

DOI: 10.11766/trxb202109290532

李奕赞, 张江周, 贾吉玉, 樊帆, 张福锁, 张俊伶. 农田土壤生态系统多功能性研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59 (5): 1177–1189.
LI Yizan, ZHANG Jiangzhou, JIA Jiyu, FAN Fan, ZHANG Fusuo, ZHANG Junling. Research Progresses on Farmland Soil Ecosystem Multifunctionality[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (5): 1177–1189.

农田土壤生态系统多功能性研究进展*

李奕赞^{1, 2}, 张江周^{3, 1}, 贾吉玉^{1, 2}, 樊帆¹, 张福锁¹, 张俊伶^{1†}

(1. 中国农业大学资源与环境学院/国家农业绿色发展研究院/植物-土壤相互作用教育部重点实验室, 北京 100193; 2. 荷兰瓦赫宁根大学及研究中心, 瓦赫宁根 6700AA; 3. 福建农林大学资源与环境学院/国际镁营养研究所, 福州 350002)

摘要: 健康土壤培育是耕地产能提升的先决条件, 也是应对粮食安全和环境保护挑战, 保障土壤可持续利用, 实现农业绿色发展和构建生命共同体的基础。健康土壤培育的核心是实现土壤生态系统多功能性。在生态文明建设的新时代, 土壤生态系统多功能性评价、培育过程及机制研究已成为全球土壤健康行动的焦点和前沿。本文系统梳理了土壤功能、土壤生态系统服务与土壤生态系统多功能性的概念, 讨论了土壤生物多样性对多功能性的影响、土壤功能间的协同与权衡关系, 总结了土壤功能评价及量化的方法, 并提出了突破单一追求粮食高产目标, 发展基于多功能性综合调控的农田健康土壤培育新思路。提出在不同层级上提高土壤多功能性的途径: 在全国尺度调整土地利用方式及农业结构、区域尺度协调资源配置、景观尺度构建农业设施建设与景观格局、田块尺度优化田间土壤管理技术, 全面提升土壤健康和多功能性。未来需要通过多学科交叉深入探索不同时空尺度的土壤多功能性形成与维持机理, 与现代科技相结合, 完善土壤功能管理相关政策与落地方案, 强化土壤多功能性在可持续环境政策与管理中的多维作用, 为山水林田湖草生命共同体协调发展和“碳达峰、碳中和”国家战略的实施提供重要支撑。

关键词: 土壤功能; 土壤生态系统服务; 土壤健康; 农业绿色发展

中图分类号: S154.4 文献标志码: A

Research Progresses on Farmland Soil Ecosystem Multifunctionality

LI Yizan^{1, 2}, ZHANG Jiangzhou^{3, 1}, JIA Jiyu^{1, 2}, FAN Fan¹, ZHANG Fusuo¹, ZHANG Junling^{1†}

(1. College of Resources and Environmental Sciences/ National Academy of Agriculture Green Development/Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Wageningen University and Research, Wageningen 6700AA, Netherlands; 3. College of Resources and Environment/ International Magnesium Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Building healthy soil is a prerequisite for the improvement of cultivated land productivity. It is fundamental for meeting the challenges of food security and environmental protection as well as realizing the agricultural green development and a community of shared future. The core of building healthy soil is to realize the soil ecosystem multifunctionality. In the new era of ecological civilization construction, research on the evaluation and cultivation of soil multifunctionality, and the underlying

* 国家自然科学基金项目(32002133)和四川省科技计划项目重点研发项目(2021YFN0026)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 32002133) and the Science & Technology Department of Sichuan Province (No. 2021YFN0026)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: junlingz@cau.edu.cn

作者简介: 李奕赞(1996—), 女, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事土壤健康与土壤多功能性研究。E-mail: yizan.li@wur.nl

收稿日期: 2021-09-29; 收到修改稿日期: 2021-12-09; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-01-21

mechanisms have become hotspots and frontiers of global soil health initiatives. In this paper, we systematically review the concepts of soil functions, soil ecosystem services and soil ecological multifunctionality. The impact of soil biodiversity on soil multifunctionality and the synergies and trade-offs between soil functions are discussed as well. Also, the approaches to evaluating and quantifying soil functions are summarized. Finally, we put forward the pathways of healthy soil cultivation based on the integrated regulation of soil multifunctionality beyond the single pursuit of high grain yield. Different strategies to increase soil multifunctionality are proposed: adjusting the way of land use and agricultural structure at the national scale, coordinating resource allocations at a regional scale, constructing agricultural infrastructure and landscape pattern at the landscape scale, and optimizing the field soil management practices to improve soil health and multifunctionality at the field scale. It is necessary to explore the maintenance mechanism of soil multifunctionality at different temporal and spatial scales, and to combine modern technologies with relevant policies and implementation plans for functional soil management, emphasizing the multi-dimensional role of soil multifunctionality in sustainable environmental policy and management. It will provide important support for the coordinated development of mountain, water, forest, farmland, lake and grass life community, and the implementation of the national strategy of carbon peak and carbon neutrality.

Key words: Soil functions; Soil ecosystem services; Soil health; Agriculture green development

人口的持续增加和气候变化对全球粮食安全提出了前所未有的挑战。突如其来的新冠肺炎疫情和频发的极端天气进一步加剧了保障全球粮食安全的紧张形势，尤其像我国这样的人口大国问题更为突出。近 30 年来，科技进步尤其是化肥、农药等科技产品在提升我国粮食产量，保障粮食安全方面发挥了前所未有的关键作用。然而过量施用化学品和高强度的土地利用，导致耕地质量下降、农田土壤退化和环境污染等生产和环境问题。在绿色发展的新时代，守护土壤健康，构建人和自然生命共同体，发挥土壤多功能性，保护耕地资源成为农业高质量发展的重要目标。当前我国有近 70% 的耕地仍为中低产田^[1]，因此提升耕地质量和确保耕地资源的可持续利用，是实现“藏粮于地、藏粮于技”战略和提升耕地产能的基本保障和重要途径^[2]。

在实现联合国可持续发展目标的过程中，土壤占有举足轻重的地位。除保障粮食安全外，土壤与淡水和能源的供应、气候变化及生物多样性丧失等可持续发展主题息息相关^[3]。因此，传统集约化生产中过分追求粮食高产的做法已无法适应新时期农业绿色发展的需求，土壤管理必须同时实现资源高效、环境保护、食品安全与人类福祉的协同发展，因此土壤多功能性（Soil multifunctionality）成为保障多目标协同发展的基础。充分理解土壤提供的各项生态系统功能（即土壤功能，Soil functions），将其与资源环境及人类营养与健康建立直接联系，并突出土壤在可持续环境政策与管理中的多维作

用^[4]，是土壤可持续管理的重要内容。

1 土壤功能的内涵

1.1 土壤功能的定义与分类

自 20 世纪 70 年代以来，随着人们对生态系统功能认识的不断深入，土壤功能一词开始逐渐兴起。例如，Adhikari 和 Hartemink^[4]认为土壤功能是土壤的属性，是土壤提供生态系统服务的能力。Volchko 等^[5]认为土壤功能是指土壤满足自然赋予要求的能力，是生态系统功能的子集。Bünemann 等^[6]沿用 Glenk 等^[7]提出的概念，将土壤功能定义为支撑生态系统服务提供的一系列土壤过程。Baveye^[8]认为土壤功能不限于生态系统的边界，还应包括其对人类以及自然界的其他惠益。总体而言，在不同的研究中，功能一词常常与过程、作用或服务混用^[6]，界定较为模糊。在将生态学对于生态系统功能及生态系统服务的定义进行综合后，土壤功能是土壤生态系统功能（Soil ecosystem functions）的简称，是指土壤为满足人类需求直接或间接地提供商品和服务的能力，即土壤支撑生态系统服务提供的能力。土壤生态系统服务（Soil ecosystem services）指人类从土壤生态系统中获得的惠益^[9]。可以看出，前者强调土壤作用过程，后者则强调服务的对象和利益相关群体。在相关研究中，二者大多同时出现，且关注对象基本一致。土壤作为一个生态系统，其中土壤属性即生物及非生

物组分（物理、化学）之间的相互作用产生了土壤过程，通过发挥土壤功能提供了土壤生态系统服务，进而影响人类福祉（图 1）。土壤多组分、多过程、多尺度的互作循环与人类活动密切相关，并

受环境和气候变化叠加效应的影响。因此，良好的土地利用和土壤管理措施可维持良性土壤过程和生态系统服务，反之则导致土壤生态系统失衡，最终影响人类社会的生存和发展。



图 1 土壤属性、土壤过程、土壤（生态系统）功能、土壤（生态系统）服务及人类福祉关联图

Fig. 1 Flowchart among soil properties, soil processes, soil (ecosystem) functions, soil (ecosystem) services and human wellbeing

近年来，生态系统多功能性（Ecosystem multifunctionality, EMF）引起人们的广泛关注。EMF 主要探讨生态系统多种功能的系统整体表现，以及由此产生的生态系统服务，而不是仅仅考虑单个或若干个生态功能^[10]。与此类似，土壤生态系统多功能性指土壤同时提供多种服务和功能的能力，而土壤功能指某一项能力。随着人们对土壤生物多样性和土壤健康的关注，土壤学家开始重视土壤对生态系统服务的贡献^[11]，以及在土地资源政策和管理中进行土壤生态系统服务评估的重要性^[12]。在农田生态系统中，人们对土壤功能的认识，不再仅限于作物高产，而是追求产量、质量、效益、环境、资源效率等的多目标协同。

土壤具有多重功能。欧盟委员会^[13]在 2006 年土壤保护专题战略中归纳了土壤的 7 项功能，包括（1）农业及林业中的生物量生产；（2）养分、其他物质和水的储存、过滤和转化；（3）生物多样性，包括物种和遗传多样性，以及生物栖息地；（4）人类及人类活动的物理和文化环境；（5）原材料的来源；（6）碳库；（7）地质考古遗产档案。FAO^[14]提出了 11 项土壤功能。目前人们重点关注的土壤功能主要包括 5 项：（1）初级生产力；（2）水的净化与调节；（3）气候调节与碳固持；（4）土壤生物多样性的维持；（5）养分的供给与循环^[15]。可以看出，目前仍较少涉及土壤的社会经济功能，对土壤功能的认识多基于自然科学的研究^[4]。

1.2 土壤功能与土壤健康

土壤健康是指土壤作为一个重要的生命系统，在其生态系统和土地使用边界内发挥功能的能力，

以维持动植物生产力，维持或改善水和空气质量，并促进动植物健康^[16]。由此可见，土壤多功能性是土壤健康的核心，是土壤健康状况的综合体现。联合国“土地退化零增长”目标（Land Degradation Neutrality）及生物多样性公约（Convention on Biological Diversity）均关注土壤功能与土壤健康^[17-18]。当前人类健康、可持续发展、气候变化与土壤健康的关系已引起人们的广泛关注，随着全球土壤健康行动推进，土壤健康的内涵不断扩展，包括碳中和、营养健康、气候变化相关的内容成为土壤健康未来研究的重点。

土壤健康突出了土壤的生命力与活性^[19]，生物多样性是直接的驱动因素，是土壤生态系统服务的主要提供者。随着人们对土壤生物多样性重要性的认识，土壤过程不再只是关注土壤化学和物理过程，而是从土壤生态系统的视角，对化学、物理和生物学多组分协同互作进行整体研究（图 2A）。这一转变将对土壤功能产生深刻的影响。在集约化农业生产中，以追求高产为单一目标的管理将导致土壤生态系统失衡或紊乱，引起土壤功能的退化或丧失；可持续集约化的目标即是在维持作物生产功能的同时，还可以保证和强化其他（养分循环、气候调节、生物多样性、水的净化等）的土壤功能，维持整个生态系统的平衡，守护土壤健康与农业可持续发展（图 2B）。

1.3 土壤生物多样性对土壤多功能性的影响

土壤是生物的栖息地，是地球上最大的生物资源库。土壤生物多样性是生态系统群落结构和功能的主要驱动因素^[20]。土壤生物支撑多种土壤生态系

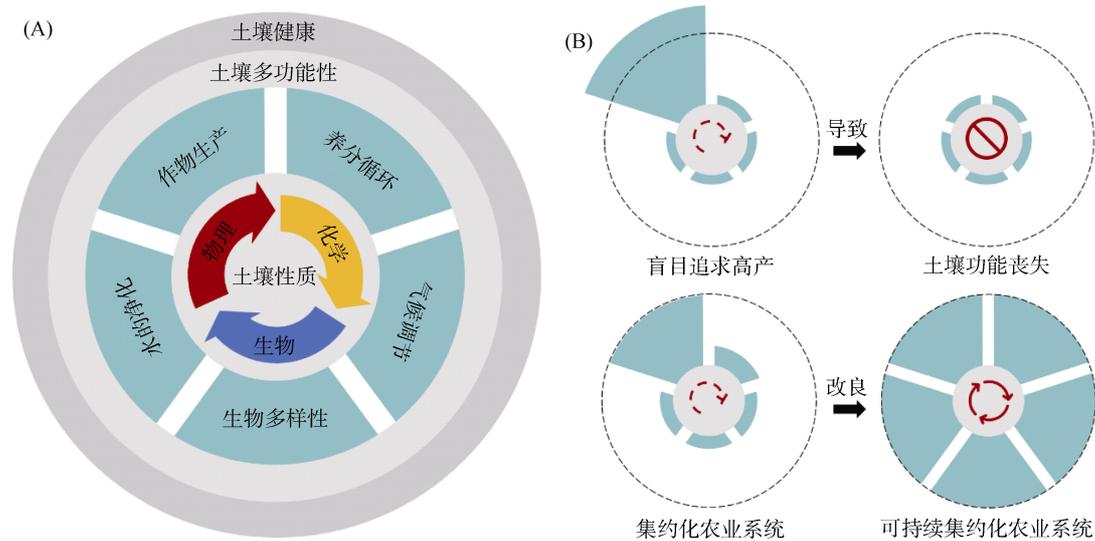


图2 土壤性质、土壤功能及土壤健康关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of soil properties, soil functions and soil health

统功能,包括初级生产力、养分循环、有机质分解,气候调控以及病原菌消长等^[21-22]。生物多样性的丧失和生物群落的简化导致生态系统的功能下降^[23]。在青藏高原的研究发现,地上与地下生物多样性对生态系统多功能性的叠加效应高于两者的独立效应^[24]。

土壤生物生活在复杂的食物网中,不同营养级生物间通过多样化取食关系在生态网络中形成高度复杂的生态集群^[25-26]。各个生态集群内部的生物具有相似的资源和环境偏好,土壤生物组合之间的连通性影响食物网的复杂度。在生物多样性高的土壤中,食物网的复杂性增强,可高效调节物质循环和能量流动^[27]。在农田生态系统中,多营养级生物间的正向互作能够促进土壤养分循环,提高作物产量^[28-29]。食物网中较高的营养级水平或者关键物种在土壤多功能性中有重要的调节作用^[30-31]。例如,无脊椎动物以植物和动物碎屑为食,显著影响土壤养分有效性。研究发现,蚯蚓通过改变土壤基础理化性质调节土壤微生物群落结构,影响生态系统多功能性^[32]。此外,土壤微生物多样性和核心功能微生物类群也是影响生态系统稳定性的主要因素^[33]。

1.4 土壤功能之间的协同与权衡

土壤功能及土壤可提供的生态系统服务主要受土壤属性及其相互作用的影响,其中土地利用方式和土壤管理对土壤功能的影响较大。人类对土壤的不合理利用与管理导致土壤生态系统失衡,引起负

服务 (Dis-service),例如生物栖息地丧失、营养物质损失、温室气体排放等^[22, 34]。土壤各个功能之间并非相互独立,而是存在着动态的协同与权衡关系。协同关系表现为多种土壤功能同步增强或减弱;权衡关系表现为一种或多种土壤功能的增加减弱了另一种或多种土壤功能。在农业生态系统中,各项调节服务(如气候调节与生物多样性维持)之间通常存在协同关系^[9],而在供给服务(如初级生产力)和调节服务(如水净化和碳固存)之间,即在生产力提升和生态系统服务可持续之间需要进行权衡^[35-36]。在农田土壤管理中,一些健康土壤的培育技术如保护性耕作、多样化种植、以及生物防治等的目的是挖掘土壤和作物的生物学潜力,培育健康土壤,实现多目标协同^[37]。

由于土壤功能在时空上存在动态性,因此土壤功能间的协同与权衡应充分考虑时空要素^[38]。在时间尺度上,土壤功能不仅取决于当下的土壤性质与过程,还会随着土壤过程与外界环境的互作发生变化,并且在大空间尺度范围影响土壤功能的发挥。在空间尺度上,我国幅员辽阔,不同地理区域的气候特征、土壤特性、水资源分布、作物类型等均存在差异,不同尺度对土壤功能关注的侧重点不同。在田块尺度上,土壤肥力、病虫害防治等是农户关注的焦点,而在流域尺度上过量氮磷投入会通过淋洗或径流污染地下水与地表水,造成富营养化、鱼类缺氧死亡,削弱生物多样性。同时,一些土壤功

能在地理区域之间存在相互叠加或抵消效应^[15]。以土壤固碳为例，不同土壤类型、土地利用方式及管理方式之间存在显著差异，而在区域上则可以叠加，这也为我国“碳达峰”与“碳中和”目标的实现提供了区域优化的可能途径^[39]。

在权衡各项土壤功能时，需要充分结合不同时空尺度的需求和管理目标，保证重要土壤功能的协同。如在提高作物品质时，可能会对产量产生影响，但品质的提升最终将提高产品价值。在景观尺度上，增加乡土植物缓冲带、多花带等会影响土地产能，但增加了生物多样性和景观功能，因而权衡土壤功能与土地整体规划和管理目标需求关系密切。

2 土壤功能的量化与评价

对土壤功能进行量化与综合评价，主要有以下四种方式：基于土壤功能的土壤健康评价、土壤功能需求与供给的量化、土壤生态系统多功能性计算，以及土壤生态系统服务价值量与物质质量评估。这四种方法分别由不同领域学者开展，研究的侧重点和应用尺度存在差异。

2.1 基于土壤功能的土壤健康评价

区别于对各项土壤属性指标的单独评估，基于土壤功能的评价方法是以各项土壤功能为评价单元，而单个功能包含多项指标数据集，以代表性土壤功能（目前模型主要包括五项功能）水平来表征土壤健康程度。

欧盟 LANDMARK 项目组^[40]开发了 Soil Navigator 决策支持模型，以土壤管理、气象参数、土壤物理、化学、生物学特性作为模型输入，对初级生产力、水的净化与调节、气候调节与碳固持、土壤生物多样性的维持、养分的供给与循环 5 项土壤功能进行等级评价，并根据用户期望的土壤功能水平、以及对各项土壤管理的可接受程度提出了针对性的土壤健康改良方案。该方法已应用于奥地利、德国、丹麦、法国、爱尔兰的土壤健康评价。Rinot 等^[41]总结了目前的土壤健康评价研究，他参考了海洋健康指数的计算方法，将各项土壤属性转化为标准化得分函数，并量化其对各项土壤生态系统服务的贡献权重，构建了基于土壤生态系统服务及功能的土壤健康评价方法。基于土壤功能进行土壤健康评价在我国起步较晚，赵瑞等^[42]参考 Rinot 等^[41]提

出的方法，构建了“生态系统服务-功能-特性-质量维度-指标-健康”的土壤健康评价理论框架，并对河南省温县进行了县域尺度的土壤健康评价。杨颖等^[43]沿用了 LANDMARK 项目组对土壤功能的分类，参考德国 Müncheberg 的评价系统^[44]，将评价指标分为基础项指标（加和关系）和限制项指标（乘积关系），计算了封丘、栾城和禹城三个站点的土壤健康综合评分。

目前基于土壤功能的土壤健康评价多在田块尺度上开展。在区域尺度上，通常需要整合大量的田块监测点的结果，结合 GIS、数学模型及大数据分析等技术手段，结果通常以地图的形式呈现。需要指出的是，基于土壤功能对土壤健康进行评价时，除传统土壤质量评价涉及的物理指标（如土壤质地、容重、蓄水能力、土壤团聚体稳定性等）及化学指标（如土壤有机质含量、pH、电导率、阳离子交换量、全氮、有效磷、速效钾、交换性钙镁等）外，应充分考虑以往评价体系中常被忽略的生物学指标（如土壤微生物量、土壤呼吸、蚯蚓、线虫、酶活性、微食物网等），建立包含代表性指标的最小数据集（Minimum Data Set, MDS）^[45]。

2.2 土壤功能需求与供给的量化

在景观尺度上，Schulte 等^[15, 46]提出了土地功能管理（Functional Land Management, FLM）的概念，并首次将其应用于爱尔兰农业系统。该理论的核心是定量化土壤功能的供需平衡。其中对各项土壤功能的需求量化主要是基于爱尔兰及欧盟范围内的限制性法规、发展战略、规划纲要等政策性文件。如欧盟《2030 年气候与能源政策框架（Climate and Energy Framework 2030）》、《硝酸盐法令（Nitrates Directive）》、《生物多样性战略（Biodiversity Strategy）》等。对于土壤功能供给与需求的量化，采用可通过单独模型计算或以程度分级表示的替代性指标（Proxy-indicators）进行评价（表 1）。由于相关政策中各项标准（即选用的指标阈值）对应的空间范围不同，因此对土壤功能需求及替代性指标的计算可以在田块、流域、国家等不同尺度开展，结果以地图方式呈现。该评价方法是基于土壤供需平衡的双向协同，而非单向性一味要求土壤无限量的提供生态系统服务。因此，该评价方法的范围不再局限于自然科学研究层面，而是与农业及环境政策紧密联系，可为土壤管理措施与政策的制定提供基础。

表 1 功能性土壤管理各土壤功能量化替代性指标^[15]

Table 1 Proxy-indicators to quantify soil functions in FLM framework

| 土壤功能 Soil functions | 替代性指标 Proxy-indicators |
|---|---|
| 初级生产力 Primary productivity | 土壤最大承载力 (Maximum soil carrying capacity) |
| 水的净化和调节 Water purification and regulation | 土壤通过反硝化作用修复硝酸盐淋失的能力 (Capacity of soils to remediate nitrate leaching through denitrification) & 土壤吸附过量磷酸盐的能力 (Capacity of soils to adsorb excess phosphate) |
| 气候调节与碳固持 Climate regulation and carbon sequestration | 后京都协定书后造林产生的碳固持 ('Post-Kyoto' afforestation) / 1990 年后造林量 (Forests planted after 1990) |
| 土壤生物多样性的维持 Provision of habitat for biodiversity | 高自然价值的农田面积 (Areal extent of High Nature Value farmland) |
| 养分的供给与循环 Nutrient cycling and provision | 由猪粪输入磷的回收利用 (Recycling of imported phosphorus in pig slurry) |

2.3 土壤生态系统多功能性的计算

计算土壤生态系统多功能性的目的是评价土壤同时发挥多种功能的能力。该方法的第一步是划定土壤功能, 并选择相关土壤参数指标; 第二步为多功能性指数的计算, 常用方法包括: 单功能法 (Single function approach)、替代法 (Turnover approach)、平均值法 (Averaging approach)、单阈值法 (Single threshold approach) 及多阈值法 (Multiple thresholds approach)^[47]。表 2 总结了上述五种方法的计算过程和结果, 比较了不同方法的侧重点和计算方法间的差异。

然而, 土壤生态系统多功能性计算也有其局限性。该方法对于土壤功能及指标的选择较为主观, 且计算方法与阈值标准不一, 计算出的多功能性指数是相对的, 因而评价结果难以与其他研究进行比较。同时, 该方法充分考虑了生物学指标, 如土壤呼吸速率、酶活性、功能基因等, 因其测定技术要求及成本相对较高, 单独应用于评价土壤生态系统多功能性时, 推广难度较大, 更适用于土壤多功能性相关机理的研究。例如解析农田土壤多功能性的驱动因素、微生物群落组成和生物多样性对土壤多功能性的影响程度等^[48-49]。

表 2 土壤生态系统多功能性计算方法^[47]

Table 2 Approaches to quantify soil ecosystem multifunctionality

| 方法 Methods | 计算过程 Calculations | 计算结果 Outputs | 局限性 Limitations |
|----------------------------------|--|---------------------------|----------------------------|
| 单功能法 Single function approach | 各项功能分别对应一个指标, 该指标测量值的高低反应该功能水平 | 各项指标测量值 (及随生物多样性增加而变化的曲线) | 定性分析而非定量; 没有提供有关多功能性的指标 |
| 替代法 Turnover approach | 同单功能法, 并整合所有物种对于各项功能的正效应与负效应 | 对于多功能性产生正效应及负效应的物种数/比例 | 不直接测量多功能性; 需要大量数据支持 |
| 平均值法 Averaging approach | 对各项功能对应的指标分别标准化 (0-1), 加以平均求得各项功能分值; 对各项功能分值加以平均求得多功能性指数 | 单一功能水平; 多功能平均水平 | 单一功能极值可能影响平均值; 无法区分各项功能的级别 |

续表

| 方法 Methods | 计算过程 Calculations | 计算结果 Outputs | 局限性 Limitations |
|--------------------------------------|--|----------------------|--|
| 单阈值法 Single threshold approach | 对多个功能聚类分析, 分为不同类别且权重均为 1; 每一类中的功能被赋予相同权重且加和为 1; 计算超过特定阈值 (如基于特定阈值的多功能性水平大值的 25%, 50%, 75%) 的各项功能权重之和, 作为多功能性指数 | 基于特定阈值的多功能性水平 | 阈值是任意设定的; 仅能表示超出阈值的功能个数/权重而无法表示超出阈值范围的程度大小 |
| 多阈值法 Multiple thresholds approach | 将单阈值法中选定的特定阈值更改为阈值区间, 使得阈值以上功能数 - 物种丰富度关系以三维图像呈现, 取图像中的各百分比对应的斜率进行分析 | 基于阈值区间的多功能性与物种丰富度关系图 | 分析结果以图像呈现而非数值; 仅有现象学的意义而不能用于机理研究 |

2.4 土壤生态系统服务价值量与物质质量的评估

生态系统服务评估的对象是生态系统服务而非功能, 相关研究通常由经济学家及政策制定者开展, 评价尺度可以是生态系统、流域以及全球范围等^[50]。土壤生态系统服务包括价值量和物质质量评估两种方法。价值量评估法是以市场定价、条件价值、群体定价为基础, 核算出土壤生态系统服务的货币价值^[50-51]。该方法由 Daily 等^[52]及 Costanza 等^[53]进行了系统的阐述, 并于 1999 年引入我国^[54]。物质质量评估法主要是从生态系统物质当量的角度对其提供的服务进行评价。该方法基于生态系统过程, 可客观反应各项服务的形成机理^[55]。由于目前很多生态系统服务还难以完全进行货币化, 因此物质质量评估法是相关研究领域的主流^[56]。

目前专门用于评估土壤生态系统服务的模型较少, 主要是利用生态系统服务评估综合模型中的土壤相关模块^[57], 如生态系统服务和权衡的综合评估模型 InVEST, 可用于评估生物多样性、碳储量、木材产量和土壤侵蚀等土壤生态系统服务^[57-58]。Polyscape 模型基于 GIS 框架, 用于探索各项土壤服务之间的空间协同与权衡关系; LUCI 是 Polyscape 的改进版本, 可以在景观尺度上追踪土体, 包括水、沉积物和化学物质在内的纵向与横向运动^[59-60]。同时, 还有学者运用水土动态过程机理模型^[3, 61]。例如 Ellili-Bargaoui 等^[62]运用 STICS 土壤作物模型模拟了法国西部小麦-玉米体系的作物生长过程, 评估了气候调节、水质调节、碳供应、作物水供应和生

物量, 以及地下水补给等 6 项土壤生态系统服务。这类模型以土壤中的物理和化学过程为主, 如水、土及盐分运移, 氮的矿化、硝化及反硝化作用等, 较少涉及对土壤生物学组分及过程的考量。

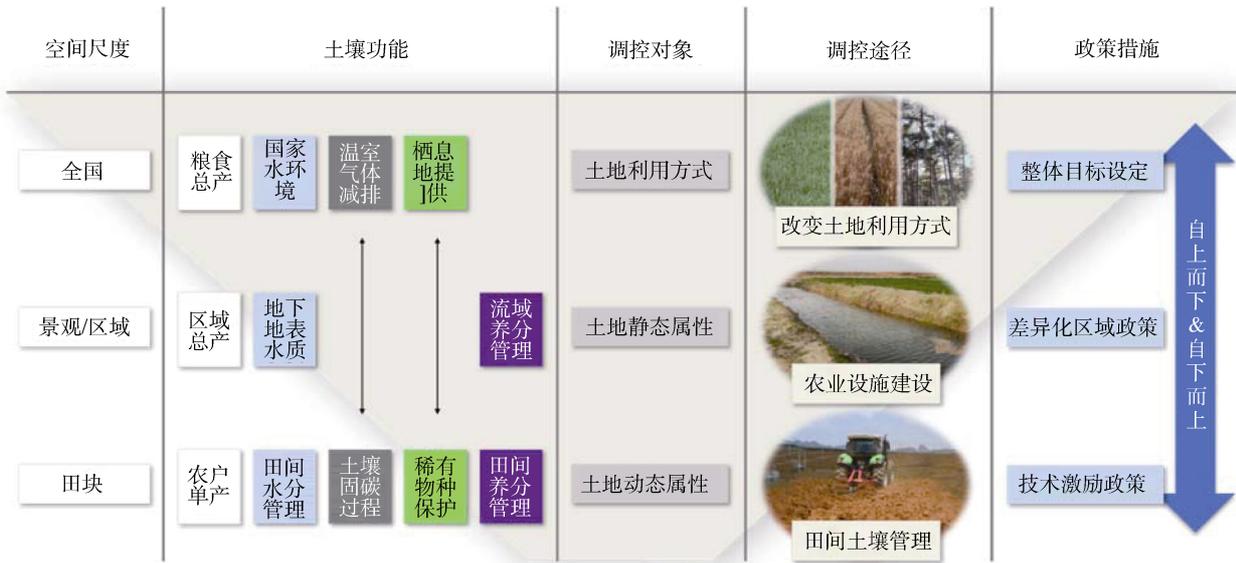
结合数字土壤制图方法, 可以直观呈现土壤生态系统服务, 以表征各项服务的空间分布特征, 即形成生态系统服务制图 (Ecosystem Service Mapping)^[63]。随着遥感等地理信息技术的进步, 空间制图方法不断完善, 为生态系统服务的可视化提供了便利。

3 农田土壤功能的调控思路

土壤功能的调控受土地利用方式、土壤属性、作物种植制度、环境要素、管理目标等多种因素的影响。在不同尺度上, 土壤功能的调控思路、途径和侧重点不同 (图 3)。

3.1 全国尺度：土地利用方式及农业结构调整

土壤的初级生产功能是保障粮食安全的基础, 涉及粮食的区域间运输问题, 应从全国尺度对供需平衡自上而下整体考量, 在国家层面划定政策目标, 实行农业产业结构调整。面对我国土壤资源严重缺乏的现状, 应严守十八亿亩耕地红线, 划定永久基本农田, 粮食主产区大规模推进高标准农田建设提升耕地地力, 提高土壤生产力, 非粮食主产区因地制宜积极探索和发展适合当地土壤及气候特点的作物及种植模式^[64]。

图3 土壤功能调控制整体思路 (修改自 Schulte 等^[46])Fig. 3 Framework of soil function regulation (Modified from Schulte et al.^[46])

在全国层面上, 需要全面统筹山水林田湖草生命共同体系统治理。生命共同体内部各要素间是普遍联系且相互影响的, 健康土壤是山水林田湖草生命共同体和谐发展的重要载体, 健康土壤管理能协同实现粮食安全、产品安全、环境安全和生态健康, 保证土壤的永续利用。通过轮作休耕、退耕还林还草等生态退耕手段规划调整特定区域的土地利用方式, 以调控大尺度范围的土壤功能^[65], 这些生态措施对实现我国“双碳”目标非常重要。此外, 还需要完善耕地占补平衡政策, 复垦废弃工矿用地、宅基地等, 保障耕地数量, 同时依照耕地异地补充政策, 统筹跨省域补充的耕地数量和粮食产能, 均衡土壤的生产与生态功能^[66]。

土地利用方式及农业结构的改变显著影响了相关主体的经济利益, 需要结合环境经济政策, 即生态补偿机制 (Payment for ecosystem services)。当前我国生态补偿机制主要应用于退耕还林补偿, 仍存在补偿覆盖不全面、补偿标准及测算方法缺乏科学性等问题^[67]。政府层面仍需要完善政策配套, 健全生态补偿机制, 才能推进土壤功能调控的落地实现。

3.2 区域尺度: 协调资源配置

区域尺度的土壤功能调控适合在省级及地级行政区开展, 需要满足国家层面的总体目标及区域分配要求。我国各个区域土壤空间分异性显著, 主要作物类型、障碍因子及对于土壤功能的需求均有不

同, 因此需要在区域层面进行土壤功能供需评价, 开发差异化区域政策及战略措施, 根据区域内资源禀赋因地制宜, 加强耕地与农田保护:

1) 东北黑土区中低产田分布较为集中, 由于长期的高强度利用, 重用轻养, 导致土层变薄, 有机质含量下降, 水土流失及土壤退化严重。该地区应当侧重提升土壤的水分调节及养分循环功能, 开发兼顾保护、治理和开发利用相结合的治理策略, 防止水土流失, 同时改良培肥, 促进地力提升^[2]。

2) 华北平原地区当前面临着水资源严重不足的困境, 土壤蓄水保肥能力下降, 同时由于长期的耕作导致耕层变浅且养分贫瘠。该地区作为我国粮食主产区应当致力于培肥地力, 提升土壤的粮食生产力, 同时改善农田水利设施建设, 发展节水灌溉技术, 提升土壤的蓄水功能^[2, 64]。

3) 西北黄土高原区气候及土壤条件复杂, 干旱缺水, 土壤侵蚀严重且易发生次生盐碱化。该地区应大力开发膜下滴灌、暗管排盐等盐渍化土壤节水改良技术模式, 同时发展退耕还林还草等生态工程, 防风固沙, 修复生态脆弱区^[68]。

4) 西南区障碍因子主要表现为耕层贫瘠及部分土壤酸化、稻田潜育化等问题。该地区应当侧重水土保持、土壤改良和水肥定向调控, 同时通过开沟排水等措施缓解稻田潜育化问题, 并培肥地力改善土壤结构^[69]。

5) 南方红壤区土壤酸化及重金属污染问题严峻, 且存在坡耕地生产力低下等问题。该地区应致力于发展治酸控污技术, 同时考虑将低产坡耕地退耕恢复植被, 提升碳固存^[70]。

在区域尺度上, 还需要考虑土壤功能在区域内的流动和溢出。如土壤养分循环功能的需求与供给通常以流域尺度为研究对象, 这是由于投入土壤的养分通常由地下及地表水排出, 在流域内循环造成污染。需要结合区域层面的政策约束, 如我国《环境保护法》、《土壤污染防治法》、《水污染防治法》及部分流域、湖泊地方性法规等均涉及化肥使用造成的农业面源污染问题, 但相关政策尚不完善, 规定内容不够明确详实, 对于生产实践指导意义不足, 缺乏对于土壤功能框架的系统考量。

3.3 景观尺度：农业设施建设与景观格局构建

景观尺度的土壤功能调控适合在县级及乡/镇级行政区开展, 旨在通过农业设施建设等人为干预措施优化景观格局, 改变土壤静态属性, 如土壤的水力特征等, 从而定向调整土壤的特定功能。

景观尺度的农业干预措施, 如灌排系统、节水灌溉与施肥配套技术等农田水利设施的建设, 通常需由地方政府统筹规划。但同时应注意避免因过度整治而造成对农田半自然生境的破坏, 考虑将农业设施工程生态景观化, 完善沟渠等生物缓冲带建设, 生态涵养通过调节水资源的时空分布, 改良农田土壤水分状况, 提高水肥利用效率, 并配合建立以村集体和农场为主体的农田生态管护制度, 对绿色基础设施开展定期维护, 以提升景观层面农田的生产功能及自然资本价值^[71]。

《全球生物多样性展望》提出的可持续转型途径中重点提及了景观尺度空间规划^[72]。在景观尺度上, 应综合考虑现有生态景观格局、农田规模化需求及生物多样性保护的需求, 避免因过度强调高标准农田建设新增集中连片土壤面积破坏作物-害虫-天敌之间的互作有机整体, 导致生物栖息地丧失及土壤功能受损^[73]。应慎重考虑保留农地田埂、河岸草地灌丛等原生空间作为田间物种的庇护所, 推动景观层面的可持续土壤功能调控^[71]。

3.4 田块尺度：田间土壤管理技术优化

田块尺度的土壤功能调控的主体是个体农户, 旨在执行与落实更大空间尺度与行政级别的政策要

求, 通过田间管理措施的优化以改变土壤动态属性。在田块尺度上, 土壤管理(肥料、农用化学品、有机肥及秸秆还田)显著影响土壤多功能性^[74]。例如, 种植覆盖作物(Cover crop)对养分循环、水分调节、生物多样性维持等多项土壤功能均有提升作用^[75]。免耕避免了机械干扰, 增加了土壤的有机质及微生物活性, 提高了土壤团聚体的稳定性, 但在较黏重的土壤中免耕易导致排水不畅及作物减产^[75-76]。因而在生产实践中应充分考虑土壤功能间的协同与权衡关系, 依据具体需求补齐短板。

农户是田块尺度上土壤功能调控的主体, 对于技术的采纳程度是实现土壤功能调控的关键。科技小院通过农民参与式技术创新模式可以有效地提高技术到位率, 提高作物产量和效率^[77]。与此类似的多主体参与式方法可以将科学技术与生产实践之间建立直接联系, 科学问题来自于生产一线, 理论在生产一线不断得到发展和完善, 这种模式不仅推动了科技创新, 还有利于技术直接落地, 为土壤改良和保育提供保障^[78-79]。

土壤管理改良还需要政府层面的政策保障。我国农业农村部、财政部当前已实施一些强农惠农政策, 如耕地地力保护补贴等, 以绿色生态为导向的补贴政策体系和激励约束机制正在逐步建立^[80]。未来可从土壤多功能性的视角加以考量, 最大程度发挥土壤功能, 实现土壤的可持续利用。

4 展 望

健康土壤是食物、生物能源、纤维、饲料和其他产品的来源, 也是提供多种生态系统服务的基本前提。作为健康土壤和生命共同体的核心内容, 土壤多功能性体现在资源环境、食品安全、气候变化与人类福祉的多目标协同, 同步发挥其生产、生活与生态价值。为实现这一目标, 未来需要加强以下几个方面的工作:

1) 深入探索土壤多功能性形成和维持机理。包括土壤多功能性的形成机制与驱动因素, 及其与人类活动的关系; 利用现代组学技术, 深入探究土壤物理、化学及生物学多组分互作的过程及机制。此外, 还应继续加强生物多样性的研究, 特别考虑多维度、多营养级的互作, 充分挖掘土壤生物学潜力

以及地上和地下互馈的作用；深化土壤微生物组在元素循环、土壤污染修复及根际免疫调控等方面的作用。

2) 在不同尺度上协同土壤功能调控目标。以保障土壤初级生产能力为基础，系统权衡各项土壤功能。在大空间尺度上，侧重整体目标，建立完善的顶层设计，把控土壤治理大方向，向“数量+质量+生态”三位一体转移^[81]，并采用“自上而下”的思路向小尺度均衡分配；在小空间上，侧重个体目标，需要考虑空间分异性，因地制宜提高土壤功能。在实现土壤功能管理的进程中，需要充分调动各利益主体的主观能动性，强化对土壤健康及土壤多功能性的理解，并通过政策手段，健全约束与鼓励机制。

3) 多学科交叉实现土壤多功能性协同。土壤功能调控是一个系统工程，坚持走绿色生产、种养结合、绿色生态环境与绿色食品相结合的农业绿色发展道路，倡导“同一健康 (One health)”的理念，从土壤健康至环境健康、食品健康、人类健康，涉及自然科学、生态科学和社会科学等多个学科。土壤多功能性的形成机制、提升技术和优化管理措施，及其落地方案、操作规范等，需要多学科和不同利益相关主体的紧密协作，才能形成全链条的系统解决方案。

4) 土壤多功能性提升需要与现代科技相结合。随着遥感、5G、大数据等现代信息技术的进步，空间制图方法不断完善，将土壤功能与遥感技术、数字信息技术有机融合，创新数字技术产品；建立天地空一体的监测与应用体系，构建土壤健康大数据平台，并与作物种植、管理措施、产品品质、环境质量等建立关联，形成基于土壤多功能性的健康管理信息中心和决策工具系统。

5) 重视土壤固碳增汇功能对“双碳”目标的贡献。“碳达峰”与“碳中和”作为我国当前重要的战略目标与土壤的固碳功能息息相关。在“双碳”行动中应当充分挖掘土壤的固碳潜力，开展土壤减碳增汇技术与政策研究，通过增施有机肥、保护性耕作、种植覆盖作物等途径提高土壤有机质含量，增加土壤碳汇，将土壤固碳作为实现“双碳”目标的重要途径协同推进。

6) 完善土壤管理相关政策与落地方案。我国当前土壤相关政策尚未充分考虑土壤多功能性，对于农业系统生态环境相关的激励与约束机制尚不完

善。可从土壤的各项功能出发，加强国际合作，借鉴当前国际先进的农业环境生态治理经验，形成我国特色的系统性土壤管理行业标准。同时加强建立基于土壤功能与耕地质量评估的技术规程和落地实施方案，激发各级利益相关群体积极参与，实现政策落地。

致谢 感谢 Craig and Susan McCaw Foundation、大自然保护协会 (The Nature Conservancy, TNC) 和国家留学基金委员会 (留金美[2019]13043) 的经费支持。

参考文献 (References)

- [1] Shen R F, Yan X Y, Zhang G L, et al. Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1051-1059. [沈仁芳, 颜晓元, 张甘霖, 等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1051—1059.]
- [2] Shen R F, Wang C, Sun B. Soil related scientific and technological problems in implementing strategy of “storing grain in land and technology”[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33 (2): 135—144. [沈仁芳, 王超, 孙波. “藏粮于地、藏粮于技”战略实施中的土壤科学与技术问题[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33 (2): 135—144.]
- [3] Bouma J. Soil science contributions towards Sustainable Development Goals and their implementation: Linking soil functions with ecosystem services[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177 (2): 111—120.
- [4] Adhikari K, Hartemink A E. Linking soils to ecosystem services—A global review[J]. *Geoderma*, 2016, 262: 101—111.
- [5] Volchko Y, Norrman J, Bergknut M, et al. Incorporating the soil function concept into sustainability appraisal of remediation alternatives[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 367—376.
- [6] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality — A critical review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 120: 105—125.
- [7] Glenk K, Mcvittie A, Moran D. Soil and soil organic carbon within an ecosystem service approach linking biophysical and economic data[R]. Cupar: Scottish Agricultural College, 2012.
- [8] Baveye P C. Bypass and hyperbole in soil research: Worrisome practices critically reviewed through examples[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72 (1): 1—20.
- [9] MEA. Millennium ecosystem assessment: Current state and trends assessment[R]. Washington, DC: Island Press,

- 2005.
- [10] Manning P, van der Plas F, Soliveres S, et al. Redefining ecosystem multifunctionality[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2 (3): 427—436.
- [11] Bouma J, Kwakernaak C, Bonfante A, et al. Soil science input in transdisciplinary projects in the Netherlands and Italy[J]. *Geoderma Regional*, 2015, 5: 96—105.
- [12] McBratney A, Field D J, Koch A. The dimensions of soil security[J]. *Geoderma*, 2014, 213: 203—213.
- [13] Commission of the European Communities. Communication from the commission to the council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Thematic Strategy for Soil Protection, COM 231 Final[R]. Brussels, 2006.
- [14] Food and Agriculture Organization (FAO). Soil functions: Soils deliver ecosystem services that enable life on Earth - Infographics [EB/OL]. 2015 [2021-09-28]. <http://www.fao.org/resources/infographics>.
- [15] Schulte R P O, Creamer R E, Donnellan T, et al. Functional land management: A framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture[J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, 38: 45—58.
- [16] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15 (1): 3—11.
- [17] United Nations. Achieving Land Degradation Neutrality[EB/OL]. 2021 [2021-09-28]. <https://www.unccd.int/actions/achieving-land-degradation-neutrality>.
- [18] Review of the international initiative for the conservation and sustainable use of soil biodiversity and updated plan of action-Draft recommendation submitted by the Chair[R]. United Nations, 2021.
- [19] Janzen H H, Janzen D W, Gregorich E G. The ‘soil health’ metaphor: Illuminating or illusory?[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2021, 159: 108167.
- [20] Craven D, Eisenhauer N, Pearse W D, et al. Multiple facets of biodiversity drive the diversity–stability relationship[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2 (10): 1579—1587.
- [21] Bardgett R D, van der Putten W H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning[J]. *Nature*, 2014, 515 (7528): 505—511.
- [22] Wall D H, Nielsen U N, Six J. Soil biodiversity and human health[J]. *Nature*, 2015, 528 (7580): 69—76.
- [23] Wagg C, Bender S F, Widmer F, et al. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111 (14): 5266—5270.
- [24] Jing X, Sanders N J, Shi Y, et al. The links between ecosystem multifunctionality and above- and belowground biodiversity are mediated by climate[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8159.
- [25] Barberán A, Bates S T, Casamayor E O, et al. Using network analysis to explore co-occurrence patterns in soil microbial communities[J]. *The ISME Journal*, 2012, 6 (2): 343—351.
- [26] de Vries F T, Griffiths R I, Bailey M, et al. Soil bacterial networks are less stable under drought than fungal networks[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3033.
- [27] Delgado-Baquerizo M, Oliverio A M, Brewer T E, et al. A global atlas of the dominant bacteria found in soil[J]. *Science*, 2018, 359 (6373): 320—325.
- [28] Fan K K, Delgado-Baquerizo M, Zhu Y G, et al. Crop production correlates with soil multitrophic communities at the large spatial scale[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2020, 151: 108047.
- [29] De Ruiter P C, Moore J C, Zwart K B, et al. Simulation of nitrogen mineralization in the below-ground food webs of two winter wheat fields[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1993, 30 (1): 95—106.
- [30] García-Palacios P, Maestre F T, Kattge J, et al. Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16 (8): 1045—1053.
- [31] Xun W B, Liu Y P, Li W, et al. Specialized metabolic functions of keystone taxa sustain soil microbiome stability[J]. *Microbiome*, 2021, 9 (1): 35.
- [32] Liu T, Chen X Y, Gong X, et al. Earthworms coordinate soil biota to improve multiple ecosystem functions[J]. *Current Biology*, 2019, 29 (20): 3420—3429.
- [33] García-Palacios P, Gross N, Gaitán J, et al. Climate mediates the biodiversity-ecosystem stability relationship globally[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115 (33): 8400—8405.
- [34] Power A G. Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences*, 2010, 365 (1554): 2959—2971.
- [35] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet[J]. *Nature*, 2011, 478 (7369): 337—342.
- [36] Hurni H, Giger M, Liniger H, et al. Soils, agriculture and food security: The interplay between ecosystem functioning and human well-being[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2015, 15: 25—34.
- [37] Zwetsloot M J, Leeuwen J, Hemerik L, et al. Soil multifunctionality: Synergies and trade-offs across European climatic zones and land uses[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72 (4): 1640—1654.
- [38] Rodríguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services[J].

- Ecology and Society, 2006, 11: art28.
- [39] Wang Y. White paper "Energy in China's New Era" was released—China achieves carbon emissions intensity reduction target ahead of schedule[N]. Economic Daily, 2020-12-22(4) [2021-09-28] http://paper.ce.cn/jjrb/html/2020-12/22/content_434587.htm. [王洋.《新时代的中国能源发展》白皮书发布——我国提前实现碳排放强度下降目标[N]. 经济日报, 2020-12-22(4) [2021-09-28] http://paper.ce.cn/jjrb/html/2020-12/22/content_434587.htm.]
- [40] Debeljak M, Trajanov A, Kuzmanovski V, et al. A field-scale decision support system for assessment and management of soil functions[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2019, 7: 115.
- [41] Rinot O, Levy G J, Steinberger Y, et al. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 1484—1491.
- [42] Zhao R, Wu K N, Liu Y N, et al. Soil health evaluation at a County level based on soil ecosystem service function[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(2): 269—279. [赵瑞, 吴克宁, 刘亚男, 等. 基于生态系统服务功能视角的县域尺度土壤健康评价[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 269—279.]
- [43] Yang Y, Guo Z Y, Pan K, et al. Farmland soil health assessment based on ecosystem multi-functionality[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 461—475. [杨颖, 郭志英, 潘恺, 等. 基于生态系统多功能性的农田土壤健康评价[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 461—475.]
- [44] Mueller L, Schindler U, Shepherd T G, et al. A framework for assessing agricultural soil quality on a global scale[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2012, 58(sup1): S76—S82.
- [45] Zhang J Z, Li Y Z, Li Y, et al. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 603—616. [张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 603—616.]
- [46] Schulte R P O, Bampa F, Bardy M, et al. Making the most of our land: Managing soil functions from local to continental scale[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2015, 3: 1—14.
- [47] Byrnes J E K, Gamfeldt L, Isbell F, et al. Investigating the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality: Challenges and solutions[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(2): 111—124.
- [48] Zheng Q, Hu Y T, Zhang S S, et al. Soil multifunctionality is affected by the soil environment and by microbial community composition and diversity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2019, 136: 107521.
- [49] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Reich P B, et al. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10541.
- [50] Zhao H L. Research progress of classification and value evaluation of ecosystem services[J]. *Ecological Economy*, 2015, 31(8): 27—33. [赵海兰. 生态系统服务分类与价值评估研究进展[J]. 生态经济, 2015, 31(8): 27—33.]
- [51] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393—408.
- [52] Daily G C, Matson P A, Vitousek P M. Ecosystem services supplied by soil[M]//*Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. Island Press, 1997: 113—132.
- [53] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253—260.
- [54] Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 19—25. [欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 19—25.]
- [55] Zhao J Z, Xiao H, Wu G. Comparison analysis on physical and value assessment methods for ecosystems services[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 290—292. [赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 290—292.]
- [56] Yuan Z Y Y, Wan R R. A review on the methods of ecosystem service assessment[J]. *Ecological Science*, 2019, 38(5): 210—219. [袁周炎妍, 万荣荣. 生态系统服务评估方法研究进展[J]. 生态科学, 2019, 38(5): 210—219.]
- [57] Wu S H, Yu Y N, Zhu J, et al. Soil ecosystem services: Concept, quantification and response to urbanization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(5): 970—978. [吴绍华, 虞燕娜, 朱江, 等. 土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 970—978.]
- [58] Stanford University. Natural Capital Project: InVEST Software Platform [EB/OL]. 2021 [2021-09-28]. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>.
- [59] Jackson B, Pagella T, Sinclair F, et al. Polyscape: A GIS mapping framework providing efficient and spatially explicit landscape-scale valuation of multiple ecosystem services[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 112: 74—88.
- [60] Su C H, Liu H F, Wang S. A process-based framework for soil ecosystem services study and management[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 282—289.
- [61] Chen T Q, Gao Y, Feng Z, et al. Hotspots and trends of soil ecosystem services based on CiteSpace[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(7): 204—219.

- [陈甜倩, 高阳, 冯喆, 等. 基于 CiteSpace 的土壤生态系统服务研究热点与趋势[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26 (7): 204—219.]
- [62] Ellili-Bargaoui Y, Walter C, Lemercier B, et al. Assessment of six soil ecosystem services by coupling simulation modelling and field measurement of soil properties[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107211.
- [63] Zhang L W, Fu B J. The progress in ecosystem services mapping: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (2): 316—325. [张立伟, 傅伯杰. 生态系统服务制图研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34 (2): 316—325.]
- [64] Zhang G L, Wu H Y. From “problems” to “solutions”: Soil functions for realization of sustainable development goals[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33 (2): 124—134. [张甘霖, 吴华勇. 从问题到解决方案: 土壤与可持续发展目标的实现[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 124—134.]
- [65] Tao R, Xu Z G, Xu J T. Grain for green project, grain policy and sustainable development[J]. *Social Sciences in China*, 2004 (6): 25—38, 204. [陶然, 徐志刚, 徐晋涛. 退耕还林, 粮食政策与可持续发展[J]. 中国社会科学, 2004 (6): 25—38, 204.]
- [66] Fang B, Qi X X, Wang Q R. Theoretical framework and estimating the value balance between the occupation and reclamation of cultivated land within China[J]. *China Land Science*, 2013, 27 (12): 12—17. [方斌, 祁欣欣, 王庆日. 国家耕地易地补充价值补偿的理论框架与测算[J]. 中国土地科学, 2013, 27 (12): 12—17.]
- [67] Han H Y, Yu Y H. Research on the payment for environmental services of the 'grain for green' program: Cost basis, willingness to accept or environmental values[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2014, 35 (4): 64—72, 112. [韩洪云, 喻永红. 退耕还林生态补偿研究——成本基础、接受意愿抑或生态价值标准[J]. 农业经济问题, 2014, 35 (4): 64—72, 112.]
- [68] Wang C, Wu X, Fu B J, et al. Ecological restoration in the key ecologically vulnerable regions: Current situation and development direction[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (20): 7333—7343. [王聪, 伍星, 傅伯杰, 等. 重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向[J]. 生态学报, 2019, 39 (20): 7333—7343.]
- [69] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Announcement of national arable land quality grading in 2019[R]. 2020. [中华人民共和国农业农村部. 2019 年全国耕地质量等级情况公报[R]. 2020.]
- [70] Zhao Q G, Luo Y M. The macro strategy of soil protection in China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30 (4): 452—458. [赵其国, 骆永明. 论我国土壤保护宏观战略[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30 (4): 452—458.]
- [71] Luo M, Yu Z R, Ying L X. Integrated land management from an ecosystem health perspective[J]. *China Land*, 2020 (2): 4—8. [罗明, 宇振荣, 应凌霄. 从生态系统健康视角看土地综合整治[J]. 中国土地, 2020 (2): 4—8.]
- [72] Secretariat of the Convention on Biological Diversity. *Global Biodiversity Outlook 5*[R]. Montreal, 2020.
- [73] Jiang T, Fu D M, Zhang W N, et al. Regulating effect of agricultural landscape pattern on ecological pest control by natural enemies[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (7): 2511—2520. [江婷, 付道猛, 张万娜, 等. 农田景观格局对害虫天敌生态控害功能的调控作用[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (7): 2511—2520.]
- [74] Li K L, Zhang H Y, Li X L, et al. Field management practices drive ecosystem multifunctionality in a smallholder-dominated agricultural system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 313: 107389.
- [75] Nunes M R, van Es H M, Schindelbeck R, et al. No-till and cropping system diversification improve soil health and crop yield[J]. *Geoderma*, 2018, 328: 30—43.
- [76] Baker D P, Gumede S. Private military/security companies and human security in Africa[J]. *African Security Review*, 2007, 16 (4): 1—5.
- [77] Zhang W F, Cao G X, Li X L, et al. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers[J]. *Nature*, 2016, 537 (7622): 671—674.
- [78] Campos I, Ng K, Penha-Lopes G, et al. The diversity of adaptation in a multilevel governance setting[M]// *Adapting to Climate Change in Europe*. Amsterdam: Elsevier, 2018: 49—172.
- [79] Hermans T D G, Dougill A J, Whitfield S, et al. Combining local knowledge and soil science for integrated soil health assessments in conservation agriculture systems[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286: 112192.
- [80] Li L H, Gao Y C. Two departments launch reform plan Agricultural subsidies to be green and ecologically oriented[N]. *People's Daily*. 2016-12-20(2)[2021-09-28]. [李丽辉, 高云才. 两部门出台改革方案 农业补贴以绿色生态为导向[N]. 人民日报, 2016-12-20 (2) [2021-09-28].]
- [81] Niu S D, Fang B. Cultivated land protection system in China from 1949 to 2019: Historical evolution, realistic origin exploration and path optimization[J]. *China Land Science*, 2019, 33 (10): 1—12. [牛善栋, 方斌. 中国耕地保护制度 70 年: 历史嬗变、现实探源及路径优化[J]. 中国土地科学, 2019, 33 (10): 1—12.]

(责任编辑: 卢 萍)