

农业生态学的新视野*

林文雄^{1,2} 陈 婷² 周明明²

(1. 福建农林大学作物遗传育种与综合利用教育部重点实验室 福州 350002;

2. 福建农林大学农业生态研究所 福州 350002)

摘 要 本文综述了我国农业生态学的发展过程与演化特点,并站在国际视野上分析了现代农业生态学发展趋势,着重提出农业生态学正从宏观与微观两个层面不断拓展,并把研究引向深入。从宏观层次上讲,农业生态学正从已往的宏观农业生物学层面逐步深入到“三农”的社会学层面,研究水平从以往关注农业生态系统结构与功能的关系逐步发展到人们普遍关心的食物系统(food system),即从生态经济学角度研究农业生态系统能物流形成与运转对经济社会发展的影响以及社会政策法规对食物系统的调控作用。也就是说,现代农业生态学越来越重视人类社会生态觉醒对保护农业生态系统环境,促进无污染生产及市场营销的重要作用。因此,在当代西方国家,许多农业生态学工作者十分重视通过各种社区运动(movement)或行动(action)来促进政府、生产部门、销售部门以及相关管理部门接受农业生态学思想,自觉按照生态规律办事,保证食物生产系统健康高效运行,这已成为现代农业生态学教学科研和生产实践的重要内容,涉及科学理论研究-实验示范推广-各种联盟运动推进-社会公众自觉参与等全过程,体现了现代农业生态学的时代特征。从微观层次上讲,现代农业生态学正进入农业分子生态学时代,它借助现代生物学的发展成就,运用系统生物学的理论与技术,深入研究农业生态系统结构与功能的关系及其分子生态学机制。特别是随着现代生物技术的不断完善,环境(宏)基因组学、蛋白质组学技术的问世,极大地推进了人们对未知生物世界的认知,尤其是对生物多样性和基因多样性的深层次剖析,使得农业生态学能从分子水平上深入研究系统演化的过程与机制,促进从定性半定量描述向定量和机理性研究推进。客观上要求农业生态学工作者必须与时俱进,不断完善自己的知识结构,提高现代科学研究技能,只有这样才能自觉接受新的科学知识,促进传统科学向现代科学提升。本文特以例证分析了这一科学发展的必须性和重要性,旨在引发广大同行的反思与共鸣。

关键词 农业生态学 发展过程 现代视野 食物系统 分子农业生态学

中图分类号: S181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)03-0253-12

New dimensions in agroecology

LIN Wen-Xiong^{1,2}, CHEN Ting², ZHOU Ming-Ming²

(1. Key Laboratory for Genetics, Breeding and Multiple Utilization of Crops, Ministry of Education, Fujian Agriculture and Forest University, Fuzhou 350002, China; 2. Institute of Agroecology, Fujian Agriculture and Forest University, Fuzhou 350002, China)

Abstract The authors reviewed the developmental history and characteristics of agroecology, and pointed out that the research areas of agroecology were broadening in both macroscopic and microscopic aspects, and the researches were going more deeply. On the macroscopic level, the investigation of agroecology was expanding from a pure macroscopic study of agricultural biology to a sociological study concerning the issues related to agriculture, farmer and rural areas. The research works shifted from the relationships between structure and function of agroecosystem to the food system. The major task was to study the impacts of the energy and material flow in agroecosystem on the social and economic development, and the regulation of food system by policy and laws from the eco-economic perspective. Modern agroecology emphasized the awakening of social ecological consciousness and the important role of ecological consciousness which played great roles in the protection of argoecosystem and the promotion of pollution-free production. Therefore, in western countries, community movements or actions were important ways that agroecologists relied on to make government, production units, sell units and administrations accept the agroecological concepts, act in compliance with

* 国家自然科学基金项目(30971737)和教育部博士点基金项目(20093515110009)资助

林文雄(1957—),男,博士,教授,主要从事农业生态学研究。E-mail: wenxiong181@163.com

收稿日期: 2012-01-26 接受日期: 2012-02-03

agroecological laws and ensure the health and efficiency of the food system. These activities had become essential subjects in the education, research and practice of modern agroecology, which involved all processes in agroecology, including scientific research, demonstration and its extension of experiments, promotion by society or association actions, spontaneous participation of publics. All these efforts embodied the feature of the modern agroecology.

On the microscopic level, modern agroecology was entering the age of molecular agroecology. Molecular agroecology employed the state-of-art techniques of modern biology and introduced the theories and assays from systems biology to unveil the underlying relationships and mechanisms of the structure and function of agroecosystem. With the development of modern biology techniques, especially the breakthroughs of environmental (meta-) genomics and proteomics, molecular agroecology largely enriched our knowledge of the unknown biological world. The ability to analyze biodiversity and genetic diversity in depth enabled molecular agroecology to examine the processes and mechanisms underlying ecosystem development on the molecular level, which fueled the transformation of agroecology from a qualitative and half-quantitative study into a quantitative and mechanism study. This change urged the agroecologists to keep pace with the times. The agroecologists needed to improve their knowledge structure and scientific research ability in order to follow the transformation of agroecology from traditional science into modern science. This article took many case-studies as examples to demonstrate the necessity and importance of this scientific development, and aimed at inspiring introspection and thinking among peers.

Key words Agroecology, Developmental processes, Modern perspectives, Food system, Molecular agroecology

(Received Jan. 26, 2012; accepted Feb. 3, 2012)

农业生态学(agroecology)自诞生以来经历了农业生态学的起始阶段(starting phase of agroecology, 1930s—1960s)、农业生态科学的扩展阶段(expansion of agroecology as a science, 1970s—1980s)、农业生态学的完善与巩固阶段(institutionalization and consolidation of agroecology, 1990s)和农业生态学研究与应用的新视野(new dimensions in agroecology, 2000—)4个发展阶段^[1-2], 研究范畴正从宏观和微观两个方向发展, 研究水平也从定性描述向定量机理性发展, 研究内容则紧紧围绕人类紧密相关的农业生物多样性重建、保护与利用, 食物系统的能流、物流和价值流形成的生态经济学原理与运行机制等展开, 因此, 农业生态学已成为一门联系农业科学、社会科学和生态科学的桥梁科学。本文特就现代农业生态学研究与应用的新视野作个综述, 并通过例证分析阐明这一科学发展趋势的重要性与现实意义。

1 现代农业生态学的概念与内涵

首次使用农业生态学一词(agroecology)可见于俄罗斯农学家 Bensin 于 1928 年写的论文中。他认为生态学方法在农作物研究中的应用就是农业生态学^[3]。20 世纪 50—60 年代, 德国动物学家 Tischler^[4]应用农业生态学研究在特定环境中的害虫管理问题, 并分析了土壤生物学、昆虫种群互作和农业景观, 包括非栽培生境中的植物保护等悬而未决的问题。1965 年他首次出版了以农业生态学为题的专著, 分析了农业生态系统内不同组分包括植物、动物、土壤、气候及其互作和人类农业管理对这些组分的影

响, 强调了生态学, 特别是农田或农业生态系统水平上的生物互作与农业管理的综合即农学的结合。可算是一本农业生态学最早的教科书。在此期间, 意大利科学家 Azzi^[5]也引用了 agricultural ecology 一词, 并把它定义为研究环境、气候、土壤的物理特性以及与农作物发育, 即作物产量与质量的关系, 但没有涉及病虫害方面。法国农学家 Henin^[6]尽管没有提到农业生态学一词, 但他把农学(agronomy)定义为生态学在植物生产和农业耕地管理中的应用。显然, 这一概念实际上与 Bensin 所定义的农业生态学相差无几。进入 20 世纪 70 年代后, 工业革命催生了无机农业, 并迎来了第 1 次以矮化高产育种为主要内容的所谓的绿色革命, 促进了农业集约化和专业化的发展, 大大提高了劳动生产率和土地生产率, 极大地缓和了人口增长对粮食需求的压力。但也给农业带来了许多新的、亟待解决的问题。一方面由于品种推广单一化带来了农业生态系统生物多样性下降, 系统功能脆弱, 使作物抵抗逆境胁迫能力下降, 容易引起病虫害猖獗, 造成农药使用量加大, 生产成本增加, 污染环境严重; 另一方面, 由于采用作物集约化生产技术, 高产需要高投入, 由于管理不当, 造成生产越多, 投入越多, 污染也越多, 陷入恶性循环。据了解, 美国 31 个州存在化肥污染地下水的问题, 农村饮用水中 63%被农药污染, 每年流失的土壤高达 31 亿 t, 由土壤流失造成的直接和间接经济损失每年超过 400 亿美元。我国虽农业机械化程度不如发达国家, 但在化肥农药使用量上有超之而无不及。根据 2 214 个申请保护品种、200 个主要推广品种、71 个超级稻品种的系谱来源的分

子标记测定,我国主产区籼稻品种间的最大遗传相似性达到 99.8%,亲缘关系很近,遗传背景非常狭窄。目前生产上种植的杂交水稻的不育系绝大部分是“野败型”,而恢复系大部分为从国际水稻所引进的 IR 系统。可见品种单一化和遗传多样性退化问题在我国也十分严重。因此农业生态系统功能也十分脆弱,病虫害严重,农药化肥使用量大,利用率不高,使用效果也不好,严重污染环境,影响产品质量。据报道,近 20 年我国受重金属污染的农田面积增加了 14.6%,已近 2 000 万 hm^2 , 占总耕地面积的 1/6。农业部发布的全国污灌区调查结果表明,在约 140 万 hm^2 的污水灌区中,受到重金属污染的土地面积约占污水灌溉总面积的 64.8%。其中轻度污染的占 46.7%,中度污染的占 9.7%,重度污染的占 8.4%。人们开始反思这种西方发达国家所推崇的石油农业。这时的农业生态学所关注问题不单单是聚焦农作物与自然环境的生态学关系的农学问题,而是拓展到聚焦由人们的生产观和价值观所引起的带有环境科学性质的生态学问题,研究的内涵与外延都发生了相应的变化。因此,进入 20 世纪 90 年代后,农业生态学思想得到迅速发展,出版了许多新的农业生态学书籍。比较有影响的要算是 Altieri 所著的《农业生态学: 可持续农业科学》^[7], Gliessman 所著的《农业生态学: 可持续农业的生态学过程》^[8]和《农业生态学: 可持续食物系统的生态学》^[9]。Altieri^[7]在他的书中把农业生态学定义为生态学原理和方法在可持续农业生态系统设计与管理中的应用科学,也是提供合理评价农业生态系统复杂性的理论基础。Gliessman^[8-9]发展了 Altieri 的农业生态学概念,即把农业生态学定义为应用生态学原理和方法设计与管理可持续食物系统的科学。显然,这一时期的农业生态学研究对象和系统边界已由以往的一块农田发展到整个农业生态系统乃至涉及全球食物生产、分布和消费网络的食物系统,探讨的问题涉及生态学、经济学和社会科学各个层面。Francis 等^[10]甚至认为农业生态学就是食物系统的生态学,强调了生态学原理及系统思想在农业生态学中的重要作用。他认为农业生态学对农业和食物生产所阐述的广度和深度远远超过了该领域对新技术的简单应用。因此农业生态学已发展成为联系农学与生态学、社会科学的桥梁。

20 世纪 70 年代末—80 年代初,农业生态系统思想开始引入我国,此时,不少学者研究并分析了农业存在问题的各种历史起因,反思了石油农业的功过是非,由此产生了旨在克服石油农业的石油特

征的各种更替农业思潮,促进了农业生态学的研究与应用。1986 年吴志强^[11]出版了《农业生态基础》一书,提出了农业生态学是根据生态学的基本原理,应用系统分析方法研究农业生态系统结构与功能,以获得最大系统生产力和最佳生态效果为目的的综合性科学。该书全面接受 Odum 的生态系统思想,站在福建区域农业生态系统角度,较为系统地分析了农业生物及其与环境的关系,提出了提高农业生态系统生产力的途径与措施,算是我国最早出版的教科书。1987 年,骆世明等^[12]出版了《农业生态学》一书,提出农业生态学是应用生态学和系统论的原理和方法,把农业生物与其自然和社会环境作为一个整体,研究其中的相互联系、协同演变、调节控制和持续发展规律的科学,首次比较完整地阐明了农业生态学的概念与内涵。该书加印 4 次,发行近两万册,成为我国较有影响的教科书之一,对于促进农业生态学的人才培养和科学研究起到重要作用。

进入 21 世纪以来,农业生态学也进入快速发展时期,学术思想活跃,研究视野从宏观向微观同时发展,研究手段先进,发表的高水平论文增多,研究成果显著,农业生态学已发展成为人们普遍关注的学科。从宏观层次上讲,现代农业生态学正从已往的宏观农业生物学层面逐步深入到“三农”的社会学层面,研究水平从以往关注农业生态系统结构与功能的关系逐步发展到人们普遍关心作为全球食物生产、分布和消费网络的食物系统(food system),即从生态经济学角度研究农业生态系统能物流形成与运转对经济社会发展的影响以及社会政策法规对食物系统的调控作用。也就是说,现代农业生态学越来越重视人类社会生态觉醒对保护农业生态系统环境,促进无污染生产及市场营销的重要作用。因此,在当代西方国家,许多农业生态学工作者十分重视通过各种社区运动(movement)或行动(action)来促进政府、生产部门、销售部门以及相关管理部门接受农业生态学思想,自觉按照生态规律办事,保证食物生产系统健康高效运行,涉及科学理论研究—实验示范推广—各种联盟运动推进—社会公众自觉参与等全过程,这已成为现代农业生态学教学科研和生产实践的重要内容。从微观层次讲,现代农业生态学正进入分子农业生态学时代,它借助现代生物学的发展成就,运用系统生物学的理论与技术,深入研究农业生态系统结构与功能的关系及其分子生态学机制。特别是随着现代生物技术的不断完善,环境(宏)基因组学、蛋白组学技术的问世,极大地推

进了人们对未知生物世界的认知，尤其是对生物多样性和基因多样性的深层次剖析，使得农业生态学能从分子水平上深入研究系统演化的过程与机制，

促进从定性半定量描述向定量和机理性研究推进，体现了现代农业生态学的时代特征和发展新思维（图 1）。

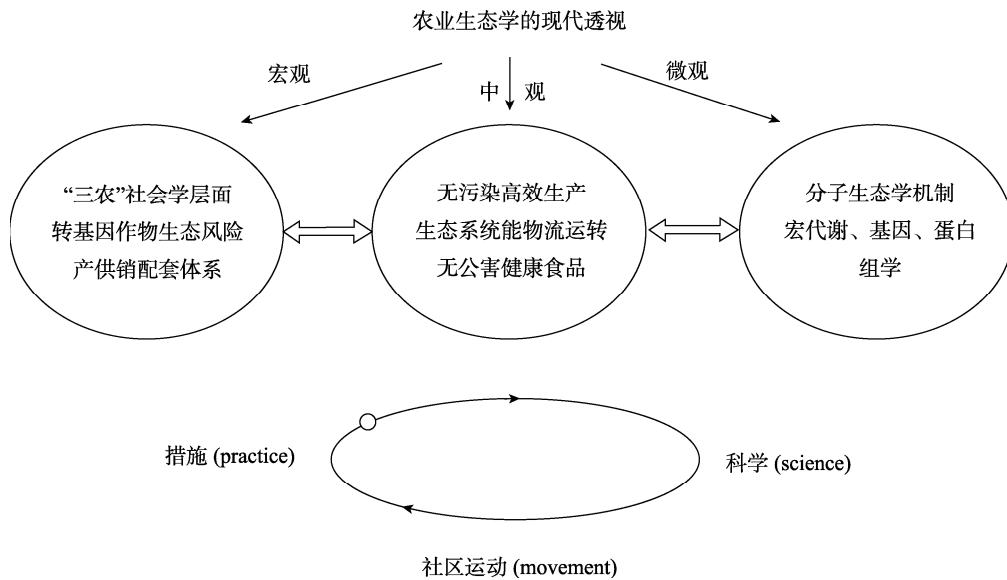


图 1 农业生态学的研究水平与研究内容
Fig. 1 Research levels and its contents of agroecology

2 现代农业的生态学新思维

从农业生态学的概念与内涵看，农业生态学是农业实现可持续发展的理论依据与技术支撑。从研究的对象和边界看，20 世纪 70—80 年代农业生态学主要聚焦于一个小区或一块农田甚至整个农场上农业生物及其与自然环境的关系，20 世纪 80 年代—21 世纪初农业生态学则更加关注景观农业生态系统乃至整个生产和食物系统的生态学问题。进入 21 世纪初，农业生态学超越了农田或农场的具体空间界限，扩展到多维的食物系统，强调应用多学科综合的系统分析方法，开展了包括食物生产、加工、市场、经济和政策决策以及消费者生活习惯等方面的综合研究。因此在西方，有一些学派认为农业生态学是一门科学，它强调研究如何实现和保持农业生态系统或食物系统可持续发展的原理与技术，也有一些学派认为农业生态学是生态学原理在农业中的应用或是实现农业可持续发展的政策主张或技术行动，旨在恢复或保持农业生态系统健康运行，实现可持续发展。但不管是采用何种研究途径，他们的共同点就是通过研究、比较和应用自然生态系统的复杂性和持续性的原理和方法进行可持续农业生态系统的设计，并通过制度改革，政策宣传、市场调控、消费引导、意识树立等群众运动和社区行动等过程进行农业生态系统的服务与管理，保证系统的可持续性。然而，Clements 等^[13]指出当前推行的作物生产技

术无法实现在不失农业生态系统的生物学复杂性的同时，满足整个世界对食物的需求而不危及生命支持系统的可持续性。对此他强调提出农业生态学家们应重视采纳一个关键策略，那就是通过系统研究和认真比较农业生态系统和自然生态系统结构与功能，并把自然生态系统的优良特性综合应用于农业实践上，通过这一过程，传统农学就可以提升改造为现代农业生态学。因此，就这个意义上讲，现代农业就是应用生态学或生态农业，也可以说是食物系统生态学，体现了现代农业的生态学新思维，这也是现代农业的发展趋势与基本特征。Clements 等^[13]对此作了如下总结。

2.1 现代农业的思维哲学观

现代农业是用生态学原理和技术提升的环境健全(sound)、经济可行(viable)和社会接受(acceptable)的可持续农业(sustainable agriculture)，这种定位有别于常规农业或石油农业，它强调生态文明、经济文明和社会文明的高度统一，重视综合应用生物学知识和新文化理念设计(重建)和管理农业生态系统。已如上述，自 20 世纪 60 年代第一次绿色革命席卷全球，当时由于采用高产品种、机械灌溉、化肥农药以及现代管理技术，据估计从 1996—2000 年，发展中国家的农民多生产出了 8~22 亿 t 粮食，挽救了约 10 亿处于饥荒状态的人口。采用这种集约化的作物生产技术既可以提高粮食生产能力，减少营养不

良人口, 又能避免过度开发, 有效保护自然资源, 从而驱动了农业和农村的发展。但获得这些成就是要付出沉重的代价的。许多国家由于长期集约耕作, 造成肥沃土壤表层变薄, 地力衰退, 地下水资源耗竭、病虫害猖獗, 生物多样性降低, 环境及产品污染严重, 以至不少人质疑地球上究竟还有多少净土和我们还能生产出多少放心食品? 但我们别无选择, 只有不断提高生产集约化水平, 才能面对人口日益增长的现实(据估计到 2050 年人口将达 92 亿), 陷入了严重的恶性循环之中。然而, 现行这种集约化作物生产技术范例(paradigm)满足不了新千年的挑战。为了增长, 农业必须学会保护, 即应走低耗费、高产出, 少污染、可持续之路, 这是现代农业新的哲学范式。以往那种集约化生产, 背后蕴含着巨大的资源浪费与环境污染, 显然是不可持续的。据报道在南非农民们采用少耕免耕法、禾谷类作物与豆科作物轮作间套种等简单的保护性农业技术, 并结合精准定位(precision placement)给水给肥和科学病虫害防治等田间栽培管理技术, 不仅使玉米的营养吸收量提高了 2 倍, 产量提高了 6 倍, 而且化肥农药使用量大幅降低, 水分需要量下降 30%, 能量消耗减少高达 60%, 与常规农业形成了鲜明的对比。因此 FAO 专家呼吁采用保护性农业(conversion agriculture, CA)、建立健康稳定的农业生态系统完全能够使发展中国家大约 25 亿低收入农民家庭实现高产并保证有足够的储蓄用于健康与教育费用^[14]。

2.2 现代农业的生态整体性

上已述及, 现代农业是应用生态学原理与技术设计和管理的可持续农业。因此如何合理设计和科学管理农业生态系统, 以实现食物系统的可持续发展, 是现代农业研究的重要内容。随着人类对自然资源消耗的持续增加, 恢复退化的农业生态系统并科学管理和有效利用自然资源受到普遍关注。人们逐渐认识到常规农业片面追求持续最大产量的观点是不科学的, 只有树立和坚持农业生态系统功能的可持续性才是现代农业所追求的目标。因此, 必须重视和加强农业生态系统的科学管理, 应把农业生态系统作为整体, 彻底转变资源利用方式, 加强系统要素的科学管理, 促进从单一资源管理的传统方式向多元资源管理的现代经营方式转变, 保证体现生态系统的整体性功能^[15]。Bohlen 等^[15]把生态系统管理定义为: “调节生态系统的内部结构和功能、特别是输入和输出实现社会所期望的状态”, 即强调在维持人类文明的同时, 保持自然多样性和景观生产力。要达到这一目的, 就要对农业生态系统进行总

体思考、综合利用和科学管理, 而不是对农业自然资源的简单利用。要清醒地认识到农业自然资源是构成农业生态系统重要要素, 农业资源的可持续利用是农业实现可持续发展的重要途径。因此, 在进行现代农业的设计与实践中, 必须充分认识资源的有限性和可更新性特点, 合理开发与利用农业自然资源, 做到增长与保护同步, 体现现代农业的生态整体性特色。现代农业的生态整体性的内涵主要包括: (1)人与自然的协调性。在特定的区域环境中, 人与自然的的关系密不可分, 他们共同构成了一定规模尺度的区域农业生态系统, 即共同存在于同一个生态整体中, 这一点与我国传统的“天人合一”自然哲学思想相一致。这就要求我们在实施现代农业系统管理时, 必须兼顾人与自然的协调发展, 即必须根据资源的可更新性与否, 按照资源可承载能力, 合理控制人口增长, 科学开发与利用自然资源, 并实行增长与保护同步政策, 保证人与自然健康协调发展。(2)生物与非生物因素的统一共存性。在进行现代农业的生态系统管理实践中, 必须认识到任何农业生态系统都是由多种生物和非生物因子相互作用, 互相联系形成的有机整体, 该系统会在特定环境条件下充分体现其特有的组成、结构和功能。因此, 必须重视农业生态系统中任何一个组成部分, 否则, 必然会割裂系统内各组分的有机联系, 从而破坏农业生态系统的完整性, 最终导致系统功能的不可持续。(3)系统发展的阶段性。因为农业生态系统是个有生命的复杂系统, 其系统形成与发生发展存在明显的阶段性特征。任何一个农业生态学系统都是不断发展变化的, 在每一个时间节点上, 农业生态系统的现状都是发展变化过程中的阶段性反映, 是农业生态系统在特定时空条件下的暂时结果, 但不是系统功能的最终体现。因此, 在现代农业的实践中, 只有坚持农业生态系统的动态发展观点, 才能够把握好系统的生态整体性内涵, 达到科学管理和合理利用农业生态系统的目的。(4)三大效益的统一性。现代农业的生态系统管理不仅突出农业自然资源的生态服务功能, 而且也强调对人类社会的利用价值, 包括产品功能、文化价值、旅游功能等等。必须清醒地认识到, 人类作为农业生态系统的管理主体, 必然会带有主观色彩, 对农业生态系统进行物质索取是其目的之一。但是, 也要求人类利用科学研究成果作指导, 在开发利用自然资源的同时作出最小损害农业生态系统整体性的管理选择, 实现系统生态、经济和社会三大效益的高度统一。(5)系统内各管理主体的高度协作性。由于农业生态系统管理最

终还是由政府、组织、个人等各种类型的主体来实施的，因此，必然要体现出各管理主体的管理水平和意志，而不同主体间的差异往往很大，有时甚至在管理的要求、目的等方面大相径庭，因此，只有保证各主体间的高度协作，才能体现系统的生态整体性功能，否则，必然导致农业生态系统管理的失败，这是西方发达国家对石油农业实践与反思后所形成的现代农业系统管理的重要整体性原则^[16]。

2.3 现代农业的景观重要性

常规农业的一个重要特征就是人类对农业生态系统的强度干扰并不断增加其频率，严重破坏农业景观的结构多样性和生物多样性。农业景观是指农田与非耕地(草地、防护林地、树篱、居民点、设施温棚及道路等)多种景观斑块的镶嵌，包括了尺度、空间格局和镶嵌动态^[16]。大规模的农作物单一化、集约化的农业经营方式必然导致农业生境的破碎化，使得作物和非作物生境变成一种相对离散化的生境类型和镶嵌的景观格局，大大减少了农业景观的复杂性。已有研究结果表明生境破碎化不仅会减少某些物种特别是自然天敌种群的丰度，还会影响物种之间的相互关系及生物群落的多样性和稳定性^[17]。近年来，国内外十分重视农业景观变化及生境破碎化对害虫生物防治和害虫-天敌关系以及害虫治理的影响。前人研究表明，在检验农田生态系统害虫治理的有效性和持续性时，发现大尺度农田景观结构及其生境类型对于害虫生态防治非常重要。农业景观的结构变化和系统内生物多样性的丧失，会引起农业生态系统服务功能的严重弱化甚至损失，不利于实施以保护自然天敌为主的害虫生态控制(图

2)。非作物生境类型如田块边缘区、休耕地和草地等，是一种比较稳定的异质化环境，可以为捕食性和寄生性节肢动物提供越冬或避难场所和适宜的花粉、花蜜等资源以及其他替代猎物。因此，非作物生境有利于自然天敌的栖息和繁衍，也有利于它们迁入邻近的作物生境中对害虫起到调节和控制作用。景观的格局、过程、尺度影响农田生物群落物种丰富度、多度、多样性以及害虫与天敌之间的相互作用。从区域农业景观系统的角度出发，运用景观生态学的理论和方法来研究作物、害虫、天敌等组分在不同斑块之间的转移过程和变化规律，揭示害虫在较大尺度和具有异质性空间范围内的灾变机理，可为利用农业景观多样性来保护农田自然天敌，实施害虫的区域性生态控制提供新的研究思路 and 手段，比如近年来南非大面积推广的“作物推-拉系统”(图 3)，便是通过建立农业景观和生物多样性来进行科学的害虫防控工作，并取得成效。这是现代农业实施可持续保护性农业技术的重要理论依据。

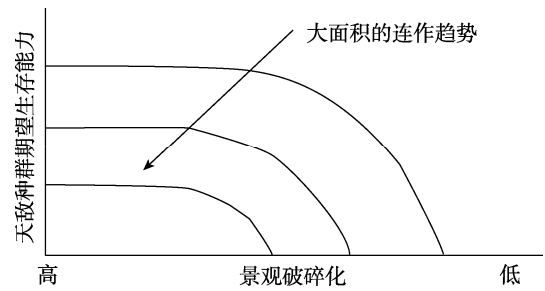


图 2 不同规模和人工化水平的农业生态系统中景观破碎化对天敌种群期望生存能力的影响
Fig. 2 Effects of landscape fragmentation on the expected viability of natural enemy populations in agroecosystems of varying scales and levels of artificialization

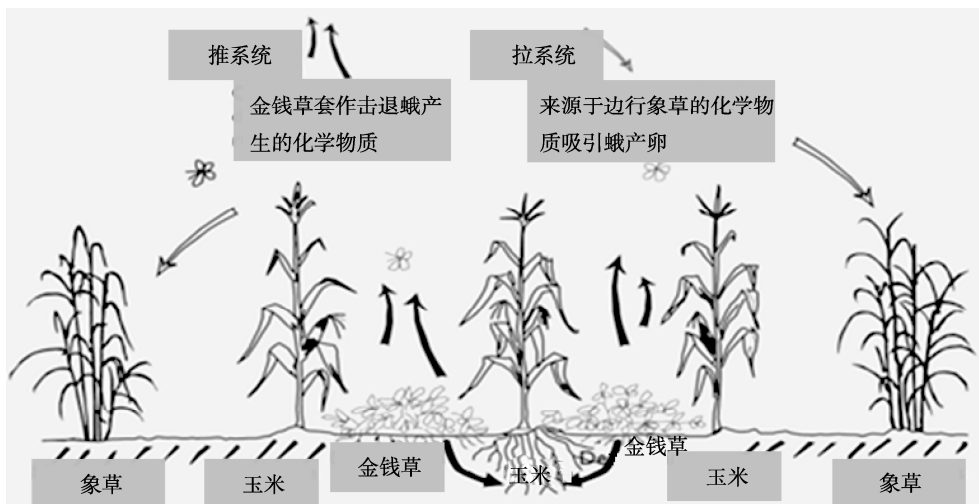


图 3 农田生态系统水平上的作物推-拉系统示意图
Fig. 3 Push-pull components of crops in farmland ecosystem

2.4 现代农业的生物多样性

生物多样性指存在于农业生态系统中所有动物、植物和微生物及其相互作用的总称^[18]。越来越多的研究表明, 农业生态系统内部功能的调节水平很大程度上依赖于系统内现存的动植物和微生物的多样性水平^[17]。在农业生态系统中, 生物多样性的意义远远超越了食物生产本身, 特别在农业生态系统的生态服务功能, 包括营养循环、微气候调节和局部水文过程、抑制不良微生物和消减有毒物质的影响等方面是需要通过系统内生物多样性的维持来实现的。显然, 农业生态系统的生态服务是一个复杂的生物学过程, 体现其可更新又可持续的生态学特性, 因此, 系统中生物多样性的降低或品种资源布局的单一化必然会导致这一自然服务功能的削弱甚至丧失。大量的研究和实践证明, 常规农业依靠大面积推广单一化品种, 形成单一化作物品种布局, 并强调以高浓度化肥、高剂量农药投入的集约化生产方式, 是造成农业生态系统结构简单、物种多样性降低、生物互作关系脆弱、自动调节能力下降, 导致病虫害频频发生和严重流行以及农业生态系统陷入恶性循环的根本原因。据统计, 世界上如此广袤的农业景观大约被 12 种粮食作物品种、23 种蔬菜作物品种和 35 种果树或坚果树等经济作物品种所覆盖着, 即不大于 70 个植物种类分布在世界范围内大约 14.4 亿 hm^2 的耕地上, 与热带雨林中每公顷含有大于 100 个植物种类的植物多样性相比, 形成了鲜明的反差^[19]。在遗传多样性方面, 常规农业更是依赖少数几个作物品种。据报道, 在美国, 60%~70%大豆种植面积是由 2~3 个品种分享的, 73%的马铃薯种植面积是由 4 个当家品种占领着, 而 3 个高产棉花品种也覆盖其 53%的总种植面积, 由此可见品种单一化问题的严重性。然而, 人们不以为然, 在农业生产实践中, 品种单一化推广并非视为问题而是作为一项劣汰优胜的农业增产措施备受推崇。更有甚者的是, 在进行农业区域化布局中, 往往是依据优势产业特色, 设计并建立颇具规模各类生产基地、专业科技园区以及集约化、专业化、规模化的设施农业等生产方式正大行其道并已成为常规农业向现代农业转化和产业化发展的重要标志。在美国等一些发达国家目前已形成的棉花带、玉米带、畜牧带等区域化农业生产格局正引领着世界农业的发展潮流和走向。然而, 正当人们满足并陶醉于常规农业的高新技术、先进生产方式和高农业生产率而漠视单一化所致的诸多问题和潜伏的隐患之时, 世界农业的危机却已悄然而至, 生物多样

性和生态平衡横遭破坏, 病虫害鼠害频发且逐年加重, 化肥农药用量直线攀升, 农业环境和农产品质量安全问题凸现, 农业可持续发展受到空前严重的威胁和挑战。因此, 如何正确处理生物多样性与农业产业化的关系, 实现农作物、农业有益生物种群和有害生物种群三者间的生态平衡, 成为当今世界农业的战略性课题, 也是农业可持续发展无法回避的现实难题。任何以破坏农业生物多样性和危害农业生态系统结构与功能为代价的农业发展模式, 都是不可取的, 也是不可持续的。所以, 提高和维持农业生态系统中生物多样性, 并营造一种良好的生态环境, 使系统中各级营养层次和食物链(或食物网)维持在一种高级平衡的状态, 保证系统功能的正常运转是国内外农业科学家和农业生态学家不懈追求的目标。现已证明, 利用不同作物种类、不同品种的合理搭配和套种间作来控制病虫害的发生, 提高作物的产量是非常有效的方法。但是, 必须指出, 不同农业生态系统的生物多样性组成与结构功能特点差异明显。一般地说, 农业生态系统的生物多样性程度取决于系统自身 4 个基本特性。一是在系统内外植被多样性程度, 二是在农业生态系统内不同作物的永久性(permanence), 三是农业生态系统的管理水平及其强度, 四是农业生态系统与自然植被相隔离的程度。Swift 等^[20]根据农业生态系统中生物多样性组分在种植制度中所发挥的功能作用划分为: (1)生产性生物组分(productive biota), 是由农民选择, 对农业生态系统多样性和复杂性起决定性作用的农作物、果树和动物; (2)资源性生物组分(resource biota), 即通过授粉、生物控制和生物降解生态生物过程对农业生态系统生产力起作用的生物; (3)消极性生物组分(destructive biota), 如杂草、害虫、病原菌等。在现代农业实践中, 农民往往根据各组分的功能, 通过栽培管理措施加以促控(图 4)。Vandermeer 等^[18]还把上述各生物组分简单归为两类: 第一类为计划内生物多样性(planned biodiversity), 在农业生态系统发挥的功能作用与生产性生物组分相同, 其组成结构与功能作用取决于农民的投入意愿和管理水平; 第二类为关联性生物多样性(associated biodiversity), 包括所有土壤中的动植物、农业生态系统中的草食动物、肉食动物和分解者, 显然与上述的第二和第三生物组分功能相似。图 4 说明了在农业生态系统中这两类组分的功能生态学关系。计划内生物多样性不仅有直接的系统功能, 而且还具有通过影响关联性生物多样性而起作用的间接系统功能。比如说树在农林复合系统中创造了阴凉的环境,

使得耐阴作物(sun-intolerant crops)能够生长,黄蜂(wasps)又从树花采集花粉和蜜汁有利于自身的生存与发育,而这些黄蜂又是作物害虫的自然拟寄生物(parasitoids)。因此,黄蜂是农林系统中关联性生物多样性的一部分,那么树创造遮阴环境(直接作用)并吸引黄蜂(间接作用)。显然,为了确保农业生态系统的生态服务功能正常健康运行,关键是鉴定好值得维持和增强的生物多样性类型,然后才能确定和设计最好的措施以促进系统内生物多样性各组分按理想方向发展。实践上,农业措施和农业系统设计都可以有效促进或降低系统内的功能多样性(图 5)。现代农业的一个主要策略就十分强调通过不同耕作措施和时空安排,有效利用各种作物、畜牧等的合理组合与科学配置开发一种互补或互利的生物多样性结构,提供良好自然的生态服务功能。必须指出的是,多样性布局和种植不应是传统农业品种布局“多乱杂”的无序状态和原始的间作、套种或混栽模式的简单回归,它必须是一种适应现代农业发展需要,以现代农业科学理论和高新技术作支撑,作物及其品种适度优化而又顺应自然的更高层面的生态农业模式。然而,单一化和多样性又是相对的。对此,杨曙辉等^[21]认为现代持续农业的作物品种科学合理布局和种植至少应考虑 4 个层面的基本内容:一是宏观布局的多样性,在实行种植业结构调整优化和优势农产品区域化布局的同时,注重作物及其品种布局的多样性和多元化以及产业的多样性,在不影响或轻度影响产业化进程的前提下,尽量节制单一作物或品种的连片规模。二是微观栽培的多样性,采取不同作物或同一作物不同品种间的混栽或间作的种植方式,造成有害生物和寄主的多样化,

使任何一种有害生物都达不到大规模流行的条件,从而达到有效持续控制病虫害的目的。朱有勇及其同事^[22]通过利用不同水稻品种(地方和杂交品种)的混间间栽模式来控制稻瘟病的实践表明,生物多样性的合理布局不仅解决了作物病害的控制问题,同时还提高了水稻单位面积的产量,大大减少了农药和化肥的使用量,改善了农业生态环境,为现代农业生态环境下如何实现可持续生产展示了光明前景。三是轮作问题,泛指轮换栽种同种作物不同品系特别是遗传基因异质或遗传背景相异的不同品种,保持农业生态系统持续的多样性,保证作物病虫害的持续有效控制,最终确保农业的持续发展生物多样性保护问题,注重和研究对农业生态系统中生物多样性、物种多样性、品种多样性和基因多样性的保护,才能利于整个生态系统的相对稳定和平衡,增强农业生态系统对病虫害的生态控制能力(图 6)^[21]。我们曾应用宏基因组学和宏蛋白组学等现代系统生物学方法研究了长期连作烟草、地黄、太子参和甘蔗等作物根际微生物多样性状况,结果发现单一作物的长期连作会导致根际土壤微生物多样性严重下降,特别是会导致土壤有益微生物减少,有害病原菌增加,土壤微生物组成从细菌型向真菌型转化,并严重影响土壤的营养循环,阻碍作物健康生长,产生严重病害,最终导致减产的所谓连作障碍现象。采用合理的作物轮作模式能有效修复土壤微生物多样性,恢复土壤生态系统机能,有效克服和消减连作带来的作物生长障碍现象,达到高产、优质、生态、安全的目的^[23-25]。因此,农业生态系统生物多样性的重建与保护、管理与利用已成为现代农业研究的重要方向^[26-27]。

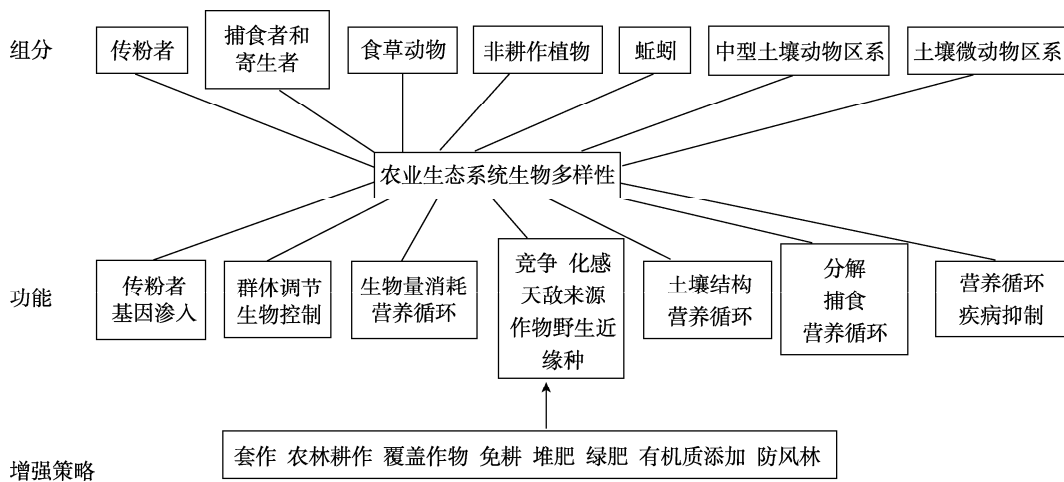


图4 农业生态系统生物多样性的组分、功能及其增强策略^[7]

Fig. 4 Components, functions and enhancement strategies of biodiversity in agroecosystems^[7]

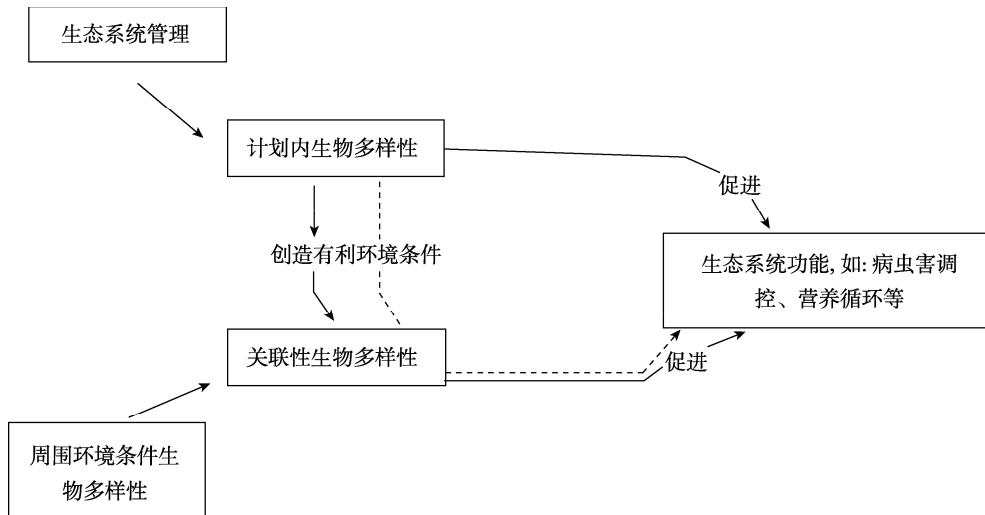


图5 计划内生物多样性与关联性生物多样性的关系与两类生物组分是如何促进生态系统功能的示意图^[17]
 Fig. 5 Relationship between planned biodiversity and associated biodiversity and how the two promote ecosystem function^[17]

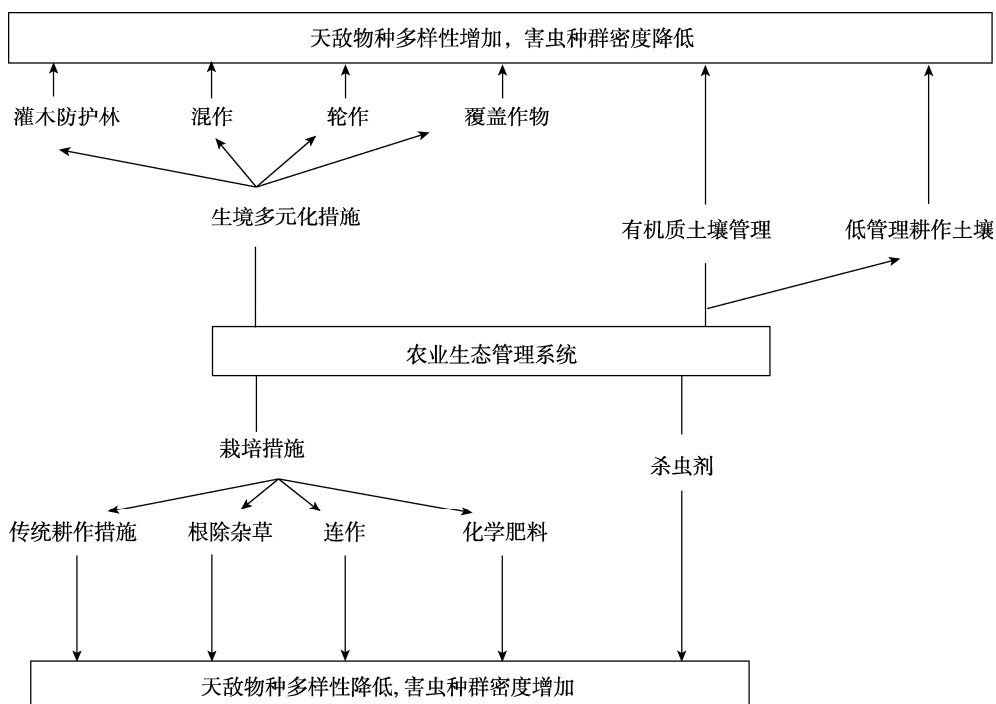


图6 农业生态系统中资源保护与害虫生态控制策略
 Fig. 6 Ecologically-based management of agroecosystems supports resource conservation and sustainable pest management

2.5 现代农业的文化价值观

现代农业的发展不仅仅是物的发展，也应当是作为农业实践主体的人的发展。农业实践主体的精神面貌对现代农业的发展起着主导的作用。长期以来，为了适应农业生产和社会经济发展的需要，人们创造了多样性的农业生产方式和相应的丰富多彩的农业文化。时至今日，我国农耕文化中的许多理念，在人们的生活和农业生产中仍具有现实意义。在它的形成和发展过程中，浸透着历代先贤的血汗，凝聚着人类的智慧，生动展现了人类的实践经验、教训和成功，反映了人类对其与自然之间的关系、

规律的认识与把握。对于今天来说这无疑是一项重要的农业文化遗产。农业文化遗产在概念上等同于世界文化遗产，除一般意义上的农业文化与技术知识外，还包括历史悠久、结构合理的传统农业景观和农业生产系统。按照FAO的定义，全球重要农业文化遗产是指：“农村与其所处环境长期协同进化和动态适应下所形成的独特的土地利用系统和农业景观，这种系统与景观具有丰富的生物多样性，而且可以满足当地社会经济与文化发展的需要，有利于促进区域可持续发展”^[28]。保持和传承民族特色、地方特色、传统特色的农业文化，对于丰富文化生

活与促进社会和谐均有着十分重要的基础作用。传统农业注重整体、协调、良性循环、区域差异,充分利用农业生态系统的自我调控机制和自然生态净化过程,利用生物间的相生相克的关系,达到尽量避免滥用化肥、农药、生长剂、除虫剂等,减少对生态环境污染值的现代农业借鉴。通过对吴越“饭稻羹鱼”历史的分析,游修龄先生推断,浙江省永嘉、青田等县的稻田养鱼历史可追溯到2 000年前。浙江省青田县龙现村的“稻鱼共生系统”入选全球重要农业文化遗产,村内“稻鱼共生系统”已有700多年历史,目前还保留有传统的稻鱼共生农业生产方式,稻田内放养本地特有的“田鱼”,家家户户在房前屋后挖坑凿塘,饲养田鱼,形成了“有水有田鱼”的奇特景观。稻鱼共生系统,即稻田养鱼,是一种典型的生态农业生产方式,系统内水稻和鱼类共生,通过内部自然生态协调机制,实现系统功能的完善。系统既可使水稻丰产,又能充分利用田中的水、有害生物、虫类养殖鱼类,综合利用水稻田的一切废弃能源,提高生产效益,不用或少用高效低毒农药,以生物防治虫害为基础,生产优质鱼类和稻米^[28-29]。此外,稻鱼共生农业文化遗产中蕴含了丰富的文化,不仅包括系统本身的文化,也包括遗产地衍生出的各类文化,如田鱼文化、水文化、民俗文艺及古建筑文化等。这些文化在遗产地的发展和演化中或独立发展,或在凌乱中互相衍生,未能很好地融合。稻鱼共生系统农业文化遗产可促进各类文化融合,形成一个复合系统,从而使各类文化以稻鱼共生系统为核心,向外扩展,完整展现遗产地的风采。因此,稻鱼共生系统不仅具有提高农业生产收入,降低生产成本,产生相关经济效益等经济价值。同时,作为一种复合农业生态系统,还具有维持农田生态平衡、保护农田生态环境、保护生物多样性等突出的生态价值、社会价值、文化价值、科研价值和示范价值,对于丰富现代乡村旅游经济也有重要意义。

3 农业生态学面临的挑战与机遇

已如上述,从宏观层次讲,现代农业生态学研究的内涵与外延都发生深刻变化,研究水平从个体到群落,研究边界从小区到农场,乃至整个农业生态系统或涉及全球食物生产、分布和消费网络的食物系统,探讨的问题涉及生态学、经济学和社会科学各个层面。客观上要求我们必须改变思维方式,即既聚焦宏观生物学的科学问题,又要重视政策层面对农业生产、农民行为和农村发展的调控作用等

社会科学问题对本学科领域的反馈调节作用。但必须指出的是,农业生态学还是属于宏观应用生物学范畴,研究对象还应是农业生态系统,其核心是农业生物及其产品形成的食物(营养)链、加工链和价值链的相关管理与市场调节问题,其中特别强调了人在系统管理的主体作用,因此必须重视对管理者的生态学教育。但是,也存在研究系统界限无限扩大,研究范畴过于模糊,给人以包罗万象的感觉,这不利于学科的发展,以致于有人呼吁该是研究什么不是农业生态学的时候了。但从微观层次讲,现代农业生态学又进入了分子农业生态学时代,它借助现代生物学的发展成就,运用系统生物学的理论与技术,深入研究农业生态系统结构与功能的关系及其分子生态学机制。特别是随着现代生物技术的不断完善,环境(宏)基因组学、蛋白组学技术的问世,极大地推进了人们对未知生物世界的认知,尤其是对生物多样性和基因多样性对农业生态系统机能影响的深层次剖析和入侵生物、转基因生物及其产品对环境安全的分子生态学评价等,使得农业生态学能从分子水平上深入研究系统演化的过程与机制,促进从定性半定量描述向定量和机理性研究推进^[30]。客观上也要求农业生态学工作者必须与时俱进,不断完善自己的知识结构,提高现代科学研究技能,只有这样才能自觉接受新的科学知识,促进传统科学向现代科学提升。但是,也有人反对这种研究倾向,认为农业生态学是宏观科学,不宜过多涉及分子生物学问题。但不管农业生态学如何发展,笔者认为它还是属于生物学范畴,着重研究农业生物与环境相互关系,关注的焦点是如何通过科学的农业生态系统管理,实现可持续食物生产的过程与机制问题,研究方法是系统方法,包括宏观与微观两个方面。但是当前农业生态学面临的主要问题是把农业生态系统作为整体来操作,以便能够准确预测系统对未来环境变化的反应。近年来, Purdy 等^[31]提出整合生态学(integrative ecology)观点,认为必须应用系统生物学的宏基因组学(metagenomics)、宏蛋白组学(metaproteomics)和转录组学(transcriptomics)等组学(OMICS)方法,方可从分子到生态系统水平上系统研究其响应未来环境变化的生态学过程及其分子机制。这是因为以往那种应用单一孤立的物种水平的研究方法及其所获得的结果是不能用来预测整个农业生态系统在更高组织水平和更大时空界限上的生态学响应,包括生物多样性、生态学作用及其互作等能够深入理解生态系统机能的关键性参数变化情况(图 7)。我们的确需要从不同等级水平了解他们之

间的相互联系, 因为任何生态系统的稳定性 (stability) 及其弹性 (resilience) 最终要依靠构成该系统的每一个生物成员包括最小的病毒和微生物乃至最大的植物和动物个体的生态作用。显然, 要理解这种多物种复杂系统的机能, Lindeman 的经典生态系统生态学的研究方法是无法达到的。只有应用现代系统生物学的组学技术才能克服传统生态系统生态学只聚焦于能量、营养和生物质在粗糙拼错的功能单位(如基于分类学方法把光合细菌、藻类和植物

归为初级生产者)间的流动或分配的不足, 如应用宏基因组学和宏蛋白组学技术才能全面揭示农田生态系统中生物多样性及其与系统功能的关系。因此以系统生物学为理论背景和方法论基础的整合生态学观点与技术是现代分子农业生态学研究走向深入的重要技术支撑, 将给农业生态学研究带来新的挑战 and 难得的发展机遇, 值得我们认真把握与积极应对。对此, Purdy 等^[31]提出了新的研究策略与主攻方向(图 8), 值得认真研究与学习。



图 7 从分子到生态系统的生物学组织层次及其相对应的遗传学和生态学(框格阴影部分)方法与研究领域
Fig. 7 Hierarchy of biological organization with increasing order of complexity from molecules to ecosystems and the relevant genetic and ecological measures and study fields of each gradation (shaded boxes)

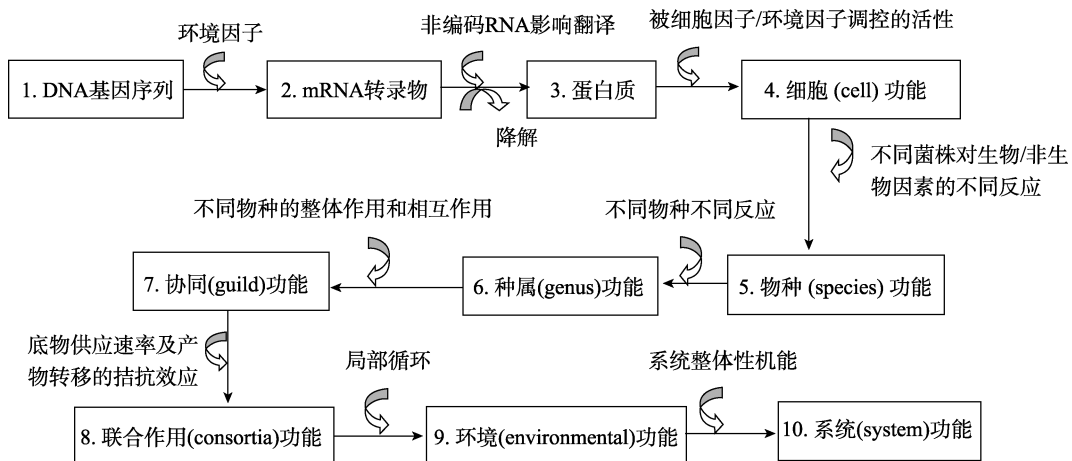


图 8 揭示生物与环境相互作用的生态学关系的系统生物学展望

Fig. 8 From molecules to ecosystems: a systems biology perspective highlighting a range of potential biotic and abiotic drivers and responses, and their interactions

参考文献

[1] Wezel A, Soldat V. A quantitative and qualitative historical analysis of the scientific discipline of agroecology[J]. International Journal of Agricultural Sustainability, 2009, 7(1): 3-18

[2] Wezel A, Bellon S, Doré T, et al. Agroecology as a science, a movement and a practice[J]. Agron Sustain Dev, 2009, 29(4): 503-515

[3] Bensing B M. Agroecological characteristics description and classification of the local corn varieties chorotypes[M]. New York: Haworth Press, 1928

- [4] Tischler W. Agrarökologie[M]. Jena, Germany: Gustav Fischer Verlag, 1965
- [5] Azzi G. Agricultural ecology[M]. London: Constable & Company, 1956
- [6] Henin S. Les acquisitions techniques en production végétale et leur application[M]. Paris: Economie Rurale, 1967: 31–44
- [7] Altieri M A. Agroecology: The science of sustainable agriculture[M]. Boulder: Westview Press, 1995
- [8] Gliessman S R. Agroecology: Ecological processes in sustainable agriculture[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997
- [9] Gliessman S R. Agroecology: The ecology of sustainable food systems[M]. New York: CRC Press, Taylor & Francis, 2007
- [10] Francis C, Lieblein G, Gliessman S, et al. Agroecology: The ecology of food systems[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2003, 22(3): 99–118
- [11] 吴志强. 农业生态基础[M]. 福建: 福建科技出版社, 1986
- [12] 骆世明, 陈聿华, 严斧, 等. 农业生态学[M]. 长沙: 湖南科技出版社, 1987
- [13] Clements D, Shrestha A. New dimensions in agroecology[M]. New York: Food Products Press, 2010: 230–511
- [14] Florentín M A, Peñalva M, Calegari A, et al. Green manure/cover crops and crop rotation in conservation agriculture on small farms[C]. Integrated Crop Management. Plant Production and Protection Division. FAO, Rome. 2011
- [15] Bohlen P J, House G. Sustainable agroecosystem management[M]. New York: CRC Press, 2009: 115–283
- [16] Fahrig L. Effect of habitat fragmentation on the extinction threshold: A synthesis[J]. Ecological Applications, 2002, 12(2): 346–353
- [17] Altieri M A. The ecological role of biodiversity in agroecosystems[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1999, 74(1/3): 19–31
- [18] Vandermeer J, Perfecto I. Breakfast of biodiversity: the truth about rain forest destruction[M]. Oakland: Food First Books, 1995
- [19] Perry D A. Forest ecosystems[M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1994: 435–649
- [20] Swift M J, Anderson J M. Biodiversity and ecosystem function in agroecosystems[M]//Schultze E, Mooney H A. Biodiversity and ecosystem function. New York: Springer, 1993: 57–83
- [21] 杨曙光, 宋天庆. 作物(品种)布局单一化趋向与农业可持续发展[J]. 农业环境与发展, 2005, 22(5): 1–10
- [22] Zhu Y Y, Chen H R, Fan J H, et al. Genetic diversity and disease control in rice[J]. Nature, 2000, 406(6797): 718–722
- [23] Wang H B, Zhang Z X, Li H, et al. Characterization of metaproteomics in crop rhizospheric soil[J]. J Proteome Res, 2011, 10(3): 932–940
- [24] Wu L K, Wang H B, Zhang Z X, et al. Comparative metaproteomic analysis on consecutively *Rehmannia glutinosa*-monocultured rhizosphere soil[J]. PLoS ONE, 2011, 6(5): e20611
- [25] Li Z F, Yang Y Q, Xie D F, et al. Identification of autotoxic compounds in fibrous roots of *Rehmannia glutinosa* Libosch.)[J]. PLoS ONE, 2012, 7(1): e28806
- [26] Li R, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104(27): 11192–11196
- [27] Latz E, Eisenhauer N, Rall B C, et al. Plant diversity improves protection against soil-borne pathogens by fostering antagonistic bacterial communities[J]. Journal of Ecology, 2012(1): 1365–2745
- [28] 孙业红, 闵庆文, 成升魁. “稻鱼共生系统”全球重要农业文化遗产价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 991–994
- [29] Xie J, Hu L L, Tang J J, et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(50): E1381–E1387
- [30] Weckwerth W. Green systems biology—From single genomes, proteomes and metabolomes to ecosystems research and biotechnology[J]. Journal of Proteomics, 2011, 75(1): 284–305
- [31] Purdy K J, Hurd P J, Moya-Larano J, et al. Systems biology for Ecology: From molecules to ecosystems in integrative ecology[M]. Woodward G. Advances in Ecological Research. 2010: 88–135