

DOI: 10.11766/trxb202002220064

张俊伶, 张江周, 申建波, 田静, 金可默, 张福锁. 土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 783–796.
ZHANG Junling, ZHANG Jiangzhou, SHEN Jianbo, TIAN Jing, JIN Kemo, ZHANG Fusuo. Soil Health and Agriculture Green Development: Opportunities and Challenges[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 783–796.

土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策*

张俊伶^{1, 2}, 张江周^{1, 2}, 申建波^{1, 2}, 田 静^{1, 2}, 金可默^{1, 2}, 张福锁^{1, 2†}

(1. 中国农业大学资源与环境学院/植物-土壤相互作用教育部重点实验室, 北京 100193; 2. 中国农业大学国家农业绿色发展研究院, 北京 100193)

摘 要: 农业绿色发展是农业现代化的必由之路, 土壤健康是农业绿色发展的基石。本文系统总结了国内外有关土壤健康的内涵、研究进展和发展趋势, 探讨了提升土壤健康的途径和对策, 并对我国未来健康土壤培育工程提出了建议和展望。健康土壤培育的核心是消除土壤障碍因子, 深入挖掘土壤生物学潜力, 增碳提高资源效率, 强化生物学过程, 协同地上和地下生物互作。通过优化土壤内部调节过程, 最小化外部的投入, 以实现土壤生产功能和其他生态服务的同步提升。健康土壤的培育是一个系统工程, 需要对投入品-生产过程-产品品质-产品加工-废弃物循环等全产业链进行系统综合考虑, 多学科交叉创新, 政产学研用一体化联合攻关, 同时还需要政策保障和激励措施, 需要全社会行动起来。

关键词: 土壤健康; 农业绿色发展; 障碍因子; 生物强化; 生态系统多功能

中图分类号: S154.4 **文献标志码:** A

Soil Health and Agriculture Green Development: Opportunities and Challenges

ZHANG Junling^{1, 2}, ZHANG Jiangzhou^{1, 2}, SHEN Jianbo^{1, 2}, TIAN Jing^{1, 2}, JIN Kemo^{1, 2}, ZHANG Fusuo^{1, 2†}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. National Academy of Agriculture Green Development, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Agriculture green development (AGD) is the future for modern agriculture, and soil health is the cornerstone of AGD. This article summarized the connotation, research progress and trend of soil health in domestic and overseas. By summarizing the main management strategies for healthy soil cultivation, this paper puts forward novel ideas and approaches for promoting soil health, and discusses the challenges and opportunities for soil health engineering. The cores for the promotion of healthy soils are: eliminating the limiting factors of soils; increasing the content of soil organic carbon and nutrient use efficiency; exploiting the biological potentials; promoting synergistic interactions between above-ground and below-ground. The aim of soil health engineering is to synergize the production and other ecosystem services delivered by soils by optimizing the internal regulatory processes whilst minimizing the external inputs. The cultivation of healthy soil needs holistic engineering, which requires

* 国家重点研发计划项目(2016YFE0101100)、北京市科技支撑乡村振兴项目(Z191100004019013)和北京高校高精尖学科建设项目资助
Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFE0101100), the Science and Technology Supports Rural Revitalization Project in Beijing (No. Z191100004019013) and the Beijing University Advanced Discipline Construction Project

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

作者简介: 张俊伶(1970—), 女, 山西临汾人, 博士, 教授, 主要从事土壤健康与微生物研究。E-mail: junlingz@cau.edu.cn

收稿日期: 2020-02-22; 收到修改稿日期: 2020-03-12; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2020-03-27

comprehensive integration of whole industry chain in the nexus of external input, crop production, products-processing, and waste recycling. Meanwhile, cross-disciplinary innovation, government-farmer-research-extension institute collaboration, and policy support and incentive systems are crucial for realizing soil health towards AGD.

Key words: Soil health; Agriculture green development; Limiting factors; Biofortification; Ecosystem multifunctionality

农业绿色发展是以效率、和谐、可持续为目标的经济增长和社会发展方式，是可持续发展的必然选择。其内涵主要包括以下三个要点：一是将环境资源作为社会经济可持续发展的内在要素；二是将实现经济、社会和环境的可持续发展作为绿色发展的目标；三是将经济活动过程和结果的绿色化、生态化作为绿色发展的主要内容和途径。土壤健康是农业绿色发展的重要基础和核心内容，直接关系到可持续进程和有关目标的实现。

经过 30 多年的不懈努力，我国粮食产量大幅提高，人民生活日益得到改善。然而，土地集约化程度和农业生产资料的投入却不断增加，在满足粮食需求的同时，也导致了土壤退化、资源利用率低和环境恶化等严重问题。当前，集约化农业发展到了一个新的历史转折点，改变传统农业投入高、资源效率低和环境污染风险大的生产模式，以绿色发展为导向，协同实现提质增产、资源高效、环境安全、经济发展、农民增收等目标，走出一条资源节约、环境友好、食品安全、人类健康的高质量农业发展道路成了必然选择。绿色发展理念和绿色生产方式开启了农业发展的新时代，健康土壤是保障现代化农业高质量发展的根基。人类消耗的食物和能量 99% 来源于土壤，世界粮农组织（FAO）在国际土壤年提出了“健康土壤带来健康生活”的理念和行动，认为只有健康的土壤才能生产健康的食物，进而孕育健康的人类和健康的社会。随着全球人口的增加和生活水平的不断提高，人们对食物需求的数量和质量都发生了重大变化，同时面临极端天气等气候变化对农业生产和环境的负面影响，人口、粮食、资源和环境之间的矛盾日趋尖锐。土壤作为脆弱性的非再生资源，其健康状况和可持续性管理正成为全球关注的焦点和热点^[1-2]。2015 年联合国提出的可持续发展目标，旨在至 2030 年彻底解决社会、经济和环境三个维度协同发展的问题，使全球社会和经济转向可持续发展道路。《2030 年可持续发展议程》中涵盖了 17 项可持续发展目标，其中 13 项

目标直接或间接与土壤有关。因此，土壤健康不仅深刻地影响植物、动物和人类的健康，而且与大气、水环境保护休戚相关，是以人类健康为中心的整体健康系统中的一个重要组成部分，是农业绿色发展的基石。

1 我国土壤健康问题与发展态势

1.1 问题

当前我国土壤健康问题严重，土壤保育形势严峻。我国现有耕地资源总量仅为 1.35 亿 hm^2 ，土壤资源严重不足，而且由于长期不合理的利用，土壤退化严重。据统计，我国因土壤侵蚀、肥力贫瘠、盐渍化、沼泽化、污染及酸化等造成的土壤退化总面积约为 4.60 亿 hm^2 ，占全国土地总面积的 40%，是全球土壤退化总面积的 1/4^[3]。其中，全国现有土壤侵蚀总面积 2.95 亿 hm^2 ，占国土面积的 30.7%（2014 年报道），是世界上水土流失最为严重的国家之一，水土流失给我国造成的经济损失约相当于 GDP 总量的 3.5%。2019 年 12 月 5 日世界土壤日的主题是“阻止土壤侵蚀，拯救我们的未来”，说明土壤退化日益引起国际社会的广泛关注。同样，土壤污染问题也敲响了警钟。2014 年《全国土壤污染状况调查公报》结果显示，我国土壤污染总超标率达到 16.1%，以轻微程度的为主，约占 11.2%。以无机污染为主，约占总污染的 80% 以上，有机污染次之，复合污染较少。土壤污染对食品安全和人类健康造成很大威胁。全国每年受重金属污染的粮食多达 1 200 万吨，因重金属污染而导致的粮食减产高达 1 000 多万吨，合计经济损失至少 200 亿元^[4]。农用薄膜造成的白色污染、滥用抗生素导致的污染等也对土壤健康造成极大的威胁。

当前我国有限耕地的土壤健康状况仍不容乐观。除污染带来的健康问题外，首先，耕地地力总体水平不高，耕地土壤有机碳（SOC）普遍贫乏，土壤结构性问题比较明显。基于第二次全国土壤普

查数据的估算,我国农田 20 世纪 80 年代初 SOC 库(20 cm 深度)基本处于 $26.6\sim 32.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间^[5-7],远低于美国农田的平均值 $43.7\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[8]和欧洲农田的平均值 $40.2\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[9]。2015 年全国优等耕地面积为 397.38 万 hm^2 ,仅占全国耕地评定总面积的 2.9%。其次,近年来我国土壤耕层“浅、实、少”的问题严重。据统计,全国 65.5%的监测点土壤耕层厚度平均值小于 20 cm,低于美国耕层厚度 35 cm ^[10];据 2016 年全国耕地质量监测报告指出,全国 25.9%的监测点土壤容重大于 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,高于作物适合生长的范围 $1.10\sim 1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。土壤有效耕层变浅和板结,影响作物根系下扎的深度,导致根系无法利用深层土壤的水分和养分,作物生长受抑制;同时,土壤结构变差,蓄水和渗透能力变差,增加了土壤流失和侵蚀的风险。再者,我国土壤养分对当季作物贡献的份额较少,平均份额在 50%,有的甚至只有 30%~40%,低于可持续农田生态系统(>70%)。我国养分资源利用率也较低,三大粮食作物氮肥、磷肥和钾肥当季平均利用率分别为 33%、24%和 42%。最后,现代农业复种指数比较高、作物种植种类单一以及大肥大水大药等,导致土壤生物多样性低,土传病害频发,严重影响土壤健康和作物健康状况。全国大约 5 亿亩(1 公顷为 15 亩)经济作物均面临土传病害的问题。总之,传统高度集约化农业管理方式导致土壤酸化、有机质下降、土壤生物多样性降低、土传病害频发和环境污染^[11-12],严重影响土壤生态系统功能的发挥。由于土壤污染和退化具有隐蔽性、长期性和复杂性的特点,导致土壤污染或退化之后极难恢复,因此防治土壤污染和退化,培育健康土壤,是农业绿色发展面临的重大挑战。

1.2 内涵和发展态势

人类对土壤健康和功能的兴趣可以追溯到文明的起点^[13]。随着人口的急剧增长和土壤退化的加剧,自 20 世纪 70 年代以来,土壤质量和功能受到越来越多的关注^[14-17],出现了两个独立但相互关联的术语,即土壤质量和土壤健康。通常科研人员偏好土壤质量,而农民和其他政企等公众人员则对土壤健康更感兴趣。尽管不同学者持有不同的观点和看法,现在普遍倾向于接受两者统一的观点。早期土壤健康与土壤质量两个概念之间的差异,主要表现在土壤质量主要强调土壤的运行能力或者适合使用^[14]。

例如,美国土壤学会定义的土壤质量,是指土壤作为重要的生命系统行使各种功能的能力,以及在生态系统水平和土地利用的边界范围内,维持生产植物性和动物性产品的能力,维持或改善水和大气质量的能力,以及促进植物和动物健康的能力^[18]。狭义的土壤健康,强调的是土壤生物特别是土壤病原菌,尤指土壤要保证植物的健康生长。广义的土壤健康,是指在自然或管理的生态系统边界内,一个充满活力的土壤所具有的保证持续生产,保持良好的水体和大气环境,促进植物、动物(人类)健康的能力^[17]。可以看出,两者基本同义。土壤健康在更广的范围内认为土壤具有生命力、是动态的,强调土壤的自然资源属性、环境属性和生态属性,其与植物健康、动物健康和人类健康密切相关。土壤健康还包括恢复力和抵抗力^[19],具体体现在土壤生物在调节全球气候变化的重要性等方面。

我国科学家也对土壤健康进行了广泛关注。曹志洪和周健民^[20]将土壤健康的定义为“土壤提供食物、纤维和能源等生物物质的土壤肥力质量,土壤保持周边水体和空气洁净的土壤环境质量,土壤消纳有机和无机有毒物质、提供生物必需元素、维护人畜健康和确保生态安全的土壤健康质量的综合量度”。周启星^[21]认为土壤健康最为基本的判断标准,首先是能生产出对人体具有健康效益的动植物产品,其次是应该具有改善水和大气质量的能力以及在一定程度上抵抗污染物的能力,还应该能够直接或间接地促进植物、动物、微生物以及人体的健康。由上可以看出,土壤健康是一个综合量度,除了与农业生产有关的基本功能之外,还强调了土壤生物对生态系统服务的重要性,以及其改善环境质量和提高动植物健康的能力。

近年来,随着人们对土壤生态系统服务的关注^[1, 22-26],土壤健康成为国际上土壤学和生态学研究热点问题。自 20 世纪 60 年代起,人们已经认识到生态系统服务的重要性^[27]。生态系统服务是指人类从自然界获得的益处,涵盖供给服务、调节服务、支持服务以及文化服务等。土壤作为生态系统的的重要组成部分,常常被视为“免费”的礼物,而生态学家则更注重地上部生物多样性忽视了土壤生物多样性。然而,近年来由于气候变化和人类活动的影响,土壤功能急剧衰减,表现在土壤生产力下降、养分失衡、传粉能力下降、生物多样性下降

等, 土壤生态系统失衡, 已严重威胁人类的生存和发展。人们普遍认识到土壤不仅可以提供食物, 而且还为社会提供了广泛的生态系统服务^[24, 28-30]。具体而言, 土壤的供给服务是指土壤为人类提供粮食生产, 以及非粮食原材料、土壤矿物等资源和产品。调节服务是指土壤在温度调节、温室气体排放和固定、水体净化、污染物降解和吸纳等方面的效应。支持服务指土壤产生和支撑其他服务的效应, 包括初级生产力、参与生物地球化学过程, 为生物多样性提供生境和作为遗传资源库等。文化服务功能是指土壤对文化遗产的保存、提供游憩地、景观和开展教育等方面的功效。

2 我国农业绿色发展的挑战与土壤健康的机遇

2.1 农业绿色发展的挑战

我国农业绿色发展面临的挑战包括以下几个方面:

1) 我国农业资源投入量大, 产量和资源效率有待进一步提升。我国化肥和农药投入量位居世界第一, 保障了我国粮食安全生产, 近几年粮食总产稳定超过 6 亿吨。然而, 高度集约化农业的特点是化学品投入高, 资源利用效率低。在农药化肥投入量居高不下的前提下, 并未成正比实现相应的高产出。目前我国粮食作物产量仅达到产量潜力的 50%~80%, 仍有 20%~50% 的潜力有待进一步挖掘, 因此我国农产品增产增效潜力巨大。

2) 我国农产品生产成本低, 品质有待提升。我国农产品生产的特点是数量多, 但品质差, 不能满足人民对美好生活的需求, 因此, 市场价值低, 出口率低, 产业发展困难重重。例如, 作为苹果的第一生产大国, 我国苹果生产量占全球的近 50%, 但出口额不足 12%。由此可见, 我国农产品质量的提升空间非常大, 加强农产品供给侧结构性改革, 优化提升全产业链, 尤其是土壤健康培育和作物栽培生产环节的管理, 还可以大幅降低农产品生产成本, 切实提高健康、高质量食品的供给能力。

3) 我国粮食、水果和蔬菜生产的资源环境代价太高。我国农业生产的资源环境代价非常高。从 1980 至 2018 年间, 我国粮食总产量增长了 105%, 但是

化肥消费量增长了 345%。农用塑料薄膜和农药使用量, 分别由 1991 年的 64.2 万和 76.5 万吨增至 2018 年的 246.5 万和 150.4 万吨。以化肥为例, 长期盲目滥用化肥, 导致了农产品和地下水硝酸盐含量超标, 也不利于土壤结构的形成, 作物减产和品质下降。同时, 不合理施肥导致农田土壤显著酸化现象非常严重, 从 20 世纪 80 年代到 21 世纪, 全国农田土壤的 pH 平均下降了 0.5 个单位^[31]。土壤酸化不仅影响作物根系生长导致作物减产, 还会造成重金属元素活化、土传病虫害加重等一系列问题, 进而严重威胁农业生产和生态环境安全^[32]。

4) 农业绿色发展对科技创新提出更高要求。科技创新的主攻方向应该是如何用最少的资源生产出数量足、质量好、营养健康的农产品, 以满足人们对美好生活向往的需求, 这是现在农业科技领域最关键的一个创新方向和主攻点。它的突破口就在于对农业全产业链卡脖子技术的突破。传统单一学科不能解决农业绿色发展全产业链的问题。通过多学科交叉融合、创新技术, 大幅度提高资源利用效率, 生产出更多、更好、更健康的农产品, 实现农业生产与资源和生态环境准确匹配, 粮食安全和环境安全双赢的绿色发展目标^[33-34]。

2.2 土壤健康的新机遇

农业绿色发展的重点是在发展过程中减少资源环境代价, 平衡好“绿色”与“发展”的问题^[35], 健康土壤是农业绿色发展的基础。土壤酸化、土壤重金属污染、土壤退化等系列问题的凸显, 严重制约了农业绿色发展。培育健康的土壤, 增加土壤养分有效性、微生物多样性等, 提升土壤生态系统服务势在必行。

2016 年国务院印发了《土壤污染防治行动计划》, 指出到 2020 年, 全国土壤污染加重趋势得到初步遏制, 土壤环境质量总体保持稳定, 农用地和建设用土壤环境安全得到基本保障, 土壤环境风险得到基本管控。到 2030 年, 全国土壤环境质量稳中向好, 农用地和建设用土壤环境安全得到有效保障, 土壤环境风险得到全面管控。到 21 世纪中叶, 土壤环境质量全面改善, 生态系统实现良性循环; 同时, 可持续发展议程的实现也需加强土壤的可持续管理。这是一项巨大的工程, 需要提出更多行之有效的措施来防止土壤进一步恶化, 健康土壤培育方法和案例亟需进行研究和总结, 为国家土壤污染

防治和土壤质量提升奠定科学基础。

新时代社会主要矛盾为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾。人民对美好生活需求需要生产更多绿色、优质、健康的农产品，除了先进的生产技术和生产理念，健康的土壤是生产绿色产品 and 安全食品的基础，构建健康土壤是一项系统工程，对于解决新时代社会主要供需矛盾具有重要现实意义。

3 土壤健康研究进展与热点

农业绿色发展需要保证水、土、气清洁和安全，保证农产品安全和质量，才可以保证人体健康，提高人民生活幸福指数。作为环境质量的一个重要组分，土壤健康（质量）和大气、水体质量一样同等重要。

3.1 土壤健康指标的建立和评价方法

土壤各组成成分复杂，各组分之间在不同时空维度上也存在多种互动，这些均为衡量和评价土壤生态系统服务带来了严峻的挑战^[18]。长期以来，人们一直致力于筛选土壤质量（健康）评价指标，并完善评价方法。土壤健康是一个综合量度，评价指标包括土壤静态（自然属性）和动态指标。土壤静态指标主要受成土过程的影响；动态指标则对管理措施较为敏感，通常作为筛选的对象。土壤健康程度的判定标准，在于土壤是否充分发挥了其功能，如果发挥了功能就认为是高质量的，反之，则存在着障碍因素或者土壤质量低。现在人们认识到土壤

具有多功能性，不同功能之间存在权衡和协同互动。由于土壤具有多相性和多功能性，因此衡量土壤健康（质量）状况不可能使用单一的指标和方法，也无法一直通用一个标准，所以土壤健康的评价具有目标性、相对性和实效性。通常，人们从众多的土壤定性和定量指标中筛选出最小数据集（Minimum Data Set, MDS），用来评价土壤质量^[15-16]。测定指标涉及物理、化学和生物指标三个方面，目前许多评价体系多采用理化指标，涉及的生物指标不多。常用的物理指标包括土壤水分、容重、土壤质地、团聚体、土层深度、穿透力、导水率、孔隙度、渗透力等。化学指标包括有机质、pH、有效养分、重金属，中量元素含量，含盐量等^[36]。近年来，生物学指标正处于快速发展阶段。土壤生物直接参与土壤过程，深刻影响土壤生态系统服务，因此生物学指标被认为是对管理更为敏感的指标。除常用的微生物碳和氮、可矿化氮等外，土壤生物多样性、功能基因表达、酶学方法、代谢组和转录组以及一些指示生物（如菌根真菌、线虫、蚯蚓等）检测也得到快速发展。土壤生物是否消失，土壤生物的数量、活性、生理或行为的变化均可能反映土壤健康情况，但由于土壤生物种类多、数量大、变化快，且在一定程度上存在功能冗余性，这些均为定量化生物指标带来了困难。在这方面欧盟国家已进行了大量的探索，开展了对生物指标的筛选工作^[37-38]。图 1 列举了土壤质量（健康）指标、工具和评价体系的发展过程，探索新指标和评价工具和方法是未来的发展态势。

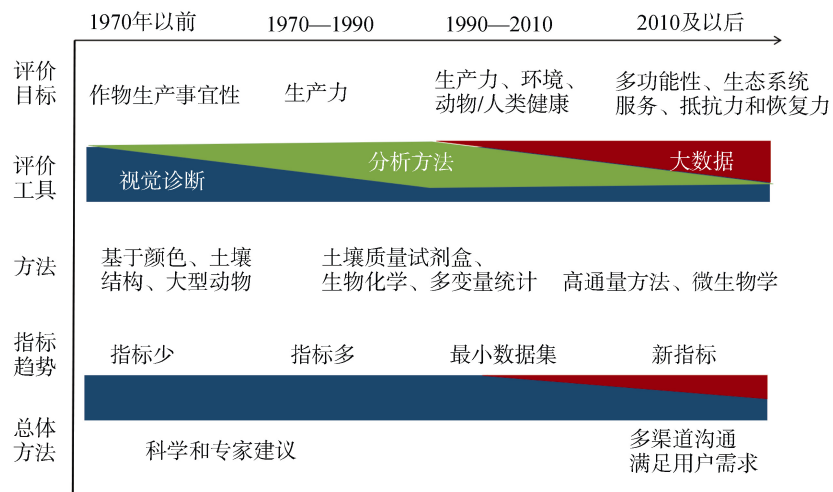


图 1 土壤质量（健康）评价的目标、工具和方法汇总（改编自 Bünemann 等^[36]）

Fig. 1 Main objectives, tools and approaches of soil quality assessment through history (Modified from Bünemann et al.^[36])

考虑到土壤类型和管理方式的多样性,并且各个测定指标的度量也不同,因此需要建立一个综合评价体系,将各种指标进行系统整合,计算出土壤健康(质量)的综合指标。鉴于目前土壤学界已普遍接受土壤健康可以与土壤质量术语相互替代,因此可以借鉴土壤学家建立的土壤质量指数法(Soil Quality Index, SQI)^[16],建立土壤健康指数法(Soil Health Index, SHI),其中发展较为系统的是康奈尔土壤健康评价体系。评估的方法有静态评价方法,如多变量指标克里格法、土壤质量综合指数评分法和土壤相对质量法,也有动态评价方法,如土壤质量动力学方法等。许多国家利用土壤质量监测网和健康测试对土壤质量、食品安全和环境安全进行了评估。例如,土壤管理评估框架(Soil Management Assessment Framework, 简称 SMAF)^[39]、康奈尔土壤健康综合评价(Comprehensive Assessment of Soil Health, CASH),以及基于生态系统服务的评价方法^[40]等。总之,土壤健康需结合土壤管理目标,从生态学视角展开研究,还需深入理解土壤生物驱动的代谢过程,建立大数据平台,借助一些新技术和手段逐步完善和发展土壤健康体系。

3.2 农产品品质与人体健康

土壤健康直接影响人体健康。农产品的数量和质量尤其是后者与人体健康密切相关。健康土壤还能降低或者消纳土壤中有毒和有害物质,避免土壤中致病微生物对人体健康的危害。此外,土壤还是抗生素类物质和一些次生代谢物的来源^[41]。早在1948年研究者 Balfour^[42]就提出“有活力的土壤(The Living Soil)”,明确指出土壤生命力和人类健康的重要性。作者观察到化学品的大量投入导致农产品产量提高的同时,品质和口感明显下降;同时,畜禽容易感病,人体健康也遭受巨大的威胁,因此提出了土壤-畜禽-人体健康是一个整体的观点。1990年 Reganold 等^[43]学者提出土壤是一个复杂的、有活力的但很脆弱的体系,应加以保护和滋养才能保持土壤的可持续生产力和稳定性。近年来,土壤污染和农产品质量安全事件频发,人们已经深刻认识到过量和不合理使用化学品的负面效应,只有培育健康土壤才能保证食品安全和人类的健康。一方面,营养健康与土壤健康密切相关。据 FAO 统计,全世界有近 20 亿人口处于营养缺乏状态,其中包括微量元素缺乏症,又被称为“隐形杀手”,且一些经济不发达国家和地区铁、锌、硒等微量元素已成为

营养不良的首要问题,在妇女和儿童身上表现更为突出^[44-45]。另一方面,农产品中有害有毒物质如农药残留和重金属等,对人体健康造成极大的威胁。以抗生素的使用为例,我国是世界上抗生素最大的生产国和消费国,每年生产的抗生素近一半用于畜牧养殖业。因此,动物粪便成为土壤抗生素和抗生素抗性基因(Antibiotic Resistance Genes, ARGs)的重要来源。有研究表明,长期施用猪粪后,土壤中抗生素抗性基因的丰度显著增加。同时,抗生素抗性基因可以通过水平基因转移被土壤微生物获取,导致微生物耐药性的扩散,携带抗生素抗性基因的微生物会进一步在环境中繁殖,并有可能传播给病原菌,影响人类健康^[46-47]。因此如何生产腐熟物质和施用有机肥(尤其是动物源有机肥)对减低土壤抗生素抗性基因的丰度和提升土壤健康意义重大。

3.3 土壤生物多样性

土壤是全球最大的基因库和物种栖息地。土壤生物及各种生物间的相互作用非常复杂,共同参与养分和水分的生物地球化学循环,影响土壤结构,调控土传病害,且在污染物转化和净化方面具有重要作用,是土壤生态系统服务的重要组成部分。在集约化农业生产中,大量化学品的投入和不合理管理导致土壤生物多样性下降,微生物区系失衡,土壤食物网趋于简单化^[48],病虫害增加,作物严重减产;与此同时,为防止病虫害的发生,种植户不得不大量使用农药等化学品,这种恶性循环导致土壤代谢过程严重受损,生态系统的功能下降,作物品质下降和环境质量恶化,甚至危害人体健康。

一些研究者认为,土壤生物数量及其活动能敏感地反映出土壤健康和人类管理的变化过程,可以用作土壤变化的早期预警生态指示。如澳大利亚学者 Pankhurst 等^[49]提出了表征土壤健康的生物指标体系,主要包括微生物量、土壤微生物、病原菌、大中型土壤动物区系、土壤酶和植物等。欧盟的 EcoFinders (Ecological Function and Biodiversity Indicators in European Soils)项目也努力挖掘能综合反映土壤健康的生物指标,包括土壤生物多样性、群落结构、功能基因表达等^[37-38]。生物指标在土壤健康评价中有独特的优势,但也存在一些问题,包括采集样品的代表性、测定成本以及与土壤功能的相关性等。随着土壤生物多样性和食物网研究的迅速发展,尤其是分子生物学和生物信息学技术手段的不断进步,基于基因组、转录组、代谢组和蛋白

组学技术的发展极大地推动了土壤生物多样性和功能的研究。

根际微生物在植物生长和健康中有重要的作用^[50]。根际有益微生物作为根系的屏障，可以提高植物抗病性和土壤抑病性^[51]。同时，土壤生物多样性和地上部生物多样性紧密相关^[52]，土壤生物多样性显著影响生态系统的功能^[53]。在生态学领域广泛应用的植物-土壤反馈 (Plant-soil feedback, PSF) 理论^[54-55]，是将植物与根际 (尤其是根际微生物) 作为一个整体放在一个或多个植物生长期的时间尺度进行系统评价。连作障碍就是典型的负反馈效应，而间套作则表现出正反馈。农业生产的目标是在农事管理和生产周期中形成正反馈，因此如何通过提高生物多样性，进而提升生态系统多功能性，形成正向反馈是农业绿色发展的一个重要内容。

3.4 土壤生态服务功能

长期以来人们低估了土壤生态系统服务^[56]，直到 2000 年后才开始注意到土壤生态系统服务，到 2009 年后该领域的研究发展迅速。近年来，人们对土壤生态系统服务的认识，从单纯对土壤生产功能的关注，逐步发展到注重土壤生态系统服务的多样化，并提出了在景观尺度上进行功能土地管理的理念。即通过综合评估土壤功能，对土壤生态系统服务多样性进行综合协同和权衡，以实现土壤的可持续管理和利用^[24,57-58]。一些不可持续管理措施，如传统耕作、不合理施肥、盲目使用除草剂和杀虫剂等，可导致土壤生态系统服务贬值和退化。相反，可持续的土壤管理措施，如保护性耕作、有机农业、

覆盖作物和作物多样化种植等则对土壤生态系统服务具有正效应^[59]。

为了更好地评价和管理土壤生态系统服务功能，科学家试图建立生态系统服务的框架，将整个生态系统服务过程联系在一起，并用来支持政策以及决策的建立。其中欧盟在 1998 年提出的 DPSIR (Driver-Pressure-State-Impact-Response) 框架应用较为广泛 (图 2)^[60]。Turner 和 Daily^[61]提供的框架包括问题识别、评估、政策制定、能力建设和重新评估。欧盟 FP7 资助的开放项目试图通过强调土壤功能特征，建立生态系统服务层级框架，将生态系统服务和自然资本的概念应用于土地、水和城市的管理与决策^[62]。在欧盟 FP7 计划的基础上，RECARE (Preventing and Remediating Degradation of Soils in Europe through Land Care) 提出了一个适用的框架，以评估土壤威胁和预防及修复措施对生态系统服务的影响^[63-64]。Schulte 等^[58]提出了功能土地管理 (Functional Land Management, 简称 FLM) 的概念，主要是依据欧盟对环境的政策需求，来权衡和协同土壤的主要功能。

4 面向农业绿色发展的健康土壤的培育思路

基于我国人口多、单位人口耕地面积少的特点，耕地保护政策力度一直很大。我国的耕地保护始于 20 世纪 80 年代，和耕地保护相关的政策相继出台，对保障粮食安全起了重要的作用。有分析表明，耕

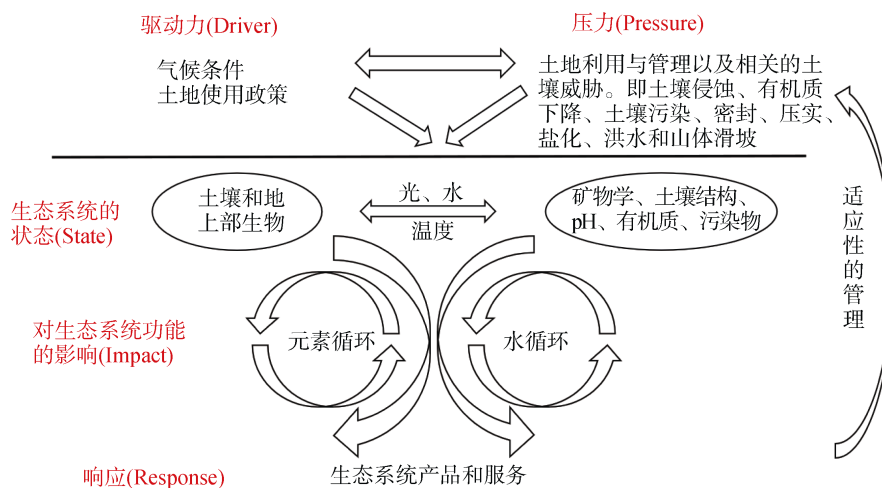


图 2 土壤 DPSIR 框架图 (改自 Brussaard 等^[60])

Fig. 2 The Driver-Pressure-State-Impact-Response framework applied to soil. Modified from Brussaard et al. ^[60]

地保护政策对提高粮食产量的贡献率达 43.1%^[65]。随着乡村振兴、生态文明建设与可持续发展战略的推进,耕地保护逐渐转向耕地转型、耕地多功能保护、生态休耕与安全等,且更加关注耕地的自然本体保护^[65]。针对土壤质量评价,我国在 80 年代初开始选择了很多的指标,但未形成合适的体系和标准。90 年代初,我国土壤质量评价研究中所选取的指标范围很广,涵盖了土壤质量的各个方面,其中土壤物理性质、环境指标和肥力因子较全面,而生物指标相对很少。随着耕地保护制度的内涵变革从“数量”转变为“数量+质量”,再跃迁到“数量+质量+生态”三位一体的均衡管理^[66],如何建立面向农业绿色发展的土壤健康综合评价系统成为挑战。近年来,各国均在积极推动农业可持续发展,一些科学家提出了基于“地下革命”的观点^[67],其核心是减少化学品的过度使用,立足于自然生态过程,通过提高生物多样性和强化生物互作,优化系统内部调节过程,并指出轮作、多样化种植和生物防治等的重要性。

我国土壤类型和作物种类繁多,不同地区地形地貌气候因子复杂,再加上土壤管理措施和管理目标的差异性,很难统一界定健康土壤的标准。健康土壤应因作物、土壤、气候和管理目标等而定。本文仅对田块尺度进行讨论,提出健康土壤培育的三个阶段(图 3):第一个阶段主要是消除土壤的障碍因子,即找到影响作物产量和品质的限制因子,同时厘清生态环境的障碍因子,有针对性进行消除;同时,保证良好的土壤结构,构建理想的耕层。第二个阶段主要是强化土壤生物学过程,提高土壤有机碳;利用植物-土壤-生物(尤其是微生物)互作,提升土壤免疫力和抵抗力,提高作物抵御病虫害的能力。第三个阶段是提升土壤生态系统服务,通过农田景观配置和生态系统重构,提高土壤生物和地上部的生物多样性,利用地上-地下生物互作提升土壤生态涵养功能,保障生态安全;引入土壤生态服务量化模型,建立土壤生态服务功能的评价体系,提出健康土壤管理的优化解决方案。

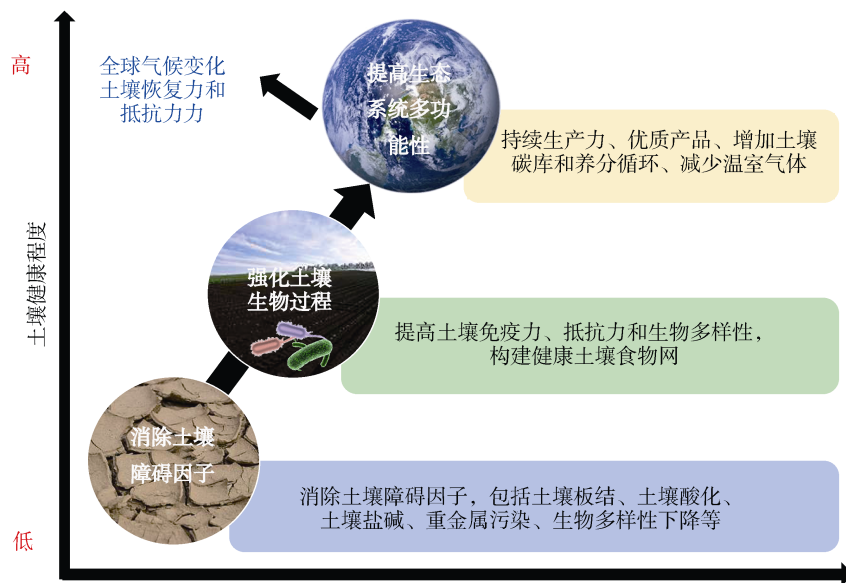


图 3 健康土壤培育的思路

Fig. 3 Conceptual model of cultivating healthy soils

5 土壤健康的实施路径与行动

在农业绿色发展下,通过优化土壤内部调节过程,最小化外部的投入,实现土壤生态系统多功能性的协同是当前健康土壤培育的目标。具体的实现途径主要包括以下方面:

5.1 消除土壤障碍因子,构建理想土壤耕层

土壤的自然属性和不合理管理均可导致土壤不健康或亚健康,因此消除土壤的障碍因子是提升土壤健康的一个重要内容。例如,在南方酸性红壤上,低 pH 和铝毒显著影响土壤中钾、钙、镁等养分的有效性。通过施用石灰和有机物料可以提高土壤 pH、有机质含量和养分有效性。在西南地区水田改

旱作后土壤质地黏重，团粒结构差，犁底层坚硬，严重影响作物根系的生长和作物健康。在此种植模式中，土壤物理障碍是主要的限制因子，改善土壤结构是提升作物生产力的核心。

针对土壤物理障碍，主要的一些改良措施包括深耕、有机肥施用、秸秆还田以及施用土壤调理剂等^[68]。此外，合理的水肥管理、植物抗性品种和基因型的选择也非常重要。有效合理的深耕可以打破土壤犁底层，增加土壤的通透性，提高土壤的蓄水力和保水力，促进作物增产^[69-70]。施用有机肥可以改良土壤物理结构，提高土壤的有机质含量^[71-72]。生物有机肥的施用还可以通过抑制土壤病原菌提升土壤质量^[73]。秸秆还田在东北和华北等主要种植区得到了大面积的推广。秸秆在腐解的过程中提高了土壤团聚体数量，增加土壤孔隙度，降低土壤紧实度等。近年来，土壤调理相关产品也得到广泛的使用。例如在酸性土壤上施用石灰，不仅能调节土壤的酸度，还具有改良土壤结构的效果，其原理是石灰中富含的大量 Ca^{2+} 可促进土壤胶体的凝聚，加速土壤团粒结构的形成^[74]。土壤中添加生物炭后显著降低土壤容重，增加土壤总孔隙度和微生物活性，从而改善土壤结构^[75-76]。我国的土壤调理产品多通过添加天然矿物为主，生物制剂以及含有生物活性物质的相关产品较少。最近的研究发现，深根作物包括一些覆盖植物的根系在提高土壤有机质和改良土壤结构上具有重要的作用，因此深入理解植物根系形态和生理的可塑性，充分发挥根系的生物学潜力，成为缓解土壤物理障碍的一种极具潜力的改良策略^[12,77-78]。

5.2 增碳提质，培育高质量农田

我国土壤有机质含量普遍不高，同时长期高度集约化耕作和过度放牧导致土壤碳储量持续减少，采用合理的管理措施可以保护和重建土壤碳，是实施土壤健康计划的基础^[79-80]。基于全球数据的汇总分析发现，在当前的生产力水平下，土壤有机质提高 1%（即从 1% 提高到 2%）后，小麦和玉米平均产量可增加 10% 和 5%，并且可减少 70% 氮肥用量^[81]。我国农田土壤每固定 $1.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 有机碳，粮食作物的产量平均提升约 $0.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[82]。近 30 年来，我国农田表层 SOC 库总体增加，发挥了碳汇功能^[83-84]。然而，我国仍然有 0.87 亿 hm^2 中低产田，这些中低产田土壤障碍因子多，有机质含量低，且容易发生土

壤退化。合理的管理措施可显著增加土壤 SOC 含量。例如，与无机肥投入相比，长期施用有机肥可显著提高土壤固碳速率，同时 SOC 含量和质量均得到提升^[85-87]。保护性耕作管理措施能有效提高土壤 SOC 含量，传统耕作+秸秆还田、免耕以及免耕+秸秆还田的年固碳速率分别为 $0.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[88-89]。此外，多样化种植以及轮作改变了作物残体的数量和质量，显著影响土壤微生物群落结构和活性，提高了土壤有机质的含量^[90-91]。2015 年联合国巴黎气候大会上启动了“千分之四倡议”，即全球每年如能在土壤中增加千分之四的有机物质，将可以抵消全球的温室气体排放量。这项计划旨在通过因地制宜的农业实践，增加土壤有机质含量和碳固持，从而发挥农业土壤在粮食安全和气候变化方面的关键作用。专家组提出了土壤碳管理的 8 项措施，包括防止土壤碳流失、促进土壤碳吸收、科学监控、评估及验证干预、利用高科技监测土壤碳储量变化、开发计算机模型和示范性网络测试、增强宣传教育等^[92]。尽管全球农业土壤增加“千分之四”的目标能否真正实现仍存在争议^[93]，但该行动积极推动了政府和公众对农田固碳作用的关注。

5.3 强化生物过程，提高生态系统服务多样性

土壤健康需要实现土壤生产功能与其他生态系统服务的同步提升。Reganold 和 Wachter^[94]系统比较了有机农业和传统农业生态系统服务的差异，发现有机农业更能实现生态系统多功能的协同。在此基础上，我们提出农业绿色发展同样需要提升土壤生态系统的多功能性，实现生态系统服务的协同和权衡（图 4）。提升土壤生态系统服务的一个重要途径是提高生物多样性，包括土壤生物多样性、以及地上和地下生物的协同与调控。土壤生物多样性是维持生态系统结构和功能的重要内容，在生态系统乃至整个生物圈的能量流动和物质循环中发挥着关键作用。国际生物多样性合作计划始于 1991 年的 DIVERSITAS 项目；2002 年，联合国粮农组织设立了土壤生物多样性研究议程（Soil Biodiversity Initiative），之后全球陆续开展了土壤生物多样性研究，极大地推动了人们对土壤生物多样性及其影响的关键生态过程的理解。近年来，关于作物根际微生物组的研究取得较大进展，作为植物的第二基因组，根际微生物直接影响植物的生长和健康。我国科研工作者在土壤免疫、菌群互作、合

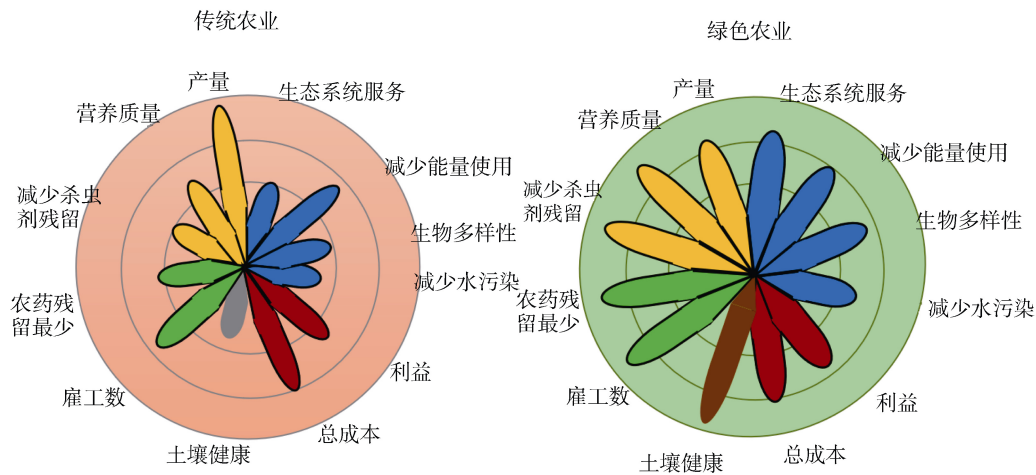


图4 绿色农业与传统农业比较示意图(基于 Reganold 和 Wachter^[94])

Fig. 4 Conceptual comparison of green agriculture relative to conventional agriculture. Based on Reganold and Wachter^[94]

成菌群、植物-微生物互作和生物调控等方面取得较大的进展^[95-97]。例如,基于合成菌群中菌株成对的竞争或便利互作,较好地预测了复杂群落的互作关系以及对病原菌入侵的抵抗能力,为通过调控根际菌群提高土壤免疫能力提出了重要的途径^[98]。此外,利用土壤多营养级生物互作也可以有效提高土壤免疫,控制土传病害的发生。研究发现,土壤噬菌体组合可以猎杀和致弱土传病原菌,使之丧失竞争能力和致病能力,进而恢复和提升了根际土壤微生物抵御病原菌入侵的能力^[99]。作物-根际有益微生物协同进化的研究为创制抗逆性生物肥料奠定了基础。随着人们对土壤微生物组和食物网的认识不断深入,土壤生物在生态系统服务中的作用日益凸显。合理培育健康土壤生物区系,优化土壤内部调控过程,深度挖掘土壤生物尤其是土壤微生物资源,发挥功能微生物和土壤生物的作用,实现生物定向调控,正成为全球的研究热点。一些管理措施,如增施有机肥、多样化种植、种植覆盖作物或功能植物、开展有机农业等均可提高土壤生物多样性。

6 未来研究方向与展望

土壤长期以来被视为“黑箱”,土壤生态系统功能则被认为是大自然赋予的免费资本。近年来,随着科学技术的进步,人们对土壤物理、化学和生物学尤其是对土壤生物多样性和功能的理解和认识不断深入,极大地推动了土壤生态系统服务的研究。

当前全球正掀起土壤健康理论和实践的热潮,各国政府也在采用各种激励机制积极推动可持续土壤管理行动。未来需以绿色发展理念为指导,提高全社会对土壤健康重要性的认识。建议重点从以下几个方面展开工作:

1) 提高土壤自身免疫和生物学过程,强化地上和地下生物协同互作,实现土壤结构、代谢和功能的耦合是健康土壤培育的核心科学问题。重视土壤对胁迫的记忆,充分发挥有益微生物的作用,保证植物健康。此外,土壤抵抗力和恢复力,以及土壤对全球变化响应机制和过程值得深入研究。

2) 大规模微生物分离培养、人工重组微生物群落和功能食物网的发展,为减少化学品投入,挖掘土壤生物资源提供了广阔的前景。随着新技术的发展和交叉学科的不断渗入,人们从多视角多途径开展了对土壤多样性和功能的深入研究。通过提高土壤生物多样性强化生物互作以提升土壤生态系统服务,正成为农业绿色发展研究的一个重要内容。

3) 可持续土壤的管理还要坚持发展生态绿色的理念,需要对投入品-生产过程-产品加工-废物循环等全产业链进行系统综合考虑,对水-土-气进行一体化综合生态管理,实现全链条的绿色发展。同时,需要多学科交叉创新,推行新农科教育体制,联合攻关,创新科学技术,发展绿色产品和新技术。

4) 健康土壤需建立相对完善的监测网络,建立检测土壤资源大数据管理平台,掌握时空变化特征,探讨土壤健康演变过程以及人为活动对土壤演变的

影响及反馈机理，形成能兼顾预警、检测并实时反馈的土壤健康系统评价体系。同时，利用信息农业和智慧农业的优势，实现全链条的精准管理。

5) 土壤健康是一个系统工程，需要从国家层面开展研究，形成“政产学研用”共同参与多元化互助推动的模式。企业、种植户和农民是土壤的主要经营者，还需广泛传播健康土壤的知识，培育保护土壤的意识。同时还需要继续加强政策保障和激励措施，激发健康土壤先行者的积极性和兴趣，并提高公众的意识，在实施科技创新的同时，使全社会大众成为土壤健康的践行者和推动者。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] Keesstra S D, Bouma J, Wallinga J, et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals[J]. *Soil*, 2016, 2 (2): 111—128.
- [3] Zhao Q G, Sun B. Soil quality and sustainable environment I. The definition and evaluation method of soil quality[J]. *Soils*, 1997, 29 (3): 113—120. [赵其国, 孙波. 土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. *土壤*, 1997, 29 (3): 113—120.]
- [4] Luo Y M, Teng Y. Status of soil pollution degradation and countermeasures in China[J]. *Soils*, 2006, 38 (5): 505—508. [骆永明, 滕应. 我国土壤污染退化状况及防治对策[J]. *土壤*, 2006, 38 (5): 505—508.]
- [5] Song G H, Li L Q, Pan G X, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 74 (1): 47—62.
- [6] Qin Z C, Huang Y, Zhuang Q L. Soil organic carbon sequestration potential of cropland in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2013, 27 (3): 711—722.
- [7] Zhao Y C, Xu S X, Wang M Y, et al. Carbon sequestration potential in Chinese cropland soils: Review, challenge, and research suggestions[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33 (2): 191—197. [赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 等. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑战与研究建议[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33 (2): 191—197.]
- [8] Guo Y Y, Gong P, Amundson R, et al. Analysis of factors controlling soil carbon in the conterminous United States[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70 (2): 601—612.
- [9] Smith P, Powlson D S, Smith J U, et al. Meeting Europe's climate change commitments: Quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture[J]. *Global Change Biology*, 2000, 6 (5): 525—539.
- [10] Wang X B, Zhou B Y, Sun X F, et al. Soil tillage management affects maize grain yield by regulating spatial distribution coordination of roots, soil moisture and nitrogen status[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10 (6): e0129231. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129231>.
- [11] Zhang T L, Li Z P, Wang X X. Soil degradation and its eco-environmental impact under highly-intensified agriculture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (5): 843—850. [张桃林, 李忠佩, 王兴祥. 高度集约农业利用导致的土壤退化及其生态环境效应[J]. *土壤学报*, 2006, 43 (5): 843—850.]
- [12] Jin K M, White P J, Whalley W R, et al. Shaping an optimal soil by root-soil interaction[J]. *Trends in Plant Science*, 2017, 22 (10): 823—829.
- [13] Brevik E C, Sauer T J. The past, present, and future of soils and human health studies[J]. *Soil*, 2015, 1 (1): 35—46.
- [14] Larson W E, Pierce F J. Conservation and enhancement of soil quality[C]//Dumanski J. Evaluation for sustainable land management in the developing world - IBSRAM Proceedings. Bangkok, Thailand, 1991: 175—203.
- [15] Doran J W, Parkin T B. Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set[M]//Doran J W, Jones A J. Methods for assessing soil quality. SSSA special publications. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 1996: 25—37.
- [16] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality[M]//Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America and American, 1994: 3—21.
- [17] 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.
- [18] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61 (1): 4—10.
- [19] Brady N C, Weil R R. The nature and properties of soils[M]. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2007.
- [20] Cao Z H, Zhou J M, et al. Soil quality of China[M]. Beijing: Science Press, 2008. [曹志洪, 周健民, 等. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [21] Zhou Q X. Healthy soil science[M]. Beijing: Science Press, 2005. [周启星. 健康土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.]
- [22] Lal R. Soil health and carbon management[J]. *Food and Energy Security*, 2016, 5 (4): 212—222.
- [23] Daily G C, Matson P A, Vitousek P M. Ecosystem services supplied by soils[M]//Daily G C. Nature's

- services: Societal dependence on natural ecosystems. Washington DC: Island Press, 1997.
- [24] Adhikari K, Hartemink A E. Linking soils to ecosystem services—A global review[J]. *Geoderma*, 2016, 262: 101—111.
- [25] 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.
- [26] Dominati E, Patterson M, MacKay A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69 (9): 1858—1868.
- [27] Millennium Ecosystem Assessment. Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Their Services[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [28] EASAC (European Academies Science Advisory Council) report, www.easac.eu, 2018
- [29] Zhu Y G, Li G, Zhang G L, et al. Soil security: From Earth's critical zone to ecosystem services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70 (12): 1859—1869. [朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. *地理学报*, 2015, 70 (12): 1859—1869.]
- [30] Zhang G L, Wu H Y. From “problems” to “solutions”: Soil functions for realization of sustainable development goals[J]. *Bulletin of 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.]
- [31] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008—1010.
- [32] Davies W J, Shen J B. Reducing the environmental footprint of food and farming with Agriculture Green Development[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019311>.
- [33] Yu X R. Promoting Agriculture Green Development to realize the great rejuvenation of the Chinese nation[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019318>.
- [34] Zhang F S, Dong W C, Li J Q. Creating a new university-education system to promote Agriculture Green Development[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019319>.
- [35] Shen J B, Zhu Q C, Jiao X Q, et al. Agriculture green development: A model for China and the world[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019300>.
- [36] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality—A critical review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 120: 105—125.
- [37] Pulleman M, Creamer R, Hamer U, et al. Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—An overview of European approaches[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4 (5): 529—538.
- [38] Stone D, Ritz K, Griffiths B G, et al. Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 97: 12—22.
- [39] Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (6): 1945—1962.
- [40] 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.
- [41] Brevik E C, Pereg L, Steffan J J, et al. Soil ecosystem services and human health[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, 5: 87—92.
- [42] Balfour E B. *The living soil*[M]. London: Faber and Faber Limited, 1948.
- [43] Reganold J P, Papendick R I, Parr J F. Sustainable agriculture[J]. *Scientific American*, 1990, 262 (6): 112—120.
- [44] Liu Z H, Wang H Y, Wang X E, et al. Genotypic and spike positional difference in grain phytase activity, phytate, inorganic phosphorus, iron, and zinc contents in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Cereal Science*, 2006, 44 (2): 212—219.
- [45] Zhang Y Q, Shi R L, Rezaul K M, et al. Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58 (23): 12268—12274.
- [46] Zhu Y G, Johnson T A, Su J Q, et al. Diverse and abundant antibiotic resistance genes in Chinese swine farms[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110 (9): 3435—3440.
- [47] Xie W Y, Yuan S T, Xu M G, et al. Long-term effects of manure and chemical fertilizers on soil antibiotic resistome[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 122: 111—119.
- [48] Wall D H, Nielsen U N, Six J. Soil biodiversity and human health[J]. *Nature*, 2015, 528 (7580): 69—76.
- [49] Pankhurst C E, Doube B M, Gupta V V S R. *Biological indicators of soil health*[M]. New York: CAB International, 1997.
- [50] Berendsen R L, Pieterse C M J, Bakker P A H M. The rhizosphere microbiome and plant health[J]. *Trends in Plant Science*, 2012, 17 (8): 478—486.
- [51] Raaijmakers J M, Mazzola M. Soil immune responses[J]. *Science*, 2016, 352 (6292): 1392—1393.

- [52] Dedejn G, Vanderputten W. Linking aboveground and belowground diversity[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20 (11): 625—633.
- [53] Bardgett R D, van der Putten W H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning[J]. *Nature*, 2014, 515 (7528): 505—511.
- [54] Bever J D, Westover K M, Antonovics J. Incorporating the soil community into plant population dynamics: The utility of the feedback approach[J]. *Journal of Ecology*, 1997, 85 (5): 561.
- [55] Ehrenfeld J G, Ravit B, Elgersma K. Feedback in the plant-soil system[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2005, 30 (1): 75—115.
- [56] Robinson D A, Fraser I, Dominati E J, et al. On the value of soil resources in the context of natural capital and ecosystem service delivery[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78 (3): 685—700.
- [57] Pereira P, Bogunovic I, Muñoz-Rojas M, et al. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, 5: 7—13.
- [58] 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.
- [59] Kragt M E, Robertson M J. Quantifying ecosystem services trade-offs from agricultural practices[J]. *Ecological Economics*, 2014, 102: 147—157.
- [60] Brussaard L, Pulleman M M, Ouédraogo É, et al. Soil fauna and soil function in the fabric of the food web[J]. *Pedobiologia*, 2007, 50 (6): 447—462.
- [61] Turner R K, Daily G C. The ecosystem services framework and natural capital conservation[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2008, 39 (1): 25—35.
- [62] Potschin-Young M, Czúcz B, Liqueste C, et al. Intermediate ecosystem services: An empty concept?[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 27: 124—126.
- [63] Greiner L, Keller A, Grêt-Regamey A, et al. Soil function assessment: Review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services[J]. *Land Use Policy*, 2017, 69: 224—237.
- [64] Schwilch G, Bernet L, Fleskens L, et al. Operationalizing ecosystem services for the mitigation of soil threats: A proposed framework[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 586—597.
- [65] Lv X, Huang X J, Chen Z G, et al. Evaluation on the grain production performance of the cultivated land protection policy in China[J]. *Resources Science*, 2010, 32 (12): 2343—2348. [吕晓, 黄贤金, 陈志刚, 等. 中国耕地保护政策的粮食生产绩效分析[J]. *资源科学*, 2010, 32 (12): 2343—2348.]
- [66] 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.]
- [67] Bender S F, Wagg C, van der Heijden M G A. An underground revolution: Biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2016, 31 (6): 440—452.
- [68] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124 (1/2): 3—22.
- [69] Alcántara V, Don A, Well R, et al. Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22 (8): 2939—2956.
- [70] Schneider F, Don A, Hennings I, et al. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know?[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 174: 193—204.
- [71] Shen Q R, Liang X L, Li R, et al. The invention relates to a full element compound microbial fertilizer and its preparation method and application: CN103992159A[P]. 2014-08-20. [沈其荣, 梁晓琳, 李荣, 等. 一种全元复合微生物肥料及其制备方法和应用: CN103992159A[P]. 2014-08-20.]
- [72] Liu T, Chen X Y, Hu F, et al. Carbon-rich organic fertilizers to increase soil biodiversity: Evidence from a meta-analysis of nematode communities[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 232: 199—207.
- [73] Zhang P, Wang X H, Li R, et al. Effect of bio-organic fertilizer on pathogenic and functional bacteria composition in rhizospheric soil of field vegetables[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (2): 381—387. [张鹏, 王小慧, 李蕊, 等. 生物有机肥对田间蔬菜根际土壤中病原菌和功能菌组成的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50 (2): 381—387.]
- [74] Manjoka J, Yerokun O A, Lungu O I, et al. Changes in soil organic matter and soil aggregation of a Zambian oxisol after applying lime[J]. *International Journal of Soil Science*, 2007, 2 (3): 190—196.
- [75] Wang D Y, Fonte S J, Parikh S J, et al. Biochar additions can enhance soil structure and the physical stabilization of C in aggregates[J]. *Geoderma*, 2017, 303: 110—117.
- [76] Demisie W, Liu Z Y, Zhang M K. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil[J]. *Catena*, 2014, 121: 214—221.
- [77] Gao W, Hodgkinson L, Jin K, et al. Deep roots and soil structure[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2016, 39 (8): 1662—1668.
- [78] Jin K M, Shen J B, Ashton R W, et al. Wheat root growth responses to horizontal stratification of fertiliser in a water-limited environment[J]. *Plant and Soil*, 2015, 386 (1/2): 77—88.
- [79] Tilman D. The greening of the green revolution[J]. *Nature*, 1998, 396 (6708): 211—212.

- [80] Bradford M A, Carey C J, Atwood L, et al. Soil carbon science for policy and practice[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2 (12): 1070—1072.
- [81] Oldfield E E, Bradford M A, Wood S A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields[J]. *Soil*, 2019, 5 (1): 15—32.
- [82] Xu M G, Zhang X B, Sun N, et al. Advance in research of synergistic effects of soil carbon sequestration on crop yields improvement in croplands[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (6): 1441—1449. [徐明岗, 张旭博, 孙楠, 等. 农田土壤固碳与增产协同效应研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (6): 1441—1449.]
- [83] Han D R, Wiesmeier M, Conant R T, et al. Large soil organic carbon increase due to improved agronomic management in the North China Plain from 1980s to 2010s[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24 (3): 987—1000.
- [84] Zhao Y C, Wang M Y, Hu S J, et al. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115 (16): 4045—4050.
- [85] Zhang W J, Wang X J, Xu M G, et al. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of Northern China[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7 (2): 409—425.
- [86] Xia L L, Lam S K, Yan X Y, et al. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51 (13): 7450—7457.
- [87] Tian J, Lou Y L, Gao Y, et al. Response of soil organic matter fractions and composition of microbial community to long-term organic and mineral fertilization[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53 (5): 523—532.
- [88] Tian K, Zhao Y C, Xu X H, et al. Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 204: 40—50.
- [89] Tian K, Zhao Y C, Xing Z, et al. A meta-analysis of long-term experiment data for characterizing the topsoil organic carbon changes under different conservation tillage in cropland of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (3): 433—440. [田康, 赵永存, 邢喆, 等. 中国保护性耕作农田土壤有机碳变化速率研究——基于长期试验点的 Meta 分析[J]. *土壤学报*, 2013, 50 (3): 433—440.]
- [90] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66 (6): 1930—1946.
- [91] Cong W F, Hoffland E, Li L, et al. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21 (4): 1715—1726.
- [92] Rumpel C, Amiraslani F, Koutika L S, et al. Put more carbon in soils to meet Paris climate pledges[J]. *Nature*, 2018, 564 (7734): 32—34.
- [93] van Groenigen J W, van Kessel C, Hungate B A, et al. Sequestering soil organic carbon: A nitrogen dilemma[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51 (9): 4738—4739.
- [94] Reganold J P, Wachter J M. Organic agriculture in the twenty-first century[J]. *Nature Plants*, 2016. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.221>.
- [95] Bai Y, Müller D B, Srinivas G, et al. Functional overlap of the *Arabidopsis* leaf and root microbiota[J]. *Nature*, 2015, 528 (7582): 364—369.
- [96] Zhu Y G, Shen R F, He J Z, et al. China soil microbiome initiative: Progress and perspective[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32 (6): 554—565. [朱永官, 沈仁芳, 贺纪正, 等. 中国土壤微生物组: 进展与展望[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32 (6): 554—565.]
- [97] Zhang J Y, Liu Y X, Zhang N, et al. *NRT1.1B* is associated with root microbiota composition and nitrogen use in field-grown rice[J]. *Nature Biotechnology*, 2019, 37 (6): 676—684.
- [98] Li M, Wei Z, Wang J N, et al. Facilitation promotes invasions in plant-associated microbial communities[J]. *Ecology Letters*, 2019, 22 (1): 149—158.
- [99] Wang X F, Wei Z, Yang K M, et al. Phage combination therapies for bacterial wilt disease in tomato[J]. *Nature Biotechnology*, 2019, 37 (12): 1513—1520.

(责任编辑: 卢萍)