

承德市农田土壤质量演变对农业生产力的影响及调控机制研究

李岩¹, 杜宏儒¹, 孙浩轩², 李嘉琪¹, 刘志泰¹, 刘小花¹, 胡展森¹, 张文杰^{1*}

(1. 承德市农林科学院, 河北承德 067000; 2. 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心), 长春 130033)

摘要: 针对承德市设施蔬菜土壤退化问题, 2021—2022年在平泉市、围场县、隆化县、宽城县、兴隆县、承德县采集360余份土壤样品进行系统检测。承德市设施蔬菜土壤呈复合退化特征, 有效磷含量(267~334 mg/kg)和速效钾含量(786~1 048 mg/kg)分别超标6倍和4~5倍的养分失衡、中高度盐渍化(电导率58~121 ms/m)、镉含量(0.20~0.26 mg/kg)接近风险阈值及铜锌显著富集的重金属风险、酞酸酯100%检出的有机污染以及钙镁比例失调。高强度农业生产导致上述多因素协同退化, 据此提出以“增施有机肥-优化化肥-微生物修复酞酸酯-合理轮作-水肥一体化”为核心的“诊断-修复-调控”技术体系, 为缓解土壤退化、保障农产品安全及京津冀冷凉区设施农业可持续发展提供技术范式。

关键词: 承德市; 设施土壤; 土壤质量; 酞酸酯污染; 土壤改良

中图分类号: S158.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2025)06-0045-05

Effects of Farmland Soil Quality Evolution on Agricultural Productivity and Its Regulation Mechanisms in Chengde City

LI Yan¹, DU Hongru¹, SUN Haoxuan², LI Jiaqi¹, LIU Zhitai¹, LIU Xiaohua¹, HU Zhansen¹, ZHANG Wenjie^{1*}

(1. Chengde Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Chengde 067000; 2. Jilin Academy of Agricultural Sciences(Northeast Agricultural Research Center of China), Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at the soil degradation problem of protected vegetable fields in Chengde City, this study collected more than 360 soil samples from 6 counties(Pingquan City, Weichang County, Longhua County, Kuancheng County, Xinglong County, and Chengde County) for systematic detection during 2021-2022. The protected vegetable soils in Chengde City exhibited comprehensive degradation characteristics, including nutrient imbalance with available phosphorus(267-334 mg/kg) and available potassium(786-1 048 mg/kg) exceeding the standard by 6 times and 4-5 times, respectively; moderate to high salinization (electrical conductivity: 58-121 ms/m); heavy metal risk characterized by cadmium content(0.20-0.26 mg/kg) approaching the risk threshold and significant enrichment of copper and zinc; organic pollution with 100% detection rate of phthalates; and imbalanced calcium-magnesium ratio. Intensive agricultural production has led to the synergistic degradation of the aforementioned multiple factors. Accordingly, a "diagnosis-repair-regulation" technical system centered on "increasing organic fertilizer application, optimizing chemical fertilizers, microbial remediation of phthalates, reasonable crop rotation, and integrated water and fertilizer management" was proposed. This study provides a technical paradigm for alleviating soil degradation, ensuring agricultural product safety, and promoting the sustainable development of protected agriculture in the cool region of the Beijing-Tianjin-Hebei region.

Key words: Chengde City; Protected soil; Soil quality; Phthalate pollution; Soil improvement

收稿日期: 2025-05-14

基金项目: 承德市科技计划项目(202305B004)

作者简介: 李岩(1995-), 男, 助理研究员, 硕士, 从事蔬菜栽培及果实品质调控研究。

杜宏儒为并列第一作者。

通信作者: 张文杰, E-mail: 1105520555@qq.com

近年来,国内外学者针对设施农业土壤退化问题开展了广泛研究。华北地区设施菜田土壤次生盐渍化严重,电导率普遍超过100 ms/m,速效磷含量高于标准值的5~10倍^[1-3]。酞酸酯污染问题日益突出,京津冀地区设施土壤中DBP(邻苯二甲酸二丁酯)检出率达90%以上,部分点位超过100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[3-4]。在土壤修复方面,国内外学者探索了多种改良技术。微生物菌肥、生物炭等生物修复手段可降低盐渍化土壤电导率20%~40%,硅钙肥对酞酸酯降解效率达60%以上^[4-5]。承德市作为京津冀重要的“菜篮子”基地,2023年蔬菜播种面积达6.9万 hm^2 。长期高强度生产导致土壤退化问题日益严峻,次生盐渍化显著、引发作物生理障碍、养分严重失衡、新型污染物累积、生物功能退化、土传病害增加,这些问题直接导致蔬菜硝酸盐超标,化肥用量逐年增加,对生态安全构成威胁。现有修复技术多基于短期试验,缺乏区域适应性验证,尤其针对承德设施土壤的集成修复技术体系尚未建立。因此,亟须结合长期定位观测,构建适用于该地区的土壤质量提升技术模式^[5-8]。因此开展土壤质量系统评估与绿色改良研究意义重大。本研究在实践层面,构建的“诊断-修复-调控”技术体系,可有效解决次生盐渍

化、养分失衡及酞酸酯污染等突出问题,降低土壤电导率,提升养分利用效率。研究成果不仅为区域设施农业可持续发展提供重要的科学依据和实践范式,也为我国北方冷凉地区设施土壤可持续利用提供了示范样板。

1 试验样本与分级标准

2021—2022年对承德市的平泉市、围场县、隆化县、宽城县、兴隆县、承德县的主要设施农区不同种植年限的设施农田土壤进行样品采集,共计360余份。

测定土壤pH值、有机质含量、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量,同时对污染物抗生素、酞酸酯进行检测。土壤养分分级依据全国第二次土壤普查提供的分级标准进行。土壤pH值共分7级,其中<4.5为极强酸性、4.5~<5.5为强酸性、5.5~<6.5为酸性、6.5~<7.5为中性、7.5~<8.5为碱性、8.5~<9.0为强碱性、>9.0为极强碱性。土壤交换性钙分为5级,<1 mg/kg为极缺乏、1~<4 mg/kg为缺乏、4~<12 mg/kg为中等、12~<20 mg/kg为丰富、20~60 mg/kg为很丰富、>60 mg/kg为极丰富。土壤有机质和有效大量元素含量分级标准见表1,有效微量元素含量分级标准见表2。

表1 土壤有机质和有效大量元素含量分级标准

mg/kg

Table 1 Classification standards for soil organic matter and available macronutrient content

分级 Grade	有机质含量 Organic matter content	碱解氮含量 Alkali-hydrolyzable nitrogen	速效磷含量 Available phosphorus	速效钾含量 Available K content
1(极丰富)	>4	>150	>40	>200
2(很丰富)	3~4	120~150	20~39	150~199
3(丰富)	2~3	90~119	10~19	100~149
4(中等)	1~2	60~89	5~9	50~99
5(缺乏)	0.5~1	30~59	3~4	30~49
6(极缺乏)	≤ 0.5	≤ 30	≤ 3	≤ 30

表2 有效微量元素含量分级标准

mg/kg

Table 2 Grading standards for effective trace element contents

分级 Grade	1(极缺乏) (Extremely scarce)	2(缺乏) (Lack)	3(中等) (Medium)	4(丰富) (Rich)	5(很丰富) (Very rich)
硼	<0.2	0.2~0.50	0.50~1.0	1.0~2.0	≥ 2.0
钼	<0.1	0.1~0.15	0.15~0.2	0.2~0.3	≥ 0.3
锌	<0.3	0.3~0.50	0.50~1.0	1.0~3.0	≥ 3.0
铜	<0.1	0.1~0.20(缺乏)	0.20~1.0	1.0~1.8	≥ 1.8

2 结果与分析

由表3可知,营养元素严重失衡引发次生风险。数据显示,承德市设施土壤中磷、钾元素严重过量,其中,有效磷含量高达263.00~369.04 mg/kg,超出土壤肥力分级1级标准;速效钾含量达677.71~1 119.45 mg/kg,超过1级阈值(>200 mg/kg)。这种异常富集主要源于设施农业长期过量施用化肥,并直接导致土壤盐分积累,达中高度盐化水平。同

时,钙镁比例显著失调:交换性钙含量仅属“中等”水平,而交换性镁与钙的摩尔比接近1:1(理想值为3:1~4:1)。这种失衡状态可能破坏土壤团聚体结构,并抑制作物对钾、镁等元素的吸收效率,加剧生理性障碍风险。

由表4得知,土壤样本中重金属镉(Cd)含量普遍处于0.21~0.26 mg/kg,已接近或超过规定的农用地土壤污染风险筛选值(0.3 mg/kg),存在一定的环境风险。同时,锌(Zn)与铜(Cu)元素呈现显著富

表3 承德市设施土壤基础数据库
Table 3 Basic database of facility soil in Chengde City

	pH 值 pH value	有机质含量/ mg·kg ⁻¹ Organic matter content	全氮含量/ g·kg ⁻¹ Total nitrogen content	有效磷含量/ mg·kg ⁻¹ Available phosphorus content	速效钾含量/ mg·kg ⁻¹ Content of available K	电导率/ ms·m ⁻¹ Conductivity	交换性钙含量/ mg·kg ⁻¹ Exchangeable calcium content	交换性镁含量/ mg·kg ⁻¹ Exchangeable magnesium content
2021年平泉市	6.82	50.55	3.43	263.00	1 116.00	114.73	383.00	313.00
2022年平泉市	6.52	55.19	2.82	271.39	980.65	115.41	354.00	293.00
2021年围场县	6.80	71.64	2.78	288.00	931.00	111.21	405.00	309.00
2022年围场县	6.90	53.02	2.90	296.00	944.00	88.24	395.00	382.00
2021年隆化县	6.85	51.45	3.63	300.54	1 119.45	98.42	418.29	312.21
2022年隆化县	6.75	62.51	3.56	369.04	977.38	58.01	408.29	321.42
2021年宽城县	6.80	60.08	3.47	320.54	1 000.29	102.80	399.42	302.46
2022年宽城县	6.61	53.65	4.05	282.33	924.88	69.46	391.46	334.00
2021年兴隆县	6.50	65.02	3.66	272.42	922.33	87.73	400.04	337.08
2022年兴隆县	6.75	60.76	3.13	285.29	874.00	59.93	386.13	315.75
2021年承德县	6.74	53.02	3.86	281.21	894.29	121.17	389.71	313.71
2022年承德县	6.58	61.19	3.82	274.00	677.71	91.94	396.64	312.57

表4 承德市设施土壤污染底数数据库
Table 4 Basic database of soil pollution in facilities in Chengde City

	镉 Cd	铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	铬 Cr	抗生素 Antibiotic	酞酸酯 Phthalate esters
2021年平泉市	0.22	28.00	23.00	82.00	54.00	未见	有
2022年平泉市	0.21	28.00	23.00	65.00	55.00	未见	有
2021年围场县	0.25	28.00	23.00	90.00	54.00	未见	有
2022年围场县	0.25	26.00	22.00	94.00	53.00	未见	有
2021年隆化县	0.26	27.50	23.50	89.75	54.00	未见	有
2022年隆化县	0.24	24.29	26.63	82.79	53.71	未见	有
2021年宽城县	0.24	30.25	23.29	91.63	54.58	未见	有
2022年宽城县	0.20	24.25	22.42	87.50	52.96	未见	有
2021年兴隆县	0.25	25.71	23.96	89.25	59.86	未见	有
2022年兴隆县	0.25	25.75	26.76	78.88	65.88	未见	有
2021年承德县	0.21	30.07	24.29	83.00	53.79	未见	有
2022年承德县	0.22	28.07	24.79	81.79	52.36	未见	有

集现象,锌含量高达65~94 mg/kg,远超土壤有效锌5级标准;铜含量为24.25~30.25 mg/kg,也远超有效铜5级标准阈值。这种重金属的长期高浓度富集,不仅可能对土壤微生物活性和植物生长产生抑制作用,更关键的是增加了其通过食物链传递并在生物体内积累的风险,对农产品安全和生态系统健康构成潜在威胁。

土壤样本中均检出酞酸酯类物质(标注“有”)。酞酸酯作为塑料增塑剂的核心成分,主要来源于设施农业中广泛使用的农膜、灌溉管道等塑料制品的降解释放。此类化合物可在蔬菜等作物组织中富集,最终对人体免疫及代谢系统构成潜在健康威胁。

综上所述,承德设施土壤已呈现复合污染特征:重金属与有机污染叠加,高量化肥投入导致盐分积累及养分失衡。亟需开展污染源管控(如规范农膜回收、化肥减量),并优先治理镉污染,防止通过农产品链危及人体健康。

3 承德市设施土壤绿色改良技术

随着种植年限增加,土壤板结盐渍化问题凸显,典型症状包括:黄瓜叶缘枯焦、番茄生理性卷叶、植株缺水萎蔫等;土壤表层可见绿苔、砖红色斑或盐霜。究其根源,系长期重化肥、大水漫灌等非科学管理所致。土壤板结抑制根系向下生长,诱发植株衰弱与病害频发,进而增加农药依赖,形成“土壤退化-病害加剧-农残风险”恶性循环。亟需从土壤改良源头切入,构建健康的根际环境以保障蔬菜优质安全生产。

3.1 增施有机肥

有机肥含有丰富的有机质和各种营养元素,还可使土壤疏松多孔,并能和矿物质土粒结合,形成良好的土壤团粒结构,降低土壤黏着性。因此,对于板结的土壤,底肥应以优质有机肥为主,少施化肥,中后期追肥以吸收率高的水溶性肥料为主^[9]。根据不同蔬菜的需肥特征,肥源数量等,采用撒施、条施、穴施等施肥方法。(1)畦作蔬菜,可采用撒施,将有机肥均匀铺撒在地表,用小型旋耕机或人工将有机肥均匀混拌入0~20 cm土层。(2)垄作蔬菜,可采用条施法,在做好的垄上开沟,将有机肥施入10~15 cm土层。(3)穴播或移栽的蔬菜,可采用穴施法,将有机肥施入播穴内5~10 cm土层。

3.2 合理施用化肥

以“基肥控量(化肥占总量30%~40%)、追肥

增效”为核心,依据土壤检测与作物需肥特性动态调控:基肥阶段实行化肥有机肥协同(缺氮补尿素、缺磷施过磷酸钙),严控超量引发的板结/盐渍化/地下水污染风险;追肥阶段采用少量多次策略,优选水溶肥滴灌/喷灌精准补给,规避表土撒氮肥(防氨挥发)及酸性土误施生理酸性肥等误区。针对种植模式差异化操作:畦作沟施/穴施(深10~15 cm覆土抑挥发)→垄作侧深施(距根10 cm避盐害)→移栽定植水带肥(促缓苗)。配套腐殖酸减量15%~30%及水肥一体化智能调控氮磷钾比例,阻断盐分累积路径,构建减污降耗可持续体系^[10]。

3.3 微生物降解

微生物降解技术通过施用特定功能菌剂分解土壤中残留的有机污染物,并钝化重金属离子,实现有害物质的生物转化或固定。在实施过程中,需严格把控菌剂活性。弱光照可避免紫外线对微生物的灭活作用,而及时翻耕则强化了菌群在土壤剖面的定殖扩散。通过持续激活土著与外来菌群的协同降解能力,不仅能显著降低有机污染物毒性,还可同步固定游离态重金属离子,阻断其向作物迁移的路径。长期应用可逐步恢复土壤微生态平衡,提升系统自净能力,为农田环境可持续治理提供生物学解决方案^[11]。

3.4 合理轮作

合理轮作体系下,豆科作物通过根系与固氮菌共生形成根瘤结构,将大气氮素高效转化为土壤有效氮,显著提升氮营养库容。豆科植株翻压还田后,其庞大的根系网络与茎叶有机质在土壤微生物驱动下逐步腐解,同步释放氮磷钾以及微量元素,并促进土壤团粒结构形成,从根本上改善板结、黏重等物理障碍。这一过程本质是植物-微生物协同的生态引擎,既降低外源化肥依赖,又激活土壤碳氮循环。这种基于农田生物多样性自调节的治理路径,在修复污染的同时重建土壤健康微生态,形成抗逆性持续增强的可持续耕作模式。

3.5 推广水肥一体化技术

大力推广菜田滴灌、微喷灌技术,这种局部湿润方式既可满足作物根系需水,又能避免传统漫灌导致的土壤表面持续高湿状态,从源头上抑制喜湿型病原菌的繁殖,降低病害发生风险。水肥一体化技术的整合应用,使灌溉系统升级为养分高效传递载体。依托滴灌/微喷灌设施,将可溶性肥料精准投送至作物根系密集区,在减少养分地表径流与深层渗漏的同时,显著提高肥料利用

率。这种节水节肥的协同效应,直接降低了农药施用需求,可以减少病害的发生,养分精准供给抑制杂草竞争从而减少除草剂投入,最终形成“以水调肥、以肥抗病、减药护生态”的可持续种植闭环^[12]。

4 结 论

承德设施土壤调查揭示了设施土壤存在退化风险,其数据价值在于精准定位“盐渍化-酰胺酯-重金属”协同治理靶点。提出的绿色技术体系以有机改良为核心、精准管理为工具、政策法规为保障,不仅适用于承德,更为类似区域提供了可复制的可持续发展路径。未来需要加强技术落地与长期生态效益追踪,推动“土壤健康”成为京津冀农业高质量发展的核心指标。

参考文献:

- [1] 巩龙达,郭德浩,金树权,等.不同种植年限茶园土壤氮磷养分流失规律[J].浙江农业科学,2022,63(2):280-283.
GONG L D, GUO D H, JIN S Q, et al. Regular pattern of nitrogen and phosphorus losses in tea plantation with different cultivation years[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(2): 280-283. (in Chinese)
- [2] 卢维宏,刘娟,张乃明,等.中国典型设施栽培土壤Cu、Zn累积特征及风险预测[J].农业工程学报,2021,37(11):189-196.
LU W H, LIU J, ZHANG N M, et al. Accumulation characteristics and risk prediction of Cu and Zn contents in typical facility soils in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11): 189-196. (in Chinese)
- [3] 辛焱,孙振营,张波.设施蔬菜土壤连作障碍及治理措施[J].吉林农业科学,2008,33(6):100-102.
XIN Y, SUN Z Y, ZHANG B. The obstacle in soil of succession planting vegetables in protected cultivation and control measurements[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2008, 33(6): 100-102. (in Chinese)
- [4] TAYLOR M D, KIM N D, HILL R B, et al. A review of soil quality indicators and five key issues after 12yr soil quality monitoring in the Waikato region[J]. Soil Use & Management, 2010, 26(3): 212-224.
- [5] 沃惜慧,杨丽娟,曹庭悦,等.长期定位施肥下设施土壤重金属积累及生态风险的研究[J].农业环境科学学报,2019,38(10):2319-2327.
WO X H, YANG L J, CAO T Y, et al. Accumulation and ecological risk of heavy metals in greenhouse soil under long-term fertilization[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(10): 2319-2327. (in Chinese)
- [6] ALI M M, ANWAR R, YOUSEF A F, et al. Influence of bagging on the development and quality of fruits[J]. Plants, 2021, 10(2): 358.
- [7] MENG J F, NING P F, XU T F, et al. Effect of rain-shelter cultivation of *Vitis vinifera* cv. Cabernet Gernischet on the Phenolic profile of berry skins and the incidence of grape diseases[J]. Molecules, 2012, 18(1):381-397.
- [8] 陈毛华,刘明广,郭斌,等.阜阳市颍州区城郊菜地重金属污染调查与评价[J].东北农业科学,2016,41(3):37-40.
CHEN M H, LIU M G, GUO B, et al. Investigation and evaluation of heavy metals pollution in suburban vegetable soils in Yingzhou District of Fuyang City[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2016, 41(3): 37-40. (in Chinese)
- [9] 刘雪.设施蔬菜土壤恶化状况分析[J].西北园艺,2022(5):46-47.
LIU X. Analysis of soil deterioration in facility vegetables[J]. Northwest Horticulture, 2022(5): 46-47. (in Chinese)
- [10] 王芳,王晓立,张颖,等.设施蔬菜复种连作对土壤理化性质和生物学特性的影响[J].江苏农业科学,2022,50(7):214-220.
WANG F, WANG X L, ZHANG Y, et al. Influences of multiple planting and continuous cropping of facility vegetables on soil physicochemical properties and biological properties[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(7): 214-220. (in Chinese)
- [11] 蔡尽忠,王理玲,邓盈.蔬菜废弃物堆肥对设施蔬菜连作土壤生态质量的改良效果[J].中国瓜菜,2024,37(3):151-157.
CAI J Z, WANG L L, ZHENG Y. Improvement effect of vegetable waste composting on soil ecological quality of continuous vegetable cropping in facilities[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2024, 37(3): 151-157. (in Chinese)
- [12] 李嘉欣,李智,郭明月,等.不同种植年限设施蔬菜土壤的理化性质及对供磷能力的影响[J].江苏农业科学,2024,52(1):210-218.
LI J X, LI Z, GUO M Y, et al. Physical and chemical properties of vegetable soil with different planting years and their effects on phosphorus supply capacity[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 210-218. (in Chinese)

(责任编辑:范杰英)