

DOI: 10.11766/trxb202307210286

孙波, 朱安宁, 姚荣江, 沈仁芳, 张佳宝. 潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1231–1247.

SUN Bo, ZHU Anning, YAO Rongjiang, SHEN Renfang, ZHANG Jiabao. Research Progress on Barrier Remediation Technology and Productivity Enhancement Model for Fluvo Aquic Soil, Red Soil, and Saline-Alkali Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1231–1247.

潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展^{*}

孙 波, 朱安宁, 姚荣江, 沈仁芳, 张佳宝[†]

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 耕地质量建设是保障我国粮食安全的战略需求。我国中低产耕地亟需解决酸化、盐碱、贫瘠、生物功能衰减等问题, 全面提升耕地产能。中国科学院南京土壤研究所针对潮土、红壤、盐碱土等主要耕地土类, 基于长期观测、研究和示范, 明确了土壤质量演变规律和退化调控机制, 发展了不同农区耕地质量培育理论和技术体系。针对潮土, 阐明了有机质、团聚体和微生物联动的内稳定性地力形成机制, 研发了农田土壤和作物信息监测的传感设备, 集成了厚沃耕层构建与大面积均衡增产模式。针对红壤, 揭示了土壤酸缓冲性提升抑酸机制和关键微生物驱动养分转化机制, 研发了抑酸抗酸协同技术和红壤大团聚体生物培肥技术, 分类创建了江西省耕地生态培肥和产能提升模式。针对盐碱土, 阐明了土壤水盐调控伴生氮素迁移转化过程, 提出盐渍障碍消减与养分增效协同机理与调控技术, 创新了滨海盐碱地和河套灌区次生盐渍化生态治理模式。未来研究重点在耕地质量调查与建设管理、耕地土壤障碍消减与产能提升、土壤健康管理与生态保护3个方面, 突破土壤障碍消减技术瓶颈, 研发系列调理剂和生物培肥产品, 提升区域模式落地率, 建立我国耕地质量提升和可持续利用的系统解决方案。

关键词: 潮土; 红壤; 盐碱地; 肥沃耕层; 酸缓冲性; 水氮盐调控; 产能提升

中图分类号: S15; S14 文献标志码: A

Research Progress on Barrier Remediation Technology and Productivity Enhancement Model for Fluvo-Aquic Soil, Red Soil, and Saline-Alkali Soil

SUN Bo, ZHU Anning, YAO Rongjiang, SHEN Renfang, ZHANG Jiabao[†]

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Farmland quality construction is a strategic requirement for ensuring food security in China. There is an urgent need to address issues such as soil acidification, salinization, infertility, and declining biological functions for medium to low-yield farmland, in order to comprehensively enhance farmland productivity in China. Based on long-term observation, research, and

* 国家重点研发计划项目(2022YFD1900600)、国家农业科技项目(NK18-3, NK18-4)和农业农村部现代农业产业技术体系(CARS-52)资助
Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2022YFD1900600), the National Agricultural Science and Technology Project of China (Nos. NK18-3, NK18-4), and the China Agriculture Research System of MOF and MARA (No. CARS-52)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jbzheng@issas.ac.cn

作者简介: 孙 波(1968—), 男, 江苏南京人, 研究员, 主要研究方向为土壤质量演变与生物学调控。E-mail: bsun@issas.ac.cn

收稿日期: 2023-07-21; 收到修改稿日期: 2023-09-19; 网络首发日期(www.cnki.net): 2023-10-08

demonstration, the Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences has clarified the evolution rules and degradation control mechanisms of soil quality for major cultivated soil types such as fluvo-aquic soil, red soil, and saline-alkaline soil, and developed the theories and technical systems for farmland quality cultivating in different agricultural areas. For fluvo-aquic soil, the formation mechanisms of the internal stability for soil fertility through the synergetic linkage among organic matter, aggregate, and microbe were clarified, the sensing equipment for monitoring farmland soil and crop information were developed, and the models to integrate the construction of fertile cultivated layer and the balanced enhance of crop yield at large-scale were established. For red soil, the mechanisms for inhibiting soil acidification by improving acid buffering capacity and microbial keystone taxa-driven nutrient transformation were revealed, the technologies for synergistic inhibition and resistance of soil acidification and biological fertility cultivation of soil macro-aggregates were developed, and the ecological modes for farmland quality and productivity enhancement in Jiangxi Province were classified and established. For saline-alkali soil, the nitrogen migration and conversion processes associated with soil water-salt management were clarified, the synergistic mechanism and key technologies of salinization obstacles reduction and nutrient enhancement were developed, the soil accelerating fertility cultivation mode and the soil salinization ecological remediation mode were innovated for the coastal region and Hetao Irrigation District respectively. Future research should focus on farmland quality investigation and construction management, farmland soil obstacle remediation and productivity improvement, and soil health management and ecological protection. We need to break through the technical bottleneck for soil obstacle remediation, develop a series of conditioners and biological fertilizer products, improve the implementation rate of regional management modes, and finally establish a systematic solution for improving farmland quality and sustainably utilizing farmland resources in China.

Key words: Fluvo-aquic soil; Red soil; Saline-alkali soil; Fertile cultivated layer; Acid buffering capacity; Water, nitrogen and salt regulation; Productivity enhancement

耕地是粮食生产的命根子。我国现有 20.23 亿亩 ($1 \text{ hm}^2 = 15 \text{ 亩}$) 耕地, 但人均耕地仅为 1.3 亩, 不足世界平均水平的 40%, 其中高等级耕地 (1~3 等) 占 31.24%, 产能提升潜力低, 且面临退化风险; 中等级 (4~6 等) 和低等级 (7~10 等) 耕地分别占 46.81% 和 21.95%, 具有不同的生产障碍因素, 总体上我国耕地基础地力对粮食产量的平均贡献率为 45.7%~60.2%, 较农业发达国家低 20~30 个百分点, 耕地产能潜力仍有很大的提升空间。未来十年我国仍然要强化耕地数量保护和质量提升, 牢牢守住 18 亿亩耕地红线, 到 2030 年累计建成 12 亿亩高标准农田, 稳定保障 1.2 万亿斤以上粮食产能^[1]。因此, 加强我国耕地质量建设是我国粮食安全的重大战略需求。

中国科学院南京土壤研究所建设了土壤与农业可持续发展国家重点实验室、土壤养分管理国家工程实验室、农业农村部耕地质量保育重点实验室, 以及封丘、鹰潭、常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站体系, 形成了应用基础研究-技术开发-推广应用的科技创新平台体系。2000 年以来相继承担了一批国家重点基础研究发展计划 (“973”计划)、

国家高技术研究发展计划 (“863”计划)、国家科技支撑计划和国家重点研发计划项目, 明确了我国潮土、红壤、盐碱土等主要耕地土类的质量演变规律和退化调控机制, 发展了不同农区耕地质量监测评价体系与培育理论; 在主要粮食产区耕地障碍消减、地力提升、养分高效利用与大面积均衡增产等关键技术研发方面取得显著进展, 为我国高标准农田建设和耕地质量提升提供了重要科技支撑。

1 潮土耕地障碍消减与产能提升

我国潮土的面积超过 3.8 亿亩, 分布范围广阔, 但大部集中分布在黄淮海平原的山东、河北、河南、江苏等省份。黄淮海平原耕地面积占全国的 15.9%, 是我国重要的粮油产区, 其中小麦和玉米产量分别占全国的 71% 和 30%。潮土作为黄淮海平原的主要耕作土壤, 总体质地偏砂, 障碍因子多且复杂, 从早期的旱涝、盐碱、风沙、瘠薄到近年的土壤结构差、有机质含量偏低、养分不均衡、耕层浅薄以及水分和养分利用效率较低等等, 导致黄淮海平原中低产田占比较高。

从 20 世纪 50 年代的华北土壤障碍调查、60 年代黄淮海盐碱地改良的“井灌井排”核心技术研发、80 年代黄淮海农业综合治理的“封丘模式”推广，中国科学院南京土壤所开展了大量的中低产土壤改良与区域农业综合治理工作，取得了一系列重要成果。近 20 多年来，面向国家粮食安全战略需求，南京土壤研究所率先在我国开展了土壤质量研究，深入开展了耕地保育基础理论与技术研究。在基础理论研究方面，主持实施了我国第一个土壤质量领域国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(“土壤质量演变规律与可持续利用”)，随后封丘站又相继主持实施了“我国农田生态系统重要过程与调控对策”和“粮食主产区农田地力提升机理与定向培育对策”等“973”计划项目，揭示了潮土障碍形成机制和土壤质量演变规律，解析了土壤有机质的周转规律和土壤结构的形成机制，提出了农田地力定向培育的对策，有力推进了我国新时期中低产田地力提升的基础理论研究以及传统土壤学向现代土壤学的发展。在技术研发和示范方面，主持实施了国家重点研发计划项目“旱作区土壤培肥与丰产增效耕作技术”、中国科学院重大项目“河南封丘耕地保育与持续高效现代农业试点工程”、中国科学院重要方向项目“河南高产高效现代农业示范工程—大面积均衡增产技术”，创建了农田地力提升和大面积均衡增产技术模式，新整治耕地肥沃耕层工程化快速构建技术等等，显著促进了黄淮海农区耕地质量提升与粮食高产稳产。

1.1 阐明了潮土有机质、团聚体和微生物联动机制，提出了提升土壤内稳定性地力是实现作物稳产高产的关键

基于施肥长期定位试验，明确了我国旱地土壤有机质的稳定性和周转速率，以及潮土有机质快速分解的内在机制和两面性效应：高效提供养分和阻抑有机质累积^[2-3]。提出了潮土团聚体形成机制和关键控制因素，主要受控于微团聚体和粉黏粒组分中有机碳含量，粉黏粒组分中有机碳的增加加速了微团聚体的团聚化过程，微团聚体则通过自身或者与粉黏粒组分结合形成大团聚体^[4]。团聚化程度越高的土壤，小于 4 μm 孔径孔隙的比例越高，导致土壤氧气有效扩散系数降低，阻抑好氧菌生长，促进兼性和厌氧菌繁殖，降低了好氧菌/厌氧菌比值，使芽孢杆菌 (*Bacillus asahii*) 成为优势微生物^[5]，减缓了单位有机

碳的分解速率，证明潮土有机质、团聚体和微生物群落之间存在着联动关系^[6]。采用 ¹³C 示踪技术研究发现，外源碳在有机质含量高的土壤中残留率高于有机质含量低的土壤，表明肥力低的土壤中有机质提升难度更大，其潜在机制是低肥力土壤中的微生物以好氧菌为主，高效分解外源碳^[7]。

基于保护性耕作长期定位试验，明确了不同耕作与秸秆还田条件下沙性潮土团聚结构形成机制及其对有机碳和微生物的反馈作用，土壤活性有机碳累积有利于促进水稳定性大团聚体形成，提高团聚体的稳定性指数^[8]。甲氧基含氮烷基碳和烷氧碳是直接影响土壤团聚化进程的最关键活性有机碳官能团，其中甲氧基含氮烷基碳主要通过胶结作用和疏水效应提高团聚体的稳定性，而烷氧碳作为极性官能团，主要通过形成有机无机复合体发挥效应^[9]。在长期保护性耕作条件下，随着团聚结构形成，土壤微域环境发生显著变化，水稳定性大团聚体形成总体上有利增加土壤碳基质含量、提高碳氮比、提升土壤保水性以及形成厌氧微环境，进而驱动微生物群落向真菌和厌氧微生物转变。通过反馈作用，土壤团聚体耦合微生物共同制约有机碳的累积过程，其中大团聚体形成主要通过物理闭蓄细颗粒态有机质来降低微生物对有机碳的矿化分解，而微生物则主要增加了真菌在土壤有机质截获中的贡献度^[10]。

高度依赖化肥资源的作物生产是难以持续的，提升土壤地力是保障作物稳产高产的关键。基于多年的长期定位试验研究结果，率先提出了土壤地力构成及其与作物产量的关系。土壤地力的构成包括限制性地力、速效性地力、内稳定性地力和枯竭性地力，其中，速效性地力主要通过施用矿质化肥得以提升并具有不稳定性特征，限制性地力则受到光、温、水等区域环境因子的影响，而内稳定性地力总体上反映了土壤有机质、养分、团聚结构以及微生物的协同效应，进而决定了作物生长环境的缓冲能力与稳定性^[11]。作物的稳产高产主要取决于土壤肥力的提高，这与内稳定性地力提升息息相关。内稳定性地力的提升有利于形成良好的土壤物理结构，提高土壤固碳潜力，提供适宜的微生物栖息环境，促进土壤养分循环。较低的稳定性地力使高产难以摆脱对大水大肥的依赖，短期内可通过化肥创建速效性地力，但长期而言需改善立地条件，提高有机质含量、

养分库容、土壤结构性和生物活性（图 1）。

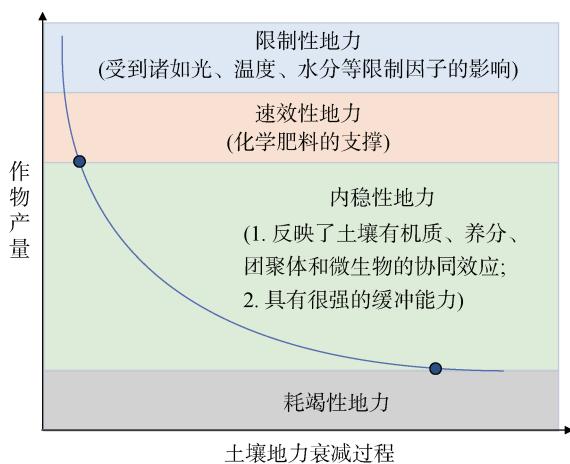


图 1 土壤地力构成及作物产量与地力衰减过程的关系

Fig. 1 Soil fertility composition and the relationship between crop yield and soil fertility degradation process

有机质是组成土壤内稳定性地力的核心要素，而较低的土壤有机质累积速率严重限制了内稳定性地力的提升。一般而言，加速土壤有机质累积和促进土壤内稳定性地力提升主要包含三大策略：一是通过添加外源有机物质（如秸秆还田）来提高土壤碳平衡点，二是利用适宜的生物激发制剂（如有机肥和绿肥）来提高微生物代谢活性和促进土壤有机质转化，三是通过降低外部作用力的损害（如少免耕）来维

持土壤结构和有机质的稳定性。基于区域土壤属性与生物气候特征，将三类措施有机结合是提升土壤内稳定性地力、实现可持续性农业生产的关键所在。该理论的提出为制定我国农田地力定向培育对策奠定了重要的科学基础。

1.2 基于新型传感器和物联网技术研发了农田土壤和作物信息监测新技术和新设备，建立了区域尺度水肥管理决策系统

基于大型蒸渗仪和田间定位试验的长期观测，在揭示小麦-玉米轮作系统的耗水规律和不同水源对产量贡献的基础上，针对土壤水分分布预测，基于 Brooks-Corey 模型提出了土壤水力特性参数的垂直入渗试验测定方法^[12]，发展了一维非饱和土壤水分入渗方程的近似解析解方法^[13]，建立了利用探地雷达绘制土壤结构图方法^[14]，提升了田间原位测定土壤水力特性参数的能力。

通过集成新型传感器和物联网技术，研发了农田土壤和作物信息监测新设备，包括国内首款融合无线地下传感器网络 WUSN 和低功耗广域网 LPWAN 技术的原位土壤水温盐测量设备 M1X、便携式土壤多参数测量设备 PTC、基于宇宙射线中子的大尺度监测设备 SIL-1N、土壤-气象 7 参数集成的监测设备 SAM、作物生长参数监测设备 ACam 等（图 2），促进了土壤水分自动监测以及农田墒情预测预报网络的发展。



图 2 基于传感器技术的农田土壤和作物信息监测设备

Fig. 2 Farmland soil and crop information monitoring equipment based on sensor technology

建立了融合宇宙射线中子法和无人机遥感的区域土壤水监测技术、基于多源近感技术的作物生长监测技术、作物冠层营养动态精准诊断技术,提出了基于区域尺度水氮管理模型的农田灌溉策略^[15],在黄淮海平原应用于玉米和小麦施肥和灌溉决策管理,实现了农田水肥资源的优化利用,促进了粮食高产和稳产^[16]。

1.3 创新了潮土障碍因子消减与地力提升关键技术, 创建了中低产田改良与厚沃耕层构建技术模式

为实现大面积均衡提升黄淮平原地区粮食增产潜力,针对该地区中低产田治理和高标准农田建设中面临的一系列瓶颈问题,研发了农田地力提升与大面积均衡增产技术与模式。新技术的研发以封丘站几十年来的研究成果为基础,从消减中低产田土壤障碍因子、提升农田地力、挖掘作物遗传增产潜力、提高资源利用效率四方面入手,创建了覆盖高中低产田地力

提升与大面积均衡增产技术体系及其集成模式(图3)。最先提出了将土壤衍生性障碍因子和属性障碍因子分类消减策略,针对旱、渍、坡等衍生性土壤障碍因子研发了现代标准化的长效控制共性技术,针对沙、黏、碱、瘠等土壤属性障碍因子研发了专性靶向技术。创建了以机械化激发式秸秆还田为主体的地力培育新模式,通过激发和驯化沃土先锋微生物群落促进了地力快速提升,使改土和地力培育有了突破。提出了地力提升关键技术分层次集成、接力式推进、信息技术支撑的创新思路,通过后台高新技术服务,支持田间一体化精准操作,创建了既轻简又现代化的中低产田“地力-产量双跨越技术体系”^[17]。实现了黄淮地区农田大面积均衡增产增效。技术模式应用从黄淮海平原潮土区扩展至砂姜黑土、褐土、黄褐土、水稻土生态类型区,在河南16个县进行了示范应用。形成的“黄淮地区农田地力提升与大面积均衡增产技术及其应用”成果获2014年度国家科技进步二等奖。

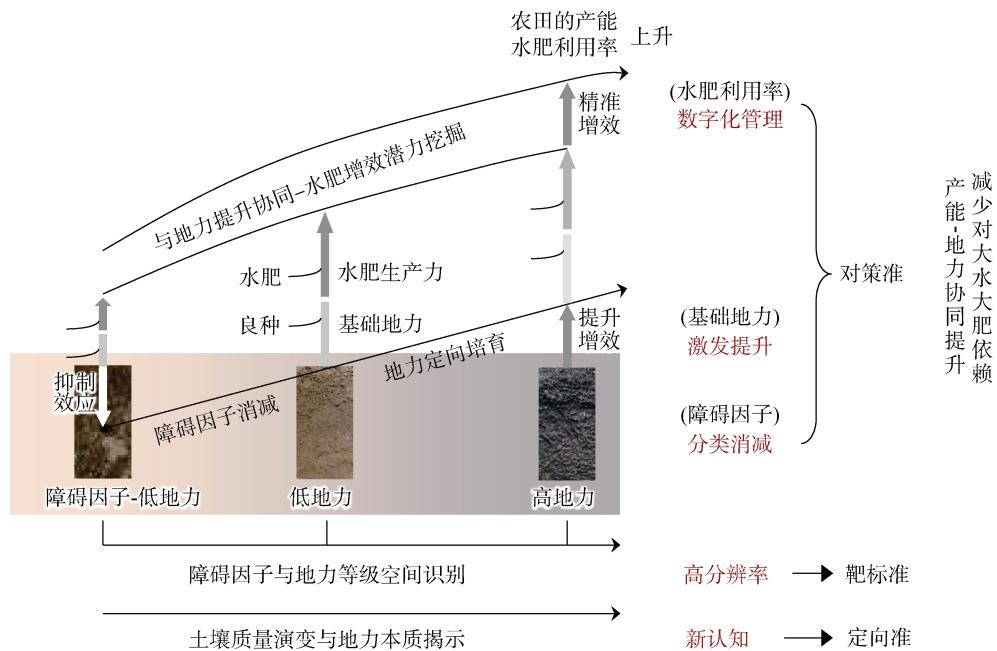


图3 黄淮地区中低产田地力提升技术体系

Fig. 3 Technical system for improving the productivity of low-to-medium yield farmland in regions between the Yellow River and Huai River

针对黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作一年两熟种植系统,研发了区域适宜性保护性耕作技术。以三年为一个周期,在秸秆还田的基础上,采用“自第一茬深翻后小麦种肥同播,随后连续五茬玉米和小麦免耕施肥播种”的深免间歇耕作技术,规避连年深翻导致的土壤团聚结构破坏和有机碳加速分

解,以及长期免耕带来的土壤板结、养分表聚、小麦产量下降等不利影响,实现农田高强度种植下粮食高产稳产的耕地质量保护。通过秸秆粉碎覆盖还田或翻压还田增加有机物料投入,促进有机碳积累和改善土壤物理性质;结合新型小麦、玉米免耕播种机械,实现生产上的冬小麦-夏玉米周年机械化种

肥同播免耕轻简作业,减少土壤扰动,促进土壤团聚结构形成和有机碳累积;在有条件的地区,土壤深翻配合秸秆深还作业,适当添加生物有机肥、堆肥或秸秆腐熟剂等生物激发调节剂,驯化土壤有益微生物,促进秸秆快速腐解和转化为土壤有机质;对于高产田,有机肥的投入可以替代15%~30%矿质化肥,达到土壤培肥与提质增效的目的,同步实现农田高强度种植、地力提升与化肥养分高效利用。

新整治耕地短期内熟化耕层缺失,土壤生产力低下,而传统土壤培肥模式极为冗长,难以摆脱对大水大肥的依赖。针对这一普遍存在的问题,南京土壤研究所研发了以材料换时间的新整治耕地耕层快速构建关键技术,即以富含80%以上腐殖质的天然腐殖质材料加工生产出需长期培育而成的土壤有

机质稳定性组分,以秸秆(含腐熟秸秆)代替土壤有机质活性组分,以天然腐殖质材料断链活化生产生物激发剂,针对不同土类的新垦/复垦高标准耕地设置配比组装技术方案,通过一次性工程化作业同步提升土壤中难分解、易分解有机质含量,经过1~2年自驯化,促进土壤有机质-团聚体-生物活性联动机制的形成,使低肥力耕地快速形成生产力(图4)。新技术的应用大幅缩短了传统土壤有机质冗长的培育过程,天然腐殖质材料稳定性好,矿化分解缓慢,一次性投入可以赋存10~20年,保障了土壤有机质的持续稳定。2016年以来,该技术在河南、吉林、山东、陕西、河北、江西、浙江等10多个省份开展了试验验证及示范应用,2017—2021年仅吉林省就进行了工程化作业面积10万余亩。

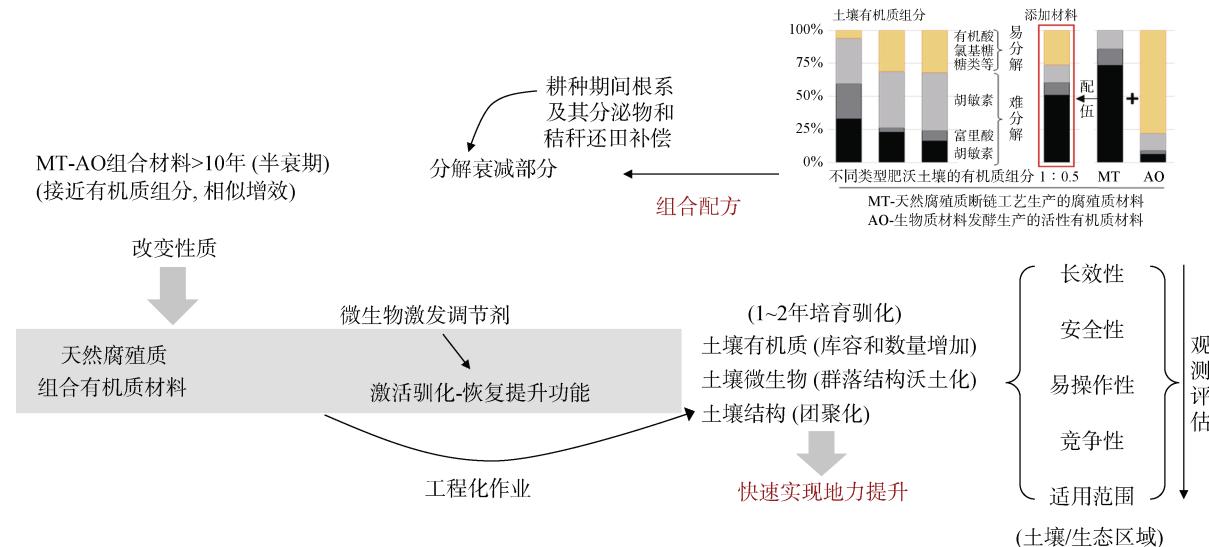


图4 新整治耕地肥沃耕层快速构建关键技术

Fig. 4 Key technologies for quickly constructing the fertile cultivated layer of newly renovated farmland

2 红壤耕地障碍消减与产能提升

我国东南红壤丘陵区(云贵川以东、长江以南)土壤面积约113万km²,占全国土地总面积的11.8%。这一地区广泛分布着铁铝土纲土壤,主要包括红壤(55.8%)、赤红壤(17.5%)、砖红壤(3.9%)和黄壤(22.8%)。红壤地区水热资源丰富(年均温15~28℃,≥10℃积温5 000~9 500℃,年均降雨1 200~1 500 mm,雨热同季),是我国水稻、油料、经济林果(柑橘等)和经济作物(茶叶等)重要产区。但红壤水土流失、土壤酸化、土壤肥力和生态

功能衰减等退化过程,制约了红壤产能的提升。

从20世纪50年代起,由李庆逵院士率领南方综合科考队进行了红黄壤区土壤资源调查和橡胶宜林地考察,并开展了红壤改良利用试验,创建了低产红壤旱地“以磷增氮”的磷矿粉直接施用技术;60和70年代,基于碳铵造粒方法建立有机肥-铵态氮配施方法,提出红壤性水稻土次生潜育化改良技术;80年代,提出红壤“脱硅富铝化”发生机制,建立了侵蚀红壤的植被恢复技术和酸性土壤改良技术^[18]。90年代以来,系统开展了红壤生态系统演变与调控、红壤质量退化和重建、红壤区域农业可持

续发展对策和模式的研究^[19]。2000 年以来, 在应用基础研究方面, 主持实施了“973”项目“东南丘陵区红壤酸化过程与调控原理”, “十三五”国家重点研发计划项目“耕地地力影响化肥养分利用的机制与调控”, 重点基金项目“广西红壤肥力与生态功能协同演变机制与调控”“农田土壤微生物多样性形成规律的热能理论研究”和“可变电荷土壤中根-土相互作用与根/土界面的电化学特征”, 中国科学院战略性先导科技专项项目“地上-地下生物协同调控与氮磷高效利用机理”。在技术研发和示范方面, 主持实施了“十一五”国家科技支撑计划“红壤退化的阻控和定向修复与高效优质生态农业关键技术研究与试验示范”, 中国科学院-江西省合作项目“耕地保育与持续高效现代农业试点工程—江西试验区”, 正在实施“十四五”国家重点研发计划项目“江南坡耕地红壤退化阻控与产能提升综合技术模式与应用”。通过长期研究, 为红壤生态系统退化和治理提供了重要理论和技术支撑, 推动了红壤区耕地地力的持续提升, 发展了红壤丘陵区生态农业模式。

2.1 评估了红壤加速酸化状况, 研发了抑制质子产生和提升土壤抗酸化能力新方法, 构建了红壤降酸和阻酸技术模式

根据 2005—2014 年全国测土配方施肥土壤基础养分数据^[20], 我国强酸性 ($\text{pH} < 5.5$) 耕地面积达 2.61 亿亩, 南方红黄壤区约 1.66 亿亩, 其中江西、福建、广东、浙江、湖南、广西强酸性耕地占比分别为 92.3%、85.4%、54.3%、41.9%、29.2% 和 28.8%。近 30 年来, 由于氮肥施用量增加, 红壤酸化加速, 长江中下游和华南区水稻土 pH 分别下降了 0.29 和 0.58 个单位, 西南区水稻土 pH 上升了 0.14 个单位^[21]。在抑制质子产生方面, 红壤旱地中配合施用尿素、铵态氮肥和硝化抑制剂抑制氮肥硝化产酸。在提升土壤的抗酸化能力方面, 短期尺度上施用秸秆生物炭可有效提升红壤酸缓冲容量, 长期尺度上施用有机肥通过提高土壤有机质提升红壤抗酸化能力。红壤中施用秸秆生物炭可以通过碳酸盐中和、羧基质子化过程消减质子, 同时提高红壤酸缓冲性、降低交换性 Al 产生^[22]。红壤配合施用石灰物质(如无重金属污染的碱渣等工业副产品)与农作物秸秆(生物炭), 可以同步改良红壤表层 (0~20 cm) 和表下

层 (20~40 cm) 酸度, 提高红壤肥力^[23]。建立了不同区域红壤主要作物的酸害阈值(如安徽和湖南油菜酸害的 pH 阈值分别为 4.9 和 5.6), 基于土壤 pH 和有机质含量提出了水稻生产的重金属安全阈值^[24], 构建了红壤碱性物质降酸、有机肥阻酸与减氮控酸技术, 在江西、安徽等省示范应用, 土壤 pH 可以提高 0.4~1.0 个单位, 油菜产量提高 50%以上^[25-26]。

2.2 查明了南方红壤地力演变状况, 揭示了红壤养分转化的微生物机制, 阐明了土壤微生物群落构建机理, 提出红壤大团聚体生物培育技术

评估了东南红壤丘陵区土壤有机质和养分状况, 发现红壤旱地全氮中度贫瘠(约 63%)、速效磷严重贫瘠(约 78%), 明确了 1980 年以来红壤旱地有机质含量下降、水稻土有机质含量提升趋势^[27]。1980—2011 年间, 由于大面积实施秸秆还田, 东部和中南部土壤有机碳储量分别增加了 8.33 和 6.67 的 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[28]。

通过长期试验揭示了红壤秸秆长期腐解过程中的微生物碳泵机制, 发现 α -变形菌纲的根瘤菌驱动胞外酶修饰作用、毛壳属真菌驱动微生物同化作用, 微生物关键种演替协同调控秸秆残体化学组成在快分解期趋异、在慢分解期趋同^[29]。针对瘠薄红壤稻田建立了秸秆-猪粪周年协同培肥技术, 提升团聚体碳累积效率和生物活性, 长期培肥后 $> 1 \text{ mm}$ 团聚体比例提高 1.4 个百分点, 其中有机碳增加 7.7%以上, 微生物碳源代谢能力增加 21%以上, 生物源指数 BIX 提升 5.3%, BIX 对氮肥利用率贡献率达 60%, 稻田氮肥利用率提升 13 个百分点以上^[30-31]。

在揭示农田养分盈余对土壤养分库容促进作用的基础上, 揭示了长期培肥过程中土壤生物网络形成对养分转化的促进机制, 阐明了大团聚体中线虫捕食微生物促进红壤“固碳供氮释磷”机制。研究发现, 旱地红壤有机培肥后促进了大团聚体的形成, 大团聚体中线虫对微生物的捕食作用抑制土壤碳代谢(“负反馈”), 提高有机质积累能力; 促进氮代谢和磷代谢(“正反馈”), 提高氮磷供应能力, 其关键机制是食细菌线虫的优势属(原杆属 *Protorhabditis*)捕食生物网络中的关键微生物硝化螺菌属(*Nitrosospira cluster 3a, 9, 10*)和中慢生型根瘤菌属(*Mesorhizobium*)^[32-33]。阐明了红壤区花生连作

障碍发生机制,发现花生根系分泌酚酸减少有益菌群(放线菌、绿僵菌属等)丰度,增加潜在病原性真菌(镰刀菌属)及病害发生率^[34],研发了花生合理间作抑病增产技术^[35]和根际微生物群落促生功能调控技术^[36]。

结合野外试验、模拟试验和样带调查,创建了温度和pH协同驱动细菌多样性模型^[37-38],阐明土壤生物体型影响扩散速率和生态位宽度、驱动生物

群落构建机制^[39],发展了土壤生物多样性代谢模型(图5)。发现通过长期均衡施肥提供充足养分,激发细菌、真菌、原生生物和线虫网络的跨营养级相互作用,提高碳代谢功能稳定性机制^[40]。基于土壤微生物组装和功能调控机制,提出“扩增土壤蓄纳养分功能-提升生物养分转化功能”双核驱动地力调控原理(图6),建立了“红壤大团聚体生物培肥”技术^[41]。

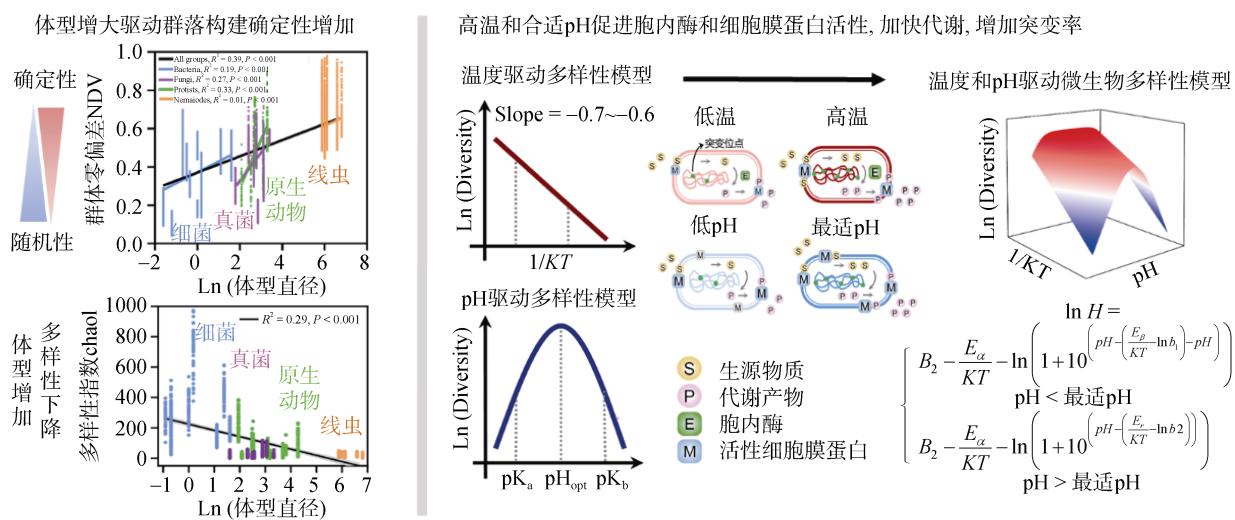


图5 生物体型驱动生物群落构建以及温度和pH驱动细菌多样性模型

Fig. 5 The community structured by organism body size and the bacterial diversity model driven by temperature and soil pH

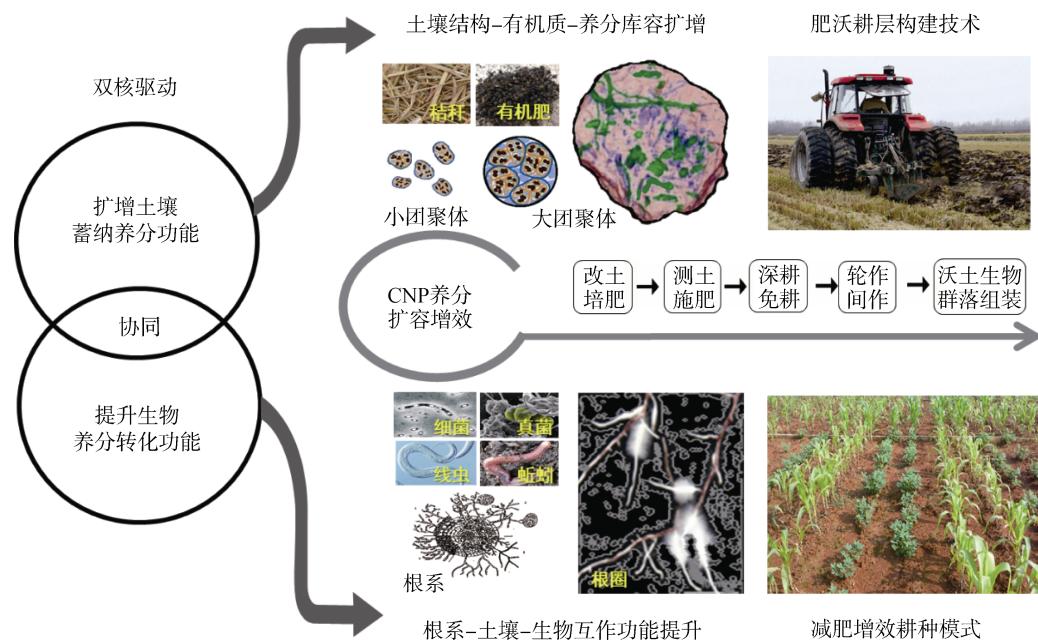


图6 “扩增土壤蓄纳养分功能-提升生物养分转化功能”双核驱动地力调控原理

Fig. 6 The dual-core driving principle for regulating soil fertility by expanding soil nutrient storage function and enhancing biological nutrient transformation function

2.3 持续提升“顶林-腰果-谷农-塘鱼”生态循环农业模式, 建立江西省红壤耕地保育技术体系, 依据旱地坡度和稻田地力创建了耕地生态培肥增效技术模式

从20世纪起, 从防酸控蚀、保水增肥、建立红壤丘陵立体利用模式方面开展了红壤退化的综合治理。研发了侵蚀红壤快速绿化与水土保持技术、退化土壤肥力恢复与优化施肥技术、酸性土壤快速改良技术、蓄-保-灌结合防御季节性干旱技术。优化了红壤丘陵区“顶林-腰果-谷农-塘鱼”生态循环农业模式, 基于沼气工程优化了猪-沼-柑橘/经济作物轮作和间作/水稻种养循环模式, 确定了中小型养殖场(年出栏1200头猪, 年产生48吨猪粪和360吨冲栏水)有机肥养分资源合理分配比为100亩旱地、50亩水田和10亩柑橘园。2000—2002年在江西、湖南、福建等省应用面积约220万公顷, 新增产值约130亿元, 新增利润约12亿元, 促进了红壤区域特色农业的发展。“中国红壤退化机制与防治”获2004年度国家科学技术进步奖二等奖。

开展了江西省红壤耕地保育技术研究, 建立了红壤酸化和花生连作障碍修复模式, 通过应用抗病品种, 结合土壤改良剂和生物有机肥施用, 以及药材+花生间作, 提高土壤pH, 调节了土壤微生物区系, 降低了病原菌丰度和有毒物质积累, 从而克服连作障碍; 集成了稻秆快腐还田和肥力培育技术,

在绿肥/秸秆冬翻还田基础上配合施用腐秆菌剂, 增加了土壤有机质, 增强了微生物对土壤养分的固持, 促进了秸秆分解, 降低了秸秆腐解残留率, 增加了秸秆NPK养分释放率, 提高土壤速效氮、磷养分, 减少了化肥的施用量; 开发了双季稻高产设计栽培模式, 早稻以提高有效穗数和穗粒数为目标, 晚稻在适宜穗数的基础上进一步提高结实率; 建立了复合型持续增产模式、平原高产型超高产、山区低产型耕地定向培育模式和丘陵盆地中产型轻型生产模式。在江西省14个县市示范推广1565万亩, 增产粮食近100万吨, 增效约18亿元。创新了红壤秸秆激发式还田与生态间作控蚀培肥技术、红壤稻田秸秆-猪粪-绿肥周年协同培肥技术, 依据旱地坡度创建生态培肥增效($<5^{\circ}$ 缓坡旱地)和控流聚土培肥($5^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 旱坡地)模式, 依据稻田地力等级创建增碳促肥提效(四等以下)和稳碳减肥增效(四等以上)模式(图7)。2018—2020年在江西省累计推广应用4581.6万亩, 增产164.7万吨, 增效24.3亿元, 推广面积达全省耕地面积30%以上, 全省耕地质量增速较“十二五”提高5倍, 支撑了江西省高标准农田建设行动。“江西省耕地保育与持续高效现代农业技术研究与示范”、“红壤丘陵区花生连作障碍阻控及高产高效关键技术研究与应用”、“江西省耕地质量提升关键技术与集成应用”先后获得2011年、2015年和2021年江西省科技进步二等奖。

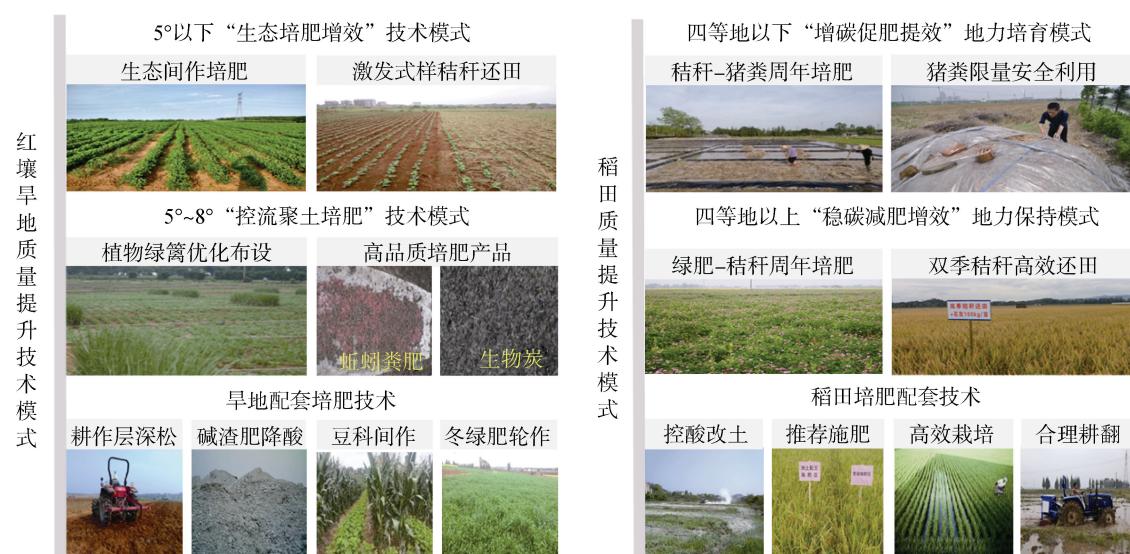


图7 江南红壤丘陵区旱地和稻田质量分类提升技术模式

Fig. 7 The technical models for classification improvement of upland and paddy field quality in the red soil hilly region of Southern Yangtze River

3 盐渍化耕地障碍消减与产能提升

我国目前拥有集中连片盐碱荒(草)地资源约2亿亩,以及占全国耕地面积5.9%、总面积1.14亿亩的盐碱化耕地,集中分布在我国东北(吉林、黑龙江和内蒙古)、青新(青海、新疆)、西北内陆(内蒙古、宁夏、甘肃等)以及滨海和华北平原(河北、山东、江苏等)共四个地区,其盐碱荒(草)地面积占比分别为19.1%、57.1%、22.9%和0.8%,盐碱化耕地面积占比分别为18.5%、33.1%、15.4%和33.0%。土壤盐碱障碍顽固与反复、水资源匮乏和适生作/植物品种缺少制约了这部分盐碱地的开发利用与产能提升^[42]。

从20世纪60年代起熊毅院士率队在黄淮海平原开展土壤次生盐渍化治理研究,提出以“井灌井排”为核心的治理模式,为黄淮海平原综合治理开发做出了突出贡献。70年代以来,对我国主要类型盐碱土的分布规律、发生演变、基本特性及改良利用等进行了系统全面的研究。80年代,在中国科学院封丘农业生态实验站建成国际先进的地下大型土壤水盐运动模拟实验室,引领了我国土壤水盐运动规律和次生盐碱化的发生及其预测预报研究^[43]。2000年以来,系统研究了土壤盐渍化多尺度监测评估、水盐运移数值模拟、水盐过程调控与盐渍化防控、盐渍土快速增碳培肥等方面理论与技术。近10年来,率先提出盐碱地分类治理理念,主导了国内盐碱地分类治理与农业高效利用研究工作^[44],聚焦滨海和河套灌区开展以节水控盐和养分增效为目标、“控水、控盐、控肥”为主要特征的盐碱障碍生态消减理论与技术研究。

2005年以来,系统开展了盐碱地水盐监测评估与数值模拟、土壤水盐调控与培肥熟化、盐碱地农业高效利用与盐土农业特色利用模式的研究,获得系列省部级科技进步奖。在应用基础研究方面,先后主持实施NSFC-山东联合基金“黄河三角洲盐渍农田土壤氮磷养分增效机理”、国家重点研发计划课题“土壤盐渍化降低养分利用效率机理及其增效途径”与“区域山水林田湖草沙和盐渍化对节水的响应与系统优化”。在技术研发和示范方面,主持实施公益性行业(农业)科研专项经费项目“盐碱地农业高效利用配套技术模式研究与示范”、国家“863”

计划重点项目“苏北滩涂耐海水植物新品种筛选培育及综合栽培技术研究与示范”、国家重点研发计划项目“河套平原盐碱地生态治理关键技术研究与集成示范”、中国科学院“STS”计划课题“滨海盐碱地分类治理技术集成与示范”。目前主持国家重大科技项目“耕地盐碱退化阻控和肥力恢复关键技术及集成示范”。通过长期研究,为我国盐碱地生态治理、退化阻控、地力培育和水肥资源高效利用提供重要理论和技术支撑,助推盐碱区耕地提质、荒地改造与产能扩增。

3.1 精细刻画了多尺度土壤水盐过程,明晰了水盐运动精准定向调控机制与方法

多时空尺度土壤水盐运动过程及其调控机理仍是盐渍化防控与障碍消减的核心问题。在田间尺度上,Hydrus、Swap、Comsol等瞬态模型被广泛用于精细刻画土壤溶质运移过程;研究发现在Hydrus模型中引入磁感式大地电导率仪EM38近地传感信息作为辅助数据源,建立模型与EM38信息的数据同化方法,可实时修正模型参数并调整运行轨迹,降低土壤盐分预测均方根误差15%~22%^[45]。在区域尺度上,通过模型率定与参数优化,应用SaltMod、SahysMod等稳态模型可改进G-SPAC系统水盐过程中长期模拟,土壤盐分和地下水预测精度分别提高9%~18%和4%~15%^[46-47]。在流域尺度上,发现降水、土壤水和地下水耦合水盐交互过程,构建的结合气象、水盐信号序列的DWT-NF(离散小波变换-模糊神经)“纯”动态中长期预测模型,减少模型预测的迭代次数,弱化误差累积效应^[48]。

土壤水盐过程定向调控机理为盐渍障碍精准消减提供理论依据。研究发现利用农田管理措施改变关键土壤物理参数可驱动盐分的定向转移与聚集,明确了土壤上、下边界条件和饱和导水率 K_s 是敏感参数^[49]。地面覆盖可改变土壤上边界条件,重度盐渍土地表覆膜可减少腾发量12.1%~25.5%,降低表层土壤积盐量14.3%~32.4%^[50];暗管排盐改变土壤下边界条件且具有较高脱盐速率,与覆膜、旱季微咸水灌溉、局部旱改水等措施相比,其平均脱盐速率分别提高38.9%、183.7%和93.8%^[51];构建稳定疏松亚表层可单向调节土壤水盐运动,在30 cm深度埋设木质素纤维和秸秆土壤孔隙度提高6%~20%、淋盐效率提高22.1%~29.5%,并打破毛细管

阻断返盐^[52]。集成了盐渍土“上覆-中阻-下排”立体长效控盐技术体系(图8),其中上、下边界调控

和隔层创建对耕层土壤抑盐阻盐的贡献分别为21%、34%和45%^[53]。

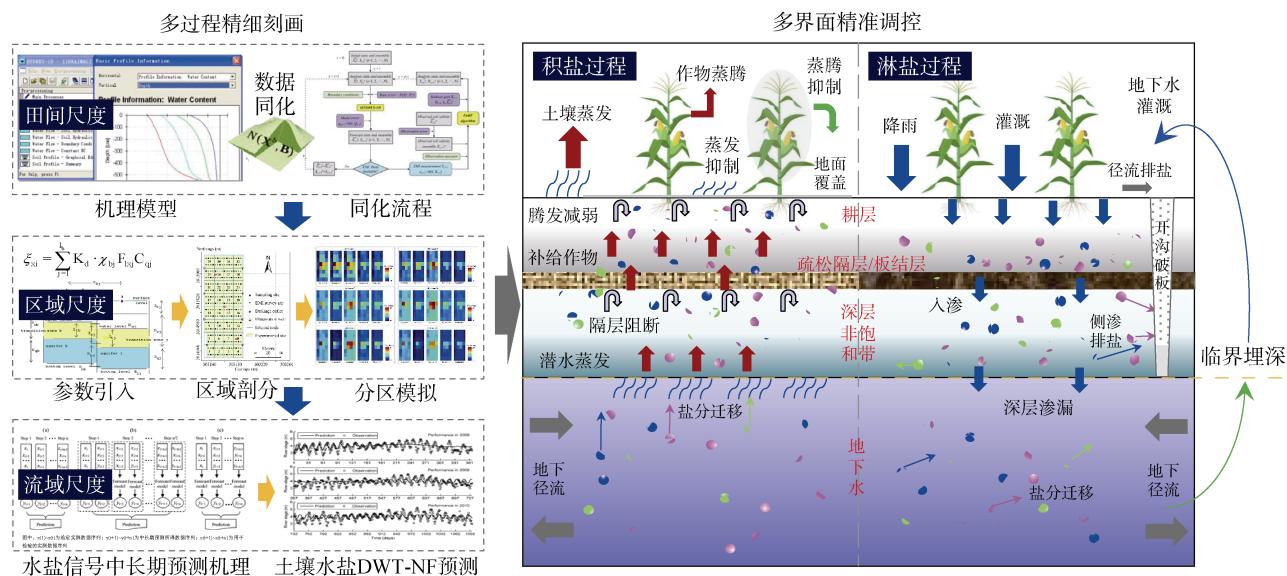


图8 盐渍土“上覆-中阻-下排”长效控盐技术

Fig. 8 The long-term salt control technology for saline-alkaline soil with “overlying in the top-blocking in the middle-drainage in the bottom”

3.2 揭示了土壤盐渍化对氮素养分利用的制约机制,厘清了土壤水盐调控伴生氮素迁移转化过程,提出了盐渍障碍消减与养分增效协同机理与调控技术

盐渍化农田具有迥异于常规农田的氮素养分形态、有效性以及转化、迁移与作物吸收过程^[54]。研究发现土壤盐渍化推迟氨挥发进程,但通过延长氨挥发持续时间、提高平均氨挥发速率进而增加氨挥发量,土壤盐分每增加 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均氨挥发速率提高 $0.05\sim0.12\text{ mg}\cdot(\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$,氨挥发量增加 $1.90\sim4.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[55];土壤盐分对有机氮矿化、硝化的影晌具有阈值效应,土壤盐分低于 $3.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的轻度盐渍化基本不影响矿化和硝化,超过该阈值显著降低其速率,中度盐渍土较非盐渍土的矿化、硝化平均速率(10 d)分别降低42.2%和45.8%^[56]。监测结果表明,与轻度盐渍土相比,中度盐渍土提高氨挥发量 $6.5\%\sim10.3\%$ 、氮淋失量 $4.7\%\sim8.9\%$,减少当季作物吸氮量 $7.7\%\sim10.4\%$ ^[57]。土壤盐渍化具有抑制作物吸氮的直接机制,以及增加氨挥发量、抑制氮素转化、提高氮淋失等制约氮素利用率的间接机制。

盐渍农田土壤水盐迁移过程与氮素迁移、转化过程耦合并共同影响氮素赋存形态与吸收利用^[58]。秸秆生物炭具有疏松耕层土壤、促进盐分淋洗、增

加铵态氮吸附的正向效应以及抑制硝化的反向效应^[59]。研究发现生物炭通过改变AOB群落结构,降低 $amoA$ -AOB基因拷贝和 $Nitrosospira$ 相对丰度抑制硝化过程^[60];同时,施用生物炭 $15\sim22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附量 $0.3\sim1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,减少氮淋失通量 $16.8\%\sim33.2\%$ ^[61];此外,生物炭通过缓解水盐胁迫与促进作物生长,提高土壤微生物生物量氮(MBN)和作物吸氮量^[62]。创建了盐渍农田施用生物炭配合氮素运筹和微咸水灌溉的控盐减氮技术(图9)^[63],可以促进氮素吸收65%~75%、吸附固持氮素5%~10%、减少氮素淋失15%~20%、增加微生物氮素同化3%~8%。

3.3 持续提升盐碱地分区分类治理利用水平,创新了滨海盐碱地加速治理培育与农业高效利用技术体系,创建了河套灌区土壤次生盐渍化生态治理与生产-生态可持续发展模式

从2002年开始,围绕着盐碱地资源快速监测、定量评估、分区治理和分类利用,利用磁感式大地电导率仪EM38和EM31的非接触式与速测优势,完善并优化了由EM38和EM31联用、GIS和GPS结合、数据自动采集与动力牵引平台融合组成的土壤盐渍化移动磁感式测定系统,确定了田间磁感式测定影响因素的主要率定指标,构建了基于Tikhonov正则化

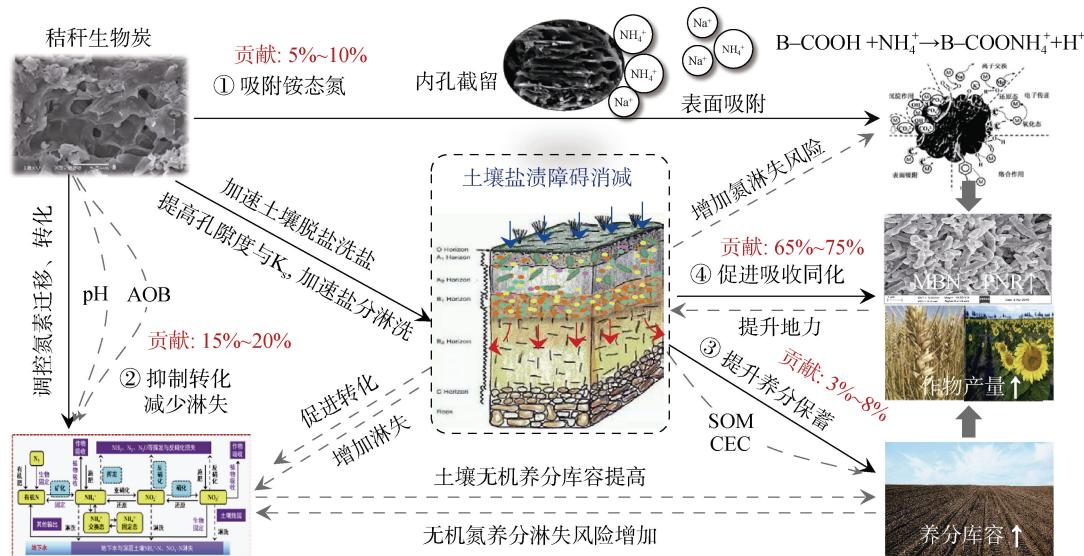


图 9 盐渍农田施用生物炭配合氮素运筹和微咸水灌溉的控盐减氮技术

Fig. 9 The technology to combine biochar application with nitrogen operation and brackish water irrigation for controlling salt and reducing nitrogen fertilization in saline farmland

和线性响应方程的剖面土壤盐分分层反演模型,形成了区域土壤盐分空间分布与时空演变过程的精准解译技术,提出了盐碱地分区分类灌排管理、土壤培肥和作物布局方案,为盐碱地质量快速精准评估、高效

改造和持续利用提供技术支撑(图10)。在江苏、山东、河南、新疆等地示范应用122万亩,盐碱地改良利用节本增效2.36亿元。“盐渍土壤的磁感式调查规划技术与应用”获2009年江苏省科技进步三等奖。

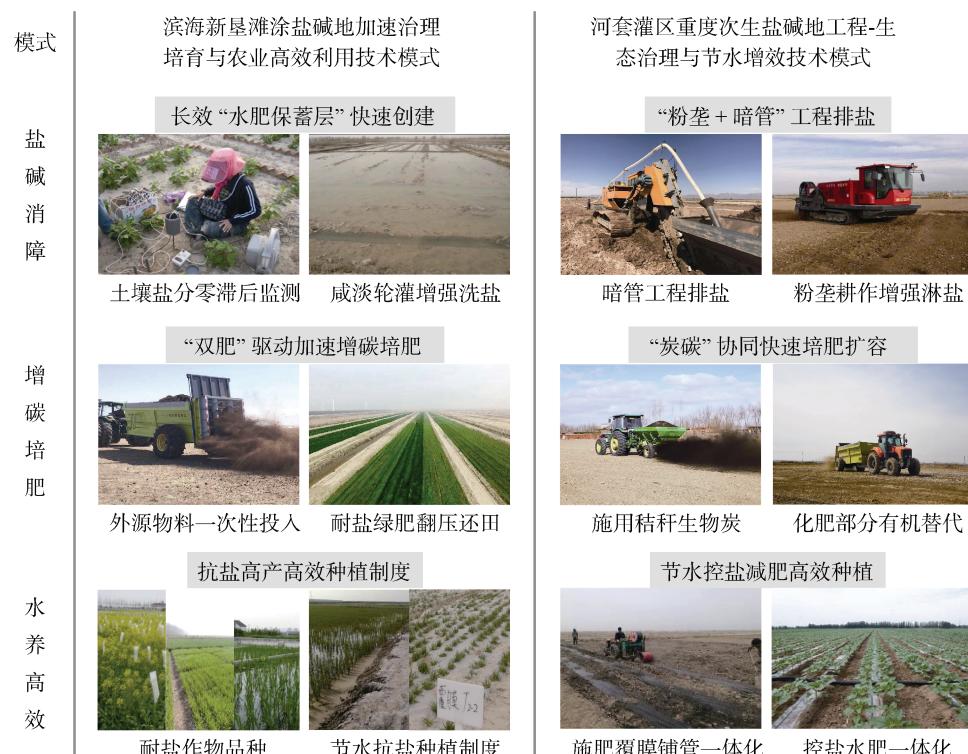


图 10 滨海和河套灌区盐碱地消障提质与增产增效技术模式

Fig. 10 The technical models for obstacles reduction, quality promotion, yield increase and efficiency enhancement of saline soil in the coastal region and Hetao Irrigation District

针对东部滨海地区土壤盐碱化监测精度低、脱盐周期长、培肥速率慢、配套栽培技术少等问题,发明了瞬变土壤盐分的滞后监测传感器,提高数据采集效率10倍以上;构建了土壤盐渍化多尺度实时监测评估新技术,精度误差<10%;研发了增强盐分淋洗、维持长效“水肥保蓄层”的节水控盐技术,提高耕层淋盐效率30%~45%,节水15%以上;创建了外源有机物料一次性投入配合绿肥种植还田的“双肥”驱动快速增碳培肥技术,重度盐碱地有机质年增加2~3 g·kg⁻¹,盐碱荒地1~2年达到补充耕地质量要求;构建盐碱地稻-麦-油作物高产高效与盐土植物适土种植制度,提高产量22%~34%,减少水肥投入量15%以上(图10)。在江苏、山东、浙江等沿海地区推广805万亩,累计增效11.2亿元。“滨海盐碱地加速治理培育与农业高效利用”获2015年江苏省科学技术二等奖。

针对北方河套灌区因灌排不畅导致的土壤次生盐碱化、养分利用率低等问题以及农业-生态协同发展的需求,基于土壤盐渍障碍生态消减与盐渍土养分增效的理论和技术,集成创建了河套灌区盐碱地工程-生态治理与“三控三提”增产增效技术模式^[64]。该模式利用生物炭调控土壤水盐肥耦合迁移、转化与作物吸收过程,建立生物炭施用疏松保蓄层创建技术,以淡化沃层快速营建促进“控水提质”;基于盐分在“土壤-地下水”、“耕地-荒地”系统迁移与源汇转换关系,提出“粉垄+暗管”工程排盐技术,利用粉垄促淋和暗管增排促进“控盐提产”;基于水氮分时滴施对氮素养分迁移、转化、固持特征的影响,形成盐碱地微咸水控盐滴灌水氮一体化技术,通过盐肥分时调控与水肥精准共施促进“控肥提效”。2017—2022年在河套灌区的林果、饲草、粮经等产业累计推广应用184万亩,增产21.2万吨,实现土壤盐碱化降低1个等级,减少化肥用量11%~26%,产能增加9%~21%,水分生产力提高18%~41%,每亩节本增收110~240元。

4 未来面临的主要问题和发展方向

我国耕地资源利用强度高,导致土壤退化和农田生态功能衰减,制约了耕地产能持续提升和可持续利用。在高标准农田建设过程中,中低产耕地由于存在多种土壤障碍,如土层浅薄、盐分高、酸度

强、有机质低、养分瘠薄、水分资源缺等,导致耕地质量难以快速提升。同时,部分补充耕地和高标准农田建成后存在耕作层有机质含量过低、有效土层厚度不足、地力培肥措施不完善等问题,难以实现“一季千斤,两季吨粮”的高产稳产目标,亟须开展高标准农田的改造提升,通过地力培育措施实现粮食综合产能的稳定提升。

在耕地资源保护和可持续利用方面,土壤健康管理已成为国际前沿焦点。美国2017年制定《土壤健康路线图》,开展农场尺度土壤健康管理行动;欧盟2020年制定“地平线欧洲”行动计划,实施土壤健康与食物健康管理行动。我国亟须发展土壤健康管理的生物技术、产品和模式,支撑农业绿色高质量发展,实现我国农业向数量质量效益并重、资源生态安全和土壤健康的更高目标发展。

未来,围绕我国耕地质量建设和保护的核心任务,重点在资源调查与农田建设管理、耕地障碍消减与产能提升、土壤健康与生态保护3个方向开展系统研究,聚焦土壤高强度利用过程中的重大科技问题,全链条设计关键技术创新、产品研发和典型场景应用示范,突破土壤障碍消减技术瓶颈,研发土壤调理剂和生物培肥系列产品,提升区域模式落地率,建立我国耕地质量建设和可持续利用的系统解决方案。

在耕地土壤资源调查与农田建设管理方向,针对我国土壤资源不清、障碍清单不明,耕地土壤健康清单不完善,农田建设缺乏科学依据等突出问题,研究星空地一体化立体综合调查技术,创新耕地土壤障碍、土壤质量、土壤健康、土壤环境和耕地产能智能监测,高标准农田建设技术,开展全国土壤第三次普查工作,建立障碍性土壤耕地质量监测平台和耕地资源演变大数据平台,提出不同区域高标准农田产能提升以及耕地资源可持续利用对策,集成我国重点区域土壤改良与治理修复的整体解决方案。

在耕地土壤障碍消减与产能提升方向,针对我国土壤酸化、盐碱、瘠薄、耕层浅薄压实等障碍问题,研究障碍形成机制、驱动因素、演变规律、消减机制,创新耕层扩容、生物培肥、土壤控酸、控盐改碱、水肥高效利用、土壤养分均衡化等土壤消障关键技术;研制新型土壤结构调理、多功能酸化修复、盐碱地改良、功能性有机肥等新产品、新材

料，实现土壤障碍的大面积消减和耕地质量的均衡提升。重点突破土壤扩容与耕层重建技术、土壤增碳与生物培肥技术、土壤控酸与污染减量净化技术、控盐改碱与水肥高效技术以及土壤养分均衡化与内稳定性地力提升技术。

在耕地土壤健康诊断与生态工程技术方向，针对我国耕地土壤生物功能衰减、农田土传病害多、流域耕地利用模式单一、土壤碳中和潜能难以发挥等生态问题，研究土壤生物网络结构、分布格局、演变过程、健康土壤形成机制等，构建不同农田生态系统土壤健康评价的指标体系和评价方法，形成土壤生物网络关键生物种群健康基准值及其诊断标准，建立健康土壤生物网络结构和功能调控的生态工程技术，创新健康土壤保育、流域多元作物低碳种植等技术与产品，集成示范不同生态区耐逆促生抗病和固碳减排协同的健康土壤构建模式。

参考文献 (References)

- [1] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. National high standard farmland construction plan(2021-2030)[R]. <http://www.ntjss.moa.gov.cn/zcfb/202109/P020210915673910083593.pdf>. [中华人民共和国农业农村部. 全国高标准农田建设规划 (2021-2030 年) [R]. 2021. <http://www.ntjss.moa.gov.cn/zcfb/202109/P020210915673910083593.pdf>.]
- [2] Ding W X, Meng L, Yin Y F, et al. CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39 (2): 669—679.
- [3] Chen Z M, Xu Y H, Zhou X H, et al. Extreme rainfall and snowfall alter responses of soil respiration to nitrogen fertilization: A 3-year field experiment[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23 (8): 3403—3417.
- [4] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, et al. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124: 170—177.
- [5] Feng Y Z, Chen R R, Hu J L, et al. *Bacillus asahii* comes to the fore in organic manure fertilized alkaline soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 81: 186—194.
- [6] Zhang H J, Ding W X, Yu H Y, et al. Linking organic carbon accumulation to microbial community dynamics in a sandy loam soil: Result of 20 years compost and inorganic fertilizers repeated application experiment[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51 (2): 137—150.
- [7] Zhang H J, Ding W X, Yu H Y, et al. Carbon uptake by a microbial community during 30-day treatment with ¹³C-glucose of a sandy loam soil fertilized for 20 years with NPK or compost as determined by a GC-C-IRMS analysis of phospholipid fatty acids[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 57: 228—236.
- [8] Zhang X F, Xin X L, Zhu A N, et al. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain[J]. *CATENA*, 2017, 156: 176—183.
- [9] Zhang X F, Zhu A N, Yang W L, et al. Accumulation of organic components and its association with macroaggregation in a sandy loam soil following conservation tillage[J]. *Plant and Soil*, 2017, 416 (1): 1—15.
- [10] Zhang X F, Xin X L, Zhu A N, et al. Linking macroaggregation to soil microbial community and organic carbon accumulation under different tillage and residue managements[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 178: 99—107.
- [11] Zhang J B. Improving inherent soil productivity underpins agricultural sustainability[J]. *Pedosphere*, 2023, 33 (1): 3—5.
- [12] Ma D H, Zhang J B, Horton R, et al. Analytical method to determine soil hydraulic properties from vertical infiltration experiments[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81 (6): 1303—1314.
- [13] Wu S C, Ma D H, Liu Z P, et al. An approximate solution to one-dimensional upward infiltration in soils for a rapid estimation of soil hydraulic properties[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128188.
- [14] Xu J N, Pan X C, Zhang J B, et al. A framework for efficient soil architecture mapping using ground-penetrating radar[J]. *CATENA*, 2023, 223: 106906.
- [15] Li X P, Zhang J B, Liu J T, et al. A modified checkbook irrigation method based on GIS-coupled model for regional irrigation scheduling[J]. *Irrigation Science*, 2011, 29 (2): 115—126.
- [16] Niu Y J, Li X P, Zhang J B, et al. Inversion of leaf area index in winter wheat by merging UAV LiDAR with multispectral remote sensing data[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (1): 161—171. [牛玉洁, 李晓鹏, 张佳宝, 等. 融合无人机载激光雷达与多光谱遥感数据的冬小麦叶面积指数反演[J]. 土壤学报, 2022, 59 (1): 161—171.]
- [17] Zhang J B, Lin X G, Li H. A new generation of controlling technology for the medium and low-yield fields and its potential in large-area balanced grain production increase[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2011, 26 (4): 375—382. [张佳宝, 林先贵, 李晖. 新一代中低产田治理技术及其在大面积均衡增产中的潜力[J]. 中国科学院院刊, 2011, 26 (4): 375—382.]
- [18] Li Q K. Red soil of China[M]. Beijing: Science Press, 1983. [李庆逵. 中国红壤[M]. 北京: 科学出版社,

- 1983.]
- [19] Zhao Q G. Temporal and spatial changes, mechanism and regulation of soil degradation in red soil region of Eastern China[M]. Beijing: Science Press, 2002. [赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002.]
- [20] National Agricultural Technology Extension Service Center. Soil basic database for national soil testing and formulated fertilization: 2005-2014[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015. [全国农业技术推广服务中心. 测土配方施肥土壤基础养分数据集: 2005-2014[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.]
- [21] Ye Y C, Sun B, Liu S G, et al. Spatio-temporal variation of paddy soil acidification and its response to nitrogen surplus in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52 (2): 246-256. [叶英聪, 孙波, 刘绍贵, 等. 中国水稻土酸化时空变化特征及其对氮素盈余的响应[J]. 农业机械学报, 2021, 52 (2): 246—256.]
- [22] Shi R Y, Ni N, Nkoh J N, et al. Biochar retards Al toxicity to maize (*Zea mays* L.) during soil acidification: The effects and mechanisms[J]. Science of the Total Environment, 2020, 719: 137448.
- [23] Li J Y, Liu Z D, Zhao W Z, et al. Alkaline slag is more effective than phosphogypsum in the amelioration of subsoil acidity in an Ultisol profile[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 149: 21—32.
- [24] Sun B, Ma Y B, Xing J S, et al. Safety threshold values of cadmium, lead, chromium, mercury and arsenic in soil for rice production: GB/T 36869—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. [孙波, 马义兵, 辛景树, 等. 水稻生产的土壤镉、铅、铬、汞、砷安全阈值: GB/T 36869-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.]
- [25] Sun B. Control and ecological rehabilitation of red soil degradation[M]. Beijing: Science Press, 2011. [孙波. 红壤退化阻控与生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [26] Xu R K. Amelioration principles and technologies for acidified red soils[M]. Beijing: Science Press, 2013. [徐仁扣. 酸化红壤的修复原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [27] He Y Q. Evolvement and regulation of red soil quality[M]. Beijing: Science Press, 2008. [何园球. 红壤质量演变与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [28] 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.
- [29] Wang X Y, Liang C, Mao J D, et al. Microbial keystone taxa drive succession of plant residue chemistry[J]. The ISME Journal, 2023, 17: 748—757.
- [30] Chen X F, Li Z P, Liu M, et al. Microbial community and functional diversity associated with different aggregate fractions of a paddy soil fertilized with organic manure and/or NPK fertilizer for 20 years[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15 (2): 292—301.
- [31] Wu M, Li G L, Wei S P, et al. Discrimination of soil productivity and fertilizer-nitrogen use efficiency in the paddy field of subtropical China after 27 years different fertilizations[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2021, 67 (2): 166—178.
- [32] Jiang Y J, Sun B, Li H X, et al. Aggregate-related changes in network patterns of nematodes and ammonia oxidizers in an acidic soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 88: 101—109.
- [33] Jiang Y J, Liu M Q, Zhang J B, et al. Nematode grazing promotes bacterial community dynamics in soil at the aggregate level[J]. The ISME Journal, 2017, 11 (12): 2705—2717.
- [34] Li X G, Jousset A, de Boer W, et al. Legacy of land use history determines reprogramming of plant physiology by soil microbiome[J]. The ISME Journal, 2019, 13 (3): 738—751.
- [35] Li X G, de Boer W, Zhang Y N, et al. Suppression of soil-borne *Fusarium* pathogens of peanut by intercropping with the medicinal herb *Atractylodes lancea*[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2018, 116: 120—130.
- [36] Chen Y, Bonkowski M, Shen Y, et al. Root ethylene mediates rhizosphere microbial community reconstruction when chemically detecting cyanide produced by neighbouring plants[J]. Microbiome, 2020, 8: 4.
- [37] Luan L, Jiang Y J, Dini-Andreote F, et al. Integrating pH into the metabolic theory of ecology to predict bacterial diversity in soil[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, 120 (3): e2207832120.
- [38] Luan L, Dini-Andreote F, Sun B, et al. Modeling soil bacterial diversity: Challenges and opportunities[J]. Trends in Microbiology, 2023, 31 (9): 885—888.
- [39] Luan L, Jiang Y J, Cheng M H, et al. Organism body size structures the soil microbial and nematode community assembly at a continental and global scale[J]. Nature Communications, 2020, 11: 6406.
- [40] Zhu L Y, Chen Y, Sun R B, et al. Resource dependent biodiversity and potential multi-trophic interactions determine belowground functional trait stability[J]. Microbiome, 2023, 11: 95.
- [41] Sun B, Zhang X D, Lu Y H. Improvement of cultivated land fertility and efficient utilization of chemical fertilizers and nutrients[M]. Beijing: Science Press, 2022. [孙波, 张旭东, 陆雅海. 耕地地力提升与化肥养分高效利用[M]. 北京: 科学出版社, 2022.]

- [42] Hu Y, Yang F, Yang N, et al. Analysis and prospects of saline-alkali land in China from the perspective of utilization[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54 (2): 489—494. [胡炎, 杨帆, 杨宁, 等. 盐碱地资源分析及利用研究展望[J]. 土壤通报, 2023, 54 (2): 489—494.]
- [43] Yang J S, Yao R J. Management and efficient agricultural utilization of salt-affected soil in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30 (s): 162—170. [杨劲松, 姚荣江. 我国盐碱地的治理与农业高效利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30 (s): 162—170.]
- [44] Yang J S, Yao R J, Wang X P, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (1): 10—27. [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.]
- [45] Yao R J, Yang J S, Wang X P, et al. Improving soil salinity simulation by assimilating electromagnetic induction data into HYDRUS model using ensemble Kalman filter[J]. Journal of Environmental Informatics, 2022, 39 (2): 81—96.
- [46] Yao R J, Yang J S, Zhang T J, et al. Studies on soil water and salt balances and scenarios simulation using SaltMod in a coastal reclaimed farming area of Eastern China[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131: 115—123.
- [47] Yao R J, Yang J S, Wu D H, et al. Calibration and sensitivity analysis of SahysMod for modeling field soil and groundwater salinity dynamics in coastal rainfed farmland[J]. Irrigation and Drainage, 2017, 66 (3): 411—427.
- [48] Yu S P, Yang J S, Liu G M, et al. Improvement for the multi-scale periodic characteristics revealing of precipitation signals and its impact assessment on soil hydrological process by combining HHT and CWT approaches[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2015, 15: 393—407.
- [49] Zhang Y, Yang J S, Yao R J, et al. Short-term effects of biochar and gypsum on soil hydraulic properties and sodicity in a saline-alkali soil [J]. Pedosphere, 2020, 30 (5): 694—702.
- [50] Wang X P, Yang J S, Yao R J, et al. Manure plus plastic film mulch reduces soil salinity and improves barley-maize growth and yield in newly reclaimed coastal land, Eastern China[J]. Water, 2022, 14 (19): 2944.
- [51] Yao R J, Yang J S, Wu D H, et al. Scenario simulation of field soil water and salt balances using SahysMod for salinity management in a coastal rainfed farmland[J]. Irrigation and Drainage, 2017, 66 (5): 872—883.
- [52] Zhu W, Yang J S, Yao R J, et al. Soil water-salt control and yield improvement under the effect of compound control in saline soil of the Yellow River Delta, China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 263: 107455.
- [53] Yao R J, Gao Q C, Liu Y X, et al. Deep vertical rotary tillage mitigates salinization hazards and shifts microbial community structure in salt-affected anthropogenic-alluvial soil[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 227: 105627.
- [54] Li H Q, Yao R J, Yang J S, et al. Influencing mechanism of soil salinization on nitrogen transformation processes and efficiency improving methods for high efficient utilization of nitrogen in salinized farmland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3915—3924. [李红强, 姚荣江, 杨劲松, 等. 盐渍化对农田氮素转化过程的影响机制和增效调控途径[J]. 应用生态学报, 2020, 31 (11): 3915—3924.]
- [55] Zhu W, Yang J S, Yao R J, et al. Nitrate leaching and NH₃ volatilization during soil reclamation in the Yellow River Delta, China[J]. Environmental Pollution, 2021, 286: 117330.
- [56] Zhu H, Yang J S, Li Y L, et al. Effects of soil salinity on nitrification and ammonia-oxidizing microorganisms in coastal reclaimed farmland soil[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22 (2): 2743—2754.
- [57] Sun Y P, Zhang X, Xiao J T, et al. Saline-alkaline characteristics during desalination process and nitrogen input regulation in reclaimed tidal flat soils [J]. Sustainability, 2023, 15 (5): 4378.
- [58] Yao R J, Li H Q, Zhu W, et al. Biochar and potassium humate shift the migration, transformation and redistribution of urea-N in salt-affected soil under drip fertigation: Soil column and incubation experiments[J]. Irrigation Science, 2022, 40 (2): 267—282.
- [59] Sun Y P, Yang J S, Yao R J, et al. Biochar and fulvic acid amendments mitigate negative effects of coastal saline soil and improve crop yields in a three year field trial[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 8946.
- [60] Yao R J, Li H Q, Yang J S, et al. Combined application of biochar and N fertilizer shifted nitrification rate and amoA gene abundance of ammonia-oxidizing microorganisms in salt-affected anthropogenic-alluvial soil[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 171: 104348.
- [61] Tang C, Yang J S, Xie W P, et al. Effect of biochar application on soil fertility, nitrogen use efficiency and balance in coastal salt-affected soil under barley-maize rotation[J]. Sustainability, 2023, 15 (4): 2893.
- [62] Sun Y P, Chen X B, Yang J S, et al. Biochar effects coastal saline soil and improves crop yields in a maize-barley rotation system in the tidal flat reclamation zone, China[J]. Water, 2022, 14 (20): 3204.
- [63] Yao R J, Li H Q, Yang J S, et al. Regulation effect of biomass improved materials on migration of soil water, salt and nitrogen in salt-affected soil under drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural

- Machinery, 2020, 51 (11): 282–291. [姚荣江, 李红强, 杨劲松, 等. 滴灌下生物质改良材料对盐渍土水盐氮运移的调控效应[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (11): 282—291.]
- [64] Yang J S, Yao R J, Wang X P, et al. Research on ecological management and ecological industry development model of saline-alkali land in the Hetao Plain, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (22): 7059—7063. [杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 河套平原盐碱地生态治理和生态产业发展模式[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7059—7063.]

(责任编辑: 卢萍)