

DOI: 10.11766/trxb201912050657

蔡祖聪. 浅谈“十四五”土壤肥力与土壤养分循环分支学科发展战略[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1128–1136.

CAI Zucong. Discussion on the Strategies for Development of the Subdiscipline of Soil Fertility and Soil Nutrient Cycling for the 14th Five-Year Plan[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1128–1136.

浅谈“十四五”土壤肥力与土壤养分循环分支学科发展战略*

蔡祖聪^{1, 2}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘 要: 土壤肥力与土壤养分循环分支学科是土壤学科中应用性较强的学科, 悠久的历史发展历史积累了极为丰富的文献资料, 在评价和利用土壤资源, 提高作物产量和养分利用率, 减少环境污染中发挥着重要作用。“十四五”期间土壤肥力与土壤养分循环分支学科应加强土壤养分转化过程、速率、产物及其影响因素的基础性研究。鉴于我国大宗作物种植强度下降, 集约化设施种植面积增加的两极化发展现状和减肥减药维持生态环境安全的国家需求, “十四五”期间, 土壤肥力与土壤养分循环分支学科应加强以下针对性研究: 1) 休耕轮作对土壤肥力的影响及通过休耕轮作维持和提高土壤肥力的原理、途径和方法; 2) 高度集约化种植条件下快速恢复土壤肥力, 保持土壤健康和有效利用土壤养分的科学管理原理、途径和方法; 3) 实现土壤-作物-环境相互契合, 充分发挥土壤肥力, 高效利用土壤养分的基础科学问题。

关键词: 土壤肥力; 土壤养分; 学科发展; 科学管理; 高效利用

中图分类号: S158 **文献标志码:** A

Discussion on the Strategies for Development of the Subdiscipline of Soil Fertility and Soil Nutrient Cycling for the 14th Five-Year Plan

CAI Zucong^{1, 2}

(1. School of Geography Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: Soil fertility and soil nutrient cycling is more like an applied discipline in the soil science, with a long history and a huge volume of literature accumulation. It plays an important role in assessing and exploiting the soil resources, enhancing crop production and nutrient use efficiency, and reducing environmental loads of non-point source of pollutants from croplands. During the 14th five-year-plan period, it is essential to strengthen researches on processes, rates, products, and influencing factors of the nutrient transformation in the soil, the basis of soil fertility and soil nutrient cycling. In view of the fact that the agriculture is developing towards a two-pole structure, that is, the cropping of staple crops, such as rice, wheat, and maize, declining in intensity, and the facilitated farming, such as plastic film-sheds and greenhouses, rapidly expanding in area in China, and in

* 国家自然科学基金项目(41977032)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41977032)

作者简介: 蔡祖聪(1958—), 男, 浙江余姚人, 教授, 主要从事土壤氮素循环和退化土壤修复研究。E-mail: zccai@njnu.edu.cn

收稿日期: 2019-12-05; 收到修改稿日期: 2020-04-14; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-05-29

response to the calls of the nation for reduction of the environmental loads of non-point source pollutants and maintenance of safety of the eco-environment, it is crucial to intensify researches on the following topics in the sub-discipline of soil fertility and soil nutrient cycling, during the 14th five-year-plan period. i.e. 1) impacts of turning intensive cropping into fallow and crop rotation on soil fertility, and principles, pathways and methods of the practice maintaining and improving soil fertility; 2) principles, pathways and methods of scientific management of rapidly restoration of soil fertility, maintenance of soil health, and effectively utilization of soil nutrients under a highly intensive cropping system; and 3) basic scientific issues, like how to harmonize the relationships between soil, crops and environment, how to bring soil fertility into full play and how to efficiently utilize soil nutrients.

Key words: Soil fertility; Plant nutrients; Discipline development; Scientific management; High use efficiency

土壤肥力与土壤养分循环是土壤学科中应用性较强的分支学科, 主要研究土壤供给作物养分的能力、与土壤养分供应有关的土壤养分循环过程、农田养分以各种形态向环境的扩散过程及其驱动因素等。土壤肥力研究在评价和利用土壤资源中发挥着重要的作用。出于对全球变化和农业面源污染的高度关注, 农田土壤固碳和温室气体排放, 农田氮、磷等营养元素向水体扩散过程及其污染负荷、驱动因素、模型模拟等是过去相当长一段时期土壤养分循环领域的主要研究热点, 在估算农田生态系统固碳潜力、温室气体排放、定量农业面源污染等方面积累了大量的数据, 取得了丰富的研究成果, 在全球变化和生态环境保护领域发挥了重要作用。但是, 土壤养分循环服务于作物养分供应及其影响因素的研究则进展比较缓慢。改革开放以来, 我国的作物种类、种植方式、种植制度、肥料种类等均发生了显著的变化, 近年来, 种植强度的两极化趋势极为明显, 这些变化对土壤肥力维持和作物养分供应提出了新的要求。当前土壤肥力和土壤养分循环的研究尚不能清晰地回答这些变化引发的科学问题, 因而指导生产实际的能力较弱, 难以发挥该分支学科在农业生产中应有的作用。在“十四五”期间, 土壤肥力与土壤养分循环分支学科应该回归本原, 围绕我国经济发展和种植制变化对土壤肥力和土壤养分循环提出的新要求, 加强基础理论研究, 研发适应新的种植模式的土壤肥力维持和提高, 促进土壤养分有效利用, 减少对土壤质量和生态环境负面影响的新理念、新方法和新技术。

1 历史发展与现状

土壤肥力是反映土壤肥沃程度的一个重要指

标, 但是关于土壤肥力的定义及其指标仍不统一。在欧美等国家土壤肥力是指衡量土壤能够提供作物生长所需的各种养分的能力。在我国, 土壤肥力是指土壤为植物生长供应和协调养分、水分、空气和热量的能力, 是土壤物理、化学和生物学性质的综合反应^[1]。显然, 欧美国家的土壤肥力概念比较单一, 可称之为狭义的土壤肥力概念, 但易于定量和评价; 我国的土壤肥力概念涉及土壤物理、化学、生物学性质和营养元素含量等, 有些还包括土壤所处的环境等与作物生长有关的各个方面, 综合性强, 可称之为广义的土壤肥力概念, 更接近于土壤生产力概念。由于广义土壤肥力概念难以量化, 在我国, 土壤肥力的综合评价成为了该分支学科的重要研究内容, 发表了大量的研究论文。然而至今未形成具有共识的土壤肥力综合评价方法和指标值。我国第二次土壤普查时采用了欧美国家的土壤肥力概念, 以土壤的养分含量作为划分依据。这一土壤养分含量等级指标仍然是我国土壤肥力评价的基础^[2]。

土壤养分循环涉及的范围很广, 例如, 土壤碳氮循环是当前全球变化的研究热点, 土壤氮磷向水体的扩散则是水体污染防控的研究热点。笔者体会, 土壤肥力与土壤养分循环分支学科中的土壤养分循环是那些涉及与土壤肥力, 即与养分供应能力有关的土壤养分循环问题, 它是土壤肥力的基础和核心。

笔者以中国知网(CNKI)为数据源^[3], 对土壤肥力和土壤养分循环分支学科发表的论文数量及其涉及的主题词进行了搜索。对于特定的研究领域, 相同关键词下我国学者发表的论文数量在英文刊物和中文刊物上具有同步性, 因此, 从CNKI得到的数据可窥我国土壤肥力与土壤养分循环分支学科的发展历史和现状之一斑。分别以“土壤肥力”和“土壤养分循环”为关键词, 在中国CNKI搜索文献数量, 结

果如图 1。截止 2019 年 11 月 14 日, CNKI 共收录了有关土壤肥力的文献 22 039 篇, 有关土壤养分循环的文献则仅区区 396 篇, 其中同时涉及土壤肥力和土壤养分循环的文献更少, 仅为 66 篇。CNKI 收录的关于土壤肥力的最早的文章是 Hall 于 1910 年在 *Science* 发表的“*The fertility of the soil*”^[4]。这足以证明土壤肥力是一门历史悠久的学科。CNKI 收录的我国学者涉及土壤肥力的最早的文章是周昌莹 1936 年发表于《地质论评》的“土壤调查及土壤图之制法”^[5]。从图 1a 可以看出, 我国关于土壤肥力的文章发表数量在 20 世纪 50 年代至 60 年代中出现过一个快速增长

长的时期。由于众所周知的原因, 1967—1972 年是一个停滞期, 随后又开始快速增加, 1980 年后每年发表的论文数量超过 100 篇, 2008 年达到 1 025 篇, 随后继续波动式增长。土壤肥力研究涉及的主题词以土壤肥力为主, 占近半数, 其次为土壤成分、养分元素氮、磷、钾和酶活性, 每一主题词下收录的文献均在 1 000 篇以上(表 1)。土壤肥力综合评价的文献也达 347 篇, 几乎与土壤养分循环关键词下的文献数量相当, 但绝大部分是关于区域土壤肥力的综合评价, 所用的评价方法各不相同, 至今未形成统一、共识的土壤肥力评价方法和指标值。

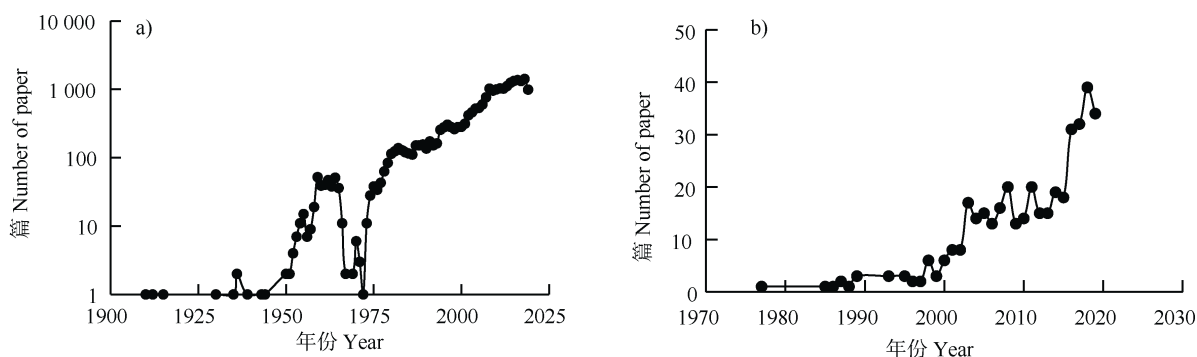


图 1 CNKI 收录的土壤肥力 (a) 与土壤养分循环 (b) 分支学科每年发表的文献数量

Fig. 1 Number of papers published per year on soil fertility (a) and soil nutrient cycling (b) archived in CNKI

CNKI 收录的关于土壤养分循环的文献迟至 1977 年才出现(图 1b), 是国外学者发表在 *Science* 上关于土壤中草酸钙及其对营养元素循环的文章^[6]。1985 年曾天勋发表于《广东农业科技》的“浅谈森林养分循环的规律及有关营林问题”^[7]是 CNKI 收录的我国学者关于土壤养分循环的最早的文章。这不一定分别是国外和我国学者最早开始研究和发表土壤养分循环文章的时间, 但是可以确定的是, 相对于土壤肥力研究, 土壤养分循环研究领域起步要晚得多。CNKI 收录的土壤养分循环的文献数量虽有逐年增加的趋势(图 1b), 但始终未形成热点研究领域。土壤养分循环涉及的主题词多, 但比较发散(表 1)。

涉及土壤肥力 22 039 篇文章和涉及土壤养分循环的 396 篇中, 同时涉及土壤肥力和土壤养分循环的文献仅为 66 篇。这一数据表明从土壤养分循环角度研究土壤肥力未受到重视, 土壤肥力与土壤养分循环分支学科的两部分有机结合程度有待加强。

2 土壤肥力和土壤养分循环的基础科学问题

讨论土壤肥力和土壤养分循环的基础科学问题有必要明确土壤养分循环与土壤养分转化的概念。当前, 在文献中经常混用土壤养分循环与土壤养分转化的概念。笔者以为, 土壤养分循环是指以土壤为核心, 土壤中的养分元素与生物圈(农田中主要为作物)、水圈、大气圈和岩石圈的交换途径、形态和通量; 土壤养分转化则是指土壤中养分元素从一种存在形态或化学价态转化成为另一种存在形态或价态的过程。由于不同存在形态或价态的元素在土壤中的移动性、与其他圈层的交换性及其生物和环境效应不同, 且它们在土壤中的量由土壤转化过程及其相对速率所决定, 所以, 土壤养分转化过程起着土壤养分循环“调配器”的作用, 控制土壤养分循环的方向、养分元素化合物种类和交换通量。土壤养分循环途径中与作物的养分交换过程, 即为狭

表 1 土壤肥力与土壤养分循环涉及的主题词及相应的论文数

Table 1 Number of published papers and key words related to soil fertility and soil nutrient cycling archived in CNKI

土壤肥力 Soil fertility		土壤养分循环 Soil nutrient cycling	
主题词 Key word	篇 Number of papers	主题词 Key word	篇 Number of papers
土壤肥力	10 703	养分循环	80
土壤成分	2 585	营养物质循环	72
土壤养分	1 925	土壤成分	59
有效磷	1 553	土壤养分	59
速效磷	1 548	生物量	31
速效钾	1 272	现存量	27
酶活性	1 100	土壤养分循环	27
酶活力	1 053	土壤肥力	21
农业用地	828	化学平衡	17
土壤有机质	803	养分平衡	17
有机肥	802	养分元素	15
碱解氮	726	森林生态系统	14
农家肥料	699	人工林	14
土壤微生物	572	生态系统	13
秸秆还田	527	人工林生态系统	13
有机质含量	500	农业用地	12
土壤质量	478	养分含量	12
耕作土壤	475	农田生态系统	12
水稻土	435	土壤微生物	11
有机质	420	有效磷	10
稻田土壤	415	速效磷	9
麦类作物	405	凋落物	9
耕作制度	396	凋落物层	9
土壤肥力质量	391	微生物	8
耕种用地	387	生产方式	8
综合评价	347	酶活性	8
土壤调查	321	凋落物分解	8
土壤酶活性	321	生产力	8
		黄土高原	7
		乔木层	7
		养分特征	7
		速效钾	7
		林地土壤	7

义的土壤肥力。因此,土壤养分转化过程、产物及其速率是土壤肥力和土壤养分循环分支学科的基础

科学问题。

在此,以氮素为例说明土壤氮转化过程对于土壤

氮素供应和土壤氮素循环研究的基础性作用。不同形态的氮有着各不相同的生物和生态环境效应。氮气是惰性气体,称为惰性氮,既不能被具有固氮能力以外的生物利用,也不产生显著的环境和气候效应;与此相对应,化学价不为零,具有生物、环境或气候效应之一或多种效应的氮则称为活性氮^[8]。氮氧化物气体具有强烈的大气化学反应能力, N₂O 可长期存在于大气中,是重要的温室气体,且破坏臭氧层;在大气中 NH₃ 具有中和酸的作用,是生成气溶胶的重要前体^[9]; NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 均可被植物吸收利用。所以,它们都归于活性氮。土壤中不同形态的氮其生物有效性、向环境的扩散能力和途径等均有显著的差异。绝大部分土壤有机氮不能被植物直接吸收利用,向环境的扩散性较小,在土壤中相对比较稳定,特别是那些与土壤无机矿物形成复合体的有机质氮,它们可以长期存在于土壤中^[10]。相比较于有机氮,无机氮向环境的扩散性则相对比较容易,但无机氮扩散的驱动因素、方向和途径则各不相同:由于铵的电性和直径,带负电荷的土壤胶体对铵有很强的吸附作用,土壤中铵的水溶性较低,不易随水分移动,但是,在 pH 高的土壤中,铵很容易解离为氨而挥发进入大气,所以, pH 高的土壤对铵的吸持能力很弱;相反,绝大多数土壤胶体对硝态氮不仅无吸持作用,而且还有排斥作用,硝态氮极易溶于水而随水分迁移,因此,硝态氮以随水分迁移进入水体为主。土壤中的氮通过转化而在各种形态之间转换,有机氮矿化作用使有机氮转化为无机氮成为植物有效的无机氮;铵态氮通过硝化作用转化成为硝态氮,同时产生氮氧化物气体;反硝化过程将硝态氮转化为氮气及其氮氧化物气体,硝态氮异化还原则将硝态氮转化成为铵态氮等。土壤中各种氮转化过程的相对速率决定了各种形态的氮在土壤中存在的比例和被生物吸收、进入水体和大气的形态和通量。酸性土壤的硝化作用弱甚至缺失,土壤有机氮矿化后主要以铵态氮存在,径流和渗漏水中硝态氮含量很低;相反,中性和偏碱性土壤的硝化作用强,有机氮矿化后或施入到土壤的铵态氮迅速硝化成为硝态氮,径流和渗漏水中硝态氮占比大^[11]。不仅如此,在植物的长期演化过程中,土壤中铵态氮和硝态氮的比例决定了起源于该土壤上生长的植物是喜好吸收铵态氮还是喜好吸收硝态氮^[12]。种植的作物对铵态氮或硝态氮的喜好与土壤中无机氮的主要形态—

致,氮肥的利用率则高,反之则利用率低^[13-14]。

土壤氮元素循环,即与植物、水体和大气的交换通量不仅取决于土壤中氮转化速率,还取决于转化过程的最终产物、中间产物及其副产物的比例。描述 N₂O 排放的“管道漏气”模型很好地表达了氮转化速率和产物比例对 N₂O 排放的重要性^[15]。土壤中各种氮转化过程的速率和产物比例取决于土壤性质及其水、气、热环境条件,因此,土壤氮转化过程的速率和产物是土壤水、气和热状况综合作用的结果。由于土壤水、气和热等因素是可调控的,因而为人类调控土壤氮转化过程速率及其产物比例提供了可能。

虽然其他元素在土壤中的转化过程不如氮元素那么丰富多彩,但同样其形态决定了对作物的有效性和向水体和大气的扩散通量。例如,矿物中的磷、钾等营养元素只有通过风化释放到土壤溶液或成为交换态等才能被植物吸收利用,但风化作用也增加了这些元素随水分迁移进入水体的可能性。

由此可见,深入认识土壤中元素的转化过程、速率、产物及其影响因素是土壤养分循环研究深入到定量化和实现针对性调控的基础。然而,至今仍然缺乏土壤养分转化过程、产物和速率的量化测定方法,在土壤养分循环研究中经常作为黑箱处理。当今的科学技术水平和研究手段为量化土壤养分转化速率和产物创造了良好的条件,“十四五”应将土壤养分转化过程、产物和速率的量化,包括量化的研究方法和研究手段作为土壤肥力与土壤养分循环分支学科基础研究的重点。

3 国家需求对土壤肥力和土壤养分循环学科的新要求

随着我国经济的高速发展和人们生活状况的改善,对农产品供应提出了多样化的要求。与此相适应,在过去 40 年中,我国的种植制度和管理方式发生了很大的变化,呈现出明显的两极化现象。一方面,水稻、小麦和玉米等大宗粮食作物的种植强度下降,一年三熟地区降为二熟,甚至一熟;一年二熟地区降为一熟,甚至休闲抛荒;另一方面,高强度的设施种植面积不断扩大。由于设施种植的高产值^[16],过去 40 年中,我国设施种植快速发展,截至

2017 年,全国设施种植总面积达到 370 万 hm^2 。2016 年我国设施种植的年产值超过 9 800 亿元,部分省市农民纯收入的 50%以上来自于设施种植^[17]。在肥料施用方面也发生了显著的变化。根据有关报道,过去几年我国已经提前实现了到 2020 年化肥使用量零增长的目标,大宗粮食作物的单位面积肥料施用量从 2000 年以来已经呈现下降趋势^[18]。相反,设施园艺种植的肥料施用量未见实质性地减少。大量统计数据表明,我国设施园艺种植的单位面积平均 N、 P_2O_5 和 K_2O 施用总量(有机肥+化肥)分别为 850.5、726.0 和 793.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远远超过作物的推荐施肥量^[19]。提高养分利用率,减少施肥导致的养分环境负荷仍然任重道远。“十四五”时期,土壤肥力与土壤养分循环分支学科在继续深化过去研究成果,加强土壤养分转化基础研究的同时,还应针对我国当前种植制度和肥料管理等方面出现的新情况开展相关的基础研究,解决生产实际中的基础理论问题,服务于国家需求。

3.1 发挥在落实“藏粮于地、藏粮于技”战略中的作用

“藏粮于地、藏粮于技”是我国“十三五”计划的国家战略任务之一。提出这一战略主要是基于现阶段国内外市场粮食供给宽裕,我国已有经济能力增加粮食进口,因而具备了在部分地区实行耕地轮作休耕的条件。为了确保谷物基本自给、口粮绝对安全,必须保障轮作休耕地土壤的肥力不受破坏,甚至有所提高,一旦国际形势突变或发生重大自然灾害时,轮作休耕地即可投入到粮食生产中去。为落实“藏粮于地、藏粮于技”战略,2016 年农业部等十部委发出了《探索实行耕地轮作休耕制度试点方案》的通知。事实上,在全国范围内,尤其是我国南方地区,农田荒芜,复种指数下降现象已十分普遍。但是,由于农村劳动力转移,农民收入对农业生产的依赖程度下降,休耕或休闲期土壤未得到有效管理的现象十分突出,落实“藏粮于地、藏粮于技”战略面临着巨大的挑战。实现“藏粮于地”的关键是通过轮作休耕,维持,甚至提高土壤肥力。由此可见,土壤肥力和土壤养分循环学科在落实“藏粮于地、藏粮于技”战略中可以发挥主力军的作用。

1) 休耕时土壤肥力恢复过程及其作用因素。休耕是人类最早利用的农业土壤肥力恢复途径。在过

去相当长的历史时期,由于长期的粮食供应紧张,不具备通过休耕恢复土壤肥力的空间,因此,有关的研究也几乎是空白。当前,轮作休耕已经成为客观现实,而且有可能长期持续。土壤肥力与土壤养分循环分支学科应该加强研究不同休耕方式下土壤结构、通透性、有机质和养分元素含量及其有效性等土壤肥力因子的动态变化过程,驱动土壤肥力因子变化的主要因素,作用机制等。

2) 加速休耕土壤肥力恢复的原理、途径和方法。在自然条件下,休耕恢复土壤肥力是一个缓慢的过程,与“藏粮于地、藏粮于技”战略要求不相适应。因此,必须加强加速休耕土壤肥力恢复的原理、途径和方法的研究。其次,由于农村劳动力转移,农民对维持土壤肥力的热情下降,快速恢复土壤肥力的途径、方法和技术还必须省工、高效和易于实施。

3) 轮作恢复土壤肥力的机制和轮作作物选择的基本原则。在农作物生长间隔期,种植覆盖作物,可以减少养分向环境的扩散;覆盖作物翻耕入土,可以提高土壤有机质含量和养分供应能力。因此,在二季作物生长的间隔期,种植覆盖作物已经成为国际研究的热点之一^[20]。我国地域广阔,气候和土壤类型和种植制度多种多样,应该加强研究适应不同气候和土壤的轮作或覆盖作物在恢复土壤肥力中的作用及其作用机制,在此基础上提出适合于不同气候、土壤类型和种植制的轮作作物搭配的基本原则。

3.2 高度集约化种植的土壤肥力维持和提高

我国设施种植的快速发展为保障我国蔬菜、瓜果供应和提高农民经济收入发挥了重要作用。由于设施种植的本身特点,缺乏科学指导和片面追求短期经济效益等因素的驱动,设施种植土壤退化已成为制约设施种植可持续发展的瓶颈问题^[19, 21-22]。设施种植的土壤退化主要表现为酸化、次生盐渍化、养分过量积累、养分失衡和土传病害频发。土壤生物和理化性质的快速严重退化也常常发生在经济效益较高的果园土壤中。

土壤生物是土壤养分转化的主要执行者,由土壤生物合成的酶活性是土壤肥力的重要指标之一,也是高频出现在土壤肥力中的主题词(表 1)。由于作物单一,种植强度高,设施种植必然导致土壤生物多样性下降和土传病原生物丰度增加,不仅导致

土壤养分转化速率和活性下降, 而且导致土传病害频发^[23]。显然, 受土传病害侵袭的作物是无法有效吸收土壤养分的。健康的土壤微生物区系是维持土壤健康, 发挥其生产功能和生态服务功能的重要基础^[24]。所以, 维持土壤健康的微生物区系是高强度设施种植下防止土壤肥力退化, 恢复退化土壤肥力的关键。

以设施种植为代表的高强度的集约化种植不仅对恢复和防止土壤肥力退化提出了新的课题, 而且对养分管理也提出了新的要求。笔者曾探讨过高度集约化种植的养分管理问题^[25], 在此摘其要点如下:

1) 合理养分施用量的确定原则。由于以设施种植为代表的集约化种植环境与大田生产有很大的差别, 如在设施种植下具有较高的温度和湿度, 土壤水分以从下往上运移为主, 设施栽培作物对养分浓度(活度)的要求高于大田作物, 所以, 确定设施种植的肥料施用量不能简单地照搬用于大田生产的施肥量确定原则。

2) 养分平衡指标。集约化种植对养分平衡的要求更高。从单一养分元素看, 由于大量、偏面施用氮磷钾和添加微量元素的复合肥, 设施种植土壤普遍出现了各种养分元素大量积累的现象^[26-27]。笔者实验室测定了云南昆明周边种植番茄土壤养分元素含量, 结果如表 2。无论是磷、钾大量元素, 还是钙、镁、硫中量元素, 或是铜、锌、硼、铁、锰等微量元素均远远超过第二次土壤普查时制订的土壤

养分最高等级。但是, 这并不能保证土壤养分的平衡供应, 然而目前尚无具有针对性的养分平衡确定原则和具体指标。

3) 大量积累养分的作物有效性及其环境效应。设施种植土壤中普遍积累了大量的氮、磷、钾、硫和微量元素, 但是农户还是继续大量施肥化肥, 而学术界对因施肥而大量积累的养分元素的作物有效性也缺少充分的研究^[27]。明确设施种植土壤大量积累的养分元素的作物有效性及其影响因素是因土施肥或诊断施肥的基础。由于特殊的环境条件, 设施种植土壤的养分转化循环规律不同于大田, 例如因塑料膜的存在从土壤界面挥发的氨并不直接排向大气; 因缺少向下运移的水分, 硝态氮难以向下运移而积聚在表层形成盐斑等, 所以, 设施种植的土壤养分扩散途径和机制也不同于大田。应加强集约化种植土壤养分循环规律和养分扩散途径研究, 为客观评估集约化种植的环境效应提供科学依据。

4) 过量积累养分的消除。集约化种植下土壤养分过量积累现象十分普遍, 国际上采用种植前淋洗清除过量积累养分的方法^[28]。但我国集约化种植地区往往同时也是地面水和地下水养分富集区, 淋洗去除过量积累的养分不符合我国的生态环境保护。土壤肥力和土壤养分循环分支学科既需要为设施种植提供养分施用量的确定方法和手段, 减少养分在土壤中的积累, 也需要提供清除过量土壤养分的有效方法和手段。

表 2 云南昆明鸡街镇番茄地土壤有效养分含量

Table 2 Contents of available nutrients in the soils under greenhouse dedicated to tomato cultivation in Kunming, Yunnan

编号 Code	磷 P	钾 K	钙 Ca	镁 Mg	硫 S	铜 Cu	锌 Zn	铁 Fe	硼 B	锰 Mn)
/(mg·kg ⁻¹)										
1	137	151	2 650	214	213	7.84	54.9	204	3.52	152
2	238	412	2 900	246	164	10.9	55.5	231	2.92	145
3	179	366	2 490	218	167	7.61	38.6	196	2.12	118
4	56.2	167	2 470	246	189	9.93	40.3	366	1.71	164
5	68.6	277	2 495	218	160	7.95	38.1	231	1.91	108
6	50.2	289	3 725	278	162	9.22	29.6	238	1.98	117
一级标准 ¹⁾ Class 1 ¹⁾	>40	>200	>1 000	>300	>30	>1.8	>3.0	>20	>2.0	>30

¹⁾第二次土壤普查制订的土壤养分等级, 参见文献[2]。Grades of soil nutrient supply designed for the Second National Soil Survey, see reference [2].

3.3 实现“双减”目标的土壤肥力和养分循环问题

目前提高养分利用率以实现减少肥料施用量的目标多从养分管理角度出发,在土壤方面主要通过测土施肥确定合理施用量,较少考虑土壤养分供应种类、强度、时间动态是否与作物需求的养分种类、需求量及其时间相契合和土壤积累的养分保持是否与环境条件相契合等的问题,土壤肥力和土壤养分循环分支学科在提高养分利用方面的作用远未充分发挥。“十四五”期间应加强土壤-作物-环境相互作用的研究。

1) 土壤-作物相互作用与养分高效利用。目前关于合理施肥的研究基本上都是针对确定的土壤-作物系统而进行的,忽视了根据土壤和作物特性选择适宜作物对养分高效利用的重要性,关于“土宜”的研究只关注一些特色作物,对于一般性作物考虑较少,考虑土壤属性及土壤养分转化特性适应性的更少^[29-30]。研究表明将喜铵作物种植于铵态氮为主的土壤中,将喜硝作物种植于硝态氮为主的土壤中是实现氮肥高效利用的基础;反之,则难以提高氮肥利用率^[31]。轮作休耕措施的实施和大量特色经济作物的引种为根据土壤和作物特性选择适宜的作物创造了空间,土壤-作物相互作用与养分高效利用关系的研究成果已经具备了应用的广阔空间。

2) 作物-土壤微生物相互作用。土壤微生物在土壤养分循环与作物有效性方面发挥着重要的作用,但是,对此的认识非常有限,而且多局限于土壤微生物对单一元素循环及其有效性的影响,对养分平衡供应中的作用认识几乎还是空白。另外,作物根系通过改造根际环境和分泌物质,改变根际土壤微生物丰度和组成。根际微生物是当前的研究热点^[32],然而,作物-土壤微生物相互作用对作物健康和养分供应的认识仍然很不充分,可应用的调控手段更加有限。

3) 土壤-作物-环境相互作用与养分有效性。作物并不是土壤中有效养分的唯一利用者,土壤生物对有效养分的同化作用,土壤养分向水体和大气的扩散,以及土壤养分的物理和化学固定等均与作物吸收形成竞争关系,所以,土壤对作物养分的供应能力不仅决定于土壤中养分的量、释放速率等,还取决于作物对有效养分的吸收竞争能力。认识土壤-作物-环境的相互作用是调控土壤对作物养分供应能力的重要基础。

参考文献 (References)

- [1] Luo D Q, Bai J, Xie D T. Research on evaluation norm and method of soil fertility[J]. *Soil and Environmental Sciences*. 2002, 11 (2): 202—205. [骆东奇, 白洁, 谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法[J]. *土壤与环境* 2002, 11 (2): 202—205.]
- [2] Hu Z Z, Pan C D, Chen H. Evaluation of soil fertility in Jujube production orchards in Ruoqiang County, Xinjiang[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2019, 42 (3): 76—80. [胡珍珠, 潘存德, 陈虹. 新疆若羌县红枣生产园土壤肥力研究[J]. *河北农业大学学报*, 2019, 42 (3): 76—80.]
- [3] 中国知网 (CNKI). <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbprefix=SCDB>.
- [4] Hall A D. The fertility of the soil[J]. *Science*, 1910, 32 (820): 363—371.
- [5] Zhou C Y. Soil survey and methods for soil mapping[J]. *Geological Review*, 1936 (5): 531—544. [周昌蓉. 土壤调查及土壤图之制法[J]. *地质论评*, 1936 (5): 531—544.]
- [6] Graustein W C, Cromack K Jr, Sollins P. Calcium oxalate: Occurrence in soils and effect on nutrient and geochemical cycles[J]. *Science*, 1977, 198 (4323): 1252—1254.
- [7] Zeng T X. Brief discussion on nutrient cycling in forest and silviculture[J]. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 1985, 1 (4): 1—5. [曾天勋. 浅谈森林养分循环的规律及有关营林问题[J]. *广东林业科技*, 1985, 1 (4): 1—5.]
- [8] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, 31 (2): 64—71.
- [9] Erisman J, Schaap M. The need for ammonia abatement with respect to secondary PM reductions in Europe[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 129 (1): 159—163.
- [10] Torn M S, Trumbore S E, Chadwick O A, et al. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover[J]. *Nature*, 1997, 389 (6647): 170—173.
- [11] Zhang J B, Tian P, Tang J L, et al. The characteristics of soil N transformations regulate the composition of hydrologic N export from terrestrial ecosystem[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121 (6): 1409—1419.
- [12] Haynes R J, Goh K M. Ammonium and nitrate nutrition of plants[J]. *Biological Reviews*, 1978, 53(4): 465—510.
- [13] Zhang J, Cai Z, Müller C. Terrestrial N cycling associated with climate and plant-specific N preferences: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69 (3): 488—501.
- [14] Liu S Y, Chi Q D, Cheng Y, et al. Importance of matching soil N transformations, crop N form preference, and climate to enhance crop yield and

- reducing N loss[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 1265—1273.
- [15] Zhang J B, Müller C, Cai Z C. Heterotrophic nitrification of organic N and its contribution to nitrous oxide emissions in soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 84: 199—209.
- [16] Wei X M, Qi F, Ding X M, et al. Main achievements in China facility horticulture[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32 (12): 227—231. [魏晓明, 齐飞, 丁小明, 等. 我国设施园艺取得的主要成就[J]. *农机化研究*, 2010, 32 (12): 227—231.]
- [17] Qu J. China ranks first in the world in facility horticulture area[N]. *Science and Technology Daily*, 2017-08-22 (1). [瞿剑. 中国设施园艺面积世界第一[N]. *科技日报*, 2017-08-22 (1).]
- [18] Sun W J, Huang Y. Synthetic fertilizer management for China's cereal crops has reduced N₂O emissions since the early 2000s[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 160: 24—27.
- [19] Sun J, Gao H B, Tian J, et al. Development status and trends of protected horticulture in China[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(4): 594—604. [孙锦, 高洪波, 田婧, 等. 我国设施园艺发展现状与趋势[J]. *南京农业大学学报*, 2019, 42(4): 594—604.]
- [20] Justes E. *Cover crops for sustainable farming*[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017.
- [21] Wang G Y, Guo W L, Chen B H, et al. Continuous cropping obstacles of facilities vegetables in Henan: Investigation and analysis[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32 (25): 27—33. [王广印, 郭卫丽, 陈碧华, 等. 河南省设施蔬菜连作障碍现状调查与分析[J]. *中国农学通报*, 2016, 32 (25): 27—33.]
- [22] Cao Z H, Huang J F, Zhang C S, et al. Soil quality evolution after land use change from paddy soil to vegetable land[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26 (2): 97—103.
- [23] Cai Z C, Huang X Q. Soil-borne pathogens should not be ignored by soil science[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 305—310. [蔡祖聪, 黄新琦. 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (2): 305—310.]
- [24] Doran J W, Zaiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15: 3—11.
- [25] Cai Z C. Scientific and technological issues of nutrient management under greenhouse cultivation in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (1): 36—43. [蔡祖聪. 我国设施栽培养分管理中待解的科学和技术问题[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (1): 36—43.]
- [26] Li T, Yu L, Wu Y, et al. Secondary salinization of greenhouse vegetable soils and its affecting factors in Shandong Province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (1): 100—110. [李涛, 于蕾, 吴越, 等. 山东省设施菜地土壤次生盐渍化特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (1): 100—110.]
- [27] Feng W, Zhou X F, Yang J F. The effective-using study on the accumulating phosphorus, potassium of greenhouse vegetables in soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23 (S1): 193—196. [冯伟, 周晓芬, 杨军芳. 设施蔬菜土壤积累态磷、钾养分的有效利用研究[J]. *华北农学报*, 2008, 23 (S1): 193—196.]
- [28] Sonneveld C, Voogt W. *Plant nutrition of greenhouse crops*[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009.
- [29] Wang L, Hu B Q, Zhou Y Y, et al. Study on land suitability for *Hylococcus undatus* and some other plants in Karst area based on DEM-GRA[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29 (2): 134—140, 151. [王雷, 胡宝清, 周游游, 等. 基于 DEM-GRA 的岩溶区火龙果等土宜的研究[J]. *中国岩溶*, 2010, 29 (2): 134—140, 151.]
- [30] Gao W C, Cai K, Li D C, et al. Soil taxonomy and suitability assessment on typical tobacco-planting farmlands in Guizhou, Southwest China[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1 (8): 877.
- [31] Zhang J B, Wang J, Müller C, et al. Ecological and practical significances of crop species preferential N uptake matching with soil N dynamics[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 103: 63—70.
- [32] Prasad M, Chaudhary M, Choudhary M, et al. *Rhizosphere microorganisms towards soil sustainability and nutrient acquisition*[M]//*Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture*. Singapore: Springer Singapore, 2017: 31—49.

(责任编辑: 卢 萍)