

•人物评传•

罗伯特·李·梅特卡夫：害虫生态治理之路的探寻者

Robert Lee Metcalf: The Explorer of the Road of Pest Ecological Management

杜常生 /DU Changsheng

(安徽师范大学历史学院, 安徽芜湖, 241002)
(School of History, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui, 241002)

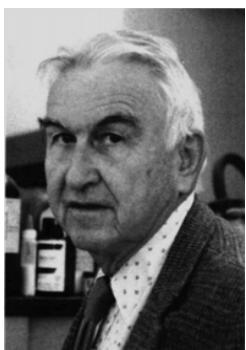
摘要: 罗伯特·李·梅特卡夫是美国著名害虫防治专家、环境毒理学家和昆虫生态学家, 他因能够在保证生态环境安全的情况下实现害虫防治而闻名。梅特卡夫在杀虫与生态相结合研究理念的指引下, 提出保持对害虫充分控制的最可行策略是有害生物综合治理 (IPM)。在20世纪下半叶由《寂静的春天》而引发的美国环境保护运动中, 梅特卡夫成为害虫生态治理之路的探寻者, 为消弭生态环保与杀虫剂使用之间的矛盾作出了巨大贡献。

关键词: 昆虫学 杀虫剂 生态治理

Abstract: Robert Lee Metcalf is a famous American expert in pest control, environmental toxicologist and insect ecologist. He is famous for his ability to realize pest control while ensuring the safety of ecological environment. Under the guidance of the research concept of combining insecticide and ecology, Metcalf proposed that the most feasible strategy to maintain adequate pest control is Integrated Pest Management (IPM). In the second half of the 20th century, under the momentum of the American environmental movement triggered by *Silent Spring*, Metcalf became a pioneer in the way of ecological pest management, making a great contribution to eliminating the contradiction between ecological protection and pesticide use.

Key Words: Entomology; Insecticide; Ecological governance

中图分类号: K815; S431 文献标识码: A DOI: 10.15994/j.1000-0763.2024.05.015



梅特卡夫

DDT (Dichlorodiphenyltrichloroethane, 全称双对氯苯基三氯乙烷) 的杀虫特性是在世界刚刚陷入第二次世界大战时被发现的, 这是“二战”期间为控制昆虫传播疾病而引入的一种新型杀虫剂。“二战”后, 美

国引进了此杀虫剂, 自此, 美国的农业迎来了“农药的黄金时代”。随着杀虫剂使用在美国的勃兴, 美国农业部和一些昆虫学家开始对这些化学品的影响和安全性表示担忧。罗伯特·李·梅特卡夫 (Robert Lee Metcalf, 1916–1998) 作为美国知名的害虫防治专家、环境毒理学家和昆虫生态学家, 以一种极具预见性和科学性的眼光, 率先向杀虫剂“发难”, 表明他对杀虫剂安全性的担忧, 并开始提倡杀虫与生态相结合的

研究理念。梅特卡夫也因其能够在保证生态环境安全的情况下实现害虫防治而闻名。

一、梅特卡夫的学习经历与职业生涯

梅特卡夫，1916年11月13日生于俄亥俄州哥伦布市，他的昆虫学家学深厚，其父克莱尔·李·梅特卡夫（Clell Lee Metcalf）及克莱尔的兄弟芝诺·佩恩·梅特卡夫（Zeno Payne Metcalf）皆为昆虫学领域研究人员。鉴于梅特卡夫在昆虫学“美妙领域”的家学背景，他自认为“将化学应用于昆虫学可能是其能做的最好的事情之一。”^[1]梅特卡夫本硕皆就读于伊利诺伊大学，他于1939年获得昆虫学学士学位，并于一年后获得昆虫学硕士学位；后又离开家乡前往康奈尔大学攻读博士学位，于1942年获得昆虫学博士学位。

尽管梅特卡夫最终因提醒科学界和公众注意农药滥用对环境的影响而赢得赞誉，但他的职业生涯始于传统的化学毒理学研究。1943年，他得到了第一份工作，在田纳西河流域管理局（TVA）担任助理昆虫学家。在那里，他主要研究改善在蓄水中对蚊子的化学控制。1943–1945年还担任过美国海军技术员，进行疟疾控制研究。1946年，他离开田纳西河流域管理局，成为加州大学河滨分校的一名教员，并于1953年晋升为正教授，1951–1963年担任该校昆虫学系主任，1963–1968年担任副校长。正是在这一时期，梅特卡夫开始认识到昆虫化学防治的一些环境和毒理学限制，尽管在他进入职业生涯的同时，合成有机杀虫剂被宣布为最终的昆虫防治剂。（[2]，p.4）1968年，梅特卡夫离开河滨分校，回到伊利诺伊州的厄巴纳，被当时的系主任克莱德·卡恩斯（Clyde Kearns）招募到昆虫学系担任教职，成为伊利诺伊大学昆虫学、生物学、环境研究和药理学教授。1969–1972年，梅特卡夫开始了为期三年的动物学系主任的工作；1971年，他被任命为生物学特聘教授。1981年，他被任命为伊利诺伊大学高级研究中心的教授，这是该机构对教师所取得成就的最高认可。1994–1996年担任加州

大学河滨分校外来害虫研究中心常驻教授、临时主任。直至1998年11月11日，在梅特卡夫82岁生日的前两天，他在伊利诺伊州厄巴纳的家中去世，就这样结束了他作为二十世纪昆虫学领域极具权威性人物的一生。

二、梅特卡夫对“杀虫剂时代”的阶段性认知

1946年DDT进入美国农业的商业引入列表。梅特卡夫将DDT杀虫剂的问世作为“杀虫剂时代”的开端。梅特卡夫认为像他这一代人经历了杀虫剂使用的三个不同阶段：1946–1962年的乐观时代、1962–1976年的怀疑时代和1976年的有害生物综合治理（IPM）时代。

在乐观时代，DDT开始进行商业使用的头几年里，这种“神奇”的化学物质不会有错。^[3]在此时期，“为达目的不择手段”成为长时间指导美国农业部昆虫防治部门的思想。（[4]，pp.120–121）正如一位历史学家所说，这是一个昆虫学家越来越多地“把化学家而不是生态学家或生物学家作为他们职业卓越的典范”的时代。梅特卡夫后来也量化了这一评估：他调查了《经济昆虫学杂志》的内容，发现与化学控制有关的文章在1950年达到76%的峰值，取代了对生物、机械或植保等防控手段的研究。^[1]值得注意的是，即使是在乐观时代，美国的一些政府官员和科学家甚至公众就已经意识到农药使用的负面影响。在1951年的“德莱尼听证会”上，国会议员一再重申他们对广泛使用DDT及其潜在健康影响的关切。但科学家和公共卫生官员们对DDT和其他合成杀虫剂的看法大相径庭。一些科学家指出，缺乏与DDT相关的有害影响的具体证据，而另一些科学家则引用了与DDT和其他化学杀虫剂有关的、影响从轻微到严重的轶事证据。然而，大多数与会者都认为，自第二次世界大战后引入这些新杀虫剂以来，它们已显著提高了作物产量，并对公众健康做出了贡献。^[5]由此可见，在此时期，DDT的拥护者仍然居于社会主流地位。

在怀疑时代，1962年卡逊《寂静的春天》

一书的出版，开启了对普遍存在的观点的公开挑战——即使用农药的收益/风险等式压倒性地倾向于收益。^[3] 卡逊在书中警示道：“在当前环境遭受普遍污染的形势下，化学药品可以改变自然界及万物生命，与辐射一样危害巨大，只是尚未为人所知。……农田、森林以及花园里喷洒的农药会在土壤中长存，接着进入生物体内，在中毒和死亡的链条中不断地传递下去。”（[4]，p.4）《寂静的春天》出版以来，毒理学和环境风险评估已成为科学家如何确定农药对环境的破坏以及对人类、野生动物和生态系统健康的威胁的主要范式。此书的出版，使杀虫剂问题充斥着当时几乎每天报纸的头条，杀虫剂在美国全国范围内成为了一个家喻户晓的词。^[6] 但也有人指出卡逊此书的一些缺陷，时任美国农业部昆虫学家和行政官员的爱德华·尼普林（Edward F. Knipling）曾指出：“尽管卡逊小姐尽职尽责地为公众服务，但她没有讨论杀虫剂对昆虫控制的好处，也没有考虑不使用杀虫剂的后果，从而让公众权衡使用杀虫剂的利弊，这是一个严重的疏忽。”^[7] 与尼普林的观点一致，美国的化学工业发言人罗伯特·怀特-史蒂文斯（Robert White-Stevens）预测了一个没有杀虫剂的可怕未来：“如果人类忠实地遵循卡逊女士的教诲，我们将回到黑暗时代，昆虫、疾病和害虫将再次统治地球。”^[8] 而就梅特卡夫而言，他对这本书有着一种复杂的感情，在他生命的最后几年，他回忆起卡逊对昆虫学家的描述，尤其是她将昆虫学描述为“石器时代的科学”，最初让他感到“被侮辱”。但这种感觉消退后，他对这本书的看法也随之发生改变。《寂静的春天》成为“他客厅里为数不多的几本书之一，喜欢拿起来反复阅读。”^[1] 梅特卡夫认为：“尽管她笼统的指责遭到许多昆虫学家的强烈不满，但这本书必须被评为二十世纪最有影响力的著作之一。”并倡议“这本书应该被所有昆虫学家阅读。”^[3]

在有害生物综合治理时代，梅特卡夫认为，杀虫剂的过度使用造成的环境污染以及对人体健康的影响已经迫切需要一种新的害虫防治理念和方法，这被称为有害生物综合治理。它寻

求将所有现有的虫害抑制技术、作物轮作技术、抗虫害作物品种技术、天敌的管理技术以及有选择性和明智地使用杀虫剂，结合到一个健全的生态框架中。这一成就有望成为所有人——包括农民、环保主义者、科学家和有关公民——都能接受的成就。^[9] 梅特卡夫认为实施有害生物综合治理策略是解决单纯依赖杀虫剂进行虫害控制所产生的多种问题的唯一切实可行的办法。有害生物综合治理为害虫防治提供了一种以生态为导向的策略，可以最大限度地提高农药使用的效益并将风险降至最低。^[10]

由上可见，20世纪40年代至80年代，随着美国“杀虫剂时代”的到来及发展，美国的政界、科学界以及公众界掀起了针对杀虫剂使用的大辩论。而这其中，不乏涌现出一些跳脱出辩论之外而致力于解决论争的“实干家”，梅特卡夫便是其中之一。

三、梅特卡夫的昆虫学事业

梅特卡夫学识渊博，尤其是在昆虫学研究领域硕果累累。他在有害生物防治和综合治理的理论和实践中做出了大量具有开创性的理论成果和实验成果。

1. 对害虫抗药性的测量及认知

害虫对药剂的自然抗性及获得抗性是化学防治及昆虫毒理学研究的中心问题。^[11] 直到1945年美国引入DDT后，害虫的抗药性才开始受到应有的关注，梅特卡夫是少数认识到对农药的使用趋之若鹜的危险性和具备这种先见之明的昆虫学家之一。最重要的是，他是第一批一丝不苟地记录害虫对杀虫剂的抗药性现象的人之一。（[2]，p.5）

20世纪50年代，由于迫切需要测量抗药性的定量方法，梅特卡夫开发了一种实验室生物测定法，使用微升涂药器精确估计LD50，即对50%样本群体的致死剂量进行评估，这项技术迅速成为该领域的标杆。除了开发抗药性的定量方法，梅特卡夫还利用他精进的化学技能开发了新的定量措施，以确定农药的代谢和环境命运。（[2]，pp.5–6）梅特卡夫认为：“从生

物学角度看，昆虫对杀虫剂的抗药性是大量使用杀虫剂对害虫进行密集的‘自然选择’所带来的进化现象。”^[12]1989年，梅特卡夫撰文指出：“在过去的40年里，昆虫对杀虫剂的抗性发展成为一个巨大的实际问题，它不仅威胁到人类控制农业害虫的能力，而且威胁到控制传播人类和动物主要疾病的昆虫媒介的能力。”^[13]为提高公众对害虫抗药性的认识，梅特卡夫还细数了杀虫剂的过度使用所产生的昆虫抗性历史，对这种杀虫剂抗性现象及抗性机理进行了学理性说明，阐明昆虫对杀虫剂的抗性对害虫防治的影响，并对管理具有抗性的昆虫提出了解决方法。他提出，“延缓或避免害虫抗性的唯一合理举措在于有害生物综合治理计划，该计划通过减少对杀虫剂的依赖性使用来降低害虫遗传抗性选择的频率和强度，或者通过天敌、昆虫疾病、培养操作和寄主-植物抗性等多种干预措施来控制昆虫种群。这些多重抑制措施协同作用，可以在大多数由杀虫剂导致的抗性突变体产生抗性后代之前摧毁它们。”^[3]由此可见，梅特卡夫是努力证明昆虫可以对化学杀虫剂产生抗药性的先驱之一，并为解决昆虫抗性问题提供了自己的见解。

2. 杀虫剂增效剂的开发

增效剂是添加到杀虫剂中的无毒化学物质，以提高其杀伤力或更广泛地说——提高其对害虫的有效性。其主要的作用模式是：增效剂是一组相对无毒的化合物，可以增强已经有效的化合物对目标害虫的毒性，从而将有毒杀虫剂的使用保持在最低水平。^[14]从20世纪50年代开始，一直持续到20世纪60年代，梅特卡夫将注意力集中在杀虫剂增效剂的开发上，因此，梅特卡夫是在不影响疗效的情况下减少农药投入方法的早期倡导者和成功实践者，这种方法与环境更兼容。（[2]，p.6）

梅特卡夫认为增效剂对昆虫学家具有切实的重要性：(1) 通过一种混合物更经济或更有效地控制昆虫；(2) 增加杀虫剂的活性谱；(3) 恢复杀虫剂对抗性昆虫的活性。除了这些重要的实际考量之外，对增效剂的基础研究使人们更好地了解昆虫的解毒机制、杀虫剂抗性所涉

及的基本生化过程以及杀虫剂的作用模式。^[15]梅特卡夫的研究有助于在不影响杀虫效果的情况下减少农药投入，这种方法对环境的破坏性较小，而且在实际应用中更为使用者所接受。有学者指出，由于梅特卡夫等人对杀虫剂和其他外源药物的毒性模式进行了广泛调查，具有特定活性的增效剂的使用如下：抑制杀虫剂的代谢解毒，促进杀虫剂通过昆虫角质层的渗透，并在杀虫剂与目标昆虫受体蛋白的结合位点起作用。^[14]由此可见，增效剂的开发主要是对提高杀虫剂的功效以及保护环境方面做出了重大贡献，尤其是在出现抗药性问题时。而在增效剂的作用模式开发方面，梅特卡夫的确充当了“先行者”的角色，为后来增效剂的开发奠定了基调。

3. 模式生态系统的开创

20世纪70年代，梅特卡夫开创了可能是证明农药对环境影响的最有效工具——模式生态系统。正如他在1971年所说，“环境灾难的威胁已经表明，我们再也无法通过一到二十年的大规模使用来了解农药的环境行为。我们需要一种现实的实验室方法来筛选拟议中的新型农药，以了解其环境命运。”^[16]梅特卡夫对这个问题的极佳解决方案是在实验室里创造一个微型生态系统模型——一个微观世界。在一系列封闭的水箱中，梅特卡夫设计了一个自给自足的生态系统，正如他所描述的那样——“一个盒子里的伊利诺伊州农场池塘。”（[2]，p.7）微宇宙技术的使用无疑为了解化学物质对环境质量的影响做出了重大贡献，更重要的是，它提供了一种将农药的消极影响降至最低的实验工具。

模式生态系统的最终目的是作为一个单一的生活单元，深入研究环境的生物降解性。其结果的可重复性非常重要，因为即使是这个简单的生态系统也比任何单个实验动物或动物群复杂的多。同时，模式生态系统技术是精确的，可以观察和研究农药在系统各个元素中的代谢转化。该方法很好地估计了农药降解产物对多种生物的潜在毒性。除此以外，该系统在筛除有潜在不利影响的候选农药方面是有用的。^[16]

再者，在实地研究中证明降解是困难的，这既是因为所需的时间较长，也是因为证明代谢物和农药本身降解的复杂性。通过在陆生水生实验室模式生态系统中评估放射性标记的农药，可以解决这些困难，该模式生态系统提供了有关母体化合物及其代谢物的持久性、生物累积性和降解的定性和定量数据。^[17]有学者指出：“梅特卡夫创建了一个模式生态系统，使用该系统可以提供有关化合物生态特性基本信息。这些信息可以在几个月内获得，与生态学家在20年内收集的关于DDT的信息具有相同的涵义和适用性。在开发新农药的任何努力中，新的测试都应该是强大的预筛选工具，它将保留最佳可用化合物的高度理想特性，同时规避它们所带来的消极影响。事实上，也许稍作修改，模式生态系统应该可以适用于任何可能进入环境的化学物质。”^[18]由此可见，模式生态系统技术使新的农药和其他工业化学品的环境可接受性的预筛选成为可能，并成为了生态灭虫技术领域的关键一环。

四、梅特卡夫的中国之行

据梅特卡夫所言：“自1949年以来，没有美国昆虫学家访问过中国大陆，只有少数关于中国昆虫学发展的传闻通过其他国家的游客发布的帖子传到了我们这里。”^[19]但庆幸的是，继中美间二十余年的知识封锁之后，中美关系的松动使两国的昆虫学专家得以“面对面”的交流，这也成为了中美关系缓和后双方民间科技交流的一部分。

1. 跟随“美国昆虫防治代表团”访华

1975年8月3日至8月28日，由九名科学家、一名谙熟中国历史的教授、一名美国国务院官员和一名美中学术交流委员会(CSCPRC)工作人员组成的“美国昆虫防治代表团”访华并在中国停留了4周。代表团是美中学术交流委员会所组织，戈登·E. 盖伊(Gordon E. Guyer)任主席，梅特卡夫任副主席。^([20], p.iii)代表团访问中国的主要目的是交流关于控制农作物害虫的信息。虽然被邀请的美国科学家代

表了应用昆虫学的系列领域，但大多数都在积极发展和促进有害生物综合治理。委员会很难选出比梅特卡夫更批评过度依赖化学控制或更支持有害生物综合治理的杀虫剂专家。^[1]

代表团临行前被告知“中国昆虫学家和美国昆虫学家一样，经历了完全依赖杀虫剂来控制害虫的挫败感：害虫对杀虫剂的抗药性急剧增加；农业生态系统的变化导致次生有害生物的破坏性复合体；广泛使用有毒农药造成的人类健康问题；食物、水、空气和土壤污染；并稳步降低虫害防治措施的效益-成本比率。”^[19]但就中国而言，20世纪60年代中期，中国就已进入害虫的“初级综合防治”阶段，为了减少化学农药使用，提出了以农药防治、物理防治、生物防治和化学防治相结合的综合防治策略。^[21]缺乏化学杀虫剂以及对抗药性和毒性的担忧，促使中国科学家和农业官员探索其他害虫控制解决方案，包括生物控制（培养天敌、寄生昆虫和利用害虫的疾病）和栽培防治（调整种植方法以中断害虫的生命周期），此种方式在国外的环保主义者看来是“先进的”。^[22]这引起了美国昆虫学家的关注，他们面临着越来越多的害虫抗性以及越来越多的证据表明农药对环境的消极影响。他们在寻找灵感和证据，以促进他们推广新的和更好的治虫方法。这也有助于他们在中国积极寻求病虫害综合治理经验。^[23]

“美国昆虫防治代表团”在中国行程约4700英里，他们访问了大学、研究所、社区、生产队、农田、市场和工厂。他们的任务是尽可能多地了解中国的昆虫防治理念和实践，并与中国科学家、学生、农业专家和农民的代表团交换意见。^[19]梅特卡夫跟随代表团行至东北地区、北京、西安、上海、湖南、广东等地。代表团认为，在当时的中国，“控制害虫对作物的损害和未来可能开发的抗虫谷物品系具有真正的意义，特别是因为中国当时广泛使用的复种和间种技术往往使植物保护方法复杂化。改善昆虫防治质量是中国提高粮食产量的一个关键途径。”(^[20], p.8)

2. 梅特卡夫对中国虫害治理的观察

1975年，梅特卡夫跟团前往中国，与中国进行了第一次科学上的交流。在抵达中国之前，“美国昆虫防治代表团”就已经听说了中国扫除“四害”运动的报道。梅特卡夫决定自己数一数，了解一下除“四害”运动的效果。他特别关注苍蝇：每次看到苍蝇，他都会立即将其记录在日记中。如果他看到一只苍蝇，他会写下“1d”；如果是两只苍蝇，就写“2d。”（“d”指代“diptera”——双翅目）^[23]代表团的报告指出：“我们参观的地区管理的很好，没有发现苍蝇在污秽中繁殖的严重问题。群众动员和卫生教育项目在控制家蝇方面非常有效。（[20], p.72）因此，包括梅特卡夫在内的代表团成员认为：中国高度重视植物保护，综合治理已经在许多公社得到越来越多的推广和实施。中国正在努力将病虫害防治与农业总产量计划结合起来，所有活动都旨在确保丰收。并认为：中国人在对综合防治的广泛热情以及在应用许多对其发展至关重要的生态原则方面，已经超越了美国的水平。（[20], pp.141–142）

就中国具体情况而言，我国政府在1975年的全国植物保护工作会议上确立了“预防为主，综合防治”的病虫害防治方针。综合防治不仅考虑害虫本身，同时将包括寄主生物、天敌昆虫在内的整个农田生态系统考虑进来，充分发挥抗性品种、栽培、生态等多种因素的作用，采用最合理的综合性策略开展害虫防治。^[24]在此情势下，DDT正在被淘汰使用，主要原因是它与综合防治方案不相容、它在环境中的持久性存在以及昆虫对它的抗药性。正如梅特卡夫回国后所写的那样：“我们对中国大规模利用综合防治的情形完全没有准备”^[19]梅特卡夫还认为：“有害生物综合治理在中国的地位比世界上任何其他地方都要高，它为农业生产和作物保护带来了稳定的、有时甚至是惊人的成功。”^[25]

3. 中国之行的“回响”

梅特卡夫在造访完中国后，对中国治虫进行了写实性描述：

如今，中国在为其10亿人口生产粮食方面基本实现了自给自足，而这个国家的面积仅略大于美国。中国只有11.5%的土地是可

耕地（而美国有18%的可耕地）。大约85%的中国人从事农业，我们观察到，几乎所有人都对害虫的肆虐表示担忧。醒目的深红色路标上写着：“消灭苍蝇、蚊子、老鼠和臭虫这‘四害’。”……中国无论是城市还是农村，目前都是世界上最清洁的社会。^[19]

在美国昆虫学会1975年举行的会议上，参会人员对中美这两个世界大国的昆虫防治策略进行了有趣的比较。在此次会议上，梅特卡夫和几位代表分享了他们在中国的发现。据加州大学伯克利分校的昆虫学家罗伯特·范登博施（Robert Van den Bosch）的记载，有2000人参加了这次发布会，并听到代表们兴奋地报告了中国在减少农药使用和寻求综合防治方法方面所做的努力。就当时而言，中国的虫害防治系统似乎比美国的更有优势。^[26]正如梅特卡夫所言：“与中国昆虫学家的科学交流项目在害虫防治基本原理的细节掌握和其他更广泛的方面都是有益的。令人鼓舞的是，在中国和美国，害虫生态防治的理念已经独立发展，这些理念完全适用于大规模付诸实际。同样具有启发性的是，中美两国都认识到了由滥用农药引起的相同问题，这些问题需要在国家层面上通过立法加以纠正。”^[19]

结语

杀虫剂问题牵涉诸多方面，不仅涉及到经济问题、政治问题、社会问题、环境问题，同时还涉及到伦理问题。而这些问题中或多或少都牵涉着杀虫剂的使用与生态环境保护之间的关系问题。回顾“人虫大战”的历程，人类似乎从未取得真正的胜利。而在这一次次“战争”中涌现出一批抗击虫害的卫士，梅特卡夫就是其中的杰出者——并被认为是二十世纪领先的昆虫学家之一。梅特卡夫在其一生中扮演着多重角色：首先，作为国际上知名的昆虫学家，他的研究成果深刻地影响了环境科学的发展进程；其次，作为国际机构和美国联邦政府的专家顾问，他曾多次在听证会上建言献策；最后，作为生态治虫理念的倡导者，梅特卡夫致力于

实现与环境兼容的害虫治理目标，多年来一直秉持着在生态研究理念的指引下实施环境可持续的害虫防治举措。

[参考文献]

- [1] Schmalzer, S. 'Insect Control in Socialist China and the Corporate United States: The Act of Comparison, the Tendency to Forget, and the Construction of Difference in 1970s U.S. – Chinese Scientific Exchange'[J]. *Isis*, 2013, 104(2): 303–329.
- [2] Berenbaum, M., Lampman, R. *Robert Lee Metcalf 1916–1998, Biographical Memoirs: Volume 80*[M]. Washington, D. C.: The National Academies Press, 2001.
- [3] Metcalf, R. L. 'Changing Role of Insecticides in Crop Protection'[J]. *Annual Review of Entomology*, 1980, 25: 219–256.
- [4] 蕾切尔·卡逊：寂静的春天[M]. 许亮译, 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
- [5] Davis, F. R. *Banned: A History of Pesticides and the Science of Toxicology*[M]. New Haven & London: Yale University Press, 2014, 121.
- [6] Gunther, F. A. *Residue Reviews / Rückstands-Berichte*[M]. New York: Springer, 1971, 104.
- [7] Kinkela, D. *DDT and The American Century: Global Health, Environmental Politics, and the Pesticide That Changed the World*[M]. Chapel Hill: The University of North Carolina Press, 2011, 106.
- [8] Lytle, M. H. *The Gentle Subversive: Rachel Carson, Silent Spring, and the Rise of the Environmental Movement*[M]. New York: Oxford University Press, 2007, 183.
- [9] Pimentel, D., Lehman, H. *The Pesticide Question: Environment, Economics, and Ethics*[M]. New York and London: Routledge, Chapman & Hall, Inc, 1993, 430.
- [10] Metcalf, R. L. 'Benefit/risk Considerations in the Use of Pesticides'[J]. *Agriculture and Human Values*, 1987, 4: 15–25.
- [11] 赵善欢. 农业害虫化学防治研究的现状及今后发展方向[J]. 植物保护学报, 1962, 1 (4) : 351–364.
- [12] Georghiou, G. P., Saito, T. *Pest Resistance to Pesticides*[M]. New York and London: Plenum Press, 1983, 704.
- [13] Metcalf, R. L. 'Insect Resistance to Insecticides'[J]. *Pesticide Science*, 1989, 26: 333–358.
- [14] B-Bernard, C., Philogène, B. J. R. 'Insecticide Synergists: Role, Importance, and Perspectives'[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health: Current Issues*, 1993, 38(2): 199–223.
- [15] Metcalf, R. L. 'Mode of Action of Insecticide Synergists'[J]. *Annual Review of Entomology*, 1967, 12(1): 229–256.
- [16] Metcalf, R. L., Sangha, G. K., Kapoor, I. P. 'Model Ecosystem for the Evaluation of Pesticide Biodegradability and Ecological Magnification'[J]. *Environmental Science & Technology*, 1971, 5(8): 709–713.
- [17] Francis, B. M., Lampman, R. L., Metcalf, R. L. 'Model Ecosystem Studies of the Environmental Fate of Five Herbicides Used in Conservation Tillage'[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1985, 14: 693–704.
- [18] Hayes, W. J. *Essays in Toxicology 5*[M]. New York and London: Academic Press, 1974, x.
- [19] Metcalf, R. L. 'China Unleashes Its Ducks'[J]. *Environment*, 1976, 18(9): 14–17.
- [20] National Academy. 'Insect Control in the People's Republic of China: A Trip Report of the American Insect Control Delegation'[R]. Washington, D. C.: National Academy of Sciences, 1977.
- [21] 程家安、祝增荣. 中国水稻病虫草害治理60年: 问题与对策[J]. 植物保护学报, 2017, 44 (6) : 885–895.
- [22] Schmalzer, S. *Red Revolution, Green Revolution: Scientific Farming in Socialist China*[M]. Chicago and London: The University of Chicago Press, 2016, Introduction, 12–13.
- [23] Schmalzer, S. 'Speaking About China, Learning from China: Amateur China Experts in 1970s America'[J]. *The Journal of American-East Asian Relations*, 2009, 16(4): 313–352.
- [24] 萧玉涛等. 中国农业害虫防治科技70年的成就与展望[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56 (6) : 1115–1124.
- [25] Metcalf, R. L., Kelman, A. 'Integrated Pest Management in China'[J]. *Environment*, 1981, 23(4): 6–13.
- [26] Bosch, R. V. D. *The Pesticide Conspiracy*[M]. Berkeley & Los Angeles & Oxford: University of California Press, 1978, 147–148.

[责任编辑 王大明 柯遵科]