

灌溉方式及腐植酸用量对温室内土壤 Cd 迁移的影响

刘 慧^{1,2,3}, 袁宏伟³, 朱方伟³, 郭红岩¹

(1.南京大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093; 2.河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098; 3.河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘 要:目前,我国温室大棚栽培面积呈逐年递增趋势。与露地栽培相比,温室大棚栽培肥料用量大,土壤表层养分含量高,土壤污染严重,直接影响农产品的品质和栽培经济效益。采用温室内土柱模拟试验,研究了不同灌溉方式以及腐植酸用量下土壤 Cd 的迁移转化行为。结果表明,添加腐植酸促进表层土壤 Cd^{2+} 向下迁移,该迁移行为与灌溉方式、腐植酸添加量关系密切,随腐植酸用量的增大,灌溉淋出的 Cd^{2+} 量逐渐增加。与常规灌溉相比,滴灌使 Cd^{2+} 多存在于土壤的表层,通过减少 Cd^{2+} 的淋滤量而减轻对地下水安全的威胁。

关键词:温室;滴灌;常规灌溉;Cd;腐植酸

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)07-1310-05

Effect of Irrigation Methods and Humic Acid Supply on Soil Cd Translocation in Greenhouse

LIU Hui^{1,2,3}, YUAN Hong-wei³, ZHU Fang-wei³, GUO Hong-yan¹

(1.State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2.Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China; 3.College of Water Conservancy and Hydropower, HoHai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: At present, the areas of greenhouse in China are increasing year by year. Compared with open field culture, greenhouse cultivation was with much higher fertilizer supply, higher nutrient content in surface soil and heavier soil pollution, which evidently affected the quality of agricultural products and economic benefits. Soil column-leaching tests were conducted in greenhouse to study the leaching and translocation behaviors of soil Cd as influenced by different quantities of humic acid (HA) supply and irrigation methods. The results showed that the migration of Cd^{2+} from up-soil to deep-soil in the column was promoted by HA application and was also tightly related to the quantity of HA and different irrigation methods. Cd^{2+} concentration in soil leaching solution was significantly increased by the application of HA, which implied HA addition could promoted Cd desorption from soil. More Cd^{2+} stayed in the soil surface layer with drip irrigation than that with the conventional irrigation, which indicated the environmental risk of Cd pollution with drip irrigation was less than that of conventional irrigation for underground water.

Keywords: greenhouse; drip irrigation; conventional irrigation; cadmium; humic acid

不合理的化肥施用、城市生活垃圾和工业三废的不合理排放以及城市边缘地带农化产品的高强度使用,均对土壤质量以及农产品质量安全构成严重威胁^[1]。近年来,温室蔬菜种植快速发展,由于温室结

构的相对封闭性,内部土壤重金属污染更为严重。薄润香等发现太原市无公害蔬菜基地温室土壤综合污染指数接近警戒线^[2]。李德成等初步揭示了江苏盐城地区蔬菜大棚土壤中重金属元素的含量及其随大棚利用年限的变化趋势,同时指出,虽然在目前生产条件下该研究地区的蔬菜大棚土壤中重金属含量尚处于安全水平之内,但外界投入条件的改变可能会破坏这一动态安全水平,在今后蔬菜大棚的生产和发展中必须加以重视^[3]。有调查表明中国菜地土壤中重金属 Cd 的超标率较高^[4]。

收稿日期:2010-01-16

基金项目:污染控制与资源化研究国家重点实验室开放基金(PCRRF 06003);浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室开放基金(1061408125);河海大学引进人才启动基金(20844 0501106)

作者简介:刘 慧(1972—),女,山东龙口人,副教授,博士,主要从事土壤及水污染控制研究。E-mail:liuhui@hhu.edu.cn

由于重金属通常被土壤强烈吸附,生物有效性较低,在重金属污染土壤修复中,常施用 EDTA、低分子量有机酸等有机络合物来活化土壤重金属,但这种技术可能会增大重金属污染地下水的潜在危险性^[5]。腐植酸类物质(HA)在土壤改良与修复中有重要作用,已是农业和环境化学界公认的事实^[6-8],过去人们往往只从改良土壤结构和理化性质、维护微生物区系活性的角度来理解腐植酸的作用,但对腐植酸影响土壤重金属迁移的关注较少。

本试验研究不同灌溉方式(滴灌与常规灌溉)对土壤重金属迁移行为的影响。同时研究不同腐植酸添加量对土壤重金属淋滤及迁移的作用,以了解不同灌溉模式下土壤重金属迁移特征,为地下水安全性评价提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

土柱试验在河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室试验场的温室大棚内进行。试验场位于北纬 31°56′15″,东经 118°47′49″,地貌为丘陵岗地,年平均降雨量 1 106.5 mm,年平均温度 15.7℃,无霜期 237 d。供试土壤采自试验场农田 0~20 cm 耕层,土壤类型为黄棕壤,土壤理化性质如表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质(0~20 cm)

Table 1 Physical and chemical properties of the soil(0~20 cm)

容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
1.37	10.3	0.95	64.6	0.131	9.51	33.2

1.2 试验设计与实施

供试土壤经自然风干,敲碎大土块,过 4 cm 筛。土壤 Cd^{2+} 背景值为 $0.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于无污染土壤。重金属污染土壤是向无污染土壤加入 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 至 Cd^{2+} 含量为 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 制成。

土柱容器为直径 20 cm、高 115 cm 的 PPR 带底圆筒。柱子底部为铺加数层纱布和细石子的过滤层,并在底部的圆筒侧面安装收集土壤淋滤液装置。土柱下层为 40 cm 高的无污染土壤,上部为 20 cm 高的重金属污染土壤,污染土层与非污染土层之间以纱布隔离。装土时适时压实,使土壤容重保持在 $1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右。将各土柱土壤加水至饱和状态。

设灌溉方式和腐植酸配比两个因素进行试验,灌

溉方式分滴灌和常规灌溉。常规灌溉为直接向土柱中加要求水量,滴灌为利用装有滴头的容器模拟滴灌装置向土柱中加水。灌溉量参照《农田灌溉水质标准》(GB 5084—1992)中小麦/玉米地的灌溉定额($300 \text{ m}^3\cdot 0.66 \text{ hm}^{-2}\cdot \text{a}^{-1}$)。根据供试土柱的横截面积计算得出相应灌水量,其相应的年灌溉量在 10 d 之内对土柱进行 1 年灌溉量灌溉试验。腐植酸配比按照腐植酸与 Cd 质量比:0、50%、100%施入土壤。每处理 3 次重复。对土柱进行灌溉试验,每 2 d 取 1 次淋滤液,总共 5 批淋滤液水样。水样经过滤后直接测定其 Cd 含量。

1.3 试验采样与测试

由于在浇水过程中土柱土壤发生沉降,根据初期放置在底层无污染土壤与表层重金属污染土壤之间的标记(纱布),将表层土壤和底层土壤(分 2 层:20~40 cm,40~60 cm)分别混合均匀、取样,测定土壤全 Cd 含量。

淋滤液重金属 Cd 含量测定:火焰原子吸收测定法。

土壤重金属 Cd 含量测定:称取 5.000 g 土壤样品(过 100 目筛),加入 20 mL 王水后加热至棕色氮氧化物基本赶完,取下冷却至室温。然后加入 10~20 mL 高氯酸消煮至样品呈灰白色糊状,取下冷却至室温,加水过滤定容。火焰原子吸收测定土壤 Cd 含量。

1.4 测定方法与数据分析

土样用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 消煮制备待测液。溶液中的 Cd^{2+} 用日立 Z-8100 型原子吸收光谱仪(火焰法)测定。

数据结果为 3 次重复的平均值,用 Duncan 法进行差异显著性测验。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉方式下腐植酸对土壤中 Cd 迁移的影响

表 2 为施用腐植酸后,土壤滴灌与常规灌溉方式下不同土层(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm)中 Cd^{2+} 的含量。由表 2 可见,与常规灌溉相比,滴灌使 Cd^{2+} 更多保留在表层土中。滴灌条件下,未施加腐植酸的土柱表层土壤 Cd^{2+} 向 40 cm 及 60 cm 下迁移量最少,而随着腐植酸施入量的增加, Cd^{2+} 由表层土向下迁移的量也在增大,其中 100%腐植酸处理组 20~60 cm 土层中迁入的 Cd^{2+} 量比对照组(0 腐植酸添加量)高出 71.0%。常规灌溉方式下未加腐植酸的土柱土壤表层的 Cd^{2+} 有明显的向下迁移现象,随腐植酸加入量的增加,20 cm 以下土层中 Cd^{2+} 含量逐渐增加。

表 2 土柱各土层 Cd²⁺的含量(mg·kg⁻¹)Table 2 Cd²⁺ content in the different layers of soil(mg·kg⁻¹)

灌溉方式	HA/Cd	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
滴灌	0	17.8a	0.773b	0.861b
	50%	13.3b	0.971ab	0.913b
	100%	12.4b	1.18a	1.62a
常规灌溉	0	20.2a	1.04b	1.07b
	50%	16.1b	1.35a	1.27a
	100%	10.3c	1.21ab	1.13ab

注:不同小写字母表示同一灌溉方式同列数值间差异达 0.05 水平。

由图 1、图 2 可以看出,两种灌溉方式未添加 HA 处理,土壤中 90%以上 Cd 依然存在于表层土中。随着腐植酸使用量增加,土壤中 Cd 明显地由表层向下迁移。滴灌方式下 100%HA/Cd 处理 Cd 迁移量最大,20~60 cm 土层 Cd 占总量的 18.3%,由此可知,向土壤中施加腐植酸可促进土壤中 Cd 向水溶态转化。

2.2 不同灌溉方式下腐植酸对 Cd 淋滤行为的影响

图 3 和图 4 分别为施用不同比例的腐植酸后,滴灌与常规灌溉方式下土壤淋出液中 Cd²⁺的动态变化。

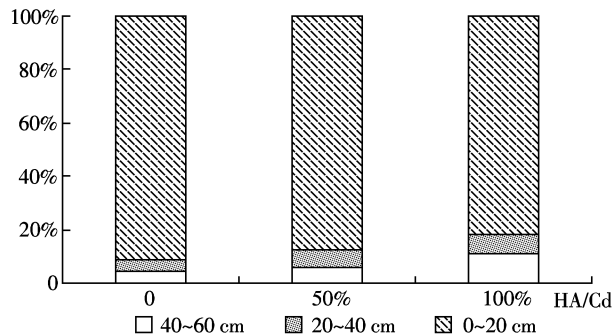


图 1 滴灌方式下腐植酸处理对各层土壤 Cd 总量的影响

Figure 1 Total Cd concentration of soils in the different layers under drip irrigation with HA-treatment

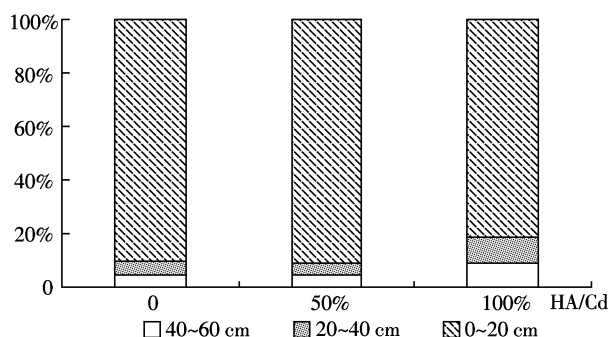


图 2 常规灌溉下腐植酸处理对各层土壤 Cd 总量的影响

Figure 2 Total Cd concentration of soils in the different layers under conventional irrigation with HA-treatment

由图可见,滴灌方式下土壤中水溶性 Cd 向下淋洗过程比常规灌溉方式缓慢。滴灌方式下,施用腐植酸 8 d 后,土壤淋出液中 Cd²⁺的浓度达到高峰;10 d 后,土壤淋滤液中 Cd²⁺浓度迅速下降至最低点。常规灌溉下则是前 3 批取样,即在前 6 d 里土壤 Cd²⁺缓慢淋出,自第 8 d 取样后 Cd²⁺含量急速下降。综合可知,腐植酸对于土壤中的 Cd 具有明显的解吸作用,它可以促进土壤中不溶性 Cd 向水溶态转化,这样同时也增大了土壤中 Cd 对地下水质量的影响。

常规灌溉方式对土壤中水溶性 Cd 的淋洗作用明显要大于滴灌方式,这可能更容易造成土壤中水溶性 Cd 大量淋洗到地下水中,威胁地下水的安全。

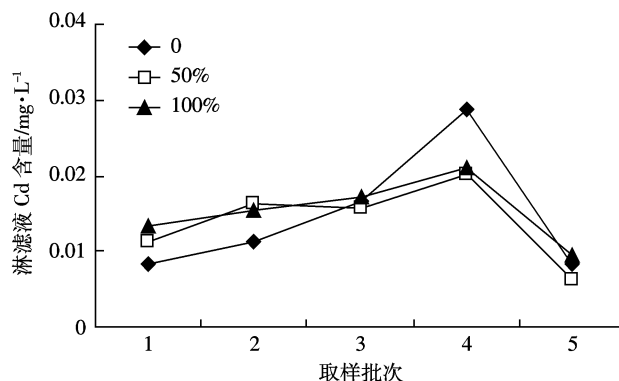


图 3 滴灌方式下淋滤液 Cd 的动态变化

Figure 3 Cd concentration dynamics in leachate under drip irrigation

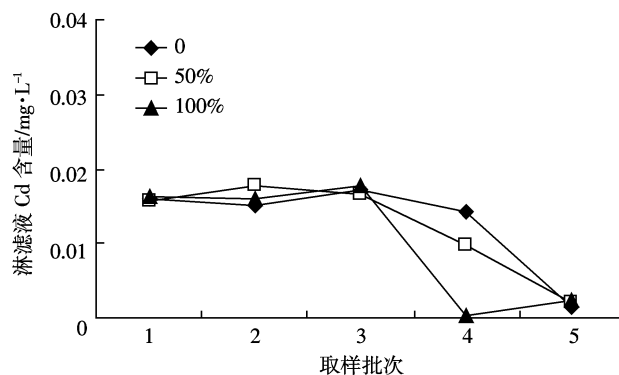


图 4 常规灌溉方式下淋滤液 Cd 的动态变化

Figure 4 Cd concentration dynamics in leachate under conventional irrigation

3 讨论

目前我国温室多用于进行蔬菜和花卉生产,土壤由于缺乏雨水的淋洗,往往容易造成重金属、盐离子等在土壤中的富集。运用合理的灌溉方式将重金属

转移至既不影响农作物的品质,又不威胁地下水安全的位置,对于有效解决温室土壤重金属富集的特点将更为有效。

地下水重金属污染是污染物在地表-土壤-地下水系统中进行各种物理、化学和生物过程的结果。在一定的条件下,土壤中的重金属可随水的移动而发生迁移,因此积累在土壤中重金属的移动性受到人们广泛关注。田间实地采集剖面土样的分析结果也表明,重金属主要积累在表层^[12-13]。通过淋洗试验,说明在淋滤过程中,水溶态重金属逐步由土柱上层向下层迁移,所以促成土层从上到下水溶态重金属含量都表现出由小变大的垂直分布规律^[9]。研究资料表明,污水灌溉导致土壤表层富集的高含量重金属被淋出的趋势并不明显^[14]。严连香等也认为重金属污染企业带来的重金属对造成该地区浅层地下水的污染可能性不大。这与土壤性质,比如土壤表层黏性成分和有机质含量高有密切关系^[15]。

对于重金属污染土壤,由于重金属通常被强烈吸附,其生物有效性较低,因而 EDTA、低分子量有机酸等有机络合物常被用来活化土壤重金属^[5]。本试验表层土壤中 Cd 并未被大量淋洗进入下层土柱,这可能由于 HA 的添加吸附了 Cd²⁺,也可能由于土壤胶体将 Cd 吸附,致使其难以被淋洗下来。有研究表明,有机物对土壤 Cd 的溶出能力与其浓度、酸度和螯合性能等因素有关^[10]。Cd 较易为土壤颗粒强烈吸附,因而其溶解度较低,土壤溶液中 Cd²⁺的浓度也较低,且表现出明显的腐植酸络合溶解滞后效应,本试验发现腐植酸加入 8 d 后土壤淋出液高于第 6 d,随后随时间而迅速下降。其他学者研究发现随腐植酸投入比的加大,可溶态 Cd 含量明显下降^[11],这与本文的试验结果一致。结果说明腐植酸在棕壤上有明显降低有害的活性 Cd 的净化功能,其作用机制在于腐植酸具备的络合(螯合)能力和胶体特性,确认腐植酸是减少土壤重金属污染地下水的优选材料。

4 结论

在本试验设计的剂量范围内,腐植酸能促进污染温室土壤 Cd 的淋滤,提高了土壤溶液中可溶性 Cd 的含量。不同灌溉方式下腐植酸修复重金属 Cd 污染土壤对地下水的影响作用不同,滴灌方式相对安全。在滴灌方式下,水溶性 Cd 向下迁移过程缓慢,因此可能减少对地下水的危害。但是腐植酸的添加量以及土壤的最佳灌水量还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 王丽慧,王翠红,叶丽丽,等.城郊蔬菜地土壤铅和镉污染研究进展[J].湖南农业科学,2009,5:50-52,57.
WANG Li-hui, WANG Cui-hong, YE Li-li, et al. Progress in studying lead and cadmium pollution in soils for vegetable cultivation in urban areas[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2009, 5:50-52, 57.
- [2] 薄润香,樊文华,王宏燕.太原市 5 个无公害蔬菜基地温室土壤重金属含量的研究[J].山西农业科学,2008,36(9):43-46.
BO Run-xiang, FAN Wen-hua, WANG Hong-yan. Study on greenhouse soil heavy metals in five pollution-free vegetable bases in Taiyuan[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2008, 36(9):43-46.
- [3] 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 De-cheng, LI Zhong-pei, ZHOU Xiang, et al. Contents of heavy metal elements in soils of vegetable greenhouses different in age[J]. *Rural Eco-Environment*, 2003, 19(3):38-41.
- [4] 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.
ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, MEI Xu-rong. Heavy metal contention soils of vegetable-growing lands in China and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11):2507-2517.
- [5] 吴龙华,骆永明,章海波.有机络合强化植物修复的环境风险研究[J].土壤,2001,4:189-192.
WU Long-hua, LUO Yong-ming, ZHANG Hai-bo. Study on the environmental risk of strengthening plant restoration by chelating agents[J]. *Soil*, 2001, 4:189-192.
- [6] 陈亚华,刘 亮,王桂萍,等.螯合诱导植物修复中污染土壤的重金属淋滤行为[J].南京农业大学学报,2007,30(4):46-51.
CHEN Ya-hua, LIU Liang, WANG Gui-ping, et al. The leaching behavior of heavy metals in contaminated soils during the process of chelant-enhanced phytoremediation[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2007, 30(4):46-51.
- [7] 马明广,周 敏,蒋煜峰,等.不溶性腐植酸对重金属离子的吸附研究[J].安全与环境学报,2006,6(3):68-71.
MA Ming-guang, ZHOU Min, JIANG Yu-feng, et al. Study on adsorption of heavy metal ions onto insolubilized humic acid[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(3):68-71.
- [8] 王亚军,朱 琨,王进喜,等.腐植酸对铬在砂质土壤中吸附行为的影响研究[J].安全与环境学报,2007,7(5):42-47.
WANG Ya-jun, ZHU Kun, WANG Jin-xi, et al. Study on the humic acid absorption of chromium in sandy soil[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(5):42-47.
- [9] 杜辉锋,李取生,陈连运,等.淋洗脱盐对滩涂土壤孔隙水重金属垂直迁移的影响[J].生态科学,2009,28(1):62-65.
DU Ye-feng, LI Qu-sheng, CHEN Lian-yun, et al. Effects of leaching desalination on the vertical movement of heavy metals in the pore water of tidal flat soils during reclamation[J]. *Journal of Ecologic Science*, 2009, 28(1):62-65.
- [10] 何雨帆,刘宝庆,白厚义,等.腐植酸对污染土壤中镉解吸的影响[J].广西农学报,2006,21(5):1-3.

- HE Yu-fan, LIU Bao-qing, BAI Hou-yi, et al. Effect of humus on desorption behavior of cadmium in paddy soil[J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2006, 21(5): 1-3.
- [11] 王 晶, 张旭东, 李 彬, 等. 腐植酸对土壤中 Cd 形态的影响及利用研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 185-187.
- WANG Jing, ZHANG Xu-dong, LI Bin, et al. The effect of humid acid on the cadmium transformation and the mechanism[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(3): 185-187.
- [12] 章明奎. 污染土壤中重金属的优势流迁移[J]. 环境科学学报, 2005, 25(2): 192-197.
- ZHANG Ming-kui. Preferential transfer of the heavy metals in the polluted soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(2): 192-197.
- [13] 张春燕, 王学锋, 王建玲, 等. 新乡市水源地土壤重金属含量特征及其对地下水的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1355-1358.
- ZHANG Chun-yan, WANG Xue-feng, WANG Jian-ling, et al. Quantitative characteristics of soil heavy metals in tap water resources field of Xinxiang and their effects on groundwater[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9): 1355-1358.
- [14] 杨 军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 中水灌溉下重金属在土壤中的垂直迁移及其对地下水的污染风险[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 449-456.
- YANG Jun, ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, et al. Leaching of heavy metals in soil column under irrigation reclaimed water: A simulation experiment[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 449-456.
- [15] 严连香, 黄 标, 邵学新, 等. 不同工业企业周围土壤-作物系统重金属 Pb、Cd 的空间变异及其迁移规律[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 52-62.
- YAN Lian-xiang, HUANG Biao, SHAO Xue-xin, et al. Spatial variability and transfer of Pb and Cd in soil-crop system around different types of factories[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 52-62.