

生物多样性在低碳农业中的应用现状及展望

陈俊斌¹, 胡 广^{1,2}

(¹浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; ²浙江省植物次生代谢调控重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 在中国推进生态文明建设的背景下, 农业固碳增效被写入“双碳目标”, 低碳农业随之兴起。生物多样性是生态系统功能与服务的基础, 在农业低碳化过程中发挥了至关重要的作用, 保护农田生物多样性, 充分发挥其生态作用是实现农业减排固碳的重要路径。收集“Web of Science”数据库中2010—2022年的文献, 利用CiteSpace文献计量软件的关键词共现以及聚类分析, 对近年来国际低碳农业中生物多样性的研究动态、研究热点进行分析, 对生物多样性的功能进行归纳总结。分析结果表明, 生物多样性的保护与管理是目前低碳农业生物多样性的研究热点, 而生物防治是生物多样性实现农业低碳化的主要途径, 通过对不同生物类群多样性的生态价值进行梳理, 发现生物多样性可以增加农业生产过程中的生态与经济价值。未来的研究可从生态系统和景观的尺度, 探索基于生物多样性的多功能农业发展模式, 从而更好地助力双碳目标的顺利实现。

关键词: 农业低碳化; 生物多样性; 增产; 品质提升; 病虫害控制; 传粉; 生物类群

中图分类号: X171.3

文献标志码: A

论文编号: cjas2023-0139

Current Status and Prospects of Biodiversity Application in Low-carbon Agriculture

CHEN Junbin¹, HU Guang^{1,2}

(¹School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;

²Key Laboratory of Plant Secondary Metabolism and Regulation of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: In the context of promoting the ecological civilization in China, carbon fixation and efficiency enhancement in agricultural industry has been listed in the "carbon peaking and carbon neutrality goals", and low-carbon agriculture has emerged accordingly. Biodiversity is the basis of ecosystem functions and services, and plays a key role in the agricultural decarbonization. Protecting biodiversity in farmland and fully exploiting its ecological effects is an important approach to achieve agricultural decarbonization. In this study, the literature from 2010 to 2022 in the database of Web of Science was selected. Using the keyword co-occurrence and cluster analysis of CiteSpace bibliometric software, the international research trends and topics of biodiversity in low-carbon agriculture were analyzed, and the functions of biodiversity were summarized. The results showed that the conservation and management of biodiversity was the hot topics in low-carbon agriculture. Biological control was the main practice for biodiversity to achieve agricultural decarbonization. By evaluating the ecological value of the diversity of different biological taxa, it was found that biodiversity could increase the ecological and economic value of the agricultural production process. Future research can explore biodiversity-based multifunctional agricultural development at the ecosystem and landscape scales, thus better contributing to the successful achievement of the "dual carbon" goals.

基金项目: 国家自然科学基金“景观破碎化对城市公共健康的影响”(32171570)。

第一作者简介: 陈俊斌, 男, 1998年出生, 浙江杭州人, 硕士研究生, 研究方向: 生物多样性保护。通信地址: 310018 杭州市钱塘区二号大街928号7号楼425室, E-mail: 1282562892@qq.com。

通信作者: 胡广, 男, 1983年出生, 浙江温州人, 教授, 博士, 主要从事景观生态学、城市生态学、园林生态学和生物多样性保护方面的研究工作。通信地址: 310018 杭州市钱塘区二号大街928号7号楼419室, Tel: 0571-86843706, E-mail: hug163@163.com。

收稿日期: 2023-05-15, **修回日期:** 2023-10-10。

Keywords: agricultural decarbonization; biodiversity; yield increase; quality improvement; pest control; pollination; biological taxa

0 引言

随着全球气候变化问题的加重、生存环境的恶化,人们意识到以破坏生态环境为代价的高碳排产业发展方式需要重新审视,产业的低碳化改造随之兴起。农业作为国民经济的基础,是仅次于工业的第二大温室气体排放来源,农业生产的各个环节,如耕种、收获、流通、消费、废弃物处理等,都会产生温室气体^[1]。中国温室气体排放总量的17%来源于农业排放,其中,农业源CH₄的排放量占中国CH₄排放总量的50.15%,农业源N₂O的排放量占中国N₂O排放总量的92.43%^[2],农业源CO₂的排放量占中国CO₂排放总量的7.4%^[3],可见,在农业活动中存在巨大的减排固碳空间。

农业的发展经历了3个阶段,即原始农业阶段、传统农业阶段和工业化农业阶段^[4],在此过程中,农业的集约化和自动化水平不断提高。但是在推动农业集约化的进程中,化肥和农药的使用量也在不断的提高,这不但导致了农业面源污染,其生产及使用过程还加剧了CO₂的排放,进而降低未来农业的生产潜力。IPCC曾在2007年的报告中指出,全球平均温度如果增加超过1~3℃的范围,那么粮食生产潜力会显著降低^[5]。而根据2022年IPCC第六次评估报告中的结论^[6],在当前的排放情况下,2100年全球升温的中值很可能达到3.2℃,远超《巴黎协定》升温低于2℃的温控目标。因此,为应对全球变暖对中国粮食安全以及其他环境问题的威胁,中国明确提出了“碳达峰”和“碳中和”目标(双碳目标),并且制定了一系列农业节能减排的计划目标和行动框架,推动农业模式的转变,构建绿色低碳农业。

低碳农业是指以减少大气中的温室气体含量为目标,以减少碳排放、增加碳汇和适应气候变化技术为手段,高效率、高碳汇、低能耗、低碳排的农业^[4]。如何发展低碳农业,国内外不同专家学者提出了自己的看法。其中,生物多样性被认为是可持续农业的重要要求之一^[7],是提供维持农业本身和整个环境所需的生态系统服务的基础^[8],通过推动生物多样性保护进而发展低碳农业,已经成为一个重要的研究方向。Tschamtker等^[9]提出,构建生物多样性友好型农业景观是农业低碳发展的有效方案。Koohafkan等^[10]认为绿色低碳农业就是具有适应力且高产的生物多样性农业。2020年,世界自然保护联盟(IUCN)倡导基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)^[11],助力于实

现全球及国家层面在应对气候变化和保护生物多样性等方面的目标,可为农业减碳增汇与生物多样性保护提供文件规范和实践案例^[12]。联合国环境规划署(UNEP)与全球环境基金(GEF)携手在印度实施的“将农田生物多样性保护和利用纳入农业部门主流,以确保生态系统服务和减少脆弱性”项目,证明了生物多样性对于农业与粮食系统可持续发展的重要性^[13]。在国内,李波^[14]指出农田生物多样性会直接影响农业生产,最终影响全球粮食安全和生态安全。赵文晋等^[15]认为利用生物多样性促进农作物生长从而减少化肥的使用是发展低碳农业的有效策略。严立冬等^[16]提出维护农田生物多样性和碳排碳汇的收支平衡才能发展低碳农业。孔箐铎等^[17]更是认为发展低碳农业就是发展生物多样性农业。综上所述,保护和提升农田及其周边生境中的生物多样性是农业低碳化的核心内容之一,是发展低碳农业的有效路径,探究生物多样性对低碳农业的功能与价值具有十分重要的理论和实践意义。

生物多样性通常指地球上数以百计的动物、植物、微生物及其与环境形成的生态复合体,是生态系统的重要属性,也是人类社会赖以生存和发展的物质基础^[18]。近20年来,中国政府发布并实施了一系列生物多样性保护规划,这些规划从宏观到具体,使生物多样性保护融入到当地经济社会发展规划中的方方面面^[19]。专家学者们也对生物多样性在农业生产中的功能与价值开展了大量的研究。孔箐铎等^[17]发现农田生物多样性具有生产与消费功能、生态服务功能、生活服务功能和社会政治功能。李明等^[20]指出农田生物多样性是粮食生产系统的基础,能为人类提供必备产品并增加农民收益,并且其还具备生态调节功能以及支撑环境的功能。陈欣等^[21]则进一步明确农田生物多样性具有授粉促进、基因交流、种群调节、生物控制、病害控制等功能。生物多样性为农业生产提供的服务功能繁多,大部分研究主要测重生物多样性某一方面的生态作用,少有研究对其进行较完善的梳理。因此,本研究基于现有生物多样性在农业低碳化中生态作用的相关研究,利用信息可视化软件CiteSpace对其进行文献综述以及分析,直观呈现近10年该研究领域发展的时空特征、研究热点和研究前沿,并从经济价值与生态价值两方面对生物多样性在低碳农业中的功能进行梳理,探讨不同生物类群多样性对低碳农业的具体贡献和价

值,以期利用生物多样性发展低碳农业的未来研究与实践提供参考,助力中国低碳农业建设。

1 数据来源与分析方法

1.1 数据来源

文献数据来源于 Web of Science (WoS) 核心合集数据库,检索时间范围为2010年1月1—2022年12月31日,先通过关键词“low carbon”、“ecological”、“green”、“zero carbon”并限定文献类型为Article分别进行检索,用OR对各关键词进行组配得到检索式A;再搜索关键词“agriculture”、“farmland”、“cropland”,并进行同上的操作得到检索式B;接着对关键词“biodiversity”、“diversity”、“richness”进行同上的操作得到检索式C,将检索式A、B、C用AND进行组配得到4487篇文献,最后利用CiteSpace除重功能和人工检查,剔除无关的非学术文献,得到最终的4064篇文献用于文献计量分析。

1.2 分析软件与方法

文献计量分析使用了CiteSpace 6.1.R2,是由陈超美博士开发的一款用于文献计量与分析的信息可视化软件^[22],可用来绘制科学知识图谱,直观地展现所研究领域研究热点、研究前沿等内容,是目前最流行的知识图谱绘图工具之一^[23]。本研究利用该软件的关键词共现分析,对该领域关键词网络进行可视化展示,找出高频、高中心性关键词进行研究热点分析,同时利用该软件聚类分析,辅助归纳关键词归属领域,对农田生物多样性的主要功能进行总结。

2 研究文献特征分析

2.1 发文量时空特征

发文量是分析某一学科在一段时间内发展态势的重要指标,可直观的看到该学科在该时间段研究热度的变化^[24]。通过Web of Science检索结果分析功能绘制研究方向图(图1),可以看出Environmental



图1 生物多样性在低碳农业中的作用研究方向

Sciences Ecology(环境科学)是该领域发文量最多的研究方向,Agriculture(农学)、Biodiversity Conservation(生物多样性保护)紧随其后。Plant Science(植物学)、Microbiology(微生物学)、Zoology(动物学)、Marine Freshwater Biology(海水及淡水生物学)针对不同生物类群,开展了不同研究方向。其中,植物学方向发文量较多,是生物类群中的热点研究方向。

利用Endnote文献管理软件,对研究趋势进行统计,绘制图2。结果显示:低碳农业生物多样性的相关研究发文量呈现整体上升的趋势,2018—2019年发文量增长最快;在不同国家之间,选取五常国家与金砖国家等农业发达国家进行对比,中国、巴西、美国、印度等

国家发文量最大,以中国农业为研究对象的文章数量远超其他国家。

20世纪80年代,“agrobiodiversity(农田生物多样性)”一词被创造^[25],人们开始对农田生态系统中的生物多样性进行研究。近年来,随着农业的扩张和集约化^[26],生物多样性面临的威胁和压力也不断地增加^[27],并出现了全球范围的下降^[27-28],引起了大量专家学者的关注。在增长最快的2018—2019年,关注农作物质量、产量以及碳汇的文章增加较多。如Catarino等^[29]的研究发现,授粉昆虫可以提升15%~40%的油菜产量;Wan等^[30]的稻鱼共养试验发现黄鳍鱼可通过提升土壤肥力,从而提升稻米品质;Kallenbach等^[31]认为提高土壤微生物碳处理效率是管理农业土壤碳汇的有效

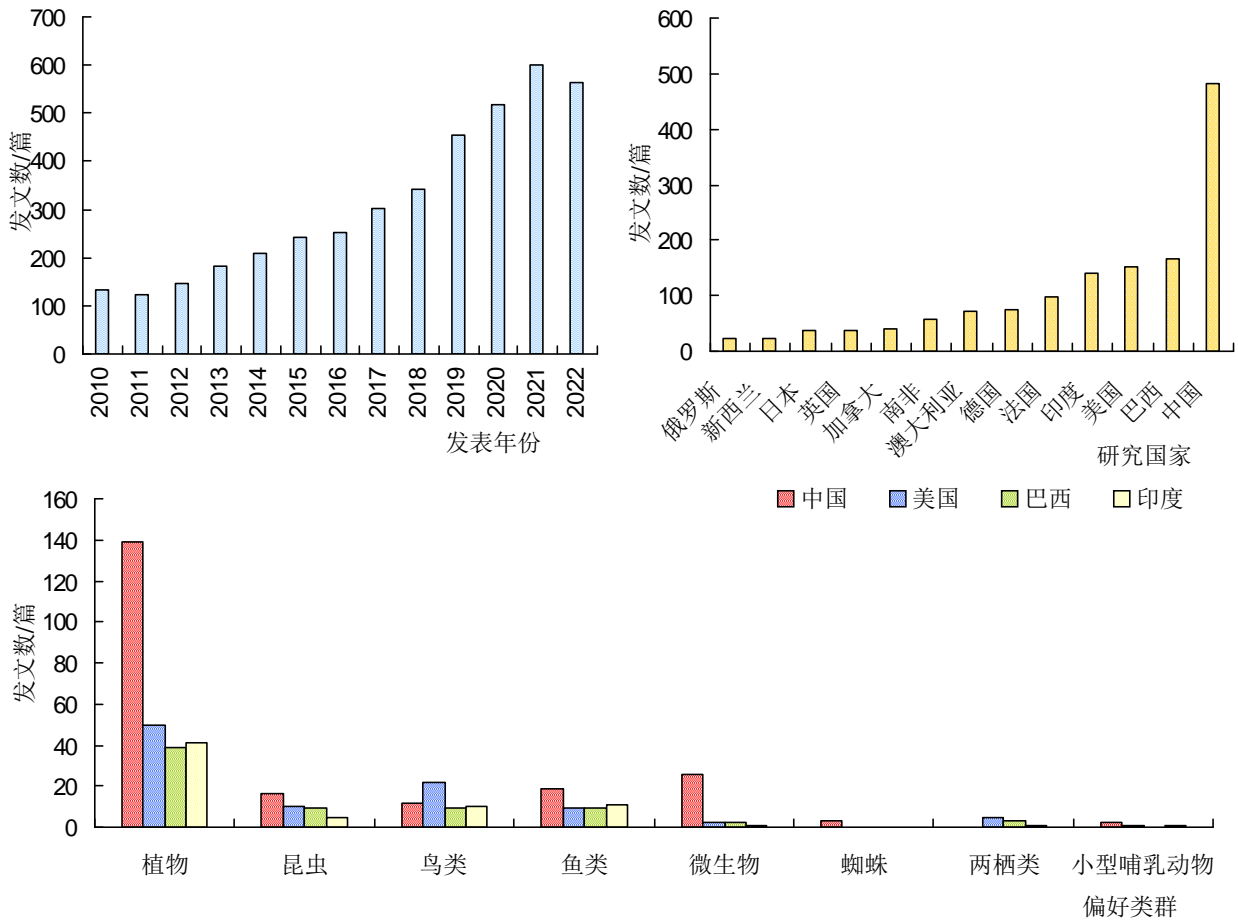


图2 生物多样性在低碳农业中的作用研究趋势

策略。在不同国家之间,以中国为研究对象的文章同步关注生物多样性对农作物质量与产量的影响,而美国、巴西、印度等国家则更多关注农作物产量。在对具体生物类群的偏好上,中国对农田及其周边生境中的植物、鱼类和微生物关注程度较高,美国偏好植物与鸟

类,巴西和印度则主要关注农田植物。

2.2 关键词分析

通过 CiteSpace 软件对检索文献进行关键词共现与聚类分析,得到关键词知识图谱(图3),并提取图谱对应各聚类中出现的高频关键词(表1)。聚类结果显

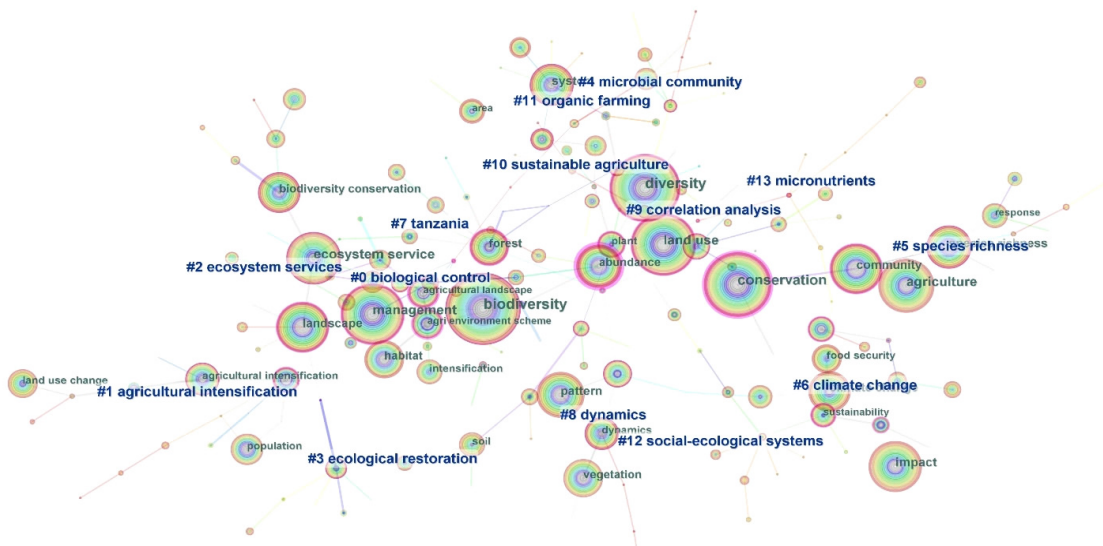


图3 低碳农业生物多样性研究关键词共现图谱

表 1 不同聚类中的高频关键词

序号	关键词	出现频次/次	中心性	归属聚类中心
1	Biodiversity(生物多样性)	1238	0.18	Biological control(生物防治)
2	Diversity(多样性)	946	0.35	Correlation analysis(相关性分析)
3	Conservation(保护)	719	0.69	Species richness(物种丰富度)
4	Management(管理)	638	0.25	Biological control(生物防治)
5	Ecosystem service(生态系统服务)	614	0.15	Ecosystem service(生态系统服务)
6	Land use(土地利用)	522	0.28	Correlation analysis(相关性分析)
7	Agriculture(农业)	477	0	Species richness(物种丰富度)
8	Impact(影响)	422	0	Climate change(气候变化)
9	Landscape(景观)	328	0.25	Ecosystem service(生态系统服务)
10	Community(群落)	313	0.20	Species richness(物种丰富度)
11	Climate change(气候变化)	310	0.09	Climate change(气候变化)
12	Species richness(物种丰富度)	273	0.14	Species richness(物种丰富度)
13	System(系统)	248	0.13	Organic farming(有机农业)
14	Pattern(模式)	246	0.09	Dynamics(动态)
15	Abundance(多度)	244	0.85	Correlation analysis(相关性分析)
16	biodiversity conservation(生物多样性保护)	233	0.10	Tanzania(坦桑尼亚)
17	Forest(森林)	209	0.37	Tanzania(坦桑尼亚)
18	Habitat(栖息地)	194	0	Biological control(生物防治)
19	Vegetation(植被)	177	0.02	Social-ecological systems(社会生态系统)
20	Dynamics(动态)	173	0.10	Dynamics(动态)

示,模块值为0.8132,大于0.3,平均轮廓值为0.9421,大于0.7,表明聚类是合理的。图中各个关键词圆圈的大小表示其在文献中出现频次的多少(Biodiversity圆圈最大,出现频次最高),圆圈之间的连线表示2个关键词之间具有联系,圆圈的不同颜色环表示关键词在不同时间出现,圆圈中粉紫色色环越厚代表中心性越高(Abundance粉紫色色环最厚,中心性最高)。

由表1可知,“Biodiversity(生物多样性)”、“Diversity(多样性)”、“Conservation(保护)”、“Management(管理)”等词语出现频率最高,说明农田生物多样性的保护与管理是该领域的研究热点。如Chappell等^[32]强调,生物多样性与农业具有相互依存性,并且具有相互支持的作用;Schmidt^[7]发现多数专家认为“genetic erosion(遗传侵蚀)”这一概念具有较高不确定性,因此需要植物育种专家不断注入多样的遗传性状来进行预防,从而达到农业可持续。在研究指标上,一般采用“Species richness(物种丰富度)”、“Abundance(多度)”等指标来对生物多样性进行评估,并且,“Abundance”的中心性为0.85,与其他关键词联系最为广泛,说明关于农田生物多样性的研究主要是在群落和种群水平,对于生物体个体数量的关注要强于物种丰富度。

大量的研究内容主要集中在“Biological control(生物防治)”、“Agricultural intensification(农业集约化)”、“Ecosystem service(生态系统服务)”、“Ecological restoration(生态恢复)”等4个聚类中(图3),一定程度上反映生物多样性在农业中的作用体现在经济与生态两方面。归属“Biological control”聚类关键词最多,说明生物防治是生物多样性在农业生产中最受关注的功能。如Philpott等^[33]对生物多样性的害虫防治作用进行了讨论,认为生物多样性可在作物多样性、天敌多样性、景观多样性等不同层面上对害虫防治起到作用;Hajjar等^[34]认为生物多样性不但具有病虫害控制、提升授粉效率、稳定作物产量等作用,而且还有助于生态系统固碳,防止土壤侵蚀。

3 生物多样性提升农业产值实现低碳化

3.1 农田增产增收功能

农田生物多样性的合理搭配能明显提高粮食产量、增加农民收益^[20]。Baumgärtner等^[35]指出农田生物多样性不但可以稳定作物产量,降低农民减产的风险,还可以提供一定的生态服务(如二氧化碳贮存)来为社会提供保障。Li等^[36]在云南10个县中开展田间对比试验,将多种作物间作模式(小麦与蚕豆,烟叶与玉米,

土豆与玉米,甘蔗与玉米)与单一作物栽培模式相比,发现多种作物间作模式可以提高33.2%~84.7%的作物产量。烟草与甘蔗间作玉米,提高了烟草生长后期和甘蔗种植前期土地空间和物质资源的利用,增加了一个玉米生产季节,从而提高了产量;马铃薯和玉米以及小麦和蚕豆的组合则利用了它们高度的差异,形成田间立体作物组合,改善了田间小气候,促进了作物生长。

桑基鱼塘、稻—鱼—鸭共养、猪—沼—果循环等中国传统生态农业模式也为生物多样性提高农田产量与农民收入提供有力的实践证明。对浙江省稻鱼共生系统的研究显示,稻田养鱼系统一方面使农民获得了养鱼的收益;另一方面,由于水稻同鱼类的互惠互利关系:(1)鱼类取食水稻田中的害虫,水稻调节鱼类的田间环境;(2)未被植物利用的氮肥促进了稻田中浮游生物的生长,这些浮游生物被鱼类消耗掉了;(3)未消耗的鱼饲料中的氮可被水稻利用。稻鱼共生系统比水稻单作系统少施用68%的杀虫剂和24%的化肥,直接减少了农民的开支^[37]。由于化肥、农药是农业生产中重要的碳排放来源,所带来的碳排放约占农业碳排放总量的25%~30%^[38],因此,通过提升生物多样性的方式来实现农业增产,可有效减少化肥的相对用量,降低农业全生命周期过程中的碳排。

3.2 农产品品质提升功能

维持和保护生物多样性对于野生动植物资源,特别是栽培、养殖动植物品种的野生种和亲缘种资源的保护非常重要。经过驯化的品种经过多代的更替后,原有的优良性状可能会发生改变甚至退化,因而必须从野生种类中找出好的品系与原有品种进行杂交复壮^[39]。朱有勇^[40]对云南元阳哈尼梯田红米品质千年不退化的现象进行研究,发现哈尼梯田水稻品种等位基因比现代品种平均高3.18倍,功能基因中SNP频率和基因多样性丰度极高,这有力的证明了生物(遗传)多样性在农作物优良品质维持和提升中的重要作用

间作、共作是中国具有悠久历史的农业生产技术,能够增强农田种生物的遗传和物种多样性,提升农产品品质。农田中合理配置不同科属的植物,如豆科和禾本科植物的组合,由于其对土壤营养成分的需求不同,二者间作可保持土壤肥力的持续性,从而提高作物的品质;同时豆科植物的根系可以固氮,为其他农业作物提供氮素营养,玉米和大豆的间作试验显示,不同作物的种间根际效应可以大幅提升作物的产量和营养价值^[41]。吴满霞^[42]对茶园间作的研究显示,间作能提高茶园生物多样性,并且使茶叶氨基酸总量、茶氨酸量增加,酚氨比下降,提升茶叶的品质。在农田动物与植物

共作方面,王强盛等^[43]开展了稻鸭共作系统对水稻品质影响的研究,发现鸭在田间活动过程中兼有拔草及浑水控草的作用,可明显减少田间杂草的危害;并且鸭子也喜食稻飞虱、稻象甲、稻纵卷叶螟等害虫,减少害虫基数。稻鸭共作系统可有效提高米粒的外观品质、营养品质等,能大大降低米粒的垩白率。

4 生物多样性改善农业生态实现低碳化

4.1 病虫害控制功能

大量研究与实践表明,生物多样性具有控制农业病虫害的功能。Kazemi等^[25]提出生物多样性在提供粮食安全、病虫害防治和生态恢复等生态系统服务方面具有一定作用,对气候变化、土地利用和碳汇具有一定的影响。Letourneau等^[44]利用荟萃分析对45篇论文中涉及的552个对照试验研究发现,物种多样性高的作物系统相比物种多样性低的作物系统,植食动物数量少、其天敌数量多、作物损害程度低。赵文晋等^[15]发现河北枣强县农民利用高生物多样性的“生态棉田”(小米引鸟吃害虫、芝麻驱赶蚜虫),化解了棉花枯黄萎病的危机。朱有勇^[40]对中国西南地区气象特点和生物灾害频发的情况进行深入调查,利用不同水稻品种的混合间栽模式形成生态屏障,成功控制了稻瘟病的传播,减少了农药使用量,体现了生物多样性防治病害的功能^[45]。Philpott等^[33]认为在农田周边提供不同类型的自然和人工的栖息地增加生物多样性是防治病虫害的最佳方式。

根据张广胜等^[38]对农药隐含碳排放系数的计算,1 kg农药的全生命周期隐含18.1 kg的CO₂(除草剂、杀虫剂和杀真菌剂三者平均值)排放。2018年中国农药使用量为150.36万t^[46],粗略可得中国农药生产的CO₂排放量为2721.516万t。通过提升生物多样性来进行病虫害控制,可以大幅减少农药的使用量,在提升食品安全的同时,具有巨大的降碳潜力。

4.2 提升传粉效率功能

农业生态系统中主要的传粉动物为家养蜜蜂和野生传粉昆虫,家养蜜蜂数量较多,野生传粉昆虫传粉效率较高,两者可以优势互补^[47]。维持传粉动物的物种多样性,可以提高作物授粉的效率与成功率,直接关系到作物的产量、品质。研究分析显示^[48],全球约70%的主要作物(产量占全球作物总产量的35%)可通过传粉增产,中国主要种植的44种水果和蔬菜中,约57%(产值占国内蔬果总产值的25.5%)利用虫媒传粉。如果没有传粉动物,全球农业总产量预计会下降3%~8%,这意味着全球需要将2/3的陆地变为耕地才能弥补这部分损失^[48]。大量研究表明^[49],不施用化肥的农业生

产模式将会减少产量 30% 以上, 2019 年全球化肥施用总量为 19080.8 万 t^[50], 则传粉动物带来平均 5% 的产量提升相当于 3180.1 万 t 的化肥施用。根据张广胜等^[38]对化肥隐含碳排放系数的计算, 1 kg 化肥的全生命周期隐含 1.38 kg 的 CO₂ (氮肥、磷肥和钾肥三者平均值) 排放, 可粗略得出传粉动物可减少 4388.58 万 t 的 CO₂ 排放量, 因此, 维持传粉动物的生物多样性对农业来说十分重要。

传粉昆虫的物种多样性受到环境因素影响显著。适宜的生境、筑巢点、筑巢材料以及充足的食物来源 (蜜源植物), 是传粉昆虫生存与繁衍的必要条件, 这些资源可能分散在农业景观不同生境类型的景观斑块中 (包括自然生境、半自然生境及农田等)^[51], 因此, 提升农业景观斑块的多样性, 提供多样且适合传粉昆虫生存的栖息地, 可以有效提高传粉者的生物多样性, 从而提升传粉效率, 带来作物产量与品质的提升, 减少化肥

的施用。

5 不同生物类群对低碳农业的具体价值

为进一步了解不同类群生物多样性对低碳农业的主要价值, 将文献按照增产增收、品质提升、病虫害控制和传粉服务四大价值进行整理, 并按照植物、鸟类、鱼类、昆虫、蜘蛛、两栖类、小型哺乳动物、微生物 9 大类群进行分类归纳, 得到表 2。

由表 2 可知, 植物类群在低碳农业中的研究有 1681 篇, 数量最多, 其次是昆虫、鸟类、鱼类等, 说明植物与昆虫是低碳农业中的研究热点; 在四类价值的发文量中可以看到, 各生物类群对农业增产增收的作用是研究最多的, 达 974 篇, 说明现有研究仍多以经济价值来评价衡量生物多样性对农业的作用; 昆虫类群在四个价值研究均最多, 一定程度上说明昆虫多样性与低碳农业联系最为密切。

在植物类群中, 主要研究其多样性对农业增产增

表 2 不同生物类群对低碳农业的价值 篇

类群	总发文量	增产增收	品质提升	病虫害控制	传粉服务	多样性提升技术
植物	1681	403	236	44	67	间作、混作、套作
昆虫	1585	422	261	62	85	人工巢箱、生境营造、蜜源植物
鸟类	395	69	46	12	10	人工巢箱、生境营造、食源植物
鱼类	180	36	56	2	2	水田放养、生境营造
微生物	116	20	20	0	0	豆科植物混种, 菌根微生物制剂
蜘蛛	39	13	5	9	4	生境营造, 无公害农业
两栖类	39	8	5	0	0	生境营造, 无公害农业
小型哺乳动物	21	3	2	0	3	生境营造, 无公害农业
总计	4056	974	631	129	171	

注: 表中数字为发表文献数。

收和品质提升的作用。植物多样性的作用主要是通过间作、混作、套作等不同的种植方式, 使不同养分偏好、不同冠层和不同根系结构的植物互相组合, 来对土壤、水肥、光热等资源进行充分利用, 从而达到农田增产。Jaskulska 等^[52]将大麦和豌豆以行间作的方式进行耕种, 与纯播相比, 产量分别提升 8.5% 与 10.2%; Frimpong 等^[53]发现可可与香蕉间作可以促进可可授粉, 从而增加产量; Ahmed 等^[54]对 3 种刺槐在农田中的种植组合进行试验, 发现其有效提高了土壤肥力, 可增加高粱产量, 在干旱区有推广意义。除了产量和品质的提升, 植物类群在传粉服务以及病虫害控制方面也存在一定的作用, 如营造适宜传粉者生存的生境从而吸引传粉者, 通过间作形成传染病传播的生态屏障等。

在节肢动物的研究中, 传粉昆虫一般在取食花粉过程中提供传粉服务, 蜘蛛一般通过捕食害虫来控制

虫害, 间接提升农作物产量和品质。Catarino 等^[29]对 294 个农民的农田进行调查, 发现传粉昆虫多度较高的田地产量比传粉昆虫多度较低的田地产量高 15%~40%; Martinez-Salinasa 等^[55]在 30 个哥斯达黎加的咖啡农场发现没有蜜蜂的传粉服务和鸟类的虫害控制, 农场平均减产 24.7% (相当于每公顷损失 1066 美元); Adhikari 等^[56]通过覆盖作物管理措施提高甲虫 (主要食物是蚜虫、蛴螬等害虫以及杂草种子) 群落多度, 从而达到了虫害防治与杂草控制的目的。

在鸟类、鱼类和微生物 3 个类群中, 鸟类主要通过捕食害虫来控制虫害; 鱼类则是提供直接经济价值, 以及作为循环农业中的重要组成部分; 微生物则主要是通过固氮和形成菌根来为农作物提供养料。Olmos-Moya 等^[57]在智利中部的 5 个葡萄园中放置巢箱以吸引食虫鸟类, 减少了 43% 的害虫; Garcia 等^[58]在西班牙

的24个苹果园中放置巢箱吸引鸟类,确定了山雀类是苹果蛀虫的天敌,并认为放置巢箱是一种高效、廉价且易于实施的生态集约化措施;Erdemci等^[59]通过田间试验证明荧光假单胞菌这一根际细菌对扁豆的生长与产量有正向作用,认为研究微生物对低碳农业来说是十分必要的;Tsuruta等^[60]对日本的稻鱼共养系统进行研究,发现鱼粪的施肥作用提高了水稻的品质以及产量。

6 总结与展望

农业活动中的减排固碳具有巨大潜力,为了实现中国“双碳”目标的顺利达成,推动农业模式转变刻不容缓。生物多样性是发展低碳农业的生态基础和有效路径。本研究利用CiteSpace文献计量软件对生物多样性在低碳农业中的作用研究进行分析,并从经济与生态价值角度,对国内外低碳农业中生物多样性发挥的功能进行归纳总结,探讨不同生物类群对低碳农业的主要价值,得到以下结论。

(1)Environmental Sciences Ecology(环境科学)、Agriculture(农学)、Biodiversity Conservation(生物多样性保护)是该领域发文量最多的研究方向,Plant Science(植物学)方向发文量较多,是生物类群中的热点研究方向。

(2)低碳农业中生物多样性的相关研究发文量呈现整体上升的趋势,2018—2019年发文量增长最快;中国、巴西、美国、印度等农业大国发文量较大,在中国开展的研究数量远超其他国家。

(3)生物多样性的保护与管理是目前低碳农业生物多样性的研究热点,而生物防治是生物多样性实现农业低碳化的主要途径,生物多样性可以增加农业生产过程中的生态与经济价值。在经济方面,生物多样性直接促进农田增产增收和农产品品质提升,可有效减少化肥的使用,从而减少因化肥的使用而产生的碳排放量。在生态方面,生物多样性具有病虫害控制功能,可有效减少农药的使用量,从而降低碳排放量。生物多样性也能提升传粉效率,间接提升作物产量和品质。

(4)植物与昆虫是低碳农业中生物多样性研究最多的类群;昆虫多样性与低碳农业联系最为密切,可以提供多种生态服务;植物多样性主要提升农作物产量;鸟类多样性主要有控制病虫害的价值;鱼类和微生物主要有提升农作物品质的价值。

现有研究与实践表明,合理的农业实施与管理模式是提高农田及其周边地区生物多样性的有效方法。目前,关于农业的生物研究主要集中在品种提升与改良方面,主要关注重要作物和蔬果优良品种的遗传多样性,少有从生态系统和景观尺度考虑提升农田生物

多样性从而减少农业碳排;在具体生物类群上对农田鸟类、微生物、两栖类等类群关注也较少。随着全球快速城市化发展,世界各国的农田面积不断缩减,对高效集约低碳农业模式的需求也在不断增加,未来的研究可从生态系统和景观的尺度,探索基于生物多样性的多功能农业发展模式,实现农业减排固碳,从而更好地助力双碳目标。

参考文献

- [1] 郑远红. 低碳经济视角下我国农业现代化发展路径创新[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(3): 263-267.
- [2] 纪玉颖. “双碳”目标下低碳农业研究[J]. 上海农村经济, 2022(7): 43-45.
- [3] 程琨, 潘根兴. 农业与碳中和[J]. 科学, 2021, 73(6): 8-12, 4.
- [4] 杨中柱. 发展我国低碳农业的思考[J]. 农业部管理干部学院学报, 2010(1): 29-32.
- [5] PARRY M L, CANZIANI O, PALUTIKOF J, et al. Climate change 2007- impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge university press, 2007: 273-313.
- [6] SHUKLA P R, SKEA J, SLADE R, et al. IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change (summary for policymakers) [M]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge university press, 2022: 17-20.
- [7] SCHMIDT M R, WEI W. Loss of agro- biodiversity, uncertainty, and perceived control: A comparative risk perception study in Austria and China[J]. Risk analysis: An official publication of the society for risk analysis, 2006, 26(2): 455-70.
- [8] OVERMARS K P, SCHULP C J E, ALKEMADE R, et al. Developing a methodology for a species- based and spatially explicit indicator for biodiversity on agricultural land in the EU[J]. Ecological indicators, 2014, 37: 186-198.
- [9] TSCHARNTKE T, GRASS I, WANGER T C, et al. Beyond organic farming - harnessing biodiversity- friendly landscapes[J]. Trends in ecology & evolution, 2021, 36(10): 919-930.
- [10] KOOHAFKAN P, ALTIERI M A, GIMENEZ E H. Green Agriculture: foundations for biodiverse, resilient and productive agricultural systems[J]. International journal of agricultural sustainability, 2012, 10(1): 61-75.
- [11] IUCN. Guidance for using the IUCN global standard for nature-based solutions[M]. Gland, Switzerland: IUCN, 2020: 1-15.
- [12] 曾楠, 刘桂环, 张洁清, 等. 基于自然的解决方案的农业甲烷减排路径及对策研究[J]. 环境保护, 2022, 50(7): 54-58.
- [13] BISHT I S, RANA J C, YADAV R, et al. Mainstreaming agricultural biodiversity in traditional production landscapes for sustainable development: The Indian scenario[J]. Sustainability, 2020, 12(24).
- [14] 李波. 中国的农业生物多样性保护及持续利用[J]. 农业环境与发展, 1999(4): 9-15.
- [15] 赵文晋, 李都峰, 王宪恩. 低碳农业的发展思路[J]. 环境保护, 2010(12): 38-39.

- [16] 严立冬,邓远建,屈志光.论生态视角下的低碳农业发展[J].中国人口·资源与环境,2010,20(12):40-45.
- [17] 孔箐铤,靳佩贞.低碳背景下的农业生物多样性保护思考[J].中国农学通报,2010,26(21):297-300.
- [18] 邱波,王刚.生产力与生物多样性关系研究进展[J].生态科学,2003(3):265-270,241.
- [19] 薛达元,张渊媛.中国生物多样性保护成效与展望[J].环境保护,2019,47(17):38-42.
- [20] 李明,彭培好,王玉宽,等.农业生物多样性研究进展[J].中国农学通报,2014,30(9):7-14.
- [21] 陈欣,唐建军,王兆骞.农业生态系统中生物多样性的功能——兼论其保护途径与今后研究方向[J].农村生态环境,2002(1):38-41.
- [22] 侯剑华,胡志刚.CiteSpace软件应用研究的回顾与展望[J].现代情报,2013,33(4):99-103.
- [23] 陈悦,陈超美,刘则渊,等.CiteSpace知识图谱的方法论功能[J].科学学研究,2015,33(2):242-253.
- [24] 邱均平,沈超,宋艳辉.近十年国内外计量经济学研究进展与趋势——基于Citespace的可视化对比研究[J].现代情报,2019,39(2):26-37.
- [25] KAZEMI H, KLUG H, KAMKAR B. New services and roles of biodiversity in modern agroecosystems: A review[J]. Ecological indicators, 2018, 93: 1126-1135.
- [26] TSCHARNTKE T, CLOUGH Y, WANGER T C, et al. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification[J]. Biological conservation, 2012,151(1):53-59.
- [27] SHOYAMA K, YAMAGATA Y. Predicting land-use change for biodiversity conservation and climate-change mitigation and its effect on ecosystem services in a watershed in Japan[J]. Ecosystem services, 2014,8:25-34.
- [28] BAUDRON F, GILLER K E. Agriculture and nature: Trouble and strife?[J]. Biological conservation, 2014, 170:232-245.
- [29] CATARINO R, BRETAGNOLLE V, PERROT T, et al. Bee pollination outperforms pesticides for oilseed crop production and profitability[J]. Proceedings of the royal society biological sciences, 2019,286(1912).
- [30] WAN N F, LI S X, LI T, et al. Ecological intensification of rice production through rice- fish co- culture[J]. Journal of cleaner production, 2019, 234: 1002-1012.
- [31] KALLENBACH C M, WALLENSTEIN M D, SCHIPANKSI M E, et al. Managing agroecosystems for soil microbial carbon use efficiency: Ecological unknowns, potential outcomes, and a path forward[J]. Frontiers in microbiology, 2019,10:1146.
- [32] CHAPPELL M J, LAVALLE L A. Food security and biodiversity: can we have both? An agroecological analysis[J]. Agriculture and human values, 2011, 28(1): 3-26.
- [33] PHILPOTT S M. Biodiversity and Pest Control Services[J]. Encyclopedia of biodiversity, 2013:373-385.
- [34] HAJJAR R, Jarvis D I, GEMMILL- HERREN B. The utility of crop genetic diversity in maintaining ecosystem services[J]. Agriculture ecosystems & environment, 2008,123(4):261-270.
- [35] BAUMGÄRTNER S, QUAAS M F. Managing increasing environmental risks through agrobiodiversity and agrienvironmental policies[J]. Agricultural economics, 2010,41(5): 483-496.
- [36] LI C, HE X, ZHU S, et al. Crop diversity for yield increase[J]. PloS one,2009,4(11):e8049.
- [37] XIE J, HU L, TANG J, et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice - fish coculture system [J]. Proceedings of the national academy of Sciences of the United States of America,2011,108(50):19851-19852.
- [38] 张广胜,王珊珊.中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制[J].农业经济问题,2014,35(7):18-26,110.
- [39] 祝增荣,李红叶,程家安.农业生物多样性与农业的可持续发展[J].农业现代化研究,2000(2):100-104.
- [40] 朱有勇.元阳梯田红米稻作文化——一项亟待研究和保护的农业科学文化遗产[J].学术探索,2009(3):14-15,23.
- [41] LI L, 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.
- [42] 吴满霞.茶园间作增进生物多样性和提升茶叶品质的研究进展[J].茶业通报,2009,31(3):117-119.
- [43] 王强盛,黄丕生,甄若宏,等.稻鸭共作对稻田营养生态及稻米品质的影响[J].应用生态学报,2004(4):639-645.
- [44] LETOURNEAU D K, ARMBRECHT I, RIVERA B S, et al. Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review[J]. Ecological applications, 2011, 21(1): 9-21.
- [45] 杜雯琴,江河.从《“十三五”生态环境保护规划》看源头防控的五个创新[J].环境保护,2017,45(15):50-53.
- [46] 徐新良,陈建洪,张雄一.我国农田面源污染时空演变特征分析[J].中国农业大学学报,2021,26(12):157-165.
- [47] VITOUSEK P M, MOONEY H A, LUBCHENCO J, et al. Human domination of earth's ecosystems[J]. Science, 1997,277(5325):494-499.
- [48] 孙玉芳,李想,张宏斌,等.农业景观生物多样性功能和保护对策[J].中国生态农业学报,2017,25(7):993-1001.
- [49] 马文奇,张福锁,张卫锋.关乎我国资源、环境、粮食安全和可持续发展的化肥产业[J].资源科学,2005(3):33-40.
- [50] 江敬安,陈丽,沈兵,等.世界肥料产业发展趋势及展望[J].现代化工,2023,43(1):13-20.
- [51] RUSCH A, CHAPLIN- KRAMER R, GARDINER M M, et al. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis[J]. Agriculture ecosystems & environment, 2016,221:198-204.
- [52] JASKULSKA I, JASKULSKI D, GALEZEWSKI L. Peas and barley grown in the strip- till one pass technology as row intercropping components in sustainable crop production[J]. Agriculture-basel,2022,12(2):229.
- [53] FRIMPONG E A, GEMMILL- HERREN B, GORDON I, et al. Dynamics of insect pollinators as influenced by cocoa production systems in Ghana[J]. Journal of pollination ecology, 2011,5(10):74-80.
- [54] AHMED A I, AREF I M, ALSHAHRANI T S. Investigating the variations of soil fertility and Sorghum bicolor L. physiological

- performance under plantation of some Acacia species[J]. Plant soil and environment, 2020,66(1):33-40.
- [55] MARTINEZ- SALINASA A, CHAIN- GUADARRAMA A, ARISTIZABAL N, et al. Interacting pest control and pollination services in coffee systems[J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2022,119(15): e2119959119.
- [56] ADHIKARI S, MENALLED F D. Supporting beneficial insects for agricultural sustainability: the role of livestock- integrated organic and cover cropping to enhance ground beetle (carabidae) communities[J]. Agronomy-basel,2020,10(8): 1210.
- [57] OLMOS MOYA N, DIAZ SIEFER P, POZO R A, et al. The use of cavity- nesting wild birds as agents of biological control in vineyards of central chile[J]. Agriculture ecosystems &environment, 2022,334:107975.
- [58] GARCIA D, MINARRO M, MARTINEZ- SASTRE R. Enhancing ecosystem services in apple orchards: Nest boxes increase pest control by insectivorous birds[J]. Journal of applied ecology, 2021, 58(3):465-475.
- [59] ERDEMCİ I. Effect of pseudomonas fluorescent rhizobacteria on growth and seed quality in lentil (Lens Culinaris Medik.) [J]. Communications in soil science and plant analysis, 2020, 51(14): 1852-1858.
- [60] TSURUTA T, YAMAGUCHI M, ABE S, et al. Effect of fish in rice- fish culture on the rice yield[J]. Fisheries science,2011,77(1):95-106.