

# 耕地地力对化肥养分利用的影响机制及其调控研究进展<sup>①</sup>

孙波<sup>1,8</sup>, 陆雅海<sup>2</sup>, 张旭东<sup>3</sup>, 卢升高<sup>4</sup>, 韦革宏<sup>5</sup>,  
杨劲松<sup>1,8</sup>, 朱安宁<sup>1,8</sup>, 刘满强<sup>6</sup>, 段英华<sup>7</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 3 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 4 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 5 西北农林科技大学生命科学院, 陕西杨凌 712100; 6 南京农业大学资源与环境科学学院 210095; 7 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 8 农业部耕地保育重点实验室, 南京 210008)

**摘要:** 耕地地力影响了化肥养分的利用效率, 是调控养分利用率的基础途径。本文概述了耕地土壤障碍对养分利用的制约机制、耕地地力培育对养分利用的促进机制、提高养分资源利用效率的耕地培肥模式 3 个方面的研究进展。针对我国主要的耕地土壤-作物系统, 提高化肥养分利用率需要解决 4 个地力调控方面的关键问题: 地力与养分利用率关系及其时空变化规律、土壤障碍制约养分高效蓄积转化机制与消减原理、地力培肥促进根系-土壤-微生物互作提高养分耦合利用机制及调控途径、肥沃耕层构建与生物功能提升对养分蓄纳供应的协同驱动增效机制与调控理论。本文提出基于多时空尺度综合研究, 建立稳定提升土壤功能-加速养分循环利用的“双核驱动”地力综合管理理论, 在不同区域构建并应用化肥减施增效的耕地地力综合管理模式, 实现耕地大面积均衡减施化肥的目标。

**关键词:** 耕地地力; 土壤障碍; 肥沃耕层; 养分蓄纳供应; 养分利用率; 调控模式

**中图分类号:** S15; S14 **文献标识码:** A

我国近 30 年来的化肥投入的增加支撑了我国粮食产量的持续增长。2015 年我国化肥生产量达 7 627 万 t, 施用量约 6 000 万 t, 单位面积化肥用量是世界平均水平的 3 倍。2015 年我国水稻、玉米、小麦三大粮食作物化肥利用率为 35.2%, 比 2013 年提高 2.2 个百分点, 但比欧美小麦、玉米主产区低 10~30 个百分点, 因此化肥减施增效仍有较大空间<sup>[1]</sup>。在采用精确施肥、替代施肥和施用高效肥料提高当季化肥利用率的同时, 培育和提升耕地地力成为长期稳定提高化肥养分利用效率、实现藏肥于土与耕地大面积均衡减肥的根本途径。耕地地力是指在特定立地条件(气候、地形、水文)、土壤剖面理化性状、农田基础设施建设及水肥投入水平下农田土壤的生产能力。土壤是化肥养分转化、迁移和作物吸收的场所, 地力因素(障碍和肥力因素)一方面影响土壤蓄纳和稳定供应养分的能力, 另一方面影响微生物活性和根系生长, 进而影响养分在土壤-作物系统中的高效循环利用。我国耕地基础地力对粮食产量(小麦、玉米、单

季稻)的平均贡献率为 45.7%~60.2%<sup>[2]</sup>, 比农业发达国家低了 20~30 个百分点, 只有通过高强度集约化管理才能同时实现粮食增产和资源增效。由于我国耕地土壤类型丰富, 不同农区管理方式多样、地力水平差异巨大, 必须分区实施地力提升措施, 这是实现化肥减施增效的基础性与关键环节。当前迫切需要建立耕地地力提升与化肥养分利用增效之间的定量关系, 打破土壤障碍对耕层长效蓄纳供应化肥养分能力的制约, 培肥地力激发作物-土壤-微生物互作功能以促进化肥养分高效循环利用, 构建不同区域化肥减施增效的耕地地力综合管理模式, 为实现农业增产增效与可持续发展提供理论和技术支撑。

## 1 国外研究现状及趋势

20 世纪 90 年代, 为应对资源和环境对粮食生产的约束, 国际上提出发展集约化可持续农业<sup>[3]</sup>, 欧盟制定“2020 计划”提出通过提高土壤质量稳定提升农业生产效率。21 世纪以来, 国外研究主要集中在

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200300)资助。

作者简介: 孙波(1968—), 男, 江苏南京人, 博士, 研究员, 研究方向为土壤质量演变与农田养分循环, 重点研究农田土壤养分转化微生物过程及其调控。E-mail: bsun@issas.ac.cn

消减土壤障碍和提升土壤功能两个层面,其中美国农业部盐土实验室与澳大利亚联邦科学与工业研究组织等在打破土壤障碍对化肥养分利用的制约方面开展了系统研究,美国康奈尔大学、法国国家农业研究院和瑞士有机农业研究所等在揭示化肥养分高效利用的土壤生物物理机制方面取得了显著进展,而荷兰瓦赫宁根大学和加拿大萨斯喀彻温大学等建立了有效的地力分区管理与综合培肥模式。

### 1.1 建立了打破土壤次生障碍对化肥养分利用制约的原理与技术

耕地不合理的管理导致土壤退化。全球退化土壤中,物理性与化学性退化分别占 4.2% 和 12.2%, 尤以酸化、盐碱化和连作障碍为重。长期大量施用铵态氮肥加速了土壤酸化、并衍生板结和耕层变薄等次生障碍,进而降低土壤养分库容、抑制作物根系对养分的吸收<sup>[4]</sup>。合理配施有机肥和无机肥,以及采用诱导作物根系释放碱性物质的措施可以减缓耕地土壤酸化、改善土壤结构<sup>[5-6]</sup>。针对盐碱环境下导致的作物吸收养分失衡障碍<sup>[7]</sup>,通过联合采用土壤调理与生物调控技术可以有效提升作物对养分的吸收效率<sup>[8]</sup>,而应用土壤水-盐-肥运移模型(HYDRUS 2D/3D)可以在区域尺度上指导盐碱土的改良<sup>[9]</sup>。长期连作在导病型土壤上导致作物根系对养分的吸收效率下降<sup>[10]</sup>,定向培育抑病型的土壤肥力性状和微生物区系已成为提高化肥养分利用效率的重要策略<sup>[11]</sup>。

### 1.2 揭示了化肥养分增效的土壤物理性保护与微生物促进机制

土壤良好结构促进了有机氮矿化和腐殖酸结合态磷的积累,提高了氮磷养分的长效供应能力<sup>[12-13]</sup>。土壤结构体(如团聚体)中的碳循环可以通过代谢补偿机制促进氮磷循环<sup>[14]</sup>,而在生态系统尺度上调控碳氮磷的耦合循环促进了养分的平衡供应<sup>[15]</sup>。调控活性有机碳输入可以增强土壤结构体中有机质的积累<sup>[16-17]</sup>,特别是促进微生物热区(microbial hotspot, 包括有机碎屑区、根际、生物孔隙、团聚体)结构的形成<sup>[18]</sup>,从而发挥土壤的生物功能。耕层土壤中,特别是微生物热区中的微生物群落驱动了土壤养分的循环过程,基于荧光显微成像技术发现根系、微生物与养分在微观尺度上存在互作机制<sup>[19]</sup>;采用<sup>13</sup>C 标记和高通量测序方法发现间套作与轮作影响了根际微生物组成及其对养分的转化利用<sup>[20]</sup>;作物根系的生长促进了细菌网络的复杂性,而且根系细菌之间存在广泛的互惠作用,促进了其生物功能<sup>[21]</sup>。在百年

尺度上,长期施用化肥和有机肥分别提高了贫营养型和富营养型微生物区系的丰度,增加了氮磷养分矿化的活性<sup>[22]</sup>。在有机农业系统中配施有机肥和磷细菌可提高土壤微生物多样性,减施化肥 30% 以上<sup>[23]</sup>。因此,调控土壤热区的微生物区系和施用生物有机肥已成为有效减肥途径。

### 1.3 建立了提高化肥养分利用效率的地力分区管理与综合培肥模式

耕地地力综合管理是指根据区域气候-作物-土壤条件,运用耕作、轮作、施肥管理结合增加生物多样性等农艺措施培育耕地地力,实现化肥养分利用率和作物产量协同提高的目标。欧美发达国家耕地资源丰富,可以兼顾粮食生产和环境保护目标,主要采取保护性耕作措施提高基础地力<sup>[24]</sup>,加拿大建立了小麦间歇性免耕模式恢复地力<sup>[25]</sup>;美国通过豆科轮作增加土壤碳、氮固定,平均提高氮肥利用率达 17%<sup>[26]</sup>。而在非洲干旱区,通过建立地力差异化管理措施来提高化肥养分利用率<sup>[27]</sup>。另一方面,通过生物培肥措施改善土壤生物功能可以提高养分利用效率,在南非氧化土上引种固氮蓝藻显著改善土壤结构和肥力,促进了玉米生长<sup>[28]</sup>。目前,通过调控作物根际土壤生物功能协同提高土壤地力和减少养分损失已成为提升土壤综合服务功能的有效途径<sup>[29]</sup>。

## 2 国内研究现状及趋势

近年来,我国相继实施了“中低产田改造”、“沃土工程”、“高标准农田建设”、“测土配方施肥”计划,中国科学院、中国农业科学院与中国农业大学、南京农业大学、浙江大学等依托 20 世纪 80 年代建立的中国生态系统研究网络和土壤肥力与肥料效应监测网,开展了农田生态系统养分循环和土壤质量长期演变规律的研究,评价了我国农田化肥养分平衡和养分利用的时空变化特征<sup>[30-32]</sup>,揭示了热量驱动的化肥养分投入和有机养分再循环对产量的增益作用<sup>[33]</sup>,发展了典型类型土壤质量管理的指标体系、培育理论与技术体系<sup>[34-35]</sup>。主要粮食产区农田土壤有机质演变与提升综合技术、黄淮地区农田地力提升与大面积均衡增产技术及其应用、克服土壤连作生物障碍的微生物有机肥及其新工艺等成果先后获得国家科技奖。目前,针对我国耕地地力和施肥水平的多样性和复杂性,亟需在不同时空尺度上系统开展耕地地力提升与化肥养分高效利用之间的关联机制研究,重点在化肥减施高潜力区开展耕地地力和养分资源协同管理理

论、技术和调控模式研究。

## 2.1 深化了长期施肥条件下土壤团聚体和根际碳氮磷储存和转化机制的研究

近年来,我国学者利用同步辐射、 $^{13}\text{C}$ -核磁共振( $^{13}\text{C}$ -NMR)等技术深入研究了秸秆还田和保护性耕作等对不同类型土壤团聚体结构和养分库容的协同促进作用,发现不同气候条件下土壤中秸秆分解的芳香化过程趋同<sup>[36]</sup>,长期施用有机肥和免耕促进了不同旱地土壤 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体中碳氮磷的积累<sup>[37-41]</sup>,显著增加了水稻土 $>1\text{ mm}$ 团聚体中有机碳氮的积累<sup>[42-44]</sup>,但不同粒径团聚体中养分积累速率随土壤类型而变化<sup>[45]</sup>;而微生物控制了有机碳在团聚体中的累积。基于长期施肥试验,在长期尺度上阐明了典型耕地土壤类型保持有机质平衡的有机碳投入阈值,揭示了土壤有机质提升总体上增产和促进氮素利用的趋势<sup>[46-47]</sup>,并针对不同粮食主产区发展了农田土壤有机质的综合提升技术体系<sup>[34, 48]</sup>。

应用稳定性同位素探针、高通量测序和基因芯片等技术显著推进了土壤-根系-微生物系统中养分转化机制的研究,发现在根际尺度上水稻土有机物降解与养分释放过程存在微生物的种间互营机制<sup>[49]</sup>;在田块尺度上长期平衡施肥显著提高了缺磷红壤性水稻土中氮转化功能基因多样性和氮素转化酶活性<sup>[50]</sup>,水稻与绿肥长期轮作改变了氮转化微生物群落结构,提高了铵态氮的供应<sup>[51]</sup>;在区域尺度上轮作系统显著改变了水稻土微生物的生态网络结构,不同水稻土中共有的网络关键细菌(根瘤菌目 Rhizobiales)和真菌(肉座菌目 Hypocreales)具有调控氮素转化的作用<sup>[52]</sup>。在旱地系统中,秸秆腐解过程中碳分解与氮素固定和反硝化存在耦合机制<sup>[53]</sup>,微生物控制了有机碳在团聚体中的积累<sup>[54]</sup>,气候条件显著影响了不同土壤中秸秆腐解微生物群落的演变过程<sup>[55]</sup>。在砂姜黑土中长期施用有机肥通过改变土壤 pH 显著恢复了由于施用化肥而降低的微生物多样性<sup>[56]</sup>;在碱性潮土中施用有机肥显著提高了氨氧化细菌数量<sup>[57]</sup>,增加了影响碳素和磷素转化的关键微生物(如菌根真菌和 *Bacillus asahii*)丰度<sup>[58-59]</sup>;在酸性红壤中,长期施用有机肥显著增加了大团聚体中生物网络结构的复杂性,大团聚体中食细菌线虫对细菌的捕食作用降低了土壤呼吸熵<sup>[60]</sup>,而对氨氧化细菌的捕食作用提高了土壤硝化势<sup>[61]</sup>。因此长期施用有机肥的管理措施对于维持和提升土壤微生物转化养分的功能具有重要作用。

## 2.2 推进了土壤次生障碍发生机制研究,探索了耕地肥沃耕层构建与化肥养分增效技术,建立了国家测土配方施肥数据管理平台

针对土壤酸化,通过对全国多点数据的分析阐明了施用化肥对土壤酸化的驱动机制<sup>[62]</sup>,通过野外定位试验研究分析了红壤酸化对氮磷转化的制约作用,提出了生物炭改良方法<sup>[63]</sup>。针对盐碱化,基于垄作、硫酸铝改良和氮肥分次施用效应,提出重度盐碱土上提高作物产量和养分利用率的技术体系<sup>[64]</sup>。针对连作障碍,研发了控制土壤连作障碍的新型微生物有机肥技术<sup>[65]</sup>。针对不同区域的耕层土壤退化,在东北平原黑土区提出“玉米免耕结合秸秆深埋的肥沃耕层构建技术”以应对耕层变薄问题<sup>[66]</sup>,在华北平原潮土区建立“激发式玉米秸秆行间掩埋技术”消减土壤砂性障碍<sup>[67]</sup>,在关中平原和渭北旱塬壤土和黑垆土区建立了小麦-玉米的“高茬还田”和“垄沟覆膜栽培”技术减缓干旱胁迫和提升土壤有机质<sup>[68-69]</sup>,在长江中游红壤区发展“耕层养分库和生物功能协同重建技术”阻控酸化和瘠薄<sup>[70]</sup>,在四川盆地紫色土区构建“聚土垄作免耕-坡式梯田模式”破除耕层浅薄问题<sup>[71]</sup>,这些中低产田改造技术的应用显著提高了养分利用效率和作物产量<sup>[72]</sup>。在国家尺度上,基于测土配方施肥数据和模型分析,建立了全国测土配方施肥数据管理平台,研发了县域耕地资源管理信息系统(CLRMIS)并应用于 2 498 个县,支撑了全国耕地地力评价和施肥决策<sup>[73]</sup>。

## 2.3 亟需开展耕地地力与化肥养分利用之间的关联机制与协同提升技术研究

耕地地力与化肥养分利用之间的关系受气候、土壤和作物等诸多因素的综合影响,必须结合区域尺度的长期综合观测,揭示耕地地力空间分布格局对化肥养分利用的多尺度影响规律,建立耕地管理模式与耕地质量及化肥养分利用效率之间的关系,阐明耕地地力培肥的区域减肥潜力和调控对策。目前需要加强研究耕地酸化过程与养分循环的耦合作用机制;探索水-盐-肥耦合促进化肥养分高效利用的机制;厘清连作障碍制约化肥养分利用的效应关系;开展田间原位研究,揭示消减土壤结构障碍过程中土壤团聚体-有机质关键组分-氮磷转化-微生物网络的协同机制,集成肥沃耕层构建与土壤生物功能提升的耕地地力综合管理技术。

国内外研究均证明提高地力是实现化肥减施的长效途径,但减施策略也因养分类型而异。稳定提升地力对提高磷肥长期累积利用率效果明显;但我国氮

肥过量施用问题严重,减施氮肥更依赖于提高当季利用率。地力培育是一个长期过程,特别是中低产田地力培育难以一蹴而就。因此,必须加强理论创新,攻克在中短期内加快提升耕地地力、实现化肥减施增效的技术难题。如果利用国家尺度长期试验平台,加强土壤学与生物学和植物营养学的交叉研究,揭示消除土壤障碍制约和培育地力促进养分利用机制,耦合土壤蓄纳库容提升和养分加速循环利用的增效作用,建立以有机培肥与耕作管理为基础的综合调控技术原理和优化模式,将能够为大面积均衡减施化肥、实现藏肥于土目标提供重大基础理论和技术支撑。

### 3 面向化肥减施增效的耕地地力综合管理研究重点和突破方向

我国中低产耕地约占耕地总面积的 67.3%,严重制约了养分的高效利用<sup>[47]</sup>;同时在高产耕地中存在养分过量施用和肥力退化的潜在影响<sup>[28]</sup>。我国中低产田的土壤原生障碍和次生障碍并存,主要为酸化、盐碱、砂性、黏重板结、土层浅薄、障碍层,叠加瘠薄、干旱、水土流失和重金属污染等问题,限制了农田生产潜力的发挥和水肥资源的高效利用。如东北平原的薄层黑土、白浆土和苏打盐碱土,华北平原的薄层褐土、砂姜黑土、潮土和滨海盐碱土,西北地区的黑垆土、塷土、黄绵土和绿洲干旱次生盐渍土,南方丘陵区红壤和紫色土,长江中下游的冷浸田、黄泥田和白土等。因此,面向建立耕地大面积均衡减肥技术的国家需求,亟需针对我国农产品主产区的主要土壤类型和作物类型(小麦、玉米、水稻和蔬菜),以消除土壤障碍制约和快速培育地力从而稳定提升化肥养分利用率为突破口,以提升耕地养分资源利用率为目标,开展农田地力提升与养分利用增效机制和技术的多尺度研究。

首先,需要建立多尺度的综合研究方法体系,包括分子尺度的宏基因组测序和生物信息学方法,团聚体尺度的<sup>13</sup>C-核磁共振、同步辐射和计算机断层摄影(CT),田块尺度的同位素标记和原位自动观测技术,区域尺度的时空序列调查、养分循环模型技术。其次,基于多时空尺度的研究方法,开展土壤学与生态学和植物营养学交叉研究,重点回答提高化肥养分利用效率的 4 个关键科学问题:地力与养分利用率关系及其时空变化规律;土壤障碍(酸化、盐碱、板结粘闭、耕层变浅、连作障碍)制约养分高效蓄积转化机制与消减原理;地力培肥促进根系-土壤-微生物互作提高养分耦合利用机制及调控途径;肥沃耕层构

建与生物功能提升对养分蓄纳供应的协同驱动增效机制与调控理论。通过剖析地力与化肥养分利用效率关系及其时空变化规律与主控因素,揭示障碍对养分高效储存转化的制约机理及其消减原理,阐明培肥地力促进根系-土壤-微生物互作功能从而促进养分耦合循环利用的增效机制,建立稳定提升土壤功能-加速养分循环利用的“双核驱动”地力综合管理理论。最后,基于区域气候、土壤、作物条件,建立并应用化肥减施增效的耕地地力管理模式、途径和对策,实现藏肥于土、大面积均衡减肥的目标。

通过系统研究,需要在理论和技术方面实现 3 个方面的突破:

1) 在区域尺度和长时间尺度上,建立耕地地力与化肥养分利用率的定量关系,发展多尺度动态关系模型。基于国家尺度耕地地力和养分管理研究平台,主要包括中国科学院的中国生态系统研究网络和中国农业科学院的土壤肥力与肥料效应监测网,利用长期试验从长时间尺度建立不同管理措施下地力提升与化肥养分利用率变化的定量关系和预测模式;基于我国农产品主产区耕地地力与化肥养分利用率调查,从区域尺度建立不同气候、土壤和作物系统中地力和障碍因子与化肥养分利用率的定量关系和预测模型。在不同时空尺度上揭示耕地地力演变过程中控制化肥养分利用率的因素,评价不同区域通过地力提升减施化肥的潜力。

2) 揭示集约化管理下地力提升促进化肥养分高效利用的界面过程机制,发展“双核驱动”养分增效的地力综合调控理论,创新化肥减施增效的理论和模式。针对集约化管理下地力提升措施对“养分输入-保蓄-供应”的促进机制,从根系-土壤-微生物界面,阐明根系分泌物和有机质关键组分与不同界面(根表、根际、团聚体)微生物网络的协同演变关系,揭示其互反馈机制对氮磷耦合循环的激发效应和增效机制。基于土壤障碍消减和肥沃耕层构建,提高土壤对养分的蓄纳供应能力;基于轮作培肥,促进根系-土壤-微生物互作效能,挖掘“扩氮固碳促磷”潜力;创建“稳定提升土壤功能-加速养分循环利用”的“双核驱动”地力综合调控理论,建立化肥减施增效的地力综合管理模式。

3) 在国家尺度,建立耕地地力与化肥利用机制关联型的协同管理大数据平台。基于不同时空尺度耕地地力与化肥养分利用率定量关系和影响因素研究,结合互联网地理信息系统(WebGIS)和分布式数据库管理系统(DDBMS)融合多元数据,包括耕地质量监

测、测土配方施肥、长期试验及相关社会经济等数据，集成传统的土壤分类型、农业施肥决策型和社会经济管理型数据库的优势，建立互联网分布式数据平台和基于多业务传送平台(MSTP 专线)的内网系统，构建国家尺度耕地地力和化肥养分高效利用的协同管理大数据平台。在此基础上，采用云计算软件(VM Ware 系列软件)开展典型区域的大数据分析，在评价耕地地力水平基础上，分类提出化肥资源高效配置利用和减施区划方案，并为政府部门、企业、推广人员和农户提供咨询服务。

致谢：感谢李忠佩、田霄鸿、张月平、梁玉婷、胡君利在成文过程中的帮助。

### 参考文献：

- [1] 郝锐敏. 农业部首度发布化肥农药利用率数据[N]. 农资导报, 2015-12-11. <http://www.nzdb.com.cn/bencandy.php?fid=26&id=201445>
- [2] 汤勇华, 黄耀. 中国大陆主要粮食作物地力贡献率和基础产量的空间分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 1070-1078
- [3] Cassman K G. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1999, 96(11): 5952-5959
- [4] Ahmad N, Hassan F U, Belford R K. Effect of soil compaction in the sub-humid cropping environment in Pakistan on uptake of NPK and grain yield in wheat (*Triticum aestivum*): I. Compaction[J]. Field Crops Research, 2009, 110(1): 54-60
- [5] Hulugalle N R, Weaver T B, Finlay L A, et al. Soil properties and crop yields in a dryland Vertisol sown with cotton-based crop rotations[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(2): 356-369
- [6] Schroder J L, Zhang H, Girma K, et al. Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(3): 957-964
- [7] Paul D, Lade H. Plant-growth-promoting rhizobacteria to improve crop growth in saline soils: A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(4): 737-752
- [8] Sakadevan K, Nguyen M L. Extent, impact, and response to soil and water salinity in arid and semiarid regions[J]. Advances in Agronomy, 2010, 109(109): 55-74
- [9] Šimůnek J, Jacques D, Šejna M, et al. The HP2 Program for HYDRUS (2D/3D). A Coupled Code for Simulating Two-Dimensional Variably-Saturated Water Flow, Head Transport, Solute Transport and Biogeochemistry in Porous Media (HYDRUS+PHREEQC+2D)[CP]. Version 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic, 2011: 1-78
- [10] Lakshmanan V, Selvaraj G, Bais H P. Functional soil microbiome: belowground solutions to an aboveground problem[J]. Plant Physiology, 2014, 166(2): 689-700
- [11] Mendes R, Kruijt M, De Bruijn I, et al. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria[J]. Science, 2011, 332(6033): 1097-1100
- [12] Wright A L. Phosphorus sequestration in soil aggregates after long-term tillage and cropping[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(2): 406-411
- [13] Krause U, Koch H J, Maerlaender B. Soil properties affecting yield formation in sugar beet under ridge and flat cultivation[J]. European Journal of Agronomy, 2009, 31(1): 20-28
- [14] Vogel C, Mueller C W, Höschel C, et al. Submicron structures provide preferential spots for carbon and nitrogen sequestration in soils[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 149-168
- [15] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. Nature, 2011, 478(7367): 49-56
- [16] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68(1): A4-A9
- [17] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter[J]. Nature, 2015, 528(7580): 60-68
- [18] Kuzyakov Y, Blagodatskaya E. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 83: 184-199
- [19] Philippot L, Raaijmakers J M, Lemanceau P, et al. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere [J]. Nature Reviews Microbiology, 2013, 11(11): 789-799
- [20] Lopes A R, Manaia C M, Nunes O C. Bacterial community variations in an alfalfa-rice rotation system revealed by 16S rRNA gene 454-pyrosequencing[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2014, 87(3): 650-663
- [21] Shi S J, Nuccio E E, Shi Z J, et al. The interconnected rhizosphere: High network complexity dominates rhizosphere assemblages[J]. Ecology Letters, 2016, 19(8): 926-936
- [22] Francioli D, Schulz E, Lentendu G, et al. Mineral vs. organic amendments: Microbial community structure, activity and abundance of agriculturally relevant microbes are driven by long-term fertilization strategies[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 1446
- [23] Mäder P, Fließbach A, Dubois D, et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming[J]. Science, 2002, 296: 1694-1697
- [24] Pittelkow C M, Liang X, Linquist B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture[J]. Nature, 2015, 517: 365-368
- [25] Daraghmeh O A, Jensen J R, Petersen C T. Near-saturated hydraulic properties in the surface layer of a sandy loam soil under conventional and reduced tillage[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(6): 1728-1737

- [26] Gardner J B, Drinkwater L E. The fate of nitrogen in grain cropping systems: A meta-analysis of  $^{15}\text{N}$  field experiments[J]. *Ecological Applications*, 2009, 19(8): 2167–2184
- [27] Tittonell P, Giller K E. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture[J]. *Field Crops Research*, 2013, 143(1): 76–90
- [28] Maqubela M P, Mkeni P N S, Issa O M, et al. Nostoc cyanobacterial inoculation in South African agricultural soils enhances soil structure, fertility, and maize growth[J]. *Plant and Soil*, 2009, 315(1/2): 79–92
- [29] Wagg C, Bender S F, Widmer F, et al. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(14): 5266–5270
- [30] Shen R P, Sun B, Zhao Q G. Spatial and temporal variability of N, P and K balances for agroecosystems in China[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(3): 347–355
- [31] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207–4229
- [32] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915–924
- [33] 杨林章, 孙波. 中国农田生态系统养分循环和平衡及其管理[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1–310
- [34] 段武德, 陈印军, 翟勇, 等. 中国耕地质量调控技术集成研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011: 1–337
- [35] 曹志洪, 周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1–709
- [36] Wang X, Sun B, Mao J, et al. Structural convergence of maize and wheat straw during two-year decomposition under different climate conditions[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46: 7159–7165
- [37] Shu X, Zhu A N, Zhang J B, et al. Changes in soil organic carbon and aggregate stability after conversion to conservation tillage for seven years in the Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(6): 1202–1211
- [38] Yu H, Ding W, Chen Z, et al. Accumulation of organic C components in soil and aggregates[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13804
- [39] 宋春, 韩晓增, 王凤菊, 等. 长期不同施肥条件下黑土水稳性团聚体中磷的分布及其有效性[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(2): 272–276.
- [40] 王仁杰, 强久次仁, 薛彦飞, 等. 长期有机无机肥配施改变了壤土团聚体及其有机和无机碳分布[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4678–4689
- [41] 邢旭明, 王红梅, 安婷婷, 等. 长期施肥对棕壤团聚体组成及其主要养分赋存的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, (2): 67–273
- [42] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响[J]. *土壤*, 2007, 39(5): 787–793
- [43] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(5): 950–960
- [44] 李文军, 杨基峰, 彭保发, 等. 施肥对洞庭湖平原水稻土团聚体特征及其有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(20): 4007–4015
- [45] 刘震, 徐明岗, 段英华, 等. 长期不同施肥下黑土和红壤团聚体氮库分布特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1386–1392
- [46] 徐明岗, 张文菊, 黄少敏. 中国土壤肥力演变(第二版)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015: 1–1124
- [47] Duan Y, Xu M, Gao S, et al. Nitrogen use efficiency in a wheat–corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications[J]. *Field Crops Research*, 2014, 157(2): 47–56
- [48] 全国农业技术推广服务中心, 中国农科院农业资源与区划所. 耕地质量演变趋势研究——国家级耕地土壤监测数据整编[M]. 北京: 中国农业科学技术出版, 2008: 1–409
- [49] Li H, Chang J, Liu P, et al. Direct interspecies electron transfer accelerates syntrophic oxidation of butyrate in paddy soil enrichments[J]. *Environmental Microbiology*, 2014, 17(5): 1533–1547
- [50] Su J Q, Ding L J, Xue K, et al. Long-term balanced fertilization increases the soil microbial functional diversity in a phosphorus-limited paddy soil[J]. *Molecular Ecology*, 2015, 24(1): 136–150
- [51] Gao S J, Zhang R G, Cao W D, et al. Long-term rice-rice-green manure rotation changing the microbial communities in typical red paddy soil in South China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(12): 2512–2520
- [52] Jiang Y, Liang Y, Li C, et al. Crop rotations alter bacterial and fungal diversity in paddy soils across East Asia[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 95: 250–261
- [53] Fan F, Yin C, Tang Y, et al. Probing potential microbial coupling of carbon and nitrogen cycling during decomposition of maize residue by  $^{13}\text{C}$ -DNA-SIP[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 70: 12–21
- [54] Zhang S, Li Q, Lü Y, et al. Contributions of soil biota to C sequestration varied with aggregate fractions under different tillage systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62: 147–156.
- [55] Sun B, Wan X, Wang F, et al. Assessing the relative effects of geographic location and soil type on microbial communities associated with straw decomposition[J]. *Applied Environmental Microbiology*, 2013, 79(11): 3327–3335
- [56] Sun R, Zhang X X, Guo X, et al. Bacterial diversity in soils subjected to long-term chemical fertilization can be more stably maintained with the addition of livestock manure than wheat straw[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 9–18
- [57] Shen J P, Zhang L M, Zhu Y G, et al. Abundance and

- composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea communities of an alkaline sandy loam[J]. *Environmental Microbiology*, 2008, 10(6): 1601–1611
- [58] Lin X, Feng Y, Zhang H, et al. Long-term balanced fertilization decreases arbuscular mycorrhizal fungal diversity in an arable soil in North China revealed by 454 pyrosequencing[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(11): 5764–5771
- [59] Feng Y, Chen R, Hu J, et al. *Bacillus asahii* comes to the fore in organic manure fertilized alkaline soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 186–194
- [60] Jiang Y, Sun B, Jin C, et al. Soil aggregate stratification of nematodes and microbial communities affects metabolic quotient in an acid soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 60: 1–9
- [61] Jiang Y, Jin C, Sun B. Soil aggregate stratification of nematodes and ammonia oxidizers affects nitrification in an acid soil[J]. *Environmental Microbiology*, 2014, 16(10): 3083–3094
- [62] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010
- [63] 徐仁扣. 酸化红壤的修复原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1–274
- [64] 杨劲松, 姚荣江. 我国盐碱地治理与农业高效利用[J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30(增刊): 162–170
- [65] 沈其荣, 杨兴明, 黄启为, 等. 一种能防除连作作物枯萎病的拮抗菌及其微生物有机肥料[P]. 中国: ZL200510122898.0, 2007
- [66] 韩晓增, 邹文秀, 王凤仙, 等. 黑土肥沃耕层构建效应[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2996–3002
- [67] 赵金花, 张丛志, 张佳宝. 激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2): 438–449
- [68] 南雄雄, 游东海, 田霄鸿, 等. 关中东平原农田作物秸秆还田对土壤有机碳和作物产量的影响[J]. *华北农学报*, 2011, 26(5): 222–229
- [69] 陈辉林, 田霄鸿, 王晓峰, 等. 不同栽培模式对渭北旱塬区冬小麦生长期间土壤水分、温度及产量的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(9): 2424–2433
- [70] 孙波. 红壤退化阻控与生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1–466
- [71] 朱波, 陈实, 游祥, 等. 紫色土退化旱地的肥力恢复与重建[J]. *土壤学报*, 2002, 39(5): 743–749
- [72] 曾希柏, 张佳宝, 魏朝富, 等. 中国低产田状况及改良策略[J]. *土壤学报*, 2014(4): 675–682
- [73] 张月平, 张炳宁, 田有国, 等. 县域耕地资源管理信息系统开发与应用[J]. *土壤通报*, 2013(6): 1308–1313

## Research Progress on Impact Mechanisms of Cultivated Land Fertility on Nutrient Use of Chemical Fertilizers and Their Regulation

SUN Bo<sup>1,8</sup>, LU Yahai<sup>2</sup>, ZHANG Xudong<sup>3</sup>, LU Shenggao<sup>4</sup>, WEI Gehong<sup>5</sup>, YANG Jinsong<sup>1,8</sup>,  
ZHU Anning<sup>1,8</sup>, LIU Manqiang<sup>6</sup>, DUAN Yinghua<sup>7</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 4 College of Resources and Environmental Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 5 College of Life Sciences, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 6 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 7 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 8 Key Laboratory of Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The cultivated land fertility affects the nutrient utilization of chemical fertilizers, which is the basic pathway to regulate the nutrient use efficiency (NUE). The research progresses in this field were reviewed from three aspects: the restriction mechanism of soil constraint factors on nutrient utilization, the promotion mechanism of soil fertility incubation on nutrient utilization, and the models for enhancing NUE by improving cultivated land fertility. For the main types of soil-crop systems, four scientific problems need to be clarified in terms of regulating NUE by fostering cultivated land fertility: temporal and spatial variation of correlation between soil fertility and NUE, the mechanisms for soil obstacles to restrict nutrient accumulation and transformation and its removing principle, the mechanisms and regulatory pathways for fertility incubation to promote root - soil - microbe interaction and the synergetic utilization of nutrients, the mechanisms and theories for coupling fertile cultivated layer construction and soil biological function improvement to enhance nutrient storage and supplies. Based on the comprehensive research at multi-temporal and spatial scales, the “dual core driven” soil fertility improvement theory should be developed, which combines the improvement of soil storage-release function and acceleration of nutrient recycling use. Finally the integrated cultivated land fertility management models should be established and applied to enhance NUE of chemical fertilizers in different regions, which could promote the fulfillment of the goal to reduce chemical fertilizer application in cultivated land at the regional scale.

**Key words:** Cultivated land fertility; Soil obstacle; Fertile soil cultivated layer; Nutrient storage and supply; Nutrient use efficiency; Regulatory model