

DOI:10.11766/trxb202311010449

董金龙, 徐烨红, 全智, 尹义蕾, 赵云云, 徐乔, 田康, 黄斌, 蔡祖聪, 马艳, 段增强. 中国设施种植土壤可持续利用的难点与应对策略[J]. 土壤学报, 2024.

DONG Jinlong, XU Yehong, QUAN Zhi, YIN Yilei, ZHAO Yunyun, XU Qiao, TIAN Kang, HUANG Bin, CAI Zucong, MA Yan, DUAN Zengqiang. The Obstacles and Countermeasures of Soil Sustainability in Protected Horticulture in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024.

中国设施种植土壤可持续利用的难点与应对策略*

董金龙¹, 徐烨红², 全智^{3,4}, 尹义蕾⁵, 赵云云⁵, 徐乔⁶, 田康¹,
黄斌³, 蔡祖聪⁷, 马艳^{2†}, 段增强^{1†}

(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.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 3.中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站, 沈阳 110016; 4.潍坊现代农业与生态环境研究院, 山东潍坊 261199; 5.农业农村部规划设计研究院, 北京 100125; 6.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225100; 7.南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

摘要: 中国设施种植大多采用中低端装备土壤栽培模式, 具有高投入、高产出和高强度利用的特点。截至2021年, 设施播种面积在267万 hm^2 左右, 占全球设施总面积80%以上。但长期设施种植导致土壤质量下降, 诱发面源污染加剧、温室气体排放增加、农产品产量和质量下降等诸多问题。本文聚焦设施种植土壤, 总结分析了设施土壤可持续利用的难点, 主要表现为: 土壤养分失衡、环境质量下降、农产品产量和质量降低、设施农用地管理制度不健全等。设施种植可持续利用难题主要归因于: 装备水平落后导致设施微环境和土壤养分供应调控不精准、施肥不合理和作物种类单一诱发土壤连作障碍、设施农用地管理制度革新动力不足导致土壤管理技术集成创新缓慢等。本文围绕设施土壤可持续利用提出了7项应对策略: 建设期耕作层构建、休闲期土壤改良、设施微环境调控、投入品管控、轮作模式构建、作物抗逆调控以及设施农用地管理制度优化, 旨在为小农中低端装备条件下设施土壤可持续利用提供研究思路和科学依据。

关键词: 温室大棚; 设施土壤; 土壤连作障碍; 土壤质量; 设施农用地管理

中图分类号: S158.1 **文献标志码:** A

The Obstacles and Countermeasures of Soil Sustainability in Protected Horticulture in China

DONG Jinlong¹, XU Yehong², QUAN Zhi^{3,4}, YIN Yilei⁵, ZHAO Yunyun⁵, XU Qiao⁶, TIAN Kang¹, HUANG Bin³, CAI Zucong⁷, MA Yan^{2†}, DUAN Zengqiang^{1†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. National Field Research Station of Shenyang Agroecosystems, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 4. Weifang Academy of Modern Agriculture and Ecological Environment, Weifang, Shandong 261199, China; 5. Academy of Agricultural Planning and Engineering, MARA, Beijing 100125, China; 6. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou, Jiangsu University, Yangzhou, Jiangsu 225100, China; 7. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: China's protected horticulture largely depends on soils as growth medium with low to medium technology, which is characterized by high input, high output, and intensive soil use. The cultivation area of the protected horticulture was 2.67 million hm^2 in 2021, accounting for more than 80% of the global protected horticulture area. However, the protected cultivation resulted in soil degradation, non-point pollution, increased greenhouse gas emissions, and loss of crop yield and quality. This study focused on soil sustainability in protected horticulture. It summarized the obstacles that limited the sustainability of protected horticulture, which were the imbalance of soil nutrients, low soil environmental quality, the penalty of crop yield and quality, and backward

*国家自然科学基金项目(42207357)、农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室开放课题(2023F13)和江苏省农业科技自主创新项目(CX(21)3098)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42207357), the Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China (No. 2023F13) and the Agricultural Science and Technology Innovation Fund of Jiangsu Province, China (No. CX(21)3098)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: zqduan@issas.ac.cn; myjaas@sina.com.

作者简介: 董金龙(1988—), 男, 安徽固镇人, 从事设施土壤碳氮循环和植物营养生理研究。E-mail: jldong@issas.ac.cn

收稿日期: 2023-11-01; 收到修改稿日期: 2024-01-21; 网络首发日期(www.cnki.net):

land management and policy. These obstacles were mainly attributed to the low accuracy of plastic greenhouse environmental control and fertilization caused by low technology of protected facility, soil continuous cropping obstacles induced by inappropriate fertilization and monocropping, and less integrative innovation on soil management technology due to the lack of suitable land policy. This study proposed seven strategies to address current soil unsustainability, including soil profile design when building a plastic greenhouse, soil remediation at the fallow period, plastic greenhouse environmental regulation, control of soil input, buildup of crop rotation mode, plant resistance improvement, and the adaptation of land use policy. These strategies are expected to provide reasonable and scientific foundations for sustainable soil management in plastic greenhouses of low-to-medium technology possessed by smallholders.

Key words: Plastic greenhouse; High tunnel soils; Soil continuous cropping obstacles; Soil quality; Land management and policy

设施种植业是借助现代农业管理技术、生物技术、信息技术、工程装备技术等,为植物生长提供相对可控环境,一定程度上摆脱对自然环境依赖,开展高效植物性产品生产的农业类型^[1]。中国设施种植以土壤栽培为主。设施种植土壤(设施土壤)是受长期种植蔬菜等高经济价值作物和相对可控环境条件综合影响,性质发生剧烈变化的一类土壤。设施土壤大致归属于土地利用类型中的菜园土和土壤系统分类中的肥熟旱耕人为土。自20世纪90年代以来,随着人民生活水平提高,对蔬菜等园艺产品需求增加以及国家“菜篮子工程”政策引导等,我国设施土壤种植及对应园艺产业发展迅速,为提供健康、多样化农产品,提高农民收入,促进乡村振兴和稳定农村就业做出了重要贡献^[1-2]。

我国设施土壤因高度集约化栽培园艺作物,受材料覆盖而缺乏淋洗、大量农家肥和化肥投入、高复种指数等强烈人为活动影响,养分和有害物质累积,土壤质量有恶化风险^[3]。设施土壤养分利用率低,养分流失导致地表和地下水污染,温室气体排放增加,农业废弃物资源浪费及污染,设施土壤有害物质累积等问题较为严峻^[4-6]。近年来,设施农用地和大棚荒废、种植户频繁更换设施用地、设施农产品污染物超标等现象屡有发生,设施土壤难以实现可持续利用^[2,7]。

本文旨在明确我国设施种植业发展现状及趋势,剖析设施土壤可持续利用的主要难点,厘清难题背后的科学、技术、社会经济逻辑,并提出关键应对策略。研究成果能够为科学认识我国设施种植业发展趋势、提高土壤质量和农产品品质、实现设施农业可持续发展提供科学依据。

1 中国设施种植业发展现状与趋势

近年来,全球设施种植业总体处在扩张期,发展迅速。设施农业较发达的国家主要包括荷兰、以色列、西班牙、意大利、日本、韩国,设施播种面积相对稳定;设施农业发展中国家主要包括印度、巴基斯坦、墨西哥、土耳其、巴西、摩洛哥,设施播种面积快速增长^[8-9]。我国设施播种面积从20世纪90年代初开始快速增长,2010年达到峰值400万 hm^2 ,2021年稳定在267万 hm^2 ^[2,5,10-11]。目前,我国是全球设施种植第一大国,其他国家播种面积占比仅约20%。

我国设施类型中塑料大棚和日光温室占比超80%,大型连栋温室和玻璃温室占比较低,且多仅作为育苗基地、休闲观光、高新技术推广使用^[2,12]。我国设施作物主要是园艺作物,其中蔬菜、瓜果占比超80%,果树和花卉占比各约10%,近年来果树和花卉播种面积增速较快^[13]。我国设施种植业生产了全国30%以上的蔬菜和诸多水果、花卉等高经济价值农产品。据估计,目前我国设施种植业总产值超过1.4万亿元,直接带动约700万小农种植户就业,间接提供相关产业就业岗位超7000万个^[2]。单位面积设施园艺作物经济效益为大田作物10倍~20倍,是露地园艺作物3倍~5倍^[2];据笔者估算,我国设施种植总产值分别为小麦、玉米和水稻总产值的3.7倍、2.0倍和1.6倍,成为提高农民收入、助力乡村振兴、维护社会公平和国家稳定的重要支柱产业。

设施土壤栽培因贴近农民种植习惯、生产成本低、对养分和水分缓冲能力强、对种植户管理容错空间大等特点,为我国设施种植主要形式,播种面积占比超过90%,其他如基质栽培和水培占比很低。总体而言,我国设施种植以中小规模生产为主,以家庭农场经营、中低端设施装备、土壤栽培、投资成本和风险低、利润率高为主要特征。我国小农中低端土壤栽培模式与较发达经济体,如西班牙、意大利、韩国和日本现行主要设施栽培模式接近。虽然较发达经济体由于设施从业者老龄化、劳动力昂贵等原因,一直致力于提高设施环境调控智能化、水肥一体化水平,但囿于设施装备一次性投入高、运营成本和能耗高、注重有机农业发展等原因,以高新装备为主要特征的设施种植长期以来难以大面积推广^[14-15]。近年来,我国在植物工厂、智能温室等方面的投入显著增加,高端温室设计和建造水平不断提升,但经济不可持续、高能耗和高碳排放成为其发展主要障碍。鉴于我国农业劳动力比较优势明显和小农生产国情,可以预见未来20年我国设施种植大概率仍将主要依赖小农中低端装备的土壤栽培模式。

2 设施土壤可持续利用难点

我国设施土壤可持续利用难点表现为土壤养分富集、连作障碍和环境质量下降。上述难点又直接与设施土壤不合理水肥管理与种植制度相关,即管理措施制约土壤养分平衡和环境质量提升。

2.1 过量施肥降低设施土壤质量并威胁生态环境健康

利用构建的全国设施土壤养分数据库,含 22 403 个设施土壤肥力数据,在假设设施土壤肥力随种植年限先增加后保持稳定的前提下,本文根据设施土壤肥力随种植年限变化曲线拟合建模,并综合文献数据和肥力频率分布,给出了全国尺度上设施土壤肥力丰缺临界值。研究发现,我国设施土壤肥力丰缺临界值高于露地蔬菜和主要基于粮食作物的第二次全国土壤普查土壤肥力分级标准,其中有机质达第二次全国土壤普查标准 2.5 倍,碱解氮达 3 倍,有效磷达 20 倍,速效钾达 6 倍(表 1)。该结果与多数文献报道的设施土壤肥力要求远高于露地作物土壤一致^[4, 16-17]。

表 1 设施土壤、菜地土壤、粮田土壤肥力丰缺临界值

Table 1 The critical values of the fertility parameters of plastic greenhouse soils, vegetable soils and soils mainly for grain cultivation

土壤类型 Soil types	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali- hydrolyzed N/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)
设施土壤 ^①	25	180	100	300	2.10	20
菜地土壤 ^②	20	120	50	150	1.20	15
粮田土壤 ^③	10	60	5	50	0.75	10

注:土壤肥力丰缺临界值定义为作物产量(生物量)达到最高值 90%时的土壤肥力值,可认为肥力达到该值后,施肥对产量提高促进作用有限。菜地数据参考沈汉和邹国元^[16]及高俊岭等^[18]文献,虽未区分是否露地,但因露地蔬菜面积大,数据总体代表露地蔬菜土壤。粮田土壤肥力丰缺临界值参考第二次全国土壤普查分级标准。为方便推广应用,数值进行了取整。CEC,阳离子交换量。Note: The critical values of the fertility are defined as the soil fertility when crop production or yield reaching 90% of the maximum, which are taken as the thresholds when more fertilization did not promote crop production or yield. The data on vegetable soils referred to studies of Shen and Zou^[16] and Gao et al^[18], whilst those on grain soils referred to the Second National Soil Survey of China. The values were rounded up to ease data application. CEC, cation exchange capacity. ①Plastic greenhouse soils, ②Vegetable soils without distinguishing plastic-greenhouse vegetable soils or open field vegetable soils largely representing open-field soils vegetable due to the larger cultivation area, ③Grain soils.

我国设施土壤高养分浓度不仅未持续提高作物产量,反而导致土壤质量退化,降低农产品产量和品质。一方面,我国设施土壤施肥量大,其中总氮投入年平均可达 2.1 t·hm⁻²(未发表),氮素利用率却仅有 19%^[19],远低于全国氮素平均利用率 40%左右,导致大量硝态氮等养分累积于土壤中。超量施肥还引起土壤次生障碍,如土壤酸化、土传病虫害,降低作物产量,导致设施肥料边际收益率持续降低^[20-21]。另一方面,由于偏施氮肥、作物生理性缺钙和真菌性病害等原因,设施农产品质量也出现明显恶化,例如番茄和辣椒裂果、商品率低,叶菜硝酸盐累积,农产品铁和锌等微量元素含量降低,营养品质恶化^[11, 22-23]。

同时,设施土壤超量养分的转化、损失和累积加重了周边生态环境负载^[23-25]。设施投入的铵态和酰胺态氮在氨氧化过程产生大量氢离子,导致土壤和水体酸化^[24];氮素硝化反硝化以气态氮氧化物排放损失,加重全球气候变化^[26-27];硝态氮和磷素以径流和淋溶损失恶化地表水和地下水水质^[27]。值得注意的是,由于设施施肥量大,设施种植产生的养分环境负荷通常为大田种植的数倍。

2.2 设施土壤污染物累积与农产品安全风险升高

设施耕地较多集中在城郊区,受工业化和城市化等强人为干扰影响较大,土壤本底污染风险普遍更高。同时,设施畜禽粪便等农家肥投入巨大,平均达 89.7 t·hm⁻²(鲜重,未发表),而规模化养殖场来源畜禽粪便重金属含量较高,增大设施种植农产品重金属超标风险。研究发现,鸡粪、牛粪、羊粪等农家肥和商品有机肥均存在不同程度的重金属超标^[28]。因此,与露地相比,设施土壤存在显著重金属累积问题,其中尤以镉(Cd)和铜(Cu)累积问题最为普遍和严重^[17, 29],土壤 Cd 能够被蔬菜根系吸收并累积在可食用部位,威胁农产品安全^[30-31]。苏南叶类蔬菜 Cd 平均浓度达 61.1 μg·kg⁻¹,点位超标率达到 5.2%(N=77),重金属超标风险较高^[32]。

除重金属外,设施土壤也存在有机污染物累积,如塑化剂邻苯二甲酸酯类^[33-34]、农药^[35]、抗生素^[36]、微塑料^[37-38]。虽然与重金属相比,有机污染物在设施农产品中累积及其安全风险评估研究仍不充分,但越来越多研究证实设施土壤-农产品生产系统的有机污染风险同样不容忽视

[39]。设施蔬菜种植土壤中微塑料颗粒含量可达每千克土壤 1 000 个以上,尤以表层土壤累积最为严重,增加农产品微塑料累积风险,并干扰土壤微生物群落结构及功能^[40]。随畜禽粪污有机肥进入设施土壤中的抗生素,一部分会在土壤微生物等的作用下发生吸附或降解,另一部分则会持续对土壤微生物施加选择压力,改变土壤微生物群落组成,甚至促进环境中耐药菌的传播和抗性基因污染。此外,抗生素不仅伴随地表淋溶作用迁移至地表水和地下水中,扩大污染范围,还可能通过多种途径迁移至农产品中,威胁农产品安全。

2.3 设施农用地管理制度无法满足土壤质量提升要求

设施农用地管理制度中最为核心的是设施农用地承包经营权制度。我国土地制度是 40 多年前确立的家庭联产承包责任制。当时土地制度设计以粮食生产为核心,包产到户后种粮效益和农民主观能动性高,农民精耕细作,有利于土壤可持续利用。目前,我国单位面积土地经济效益低,土地流转规模经营现象普遍,但土地经营权时常被种植户短期持有(租赁),加上户籍限制、设施种植业相关产业配套不足,种植户以最大化开发利用耕地为目标,设施农用地管理制度难以为种植户提供长期维持土壤质量的动力和条件。

长江三角洲(长三角)地区设施播种面积较大,但长三角设施农用地经营权管理、耕地“非粮化”管理、设施农用地配套管理等制度均存在缺陷,不利于设施土壤质量提升及其可持续利用。笔者实地调研长三角芜湖、马鞍山、南京、镇江、扬州、无锡、泰州、苏州、南通、上海等 10 个城市 402 个大棚,获得 107 份设施大棚及土壤管理有效问卷显示(未发表):(1)设施种植园区经营普遍为政府牵头、责任人承包、种植户分包种植的模式,设施种植园区荒废情况频发。该模式虽强化了政府自上而下对设施种植产业宏观调控的管理属性,但弱化了政府自下而上提高种植户组织化程度和话语权的属性,导致种植户难以拥有耕地经营的主人翁责任意识,无法调动种植户耕地质量提升主观能动性,因此对耕地开发利用短视。(2)苏南、上海设施种植户多为外地户籍,土地以租赁为主,但租赁合同年限较短,设施耕地经营权不稳定,导致种植户不愿增加投资提升土壤质量。(3)苏州、上海等经济发达城市因满足粮食安全政策要求,政府强制将种植户设施农用地改为水稻田,致使种植户不得已搬迁异地,制约种植户对耕地可持续管理。(4)设施土壤管理较粮食作物需要更多有机肥投入来满足作物生产需求^[7,41],但大城市郊区囿于环保要求,限制养殖业发展,导致种养结合困难,有机肥料使用成本较高。据笔者估计,北京、上海、江苏省和浙江省内稻壳鸡粪、牛粪和羊粪自给率较全国其他省份均偏低,粮食种植、设施种植和养殖在物质生态循环方面存在较严重脱钩。

3 设施土壤可持续利用难度大的原因

我国设施土壤可持续利用难题来源于我国传统露地粮食生产向高技术设施种植业快速过渡过程中技术和产业配套的严重不协调。这种不协调与设施种植户自身属性和政府顶层设计缺乏密切相关。

3.1 设施装备水平落后导致设施环境和土壤养分难以精准调控

与较发达国家规模农业相比,我国设施种植户多为小农,难以承受大规模固定资产投资,因而我国设施装备水平总体落后,绝大部分设施为简易塑料钢架大棚和日光温室^[42]。这类设施无补光、加温、除湿和 CO₂ 补充设备,不能够稳定提供植物生长必需的适宜光照、温度、湿度和 CO₂ 浓度条件,无法按照某一园艺作物的生长需求实现设施环境的精准调控(表 2)。我国晚秋、冬季和早春的寒潮、暴风雪、连阴雨天气较多,设施作物常处于低温、弱光逆境环境,种植户不得不封闭大棚降低热量扩散损失,诱发大棚湿度增加、CO₂ 不足等更多逆境。多重逆境叠加抑制作物对养分、水分的吸收,导致作物生长受阻。环境逆境调控手段有限成为设施种植户不断加大土壤养分投入、过度施肥以开发利用土壤的首要原因。

3.2 设施土壤施肥不合理和作物种类单一导致土壤连作障碍

与设施环境调控手段有限类似,我国设施土壤施肥管理手段也多不合理,导致一系列设施土壤退化问题,抑制作物养分吸收。施肥管理的不合理包括肥料设计不合理、肥料伴随成分管控不合理和施肥技术不合理三类。

表 2 设施蔬菜与粮食作物（小麦）种植对环境条件、土壤养分丰缺临界值的要求差异对比
Table 2 The comparisons of the nutrient concentration and critical value between the plastic greenhouse soils and open-field grain soils

	氮素需求总量 Total N demand /(kg·d ⁻¹ ·hm ⁻²)	氮肥利用率 N use efficiency /%	施肥频率 Fertilization frequency	根系阳离子交换量 Root cation exchange capacity/(cmol·kg ⁻¹)	根系密度及分布 Root density and distribution	空气 CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration /(μmol·mol ⁻¹)	空气湿度 Humidity	光照条件 Light	土壤升温速度 Soil temperature increase
小麦 ^①	0.91	33	50~100 d 施 一次	14	0-30 cm 1.65 cm·cm ⁻³ ; 30-90 cm 0.67 cm·cm ⁻³	420	湿度<70%	100%自然光	快, 0.7 °C地温升高/度 气 温升高
设施蔬菜 ^②	3.03	19	3~10 d 施一 次	40~60	0-30 cm 0.61 cm·cm ⁻³ ; 30-90 cm 0.17 cm·cm ⁻³	200	湿度>80%	可见光透过率 80%; 紫外光透 过率 20%	慢, 0.35 °C地温升高/度 气 温升高
土壤养分 丰缺临界 值差异 ^③	设施蔬菜每日需 肥量是小麦 3 倍 以上, 需提高土 壤临界值以降低 高频施肥成本。	设施蔬菜高肥 料投入增加了 肥料损失, 降低 养分利用率, 需 更高临界值。	设施蔬菜施 肥频率是小 麦的 5 倍以 上, 弱化对高 临界值需求。	设施蔬菜养分吸收能 力是小麦 3 倍左右, 弱化对高临界值的需 求。	设施蔬菜养分截获能力 是小麦的 1/3 左右, 需 更高临界值。	低 CO ₂ 浓度降低 根系生长和蒸 腾, 降低根系养 分吸收能力, 需 提高临界值。	湿度高降低 蒸腾和养分 吸收能力可 达 25%, 需更 高临界值。	弱光降低蒸腾 和根系伸长, 养 分吸收效率降 低 30%左右, 需 高临界值。	土壤湿度大、光照弱、叶 片遮阴导致升温慢 50%, 根系活力与地上部温度 不匹配, 养分吸收能力低 30%, 需更高临界值。
参考文献 ^④	[3]	[19, 43]	[44]	[44]	[3]	[45-48]	[49-51]	[52-54]	[55-58]

注: 表中数据从文献中提取或经验估计, 仅供参考。Note: The data were extracted from some typical literature or estimated.①Wheat, ②Plastic greenhouse vegetables, ③Differences in soil nutrient critical value, ④ References.

(1) 肥料设计不合理主要体现在肥料养分组成和含量设计的不合理。首先, 设施蔬菜作物多为喜硝作物, 但我国氮肥长期以酰胺态氮肥和铵态氮肥为主, 缺乏硝基肥料。目前, 我国硝基水溶肥使用并不普遍。其次, 作物对磷素吸收较少, 加上设施缺少雨水淋洗损失, 磷肥需求较少。但我国菜农习惯施用富含磷的平衡肥, 加上畜禽粪便磷氮比远高于植物需求, 氮磷失衡、磷过量投入问题严重。直至近几年, 随着测土配方施肥技术推广, 低磷复合肥应用才得以缓慢推进。再次, 设施钾肥施用虽总量偏高, 但钾素投入比例偏低。设施作物对钾肥需求量普遍超过氮素, 远高于磷素, 如番茄 $N:P_2O_5:K_2O$ 需求比例为 2.3:1.0:4.4。但我国高钾化肥价格偏高, 降低种植户钾肥施用积极性, 有机肥普遍含钾量低, 氮钾施用比例严重失调^[41]。最后, 设施作物对钙镁肥的需求较高, 但无论是肥料生产企业还是种植户对钙镁肥的重视程度均有待提高。

(2) 肥料伴随有害成分管控不合理。目前我国化肥和有机肥的相关国家、行业和地方标准对肥料伴随盐分限制重视程度不高。硫基复合肥中过剩的硫酸盐、有机肥料(厨余垃圾、鸡粪等来源)中多余的氯化钠等盐分均加重设施土壤次生盐渍化^[5]。农家肥中抗生素等物质累积也对土壤微生物群落结构和多样性构成严重威胁。

(3) 施肥技术不合理。一方面, 虽然我国设施种植从业者种植技术水平已有显著提高, 但种植户仍然存在较多学历低、年龄大、学习接受新技术能力不足问题。较多种植户施肥技术沿袭粮食作物施肥习惯, 施肥技术较为粗放。另一方面, 我国设施施肥技术的科学研究还因园艺作物种类众多, 对施肥成本、配套机械关注不够, 导致较多设施作物施肥技术研发落后于实际生产、施肥技术应用脱离生产实际情况频发^[4]。

为发挥产业集约化优势, 过于单一的设施作物种类也是导致土壤连作障碍的主要因素。单一或较少种类作物, 尤其是葫芦科作物黄瓜等的集约化种植易导致土壤自毒物质累积^[59], 抑制种子萌发和根系生长, 同时导致病原菌、虫卵等累积, 诱发土传病虫害^[60-61]。设施土壤连作障碍会降低土壤养分的生物有效性, 误导种植户认为土壤养分缺乏, 进而导致养分过量投入, 陷入“肥料持续投入—土壤质量不断下降”的恶性循环。

3.3 设施农用地管理制度革新动力不足导致土壤管理技术集成创新缓慢

目前我国耕地生产仍以确保粮食安全为核心目标, 对设施农用地管理制度革新缺乏动力。最近几年, 受“俄乌冲突”及“中美博弈”等紧张国际局势影响, 我国粮食安全受到更多重视, 设施农用地管理制度革新动力愈加不足。蔬菜、水果在粮食生产不足的历史时期曾经是普通百姓最重要的能量补给来源, 近年来虽然受“大食物观”等相关政策, 膳食结构调整、人民生活水平提高对园艺作物需求增加的影响, 国家政策上对蔬菜、水果等重要农产品的重视程度显著提高, 但总体上对园艺作物的重视以保证供给总量为主, 对其生产环节的高质量发展关注不够。

《全国蔬菜产业发展规划(2011—2020年)》和《全国现代设施农业建设规划(2023—2030)》等均提出了支持设施种植业发展的任务和目标, 为设施种植业发展方向指明了道路, 但对设施种植业及其上下游相关产业整体布局方面的考量尚需细化, 相关规划较少涉及设施种植业、养殖业等产业相结合的空间布局设计, 反映出设施农用地管理制度革新的深度不足。作为劳动、资源和资金密集型产业, 目前发展规划和管理制度单一侧重种植已难以提高该产业的生产效率, 而且产生严重资源浪费和环境污染。我国小农生产缺乏组织能力、风险承担能力和融资能力的属性决定了以小农户自主组织、扩大再生产的周期漫长, 很难促进设施土壤管理技术集成创新和产业长期稳定发展。

4 设施土壤可持续利用的关键策略

针对设施土壤可持续利用难点及其根源, 本文从设施土壤利用技术创新和设施农用地管理制度革新两个角度, 聚焦设施建设时土壤耕作层构建、设施休闲期土壤改良、设施环境调控、投入品管控、作物轮作模式、作物抗逆调控和种植制度管理, 提出了7项设施土壤可持续利用的关键应对策略, 见图1。

4.1 设施建设时土壤耕作层构建

长期以来, 我国设施种植业园区重建建设轻维护, 导致众多园区设施土壤质量快速恶化、进而荒废。究其原因与设施种植园区建设时重视钢架和道路等地上基础设施建设, 但对地下设施土壤耕作层构建基本处于“零关注”状态密切相关。《全国现代设施农业建设规划(2023—2030)》中“现代设施农业提升工程”和“戈壁盐碱地现代设施种植建设工程”建设任务极为重视设施种

植业基础设施提升问题,但对设施土壤耕作层设计和维护问题涉及较少。笔者建议将设施土壤耕作层构建纳入政府投资的设施种植园区建设考核。

设施土壤耕作层构建最为成功的案例是有“欧洲蔬菜之都”的西班牙阿尔梅里亚“三明治”设施土壤耕作层设计。“三明治”设施土壤结构:底层(厚度 20~50 cm)为粉质土或黏质土,起到保水保肥作用;中间层(2~10 cm)为有机粪肥,起疏松土壤,提高养分和水分缓冲能力,促进根系发育,并通过有机物分解提供热量和 CO₂ 的作用;表层为砂质土(8~15 cm),利于土壤透水通气,接纳水肥,缓冲土壤温度变化^[62]。据统计,阿尔梅里亚地区有 80%左右的农场采用该土壤结构设计,且占比长期保持稳定。最近 20 年,无土栽培技术推广也因与“三明治”土壤相比经济成本更高,未能在该区域发展起来^[62]。

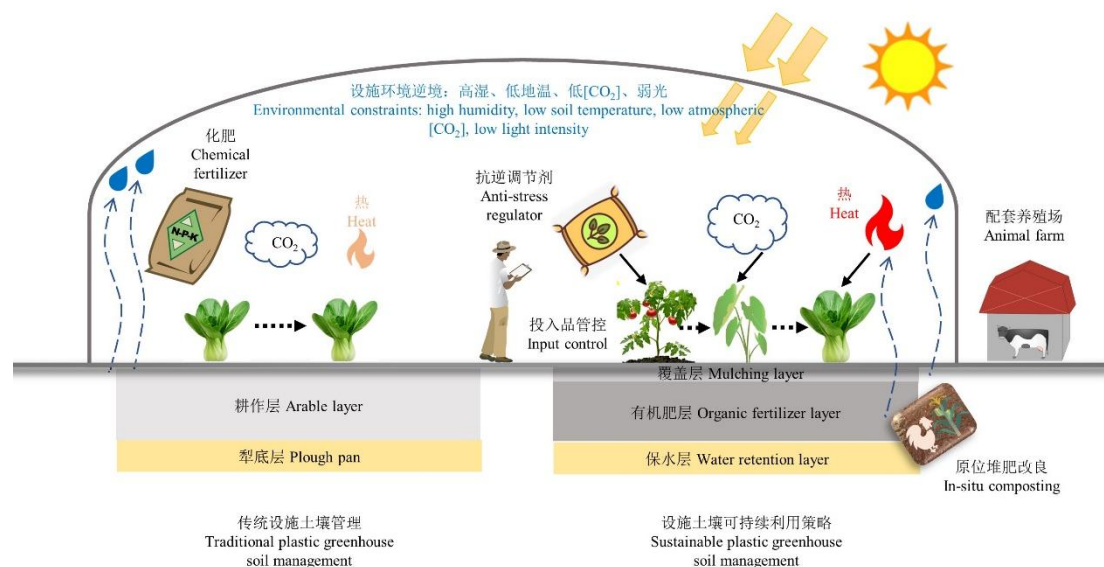


图1 设施土壤可持续利用策略与传统设施土壤管理策略对比(小图标来源于 IAN/UMCES Symbol and Image Libraries)

Fig.1 The comparisons of the strategies between sustainable soil management and traditional soil management in plastic greenhouse horticulture production (Icons were from IAN/UMCES Symbol and Image Libraries)

我国日光温室和塑料大棚建造过程中,除培肥提高耕作层肥力,亦亟需关注土层功能构建,包括:(1)耕作层以下底土层的保水、保肥功能;(2)中间有机粪肥层促根、保持有效养分、缓冲污染物质(重金属、有机污染物等)等功能;(3)表层土通气、降湿、保温等功能。阿尔梅里亚气候干旱少雨、光照充足,与我国西北干旱地区、戈壁盐碱地区气候有一定相似。未来我国该区域设施园区建设可采用该土壤耕作层设计,其中,盐碱地中间层即有机粪肥层可因地制宜适度加厚,阻止盐分随毛管水上升,降低盐分向表层迁移。

4.2 设施种植休闲期土壤改良

为提高设施土地利用效率,设施生产休闲期一般较短(1~2个月)。充分利用该休闲期开展设施土壤障碍因子消减是土壤改良的优先策略。传统休闲期设施土壤改良策略包括:(1)盐分去除措施,如揭棚增加雨水淋洗、灌水洗盐、工程暗管排盐等;(2)化学杀菌措施,如施用石灰氮、棉隆、威百亩等杀灭土传病虫害;(3)高温焖棚措施,如通过不灌水干焖、适当灌水湿焖杀灭大棚内部病原微生物;(4)土壤酸化改良,如施用农作物秸秆、石灰等缓解土壤酸化过程。或者将几种措施有机结合,提高土壤改良效果。但总体而言,土壤改良效果持久性不长,存在农药残留、养分损失等引起的环境污染问题。近年来,以有机物料(秸秆、粪污、食物残渣等)施用为核心的生物改良技术成为研究热点,其中以强还原处理和土壤生物日晒技术关注较多^[63-65]。

强还原处理法改良设施土壤研究较为充分^[66-67]。该方法通过饱和灌水、有机物料施用、覆膜和高温焖棚,创造厌氧、高温环境,促进土壤微生物群落再组装,抑制土壤病原菌,降低土壤盐分、有害代谢产物或污染物含量,进而提高土壤肥力和环境质量。该方法在实际生产中广泛使用,在南方草莓等高经济价值且易感病作物上的应用普遍。目前该方法已形成农业行业标准《保护地连作障碍土壤治理 强还原处理法》(NYT4312-2023)。但该方法导致土壤养分损失量(NO_x排放和NO₃淋溶)大,厌氧环境产生的还原性物质易抑制根系生长。

与之相比,设施土壤生物日晒技术提倡好氧或部分厌氧发酵,通过间歇补水、有机物料添加

和高温焖棚创造高温发酵环境,依靠有机物料在土壤中的原位好氧堆肥过程影响微生物群落结构、改善土壤质量^[68-69],有望弥补强还原处理法的缺陷。但目前,设施土壤生物日晒技术尚存在诸多空白。例如,部分好氧发酵环境如何影响设施土壤养分循环过程?设施有机物料如何选择和改进才能实现高效抑菌,并产生生物刺激物质促进作物根系发育?

4.3 设施微环境调控

由于我国设施装备水平普遍较低,小农生产提高装备水平难度太大,低成本实现设施微环境,包括设施光照、温度、湿度、CO₂浓度等调控,成为关键。

首先,我国幅员辽阔,充分利用光照资源优势是设施环境优化的首要策略。研究发现,得益于北纬 37° 附近天气晴朗少雨、光照资源相对丰富,全球蔬菜作物和设施种植业广泛分布于该区域^[70]。我国华北和环渤海区、西北干旱区两大设施蔬菜主产区均分布在北纬 37° 附近。未来,随着经济较发达的华北和环渤海区及我国第二大设施种植产区长江中下游亚热带多雨区劳动力成本的逐年增加,国家对荒漠、盐碱地等备用耕地开发的重视,通过充分利用西北地区晚秋、冬季和早春相对充足光照资源开展设施农产品,如耐长途运输茄果类蔬菜、甘蓝类蔬菜、水果等生产,有可能将设施生产逐步向西北干旱光照充足区转移。

其次,日光温室是光热资源利用效率较高的典型中低端装备温室类型。我国华北和环渤海地区、西北地区可借助《全国现代设施农业建设规划(2023—2030)》的“戈壁盐碱地现代设施种植建设工程”等政策红利,充分发挥我国独创日光温室技术优势、戈壁盐碱地光照资源优势 and 西部廉价人力资源优势,大力推进日光温室建设,提高光能利用率和设施微环境调控水平。

再次,设施种植业中有机粪肥施用、秸秆燃烧等能够将有机物料中储存的能量或 CO₂ 充分利用,缓解设施环境低温或 CO₂ 缺乏问题,实现农业废弃物综合利用^[45, 47]。我国中西部粮食生产大县具有充足秸秆资源和养殖业产生的畜禽粪便资源,能够为设施土壤质量提升提供充足堆肥和有机肥生产原料,奠定了以种养结合为基础的设施种植业比较优势,有望利用农业废弃物资源提高设施环境温度和 CO₂ 浓度。

最后,与传统漫灌等粗放灌溉技术相比,设施土壤精准灌溉管理能够降低设施空气和土壤湿度,降低土壤比热容和土壤升温难度(表 2),提高土壤通气性和养分有效性,是调节设施微环境的关键。过去,设施蔬菜栽培由于灌溉技术不成熟,过量灌溉加剧土壤硝态氮、钙、镁淋失和土壤酸化等质量退化问题,存在“灌水多→随水施肥量大→土壤退化→根系弱→灌水更多”的恶性循环。目前,我国设施土壤灌溉正在向依赖水肥一体化系统过渡^[71-72],但水肥一体化侧重作物对水分和养分需求,土壤水分、硝态氮传感器等土壤信息反馈硬件设备不足,导致养分和水分调控尚不精准。未来,智能水肥一体化系统不仅需提高作物需求养分和水分调控的精准度,而且需加强对设施微环境调控的关注,达到“以水调温”、“以水调气”等多重功能。

4.4 设施投入品管控

设施种植业投入品管控策略的核心是限制投入品中非土壤和植物必需品的投入,弱化投入品对土壤质量的潜在危害。目前,我国对已商品化有机肥有明确重金属、蛔虫卵和粪大肠杆菌限制要求(有机肥料 NY525-2021),但该标准并未涉及强烈干扰土壤生物功能的有机污染物,如抗生素、残留农药等的限量要求,而且对投入品中盐分含量也无限量要求。我国设施种植用量最大的农家粪肥多数未商品化,对农家粪肥污染物含量监管较为缺失。我国鸡粪、猪粪施用量大,其磷含量高、磷氮比高,有机磷素供给存在结构性过剩^[41, 73]。设施种植土壤限制元素以碳、钾为最,氮、钙、镁其次,增加高碳、低磷有机物料,如秸秆、牛粪、羊粪等的施用可能缓解土壤有机磷供应过量的问题。总之,我国亟需建立设施种植业投入品,尤其是有机粪肥类投入品中有害成分和过量养分的监管体系,并推进相关标准建设。

此外,设施种植业化肥残留管控仍然较少。其中,推进硝基钾肥、硝基钙肥等低盐分残留化肥研发,加强硫基、氯基、磷基等高残留化肥管控至关重要。国际上设施蔬菜冲施肥和营养液栽培广泛使用硝基氮肥替代铵氮和酰胺态氮肥的经验值得借鉴和推广。其中,将各类肥料混合配置成混合固体肥料(如硝酸钙钾)或浓缩液已成为降低硝基肥潜在安全风险的重要措施。

4.5 设施作物轮作模式选择

设施作物轮作模式选择的核心逻辑在于:(1)降低单一作物连作根系和秸秆分解产生的代谢产物和土壤病原生物(病原菌和线虫)等累积及危害^[74];(2)利用不同作物养分需求差异提高养分利用率;(3)利用不同作物和微生物互助关系提高设施土壤微生物群落和功能多样性^[75];(4)利用作物生长发育特性和各季节光照、温度优势安排作物茬口,提高设施耕地及土壤利用率。

因设施蔬菜种类繁多, 轮作模式选择具有极高多样性, 包括果菜间轮作、果菜/叶菜轮作、蔬菜-玉米/水稻轮作、设施蔬菜/露地蔬菜轮作等。生产上葫芦科瓜类蔬菜(黄瓜、哈密瓜)因根系分泌酚类、黄酮类物质易发生自毒作用和对线虫敏感等^[76-77], 常与茄科茄果类蔬菜(番茄、辣椒)和豆类蔬菜(菜豆、豇豆)轮作, 对设施土壤质量提升效果良好。长江下游种植户常见茄果类-叶类-根茎类蔬菜轮作模式, 如茄子-空心菜-莴笋(早春-夏季-秋延)轮作, 利用空心菜水陆两栖、耐高温和耐高湿特性, 既避免夏季高温无法生产, 也大量灌溉降低土壤盐分。

值得注意的是, 由于集约化生产和销售优势明显, 各地普遍存在整村种植 1~2 种作物的倾向。如何因地制宜选择轮作模式兼顾生产成本、市场需求和土壤质量提升, 亟需各地深入实践和探索。西班牙阿尔梅里亚的辣椒-西瓜轮作、寿光的番茄-丝瓜轮作、和县的辣椒-毛豆轮作、嘉兴的稻菜轮作等均成为当地探索出的良好设施作物轮作模式, 土壤质量能够得到有效提升。

4.6 设施作物抗逆调控

我国设施园艺作物品种改良研究和推广工作起步较晚。长期以来, 我国耐高湿、弱光、低温的设施优良作物品种较少, 相关调控手段较少。但近年来, 随着我国设施园艺市场和产业发展壮大, 相关研究工作进展较快^[11]。利用嫁接技术, 提高设施作物抗盐能力和养分吸收能力的技术研究较为充分, 在我国设施生产中应用较为普遍^[11, 78]。油菜素内酯等激素类物质喷施能促进设施蔬菜光合作用、生长发育和抗逆, 实际生产中应用广泛^[79-80]。利用作物逆境调控策略, 调控园艺作物遗传改良、发育过程, 提高设施作物抗逆能力, 能在不增加养分投入情况下提高养分吸收、利用效率, 从而降低根际养分临界浓度和肥料投入, 间接缓解土壤质量退化。

4.7 设施农用地管理制度优化

设施农用地管理制度优化兼顾土壤科学的自然属性和社会属性^[81], 是实现设施园艺产业和土壤可持续利用的重要途径。无论从提高农民收入, 还是从目前膳食结构调整角度出发, 适度调整我国粮食安全政策, 能够解决设施农用地管理制度革新动力不足问题, 缓解集约化设施种植业发展限制问题。设施农用地管理制度优化核心是“以种植户为本”, 需弱化传统的过分聚焦总体设施种植产业发展和农产品保供问题。未来, 设施农用地管理制度必须站在国家乡村振兴、社会公平、城乡平衡发展高度, 借助国家和省级层面的宏观顶层设计、管理制度革新和政策资金支持, 稳定设施种植户土地经营权, 夯实种植户对耕地的主人翁权利与责任, 从而提高设施种植户扩大再生产积极性, 增强种植户的精耕细作意愿。同时, 以设施农用地布局优化促进设施种植业上下游产业融合, 生产-加工-销售-废弃物处理衔接, 加强技术集成创新, 构建为种植户提供低成本技术支持的科技助农服务体系, 综合提高设施土壤可持续利用能力。

在具体措施上, 如何解决设施种植产业发展“卡脖子问题”, 例如如何构建设施种植全产业链低成本物质循环体系、在哪个生产环节补贴种植户生产活动、如何权衡经济与环境效益, 可能是主要技术和推广难点。在设施种植产业基础较好地区, 在全国、省级尺度上开展大田种植基地、设施种植基地、养殖基地、有机堆肥厂配套建设, 能够实现种植业秸秆、养殖业粪肥处理及循环利用, 提升设施土壤质量。在经济发达地区, 大力支持种植-养殖-加工-休闲旅游的一二三产业融合, 给予有机肥实物补贴, 提高种植户组织水平、种植规模和抗风险能力^[12]。在经济发达且外来农户较多地区, 可探索建设新型“设施种植产业聚集虚拟村”。虚拟村不要求物理上村落的聚集, 而是依托现有设施种植产业基础, 依靠政府顶层设计, 吸引或招募粮食种植、设施种植、养殖、销售等专业人才配套开展农产品生产, 并以从业者为基础培育种养一体产业聚集型服务机构及体系(新型农业联合体、农业协会或合作社), 搭建以设施种植为核心的全产业链经营网络。虚拟村强调全产业链网络构建和产业人才培养, 有望摆脱过去“重前期硬件建设, 轻人才培养、后期维护和配套服务”的困局。

5 结语

目前, 我国设施播种面积世界第一, 设施种植业成为提高农民收入和老百姓生活质量、实现国家乡村振兴战略的重要支柱产业。但囿于我国小农生产国情, 设施种植未来仍将主要依赖小农中低端土壤栽培生产模式。如何在中低端装备水平下构建起设施种植资源环境可持续和种植户经济效益间新的动态平衡成为设施土壤可持续利用的核心问题。为此, 加强国家和省级设施种植全产业链顶层设计, 破解小农自身局限性和增强土壤管理技术创新至关重要。未来, 亟需从“大食物观”视角, 优化设施农用地经营权管理, 构建以设施种植为核心的粮食种植-设施种植-设施养

殖-农业废弃物循环处理空间布局设计和技术研发, 加强政策、资金扶持, 培育新型农业经营主体, 提高种植户扩大再生产积极性, 推进设施园区建设时土壤耕作层构建和休闲期土壤健康维护, 创新气候资源利用技术和温室建造技术, 加强投入品有害物质限量管控, 开发高效作物轮作和抗逆调控手段, 多措并举、节本增效, 综合实现设施土壤可持续利用目标。

致谢 作者感谢中国科学院南京土壤研究所研究生马笑和赵纭在论文基础数据收集和整理中所做的贡献。

参考文献 (References)

- [1] Wang A L, Li L Y, Chuan L M, et al. Present status, problems and countermeasures of facility vegetable industry in Beijing[J]. *China Vegetables*, 2023(3): 8-14. [王爱玲, 李凌云, 申丽敏, 等. 北京市设施蔬菜产业现状、问题与对策[J]. *中国蔬菜*, 2023(3): 8-14.]
- [2] Li T L, Qi M F, Meng S D. Sixty years of facility horticulture development in China: Achievements and prospects[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2022, 49(10): 2119-2130. [李天来, 齐明芳, 孟思达. 中国设施园艺发展 60 年成就与展望[J]. *园艺学报*, 2022, 49(10): 2119-2130.]
- [3] Wang X Z, Dou Z X, Shi X J, et al. Innovative management programme reduces environmental impacts in Chinese vegetable production[J]. *Nature Food*, 2021, 2(1): 47-53.
- [4] 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.]
- [5] Zhang Z L, Sun D, Tang Y, et al. Plastic shed soil salinity in China: Current status and next steps[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296: 126453.
- [6] Yin Y, Xi F M, Bing L F, et al. Accounting and reduction path of carbon emission from facility agriculture in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3856-3864. [尹岩, 郝凤明, 郝龙飞, 等. 我国设施农业碳排放核算及碳减排路径[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3856-3864.]
- [7] Geng W C, Ma Y, Zhang Y X, et al. Research progress in soil health regulation technology for protected agriculture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(12): 1973-1984. [耿文丛, 马悦, 张玉雪, 等. 设施农业的土壤健康调控技术研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2022, 30(12): 1973-1984.]
- [8] Singh P, Bhardwaj A, Kumar R. Protected horticulture in India: An overview[M]// Singh A K, Patel V B. *Sustainable agriculture*. New York: Apple Academic Press, 2020: 295-317.
- [9] The Netherlands Enterprise Agency. Greenhouse horticulture in South Korea[R]. Netherlands, 2021.
- [10] Guo S R, Sun J, Shu S, et al. Analysis of general situation, characteristics, existing problems and development trend of protected horticulture in China[J]. *China Vegetables*, 2012(18): 1-14. [郭世荣, 孙锦, 束胜, 等. 我国设施园艺概况及发展趋势[J]. *中国蔬菜*, 2012(18): 1-14.]
- [11] Zhou J, Shi K, Xia X J, et al. Vegetable cultivation technology in China: A sixty-year review and prospect[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2022, 49(10): 2131-2142. [周杰, 师恺, 夏晓剑, 等. 中国蔬菜栽培科技 60 年回顾与展望[J]. *园艺学报*, 2022, 49(10): 2131-2142.]
- [12] 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.]
- [13] Liu F Z, Wang H B, Li L, et al. Current situation, issue and suggestion of the protected fruit industry in China[J]. *China Fruits*, 2021, 217(11): 1-4. [刘凤之, 王海波, 李莉, 等. 我国设施果树产业现状、存在问题与发展对策[J]. *中国果树*, 2021, 217(11): 1-4.]
- [14] Eyhorn F, Muller A, Reganold J P, et al. Sustainability in global agriculture driven by organic farming[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 253-255.
- [15] van Delden S H, SharathKumar M, Butturini M, et al. Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems[J]. *Nature Food*, 2021, 2(12): 944-956.
- [16] Shen H, Zou G Y. Parameters selection for evaluation of vegetable soil quality and its gradation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(5): 553-557. [沈汉, 邹国元. 菜地土壤评价中参评因素的选定与分级指标的划分[J]. *土壤通报*, 2004, 35(5): 553-557.]
- [17] Fan Y N, Zhang Y X, Chen Z K, et al. Comprehensive assessments of soil fertility and environmental quality in plastic greenhouse production systems[J]. *Geoderma*, 2021, 385: 114899.
- [18] Gao J L, Song C Y, Huang S W, et al. Current situation and soil nutrient status of vegetable fertilizer application in Qingdao City[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2011(3): 68-72. [高峻岭, 宋朝玉, 黄绍文, 等. 青岛市设施蔬菜施肥现状与土壤养分状况[J]. *山东农业科学*, 2011(3): 68-72.]
- [19] Ding W H, Lei H J, Xu C, et al. Characteristics and spatial distribution of apparent nitrogen balance in the greenhouse vegetable cropping system in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3): 353-360. [丁武汉, 雷豪杰, 徐驰, 等. 我国设施菜地表面观氮平衡分析及其空间分布特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(3): 353-360.]
- [20] Liu K, Guo L N, Jia Y X, et al. Analysis on fertilization status and potential of fertilizer reduction in greenhouse vegetable fields in Beijing[J]. *China Vegetables*, 2020(9): 71-81. [刘衍, 郭利娜, 贾羽旋, 等. 北京市设施蔬菜施肥状况及减施潜力分析[J]. *中国蔬菜*, 2020(9): 71-81.]
- [21] Yang X, Pan Z H, Tang W J, et al. Effects of organic waste ecological fertilizer returning to fields on quality of soil environmental and quality and benefit of tomato in greenhouse[J]. *Vegetables*, 2022(5): 26-32. [杨霞, 潘子涵, 唐伟杰, 等. 有机废料生态肥还田对温室土壤环境质量及番茄品质和效益的影响[J]. *蔬菜*, 2022(5): 26-32.]
- [22] Dong J L, Gruda N, Lam S K, et al. Effects of elevated CO₂ on nutritional quality of vegetables: A review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 924.
- [23] Ju X T, Zhang F S. Nitrate accumulation and its implication to environment in North China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2003, 12(1): 24-28. [巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 24-28.]
- [24] 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[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83(1): 73-84.
- [25] 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[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(2): 332-335. [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[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(2): 332-335.]
- [26] Wang X Z, Zou C Q, Gao X P, et al. Nitrous oxide emissions in Chinese vegetable systems: A meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 239: 375-383.
- [27] Qasim W, Xia L L, Lin S, et al. Global greenhouse vegetable production systems are hotspots of soil N₂O emissions and nitrogen leaching: A meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 116372.
- [28] Huang S W, Tang J W, Li C H. Status of heavy metals, nutrients, and total salts in commercial organic fertilizers and organic wastes in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 162-173. [黄绍文, 唐继伟, 李春花. 我国商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分和盐分状况[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 162-173.]
- [29] Chen Y, Huang B, Hu W Y, et al. Environmental assessment of closed greenhouse vegetable production system in Nanjing, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(8): 1418-1429.
- [30] Luo C L, Liu C P, Wang Y, et al. Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, South China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1): 481-490.
- [31] Huang Y Y, He C T, Shen C, et al. Toxicity of cadmium and its health risks from leafy vegetable consumption[J]. *Food & Function*, 2017, 8(4): 1373-1401.
- [32] Zhang Z L, Lin J, Dong M Y, et al. Survey of cadmium and mercury pollution and assessment of health risk of crops in polluted farmland in southern Jiangsu[J]. *Soils*, 2022, 54(1): 206-210. [张梓良, 林健, 冬明月, 等. 苏南某区污染耕地农产品镉汞状况调查及健康风险评估[J]. *土壤*, 2022, 54(1): 206-210.]
- [33] Wang J, Luo Y M, Teng Y, et al. Soil contamination by phthalate esters in Chinese intensive vegetable production systems with different modes of use of plastic film[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 180: 265-273.
- [34] Wang J, Chen G C, Christie P, et al. Occurrence and risk assessment of phthalate esters (PAEs) in vegetables and soils of suburban plastic film greenhouses[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 523: 129-137.
- [35] Zhang A P, Luo W X, Sun J Q, et al. Distribution and uptake pathways of organochlorine pesticides in greenhouse and conventional vegetables[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 1142-1147.
- [36] Li C, Chen J Y, Wang J H, et al. Occurrence of antibiotics in soils and manures from greenhouse vegetable production bases of Beijing, China and an associated risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 521/522: 101-107.
- [37] Li Q L, Zeng A R, Jiang X, et al. Are microplastics correlated to phthalates in facility agriculture soil?[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 412: 125164.
- [38] Hao Y Q, Sun H J, Zeng X P, et al. Smallholder vegetable farming produces more soil microplastics pollution than large-scale farming[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 317: 120805.
- [39] Ma T T, Zhou W, Chen L K, et al. Phthalate esters contamination in vegetable-soil system of facility greenhouses in Jingmen, central China and the assessment of health risk[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(9): 2703-2721.
- [40] Li N Y, Qu J H, Yang J Y. Microplastics distribution and microbial community characteristics of farmland soil under different mulch methods[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 445: 130408.
- [41] Huang S W, Tang J W, Li C H, et al. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1480-1493. [黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1480-1493.]
- [42] Xie J M, Yu J H, Chen B H, et al. Facility cultivation systems “设施农业”: A Chinese model for the planet[M]//*Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2017: 1-42.
- [43] Bai Y L. Review on research in plant nutrition and fertilizers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3477-3492. [白由路. 植物营养与肥料研究的回顾与展望[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(17): 3477-3492.]
- [44] Cheng Z H. General introduction of vegetable cultivation[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2019. [程智慧. 蔬菜栽培学总论[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [45] Dong J L, Gruda N, Li X, et al. Sustainable vegetable production under changing climate: The impact of elevated CO₂ on yield of vegetables and the interactions with environments-A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 253: 119920.
- [46] Kläring H P, Hauschild C, Heißner A, et al. Model-based control of CO₂ concentration in greenhouses at ambient levels increases cucumber yield[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143(3/4): 208-216.
- [47] Jin C W, Du S T, Wang Y, et al. Carbon dioxide enrichment by composting in greenhouses and its effect on vegetable production[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2009, 172(3): 418-424.
- [48] Dong J L, Gruda N, Li X, et al. Impacts of elevated CO₂ on nitrogen uptake of cucumber plants and nitrogen cycling in a greenhouse soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 145: 103342.
- [49] Zhang Y C, Yang X F, Xu G T, et al. Effects of temperature and humidity in greenhouse on occurrence of strawberry gray mold[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(9): 1850-1853. [张豫超, 杨肖芳, 许关桐, 等. 设施内温湿度生态调控对草莓灰霉病发生的影响[J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(9): 1850-1853.]
- [50] Suzuki M, Umeda H, Matsuo S, et al. Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 187: 44-49.
- [51] Zhou J C, Zhou S Y, Wang S Y, et al. Impact of climates on wheat yield in Yellow and Huai River wheat production area[J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2023, 26(5): 52-57. [周景春, 周素英, 王苏瑶, 等. 气候条件对黄淮南片小麦产量的影响[J]. *特种经济动植物*, 2023, 26(5): 52-57.]
- [52] Zhou J, Li P P, Wang J Z, et al. Growth, photosynthesis, and nutrient uptake at different light intensities and temperatures in lettuce[J]. *HortScience*, 2019, 54(11): 1925-1933.
- [53] Cheng Q, Liu S Y, Qu M, et al. Comparative analysis of temperature and light environment of PO film and PE film solar greenhouse[J]. *China Vegetables*, 2011(S1): 72-77. [程强, 刘思莹, 曲梅, 等. PO膜和PE膜日光温室温光环境比较分析[J]. *中国蔬菜*, 2011(S1): 72-77.]
- [54] Rosado D, Ackermann A, Spassibojko O, et al. WRKY transcription factors and ethylene signaling modify root growth during the shade-avoidance response[J]. *Plant Physiology*, 2022, 188(2): 1294-1311.
- [55] 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[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(24): 209-212. [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[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(24): 209-212.]

- [56] Li Z Z. Correlation between topsoil temperature and surface air temperature of vegetable garden soil in Harbin suburb[J]. Acta Pedologica Sinica, 1966, 14(1): 105-106. [李治中. 哈尔滨郊区菜园土层土温和近地层气温的相关性[J]. 土壤学报, 1966, 14(1): 105-106.]
- [57] Yang Y X, Zhang J H, Yang J H. Analysis of temperature and ground temperature in Dezhou and its influence on the development period of winter wheat[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2010, 46(S1): 118-120, 125. [杨玉霞, 张建海, 杨建红. 德州气温、地温分析及对冬小麦发育期的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(S1): 118-120, 125.]
- [58] Yan Q Y, Duan Z Q, Li X, et al. Effect of root zone temperature on growth of cucumber and nutrient utilization in soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(4): 752-760. [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[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 752-760.]
- [59] Ye S F, Yu J Q, Peng Y H, et al. Incidence of *Fusarium* wilt in *Cucumis sativus* L. is promoted by cinnamic acid, an autotoxin in root exudates[J]. Plant and Soil, 2004, 263(1): 143-150.
- [60] Bonanomi G, Lorito M, Vinale F, et al. Organic amendments, beneficial microbes, and soil microbiota: Toward a unified framework for disease suppression[J]. Annual Review of Phytopathology, 2018, 56: 1-20.
- [61] Qiu M H, Zhang R F, Xue C, et al. Application of bio-organic fertilizer can control *Fusarium* wilt of cucumber plants by regulating microbial community of rhizosphere soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(7): 807-816.
- [62] Valera D L, Belmonte L, Molina F, et al. Greenhouse agriculture in *Almeria*. A comprehensive techno-economic analysis[M]. Cajamar Caja Rural, 2016.
- [63] Quan Z, Huang B, Lu C Y, et al. Effects of ryegrass amendments on immobilization and mineralization of nitrogen in a plastic shed soil: A ¹⁵N tracer study[J]. Catena, 2021, 203: 105325.
- [64] Cai Z C, Zhang J B, Huang X Q, et al. Application of reductive soil disinfestation to suppress soil-borne pathogens[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 469-476. [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[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 469-476.]
- [65] Liang Y C, Li Y L, Lin Y, et al. Assessment of using solid residues of fish for treating soil by the biosolarization technique as an alternative to soil fumigation[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 357: 131886.
- [66] Zhu T B, Dang Q, Zhang J B, et al. Reductive soil disinfestation (RSD) alters gross N transformation rates and reduces NO and N₂O emissions in degraded vegetable soils[J]. Plant and Soil, 2014, 382(1): 269-280.
- [67] Huang X Q, Zhao J, Zhou X, et al. Differential responses of soil bacterial community and functional diversity to reductive soil disinfestation and chemical soil disinfestation[J]. Geoderma, 2019, 348: 124-134.
- [68] Domínguez P, Miranda L, Soria C, et al. Soil biosolarization for sustainable strawberry production[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(4): 821-829.
- [69] Hu J R, Shi C H, Li C R, et al. Comprehensive control technology and application of garlic root maggot[J]. China Vegetables, 2020(1): 93-96. [胡静荣, 史彩华, 李传仁, 等. 大蒜根蛆综合防治技术与应用[J]. 中国蔬菜, 2020(1): 93-96.]
- [70] Dong J L, Gruda N, Li X, et al. Global vegetable supply towards sustainable food production and a healthy diet[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 369: 133212.
- [71] Incrocci L, Thompson R B, Fernandez-Fernandez M D, et al. Irrigation management of European greenhouse vegetable crops[J]. Agricultural Water Management, 2020, 242: 106393.
- [72] Du T H, Zou J J, Sun S G, et al. Design of intelligent irrigation control system for facility vegetable[J]. Water Saving Irrigation, 2020(2): 92-95. [杜太行, 邹军军, 孙曙光, 等. 设施蔬菜智能灌溉控制系统的设计[J]. 节水灌溉, 2020(2): 92-95.]
- [73] Tian K, Xing Z, Kalkhajah Y K, et al. Excessive phosphorus inputs dominate soil legacy phosphorus accumulation and its potential loss under intensive greenhouse vegetable production system[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 303: 114149.
- [74] Xie X G, Chen Y, Bu Y Q, et al. A review of allelopathic researches on phenolic acids[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6417-6428. [谢星光, 陈晏, 卜元卿, 等. 酚酸类物质的化感作用研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6417-6428.]
- [75] Berendsen R L, Pieterse C M J, Bakker P A H M. The rhizosphere microbiome and plant health[J]. Trends in Plant Science, 2012, 17(8): 478-486.
- [76] Wang L X, Chen M X, Lam P Y, et al. Multifaceted roles of flavonoids mediating plant-microbe interactions[J]. Microbiome, 2022, 10(1): 233.
- [77] Del Valle I, Webster T M, Cheng H Y, et al. Soil organic matter attenuates the efficacy of flavonoid-based plant-microbe communication[J]. Science Advances, 2020, 6(5): eaax8254.
- [78] Lee J M, Kubota C, Tsao S J, et al. Current status of vegetable grafting: Diffusion, grafting techniques, automation[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 127(2): 93-105.
- [79] Xia X J, Dong H, Yin Y L, et al. Brassinosteroid signaling integrates multiple pathways to release apical dominance in tomato[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(11): e2004384118.
- [80] Hu W H, Huang L F, Mao W H, et al. Role of brassinosteroids in the regulation of photosynthetic apparatus in cucumber leaves[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(4): 762-766. [胡文海, 黄黎锋, 毛伟华, 等. 油菜素内酯对黄瓜苗期叶片光合机构调节作用的研究[J]. 园艺学报, 2006, 33(4): 762-766.]
- [81] Peng B Z, Ding D H. Soil science and economics[J]. Soils, 1994, 26(2): 57-60. [彭补拙, 丁栋虹. 土壤学与经济学[J]. 土壤, 1994, 26(2): 57-60.]

(责任编辑: 陈荣府)