

新时代耕地土壤产能提升科技发展现状与战略思考^①

张佳宝

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135)

摘要: 面向国家粮食安全重大战略需求, 针对我国耕地土壤障碍因子多、基础地力不高、功能退化明显、耕地产能低下等重大现实问题, 本文全面剖析耕地领域国内外科技发展新进展和新趋势, 结合未来本领域的学科发展需求与关键科技问题, 提出“十五五”耕地土壤产能提升科技领域战略布局: 重点部署耕地土壤障碍消减、耕地土壤内稳定性地力提升、耕地土壤养分调控与精准智能化施肥、耕地土壤微生物组装与功能调控、耕地健康培育与产能提升、污染耕地土壤绿色可持续修复、固碳减排过程与调控、高标准农田地力快速培肥与综合感知、耕地质量智慧监测与预测预警、耕地保护利用生态屏障建设等主攻方向, 全面提升我国耕地土壤科技水平, 抢占耕地土壤科技制高点, 实现我国耕地质量与产能协同稳步提升, 为全面实施“藏粮于地 藏粮于技”国家战略提供重要科技支撑。

关键词: 新时代; 耕地土壤; 产能提升; 科技发展; 战略思考

中图分类号: X53 文献标志码: A

Current Status and Strategic Thinking of Scientific and Technological Development for Farmland Soil Production Capacity Improvement in the New Era

ZHANG Jiabao

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

Abstract: Facing the major strategic demands of national food security and in response to the significant practical problems in China, such as numerous soil obstacles, low basic soil fertility, obvious functional degradation, and low agricultural productivity, this article comprehensively analyzes the new progress and trends in scientific and technological development both at home and abroad in the field of cultivated land. Based on future disciplinary development needs and key science and technology challenges in this field, it proposes a strategic framework for the “15th Five-Year Plan” aimed at enhancing soil productivity in cultivated land. The future key directions will focus on mitigating soil constraints, enhancing intrinsic stable fertility, optimizing nutrient regulation and energy-efficient fertilization practices, assembling and functionally regulating soil microbial communities, cultivating and improving the health and productivity of cultivated land, green and sustainable remediation of contaminated soils, managing carbon sequestration and emission reduction processes, rapidly enhancing the fertility of high-standard farmland, establishing comprehensive perception and intelligent monitoring systems for cultivated land quality with predictive and early warning capabilities while constructing ecological barriers for the protection and sustainable utilization of cultivated land. This aims to comprehensively enhance the scientific level of cultivated land soil in China; seize the commanding heights of soil science & technology related to cultivated land, achieve coordinated and steady improvement of cultivated land quality as well as productivity in China, provide important scientific support for implementing comprehensively national strategy.

Key words: New era; Farmland soil; Production capacity improvement; Technological development; Strategic thinking

耕地是粮食生产的命根子。党中央和国务院高度重视耕地保护与利用工作。党的二十大报告强调“全方位夯实粮食安全根基, 牢牢守住 18 亿亩耕地红线,

确保中国人的饭碗牢牢端在自己手中”。2024 年的中央一号文件明确指出: 加强退化耕地治理, 实施耕地质量提升行动。《国家中长期科学和技术发展规划

①基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2023-JB-06)资助。

作者简介: 张佳宝(1957—), 男, 江苏高邮人, 中国工程院院士, 主要从事耕地土壤地力提升理论与技术、农田生态系统物质循环过程与模拟、土壤信息快速获取与数字农业等研究。E-mail: jbzheng@issas.ac.cn

(2021—2035 年)》明确提出“要强化耕地数量保护和质量提升，坚持最严格的耕地保护制度，着力加强耕地数量、质量、生态‘三位一体’保护”。耕地产能提升的核心在于耕地质量，基础是耕地数量，保障是耕地生态。我国耕地资源数量和质量均属严重制约型，全国耕地面积 20.23 亿亩，但是，耕地质量低下的局面尚未根本改观，中低产田占比居高不下，耕地复合障碍因子多，耕地质量退化风险持续存在，制约了我国区域耕地产能提升。我国耕地复种指数高、水肥资源利用率低，耕地生态环境容量透支严重，耕地环境安全风险和生态服务功能退化日益加剧，耕地污染问题尚未根本性解决，土壤生物多样性降低并处于失衡边缘，耕地系统的稳定性及适应全球气候变化的韧性减弱^[1-2]。当前，我国正处在全面实施新一轮千亿斤粮食产能提升行动、加快推进高标准农田建设的重要时期，必须加强退化耕地治理，实施耕地质量提升行动。因此，开展耕地土壤产能提升科技创新，是支撑国家“藏粮于地 藏粮于技”战略实施的重要举措，是引领农业绿色发展的重要任务，是提升农业农村现代化水平、建设农业科技强国的重要基础，对保障国家粮食安全和推动乡村振兴具有重要的战略意义。

1 国际耕地土壤产能提升科技发展现状与态势

耕地土壤产能提升既是国际上重点关注的农业重大科技难题，也是土壤改良和肥料行业的产业科技问题，涉及多学科交叉融合创新、多行业目标协同发展，具有科技创新长期性、复杂性和产业发展艰巨性，因此，突破耕地土壤关键核心技术，创新耕地土壤科技体系，成为全球各国关注的焦点。在新一轮世界科技革命浪潮推动下，世界各国和国际组织相继提出了耕地土壤保护行动计划，联合国粮农组织提出了“全球土壤伙伴计划”，2020 年制定了《可持续土壤管理评价方案》；联合国发布了 2030 年可持续发展目标 17 项，其中 12 项与土壤有关；国际土壤学联合会(IUSS) 2021 年提出了实现可持续发展目标的土壤管理目标，包括生产健康食品、支撑陆地生物健康生长和产业创新及社会经济发展；美国农业部提出了“土壤健康-解开土壤奥秘行动计划”；欧盟委员会于 2020 年提出了“土壤健康行动计划”；澳大利亚 2021 年发布了“国家土壤战略”，并推出了“国家土壤战略临时行动计划”。从国际耕地土壤科技发展态势来看，耕地土壤服务功能研究从生产力本质扩展到综合

生态服务功能，已经全面进入生产功能、环境功能、生态功能的多目标系统研究阶段^[3-6]。发达国家在耕地土壤障碍消减与地力提升、土壤养分调控与精准施肥、土壤微生物多样性与生物调控、土壤固碳减排与绿色修复、土壤健康培育与可持续管理、土壤质量智慧诊断与监测评价等方面均取得了突破性进展，建立了较为完整的土壤保护利用基础理论方法，开发了具有市场化、商品化的土壤技术与产品，创建了基于土壤健康培育的集成技术模式与可持续利用管理方案，对不同国家耕地土壤产能提升发挥了重要科技支撑作用。

1)耕地土壤障碍消减方面：近年来，国际上十分关注全球土壤酸化、侵蚀、盐渍化等突出问题，其中土壤酸化研究主要聚焦土壤铝活化、氮肥驱动土壤酸化、酸化时空演变、重金属毒害、酸化与产能的响应关系等^[7-13]。澳大利亚等国家在有机物质驱动土壤碳氮转化过程及其对农田土壤酸化的阻控潜力方面做出了突出成绩^[10]。当前国际上着重关注耕地土壤的致酸途径，研究靶向阻酸控铝技术和分区分类调控技术模式，以及土壤酸化预测预警与控酸决策系统。耕地土壤侵蚀障碍近期研究主要关注侵蚀监测预报方法、作物产能对侵蚀退化的响应、侵蚀阻控机理。美国农业部在缓坡耕地侵蚀阻控方面取得了突出成果，揭示了不同耕地管理方法和作物生产模式对土壤侵蚀的影响，建立了以免耕、少耕等保护性耕作为主的耕地侵蚀阻控技术。新西兰基于不同作物的轮作和植被覆盖形成了以农艺措施为主的耕地侵蚀阻控技术。目前耕地土壤侵蚀阻控技术发展正迈向多措施结合的复合阻控，应用智能化与数字化技术突破当前针对单一营力、单一过程、单一目标的侵蚀阻控技术，形成多目标协同的土壤侵蚀阻控技术体系。近年来，土壤盐碱障碍消减与材料科学、生命科学的多学科交叉融合不断提升，研究主要聚焦水盐多尺度循环、水盐平衡、排盐控盐、质量和产能提升等方面。如以色列开发风光能，利用低成本咸水淡化结合节水灌溉技术消减土壤盐碱障碍；加拿大探索利用氧化铝膜、多孔聚合物膜等纳米材料，仿生蕨类植物维管束，诱导土壤盐分定向聚集或结晶成霜；美国筛选、驯化根际耐盐功能微生物，结合人工合成菌群定殖，通过代谢调节提高作物耐盐能力。目前，土壤盐分管理、水盐过程物理调控、作物适生利用和微生物修复等成为研究前沿及热点方向。

2)耕地土壤内稳性地力提升方面：各国在此领域的科技发展趋势主要体现在土壤有机质含量与质量

双提升、土壤团聚体培育等主流方向^[14]。近年来,有机质研究的重点从土壤有机质含量逐渐过渡到土壤有机质的稳定性,即从“数量”到“质量”的转变,其中关于土壤有机质形成的微生物机制逐渐成为耕地研究的热点问题;德国广泛采用有机肥料(如堆肥和绿肥)来提升土壤的有机质含量,美国则践行“保守农业”,采取包括免耕、覆盖作物和轮作等方法增加土壤有机质,二者均取得了良好的效果。然而,如何持续、高效和精准地突破内稳定性地力持续提升的瓶颈,仍是行业共性的技术难题。如何创制高腐殖质新型有机肥及如何精准施用,如何实现具有区域适应性的秸秆高效培肥,如何集成新型有机肥和耕作以实现耕地障碍消减和有机质精准提升,将成为未来耕地领域科技发展的新趋势。未来耕地土壤团聚体培育技术的发展将从单一技术应用逐渐向多项技术集成转变,研究将更加关注“有机矿物复合体-微团聚体-大团聚体”协同优化的理论技术研究及应用。

3)耕地养分高效利用方面:该领域研究重点一方面面向作物养分持续高效利用方向发展,重点解析作物养分高效的遗传基础与调控网络,包括氮磷钾等大量元素的信号传导、吸收转运、代谢利用等分子遗传调控机制,铁、锌、硒等微量元素吸收富集的遗传调控机制,不同营养元素之间的协同或拮抗机制,以及不同生物或非生物胁迫对养分元素吸收利用的影响机制,揭示作物在复杂环境中的养分利用策略,以优化养分管理措施^[15];另一方面向土壤肥力持续提升方向发展,重点揭示土壤-植物系统养分循环过程与土壤健康维持机制,尤其是全球气候变化下土壤养分循环机制、微生物-植物互作调控机制等,以优化作物生长条件并提高作物产量。同时,该领域研究也向施肥技术智能方向发展,重点构建智能化推荐施肥技术与装备已成为当前的关注焦点,包括基于大数据的智能推荐施肥模型与方法、植株营养诊断与施肥技术信息化和机械化等^[16]。而在产品方面,该领域研究则向肥料产品绿色方向发展,重点创制新型绿色材料与高效肥料产品,包括以生物基可降解包膜材料为基础的包膜技术创新和包膜缓释肥料的创制,有机废弃物肥料化、资源化和商品化,微生物肥料创制,以及智能水肥一体化技术发展。

4)耕地土壤污染修复方面:近10年来,欧美等主要发达国家继续围绕土壤重金属污染成因、污染过程、风险评估、治理修复等基础理论方面开展系统研究,并在重金属的多介质多界面传输过程、迁移转化机制、多尺度模型预测等方面取得了突破性进展,构

建了土壤重金属风险识别与评估技术体系,形成了完整的土壤重金属监测方法、技术与成套设备,发展了污染土壤组合修复技术与装备体系,实现了规模化工程应用^[12,17]。耕地土壤有机污染问题在部分发达国家也被较早关注。当前耕地土壤有机污染的研究主要集中在微生物修复技术的实际应用和微生物降解有机污染物的机制、植物-微生物协同修复、基于微生物组学与代谢组学的生态修复等方向。此外,目前国际上关注较多的新污染物种类包括抗生素及其抗性基因、微塑料、全氟化合物等,研究主要涉及新污染物高通量筛查方法与精准识别、环境行为与效应等多个方向,如美国、欧盟、日本等构建了以“筛查-评估-管理”为链条的新污染物防治体系,实时更新新污染物管控清单,建立了水土环境中新污染物污染标准。

5)耕地土壤固碳减排方面:近年来,土壤固碳和温室气体减排领域的研究呈现持续增长和技术创新趋势。在众多固碳减排技术中,以“生物质炭”和“高效肥料”为核心的技术发展较快^[18-19]。美国康奈尔大学研究团队探讨了生物质炭在土壤和可再生能源中的应用,揭示了其减排潜力与二氧化碳回收的关联;英国谢菲尔德大学的研究团队提出了通过向农田施加硅酸盐岩粉进行土壤固碳的方案,验证了其固碳效果与全球硅酸盐风化碳汇相当,为农田减排增汇提供了理论依据。挪威生命科学大学明确了氧化亚氮呼吸细菌在减少田间氧化亚氮排放中的潜力,为温室气体减排提供了经济有效的新途径。未来5年,耕地土壤固碳减排技术发展将从单一措施向多个措施集成转变,更加重视固碳与减排、“水-肥-碳”优化耦合技术、固碳减排丰产协同技术的研发与应用,更加重视地域空间的优化匹配方案,从单点模式走向地域空间的技术模式体系。

6)高标准农田智慧建设方面:智能化和精准农业技术在高标准农田建设中得到广泛应用,包括物联网、大数据分析、智能传感器等,有助于提高农田管理的精准度和效率,优化资源配置^[20]。国外现代化高标准农田建设使用大数据智能管理与挖掘技术,大力发展战略、智慧农业技术,拥有适应性较高的本土化模型,并形成了相对成熟的农业水土资源高效利用技术模式。如以色列农业水中心-土壤水资源环境研究院在水资源高效利用和作物高效用水机制与水生产力协同提升方面形成了高效的技术与管理模式。而且发达国家在土壤健康、耕地质量提升与长期变化规律、基础设施建设与监测、智能监测监管农田、农业可持续发展等方面的研究和跨学科跨尺度农业过程

模拟方面显现出突出优势。未来,需要加大研制高标
准农田现代化智能化装备和产品、研发农田多要素连
续监测感知和低产土壤地力提升技术,集成不同生态
类型区的高标准农田耕地资源智慧监测、耕地健康智
能诊断、生态良田智能构建及耕地韧性与粮食生产稳
步提升的综合技术体系和模式,制定区域差异化的高
标准农田地力与产能协同提升方案。

7)耕地保护利用生态屏障建设方面:全球范围内
耕地质量以及周边生态系统的协同作用研究受到了
极大关注。耕地保护和利用不仅是耕地系统自身的问题,
更是“山水林田湖草沙”系统协同发展的问题^[21]。
发达国家关于“通过保护和修复生态屏障实现保护耕
地目的”相关研究起步较早,在生态屏障对耕地保护
机制研究中,美国农业部国家土壤侵蚀研究实验室定
量评估了不同植被配置模式防治土壤侵蚀的有效性
以及改善生态环境的效益。乌克兰林业大学提出了通
过建立防护林带改善农业景观。美国爱荷华大学研究
人员通过在耕地和河流之间种植树木缓冲带,减少了
农田的土壤侵蚀,改善了农田生态系统。未来,该研究
领域将与大数据和人工智能技术深度融合,突破当前
耕地单一生态系统保护技术的局限性,形成多系统、
多维度的耕地与生态屏障协同技术,显著增强耕地对
自然灾害的抵御韧性,极大优化耕地墒情状况,
保障粮食稳产和高产。

8)区域耕地土壤健康与产能提升模式方面:土壤
健康培育逐渐成为国际土壤科技研究的热点,探索因
地制宜的耕地健康管理措施和农业可持续发展模式
成为主要发展趋势^[22-23]。国际上关于黑土健康研究主
要关注土壤有机质、团聚体稳定性、土壤微生物等方
面。俄罗斯、乌克兰、加拿大等国家较为系统地研究了
施肥和覆盖作物等措施对退化土壤储水能力、团聚
体水稳定性、土壤有机质、养分变化、酸化的影响。
近年来,发达国家针对水资源不足、耕地沙化、盐碱
化等问题,开始注重干旱地区既定水资源条件下耕地
地力提升、水资源高效利用等研究。如欧盟从 2017
年起资助 8 个 500 万欧元以上多样化种植相关项目,
旨在构建绿色可持续农业生产体系;美国建立了土壤
健康评价指标体系、配套技术模式、管理体系等完整
方案。而南美洲的巴西等国家对酸化耕地治理也较
为重视,虽然采用的主要技术仍然是施用石灰和磷石膏
等传统改良剂,但在改良剂施用方法方面取得了一定
进展。改良剂的精准施用是当前国际研究主流。印度
在健康土壤培育、耕地质量改善及其与产能提升的
关系等方面也开展了较多研究,取得了一定的进展。部

分欧美发达国家也较为重视健康土壤培育与生态功
能的协同提升。欧盟地平线项目树立了“农田-小流域-
生态农业多尺度生态系统构建”“生态系统价值链
转化与服务”“创新植物系统以提高生态系统服务功
能”等多个科技发展目标。此外,近年来,世界各国
纷纷开发以智能化、精准化和定制化为核心的现代信
息技术,在健康土壤培育和农业绿色发展上起到了重
要助推作用。

9)耕地质量智慧监测方面:从国际耕地质量智慧
监测领域科技发展趋势来看,研究主要聚焦在精准农
业与农田管理、土地利用变化与生态系统管理、耕地
退化与修复监测技术以及碳储量和气候变化的应对
等主要方向。集成遥感、地理信息技术、人工智能、
物联网等现代化技术,突破土壤高效监测和地力提升
等核心共性关键技术,构建耕地质量监测评价指标体
系和监测网络体系,实现农田的精准管理;开展退化
耕地的智能监测与快速诊断技术,识别土壤退化的早
期信号,并开发高效的修复技术,如生物修复、生态
修复等,配合智慧监测手段,实现退化耕地的动态监
控和精准修复;利用大数据和遥感技术对土壤有机碳
含量进行监测和管理,实时评估气候变化对耕地质量
的影响,并综合运用土地管理、土壤改良技术、现代
监测技术以及政策工具,有效地提升耕地碳储量水
平。土壤信息快速获取技术和土壤信息系统是支撑耕
地土壤监测的重要基础。随着遥感技术、物联网技术
的发展,土壤数据的实时监测和动态更新成为可能,
这将进一步提高土壤信息获取的速度和准确性^[24]。
欧盟 LUCAS-Copernicus 于 2018 年率先构建了“原
位监测+遥感监测”相结合的土壤调查平台,利用较
少原位监测样点信息,实现了监测信息从点到面的扩
展,使区域土壤调查信息更新频率提高到每 3 年 1 次。
美国正在构建 NASIS 数据系统,该系统由多个相
互关联的土壤应用程序和数据库组成,可帮助收
集、存储、处理和传播土壤信息。埃塞俄比亚制定的
最新数字战略和数字农业的倡议也要求重点推进国
家土壤信息系统(NSIS)的构建。非洲正在开展的
Soils4Africa 项目,针对非洲大陆开展土壤监测,并
建立整个非洲大陆的土壤信息系统。这些都推动了土
壤监测与信息产业的发展。

2 我国耕地土壤产能提升科技发展现状与 态势

我国耕地土壤科技发展紧跟国际前沿,自 20 世
纪 80 年代以来相继实施了“中低产田改良”“沃土工

程”“高标准农田建设”“黑土地保护”等工程，并长期开展耕地土壤肥力变化规律研究，地力提升理论与技术得到了发展。2016年开始我国相继启动了“粮食丰产增效科技创新”“化学肥料和农药减施增效综合技术研发”“农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发”等国家重点研发计划专项，在耕地土壤障碍消减、土壤地力提升、养分高效利用与调控、土壤微生物多样性与生物调控、土壤污染治理修复、土壤固碳减排、高标准农田与防护林建设、区域耕地健康培育与产能提升模式创建、智慧监测预警等方面取得了较为明显的进展，有效支撑和保障了我国耕地土壤产能提升。但与发达国家本领域发展水平相比，上述研究还存在差距和短板，这也是我国土壤改良产业和行业发展亟需突破的技术瓶颈。

1)耕地土壤障碍消减方面：我国土壤酸化目前主要研究了南方地区典型土壤酸化特征、主要作物的酸害阈值，初步建立了农田土壤酸化的预测模型；研制了系列酸化耕地治理新技术，如无机改良、有机改良、有机-无机复合改良及根际微生物调控等技术，以及氮肥减施及有机肥部分替代化肥等农艺措施，但缺乏全国范围内的土壤酸化状况清单与分区分类的低成本靶向调控技术模式。我国构建了涵盖耕作、生物和工程等多种措施的综合侵蚀阻控技术体系，包括旱作保墒与少耕免耕、等高耕作合理配置农田微地形、间作套种、砾石覆盖、秸秆还田、梯田修筑与梯壁整治等技术，有效减缓了土壤侵蚀速率。近年来，土壤水盐调控由传统的地面灌溉向节水局部控盐方向发展，我国在非充分灌溉下土壤水盐过程研究有很好的工作积累，并形成了系列盐碱障碍消减与农业高效利用实用技术，其核心主要通过减少蒸发抑制盐分上行、改善耕层或剖面结构/边界条件促进盐分淋洗、耕层土植营养调控等途径，基本解决了中轻度盐碱障碍消减的难题。

2)耕地内稳定性地力提升方面：我国在有机质提升领域处于与国际并跑阶段。近年来，通过绿色农业和秸秆还田技术的推广，土壤有机质含量逐步提高，但在高效固碳微生物的筛选与应用、新型有机肥料研发等方面仍需进一步突破。未来，我国将在土壤有机质提升技术方面实现全球领跑，突破一批新型固碳微生物与先进材料。同时，土壤有机质管理与耕作系统将实现智能化与自动化。我国在土壤结构改良技术领域目前处于并跑阶段，但由于耕地管理历史差异，土壤结构退化在部分区域较为严重，土壤团聚体的形成和稳定性管理技术尚需提升，尤其在北方和西南地区。

未来，我国将在土壤结构改良方面开发出具有高效稳定性的土壤结构改良剂，显著提升土壤团聚体稳定性。我国在耕地土壤生物培肥技术领域起步较晚，仍处于跟跑状态。未来，应聚焦土壤健康生物定向培育，开展典型农区土壤生物多样性形成机制和生物网络基础研究，探寻土壤微生物与功能之间的关联机制；进一步明确植物与微生物互作机制，阐明土壤内稳定性地力提升的关键生物类群，研发合成菌群制剂及其配套技术；发展以生物定向培育和生物培肥为核心的土壤健康培育模式，进一步促进耕地健康和作物高产。

3)耕地养分高效利用方面：新形势下化肥产业需求已从高浓度向绿色高效方向发展。近年来，我国在作物高效利用土壤养分机制解析、作物高效利用养分的基因资源挖掘、土壤-根系-微生物互作过程对作物养分高效利用的影响机制、氮磷高效利用的地上-地下生物功能调控与技术原理等方面取得了突破性进展，建立了氮磷高效利用生物调控技术体系；开发了系列新型控释肥料、有机肥料以及功能肥料，构建了肥料环境效应评估方法和评估体系；开发了土壤肥力快速测定系统，发展了协调作物高产、养分高效及生态环境安全的肥料高效管理措施。未来，拟重点突破土壤-作物互作优化调控技术、有机-无机养分协同增效技术、局部定向调控机械化施肥技术、肥料精准化和智能化施肥技术以及新型绿色高效肥料创制与应用，实现我国耕地土壤培肥与高产高效协同发展，精准智能推荐施肥与农机农艺融合，肥料养分智能释放与作物吸收同步，达到作物持续高产、养分持续高效、生态持续健康等多重目标。

4)农田土壤生物多样性及生物生产力挖掘方面：近年来，我国农田土壤生物多样性及生物生产力挖掘领域的科研水平显著提升，研究手段逐步从传统微生物纯培养技术过渡到高通量培养组学结合宏基因组学、单细胞分选耦联培养组学等多组学技术，为系统探究土壤生物多样性与生物生产力关系提供了技术支撑^[25-30]。例如，南京农业大学利用代谢组学技术，揭示了芽孢杆菌通过代谢促进和趋化吸引调节本地微生物，进而促进黄瓜的生长。中国科学院南京土壤研究所利用合成生物学技术，构建了高效除草剂降解、抗铝毒、促进作物生长和提高产量的多功能合成菌系。中国农业大学采用全基因组学技术，揭示了间作花生根际富集的假单胞菌能改善铁营养。合成生物学结合基因编辑技术能定向构建、优化微生物功能类群。西北农林科技大学精准组装并简化了具有根腐病抗病功能的合成微生物群落，揭示了低丰度细菌菌群

在病原菌防控和植物生产力提升中的作用机制。然而,我国在土壤生物多样性的监测、评价、保护及资源利用方面的核心技术和原创性成果仍显不足。未来,应重点开展不同农田环境生物多样性时空演变规律、生态功能及其对生产力和生态系统功能稳定性作用的研究,发展基于基因编辑与合成生物学技术的高效靶向调控技术和产品,充分发挥生物生产力的耕地产能提升作用。

5)耕地土壤污染修复方面:近年来,我国十分重视耕地土壤重金属污染问题,重点关注了重金属包括镉、铬、铅等的空间分布、环境行为、毒性效应及固化稳定化等。现有重金属稳定剂的研究集中在传统的单一元素或单一基团的稳定化修复材料上,尽管这类材料对多种重金属具有稳定化效果,但重金属稳定化率通常仅在 30%~50%。未来,应重点开发新型多金属高效同步稳定化材料,研制配套智能化装备,构建针对不同重金属污染和复合污染的低成本、高效率、广适性的修复及后处置技术体系。我国在土壤有机污染生物修复技术领域发展较快^[31],研究与实践正逐步深入,但系统性的修复标准和技术规范体系尚未健全,需开发高效、低成本的生物协同修复技术。近年来,我国耕地土壤新污染物重点关注了抗生素及其抗性基因、微塑料等的空间分布、环境行为及毒性效应。未来,亟需摸清耕地土壤中新污染物污染现状,发展土壤新污染物快速筛查、精准识别以及高通量检测方法,研究更多的新污染物环境行为及毒性效应与污染治理技术。

6)耕地土壤固碳减排方面:我国在农田土壤固碳与减排技术研究方面已经具备了较好的基础。近年来,生物炭技术、秸秆还田、保护性耕作、氮肥高效管理等措施在增加土壤有机碳储量和减少温室气体排放方面取得了显著进展。同时,现代农业中碳足迹评估、碳汇管理和低碳农业模式的发展也为推动农田固碳减排和丰产协同提供了技术支持。中国科学院南京土壤研究所运用生命周期法结合大数据分析,评估了我国三大主粮作物生产过程中的固碳减排潜力以及碳中和实现路径,创建了一套“生物质热解多联产物”系统进行能源替代减排,为我国农田温室气体减排和农业碳中和提供了新策略。然而,现有研究多集中于单一目标的技术应用,尚未建立系统性的固碳减排与丰产协同技术体系。

7)高标准农田建设方面:我国当前现代化高标准农田建设的研究主要集中于土地整治、建设时序、评价体系构建、农田水利建设、土壤培肥改良及农业综

合开发等方面,但仍处于现代化建设的初级阶段,面临诸多挑战。只知“如何建”,尚不知“如何建好”,存在高标准农田的覆盖比例偏低、建设标准不够高、管理与养护机制尚需完善、土壤改良与地力提升技术不足、智能化与数字化技术尚未全面融合等问题。未来,需要加大研发高标准农田地力快速培肥技术及产品,发展高标准农田基础设施综合感知与评价技术,研发高标准农田管护利用智慧监测与智能管控技术,以及天空地一体化协同监测、高标准农田田块基础信息数据库创建、智慧农业无人农场等技术。

8)耕地保护利用生态屏障建设方面:近年来,我国十分重视以耕地产能为核心的“山水林田湖草沙”一体化保护和系统治理。例如,中国科学院沈阳应用生态研究所建立了防护林效应评估方法,系统明确了东北地区防护林对粮食产量的作用机制,发现区域尺度农田防护林可以增加年粮食产量 4%~10%。我国根据不同地域风害特征和防护目标,提出了构建“长城纹”的“山水田林路”新型现代农防林,该方案能够在达到原有防护效率的基础上节约 35%~50% 的林地占地面积,提高了水土资源利用率,促进了耕地的高效保护与利用。在湿地净化技术提升对耕地的保护中,我国研发了生态沟渠净化技术,净化后的湿地地表水可反哺耕地进行灌溉,有效提高了耕地的水源供给能力。总体上,我国耕地保护利用生态屏障营建关键理论和技术严重滞后,亟需解析我国主要粮食产区的生态屏障对耕地养护的作用机制,开发基于耕地保护利用的生态屏障定向营建技术等。

9)区域耕地土壤健康培育与产能提升模式创建方面:近年来,我国在耕地土壤健康培育方面也开展了相关探索性研究工作,提出了内稳定性地力提升、地上-地下生物互作、大团聚体生物培肥等理论与技术,并建立了典型区域耕地产能提升模式。但是由于我国不同耕作区自然资源禀赋不同、耕地土壤状况不一、作物种植制度多样,在土壤健康培育与产能提升方面,未来还需要系统构建不同区域耕地健康评价指标体系,建立重点区域耕地土壤健康生物数据库。在黑土地保护利用基础上,实现黑土肥力、生态服务功能和耕地产能协同提升;在既定水资源条件下,实现干旱半干旱地区土壤障碍消减-水肥高效利用-作物优化配置协同,促进健康土壤培育与生态安全屏障协调;提高华北等粮食主产区土壤生态系统服务多功能性,实现合理耕作与农业废弃物高效利用,固碳增效;加强酸性土壤酸、瘦、毒、病等障碍一体化综合消减,实现健康土壤培育与安全利用;强化耕地质量提升与

“山水林田湖草沙”生态屏障协同配置,实现健康土壤培育与生态保护协同目标。

10)耕地质量智慧监测和大数据挖掘方面:我国已成功发展出基于传感器、卫星遥感、无人机、地理信息系统等多种手段的耕地土壤参数监测技术,并且对耕地土壤数据的处理能力大幅提升,推动了智慧监测的全面发展,能够实现对土壤肥力的实时监测和精准管理,但在时效性、精确性、自动化程度等方面有待提升。国家高度重视耕地质量智慧监测,明确提出加强耕地质量的动态监测与精准管理。随着农业现代化对耕地质量智慧监测的迫切需求,亟需构建自主可控的监测体系。今后,应加强核心技术研发,开发新型传感器、高精度传感器、智能化数据采集系统以及智慧监测评价与预测预警平台系统。同时,我国在土壤数据挖掘领域取得了一系列研究成果,利用人工智能和机器学习等技术在土壤污染预测评价、土壤属性空间分布预测制图等方面取得了显著进展。未来,应重点开发面向土壤安全与可持续利用的“三普”土壤大数据集成、挖掘与应用技术,构建大食物观视角下我国土壤资源优化利用与管理技术体系,有力支撑我国耕地保护和质量提升建设。

3 学科发展需求与关键科学问题

近40年来,随着工业化、城镇化和农业高度集约化的发展,我国耕地土壤质量退化突出,比如质量水平总体偏低、复合障碍因子多、基础地力不高、功能退化明显、耕地产能低下等现实问题,加上我国耕地土壤类型多样,具有区域性、流域性和高强度利用等特点,这是世界上任何国家都无法比拟的,因此无法完全照搬发达国家的现有技术和模式。当今世界正在经历百年未有之大变局,尤其是近年来俄乌冲突僵持、地缘政治加剧、极端气候频发等多重不利因素的复合叠加,给我国耕地土壤产能提升与可持续利用带来极大的挑战和潜在威胁。因此,亟需攻克具有我国自主知识产权的耕地土壤关键核心技术,创新我国耕地土壤科技体系,全面提升耕地产能,保障国家粮食安全。

鉴此,结合国际上耕地产能提升科技发展新趋势和我国本领域行业产业发展的科技需求,针对我国耕地土壤产能提升面临的重大现实问题,未来5年,亟需以我国中低产田改造、高标准农田建设、边际土地保护性开发等为重大任务,以耕地产能提升为目标,从耕地自然赋能、人工赋能、生物赋能等方面创新科技,重点开展耕地土壤障碍消减、内稳定性地力提升、

养分高效利用、生物多样性及生物生产力挖掘、污染修复与质量提升、固碳减排过程与调控、耕地保护利用生态屏障建设、现代化高标准农田建设、区域耕地健康培育与产能提升模式创建、耕地质量智慧监测与预测预警等重要方向研究,攻克我国耕地土壤障碍靶向长效消减、耕地内稳定性地力提升、土壤养分调控与精准施肥、健康耕地培育与产能提升、土壤微生物组装与功能调控、复合污染绿色低碳修复和新污染物精准识别、耕地质量智慧监测与预测预警大模型、高标准农田基础设施综合感知等关键核心技术,创建区域退化耕地分类治理和产能提升、区域耕地土壤固碳减排与产能协同提升、分区分类分级耕地保护利用生态屏障建设管理和区域耕地健康培育与产能提升等技术模式,实现我国耕地质量与产能协同稳步提升,培育高科技龙头企业,壮大我国土壤肥料领域的产业经济,抢占本领域的科技制高点,显著提升国际竞争力,为全面实施“藏粮于地 藏粮于技”国家战略提供重要科技支撑。

4 “十五五”科技创新主攻方向

聚焦国家粮食安全重大战略需求,充分发挥多学科交叉融合的学科优势,未来我国耕地土壤产能将重点发展耕地重要障碍消减、内稳定性地力提升、养分高效利用、污染修复与质量提升、智慧监测评价与预测预警等关键核心技术,农田土壤生物多样性保护与利用、固碳减排与丰产协同等重点前沿技术,现代化高标准农田建设、“山水林田湖草沙”一体化保护治理、土壤“三普”大数据集成应用等大规模应用场景构建,以及区域耕地健康培育与产能提升的集成示范,旨在通过系统性研究和技术攻关,推动耕地生产力的持续提升。

1)耕地土壤障碍消减技术。针对我国耕地土壤酸化、盐碱化、土壤侵蚀退化等突出障碍问题,研究典型区域耕地土壤酸化机制与阻酸控铝技术,构建耕地土壤酸化与产能的响应关系与风险预警模型、研发高效持续抑酸产品与配套施用技术及其装备,集成酸化耕地长效抑酸协同产能提升的技术理论体系;研发中重度盐碱障碍长效消减技术与产品,突破降盐脱碱改土、节水控盐碱种植等关键技术与装备,创建盐碱地分区改造利用技术体系;明确侵蚀退化对典型作物产能的危害,研究敏感区域土壤侵蚀、水土流失高精度预测预报方法,研发土壤侵蚀及水土流失阻控与抗旱提质等多功能协调提升绿色产品与技术,构建典型区域侵蚀退化土壤生态生产功能重建技术模式与评估

体系。

2)耕地土壤内稳定性地力提升技术。针对我国耕地土壤内稳定性地力低、土壤有机质含量低、性质差等难以支撑作物产能持续扩增的突出问题,研究主要农区耕地内稳定性地力的时空特征,阐明其对作物产量形成的作用机制,识别控制不同区域耕地内稳定性地力差异的核心要素,明确我国耕地内稳定性地力提升潜力及其对作物产能扩增的潜在贡献,建立契合耕地特征和目标产能的内稳定性地力维持与提升原理;研究主要耕地土壤有机质含量和质量的分异规律,揭示有机质-团聚体-微生物的耦联关系,明确土壤有机质形成与累积的生物-非生物介导机制,阐明土壤有机质提升与团粒结构形成和微生物功能优化的联动效应,建立土壤有机质累积对内稳定性地力提升的定量关系和定向调控路径;研究制约我国主要耕地特别是中低产田产能提升的关键因子,明确低地力水平耕地的立地条件、土体构型与耕层结构特征,并阐明其与水分库容、养分保供及作物产量的关系,构建以土壤有机质量质提升、土体结构优化和水养扩库增效为核心的耕地内稳定性地力与产能协同提升的人工赋能技术体系。

3)耕地土壤养分调控与精准智能化施肥技术。针对我国耕地养分失衡、利用率低的问题,开发土壤养分大批量、高精度的原位快速检测技术与设备,系统评估我国耕地土壤养分状况,解析制约耕地产能提升的土壤养分因子,研发耕地养分均衡调控技术;研究土壤-作物系统中养分的物理、化学和生物行为,阐明小麦、玉米、水稻等典型粮食作物的养分需求规律,解析作物对养分高效利用的生理和分子机制,研发基于土壤-作物相互作用的作物养分高效利用调控技术;开发土壤-作物-环境精准施肥专业化大数据平台;开发精准智能化施肥配套的新型肥料产品,研发典型粮食作物精准智能化施肥决策模型,研发适宜我国不同地区的轻型简便机械化施肥技术,实现我国耕地的精准化和智能化施肥管理。

4)耕地土壤微生物组装与功能调控技术。针对我国耕地土壤生物多样性下降、生产潜力发挥不够等问题,解析土壤生物多样性及其时空演变规律,开发耕地土壤生物多样性的监测与保护技术;深入挖掘土壤微生物资源,精确组装具有提升土壤有机质、促进作物生长及增强作物抗病抗逆能力的多功能微生物群落;利用合成生物学方法精准调控土壤微生物群落组成,实现生物装配与载体技术的高效协同,从而构建农田沃土和产能协调提升的微生物组装配技术体系;通过土壤生物调控策略,有效激活土壤养分,增强作

物的抗逆抗病性,显著提升耕地土壤质量,从而全面提升耕地产能和实现可持续发展。

5)污染耕地土壤绿色可持续修复技术。针对耕地土壤重金属和新污染物修复技术缺乏等问题,研发基于超稳矿化、高分子的多种重金属协同钝化稳定化技术,研发基于合成微生物组功能设计的重金属污染耕地土壤修复技术,发展基于分子育种、生理生化调控等的植物移除技术;构建有机污染物高效降解合成微生物组,阐明有机污染物合成微生物组高效修复调控原理,研发有机污染耕地土壤动物和微生物多级驱动的多过程协同自然强化修复技术体系;研发新污染物快速筛查与精准识别技术,构建耕地土壤新污染物筛查识别与生态风险评估技术体系,建立我国区域耕地土壤污染绿色可持续修复与安全利用集成技术模式与应用示范。

6)耕地土壤固碳减排技术。针对稻田甲烷减排和土壤固碳的现实问题,研发秸秆错位还田耦合腐秆剂施用的秸秆综合管理固碳减排协同技术,发展以好氧栽培与水氮协同管理为主线的丰产减排技术体系,研发高效甲烷氧化菌剂以及甲烷氧化菌负载生物质炭产品;针对旱地氧化亚氮减排,研发强化反硝化过程的减排功能菌群构建和靶向调控技术,研制负载新型氮素转化制剂的微生物肥料产品。基于上述技术研发稻田和旱地智慧固碳减排系统,集成区域适应性的土壤固碳减排与产能协同提升技术模式,保障粮食安全和农业绿色发展。

7)耕地保护利用生态屏障构建技术。针对我国高标准农田建设中防护林技术体系不完善、结构失调、功能单一、抗逆性弱、防护效能低等问题,研发基于耕地保护利用和面源污染水肥控制的农田防护林构建技术,构建功能多样、系统稳定、生产-生态-经济多赢的农田防护林网体系;明确不同区域的农田防护林建设范围和林网化率,发挥“山水林田湖草沙”系统协同功能,综合评价“山水林田湖草沙”系统对耕地保护的作用及贡献率;创建分区-分类-分级的耕地保护利用生态屏障建设管理模式,并在不同粮食主产区开展耕地保护利用生态屏障建设工程。

8)高标准农田地力快速培肥与综合感知技术。针对现代化高标准农田建设中耕地质量不高、基础设施不完善、田块破碎化、抗灾能力弱、管护技术落后等问题,通过工程、生物、化学等方法,快速提升土壤有机质和促进团粒结构形成,消除土壤障碍,提升耕地质量水平;构建高标准农田多尺度评价指标体系,建立耕地质量诊断与利用快速检测技术,创建土壤障

碍消减、水肥一体化、产能扩增和生态保护协同的高质量农田培育模式;建立田间完整的灌排体系,发展田块破界快速整治与重建技术;发展与农田基础设施相适应的作物种植制度、旱作节水、复合种养体系,应用物联网、人工智能、大数据等开发高标准农田基础设施综合感知与评价技术,构建智控、智管、智慧的农田综合管理体系。

9)区域耕地健康培育与产能提升技术模式。根据我国不同耕作区土壤健康状况与农业发展结构特征,设计区域耕地应用场景驱动模式,开展区域耕地多场景综合施策重大工程,形成我国耕地产能提升的系统性解决方案。如构建东北黑土肥力与耕地产能协同提升可持续发展技术模式,华北基于合理耕作与农业废弃物高效利用的固碳增效与产能提升技术模式,西北健康土壤培育与生态安全屏障协同技术模式,西南山区地上-地下互馈健康土壤培育与生态保护协同技术模式,长江中下游“粮-经-肥”高效耦合耕地产能与生态功能双提升技术模式,华南土壤酸、瘠、毒、病协同消减的健康土壤培育与安全利用协同技术模式。

10)耕地质量智慧监测、评价与预测预警技术。针对我国耕地数量和质量原位快速监测设备缺乏、全时空监测技术不足、高分辨率预测预警大模型不足、土壤大数据集成挖掘与应用技术薄弱、耕地保育专家决策大模型缺少等问题,聚焦研制国产化的伽马能谱仪等土壤检测设备,突破耕地原位快速检测技术瓶颈;优化耕地监测网络布局,整合高分遥感、移动感知、原位检测等手段,建立耕地数量质量数据全时空连续获取技术体系;结合第三次全国土壤普查,构建耕地资源数量质量大数据集,研制土壤时空过程的数字孪生与信息挖掘范式;建立高时空分辨率、全覆盖的耕地数量质量时空预测、退化预警和耕地保育专家决策大模型;融合人工智能、机器学习、大数据、云计算等先进手段,开发集耕地数量质量智慧监测、评价、预测预警等功能的大数据分析、评价及决策信息平台,以及面向不同层次需求的移动APP智慧平台,建立多尺度现代农业区划理论与技术体系。

参考文献:

- [1] 张佳宝, 刘建立. 粮食主产区农田地力提升机理与定向培育对策研究立项报告[J]. 科技创新导报, 2016, 13(14): 181.
- [2] 沈仁芳, 滕应. 土壤安全的概念与我国的战略对策[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 468-476.
- [3] 张佳宝, 孙波, 骆永明, 等. 开展健康耕地建设行动 夯实粮食安全基础[J]. 中国农村科技, 2023(1): 21-22.
- [4] 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.
- [5] Shen R F, Teng Y. The frontier of soil science: Soil health[J]. Pedosphere, 2023, 33(1): 6-7.
- [6] Lehmann J, Bossio D A, Kögel-Knabner I, et al. The concept and future prospects of soil health[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(10): 544-553.
- [7] 宋长青, 谭文峰. 基于文献计量分析的近30年国内外土壤科学发展过程解析[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 957-969.
- [8] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 160-167.
- [9] Du L X, Zhang Z Y, Chen Y Q, et al. Heterogeneous impact of soil acidification on crop yield reduction and its regulatory variables: A global meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2024, 319: 109643.
- [10] 李科伟, 徐仁扣. 碳循环在土壤酸化与调控中的作用[J]. 土壤, 2025, 57(3): 485-497.
- [11] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.
- [12] 骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1137-1142.
- [13] 史志华, 刘前进, 张含玉, 等. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1117-1127.
- [14] 张佳宝. 加强原始创新, 提高我国耕地内在生产力[J]. 科学新闻, 2023, 25(4): 50-51.
- [15] 周卫, 艾超, 易可可. 新阶段植物营养学的研究重点[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1243-1252.
- [16] 张福锁, 申建波, 危常州, 等. 绿色智能肥料: 从原理创新到产业化实现[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 873-887.
- [17] 徐建明, 刘杏梅.“十四五”土壤质量与食物安全前沿趋势与发展战略[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1143-1154.
- [18] 颜晓元, 夏龙龙, 遂超普. 面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 177-183.
- [19] Xia L L, Cao L, Yang Y, et al. Integrated biochar solutions can achieve carbon-neutral staple crop production[J]. Nature Food, 2023, 4(3): 236-246.
- [20] 查燕, 吴文斌, 余强毅, 等. 我国农业水土资源监测与信息服务体系建设战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 64-72.
- [21] 张佳宝, 孙波, 朱教君, 等. 黑土地保护利用与山水林田湖草沙系统的协调及生态屏障建设战略[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1155-1164.
- [22] 徐明岗, 段英华, 白珊珊, 等. 基于长期定位试验的土壤健康研究与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1253-1261.
- [23] 张江周, 王光州, 李奕赞, 等. 农田土壤健康评价体系构建的若干思考[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 879-891.
- [24] 陈仲新, 任建强, 唐华俊, 等. 农业遥感研究应用进展与展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 748-767.
- [25] 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.

- [26] 褚海燕, 马玉颖, 杨腾, 等. “十四五”土壤生物学分支学科发展战略[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1105–1116.
- [27] 张瑞福, 陈玉, 孙新丽, 等. 中国生物肥料与有机肥料研究三十年: 回顾与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1262–1273.
- [28] Liu C Y, Jiang M T, Yuan M M, et al. Root microbiota confers rice resistance to aluminium toxicity and phosphorus deficiency in acidic soils[J]. Nature Food, 2023, 4(10): 912–924.
- [29] 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.
- [30] Fierer N. Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome[J]. Nature Reviews Microbiology, 2017, 15(10): 579–590.
- [31] Teng Y, Chen W. Soil microbiomes—a promising strategy for contaminated soil remediation: A review[J]. Pedosphere, 2019, 29(3): 283–297.