

设施栽培土壤盐渍化与酸化的成因及其防治措施研究进展

宿福玥¹, 张辰¹, 熊子皓¹, 邢一凡¹, 宋瑜¹, 吴沿博², 吴舒¹

(1. 河北环境工程学院 河北省农业生态安全重点实验室, 河北 秦皇岛 066102;
2. 中国-阿拉伯化肥有限公司, 河北 秦皇岛 066003)

[摘要] 设施土壤盐渍化与酸化是设施栽培可持续发展的突出障碍因子。讨论设施栽培与露天栽培的土壤环境的区别, 分析设施土壤酸化、盐渍化的成因及特征, 论证生物调控、农业调控、灌溉、耕作、工程措施等防治手段对设施土壤改良与退化土壤修复的可行性, 为设施栽培健康发展提供参考。

[关键词] 设施土壤; 土壤酸化; 土壤盐渍化; 退化防治

[中图分类号] S156 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 05-0106-07

Research progress on the causes and control measures of soil salinization and acidification in facility cultivation

SU Fuyue¹, ZHANG Chen¹, XIONG Zihao¹, XING Yifan¹, SONG Yu¹, WU Yanbo², WU Shu¹

(1. Hebei University of Environmental Engineering, Hebei Key Laboratory of Agroecological Safety, Qinhuangdao 066102, China; 2. Sino-Arab Chemical Fertilizer Co., Ltd., Qinhuangdao 066003, China)

Abstract: Soil salinization and acidification in facilities are prominent obstacles to the sustainable development of facility cultivation. This paper discusses the differences in soil environment between facility cultivation and open-field cultivation, analyzes the causes and characteristics of acidification and salinization of facility soil, and demonstrates the feasibility of prevention and control measures such as biological regulation, agricultural regulation, irrigation, tillage, and engineering measures for the improvement of facility soil and the restoration of degraded soil, providing a reference for the healthy development of facility cultivation.

Key words: facility soil; soil acidification; soil salinization; prevention and control

设施种植是指应用温室、大棚等模式将露天种植用地进行覆盖, 并创造适合农作物反季节生长的环境, 使农作物种植与生产不受季节的限制。设施大棚在我国蔬菜生产中应用广泛, 占全球大棚蔬菜种植面积的80%^[1]。设施土壤是指长期进行设施栽培耕种的农业土壤, 是设施栽培赖以发展的物质基础。设施栽培在农村产业结构调整 and 增加农民收入方面发挥着十分重要的作用, 能够在一定程度上抵御自然灾害造成的农田减产, 尤其在台风、暴雨频发的农业种植区。按蔬菜种类分布来看, 我国设施番茄面积居于首位, 其次是黄瓜、茄子、辣椒^[2]。

由于温室、大棚等设施内部的土壤缺少雨水淋洗, 且温度、湿度、通气状况等均与露地栽培有较大差别, 加之设施栽培又长期处于高集约化、高复种指数、高肥料施用量的生产状态, 导致设施土壤酸化、次生盐渍化、养分失调、土壤理化性状恶化、微生物区系改变等一系列障碍问题^[3-4]。若不

及时防治和修复, 将对农作物产量和品质造成影响。尤其是设施土壤的酸化和盐渍化问题发生的频率高、面积大、危害严重。因此, 充分认识设施栽培土壤退化的原因, 有针对性地实施土壤改良与修复, 对设施栽培持续健康发展具有重要指导意义。

1 设施栽培土壤主要退化特征及成因

1.1 次生盐渍化特征

由于气候条件、母质类型等因素, 南酸北碱是我国土壤的主要特征, 但是设施大棚内高温、高蒸发且缺少降雨淋洗, 外加不合理施肥, 极易出现土

[收稿日期] 2024-08-05

[作者简介] 宿福玥(2005-), 女, 河北衡水人, 环境生态工程专业, 研究方向为微生物环境治理与污染修复。

[通信作者] 吴舒(1985-), 男, 河北秦皇岛人, 博士, 高级工程师, 从事农业废弃物资源化及新型肥料研发方面的研究。

[基金项目] 河北省教育厅创新创业类社会实践“土壤污染修复工程”(2023年421号); 2024国家级大学生创新训练计划(项目编号: 202451721005)

壤盐渍化现象，次生盐渍化是设施栽培土壤质量退化最突出的问题。

设施土壤次生盐渍化的表现特征为土壤干燥时表面出现一层白色盐霜，破碎后呈灰白色粉末，而湿润时颜色较正常土壤暗。当白色盐霜由白变绿再变红（紫球藻）时，即土面上出现块状紫红色胶状物，说明土壤的 $w(\text{盐})$ 已经超过10 g/kg，致使土壤性状恶化，影响到设施栽培作物的产量和品质^[5]。日本在20世纪70年代对当地的设施土壤进行调查，发现 $w(\text{可溶性盐})$ 在10.0~16.0 g/kg的土壤面积占设施土壤面积的40%以上，对设施蔬菜栽培土壤进行化验发现，仅20%~30%的土壤适合蔬菜生长^[6]。

基于植物源的栽培基质替代土壤或应用植物源有机质，并结合智能灌溉等措施，能够优化温室内的植物生长环境并改良设施栽培土壤，缓解盐渍化和酸化^[7]。

腐植酸的施用能够增加土壤微生物活性、改善土壤养分循环和缓解盐渍化^[8]。陈琪^[9]等将腐植酸钾和氨基酸肥料作为生物刺激素应用在无土栽培番茄种植中，番茄果实的产量和品质显著提升。我国不同设施栽培地区中发生次生盐渍化的报道较多。温室大棚内土壤水分蒸发快，大量施用化肥，容易使保护地硝酸离子大量剩余与迅速累积，加速了土壤沉积和次生盐化。1998年，刘德^[10]等报道了哈尔滨市郊蔬菜大棚土壤总盐量高于露地2.0~13.4倍，通过调查与定点观测，发现8年以上连作大棚土壤大部分出现了盐渍化，超标的盐类浓度已危害到蔬菜正常生长。兰州市安宁区部分蔬菜设施栽培土壤 $w(\text{盐})$ 为1.0~3.0 g/kg、0~20 cm表层的盐分已超过了土壤 $w(\text{盐})$ 的临界值（1.5g/kg），高达1.78 g/kg，属于盐渍化土壤^[11]。王学军^[12]对山东寿光等地的设施土壤取样测试，发现0~15 cm表层土壤的电导率（EC）达0.8~1.15 mS/cm。这些案例说明设施土壤中的盐分更容易在表层积聚。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%，中度盐渍化的比例占4.7%，且设施栽培土壤盐渍化程度显著高于露天栽培土壤^[13-14]。研究发现设施菜地中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 的含量均与全盐含量呈极显著正相关，其中 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 含量与全盐含量的相关系数更高^[15-16]。也有研究表明，硝酸盐是温室土壤盐渍化过程中增加最多的组分， NO_3^- 在阴离子总量中的占比大于50%，是引起土壤次生盐化的主要原因之一^[17-18]。硝态氮的分布与施肥和种植年限有关，施用化肥、有机肥和沼肥都会

导致土壤剖面的 NO_3^- 累积，且随着栽种年限的延长而增加。

1.2 设施土壤盐渍化原因

设施土壤盐渍化加重的原因是多方面的，主要表现为以下6类：

（1）水分运移方向。由于人为的特殊种植环境，设施栽培生产管理过程的土壤水分的运动方向不同于露天种植，由于强烈的蒸发作用，土壤溶液中的 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 NO_3^- 等水溶性盐离子随水由下而上移动，致使盐向土壤表层聚积，尤其是与土壤胶体产生负吸附的硝态氮。

（2）地下水水位及其矿化度。较高的地下水位阻滞了盐分淋洗水的排出，增加盐分在土壤中的停留时间，而且更容易将下层土体中的盐分溶解并随水分蒸发迁移至表层，加速盐分表聚^[19]。地下水位相同的设施栽培地块，地下水矿化度越高，土壤的次生盐渍化越严重，矿化度<1 g/L的水质适宜灌溉，2~3 g/L一般不宜灌溉。

（3）灌溉方式与灌溉量。喷灌、滴灌、渗灌及沟灌是设施栽培常用的灌溉模式，沟灌模式下的土壤水分增加不均匀，加上设施条件下的高温、强蒸发，致使盐渍化现象重于其他3种灌溉模式。杨玉波^[20]等的研究表明，水肥灌溉下限过低或过高，均不利于番茄产量和水利用率提高，适中的基质水含量可以明显提高农作物的水利用率和产量。

（4）淋洗。设施栽培条件下虽然抵御了自然的不利因素，同时导致了设施土壤缺少雨水的淋洗与冲刷，土壤水分的向上运动即土壤蒸发比露天土壤强烈，地表容易积盐。

（5）不合理用肥。设施栽培条件下蔬菜的高复种指数导致化肥和有机肥的高投入是可溶性盐分增加的一个根本原因。当土壤中N、P等养分远超出蔬菜本身的需用量时，不仅投入产出比显著下降，而且多余的养分大多积累在土壤中，导致其进入地下水或以其他形式损失掉。

（6）微生物活性。设施栽培高温、高湿的环境促进了土壤固相物质的快速分解与盐基离子的释放，例如有机质的快速分解，同时也提高了硝化细菌活性，使土壤中积聚的 NO_3^- 含量增加。

1.3 设施土壤酸化与成因

高温、高湿或恒温、恒湿是栽培设施环境与露天环境的主要区别之一，高温、高湿使土壤中的有机质分解速度快于露天环境，因此设施土壤内会产生更多的有机酸等酸性物质，另外，高复种指数

下,足量的化学速效肥料的施入能够保证农作物的质量和产量,配方施肥和平衡施肥在设施栽培中还未完全普及,偏施或过量施肥,加上高蒸发和无雨水淋洗,就会引起设施土壤表层盐分的积累和酸化。

温室大棚内温度高,且通风时间短,土壤内二氧化碳浓度较高,极易生成碳酸,而碳酸正是土壤中 H^+ 的主要来源。土壤酸化是个漫长的过程,但设施土壤发生酸化的速率快于同区域露天栽培土壤。有文献报道,土壤酸化是设施栽培中普遍存在的障碍因子,随着设施栽培年限的增加,土壤的pH呈逐年下降的趋势,南方的设施栽培土壤在种植6~7年后,pH可下降1个单位^[6, 21-22]。

根区盐分积累是茄子基质栽培面临的主要问题之一,隋淑梅^[23]等人研究了茄子不同日灌溉量处理效果(2.4 mm~8.4 mm),发现,温室基质栽培下,6.0 mm的日灌溉量对茄子的品质和产量表现最佳,而2.4 mm的日灌溉量会引起茄子根区的盐离子浓度显著增加。营养液灌溉量的控制可以调节设施茄子根区的盐分聚集。

1.4 设施土壤微生物指标

微生物代谢过程中分泌的酶影响土壤养分的转化速率及土壤的供肥能力。设施土壤的微生物群落及其数量也不同于露天土壤,由此设施土壤与露天土壤中有机质的矿化分解速率和难溶养分的溶出速率也不同。设施栽培土壤的环境条件和种植模式与露天种植有显著差别,例如温度、湿度及其变化频率,另外,设施栽培是以经济作物为主,如蔬菜、水果,因此也会导致土壤的养分失衡及有毒有害物质的积累,土壤中的细菌、放线菌、真菌的类别也随着改变。高新昊^[21]研究发现,随着设施栽培年限的积累,土壤中细菌数量先上升后下降,而放线菌数量先迅速升高后保持相对稳定,真菌数量呈持续增加的趋势。

2 设施栽培土壤盐渍化与酸化的防治措施

2.1 生物调控

绿肥是一种有机清洁肥源,种植和翻压绿肥均能提高土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量,降低速效化学肥料的投入,并且可改良土壤次生盐渍化现象。海藻提取物被用作农业和园艺作物中的有机生物刺激剂,以减少化学肥料^[24]。程文龙等^[25]研究了温室大棚夏季休闲期种植羊角豆、怪麻、决明3种夏绿肥对设施土壤的改良效应,夏绿肥的生长周期短、吸附能力强,绿肥的种植能够促进土壤胶体的凝聚和土壤团粒结构的形成,降低土壤的盐

基离子总量。虽然绿肥翻压不利于降低土壤的盐基离子总量,但是培肥效果显著,因此可因地制宜地根据土壤需求选择绿肥种植或种植后就地翻压。刘金泉^[26]等研究高粱绿肥种植对设施黄瓜根系微生物种类和比例的影响,高粱绿肥种植密度的不同能够改变黄瓜根际土壤细菌菌落比例,进而增加土壤脲酶活性、碱解氮质量比、速效磷质量比,促进茎粗、叶片总面积、根系数、根总体积的提高,最终提高黄瓜产量。

土壤酶活性反映土壤中物质转化强度和肥力水平,是评价土壤质量的生物学指标。绿肥还田过程中添加纤维素酶制剂,能够显著提高土壤蔗糖酶、脲酶以及磷酸酶等的活性,绿肥与纤维素酶制剂配合使用后,设施土壤细菌、放线菌、真菌、芽孢杆菌数量显著增加,从而提高土壤的有机质含量。但是土壤中单独添加纤维素酶制剂对土壤酶活性的增加并不显著^[27]。常规田间管理措施,不使用化肥的情况下,设施土壤种植及翻压禾本科的甜玉米、高丹草和苏丹草等绿肥可改变土壤微生物区系结构,增加土壤总菌数、细菌和放线菌的数量,以及细菌数量与真菌数量比值,减少真菌的数量和比例,在一定程度上降低土壤的pH值,提高土壤速效氮、磷、钾的含量,改善土壤微生态环境^[28]。

2.2 农业调控

(1) 合理间作、轮作。设施内栽培不同种类的植物来吸收并平衡土壤中被植物提取的养分,并抑制土传病害。选择将设施内经济作物与固氮植物轮作可以将设施内空气中的气态氮转化为植物可以用的铵态氮,减少土壤中化肥的施用量。根据次生盐渍化土壤主控盐离子以及不同作物对盐离子吸收累积偏向性选择合适的轮作系统,改善土壤电导率和离子组成。当轮作植物为绿肥、固氮生物、主控离子吸附植物且不与主作物竞争土壤养分的植物,轮作模式改良次生盐渍化的效果最佳^[29]。刘蕾^[30]等将豆科植物引入设施温室内并与西红柿、甜瓜轮作,结果表明,与传统设施内的西红柿-甜瓜轮作模式相比,豆角-甜瓜或豆角-西红柿的轮作模式能够降低向设施土壤中氮、磷、钾的投入,其中氮和钾的投入可降低20%以上,并且土壤的酸化速率被降低,轮作2年后,土壤中 $w(\text{硝态氮})$ 下降了65.31%。

(2) 配方施肥。化学肥料的偏施引起的氮、磷、钾比例不符合植物和土壤养分的需求,尤其是在土壤中迁移性较强的氮素,是引起设施栽培土壤

次生盐渍化的主要原因之一^[31]，如果氮磷钾的施用比例得不到改善，盐渍化程度会累计增加，2~4年的土壤平均 $w(\text{盐})$ 增加1.25%。2~4年的土壤平均 $w(\text{盐})$ 增加2.66%。栽培年限较长的设施土壤的适合“控氮、减磷、稳钾”及作物的根外喷施微肥，有机肥料、绿肥、生物肥料与化学肥料配合使用，在改良土壤的同时保证作物产量与品质。添加腐植酸与聚丙烯酰胺复配生物酵素能够显著提高硝酸磷肥(26-17-0)在设施生菜种植中的肥效，增值硝酸磷肥不仅能够提高生菜的产量和品质，同时能够改善设施栽培土壤的理化性质^[32]。耕作措施结合土壤改良技术，引入复合微生物菌剂、生物有机肥等土壤调理剂，对中药和蔬菜均能起到节肥增效、提升产量和品质的效果^[33-34]。

(3) 盐分淋洗。可选择在高温多雨季节将温室通风口打开，自然降雨淋洗土壤中的盐分，使土壤持水并充分浸泡，将表层的盐离子淋溶到土壤下层。也可以采用人工灌溉洗盐的方式，对于浅根系作物适当增加灌水量和次数，深根系作物尽可能减少灌水量。

(4) 改良土壤。应用各种有机、无机物料及土壤改良剂对设施土壤进行改良，有机肥料的投入增加土壤微生物的活性，微生物矿化分解有机质，可为作物生长提供持续的养分，腐殖质可提高土壤的缓冲性。天然矿物和工业副产物可改良酸化的土壤，如白云石、磷石膏、工业副产浆液污泥等。

同样是有机肥料，植物有机废弃物作为土壤改良剂对设施栽培土壤磷的利用率改良优于粪肥，其中稻壳制备的有机肥料，能够提高设施番茄的产量，并且提高土壤磷的利用率(4.8%~12.9%)，这可能与稻壳的微观结构以及富含硅元素有关^[35]。黄磷渣作为无机基质，替代河沙，能够提高番茄灌溉水的利用率，并且番茄硬度增加18.2%， $w(\text{维生素C})$ 增加15.7%， $w(\text{可溶性固形物})$ 增加4.5%^[36]。

(5) 休闲作物除盐。马齿苋和羽衣甘蓝作为休闲作物对氮淋溶损失的降低量分别为28.9和26.8 kg/hm²^[37]。甜玉米休闲种植减少了近42%的水分渗漏量，显著降低根区土壤无机氮含量，土壤电导率显著下降^[38]。

2.3 灌溉方式的优化

滴灌施肥与灌水能够缓解设施栽培土壤的退化。范庆锋^[39]等研究了沟灌、滴灌和渗灌3种灌溉方式下的水分生产率及对设施番茄栽培的产量和品质的影响，同时对比了不同灌溉模式下的土壤硝

酸盐分布与迁移、土壤全盐含量以及酸度变化。滴灌的出水孔来自平铺地表的滴灌带，出水点位置对应作物根部。渗灌的出水孔来自埋深在土层30 cm处的渗灌管，出水点可接触到土壤中的作物根系。而沟灌是采用的垄沟灌水。3种灌溉方式的节水效果和对土壤的湿润方式均不同。

相关研究表明通过研究了根区盐渍化和水源涵养之间的权衡，以埃及的番茄种植为例，我们发现滴灌和沟灌可以更好地控制盐分的积累，从而防止作物遭受盐胁迫。滴灌以最少的水用量实现了这一目标，因为它保持了土壤湿润。此外，研究发现，设施栽培条件下，滴灌和渗灌的水分生产率、番茄产量均高于沟灌。土壤胶体通常带有负电荷，难以吸附带负电荷的硝态氮，灌溉水的运移方式必定会影响硝态氮在土壤中的运移及在土壤中的分布。与大田土壤相比，设施土壤缺少降雨的淋洗，环境温度也偏高，地表水分蒸发强烈时，下层土壤中的硝态氮被水分运移到表层土壤聚集。

滴灌的水分移动方向由土壤表土层向下层，水分溶解表层的硝态氮并将其携带至作物根系附近，而水分蒸发向上运移硝态氮的强度弱于向下的淋洗的强度^[40]，所以，3种灌溉方式下，滴灌土壤的pH更稳定、表层全盐含量、硝态氮含量也低于沟灌和渗灌。优化氮肥施用和灌溉水用量、维持土壤交换性钙镁浓度等措施可有效降低土壤NO₃浓度和N₂O气体的排放^[41-42]。间歇灌溉可降低土壤硝态氮和硫酸根浓度，使土壤电导率由1.55 mS/cm下降到0.36 mS/cm^[43]。

2.4 工程改良措施

(1) 洗盐暗管工程。防治土壤盐渍化有效的工程措施之一是埋设暗管排水，可在设施土壤不同深度处分别埋设层波纹多孔PVC排水管，如可在30 cm和60 cm深处分别埋设，在需要洗盐时放水对土壤冲洗，将盐分从土壤中淋洗掉。

(2) 客土措施。土壤性质优良的客土与设施内的盐渍化程度高的土壤混合，具体方法是在作物收获后，将棚内土壤与客土混合后，深耕，盐分翻至更深层，降低耕层土壤的盐分，延长大棚的使用年限。也可将EC值较高和较低的设施土壤混合，可有效降低原有土壤的次生盐渍化程度。

(3) 石灰氮。针对次生盐渍化、酸化的设施菜地土壤，施用石灰氮可提升土壤pH，提高氮肥利用效率，降低土壤电导率。氰化钙(CaCN₂)是石灰氮的主要成分，遇水分解产物为氢氧化钙和氰胺，

不仅无酸根离子的生成,而且氰胺能够抑制铵态氮向硝态氮的转化,减少氮素淋溶流失,提高作物吸收利用效率^[44]。石灰氮高温闷棚技术常被用于修复蔬菜生产土壤连作障碍^[45]。在高度盐渍化土壤上,与常规施氮处理相比,施石灰氮可使土壤电导率降低16.0%~19.7%,土壤pH升高3.4%和12.6%^[46]。

2.5 耕作措施

土壤的孔隙系统是一个复杂的系统,有的位置是大孔隙(通气孔隙)与小孔隙(毛管孔隙)彼此相通,而有些位置又发生堵塞。土壤所吸持和保存的水分主要是毛管水,毛管水是指依靠毛细管引力保持在土壤毛管孔隙的水,能溶解多种溶质,可自由移动,速度较快,及时中耕松土,切断毛细管的连通,可减少土壤水分蒸发引起的盐分向表土层迁移。

3 结论

设施栽培的种植环境及种植制度有别于露天,导致设施土壤退化,尤其是土壤盐渍化与酸化的原因是多方面的,主要原因有水分运移方向、地下水水位及其矿化度、灌溉方式与灌溉量、淋洗、不合理用肥、微生物活性等,设施土壤的改良与修复可以采用生物调控、农业调控、灌溉方式的优化、工程改良措施、耕作等措施。适宜的土壤翻耕,控制土壤毛细管水分的蒸发,可保持土壤水分并抑制蒸发引起的盐分向表层土壤聚集。引入绿肥及酶制剂可以减少化肥的施用量,提高土壤酶活性。因地制宜的轮作模式、应用生物肥料、有机肥料等可显著改良土壤性状。滴灌和渗灌可以提高水肥利用率,提高作物产量与品质。设施土壤中布设盐渍暗管、利用灌溉水淋洗土壤,可明显降低土壤中的盐分含量。

【参考文献】

- [1] 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(3):126453.
- [2] 童有为,陈淡飞. 温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径的研究[J]. *园艺学报*, 1991, 18(2): 159-162.
- [3] SHARMA S K. Soil Quality under Polyhouse and Open Field Conditions as Affected by Continuous Fertilizer and Manure Applications[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2024, 55(12): 1819-1836.
- [4] SUN K N, ZHANG J F, ZHANG W H, et al. Characteristics of Soil Salinity in Representative Plastic Shed Vegetable Production Areas in Shandong Province, China[J]. *Eurasian Soil Science*, 2023, 56(4): 488-501.
- [5] 王子璐,王祖伟.设施土壤退化研究进展与展望[J].*安徽农业科学*. 2016,44(18): 95-98.
- [6] WANG Z L, WANG Z W. Research Progress and Prospects of Facility Soil Degradation. [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(18): 95-98.
- [6] 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.
- [7] SHI J, ZHANG N M, BAO L. Research progress on soil degradation and regulation of facility agriculture in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*.2013,21(7):787-794.
- [7] AHMED N, ZHANG B, DENG L, et al. Advancing horizons in vegetable cultivation: a journey from ageold practices to high-tech greenhouse cultivation—a review [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1357153.
- [8] BERA B, BOKADO K, BARKHA. Effect of Humic Acid on Growth, Yield and Soil Properties in Rice: A Review. [J] *International Journal of Plant & Soil Science*.2024,36(6):26-35.
- [9] 陈琪,董静,周伟伟,等. 腐植酸钾和氨基酸肥料对砂培番茄生长与果实品质的影响[J].*华北农学报*.2023,38(S1):300-306.
- [9] CHEN Q, DONG J, ZHOU W W, et al. Effects of Potassium Humate and Amino Acid Fertilizer on Growth and Fruit Quality of Sand Tomatoes[J].*Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(S1):300-306.
- [10] 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):5-6.
- [10] LIU D, WU F Z. The Soil Salinity Situation and Its Influence in Vegetable Green houses in the Suburbs of Harbin City. [J]. *Northern Horticulture*, 1998(6): 5-6.
- [11] 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):90-93.
- [11] 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):90-93.
- [12] 王学军.日光温室土壤次生盐渍化分析[J].*北方园艺*,1998(Z1):15-16.
- [12] WANG X J. Analysis of Secondary Salinization of Soils in Solar Greenhouses [J]. *Northern Horticulture*, 1998(Z1): 15-16.
- [13] 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.
- [13] HUANG S W, GAO W, TANG J W, et al. Total salt content and ion composition in tillage layer of soils in the main vegetable production regions of China [J].*Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*,2016,22(4): 965-977.
- [14] 于泓,卢维宏,张乃明.我国设施栽培土壤退化特征及修复技术研究进展[J].*蔬菜*,2021(11):35-42.
- [14] YU H, LU W H, ZHANG N M.Research Progress on Degradation Characteristics and Remediation Technologies of Protected Soils in China[J].*Vegetables*,2021(11):35-42.
- [15] 曾希柏,白玲玉,苏世鸣,等.山东寿光不同种植年限设施土壤的酸化与盐渍化[J].*生态学报*,2010,30(7): 1853-1859.
- [15] ZENG X B, BAI L Y, SU S M, et al. Acidification and salinization in greenhouse soil of different cultivating years from Shouguang City,Shandong[J].*Acta Ecologica Sinica*,2010, 30(7): 1853-1859.
- [16] 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, 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.
- [17] 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.
- [18] 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. Effect 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.
- [19] 陈昊, 王军, 马超, 等. 不同水质滴灌与施氮措施下土壤盐分及关键离子变化研究[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(1): 80-86.
- CHEN H, WANG J, MA C, et al. Research on the Changes of Soil Salinity and Key Ions under Different Water Quality Drip Irrigation and Nitrogen Application Measures. [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(1): 80-86.
- [20] 杨玉波, 董灵迪, 焦永刚, 等. 不同基质对番茄生长及其产量的影响[J]. *北方园艺*, 2022(11): 8-15.
- YANG Y B, DONG L D, JIAO Y G, et al. Effects of Different Substrates on Tomato Growth and Yield [J]. *Northern Horticulture*, 2022(11): 8-15.
- [21] 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.
- GAO X H, ZHANG Y P, LIU Z H, et al. Effects of Planting Years on the Soil Ecological Environment of Greenhouse Facilities in Shouguang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1452-1459.
- [22] 陈碧华, 杨和连, 李亚灵, 等. 不同种植年限大棚菜田土壤水溶性盐分的变化特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 241-245.
- CHEN B H, YANG H L, LI Y L, et al. Variation Characteristics of Water-soluble Salts in Greenhouse Vegetable Field Soils with Different Planting Years. [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 241-245.
- [23] 隋淑梅, 刘明池, 崔锦, 等. 灌溉量对温室基质栽培茄子产量、品质与根区盐分积累的影响[J]. *节水灌溉*, 2023(11): 56-65.
- [24] FERRÁNDEZ-GÓMEZ B, JORDÁ J D, CERDÁN M, et al. Enhancing Salt Stress Tolerance in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) through Silicon Application in Roots [J]. *Plants*, 2024, 13(10): 1415.
- [25] 程文龙, 李敏, 韩上, 等. 不同种类夏绿肥对设施土壤的改良效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(4): 83-87.
- CHENG W L, LI M, HAN S, et al. Effect of different kinds of summer green manure on improvement of protected soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4): 83-87.
- [26] 刘金泉, 李明, 胡云, 等. 高粱绿肥种植密度对设施黄瓜根系生长相关因子的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 323-329.
- LIU J Q, LI M, HU Y, et al. Effect of Planting Density of Sorghum as Green Manure on Root Growth Factors of Facilities Cucumber [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 323-329.
- [27] 曲继松, 张丽娟, 朱倩楠. 添加纤维素酶对绿肥还田设施土壤酶活性及微生物种群数量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(5): 484-486.
- QU J S, ZHANG L J, ZHU Q N. Effects of Adding Cellulase on Soil Enzyme Activities and Microbial Population Quantities in Green Manure Returned Facility Soils [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(5): 484-486.
- [28] 白小军, 冯海萍, 张丽娟, 等. 种植及翻压绿肥对设施土壤养分及微生物区系的影响[J]. *北方园艺*, 2014(23): 144-147.
- BAI X J, FENG H P, ZHANG L J, et al. Effect of the Planting and Green Manure Application on Soil Nutrients and Microbial Flora in Greenhouse [J]. *Northern Horticulture*, 2014(23): 144-147.
- [29] SU K Q, MU L, ZHOU T, et al. Quantifying spatiotemporal transfer of soil water and salt between intercrop root zones under alfalfa/spring wheat strip intercrop** based on HYDRUS-2D [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2024, 375: 109172.
- [30] 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.
- LIU L, XU M, WANG L, et al. Effects of Crop Rotation with Legumes on the Composition of Microbial Community in Greenhouse Vegetable Soils [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(3): 203-215.
- [31] 陈爱晶. 盐城市农业生态文明建设与科学施肥关系探讨[J]. *现代农业科技*, 2014(6): 259-260.
- CHEN A J. Discussion on the Relationship between the Construction of Agricultural Ecological Civilization and Scientific Fertilization in Yancheng City. [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2014(6): 259-260.
- [32] 孟晶晶, 关小敏, 韩冬芳, 等. 增值硝酸磷肥在设施生菜上的应用效果研究[J]. *磷肥与复肥*, 2020, 35(10): 48-52.
- MENG P P, GUAN X M, HAN D F, et al. Study on the application effect of value-added nitrophosphate fertilizer on facility lettuce [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2020, 35(10): 48-52.
- [33] 张继雨, 王连祥, 任庆国, 等. 复合微生物菌剂对轻度盐碱地土壤改良及红花产量的影响[J]. *磷肥与复肥*, 2023, 38(10): 48-52.
- ZHANG J Y, WANG L X, REN Q G, et al. Effects of compound microbial agent on soil improvement and safflower yield in mild saline-alkali land [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2023, 38(10): 48-52.
- [34] 闫旭, 周雪, 范贝贝, 等. 设施土壤改良技术对番茄产量和土壤盐分累积的影响[J]. *磷肥与复肥*, 2023, 38(11): 49-52.
- YAN X, ZHOU X, FAN B B, et al. Effect of soil improvement techniques on tomato yield and salt accumulation in greenhouse soil [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2023, 38(11): 49-52.
- [35] 费超, 丁效东. 基于设施番茄需磷规律的磷肥施用技术规程[J]. *磷肥与复肥*, 2021, 36(2): 25-27.

- FEI C, DING X D. Technical specification of phosphate fertilizer application based on phosphorus requirement rule of greenhouse tomato. [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2021, 36(2): 25-27.
- [36] 杨加仪, 范蓉蓉, 李玲珊, 等. 黄磷渣基质对番茄生长的影响[J]. *磷肥与复肥*, 2024, 39(3): 48-52.
- YANG J Y, FAN R R, LI L S, et al. Effect of yellow phosphorus residue substrate on tomato growth [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2024, 39(3): 48-52.
- [37] 巨昇容, 闵炬, 董刚强, 等. 不同种类休闲作物阻控设施菜地氮磷淋溶效果及机制研究[J]. *土壤学报*, 2023, 60(6): 1650-1661.
- JU S R, MIN J, DONG G G, et al. Effects and Mechanisms of Different Kinds of Catch Crops on Reducing Nitrogen and Phosphorus Leaching Loss in Protected Vegetable Field [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(6): 1650-1661.
- [38] 梁浩, 胡克林, 侯森, 等. 休闲玉米对京郊设施菜地土壤氮素淋洗影响的模拟分析[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 125-136.
- LIANG H, HU K L, HOU S, et al. Simulation Analysis of Effect of Planting Summer Catch Crop Sweet Corn on Nitrate Leaching for Greenhouse Vegetable Field in Suburbs of Beijing [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 125-136.
- [39] 范庆锋, 张玉龙, 张玉玲, 等. 不同灌溉方式下设施土壤硝态氮的积累特征及其环境影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(11): 2281-2286.
- FAN Q F, ZHANG Y L, ZHANG Y L, et al. Soil nitrate accumulation and its environmental effects under various irrigation modes in protected field [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11): 2281-2286.
- [40] BBI Y, WU W, HOU L, et al. Quantifying the Spatial Distribution of Soil Nitrogen under Long-Term Drip Fertigation [J]. *Water*, 2022, 14(9): 1337.
- [41] ZHOU W, WANG Q, CHEN S, et al. Nitrate leaching is the main driving factor of soil calcium and magnesium leaching loss in intensive plastic-shed vegetable production systems [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 293: 108708.
- [42] WANG G, XU H, HUANG K, et al. Concurrent Response of Greenhouse Soil NO₃⁻ Concentration and N₂O Emissions to Nitrogen and Irrigation Management in China: A Meta-Analysis [J]. *Agronomy*, 2024, 14(7): 1387.
- [43] ZHU R, ZHANG P, LI X, et al. How to remediate sulfate-nitrate salinized greenhouse soil? An optimal combination of organic amendment, fertilizer and irrigation [J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 321: 112264.
- [44] 崔国庆, 李宝聚, 石延霞, 等. 石灰氮土壤改良作用及病虫害防治效果[J]. *植物保护*, 2006, 32(6): 145-147.
- CUI G Q, LI B J, SHI Y X, et al. The Effects of Lime-Nitrogen on Soil Improvement and the Control of Diseases and Pests. [J]. *Plant Protection*, 2006, 32(6): 145-147.
- [45] 王飞, 李世贵, 徐凤花, 等. 连作障碍发生机制研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(5): 6-13.
- WANG F, LI S G, XU F H, et al. Research Progress on the Occurrence Mechanism of Continuous Cropping Obstacles. [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2013(5): 6-13.
- [46] 程明琨, 闵炬, 巨昇容, 等. 不同土壤改良措施对大棚菜地高度盐渍化土壤改良效果研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(4): 9-16.
- CHENG M K, MIN J, JU S R, et al. Research on the Improvement Effects of Different Soil Improvement Measures on Highly Salinized Soils in Greenhouse Vegetable Fields. [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2024(4): 9-16.
- (上接93页)
- [91] LIU Y K, LIU F, YE G, et al. Macrocyclic ligand decorated ordered mesoporous silica with large-pore and short-channel characteristics for effective separation of lithium isotopes: synthesis, adsorptive behavior study and DFT modeling [J]. *Dalton Transactions*, 2016, 45(41): 16492-16504.
- [92] ZHANG N N, HE Q S, ZHANG L, et al. Homogeneous Fluorine Doping toward Highly Conductive and Stable Li₁₀GeP₂S₁₂ Solid Electrolyte for All-Solid-State Lithium Batteries [J]. *Adv Mater*, 2024, 36(36): 2408903.
- [93] HASHEMI B, SHAMSIPUR M, SEYEDZADEH Z. Synthesis of ion imprinted polymeric nanoparticles for selective pre-concentration and recognition of lithium ions [J]. *New J Chem*, 2016, 40(5): 4803-4809.
- [94] KIM Y S, LEE H M, KIM J H, et al. Hydrogel adsorbents of poly (N-isopropylacrylamide-co-methacryloyloxymethyl-12-crown-4) for Li⁺ recovery prepared by droplet microfluidics [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(14): 10656-10661.
- [95] HUANG W, LIU S C, LIU J X, et al. 2-Methylol-12-crown-4 ether immobilized PolyHIPEs toward recovery of lithium (i) [J]. *New J Chem*, 2018, 42(20): 16814-16822.
- [96] SUN D S, MENG M J, LU Y, et al. Porous nanocomposite membranes based on functional GO with selective function for lithium adsorption [J]. *New J Chem*, 2018, 42(6): 4432-4442.
- [97] LIU Y K, LIU X G, YE G, et al. Well-defined functional mesoporous silica/polymer hybrids prepared by an ICAR ATRP technique integrated with bio-inspired polydopamine chemistry for lithium isotope separation [J]. *Dalton Transactions*, 2017, 46(18): 6117-6127.
- [98] MAO L, CHEN R, HE J, et al. Remarkably High Li⁺ Adsorptive Separation Polyamide Membrane by Improving the Crown Ether Concentration and Electron Density [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(30): 10047-10056.
- [99] ZENG Y, PEI H C, WANG Z, et al. Chitosan-graft-benzo-15-crown-5-ether/PVA Blend Membrane with Sponge-Like Pores for Lithium Isotope Adsorptive Separation [J]. *ACS Omega*, 2018, 3(1): 554-561.
- [100] CHENG M, CHU T, YIN X, et al. Highly Porous Self-Supporting Graphene Oxide-Based Membranes for the Selective Separation of Lithium Ions [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(38): 12613-12619.
- [101] LIMJUCO L A, NISOLA G M, TORREJOS R E C, et al. Aerosol Cross-Linked Crown Ether Diols Melded with Poly (vinyl alcohol) as Specialized Microfibrillar Li⁺ Adsorbents [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(49): 42862-42874.