

DOI: 10.11766/trxb201805310286

我国设施栽培养分管理中待解的科学和技术问题*

蔡祖聪

(南京师范大学地理科学学院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 我国设施栽培迅速发展为保障城乡居民蔬菜和瓜果供应、增加农民收入发挥了极为重要的作用, 但是, 由于不合理施肥, 土壤酸化、次生盐渍化、养分失衡、氮、磷、钾、硫元素过量积累等土壤快速退化现象极为普遍, 正在严重威胁设施栽培的可持续发展。相关科学研究严重滞后于生产发展水平, 设施栽培养分管理中还存在诸多科学问题亟待解决。本文探讨了设施栽培中确定养分合理施用量、判断土壤养分供应是否平衡、评价养分环境效应和去除土壤中过量积累的养分等方面尚待解决的科学问题。认为我国亟需组织力量, 系统地研究在设施栽培特殊的小气候、土壤水分运移、作物生长和养分吸收特点以及高复种指数下, 土壤养分转化规律, 水、土、气和作物之间的相互作用机理及其对土壤养分有效性的影响, 尽速改变科学研究滞后于生产实际的现状。

关键词 设施栽培; 养分施用量; 养分平衡; 环境效应; 退化土壤修复

中图分类号 S158 **文献标识码** A

设施栽培由于其较高的人为可控性, 在一定程度上可以突破气候对作物生长的限制, 产量高且稳定, 具有较高的经济效益等优点, 在过去40年中, 我国的设施栽培发展极为迅速, 种植面积大幅度增加, 至2017年我国设施蔬菜栽培面积已达370万公顷, 产业产值超过9 800亿元^[1]。设施栽培快速发展为保障城乡居民蔬菜和瓜果供应, 增加农民收入发挥了极为重要的作用。然而, 在另一方面, 设施栽培土壤普遍快速退化, 大量施用化肥和农药威胁生态环境安全。设施栽培正面临着可持续发展的严峻挑战。一般情况下, 我国设施栽培土壤连续种植3~5年即出现程度不同的连作障碍现象, 表现为土壤酸化、次生盐渍化、养分失衡和自毒物质积累, 病虫害发生频率升高, 作物产量和品质下降, 甚至绝收。当土壤严重退化时只能弃棚, 造成对土壤资源的破坏和经济上的损失。王广印等^[2]对河南省设施蔬菜地的调查表明, 连续种植5年以下出现连

作障碍的设施大棚蔬菜地高达84.6%, 日光温室达56.9%; 种植20年以上存在连作障碍的大棚温室达100%, 日光温室达99.3%。我国其他省份的设施栽培土壤退化情况与此类似^[3-4]。高强度种植和养分管理不合理是导致设施栽培土壤出现严重连作障碍问题的主要原因, 其中, 养分管理不合理是最为普遍和最为突出的原因。我国设施栽培中的养分管理不合理有设施栽培发展历史短, 生产者主要从大田生产者转变而来, 缺少设施栽培养分管理经验的因素, 但是, 更为关键和更为严重的问题则是对设施栽培中土壤养分转化和作物吸收规律的基础研究严重不足, 且至今未引起高度重视, 致使科学工作者和农技科技推广者本身无足够的知识储备用以指导生产者提高养分管理水平。本文讨论设施栽培养分管理中尚未很好解决的科学问题, 旨在推动对设施栽培养分管理的研究, 提高设施栽培养分管理水平, 遏止设施栽培土壤连作障碍因子的形成速度。

* 国家重点研发计划项目(2017YFD0200600)资助 Supported by the National Key Research and Development Plan of China (No. 2017YFD0200600)

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: 2018-05-31; 收到修改稿日期: 2018-07-09; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-08-29

1 如何确定设施栽培的合理养分投入量？

设施栽培中N、P、K养分投入量大，利用率低，短期内在土壤中大量积累，导致土壤酸化和次生盐渍化，环境风险增加。余海英等^[5]对本世纪初山东寿光设施蔬菜地养分用量的调查表明，该地区每年氮、磷、钾养分的平均投入量为 $4\ 088\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $3\ 656\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $3\ 438\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，其中随化肥投入的氮、磷、钾养分分别占到各养分总量的63%、61%和66%，而氮、磷、钾养分的利用率分别仅为24%、8%和46%。由于大量施用氮、磷、钾肥，土壤中硝态氮平均含量高达 $254\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，是当地大田土壤的21倍；土壤耕层（0~20 cm）有效磷平均含量达 $248\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，最高达 $377\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均为大田土壤的5.4倍，而且远远超过适宜蔬菜生长的有效磷含量范围；速效钾含量平均达 $486\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，最高达 $764\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均为大田土壤的3.7倍。蔡红明等^[6]对陕西193个日光温室养分投入量及土壤养分积累的调查结果与此相似，年均氮、磷（ P_2O_5 ）、钾（ K_2O ）养分总投入量分别为 $1\ 944\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $1\ 587\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1\ 799\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，而养分携出量仅占氮、磷、钾养分总投入量的22%、7%和36%。虽然设施栽培的农户很少刻意施用硫肥，但由于磷和钾肥大多施用含硫的过磷酸钙和硫酸钾，设施栽培土壤中还存在无机硫大量积累的现象。如对采自安徽和县大棚蔬菜土壤的测定表明，其 SO_4^{2-} 含量高达 $917\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[7]，甚至超过了我国南方土壤全硫含量的最高报道值^[8]。据笔者了解，随着设施栽培经营者养分管理经验的不断积累，他们的养分管理水平正在不断提高，N、P、K肥料施用量有趋于合理化的趋向，一些设施栽培土壤连续种植10年以上，连作障碍问题仍在有效控制程度内。王印广等^[2]的调查发现，在河南省出现了设施栽培连续种植30年而未出现严重连作障碍的个案。但是，总体而言，设施栽培中化肥过量施用的问题依然十分普遍和严重。

在我国，有关作物养分管理的研究主要集中于大田栽培的大宗作物，如水稻、小麦和玉米；在养分元素上重点关注氮，针对磷、钾肥合理施用量的研究相对较少，针对中、微量元素施用量的研究更稀少。但是，即使对于大田栽培的水稻、小麦和玉

米的氮肥管理，合理施用量的理论计算仍有相当大的不确定性，施肥量的确定主要还是依靠经营者的经验和对大量数据的统计分析^[9]。设施栽培条件下，由于大棚内的特殊小气候，作物对养分的需求规律不同于大田栽培作物，因此，大田栽培的合理施肥量定量方法不一定适用于设施栽培。设施栽培作物种类繁多，同一作物种植在不同季节，它们对养分的需求量和需求规律各不相同，更增加了设施栽培条件下确定合理施肥量的复杂性和难度。

设施栽培为作物生长营造了不同于大田的小气候条件，温室内湿度大，气温升高快，土壤升温滞后于气温升高^[10]。较高的空气湿度降低了叶片的水分胁迫，提高了气孔导度，因而具有较高的光合速率和干物质积累速率^[11]。较高的光合速率和干物质积累对氮、磷、钾及其他中量和微量养分元素的吸收提出了更高的要求。但是，较高的空气湿度降低作物的蒸腾速率，不利于通过蒸腾吸收和转运的养分吸收^[12-14]。此外，作物对土壤养分的吸收和植株体内的转运依赖于土壤温度^[15]。土壤温度滞后于气温升高意味着土壤养分的有效性提高过程滞后于光合作用速率的提高过程。光合速率和干物质积累速率增加而土壤养分吸收和转运不能相应地提高，必然负反馈于光合作用和干物质积累，使作物产量降低。温室作物的快速生长，使根系快速吸收养分，在根周围土壤形成所谓的养分耗竭区^[16]。为了使作物的养分吸收和转运速率与光合速率和干物质积累速率相一致，缩小养分耗竭区，提高养分在土壤或土壤溶液中的浓度（或活度），增加单位蒸腾水分携带的养分量，似乎是弥补蒸腾不足而减少的养分吸收量的一条有效途径。由此可以看出，施用较大田栽培条件下更多的肥料，保持较高的土壤养分浓度应是设施栽培条件下，满足作物养分需求的客观需要。但是，针对各种作物及不同的生长阶段，设施栽培的土壤养分浓度需要提高到何种程度才能满足作物生长的需要，至今尚无科学答案。

土壤养分的作物有效性不但与作物吸收能力有关，而且还与养分在土壤中的转化、运移等特性有关。设施栽培条件下，土壤微生物区系和活性发生很大的变化^[17-18]。由于土壤微生物在养分转化中的重要性，土壤微生物区系及其活性的变化必然影响土壤养分的有效性，从而影响合理的肥料施用

量。此外,设施栽培土壤酸化和次生盐渍化也对土壤养分有效性产生影响。显然,由于设施栽培的作物养分需求规律不同于大田作物,基于大田作物生产的施肥模型,如“肥料效应函数模型”、“养分平衡模型”等^[16]不一定适用于设施栽培作物。事实上,目前尚无适合于定量设施栽培作物养分需求量和需求规律的施肥模型。由于事实上缺少量化设施栽培合理施肥量的科学确定方法,在“宁使过量,不使缺乏”意愿的驱使下,必然导致经营者过量施用化肥。在设施栽培土壤中大量积累硝态氮、磷和钾的情况下,经营者仍然大量施用氮、磷、钾肥料,这是纯粹的心理因素驱动还是确有客观的需求,仍是一个无明确答案的问题。

可以预期设施栽培的经营者通过不断的摸索和总结,针对经营的土壤、作物和设施栽培的小气候条件,将会逐渐掌握肥料的合理施用量,但这会是一个相当长的过程。科学工作者有责任通过设计科学的试验方案,总结出设施栽培下各种作物的养分需求量和需求时间的确定方法,并将相关的知识传播给设施栽培经营者,以缩短他们自己摸索的时间,尽早实现设施栽培下的养分科学管理。

2 如何判断设施栽培土壤养分是否平衡?

土壤养分失衡是设施栽培常见的作物连作障碍因子之一。据王印广等^[2]对河南设施栽培土壤的调查,无论是大棚还是日光温室,养分失衡均是发生率最高的连作障碍因子。作物体C、N、P、K等养分含量虽然随生长阶段和土壤有效养分含量的比例不同而发生一定的变化^[19-20],但对于特定的作物,元素含量之间存在相对稳定的比例关系,这是生态化学计量学的主要研究内容^[21]。如果施肥投入的养分比例与作物需求的养分比例不一致,随着种植时间的延长必然会出现土壤养分失衡问题,施入量超过作物需求的养分在土壤中相对富集,相反,施入量小于作物需求的养分在土壤中相对贫乏。但是,分析作物收获的各种养分元素输出量,只能提供土壤各种养分元素输出的部分数据。由于各种养分元素在土壤中的含量、有效性及其损失途径不同,依据土壤养分投入和作物收获输出的平衡关系仍难以判断土壤中各种养分元素是否可保持对

作物的平衡供应。因此,实现“养分平衡”的概念,在生产实际中并不是一件容易的事。养分资源的有效供应也是实现养分平衡供应的重要因素。我国大田生产中,从20世纪初至今,由于氮、磷、钾化肥的不平衡发展以及科学认知水平的局限性,土壤氮、磷、钾养分的平衡状况发生了多次变化。在化学氮肥大量施用之前,我国土壤以缺氮为主,缺磷次之,钾相对丰富。20世纪80年代,由于化肥施用重氮磷,轻钾肥,在全国范围内开始出现土壤钾素供应不足,在北方半干旱和干旱区则土壤剖面中硝酸盐大量积累的问题(参见文献[22])。由此可见,即使在大田生产中,我国实现氮磷钾肥的平衡施用也经历了长时间的摸索过程,而且仍面临着养分供应不平衡的潜在风险。

在设施栽培中,由于大量施用氮磷钾复合肥,短时间内土壤中氮磷钾以及伴随着磷钾一起施入的硫同步大量积累。但这并不等于氮、磷、钾、硫养分供应达到了平衡状态。况且,土壤养分平衡,不仅仅是氮、磷、钾大量元素之间的平衡,还包括中量元素之间和微量元素之间的平衡,大量元素与中量元素的平衡,大量元素与微量元素的平衡,中量元素与微量元素的平衡等。由于设施栽培中大量施用氮、磷、钾和硫,普遍忽视对中量和微量元素的补充,既有可能中、微量元素补充不足引起的养分不平衡,还有大量元素过分积累,导致中、微量元素相对不足的养分不平衡,养分失衡是必然的结果。

对土壤养分供应是否平衡作出判断或诊断是实施平衡施肥的基础。作物的缺素症状或与缺素有关的生理病害是诊断作物是否缺少某一元素或养分是否平衡的主要指标^[2]。但是,当作物出现缺素症状时再补充施肥,往往不能完全恢复缺素引发的对作物生长发育的损害,缺素造成的损害有时甚至是不可逆的。土壤诊断有可能提供作物是否可能缺素的事先判断,但是,我们至今仍然缺乏有效的土壤养分供应是否平衡的土壤诊断方法。当今的土壤学似乎也失去了诊断土壤养分是否平衡的兴趣和自信。所以,土壤养分平衡仍然流于概念而无实际可操作的定量指标。

设施栽培作物种类繁多,它们对各种养分的需求量各不相同,所以,为设施栽培作物提供土壤养分供应是否平衡的土壤诊断方法是对土壤学的一大

挑战。

3 如何评估土壤养分大量积累的生产 和环境效应？

在我国，设施栽培土壤大量元素氮、磷、钾大量积累是极为常见的现象^[2-4, 23]。由于磷、钾肥多以硫酸盐形态施入土壤，硫伴随着磷、钾的积累而积累^[7, 24]，对于硫的积累很少引起人们的重视。就大田土壤而言，氮、磷、钾积累往往意味着肥力水平的提高，对作物生产基本上是正面的积极效应，但可能引起不利的环境效应，如氨挥发和 N_2O 排放增加，硝态氮和磷径流与淋溶增加，影响地表水和地下水质量等。设施栽培土壤的氮、磷、钾的积累远远超过自然土壤和大田土壤所能达到的程度，硫的积累量也往往远远超过非酸性硫酸盐土壤所能达到的程度^[7-8, 24]。设施栽培中大量元素氮、磷、钾和硫含量远高于大田土壤中正常含量水平的积累，可能导致它们具有不同于大田土壤的生产和环境效应。

设施栽培土壤中大量积累的氮、磷、钾元素作为作物养分的有效性并不十分清楚，也很少被研究。对土壤中大量积累的氮、磷、钾元素的作物有效性进行深入研究将可为确定设施栽培作物的肥料合理施用量提供科学依据，是设施栽培中一个值得研究的科学问题。硫元素通常作为磷、钾肥的组成成分而被动地施入土壤，磷、钾肥的合理施用也必然使硫的输入量趋于合理。

不同于大田土壤，设施栽培土壤中大量积累的氮、磷、钾和硫对作物生长可以产生严重的不利影响，是设施栽培土壤生产力退化的主要因素。土壤中积累的氮和硫分别以硝酸盐和硫酸盐形态存在，导致设施栽培土壤次生盐渍化，不仅直接抑制作物生长，而且可能诱发作物土传病害。孙世中等^[24]的研究表明，设施栽培的香石竹枯萎病发病率与土壤电导率显著相关。我国施用的氮肥基本都是铵态氮肥或产铵态氮肥，如尿素，铵态氮被作物吸收或发生硝化作用释放质子是设施栽培土壤酸化的主要成因。钾作为植物的必需元素，几乎不存在对作物生长发育的直接不利影响，但研究表明，如果加入到土壤 K^+ 的比例和数量过高，非但未提高 K^+ 离子活度，还造成胶体上 Ca^{2+} 的大量解吸，导

致土壤胶体稳定性降低及K、Ca、Mg 三者的比例严重失衡^[25-26]。磷与很多作物必需营养元素，如Zn、Fe等可以生成溶解度很低的化合物，从而影响这些元素的作物有效性；磷酸根离子还可与以阴离子态被作物吸收的养分元素，如钼、硅、硼等的吸收产生竞争而影响它们的作物有效性^[27]。总体而言，我们对设施栽培土壤中大量积累的氮、磷、钾和硫的作物有效性及它们对其他养分元素作物有效性的影响还所知甚少。回答这些问题不仅可促进土壤学和植物营养学的发展，而且也是生产实际的需要。

设施栽培土壤积累大量的氮、磷、钾和硫，它们向大气和水体扩散、产生不利环境效应的风险极大，因而引起了人们的高度重视^[5, 23, 28]。现有的研究大多集中于氮和磷向环境的迁移和扩散方面，对钾和硫向环境迁移和扩散的研究较少。对北京平原农区地下水硝态氮含量的调查表明，设施栽培区地下水中硝态氮含量显著高于其他种植区地下水硝态氮含量^[29]。山东寿光大棚蔬菜生产区，2003至2005年的监测期间，地下水硝态氮呈现逐年上升趋势^[30]。Yusef^[23]对山东75个代表性温室蔬菜大棚的调查表明，土壤渗滤液中溶解性磷平均达 $3.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，远大于大田土壤渗滤液中的溶解性磷浓度。设施栽培的 N_2O 、NO和 NH_3 排放更是受到高度的关注^[31-32]。

设施栽培的土壤水分运移规律不同于大田土壤，因此，养分元素在土壤剖面中的迁移规律必然有别于大田土壤。设施栽培在揭棚以外的时间，阻隔了自然降水，避免了自然降水引起的水分向下运移。如果采用滴灌方式，灌溉引起的水分向下运移也非常有限。由于设施栽培中土壤水分以向上运移为主，所以，盐分的表聚现象非常严重，导致土壤的次生盐渍化。如果采用大水漫灌，或者长时间揭棚接受自然降水的淋洗，表聚的大量养分，尤其是硝态氮将向下迁移。因此，硝态氮向土壤剖面下层迁移的现象也不在少数^[28, 33]，甚至进入地下水^[29]。同样，设施栽培的水分运移规律也将影响养分的水平迁移。由此可见，研究设施栽培的土壤养分迁移和扩散规律，评估其对水体环境的影响，必须考虑其与大田不同的水分运移特点。

对于以气体形式排放到大气氮的研究，更应该考虑设施栽培对气体扩散的阻隔作用。由于设

施栽培对气体扩散的阻隔作用,箱式法测定的含氮气体排放通量只能反映棚内土壤界面这些气体的释放速率,而不一定能够反映其向棚外大气的扩散速率,尤其是对于水溶性的氨和大气化学活性很强的 NO_x ,它们中的一部分很可能因不能及时扩散到大气而返回到土壤, N_2O 也存在被进一步还原为 N_2 的可能。显然,测定以气体形式排放到大气土壤养分元素量,必须同时考虑土壤界面的释放和棚内空气与棚外大气的交换。评估设施栽培的环境影响首先必须保证监测方法和技术可以获得客观、真实的数据。

4 如何降低土壤已经积累的大量养分?

已如上述,由于过量施肥,设施栽培土壤普遍积累了大量氮、磷、钾和硫,导致土壤质量退化,因此,去除这些养分元素,尤其是导致土壤次生盐渍化的硝酸盐和硫酸盐的过量积累,是修复设施栽培退化土壤的重要任务之一。目前生产中常用的去除过量积累的养分元素的方法包括轮作、淋洗和强还原土壤处理^[34]。轮作对这些养分需求量大的作物可以降低这些养分在土壤中的积累量。轮作旱地作物,需要较长的时间才能修复退化土壤,虽然可以避免养分资源的浪费,但经济效益较低。若轮作水稻,同时还能起到淋洗的作用,但受到水资源、土壤渗透性、大棚结构等的制约,并非普遍适用。灌水淋洗对去除硝态氮的效果较好,对磷、钾和硫的淋洗效果不佳,而且淋洗使大量硝态氮进入水体,造成对水体的污染,不应该成为鼓励采用的方法。强还原土壤处理可以快速去除土壤积累的硝态氮,但对磷、钾几乎不具有去除效果,对于硫也只能将无机硫转化为有机硫,以气态硫排放出土壤的量很少^[7]。当强还原土壤处理结束、恢复到好气状态时,由无机硫转化而来的有机硫又很快矿化为无机硫,使土壤再次快速酸化和次生盐渍化。可见,目前的方法对于去除过量积累的硫均还存在严重不足。据笔者了解,在南方酸性土壤地区,设施栽培生产实际中亟需快速且经济的去除土壤中过量积累的磷、钾和硫的方法,尤其是去除硫的方法。对于北方石灰性土壤,大量积累的磷、钾、硫是否对土壤养分平衡、土壤生产和环境产生了不利影响

还少见报道。

5 结 语

在农业生产的养分管理方面,尤其是化肥的合理施用方面,我国的科学研究始终滞后于生产实际。我国的设施栽培已经快速发展,在养分管理方面出现了大量的问题,而科学研究多侧重于揭示设施栽培过量施肥的事实及其由此造成的对土壤质量和环境的不利影响,可用于指导科学施肥和解决生产中养分管理问题的研究成果非常有限。为了解决设施栽培养分管理中的科学问题,实现设施栽培的可持续发展,我国亟需组织力量,系统地研究在设施栽培特殊的小气候、土壤水分运移、作物生长和养分吸收特点以及高复种指数下,土壤养分转化规律,水、土、气和作物之间的相互作用机理及其对土壤养分有效性的影响。随着生物学、大数据管理和运用、监测和分析技术等的发展和在土壤、植物营养研究中的广泛应用,只要政府重视,土壤和植物营养学研究者持之以恒,作物养分管理中一些长期悬而未决的科学问题必将最终得到解决。

参 考 文 献

- [1] 瞿剑. 中国设施园艺面积世界第一. 科技日报, 2017-08-22 (1)
Qu J. Chinese facilities have the world's largest horticultural area (In Chinese). Science and Technology Daily, 2017-08-22 (1)
- [2] 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. 中国农学通报, 2016, 32 (25): 27—33
Wang G Y, Guo W L, Chen B H, et al. Continuous cropping obstacles of facilities vegetables in Henan: Investigation and analysis (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32 (25): 27—33
- [3] Cao Z H, Huang J F, Zhang C S, et al. Soil quality evolution after land use change from paddy soil to vegetable land. Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26 (2): 97—103
- [4] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 83

- (1): 73—84
- [5] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征. 中国农业科学, 2010, 43 (3): 514—522
Yu H Y, Li T X, Zhang X Z. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (3): 514—522
- [6] 蔡红明, 王士超, 刘岩, 等. 陕西日光温室养分平衡及土壤养分累积特征研究. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2016, 44 (9): 83—91
Cai H M, Wang S C, Liu Y, et al. Nutrient balance and accumulation in soil of solar greenhouse in Shaanxi (In Chinese). *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2016, 44 (9): 83—91
- [7] Meng T Z, Zhu T B, Zhang J B, et al. Effect of liming on sulfate transformation and sulfur gas emissions in degraded vegetable soil treated by reductive soil disinfestation. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 36: 112—120
- [8] 刘崇群. 中国南方土壤硫的状况和对硫肥的需求. 磷肥与复肥, 1995, 10 (3): 14—18
Liu C Q, Sulfur status in soils of South China and demands of sulfur fertilizers (In Chinese). *Phosphate Compound Fertilizer*, 1995, 10 (3): 14—18
- [9] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证—兼论确定作物氮肥推荐量的方法. 土壤学报, 2015, 52 (2): 249—260
Ju X T, Improvement and validation of theoretical N rate (TNR)—Discussing the methods for fertilizer recommendation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (2): 249—260
- [10] 李仁杰, 朱世东, 袁凌云, 等. 温室内地温变化规律及与气温的相关性. 中国农学通报, 2010, 26 (24): 209—212
Li R J, Zhu S D, Yuan L Y, et al. Study on the soil temperature variety regulation and the relativity with atmosphere temperature in the greenhouse (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26 (24): 209—212
- [11] Suzuki M, Umeda H, Matsuo S, et al. Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production. *Scientia Horticulturae*, 2015, 187: 44—49
- [12] Gisleröd H R, Selmer-Olsen A R, Mortensen L M. The effect of air humidity on nutrient uptake of some greenhouse plants. *Plant and Soil*, 1987, 102 (2): 193—196
- [13] 张大龙, 常毅博, 李建明, 等. 大棚甜瓜蒸腾规律及其影响因子. 生态学报, 2014, 34 (4): 953—962
Zhang D L, Chang Y B, Li J M, et al. The critical factors of transpiration on muskmelon in plastic greenhouse (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (4): 953—962
- [14] Jolliet O. Modelling of water uptake, transpiration and humidity in greenhouses, and of their effects on crops. *Acta Horticulturae*, 1993, 328: 69—78
- [15] 闫秋艳, 段增强, 李汛, 等. 根区温度对黄瓜生长和土壤养分利用的影响. 土壤学报, 2013, 50 (4): 752—760
Yan Q Y, Duan Z Q, Li X, et al. Effects of root zone temperature on growth of cucumber and nutrient utilization in soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (4): 752—760
- [16] 白由路. 植物营养与肥料研究的回顾与展望. 中国农业科学, 2015, 48 (17): 3477—3492
Bai Y L. Review on research in plant nutrition and fertilizers (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (17): 3477—3492
- [17] 马宁宁. 设施番茄根围土壤的微生物特性研究. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013
Ma N N. Study on Soil Microbial Properties in Protected Tomato Root Circumferences (In Chinese). Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013
- [18] Kim J M, Roh A S, Choi S C, et al. Soil pH and electrical conductivity are key edaphic factors shaping bacterial communities of greenhouse soils in Korea. *Journal of Microbiology*, 2016, 54: 838—845
- [19] 蔡祖聪, 钦绳武. 作物N、P、K含量对于平衡施肥的诊断意义. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (4): 473—478
Cai Z C, Qin S W. Diagnosis of balanced fertilization by N, P, K contents in grain and straw of wheat and maize (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12 (4): 473—478
- [20] 华娟. 福建省早稻主要功能品质的分析. 福州: 福建农林大学, 2014
Hua J. Analyses of main function qualities of early rice in Fujian Province (In Chinese). Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014
- [21] Anderson T R, Boersma M, Raubenheimer D. Stoichiometry: Linking elements to biochemical. *Ecology*, 2004, 85: 1193—1202
- [22] 张树清. 我国氮磷钾养分与合理施肥技术的研究. 磷肥与复肥, 2004, 19 (2): 65—69
Zhang S Q, Research on NPK nutrients and rational fertilization technique in China (In Chinese).

- Phosphate Compound Fertilizer, 2004, 19 (2): 65—69
- [23] Yusef K K. Soil phosphorus status in Chinese greenhouse vegetable production system. Copenhagen: Department of Plant and Environmental Sciences, Faculty of Science, University of Copenhagen, 2017
- [24] 孙世中, 郭云周, 官会林, 等. 不同管理模式下香石竹设施栽培土壤盐渍化特征及其诱导病害. 土壤, 2010, 42 (6): 972—977
Sun S Z, Guo Y Z, Guan H L, et al. Soil salinization characteristics of carnation cultivation under different management models and induced diseases (In Chinese). Soils, 2010, 42 (6): 972—977
- [25] 陈竹君, 王益权, 周建斌, 等. 日光温室栽培土壤供钾状况及K-Ca吸附交换特性研究. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (5): 1078—1084
Chen Z J, Wang Y Q, Zhou J B, et al. Quantity and intensity of potassium and its exchange relationship with calcium in sunlight greenhouse soils (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15 (5): 1078—1084
- [26] 刘岩, 周建斌, 刘占军, 等. 日光温室土壤养分含量及比例与种植年限的关系. 土壤通报, 2017, 48 (2): 420—426
Liu Y, Zhou J B, Liu Z J, et al. Relationships between content and ratio of soil nutrient and cultivating years in solar greenhouse (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48 (2): 420—426
- [27] Sumner M E, Farina M P W. Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping system. Advances in Soil Science, 1986, 5: 201—23
- [28] 周建斌, 翟丙年, 陈竹君, 等. 设施栽培菜地土壤养分的空间累积及其潜在的环境效应. 农业环境科学学报, 2004, 23 (2): 332—335
Zhou J B, Zhai B N, Chen Z J, et al. Nutrient accumulations in soil profiles under canopy vegetable cultivation and their potential environmental impacts (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23 (2): 332—335
- [29] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究. 土壤学报, 2006, 43 (3): 405—413
Liu H B, Li Z H, Zhang Y G, et al. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factor in rural areas of Beijing Plain (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43 (3): 405—413
- [30] 宋效宗, 赵长星, 李季, 等. 两种种植体系地下水硝态氮含量变化. 生态学报, 2008, 28 (11): 5513—5520
Song X Z, Zhao C X, Li J, et al. Dynamic variation of nitrate-nitrogen content in groundwater under two different agricultural cropping systems (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (11): 5513—5520
- [31] 林峰, 有机肥和化肥施用对大棚菜地N₂O和NO排放影响的观测研究. 南京: 南京农业大学, 2016
Lin F, Effects of chemical and organic fertilizer on N₂O and NO emissions from greenhouse vegetable fields (In Chinese). Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016
- [32] 李玉涛. 温室番茄配施氮肥和双氰胺对氮淋失及氧化亚氮排放和氨挥发的影响. 河北保定: 河北农业大学, 2015
Li Y T. Effects of nitrogen fertilizer with DCD application on leaching of nitrogen and nitrous oxide emissions and ammonia volatilization in tomato greenhouse (In Chinese). Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2015
- [33] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 氮、磷、钾在设施蔬菜土壤剖面中的分布及移动研究. 农业环境科学学报, 2006, 25 (增): 537—542
Liu Z H, Jiang L H, Zhang W J, et al. N, P, K distributions and movement in soils for greenhouse and outdoor field (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science. . 2006, 25 (Suppl): 537—542
- [34] 蔡祖聪, 张金波, 黄新琦, 等. 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究. 土壤学报, 2015, 52 (3): 469—476
Cai Z C, Zhang J B, Huang X Q, et al. Application of reductive soil disinfection to suppress soil-borne pathogens (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (3): 469—476

Scientific and Technological Issues of Nutrient Management under Greenhouse Cultivation in China

CAI Zucong

(*Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China*)

Abstract Rapid development of greenhouse cultivations has made substantial contributions to meeting the increasing demands of the urban and suburban resident population for vegetable and fruits and to improving farmers' economic status in China in the past four decades. However, due to inappropriate applications of nutrients, phenomena of soil degradation, like acidification, secondary salinization, nutrient unbalance, and unusual accumulations of N, P, K, and S appear commonly in the soils under greenhouse only a short time after setting up of the greenhouse, seriously affecting sustainable development of the greenhouse farming in China. As scientific researches in this aspect lag far behind the rapid developments of the greenhouse cultivation, nutrient management of greenhouse cultivation encounters a series of scientific and technological problems that call for urgent solution. In the paper, issues, like how to determine appropriate nutrient application rates for greenhouse cultivations, how to judge whether the soil nutrient supply, including macro-, medium-, and micro-elements, is in balance, how to evaluate environmental impacts of the nutrient management in greenhouse cultivation, and how to remove unusual surpluses of nutrients in the greenhouse soils, particularly sulfur, which is usually applied with phosphorus and potassium fertilizers, are discussed. It is held that it is essential and urgent to organize forces to launch system researches on the micrometeorology, soil water movement, growth and nutrient uptake of crops, and soil nutrient transformation in greenhouses with high multiple cropping index, particularly mechanisms of the interactions between water, soil, air and crops and their effects on soil nutrient availability, so as to alter the status of scientific researches lagging behind the production practices as quick as possible.

Key words Greenhouse cultivation; Nutrient application rates; Nutrient balance; Environmental impacts; Remediation of degraded soils

(责任编辑：卢萍)