

DOI: 10.20103/j.stxb.202312272840

孙晓, 郑华, 刘珍环, 任玉含, 唐华俊. 多尺度农业生态系统服务研究进展. 生态学报, 2024, 44(21): 9443-9457.

Sun X, Zheng H, Liu Z H, Ren Y H, Tang H J. Research progress and prospects of multi-scale agroecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9443-9457.

## 多尺度农业生态系统服务研究进展

孙 晓<sup>1,\*</sup>, 郑 华<sup>2,3</sup>, 刘珍环<sup>4</sup>, 任玉含<sup>5</sup>, 唐华俊<sup>6</sup>

1 中国人民大学生态环境学院, 北京 100872

2 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275

5 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083

6 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 北京 100081

**摘要:** 农业生态系统服务是由受人类活动深度调控和影响的农业系统产生, 其在提供有益生态系统服务的同时, 也产生了诸多对人类福祉有负面影响的生态系统负服务。农业生态系统服务和负服务研究不仅关注传统的粮食安全, 同时关注与生态安全的共赢, 可为实现农业可持续发展提供新的科学视角。基于文献阅读, 在明晰农业生态系统服务和负服务内涵及主要特征的基础上, 旨在(1) 归纳农业生态系统服务和负服务研究的核心尺度和热点议题; (2) 梳理多级尺度的典型指标及适用性评估方法; (3) 提出未来农业生态系统服务和负服务领域的关键发展方向。农业生态系统服务研究主要涉及田块、景观和区域三个核心尺度, 随着尺度扩大, 热点议题从关注田块农作物自身, 到关注景观异质性及其关联, 再到关注区域上与社会系统的结合。农业生态系统除了提供典型或特殊的粮食供给、授粉、杂草防控等服务, 同时也带来农业废料、病虫害、生境破损等负服务。对于农业生态系统服务评估, 定性和半定量方法通常可适用于多级尺度, 而不同定量方法和模型的最佳适用尺度存在差异。未来可重点从时空权衡作用分析、供需和流动机制探索、生态价值实现及生态补偿制定方向为多尺度的农业景观规划与设计提供理论和实践支撑, 从生态系统服务视角有效促进农业的可持续发展。

**关键词:** 农业生态系统服务; 生态系统负服务; 指标体系; 评估方法; 多尺度; 农业景观

## Research progress and prospects of multi-scale agroecosystem services

SUN Xiao<sup>1,\*</sup>, ZHENG Hua<sup>2,3</sup>, LIU Zhenhuan<sup>4</sup>, REN Yuhuan<sup>5</sup>, TANG Huajun<sup>6</sup>

1 School of Ecology & Environment, Renmin University of China, Beijing 100872, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 School of geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

5 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

6 State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China, The Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract:** Agroecosystem services are generated by agricultural systems that are deeply regulated and influenced by human activities. Apart from providing beneficial ecosystem services, they also bring multiple ecosystem disservices that have negative impacts on human well-being. Agroecosystem services and disservices are not only related to traditional food

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42271113); 国家重点研发计划子课题(2022YFD2001105-03); 中国科协青年人才托举工程项目(2021QNRC001)

**收稿日期:** 2023-12-27; **采用日期:** 2024-07-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunxiao@caas.cn

production but also related to ecological security, which can provide a new scientific perspective for promoting agricultural sustainable development. For agroecosystem services and disservices, they often show the following main characteristics: (1) the spatial and temporal heterogeneity of agroecosystem services and disservices are shaped by both natural and anthropogenic factors; (2) agricultural management practices impact the trade-offs and synergies between ecosystem services and disservices; (3) spatial flows of agroecosystem services supply and demand occur between agricultural ecosystems and socio-economic systems; (4) the generation and maintenance agroecosystem services and disservices interact across multiple interconnected scales. Based on literatures, this paper aimed to (1) summarize the core scales and hot topics of agroecosystem services and disservices; (2) sort out typical indicators and assess the applicability of evaluation methods at multiple scales; (3) propose key directions for agroecosystem services and disservices in the future. Research on agroecosystem service mainly involved three core scales: field, landscape, and regional scale. As the scale expanded, the hot topics shifted from focusing on field crops to considering landscape heterogeneity and its associations, and then to examining the integration with social systems at the regional level. In addition to providing typical or specific services such as food supply, pollination, and weed control, agricultural ecosystems also brought disservices such as agricultural waste, pests and diseases, and habitat degradation. For agroecosystem service assessment, qualitative and semi-quantitative methods were generally applicable across multiple scales, while the optimal scale for different quantitative methods and models may vary. In the future, based on agroecosystem services and disservices quantification and scale effects, the following main three aspects can help to provide theoretical and practical support for multi-scale agricultural landscape planning and design: spatial and temporal tradeoffs analysis, supply-demand and flow mechanism exploration, agroecosystem service value realization and ecological compensation. When adopting various agricultural management practices, it is crucial to balance the trade-off relationships and address the supply-demand deficits while fully considering diverse stakeholder interests. Agricultural landscape planning and design can be implemented by adjusting landscape complexity across multiple scales. These approaches aim to reconcile trade-offs and deficits, thereby enhancing the values of agroecosystem services and promoting sustainable agricultural development.

**Key Words:** agroecosystem services; ecosystem disservices; index system; assessment method; multiple scales; agricultural landscape

农业生态系统是一类特殊的自然-社会-经济复合生态系统,占陆地约40%的面积<sup>[1]</sup>。农业生态系统具有复杂的多层次结构和多功能特征,区别于森林、草地等自然生态系统,也有别于城市等人工生态系统,由完整的生产者、消费者和分解者组成,可自主进行物质循环和能量流动<sup>[2]</sup>。学界通常认为农业生态系统是指在一定的时间和空间范围内,利用农业生物与非生物环境之间,以及生物种群之间的相互作用建立起来,并在人类和自然共同支配下进行农副产品生产的系统综合体。因此,农业复合生态系统不仅包含农田本身,还包含农田周边一定范围的自然或半自然生境以及人工基础设施,它是人类为获得特定的供给服务而创造的,通过农业实践影响生态系统功能<sup>[3]</sup>。因此,农业生态系统服务虽然依赖农业系统自身的功能产生,但同时受农业系统内的人类活动水平影响<sup>[4]</sup>,是人类从农业生态系统中获得的有形或无形的惠益。

长期以来,粮食生产被认为是最主要的农业生态系统功能,然而由于气候变化加剧以及农业集约化带来的各种环境问题,粮食安全和生态安全受到威胁。为了缓解农业生产与生态环境保护间的冲突,促进农业可持续发展,农业系统提供的其他生态系统服务也逐渐被认知和重视<sup>[5]</sup>。受外部生产投入和人类活动影响,农业生态系统除了提供特有的粮食供给服务,还可以产生多种特有或典型的支持、调节和文化服务类型,例如授粉、病虫害防治、杂草防控、农业文化遗产等<sup>[1,6]</sup>。此外,农业系统产生的负面影响也不可忽视,被称为农业生态系统负服务,是指农业生态系统产生的功能、过程或属性对人类福祉产生认知上或实际上的负面影响<sup>[7]</sup>,如农业灌溉、化肥施用等田间管理活动会造成水资源消耗、农业废料产生、温室气体排放、病虫害、土壤结构破

坏和肥力下降、杂草覆盖等问题。

当前关于“农业生态系统服务”的研究主要针对一种或多种农业生态系统服务、负服务指标,在不同尺度的量化评估基础上,进行权衡关系、驱动因素以及管理、政策等理论与应用层面的探讨<sup>[8-11]</sup>。本质上,农业生态系统服务的内涵及特征仍未形成统一认知,缺乏综合考虑负服务的指标体系与方法模型。因此,目前亟需在明晰农业生态系统服务内涵及特征的前提下,重点阐释以下三个问题:(1)农业生态系统服务和负服务研究的核心尺度及热点议题是什么?(2)针对不同尺度,农业系统分别提供哪些典型的生态系统服务和负服务类型?(3)针对多种农业生态系统服务和负服务指标,分别有哪些适用性的评估方法与模型?在此基础上,展望未来农业生态系统服务和负服务领域的关键发展方向(图 1)。

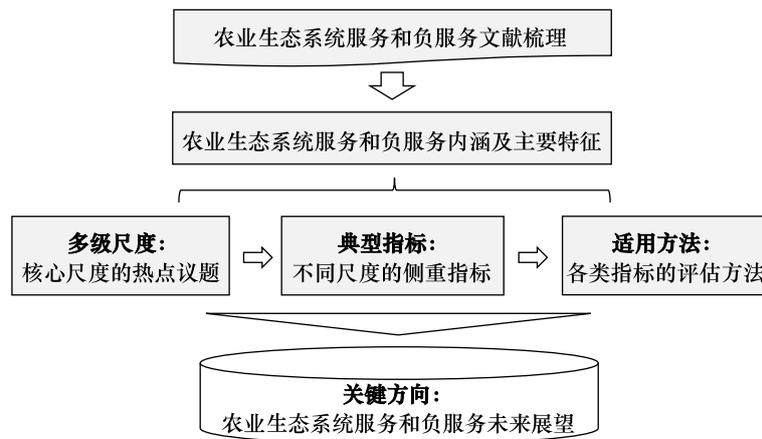


图 1 农业生态系统服务和负服务综述框架

Fig.1 The systematic review framework for agroecosystem services and disservices

## 1 农业生态系统服务和负服务研究概况

在中国知网和 Web of Science 核心合集数据库中筛选关于“农业生态系统服务和负服务”主题的文献,之后采用主题检索筛选和人工内容筛选方式梳理出聚焦农业生态系统负服务、多级尺度、热点议题、不同典型指标、评估方法和模型的文献,具体文献梳理和分析过程如图 2 所示。从 1995 年开始,农业生态系统服务和负服务为主题发表第一篇相关论文。2015 年以后,相关主题研究发表论文开始迅速增长。截至 2023 年,相关研究和综述论文共计 895 篇,其中发表在国际期刊的论文占比 91%。可以看出,目前重点关注农业生态系统负服务的研究仍比较缺乏;热点议题主要围绕三个核心尺度:全球和地区等区域尺度、景观尺度、田间和地块等田块尺度开展;农业生态系统服务和负服务指标侧重于探讨农业系统特有的指标类型,农业生态系统服务评估多是点位模型,可迁移性易受限<sup>[3,11]</sup>。

基于文献计量,农业生态系统服务和负服务具备以下几个主要特征:(1)自然和人为因素共同主导农业生态系统服务的时空异质性。自然条件和人类农业实践的差异塑造了农业景观多样性,进而产生了农业生态系统服务的差异性和动态性<sup>[8]</sup>。例如,旱地农业景观以提供粮食生产为主,水田农业景观还提供了涵养水源、调节气候等服务,林果农业景观则提供更多的休闲文娱服务,而这些农业景观负服务(如病虫害等)在年内不同季节或者年际间也会有波动。(2)农业管理方式影响服务及负服务间权衡与协同。农业生态系统服务及负服务间存在着高度的非线性关系<sup>[9]</sup>。例如,集约化管理方式下,施肥和灌溉强度增加,虽然提升了作物产量和净初级生产力,但同时也带来了水资源消耗、温室气体排、面源污染等威胁。(3)农业生态系统与社会经济系统间存在服务供需空间流动。多数农业生态系统服务会通过贸易网络、空气流动等方式和途径从农业系统流动到人类系统。例如,粮食从农业主产区经过交通廊道运输到城市居民区;乡村居民区会受益于周边农田作物、果蔬林地等提供的气候调节和降温功能<sup>[12]</sup>。(4)服务和负服务的产生及维持会在多个关联尺度

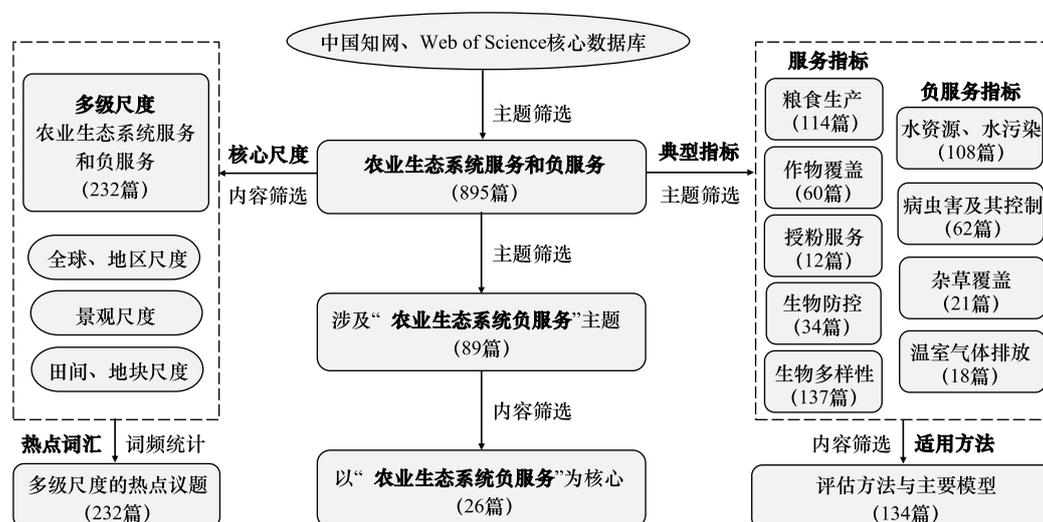


图2 农业生态系统服务和负服务文献梳理

Fig.2 Published papers related to agroecosystem services and disservices

产生相互影响。农业景观中自然或半自然生境与农田地块间的转换可对生物多样性和生态过程产生直接影响,进而影响服务供给。例如,地块尺度的咖啡林会受更大景观尺度上自然林影响,由于周边自然林具有较高生物多样性,咖啡林可获得更多授粉服务<sup>[13]</sup>。

## 2 农业生态系统服务核心尺度及热点议题

区别于其他生态系统,除了区域和景观两个常见的尺度,已有农业生态系统服务和负服务研究还聚焦于以农户为主导的田块尺度。其中,田块尺度重点聚焦与土壤、耕作相关的农田质量、生态效应的评价;景观尺度重点聚焦生物多样性、授粉服务等与景观格局的关联;区域尺度重点聚焦与农业可持续发展相关的议题(图3)。

田块尺度主要关注不同农业实践中的土壤养分、固碳、种植系统、耕作制度、微生物群落等。典型案例包括:Syswerda 和 Robertson 研究了美国密歇根州田间同一土壤类型上不同管理梯度以及不同耕作和种植方式,包括玉米-大豆-小麦轮作、休耕或免耕等对净初级生产力、土壤质量、植物多样性等生态系统服务的影响<sup>[10]</sup>; Schäckermann 等评估了以色列田间样本网格中的作物生产力情况,通过分析周围高大树木等自然生境的距离和比例对向日葵种子被捕食的影响来实现<sup>[14]</sup>;此外,田间作物覆盖以及地上地下枯萎根茎也可为葡萄园等经济园林提供大量的生态系统服务<sup>[15]</sup>;除了正向生态效益,Yvoz 等也提出了一个多指标框架来表征和评估田间杂草潜在危害性这类负向效益<sup>[16]</sup>。因此,目前已有关于田块尺度的农业生态系统服务研究,主要聚焦探索土壤质量、作物类型、耕作和种植方式带来的正向服务效益,以及在此过程中引起的杂草覆盖、肥力下降等农业生态系统特有或典型的负向生态环境效应。

景观尺度主要关注景观异质性、授粉者、天敌、物种丰度,以及与作物产量之间的关联等。由于农业生态系统服务具有多尺度关联特征,景观尺度的研究便于整合田间层面的数据信息,其结果又可以迁移到更宏观的区域层面。Swift 等认为农业景观的生物多样性与生态系统服务关系是随着尺度变化而变化的,例如:地块水平上土地使用者更加关注农业集约化作物,忽视与自身无直接关联的物种多样性,而景观和区域水平上的管理者则开始兼顾生态系统服务维持和生物多样性保护<sup>[11]</sup>。Kay 等在景观尺度对比了欧洲不同生物地理区域的多种农林复合系统空间配置类型对生态系统服务指标的影响<sup>[17]</sup>;除了农林系统以外,景观类型和景观结构的复杂性、植物物种的丰富度也能够农田周边的草地景观也可以增强生物多样性、授粉、病虫害控制、杂草抑制等农业生态系统的多功能性<sup>[1,6,18]</sup>;此外,德国一项研究还开发了一个包含生物气候、土地利用等环境预测因子,同时综合考虑景观复杂性及生物间相互作用的层次模型,可定量预测农业景观的害虫防治服务能

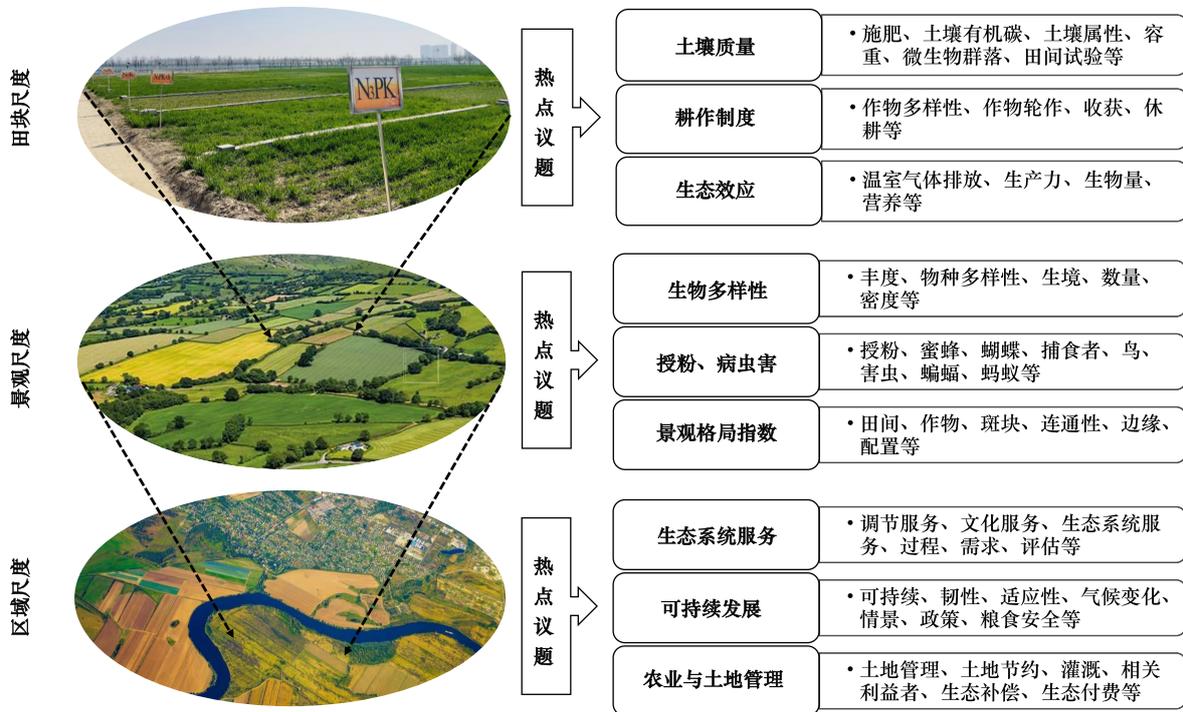


图 3 农业生态系统服务研究核心尺度和议题

Fig.3 Core scales and issues for agroecosystem services research

力<sup>[19]</sup>。因此,已有关于景观尺度的农业生态系统服务研究,主要聚焦景观组成、景观配置以及其他多种气候、生物等因素如何影响生物多样性,以及授粉、病虫害控制、杂草抑制等典型农业生态系统服务。

区域尺度主要关注与社会经济系统的结合,如生态补偿、农业景观规划与治理、韧性等,同时侧重关注宏观层面的粮食安全、土地管理与政策制定<sup>[20-22]</sup>。Novikova 等评估了立陶宛公民对不同农业生态系统服务的支付意愿,结果表明不同群体的支付意愿存在很高异质性,数据结果可为区域尺度消费者环境保护偏好提供支持<sup>[23]</sup>;除了关注生态系统服务本身,奥地利学者还开发了一个综合模型框架,用于揭示农业生态系统服务和经济发展指标的复杂关系,探究不同政策和气候变化情景对其权衡与协同关系的影响<sup>[24]</sup>。国内学者也在国家层面上评估了农业生产措施和气候变化对农业生态系统服务时空变化的综合影响,以及农业生态系统服务对气候变化的适应机制,以此为国家应对气候变化政策制度提供依据<sup>[8,25]</sup>。因此,已有关于区域尺度的农业生态系统服务研究,主要聚焦实践应用和政策管理,力求从生态系统服务视角探索农业产品价值实现、利益相关者需求、农业生态功能区划、气候变化适应策略等区域、国家或全球层面问题。

### 3 农业生态系统服务评估指标与方法

#### 3.1 指标体系

农业生态系统服务可分为供给服务、调节服务、支持服务、文化服务四大类。其中,供给服务主要包括粮食供给、饲料和纤维、原材料、医药以及能源和燃料等指标<sup>[7-8,26]</sup>;调节服务主要包括碳固存、全球气候调节、地方气候调节、废物分解和土壤保持等指标<sup>[27-29]</sup>;支持服务主要包括水源涵养、土壤结构与肥力、营养物质循环、生物防控、授粉、杂草防控等指标<sup>[3,27,30]</sup>;文化服务则主要包括审美价值、休闲娱乐、文化遗产、精神和宗教价值以及科学和教育等指标<sup>[31-33]</sup>。农业生态系统负服务可分为供给负服务、调节负服务和支持负服务三大类。其中,供给负服务主要包括水资源消耗、能源消耗和农业废料等指标<sup>[7,34]</sup>;调节负服务主要包括水污染、土壤污染、水土流失和温室气体排放等指标<sup>[3,35-37]</sup>;支持负服务主要包括病虫害、土壤结构破坏和肥力下降、

杂草覆盖和生境破损等指标<sup>[27,38-39]</sup>(图4)。

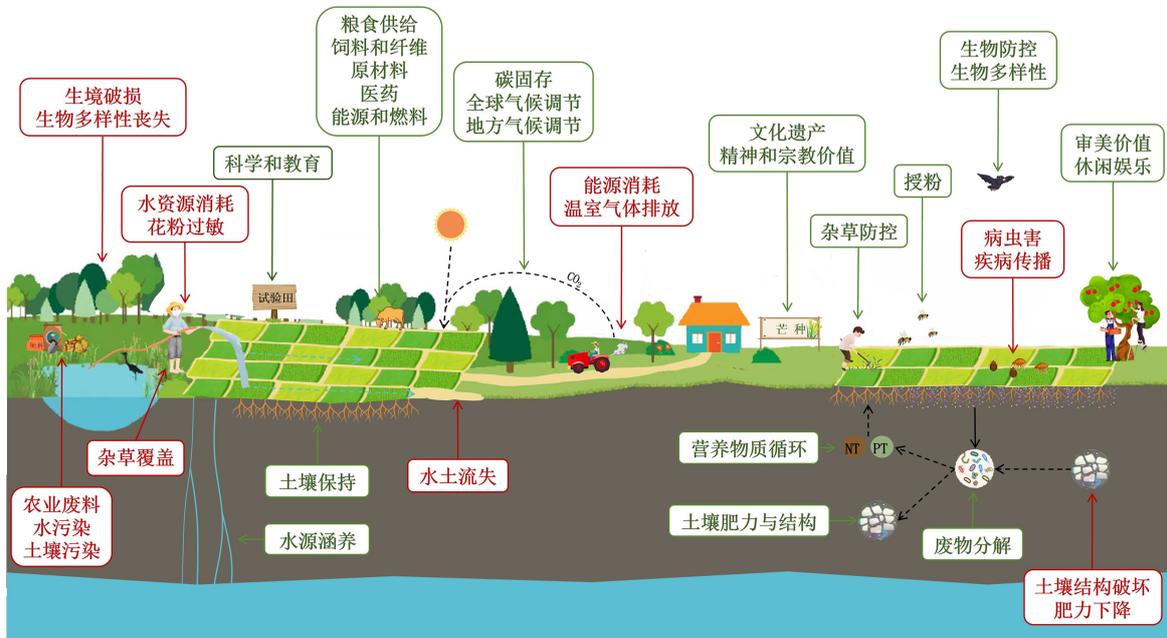


图4 农业生态系统服务和负服务典型指标示意图

Fig.4 Ecosystem services and disservices related to agroecosystem

图中绿色代表农业生态系统服务指标;红色代表农业生态系统负服务指标

不同的农业生态系统服务和负服务指标,其常见的适宜性评估尺度不尽相同(表1)。例如:对于杂草覆盖和防控、病虫害、天敌、授粉、生物防控、土壤肥力、土壤结构破坏等指标,主要聚焦在小的田块尺度,通常以网格为样本点,探究不同的作物品种、混合间作方式或作物、自然生境分布格局对指标的影响<sup>[14,40-42]</sup>。同时,这些指标可以在景观尺度上开展评估,尤其是病虫害、生物防控、授粉服务等,已有研究主要探究指标对农业景观组成、景观多样性、植被丰度、斑块面积大小的响应<sup>[43-45]</sup>;对于农业景观欣赏、休闲游憩、文化遗产、精神和灵感等文化服务指标,多聚焦在景观尺度上开展,侧重搜集和获取受访者对于不同农业景观的偏好、支付意愿,对美学、遗产、精神和灵感的感知等信息<sup>[23,46]</sup>。同时,在更大的区域尺度上,也可以从社会经济角度进行文化价值评估或文化遗产管理<sup>[47]</sup>;对于土壤保持、水源涵养、土壤流失、气候调节、生物多样性丧失等指标,通常是在流域、地区、气候带、甚至全球等景观和区域尺度上进行评估,重点探究不同指标间的权衡协同关系,农业集约化对指标的影响,以及不同土地利用、农林格局、管理方式或模拟情景下指标的变化<sup>[22,48-49]</sup>;对于粮食和原材料生产、水资源消耗、温室气体排放等指标,通常适用于田块、景观、区域等多级尺度,小尺度主要以田间试验和监测为主,旨在解析生态环境效应,大尺度则侧重探究指标与地区自然资源可持续利用、国家或全球可持续发展目标的关联<sup>[26,50-51]</sup>。

多样化的农业生态系统类型通常所关注的核心指标和发展目标不同,例如:集约化农业旨在高效提升粮食产量、减少病虫害的威胁;有机农业旨在减少化肥和农药的使用,从而降低水污染、土壤污染等;观光休闲农业侧重提供文化服务,旨在提升审美价值、休闲娱乐、科学和教育;生态农业更加关注农业生态系统的稳定性和恢复力,因此侧重生物多样性保护、提升社会生态的多功能性<sup>[29,44,49]</sup>。此外,农业生态系统服务涉及不同的相关利益者,如个体农户、农业联盟、合作社、企业、科研人员、自然保护组织、各级政府等,他们所重视的农业生态系统服务和负服务核心尺度和关键指标也存在差异<sup>[52]</sup>。例如:农户个体以提升产量、增加收入、减少损失为目标,因而更重视田块尺度上的粮食产量、生物防控、土壤肥力、土壤流失等指标;农业联盟、合作社主要以粮食安全为目标,因而更重视景观、区域尺度的粮食生产、水资源消耗等指标;自然保护组织、政府机构致

力于全球可持续发展目标的实现,因而更重视地区、全球尺度上的生物多样性保护、气候调节等指标<sup>[53]</sup>。

表 1 农业生态系统服务和负服务指标体系

Table 1 The index system for agroecosystem services and disservices

	服务类型 Ecosystem service types	具体指标 Specific index	指标含义 Index interpretation	常见评估尺度 Assessment scales	
农业生态系统服务 Agricultural ecosystem service	供给服务 饲料和纤维 原材料 医药 能源和燃料	粮食供给	农业生态系统是粮食、蔬菜、水果、肉类、乳制品等食物以及纤维、油、织物等材料 and 能源的主要生产地,还包括农田中种植的药用植物和草药。	田块、景观、区域	
		调节服务	碳固存	作物和其他植物成分光合作用吸收二氧化碳,施肥翻耕增加土壤有机质。	田块、景观
			全球气候调节	植被光和作用吸收大气中的二氧化碳,缓解温室效应和全球气候变暖。	景观、区域
	地方气候调节		作物和其他植物成分的蒸腾作用以及农田灌溉的蒸发,可以有效降低热岛效应。	田块、景观	
	废物分解		土壤微生物和无脊椎动物将农业废弃物和有机残留物转化为有机质和养分。	田块	
	土壤保持		作物、草本植物以及作物收获后的残茬和稻草可以减少水和风的侵蚀作用,防止土壤被冲刷或风蚀。	景观、区域	
	病虫害防控		农业系统中的天敌和掠食者可以帮助农作物控制害虫数量,鸟类、蝙蝠和昆虫有助于保持生态平衡、减少害虫。	田块、景观	
	杂草防控		鸟、蚂蚁和甲虫等食用种子,可防止杂草种子进入土壤种子库,减少或消除与农作物的竞争,保护作物健康和产量。	田块、景观	
	支持服务	水源涵养	农田及周围的植被根系吸收并储存水分,减少降水径流速度,使水分更多渗透到土壤中,补充和维持地下水位。	景观、区域	
		土壤结构与肥力	土壤的孔隙结构和聚集有助于提高土壤透气性、储存养分和水分,提高土壤肥力。	田块、景观	
		营养物质循环	废物分解产生的二氧化碳、水、养分(如氮、磷、钾)、稳定的有机质和残渣对土壤健康和作物生长起很大作用。	田块、景观	
		授粉	蜜蜂、蝴蝶和其他昆虫是重要的传粉者,传粉者的栖息地和健康对于作物产量至关重要。	田块、景观	
	文化服务	生物多样性	农田种植多种作物品种,为野生动植物提供栖息地,充当生态廊道,有助于农业系统的稳定性和抵抗力。	景观、区域	
		审美价值 休闲娱乐	审美价值	部分历史悠久或风景如画的农田成为文化景点。	田块、景观
			休闲娱乐	农田及周边地区是可供举办各种文化和社交活动的场所,也可作为旅游胜地,进行采摘、亲子游戏等活动。	田块、景观
		文化遗产	农田传承和维护了许多文化传统和农业实践,例如中国的哈尼梯田景观。	景观、区域	
		精神和宗教价值	农田可能是特定宗教仪式的场所,例如丰收节和种植仪式。	景观、区域	
		科学和教育	农田可以用作农业研究、土壤科学和认知教育的科研教育场所。	田块	
	农业生态系统负服务 Agricultural ecosystem disservice	供给负服务	水资源消耗	农业灌溉需要大量用水,特别是在干旱和半干旱地区。	田块、景观、区域
能源消耗			农业生产中使用的技术投入所消耗的石油、电力等能源。	田块、区域	
农业废料			农业生产中产生的农作物残余、农业塑料废物、化学用品残留等。	田块	

续表

服务类型 Ecosystem service types	具体指标 Specific index	指标含义 Index interpretation	常见评估尺度 Assessment scales
调节负服务	水污染	过度使用化肥和农药会导致地表水和地下水富营养化和硝酸盐污染。	田块、景观
	土壤污染	污水灌溉、农药、地膜、污泥、有机肥对农田的重金属污染等。	田块、景观
	水土流失	强烈的降雨、耕种和收获后土壤暴露在空气中、缺乏林草等植被覆盖、未进行轮作或休耕等均会导致土壤疲劳而造成水土流失。	景观、区域
	温室气体排放	部分农业实践,如化肥使用会引发短期内甲烷、氧化亚氮等比二氧化碳更具温室效应的温室气体排放。	田块、景观、区域
	病虫害	病虫害造成作物减产。	田块、景观
	杂草覆盖	农田中野生植物或未种植的植物与农作物竞争养分、水分、阳光或授粉。	田块、景观
	支持负服务	土壤结构破坏和肥力下降	耕作、轮耕、灌溉等耕作环节多会阻碍作物根系的生长和分布,造成土壤结构破坏、土壤养分流失和肥力下降。
生境破坏		土地开垦等行为会造成非作物栖息地的破坏或消失,例如林地、树篱和花带的增加。	田块、景观
生物多样性丧失		单一作物种植、大面积的农田和过度的农业化学品使用可能会造成农作物物种的丰度和多样性下降。	景观、区域

### 3.2 评估方法

农业生态系统服务和负服务的评估方法可大致分为:定性和半定量、定量方法。其中,定性和半定量方法不局限于空间尺度,主要包括公众参与法、价值评估法等,对数据源要求较低,指标适用范围广;定量方法主要包括实验调查、代理指标、经验公式、生物物理模型、遥感技术等,不同类型定量方法的适应性评估尺度各有不同。定量模型多用于评估粮食供给、气候调节、水源涵养、土壤保持、温室气体排放、水资源消耗、氮磷流失等指标<sup>[54-55]</sup>,对于生物防控、病虫害、杂草覆盖、花粉过敏等量化难度较大的指标,常采用定性或半定量等普适性方法进行评估<sup>[56]</sup>(图5)。

对于定性和半定量方法,公众参与法主要包括问卷调查、专家打分、公众媒体或拍照等多种形式获取数据,可适用于多级尺度的评估,结果准确性取决于样本量的大小,且严重依赖受访者的主观意志,耗时长、花费成本相对较高<sup>[57]</sup>;价值评估法中不同的定价方法可适用于不同的指标量化,例如:粮食供给主要采用实际市场法进行评估,土壤保持主要采用替代市场法测度,气体调节可采用虚拟市场碳交易测度。虽然价值法适用性也比较广泛,但缺乏对时空差异的考虑,估算结果难以准确反映真实状况,且汇率变化、统计口径不同均会影响计算结果<sup>[58-59]</sup>。

对于定量方法,田间实验以及站点监测法主要在田块尺度进行,该方法基于样地观测或实验采样获得数据,结果可靠性强,但实验和监测过程耗时长、花费大,多用于支持服务和调节服务评估,如授粉、生物防控和土壤污染等<sup>[60-61]</sup>;其他定量方法包括代理指标法、经验公式法、生物物理模型、遥感技术等可适用于田块、景观、流域、区域等多级尺度的评估。其中,代理指标主要是基于生态系统特征或指标本身含义,通过选取更易获取数据的指数来反映指标值,常用于评价生物多样性、空气污染、休闲娱乐等服务和负服务<sup>[62-63]</sup>;经验公式法评估模型简单,所需数据相对基础,主要包括土地覆被、气象、高程、土壤等数据,因此可以广泛适用于多级尺度的评估。但是由于模型存在简化假设,在宏观区域尺度上计算准确性较低,多用于评估水土流失、水资源消耗、水体污染等<sup>[64-65]</sup>;生物物理模型是目前最常用的评估方法,该方法基于农田作物生物物理过程进行动态模拟,综合考虑土壤、气象等多种环境因素,数据需求量庞杂,主要用于评估水质净化、土壤肥力、温室气体排放等相关服务和负服务指标,但是具体不同模型适用的评估尺度有所差异,例如:SWAT模型主要用于评估

方法类型	方法和模型举例	常见服务指标													常见负服务指标												
		PS	CS	GC	LC	WD	SC	PDC	WPC	WS	SF	NC	P	B	C	WRC	EC	AW	WP	SP	SE	GE	PD	WC	SD	HL	BL
公众参与	问卷调查	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
	拍照、感知	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
	专家打分	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
价值评估	实际市场法	★																									
	替代市场法																										
	虚拟市场法	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
实验调查	部门调查统计	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
	田间实验及监测	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
	空气质量指数																										
代理指标	景观格局指数																										
	可达性指数																										
	通用土壤流失方程																										
经验公式	水足迹																										
	水量平衡方程																										
	InVEST模型	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
生物物理模型	APSIM模型	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
	SWAT模型	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
	EPIC模型	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
遥感技术	DNDC模型	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
	遥感反演	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★

图5 农业生态系统服务及负服务典型指标评估方法

Fig. 5 Assessment methods for multiple agroecosystem services and disservices

注: PS: 供给服务; CS: 碳固存; GC: 全球气候调节; LC: 地方气候调节; WD: 废物分解; SC: 土壤保持; PDC: 病虫害防控; WPC: 杂草防控; WS: 水源涵养; SF: 土壤结构与肥力; NC: 营养物质循环; P: 授粉; B: 生物多样性; C: 文化服务; WRC: 水资源消耗; EC: 能源消耗; AW: 农业废料; WP: 水污染; SP: 水污染; SE: 水土流失; GE: 温室气体排放; PD: 病虫害; WC: 杂草覆盖; SD: 土壤结构破坏和肥力下降; HL: 生境破坏; BL: 生物多样性丧失。

流域尺度<sup>[66]</sup>,DNDC 模型既可适用于站点尺度,也可适用于区域尺度<sup>[67]</sup>;遥感技术则主要是结合空、天、地监测手段,对多源遥感数据进行参数反演,虽然覆盖范围广、可适用于多级尺度,多用于评估作物生产、病虫害分布与强度、土壤肥力保持与退化、杂草覆盖等服务或负服务<sup>[68-69]</sup>。其中,多源数据可采用时空融合模型进行预处理,不同尺度间数据可采用尺度转换模型或深度学习进行空间信息迁移,例如:利用站点观测数据或无人机多光谱数据升尺度来修正卫星影像,或者利用卫星数据降尺度以获取更多空间信息<sup>[70]</sup>。

#### 4 未来展望

了解农业生态系统服务和负服务指标体系和定量方法是未来进行该领域深入研究的基础和前提。不仅指标和方法本身具有多尺度特征,在此基础上进行的农业生态系统服务权衡与协同分析、供需与流动机制探索、生态价值核算与生态补偿制也同样具有尺度效应。不同农业管理实践方式下,结合权衡和供需关系,充分考虑不同利益相关群体,通过调整多级尺度的景观复杂性来实施农业景观规划与设计,旨在基于农业生态系统服务的关系改善和价值提升促进农业可持续发展(图 6)。

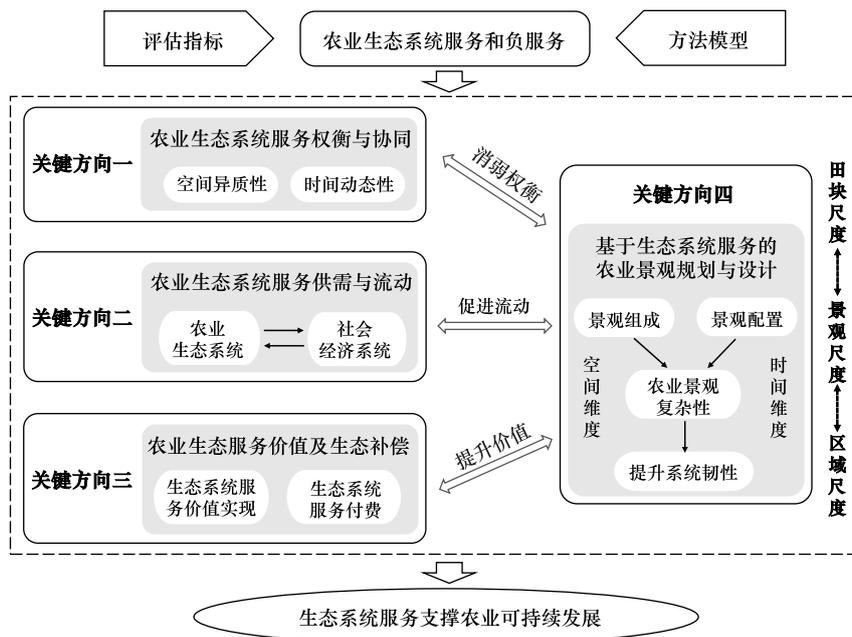


图 6 农业生态系统服务及负服务未来方向

Fig.6 Future direction for agroecosystem services and disservices

#### 4.1 农业生态系统服务时空权衡作用

粮食生产与生态环境保护的权衡关系是目前农业可持续领域面临的重大挑战<sup>[71]</sup>。在探讨农业生态系统服务权衡与协同关系时,不仅要考虑权衡关系的空间异质性,还应考虑其时间动态性。对于农作物,各个阶段的生长受物候和季节等因素影响,并且不同生长季的农业管理措施不同,因此除了年际动态,还需要考虑年内变化,从而更全面的掌握指标间关系规律。此外,未来探究在农业生态系统服务权衡关系时,还需引入负服务,对农业生态系统正负服务进行综合权衡。农业生态系统服务和负服务多数时候是同时产生的,例如:某些草本既可以作为食物提供服务,但又会与种植作物产生竞争关系<sup>[72]</sup>。由于土地、水、技术和劳动力等资源限制,农业生态系统服务的提升和负服务的减少多数时候无法实现双赢,农业实践活动甚至还可能会加剧不同指标间的权衡作用<sup>[73]</sup>。例如:粮食和纤维生产的增加,会引起更高的温室气体排放和氮淋失<sup>[9]</sup>。因此,在实施重点生态系统服务保护和修复措施的基础上,还需要对负服务进行严格和直接管理,重点是控制其维持在阈值水平之内。尤其是对病虫害这类负服务进行治理时,可采用生态工程措施修复栖息地生境、降低脆弱性

水平,例如通过天敌抑制害虫、优化作物品种和种类提高抗病虫害能力<sup>[55]</sup>。在实施削弱权衡的土地管理或农业实践策略时,应围绕各级尺度的核心指标和不同相关利益者进行,例如:在宏观区域层面,政府机构旨在削弱粮食安全与气候调节等服务间的权衡作用。

#### 4.2 农业生态系统服务供需和流动机制

农业系统通过提供的生态系统服务和负服务来影响人类福祉,农业生态系统功能依赖于农业生态系统的健康状态、生物多样性以及农业系统内在生态过程,是服务和负服务从农业生态系统流动到社会经济系统的基础。相关利益者主要通过消费或利用来满足需求,从而提高福祉<sup>[74]</sup>,未来研究应结合不同利益相关者的需求差异进行细化研究,例如:除了高质量食物产品以外,城市居民对农田提供的休闲文化、空气净化等服务也有很高需求<sup>[75]</sup>。在供需基础上,还应充分考虑农业生态系统服务流动,由于流动过程复杂,易受多种因素影响,因此判别和明确被破坏、受损和阻断的服务流是未来面临的重要挑战。其中,还需重点探讨土地管理和农业实践如何影响具体的流动过程和路径。

#### 4.3 农业生态系统服务价值实现及生态补偿

农业生态系统服务价值属于农业生态资产的主要流量部分<sup>[76]</sup>,当农业系统受到破坏或管理不善时,生态系统负服务带来的成本损失甚至会超过生态系统服务产生的价值,因此应综合考虑负服务,对农业生态系统的实际供应和综合效益实施整体核算<sup>[77]</sup>。在核算某一时间节点或时间段的服务价值时,核算因子及定量模型的不同空间尺度也应与农业资源的确权单元、管理尺度相匹配<sup>[78]</sup>。未来应编制包含农业资源、环境效益以及环境保护支出的农业系统综合账户,将农业生态系统服务价值核算引入到农户收入和农业生产核算体系中。重点加强农业用地的土地经营权、水权、碳排放权等权益交易,促进多种农业生态系统服务价值的实现<sup>[79]</sup>。在此过程中会涉及到生态系统服务付费,重点是明确对应的补偿主体、补偿内容、受益范围以及补偿标准。在制定生态补偿标准时需以人为本、因地制宜,补偿方式的选择要结合当地居民的真实需求,充分考虑利益相关方的支付意愿和受偿意愿,尤其是在实施退耕还林、退林还耕等政策、生态移民工程、农业生态旅游规划等过程中,应重点解决服务价值与农民贫困的共生关系,建立生态系统服务消费区对供给区的横向生态补偿机制<sup>[80]</sup>。

#### 4.4 基于生态系统服务的多尺度农业景观规划与设计

随着农业集约化的发展,农业景观同质化增加,尤其是田块尺度的作物种植结构变得单一,景观尺度的田间半自然生境组分迅速减少,导致农田生物多样性降低、关键生态服务缺失<sup>[81]</sup>。农业管理实践,例如施肥、机械化、简化轮作等,虽然在短期内可以提升少数种类作物的产量,增加经济效益,但对农业生态系统服务造成威胁,同时带来多种负服务,不利于农业可持续发展,因此亟需以提升生态系统服务为目标的农业景观规划与设计<sup>[82]</sup>。在实施农业景观规划与设计时,农业政策或者干预手段制定过程中应结合跨部门意见和多目标规划,主要包括景观组成、配置和异质性三个维度。增强农业景观复杂性,尤其是在田块和景观尺度上的农业景观设计,如丰富作物种类、在邻近农田种植互补作、增加半自然生境栖息地、提升空间连通性等,不仅便于物种在斑块间迁徙,往往会影响到甚至塑造更大区域尺度的农业可持续状态,例如生物多样性增加,农业生态系统应对气候变化等干扰的韧性提升<sup>[83]</sup>。同时,复杂的农业景观往往伴随着更加丰富的授粉种群以及抑制害虫的自然种,有利于削弱服务间的权衡关系,如提升作物产量和品质的同时、优化和丰富了农田的生物多样性及文化服务<sup>[84]</sup>。然而,多级尺度间的农业规划和设计如何相互影响及适应仍是难点问题。对于农业生态系统,不同等级尺度间具有相互作用关系,较大的全球和区域尺度对较小的景观和田块尺度具有制约作用;而较小的尺度则为较大的尺度提供机制和功能。区域、景观、田块等不同尺度间的转换往往会涉及到尺度推绎,通常需要耦合多尺度的格局与过程<sup>[85]</sup>。未来应重点探索:多级尺度的农业景观规划与设计具体影响过程和反馈机制怎样?如何通过多级尺度的农业景观规划与设计来削弱农业生态系统服务间权衡、促进农业生态系统服务空间流动、提升农业生态系统服务价值?此外,除了传统的空间维度规划和设计,还需要考虑时间维度的异质性,如结合作物物候期设计轮作制度,确保生物所需的资源,包括食物、栖息地等在时间上连续。因此,不同时

空维度的农业景观规划和设计,旨在提升农业系统多级尺度的韧性<sup>[86]</sup>,进而有效促进农业生态系统在经济、社会和环境三个方面的综合可持续发展。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Power A G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2010, 365(1554): 2959-2971.
- [ 2 ] Moonen A C, Bàrberi P. Functional biodiversity: an agroecosystem approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 127(1/2): 7-21.
- [ 3 ] Zabala J A, Martínez-Paz J M, Alcon F. A comprehensive approach for agroecosystem services and disservices valuation. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144859.
- [ 4 ] Fischer A, Eastwood A. Coproduction of ecosystem services as human-nature interactions—an analytical framework. *Land Use Policy*, 2016, 52: 41-50.
- [ 5 ] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystem and Human Well-being: Synthesis*. Washing DC: Island Press, 2005.
- [ 6 ] Isbell F, Adler P R, Eisenhauer N, Fornara D, Kimmel K, Kremen C, Letourneau D K, Liebman M, Polley H W, Quijas S, Scherer-Lorenzen M. Benefits of increasing plant diversity in sustainable agroecosystems. *Journal of Ecology*, 2017, 105(4): 871-879.
- [ 7 ] Zhang W, Ricketts T H, Kremen C, Carney K, Swinton S M. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 2007, 64(2): 253-260.
- [ 8 ] Yu D Y, Qiao J M, Shi P J. Spatiotemporal patterns, relationships, and drivers of China's agricultural ecosystem services from 1980 to 2010: a multiscale analysis. *Landscape Ecology*, 2018, 33(4): 575-595.
- [ 9 ] Nguyen T H, Cook M, Field J L, Khuc Q V, Paustian K. High-resolution trade-off analysis and optimization of ecosystem services and disservices in agricultural landscapes. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 107: 105-118.
- [ 10 ] Syswerda S P, Robertson G P. Ecosystem services along a management gradient in Michigan (USA) cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 189: 28-35.
- [ 11 ] Swift M J, Izac A M N, van Noordwijk M. Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes—are we asking the right questions? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 104(1): 113-134.
- [ 12 ] 王嘉丽, 周伟奇. 生态系统服务流研究进展. *生态学报*, 2019, 39(12): 4213-4222.
- [ 13 ] Ricketts T H, Daily G C, Ehrlich P R, Michener C D. Economic value of tropical forest to coffee production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(34): 12579-12582.
- [ 14 ] Schäckermann J, Weiss N, von Wehrden H, Klein A M. High trees increase sunflower seed predation by birds in an agricultural landscape of Israel. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2014, 2: 35.
- [ 15 ] Fleishman S M, Eissenstat D M, Hoffer G M, Centinari M. Cover crops and a devigorating rootstock can impart substantial agroecosystem services to high-resource vineyards: a multi-year study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 344: 108287.
- [ 16 ] Yvoz S, Cordeau S, Ploteau A, Petit S. A framework to estimate the contribution of weeds to the delivery of ecosystem (dis)services in agricultural landscapes. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108321.
- [ 17 ] Kay S, Crous-Duran J, Ferreira-Domínguez N, García de Jalón S, Graves A, Moreno G, Mosquera-Losada M R, Palma J H N, Rocas-Díaz J V, Santiago-Freijanes J J, Szerencsits E, Weibel R, Herzog F. Spatial similarities between European agroforestry systems and ecosystem services at the landscape scale. *Agroforestry Systems*, 2018, 92(4): 1075-1089.
- [ 18 ] Tamburini G, Aguilera G, Öckinger E. Grasslands enhance ecosystem service multifunctionality above and below-ground in agricultural landscapes. *Journal of Applied Ecology*, 2022, 59(12): 3061-3071.
- [ 19 ] Jia Y, Liu Y, Zhang S L. Evaluation of agricultural ecosystem service value in arid and semiarid regions of Northwest China based on the equivalent factor method. *Environmental Processes*, 2021, 8(2): 713-727.
- [ 20 ] Qiu M L, Van de Voorde T, Li T, Yuan C C, Yin G Y. Spatiotemporal variation of agroecosystem service trade-offs and its driving factors across different climate zones. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108154.
- [ 21 ] Mazumder M S U, Ali M S, Moonmoon M, Toshi F Z. Effects of conservation farming practices on agro-ecosystem services for sustainable food security in Bangladesh. *Food Security*, 2023, 15(3): 673-692.
- [ 22 ] Parron L M, Villanueva A J, Glenk K. Estimating the value of ecosystem services in agricultural landscapes amid intensification pressures: The Brazilian case. *Ecosystem Services*, 2022, 57: 101476.
- [ 23 ] Novikova A, Rocchi L, Vitunskienė V. Assessing the benefit of the agroecosystem services: Lithuanian preferences using a latent class approach. *Land Use Policy*, 2017, 68: 277-286.

- [24] Kirchner M, Schmidt J, Kindermann G, Kulmer V, Mitter H, Prettenthaler F, Rüdiger J, Schauppenlehner T, Schönhart M, Strauss F, Tappeiner U, Tasser E, Schmid E. Ecosystem services and economic development in Austrian agricultural landscapes—the impact of policy and climate change scenarios on trade-offs and synergies. *Ecological Economics*, 2015, 109: 161-174.
- [25] 张俊, 汪辉, 冯越珺. 农业生态系统服务价值评价及其驱动因素: 基于动态调节当量的实证考察. *财贸研究*, 2023, 34(4): 33-46.
- [26] Dale V H, Polasky S. Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecological Economics*, 2007, 64(2): 286-296.
- [27] Liu Q H, Sun X, Wu W B, Liu Z H, Fang G J, Yang P. Agroecosystem services: a review of concepts, indicators, assessment methods and future research perspectives. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109218.
- [28] Lal R. Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 81(2): 113-127.
- [29] González-Sánchez E J, Ordóñez-Fernández R, Carbonell-Bojollo R, Veroz-González O, Gil-Ribes J A. Meta-analysis on atmospheric carbon capture in Spain through the use of conservation agriculture. *Soil and Tillage Research*, 2012, 122: 52-60.
- [30] Klein A M, Vaissière B E, Cane J H, Steffan-Dewenter I, Cunningham S A, Kremen C, Tscharntke T. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings Biological Sciences*, 2007, 274(1608): 303-313.
- [31] Garrido P, Elbakidze M, Angelstam P. Stakeholders' perceptions on ecosystem services in Östergötland's (Sweden) threatened oak wood-pasture landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 158: 96-104.
- [32] Beudou J, Martin G, Ryschawy J. Cultural and territorial vitality services play a key role in livestock agroecological transition in France. *Agronomy for Sustainable Development*, 2017, 37(4): 36.
- [33] Sun Q Q, Zhang P, Jiang W B, Qu W, Sun Y N, Sun D F. Navigating local environment and scientific knowledge in dryland social-ecological systems through linking ecological policy-household interactions with land surface dynamics. *Land Use Policy*, 2022, 112: 105863.
- [34] Arizpe N, Giampietro M, Ramos-Martin J. Food security and fossil energy dependence: an international comparison of the use of fossil energy in agriculture (1991—2003). *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2011, 30(1/2): 45-63.
- [35] Alcolea A, Contreras S, Hunink J E, García-Aróstegui J L, Jiménez-Martínez J. Hydrogeological modelling for the watershed management of the Mar Menor coastal lagoon (Spain). *Science of the Total Environment*, 2019, 663: 901-914.
- [36] Xiang M T, Li Y, Yang J Y, Lei K G, Li Y, Li F, Zheng D F, Fang X Q, Cao Y. Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops. *Environmental Pollution*, 2021, 278: 116911.
- [37] Alcon F, Zabala J A, Martínez-García V, Albaladejo J A, López-Becerra E I, de-Miguel M D, Martínez-Paz J M. The social wellbeing of irrigation water. A demand-side integrated valuation in a Mediterranean agroecosystem. *Agricultural Water Management*, 2022, 262: 107400.
- [38] Jacobs A, Helfrich M, Hanisch S, Quendt U, Rauber R, Ludwig B. Effect of conventional and minimum tillage on physical and biochemical stabilization of soil organic matter. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(7): 671-680.
- [39] Robinson R A, Sutherland W J. Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *Journal of Applied Ecology*, 2002, 39(1): 157-176.
- [40] Búrberi P, Bocci G, Carlesi S, Armengot L, Blanco-Moreno J M, Sans F X. Linking species traits to agroecosystem services: a functional analysis of weed communities. *Weed Research*, 2018, 58(2): 76-88.
- [41] Rath S, Das A, Kiran Kumar T M, Sarangi K K. Mapping, temporal dynamics, and assessment of agricultural ecosystem services: evidence from eastern India. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023, 7: 1151205.
- [42] Bianchi F J J A, Schellhorn N A, Cunningham S A. Habitat functionality for the ecosystem service of pest control: reproduction and feeding sites of pests and natural enemies. *Agricultural and Forest Entomology*, 2013, 15(1): 12-23.
- [43] Bianchi F J J A, Booij C J H, Tscharntke T. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings Biological Sciences*, 2006, 273(1595): 1715-1727.
- [44] Török E, Zieger S, Rosenthal J, Földesi R, Gallé R, Tscharntke T, Batáry P. Organic farming supports lower pest infestation, but fewer natural enemies than flower strips. *Journal of Applied Ecology*, 2021, 58(10): 2277-2286.
- [45] Landis D A, Gardiner M M, van der Werf W, Swinton S M. Increasing corn for biofuel production reduces biocontrol services in agricultural landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(51): 20552-20557.
- [46] van Berkel D B, Verburg P H. Spatial quantification and valuation of cultural ecosystem services in an agricultural landscape. *Ecological Indicators*, 2014, 37: 163-174.
- [47] 杨翠霞, 卫伟, 刘彬. 我国梯田农业生态系统文化服务研究热点与趋势. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(5): 869-877.
- [48] Muluneh M G. Impact of climate change on biodiversity and food security: a global perspective—a review article. *Agriculture & Food Security*, 2021, 10(1): 36.
- [49] Tscharntke T, Clough Y, Wanger T C, Jackson L, Motzke I, Perfecto I, Vandermeer J, Whitbread A. Global food security, biodiversity

- conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation*, 2012, 151(1): 53-59.
- [50] DeClerck F, Jones S, Attwood S, Bossio D, Girvetz E, Chaplin-Kramer B, Enfors E, Fremier A, Gordon L, Kizito F, Lopez Noriega I, Matthews N, McCartney M, Meacham M, Noble A, Quintero M, Remans R, Soppe R, Willemsen L, Wood S, Zhang W. Agricultural ecosystems and their services: the vanguard of sustainability? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2016, 23: 92-99.
- [51] 范紫月, 齐晓波, 曾麟岚, 吴锋. 中国农业系统近 40 年温室气体排放核算. *生态学报*, 2022, 42(23): 9470-9482.
- [52] Montoya D, Gaba S, de Mazancourt C, Bretagnolle V, Loreau M. Reconciling biodiversity conservation, food production and farmers' demand in agricultural landscapes. *Ecological Modelling*, 2020, 416: 108889.
- [53] Huang Z W, Hejazi M, Tang Q H, Vernon C R, Liu Y L, Chen M, Calvin K. Global agricultural green and blue water consumption under future climate and land use changes. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 242-256.
- [54] Šumrada T, Kmecl P, Erjavec E. Do the EU's Common agricultural policy funds negatively affect the diversity of farmland birds? Evidence from Slovenia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 306: 107200.
- [55] Shackleton C M, Ruwanza S, Sinasson Sanni G K, Bennett S, De Lacy P, Modipa R, Mtati N, Sachikonye M, Thondhlana G. Unpacking *Pandora's* box: understanding and categorising ecosystem disservices for environmental management and human wellbeing. *Ecosystems*, 2016, 19(4): 587-600.
- [56] 元媛, 刘金铜, 靳占忠. 梁城县农田生态系统服务功能正负效应综合评价. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2809-2814.
- [57] Lyu Y F, Sheng L, Wu C F. Improving land-cover-based expert matrices to quantify the dynamics of ecosystem service supply, demand, and budget: Optimization of weight distribution. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110515.
- [58] 曹雅蓉, 黄钰婷, 吴隽宇. 国际生态系统服务价值评估的研究进展与热点演变. *南方建筑*, 2023(7): 77-87.
- [59] Vačkářová D, Medková H, Krpec P, Weinzettel J. Ecosystem services footprint of international trade: economic value of ecosystem services lost due to crop production. *Ecosystem Services*, 2023, 64: 101560.
- [60] Cui J, Zhou F W, Li J F, Shen Z Y, Zhou J, Yang J, Jia Z J, Zhang Z, Du F F, Yao D R. Amendment-driven soil health restoration through soil pH and microbial robustness in a Cd/Cu-combined acidic soil: A ten-year in situ field experiment. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 465: 133109.
- [61] Lowe Erin B, Russell G, Claudio G. Field edge flower plantings have variable effects on wild bee abundance, richness, nesting success, and crop pollination, independent of the surrounding landscape. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2024, 362: 108811.
- [62] Xu X, Qin C, Zhu Y. Developing the agri-environment biodiversity index for the assessment of eco-friendly farming systems. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109220.
- [63] Cortés J, Viel L, Ibarra J T. Family farming systems: an index-based approach to the drivers of agroecological principles in the southern *Andes*. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110640.
- [64] Prasuhn V. Experience with the assessment of the USLE cover-management factor for arable land compared with long-term measured soil loss in the Swiss Plateau. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105199.
- [65] Xu R H, Cai Y P, Wang X, Li C H, Liu Q, Yang Z F. Agricultural nitrogen flow in a reservoir watershed and its implications for water pollution mitigation. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122034.
- [66] Zhang Z P, Wang Q Z, Guan Q Y, Xiao X, Mi J M, Lv S J. Research on the optimal allocation of agricultural water and soil resources in the Heihe River Basin based on SWAT and intelligent optimization. *Agricultural Water Management*, 2023, 279: 108177.
- [67] Abdalla M, Song X, Ju X, Topp C F E, Smith P. Calibration and validation of the DNDC model to estimate nitrous oxide emissions and crop productivity for a summer maize-winter wheat double cropping system in Hebei, China. *Environmental Pollution*, 2020, 262: 114199.
- [68] Karthikeyan L, Chawla I, Mishra A K. A review of remote sensing applications in agriculture for food security: crop growth and yield, irrigation, and crop losses. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124905.
- [69] Weiss M, Jacob F, Duveiller G. Remote sensing for agricultural applications: a meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111402.
- [70] Tao X, Yan B Y, Wang K, Wu D H, Fan W J, Xu X R, Liang S L. Scale transformation of Leaf Area Index product retrieved from multiresolution remotely sensed data: analysis and case studies. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(20): 5383-5395.
- [71] Law E A, Macchi L, Baumann M, Decarre J, Gavier-Pizarro G, Levers C, Mastrangelo M E, Murray F, Müller D, Piquer-Rodríguez M, Torres R, Wilson K A, Kuemmerle T. Fading opportunities for mitigating agriculture-environment trade-offs in a South American deforestation hotspot. *Biological Conservation*, 2021, 262: 109310.
- [72] Herd-Hoare S, Shackleton C M. Ecosystem disservices matter when valuing ecosystem benefits from small-scale arable agriculture. *Ecosystem Services*, 2020, 46: 101201.
- [73] Tancoigne E, Barbier M, Cointet J P, Richard G. The place of agricultural sciences in the literature on ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2014, 10: 35-48.

- [74] Yang H J, Gou X H, Yin D C, Du M M, Liu L Y, Wang K. Research on the coordinated development of ecosystem services and well-being in agricultural and pastoral areas. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304: 114300.
- [75] Bernués A, Alfnes F, Clemetsen M, Eik L O, Faccioni G, Ramanzin M, Ripoll-Bosch R, Rodríguez-Ortega T, Sturaro E. Exploring social preferences for ecosystem services of multifunctional agriculture across policy scenarios. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 101002.
- [76] 刘焱序, 傅伯杰, 赵文武, 王帅. 生态资产核算与生态系统服务评估: 概念交汇与重点方向. *生态学报*, 2018, 38(23): 8267-8276.
- [77] Zhang N, Zhou Z X. Positive and negative agro-ecosystem services evaluation in urbanizing area: A case study of Chang'an District. *Arid Land Geography*, 2018, 41(2): 409-419.
- [78] Burkhard B, Groot R, Costanza R, Seppelt R, Jørgensen S, Potschin M. Solutions for sustaining natural capital and ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 1-6.
- [79] Grondard N, Hein L, Van Bussel L G J. Ecosystem accounting to support the Common Agricultural Policy. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108157.
- [80] 吴春生, 张鹏, 戴尔阜, 尹君. 基于生态系统服务的生态补偿政策制定探讨. *生态学报*, 2023, 43(24): 10032-10041.
- [81] Swantje G, Jerry V D, Wassen Martin J, Martha B. Agricultural intensity interacts with landscape arrangement in driving ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 357: 108692.
- [82] Duarte G T, Santos P M, Cornelissen T G, Ribeiro M C, Paglia A P. The effects of landscape patterns on ecosystem services: meta-analyses of landscape services. *Landscape Ecology*, 2018, 33(8): 1247-1257.
- [83] Feit B, Blüthgen N, Daouti E, Straub C, Traugott M, Jonsson M. Landscape complexity promotes resilience of biological pest control to climate change. *Proceedings Biological Sciences*, 2021, 288(1951): 20210547.
- [84] Lichtenberg E M, Kennedy C M, Kremen C, Batúry P, Berendse F, Bommarco R, Bosque-Pérez N A, Carvalheiro L G, Snyder W E, Williams N M, Winfree R, Klatt B K, Åström S, Benjamin F, Brittain C, Chaplin-Kramer R, Clough Y, Danforth B, Diekötter T, Eigenbrode S D, Ekroos J, Elle E, Freitas B M, Fukuda Y, Gaines-Day H R, Grab H, Gratton C, Holzschuh A, Isaacs R, Isaia M, Jha S, Jonason D, Jones V P, Klein A M, Krauss J, Letourneau D K, MacFadyen S, Mallinger R E, Martin E A, Martinez E, Memmott J, Morandin L, Neame L, Otiemo M, Park M G, Pfiffner L, Poccock M J O, Ponce C, Potts S G, Poveda K, Ramos M, Rosenheim J A, Rundlöf M, Sardiñas H, Saunders M E, Schon N L, Sciligo A R, Sidhu C S, Steffan-Dewenter I, Tschamtko T, Veselý M, Weisser W W, Wilson J K, Crowder D W. A global synthesis of the effects of diversified farming systems on arthropod diversity within fields and across agricultural landscapes. *Global Change Biology*, 2017, 23(11): 4946-4957.
- [85] Wu J G, David J L. A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications. *Ecological Modelling*, 2002, 153(1/2): 7-26.
- [86] Huang J, Tichit M, Poulot M, Darly S, Li S C, Petit C, Aubry C. Comparative review of multifunctionality and ecosystem services in sustainable agriculture. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149: 138-147.