

我国设施农业土壤质量退化特征与调控研究进展*

史 静 张乃明** 包 立

(云南农业大学资源与环境学院 昆明 650201)

摘 要 设施土壤质量退化已成为制约现代设施农业可持续发展的瓶颈。了解设施土壤退化成因与特征,并采取适宜的调控措施,对于促进设施农业持续健康发展具有重要意义。本文综述了国内目前设施农业土壤次生盐渍化、酸化、微生物区系破坏、养分失调、有害物质积累等 5 个方面的退化特征与成因。简述了生物、农业、工程 3 类调控措施在改良设施土壤方面的应用研究进展。并且针对我国设施土壤质量研究中存在的关于探索形成原因和控制机理方面的研究少,原创性设施土壤改良与调控技术仍然十分缺乏,大尺度、长时间设施土壤质量演变的长期定位研究和动态监测工作十分滞后,有关设施土壤退化因素叠加效应与交互作用机理研究尚未涉及等问题,提出应构建设施土壤质量标准体系,开展设施土壤质量退化演变机理以及拓展调控与改良技术,系统研究不同退化形式之间的相互作用,以及拓展新技术在设施农业土壤研究中的应用等 4 方面作为今后研究的重点。

关键词 设施农业 土壤质量退化 调控 中国

中图分类号: S151.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2013)07-0787-08

Research progress on soil degradation and regulation of facility agriculture in China

SHI Jing, ZHANG Nai-Ming, BAO Li

(College of Resources and Environmental Sciences, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract Although China has become the first major country with facility cultivation in the world, soil degradation has become a bottleneck to sustainable development of modern facility agriculture. To understand the causes of soil degradation and facility agriculture characteristics, the development of appropriate measures for promoting healthy agricultural progress is important. This article reviewed five aspects of soil degradation under current facility agriculture in China. The reviewed aspects included the characteristics and causes of secondary salinization, acidification, micro-flora destroy, nutrient dislocation and harmful substance accumulation. Three major control (biological, agricultural and engineering) measures for improving facility agriculture soils were discussed. In view of the issues of facility agriculture soils in China, research was less at the exploration stage of formative reasons and control mechanisms; original technologies for soil improvement and control were still scarce; long-term large-scale greenhouse soil quality research and dynamic monitoring lagged behind other research activities; and soil degradation factors and interaction mechanisms had not been adequately evolved. The four key components of future research in facility agriculture included the construction of quality standard system of greenhouse soil; understanding soil quality degradation and evolution mechanisms, and establishing regulatory techniques; studying interaction among different degradation ways; and expanding new technology applications.

Key words Facility agriculture, Soil degradation, Regulation, China

(Received Nov. 9, 2012; accepted Apr. 9, 2013)

设施土壤是指长期设施栽培条件下耕种的农业土壤,是设施农业赖以发展的物质基础^[1],代表现

代农业发展方向,以高技术、高投入、高产出为特征的高度集约化的设施农业,近年来在我国得到迅

* 云南省自然科学基金重点项目(2003C0006Z)和教育部“春晖计划”项目(Z2005-2-65005)资助

** 通讯作者: 张乃明(1963—),男,博士生导师,教授,主要从事土壤质量退化、面源污染控制等方面的研究。E-mail: zhangnaiming@sina.com
史静(1980—),女,博士,讲师,主要从事设施土壤退化演变机理研究。E-mail: shjing1980@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-11-09 接受日期: 2013-04-09

猛发展。截至 2008 年底,我国设施园艺面积已突破 340 万 hm^2 ,仅设施蔬菜年产量就达 1.68 亿 t,年产值超过 4 000 亿元^[2-3],成为世界上设施栽培面积最大的国家。随着设施栽培面积的迅速扩大及栽培年限的增加,由于长期覆盖栽培、高度集约经营、设施环境内水、热失衡等原因^[4],使其内部的微生态环境发生显著变化,设施土壤普遍出现次生盐渍化、酸化、养分失调、微生物区系破坏、土传病害加重等一系列质量退化及连作障碍问题,并已成为制约设施农业可持续发展的瓶颈,因此充分认识设施土壤质量退化状况,对提高设施土壤生产力,确保设施农业持续健康发展具有重要指导意义。国内外针对设施栽培条件下的土壤质量退化与连作障碍问题已有不少研究报道,但缺乏综合角度上对设施农业土壤质量退化特征与调控技术进行系统论述。本文简要回顾了此方面的研究进展,并对未来设施农业土壤研究提出了几项重点领域与方向。

1 设施农业土壤质量退化特征与成因

1.1 设施土壤次生盐渍化特征与成因

设施土壤与露地土壤相比,其表层易发生次生盐渍化,致使土壤某些化学性状恶化,影响到设施栽培作物的产量和品质^[5]。这种次生盐渍化程度与设施栽培条件有关。对于全年性进行设施栽培覆盖的土壤,次生盐化发生早且严重。如 20 世纪 70 年代日本适宜蔬菜生长的设施土壤面积仅占设施蔬菜栽培总面积的 20%~30%,土壤可溶性盐分浓度在 10.0~16.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的设施面积较大,超过设施总面积的 40%以上。关于我国不同设施栽培地区中发生次生盐渍化的报道甚多。刘德等^[6]调查表明,哈尔滨蔬菜生产区大棚土壤总盐量高于露地 2.0~13.4 倍,8 年以上连作大棚土壤大部分出现了盐渍化,盐类浓度已达到了危害蔬菜正常生长的程度。何文寿^[7]对宁夏峡口栽种 3~10 年的日光温室蔬菜土壤进行研究,其盐分含量比露地菜田高 0.5~3.0 倍,并随棚龄延长而上升。王学军^[8]在山东寿光等地的设施土壤测定中发现,0~15 cm 表土土壤电导率(EC)为 0.8~1.15 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。王平等^[9]调查到兰州市安宁区部分蔬菜设施栽培土壤盐分浓度为 1.0~3.09 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,0~20 cm 表层盐分浓度达到 1.78 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,已属盐渍化土壤。由此可见,我国不同地区设施土壤都存在不同程度的盐渍化危害。

设施土壤次生盐渍化的表现特征为:土壤干燥时表面出现白色盐霜,破碎后呈灰白色粉末;湿润时颜色较正常土壤暗,当土面上出现块状紫红色胶状物(紫球藻)时表征土壤含盐量超过 10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[10]。

徐福利等^[11]的研究结果表明,施用化肥、有机肥和沼肥都会导致土壤剖面的 NO_3^- -N 累积。李刚等^[12]研究指出,随着大棚种植年限的延长,盐分有明显的表聚现象,不同年限大棚土壤盐分纵向累积特征为:0~60 cm 土层的盐分剖面由露地的直筒型逐步向倒锥型发展,其盐分组成以 Ca^{2+} 和 NO_3^- 为主;硝酸盐是温室土壤盐渍化过程中增加最多的组分。薛继澄等^[13]的研究结果指出, NO_3^- 占阴离子总量的 67%~76%。童有为等^[14]测定的 NO_3^- 也占阴离子总量的一半以上,其是引起土壤次生盐化的主要原因之一^[7]。而硝态氮的分布与施肥和种植年限有关。由此可见,设施土壤表层均有不同程度的积盐,且随着栽种年限的延长而增加,土壤中硝酸盐含量剧增。

造成设施土壤盐渍化加重的原因是多方面的,主要表现为以下 4 个方面:①特殊的水分运行方向:由于设施的特殊生态环境,改变了自然状态下土壤水分的运动方向,水分运动方向转为由地下向地表方向运动,“盐随水来”,致使盐分向土壤表层聚积。②不合理的灌溉方法:在设施栽培条件下,习惯采用“小水勤浇”的灌溉方法,这种灌溉方式易把盐分聚集在表层。③缺少雨水淋洗:设施栽培条件下缺少雨水淋洗,加之设施栽培条件下土壤水分的向上运动即土壤蒸发比露地强烈,灌溉后向下渗漏排水受阻,地表容易积盐。④盲目大量施肥:设施栽培条件下,高复种指数导致氮肥施用量大、施用次数多,极易累积硝酸盐和加剧土壤次生盐渍化^[1,15]。

1.2 设施土壤酸化特征与成因

与露地土壤相比设施土壤生态环境发生很大改变,设施土壤酸化成因主要体现如下:高温高湿的条件使有机质分解得更快,产生更多的有机酸和腐殖酸;高复种指数下,为了保证作物的质量和产量,肥料施用量过大,偏施或过量施用化肥就成为设施土壤酸化的另一原因;高蒸发和无雨水淋洗使设施土壤养分易于在土壤表层积累,造成设施土壤表层酸化更为严重。孟鸿光^[16]对沈阳城郊 110 个具有代表性的温室大棚土壤的调查结果表明,土壤 $\text{pH}<6.5$ 的大棚占调查总数的 70.9%。杭州市蔬菜大棚内土壤 pH 介于 4.8~7.8, $\text{pH}<5.5$ 的土样占 30%^[17]。哈尔滨市种植 5 年、10 年、20 年的大棚土壤 pH 分别降低 0.01、0.16、0.44,大庆市种植 5 年、14 年、30 年的大棚土壤 pH 分别降低 0.02、0.39、0.50^[18];在南方研究表明,种植 6~7 年的设施土壤 pH 下降 1 个单位^[19]。这表明 pH 随种植年限的增加而下降。

1.3 设施土壤微生物区系破坏特征与成因

土壤微生物群落及其数量的变化可以作为土壤肥力状况的重要生物学指标,其变化特征决定于设

施土壤生态环境质量。随着设施栽培年限的延长,设施土壤生态环境发生改变,直接影响到设施土壤微生物的生存环境,从而导致设施内土壤微生物在种群、数量及活性上均与露地存在较大差别。设施土壤微生物主要由细菌、放线菌、真菌三大类组成。据周艺敏^[20]报道,随种植年限增加,耕层和亚耕层微生物总量都呈增加趋势。大棚土壤细菌数量为 $125\sim 276.7\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$,且随棚龄增加而增大;真菌数量为 $136.7\sim 203.3\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$,放线菌数量为 $83.3\sim 121.7\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$,其中细菌和真菌表现为明显种群扩大现象^[21]。唐咏等^[22]研究表明,氨化细菌、硝化细菌和反硝化细菌数量分别比棚外土壤增加1.07~2.28倍、50.47~68.79倍和4.33~9.32倍,真菌比例高于露地,其主要原因在于大棚土壤温度发生了变化^[23]。另外,土壤有机质含量较高,促进了土壤微生物的繁衍^[24]。而放线菌在总量上介于细菌和真菌之间,相较于露地土壤数量减少。设施土壤微生物区系不同于大田土壤,研究表明细菌和真菌数量均表现为大棚>温室>露地,放线菌数量表现为大棚>露地>温室。从种类而言,真菌中以非病源性腐生性青霉、曲霉、小克银汉霉为主^[25]。细菌则表现为氨化细菌、硝化细菌的数量增加,尤其是反硝化细菌更为突出,这主要是设施土壤比露地土壤有效氮含量多的缘故^[26]。张俊侠等^[27]认为设施土壤真菌中腐霉菌数量增加,木霉菌数量降低,放线菌数量随温室使用年限增加而下降。据范君华等^[28]研究,连作番茄大棚土壤酶活性随栽培年限增加活性增强,转化酶活性表现为8年>2年>4年,脲酶、过氧化氢酶、中性磷酸酶活性表现为8年>4年>2年。不同连作作物种类也会影响设施条件下土壤酶活性,贺丽娜等^[29]研究报道,豇豆-黄瓜和油菜-黄瓜轮作能显著提高土壤碱性磷酸酶活性。设施土壤理化性质和营养平衡被破坏,病原菌数量增多,青枯病、炭疽病、软腐病和根结线虫病等各种土传病害频繁发生。

1.4 设施土壤养分失衡特征与成因

设施土壤养分失调主要表现在有机质、全氮、碱解氮、速效磷均高于露地栽培,中量和微量元素缺乏^[30]。随耕种年限增加,钾和中微量元素处于亏缺状态。导致作物生理缺素和抗逆性降低,病虫害时有发生。如大棚番茄氮多钾缺引起筋腐病、白菜缺钙出现心腐病、番茄缺钙易出现脐腐病等缺素症状^[31]。同时,养分不平衡也会导致元素之间产生拮抗作用,影响作物吸收^[32]。究其原因,一是施肥量大,过多施用高浓度复合肥,且复合肥中磷比例过高;据调查表明,某设施栽培区域施肥量大,仅纯氮施用量就超过 $1\ 800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,在设施栽培中,不少地

方习惯施用高浓度复合肥(15-15-15或16-16-16),多数设施土壤未施过钾肥,土壤中钾素严重缺乏^[18]。二是设施栽培年限的延长促使了养分失衡的发生,失衡程度与设施类型、种植方式以及管理等方面有关。当前如何合理施用化肥和有机肥,防治设施土壤养分平衡,提高设施农业的土壤肥力和土壤质量,是亟待解决的重要问题。

1.5 设施土壤有害物质累积与成因

工业“三废”的排放及城市生活垃圾、污泥和含重金属的农药、化肥的施用,导致大棚土壤中某些重金属如铅、汞、镉、砷等超标,污染环境,同时也影响了设施大棚土壤质量^[33-34]。据李见云等^[35-36]报道,重金属铜、锌、铅含量随大棚棚龄的增加有一定增加,镉含量没有明显规律性,但这几项重金属含量均比农田含量高,农田及大棚重金属含量均较土壤背景值有一定程度增加,但尚未超出国家环境质量标准。史静等^[37]报道,云南设施土壤中以镉的污染程度最为严重,其单项污染指数大于1.0,已达轻度污染程度;运用内梅罗综合污染指数法对不同栽培年限土壤重金属元素含量进行评价,其综合污染指数为0.98,污染水平已达警戒级;设施栽培年限为3~5年、6~8年及>10年时的污染指数都大于1.0,且随栽培年限延长污染加剧。杨治平等^[38]对山西省保护地土壤研究表明,砷、镉污染较小,而汞污染比较严重。李德成等^[39]报道,大棚土壤中多数重金属元素含量在0~40 cm土层内含量差异很小,与露地土壤相比,除1年棚龄的土壤外,土壤重金属含量随大棚使用年限的延长而有所增加,但尚未发生重金属污染超标现象。从这些调查研究的结果来看,虽然设施土壤重金属含量有一定积累,但除个别元素对环境有污染外,大多数重金属元素尚未引起土壤环境污染。究其原因,栽培年限、轮作方式及土壤理化性状对设施土壤重金属污染物累积均造成影响^[40]。而其中由于大量施用的家禽粪便和含钙镁磷肥等成分的复合肥中均含有一定重金属元素所致。大量施肥导致土壤中重金属元素含量增加的现象在世界各地均有发生^[41]。

设施土壤在过量不合理施肥情况下容易造成有害气体积累。施用尿素或铵态氮肥过多,以及厩肥、饼肥等有机肥未充分腐熟时,在高盐分作用下,易产生大量氨气;硫酸盐化肥施用量较多,加之地温较低等因素,在硫化细菌作用下放出二氧化硫气体^[41]。相对于露地土壤环境而言,设施条件下空气流动性差,当气体浓度高到某个极限时会发生危害。

此外,也不能忽视有机肥源抗生素对设施土壤的影响,赵娜^[42]分析了珠三角地区养猪场菜地、普

通蔬菜基地、无公害蔬菜基地、绿色蔬菜基地等 4 种不同类型的菜地土壤中四环素类和磺胺类抗生素,检测发现所有土壤样品中均检出一种以上抗生素,土壤中四环素类抗生素的平均含量高于磺胺类,不同类型菜地土壤中抗生素的总含量高低顺序为:养猪场菜地>无公害蔬菜基地>普通蔬菜基地>绿色蔬菜基地。说明菜地土壤大量施加含有抗生素的有机肥后,加重了土壤抗生素污染。过量农药施用也使大棚土壤农药残留加重,尹可锁等^[43]采用气象色谱对滇池周边不同年限大棚土壤中六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)残留量进行了测定,结果表明大棚种植年限对土壤中残留量影响显著,种植年限长于 10 年的大棚土壤中 HCHs 和 DDTs 的残留量显著高于年限短于 10 年的大棚。

2 设施农业土壤改良与调控

2.1 生物调控

生物调控主要指通过改变设施土壤的微生态条件为作物生长创造最适土壤生态环境。如在防治设施土壤障碍之一的盐渍化问题时,利用某些作物耐盐和吸肥力强的特性,进行生物洗盐,如种植玉米可使 0~40 cm 土层电导率降低 15%~16%,除盐效果明显优于黄瓜^[44]。某些生物覆盖也是较好的调控手段之一,殷永娴等^[26]指出设施土壤内增施稻草、豆秸等有机物料,可降低土壤盐分含量和盐分表积,同时可促进各类群微生物的正常活动和均衡发育,减少土壤病原真菌的危害,提高土壤肥力。

通过增强土壤中有益微生物的活性可减轻连作障碍。植物根际存在着一类有益的自生细菌(PGPR),它们通过各种间接或直接的方式抑制植物病原菌繁殖,并促进植物生长,是解决连作障碍中土传病害的一条重要生物途径^[45]。利用 EM 原露(一种有效微生物活菌制剂)改良土壤,提高肥力,抑制土壤中有毒微生物的生存与繁殖,增强植物代谢功能,能缓解连作障碍等设施土壤质量问题^[15]。

2.2 农业调控

2.2.1 合理轮作,运用肥料调控

在不同作物间进行合理轮作是预防连作障碍的调控措施之一。比如黄瓜-番茄-菜豆-菜花轮作等^[46],可以通过对养分的吸收来平衡土壤养分的损耗,又可通过轮作换茬减轻土传病害的发生;其次,改变栽培种植时期,如栽培中错过高温期,或在高温前采取预防措施,可减轻连作障碍的发生^[47]。施毅超等^[48]通过对轮作(蓖麻-白菜-蓖麻-辣椒-白菜-辣椒)对土壤电导率(EC)和离子组成影响的研究结果建议,根据次生盐渍化土壤主控盐分离子以及不同作物对

盐分离子吸收累积偏向性选择合适的轮作系统,实现轮作改良次生盐渍化最佳效果。

选择合适肥料,根据肥料的性质和栽种设施作物的营养特性因地制宜地合理施用。肥料种类最好选用缓性肥料和有机无机复合肥料,进行少量多次施肥。对多年设施土壤在目前肥力水平下应以控氮、减磷、稳钾,针对性施用微肥为施肥原则,重视根外施肥。为排除棚内有害气体,温室内及时通风换气,尤其在追肥后几天应多通风;尿素和硫酸铵作追肥时应适量,不用碳酸氢铵追肥。以上措施均可降低土壤有害气体浓度。

2.2.2 以水洗盐,采用水分调控

改变灌溉方式,采用滴灌和渗灌措施代替大水漫灌和沟灌,减少水分蒸发量,防止土壤水层盐分向上层积聚;对盐分高的土壤进行充分浸泡洗盐,保持水层 3~5 cm,浸泡 5~7 d 排水;夏季高温季节,提早撤膜淋雨溶盐,使土壤表层盐分随雨淋溶到土壤深层,对于浅根系作物适当增加灌水数量和次数,深根系作物尽可能减少灌水量^[1],以上措施可显著改善土壤生态环境。

2.2.3 应用各种有机无机物料及土壤改良剂

自然界有许多有机或无机物料具有改良土壤的作用和功能,市场上也有不同类型的土壤改良剂产品。土壤改良剂可以显著促进土壤团粒形成,有效改善土壤结构,提高土壤质量。目前关于设施土壤改良剂在防治土壤酸化方面主要集中为传统的碱性矿物质制成的改良剂,如石灰改良剂,以及利用某些矿物和工业废弃物如白云石、磷石膏、碱渣等矿物和制浆废液污泥等工业废弃物。土壤改良剂在江西红壤上的应用结果表明,每 667 m²施用石灰石粉 200 kg,3 年后表层土壤酸度显著降低,土壤 pH 增加 2~3 个单位^[47]。

另外,磷矿粉、城市污水处理厂产生的碱性污泥等应用于酸性土壤的改良,也取得一定效果。以上改良剂的施用一定要注意污染物的前处理去除过程,否则磷石膏、磷矿粉、粉煤灰中含有的少量有毒金属元素长期施用也存在污染环境的风险。

土壤中施用有机、无机物料不仅能提高土壤的肥力水平,还能增加土壤微生物的活性,增强土壤自身的缓冲性能。用作改良土壤的有机物料种类很多,在农业中取材也比较方便,如家畜的粪肥、绿肥和草木灰、各种农作物的茎秆等。此外以生物炭为基质生产的土壤改良剂可以对酸化土壤、黏重土壤和污染土壤以及盐渍化土壤进行改良,在低纬度地区的田间试验表明,农田土壤施用 20 t·hm⁻² 以上的生物炭大约可减少 10% 的肥料施用量。同时,生物炭

可有效吸附 NO_3^- 与 NH_3 , 减少土壤中氮的挥发^[49]。对于用作土壤改良的无机物料, 有研究表明腐殖酸(HA)、沸石、蛭石对设施土壤盐分的影响, 认为 HA 效果较好, 不但可增强植物对养分的吸收能力, 还可以增加土壤有机质、微生物活性等; 而沸石和蛭石由于具有交换吸附作用和保肥特性, 也可广泛用于土壤改良; 几者的优化组合可明显降低土壤盐分。生物炭大多呈碱性, 还田后可提高酸性土壤 pH^[50], 降低土壤重金属污染物的生物有效性。张伟明等^[51]研究了在污灌区重金属污染土壤中添加秸秆炭对水稻生长的影响, 结果表明, 不同秸秆炭处理均促进了水稻生长。近年来, 还研发出营养型、复合型等新兴改良剂, 即将植物所需的营养元素、改良剂及矿物载体混合, 制成营养型改良剂; 复合型改良剂除了供应养分、降低酸度外, 还具有疏松土壤、提高土壤保水能力的功能。但土壤改良剂的应用也存在一些问题, 比如改良效果有限、有时会有不同程度的副作用以及成本高等缺点需要克服。

2.3 工程措施改良调控

对盐渍化程度高的土壤采用客土法进行消盐, 彻底改变土壤环境。具体方法是在蔬菜等作物收获后, 将设施土壤深耕, 使相对含盐较多的上层翻到下层, 可以降低耕层土壤的盐分, 在一定程度上延长了大棚的使用年限。这种调控措施对于次生盐渍化程度较重的设施土壤效果极其显著。胡萍等^[52]对设施土壤开展客土修复技术研究表明, 将 EC 值较高($2.35 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)和较低($1.25 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)的设施土壤按照 1:1 混合 0~30 cm 深的土壤, 可有效降低原有土壤的次生盐渍化程度。同时, 在表层 15~20 cm 深处埋设隔离层增加土壤水的下渗能力, 防止盐分向表层积聚; 此外, 埋设暗管排水是防治土壤盐渍化有效的措施之一, 如将双层波纹有孔塑料暗管分别埋在设施土壤 30 cm 和 60 cm 处, 进行灌水洗盐^[53]。上海市采用垂直排水洗盐方法, 25~35 cm、5~25 cm 和 0~5 cm 3 层的脱盐率分别为 60%、50%和 80%^[54], 这种方法具有脱盐土层深和耗水量少的优点。滴灌措施也能有效地淋洗、降低土壤盐分。Noory 等^[55]研究表明, 渗灌比传统自由灌溉方式积盐速度慢; 刘洋等^[56]研究表明, 设施栽培中采用渗灌方式会使土壤盐化速度减缓, 以地下埋深 30 cm 且带防渗槽的效果最好。因此, 大力发展滴灌和渗灌在设施栽培中的应用, 确定适宜的灌溉强度和时间, 可以有效防治设施土壤次生盐渍化。此外, 配合滴灌和喷灌等方式, 对设施土壤进行表面覆盖, 可以抑制土壤水分蒸发, 降低盐分在表层积累^[57]。

3 未来设施农业土壤研究展望

回顾过去 20 年, 我国设施农业发展迅猛, 设施栽培土壤面积迅速扩大, 围绕设施土壤质量退化与连作障碍的防控, 国内学者从不同角度广泛开展了研究探索, 也取得了一定成绩和阶段性的成果。但仍然不能满足设施农业生产的实际需要, 概括起来存在以下 5 个方面的不足:

(1)对设施土壤质量退化现象定性、定量描述研究多, 探索形成原因和控制机理方面的研究少;

(2)尚未形成设施农业土壤质量评价指标体系和质量标准;

(3)在设施土壤改良与调控技术方面, 单项技术措施研究多, 综合技术措施研究少, 生物措施的作用未能充分挖掘, 原创性的设施土壤改良与调控技术仍然十分缺乏;

(4)大尺度、长时间设施土壤质量演变的长期定位研究和动态监测工作还十分滞后;

(5)对于多数设施农业土壤而言, 多种形式(盐渍化、酸化、污染、土传病害)的退化往往同时发生, 而有关设施土壤退化因素叠加效应与交互作用机理研究尚未涉及。

展望未来, 作为人多地少的农业大国, 发展设施农业仍然是缓解我国人地矛盾的必然选择, 也就是说设施农业面积仍将稳中有升, 国家“十二五”设施农业发展规划和许多地方政府农业规划内容都可支撑这一点。日益加重的设施土壤质量退化问题, 呼唤更多的科技工作者投身到设施农业土壤研究队伍中来, 解决设施农业发展过程中出现的一系列土壤质量退化与连作障碍问题必将由地方需求上升为国家战略。

今后我国设施农业土壤质量退化研究应把关注的重点放在以下 4 个方面:

(1)建立中国设施农业土壤研究协作网, 互通信息, 共享资源, 研究制定统一规范的设施农业土壤质量的评价指标体系和研究方法, 构建适于南方和北方不同的设施栽培特点的设施土壤质量标准体系;

(2)深入开展设施土壤质量退化成因分析和演变机理探索, 在此基础上拓展新的调控与改良技术与方法, 并加大对技术物化为产品的研发;

(3)分区域建立设施土壤质量演变长期定位站点, 系统研究不同退化形式之间的互相作用关系;

(4)拓展包括生物技术、信息技术等新技术、新方法、新手段在设施农业土壤研究中的应用。

参考文献

- [1] 张乃明, 常晓冰, 秦太峰. 设施农业土壤特性与改良[M].

- 北京: 化学工业出版社, 2008
- Zhang N M, Chang X B, Qin T F. Soil properties and improvement of greenhouse soil[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008
- [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(6): 26, 28-29
- The Ministry of Agriculture Plant Management Division. Scientific planning and promote sustained and healthy development of promotion vegetable of greenhouse (I) [J]. Agriculture Engineering Technology (Greenhouse & Horticulture), 2009(6): 26, 28-29
- [3] 李中华, 王国占, 齐飞. 我国设施农业发展现状及发展思路[J]. 中国农机化, 2012(1): 7-10
- Li Z H, Wang G Z, Qi F. Current situation and thinking of development of protected agriculture in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012(1): 7-10
- [4] 李东坡, 武志杰, 梁成华. 设施土壤生态环境特点与调控[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 192-197
- Li D P, Wu Z J, Liang C H. Characteristics and regulation of greenhouse soil environment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 192-197
- [5] 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
- Shi J, Deng Y L, Zhang N M, et al. Characteristics of soil salt accumulation in greenhouse in Yunnan Province, China[J]. Soils, 2009, 41(6): 921-925
- [6] 刘德, 吴凤芝. 哈尔滨市郊蔬菜大棚土壤盐分状况及影响[J]. 北方园艺, 1998(6): 1-2
- Liu D, Wu F Z. Vegetable greenhouse soil salinity status and influence in Harbin suburb[J]. Northern Horticulture, 1998(6): 1-2
- [7] 何文寿. 设施农业中存在的土壤障碍及其对策研究进展[J]. 土壤, 2004, 36(3): 235-242
- He W S. Soil problems and countermeasure in facility agriculture in China[J]. Soils, 2004, 36(3): 235-242
- [8] 王学军. 日光温室土壤次生盐渍化分析[J]. 北方园艺, 1998(3): 12-13
- Wang X J. Soil secondary salinization analysis in greenhouse soil[J]. Northern Horticulture, 1998(3): 12-13
- [9] 王平, 刘淑英. 兰州市安宁区蔬菜保护地土壤盐分的含量及其剖面分布规律[J]. 甘肃农业大学学报, 1998(2): 186-189
- Wang P, Liu S Y. The salt content and its profile distribution of vegetable planted soil under plastic shed in Anning District of Lanzhou[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 1998(2): 186-189
- [10] 胡萍, 严秀琴, 虞冠军, 等. 设施土壤次生盐渍化客土修复技术初探[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2005, 23(1): 46-51
- Hu P, Yan X Q, Yu G J, et al. An approach to remediation of secondary salinization of the soils in the protected watermelon cultivation with special reference to the mixing of alien earth[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2005, 23(1): 46-51
- [11] 徐福利, 梁银丽, 张成娥, 等. 施肥对日光温室土壤硝酸盐分布特征的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(10): 1762-1767
- Xu F L, Liang Y L, Zhang C E, et al. Nitrate distribution characteristics in soil at fertilization on cucumber at sunlight greenhouse in loess plateau[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(10): 1762-1767
- [12] 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
- Li G, Zhang N M, Mao K M, et al. Characteristics of soil salt accumulation in plastic greenhouse and its control measures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(3): 44-47
- [13] 薛继澄, 李家金, 毕德义, 等. 保护地栽培土壤硝酸盐积累对辣椒生长和锰含量的影响[J]. 南京农业大学学报, 1995, 8(1): 53-57
- Xue J C, Li J J, Bi D Y, et al. Effects of nitrate accumulation of soil on growth and manganese concentration of pepper in protected cultivation[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1995, 8(1): 53-57
- [14] 童有为, 陈淡飞. 温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径研究[J]. 园艺学报, 1991, 18(2): 159-162
- Tong Y W, Chen D F. Study on the cause and control of secondary saline soils in greenhouses[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1991, 18(2): 159-162
- [15] 臧壮望. 保护地土壤障碍与综合治理[J]. 蔬菜, 2002(6): 21-22
- Zang Z W. Protection soil disease and comprehensive control[J]. Vegetable, 2002(6): 21-22
- [16] 孟鸿光. 温室土壤养分变化特征研究[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2008(9): 20-21
- Meng H G. Nutrient characteristics of greenhouse soil[J]. Agriculture Engineering Technology (Greenhouse & Horticulture), 2008(9): 20-21
- [17] 杨丽娟, 张玉龙, 李晓安, 等. 灌水方法对塑料大棚土壤——植物硝酸盐分配影响[J]. 土壤通报, 2000, 31(2): 63-65
- Yang L J, Zhang Y L, Li X A, et al. Effects of irrigation methods on the distribution of nitrate in soil and tomato plants in greenhouses[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2000, 31(2): 63-65
- [18] 赵凤艳, 吴凤芝, 刘德, 等. 大棚菜地土壤理化特性的研究[J]. 土壤肥料, 2000(2): 11-13
- Zhao F Y, Wu F Z, Liu D, et al. Study on the physico-chemical properties of vegetable soils under big plastics shade[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2000(2): 11-13
- [19] 邓玉龙, 张乃明. 设施土壤 pH 值与有机质演变特征研究[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 367-370
- Deng Y L, Zhang N M. Soil pH and organic matter in greenhouse[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(2): 367-370
- [20] 周艺敏. 天津半干旱地区不同种植年限菜田土壤微生物变化特征的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 424-429
- Zhou Y M. Soil microbial characteristics of different years in Tianjin[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(4): 424-429
- [21] 范君华, 刘明, 洪远新, 等. 不同利用方式对土壤微生物区系和活性的影响[J]. 塔里木农垦大学学报, 2002, 14(1): 15-17

- Fan J H, Liu M, Hong Y X, et al. Effect of different utilization methods on microorganism and its activation[J]. Journal of Tarim University of Agricultural Reclamation, 2002, 14(1): 15–17
- [22] 唐咏, 梁成华, 刘志恒. 日光温室蔬菜栽培对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 1999, 30(1): 16–19
Tang Y, Liang C H, Liu Z H. Effects of vegetable cultivation in solar greenhouse on microorganisms and enzyme activities in the soils[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1999, 30(1): 16–19
- [23] 肖辉林, 郑习健. 土壤变暖对土壤微生物活性的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2): 138–142
Xiao H L, Zheng X J. Effects of soil warming on soil microbial activity[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(2): 138–142
- [24] 罗安程, Subedi T B, 章永松, 等. 有机肥对水稻根际土壤中微生物和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4): 321–327
Luo A C, Subedi T B, Zhang Y S, et al. Effect of organic manure on the numbers of microbes and enzyme activity in rice rhizosphere[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(4): 321–327
- [25] Luna-Guido M L, Beltrán-Hernández R I, Dendooven L. Dynamics of ^{14}C -labelled glucose in alkaline saline soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(6): 707–719
- [26] 殷永娴, 刘鸿雁. 设施栽培下土壤中硝化、反硝化作用的研究[J]. 生态学报, 1996, 16(3): 246–250
Yin Y X, Liu H Y. Investigation on nitrification and denitrification of soil under installing cultivation conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(3): 246–250
- [27] 张俊侠, 孙德平, 司友斌. 设施土壤蔬菜栽培的障碍因子研究[J]. 安徽农学通报, 2001, 7(4): 52–54
Zhang J X, Sun D P, Si Y B. Study on obstruction factors of vegetable installation culture[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2001, 7(4): 52–54
- [28] 范君华, 刘明, 洪远新, 等. 不同利用方式对土壤微生物区系和活性的影响[J]. 塔里木农垦大学学报, 2002, 14(1): 15–17
Fan J H, Liu M, Hong Y X, et al. Effect of different utilization methods on microorganism and its activation[J]. Journal of Tarim University of Agricultural Reclamation, 2002, 14(1): 15–17
- [29] 贺丽娜, 梁银丽, 熊亚梅, 等. 不同前茬对设施黄瓜产量和品质及土壤酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 24–28
He L N, Liang Y L, Xiong Y M, et al. Effect of different preceding crops on yield, quality of cucumber and soil enzyme activity in solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 24–28
- [30] 史静, 邓玉龙, 张乃明. 云南设施土壤养分累积特征研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 95–101
Shi J, Deng Y L, Zhang N M. Study on characteristics of soil salt accumulation in greenhouse in Yunnan Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(12): 95–101
- [31] Wang Y, Zhang Y P. Quantitative effect of soil texture composition on retardation factor of K^+ transport[J]. Pedosphere, 2001, 11(4): 377–382
- [32] 王辉, 董元华, 李德成, 等. 不同种植年限大棚蔬菜地土壤养分状况研究[J]. 土壤, 2005, 37(4): 460–464
Wang H, Dong Y H, Li D C, et al. Nutrient variation in plastic greenhouse soils with the years of cultivation[J]. Soils, 2005, 37(4): 460–464
- [33] 陈晶中, 陈杰, 谢学俭, 等. 土壤污染及其环境效应[J]. 土壤, 2003, 35(4): 298–303
Chen J Z, Chen J, Xie X J, et al. Soil pollution and its environmental impact[J]. Soils, 2003, 35(4): 298–303
- [34] Zhang M K, Ke Z X. Heavy metals, phosphorus and some other elements in urban soils of Hangzhou City, China[J]. Pedosphere, 2004, 14(2): 177–185
- [35] 李见云, 侯彦林, 化全县, 等. 大棚设施土壤养分和重金属状况研究[J]. 土壤, 2005, 37(6): 626–629
Li J Y, Hou Y L, Hua Q X, et al. Variation of soil nutrient and heavy metal concentrations in greenhouse soils[J]. Soils, 2005, 37(6): 626–629
- [36] 李见云, 侯彦林, 王新民, 等. 温室土壤剖面养分特征及重金属含量演变趋势研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 43–45
Li J Y, Hou Y L, Wang X M, et al. Profile characteristics of available nutrients and heavy metal concentrations in greenhouse soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(3): 43–45
- [37] 史静, 张乃明. 云南设施土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 云南农业大学学报, 2010, 25(6): 862–867
Shi J, Zhang N M. The distributing character of heavy metals and its pollution estimate in greenhouse soils of Yunnan province, China[J]. The Journal of Yunnan Agricultural University, 2010, 25(6): 862–867
- [38] 杨治平, 张建杰, 张强, 等. 山西省保护地蔬菜长期施肥对土壤环境质量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 667–671
Yang Z P, Zhang J J, Zhang Q, et al. Soil environmental quality with long-term fertilization in Shanxi greenhouse[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(2): 667–671
- [39] 李德成, 李忠佩, 周祥, 等. 不同使用年限蔬菜大棚土壤重金属含量变化[J]. 农村生态环境, 2003, 19(3): 38–41
Li D C, Li Z P, Zhou X, et al. Contents of heavy metal elements in soils of vegetable greenhouses different in age[J]. Rural Eco-Environment, 2003, 19(3): 38–41
- [40] 段永蕙, 史静, 张乃明, 等. 设施土壤重金属污染物累积的影响因素分析[J]. 土壤, 2008, 40(3): 469–473
Duan Y H, Shi J, Zhang N M, et al. Accumulation of heavy metals and its influential factors in greenhouse soils[J]. Soils, 2008, 40(3): 469–473
- [41] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, 17(6): 837–842
- [42] 赵娜. 珠三角地区典型菜地土壤抗生素污染特征研究[D]. 广州: 暨南大学, 2007
Zhao N. The study of antibiotics in the soil of typical vegetable fields in Pearl River Delta[D]. Guangzhou: Jinan University, 2007
- [43] 尹可锁, 张雪燕, 徐汉虹, 等. 滇池周边大棚土壤中六六六和滴滴涕残留特征[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2):

- 399–402
Yin K S, Zhang X Y, Xu H H, et al. Residue characteristics of HCHs and DDTs in greenhouse soils in Dianchi Lake District[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2): 399–402
- [44] 童有为. 温室大棚土壤盐渍的指示植物——紫球藻[J]. 上海蔬菜, 1997(4): 38
Tong Y W. Greenhouse soil salinity indicator plant—Porphyridium[J]. Shanghai Vegetables, 1997(4): 38
- [45] 冯永军, 陈为峰, 张黄娜, 等. 设施园艺土壤的盐化与治理对策[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 111–114
Feng Y J, Chen W F, Zhang H N, et al. Soil salinization and countermeasures in protected horticulture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(2): 111–114
- [46] 曹健, 宋钊, 刘联琦, 等. 夏季蔬菜温室降温设施及其环境调控技术[J]. 广东农业科学, 2011, 38(21): 159–160
Cao J, Song Z, Liu L Q, et al. Summer vegetable greenhouse environmental control technology[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(21): 159–160
- [47] 王宁, 李九玉, 徐仁扣. 土壤酸化及酸性土壤的改良和管理[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(23): 48–51
Wang N, Li J Y, Xu R K. Soil acidification and acid soil improvement and management[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007, 13(23): 48–51
- [48] 施毅超, 胡正义, 龙为国, 等. 轮作对设施蔬菜大棚中次生盐渍化土壤盐分离子累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 548–553
Shi Y C, Hu Z Y, Long W G, et al. Effect of crop rotation on ion accumulation in secondary salinization soil of vegetable field in greenhouse[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 548–553
- [49] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. Soil Research, 2007, 45(8): 629–634
- [50] Lehmann J, Dailva J P, Sreiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. Plant and Soils, 2003, 249(2): 343–357
- [51] 张伟明, 张庆忠, 陈温福. 镉污染土壤中施用秸秆炭对水稻生长发育的影响[J]. 北方水稻, 2009, 39(2): 4–7, 11
Zhang W M, Zhang Q Z, Chen W F. Effects of crop-residue-derived charcoal amendment on growth and development of rice in a Cd-polluted soil[J]. North Rice, 2009, 39(2): 4–7, 11
- [52] 胡萍, 严秀琴, 虞冠军, 等. 设施土壤次生盐渍化客土修复技术初探[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2005, 23(1): 46–51
Hu P, Yan X Q, Yu G J, et al. An approach to remediation of secondary salinization of the soils in the protected watermelon cultivation with special reference to the mixing of alien earth[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2005, 23(1): 46–51
- [53] 郭文忠, 李丁仁. 宁夏日光温室土壤次生盐渍化发生原因及治理[J]. 长江蔬菜, 2003(4): 39–40
Guo W Z, Li D R. Reason and control of secondary salinization of greenhouse soil in Ningxia Province[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2003(4): 39–40
- [54] 张振华, 姜冷若, 胡永红, 等. 设施栽培大棚土壤养分、盐分调查分析及其调控技术[J]. 江苏农业科学, 2003(1): 73–75
Zhang Z H, Jiang L R, Hu Y H, et al. Investigation and analysis of nutrient, salinity and its control techniques in greenhouse soil[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2003(1): 73–75
- [55] Noory H, Liaghat A M, Chaiehi M R, et al. Effects of water table management on soil salinity and alfalfa yield in a semi-arid climate[J]. Irrigation Science, 2000, 27(5): 401–407
- [56] 刘洋, 张玉龙, 刘娜, 等. 渗灌管不同埋深对蔬菜保护地土壤盐分的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 295–298
Liu Y, Zhang Y L, Liu N, et al. Effect of infiltration depth on soil total salt in tomato cultivated protected field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(4): 295–298
- [57] 黄强, 殷志刚, 田长彦, 等. 两种覆盖方式下的土壤溶液盐分含量变化[J]. 干旱区地理, 2001, 24(1): 52–56
Huang Q, Yin Z G, Tian C Y, et al. Variation of salt content in soil solution in farmland covered by plastic film or wheat straw[J]. Arid Land Geography, 2001, 24(1): 52–56