

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.001

卢维宏, 张乃明, 包立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展. 土壤, 2020, 52(4): 651–658.

## 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展<sup>①</sup>

卢维宏<sup>1,2,3</sup>, 张乃明<sup>1,2\*</sup>, 包立<sup>2</sup>, 张丽<sup>1,2</sup>, 秦太峰<sup>2</sup>

(1 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201; 2 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201; 3 河南心连心化学工业集团股份有限公司, 河南新乡 453700)

**摘要:** 连作是目前我国设施农业的主要栽培方式, 连作障碍是土壤修复的世界性难题。本文系统阐述了国内设施栽培出现的连作障碍特征(如酸化、盐渍化、养分失衡、重金属及其他有害物质积累、土传病害发生严重)与成因, 并分别从农艺、生物、化学、物理 4 个方面简述了各种防治技术在缓解设施连作障碍过程中的作用效果。最后总结了设施连作障碍及防治技术研究中尚待解决的科学问题及研究方向, 以为我国设施连作障碍的发生发展机理研究和防治技术提供科学依据。

**关键词:** 设施栽培; 连作障碍; 调控技术; 土壤质量退化; 土传病害

**中图分类号:** S158 **文献标志码:** A

### Study Advances on Characteristics, Causes and Control Measures of Continuous Cropping Obstacles of Facility Cultivation in China

LU Weihong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Naiming<sup>1,2\*</sup>, BAO Li<sup>2</sup>, ZHANG Li<sup>1,2</sup>, QIN Taifeng<sup>2</sup>

(1 College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2 Yunnan Soil Fertilizer and Pollution Remediation Engineering Laboratory, Kunming 650201, China; 3 Henan Xinlianxin Chemical Industry Group Co. LTD., Xinxian, Henan 453700, China)

**Abstract:** Continuous cropping is currently the main cultivation method for facility agriculture, and continuous cropping obstacles are a worldwide problem in soil remediation. The characteristics of continuous cropping obstacles (such as acidification, secondary salinization, nutrient imbalance, accumulation of heavy metals and other harmful substances, serious soil-borne diseases) were systematically expounded in facility cultivation in China. The roles and effects of various regulation techniques in mitigating continuous cropping obstacles were briefly described from agronomical, biological, chemical and physical aspects. Based on these studies, the existing scientific problems and future research direction in continuous cropping obstacles and regulation technology in facilities cultivation were summarized in order to provide scientific basis for studying the regulation mechanism and technology of the continuous cropping obstacles in China.

**Key words:** Facility cultivation; Continuous cropping obstacle; Regulation technology; Soil quality degradation; Soil-borne disease

设施农业是利用必要的设施和设备创造相对可控的环境条件, 采用人为介入方式改变农作物生长条件, 使其在一定程度上摆脱季节、气候等因素的限制, 减少自然灾害带来的不良影响, 实现高效、集约化、可持续的现代农业生产方式<sup>[1-2]</sup>。我国设施农业自 20 世纪 80 年代发展以来, 2008 年种植面积 340 万  $\text{hm}^{2[2-3]}$ , 2010 年达 362 万  $\text{hm}^{2[4]}$ , 目前栽培面积已经超过 400 万  $\text{hm}^{2[5-6]}$ , 我国已经发展成为设施栽培世界大

国。但是, 我国目前的设施栽培还是以土培为主, 且高度集约化和长期单一化连作趋势明显, 随着栽培年限的延长, 普遍出现了土壤质量退化(如酸化、盐渍化、养分失衡、重金属及其他有害物质积累)、土传病害发生严重(土壤微生态环境破坏、根系自毒物质化感)等连作障碍问题, 据统计, 5 a 以上的大棚出现连作障碍的高达 80% 以上, 连作 20 a 以上的几乎达 100%<sup>[7]</sup>, 严重制约着我国设施农业的可持续发展。

①基金项目: 云南省对外科技合作计划项目(2015IC022)资助。

\* 通讯作者(zhangnaiming@sina.com)

作者简介: 卢维宏(1984—), 男, 山西运城人, 博士研究生, 农艺师, 主要从事植物营养与病害控制技术研究。E-mail: luweihong\_002@163.com

本文回顾了近 40 a 来设施栽培连作障碍的特征及防治技术的研究进展, 针对设施栽培连作中的土壤退化、土传病害严重及防治技术提出了该领域的科学问题及未来重点方向, 以期为我国设施栽培优质、高产、环境友好发展提供理论及实践依据。

## 1 设施栽培连作障碍特征与成因

### 1.1 土壤质量退化

**1.1.1 土壤酸化** 由于成土母质、气候等原因, 中国土壤具有典型的“南酸北碱”特征, 但一旦进入设施栽培过程, 其耕层土都出现了明显的不同程度的酸化, 且随着连作年限的延长, 具有明显加重的趋势。在陕西日光温室连作后, 平均耕层土 pH 7.73, 与对照相邻菜田(pH 8.20)相比, 降低了 5.7%<sup>[8]</sup>; 在沈阳不同连作年限日光温室的 132 个土壤样品中, pH 最小值为 4.94, 最大值为 6.68, 与对照露天土壤相比, pH 平均下降了 1.05 个单位, 酸化趋势严重<sup>[9]</sup>。在南方区域, 如安徽、云南、江西等地的设施连作中也普遍存在着类似的趋势, 安徽典型区域设施栽培连作 10、15 a 的黄潮土 pH 分别下降了 0.55、0.89 个单位, 每年约下降 0.06 个单位, 由碱性退化为中性; 连作 5、10、23 a 的黑姜土 pH 分别下降了 0.46、0.95、1.26 个单位, 约每年下降 0.08 个单位, 由中性退化为酸性<sup>[10]</sup>; 在云南、江西等地的调查中, 建棚前耕层土的 pH 为 7.19, 连作 13 a 后下降为 6.47<sup>[11]</sup>, 个别设施辣椒连作 2 a 以下土壤 pH 为 5.85, 连作 2 a 以上的土壤 pH 平均为 4.95<sup>[12]</sup>。设施土壤的普遍酸化与过量使用氮肥(如尿素、硫酸铵、含硝态氮的高氮复合肥)、堆肥(如猪粪和牛粪等)、高温高湿条件、土壤有机质分解、碱基离子(如  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$  等)被作物带走等有关<sup>[13-14]</sup>。

**1.1.2 次生盐渍化** 由于设施栽培中特殊的高肥、大水、高温、高湿且少淋洗环境, 致使大部分盐分表聚化, 且随着连作年限的延长逐步从直筒型向倒锥型发展<sup>[15-16]</sup>。在云南不同种植年限的设施土样中, 2% 的土样达到强度盐渍化, 28% 的中度盐渍化, 54% 的轻度盐渍化, 仅有 16% 的为非盐渍化, 耕层土的盐分含量平均达 1.76 g/kg, 1~3 a 连作大棚土壤盐分增加了 1 倍~2 倍, 个别达 2.5 倍<sup>[17]</sup>。在全国主要设施菜地的耕层土壤中, 轻度盐渍化的比例占 38.2%, 中度盐渍化比例占 4.7%, 且主要的盐分离子为  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ , 其次是  $\text{Ca}^{2+}$ , 分别占盐分总量的 27.9%、26.9% 和 15.3%, 设施菜地连作盐渍化程度显著重于露天菜地<sup>[18]</sup>。设施连作次生盐渍化的发生与复种指

数高、长期种植单一蔬菜种类有关, 致使作物根系对偏嗜好离子的选择性吸收, 造成特定离子的过分富集或亏损。

**1.1.3 土壤养分失衡** 土壤养分失衡是设施连作土壤质量退化最严重的问题。在河南设施蔬菜连作障碍调查中发现, 土壤养分失衡问题占比达 65% 以上, 居连作障碍问题之首<sup>[7]</sup>。研究表明, 设施连作后整体表现为氮、磷、钾、硫盈余, 耕层土壤全氮、硝态氮、有效磷、速效钾的含量分别是露地土壤的 1.9 倍、21.2 倍、5.4 倍和 3.7 倍<sup>[19]</sup>。据统计, 我国典型设施栽培生产基地, 每年氮、磷、钾养分的平均投入量为 4 088、3 656 和 3 438 kg/hm<sup>2</sup>, 其中随化肥投入的分别占各养分总量的 63%、61% 和 66%, 且施肥比例(1:0.9:0.8)与作物需求比例(1:0.3:1.4)严重失衡, 造成设施栽培中氮、磷、钾的养分利用率非常低, 分别为 24%、8%、46%<sup>[20-21]</sup>。高强度种植、单一作物连作、养分管理不合理是设施连作土壤养分失衡的主要因素, 其中单一作物连作、养分管理不合理表现的最为普遍和突出, 单一作物连作造成特定养分掠夺性从土壤中输出, 再加上不合理的养分管理, 造成了土壤-植物养分供需失衡。

**1.1.4 自毒化感物质的胁迫** 由于长期连作及偏高的复种指数, 造成设施栽培土壤中过量的根系分泌物、植株残体和残茬腐解物等自毒物质(如醌类、苯甲酸及其衍生物、肉桂酸及其衍生物、香豆素类等)<sup>[22]</sup>的累积, 加剧了连作障碍的形成。自毒物质不但具有种间抑制性, 而且对作物自身的种子萌发、幼苗生长、根系养分吸收等也具有一定的抑制效果<sup>[23]</sup>。番茄连作 12 a 时土壤自毒物质邻苯二甲酸二甲酯能显著增加土壤根结线虫二龄幼虫数量<sup>[24]</sup>; 连作 5 a 时茄子、辣椒产生的自毒物质香豆酸、肉桂酸、邻苯二甲酸二丁酯能显著降低土壤酶活性和加重根际酸化<sup>[25]</sup>; 此外, 在设施番茄<sup>[26-27]</sup>、黄瓜<sup>[28-29]</sup>、草莓<sup>[30]</sup>、西瓜<sup>[31]</sup>、萝卜、生菜等连作中产生的酚酸类化合物(如苯甲酸、羟基苯甲酸、肉桂酸、阿魏酸、丙烯酸等)还能破坏细胞膜结构的功能, 抑制作物的抗性酶活<sup>[32]</sup>, 表现长势较弱、抗性下降、产量降低, 引发连作障碍。

**1.1.5 重金属的累积** 设施连作单一的种植结构也会导致相对单一的施肥和用药结构, 以致土壤重金属的累积表现出区域化, 且累积程度随着连作年限的延长呈加重趋势<sup>[33]</sup>。过量的氮、磷投入<sup>[19, 34]</sup>和部分有机肥是设施土壤重金属的一项重要来源, 如: 磷肥中含有较多的 Hg、Cd、As、Zn、Pb, 氮肥中含 Pb 量较高, 畜禽粪便堆肥则含有较高的 Cu、Zn、Cr、Ni<sup>[35]</sup>。

同时大量施用含 Cu、As 的杀菌剂也会加重设施土壤重金属的累积程度。从重金属累积的整体分布空间来看,我国南部地区设施土壤以 Cd、Pb 和 Hg 含量最高,北部以 As、Cu、Zn 和 Cr 含量最高,西北部则 Ni 含量最高,总体来说 Cd 超标最为严重,在南部、北部、西北部地区的超标率分别为 41.7%、54.5%、11.1%,其次是 Pb,超标率分别为 33.3%、18.2% 和 0<sup>[36]</sup>,这些特征与成土母质、气候等也有一定的关系。

**1.1.6 有机污染物使用** 农膜覆盖和过量的化学杀虫、杀菌剂农药使用是设施栽培生产过程中的普遍现象,这给农业增产和农民增收提供了便利条件,同时农膜和农药的残留也成为设施土壤质量退化的成因。农膜残留导致大量的酞酸酯类化合物(如邻苯二甲酸酯类 PAEs、双-2-乙基己基酯 DEHP、二正丁酯 DnBP、邻苯二甲酸二正辛酯 DnOP)释放到土壤中,在设施土壤中累积<sup>[37-39]</sup>,并最终在设施蔬菜中富集(如叶菜类、果菜类、根茎类等)<sup>[37,40]</sup>;另外,滥用有机磷、拟除虫菊酯类、氨基甲酸酯类等杀虫剂和杀菌剂农药也是设施栽培中一个重要的有机污染源<sup>[41-42]</sup>。随着设施栽培的延长,有机质污染物的富集降低了土壤微生物群落数量,减缓了土壤腐殖质形成,破坏了土壤团粒结构,恶化了土壤环境<sup>[43]</sup>。

## 1.2 土传病害发生

**1.2.1 土壤微生物结构破坏** 设施连作障碍发生的原因很多,但最根本的原因是土壤微生物区系和多样性的失调,有益微生物减少,病原微生物富集,进而引发植物的各种土传性病害<sup>[44]</sup>。单一作物连续种植会形成特殊的土壤环境(如根系分泌物、植株残体腐解物等),使某些微生物(特别是病原微生物)富集,真菌的种类和数量增多,细菌和放线菌等有益菌减少<sup>[45-46]</sup>。周德平等<sup>[47]</sup>研究了设施芦笋种植 1、3、5、8、11 a 大棚土壤微生物群落结构及功能多样性,结果表明土壤细菌种群数量减少,真菌数量增加,细菌与真菌数量比(B/F 值)降低,随着年限增加,土壤微生物代谢活性下降,土壤微生物代谢类群多样性减少,连作 5 a 和 8 a 大棚土壤微生物丰富度指数均仅为对照 1 a 大棚的 72%。在温室土壤中,真菌的数量虽然不占主导地位,但对土壤肥力水平却能产生较大的影响,随着连作年限延长,设施土壤微生物从细菌型逐步向真菌型转化,导致地力衰竭,真菌数量越多土壤肥力越差<sup>[48-50]</sup>,作物病害加重。

**1.2.2 土壤酶活性降低** 土壤酶参与各种元素的生物循环、有机质的转化、腐殖质和有机无机胶体的形成,其活性反映了土壤中进行的各种生物化学过程

的动向和强度,尽管数量微小,但是作用颇大,是土壤健康状况的重要指标。研究表明,过氧化氢酶、脲酶、转化酶、多酚氧化酶可以作为设施菜地敏感的土壤酶学指标<sup>[51]</sup>,而长期单施化肥(尤其是氮肥)<sup>[52-53]</sup>、盐分胁迫<sup>[54]</sup>、设施连作<sup>[51]</sup>、再生水灌溉<sup>[53]</sup>等均会显著影响土壤酶的活性,设施土壤酶活性降低,必然会引发土壤养分利用率低、根系毒害(如过氧化氢)等连作障碍的发生。

**1.2.3 作物抗性下降** 连作不仅恶化作物生长的土壤环境,还会降低设施作物的自身抗性。过氧化物酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶是作物防御体系中的重要抗逆酶类。研究表明,连作产生的自毒物质不同浓度外源添加均促进了黄瓜、番茄幼苗根系中丙二醛(MDA)的合成,对根系活力和细胞质膜具有破坏作用,作物对病原菌的抵抗力有明显的下降,对细胞膜、叶绿素、线粒体都具有明显的破坏作用<sup>[55-56]</sup>。随着连作年限的增加,作物 MDA 含量在整个生育期内总体呈上升趋势,连作马铃薯叶片 MDA 含量增加会导致保护酶系统破坏<sup>[57]</sup>,最终诱发作物的系统抗性降低<sup>[58]</sup>。

## 2 设施土壤连作障碍的削减防治技术

### 2.1 农艺调控技术

**2.1.1 种植模式** 轮作、套作是区别于连作的有效缓解设施连作障碍的种植模式。在夏季温室休闲期种植大蒜、菠菜及白菜可以显著降低土壤盐分累积,增加土壤微生物数量,抑制镰刀菌的增殖<sup>[59]</sup>。在连作草莓 5 a 的大棚土壤上轮作水生蔬菜(水芹和蕹菜),表层土壤有效磷和有机质显著增加,提高了土壤腐殖化程度和有机氮素矿化能力<sup>[60]</sup>。以西兰花、青刀豆和糯玉米设置不同的套作模式,有效提高了土壤有机质含量、氮素利用率、土壤脲酶活性、蔬菜产量,降低了土壤无机氮含量<sup>[61]</sup>。在连作障碍发生的设施栽培中,开展合理的轮作、间作、套作模式,均能有效改善土壤环境,提高养分利用率,减轻土壤盐渍化及酚酸类物质的自毒作用。

**2.1.2 平衡施肥** 合理的养分管理是我国设施栽培中亟待解决的科学和技术问题。一方面需要加强对设施栽培中土壤养分转化和作物吸收规律的基础研究<sup>[62]</sup>,另一方面要高度重视平衡施肥技术的应用,即根据作物需肥规律及土壤供肥能力(尤其是碱解氮、有效磷、速效钾和有机质 4 个指标)来确定肥料的种类和数量,也可根据特定需求采取针对性的化验,施肥中结合作物特定生长阶段来调整施肥配方和施肥次数,做到“控氮、稳磷、增钾、补微”。研究

显示, 优化施肥配方、增施有机肥可降低土壤容重 3.73%~14.93%, 增加土壤总孔度 4.18%~15.79%, 提高根区土壤呼吸强度 23.4%~34.6%, 改善土壤结构, 增加土壤有机质, 提高作物的抗病性<sup>[63-64]</sup>。

**2.1.3 优化耕作方式** 众所周知, 土壤耕作可以产生更大的曝气, 将作物残茬和肥料混合到土壤中, 刺激微生物活动和纤维素分解。土壤深耕能够打破犁底层、改变土壤理化性质、提高土壤透气性、降低土壤容重、提高土壤微生物及脲酶活性、促进作物根系下扎等<sup>[65]</sup>, 同时在耕作过程中适度采用控制交通耕作 (controlled traffic farming, CTF) 方式, 对降低土壤容重、植物水分传导吸收具有明显改善作用<sup>[66-67]</sup>。

**2.1.4 嫁接技术** 嫁接是近些年来在提高作物抗性、缓解设施连作障碍方面广泛应用、效果显著的绿色调控技术。研究表明, 嫁接可诱导茄子质膜 P-H<sup>+</sup>-ATPase、P-Ca<sup>2+</sup>-ATPase 和液泡膜 V-H<sup>+</sup>-ATPase、V-Ca<sup>2+</sup>-ATPase 及质膜氧化还原酶的活性提高, 使茄子适应连作障碍下肉桂酸、香草醛的化感胁迫, 增强了细菌和放线菌的根际效应, 减弱了真菌根际效应, 提高了土壤酶(脲酶、磷酸酶、蔗糖酶)的活性, 有效缓解了茄子连作障碍的发生<sup>[68]</sup>; 同时嫁接的葫芦科、茄科植物对设施栽培过程中的冻害、高温、干旱、淹水和有机污染(如艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂等有机农药)等非生物逆境胁迫也非常有效<sup>[69]</sup>, 提高作物对土壤盐渍化<sup>[70]</sup>、土壤酸碱度、养分失衡和重金属毒性<sup>[71]</sup>等环境因子胁迫的耐受性。

**2.1.5 科学灌溉控盐技术** 灌溉排盐技术采用的是以水洗盐、盐随水走的方法将设施土壤表层的盐分带走, 降低土壤盐分累积浓度。生产实践中, 采用挖沟排水、灌溉洗盐等措施, 在作物生长季节, 用缩短畦头、高畦深沟、接通大明沟等方式使地表水顺利排出; 在休闲期大量灌水, 每亩(1 亩=667m<sup>2</sup>)地至少灌水 100 m<sup>3</sup>, 进行 2~3 次, 以使盐分随灌溉水流出土体, 达到洗盐的目的<sup>[72]</sup>。另外, 采用工程措施铺设暗管进行地下水排盐也是最常用的一种修复技术, 即采用双层波纹有孔塑料暗管排水洗盐, 浅层暗管管顶距土表 30~40 cm, 灌水洗盐时耕层盐分随水由此排出; 深层暗管管顶距土表 60~80 cm, 随水下渗底层土壤积盐由此排出, 此法对设施土壤次生盐渍化修复效果更彻底<sup>[73]</sup>。

**2.1.6 抗(耐)性品种选育** 通过现代生物学技术手段(如序列标签位点 STS、简单序列重复标记 SSR、单核苷酸多态性 SNP 等)定向筛选抗(耐)性基因, 被认为是选育设施专用抗(耐)性品种最经济有效的技

术途径。目前研究在抗逆强、成活率高、品质好、产量高等方面都取得了较好进展, 如: 设施番茄的砧木双抗(抗根结线虫、抗枯萎病)品种<sup>[74]</sup>、茄子抗青枯病品种<sup>[75]</sup>、黄瓜耐盐抗病品种<sup>[76]</sup>等, 在设施生产实践过程中已经广泛应用。

## 2.2 生物调控技术

通过向土壤中引入有益微生物, 使其与病原微生物竞争生存空间和营养物质, 或拮抗有害病原生长, 或分泌某些物质而形成根际生物屏障, 减轻病原微生物危害, 控制土传性病害(尤其是根结线虫)的发生<sup>[77-79]</sup>。在抑制设施栽培土传病害上, 主要的生防真菌有木霉属 (*Trichoderma* spp.)、淡紫拟青霉 (*Paecilomyces lilacinus*)、链霉菌 (*Streptomyces* spp.)、丛枝菌根 (*arbuscular mycorrhiza*, AM) 等, 生防细菌有芽孢杆菌类 (*Bacillus* spp.)、荧光假单胞菌 (*Pseudomonas* spp.) 等<sup>[80]</sup>。研究表明, 由短短芽孢杆菌、淡紫拟青霉等组成的复合生防菌肥对设施黄瓜根结线虫病防治效果达 57.9%, 与化学农药噻唑膦基本持平<sup>[81]</sup>; 解淀粉芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌、苏云金芽孢杆菌对番茄、黄瓜根结线虫的 2 龄幼虫和卵孵化具有明显致死作用<sup>[82-84]</sup>。

向土壤引入外源固氮微生物、根际促生菌 (plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR), 可以溶磷溶钾, 促进作物生长, 改善根系对养分的吸收, 提高养分利用率, 延缓盐碱等逆境胁迫<sup>[85-88]</sup>。外源引入丛枝菌根真菌 (AMF), 其与多数设施作物根系能形成共生关系, 除可增加养分吸收、刺激作物生长外, 还可形成隔离带使作物免受重金属的毒害, AMF 通过向根际土壤分泌有机物(如: 球囊霉素)来螯合重金属离子, 以减轻植物对重金属的吸收<sup>[89-90]</sup>, 尤其可以降低作物对土壤重金属 Cd 的吸收, 减轻 Cd 的毒害<sup>[91]</sup>; 另外复合微生物菌剂对改善土壤理化性质也具有一定的效果。

## 2.3 化学调控技术

施用土壤改良剂对缓解土壤盐渍化、酸化、板结程度, 提高土壤有机质, 均衡土壤各种营养元素, 改善设施土壤养分富集具有明显的作用。研究表明, 牡蛎类土壤调理剂可以改善设施土壤酸化, 促进番茄生长, 提高单果重及果实品质, 实现增产 16.54%<sup>[92]</sup>。在低温高盐情况下, 腐植酸钾提高番茄根系活力 4.2%, 提高叶片光合效率、改善体内 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 分布, 提高过氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性, 缓解盐胁迫效应<sup>[93]</sup>; 用生物质炭处理连作 6 a(11 茬)的日光温室营养基质, 其过氧化物酶活性提高至第 1 茬时的水

平, 基质内细菌群落多样性、蔗糖酶和脲酶活性都获得了明显的改善<sup>[94]</sup>, 同时对改善设施栽培作物长势、提高肥料利用率等具有良好的效果<sup>[95]</sup>。另外, 在设施栽培过程中, 选用50% 甲基硫菌灵、50% 多菌灵、40% 五氯硝基苯、15% 恶毒灵或其他的低毒化学药剂也可对土传病害发生较多的设施土壤进行消毒处理<sup>[96]</sup>, 起到很好的防治效果。

## 2.4 物理调控技术

电消毒法是一种常见的设施土壤物理消毒技术。以直流电土壤消毒原理、土壤微水分点处理原理和脉冲电解原理集成的土壤电化学消毒技术, 可平衡土壤酸碱性、恢复土壤透气性、杀灭土传病害的病原微生物, 特别是对线虫、韭蛆等顽固性害虫具有良好的杀灭效果, 在短时间内可有效解决土壤连作过程中的诸多问题<sup>[97-98]</sup>。郭修武等<sup>[99]</sup>对葡萄连作土壤进行蒸汽灭菌, 结果发现灭菌可改变根系分泌物的成分及含量, 促进植株的生长, 减轻了葡萄的连作障碍。通过施用化学试剂消毒、土壤蒸气消毒和日晒消毒等方法来控制黄瓜、茄子、草莓、大豆、果树等的连作障碍也有一定的效果<sup>[100]</sup>。

## 3 存在问题及未来研究趋势

### 3.1 存在问题

针对设施连作障碍及防治技术, 国内学者已经开展了大量的研究, 但随着我国设施农业的集约化和自动化程度的日趋提升, 现有技术仍然不能满足生产实际需求, 存在的问题如:

1) 我国设施农业起步晚, 面积增长快, 但质量水平较低, 实际应用中出现了诸多不同于露地常规栽培的生产问题, 如设施栽培施肥、用药和管理技术的差异。不合理的施肥/药所产生的土壤质量恶化严重, 目前的研究主要集中在土壤质量恶化后的修复技术上, 而关于连作障碍发生前的预防措施鲜有报道。

2) 在设施连作障碍的防治技术方面, 单项技术的研究居多, 综合措施的研究较少, 与实际生产中常见的多因素诱发设施土壤退化或连作障碍存在偏差。

3) 设施连作障碍发生发展的系统性研究不足。现有研究多是以已产生连作障碍的设施农业为研究对象, 而缺乏从建棚开始持续对其管理措施、土壤特征变化进行定位和系统研究。

4) 有益微生物对缓解土壤退化和连作障碍方面具有较好的作用, 但经常存在田间实际应用效果不稳定、作用机理(如营养元素磷的增溶效果与植物对增溶磷的吸收关系)不清楚等问题<sup>[101]</sup>。

5) 调控产品和技术标准不完善。目前, 市场上的土壤改良剂层出不穷, 种类更是琳琅满目, 但是在指标标识、作用机理、使用方法等方面不规范, 用没有进行规范预处理的原料生产有机肥, 会造成土壤中抗生素、重金属、盐分及病原菌污染的风险。

### 3.2 未来研究趋势

近年来, 设施农业逐步被技术型农民所青睐, 面积更是持续稳步攀升, 解决设施连作障碍问题必将成为趋势。未来应把设施连作障碍及防治技术的研究重点放在以下几个方面:

1) 构建国内设施栽培质量控制标准系统, 提前预防设施连作障碍及后期规范调控; 建立中国设施农业研究网络平台和专家体系, 实现资源共享和在线答疑。

2) 在我国典型的设施栽培集中区域, 对设施栽培进行长期定位研究, 如开展设施土壤微生物普查、根际微生态系统<sup>[102]</sup>、测土施肥/药、基因沉默技术(或RNA沉默, RNAi)、强还原土壤消毒法(reductive soil disinfestation, RSD)等新兴调控技术<sup>[103-104]</sup>的系统研究, 侧重连作障碍机理和复合型防治技术的研究。

3) 加大对土壤修复技术及连作障碍防治产品的推广, 做好产品指标及市场准入制度, 尤其是在指标标识、作用机理、使用方法以及风险控制方面, 坚决杜绝土壤二次污染。

4) 深入研究设施栽培养分投入产出平衡、肥料利用率、科学施肥制度、不同栽培管理模式<sup>[105]</sup>等, 提前预测设施土壤肥力的发展方向和可能产生的环境影响, 为实现设施栽培规模化、产业化发展提供依据。

5) 加大对新型设施栽培模式的研究, 如水肥一体化、无土栽培等, 逐步降低设施栽培对土壤的依赖程度, 缓解未来不断增长的人口数量与耕地面积日益锐减的矛盾, 着力发展环境友好、资源利用程度高、土壤依赖程度低的新型设施栽培模式。

### 参考文献:

- [1] Jensen M H. Controlled environment agriculture in deserts, tropics and temperate regions - A world review[J]. *Acta Horticulturae*, 2002(578): 19-25.
- [2] 农业部种植业管理司. 科学规划 规范推进 促进设施蔬菜持续健康发展(上)[J]. *农业工程技术(温室园艺)*, 2009, 29(6): 26, 28-29.
- [3] 张震, 刘学瑜. 我国设施农业发展现状与对策[J]. *农业经济问题*, 2015, 36(5): 64-70, 111.
- [4] 中华人民共和国农业部农垦局. 中国农垦统计年鉴-2015[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.

- [5] 张真和, 马兆红. 我国设施蔬菜产业概况与“十三五”发展重点——中国蔬菜协会副会长张真和访谈录[J]. 中国蔬菜, 2017(5): 1-5.
- [6] 瞿剑. 中国设施园艺面积世界第一[R]. 科技日报, 2017-08-22(1).
- [7] 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.
- [8] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 日光温室蔬菜地土壤主要养分含量及其累积特征分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 129-134.
- [9] 姜维. 东陵区设施土壤有机质、pH 值的剖面特征研究[J]. 农业科技与装备, 2011(6): 19-20, 23.
- [10] 李粉茹, 于群英, 邹长明. 设施菜地土壤 pH 值、酶活性和氮磷养分含量的变化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 217-222.
- [11] 苏友波, 李刚, 毛昆明, 等. 昆明地区主要花卉蔬菜基地设施栽培土壤养分变化特点[J]. 土壤, 2004, 36(3): 303-306.
- [12] 张福建, 陈昱, 吴才君, 等. 江西省设施辣椒连作障碍现状调查与分析[J]. 北方园艺, 2018(17): 75-81.
- [13] Stamatiadis S, Werner M, Buchanan M. Field assessment of soil quality as affected by compost and fertilizer application in a broccoli field (San Benito County, California)[J]. Applied Soil Ecology, 1999, 12(3): 217-225.
- [14] 史静, 张乃明, 包立. 我国设施农业土壤质量退化特征与调控研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 787-794.
- [15] Liang Y, Lin X, Yamada S, et al. Soil degradation and prevention in greenhouse production[J]. SpringerPlus, 2013, 2(1): 1-5.
- [16] 李刚, 张乃明, 毛昆明, 等. 大棚土壤盐分累积特征与调控措施研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 44-47.
- [17] 史静, 邓玉龙, 张乃明, 等. 云南设施土壤盐分累积特征研究[J]. 土壤, 2009, 41(6): 921-925.
- [18] 黄绍文, 高伟, 唐继伟, 等. 我国主要菜区耕层土壤盐分总量及离子组成[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 965-977.
- [19] 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[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 514-522.
- [20] Shang Q Y, Ling N, Feng X M, et al. Soil fertility and its significance to crop productivity and sustainability in typical agroecosystem: a summary of long-term fertilizer experiments in China[J]. Plant and Soil, 2014, 381(1/2): 13-23.
- [21] 王柳, 张福墁, 高丽红. 京郊日光温室土壤养分特征的研究[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(1): 62-66.
- [22] Li Z H, Wang Q, Ruan X, et al. Phenolics and plant allelopathy[J]. Molecules, 2010, 15(12): 8933-8952.
- [23] 王建花, 陈婷, 林文雄. 植物化感作用类型及其在农业中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1173-1183.
- [24] 刘彤彤, 卢巧芳, 王男麒, 等. 根系分泌物抑制连作障碍线虫病的根际调控机制及其应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(6): 1038-1046.
- [25] Chen S, Zhou B, Lin S, et al. Accumulation of cinnamic acid and vanillin in eggplant root exudates and the relationship with continuous cropping obstacle[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(14): 2659-2665.
- [26] 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.
- [27] 何志刚, 娄春荣, 王秀娟, 等. 番茄自毒物质降解菌的筛选及其降解效果[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(5): 114-116.
- [28] 李贺敏, 张红瑞, 沈玉聪, 等. 酚酸类物质对白菜幼苗和生理特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(5): 626-633.
- [29] 乔永旭, 张彦, 张永平, 等. 自毒物质对黄瓜和南瓜种子萌芽的影响[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(3): 87-88, 96.
- [30] 马燕会, 齐永志, 赵绪生, 等. 自毒物质胁迫下不同草莓品种枯萎病抗性变化的研究[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(2): 93-97.
- [31] 张小红, 赵依杰. 西瓜化感作用研究进展[J]. 中国蔬菜, 2013(24): 10-15.
- [32] 孙光闻, 陈日远, 刘厚诚. 设施蔬菜连作障碍原因及防治措施[J]. 农业工程学报, 2005, 21(S2): 184-188.
- [33] 王海江, 董天宇, 朱永琪, 等. 玛纳斯河流域长期连作棉田土壤重金属剖面分布特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2216-2225.
- [34] 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[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 83-91.
- [35] 尹晓明, 王荣江, 徐潇潇, 等. 猪粪堆肥过程中养分和重金属含量的动态变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(2): 254-263.
- [36] 孟敏, 杨林生, 韦炳干, 等. 我国设施农田土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 1019-1026.
- [37] 汪军, 杨杉, 陈刚才, 等. 我国设施农业农膜使用的环境问题刍议[J]. 土壤, 2016, 48(5): 863-867.
- [38] Hüffer T, Metzelder F, Sigmund G, et al. Polyethylene microplastics influence the transport of organic contaminants in soil[J]. Science of The Total Environment, 2019, 657: 242-247.
- [39] He L Z, Gielen G, Bolan N S, et al. Contamination and remediation of phthalic acid esters in agricultural soils in China: a review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(2): 519-534.
- [40] 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.
- [41] 吴蕊, 牛明芬, 郭颖, 等. 设施大棚农药污染残留调查分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 130-134.
- [42] 郭映花, 邢永华, 纪文武, 等. 2012 年乐都县某镇大棚中蔬菜和土壤禁用农药残留调查[J]. 河南预防医学杂志, 2013, 24(6): 412-414.

- [43] (美)Nyle C B, (美)Ray RW. 土壤与生活(原书第十四版)[M]. 李保国等译. 北京: 科学出版社, 2019: 748-825.
- [44] Hiddink G A, Termorshuizen A J, Bruggen A H C. Mixed cropping and suppression of soilborne diseases[J]. *Genetic Engineering, Biofertilisation, Soil Quality and Organic Farming*, 2010: 119-146.
- [45] Liu X, Zhang J L, Gu T, et al. Microbial community diversities and taxa abundances in soils along a seven-year gradient of potato monoculture using high throughput pyrosequencing approach[J]. *PLoS One*, 2014, 9(1): e86610.
- [46] 赵帆, 赵密珍, 王钰, 等. 不同连作年限草莓根际细菌和真菌多样性变化[J]. *微生物学通报*, 2017, 44(6): 1377-1386.
- [47] 周德平, 褚长彬, 范洁群, 等. 不同种植年限设施芦笋土壤微生物群落结构与功能研究[J]. *土壤*, 2014, 46(6): 1076-1082.
- [48] 杨凤军, 安子靖, 杨薇薇. 番茄连作对日光温室土壤微生物及土壤理化性状的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(1): 42-46.
- [49] 李兰君, 刘玳含, 刘建斌, 等. 连作对设施番茄土壤微生物及酶活性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(18): 130-134.
- [50] Castrillo G, Teixeira P J P L, Paredes S H, et al. Root microbiota drive direct integration of phosphate stress and immunity[J]. *Nature*, 2017, 543(7646): 513.
- [51] 吴凤芝, 孟立君, 王学征. 设施蔬菜轮作和连作土壤酶活性的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 554-558, 564.
- [52] 李猛, 张恩平, 张淑红, 等. 长期不同施肥设施菜地土壤酶活性与微生物碳源利用特征比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 44-53.
- [53] 周媛, 李平, 郭魏, 等. 施氮和再生水灌溉对设施土壤酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 268-273.
- [54] 周德平, 吴淑杭, 褚长彬, 等. 盐胁迫对蔬菜地土壤微生物及土壤酶活的毒害效应[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(8): 1602-1607.
- [55] 张恩平, 张文博, 张淑红, 等. 苯甲酸和肉桂酸对番茄幼苗根部保护酶及膜质过氧化的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(1): 186-190.
- [56] 陈天祥, 顾欣, 孙权. 外源酚酸对设施黄瓜幼苗生物量积累和抗氧化系统的影响[J]. *北方园艺*, 2016(20): 44-49.
- [57] 沈宝云, 刘星, 王蒂, 等. 甘肃省中部沿黄灌区连作对马铃薯植株生理生态特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(6): 689-699.
- [58] 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.
- [59] 吴艳飞, 张雪艳, 李元, 等. 轮作对黄瓜连作土壤环境和产量的影响[J]. *园艺学报*, 2008, 35(3): 357-362.
- [60] 赵海涛, 李良俊, 殷朝珍, 等. 水生蔬菜轮作对大棚草莓连作土壤性质的影响[J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(2): 289-295.
- [61] 张洁莹, 宁堂原, 冯宇鹏, 等. 套作糯玉米对连作菜田土壤特性及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(10): 1994-2003.
- [62] 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.
- [63] 张宝峰, 曾路生, 李俊良, 等. 优化施肥处理下设施菜地土壤容重与孔隙度的变化[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(32): 309-314.
- [64] Huang S, Zhang W J, Yu X C, et al. Effects of long-term fertilization on corn productivity and its sustainability in an Ultisol of Southern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 138(1-2):44-50.
- [65] 胡云, 李明, 尹春. 深翻和秸秆基质调控对设施黄瓜根系生长相关因子的影响[J]. *北方园艺*, 2016(8): 45-48.
- [66] McPhee J E, Aird P L, Hardie M A, et al. The effect of controlled traffic on soil physical properties and tillage requirements for vegetable production[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 149:33-45.
- [67] Bai Y H, He J, Li H W, et al. Soil structure and crop performance after 10 years of controlled traffic and traditional tillage cropping in the dryland loess plateau in China[J]. *Soil Science*, 2009, 174(2): 113-119.
- [68] 陈绍莉. 茄子连作障碍的主要化感物香草醛和肉桂酸的作用机理及嫁接调节[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015.
- [69] Schwarz D, Roupheal Y, Colla G, et al. Grafting as a tool to improve tolerance of vegetables to abiotic stresses: Thermal stress, water stress and organic pollutants[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 127(2):162-171.
- [70] Colla G, Roupheal Y, Leonardi C, et al. Role of grafting in vegetable crops grown under saline conditions[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 127(2):147-155.
- [71] Savvas D, Colla G, Roupheal Y, et al. Amelioration of heavy metal and nutrient stress in fruit vegetables by grafting[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 127(2):156-161.
- [72] 侯格平, 甄东升, 孙宁科, 等. 河西走廊蔬菜日光温室土壤次生盐渍化现状及改良对策[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(1): 48-54.
- [73] 刘杰, 李云玲. 设施土壤次生盐渍化修复技术研究进展[J]. *江西农业*, 2017(5): 24, 31.
- [74] 郜秋华, 王学颖, 王明耀, 等. 番茄砧木新品种“科砧 3号”的选育[J]. *北方园艺*, 2018(6): 204-210, 2.
- [75] 李兆龙, 曹翠文, 乔燕春, 等. 茄子抗青枯病研究现状与展望[J]. *热带农业科学*, 2015, 35(2): 74-77, 85.
- [76] 李贞霞, 孙丽, 杨和连. 保护地专用黄瓜品种选育研究进展[J]. *河南科技学院学报(自然科学版)*, 2011, 39(3): 18-23.
- [77] Weller D M. *Pseudomonas* biocontrol agents of soil borne pathogens: looking back over 30 years[J]. *Phytopathology*, 2007, 97(2): 250-256.
- [78] Kloepper J W, Ryu C M, Zhang S A. Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp[J]. *Phytopathology*, 2004, 94(11): 1259-1266.
- [79] Barea J M, Andrade G, Bianciotto V, et al. Impact on arbuscular mycorrhiza formation of *Pseudomonas* strains used as inoculants for biocontrol of soil-borne fungal plant pathogens[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(6): 2304-2307.



- [80] Idoia G, Nieves G, Jone A. Plant phenology in fluences the effect of mycorrhizal fungi on the development of verticillium-induced wilt in pepper[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2004, 110(3): 227–238.
- [81] 马玉琴, 魏偲, 茆振川, 等. 生防型菌肥对黄瓜生长及根结线虫病的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(15): 2945–2954.
- [82] 朱震, 陈芳, 肖同建, 等. 拮抗菌生物有机肥对番茄根结线虫的防治作用[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 1033–1038.
- [83] 丁国春, 付鹏, 李红梅, 等. 枯草芽孢杆菌 AR11 菌株对南方根结线虫的生物防治[J]. *南京农业大学学报*, 2005, 28(2): 46–49.
- [84] 黄大野, 叶良阶, 刘晓艳, 等. 苏云金芽孢杆菌 NBIN863 菌株对番茄根结线虫的防治效果和促生作用[J]. *中国蔬菜*, 2015(10): 57–60.
- [85] Saghafi D, Delangiz N, Lajayer B A, et al. An overview on improvement of crop productivity in saline soils by Halotolerant and Halophilic PGPRs[J]. *3 Biotech*, 2019, 9(7): 261. DOI: 10.1007/s13205-019-1799-0.
- [86] Sindhu S S, Phour M, Choudhary S R, et al. Phosphorus cycling: prospects of using rhizosphere microorganisms for improving phosphorus nutrition of plants[M]// *Geomicrobiology and Biogeochemistry*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 199–237.
- [87] Zandi P M, Basu S K. Role of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) as BioFertilizers in stabilizing agricultural ecosystems[M]// *Sustainable Development and Biodiversity*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 71–87.
- [88] Adesemoye A O, Torbert H A, Kloepper J W. Enhanced plant nutrient use efficiency with PGPR and AMF in an integrated nutrient management system[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2008, 54(10): 876–886.
- [89] Chen B D, Liu Y, Shen H, et al. Uptake of cadmium from an experimentally contaminated calcareous soil by arbuscular mycorrhizal maize (*Zea mays* L.)[J]. *Mycorrhiza*, 2004, 14(6): 347–354.
- [90] Vodnik D, Grčman H, Maček I, et al. The contribution of glomalin-related soil protein to Pb and Zn sequestration in polluted soil[J]. *Science of The Total Environment*, 2008, 392(1): 130–136.
- [91] Jiang Q Y, Zhuo F, Long S H, et al. Can arbuscular mycorrhizal fungi reduce Cd uptake and alleviate Cd toxicity of *Lonicera japonica* grown in Cd-added soils?[J]. *Scientific Reports*, 6(1): 1.
- [92] 孙瑶, 张培萃, 王洪章. 牡蛎类土壤调理剂对设施番茄酸化土壤化学性质及果品质量的影响[J]. *北方农业学报*, 2017, 45(1): 88–91.
- [93] 熊静, 高杰云, 刘伟, 等. 腐植酸钾对设施番茄苗期高盐和低温胁迫的缓解作用[J]. *腐植酸*, 2015(4): 9–14.
- [94] 邹春娇, 张勇勇, 张一鸣, 等. 生物炭对设施连作黄瓜根域基质酶活性和微生物的调节[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1772–1778.
- [95] 包立, 刘惠见, 邓洪, 等. 玉米秸秆生物炭对滇池流域大棚土壤磷素利用和小白菜生长的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(4): 815–824.
- [96] 张焯. 设施蔬菜土壤消毒与修复技术[J]. *农业工程*, 2018, 8(8): 70–71.
- [97] 隋俊杰. 土壤电消毒灭虫机在设施农业中的应用[J]. *农业工程*, 2012, 2(S1): 35–38.
- [98] 邸伟. 设施土壤连作障碍电处理试验研究[J]. *农业科技与装备*, 2012(6): 33–35, 37.
- [99] 郭修武, 李坤, 谢洪刚, 等. 连作土灭菌对葡萄生长及根系分泌特性的影响[J]. *果树学报*, 2010, 27(1): 29–33.
- [100] 喻景权. 蔬菜生产中的化学他感作用问题及其研究[J]. *园艺学进展*, 1998, 2: 336–343.
- [101] Adesemoye A O, Kloepper J W. Plant-microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, 85(1): 1–12.
- [102] 赵帆, 赵密珍, 王钰, 等. 基于高通量测序研究草莓根际微生物群落结构和多样性[J]. *土壤*, 2019, 51(1): 51–60.
- [103] 郭惠珊, 高峰, 赵建华, 等. 发展基因沉默技术, 控制作物土传真菌病害[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(8): 822–829.
- [104] 黄新琦, 蔡祖聪. 土壤微生物与作物土传病害控制[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(6): 593–600.
- [105] 李钰飞, 李季, 李吉进, 等. 温室不同管理模式对土壤微生物生物量碳和原生动物丰度的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(4): 696–704.