

设施土壤退化研究进展与展望

王子璐, 王祖伟* (天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300387)

摘要 设施土壤退化使得设施农业生产受到严重威胁。通过总结国内外的研究进展, 从土壤酸化、次生盐渍化、重金属污染、养分比例失衡, 及微生物系统改变等方面, 综述了设施土壤退化特征与成因, 并展望了设施土壤退化的研究发展趋势。

关键词 设施土壤退化; 酸化和次生盐渍化; 养分失衡; 重金属污染; 微生物系统改变

中图分类号 S15; X53 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)18-095-04

Research Advance and Prospect of Greenhouse Soil Degradation

WANG Zi-lu, WANG Zu-wei* (College of Urban & Environment Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387)

Abstract Greenhouse soil degradation can cause serious threat to protected agriculture production. The study advances at home and abroad were summarized, the characteristics and causes of soil degradation were analyzed from aspects of acidification, secondary salinization, heavy metal pollution, nutrient imbalance and microbial system changes, and the future research trend was proposed.

Key words Greenhouse soil degradation; Acidification and secondary salinization; Nutrient imbalance; Heavy metal pollution; Microbial system changes

随着我国城市化发展速度的加快, 对蔬菜的需求日益增加。我国已成为设施农业生产大国, 面积和产量稳居世界第1, 2012年我国设施农业种植面积已达世界设施农业种植面积的85%以上。设施农业是未来农业发展的主要方向^[1]。设施农业大面积建设, 虽然带来了显著效益, 但由于自身的制约, 土壤缺乏雨水洗淋, 温度、通风、湿度和肥料等与传统种植有较大的区别, 而且设施农业本身具有高集约化、高复种率、高施肥量等特点, 导致一系列土壤退化问题^[2-3]。土壤退化会造成土壤板结、肥力变差、微生物活性下降、蔬菜产量减少及质量下降等危害, 进而影响生态环境以及人体健康。

笔者从设施土壤酸化、次生盐渍化、重金属污染、养分比例失衡, 及微生物系统改变等方面阐述设施土壤退化现象, 综述当前国内外研究进展, 并总结其特征及成因。在此基础上, 对未来的研究方向进行了展望。

1 设施土壤退化现象

1.1 土壤酸化 设施土壤酸化问题, 很早就引起了学者们的关注, 一些学者将土壤酸化作为设施土壤退化的主要指标之一。

研究表明, 与露地耕种土壤相比, 设施土壤表现出随着种植年限的增加, 土壤的缓冲性能降低, 土壤pH下降而形成土壤酸化等特征^[4-9]。例如哈尔滨市种植5、10、20 a的大棚土壤与露地土壤的pH相比, 分别降低0.01、0.15、0.44, 而大庆市种植5、14、30 a的大棚土壤pH, 则分别降低0.02、0.39、0.50^[5]。山东寿光种植1 a的设施土壤的pH为7.69, 种植4 a的土壤pH为6.82, 种植13 a的土壤pH降到4.31, 而寿光土壤为褐土, 土壤pH背景值在7.50左右^[10]。土壤酸化不仅发生在北方, 南方同样出现土壤酸化的现象, 例如长江三角洲地区随着蔬菜种植年限的延长, 土壤pH呈逐年降低

的趋势, 3和10 a土壤pH分别比稻田低0.23和0.78^[6]。

设施土壤的pH随耕种周期变化而变化。设施农业因其自身的特点, 分为种植期和休闲期。Shi等^[11]对江苏宜兴蔬菜基地的研究表明, 夏季轮作间隙土壤的pH逐渐上升, 而在秋冬蔬菜生长期土壤则迅速酸化。而韩江培^[3]研究发现, 在蔬菜生长期, 土壤pH逐渐上升, 但在轮作间隙, 土壤pH则明显下降。从整个周期来看, 土壤pH呈下降趋势。

设施土壤的pH在剖面呈规律性变化。于群英等^[12]对设施土壤pH的研究发现, 酸化主要发生在耕作层, 土层愈深则酸化程度愈低。Han等^[9]对山东寿光设施土壤表层和亚表层酸化特征的研究和江苏盐城地区设施土壤剖面(0~40 cm)的研究也得到了相同的结果。但刘艳军等^[13]的研究表明, 在0~30 cm土层中, 各土层间(每10 cm为一层)土壤的pH无显著差异。

造成设施土壤酸化的原因多种多样, 主要是由于各类化肥和有机肥料的长期过量使用^[3, 14-17]。各类化肥, 特别是生理酸性盐(硫酸铵)和其他铵态氮肥的过量使用, 使土壤中 NH_4^+ 的硝化作用增强, NO_3^- 含量的增加, 加速了土壤的酸化^[14, 18]。有机肥料, 特别是粪肥中的铵态氮的硝化作用、有机氮的矿化和随之而来的硝化作用、有机物降解产生的有机酸, 加速了土壤的酸化^[15-16]。植物对土壤离子的选择性吸收和由根系分泌产生的致酸作用等也可导致产生土壤酸化。

1.2 次生盐渍化 设施土壤次生盐渍化是国内外蔬菜生产区普遍发生和存在的问题。设施农业土壤的盐分组成和离子含量与成土母质、土壤类型、灌溉水、地下水矿化度、施用肥料种类与数量、栽培作物种类、灌溉方式、管理技术等天然及人为因素相关, 表现出复杂性和多样性^[19]。设施土壤发生次生盐渍化时, 表现特征为: 当土壤干燥时, 有明显的返盐现象, 表面出现斑白盐霜, 破碎后呈灰白色粉末; 土壤较为湿润时, 颜色较暗, 在一定条件下形成斑块状盐结皮。当盐渍化的土壤较为潮湿时, 表面常出现紫红色胶状物(紫球藻), 暗示土壤的含盐量超过10 g/kg, 紫球藻可作为指示设施土壤严重盐渍化的植物^[20]。

基金项目 国家自然科学基金项目(40973074)。

作者简介 王子璐(1991-), 女, 天津人, 硕士研究生, 研究方向: 环境污染与修复。*通讯作者, 教授, 博士, 从事土壤环境污染与修复研究。

收稿日期 2016-05-11

设施土壤盐分随土壤深度不同而产生差异。Han 等^[9]研究发现,土壤次生盐渍化集中发生在 0~20、20~40 cm 的土壤中,表现为 K^+ 和 NO_3^- 的增加、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的减少。杜磊等^[21]研究得出,0~5 和 40~50 cm 土层含盐量较高,这 2 层可作为设施土壤盐分的“活动面”。杜连凤等^[6,22-23]研究得出,盐分主要积聚在 0~20 cm 土层,随着土层的加深,含盐量呈下降趋势。童有为等^[20]研究发现,玻璃温室和塑料大棚耕层土壤(0~25 cm)盐分分别是露地大田土壤的 11.8 和 4.0 倍,而 25 cm 以下土壤盐分则差异不大。邹长明等^[18]对安徽蚌埠的设施土壤盐分累积特性研究表明,大棚内土壤表层的含盐总量是露地大田土壤相同层次的 2.4~5.7 倍,盐分主要积聚在 0~15 cm 土层,特别是 0~5 cm 土层。

设施土壤次生盐渍化与种植年限和作物生长的季节性相关。陈碧华等^[24]研究发现,设施农业土壤中盐分的积累一般是随种植年限的增长而加重。薛继澄等^[25]研究表明,设施土壤盐分含量在 3~5 月可达 3~4 g/kg;而在 6~8 月,因蔬菜旺盛生长,大量吸收养分,盐分可降到 2 g/kg 以下;在次年 3~5 月,土壤中盐分又可回升到 3~4 g/kg。韩江培等^[3,9,26]的研究表明,设施土壤含盐量受作物生长的季节性影响明显,盐的含量会随着蔬菜生长周期而呈现消长变化。

设施土壤次生盐渍化受人为因素、土壤类型、温室类型等影响,其盐分组成和离子含量复杂多变。杨春霞等^[27]对宁夏设施农业研究发现, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 是造成土壤次生盐渍化的主要离子;余海英等^[22-23,28]的研究显示,设施土壤盐分以 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 的累积为主,与 Cl^- 无关^[22-23,28];陈碧华等^[24]研究发现,新乡设施土壤的盐分离子以 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 的含量随种植年限降低;曾希柏等^[7,29]研究发现,山东寿光设施土壤的盐分离子以 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 为主^[7,29];刘子英^[26]研究发现,河北曲周县设施土壤盐分以 SO_4^{2-} 、 Cl^- 为主;汪羞德等^[30]对上海设施农业的研究表明, Ca^{2+} 和 NO_3^- 与连栋大棚的盐渍化程度呈显著相关性,连栋大棚的盐渍化程度是以 Ca^{2+} 和 NO_3^- 这一对阴阳离子含量的增加为表征。李先珍等^[31]对京郊 10 a 以上蔬菜大棚土壤进行调查,阴离子浓度以 SO_4^{2-} 累积量为最高。

设施土壤次生盐渍化的产生与设施环境及人为耕作管理密切相关^[32]。封闭的栽培环境造成土壤特殊的水分运移方式,高温蒸发强烈引起土壤水分向上运动,使盐分在地表累积^[22,33];盲目的大量施肥特别是氮肥的使用,宜造成硝酸盐的累积并产生次生盐渍化^[16,20,34-35];不合理的灌溉方式,长期浅灌和小水勤浇宜造成盐分在地表积累^[28-29]。

1.3 重金属污染 对于设施土壤中重金属的研究,国外学者很少涉及,其原因可能是国外的设施农业多采用无土栽培技术,栽培植物以花卉为主,重金属不进入食物链,因而引起的关注较少。

在我国,设施农业绝大多数为有土栽培,设施土壤中重金属问题逐渐引起许多学者的重视。Bai 等^[36]研究发现,甘肃武威设施土壤中 Cd、Cu 和 Zn 发生累积,与耕作年限呈显

著正相关,而 Cr、Ni、Pb 等基本不受影响。Chen^[37]等对江苏南京设施土壤的研究发现,Cd、Hg、Pb 容易在土壤中累积,累积的关键因素是肥料的使用。Yang 等^[38]研究了我国北方地区设施农业有机肥使用对土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 的累积和生物有效性。姚艳娟^[39]对安徽省设施土壤的研究发现,Cd 和 Pb 在土壤中产生累积。曾希柏等^[40]对山东寿光设施土壤的研究发现,重金属 Zn 的含量最高,其次是 Cr、Cu;而毒性较大的元素 As、Hg、Cd 的含量相对较低。李树辉^[41]对山东寿光、河南商丘、吉林四平、甘肃武威等地设施土壤的研究发现,土壤中重金属均出现了不同程度的累积,部分样品中 Cd、Ni、Zn 的含量超过国家土壤环境质量Ⅱ级标准,耕种时间越长,累积量越大,有机肥是重金属的主要来源。刘莘等^[42]研究了寿光市蔬菜大棚土壤中重金属的含量,发现土壤中 Hg、Cd、Zn 等含量明显高于自然背景值。王俊等^[43]研究表明,日光温室土壤 Zn 累积随种植年限和施肥量而增加。

对于设施土壤中重金属的形态,也有部分学者进行了研究。王登启^[44]研究发现,设施土壤中重金属的全量和有效态含量随种植年限的增长有不同程度增加,但没有分析重金属有效态产生变化的原因。曾路生^[45]研究发现,设施土壤中重金属有效态含量随种植年限的增长而增加,具有“表聚性”,其顺序为 $Hg > As > Cu > Zn$,重金属有效态含量与 pH 呈显著负相关^[45]。赵明等^[46]研究得出,施用有机肥可降低设施土壤中 Pb 的有效态含量、增加 Cd 的有效态含量,但对 Cu、Zn 和 Cr 的有效态含量无显著影响;施用无机肥可提高土壤 Cu 和 Cr 的有效态含量,对 Zn、Pb 和 Cd 的有效态含量无显著影响。刘洋等^[47]研究了辽宁设施土壤中 Cd、Ni、As 有效态含量及其影响因素,发现 Cd、Ni、As 的有效态含量与种植年限、有机质之间为正相关关系,As 的有效态含量与 pH 呈正相关,Cd、Ni 的有效态含量与 pH 呈负相关。

造成设施土壤重金属污染的原因包括污水灌溉,农药、化肥、粪肥、塑料薄膜的使用等。姚艳娟^[39]研究发现,大量含有 Cu、As、Zn、Hg 等重金属的污水进入土壤。章圣强^[49]的研究表明,农药、化肥、粪肥中均含有数量不等的重金属元素。塑料薄膜中含有 Cd 和 Pb,长期使用会使土壤中 Cd 和 Pb 含量增加^[48-49]。

1.4 养分比例失衡 设施蔬菜种植过程中,种植户通过施用大量肥料来获得高产。随着施肥量的增加,特别是常量肥料的过量使用,不仅使土壤中养分含量不断上升^[50-52],同时造成设施土壤养分比例失调。

在我国,设施土壤养分比例失调主要表现在全 N、碱解 N、速效 P 含量均高于露地,中量和微量元素缺乏^[53]。秦巧燕等^[50]研究表明,关中渭河流域设施栽培施肥量大,纯 N 肥施用量超过 1 800 kg/hm²,且多数设施土壤并未施过 K 肥,土壤中的 K 素严重缺乏。随耕种年限增加,K 和中微量元素处于亏缺状态^[54]。马朝红等^[55]对山东省大棚蔬菜进行研究表明,N、P、K 肥的投入比例为 1:0.53:0.41,而豆类、茄果类和瓜类蔬菜的 N、P、K 需肥比例分别为 1:0.3:1.44、1:0.25:1.58 和 1:0.29:1.47,投入量与需求量之间存在着明显的差

异。设施栽培过程中种植户对 Ca、Mg、S 及微肥的认识不足,多数不施加 Ca、Mg、S 及微肥,使得土壤中大量元素含量明显偏高,而中量元素及微量元素相对缺乏,导致养分比例不均衡。

1.5 微生物系统改变 设施土壤微生物群落及其数量变化可作为评价土壤肥力的重要指标,其变化特征决定于设施土壤生态环境的质量^[54]。关于设施土壤微生物系统变化,已有大量的研究^[56-61]。目前对于设施土壤微生物系统改变的研究,主要是土壤微生物区系和土壤酶 2 个方面。

土壤微生物区系主要由细菌、真菌和放线菌 3 大类组成。细菌居多,占土壤微生物总数的 70%~90%,其次是放线菌,真菌最少^[62]。Dick 等^[63]研究表明,设施土壤中微生物区系不同于露地土壤,细菌和真菌数量为大棚>温室>露地,放线菌数量为大棚>露地>温室,随着连作次数增多,土壤微生物区系由“细菌型”向“真菌型”转变。

有关微生物总数与设施种植年限的关系,不同学者得出不同的结论。周艺敏等^[64]研究认为,随着种植年限的增加,微生物总数增加;张乃明等^[65]研究认为,设施栽培下土壤微生物数量高于露地,但随着种植年限的增加,其数量反而降低。关于设施土壤中的细菌随种植年限变化的研究,唐咏等^[66]对沈阳日光温室进行研究得出,土壤中的氨化细菌、硝化细菌和反硝化细菌的数量比露地高,且随着种植年限的增长而增加,种植 14 a 比种植 3 a 的土壤分别增加了 132×10^4 、 35×10^4 和 852×10^4 cfu/g。对于放线菌数量随种植年限的变化,唐咏等^[66]研究得出种植年限越长,放线菌数量则越少。对于真菌数量随种植年限的变化,姚圣梅等^[67]对蔬菜大棚土壤微生物群落进行研究得出,种植时间较短,真菌数量较多;反之,真菌数量较少,但有害真菌的数量和种类增加。对设施土壤微生物总数随季节的变化,王珊^[68]研究认为设施土壤微生物总数随季节变化呈现先高后低,高峰出现在 6 月,10 月最低;细菌数量季节变化与微生物总数变化趋势相同;真菌、放线菌数量的最大值都出现在 3 月。

目前对于设施土壤酶的研究中,较多的是对脲酶、转化酶和脱氢酶等进行研究^[68]。对脲酶,周礼恺等^[69]研究得出,土壤脲酶参与土壤中含氮化合物的转化,水解尿素生成氨,其活性影响着土壤中氮素的代谢。脲酶活性与土壤微生物数量、有机质、全 N 和速效 P 含量呈显著正相关^[68]。刘志民等^[70]发现设施土壤脲酶活性比露地土壤高 1~3 倍,并随种植年限的增长逐渐升高。对转化酶,王珊^[68]研究发现,设施土壤转化酶的活性,随种植年限的增长而降低,其高低与作物种类及种植年限有关。对脱氢酶,吴凤芝等^[71]研究得出过氧化氢酶活性比较稳定,设施种植年限对其影响不大。张国红等^[72]研究表明,设施土壤中过氧化氢酶活性随种植年限的增加呈抛物线变化,种植 3~4 a 时达到较高水平。

2 展望

目前,对设施土壤退化的研究,已经取得了较大的进展,但由于设施农业栽培过程中,不同区域土壤理化性质不同,种植作物品种不同,栽培方式不同,施用化肥品种及投入量

不同,自然和人为条件对设施农业的影响较大。不同栽培条件下,设施农业存在异质性,因此土壤退化的评价标准不能统一应用在广泛的设施农业栽培中。设施土壤退化今后的研究,可以更多地集中在以下几个方面。

2.1 加强土壤退化过程中导致酸化和次生盐渍化主要因子的研究 目前仅通过对土壤 pH 的测定,研究土壤酸化问题,但对土壤中酸中和容量、pH 缓冲容量等指标测定的较少。分析土壤酸化形成原因时,土壤酸化表现为 NO_3^- 的增加,研究得出所施用化肥中的 NH_4^+ 被硝化,转化成 NO_3^- ,释放 H^+ ,造成土壤酸化。但前人没有对氮同位素进行研究,表明土壤中 NO_3^- 中的 N 来自于所施用的铵肥。目前对次生盐渍化的研究中,多数表明设施栽培是密闭环境,但对于设施农业本身的灌溉量是否大于自然灌溉量的研究不多,没有考虑设施农业自身大量淋洗对土壤次生盐渍化形成的影响。多种原因造成土壤酸化、次生盐渍化,但并没有学者对土壤酸化、次生盐渍化形成的影响因素主要因子进行研究。

2.2 加强土壤养分中多种元素的研究 当前对设施农业土壤养分的研究中,多重视研究 N 素,对 P 素和 K 素研究较少。作物生长中对 K 素的需求量大于 N 素,但是实际中 K 素的含量较少,多数学者认为是 K 肥施用量少,但没有考虑 K 素在土壤中的淋失。对土壤养分中中量元素和微量元素的研究较少,学者也没有进一步研究,在土壤退化条件下,土壤养分中中量元素和微量元素的变化规律。

2.3 加强设施土壤中重金属污染和微生物系统破坏的研究 对土壤中重金属污染和微生物系统破坏的研究较多,但对设施土壤中重金属污染和微生物系统破坏的研究较少。目前,对在设施土壤退化条件下,设施土壤内重金属的含量、形态及迁移转化规律研究的较少。学者对设施土壤微生物系统改变的研究中,对微生物区系、土壤酶随种植年限变化的研究较多,对他们在土壤剖面变化的研究较少。在设施土壤退化条件下,微生物系统变化情况还需要进行深入的讨论。

参考文献

- [1] 焦坤,李德成. 蔬菜大棚条件下土壤性质及环境条件的变化[J]. 土壤, 2003, 35(2): 94-97.
- [2] 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.
- [3] 韩江培. 设施栽培条件下土壤酸化与盐渍化耦合发生机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
- [4] 黄锦张,张蚕生. 浙江嘉兴保护地土壤障碍的农化性状指标研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(4): 160-162.
- [5] 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.
- [6] 杜连凤,张维理,武淑霞,等. 长江三角洲地区不同种植年限保护蔬菜地土壤质量初探[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 133-137.
- [7] 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.
- [8] 郭文龙,党菊香,吕家珑,等. 不同年限蔬菜大棚土壤性质演变与施肥问题的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 85-89.
- [9] HAN J P, LUO Y H, YANG L P, et al. Acidification and salinization of soils with different initial pH under greenhouse vegetable cultivation[J]. Journal of soils and sediments, 2014, 14(10): 1683-1692.
- [10] 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.
- [11] SHI W M, YAO J, YAN F. Vegetable cultivation under greenhouse condi-

- tions 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.
- [12] 于群英, 李孝良. 皖北地区设施栽培土壤酸化特征研究[J]. *安徽农业科学*, 2005, 33(12): 2279–2280.
 - [13] 刘艳军, 姜勇, 梁文举, 等. 蔬菜温室土壤某些化学性质的演变特征[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2218–2220.
 - [14] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
 - [15] KIING L D, BURNS J C, WESTERMAN P W. Long-term swine lagoon effluent applications on 'Coastal' bermudagrass: II. Effect on nutrient accumulation in soil[J]. *J Environ Qual*, 1990, 19(4): 756–760.
 - [16] CHANG C, SOMMERFELDT T G, ENTZ T. Soil chemistry after eleven annual applications of cattle feedlot manure[J]. *Journal of environmental quality*, 1991, 20(2): 475–480.
 - [17] DE VRIES W, BREEUWSMA A. The relation between soil acidification and element cycling[J]. *Water air and soil pollution*, 1987, 35(3): 293–310.
 - [18] 邹长明, 张多妹, 张晓红, 等. 蚌埠地区设施土壤酸化与盐渍化状况测定与评价[J]. *安徽农学通报*, 2006, 12(9): 54–55.
 - [19] 王素平, 刘艳, 郭世荣. 设施土壤次生盐渍化的特征及其对蔬菜作物的危害[J]. *华中农业大学学报*, 2004, 35(S1): 183–186.
 - [20] 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.
 - [21] 杜磊, 郑子成, 李廷轩, 等. 不同次生盐渍化程度设施土壤的水盐运移特征研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 183–189.
 - [22] 余海英. 设施土壤养分分状况及盐分的累积、迁移特征[D]. 雅安: 四川农业大学, 2006.
 - [23] 姜伟, 王建国, 靳玉荣, 等. 设施土壤盐分变化规律及其相关分析研究[J]. *华北农学报*, 2010, 25(2): 200–205.
 - [24] 陈碧华, 杨和连, 苏世鸣, 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.
 - [25] 薛继澄, 毕德义, 李家金, 等. 保护地栽培蔬菜生理障碍的土壤因子与对策[J]. *土壤肥料*, 1994(1): 4–9.
 - [26] 刘子英. 保护地蔬菜栽培中土壤次生盐渍化演变规律研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
 - [27] 杨春霞, 张艳, 李彩虹, 等. 宁夏设施土壤盐分离子组成及含量变化特点[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(1): 201–206.
 - [28] 范庆锋, 张玉龙, 杨春璐, 等. 灌溉方法对蔬菜大棚土壤盐渍化及酸化的影响[J]. *贵州农业科学*, 2013, 41(12): 115–118.
 - [29] 李玉奇. 设施盐渍化土壤离子互作及生态修复研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
 - [30] 汪差德, 乔红霞, 朱爱凤, 等. 连栋大棚土壤次生盐渍化特点及防治[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(S): 119–122.
 - [31] 李先珍, 王耀林, 张志斌, 等. 京郊蔬菜大棚土壤盐离子积累状况研究初报[J]. *中国蔬菜*, 1993(4): 15–17.
 - [32] 张金锦, 段增强. 设施菜地土壤次生盐渍化的成因、危害及其分类与分级标准的研究进展[J]. *土壤*, 2011, 43(3): 361–366.
 - [33] 马光恕, 廉华. 设施内环境要素的变化规律及对蔬菜生长发育的影响[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2002, 14(3): 16–20.
 - [34] 刘善江. 目前保护地蔬菜施肥存在的问题及对策[J]. *北京农业科学*, 1999, 17(1): 31–32.
 - [35] 秦巧燕, 贾陈忠, 曲东, 等. 施氮量对设施栽培土壤全盐量影响分析[J]. *现代农业科技*, 2007(3): 62.
 - [36] BAI L Y, ZENG X B, SU S M, et al. Heavy metal accumulation and source analysis in greenhouse soils of Wuwei District, Gansu Province, China[J]. *Environmental science and pollution research*, 2015, 22(7): 5359–5369.
 - [37] CHEN Y, HUANG B, HU W Y, et al. Accumulation and ecological effects of soil heavy metals in conventional and organic greenhouse vegetable production systems in Nanjing, China[J]. *Environmental earth sciences*, 2014, 71(8): 3605–3616.
 - [38] YANG L Q, HUANG B, MAO M C, et al. Trace metal accumulation in soil and their phytoavailability as affected by greenhouse types in north China[J]. *Environmental science and pollution research*, 2015, 22(9): 6679–6686.
 - [39] 姚艳娟. 无公害基地土壤、蔬菜重金属健康风险评价及植物修复研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2011.
 - [40] 曾希柏, 李莲芳, 梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(11): 2507–2517.
 - [41] 李树辉. 北方设施菜地重金属的累积特征及防控对策研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
 - [42] 刘苹, 杨力, 于淑芳, 等. 寿光市蔬菜大棚土壤重金属含量的环境质量评价[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(5): 66–71.
 - [43] 王俊, 郭颖, 吴蕊, 等. 不同种植年限和施肥量对日光温室土壤锌累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 89–94.
 - [44] 王登启. 设施菜地土壤重金属的分布特征与生态风险评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
 - [45] 曾路生. 寿光设施蔬菜土壤有效态 Hg、As、Cu 和 Zn 含量的变化[J]. *环境化学*, 2013, 32(9): 1743–1748.
 - [46] 赵明, 蔡葵, 王文娇, 等. 施肥对大棚土壤有效态重金属含量及生物效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(S1): 26–31.
 - [47] 刘洋, 张玉龙, 张玉玲, 等. 辽宁省设施土壤重金属 Cd、Ni、As 有效态含量及其影响因素的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(6): 1131–1134.
 - [48] 姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 等. 动物饲料中砷、铜和锌调查及分析[J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 732–739.
 - [49] 章圣强. 沿黄灌区设施蔬菜土壤养分状况及重金属含量与评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
 - [50] 秦巧燕, 贾陈忠, 曲东, 等. 我国设施农业发展现状及施肥特点[J]. *湖北农学院学报*, 2002, 22(4): 373–376.
 - [51] 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, 31(1): 73–75.
 - [52] 陈新平, 张福锁. 北京地区蔬菜施肥的问题与对策[J]. *中国农业大学学报*, 1996, 11(5): 63–66.
 - [53] 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.
 - [54] 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.
 - [55] 马朝红, 方建坤. 蔬菜土壤盐分积累及环境风险[J]. *长江蔬菜*, 2000(12): 43–45.
 - [56] 马云华. 日光温室黄瓜连作土壤微生物区系与酶活性变化研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2004.
 - [57] 曹慧, 杨浩, 孙波, 等. 不同种植时间菜园土壤微生物生物量和酶活性变化特征[J]. *土壤*, 2002, 34(4): 197–200.
 - [58] 肖春玲, 李智芳, 李晓红, 等. 不同种植年限蔬菜大棚土壤微生物初步研究[J]. *河南农业科学*, 2007(12): 89–91.
 - [59] 庄岩, 吴凤芝. 不同农艺措施对土壤微生物的影响研究进展[J]. *东北农业大学学报*, 2008, 39(6): 136–140.
 - [60] 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.
 - [61] 章佳恩, 刘文高, 胡刚. 不同土地利用方式下土壤微生物数量与土壤肥力的关系[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(2): 140–143.
 - [62] 李文庆, 杜秉海, 骆洪义, 等. 大棚栽培对土壤微生物区系的影响[J]. *土壤肥料*, 1996(2): 31–33.
 - [63] DICK R P, MYROLD D D, KERLE E A. Microbial biomass and soil enzyme activities in compacted and rehabilitated skid trail soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1998, 52(2): 512–516.
 - [64] 周艺敏, 小仓宽典, 吉田彻志. 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.
 - [65] 张乃明, 董艳. 施肥与设施栽培措施对土壤微生物区系的影响[J]. *生态环境*, 2004, 13(1): 61–62.
 - [66] 唐咏, 梁成华, 刘志恒, 等. 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(自然科学版)*, 1999, 30(1): 16–19.
 - [67] 姚圣梅, 杨晓红, 郑雪红. 蔬菜大棚土壤微生物种类及数量的初步研究[J]. *华中农业大学学报*, 1997, 16(4): 92–95.
 - [68] 王珊. 不同种植年限设施土壤微生物学特征变化研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2007.
 - [69] 周礼恺, 张志明. 土壤酶活性的测定方法[J]. *土壤通报*, 1980, 1(5): 154–155.
 - [70] 刘志民, 李家金, 薛继澄, 等. 设施土壤的肥力特性及酶活性[J]. *土壤*, 1994, 26(5): 273–275.
 - [71] 吴凤芝, 赵凤艳, 谷思玉. 保护地黄瓜连作对土壤生物化学性质的影响[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2002, 18(1): 20–22.
 - [72] 张国红, 任华中, 高丽红, 等. 京郊日光温室土壤微生物状况和酶活性[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(7): 1447–1452.