

**The Contributions of Pesticides to Pest
Management in Meeting the Global Need for Food
Production by 2050**

Issue Paper 55

November 2014

Translation into Mandarin

November 2015



在满足至 2050 年全球粮食生产需求过程中 农药对病虫害治理的贡献

作者

Stephen C. Weller (Chair): 园艺和景观学系, 普渡大学西拉法叶校区, 印第安那州

Albert K. Culbreath: 植物病理学系, 佐治亚大学, 提夫顿

Leonard Gianessi: 植物保护研究院, CropLife Foundation, 华盛顿

Larry D. Godfrey: 昆虫学和线虫学系, 加利福尼亚大学戴维斯分校

审稿人

John J. Jachetta: 陶氏益农公司, 印第安那州 Zionsville

Jason K. Norsworthy: 作物、土壤和环境科学系, 阿肯色大学, 菲叶特维尔

John C. Palumbo: 昆虫学系, 亚利桑那大学, Yuma

CAST 联络人

John Madsen: 外来入侵杂草研究部, 美国农业部农业研究服务处, 加利福尼亚戴维斯

考虑到人口增长的必然性, 具有成本效益的粮食生产必须增加; 结合有效政策、适当监管和安全培训, 农药的使用将继续在粮食生产中发挥重要作用。(照片来自 happykanppy/Shutterstock)

摘要

术语 *农药*¹ 已经存在了数百年, 它描述许多不同的化学品。该术语有时也会遭到非议和误解。本文作者使用广泛的数据并提供明确的例子来证明农药在农业中的使用

- 提高了作物产量和品质,
- 减轻了病虫害治理的工作量, 且
- 改善了长期可持续粮食生产的前景。

本文简要介绍了使用农药的背景, 并深入探讨了农药受到欢迎和被广泛使用的原因。考虑到人口增长的必然性, 具有成本效益的粮食生产必须增加。智慧使用农药已带来更高效、可持续和富有成效的作物管理 (联合国 2012)。当然会有争议和挑战, 但结合有效政策、适当监管和安全培训, 农药的使用将继续在粮食生产中发挥重要作用。

特别考虑到过去的灾难性饥荒和作物管理办法, 作者围绕几个关键性概念梳理了大量的信息:

¹ 斜体字术语 (属/种名称和出版物标题除外) 在术语表中给予定义。

- 杀真菌剂的使用及其在美国及全球和世界各地的影响
- 除草剂的使用、杂草治理，以及良好的杂草治理办法所带来的更高产量
- 涉及杀虫剂使用的节肢动物治理，考虑到已出现的问题并研究当前及未来有效办法的开发
- 农药在发展和发达国家产生的效益

结合更好的病虫害治理办法，农药促进了免耕、保护性耕作、更高种植密度等改良型农艺技术的发展，带来了产量的增加以及水分和养分的高效利用。当以安全、智慧的方式施用，农药便会带来更具可持续性的农业。

作者引用了许多统计数据 and 具体例子。他们指出，现今全球有 8 亿多人食不果腹，每年因病虫害导致的作物减产可能高达 30%。但他们对全球各地竭力减少这一损失的发展动态持乐观态度。当农药被有效施用并充分融入一套综合方案时，世界将很快能够为 2050 年地球上的 90 亿人口提供给养。

引言

本文讨论了农药在农业中的影响以及农药的使用如何导致作物产量和品质的提升并减轻病虫害治理的工作量，这反过来提高了农民及其家人的生活质量，同时也改善了长期可持续粮食生产的前景。农药是一个描述各种用于治理病虫害的化学品的术语。农药组群包括杀虫剂、杀真菌剂、除草剂、灭鼠剂、杀螺剂、杀线虫剂、植物生长调节剂，以及保护植物或有效修改其生理的其他原料。合成农药自二战以来以各种形式用于治理农业病虫害。最近，农药的使用已超出了农业的范畴，被用于治理住宅和景观中的不良昆虫、病原体、杂草和动物，包括自然和规划环境（森林、水道、公园、娱乐场所等）。

农药以某种形式使用了数百年，硫化物和植物性物质早在公元前 2500-1500 年就被苏美尔人和中国人用于昆虫和疾病防治。硫、铜和有机汞在 19 世纪被用作杀真菌剂，波尔多液自 1885 年来被用于白粉病和霜霉菌的防治（Schumann 1991）。昆虫和杂草治理也发生过类似的模式，19 世纪晚期至 20 世纪早期，最初使用无机物进行治理。此后，自 20 世纪 30 年代末至今，合成和生物型农药的发展日新月异（Lamberth 等人 2013）。

然而，仅依据作物产量来量化农业生产和农药影响只是问题的一个方面。增加的产量（和产值）促进了许多间接的经济效应，因为新增作物产量的生产贯穿于经济之中，于是便产生了效益（经济价值）；这一收入为劳动者创建了进一步的产出、岗位和收入，增强了当地经济。对于美国农业，这些影响——作物保护技术带来的经济增值、技术使用产生的就业岗位、技术产生的收入，以及作物保护对贸易平衡的贡献——予以量化（CropLife America 2011）。基于收集到的 18 种大田作物、26 种蔬菜作物和 38 种水果及坚果作物的数据，对 50 个州各州的情况一一做了汇总。在该分析（基于此作物子集）中，作物保护产品的使用额外为大田作物带来了 514 亿美元的产值，为水果及坚果带来了 189 亿美元的产值，为蔬菜带来了 115 亿美元的产值，共计约 820 亿美元的新增作物产值。作物保护产品是大田作物、水果及坚果、蔬菜的关键投入，但各类产品的相对重要性及级别各不相同。对于大田作物，总产值的 36%（1413 亿美元中的 514 亿美元）归功于美国各地作物保护产品的使用，除草剂的使用具有最大影响。

尽管农药对生产和产量效率的贡献有据可查，但农药的使用从未离开过社会的关注。如前所述，农药使用对农业生产的直接影响有据可查（合理的假设）。这些影响包括提高作物产量和品质、优化保质期、限制病虫害种群扩充，以及增加收入，导致其他商业行业出现乘数效应。Cooper 和 Dobson（2007）提出，作物保护产品为社区和社会带来了几个间接影响。虽然很难量化，但这些项目是作物生产提高的逻辑延伸，包括改善营养和健康状况、提高生

活品质、食品安全、粮食安全、减少压力、改善视觉美学、保护生物多样性和减少内乱。这些因素大多并不孤立，而是相互作用，形成一个复合矩阵。

对于化学农药的私人效益和成本，一般估计效益成本比率约为 4:1 (Pimentel 1997)。尤其在促进粮食生产以养活不断增加的人口这一大背景下，上述效益显而易见。农药使用成本包括食品安全担忧、环境污染和人类健康问题（鉴于其作用模式和对其他动物的潜在影响，杀虫剂往往成为所有农药类型中的关注焦点）。然而，当施用于环境中时，杀虫剂具有许多现实和理论缺陷。与其他化学品（如石油产品、涂料、阻燃剂、人用保健品和化妆品等）一样，农药是环境中的外来制剂。

此外，迫切需要开发和标识能够安全使用、尽可能无风险的农药，并要求为所有商业用户提供施用和处理相关培训。目标是尽可能减少不必要的暴露并降低负面环境影响 (Fenner 等人 2013; Köhler 和 Triebkorn 2013)。农药评价目前基于的理念是其使用所带来的效益必须远远超过该使用所引发的任何风险。

病虫害治理的一个重要方面是越来越强调开发出的解决方案要能综合运用多种良好农艺操作手段，而非仅仅依赖于农药的使用 (Whitford 等人 2004)。有些团体想要禁止使用所有合成农药，声称它们本身就不安全而且所造成的问题多过其解决的问题。然而，参与制定农业政策的大多数团体却认为，农药能在粮食生产方面发挥关键作用，而且结合适当的监管和培训方案，农药可以安全有效地予以使用。最近的一期《科学》专刊可作为这些问题的优秀资料来源，提供了一组讨论“巧治病虫害”的优秀文章（《科学》2013）；这些文章讨论了农药使用及其影响相关问题，并探讨采用哪些技术可发现能够确保未来农药更安全的新化学品。

大多数病虫害管理人员、研究人员、教育工作者和医生均同意，病虫害必须综合治理，而农药往往在这一方案中发挥重要作用 (Lewis 等人 1997; Stokstad 2013)。病虫害综合治理 (IPM) 方案承认，并非所有杂草、昆虫和病原体都必定有害。良好的病虫害治理办法会将最佳农艺措施与最佳作物种质相结合以获得较高的产量和品质，从而保证安全和充足的食物供应。

农业面临的全球挑战包括快速增长的世界人口、许多地区食品和营养得不到保障，以及需要提高农业效率 (Rosegrant 等人 2014)。历史上，提高粮食生产和治理病虫害涉及几种策略，包括增加农业用地面积、通过选种和育种提高农作物产量和竞争力、使用有机和合成肥料、使用农药、改善土壤和水源管理，以及最近的培育转基因作物 (GMOs) (Godfray 等人 2010)。所有这些措施，唯独除了增加农业用地面积 (Smith 2013; 世界银行 2008)，如果实施得到，均可起到增加农业生产的作用。不过，没有一项在使用时未受批评。

最受争议的两项措施是合成肥料/农药和转基因作物。本文不探讨肥料或转基因作物的使用（除非它们影响了农药使用），而是讨论农药的使用如何增强并继续提高人类有效生产足够多的粮食以养活全世界的能力。由于全球性扩展当前耕地面积的范围有限 (Schreinemachers 和 Tipraqsa 2012)，全球粮食供应的任何实际增长均需加强目前土地的农业集约化经营。投入性资源、劳动力、灌溉用水的短缺，以及气候变化对作物产量的负面影响，需要补偿策略以避免产量损失，同时强调设计愈加高效、可持续的农业生产系统。农药有助于应对这些挑战，但若不以多样化的方式使用，抗药性终将导致产生其他问题。正如文中所讨论，由于发现农药的速度跟不上因抗性而丢弃农药的速度，这可能会对农药的药效以及最终对我们养活不断增长的世界人口的能力产生深远的影响。

到 2050 年，预计世界人口会增长 30%，达到 90 亿人 (联合国 2012)。主要的人口增长将发生在东亚和东南亚的发展中国家 (>2 亿 2800 万人)，而撒哈拉沙漠以南的非洲其人口增长将超过 9.1 亿人。在美国，到 2050 年人口预计增长 28% (8800 万人)。人口增长大多发生在工业化进行国，这些国家经济快速发展，拥有较高收入和日益需要更多食品选择的庞

大中产阶级人口不断发展壮大。到 2050 年，粮食生产需要从目前的水平提高 70% 才能满足养活更多人的需求，同时满足人均粮食消费量的增加。

今天，世界上有 8 亿多人食不果腹，到 2050 年，可能达到 10 亿。此外，目前有 1.3 亿儿童营养不良（FAO 2012）。营养不良群体大多位于撒哈拉沙漠以南的非洲地区，但食物不足的问题存在于世界各地。在发达国家，日均食物摄取为 3,500 千卡（kcal），而据估计，一个正常成年人至少需要 2,900 千卡/天才能精力充沛地工作。许多贫困者和营养不良者摄入低于 2,000 千卡/天，还有许多人远远低于这一水平。

由于世界上所有营养不良者中有 80% 以上生活在农村地区，在那里，务农是最常见的职业，因此，提高粮食生产的问题更加恶化。我们如何生产足够多的粮食，我们如何保证粮食平均分配以使所有人都营养良好？该问题的答案是设计更高效的农业系统，这些系统应能合理利用现有资源以确保未来系统可持续且多产（Godfray 等人 2010）。重要的一点是，世界人口会增加，人人享有合意且充足的食物供应的社会压力会越来越大。

粮食生产的增加部分可以通过增加农药的使用以治理目前减少作物产量的病虫害侵扰来实现。2007 年农药使用量为 24 亿千克（kg），美国使用了总量的 20%（Enserink 等人 2013；Hvistendahl 2013；Kupferschmidt 2013；Mascarelli 2013；Normile 2013；《科学》2013；Stokstad 2013）。目前，农药使用最高的是“发达”国家，包括美国、欧洲国家、中国、巴西、澳大利亚、日本和加拿大。在这些国家中，几乎 100% 的作物农田每年都用除草剂治理（杂草是世界上最普遍的病虫害），而杀虫剂和杀真菌剂主要用于高价值作物。（中国、巴西和美国分别位居年度农药销售量的 1-3 名。）在发达国家，通过谨慎使用农药，在减少因病虫害造成的作物损失方面已取得长足的进展。不过，发达国家的这种使用正在增加，而且随着物种入侵、具有突破抗性适应性的病原体出现、气候变化以及旨在解决之前顽固性病虫害问题的新化学品的开发，这种使用可能还会进一步增加。

发达国家，如美国、巴西、加拿大和澳大利亚，通过出口为养活世界发挥了重要作用。虽然有机生产系统偶尔会生产出与小块集约经营土地上的生产性农业类似的产量（Pimentel 等人 2005），但农药对于维持这些国家的作物高产仍然必不可少，从而对于维持其继续出口粮食养活不断增长的世界人口这一能力至关重要。但另一个问题是，发达世界国家必须保护目前可用的除草剂，因为只有极少的作用模式在酝酿之中（《科学》2013）。随着全球粮食需求的增长，作物价格也可能会上涨，这将使新增农药施用方式的使用在发达国家变得经济实惠。不过，要想满足未来的全球粮食需求，发展中国家也必须提高其农业产量；由于新型农药的引进步伐已经放缓，因此设计出能确保其继续有效的系统便显得极为重要。

尤其在“发展中”世界国家，另一个日益普遍的严重问题是，人们从农村地区大规模地涌向城市，这给现有的、日益减少的农村人口施加了更大的压力，他们必须生产足够多的粮食来养活一个饥饿的世界。目前，印度、巴基斯坦、孟加拉国和撒哈拉沙漠以南的非洲国家等发展中国家的农药使用率较低。这些国家有巨大的潜力提高作物产量，日益增加的农药使用有助于实现这一潜力。发展中国家的农药市场正在迅速增长，因为农民们种植更多的粮食以满足需求并降低其生产成本。

要想获得更大的粮食产量，一个解决办法是通过使用现有的和新开发的可持续技术来提高生产效率（Godfray 等人 2010）。提高作物生产力涉及到多个因素，但提高产量往往导致农作物的竞争力较小。选种和育种，其中可能包括转基因作物，必须作为一个基本需要加以强调，不仅可以实现高产还能提高对抗病虫害的竞争力，其次是要高效利用有机和合成肥料及农药，以及改善土壤和水源管理。这些进展都有助于提高人类劳动和现有投入的效率。

审查现有数据显示，每年因病虫害造成的作物生产损失和劳动效率低下程度因信息来源

而异,但就全球范围来看,产量损失可能高达30%,收获作物储存时的额外损失高达20-50%。国际粮食政策研究所(IFPRI)近期估计,仅仅通过增加使用杀真菌剂,全球小麦供应量便可增长10%,而增加使用杀虫剂和除草剂可分别使世界小麦产量再增长6-7%和7%(Rosegrant等人2014)。IFPRI估计,通过使用农药,即除草剂、杀虫剂和杀真菌剂,玉米产量分别会增长12%、9%和7%。IFPRI估计,通过使用农药,即杀虫剂、除草剂和杀真菌剂,水稻产量分别会增长7%、8%和9%。

健全的监管是正在积极落实的另一个问题。健全的监管必须能满足实际需要以确保当新型化学品被研发出来并上市销售时,它们经过了安全性和有效性的彻底评估(Lamberth等人2013)。这需要化学品的生产企业和政府共同实施。监管必须确保只研发可以安全使用的农药——政府机构有严格的程序,所以新型农药的环境足迹极其细微甚至没有,可按标签安全使用,且不会对健康造成长期的负面影响。

还必须落实教育培训方案,要求施用者和处理者学习如何正确使用和处理农药,持证上岗。此外,这些方案还必须确保,随着科学技术不断发展进步以及当出现产品安全问题时,应及时对贴有标签的农药进行重新评价。此类监管对所有新型和现有农药都很重要。对于已经过时和安全性较低、但由于价格低廉往往仍在发展中国家销售和使用的农药,人们的担忧是正常的。这种情况必须加以解决,因为发展中国家将作为粮食供应国在养活不断增长的世界人口这一任务中发挥越来越重要的作用;必须确保,当使用农药时,使用方法是安全的,且农药使用的负面影响轻微细小。

本文探讨了农药如何惠益农业。以下章节详细阐述了过去和未来植物病害在作物生产系统中的重要性,并说明了昆虫和杂草治理如何助力合理的病虫害治理,以实现养活目前和2050年世界人口所必需的优质食品高产目标。

关于农药使用的大致情况

20世纪50年代和60年代引入合成化学活性成分后,农药的使用(除草剂、杀虫剂、杀真菌剂)在发达国家——尤其是美国、欧洲、日本、澳大利亚和加拿大——快速增长。由于相比以前使用的无机产品(如石灰硫磺、铜、砷)治理效果更好,新型杀真菌剂和杀虫剂大大提高了水果和蔬菜产量。在大田小田人工除草和耕作出现严重的劳动力短缺的情况下,除草剂的广泛使用使得杂草治理成为可能。

有效化学农药的广泛采用促进了其他增产措施的采纳,例如:种植比杂草竞争力弱的矮株品种,培育对病原体和昆虫抗性较低的高产作物品种。除草剂的使用使得保护性耕作成为可能,从而大大提高了干旱地区的土壤贮水量。重要的是,较高的单产能够在不增加农田的情况下提高作物总产量。其实,美国的农田面积自20世纪80年代后期逐渐减少(USDA 2014)。

在美国,经研究发现,随着农药使用的推广,作物损失在20世纪50年代早期以大约15%的比率稳步下降,在20世纪60年代中期达到11%,20世纪70年代中期为6%,自1979年起稳定在3%左右(Chambers和Lichtenberg 1994)。

植物病害防治史

就本文而言,作者并未区分传统生产中使用的病害治理合成化学品与被认可用于有机生产中的自然生成或生物生成的化学品。合成和自然生成的农药均可用于传统农业,而只有非合成产品可用于有机生产。传统和有机农业均使用通过传统育种技术获得的抗病品种。有效的病害防治剂对于两种生产类型中的许多作物都必不可少。使用杀真菌剂是因为它们可以有效防治作物病害而且相比不施用的植物能大幅增加产量。以下讨论探讨了杀真菌剂的使用历

史以及由于提供的病害防止而不仅仅由于其施用，杀真菌剂或其他农药带来的好处，如提高产量、品质和/或盈利性（Edwards-Jones 2008）。

由一种或多种真菌、细菌、病毒、类病毒体或线虫引起的植物病害是限制作物产量和利润的主要因素。根据作物以及作物生长的农业、经济和社会状况，植物病害造成的直接损失可能包括产量和品质下降，由于销售产量直接减少且作物生产成本增加，从而导致作物的盈利性下降（Main 1977）。植物病害引起的损失风险在收获季节并未消失。许多作物——尤其是水果、浆果和蔬菜作物——特别容易感染采后病害，不断影响到种植者和当地社区，还会影响到参与批零销售商业活动的各个实体以及消费者（Main 1977）。植物病害的影响小则仅仅带来不便，大则会导致地区、大洲乃至全球范围个别农田中的某种作物全部损失。

历史上，植物病害曾导致灾难性饥荒以及随之而来的饥饿，如 19 世纪 40 年代发生在爱尔兰的饥荒（Carefoot 和 Sprott 1967；Large 1940）和 20 世纪 40 年代发生在印度孟加拉地区的饥荒。植物病害也曾导致整个地区经济崩溃，如 19 世纪 70 年代的锡兰（Carefoot 和 Sprott 1967；Large 1940），美国东部森林中的优势数种美洲栗树和北美主要景观树美洲榆树几乎灭绝（Carefoot 和 Sprott 1967）。除了损害作物外，一些植物病原菌还会产生真菌毒素，能够导致人类和其他动物出现急性或慢性健康问题（Gnonlonfin 等人 2013）。在某些情况下，如花生或玉米受到黄曲霉毒素污染（Gnonlonfin 等人 2013）或小杂粮受到脱氧雪腐镰孢烯醇（呕吐毒素）污染（Willyerd 等人 2012），即使产量损失微乎其微，真菌毒素也会引发问题。

必要的病害治理

对于大多数作物而言，要想预防损失，必须开展某种类型的病害治理。植物病害治理类别一般包括（1）耕作措施，通过干预接种过程或避开病原体来减少病原体的接种量；（2）使用抗一种或多种病原体的栽培品种；（3）操纵作物系统的物理环境或生物群系来抑制病原体种群或疾病的发展；及（4）使用化学品来杀死病原体、预防病原体感染、减缓疾病发展或引起植物的抗性反应。在许多情况下，并非仅仅使用某个单一的方法就够了，往往需要一套综合方案，将耕作、遗传、生物和化学方法结合起来共同治理一种或多种作物疾病（Cahoon 等人 1999）。某个地区或某种植物新出现的病原体所导致的病害尤其具有破坏力。未必能找到对新病原体具有抗性的改良品种，能够有效治理该病害的实践知识可能并不存在。因此，阻止病原体和载体进入某个地区对许多作物的生产至关重要。防止病原体引入非感染地区可能涉及卫生措施，包括使用驱除害虫设备来防止土壤或作物残茬上的病原体迁移、使用无病原体的种子或植物繁殖部位，或实施地区或国际检疫。

Fry（1977）指出，只有当现有的其他治理方法被证明不足之后，用化学品进行植物病害治理才变得至关重要；不过，由于许多病原体的繁殖速度是爆发式的而且各种病原体种群之间会发生遗传变异，因此非化学方法不足是常有之事。其他方法未必可用，且所有方法都有局限性。通过减少初始接种，作物轮作或耕耘等耕作方法可能是病害治理方案的重要组成部分。不过，它们往往不能完全消除病原体种群，而只能延迟或抑制流行病。在初始接种过高的情况下（往往由于恶劣的天气/环境条件所导致），仅仅采用耕作方法可能并不足以防止损失。

此外，某项措施在抑制或控制一种疾病时可能会不经意地恶化其他疾病的疫情。玉米的保护性耕作可能会降低某种茎腐病的严重程度（Cahoon 等人 1999），但它也可能会增加玉米灰斑病菌（灰斑病）和靠玉米碎屑生存的其他病原体的接种量（Paul 和 Munkvold 2004）。同样，在美国东南部，四月份种植花生相比五月中旬或更晚种植，分别减少了 *Cercospora arachidicola* 和 *Cercosporidium personatum* 导致的早期和晚期叶斑病所带来的损害风险，但提前种植增加了番茄斑萎病（番茄斑萎病毒）和茎腐病（白绢病菌）所带来的损害风险

(Kemerait 等人 2012)。病害治理的耕作办法必须在疫情发展之前实施，并提供几个选择方案以防疫情发展。在这种情况下，需要其他方法以应对生长季晚期发展的疫情。

抗植物病害的栽培品种通常使用方便、价格低廉而且对种植者和环境都安全。不过，改良抗性品种需要育种计划才能培育出来，通常在作物主要种植区培育，但在发展中国家或生产水平较高的发达国家未必可行。通过培育方式研发栽培品种往往需要很长时间，尤其当栽培品种需要对某种新病原体或某个新病原体菌株产生抗性时，更是如此。现有的抗性可能并不完整、强度不够高，或并不稳定，所以需要采取其他治理措施，尤其是在有利于疾病发展的环境下，更需如此。病原体可能会克服现有的抗性基因，尤其当抗性由单个基因赋予。往往需要多种病原体和病虫害抗性，但却难以获得，一个栽培品种往往不可能具备抵抗所有重要病原体的抗性。与耕作办法一样，抗性品种也不能对疾病疫情做出季内响应。

将病原体拒之门外

阻止病原体进入它们尚未立足的地区是杜绝问题的最佳方法。然而，各国之间、各洲之间的农产品或牲畜的全球贸易和流通不断增加让将病原体拒之门外的措施变得更加复杂 (Savary 等人 2011)。热带风暴发生的频率和强度增加也可能会增加新的病原体或载体长途跋涉进入新地区的机会 (Savary 等人 2011)。故意将某种病原体引入一个新地区也构成了潜在威胁。需要对新病原体或流行病原体新菌株的引入做出快速反应，通常的做法是销毁受感作物或进行治疗以防止损失以及后续的蔓延和存活。

在过去的一个世纪里，已经研发出许多治理植物病害的杀真菌剂和其他化学品，如杀细菌剂和杀线虫剂，当其他可用选项不足以应对时，它们为病害治理提供了新的选项。这极为重要，因为 19 世纪至 20 世纪初，植物病原体导致的作物损失在美国是十分常见的。在 19 世纪 40 年代，美国东北部各州 20-90% 的马铃薯因晚疫病而腐烂；在 19 世纪 50 年代，据报道，格鲁吉亚州 50-75% 的桃子典型地被褐腐病摧毁；在 20 世纪 90 年代，美国大西洋沿岸各州的大多数芦笋地锈菌彻底摧毁 (Smith 1905; White 1852)。真菌以及以前被视为真菌的卵菌是最普遍的植物病原体，所以杀真菌剂将作为本次讨论大部分内容的重点。

防护性无机杀真菌剂

直到 20 世纪 30 年代中期，防治真菌和细菌引起的植物病害所能使用的化学品仍主要限于无机原料，如硫（还用作杀虫剂）、铜和汞 (McCallan 1967; Schumann 和 D'Arcy 2012)。喷洒杀真菌剂来杀灭植物真菌病原体的做法正式起源于 19 世纪的法国。首个杀真菌剂——硫，被发现能完全抑制白粉病，19 世纪 50 年代这种病害曾使法国葡萄酒产量降低了 75%。

Pierre-Marie-Alexis Millardet 发现喷洒过某种混合液的葡萄藤染霜霉病的情况比附近未喷洒的葡萄藤轻，于是，1885 年研发出了由硫酸铜和石灰混合的波尔多液 (Large 1940)。在常规使用波尔多液之前的几年里，霜霉菌使得法国酿酒葡萄产量降低了 50% (Schumann 1991)。曾在美国对波尔多液和硫剂进行测试，结果证明它们对病害治理有效，于是被广泛采用，最终导致作物损失大幅下降。佛蒙特大学用波尔多液做了二十年的试验 (1890-1910)，由于对晚疫病的防治，导致马铃薯的平均产量增加了 64% (Jones, Giddings 和 Lutman 1912)。波尔多液使蔓越莓腐烂减少了 50%；对格鲁吉亚桃子喷施硫剂将褐腐病的损失降至 13%。

水果和蔬菜作物在不同地区和许多国家广泛生产逐渐依赖于杀真菌剂的常规使用。20 世纪初，人们认为，如果不使用硫剂，白粉病能够彻底摧毁加利福尼亚州的葡萄作物 (Bioletti 1907)。从 20 世纪初开始，大多数美国水果和蔬菜作物农田常规喷洒杀真菌剂（硫剂、石硫合剂、铜剂或波尔多液）以防治一种或多种植物病害。到 20 世纪 20 年代，喷洒石硫合剂防

治疮痂病成为美国苹果园的普遍做法，若无杀真菌喷剂，便无法种出供应鲜果市场的苹果。在德国，从 19 世纪 40 年代一直到 1900 年，马铃薯晚疫病在许多地区爆发，造成的生产损失达 29-77% (Kolbe 1982)。使用波尔多液防治晚疫病的首次喷洒试验发生在 1886 年。德国的长期试验 (40 年) 显示，不喷洒杀真菌剂的农田平均产量损失为 20% (Kolbe 1982)。在晚疫病严重的年份，未喷洒杀真菌剂的马铃薯损失高达 63%。晚疫病病菌于 1845 年抵达爱尔兰，摧毁了 40% 的马铃薯作物。1846 年，病菌摧毁了全部 (100%) 作物，超过 150 万人饿死，相近数量的人搬到美国。今天，这种真菌依然存在于爱尔兰，如果没有杀真菌剂，马铃薯的种植将异常艰难 (Cooke 1992)。2011 年，捷克共和国未喷洒杀真菌剂的马铃薯完全被摧毁 (Hansen 等人 2011)，而对于晚疫病生物体而言，这是一个好年辰。

硫酸铜能有效对抗许多真菌、细菌和卵菌，但它可能具有植物毒性。不过，石灰降低了硫酸铜的植物毒性影响 (Schumann 和 D'Arcy 2012)，这种混合剂到现在仍然常用。无机杀菌剂需要大剂量 (往往每公顷施用量超过 10 千克农药活性成分) 频繁施用 (McCallan 1967)，而且通常只有预防作用，不能提供持续治理 (McCallan 1967)；许多无机杀菌剂，如硫酸铜，具有植物毒性 (McCallan 1967)。1910 年以后，有机汞化合物被用作种子处理剂，保护种子免受种子腐烂病原体侵害和保护种苗免受猝倒病原体侵害 (McCallan 1967)。虽然有效，但由于汞在食物链中的持久性和生物蓄积性，它们会带来重大的环境风险。

20 世纪 30 年代中期研发的二硫代氨基甲酸盐和醌类杀真菌剂相比无机杀真菌剂而言对许多病害更加有效，而且所需的活性成分更少 (McCallan 1967; Morton 和 Staub 2008)。此外，由于它们能被阳光和微生物降解，所有不太可能蓄积 (Schumann and 和 D'Arcy 2012)。与无机杀真菌剂一样，这类杀真菌剂大多只有防护效果，必须在感染发生之前施用。

合成化学杀真菌剂

合成化学杀真菌剂的研究始于 20 世纪 40 年代，结果证明，由于改善了病害防治效果和/或减少了作物损害，作物产量得以提高。苹果、马铃薯，以及到 20 世纪 50 年代后期，大多数其他作物的种植者很快从老旧杀真菌剂转换成新型合成杀真菌剂。

研究人员发现，喷洒福美铁 (ferbam) 的苹果树比喷洒标准石硫剂的苹果树产量高 41%。产量增加大部分是因为相比石硫喷剂而言，福美铁有助于减少树木损害。当种植者于 20 世纪 40 年代末至 50 年代初转而使用合成杀真菌剂，由于植物毒性降低，美国苹果产量大幅增加。用代森锌 (zineb) 和 (nabam) 做实验，结果发现马铃薯的产量比用波尔多液时增加了 23-35%。但美国种植者于 20 世纪 40 年代末至 50 年代初转而使用合成杀真菌剂，马铃薯产量大幅增加。对于某些病害，合成化学品提供了前所未有的有效防治。就苹果来说，在福美铁引入之前，并无有效的喷剂原料能够防治黑腐病，25-50% 的水果损失在东南部十分常见。福美铁将黑腐病的发病率降至 1% (Brown 和 Britton 1986; Muncie 和 Morofsky 1947; Palmiter 1949)。

在 1950 年向国会提交的一份报告中，美国植物病理学会报告，如果不使用化学品来防治病害，许多水果和蔬菜作物无法以可靠的产量生产 (APS 1950)。

定期对杀真菌剂进行测试，以检测其防治效果和对作物产量的影响。40 多年来，在密歇根州立大学开展的实验中，未经处理的苹果树疮痂病的年发病率持续高达 98-100% (Jones 1995)。近期的一些检测结果包括以下内容：(1) 因有效防治锈病，大蒜产量翻了一番；(2) 因有效防治蔓枯病，西瓜产量增长了 61%；(3) 杀真菌剂将柑橘疮痂病的发病率从 44% 降低到 0.4%；(4) 杀真菌剂将芦笋因紫斑病导致的损失减少了 99%；(5) 杀真菌剂将樱桃树因叶斑病导致的落叶从 80% 减少到 0.3%；及 (6) 用杀真菌剂防治稻瘟病使水稻产量增加了 45%。此外，用杀真菌剂防治疫霉菌使甜椒产量增加了 28,000 千克/公顷 (ha)。

直到 20 世纪 60 年代中期，杀真菌剂在欧洲也只是偶尔用于小麦作物。不过，在 20 世纪 60 年代，越来越多的证据显示，小麦病害造成的损失比原先公认的多（Lawrence 和 Appel 1997）。自 20 世纪 90 年代以来，英国、法国、德国、丹麦、比利时和荷兰 95% 以上面积的小麦地用杀真菌剂治理过（Jørgensen 等人 2008）。治理得到的平均成果通常介于 0.5 公吨/ha 至 2.5 公吨/ha 之间。

20 世纪 60 年代至 70 年代期间，几种新型杀真菌剂化学品，如酞菁（phthalonitriles）、酰替苯胺（carboxanilides）和苯并咪唑（benzamidazoles），以及甾醇抑制剂、吗啉、酰苯胺，球果伞素和甲酰胺杀真菌剂被研发出来（McCallan 1967；Morton 和 Staub 2008）。甾醇抑制剂类中的三唑杀真菌剂和甲氧基丙烯酸酯类杀真菌剂是杀真菌剂数量和使用频率最高的农用杀真菌剂组群（Morton 和 Staub 2008）。20 世纪 60 年代末以来研发的许多杀真菌剂都能被植物吸收，对植物无毒，而且至少具有一定的内吸作用，从而提高其药效持久性并能保护非直接喷施的植物部位（Schumann 和 D’Arcy 2012）。许多现代杀真菌剂还具有某种程度的治疗效果，能够消除杀真菌剂喷施之前已经发生的一些感染。最新的杀真菌剂大多比早期开发材料的作用模式更具针对性，从而降低了对非靶标生物的毒性（Schumann 和 D’Arcy 2012）。

不过，特定的作用模式也会带来更大的病原体抗药性风险（Schumann 和 D’Arcy 2012）。具有特定作用模式的杀真菌剂和一些较新的植物保护化学品，如通过激发宿主植物对包括真菌、卵菌、细菌和病毒在内的广泛病原体的防御机制而起作用的苯并噻二唑（Morton 和 Staub 2008），是现代植物病害防治系统中的一个重要组成部分。这些化学品不仅提供出色的病原体治理效果，从而提高作物产量以及新鲜和储存食品的质量，而且更加环保、对非靶标生物低毒甚至无毒，这让它们被世界各地争相使用。

杀真菌剂的使用对发达国家和发展中国家作物产量增加方面的影响

Gianessi 和 Reigner（2006）通过一系列作物和病害的例子，综述了杀真菌剂的使用在美国产生的效益。这份报告显示，由于使用了杀真菌剂，50 种作物，包括大田作物、蔬菜作物和乔木水果，平均产量出现 16% 至 100% 不同幅度的增加。他们估计，使用有效的杀真菌剂使美国每年的农场收入增加了近 130 亿美元。

有很多例子表明，在美国使用杀真菌剂进行病害防治久而久之取得了显著的经济效益，Gianessi 和 Reigner（2006）对此进行过汇总，其他国家的例子更多。以下是最近的一些具体实例。

Scherm 等人（2009）对 2003-2004 和 2006-2007 种植季的 71 项实验所作的元分析汇总证明杀真菌剂在治理巴西大豆的亚洲大豆锈病（*Phakopsora pachyrhizi* Syd. & P. Syd.）中起到了关键作用。在使用不同的杀真菌剂和施用方案进行的各种试验中，杀真菌剂治理得到的回应是病害平均减少 58.7%，产量平均增加 43.9%（Scherm 等人 2009）。

美国东南部目前种植的主要花生品种有很大的产量潜力而且对番茄斑萎病毒有很强的田间抗性，但大多对早期叶斑病（*Cercospora archidicola*）、晚期叶斑病（*Cercosporidium personatum*）或茎腐病/白霉（*Sclerotium rolfsii*）几乎没有抗性（Kemerait 等人 2012）。对 2012 年格鲁吉亚州蒂夫顿的四项花生杀真菌剂试验进行研究，结果显示，未使用杀真菌剂的花生产量为 1,906 kg/ha，而用叶斑病标准型杀真菌剂和叶斑病及茎腐病标准型杀真菌剂治理的花生其产量分别增加了 190% 和 212%（A. Culbreath，未公布数据）。尽管环境条件十分有利于疾病发展，但 2012 年仍然取得破纪录产量，使用杀真菌剂来防治这些病害是一个关键因素。

杀真菌剂有助于预防真菌毒素污染。小麦禾谷镰孢菌（FHB）引起的赤霉病不仅降低产量，而且病原体会产生呕吐毒素（DON），进而污染谷粒并给人类和动物食用者带来健康风

险 (Willyerd 等人 2012)。在 2007 至 2010 年对 12 个州的 37 项试验进行的研究中, Willyerd 和同事(2012)证明,在开花期对一个中等抗性品种施用戊唑醇和丙硫菌唑杀真菌剂混合物,结果对比未治理的易感品种, FHB 得到 75%的防治, DON 浓度下降了 71%, 与不施用杀真菌剂的中等抗性栽培品种或施用杀真菌剂的易感栽培品种相比,这两个变种的防治效果均较好。当单项治理办法不足以应对时,这亦可作为综合考虑多种病害防治因素以取得良好治理效果的一个极佳范例。

防治小麦茎腐病 (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici* Erikss. & Henning) 的抗性栽培品种已在全球许多地区成功种植。不过,小麦的抗锈性依赖于单一基因,这很容易被新型致命性病原体种群破坏。提供某个地区主要锈病病原体种群的抗性栽培品种并预测哪些种群可能在下个生长季流行,这些工作曾被 Schumann 和 D'Arcy (2012) 描述为“永无止境的战斗”。新型致命性病原体种群的发展可能需要新的管理工具来预防这种病害带来的损失,直到新的抗性栽培品种被研发出来,尤其是随着非洲东部小麦种植区致命种群“Ug99”的出现 (Wanyera 等人 2009)。Wanyera 和 colleagues (2009) 报告说,有几种杀真菌剂对防治这种茎锈病有效。他们报告说,相比杀真菌剂治理较好的样区,未治理的样区产量损失为 32-57% (Wanyera 等人 2009)。在克服单基因抗性的新型小麦锈病病原体种群出现或新型病原体被引入(如亚洲大豆锈病进入西半球)等情况下,杀真菌剂至少在短期内可能是治理潜在毁灭性疾病的唯一可行选项。

植物病害的治理往往与杂草、昆虫及其他病虫害的治理相互关联。杂草或其他非作物植物可作为锈病病原体的替代宿主,摧毁这些植物便减少了初始接种量或病原体的遗传变异 (Schumann 和 D'Arcy 2012)。给农作物带来麻烦的寄生植物,如菟丝子(菟丝子属)或独脚金(独脚金属) (Schumann 和 D'Arcy 2012) 既可视作杂草,也可视作病原体。因此,对于这些病虫害,杂草防治即是病害防治。昆虫和其他无脊椎动物可能携带植物病原体,且本身也能造成直接损害。昆虫损害还可能使植物感染病原体或被真菌毒素污染 (Gnonlonfin 等人 2013)。因此,植物病害的防治至少部分依赖于用适当方法对其他病虫害进行防治。

20 世纪 70 年代韩国稻瘟病的流行导致了一场重大的粮食危机。据估计,产量损失达 10-50% (Mew 等人 2004)。自 20 世纪 70 年代起,韩国稻农定期使用杀真菌剂来防治稻瘟病。目前,估计稻瘟病带来的韩国水稻产量减少仅为 0.02% (Chang 1994)。

韩国农民每年收获约 9 亿磅苹果。由于生长季节经常下雨,病害问题十分严重,大多数苹果种植者喷洒杀真菌剂 14-16 次 (Uhm 等人 2008)。如果不使用杀真菌剂,90%以上的果实可能腐烂 (Uhm 等人 2008)。

苹果黑星病是欧洲苹果种植者每季喷洒杀真菌剂 15-22 次的主要原因所在。如果没有这些喷洒作业,欧盟将会损失大约 80%的苹果产量 (Holb, Heijne 和 Jeger 2003)。

杂草防治史

人工除草和耕耘

数千年来,农民们使用其他的非化学方法进行杂草防治。历史上使用的两种主要的非化学方法是人工除草和耕作/耕耘。这两种做法至今仍是除草剂使用的主要替代方案。早期的作物生产主要依靠人类劳动来除掉田间的杂草。19 世纪,农民们被告知,认真除草的农田生产出的玉米是不付出精力的类似农田的两倍 (Hudson 1994)。勤锄草的玉米作物需要在生长季锄草四次,人工锄草时一位农民可能要耗时 12 天/公顷 (6 天/英亩) 才能锄掉杂草 (Fussel 1992)。到 1850 年,65%的美国人口居住在农场,除草是农场的一项主要任务,占生产作物所需劳动力的一个很大比例 (Cates 1917)。杂草化学治理取代了密西西比州 405,000

公顷棉花每公顷 49 小时人工劳动(Holstun 等人 1960)。估计种植者每年节省 1000 万美元。

在德国, 20 世纪 60 年代初, 重工业需要越来越多的劳动者, 农村人离开了乡村。如果不用除草剂来代替离去的劳动者, 便不太可能在该国照旧开展广泛的农业生产(Koch 1992)。在日本, 除草剂的采用时除草所需的时间量减少了 97% (Takeshita 和 Noritake 2001)。

20 世纪 60 年代之前, 韩国经济是世界上最贫穷的经济之一。20 世纪 60 年代, 韩国政府走上了工业化发展道路, 韩国经济开始起飞。城市地区蒸蒸日上的生活水平和就业机会吸引农民们背井离乡。1957 年至 1982 年, 1200 多万人从农村迁居城市。在韩国, 人工除草是数百年来流行的杂草治理方法。由于出现劳动力短缺, 建议使用除草剂, 到 1971 年, 27% 的水稻(按面积算) 喷洒除草剂(Wang 1971)。到 1977 年, 占总面积 65% 的水稻喷洒除草剂, 自 20 世纪 80 年代起, 100% 的韩国水稻喷洒除草剂(Kim 1981)。

首个小麦实验作物于 1843 年在英国洛桑实验站(Rothamsted Research Center) 的 Broadbalk 试验田播种。直到第一次世界大战前, 试验田一直采用人工除草。一战期间及战后劳动力缺乏使人工除草无法实施。1900 年至 1925 年期间产量下降 40%, 几乎可以肯定这是由于杂草竞争加剧(Moss 等人 2004)。

从 20 世纪初到 20 世纪 60 年代, 使用短柄锄是加利福尼亚州许多蔬菜作物的主要除草方法。芹菜除草耗时 111 小时/公顷, 胡萝卜耗时 69 小时/公顷, 草莓耗时 69 小时/公顷(Lange 和 Brendler 1965; Adams 1938)。不过, 收到农场劳动者的大量投诉, 他们说, 由于使用长期使用短柄锄, 他们患上了永久性的北部损伤。加州工业安全委员会(California Industrial Safety Board) 于 1975 年颁布了一项条例, 永久禁止使用短柄锄。大多数种植者转而使用除草剂, 这被证明比劳动者挥舞锄头更经济。相较于菠菜 247 美元/公顷、芹菜 198 美元/公顷、洋葱 309 美元/公顷、草莓 988 美元/公顷的人工除草成本, 除草剂加施用成本仅为 25 美元/公顷。除草剂的使用被认为将加利福尼亚州洋葱田的人工使用减少了 297 小时/公顷, 相当于每年节省了 200 万小时(Nylund, Nelson 和 Dinkel 1958)。

人工除草是有机种植者的普遍做法, 他们种田不用除草剂。在荷兰, 有机农田的人工行间除草耗时为洋葱 177 小时/公顷、胡萝卜 152 小时/公顷、马铃薯 9 小时/公顷、谷物 12 小时/公顷(Van Der Weide 等人 2008)。在欧洲, 尤其是杂草丛生的情况下, 人工为洋葱除草耗时可能高达 500 至 1,000 小时/公顷(Melandner 1998; Rasmussen 等人 2011)。2004 年, 加州立法机关禁止“不必要的”人工除草, 对田间劳动者的健康和安全表示担忧; 这项裁决不适用于该州的有机种植者(加利福尼亚州 2004)。人工除草在加州有机农场广泛使用: 生菜(123.5 小时/公顷【50 小时/英亩】)、芹菜(123.5 小时/公顷【50 小时/英亩】)、胡萝卜(185.25 小时/公顷【75 小时/英亩】)、洋葱(177.84 小时/公顷【72 小时/英亩】)、棉花(29.64 小时/公顷【12 小时/英亩】)(Bolgenholm 2004; Klonsky 1994; Klonsky 等人 1995)。有机种植者有时会因为无法雇用到人工除草所需的劳动力而颗粒无收(Wheat 2012)。

在欧洲、美国和其他许多国家, 人工除草的劳动力十分昂贵, 通常不容易获得, 也不常用于农作物(Riemens 等人 2007)。不过, 随着美国抗除草剂杂草的增加, 尤其在中南部和东南部, 人工除草成为必要(Riar 等人 2013)。在日本, 全国稻田完全使用人工除草需要 189 万人工作 60 天, 这在今天完全不切实际(Takeshita 和 Noritake 2001)。

除草剂的好处

通过将其实用性、成本、有效性和可靠性与人工除草(可怕的重复性活动工作量和损失人力资本)和耕作(土壤质量退化、水土流失加重)比较, 除草剂的好处一目了然。

实验结果表明, 如果在合适的时间进行足够的人工除草或耕作, 作物产量可以相当于使用除草剂获得的产量(Lanini 和 Strange 1994)。然而, 全世界(发达国家和发展中国家)都

存在农场劳动力短缺的情况,在世界许多地区,单独依靠人工除草往往不切实际或负担不起。耕作的可靠性可能会因天气而大打折扣,如农田太湿而导致拖拉机无法工作,这时杂草继续生长,导致产量损失。

自从发明了犁,耕耘已成为杂草治理的一项重要工具。20 世纪初,用马匹或拖拉机拉犁穿过农田以杀死杂草 (Wimer 1946)。收获后,田地光秃秃的,没有植被。耕耘需要在农田穿梭 10 趟以上 (Triplett 1976)。美国的耕耘每年移动土壤超过 226,796,185,000 公吨 (2500 亿吨)。19 世纪末至 20 世纪初的实验结果表明,耕作的唯一好处是杂草防治 (Cates 和 Cox 1912)。因此,在 20 世纪初,人们认识到,如果可以发明一种实用的替代方法来防治杂草,便可大幅减少耕作;不过,直到除草剂被研发出来,才提供了一种有效的替代方法。

20 世纪 40 年代末对为玉米种植者提供的首个除草剂 (2,4-D) 进行研究后显示,出苗前施用一次可以减少一到三次耕作,而出苗后施用一次可以减少一次或多次生长季中耕作 (Slife 等人 1950)。到 20 世纪 60 年代,发明的新机器能够通过护根覆盖物进行种植,在加上广泛使用化学除草剂来防治杂草,使得保护性耕作得到商业化推广 (Montgomery 2008)。随着更有效的除草剂研发出来,农民们继续减少种植前的耕耘,在某些情况下,甚至完全取消出苗后的耕作 (Triplett 1976)。

2009 年种植八种主要作物的美国农田约有 36% (3564 万公顷【8800 万英亩】) 实行免耕作业,自 1990 年以来增长了六倍 (Horowitz, Ebel 和 Ueda 2010)。除草剂对保护性耕作是如此重要以至于美国国家科学院得出结论认为,如果没有除草剂,广泛采用保护性耕作则不可能发生,在抗草甘膦作物的情况下尤其如此 (NRC 2000)。

有机种植者广泛使用耕耘来防治杂草。在爱荷华州,有机玉米和大豆农田在生长期需要用转锄机和耕耘机进行四至五趟除草作业 (Chase, Delate 和 Johanns 2011)。在法国,不使用除草剂的谷类作物需要耕耘六趟 (Deytieux 等人 2012)。加州有机农场广泛使用耕耘:棉花、洋葱、生菜和葡萄 (Klonsky 1994; Klonsky 等人 1995; Tourte 等人 2009; Vasquez 等人 2008)。在密歇根州,有机大豆种植者使用多达十次耕耘作业来防治杂草 (Mutch 2008)。有机种植者的经验也是一个有用的视角,因为他们不能使用合成除草剂。不使用除草剂进行杂草防治的问题经常被视为有机种植者所面临的最大问题,也是制约有机生产扩张的一个最重要的因素 (Rasmussen 和 Ascard 1995)。

耕耘设备,如转锄机,在杂草很小的时候最为有效,随着杂草的发展其效力逐渐下降 (Melander 等人 2013)。研究表明,由于频繁的降雨使土壤太湿而不能使用机械除草,耕耘除草的办法往往并不可靠 (Eyre 等人 2011)。其后果是杂草长得太大,无法使用任何类型的耕作方法来治理。威斯康辛大学的研究人员发现,每 100 例实验中有 34 例出现耕耘方面的杂草防治问题,导致杂草防治效果降低,平均产量损失达 26% (Posner, Baldock 和 Hedtcke 2008)。

美国农业部 (USDA) 估计,20 世纪 50 年代由于大豆杂草而导致的国家每年平均损失为 17%。造成损失的一个主要原因是没有及时使用转锄机来除草 (USDA-ARS 1965)。由于杂草会争抢阳光、空间、营养和水分,所以农田必须除草;它们还会污染和降低供应给新鲜和加工市场的蔬菜的品质,而这对于新鲜叶菜尤为重要。除草剂是用于减少农田杂草种群的化学产品。除草剂是一项相对较新的技术,于 20 世纪 50 至 60 年代首次在美国、欧洲国家和日本广泛采用,接着在其他许多国家——如澳大利亚、加拿大和巴西——广泛采用。许多发展中国家,如印度和中国也快速采用除草剂。

农民们使用除草剂获得的主要好处有:杂草防治成本较低、杂草防治效果较好、杂草防治更稳定,这通常导致作物产量高于其他杂草防治方法,而生产成本低于其他杂草防治方法。

通过对不使用除草剂估计将会发生什么这类研究进行审查,可以获得有关除草剂好处的另一个视角。这些研究一致估计,由于人工除草和耕作的数量和时间不足以提供与除草剂等

同的除草效果，世界各地的作物产量将会下降。

历史记录清楚地表明，通过取代效果不佳的先前做法，除草剂的采用带来了更大的作物产量。此外，还有几种作物之前从未实施过杂草防治，而除草剂首次为其提供了有效的杂草防治，从而导致产量增长。除草剂使得非农业工作工资上涨、数百万劳动者离开农业的国家继续农业生产成为可能。除草剂促进了其他农艺措施的采用——施肥和种植矮株品种——带来了更高的作物产量。

合成除草剂

第二次世界大战后，随着合成苗长素除草剂的引入，开创了合成除草剂的新纪元。从那时起到现在，可供农业使用的除草剂的数量和类型都有很大扩充。如今，有在杂草出苗前施用的除草剂（土壤活性），有在杂草出苗后施用的除草剂（叶面活性/出苗后），也有对施用土壤和叶面都具有活性的除草剂。

现有的除草剂属于许多不同的化学家族，目前包括大约 63 个不同的家族，而全球大约有 220 种具体的除草剂（HRAC 2014）。市面上有广谱除草剂，杀死阔叶、禾草和莎草的阔叶型、禾草型除草剂，以及施用后达到植物各部位的内吸型除草剂或只杀死所接触的植物组织的非内吸型除草剂。市面上还有针对某种作物的选择性除草剂，或可以用于某种作物、但通过产品或具体施用技术的物理配置来实现选择性的非选择性除草剂。此外，现在还有通过基因改造对施用除草剂产生抗性的作物；最大的例子是抗草甘膦转基因作物。在这种情况下，广谱适用但选择有限的除草剂可施用于出苗的抗性作物，如玉米或棉花，且不会给作物造成损害（Monaco, Weller 和 Ashton 2002）。

1949 年，美国 931 万公顷（2300 万英亩）农田使用了除草剂；1952 年，达 1214 万公顷（3000 万英亩）；1959 年，达 2145 万公顷（5300 万英亩）；1962 年，达 2873 万公顷（7100 万英亩）；1965 年，达 4856 万公顷（1.2 亿英亩）；到 1975 年，超过 8094 万公顷（2 亿英亩）。在美国，自 20 世纪 70 年代中期起 90% 以上面积的蔬菜和大田作物（8903 万公顷【2.2 亿英亩】）使用过除草剂（Osteen 和 Fernandez-Cornejo 2013）。近年来，由于有种植矮乔木的趋势，许多果园作物的除草剂使用增加。

通常，一块地需要施用两到三次除草剂：种植前烧光处理、种植期出苗前处理、生长期出苗后处理。残留的除草剂在土壤中保持活性，药效会延续一段时间（两至三个月），当杂草发芽并开始生长或出苗后不久便将其杀死，从而有效治理许多破土而出的杂草物种。除草剂防治杂草具有选择性，针对许多具体的作物和许多土壤及气候条件。

除草剂在欧洲的使用模式与美国类似，所有国家 90% 以上的大田、蔬菜和木本作物每年使用除草剂。最近对欧洲 11 个地区玉米种植者的一项调查显示，90% 以上的农田使用除草剂，每年施用一至两次（Meissle 等人 2010）。英国近期的调查显示，97% 的大田作物、92% 的蔬菜、70% 的果园和 77% 的无核小果（按面积算）使用除草剂（FERA 2014）。

除草剂的采用受到降低杂草防治成本的欲望所驱使，因为二战后劳动力变得稀缺且愈加昂贵。20 世纪 40 年代末至 50 年代初，当农场劳动者从农村涌向城市，农业劳动力大量外流。南部几个州十年内农场劳动者净流出达 20 万至 30 万人（Mayo 1965）。1940 年，美国的农业人口为 3000 万；到 1985 年，降至 300 万以内。

近年来，由于其有利于环境和作物生产的可持续性，除草剂得到推广。通过取代耕作，除草剂的使用导致燃油使用量降低、碳排放减少、土壤侵蚀减少、用水量减少、锄头及其他农具带来的损伤减少（Harman 等人 1998）。

撒哈拉以南非洲地区的小农户除草剂使用水平较低（~5%）（Mavudzi 等人 2001；Overfield 等人 2001）。目前正在向这些农民宣传使用除草剂这一方式以显著提高作物产量并降低生产

成本，因为人工除草已变得稀缺且昂贵。

除草剂和杂草对作物产量的影响

尽管 20 世纪初已采用耕作和人工除草，但每年因杂草导致的作物损失依旧巨大（Cates 1917）。1932 年伊利诺斯州的一项研究报告估计，10% 的农田在一个“正常年份”因杂草导致的作物损失达 50% 或以上（Case 和 Mosher 1932）。大量肥沃的小麦地因田旋花的侵扰几乎完全荒置。使用 2,4-D 后一到两年内，这些田地重新投入小麦生产（Freed 1980）。

在河底，土壤往往过湿而不能及时耕耘，由于杂草丛生玉米作物往往有所损失。在某些地区，由于杂草问题农民们停止种植玉米（Raleigh 和 Berggren 1964）。1947 年的一项报告指出，由于喷洒了 2,4-D，肯塔基州的 7,200 公顷（18,000 英亩）河滩地增产了 25,401 公吨（100 万蒲式耳）玉米（Hanson 1947）。1947 年内布拉斯加州超过 2 万公顷（5 万英亩）的玉米喷洒这种除草剂，产量增长了 11-49%（Hanson 1947）。

就大多数作物而言，历史数据表明，除草剂的使用导致产量增加。曾做过大量实验，将使用除草剂获得的产量与采用标准做法获得的产量进行对比。黄瓜产量增长了 24%，干菜豆增长了 38%，高粱增长了 34%，桃子增长了 167%，马铃薯增长了 29%，水稻增长了 160%（Burnside 和 Wicks 1964；Comes, Timmons 和 Weldon 1962；Daniell 和 Hardcastle 1972；Glaze 1975；Mueller 和 Oelke 1965；Nelson 和 Giles 1989）。一项为期四年的研究表明，当使用 2,4-D 时，小麦产量增加了 255 千克/公顷（Alley 1981）。明尼苏达大学和伊利诺伊大学对 1961-1975 年数据进行分析表明，使用除草剂后玉米产量增加了 15%，而使用除草剂后大豆产量增加了 19%（Dexter 1982）。

在英国，对谷物施用 MCPA（2-甲基-4 氯苯氧乙酸）被认为导致产量提高约 20%（Lever 1991）。除草剂被认为是加拿大小麦产量翻番的主要因素（Freyman 等人 1981）。在澳大利亚，研究表明，使用除草剂代替耕耘导致土壤剖面多蓄积 27 毫米水，粮食产量增长 15-25%（Wylie 2008）。

20 世纪 50 年代至 70 年代，全国作物产量的总体变化受多个因素影响，包括使用除草剂、增加施肥和灌溉、植物杂交新品种，以及进入合成杀真菌剂和杀虫剂。就玉米和大豆而言，研究人员已从统计学上确定了除草剂对产量提高所作的贡献。1964 年至 1979 年，除草剂对玉米产量增加的影响占 20%，1965 年至 1979 年，除草剂对大豆产量增加的影响占 62%（Schroder, Headley 和 Finley 1981, 1984）。

尽管尚未进行统计学研究，但已经观察到其他作物的产量增加与除草剂使用增加之间也存在类似的密切关系。除草剂的使用被视为花生产量翻番的一个主要因素（Grichar 和 Colburn 1993）。用除草剂进行更好的杂草防治被视为水稻产量增加的一个重要因素（Smith, Flinchum 和 Seaman 1977）。

历史记录清楚地表明，只有在引入有效的除草剂后，几种作物的产量才显著提高。自从 20 世纪 80 年代引入有效的除草剂，缅因州的蓝莓产量翻了三倍以上（Yarborough 和 Ismail 1985；Yarborough 等人 1986）。20 世纪 70 年代初，三种主要除草剂（敌草腈、达草灭和草甘膦）的引入被视为 1960 年至 1978 年蔓越莓产量翻番最为重要的因素，而另一种除草剂（草甘膦）的登记被认为导致 20 世纪 80 年代蔓越莓产量增长 50%（Dana 1989；Eck 1990）。20 世纪 50 年代引入除草剂后，路易斯安那州的甘蔗产量显著增加。

替代性杂草防治方法

过去 20 年里对替代性杂草防治方法进行了大量的研究。这些研究的主要结论是：替代

办法取得的杂草防治水平不及除草剂的预期防治程度和连贯性 (Lutman 2013)。近期对英国非化学杂草防治方法的一项审查确定了所取得的平均减少比例: 犁耕(67%)、延迟播种(37%)、提高播种率(30%)、竞争品种(27%)、春作(80%)和休耕(70%) (Moss 2010)。在英国的除草剂标签上, 对杂草给出了“易感”(对禾本杂草而言, 95%)、“中度易感”(75–80%)、“中度抗性”(60–75%)和“抗性”(<60%) 评级 (Moss 2010)。如果按除草剂的相同标准来评价非化学方法, 禾本杂草将被描述为对大多数非化学方法具有“抗性”(Lutman 2013)。

与相对简单的除草剂施用相比, 采用非化学方法不仅防治效果更差、变数更多, 而且管理要复杂得多 (Lutman 2013)。非化学防治措施的成本, 无论是直接的经济成本还是管理时间方面的成本, 也往往高于除草剂施用成本 (Lutman 2013)。

密苏里大学农村社会学家研究了农民停止玉米行间耕作的原因。耕耘大面积的作物农田需要持续数周不停工作。农民们批评耕作太费时间、耽误了其他要做的工作、效率低下。还会导致土壤板结、增加水土流失, 他们再也不愿回到这项工作上 (Rikoon, Vickers 和 Constance 1993)。

由于除草剂, 农艺措施成为可能

使用除草剂防治杂草为几项重大农艺措施的采用提供了便利, 对作物生产的各个阶段具有重大影响。

20 世纪 50 年代以前, 延迟播种是防治春播作物杂草最有效的方法。不可能做到今天常见的早播, 因为杂草会击败作物。杂草出苗后的春耕虽然在作物种植前除掉杂草, 但将种植时间推迟了近三周。我们现在实行的早播反映出以下两点: 可以获得更耐寒的杂交种、除草剂的使用让春耕需求减少成为可能 (USDA-ERS 1963; Warren 1998)。在美国中西部, 玉米种植如今比 20 世纪 70 年代末提前了两周 (Kucharik 2006), 在美国中南部, 过去 30 年来 50% 的玉米种植日期提前了一个月左右 (从五月初提前至四月初) (Kucharik 2006)。如若没有除草剂, 玉米种植日期将不得被推迟, 以便机械摧毁第一批萌发的杂草种群。这将导致在中西部玉米生产中淘汰使用高产、全季杂交品种, 转而使用生长期较短、产量较低的品种。等杂草出苗后进行耕作, 延期种植使得早期萌芽的杂草通过种植前耕耘得到治理; 然而, 爱荷华州玉米种植从 5 月 1 日延迟至 5 月 20 日导致平均产量损失 8%。

传统上, 玉米种植留有足够的行间距, 以便对每株作物的四面全部进行耕耘 (Pike, McGlamery 和 Knake 1991)。如今, 由于耕作需求减少, 许多作物使用较密的行间距。当以较高植株密度种植时, 高产杂交品种的引入导致株间距和行间距均缩小。虽然耕作能在行与行之间出色完成除草任务, 但在行内部无法使用; 有效的除草剂能防治行内部与行与行之间的杂草 (Warren 1998)。玉米的平均播种率从 20 世纪 30 年代的每公顷 30,000 株增加到 20 世纪 50 年代的 38,000 株和 20 世纪 70 年代的 46,000 株, 今天通常为每公顷 80,000 株 (Cardwell 1982; Duvick 2005); 行间距从 20 世纪 50 年代的 102 厘米 (cm) 缩小到 20 世纪 70 年代末的 90cm。

德克萨斯州高地平原的农民种植高粱也出现类似的趋势, 行间距从 100 cm 缩小到 25 cm (从 40 英寸降至 10 英寸) 导致灌溉地的产量增加了 1,088 千克/公顷 (986 磅/英亩), 这也是由于除草剂的使用和有效的杂草防治。每公顷采用更密集的行间距和更高等的植物种群也是花生、大豆和蔬菜作物的常见做法, 引入除草剂后, 作物产量增加: 食荚菜豆 (45%)、甜玉米 (50%)、胡萝卜 (22-33%)、西兰花 (65%) (Mack 1969)。

更密的植物间距还提高了养分吸收和利用效率。实验表明, 有效的杂草治理对氮肥的吸收至关重要 (Vengris, Colby 和 Drake 1955)。在杂草环境下生长的玉米吸收的氮仅是无杂草条件下玉米吸收量的 58%。杂草幼苗对现成的 (肥料) 氮的吸收比作物幼苗快。在布满处于

营养生长期稗草的稻田，传统的做法是推迟施用氮肥，直到杂草进入抽穗期，因为杂草会耗掉大部分的氮（Ennis 等人 1963）。这种延迟并不可取，容易错过水稻作物需要氮肥的最佳时机。使用除草剂除掉稗草，就能及时施氮肥以获得最佳产量（Ennis 等人 1963）。

大约自 1900 年以来，各州和联邦实验站的研究人员一直致力于开发更适合大平原的作物生产系统。为旱地作物生产开发的办法之一是采用夏季休耕，在原本可能正常种植作物的种植季内不种植任何作物。由于大多数小麦种植在能够储存大量水的土壤上，休耕的土壤能在后来长期无雨的季节为作物提供水分（Smika 1983）。在中央大平原的干旱农业区，用除草剂代替耕作导致保存了足够的土壤水分，从而时每年的持续性作物生产成为可能，无需休耕一年来储存土壤水分。近几十年来美国的休耕面积大幅下降，主要是由于提高了除草剂的使用（Derksen 等人 2002）。数据显示，小麦收割后没有耕整的土壤在春季可以储存与以往休耕持续至秋小麦种植前同样多甚至更多的水分（Peterson 和 Westfall 2004），这一发现导致大平原扩大了夏玉米和高粱的种植面积。

其他例子包括将除草剂用于产量较高、结籽较多、麦秆较少的矮株小麦（Gressel 1999）。除草剂导致机械收割在英国得到快速推广（一项节省劳动力的主要技术），因为在以前，杂草经常堵塞收割机，机械收割设备并未广泛使用（Lever 1991）。除草剂还使轮作方案变更成为可能。18、19 世纪和 20 世纪初，谷物通常以轮作方式在英国和欧洲种植，行间种植其他作物，如萝卜。两季连续种植谷物往往会形成一个混合杂草群，然后通过对根块作物进行频繁的行间耕耘来“清除”这些杂草（Lever 1991）。除草剂减少了这一需要，使农民能在其轮作中种植收入更好的作物。当经济和市场力量也影响作物轮种次序时，单为抑制杂草而维持某个特定的轮作制度难以自圆其说。有了除草剂，种植者现在可以选择最赚钱的作物。

除草剂的使用导致发达国家产量提高

如前所述，自 20 世纪 40 年代末以来，除草剂的使用在发达国家大幅推广，所提供的例子展示了除草剂如何影响良好农艺措施取得进展。发达国家除草剂的采用受到降低杂草防治成本的欲望所驱使，因为二战后劳动力变得稀缺且愈加昂贵。这已在多个国家得到证实，包括德国、日本、韩国和美国，因为农场劳动者流向工业岗位、农场主面临劳动力短缺、除草剂帮助有效管理杂草（Kim 1981；Koch 1992；Takeshita 和 Noritake 2001；Wang 1971）。

20 世纪 60 年代以来的数据显示，由于除草剂的使用，美国产量增加，已被证实的有水稻、干菜豆、高粱和马铃薯（Burnside 和 Wicks 1964；Comes, Timmons 和 Weldon 1962；Mueller 和 Oelke 1965；Nelson 和 Giles 1989），小麦（Alley 1981）和玉米（Dexter 1982）。英国的谷物（Lever 1991）、澳大利亚的粮食（Wylie 2008）和加拿大的小麦生产（Freyman 等人 1981）也取得类似成果。杂草防治的改进不仅降低了杂草竞争，还改善了苗床湿度，因为所需的耕作减少（Nalewaja 1975）。

阿根廷大豆和玉米生产规模扩大、经济活力提升的主要原因是广泛采用除草剂（尤其是草甘膦）来防治杂草。草甘膦在阿根廷如此广泛采用很大程度上是由于几乎全部采用抗草甘膦大豆（Penna 和 Lema 2003）。草甘膦使用的增加促进了免耕作物生产制度的快速推广，扭转了数十年的破坏性耕作办法，导致作物产量提高、经济活力提升、种植面积扩大。

研究表明，在免耕制度下，作物的生产力一直较高，免耕制度下种植的玉米、大豆和小麦产量比传统耕作制度下的产量高 17%（Ribeiro 等人 2007）。

在巴西，随着工业化进程加快，受城市更高工资趋势，人们从农村移居城市地区。巴西农村人口从 1950 年占总人口 64% 下降到 1980 年的 32% 和 2010 年的 16%（Cerri 等人 2010）。因此，农村地区从事人工或拖拉机除草的劳动者越来越少。巴西大量小农户采取免耕措施。调查显示，劳动力需求减少是小农户采用免耕制度的一个主要诱因（Ribeiro 等人 2007）。

除草剂取代人工除草、犁地和耙地使玉米劳动力需求减少了 38%。

以往在中国农民们人工除草。用人工方式给中国稻田充分除草需要大约 10 亿人日的劳动量 (Askew 1991)。然而, 20 世纪 70 年代末以来, 工业的快速扩张导致农村人口外流, 再加上相应的工资上涨, 使得除草剂的使用对农民更具吸引力 (Zhang 2003)。1978 年至 1990 年, 在研究和推广部门的鼓励 and 宣传下, 越来越多的中国农民开始采用除草剂来防治杂草 (Zhang 等人 2007)。农田除草剂施用面积从 20 世纪 70 年代初的不足 100 万公顷稳步增长至 2005 年的 7000 万公顷以上 (Zhang 2003)。

1973 年, 在中国, 估计因杂草导致的水稻作物损失达 40%, 即使作物人工除草多次。1988 年, 随着除草剂使用的推广, 杂草导致的水稻损失估计为 6-8% (Moody 1991)。2010 年对云南高原水稻生产区的一项调查显示, 目前冠层以上不可控杂草导致的水稻产量损失为 2.8%, 而冠层以下不可控杂草导致的产量损失为 1.5% (单独考虑) (Dong 等人 2010)。研究人员指出, 杂草损失估计大大低于先前的估值, 并提到除草剂的采用是一个原因。

在俄罗斯, 20 世纪 60 年代, 研究表明, 除草剂的使用导致国营农场谷物产量增加 50% (Chenkin 1975)。俄罗斯除草剂的使用从 1968 年的 2500 万公顷增加到 1973 年的 4700 万公顷 (Keiserukhshy 和 Kashirsky 1975)。1991 年苏联解体导致集体农场私有化。农业的政府支持崩塌, 许多农场没有财力购买除草剂。减少除草剂的使用是导致 20 世纪 90 年代俄罗斯小麦产量降低的一个主要因素。1996 年至 2000 年期间由于杂草侵扰而导致俄罗斯谷物产量年度损失估计达 950 万公吨 (1050 万吨) (Zakharenko 2004)。如果农民们完全不能使用除草剂, 20 世纪 90 年代的损失将更大。俄罗斯农业科学院对 1990-1999 年的估计是, 使用了除草剂的 1500 万公顷农田每年的额外产量为 540 万公吨 (600 万吨) (Zakharenko 2000)。旨在抑制杂草的措施被确定为提高俄罗斯谷物产量的首要优先事项 (Zakharenko 2004)。近年来, 俄罗斯政府出台了一系列政策以提高除草剂在作物生产中的可获性和使用率。2010 年俄罗斯的除草剂市场估值比 2003 年高出 2.8 倍 (McDougall 2013)。

虫害防治史

昆虫是地球上最成功的生物, 多达 200 万种; 目前叫得出名的昆虫有 90 万种, 每年有数以万计的新物种被命名。事实上, 昆虫约占世界物种总数的 80%。昆虫属于更大一类动物, 即节肢动物, 这类动物还包括螨虫、蜘蛛、蝎子、千足虫、龙虾和小虾等生物, 以及一些已灭绝的成员。除了品种繁多, 昆虫还十分常见。据估计, 任何时候活着的昆虫大约有 10 quintillion (即 10,000,000,000,000,000) 只, 地球上每人平均超过 2 亿只, 每人每磅体重对应 300 磅的昆虫。

虽然在热带生态系统中最常见、品种最多, 但昆虫和有节肢动物在温带生态系统中也 very 常见, 北卡罗来纳州的研究详述了每英亩 5 英寸深的土壤中大约有 1.24 亿只动物, 其中有 9000 万只螨虫、2800 万只弹尾虫 (昆虫的近亲) 和 450 万只其他昆虫。宾夕法尼亚州的一项类似研究得到的数量比北卡罗来纳州研究中的螨虫、弹尾虫和昆虫数量高两至三倍 (Sabrosky 1953)。在陆栖系统中, van den Bosch 和 Stern (1969) 估计, 大约有 1,000 种节肢动物与加州中央谷地的苜蓿存在关联, 而 Pimentel 和 Wheeler (1973) 从纽约上州的苜蓿上收集到了 591 种节肢动物。这些昆虫物种仅极少数以苜蓿为食, 被列为害虫; 其中有些通过以捕食者和拟寄生物的身份活动带来益处, 大多数对苜蓿既无正面也无负面影响。总体而言, 只有一小部分节肢动物物种 (不足 1%) 被视为害虫, 但是它们给人类带来了很大麻烦。

节肢动物对生态系统和人类生存产生了各种不利影响。昆虫向人类、其他动物和植物传播病菌, 通过一种蚊媒寄生虫——疟疾, 导致 2012 年主要是非洲儿童估计死亡 627,000 人。

其他昆虫病原体系统也具有类似的毁灭性，昆虫传播的人类疾病对社会产生了重大影响，影响了战争结果等。除了无法估量的人类生命损失影响外，这些疾病还给农业系统带来了其他严重的经济后果。节肢动物给森林和牧场等自然系统造成损害。从而破坏了生态系统，给濒危物种和物种多样性带来潜在影响，削弱了美学价值，包括休闲娱乐用途。节肢动物破坏森林和牧场的更多可量化结果包括：生产力损失、野火发生率增加、水土流失加重、基础设施受损等。不过，本文的主题是病虫害（此时指节肢动物）对农业生产的影响，尤其是在满足 2050 年全球粮食生产需求情况下的影响。昆虫和螨虫显然在与人类竞争食物资源的过程中发挥了关键作用，随着世界人口不断增加以及发展中国家对丰富健康饮食的需求不断增加，这种局面会愈加显著。

昆虫拥有多个属性，这使它们能够在我们生活的各个方面，包括粮食纤维牧草生产、动物/畜牧业生产、维护我们的财产和结构、保护我们的娱乐和自然区、基础设施、人类健康等方面十分有效地与我们人类竞争。能让昆虫和螨虫如此成功的属性包括：（1）体型小，这有助于它们填补一些小生境，包括难以到达的地方；（2）快速繁殖和种群增长，这让它们能够迅速适应和应对新环境；（3）流动性高，这使它们能够迁移至并占领新的领地；（4）在幼年和成年期能够居住于不同的小生境，即：降低了各个生命阶段之间的种内竞争，一些物种在各个阶段生活在完全不同的小生境，例如，同一物种幼年水栖成年陆栖或幼年生活在土壤里成年生活在地面上；（5）物种化程度高；（6）可食用的植物部位广泛，包括根叶茎（属于茎类）、花蕾、花朵和果实；及（7）能够进化并快速适应选择压力，包括各种管理/防治策略造成的压力。

从古至今，害虫一直与人类竞争资源，包括食物。《圣经》中提到不下于 13 种昆虫（蚂蚁、蜜蜂、甲虫、各种毛虫、跳蚤、苍蝇、虱子、蚱蜢、黄蜂、蝗虫、虱子、蛾、蛆）。在《圣经》的“埃及十灾”中，蝗灾位列第八——“蝗虫覆盖着大地，吃完了未被冰雹摧毁的剩余植被”（第七灾）。沙漠蝗虫和东亚飞蝗至今仍是非洲、中东和亚洲农业生产的主要虫害和威胁。至少有十分之一的世界人口的生计受到这种贪婪昆虫所影响，因为它已存在了数百年。

农业系统中节肢动物虫害治理的历史包括三个不同的阶段：（1）传统方法时代（古代至 1938 年）；（2）杀虫剂时代（1938 年至 1975 年）；及（3）虫害综合治理时代（1976 年至今）（Metcalf 1980）。

传统方法时代（古代至 1938 年）

这一时期通常使用耕作和机械方法（作物轮作、水淹、田间卫生防治、人工收集）。也使用从楝树、菊花和烟草中提取的植物源杀虫剂。20 世纪初使用过几种含有砷、汞、锡、铜的合成无机杀虫剂。有关于寄主植物抗性和生物治理起源的记录，关键例子有：通过将欧洲葡萄接穗嫁接到北美抗性砧木上来治理葡萄根瘤蚜，使用从澳大利亚进口的澳洲瓢虫来治理加州的吹绵蚧（DeBach 1964）。然而，该时期昆虫造成了大量的作物损失，但由于缺乏有效的防治措施，这种情况也只能“被接受”。

杀虫剂时代（1938 年至 1975 年）

杀虫剂和杀螨剂是农药的一个子集，具体目标分别是防治昆虫和螨虫（就本文而言，杀虫剂和杀螨剂统称为杀虫剂）。1939 年保罗·穆勒（Paul Muller）发现 DDT 的杀虫性能开启了杀虫剂的新纪元，为此他于 1948 年荣获诺贝尔奖。发现 DDT 后，几种其他有关的杀虫剂被研发出来，20 世纪 50 年代有机磷和氨基甲酸酯类化学杀虫剂问世。由于其有效性、方便

性、灵活性和经济性，这些杀虫剂对提高作物产量发挥了重要作用。不过，随着这些杀虫剂使用量增加、使用范围扩大，问题开始出现并加剧。杀虫剂的使用会对生态系统产生不良影响，包括污染环境（空气、土壤、牧草和水源）、对动物种群（鸟类、鱼类、昆虫捕食者和拟寄生物）产生负面影响、大多数人的脂肪组织中有杀虫剂残留，以及节肢动物本身的不良反应。

有害昆虫和螨虫对杀虫剂产生抗性成为一个重大问题。通过自然选择和基本进化原则，昆虫和螨虫可以适应杀虫剂的毒性作用。550 多种昆虫和螨虫对各种化学杀虫剂和作用模式产生抗性（Georghiou 1990）。抗性的定义是“病虫害种群的敏感性发生可遗传性变化，具体表现是某个产品依照这种病虫害的标签建议使用时反复未能达到预期的防治水平”，昆虫的代谢、靶标位点、穿透（表皮屏障）或行为特征变化可以引起抗性（Insecticide Resistance Action Committee 2013）。

杀虫剂抗性不是一个新现象，早在 20 世纪 50 年代中期就首次报道过家蝇（*Musca domestica*）与 DDT 的事件。害虫卷土重来、次级害虫爆发是杀虫剂的另一一些潜在缺陷，这是由于杀虫剂破坏了农业生态系统中非靶标生物的种群动态。当杀虫剂等治理策略应用于被破坏性害虫种群侵扰的作物时，系统中非靶标节肢动物的种群数量也会减少。这些昆虫和螨虫有些可能是靶标害虫或系统中其他昆虫的捕食者和拟寄生物。随着杀虫剂药效的消散，

- 由于对害虫数量的自然生物制衡减少，靶标害虫的数量无节制地反弹到比杀虫剂施用前更高的水平（害虫卷土重来），或

- 由于对其保持制衡的捕食者和拟寄生物受到杀虫剂施用的不利影响，系统中其他昆虫物种的数量增加至破坏性水平（次级害虫）。

虽然是一个十分有效有用的工具，但显然杀虫剂的使用必须得到的更好的管理，不可能长期单独地使用。不过，作为综合系统的一部分，杀虫剂应能发挥关键作用。

虫害综合治理时代（1976 年至今）

虫害综合治理可以追溯到 1946 年，当时加利福尼亚州聘请首位监督防治昆虫学家监控苜蓿虫害并制定防治措施（Hagen, van den Bosch 和 Dahlsten 1971）。不过，病虫害综合治理（IPM）的起源和概念通常归于 Stern 等人（1959）。病虫害综合治理是一套系统方法，整合一系列治理策略以实现经济实惠的病虫害防治，强调虫害防治的可持续性，同时维持杀虫剂作为可行工具的实用型。具体而言，IPM 是一种基于生态系统的策略，侧重于通过将生物防治、生境操纵、修改耕作措施、使用抗性品种和选择性使用杀虫剂等技术相结合以长期预防病虫害或其损害。

只有当检测显示，依照既定准则需要使用杀虫剂，方可使用，施用杀虫剂的目的是只消除靶标生物。虫害防治材料的挑选和施用方式能最大限度的降低对人类健康、有益和非靶标生物以及环境的风险（UC IPM Online 2013）。在 IPM 系统环境下使用杀虫剂将确保这些工具世代代可持续。杀虫剂是促进粮食生产、保障食品供应的法宝，而这又是满足不断增长的世界人口的饮食需求所急需的。杀虫剂的使用给环境和生态系统带来的潜在不利影响要求我们必须审慎而明智地使用杀虫剂。过度依赖和过度使用杀虫剂，如农药（杀虫剂）时代（1938 年至 1957 年），被证明是不可持续的。

即便是在今天采用了最先进的管理策略，害虫对农业生产的破坏也估计高达 30%；此外，昆虫导致的采后损失也给食品供应带来了额外损害。IPM 策略的使用在严格度和强度等方面是一个连续体，但美国和全世界大多数农业生产只在某种程度上实行了 IPM。监管控制往往是一项 IPM 方案的最初管理策略。检疫、入境检查、进出口法规等有助于减少病虫害在各司法管辖区间迁移。虽然仍然有效，但全球贸易和国际旅行的扩大使系统变得紧张，并给许

多地区,尤其是美国一些地区带来了入侵害虫的严峻挑战。这些入侵害虫往往侵扰某个地区,而由于缺乏自然约束机制,害虫种群肆无忌惮地繁衍。

防治措施

耕作防除措施是病虫害综合治理(IPM)方案一个重要方面,是在大多数农业系统中实施的一项措施。使用适应性强的作物品种、最优的生产作业、适宜的种植日期、作物轮作等,有助于长出生机勃勃的健康植物;这些做法可以帮助减轻害虫造成的损害,减少总体作物损失。上述这些做法对提高作物产量也很重要,这样只需稍作努力便可积极影响IPM。更多IPM特定耕作办法,如诱虫作物、间作、破坏替代性宿主、耕耘等,发达国家也经常使用。

利用驱虫性“驱”植物和诱虫性“引”植物的驱-诱式种植制度已经开发出来并成功用于非洲的自给农业,为攻击玉米和其他谷物的鳞翅目害虫传递化学信息素(Hassanali等人2008)。机械和物理防治在生境上适合IPM,如为高价值作物搭建小拱棚或其他物理屏障。

生物防治是IPM的另一个组成部分。自然形成的昆虫天敌种群攻击害虫并减少害虫的种群密度。捕食性昆虫捕食害虫,昆虫拟寄生物侵扰并杀死宿主。昆虫感染微生物的*动物流行病*爆发在特定条件下可以减少害虫种群。这些生物对许多系统中的害虫进行了重要的、自由的控制。生物防治可以采取更有计划和战略的方法,如故意释放养虫室饲养的生物,但自然形成的有益生物种群是所有IPM系统的一部分。

最后,在一些宿主植物-害虫情况下,宿主植物抗性是IPM管理工具的一个重要组成部分。这些抗性品种需要大量的研究工作才能研发出来,但有效性、成本/效益率、有利的环境方面、使用的简便性和种植者的接受度等方面的权衡都是努力的理由。不过,使用抗性品种进行综合虫害治理并不适合所有系统,因为害虫和作物必须服从这类策略的发展。

生物、耕作、植物、机械和和监管防治是治理主要昆虫和螨类害虫的IPM整体策略。这些选项有助于缓和害虫种群水平,但在许多情况下,剩余的害虫水平超过了经济阈值,必须加以管理。这些非化学策略降低了害虫种群水平,但需要采取补救办法,如杀虫剂,以防止因害虫种群逃避对它们的限制而造成的作物损失。在这种情况下,当害虫种群达到IPM概念定义的阈值水平,杀虫剂便可作为关键的治理工具予以使用。这些非化学策略与杀虫剂结合使用是IPM的关键要素之一。

农药的变迁

去过50年里IPM使用的杀虫剂类型发生了翻天覆地的变化。导致环境问题的杀虫剂(有机氯)和那些对哺乳动物(包括人类)急性毒性高的杀虫剂在发达国家很大程度上被风险较小、具有生物合理性的生物型及其他环保型和易用型材料所取代。利用害虫生理弱点的昆虫生长调节剂、费洛蒙(化学信息素)和其他新型化学品(即:针对具体的生命阶段、命令或生物途径)变得越来越普遍,本质上它们提供了外科手术的管理水平(Gilbert和Gill2010)。这些进展使得我们能在尽量减少非靶标影响和环境后果的同时实现虫害的最优防治。

在过去的20年间,植物源农药(如:通过基因工程改造含有从苏云金芽孢杆菌提取的 δ 内毒素基因的植物)的研发首先使发达国家玉米和棉花的IPM发生了彻底变革。这种方法的研发正向其他作物和发展中国家扩展。昆虫的快速进化能力和新型虫害治理技术(如转基因作物)带来的强大选择压力使抗药性持续成为防治植物病虫害的一大威胁。昆虫也有能力克服其他IPM策略,如耕作和生物防治,因此开发强大的管理工具任重道远。

大量研究量化了美国农药政策变更和产品供应情况的影响。Knutson等人的一项研究描述了假设禁止除草剂、杀虫剂和杀真菌剂,可能会给美国社会造成哪些影响(Knutson1999)。在1999年的情况下,如果13种商品不能使用有机磷类和氨基甲酸酯类杀虫剂(两种化学类杀虫剂,每种包含几个成员),美国产量将下降1%(小麦)至38%(苹果),食品价格将上

涨 1%（十三种商品中有六种）至 23%（棉花）。产量降低、价格上涨，美国农业生产者在全球主粮、棉花和花生市场上的竞争力将会下降。美国的玉米、小麦和大豆出口将下降 27%，相应损失约 13.2 万个工作岗位。

这项发表于 1999 年的分析发现，美国丧失这两类杀虫剂将会大幅减少玉米、小麦和大豆的年终供应量，引起价格波动，减缓美国对贫穷国家的食品援助计划，加重全球饥饿。最近，对 50 种美国作物（美国种植面积最大的商品，每年共计~1.0935 亿公顷【2.7 亿英亩】）的杀虫剂使用情况及其影响进行了量化（Gianessi 2009）。50 种作物中有 42 种超过 50% 的面积每年使用杀虫剂，这 50 种作物中有 23 种超过 90% 的面积使用杀虫剂。施用这些杀虫剂是为了防止害虫造成的作物损失，这是使用的主要标准。如果不及时治理，被调查的 50 种作物中将有 31 种和 7 种分别遭受大于 40% 和大于 70% 的全国性产量损失。这项研究发现，通过减轻作物虫害的破坏性影响，美国农民额外生产出 1440 亿磅食品、饲料和纤维，农业收入累计增加 229 亿美元。

总之，在杀虫剂上每花费一美元，美国种植者便获得 19 美元的新增产值。因此，作为小企业主，美国农业生产者使用杀虫剂来保护他们的投资。使用并不是随意的，而是对害虫种群和作物损失风险进行估算后做出的反应。

明尼苏达州从所有作物产品中获得了最大产值（46 亿美元；6% 源于杀虫剂、19% 归因于除草剂），而佛罗里达州和格鲁吉亚州从杀虫剂使用中获得的产值比例最高（超过 50%）（格鲁吉亚州从杀虫剂使用中获得的产值最多，达~8.9 亿美元）。与大田作物相比，水果坚果和蔬菜作物的产值更多是由于使用了杀真菌剂和杀虫剂；鉴于其消费者食品供应的最终用途，这可能符合这些作物的更高质量标准。加利福尼亚州从水果坚果和蔬菜作物的杀虫剂使用中获得了最大产值，分别为~56 亿美元和 28 亿美元。

大量研究已整理出节肢动物所致作物损失的经验数据。昆虫造成的损失从空间上来讲众所周知，从时间上来说各种各样。种群每年都会发生变化，农田与农田之间也有差异（即使在同一块田地，种群也可能部分严重部分轻微）。美国的棉昆虫学家量化了 1979 年来各州因昆虫和螨虫造成的棉花损失。这些数据来自于观测、研究样区、与种植者的讨论等（密西西比州立大学 2013）。例如，在 2000 年，节肢动物害虫使棉花总产量减少了 9.26%，2000 年作物的昆虫治理成本和损失总计达 289.78 美元/公顷（117.32 美元/英亩）。2013 年，节肢动物害虫使棉花总产量减少了 2.68%。2013 年作物的昆虫治理成本和损失总计达 223.58 美元/公顷（90.52 美元/英亩）。

在国际上，杀虫剂已被证明对防止非洲玉米茎螟所致的作物损失有用，因为通过使用颗粒杀虫剂，全国平均 13.5% 的作物损失可以避免（De Groote 等人 2011；Gianessi 和 Williams 2012）。据联合国估计，在以色列和马达加斯加广泛喷洒杀虫剂来治理爆发的沙漠蝗虫避免了马达加斯加~25% 的水稻作物损失，如果不治理，这些作物将会被摧毁（FAO-ECLC 2013；Gianessi 2013a）。其他例子有日本水稻褐飞虱防治（Gianessi 2013b；Holt 等人 1996；Kiritani 1979）和西非用于生产巧克力的可可豆（Dormon, van Huis 和 Leeuwis 2007；Gianessi 和 Williams 2011）。当作为早播、近间距豇豆和三次杀虫剂施用相结合的 IPM 方案的一部分使用时，相比施用杀虫剂五到六次的传统做法，非洲农民获得了 51% 的产量增益。三次喷洒处理还为种植者带来了最高的净回报，回报率为 3:1。虽然单独采用耕作措施也能提高产量，但与杀虫剂相结合生产出了最高豇豆产量（Gianessi 2013c；Karungi 等人 2000；Nabirye 等人 2003）。

农药问题

杀虫剂使用带来的一些人类和环境问题包括对水源、土壤和大气资源的潜在污染；食品安全；施用者和农业工作者安全；对靶标生物的影响；其他。杀虫剂向监管机构登记注册前

必须进行一组科学测试、准备到位并由监管机构执行的保障措施、各种监督团体及广大公众对农药使用的制约与平衡,以及作物保护产品生产商的社会责任和对农业及社会可持续发展的期盼减轻了这些不良影响。例如,关于食品安全,2011年间加州农药监管处对加利福尼亚州 160 多种农产品进行抽样检测,发现 97.9%的新鲜农产品样本(1,009 个样本)低于美国环保署(EPA)规定的农药残留容许量(CDFA 2011)。事实上,60.8%无残留,35.8%残留量居于美国环保署设定的合法容许量范围之内。这些样本检测了所有主要农药类型。

关于农药使用导致的人类暴露,自 1971 年以来,加州机构每年都对农药暴露导致潜在健康影响的案件进行调查(加州环保局 2010)。2010 年,农药在农业上的使用和农药暴露确定涉及 21 起人类暴露案件,这占 240 万次施用的 0.00088% (加州环保局 2010)。杀虫剂使用成本(在利益方面:成本关系)是有形的,大量的研究工作均旨在降低这些成本。不过,鉴于日益增长的需求和人口,杀虫剂使用对提高粮食生产的好处和重要性不言而喻,与之相比,随着新型低风险杀虫剂和转基因植物方法被研发出来,这些成本呈下降趋势。

农药为发展中/发达国家带来的效益

发展中国家作物产量较低很大程度上是由于虫害无法控制

木薯

木薯是撒哈拉以南非洲地区 2 亿多人民的一个重要主食,但非洲的木薯产量很低,平均为 8.17 至 9.07 公吨/公顷(9-10 吨/公顷),比实验农场的产量低 50%(Fermont 等人 2009)。杂草侵扰是非洲木薯生产的一个主要制约因素,因为目前可用的除草剂很少,每个作物生长周期锄草四次的要求导致杂草防治情况糟糕,产量减少 40%甚至颗粒无收(Bamidele 等人 2004)。

水稻

最近的一项水稻研究估计,亚洲热带地区的稻田每年因病虫害(昆虫/疾病/杂草)造成的粮食产量损失为 1.09 至 1.81 亿公吨(1.2 至 2 亿吨)(Willoquet 等人 2004)。整个地区平均产量损失估计达 37.2%(Savary 等人 2000),杂草是主要制约因素,与疾病一起导致产量减少 15%(Ziegler 和 Savary 2010)。非洲近期的一项报告估计,由于杂草侵扰每年水稻损失 209 万公吨(230 万吨)(占总产量的 15%)(Rodenburg 和 Demont 2009),在印度,每年因杂草导致的水稻产量损失估计为 1300 万公吨(1500 万吨)(Ghosh 等人 2004)。孟加拉国农民农田因杂草防治不佳导致的水稻产量差距为 43-51%(Rashid 等人 2012),高达 0.9 公吨/公顷(1 吨/公顷),30%的农民因杂草疯长而损失超过 500 千克/公顷(Ahmed 等人 2001)。昆虫导致孟加拉国水稻产量每年减少 4-14%(Mondal 2010),在布基纳法索,姑河垦区(Vallee du Kou)的灌溉水稻,干季期间茎螟导致的产量损失高达 40%(Sama 等人 2013)。

小麦

对“2006 年提高小麦产量潜力国际研讨会”来自 19 个发展中国家的参与者进行调查后确定了他们国家小麦生产的主要制约因素(Kosina 等人 2007)。这些国家占全球小麦面积的 47%,占发展中国家小麦种植面积的 89%。估计因杂草导致的产量损失介于 8.5%至 23.9%之间,具体因地区而异,总体每年可能导致高达 2180 万公吨(2400 万吨)损失。因疾病导致的产量损失介于 14%至 27%之间,具体因地区而异,每年的总损失可能高达 2000 万公吨(2200 万吨),最严重的疾病是叶锈病和条锈病、赤霉病(FHB)、颖枯病、白粉病、斑枯病、纹枯

病。估计因害虫导致的产量损失介于 12.2%至 22%之间，估计导致每年产量损失 1810 万公吨（2000 万吨），蚜虫、菽麻害虫（包括“盾虫”【盾蝽科】和“臭虫”【椿象科】家族的成员）、麦蝇、象鼻虫是最常见的害虫。

印度和巴基斯坦对密集灌溉和施肥反应较好的高产小麦品种具有出色的产量潜力；不过，小麦潜在产量与农民农田的实际产量之间存在较大差距（Singh 和 Varshney 2010），杂草侵扰是导致小麦产量降低 25-30%的主要原因（Anjum 和 Bajwa 2010；Banga, Yadav 和 Malik 2003）。

玉米

在亚洲，玉米主要是雨季作物，但在这些条件下，各种各样的禾本和阔叶杂草在作物发芽之前便侵入玉米地。传统上，人工除草是玉米农民采用的主要杂草治理方法（Shad, Chatha 和 Nawaz 1993）。如果除草次数够多且时间恰当，玉米产量可以达到使用除草剂情况下的产量（Prasad, Singh 和 Upadhyay 2008）。然而，由于玉米生长早期劳动力短缺和频繁的季风雨，人工除草经常被推迟甚至完全被忽略（Prasad, Singh 和 Upadhyay 2008），导致杂草问题严重从而降低玉米产量（Hussain 等人 2010）。在菲律宾，据报道，玉米农田因杂草导致的实际损失为 15-30%（Paller, Ramirez 和 Malenab 2001），而在巴基斯坦，杂草导致的玉米产量损失估计为 14%（Sohail 等人 1993）。

亚洲玉米螟虫和茎螟是东南亚玉米生产的一个主要制约因素，印度、巴基斯坦和菲律宾生产力低下的一个主要原因是昆虫，尤其是茎螟造成的损害（Ganguli, Chaudhary 和 Ganguli 1997）。在印度，茎螟导致 80-100%的玉米产量损失达 7.5%（Joshi 等人 2005）；在巴基斯坦，产量损失共计达 18%（Sohail 等人 1993）；在菲律宾，玉米产量损失平均达 16%（Gonzales 2005）。莫桑比克、津巴布韦和埃塞俄比亚等撒哈拉以南的非洲国家也存在类似情况，农民农田的产量损失经常超过 50%（Chinwada, Omwega 和 Overholt 2001；Cugala 和 Omwega 2001；Getu 等人 2002）。非洲国家注册了几种用于防治茎螟的杀虫剂（Chinwada, Omwega 和 Overholt 2001），由于其有效性和使用相对简便，建议小农户使用颗粒制剂。肯尼亚对 135 块农田的调研将典型的农民操作方法与向玉米叶轮施用颗粒杀虫剂进行对比（De Groote 等人 2011）。由此估计，因茎螟导致的全国平均作物损失达 13.5%——该损失可以通过使用颗粒杀虫剂得以避免（De Groote 等人 2011）。

灰斑病是撒哈拉沙漠以南非洲地区玉米生产的主要制约因素之一，最初观测到其导致 1990-1991 年生长季南非玉米农田出现经济损失。据报道，病原体广泛分布于埃塞俄比亚、肯尼亚、马拉维、莫桑比克和津巴布韦，其次是刚果、尼日利亚、坦桑尼亚和赞比亚。非洲突然出现灰斑病的一个合理解释是，随玉米一起从美国进口的受感玉米渣是该真菌的原始来源（Ward 等人 1999）。观测到因灰斑病造成的产量损失发生在马拉维（29-69%）（Mpeketula, Saka 和 Msuku 2003）、埃塞俄比亚西部（22-75%）的改良和本地品种（Tilahun 等人 2001）、肯尼亚（45%）和津巴布韦（35%）（Simons 2003）、坦桑尼亚（15-40%）（Lyimo 2006），以及南非（30-40%）（Ward 和 Nowell 1998）。

人工除草是非洲小玉米农场的主要杂草治理措施，研究证明，生长季的杂草竞争导致玉米产量损失达 50-90%（Chikoye, Udensi 和 Lum 2005）。小农场获得的平均产量大大低于使用最佳治理方案的非洲研究样区的示范产量，通常为 0.9 至 1.8 公吨/公顷（1-2 吨/公顷），而研究样区的产量为 7.3 公吨/公顷（8 吨/公顷）。在实验农场，已经确定，如果玉米地在种植后前 56 天保持无杂草的状态，便可达到最高产量（Akobundu 1987），而首次除草推迟一周可能导致玉米产量减少三分之一（Orr, Mwale 和 Saiti 2002）。在大多数农场，除草通常与其他农场活动相冲突，于是推迟到稍后日期；调查数据表明，在马拉维，小农种植的玉米有三分之一的面积要么不除草，要么在关键的头六周过后除草（Orr, Mwale 和 Saiti 2002）。季初劳动力短缺导致除草延迟，随后因杂草竞争导致玉米产量损失 15%至 90%的情况十分普遍

(Kibata 等人 2002)。在尼日利亚，玉米农民的除草做法（除草一次）导致与农田除草三次相比产量损失 42% (Chikoye, Schulz 和 Ekeleme 2004)。

发展中国家的农药研究显示出极大的增产潜力

豇豆

在非洲不同种植情况下使用农药进行病虫害治理的研究表明，施用农药能够减少病虫害压力，从而提高作物产量。豇豆是撒哈拉沙漠以南非洲地区农村人口饮食中植物蛋白质的一个主要来源，受许多害虫侵扰，但研究表明，如果使用杀虫剂，农民可以将产量提高十倍 (Kamara 等人 2010)。国际热带农业研究所的《西非豇豆生产农民指南》指出，“一般来说，豇豆丰收需要喷洒 2-3 次杀虫剂” (Dugje 等人 2009)。

花生

非洲的花生产量低于亚洲、拉丁美洲和美国，原因是非洲农民不施用杀真菌剂。农民通常认为叶落是作物成熟所致，并未认识到叶面疾病造成的产量损失，但研究表明，施用杀真菌剂可以用来成功防治叶斑病，并将非洲西部和南部的花生产量提高 80% (Naab 等人 2005)。

豆类作物

印度豆类作物（蚕豆、豌豆）每年因昆虫、疾病和杂草导致的产量潜能损失达 30% (Dhar 和 Ahmad 2004)。研究表明，通过使用杀真菌剂、杀虫剂和除草剂，这些损失可以大幅减少。杀虫剂使食心虫种群减少 90%，而杀真菌剂使蚕豆褐斑病的发生率下降 60% (Ameta, Sharma 和 Jain 2010; Maheshwari 等人 2012)。印度豆类作物往往几乎不可能用人工或机械方式除草。研究显示，相比农民传统作业方式，使用除草剂后豆子产量翻了一番 (Sekhon 等人 2004)。

玉米

霜霉病是本世纪亚洲玉米生产的一个主要制约因素，它们导致印度尼西亚、菲律宾和印度产量损失高达 20-90% (Mikoshiha 1983; Putnam 2007)。研究表明，用种子处理和/或叶面喷洒的方式施用内吸性杀真菌剂极好地防治了亚洲玉米霜霉病。仅通过种子处理便有可能使产量增加 8-10%。种子处理与一次叶面喷洒相结合来防治霜霉病，可使玉米产量增加 34% (Lal, Saxena 和 Upadhyay 1980)。

已发现杀真菌剂能够极好地防治非洲的灰斑病。极少杂交品种具有足够的抗性能防止灰斑病造成的产量损失。在南非的研究表明，即使是抗性最强的杂交品种也能对杀真菌剂处理做出回应。未喷洒杀真菌剂的中等抗性杂交品种产量损失高达 50%，而未喷洒杀真菌剂的易感品种产量减少高达 65% (Ward 等人 1999)。在不利于灰斑病发展的季节，未喷洒杀真菌剂的易感和中等抗性品种的产量损失分别为 38 和 20% (Ward 等人 1999)。在赞比亚开展的试验中，喷洒与未喷洒处理剂的粮食产量差异介于 27%至 54%之间，具体取决于基因型的易感性 (Verma 2001)。

喷洒化学除草剂来清除玉米田的杂草可以代替非洲农田的人工除草。使用莠去津 (atrazine)，尼日利亚的玉米产量翻了一番 (Benson 1982)。在津巴布韦，除草剂导致玉米产量增加高达 50% (Chivinge 1990)，在肯尼亚，除草剂导致产量比农民人工除草作业时高 33% (Muthamia 等人 2002)。

寄生的独脚金 (*Striga*) 物种被认为是撒哈拉沙漠以南非洲地区谷类作物（高粱、谷子和玉米）栽培最大的生物制约因素。两种独脚金侵扰了 2200-4000 万公顷农田 (Woomer 2006)。

对玉米的不良影响最大，约有 250 万公顷蒙受 30-80%的谷粒损失（Woomer 2006）。某些地区总农田面积高达 40%由于不堪独脚金侵扰而弃种玉米和高粱（Mutengwa 等人 1999）。

在过去几年里，国际玉米小麦改良中心与魏茨曼科学研究所和化学公司巴斯夫（BASF）合作开发出了一项有前途的技术。玉米的一个自然突变体能使玉米对咪唑啉（IR）除草剂具有抗性。用灭草烟（从咪唑啉类中选取的一种内吸性除草剂）做 IR-玉米品种的种子包衣能使该植物免受独脚金侵扰（De Groot 等人 2008）。独脚金的种子受玉米根系刺激发芽，附着于玉米幼苗，在造成任何损害之前便被玉米幼苗中的灭草烟杀死了。研究表明，用灭草烟做成的种子包衣可提供整个生长季的独脚金防治，当独脚金密度较高时，能使玉米产量增加三到四倍（Kanampiu 等人 2003）。

在发展中国家使用农药具有十分可观的成本收益率

随着越来越多的亚洲经济体实行工业化，数百万人从农村迁移到城市，导致人工除草劳动力短缺，增加了人工除草的现有劳动力成本。农民们别无选择，只得减少劳动力和生产成本，尤其是在劳动最密集的任务上，如除草。在菲律宾，使用除草剂的水稻农民的比例从 1966 年的 14%上升到 1974 年的 61%（De Datta 和 Barker 1977）。如今，96-98%的菲律宾水稻农民使用除草剂（Marsh 等人 2009）。菲律宾最近的一项研究发现，随着劳动力成本的上涨，稻田施用除草剂优于人工除草，即使是在杂草密度最低时，也能节省 25-54 美元/公顷（Beltran, Pannell 和 Doole 2012）。在杂草密度最高和劳动力成本最高时，施用除草剂可得到约 80%（约 200 美元/公顷）的实惠。

近年来，随着许多非洲国家快速城市化发展，人工除草的劳动力短缺加剧。研究显示，除草剂大约是人工除草劳动力雇佣成本的三分之一（Maina 等人 2003）。在赞比亚的研究表明，使用除草剂的收益相当高。施用除草剂使玉米的毛利润增加了 70 美元至 72 美元/公顷，毛利润增长约三分之一（Burke 等人 2011）。

在非洲、印度和孟加拉国使用除草剂将大幅减少人工除草所需的劳动时间并削减除草成本。在非洲，农民节省至少 388 美元/公顷的时间价值以用于其他非农场或农场活动（Muoni, Rusinamhodzi 和 Thierfelder 2013）。印度茄子使用杀虫剂成本收益率介于最低 1:5 至最高 1:20 之间（Abrol 和 Singh 2003）。孟加拉国水稻生产的经济分析显示，除草剂施用的净收益比人工除草三次高 116%（Rashid 等人 2012）。

在发展中国家使用农药将促进其他可持续措施的采用

非洲玉米农田采用除草剂可能会导致产量增加，这不仅是由于杂草治理得到改善，还因为它为施肥的采用和种植面积的扩大提供了便利。尽管推广了 40 年，但撒哈拉以南的非洲地区施肥率仍然很低，仅 5%的小农采用施肥方案（Dar 和 Twomlow 2007）。施肥的效果取决于杂草治理情况。施肥导致更多杂草生长，反而增加了更多人工除草需求。通过用除草剂来治理杂草问题，玉米农民将更可能使用肥料以实现更大的玉米产量增长。非洲农民通常只在 50%的现有农田上种植作物，其余面积休耕，因为他们断定，无法获得足够的劳动力来为额外的农田除草（Bishop-Sambrook 2003）。通过大大减少除草所需的劳动量，除草剂的采用可以导致更大的面积种植作物，包括玉米。

在南非，水稻历来通过用手将幼苗移栽到灌溉水田来种植。灌水对水稻有益，能够控制第一波杂草并使秧苗领先于随后几波杂草。生长期出现的杂草通常以人工除草方式治理。

水和劳动力资源的匮乏威胁着亚洲水稻生产可持续性。水稻大约消耗灌溉用水总量的 50%。由于与家庭和工业用水竞争，农业的用水份额正在下降。在亚洲，上个世纪农业的用

水份额从 98% 下降到 80%，到 2020 年可能降至 72% (Kumar 和 Ladha 2011)。经济的快速增长增加了非农业部门的劳动力需求，导致农业劳动力供应减少。与人工插秧除草等农活相比，许多人更喜欢非农业工作。由于劳动力短缺不断加剧，劳动工资上涨，从而导致许多亚洲国家传统水稻生产系统没有经济效益。

水稻的种植可以用旱田播种来取代水田插秧。旱田种植系统比水田插秧所需的用水量少 35-57%，劳动量少 67% (Farooq 等人 2011; Mazid 等人 2006)。不过，旱田系统中的杂草问题更麻烦，因为杂草不能通过灌水来治理 (Kumar 和 Ladha 2011)。对各种除草剂进行筛选后发现它们对干种系统中的烧光、出苗前和出苗后杂草防治有效 (Kumar 和 Ladha 2011)。在菲律宾、越南、马来西亚和泰国，水稻直接播种大规模取代了插秧。几乎所有实施直接播种的稻农都采用了化学除草剂，因为与人工除草的移栽水稻相比，它们使干种作物的杂草防治时间减少了 500 小时/公顷 (Ho 1996; Mazid 等人 2006)。

结论

本文讨论了在农业中使用农药的依据，以及由于改善了病虫害治理效果，农药使用对提高粮食生产的影响。强有力的证据表明，农药在简化病虫害治理和提高治理效率方面发挥了重要作用，使更少的农民能够生产出更高产量的粮食。农药不仅有助于更好地治理病虫害，还有助于开发出改良型农艺措施。这些措施，如免耕和少耕农艺，帮助节约宝贵的土壤资源，改进了遗传物质以允许更高的植株密度，增加了产量。它们还能使养分和水资源得到更高效的利用，生产出能在储存期内保持品质的优质作物，提高养分利用率，而且更能被广大消费者所接受。所有这些成果主要归功于作物生产周期之前、之中和之后更高效的病虫害治理。

合成农药的一个重要方面是，在过去 30 年里，许多新型农药已被引入农业系统，它们用新技术设计、使用更安全、环境足迹更低、对病虫害类型更具针对性、每公顷施用量极低（用克或盎司取代千克），而且凭借改良技术，因地制宜施用更精准。例子包括磺酰脲类除草剂、piperidinylthiazole 杀真菌剂，以及 mectin 杀虫剂和杀螨剂 (Lamberth 等人 2013)。此外，新方法将不仅包括合成农药，还包括（如 Lamberth 和同事 (2013) 所言）“由天然产品、受竞争者启发的化学品、从大学获取的化合物、组合化学库、其他指标的项目中间体，以及制药和动物卫生公司的化合物产品集制成的农药。”新农药的来源有很多机遇，也面临许多挑战，包括研发成本、市场适应性、药效和持续时间、环境安全性和非靶标生物。有意了解关于农药研发所涉及的技术和化学品方面更详细介绍的读者，请参阅 Lamberth 和同事 (2013) 的文章。

例如，20 世纪 80 年代初以来研发出了许多新作用机制除草剂，它们针对具体物种（只用于禾本杂草或只用于阔叶杂草）、施用更精准，或对现有出苗杂草最有效。此外，它们的环境足迹要低得多、对非靶标生物的毒性也很低。不过，20 世纪 90 年代初唯一的新作用机制类除草剂才投放市场。这主要是由于抗草甘膦除草剂作物研发出来，从而导致免耕农作大幅增加。这反过来节省了投入整地和季中除草土壤耕作的一些劳动力，同时减少了土壤侵蚀和土壤板结，只有当出苗杂草出现时才需要施用除草剂。这种类型的除草剂还主宰了除草剂市场，不利于其他广谱性较差的除草剂。这种抗草甘膦技术在环境方面的效益远远超出杂草防治。不过，正如任何其他有效技术一样，如果农业部门不开始实行综合使用各种工具的杂草治理方案，从而减少对一种工具的依赖，那么杂草对草甘膦产生抗性的问题会导致该技术警钟长鸣。相反的观点是，这些问题现在已经为新除草剂的开发和扩大安全有效化合物的市场份额创造了机会。

杀虫剂和杀真菌剂的发展趋势并非与除草剂的情况相似。自 1995 年来已有十几类新型作用模式的新化学杀虫剂投放市场，这些杀虫剂均归类为低风险化学品。杀真菌剂反映出类

似的模式。然而，研发、检验标签和市场适应性等挑战，以及与人类及非靶标生物安全和低环境影响有关的问题是所有类别的农药都有的。目前有许多新技术可用于农药开发，还将会有新农药被开发出来。总体上的重大挑战是，这些农药如何适应全世界的粮食生产计划、它们是否能被所有农民负担得起，它们是否有助于满足养活 2015 年 90 亿世界人口的总体需求。

本文介绍了农药如何使农业生产大幅提高；如何缓解较高比例人口必须从事农业生产的需求；如何导致超乎想象的产量增长。这些工作需要各方协调农药发展方案，包括化学公司、学者、政府和公民团体，从而得出被社会接受的解决方案。

作者同意美国国家科学院（NRC 1993）提出的观点：

农药广泛应用于美国农业。当被有效施用，农药可以杀死或控制病虫害，包括杂草、昆虫、真菌、细菌和啮齿类动物。病虫害化学防治有助于大多数主要水果和蔬菜作物产量大幅增加。其使用已导致过去 40 年来美国饮食的数量和种类发生重大改善，从而大大提高了公众健康水平。

不过，作者想将“当被有效施用”改为“当被纳入利用所有可用工具来满足养活至 2050 年地球上 90 亿人口的粮食生产需求的农业综合方案...”

术语表

杀螨剂。一种灭杀螨虫和蜱虫的农药。

节肢动物。一种拥有分节身体和分节附肢的无脊椎动物。

波尔多液。一种由硫酸铜、石灰和水构成的有效杀真菌剂和杀细菌剂。

植物性物质。属于或关于植物或植物生命研究。

广谱。有效对抗广泛的生物体。

栽培品种。在栽培条件下起源并存续的生物。

动物流行病。同时影响同一种类许多动物的疾病爆发。

杀真菌剂。一种消灭真菌或抑制其生长的制剂。

种质。生殖细胞的遗传物质。

除草剂。一种用于破坏或抑制植物生长的制剂。

杀虫剂。一种消灭昆虫的制剂。

间作。同时挨着种植两种或多种作物。

真菌毒素。真菌产生的有毒物质。

病原体。一种具体的致病因子。

农药。一种用来消灭损害植物或作物的动物或昆虫的化学品。

植物毒性。对植物有毒。

出苗后。种子萌芽之后。

出苗前。植物破土而出之前。

化学信息素。为信息交流目的携带信息的一种化学物质或混合物的遗传学术语。

参考文献

Abrol, D. P. and J. B. Singh. 2003. Relative efficacy of some insecticides against brinjal fruit and shoot borer, *Leucinodes orbonalis* Guen., and their impact on fruit yield. *J Asia-Pacific Entomol* 6 (1): 83–90.

Adams, R. L. 1938. *Seasonal Labor Requirements for California Crops*. Bulletin 623. Agriculture Experiment Station, University of California.

Ahmed, G. J. U., M. S. Hassan, A. J. Mridha, M. A. Jabbar, C. R. Riches, E. J. Z. Robinson, and M. Mortimer. 2001.

- Weed management in intensified lowland rice in Bangladesh. Pp. 205–210. In *Proceedings of the BCPC Conference*, Brighton, U.K., November 12–15.
- Akobundu, I. O. 1987. *Weed Science in the Tropics: Principles and Practices*. John Wiley & Sons, Chichester, UK. 538 pp.
- Alley, H. P. 1981. Weed control. In *1981 Winter Wheat Production in Wyoming*. Bulletin 603, Revised, Agricultural Experiment Station, University of Wyoming, Laramie.
- American Phytopathological Society (APS). 1950. *The Present Status of Chemicals Used to Control Diseases of Edible Fruits and Vegetables in the United States (Fungicides, Bactericides, Nematicides)*. Submitted to the Federal Security Agency, Docket No. FDC-57.
- Ameta, O. P., U. S. Sharma, and H. K. Jain. 2010. Relative efficacy of Flubendiamide 480SC against *Helicoverpa armigera* (Hubner) in chick pea. *Pestology* 34 (11): 31.
- Anjum, T. and R. Bajwa. 2010. Competition losses caused by *Rumex dentatus* L. and *Chenopodium album* L. in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Philipp Agric Sci* 93 (3): 365–368.
- Ashton, F. M. 1960. The major problem in vegetable crop production—Weed control. *Proc Calif Weed Sci Soc* 12:72–74.
- Askew, M. F. 1991. Weed control in the developed world without chemicals: Implications for agriculture, agriculture-related industries and consumers. *Proc Brighton Crop Prot Conf, Weeds* 2:775–788.
- Bamidele, S. A., A. O. Ayeni, A. A. Agboola, and B. A. Majek. 2004. Manual control of thorny mimosa (*Mimosa invisa*) in cassava (*Manihot esculenta*). *Weed Technol* 18:77–82.
- Banga, R. S., A. Yadav, and R. K. Malik. 2003. Bioefficacy of flufenacet and sulfosulfuron alone and in combination against weed flora in wheat. *Indian J Weed Sci* 35 (3/4): 179–182.
- Beltran, J. C., D. J. Pannell, and G. J. Doole. 2012. Economic implications of herbicide resistance and high labour costs for management of annual barnyardgrass in Philippine rice farming systems. *Crop Prot* 31:31–39.
- Benson, J. M. 1982. *Weeds in Tropical Crops: Review of Abstracts on Constraints in Production Caused by Weeds in Maize, Rice, Sorghum-millet, Groundnuts and Cassava*. FAO Plant Production and Protection Paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 32 (1), 63 pp.
- Bioletti, F. T. 1907. *Oidium or Powdery Mildew of the Vine*. Bulletin No. 186, Agricultural Experiment Station, University of California.
- Bishop-Sambrook, C. 2003. *LabourSaving Technologies and Practices for Farming and Household Activities in Eastern and Southern Africa. Labour Constraints and the Impact of HIV/AIDS on Rural Livelihoods in Bondo and Busia Districts, Western Kenya*. International Fund for Agricultural Development/Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 62 pp.
- Bolgenholm, V. 2004. *The Use and Importance of Handweeding in Organic Farming*. Letter to Jose H. Millan, Deputy Secretary, Enforcement, California Labor and Workforce Development Agency.
- Brown, E. A. and K. O. Britton. 1986. Botryosphaeria diseases of apple and peach in the southeastern United States. *Plant Dis* 70 (5): 480.
- Burke, W. J., M. Hichaambwa, D. Banda, and T. S. Jayne. 2011. The cost of maize production by smallholder farmers in Zambia. *Food Security Research Project, Working Paper* 50. Lusaka, Zambia.
- Burnside, O. C. and G. A. Wicks. 1964. Cultivation and herbicide treatments of dryland sorghum. *Weeds* 12:307–310.
- Cahoon, J. E., D. E. Eisenhauer, R. W. Elmore, F. W. Roeth, B. Douppnik, R. A. Selley, K. Frank, R. B. Ferguson, M. Lorenz, and L. J. Young. 1999. Corn yield response to tillage with furrow irrigation. *J Prod Agric* 12:269–275.
- California Department of Food and Agriculture (CDFA). 2011. Pesticide residue monitoring program. Summaries of DPR report *Residues in Fresh Produce*, <http://www.cdpr.ca.gov/docs/enforce/residue/rsmonmnu.htm> (10

February 2014)

- California Environmental Protection Agency (California EPA). 2010. Pesticide use reporting—2010 summary data. California Department of Pesticide Regulation. 654 pp., http://www.cdpr.ca.gov/docs/pur/pur10rep/10_pur.htm (10 February 2014)
- Cardwell, V. B. 1982. Fifty years of Minnesota corn production: Sources of yield increase. *Agron J* 74:984–990.
- Carefoot, G. L. and E. R. Sprott. 1967. *Famine on the Wind: Man's Battle Against Plant Disease*. Rand McNally & Company, Skokie, Illinois.
- Case, H. C. M. and M. L. Mosher. 1932. *Farm Practices That Pay*. Circular 389, College of Agriculture and Agricultural Experiment Station, University of Illinois.
- Cates, H. R. 1917. The weed problem in American agriculture. *Yearb Dept Agr* 205–216.
- Cates, J. S. and H. R. Cox. 1912. *The Weed Factor in the Cultivation of Corn*. Bureau of Plant Industry Bulletin No. 257, U.S. Department of Agriculture.
- Cerri, C. C., M. Bernoux, S. M. F. Maia, C. E. P. Cerri, C. C. Junior, B. J. Feigl, L. A. Frazão, F. F. de Castro Mello, M. V. Galdos, C. S. Moreira, and J. L. N. Carvalho. 2010. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. *Sci Agric* 67 (1).
- Chambers, R. G. and E. Lichtenberg. 1994. Simple econometrics of pesticide productivity. *Am J Agr Econ* 76:407–417.
- Chang, K. K. 1994. Blast management in high input, high yield potential, temperate rice ecosystems. In R. S. Zwigler, S. A. Leong, and P. S. Teng (eds.). *Rice Blast Disease*. University Press, Cambridge.
- Chase, C., K. Delate, and A. M. Johanns. 2011. *Organic Crop Production Enterprise Budgets*. FM 1876, Iowa State University. Revised July 2011, <http://www.extension.iastate.edu/agdm/crops/html/a1-18.html> (22 January 2014)
- Chenkin, A. F. 1975. Economic effect of plant protection in the Russian Federated Republic. Pp. 27–31. In *VIII International Congress of Plant Protection*. Moscow, USSR.
- Chikoye, D., S. Schulz, and F. Ekeleme. 2004. Evaluation of integrated weed management practices for maize in the northern Guinea savanna of Nigeria. *Crop Prot* 23:895–900.
- Chikoye, D., U. E. Udensi, and A. F. Lum. 2005. Evaluation of a new formulation of atrazine and metolachlor mixture for weed control in maize in Nigeria. *Crop Prot* 24:1016–1020.
- Chinwada, P., C. O. Omwega, and W. A. Overholt. 2001. Stemborer research in Zimbabwe: Prospects for the establishment of *Cotesia flavipes* Cameron. *Int J Trop Insect Sci* 21 (4): 327–334.
- Chivinge, O. A. 1990. Weed science technological needs for the communal areas of Zimbabwe. *Zambezia* 17 (2): 133–143.
- Comes, R. D., F. L. Timmons, and L. W. Weldon. 1962. *Chemical Control of Annual Weeds in Pinto and Great Northern Field Beans*. Agricultural Experiment Station, University of Wyoming, Bulletin 393. 15 pp.
- Cooke, L. R. 1992. Potato blight control in Ireland: A challenging problem. *Pestic Out* 13 (4): 28–31.
- Cooper, J. and H. Dobson. 2007. The benefits of pesticides to mankind and the environment. *Crop Prot* 26:1337–1348.
- CropLife America. 2011. The contribution of crop protection products to the U.S. economy. CropLife Foundation, Washington, D.C. 75 pp.
- Cugala, D. and C. O. Omwega. 2001. Cereal stemborer distribution and abundance, and introduction and establishment of *Cotesia flavipes* Cameron (Hymenoptera: Braconidae) in Mozambique. *Insect Sci Appl* 21 (4): 281–287.
- Dana, M. N. 1989. The American cranberry industry. *Acta Hortic* 241:287–294.
- Daniell, J. W. and W. S. Hardcastle. 1972. Response of peach trees to herbicide and mechanical weed control.

Weed Sci 20:133–136.

- Dar, W. D. and S. Twomlow. 2007. Managing agricultural intensification: The role of international research. *Crop Prot* 26 (3): 399–407.
- DeBach, P. (ed.). 1964. *Biological Control of Insect Pests and Weeds*. Reinhold Publishing Corporation, New York. 844 pp.
- De Datta, S. K. and R. Barker. 1977. Economic evaluation of modern weed control techniques in rice. In J. D. Fryer and S. Matsunaka (eds.). *Integrated Control of Weeds*. University of Tokyo Press, Tokyo.
- De Groot, H., L. Wangare, F. Kanampiu, M. Odendo, A. Diallo, H. Karaya, and D. Friesen. 2008. The potential of a herbicide resistant maize technology for Striga control in Africa. *Agr Syst* 97:83–94.
- De Groot, H., W. A. Overholt, J. O. Ouma, and J. Wanyama. 2011. Assessing the potential economic impact of *Bacillus thuringiensis* (Bt) maize in Kenya. *Afr J Biotechnol* 10 (23): 4741–4751.
- Derksen, D. A., R. L. Anderson, R. E. Blackshaw, and B. Maxwell. 2002. Weed dynamics and management strategies for cropping systems in the northern Great Plains. *Agron J* 94:174–185.
- Dexter, A. G. 1982. Weedonomics. *Proceedings, North Central Weed Control Conference*, Des Moines, Iowa, December 8–10.
- Deytieux, V., T. Nemecek, R. F. Knuchel, G. Gaillard, and N. M. Munier-Jolain. 2012. Is integrated weed management efficient for reducing environmental impacts of cropping systems? A case study based on life cycle assessment. *Eur J Agron* 36:55–65.
- Dhar, V. and R. Ahmad. 2004. Integrated pest management in chickpea and pigeonpea. Pp. 109–117. In P. S. Birlhal and O. P. Sharma (eds.). *Integrated Pest Management in Indian Agriculture*. Chandu Press, Delhi, India.
- Dong, K., B. Chen, Z. Li, Y. Dong, and H. Wang. 2010. A characterization of rice pests and quantification of yield losses in the japonica rice zone of Yunnan, China. *Crop Prot* 29:603–611.
- Dormon, E. N. A., A. van Huis, and C. Leeuwis. 2007. Effectiveness and profitability of integrated pest management for improving yield on smallholder cocoa farms in Ghana. *Int J Trop Ins Sci* 27 (1): 27–39.
- Dugje, I. Y., L. O. Omoigui, F. Ekeleme, Y. Kamara, and H. Ajeigbe. 2009. *Farmers Guide to Cowpea Production in West Africa*. International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria, http://www.iita.org/c/document_library/get_file?uuid=dd0fe400-eb90-470c-9dc1-f679c5d66a81&groupId=25357 (26 June 2014)
- Duvick, D. N. 2005. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Adv Agron* 86:83–145.
- Eck, P. 1990. *The American Cranberry*. Rutgers University Press. 420 pp.
- Edwards-Jones, G. 2008. Do benefits accrue to ‘pest control’ or ‘pesticides’? A comment on Cooper and Dobson. *Crop Prot* 27:965–967.
- Ennis, W. B., W. C. Shaw, L. L. Danielson, D. L. Klingman, and F. L. Timmons. 1963. Impact of chemical weed control on farm management practices. *Adv Agron* 15:161–210.
- Enserink, M., P. J. Hines, S. N. Vignieri, N. S. Wigginton, and J. S. Yeston. 2013. The pesticide paradox. *Science* 341 (6147): 728–729.
- Eyre, M. D., C. N. R. Critchley, C. Leifert, and S. J. Wilcockson. 2011. Crop sequence, crop protection and fertility management effects on weed cover in an organic/conventional farm management trial. *Eur J Agron* 34:153–162.
- Farooq, M., K. H. M. Siddique, H. Rehman, T. Aziz, D.-J. Lee, and A. Wahid. 2011. Rice direct seeding: Experiences, challenges and opportunities. *Soil Till Res* 111:87–98.
- Fenner, K., S. Canonica, L. P. Wackett, and M. Elsner. 2013. Evaluating pesticide degradation in the environment: Blind spots and emerging opportunities. *Science* 341:752–757.

- Fermont, A. M., P. J. A. van Asten, P. Tittonell, M. T. van Wijk, and K. E. Giller. 2009. Closing the cassava yield gap: An analysis from smallholder farms in East Africa. *Field Crop Res* 112 (1): 24–36.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2012. *The State of Food Insecurity in the World*. The Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations–Emergency Centre for Locust Operations (FAO–ECLC). 2013. *Desert Locust Bulletin*. No. 422, <http://www.fao.org/ag/locusts/common/ecg/562/en/DL422e.pdf> (5 May 2014)
- Food and Environment Research Agency (FERA). 2014. *Pesticide Usage Surveys*, <http://www.fera.defra.gov.uk/landUseSustainability/surveys/index.cfm> (9 July 2014)
- Freed, V. H. 1980. Weed science: The emergence of a vital technology. *Weed Sci* 28 (6): 621–625.
- Freyman, S., C. J. Palmer, E. H. Hobbs, J. F. Dormaar, G. B. Schaalje, and J. R. Moyer. 1981. Yield trends on long-term dryland wheat rotations at Lethbridge. *Can J Plant Sci* 61:609–619.
- Fry, W. E. 1977. Management with chemicals. Pp. 213–238. In J. G. Horsfall and E. B. Cowling (eds.). *Plant Disease: An Advanced Treatise*, Vol. 1. *How Disease Is Managed*. Academic Press, New York.
- Fussel, B. 1992. *The Story of Corn*. University of New Mexico Press, Albuquerque, New Mexico.
- Ganguli, R. N., R. N. Chaudhary, and J. Ganguli. 1997. Effect of time of application of chemicals on management of maize stem borer, *Chilo partellus* (Swinhoe). *Int J Pest Manage* 43 (4): 253–259.
- Georghiou, G. P. 1990. Overview of insecticide resistance. Pp. 18–41. In M. B. Green, H. M. LeBaron, and W. K. Moberg (eds.). *Managing Resistance to Agrochemicals*. American Chemical Society, Washington, D.C.
- Getu, E., W. A. Overholt, E. Kairu, and C. O. Omwega. 2002. Status of stemborers and their management in Ethiopia. *Integrated Pest Management Conference Proceedings*, Kampala, Uganda, September 8–12.
- Ghosh, S. K., R. K. Ghosh, P. Ghosh, and S. Saha. 2004. Bio-efficacy of some eco-friendly herbicides in transplanted summer rice (*Oryza sativa* L.) and their effect on beneficial soil microorganisms. *Fourth International Weed Science Congress*, Durban, South Africa.
- Gianessi, L. P. 2009. Executive summary. In *The Value of Insecticides in U.S. Crop Production*. CropLife Foundation, Washington, D.C. 18 pp., <http://croplifefoundation.files.wordpress.com/2012/07/insecticide-benefits-execsum.pdf> (10 February 2014)
- Gianessi, L. 2013a. *Desert Locust Plagues Managed with Insecticides*. International Pesticide Benefits Case Study No. 100. CropLife Foundation, Crop Protection Research Institute, <http://croplifefoundation.files.wordpress.com/2012/07/100-locusts.pdf> (5 May 2014)
- Gianessi, L. 2013b. *Insecticides Are Key for Managing Brown Planthoppers in Japanese Rice Fields*. International Pesticide Benefits Case Study No. 82. CropLife Foundation, Crop Protection Research Institute, <http://croplife-foundation.files.wordpress.com/2012/07/82-japan-planthoppers.pdf> (5 May 2014)
- Gianessi, L. 2013c. *IPM Proves Most Effective in Controlling Insect Pests of Cowpea in Africa*. International Pesticide Benefits Case Study No. 99. CropLife Foundation, Crop Protection Research Institute, <http://croplifefoundation.files.wordpress.com/2012/07/99-africa-cowpea.pdf> (5 May 2014)
- Gianessi, L. and N. Reigner. 2006. The importance of fungicides in U.S. crop production. *Out-looks Pest Manage* 17:209–213.
- Gianessi, L. and A. Williams. 2011. *Insecticide Use in West Africa Means More Cocoa Beans for Chocolate and Less Destruction of Rain Forests*. International Pesticide Benefits Case Study No. 4. CropLife Foundation, Crop Protection Research Institute, <http://croplifefoundation.files.wordpress.com/2012/07/4-cocoa.pdf> (5 May 2014)
- Gianessi, L. and A. Williams. 2012. *Insecticides Could Greatly Increase African Maize Yields*. International Pesticide Benefits Case Study No. 66. Crop Life Foundation, Crop Protection Research Institute,

- <http://croplifefoundation.files.wordpress.com/2012/07/66-africa-maize-insecticides.pdf> (5 May 2014)
- Gilbert, L. I. and S. S. Gill. 2010. *Insect Control: Biological and Synthetic Agents*. Academic Press. 490 pp.
- Glaze, N. C. 1975. Weed control in cucumber and watermelon. *J Am Soc Hort Sci* 100:207–209.
- Gnonlonfin, G. J. B., K. Hell, Y. Adjovi, P. Fan-dohan, D. O. Koudande, G. A. Mensah, A. Sanni, and L. Brimer. 2013. A review on aflatoxin contamination and its implications in the developing world: A sub-Saharan African perspective. *Crit Rev Food Sci* 53:349–365.
- Godfray, H. C. J., J. R. Beddington, I. R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J. F. Muir, J. Pretty, S. Robinson, S. M. Thomas, and C. Toulmin. 2010. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science* 327 (5967): 812–818.
- Gonzales, L. A. 2005. *Harnessing the Benefits of Biotechnology: The Case of Bt Corn in the Philippines*. Society Towards Reinforcing Inherent Variability Enhancement, Laguna, Philippines.
- Gressel, J. 1999. Needed: New paradigms for weed control. Pp. 462–486. In *Twelfth Australian Weeds Conference*.
- Grichar, W. J. and A. E. Colburn. 1993. Effect of dinitroaniline herbicides upon yield and grade of five runner cultivars. *Peanut Sci* 20:126–128.
- Hagen, K. S., R. van den Bosch, and D. L. Dahlsten. 1971. The importance of naturally-occurring biological control in the western United States. Pp. 25–93. In C. B. Huffaker (ed.). *Biological Control*. Plenum, New York.
- Hansen, J. G., B. Anderson, R. Bain, A. Lees, F. Ritchie, G. Gulbis, S. Kildea, L. Cooke, L. Dubois, C. Chatot, A. Filippov, A. Hannukkala, H. Hausladen, E. Hausvater, J. Heldak, P. Vrabcek, A. Hermansen, R. Narstad, J. Kapsa, M. Koppel, T. Musa, A. Ronis, H. Schepers, K. Vogelaar, and P. van Haverbeke. 2011. The development and control of late blight (*Phytophthora infestans*) in Europe in 2010 and 2011. *Thirteenth EuroBlight Workshop*, St. Petersburg, Russia, October 9–12.
- Hanson, N. S. 1947. Past, present, and future in the North Central Weed Control Conference. *Proc 4th Ann Meet N Cent Weed Cont Conf* 4:8–12.
- Harman, W. L., G. C. Regier, A. F. Wiese, and V. D. Lansford. 1998. Water conservation and economic impacts when integrating irrigation with no-tillage. *J Soil Water Conserv* 53 (4): 341.
- Hassanali, A., H. Herren, Z. R. Khan, J. A. Pickett, and C. M. Woodcock. 2008. Integrated pest management: The push-pull approach for controlling insect pests and weeds of cereals, and its potential for other agricultural systems including animal husbandry. *Philos T Roy Soc B* 363 (1491): 611–621.
- Herbicide Resistance Action Committee (HRAC). 2014. *The World of Herbicides*, <http://www.hracglobal.com/Portals/5/maoposter.pdf> (10 September 2014)
- Ho, N.-K. 1996. Current status of rice herbicide use in the tropics. *JIRCAS Int Symp Ser* 4:77–86.
- Holb, I. J., B. Heijne, and M. J. Jeger. 2003. Summer epidemics of apple scab: The relationship between measurements and their implications for the development of predictive models and threshold levels under different disease control regimes. *J Phytopathol* 151:335–343.
- Holstun, J. T., Jr., O. B. Wooten, Jr., C. G. Mc-Whorter, and G. B. Crowe. 1960. Weed control practices, labor requirements and costs in cotton production. *Weeds* 8:232–243.
- Holt, J., T. C. B. Chancellor, D. R. Reynolds, and E. R. Tiongco. 1996. Risk assessment for rice planthopper and tungro disease outbreaks. *Crop Prot* 15 (4): 359–368.
- Horowitz, J., R. Ebel, and K. Ueda. 2010. *“No-Till” Farming Is a Growing Practice*. Economic Information Bulletin No. 70, U.S. Department of Agriculture–Economic Research Service.
- Hudson, J. C. 1994. *Making the Corn Belt: A Geographical History of Middle-Western Agriculture*. Indiana University Press.
- Hussain, M., A. Ali, M. Tahir, M. Waseem, M. A. Nadeem, and A. Butt. 2010. Comparative efficacy of new herbicides for weed control in maize (*Zea mays* L.). *Int J Trop Agric* 28 (1–2): 17.

- Hvistendahl, M. 2013. In rural Asia, locking up poisons to prevent suicides. *Science* 341 (6147): 738–739. Insecticide Resistance Action Committee. 2013. <http://www.iraac-online.org/> (10 February 2014)
- Irving, G. W., Jr. 1967. Weed control and public welfare. *Weeds* 15 (4): 296–299.
- Jones, A. L. 1995. A stewardship program for using fungicides and antibiotics in apple disease management programs. *Plant Dis* 79 (4): 427.
- Jones, L. R., N. J. Giddings, and B. F. Lutman. 1912. *Investigations of the Potato Fungus*, *Phytophthora infestans*. Bulletin No. 168, Vermont Agricultural Experiment Station.
- Jørgensen, L. N., G. C. Nielsen, J. E. Ørum, and E. Noe. 2008. Controlling cereal disease with reduced agrochemical inputs—A challenge for both growers and advisers. Pp. 23–34. In *Cereal Pathosystems—British Society for Plant Pathology Presidential Conference*, University of London, 16–17 December.
- Joshi, P. K., N. P. Singh, N. N. Singh, R. V. Gerpacio, and P. L. Pingali. 2005. *Maize in India: Production Systems, Constraints, and Research Priorities*. CIMMYT, Mexico, D. F. 42 pp.
- Kamara, A. Y., F. Ekeleme, L. O. Omoigui, T. Abdoulaye, P. Amaza, D. Chikoye, and I. Y. Dugje. 2010. Integrating planting date with insecticide spraying regimes to manage insect pests of cowpea in north-eastern Nigeria. *Int J Pest Manage* 56 (3): 243–253.
- Kanampiu, F. K., V. Kabambe, C. Massawe, L. Jasi, D. Friesen, J. K. Ransom, and J. Gressel. 2003. Multi-site, multi-season field tests demonstrate that herbicide seed-coating herbicide-resistance maize controls *Striga* spp. and increases yields in several African countries. *Crop Prot* 22:697–706.
- Karungi, J., E. Adipala, S. Kyamanywa, M. W. Ogenga-Latigo, N. Oyobo, and L. E. N. Jackai. 2000. Pest management in cowpea. Part 2. Integrating planting time, plant density and insecticide application for management of cowpea field insect pests in eastern Uganda. *Crop Prot* 19 (4): 237–245.
- Keiserukhshy, M. G. and O. P. Kashirsky. 1975. Economics of plant protection in the USSR. *VIII International Congress of Plant Protection*, Vol. II, Moscow, USSR.
- Kemerait, R., A. Culbreath, J. Beasley, E. Prostko, T. Brenneman, N. Smith, S. Tubbs, R. Srinivasan, M. Boudreau, B. Tillman, D. N. D. Rowland, A. Hagan, and A. Majumdar. 2012. Peanut Rx: Minimizing diseases of peanut in the southeastern United States. Pp. 91–107. In J. P. Beasley (ed.). 2012 *Peanut Production Update*. University of Georgia Cooperative Extension Publication CSS-12-0130, Athens, Georgia.
- Kibata, G. N., J. M. Maina, E. G. Thurairira, F. J. Musembi, G. Nyanyu, J. G. N. Muthamia, J. O. Okuro, I. Mutura, S. Amboga, A. N. Micheni, F. Mureithi, D. Overfield, and P. J. Terry. 2002. Participatory development of weed management strategies in maize based cropping systems in Kenya. Pp. 343–344. *Thirteenth Australian Weeds Conference*, Perth, Western Australia, September 8–13.
- Kim, K. U. 1981. Weed control in Korea. In *Weeds and Weed Control in Asia*. FFTC Book Series No. 20. Food and Fertilizer Technology Center. 259 pp.
- Kiritani, K. 1979. Pest management in rice. *Annu Rev Entomol* 24:279–312.
- Klonsky, K. 1994. *Cultural Practices and Sample Costs for Organic Vegetable Production on the Central Coast of California*. Giannini Foundation of Agricultural Economics, University of California. 94 (2). 84 pp.
- Klonsky, K., P. Livingston, R. Vargas, and B. Weir. 1995. *Production Practices and Sample Costs for Organic Cotton Northern San Joaquin Valley*. University of California Cooperative Extension. 23 pp.
- Knutson, R. D. 1999. Economic impacts of reduced pesticide use in the United States: Measurement of costs and benefits. AFPC Policy Issues Paper 99-2, Agricultural and Food Policy Center, Department of Agricultural Economics, Texas A&M University, College Station. 26 pp.
- Koch, W. 1992. Impact of weeds on developing countries. Pp. 127–133. In *Proceedings of the 1st International Weed Control Congress*, Melbourne, Australia, February 17–21.
- Köhler, H-R. and R. Triebkorn. 2013. Wildlife ecotoxicology of pesticides: Can we track effects to the population

- level and beyond? *Science* 341:759–765.
- Kolbe, W. 1982. Importance of potato blight control exemplified by Hofchen long-term trial (1943–), and historical development. *Pflanzen-schutz-Nachrichten Bayer* 35:247–290.
- Kosina, P., M. Reynolds, J. Dixon, and A. Joshi. 2007. Stakeholder perception of wheat production constraints, capacity building needs, and research partnerships in developing countries. *Euphytica* 157:475–483.
- Kucharik, C. J. 2006. A multidecadal trend of earlier corn planting in the central USA. *Agron J* 98:1544–1550.
- Kumar, V. and J. K. Ladha. 2011. Direct seeding of rice: Recent developments and future research needs. *Adv Agron* 111:297–413.
- Kupferschmidt, K. 2013. A lethal dose of RNA. *Science* 341 (6147): 732–733.
- Lal, S., S. C. Saxena, and R. N. Upadhyay. 1980. Control of brown stripe downy mildew of maize by Metalaxyl. *Plant Dis* 64 (9): 874–876.
- Lamberth, C., S. Jeanmart, T. Luksch, and A. Plant. 2013. Current challenges and trends in the discovery of agrochemicals. *Science* 341:742–745.
- Lange, A. H. and R. A. Brendler. 1965. Weed control in transplanted celery. *Calif Agr* 19 (2): 2–3.
- Lanini, W. T. and M. L. Strange. 1994. Weed control in bell pepper with napropamide and hand weeding. *Weed Technol* 8:530–535.
- Large, E. C. 1940. *The Advance of the Fungi*. Henry Holt and Co., New York.
- Lawrence, N. J. and J. Appel. 1997. Cereal fungicides—Past, present and future. *Asp Appl Biol* 50:263.
- Lever, B. G. 1991. *Crop Protection Chemicals (Ellis Horwood Series in Applied Science and Industrial Technology)*. Ellis Horwood Ltd. 500 pp.
- Lewis, W. J., J. C. van Lenteren, H. C. Phatak, and J. H. Tumlinson III. 1997. A total system approach to sustainable pest management. *Proc Nat Acad Sci* 94:12243–12248.
- Lutman, P. J. W. 2013. A review of the effects of crop agronomy on the management of *Alopecurus myosuroides*. *Weed Res* 53:299–313.
- Lyimo, N. G. 2006. *Improving Farmers' Access to and Management of Disease Resistant Cultivars in the Southern Highland of Tanzania—Phase 2*. DFID Technical Report No. R8406. Department for International Development, U.K.
- Mack, H. J. 1969. Plant populations of vegetable crops as affected by weed control. *21st Annual California Weed Conference Proceedings*.
- Maheshwari, S. K., N. A. Bhat, T. A. Shah, A. K. Shukla, and K. Hare. 2012. Effect of fungicidal seed and foliar applications on *Ascochyta* blight of pea. *Ann Plant Prot Sci* 20 (1): 240–241.
- Main, C. E. 1977. Crop destruction—The raison-d'être of plant pathology. Pp. 55–78. In J. G. Horsfall and E. B. Cowling (eds.). *Plant Disease: An Advanced Treatise; Vol. 1. How Disease Is Managed*. Academic Press, New York.
- Maina, J. M., B. M. Kivuva, A. J. Murdoch, D. M. Mwangi, M. W. K. Mburu, and J. G. M. Njuguna. 2003. Weed management options for resource poor maize-dairy farmers in Central Kenya. Pp. 993–998. BCPC Int Congr—Crop Science and Technology, Glasgow, Scotland, November 10–12.
- Marsh, S., M. Casimero, R. Llewellyn, and D. Pannell. 2009. *Herbicide Use Strategies and Weed Management Options in Filipino and Australian Cropping*. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, Australia.
- Mascarelli, A. 2013. Growing up with pesticides. *Science* 341 (6147): 740–741.
- Mavudzi, Z., A. B. Mashingaidze, O. A. Chivinge, J. Ellis-Jones, and C. Riches. 2001. Improving weed management in a cotton-maize system in the Zambezi valley, Zimbabwe. Pp. 169–174. The BCPC Conference: Weeds, Brighton, United Kingdom, November 12–15.

- Mayo, S. C. 1965. The changing South: From mules to machines. *Proc South Weed Conf* 18:12–27.
- Mazid, M. A., C. R. Riches, A. M. Mortimer, L. J. Wade, and D. E. Johnson. 2006. Improving rice-based cropping systems in north-west Bangladesh. Pp. 331–334. In *Fifteenth Australian Weeds Conference—Managing Weeds in a Changing Climate*, Adelaide, South Australia, September 24–28.
- McCallan, S. E. A. 1967. History of fungicides. Pp. 1–38. In D. C. Torgeson (ed.). *Fungicides, An Advanced Treatise, Volume 1*. Academic Press, New York.
- McDougall, P. 2013. <http://phillipsmcdougall.com> (30 July 2013)
- Meissle, M., P. Mouron, T. Musa, F. Bigler, X. Pons, V. P. Vasileiadis, S. Otto, D. Antichi, J. Kiss, Z. Pálincás, Z. Dorner, R. Van Der Weide, J. Groten, E. Czembor, J. Adamczyk, J.-B. Thibord, B. Melander, G. Cordsen Nielsen, R. T. Poulsen, O. Zimmermann, A. Verschwele, and E. Oldenburg. 2010. Pests, pesticide use and alternative options in European maize production: Current status and future prospects. *J Appl Entomol* 134:357–375.
- Melander, B. 1998. Economic aspects of physical intra-row weed control in seeded onions. Pp. 180–185. In D. Foguelman and W. Lockeretz (eds.). *Proceedings of the 12th International IFOAM Scientific Conference, Organic Agriculture—The Credible Solution for the XXIst Century*, http://orgprints.org/1510/1/IFOAM_98_NYVERSION1.pdf (22 January 2014)
- Melander, B., N. Munier-Jolain, R. Charles, J. Wirth, J. Schwarz, R. van der Weide, L. Bonin, P. K. Jensen, and P. Kudsk. 2013. European perspectives on the adoption of nonchemical weed management in reduced-tillage systems for arable crops. *Weed Technol* 27:231–240.
- Metcalf, R. L. 1980. Changing role of insecticides in crop protection. *Annu Rev Entomol* 25:219–256.
- Mew, T. W., H. Leung, S. Savary, C. M. Vera Cruz, and J. E. Leach. 2004. Looking ahead in rice disease research and management. *Crit Rev Plant Sci* 23 (2): 103–127.
- Mikoshiba, H. 1983. *Studies on the Control of Downy Mildew Disease of Maize in Tropical Countries of Asia*. Technical Bulletin of the Tropical Agricultural Research Center No. 16. 62 pp.
- Mississippi State University. 2013. Cotton crop loss data, <http://www.entomology.msstate.edu/resources/cottoncrop.asp> (2 May 2014)
- Monaco, T. J., S. C. Weller, and F. M. Ashton. 2002. *Weed Science Principles and Practices*. 4th ed. John Wiley and Sons, New York.
- Mondal, M. H. 2010. Crop agriculture of Bangladesh: Challenges and opportunities. *Bangl J Agric Res* 35 (2): 235–245.
- Montgomery, D. R. 2008. Agriculture's no-till revolution? *J Soil Water Conserv* 63 (3): 64A–65A.
- Moody, K. 1991. Weed management in rice. Pp. 301–328. In D. Pimentel (ed.). *Handbook of Pest Management in Agriculture*. Vol. 3. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Morton, V. and T. Staub. 2008. A short history of fungicides. *APSnet Features*, doi: 10.1094/APSnetFeature-2008-0308.
- Moss, S. R. 2010. Non-chemical methods of weed control: Benefits and limitations. Pp. 14–19. In *Seventeenth Australasian Weeds Conference*.
- Moss, S. R., J. Storkey, J. W. Cussans, S. A. M. Perryman, and M. V. Hewitt. 2004. The Broadbalk long-term experiment at Rothamsted: What has it told us about weeds? *Weed Sci* 52:864–873.
- Mpeketula, P. M. G., V. W. Saka, and W. A. B. Msuku. 2003. An investigation on the biological variability of *Cercospora zeae maydis*, the incitant of gray leaf spot in maize in Malawi. *Afric Crop Sci Conf Proc* 6:286–289.
- Mueller, K. E. and E. A. Oelke. 1965. Watergrass control in rice fields with Propanil and Ordram. *Calif Agr* 19 (7): 10–12.
- Muncie, J. H. and W. F. Morofsky. 1947. Results of spraying and dusting potatoes in Michigan in 1946. *Am Potato J*

24:183.

- Muoni, T., L. Rusinamhodzi, and C. Thierfelder. 2013. Weed control in conservation agriculture systems of Zimbabwe: Identifying economical best strategies. *Crop Prot* 53:23–28.
- Mutch, D. 2008. Evaluation of a no-till organic soybean system in Michigan. *N Central Weed Sci Soc Proc* 63:173, <http://www.ncwss.org/proceed/2008/abstracts/173.pdf> (24 January 2014)
- Mutengwa, C. S., P. Tomgoona, S. Mabasa, O. A. Chivinge, and D. Icishahayo. 1999. Path coefficient analysis of phenotypic correlations of sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) yield components and witchweed (*Striga asiatica* [L.] Kuntze) parameters. Pp. 137–143. In *Proceedings of the 17th Biennial Weed Science Society Conference for Eastern Africa*.
- Muthamia, J. G. N., F. Musembi, J. M. Maina, J. O. Ouma, S. Amboga, F. Murithi, A. N. Micheni, J. Terry, D. Overfield, G. Kibata, and J. Mutura. 2002. Participatory on-farm trials on weed control in smallholder farms in maize-based cropping systems. Pp. 468–473. In D. K. Friesen and A. F. E. Palmer (eds.). *Proceedings of Seventh Eastern and South Africa Regional Maize Conference, Nairobi, Kenya, February 5–11*.
- Naab, J. B., F. K. Tsigbey, P. V. V. Prasad, K. J. Boote, J. E. Bailey, and R. L. Brandenburg. 2005. Effects of sowing date and fungicide application on yield of early and late maturing peanut cultivars grown under rainfed conditions in Ghana. *Crop Prot* 24:325–332.
- Nabirye, J., P. Nampala, M. W. Ogenga-Latigo, S. Kyamanywa, H. Wilson, V. Odeke, C. Iceduna, and E. Adipala. 2003. Farmer-participatory evaluation of cowpea integrated pest management (IPM) technologies in Eastern Uganda. *Crop Prot* 22:31–38.
- Nalewaja, J. D. 1975. Herbicidal weed control uses energy efficiently. *Weeds Today* (Fall): 10–12.
- National Research Council (NRC). 1993. *Pesticides In the Diets of Infants and Children*. National Academy Press, Washington, D.C.
- National Research Council (NRC). 2000. *The Future Role of Pesticides in US Agriculture*. National Academy Press, Washington, D.C.
- Nelson, D. C. and J. F. Giles. 1989. Weed management in two potato cultivars using tillage and pendimethalin. *Weed Sci* 37:228–232.
- Normile, D. 2013. Vietnam turns back a ‘tsunami of pesticides.’ *Science* 341 (6147): 737–738.
- Nylund, R. E., D. C. Nelson, and D. H. Dinkel. 1958. Comparative costs of weeding onions by hand or with monuron, CIPC, and CDAA. *Weeds* 6:305–309.
- Orr, A., B. Mwale, and D. Saiti. 2002. Modelling agricultural ‘performance’: Smallholder weed management in southern Malawi. *Int J Pest Manage* 48 (4): 265–278.
- Osteen, C. D. and J. Fernandez-Cornejo. 2013. Economic and policy issues of U.S. agricultural pesticide use trends. *Pest Manag Sci* 69:1001–1025.
- Overfield, D., F. M. Murithi, J. N. Muthamia, J. O. Ouma, K. F. Birungi, J. M. Maina, G. N. Kibata, F. J. Musembi, G. Nyanyu, M. Kamidi, L. O. Mose, M. Odendo, J. Ndungu, G. Kamau, J. Kikafunda, and P. J. Terry. 2001. Analysis of the constraints to adoption of herbicides by smallholder maize growers in Kenya and Uganda. Pp. 907–912. In *The BCPC Conference: Weeds*, Brighton, United Kingdom, November 12–15.
- Paller, E. C., A. H. M. Ramirez, and E. T. Malenab. 2001. Weed management in grain corn: Comparing calendared treatments and use of weed control action indicators (WCAI). *Philipp J Crop Sci* 27 (1): 9–12.
- Palmiter, D. H. 1949. Fungicides for apple scab and their effects on yield and quality of fruit. P. 271. In *Proceedings of the New York State Horticultural Society*.
- Paul, P. A. and G. P. Munkvold. 2004. A model-based approach to preplanting risk assessment for gray leaf spot of maize. *Phytopathology* 94:1350–1357.
- Penna, J. A. and D. Lema. 2003. Adoption of herbicide resistant soybeans in Argentina: An economic analysis. Pp.

- 203–220. In *Economic and Environmental Impacts of Agrotechnology*. Kluwer-Plenum, New York, New York.
- Peterson, G. A. and D. G. Westfall. 2004. Managing precipitation use in sustainable dryland agroecosystems. *Ann Appl Biol* 144:127–138.
- Pike, D. R., M. D. McGlamery, and E. L. Knake. 1991. A case study of herbicide use. *Weed Technol* 5:639–646.
- Pimentel, D. 1997. *Techniques for Reducing Pesticides: Environmental and Economic Benefits*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Pimentel, D. and A. G. Wheeler. 1973. Species and diversity of arthropods in the alfalfa community. *Environ Entomol* 2:659–668.
- Pimentel, D., P. Hepperly, J. Hanson, D. Douds, and R. Seidel. 2005. Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *BioScience* 55:573–582.
- Posner, J. L., J. O. Baldock, and J. L. Hedtcke. 2008. Organic and conventional production systems in the Wisconsin integrated cropping systems trials: I. Productivity 1990–2002. *Agron J* 100 (2): 253–260.
- Prasad, A., G. Singh, and R. K. Upadhyay. 2008. Integrated weed management in maize (*Zea mays* L.) and maize+blackgram. *Indian J Weed Sci* 40 (3/4): 191–192.
- Putnam, M. L. 2007. Brown stripe downy mildew (*Sclerophthora rayssiae var. zeae*) of maize. Plant Health Prog, doi:10.1094/PHP-2007-1108-01-DG, <https://www.plantmanagement-network.org/pub/php/diagnosticguide/2007/stripe/> (26 June 2014)
- Raleigh, S. M. and G. H. Berggren. 1964. Atrazine effective weed control chemical in corn. Pennsylvania State University. *Sci for Farmers* (Spring-Summer): 6.
- Rashid, M. H., M. Murshedul Alam, A. N. Rao, and J. K. Ladha. 2012. Comparative efficacy of pretilachlor and hand weeding in managing weeds and improving the productivity and net income of wet-seeded rice in Bangladesh. *Field Crop Res* 128:17–26.
- Rasmussen, J. and J. Ascard. 1995. Weed control in organic farming systems. Pp. 49–67. In D. M. Glen, M. P. Greaves, and H. M. Anderson (eds.). *Ecology and Integrated Farming Systems. Proceedings of the 13th Long Ashton International Symposium on Arable Ecosystems for the 21st Century*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Rasmussen, J., C. B. Henriksen, H. W. Griepentrog, and J. Nielsen. 2011. Punch planting, flame weeding and delayed sowing to reduce intrarow weeds in row crops. *Weed Res* 51 (5): 489–498.
- Riar, D. S., J. K. Norsworthy, L. E. Steckel, D. O. Stephenson IV, T. W. Eubank, J. Bond, and R. C. Scott. 2013. Adoption of best management practices for herbicide-resistant weeds in midsouthern United States cotton, rice, and soybean. *Weed Technol* 27 (4): 788–797.
- Ribeiro, M. F. S., J. E. Denardin, R. Ferreira, C. A. Flores, H. J. Kliemann, R. A. Kochhann, I. C. Mendes, G. M. Miranda, L. Montoya, N. Nazareno, C. N. Pillon, E. Scopel, and F. Skora Neto. 2007. Conservation agriculture research in Brazil. *Knowledge Assessment and Sharing on Sustainable Agriculture*. Deliverable 1.4–Appendix A1. CIRAD.
- Riemens, M. M., R. M. W. Groeneveld, L. A. P. Lotz, and M. J. Kropff. 2007. Effects of three management strategies on the seedbank, emergence and the need for hand weeding in an organic arable cropping system. *Weed Res* 47:442–451.
- Rikoon, J. S., R. Vickers, and D. Constance. 1993. Factors affecting initial use and decisions to abandon banded pesticide applications. Pp. 335–337. In *Agricultural Research to Protect Water Quality: Proceedings of the Conference (Soil Water Conservation Society)*, Minneapolis, Minnesota, February 21–24.
- Rodenburg, J. and M. Demont. 2009. Potential of herbicide resistant rice technologies for sub-Saharan Africa. *AgBioForum* 12 (3/4): 313–325.
- Rosegrant, M. W., J. Koo, N. Cenacchi, C. Ringler, R. Robertson, M. Fisher, C. Cox, K. Garrett, N. D. Perez, and P.

- Sabbagh. 2014. *Food Security in a World of Natural Resource Scarcity*. International Food Policy Research Institute, Washington, D.C. 174 pp.
- Sabrosky, C. W. 1953. How many insects are there? *Systematic Biol* 2 (1): 31–36.
- Sama, K., D. Dakouo, S. E. Nacro, and N. M. Ba. 2013. IPM strategy at the Vallée du Kou irrigated rice scheme in Burkina Faso. *3rd Africa Rice Congress 2013*, Yaoundé, Cameroon, 21–24 October, http://www.africanrice.org/arc2013/sARC_English_Combined_03oct13.pdf (27 June 2014)
- Savary, S., L. Willocquet, F. A. Elazegui, N. P. Cas-tilla, and P. S. Teng. 2000. Rice pest constraints in tropical Asia: Quantification of yield losses due to rice pests in a range of production situations. *Plant Dis* 84:357–369.
- Savary, S., A. Nelson, A. H. Sparks, L. Willocquet, D. Hodson, E. Duveiller, G. Mahuku, J. Padgham, G. Forbes, S. Pande, M. Sharma, K. A. Garrett, J. Yuen, and A. Djurle. 2011. International agricultural research tackling the effects of global and climate changes on plant diseases in the developing world. *Plant Dis* 95:1204–1216.
- Scherm, H., R. S. C. Christiano, P. D. Esker, E. M. Del Ponte, and C. V. Godoy. 2009. Quantitative review of fungicide efficacy trials for managing soybean rust in Brazil. *Crop Prot* 28:774–782.
- Schreinemachers, P. and P. Tipraqsa. 2012. Agricultural pesticides and land use intensification in high, middle and low income countries. *Food Policy* 37:616–626.
- Schroder, D., J. C. Headley, and R. M. Finley. 1981. *The Contribution of Herbicides and Other Technologies to Soybean Production in the Corn Belt Region, 1965–1979*. University of Missouri, Agricultural Economics Paper 1981-33. 25 pp.
- Schroder, D., J. C. Headley, and R. M. Finley. 1984. The contribution of herbicides and other technologies to corn production in the Corn Belt region, 1964 to 1979. *N Central J Agr Econ* 6 (1): 95–104.
- Schumann, G. L. 1991. *Plant Diseases: Their Biology and Social Impact*. American Phytopathological Society Press, St. Paul, Minnesota.
- Schumann, G. L. and C. J. D'Arcy. 2012. *Hungry Planet: Stories of Plant Diseases*. The American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota.
- Science. 2013. Infographic: Pesticide planet. *Science* 341 (6147): 730–731.
- Sekhon, H. S., G. Singh, P. Sharma, and P. Sharma. 2004. Agronomic management of mungbean grown under different environments. Pp. 82–103. In *Proceedings of the Final Workshop and Planning Meeting, Improving Income and Nutrition by Incorporating Mungbean in Cereal Fallows in the Indo-Gangetic Plains of South Asia DFID Mungbean Project for 2002–2004*, Punjab Agricultural University, Ludhiana, Punjab, India, May 27–31.
- Shad, R. A., M. Q. Chatha, and H. Nawaz. 1993. Weed management studies in maize. *Pak J Agr Res* 14 (1): 44–50.
- Simons, S. 2003. *Management Strategies for Maize Grey Leaf Spot (Cercospora zea-maydis) in Kenya and Zimbabwe*. DFID Technical Report No. R7566. Department for International Development, UK.
- Singh, P. K. and J. G. Varshney. 2010. Survey of adoption level of chemical weed control technology in wheat crop at farmers' fields. *Biennial Conference of the Indian Society of Weed Science—Recent Advances in Weed Science Research—2010*, February 25–26.
- Slife, F. W., R. F. Fuelleman, G. E. McKibben, and W. O. Scott. 1950. *Controlling Weeds in Corn with 2,4-D*. Circular 652, University of Illinois College of Agriculture, Urbana, Illinois.
- Smika, D. E. 1983. Cropping practices: Introduction. ASA-CSSA-SSSA, Agronomy Monograph No. 23. *Dry Agric*.
- Smith, P. 2013. Sustainable production: Delivering food security without increasing pressure on land. *Glob Food Secur* 2:18–23.
- Smith, R. E. 1905. *Asparagus and Asparagus Rust in California*. Agricultural Experiment Station Bulletin 165. College of Agriculture, University of California.
- Smith, R. J., W. T. Flinchum, and D. E. Seaman. 1977. *Weed Control in U.S. Rice Production*. Agriculture Handbook No. 497, U.S. Department of Agriculture. 78 pp.
- Sohail, A., J. Mahmood, M. H. Khan, and M. M. Mahmood. 1993. Evaluation of some insecticides on maize against

- Chilo partellus* (Swinhoe). *Pak J Agr Res* 14 (4): 393–395.
- State of California. 2004. Hand weeding, hand thinning, and hand-capping operations in agriculture. General Industry Safety Orders, Chapter 4, Subchapter 7, Article 13, Section 3456. CA.GOV. Occupational Safety and Health Standards Board, Department of Industrial Relations, <http://www.dir.ca.gov/oshsb/handweeding0.htm> (3 September 2014)
- Stern, V. M., R. F. Smith, R. van den Bosch, and K. S. Hagen. 1959. The integrated control concept. *Hilgardia* 29:81–101.
- Stokstad, E. 2013. The war against weeds down under. *Science* 341 (6147): 734–736.
- Takeshita, T. and K. Noritake. 2001. Development and promotion of labor saving application technology for paddy herbicides in Japan. *Weed Biol Manag* 1:61–70.
- Tilahun, T., G. Ayana, F. Abebe, and D. Wegary. 2001. Maize pathology research in Ethiopia: A review. *Second National Maize Workshop of Ethiopia Proceedings*, Addis Ababa, Ethiopia, November 12–16.
- Tourte, L., R. F. Smith, K. M. Klonsky, and R. L. De Moura. 2009. *Sample Costs to Produce Organic Leaf Lettuce*. LT-CC-09-O, University of California Cooperative Extension.
- Triplett, G. B. 1976. History, principles and economics of crop production with reduced tillage systems. *Ann Entomol Soc Am* 22 (3): 289–291.
- UC–IPM Online. 2013. *What Is Integrated Pest Management (IPM)?* University of California Agriculture and Natural Resources, Statewide Integrated Pest Management Program, <http://www.ipm.ucdavis.edu/GENERAL/whatisipm.html> (10 February 2014)
- Uhm, J. Y., D. H. Lee, D. H. Kim, and H. Woo. 2008. Development of a spray program for apple with reduced fungicide application in Korea. *J Plant Pathol* 90 (Supplement 2): S2.155–156.
- United Nations. 2012. Population Division, *United Nations Department of Economic and Social Affairs*, <http://www.un.org/en/development/desa/index.html> (15 July 2014)
- U.S. Department of Agriculture (USDA). 2014. *Census of Agriculture*, http://www.agcensus.usda.gov/Publications/2012/#full_report (9 September 2014)
- U.S. Department of Agriculture–Agricultural Research Service (USDA–ARS). 1965. *Losses in Agriculture*. Agriculture Handbook 291.
- U.S. Department of Agriculture–Economic Research Service (USDA–ERS). 1963. *Agriculture and Economic Growth*. Agricultural Economic Report No. 28.
- van den Bosch, R. and V. M. Stern. 1969. The effect of harvesting practices on insect populations in alfalfa. *Proc Tall Timbers Conf Ecol Anim Cont Hab Manage* (1): 47–51. Tall Timbers Research Station, Tallahassee, Florida.
- Van Der Weide, R. Y., P. O. Bleeker, V. T. J. M. Achten, L. A. P. Lotz, F. Fogelberg, and B. Melander. 2008. Innovation in mechanical weed control in crop rows. *Weed Res* 48:215–224.
- Vasquez, S. J., J. Hashim-Buckey, M. W. Fidelibus, L. P. Christensen, W. L. Peacock, K. M. Klonsky, and R. L. De Moura. 2008. *Sample Costs to Produce Grapes for Organic Raisins*. GR-VS-08-O, University of California Cooperative Extension.
- Vengris, J., W. G. Colby, and M. Drake. 1955. Plant nutrient competition between weeds and corn. *Agron J* 47:213.
- Verma, B. N. 2001. Grey leaf spot disease of maize—Loss assessment, genetic studies and breeding for resistance in Zambia. *Seventh Eastern and Southern Africa Regional Maize Conference Proceedings*, Nairobi, Kenya, February 11–15.
- Wang, I. K. 1971. *Diffusion and Acceptance of Recommended Farm Practices for Increased Food Production*. College of Agriculture, Seoul National University, Seoul, South Korea.
- Wanyera, R., J. K. Macharia, S. M. Kilonzo, and J. W. Kamundia. 2009. Foliar fungicides to control wheat stem rust, race TTKS (Ug99), in Kenya. *Plant Dis* 93 (9): 929–932.

- Ward, J. M. J. and D. C. Nowell. 1998. Integrated management practices for the control of maize grey leaf spot. *Integr Pest Manage Rev* 3:177–188.
- Ward, J. M. J., E. L. Stromberg, D. C. Nowell, and F. W. Nutter, Jr. 1999. Gray leaf spot, a disease of global importance in maize production. *Plant Dis* 83 (10): 884–895.
- Warren, G. F. 1998. Spectacular increases in crop yields in the United States in the twentieth century. *Weed Technol* 12:752–760.
- Wheat, D. “Labor Committee Hears Litany of Woe,” *Capital Press*, July 19, 2012.
- White, W. N. 1852. Plums at the south. *Horticulturalist* 7:401–405.
- Whitford, F., D. Barber, D. Scott, R. Edwards, and J. Caravetta. 2004. *Pesticides and the Label*. PPO 024, Purdue Pesticide Programs. 46 pp.
- Willoquet, L., F. A. Elazegui, N. Castilla, L. Fernandez, K. S. Fischer, S. Peng, P. S. Teng, R. K. Srivastava, H. M. Singh, D. Zhu, and S. Savary. 2004. Research priorities for rice pest management in tropical Asia: A simulation analysis of yield losses and management efficiencies. *Phytopathology* 94:672–682.
- Willyerd, K. T., C. Li, L. V. Madden, C. A. Bradley, G. C. Bergstrom, L. E. Sweets, M. McMullen, J. K. Ransom, A. Grybauskas, L. Osborne, S. N. Wegulo, D. E. Hershman, K. Wise, W. W. Bockus, D. Groth, R. Dill-Macky, E. Milus, P. D. Esker, K. D. Waxman, E. A. Adee, S. E. Ebelhar, B. G. Young, and P. A. Paul. 2012. Efficacy and stability of integrating fungicide and cultivar resistance to manage Fusarium head blight and deoxynivalenol in wheat. *Plant Dis* 96:957–967.
- Wimer, D. C. 1946. *Why Cultivate Corn?* Circular 597, College of Agriculture, University of Illinois, Urbana, Illinois.
- Woomer, P. L. 2006. *Empowering African Farmers to Eradicate Striga from Maize Croplands*. The African Agricultural Technology Foundation, Nairobi, Kenya.
- World Bank. 2008. *World Development Report, 2008: Development and Agriculture*. The World Bank, Washington, D.C.
- Wylie, P. 2008. High Profit Farming in Northern Australia—A New Era in Grain Farming. Grains Research and Development Corporation, <http://www.grdc.com.au/uploads/documents/GRDC-High-Profit-Farming-in-Northern-Australia.pdf> (9 July 2014)
- Yarborough, D. E. and A. A. Ismail. 1985. Hexazinone on weeds and on lowbush blueberry growth and yield. *Hortic Sci* 20:406–407.
- Yarborough, D. E., J. J. Hanchar, S. P. Skinner, and A. I. Ismail. 1986. Weed response, yield, and economics of hexazinone and nitrogen use in lowbush blueberry production. *Weed Sci* 34:723–729.
- Zakharenko, V. 2000. Bioeconomic methods and decision-making models for herbicide use in Russian agriculture. In *3rd International Weed Science Congress*, Foz do Iguassu, Brazil, June 6–11.
- Zakharenko, V. A. 2004. Phytosanitary condition of agroecosystems and potential yield losses from harmful organisms in agriculture under conditions of Russia’s multiform economy. *Russ Agric Sci* 5:13–18.
- Zhang, C. X., Y. Liu, H. Cui, S. Wei, and H. Huang. 2007. Herbicide usage and associated problems in China. Pp. 380–381. In *Proceedings of the 16th International Plant Protection Congress*, Glasgow, UK.
- Zhang, Z. P. 2003. Development of chemical weed control and integrated weed management in China. *Weed Biol Manag* 3:197–203.
- Ziegler, R. S. and S. Savary. 2010. Plant diseases and the world’s dependence on rice. In R. N. Strange and M. L. Gullino (eds.). *The Role of Plant Pathology in Food Safety and Food Security. Plant Pathology in the 21st Century, Vol. 3*. Springer, New York.