

# 2020年农业生态学热点回眸

赵桂慎,任胜男,原燕燕,孔祥

中国农业大学资源与环境学院,北京 100193

**摘要** 农业生态学是一门新兴学科,主要研究农业生物与其环境之间的相互作用关系,对全球可持续发展具有重大影响。从分子到景观不同尺度,涉及农业面源污染、农业资源高效利用、农业生态模式、农业景观与生态服务、农业与全球变化等方面,回顾了2020年农业生态学的重要科技进展和突破,认为可持续食物生产系统的颠覆性创新和人类健康导向的食物链管理是今后农业生态学的研究重点。

**关键词** 农业生态学;生态集约化;食物生产系统;食物链;垂直农场

农业生态系统是地球生物圈内与人类经济活动密切相关的最大的陆地生态系统,以食物(如谷物、油料、糖类和肉蛋奶等)和其他重要农产品(如纤维、橡胶及皮革等)的生产与供给为主。农业生态学作为一门新兴学科,世界各国对其有多种定义和范围界定<sup>[1]</sup>。从本质上讲,农业生态学是学习自然界“生态智慧”,通过模拟自然生态系统“高效率”“零污染”特性,构建并优化食物生产系统结构和功能的一门学科,主要研究农业生物与其环境的相互作用关系。传统农业蕴含着丰富的农业生态学理论知识,为世界农业可持续发展做出了重要贡献,如种养结合、豆科绿肥、农业废弃物循环以及农业生物多样性利用等。特别是自20世纪60年代“绿色革命”以来,农业生产过程中大量化学品(化肥、农药及石化燃料等)投入导致世界范围内的生态环境危机,可持续集约化(sustainable intensification)

或生态集约化(ecological intensification)逐渐成为共识。国际上各种可持续替代农业模式不断涌现,农业生态学研究与实践也越来越引起世界各国的高度重视,已成为落实联合国面向2030年的全球可持续发展目标(sustainable development goals, SDGs)的重要组成部分<sup>[2]</sup>。

从世界范围来看,生态农业的发展水平可以分为4个层次<sup>[3]</sup>:(1)资源节约型技术,如节肥、节水、节药等;(2)投入替代,如有机肥替代化肥、生物综合防治替代农药;(3)农业生态系统结构调整,如农林系统、农牧系统的建立,提出新的间套轮作方式建立等;(4)食物链供应体系的改革,比如打破生产与供应链的垄断行为,建立生产者和消费者关系更加密切和直接的联系,从而有利于农业资源的优化组合,提高农产品供应与消费的均衡性,改善农业经济福利。总体上看,西方发达国家目前处于

收稿日期:2020-12-30;修回日期:2021-01-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800906-2)

作者简介:赵桂慎,教授,研究方向为经济生态、生态农业与复杂系统管理、富硒功能农业,电子信箱:zhgsh@cau.edu.cn。

引用格式:赵桂慎,任胜男,原燕燕,等. 2020年农业生态学热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 166-173; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.

2021.01.013

第3~4层次,中国大致处于第1~2层次,尚有较大差距。

农业生态系统的生态化调控路径主要有两个:一是调节农业投入,包括投入数量和结构,降低生产成本和环境压力,减少外部性;二是优化农业生态系统的结构和功能,改善和提高系统经济及生态效率。国际上发达国家已进入从微观到景观尺度生态过程与土地利用结构调整优化的稳定发展阶段,而中国目前的主要调控途径是调节投入及改善农业环境,如两减(减肥、减药)、一控两减三基本(即“控制农业用水总量和农业水环境污染,农田灌溉用水水质达标;化肥、农药减量使用;畜禽粪污、农膜、农作物秸秆基本得到资源化、综合循环再利用和无害化处理)等。今后的重点调控途径应转向调整结构,从分子等微观尺度、田块尺度到景观尺度,以系统观念设计优化农业生态系统结构功能,改善提高系统效率,减缓农业生态环境压力。2020年,国内外农业生态学领域的主要科技热点如下。

## 1 农业面源污染与土壤修复

### 1.1 中国农业污染源普查结果发布

21世纪以来,中国提出并实施生态文明建设的国家战略,“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念深入人心,绿色化成为生态文明建设的重要抓手,农业绿色化发展成为主旋律。从中国的农业生态化实践看,产业生态化是生态文明建设的主要方向。中国是世界农业大国,以8%的耕地养活了世界22%的人口,粮食总产量17年持续增产,取得了举世瞩目的成效,但面临农业资源稀缺和局部生态环境压力加剧的双重制约。2015年,农业农村部先后印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》《到2020年农药使用量零增长行动方案》和《关于打好农业面源污染防治攻坚战的实施意见》,提出“一控二减三基本”策略;2017年提出“开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案”。以上措施初见成效,如农业资源利用效率显著提高,化肥利用率从2008年的28%提高到2019年的39.2%<sup>[4]</sup>,但农业生态问题依然严峻。2020年6月8日,中国生态环境部、国家统

计局和农业农村部联合发布《第二次全国污染源普查公报》(2020年第33号)<sup>[5]</sup>,结果表明农业源化学需氧量、总氮和总磷3类主要污染物排放量整体贡献率仍然占50%以上,与2010年公布的《第一次全国污染源普查公报》相比变化不明显,当前中国农业面源污染问题值得引起高度重视。

### 1.2 盐碱地快速脱盐技术取得突破

盐碱地改良是世界性难题,作为重要的后备土地资源,盐碱地改良与利用对维护世界粮食安全和生态安全具有重要意义。中国盐碱地约占国土总面积的10%,新中国成立后盐碱地治理成效显著,但由于成因存在差异性,绝大多数尚未修复利用。2020年12月,胡树文等创建的快速脱盐生态修复重度盐碱地工程技术模式通过了专家评审,成果整体达到国际领先水平。该技术体系能够实现“当年修复、当年种植、当年高产”,在松嫩平原的盐碱地水稻平均亩产超过500 kg。该成果破解了盐碱地改良这一世界性难题,为中国实施“藏粮于地、藏粮于技”战略提供了坚实的科技支撑。据不完全统计,目前累计超过7000 ha重度盐碱地得到修复利用,辐射面积超过7万 ha,年新增粮食产能1.5亿 kg以上<sup>[6]</sup>,在农业生态系统立地环境改善方面取得突破性进展(图1)。



图1 盐碱地技术改良效果  
(图片来源:中国科学报官网)

### 1.3 首次发现农作物吸收微塑料颗粒

微塑料污染问题已成为全球关注的环境问题。大多数微塑料直接或通过塑料降解排放到陆地环境,并在土壤中大量累积,对陆地生态系统构成潜在威胁。由于微塑料在世界范围内普遍存在于农

业灌溉废水中,因此评价作物对微塑料的吸收情况具有重要意义。此前科学家认为,微塑料在日常食用的蔬菜和农作物中是“不可能”存在的,因为植物根系表皮的孔隙小,而塑料微粒较大。李连祯等<sup>[7]</sup>研究了小麦和生菜在不同介质中微塑料的吸收效应,结果表明亚微米和微米大小的塑料颗粒在侧根部位的裂痕处进入根内部,并在蒸腾拉力的作用下通过导管系统随水流和营养流进入作物可食用部位(图2)。此研究结果阐明了微塑料颗粒与植物相互作用的模式,并对污水灌溉或在污水污泥污染的农田中种植作物有启示作用。

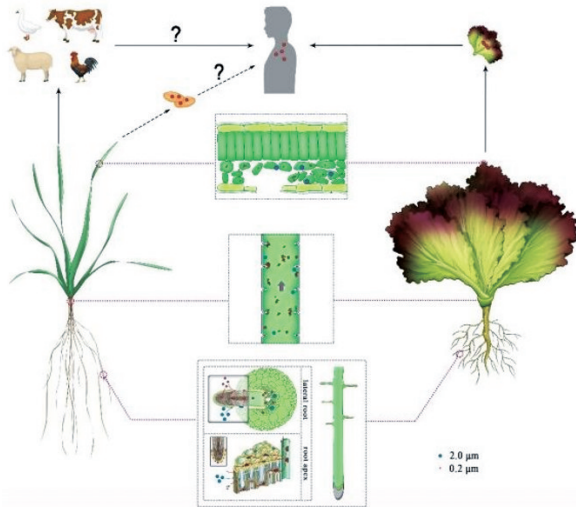


图2 小麦和生菜吸收和传输微塑料颗粒的过程及其在食物链中传递路径  
(图片来源:中国科学院官网)

也就是说,如果在真实环境中,植物根系吸收微塑料颗粒的强度过高时,微塑料可能通过食物链的传递在人体中富集,从而对人体健康产生不利影响。著名土壤生态学家 Rillig 评价本研究进展为陆地生态系统微塑料研究的重要里程碑。该发现对微塑料颗粒对人体健康与食物链管理提出了新的任务与挑战。

## 2 农业资源高效利用

### 2.1 获得控制水稻氮肥利用效率的关键基因 *NGR5*

“绿色革命”水稻品种(GRVs, green revolution

varieties)具有半矮化、抗倒伏、耐高肥和高产的特性,高产往往需要高氮投入,而耐高肥性容易导致氮肥利用率低<sup>[8]</sup>,高氮低效是农业面源污染的主要根源之一,不利于农业可持续发展。从作物栽培角度上讲,水稻高产依赖于分蘖数、粒数和粒重等3个决定因素,一般情况下高种植密度且高分蘖有利于高产。因此,如何在低氮条件下通过提高水稻分蘖数达到高产成为研究热点,也是未来农业可持续发展的重要目标。

吴昆等<sup>[9]</sup>在已有研究基础上,通过化学诱变和遗传筛选,获得了控制水稻氮肥利用效率的关键基因 *NGR5* (Nitrogen-mediated tiller growth response 5),通过分子水平上的调控,实现了增加水稻分蘖数,提高氮肥利用率和增产的多重目标,为低氮条件下提高水稻产量提供了有效技术途径。同时,这项成果也为绿色高产水稻新品种选育奠定了坚实的基础(图3)。

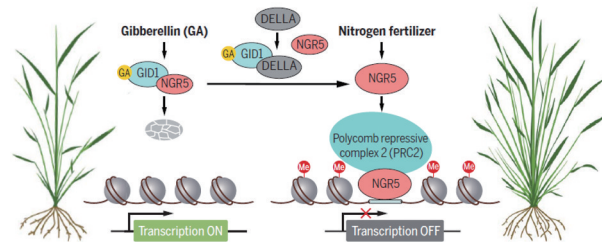


图3 氮响应染色质调控水稻分蘖  
(图片来源:Science 官网)

### 2.2 揭示提升光合生产力和水分利用效率的新机制

光合作用是作物生产的基础,改善光合作用是提高主要作物产量潜力的一个目标。在分子水平上,电子传递和核酮糖-1,5-二磷酸(RuBP)再生是光合作用的关键过程,已有研究表明单独刺激电子传递或提高 RuBP 再生能力均可增加光合碳同化速率和植物生物量,研究发现利用一种多基因方法,即引入蓝藻生物功能酶果糖-1,6-二磷酸酶/景天庚酮糖-1,7-二磷酸酶或景天庚酮糖-1,7-二磷酸酶的超量表达,并与红藻蛋白细胞色素 c6 表达共同作用,可以达到同时调控这2个过程进一步提高光合生产力的效果。而且在大田条件下,刺激电子传递和 RuBP 再生在提升光合生产力的同时还

可以提高作物水分利用效率<sup>[10]</sup>。因此,在农业生产中,可以通过刺激光合作用中的关键过程,同时实现光能和水分的利用,为作物绿色高效生产提供了理论依据。

### 2.3 发现与植物生产力正相关的关键性微生物和功能基因

土壤是农业生态系统的一个极为重要的“生态库”。其中,土壤多营养群落在调节养分循环、病原体抗性和土壤健康相关的生态系统过程中发挥着重要作用,最终调节生态系统的服务功能。尤其在集约化的农田生态系统中,复杂的土壤营养群落在调节土壤功能和植物生产力方面具有重要作用。研究表明植物生产力与特定根系微生物群落和功能基因的丰度之间具有显著的相关性,并提供了一系列与植物生产力正相关的关键性微生物和功能基因(如拟杆菌门的 *Rubricoccus*、*Salinispora* 和 *Streptomyces* 等;真菌类的 *Sordariomycetes* 和 *Pezizomycetes* 等)<sup>[11]</sup>,这些关键性微生物和功能基因被认为是未来潜在的提高生产力的生物接种剂。

## 3 农业生态模式构建与优化

### 3.1 中国农业种养分离加剧

种养结合是中国传统农业的精髓,也是中国传统农业几千年来可持续发展的重要基础。中国学者以每年 20000 个样本的数据库为依据,测算了 1986—2017 年 30 多年中国农村种养结合循环农业模式的发展情况。研究结果显示<sup>[12]</sup>,种养结合的农户比例从 1986 年的 71% 下降到 2017 年的 12%,其中约 1/3 的种养结合农户有机肥养分供给量超过了作物需求量,种养分离、种养失配现象严重,应建立“以种定养”或“以养定种”的可持续集约化发展机制,结合现代科学与装备技术,建立现代化的种养结合生态农业模式势在必行。

### 3.2 总结出两种全球粮食作物间套作模式

生态学研究的根本任务是生态设计,生态农业模式构建是农业生态学研究的核心,也是较高层次的表现形式。全球粮食生产以单一种植模式为主,单一种植模式具有较高的产量与作业效率,但投入

高,资源利用效率低,环境压力大,生态化模式重构意义重大。从全球尺度看<sup>[13]</sup>,粮食生产间套作的设计及管理方式呈现 2 种不同的模式且显著影响间套作的增产效应。粮食作物与玉米间作、条带种植模式在中国应用广泛,投入高增产效应也相应高,而矮谷物与豆科混作模式在欧洲广泛应用,投入低,增产效应低。总之,以中国为代表的高投入-高产玉米间套作模式具有更大的增产效应,是低投入-低产出的间套作模式的 4 倍,对保障全球粮食安全具有重要借鉴意义(图 4)。

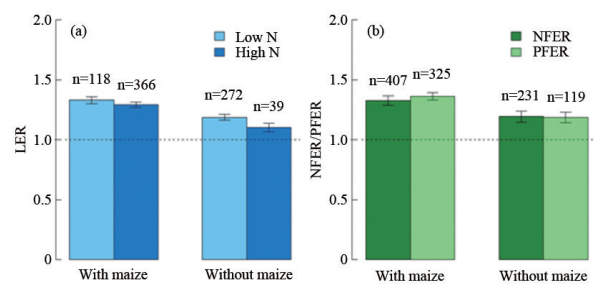


图4 间套作体系与单作体系土地相对利用率、氮肥及磷肥当量利用率比较

研究还发现,两种间套作体系与单作相比,玉米间套作体系和无玉米的间套作体系的土地相对利用率(relative use efficiency of land, LER)、氮肥当量利用率(N fertilizer equivalent ratio, NFER)和磷肥当量利用率(P fertilizer equivalent ratio, PFER)均大于 1,分别节约了 16%~29% 的土地和 19%~36% 的肥料,但研究中未涉及 2 种不同模式在不同地区的播种面积比例。今后农场作业“无人化”是大势所趋,如何克服农田作物多样化种植受机械化制约的“短板”是关键所在。

### 3.3 室内垂直农场可大幅度提高小麦产量

随着全球人口不断增长,谷物生产规模需要随之扩大。小麦作为人类的主要谷物之一,可以为人类饮食提供大约 20% 的热量和蛋白质。室内垂直农场种植小麦模式可能是未来提高小麦产量的一种有前途的选择,室内垂直农场也是通过提高单位面积产量来大幅度减少粮食生产土地占用的可行技术路径。研究结果表明(图 5),在提供最佳温度、密集人工光照、高 CO<sub>2</sub> 浓度和最大收获指数的

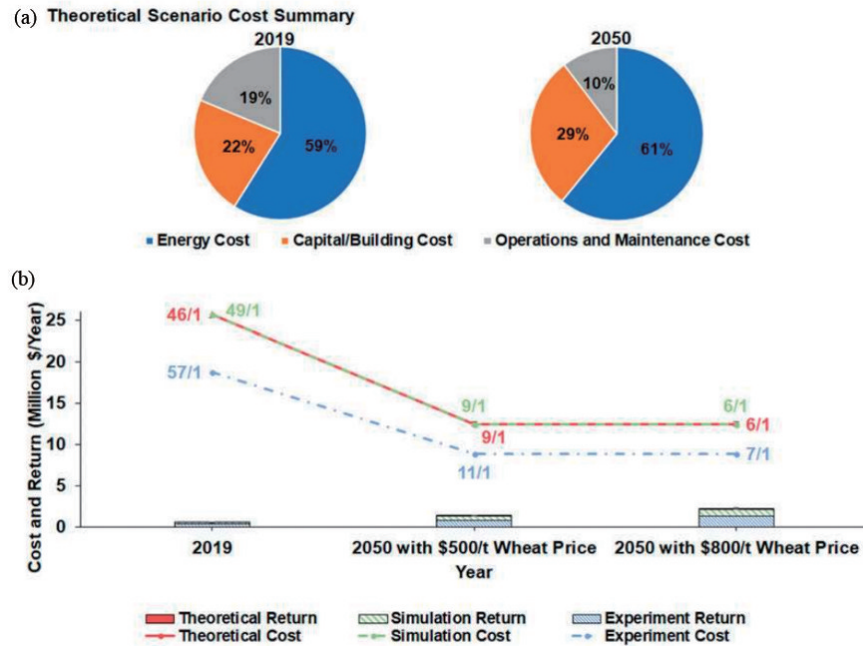


图5 室内垂直农场小麦生产的年成本和收益(图片来源:PNAS)

条件下,一个10层的室内垂直农场小麦产量可以达到 $(700\pm 40)$ t/ha。根据估算,室内垂直农场的最高产量潜力能够达到 $(1940\pm 230)$ t/ha,是目前世界小麦平均产量3.2 t/ha的220至600倍。

室内垂直农场不受气候、季节和地区的影响,为小麦种植提供了有利的生长环境。此模式需要的土地面积更少,大部分水可以重复使用,尽可能减少了农药和除草剂的使用量,而且将养分损失降至最低,是未来可持续集约化农业的重要模式之一。尽管今后室内垂直农场小麦种植在经济上的竞争力可能稍低,但它可能在防范未来气候变化或其他粮食系统意外中断方面发挥重要作用<sup>[14]</sup>。当然,室内垂直农场模式最大的生产潜力仍有待实验验证,也需要进一步的技术革新来降低运营的资金和能源成本。

## 4 农业景观及其生态服务功能

农业景观生态格局变化与其提供的生态服务密切相关,特别是对于农业病虫害防治、天敌保护、植物授粉、生物多样性保护、外来物种入侵阻断等

具有重要作用和影响<sup>[15-16]</sup>。农业景观生态过程与机制研究是农业生态学宏观领域的研究热点,尤其是欧美地区走在世界前列,近10年来中国农业景观研究发展较快,相关技术规范陆续出台,农业景观规划与建设取得了较大进展,但与欧美相比仍然处于初级发展阶段。

### 4.1 农田花带建设有利于害虫防治

Albrecht等<sup>[17]</sup>系统研究了北美、欧洲和新西兰花带和树篱对农业影响作用,研究结果表明,花带对害虫防治的有益效应平均提升了16%,而对授粉和产量影响差别较大,多年生、时间较长且多样性高的花带对授粉更有效,但随着距离增加呈其效应指数下降,对指导农田景观设计和植物选择具有重要科学参考价值。

### 4.2 蝙蝠授粉显著增加火龙果产量和品质

蝙蝠能够为许多具有很高社会经济价值的植物授粉,包括墨西哥的大多数柱状仙人掌(仙人掌科)。研究发现火龙果的主要传粉者是一种索热尔长舌蝠属的食蜜蝙蝠。当花被其他种群(昼间活动的鸟类和昆虫)传粉时,尽管不同品种之间的传粉依赖性不同,火龙果产量总体下降了35%。在没有

蝙蝠授粉的情况下,所有品种的果实质量都显著下降,当其他种群授粉时,果实重量减轻46%,甜度降低13%,经济价值显著降低。此外,结实率显著降低。研究表明,蝙蝠通过为主要经济作物授粉,提供了一个重要的生态系统服务,减少这项服务将导致作物产量和质量的大幅度下降,给农场造成巨大的收入损失<sup>[18]</sup>。

#### 4.3 作物基因渗入是欧洲大刍草产生高适应性和抗药性的主因

外来物种入侵严重威胁着全球生态安全,然而全球贸易加快了生物入侵速度。热带大刍草是玉米最接近的野生亲缘植物,研究发现在西班牙和法国发现新的农业杂草一大刍草与作物基因渗入有关(图6)。

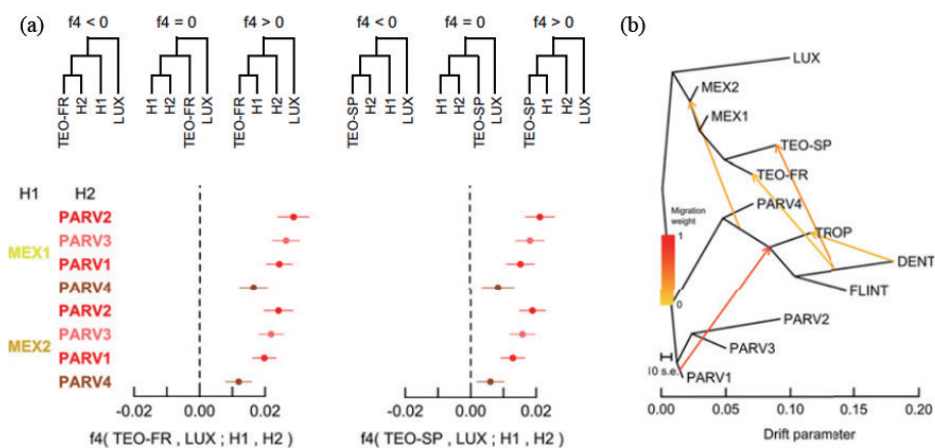


图6 欧洲大刍草起源及其玉米基因渗入(图片来源:PNAS)

研究表明,西班牙大刍草和法国大刍草均起源于玉米亚种,迄今为止欧洲所有大刍草入侵种群拥有单一起源——墨西哥种属 Chalco;墨西哥大刍草在欧洲的出现很可能与控制花期的基因转移有关;适应温带地区的欧洲玉米品种有助于欧洲大刍草的形成<sup>[19]</sup>。总之,农作物基因渗入到野生植物中,使其既能迅速适应新的气候生态位,又能对除草剂产生抗性,从而促进了一种新出现的有害杂草的形成。这一研究成果为预防及阻断外来杂草物种入侵提供了新的警示和思路。

## 5 农业与全球气候变化

### 5.1 食物生产系统温室气体模拟排放结果发布

《巴黎协定》的长期目标是将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2℃以内,并努力将温度上升幅度限制在1.5℃以内。全球食物生产系统是温室气体排放的主要源头之一,每年温室气体排放量约160亿tCO<sub>2</sub>当量,其全球贡献率为30%,

主要排放途径包括荒地开垦与乱砍滥伐、化肥等农业化学品的生产和使用、牛羊等反刍动物养殖、水稻生产、畜禽粪污、食物生产及供应链能源消耗等。Clark等<sup>[20]</sup>研究表明,到21世纪末,即使停止使用石化能源,仅食物生产系统温室气体排放量就可以阻止将温度上升幅度限制在1.5℃以内目标的实现,达到将温度上升幅度限制在2℃内的目标也将变得十分困难,因此必须对食物生产系统进行大刀阔斧的变革,如提倡素食,减少肉蛋奶消费量;减少热量摄入;通过改善作物基因提高单产;减少50%的食物损失和浪费;通过管理制度和技术创新提高生产效率,减少温室气体排放强度,如精准施氮等。

### 5.2 全球升温3℃情况下,雨养农业地区扩大可持续灌溉面积有较大潜力

气候变化将影响全世界的农作物生产,特别是在雨养农业地区。如何在不影响当地水资源可持续利用条件下,利用灌溉措施对冲气温升高的不利影响具有重要意义。在全球雨养农业目标区,通过气候模型模拟研究发现<sup>[21]</sup>,35%的雨养农业区可以

采取扩大灌溉面积的方式应对全球变暖造成的干旱胁迫影响。具体来说,在全球升温3℃的情况下,采取小规模月蓄水、亏量灌溉的“软路径”灌溉策略,可增加灌溉面积7000万ha,能够多养活全球3亿多人口;如果采用大规模年蓄水的“硬路径”灌溉策略,可增加灌溉面积3.5亿ha,可多养活全球14亿人口。这一研究结果对雨养农业区如何通过发展可持续集约化农业,评估灌溉基础设施投资以应对全球气候变暖具有重要贡献。

## 6 结论

2020年农业生态学研究进展,让我们看到了未来农业可持续集约化发展的新希望,同时也看到在应对全球气候变化、农业面源污染治理、农业资源高效利用、新生态农业模式构建以及农业景观优化等方面面临着新的任务与挑战。多学科交叉融合十分必要,也更加迫切,兼顾农业优质高产和生态环境友好的新理论、新方法和新技术仍然是农业生态学的研究热点。面向未来30年,与人工智能、大数据相融合的生态化垂直农场可能会带来一场新的“绿色革命”,全球食物可持续生产系统的颠覆性创新以及“环境-农产品-人”健康食物链供应体系研究是重中之重,今后农业生态学研究前途光明,但任重而道远。

### 参考文献(References)

- [1] 骆世明. 农业生态学的国外发展及其启示[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 14-22.
- [2] 吕永龙, 王一超, 苑晶晶, 等. 关于中国推进实施可持续发展目标的若干思考[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(1): 1-9.
- [3] Gliessman S R. Agroecology: The ecology of sustainable food systems[M]. USA: CRC Press, 2007.
- [4] 央视网. 我国三大粮食作物化肥利用率达39.2%[EB/OL]. (2019-12-28) [2020-12-29]. <http://sannong.cctv.com/2019/12/18/ARTIVXE1gr2RWxwiJs4Wzt65191218.shtml>.
- [5] 中华人民共和国生态环境部办. 关于发布《第二次全国污染源普查公报》的公告[EB/OL]. (2020-06-09) [2020-12-29]. [http://mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610\\_783547.html](http://mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html).
- [6] 赵永新. 啃下盐碱地修复这块“硬骨头”[N]. 人民日报, 2020-12-21(19).
- [7] Li L, Luo Y, Li R, et al. Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 929-937.
- [8] Li S, Tian Y, Wu K, et al. Modulating plant growth-metabolism coordination for sustainable agriculture[J]. *Nature*, 2018, 560(7720): 595-600.
- [9] Wu K, Wang S, Song W, et al. Enhanced sustainable green revolution yield via nitrogen-responsive chromatin modulation in rice[J]. *Science*, 2020, 367(6478): 641-651.
- [10] López-Calcano P E, Brown K L, Simkin A J, et al. Stimulating photosynthetic processes increases productivity and water-use efficiency in the field[J]. *Nature Plants*, 2020, 6: 1054-1063.
- [11] Fan K, Delgado-Baquerizo M, Zhu Y, et al. Crop production correlates with soil multitrophic communities at the large spatial scale[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 151: 108047.
- [12] Jin S, Zhang B, Wu B, et al. Decoupling livestock and crop production at the household level in China[J]. *Nature Sustainability*, 2020(1): 1-8.
- [13] Li C, Hoffland E, Kuyper T W, et al. Syndromes of production in intercropping impact yield gains[J]. *Nature Plants*, 2020, 6: 653-660.
- [14] Asseng S, Guarin J R, Raman M, et al. Wheat yield potential in controlled-environment vertical farms[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(32): 19131-19135.
- [15] Nicholson C C, Ward K L, Williams N M, et al. Mismatched outcomes for biodiversity and ecosystem services: testing the responses of crop pollinators and wild bee biodiversity to habitat enhancement[J]. *Ecology Letters*, 2020, 23(2): 326-335.
- [16] Aguilera G, Roslin T, Miller K, et al. Crop diversity benefits carabid and pollinator communities in landscapes with semi-natural habitats[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(11): 2170-2179.
- [17] Albrecht M, Kleijn D, Williams N M, et al. The effectiveness of flower strips and hedgerows on pest control, pollination services and crop yield: a quantitative synthesis[J]. *Ecology Letters*, 2020, 23: 1488-1498.
- [18] Tremlett C J, Moore M, Chapman M A, et al. Pollination by bats enhances both quality and yield of a major cash

- crop in Mexico[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(3): 450–459.
- [19] Corre V L, Siol M, Vigouroux Y, et al. Adaptive introgression from maize has facilitated the establishment of teosinte as a noxious weed in Europe[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(41): 25618–25627.
- [20] Clark M A, Domingo N G G, Colgan K, et al. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2° C climate change targets[J]. *Science*, 2020, 370(6517): 705–708.
- [21] Rosa L, Davide D C, Sangiorgio M, et al. Potential for sustainable irrigation expansion in a 3 ° C warmer climate[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(47): 29526–29534.

## Review of agroecology in 2020

ZHAO Guishen, REN Shengnan, YUAN Yanyan, KONG Xiang

College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

**Abstract** As a new subject emerging with the green revolution, agroecology focuses on the total relationships between agricultural organisms and both their organic and inorganic environments, which is playing a key role in global sustainable development. From molecular to landscape scale, this paper reviews the achievements in non-point source pollution, high-efficient use of agricultural resource, establishment of agro-ecosystem, agricultural landscape and its ecosystem service, and impact of global climate change on agriculture. A game-changing innovation of sustainable food production system and food chain management for human health are becoming the research hotspots in the future agroecology.

**Keywords** agroecology; ecological intensification; food production system; food chain; vertical farming ●



(责任编辑 徐丽娇)