

曾子凡,马艳,罗佳,等. 长期施肥对设施蔬菜土壤理化及生物学性状的影响研究进展[J]. 江苏农业科学,2023,51(6):9-15.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.06.002

长期施肥对设施蔬菜土壤理化及生物学性状的影响研究进展

曾子凡^{1,2}, 马艳^{1,2}, 罗佳^{2,3}, 郭德杰²

(1. 江苏大学环境与安全工程学院,江苏镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,江苏南京 210014;
3. 国家农业环境六合观测实验站,江苏南京 210014)

摘要:随着设施农业的大力发展,设施蔬菜种植逐渐成为我国蔬菜种植业的主力,设施蔬菜土壤成为典型农业土壤之一,其环境质量至关重要,受到广泛关注。由于设施环境的特殊性以及设施栽培中不合理的施肥手段,长期连作下极易使土壤质量严重下降。本文阐述了长期施用化肥对设施蔬菜土壤理化及生物学性状的影响,并与短期研究结果对比表明,长期单施化肥造成设施蔬菜土壤理化性状劣化、土壤微生物群落改变及酶活降低,为设施蔬菜土壤带来的负面效应均不利于作物生长,从而进一步综述了有机肥替代施用对土壤理化及生物学性状的影响。大量研究表明,有机肥替代施用优化了设施土壤理化性质并显著提高了微生物群落物种丰富度、有益微生物占比和土壤酶活性,增强了土壤微生物生态系统的稳定性,但目前相关结果在研究时限和内容上仍存在一定局限性,长期有机肥替代施用对于设施蔬菜土壤的综合影响还有待进一步探究,以期设施蔬菜合理施肥提供一定依据。

关键词:设施蔬菜;土壤;有机肥替代;长期施肥;土壤理化性状

中图分类号:S147.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)06-0009-07

设施农业是一种生产者通过使用相应的设施工程技术和生产手段,在生产环境能够在一定程度

上被控制的前提下,以高效生产为目的的进行动物养殖和植物种植的现代农业生产方式。因其在相对可控环境下进行农作物生产的特质,使其能够全部或者部分性地摆脱自然资源的束缚,进而达到提高劳动生产率、资源利用率以及增加社会效益的目的^[1]。由于我国耕地资源短缺,近年来,设施农业在蔬菜种植业发展中占据着越来越重要的地

收稿日期:2022-04-22

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目[编号: CX(21)3006]。

作者简介:曾子凡(1998—),女,四川达州人,硕士研究生,主要从事土壤改良与功能肥料研究。E-mail:734463816@qq.com。

通信作者:马艳,博士,研究员,主要从事土壤改良与功能肥料研究。E-mail:myjaas@sina.com。

[67]李双喜,沈其荣,郑宪清,等. 施用微生物有机肥对连作条件下西瓜的生物效应及土壤生物性状的影响[J]. 中国生态农业学报,2012,20(2):169-174.

[68]张婷,李世东,缪作清. “秸秆降解生防菌强化技术”对黄瓜连作土壤微生物区系的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21(11):1416-1425.

[69]吴绍军,王夏雯,余翔,等. 有机肥与生物菌肥对西瓜幼苗生长及根际基质微生物的影响[J]. 贵州农业科学,2014,44(7):61-64.

[70]廉晓娟,郭锐,李明悦,等. 调理剂对设施土壤物理性状及蔬菜产量品质的影响[J]. 湖北农业科学,2015,54(19):4702-4704.

[71]王广印,郭卫丽,陈碧华,等. 生物菌肥和土壤调理剂对大棚春黄瓜生长、产量和病害的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(36):58-62.

[72]张蕾,吴文强,王维瑞,等. 土壤调理剂及其配施微生物菌肥对设施菜田次生盐渍化土壤改良效果研究[J]. 中国土壤与肥

料,2021(3):264-271.

[73]张蕾,李萍,王维瑞,等. 轻度盐胁迫下土壤调理剂对设施黄瓜土壤肥力及生长发育的影响[J]. 北方园艺,2021(9):50-60.

[74]郭君钰,李停锋,李雯,等. 不同土壤调理剂配施对连作压砂田土壤质量及西瓜品质的影响[J]. 新农业,2022(8):4-8.

[75]王明友,李光忠,杨秀凤,等. 生物菌肥对保护地黄瓜生育及产量、品质的影响研究初报[J]. 土壤肥料,2003(3):38-41.

[76]王亚玲,王赫,彭正萍,等. 设施黄瓜产量、品质及养分利用对不同土壤调理措施的响应[J]. 水土保持学报,2020,34(6):275-280.

[77]赵跃,黄楠,刘继培. 生物有机肥配施硅钙钾镁肥对西瓜产量、品质及土壤养分的影响[J]. 农学学报,2022,12(9):37-41.

[78]王迪轩,李光波,夏妹,等. 有机肥与生物菌肥配合提高土壤肥力技术[J]. 科学种养,2018(8):36-37.

[79]王亚文,史慧芳,张鹏,等. 微生物菌肥在设施蔬菜生产中的研究进展[J]. 农学学报,2021,11(11):27-32.

位,设施蔬菜种植面积占全国设施总面积的 41.3%,占全国蔬菜种植面积的 80%^[2],发展设施蔬菜种植是农村经济和社会发展的主要推动力^[3],对于蔬菜的周年供应和农民增收、农业增效具有重要贡献^[4]。

设施农业的封闭性能形成独特的、可控的生长环境,通过对设施内微环境的合理调控可促进蔬菜的生长^[5]。但研究发现,设施蔬菜土壤理化性状、酶活性、微生物群落和微生物数量都存在着显著连作作用^[6],同时,由于设施蔬菜复种率的持续上升,加上品种单一,造成了轮作倒茬的困难^[7],连作还使蔬菜病虫害逐年增加。同时,设施蔬菜的施用也存在着氮(N)、磷(P)、钾(K)肥不足的问题,尤其是在追肥、提苗时,施用 N、P、K 比例严重失衡,会导致作物产量、质量、化肥利用率、效益降低及设施生产中肥效发挥、农田环境污染加剧等问题^[8-9]。因此,施肥对设施蔬菜的生产起到关键的作用。

1 长期施用化肥对设施蔬菜土壤理化及生物学性状的影响

与露地土壤不同的是,为保持高频种植下作物养分供应,设施土壤施肥量往往较大,而处于高蒸发、高温、高湿、无雨水淋溶的环境下^[10-11],长期连续施用高量的化肥设施辣椒土壤易出现板结、次生盐渍化和酸化等连作障碍,具有更高的土壤退化风险^[12],这些土壤品质的下降和生态环境的恶化,将会对蔬菜的生长产生更大的影响,不但会造成产量的下降,而且还会对粮食和人体的健康造成危害^[13],亟待解决。

1.1 长期单施化肥对设施蔬菜土壤物理性状的影响

土壤物理性质影响着植物根系和土壤生物活动,对作物生长起到重要作用。在实际生产中,随着种植年限的增加,土壤一般呈现容重上升、孔隙度下降的变化趋势^[14-15],此外,施肥、灌溉等农艺手段对土壤容重、孔隙度均有影响^[16-17]。有研究表明,连续 2 年单施化肥使设施蔬菜土壤容重显著提升,而孔隙度暂无变化^[18];连续 10 年单施化肥与对照(不施肥)的孔隙度和土壤容重相当,使土体变紧实,物理性质趋劣^[19]。在高集约化、高复种指数的设施环境下,随着种植年限的延长,设施菜地表层(0~20 cm)土壤容重普遍高于正常值,总孔隙度下降及田间最大持水量普遍低于正常值,土壤出现板

结化现象,土壤供肥能力、透气性、水分运输能力降低^[20]。

1.2 长期单施化肥对设施蔬菜土壤化学性状的影响

1.2.1 长期单施化肥对设施蔬菜土壤盐含量与电导率的影响 设施蔬菜土壤次生盐渍化的发生比例显著高于露地蔬菜土壤。随着在大棚种植设施蔬菜年限的延长,土壤中所含盐分显著累积^[21],表层盐分含量、电导率呈上升趋势,在 1~3 年连作大棚中土壤盐分可增加 1~2 倍甚至 2.5 倍^[22],连续种植 5~6 年时,设施土壤盐分及其中主要盐离子含量达到最大值,通过调整农艺手段、改进管理措施后有所降低,但仍显著高于露地蔬菜土壤^[23]。这是由于自然状态下土壤水分由表层渗流至深层土壤,而由于设施土壤被季节性或长年覆盖,棚内温度较高、蒸发量大,使得深层水分不断通过毛细作用上移,当水分运动方向受到改变,总是由下向上移动时,水体中被溶解的盐分也随着水分的迁移,从而到土壤表层,进而大量聚积^[24]。同时由于设施蔬菜复种指数高,产出量大,往往施肥量大且施用次数多,在我国南北方许多蔬菜主产区,氮磷化肥的大量施用是导致设施蔬菜土壤盐分增加而产生次生盐渍化的主要原因^[25-26],特别是氮肥,在设施蔬菜中,施用过多会导致土壤中硝态氮的积累,从而加重土壤的二次盐渍化^[27],结果造成土壤理化性质恶化,对设施作物的产量与质量产生一定的影响。

1.2.2 长期单施化肥对设施蔬菜土壤酸度的影响

在我国土地资源密集的环境中,土壤酸化一直是一个重要的问题。土壤酸化是土壤复合物吸收一定浓度的酸性离子并使其淋失的一种过程^[28]。随着全球工业化进程的加快带来的酸沉淀和高强度的农业土地使用,使大量的外来 H^+ 进入土壤,加剧了酸化进程,给生态和农林生产带来了极大的威胁。

我国主要作物产区土壤 pH 值受酸沉降贡献很小,每年氮循环相关过程 H^+ 释放量达 20~221 kmol/hm²,同时钙、镁、钾等基础阳离子维持 15~20 kmol/hm² 的吸收量进一步加重了土壤酸化^[29]。作物对养分的选择性吸收,农民大量使用氯化钾、硫酸钾、磷酸钙等化肥后,可以将钾、钙等阳离子转化为 H^+ ,再加上土壤中的强酸性离子,如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等^[30],造成根际土壤酸化,而植物对过量阳离子的吸收导致根际酸化是一种局部化效应,在随后的植物分解过程中可以通过释放羟基($\cdot OH$)

离子来平衡,但肥料的硝化作用可导致永久酸化^[31-32]。综上,硝酸盐的投入可能是土壤酸化的主要原因^[33]。

氮肥对土壤酸化作用在长期定位试验中得到更为量化的理解^[34]。施用氮肥 30 年后,土壤表层(0~15 cm) pH 值随施氮时间的延长而降低,与施氮量呈显著正相关。第 10 年土壤 pH 值降低到 5.0 以下,同时产量的下降与土壤 pH 值的变化幅度有直接关系^[35]。酸化现象在设施条件下也更为突出。在陕西,连作设施蔬菜土壤耕层平均 pH 值对比相邻对照菜田降低了 5.7%^[36];在云南、江西等地的调查中,连作 13 年设施大棚耕层土的 pH 值下降了 0.72^[37];连续种植蔬菜 15 年后设施黄潮土由碱性变为中性,土壤 pH 值平均每年下降 0.05~0.06,连作 5、10、23 年的塑料大棚黑姜土菜地 pH 值分别下降了 0.46、0.95、1.26,约每年下降 0.08,由中性变为酸性^[38]。

有研究发现,施入硫酸铵和尿素对耕地土壤硝化作用促进明显,使土壤显著酸化^[39]。添加硫酸铵、尿素和碳酸氢铵培养 35 d,对本身酸度较高(pH 值为 4.46 和 4.82)的土壤硝化作用无直接影响,而显著促进了中性偏酸(pH 值为 6.27)土壤的硝化作用,土壤酸化明显^[40]。故氮肥的不合理施用带来的酸化问题不容小觑,尤其对于设施蔬菜土壤而言,合理的施肥手段具有重要意义。

1.2.3 长期单施化肥对设施蔬菜土壤养分含量的影响 化肥作为速效肥,施入土壤后养分释放速度快,合理施用下不易在土壤中累积,但由于不同农地特征、不同作物以及农户施肥习惯等因素,单施化肥往往存在施用过量现象^[41]。我国化肥施用存在氮肥、磷肥过量较严重,钾肥施用不足的普遍现象^[42],使施肥成本增高,肥害增多;同时由于元素间存在拮抗作用,土壤氮磷含量过多则会降低钙、镁、硼、锌等中微量元素养分的有效性^[43],故连作时蔬菜易出现脐腐病(缺钙)、缺镁症(缺镁)、茎裂病(缺硼)等缺素病害^[44]。

1.3 长期单施化肥对设施蔬菜土壤生物学性状的影响

土壤生物学性状的观测通常指微生物性状和土壤酶活性 2 个方面。土壤微生物是土壤生态系统中非常活跃的一种生物,包括细菌、真菌、放线菌等,它们是土壤的主要组成成分,同时也是土壤物质的转化和能量的循环,可反映出土壤中物质代谢

的旺盛程度^[45]。施肥为作物生长提供养分的同时影响着土壤微生物活动。已有研究表明,古菌、细菌和真菌的 β 多样性以及土壤功能主要受氮肥驱动,连续 28~50 年施氮降低了土壤中古菌丰度,增加了细菌和真菌丰度^[46],同时增加了古菌和真菌的多样性而减少了细菌的多样性^[47]。但也有研究表明,随着土壤中氮素积累量的增多,土壤酸碱度等指标变化使土壤中细菌、放线菌不仅数量减少并且所占比例降低,是致使蔬菜发病率升高的重要因素^[48]。而长期投入氮素通过增加细菌丰度来加速土壤微生物潜在的硝化活性,刺激硝化活动,从而形成恶性循环,使整个农业系统更加依赖外部氮输入^[49]。在设施条件下连续施肥 3 年,设施菜地微生物 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 物种丰富度指数以化肥处理最低,而 Simpson's 多样性指数、Evenness 均匀度指数和细菌丰度相对不施肥土壤均变化不大^[50]。不同施肥方式对温室内的土壤微生物分布均造成了影响,尤其是在单施化肥的情况下,真菌、放线菌等有害菌的增多,使土壤连作障碍的可能性更大^[51]。

土壤微生物活动的主要来源主要通过微生物活动分泌、植物根系分泌及植物残体、植物区系的降解等,它对土壤养分的转化、养分的固定、矿化等具有重要的影响^[52]。脲酶可促使含氮化合物水解,生成植物生长所需的氮素;过氧化氢酶能将其分解为氧和水,从而降低了活性氧对植物的毒性;蔗糖酶和磷酸酶分别为土壤提供植物易吸收的小分子糖类(如葡萄糖和果糖)和有效磷;蛋白酶可促使蛋白质分解成氨基酸,从而为植株提供 N,以上几种土壤酶活性受到广泛关注。38 年以上的长期施肥能够显著改善土壤中的有机质和微生物数量,改善其理化性质,并能促进微生物的生长与繁殖,提高了土壤葡萄糖水解酶和乙酰胺水解酶的活性^[53],同时显著提升了蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性、脲酶活性、土壤纤维素酶活性,但相较配施有机肥或秸秆,其提升效果最低^[54]。在设施环境下,随连作年限增加,土壤中的酶如脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶的活性呈显著降低趋势^[55],其中脲酶、蔗糖酶、蛋白酶的活性呈倒“U”形变化趋势,脲酶、蔗糖酶的活性在连作 3 年后达到峰值,蛋白酶在连作 5 年的土壤中活性最高,过氧化氢酶、磷酸酶的活性随连作年限的增加而逐年下降^[56]。

综上,短期内单施化肥对设施土壤微生物多样

性、丰度及酶活性有一定提升,但长期施用下设施土壤有害微生物随施用年限延长占比变高,设施蔬菜连作病害发生风险增大,同时土壤酶活性也随种植年限的增加有下降趋势。

2 有机肥替代化肥施用对设施蔬菜土壤理化及生物学性状的影响

长期施用化肥为设施蔬菜土壤带来了许多问题,为保障设施作物生产,必须探究出更为合理的施肥手段。在提倡发展绿色农业和食品安全的今天,作为一种具有营养全面、肥效长、来源广泛、可就地取材等优点的肥料,有机肥又一次受到了人们的关注。而有机肥受肥源、茬口、田间耕作管理的影响,分解速度较慢,难以在短期内满足作物的营养需要,单一施用或施用量不足时会影响蔬菜的自然品质。在作物增产方面,施用氮、钾肥仍为提高设施蔬菜产量的关键措施,而有研究表明连续 10 年种植后,施用有机肥与化学氮肥对设施蔬菜的增产效应相当^[57],配施达到最高提升效果^[58],故化肥减量与有机肥结合施用即有机肥替代化肥技术^[59]成为目前设施生产中主流施肥手段。有研究显示,采用化肥与有机肥复合施肥方式的农户达 68.67%^[60],有机肥替代技术在实际生产应用中也受到广泛认可。

2.1 有机肥替代化肥施用对设施蔬菜土壤物理性状的影响

有机肥替代化肥施用,可以使土壤的容重、孔隙度和各项水力学性能得到明显的改善,从而使土壤的结构和水力学性能得到改善^[61]。连续施用 22 年后有机肥显著增加了土壤有机碳和土壤孔隙度,各施肥处理中,有机肥配施化肥处理的水稳性团聚体粒径最大^[45]。在安徽淮北 32 年的定位试验中同样表明,单施有机肥和有机肥化肥配施均显著降低了表层土壤容重,但配施的效果最明显^[62]。而设施环境下有别于露地土壤,有机肥替代施用显著降低了设施蔬菜土壤容重,改善了土壤结构,总孔隙度为 50%~60%,通气孔隙度为 10%~20%,均有利于土壤微生物活动和作物生长^[63],但随肥料用量的增大,土壤的含水率和容重呈现先增大后减小的趋势,而总孔隙度则呈现出先减小后增大的趋势^[64],而长期施用下,随着大棚种植年限的增加,土壤容重每年以 0.007 g/cm^3 的速度递减,呈极显著降低的变化趋势,同时孔隙度约以每年 0.256% 的速度

增加^[65]。综上,有机肥替代施用显著优化了土壤的物理性状,改善了土壤结构,长期施用下土壤容重、孔隙度等指标虽有劣化趋势,但相对不施肥及单施化肥,土壤质量劣化有较大缓和。

2.2 有机肥替代化肥施用对设施蔬菜土壤化学性状的影响

2.2.1 有机肥替代化肥施用对设施蔬菜土壤酸化、盐渍化的影响 已有大量研究表明,有机肥替代相比单施化肥显著提高了设施土壤酸碱度,减缓了酸化现象^[66-69],而连续施用鸡粪有机肥 5 年后设施栽培土壤由于硝态氮和速效磷的累积,其 pH 值也呈下降趋势^[70],说明有机肥替代仅能减缓酸化速度,长期施用下设施土壤仍有酸化风险。有机肥替代对设施蔬菜土壤电导率的影响与替代比例和有机肥种类均有关,但目前结论不统一。有研究表明,施用化肥显著提升了设施土壤 EC 值,而畜禽肥与无机肥组合施用进一步显著提高了土壤 EC 值^[67,71];也有研究表明,有机肥施用降低了设施蔬菜土壤 EC 值^[72-73]。但长期施用条件下,随着设施蔬菜种植年限的延长,土壤中的盐离子交换量逐渐增多,而阳离子交换能力的增强则使得该设施蔬菜的盐基饱和度维持在一定的水平^[74],长期连作后土壤电导率显著高于短期连作土壤^[75]。

2.2.2 有机肥替代化肥施用对设施蔬菜土壤养分含量的影响 有机肥替代化肥施用,使得设施土壤有机质和全氮含量显著增加,速效养分含量随替代比例的增加先增加后减少,土壤中碱解氮、有效磷和速效钾含量显著增加^[76-78]。同时,土壤中的氮、磷、钾养分含量不断增加,促进了交换性钙、镁、硫的解吸,故有机肥替代技术也能提升设施土壤中其他养分元素含量^[79]。而在长期施用有机肥条件下,随着设施蔬菜生长年限的延长,土壤中的硝态 N、速效 P、速效 K 等营养物质的含量逐渐增多,营养物质的富集程度显著提高,积累强度也随之提高^[80],土壤中过高的养分积累使设施土壤中盐分含量逐年增加^[81]。

2.2.3 有机肥替代化肥施用对设施蔬菜土壤重金属累积的影响 化肥和有机肥的施用均会导致土壤中的重金属浓度逐步升高,并具有重金属污染的危险,而有机肥与化肥配施则使得土壤中的重金属浓度升高幅度更大^[82]。不同比例有机肥替代化肥不同程度提高了土壤有效态铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)含量^[83-84],其中土壤有效态 Cu、锌(Zn)含量

随有机肥替代施用量的增加而增加,有效态铅(Pb)含量随替代量的增加而降低^[85],而土壤中全量重金属均随有机肥用量的增加表现为递增趋势^[86],同时有机肥替代化肥施用显著提高了玉米籽粒中的 Zn 含量^[87]。故有机肥替代化肥施用下,土壤及作物具有更高的重金属污染风险。

2.3 有机肥替代化肥施用对设施蔬菜土壤生物学性状的影响

通过 28 年的施肥和有机肥-无机肥的配施,可以使土壤中的细菌数量、多样性和丰富程度得到明显的改善,但配施对微生物群落构成的影响更为明显,使放线菌门的相对丰度明显下降,拟杆菌门的相对丰度增大,对土壤生态系统的稳定与健康更为有利^[88]。设施环境下,有机肥替代施用对设施蔬菜根际土壤的微生物种群数量和土壤酶活性具有显著的影响:短期施入,植物根际土壤细菌、放线菌及微生物的总数均有明显的提高,而真菌的数量则有所下降^[89];脲酶、过氧化氢酶活性均显著提高^[90],故相较于单施化肥在一定程度上改善了设施土壤微生物区系,并提高了土壤微生物代谢活性。连续有机肥替代施用 10 年后,设施土壤细菌、真菌和古菌丰度的变化与单独施用肥料基本一致,增加了古菌的广古菌和深古菌的相对丰度,使其相对丰度下降,使设施土壤微生物区系向更健康的方向发展。连续有机肥替代同时促进了土壤胞外酶的分泌,土壤 α -葡萄糖苷酶、 β -葡萄糖苷酶、 β -纤维二糖苷酶、 β -木糖苷酶和乙酰氨基葡萄糖苷酶活性较单施化肥模式均增加^[91]。故在设施环境下,长期有机肥替代施用相较单施化肥,土壤微生物性状及酶活性均得到较大改善,通过调节土壤微生物区系和提高土壤微生物代谢活性等方面,进而提升土壤质量。

3 总结与展望

长期施用化肥使设施土壤易发生土壤板结、物理质量下降,同时造成更高的土壤酸化盐渍化风险,且随着种植年限增加,土壤微生物区系变化,易使蔬菜发生病害,同时土壤酶活也随种植年限延长而下降。而随着有机肥替代化肥技术的广泛应用,单施化肥对土壤带来的问题得到一定程度的解决,有机肥替代施用显著优化了设施土壤的物理性状,并在提升土壤养分的同时显著减缓了土壤酸化、盐渍化现象,有机肥替代施用显著提高了微生物群落

的物种丰富度和有益微生物占比以及土壤酶活性,增强了土壤微生物生态系统的稳定性。

目前露地环境下长期定位试验开展较多,时限多集中在 10 年以上,不同施肥处理对土壤各方面的综合影响有一定评判依据,而设施环境下有机肥替代试验研究周期多为 1~2 茬,长期定位试验开展较少,时限大多集中在 1~5 年,对土壤各方面性状影响的所得结论仍存在一定局限性。因此,长期有机肥替代施用对于设施蔬菜土壤的综合影响还有待进一步研究,以期为设施环境合理施肥提供一定的参考。

参考文献:

- [1]徐宁.巴彦淖尔市设施农业推广问题研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2017:1-2.
- [2]魏丹,李艳,秦程程,等.环渤海地区设施蔬菜土壤障碍与治理措施[J].中国土壤与肥料,2021(5):303-309.
- [3]刘蕾,徐梦,王凌,等.引入豆科作物的轮作模式对设施蔬菜土壤微生物群落组成的影响[J].华北农学报,2021,36(3):203-215.
- [4]李天来,许勇,张金霞.我国设施蔬菜、西甜瓜和食用菌产业发展的现状及趋势[J].中国蔬菜,2019(11):6-9.
- [5]王祥鑫.设施辣椒产业化现状及发展建议[J].中国果菜,2020,40(5):109-111.
- [6]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[J].土壤,2020,52(4):651-658.
- [7]侯峥嵘,张洁,王建泉,等.设施辣椒病虫害发生现状与综合防控[J].农业工程技术,2020,40(28):73-75,79.
- [8]陈劲憬,高丽红,曹之富.施肥对设施土壤及作物生育的影响研究进展[J].农业工程学报,2005,21(14):16-20.
- [9]吕长山,王金玲,于广建,等.氮肥对辣椒果实品质及产量的影响[J].东北农业大学学报,2005,36(4):448-450.
- [10]李晶晶,续勇波.百合连作年限对设施土壤理化性质和生物学特性的影响[J].土壤通报,2019,50(5):1171-1177.
- [11]陈天祥,孙权,顾欣,等.设施蔬菜连作障碍及调控措施研究进展[J].北方园艺,2016(10):193-197.
- [12]王绪奎,陈光亚.设施农业中的土壤问题及对策[J].江苏农业科学,2001,29(6):39-42.
- [13]王敬国.设施菜田退化土壤修复与资源高效利用[M].北京:中国农业出版社,2011.
- [14]马艳春,姚玉新,杜远鹏,等.葡萄设施栽培不同种植年限土壤理化性质的变化[J].果树学报,2015,32(2):225-231.
- [15]Zhang C, Li X Y, Yan H F, et al. Effects of irrigation quantity and biochar on soil physical properties, growth characteristics, yield and quality of greenhouse tomato[J]. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106263.
- [16]金永贵,原亚琦,林文,等.休闲期耕作方式对旱地麦田土壤性状及产量的影响[J].山西农业科学,2020,48(3):382-386.

- [17] Alskaf K, Mooney S J, Sparkes D L, et al. Short-term impacts of different tillage practices and plant residue retention on soil physical properties and greenhouse gas emissions [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 206: 104803.
- [18] 郑福丽, 李国生, 张柏松, 等. 新建大棚番茄有机肥替代化肥的适宜比例及效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(2): 360–368.
- [19] 王慎强, 李欣, 徐富安, 等. 长期施用化肥与有机肥对潮土土壤物理性质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2001, 9(2): 77–78.
- [20] 周鑫鑫. 设施农业肥料高投入对土壤环境次生盐渍化的影响研究[D]. 上海: 东华大学, 2013: 45–49.
- [21] 吴凤芝, 刘德, 王东凯, 等. 大棚蔬菜连作年限对土壤主要理化性状的影响[J]. *中国蔬菜*, 1998(4): 5–8.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 吴凤芝, 赵凤艳, 刘元英. 设施蔬菜连作障碍原因综合分析与防治措施[J]. *东北农业大学学报*, 2000, 31(3): 241–247.
- [25] 李俊良, 崔德杰, 孟祥霞, 等. 山东寿光保护地蔬菜施肥现状及问题的研究[J]. *土壤通报*, 2002, 33(2): 126–128.
- [26] 黄锦法, 李艾芬, 马树国, 等. 蔬菜保护地土壤障碍的调查及防治措施[J]. *土壤肥料*, 2002(2): 42–44.
- [27] 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.
- [28] 于天仁. 我国农业持续发展和生态环境中重大土壤问题的化学机理研究建议[J]. *土壤*, 2001, 33(3): 119–122.
- [29] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [30] 余海英, 李廷轩, 周健民. 设施土壤次生盐渍化及其对土壤性质的影响[J]. *土壤*, 2005, 37(6): 581–586.
- [31] Bolan N S, Hedley M J, White R E. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures[J]. *Plant and Soil*, 1991, 134(1): 53–63.
- [32] Yan F, Schubert S, Mengel K. Soil pH changes during legume growth and application of plant material[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 23(3): 236–242.
- [33] Tang C, Unkovich M J, Bowden J W. Factors affecting soil acidification under legumes. III. Acid production by N_2 -fixing legumes as influenced by nitrate supply[J]. *New Phytologist*, 1999, 143(3): 513–521.
- [34] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 238–244.
- [35] Schröder J L, Zhang H L, Girma K, et al. Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(3): 957–964.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Zhao X, Xing G X. Variation in the relationship between nitrification and acidification of subtropical soils as affected by the addition of urea or ammonium sulfate[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(12): 2584–2587.
- [40] Zhao W, Cai Z C, Xu Z H. Does ammonium-based N addition influence nitrification and acidification in humid subtropical soils of China? [J]. *Plant and Soil*, 2007, 297(1/2): 213–221.
- [41] 邹小园, 郭金润, 梁耀明. 农户化肥减施意愿与行为研究进展[J]. *广东农业科学*, 2021, 48(5): 149–157.
- [42] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 214–221.
- [43] 李玲. 设施蔬菜连作土壤障碍与治理措施[J]. *农民致富之友*, 2012(18): 91.
- [44] 刘淑云. 日光温室蔬菜连作障碍的因果分析及防治措施探究[J]. *农业工程技术*, 2020, 40(13): 571–573.
- [45] Mandal A, Patra A K, Singh D, et al. Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(18): 3585–3592.
- [46] 刘灵芝, 马诗涵, 李秀玲, 等. 长期施肥对土壤氨氧化微生物的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1459–1466.
- [47] Li Y L, Tremblay J, Bainard L D, et al. Long-term effects of nitrogen and phosphorus fertilization on soil microbial community structure and function under continuous wheat production[J]. *Environmental Microbiology*, 2020, 22(3): 1066–1088.
- [48] 尚双华. 设施土壤氮素积累条件下番茄枯萎病发生的微生态机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016: 91–114.
- [49] Huang L, Riggins C W, Rodríguez-Zas S, et al. Long-term N fertilization imbalances potential N acquisition and transformations by soil microbes[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 691: 562–571.
- [50] 曾希柏, 王亚男, 王玉忠, 等. 不同施肥模式对设施菜地细菌群落结构及丰度的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(1): 69–79.
- [51] 蒋玉根, 邵赛男, 蒋沈悦, 等. 施肥对连作大棚蔬菜产量、土壤养分和微生物种群的影响[J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(5): 927–931.
- [52] Fan Z Z, Lu S Y, Liu S, et al. The effects of vegetation restoration strategies and seasons on soil enzyme activities in the Karst landscapes of Yunnan, southwest China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2020, 31(5): 1949–1957.
- [53] 杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 等. 长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征[J]. *环境科学*, 2018, 39(8): 3901–3909.
- [54] Ma X X, Wang L L, Li Q H, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32

- (17):5502–5511.
- [55] 郑立伟,赵阳阳,王一冰,等. 不同连作年限甜瓜种植土壤性质和微生物多样性[J]. 微生物学通报,2022,49(1):101–114.
- [56] 徐小军,张桂兰,周亚峰,等. 甜瓜设施栽培连作土壤的理化性质及生物活性[J]. 果树学报,2016,33(9):1131–1138.
- [57] 晁 赢. 长期定位施肥对土壤肥力特征及养分吸收利用的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2009:67–69.
- [58] 谭福雷. 长期定位施肥对设施番茄土壤理化性质、微生物、产量及品质的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016:43–45.
- [59] 万连杰,李俊杰,张 绩,等. 有机肥替代化肥技术研究进展[J]. 北方园艺,2021(11):133–142.
- [60] 寇枝楠,陈一鸣. 设施蔬菜有机肥施用行为研究[J]. 农村经济与科技,2021,32(5):16–18.
- [61] 曲成闯,陈效民,韩召强,等. 生物有机肥对潮土物理性状及微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持通报,2018,38(5):70–76.
- [62] 李 玮,孔令聪,张存岭,等. 长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析[J]. 土壤学报,2015,52(4):943–949.
- [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] 王 荣,刘吉青,周海霞,等. 生物有机肥与保水剂对设施连作黄瓜生长和土壤肥力的影响[J]. 河南农业科学,2018,47(8):45–53.
- [65] 高新昊,张英鹏,刘兆辉,等. 种植年限对寿光设施大棚土壤生态环境的影响[J]. 生态学报,2015,35(5):1452–1459.
- [66] 林仕芳,王小利,段建军,等. 有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. 环境科学,2022,43(4):2219–2225.
- [67] Guo Z C, Zhang Z B, Zhou H, et al. Long-term animal manure application promoted biological binding agents but not soil aggregation in a Vertisol[J]. Soil and Tillage Research,2018,180:232–237.
- [68] 段海芹,秦 秦,吕卫光,等. 有机肥长期施用对设施土壤全镉和有效态镉含量的影响[J]. 土壤学报,2021,58(6):1486–1495.
- [69] 安祥瑞,江尚焘,谢昶琰,等. 减施化肥配施有机肥对荔枝园土壤微生物区系的影响[J]. 应用生态学报,2022,33(4):1099–1108.
- [70] 伊 田,梁东丽,王松山,等. 不同种植年限对设施栽培土壤养分累积及其环境的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(7):111–117.
- [71] 王娟娟,朱紫娟,钱晓晴,等. 减施化肥与不同有机肥配施对稻季土壤细菌群落结构的影响[J]. 土壤,2021,53(5):983–990.
- [72] 赵自超,赵时锋,张宏启,等. 菌渣还田对设施瓜菜产量、品质和土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(19):112–118.
- [73] 王光飞,廖开志,马 艳,等. 中药渣有机肥耦合高效水溶肥改良不同肥力设施番茄土壤效果[J]. 中国土壤与肥料,2021(5):103–111.
- [74] 郭贵宾. 设施蔬菜栽培对土壤阳离子交换性能的影响[J]. 现代农业科技,2019(21):106.
- [75] 徐 彬,徐 健,祁建杭,等. 江苏省设施蔬菜连作障碍土壤理化及生物特征[J]. 江苏农业学报,2019,35(5):1124–1129.
- [76] 高利娟,邹国元,丁效东,等. 尾菜醇液制备及部分替代化肥对设施番茄土壤养分、酶活性及品质影响[J]. 天津农业科学,2021,27(1):1–7,11.
- [77] 朱利霞,曹萌萌,桑成琛,等. 生物有机肥替代化肥对玉米土壤肥力及酶活性的影响[J]. 四川农业大学学报,2022,40(1):67–72.
- [78] 王秋君,郭德杰,马 艳. 连续施用有机肥下设施土壤碳氮磷化学计量学特征及其与土壤有效磷的关系[J]. 江苏农业学报,2021,37(4):893–901.
- [79] 韩 巍,赵金月,李豆豆,等. 设施蔬菜大棚土壤氮磷钾养分富积降低土壤钙素的有效性[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(4):1019–1026.
- [80] 董志超,程全国,李 晔,等. 设施蔬菜土壤重金属含量的测定及潜在生态风险研究[J]. 黑龙江农业科学,2018(11):90–93.
- [81] 祝海燕,李婷婷. 设施果菜类蔬菜耕层土壤养分积累与棚龄的相关性[J]. 中国瓜菜,2019,32(5):45–49.
- [82] 曾国胜,钮 红. 有机肥替代化肥对土壤肥力的影响[J]. 农业科技与信息,2021(13):56–59.
- [83] 贝凯月,向春阳,赵 秋,等. 有机肥替代化肥对设施蔬菜土壤有效态 Fe、Mn、Cu 含量的影响[J]. 华北农学报,2020,35(6):148–154.
- [84] 代雪宾,李晓衡,田秀平,等. 化肥减施对设施蔬菜土壤微量元素有效性的影响[J]. 天津农学院学报,2021,28(3):1–5.
- [85] 张 霞,李 健,潘孝青,等. 不同熟化垫料替代比例对稻麦轮作下作物产量、土壤肥力及重金属的影响[J]. 江苏农业学报,2021,37(5):1175–1182.
- [86] 姚冬辉,魏宗强,颜 晓,等. 商品有机肥替代部分化肥对双季水稻产量及重金属含量的影响[J]. 江西农业大学学报,2020,42(5):863–871.
- [87] 方 成,代子雯,李伟明,等. 化肥减施配施不同有机肥对甜糯玉米产量和品质的影响[J]. 生态学杂志,2021,40(5):1347–1355.
- [88] 刘平静,肖 杰,孙本华,等. 长期不同施肥措施下土细菌群落结构变化及其主要影响因素[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(2):307–315.
- [89] 姜 蓉,徐 智,汤 利. 化肥减量配施不同有机肥对设施菊花土壤微生物功能多样性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2017,32(5):895–902.
- [90] 白亚丽. 日光温室果菜有机肥替代及化肥减施对其生长和土壤环境的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2018:31–35.
- [91] 马 龙. 不同施肥模式对设施菜田土壤微生物群落结构及氮循环的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2021:63–65.