

## 再生水灌溉方式对重金属在土壤中残留累积的影响\*

齐学斌<sup>1,3</sup> 李平<sup>1</sup> 樊向阳<sup>1</sup> 赵志娟<sup>1</sup> 樊涛<sup>1</sup> 黄仲冬<sup>1</sup> 乔冬梅<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所 新乡 453003; 2. 中国农业科学院研究生院  
北京 100083; 3. 西北农林科技大学 杨凌 712100)

**摘要** 不同灌溉技术(沟灌、地下滴灌)和灌水方式(充分灌溉、分根交替灌溉)下再生水灌溉对重金属在土壤中残留影响的田间试验表明:其他条件相同时,收获后充分灌水小区土壤重金属Cd含量高于分根交替灌水小区;再生水(二级处理污水)地下滴灌小区高于二级处理污水加氯地下滴灌小区;二级处理污水沟灌小区高于清水灌溉小区;充分灌溉下二级处理污水滴灌小区低于沟灌小区,而分根交替灌溉下沟灌低于滴灌。土壤Pb含量的变化规律与Cd基本相似,除滴灌下二级处理污水区低于二级处理污水加氯小区,无论充分灌溉还是分根交替灌溉均为滴灌低于沟灌。不同处理收获后土壤Pb含量均有不同程度降低;而二级处理污水灌溉小区土壤Cd含量较试验前增加0.62%~7.78%,其他处理均有不同程度减小。试验结果为再生水资源的农业安全利用提供了技术依据。

**关键词** 再生水 灌水水质 灌溉技术 灌水量 重金属残留

**中图分类号:** S237.5; X131.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2008)04-0839-04

### Soil heavy metal residue under different treated waste-water irrigation technique and management

QI Xue-Bin<sup>1,3</sup>, LI Ping<sup>1</sup>, FAN Xiang-Yang<sup>1</sup>, ZHAO Zhi-Juan<sup>1</sup>, FAN Tao<sup>1</sup>,  
HUANG Zhong-Dong<sup>1</sup>, QIAO Dong-Mei<sup>1,2</sup>

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China;  
2. Graduate School, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100083, China;  
3. Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract** Different irrigation techniques (furrow irrigation and subsurface drip irrigation) and management (full irrigation and partial rootzone drying irrigation) were used to study heavy metal residue in soils irrigated with treated waste-water. The results show that Cd content in soils after harvest with full irrigation is higher than in that with partial rootzone drying irrigation under the same irrigation technique and water quality. Cd content in soils under subsurface drip irrigation with treated waste-water is higher than in those with treated waste-water and a few additional chloride; that under furrow irrigation with treated waste-water is higher than in soils with fresh water irrigation. Cd content in soils under full irrigation with treated waste-water and subsurface drip irrigation is lower than those with furrow irrigation. However, Cd content in soils with partial rootzone drying irrigation and subsurface drip irrigation is higher than in soils with furrow irrigation. Pb content exhibits the same trend as Cd for almost all the treatments, except that Pb content in soils under subsurface drip irrigation with treated waste-water is lower than that with treated waste-water and a few additional chloride; also those for soils under subsurface drip irrigation with treated waste-water are lower than for furrow irrigation under both partial rootzone drying irrigation and full irrigation. Soil Pb residue decreases under different treatments after harvest, while soil Cd residue under treated waste-water irrigation increases by 0.62%~7.78% after harvest (though it decreases under other treatments). The study provides a solid scientific guide for treated waste-water irrigation.

**Key words** Treated waste-water, Water quality, Irrigation technique, Irrigation management, Heavy metal residue  
(Received Jan. 29, 2007; accepted June 14, 2007)

\* 欧盟第六框架项目(FOOD-CT-2005-023168)、科技部国际合作项目(2006DFA72190)、国家科技支撑计划(2006BAD17B02)和国家高技术研究发展计划(863计划)(2006AA100205)资助

齐学斌(1963~),男,硕士,研究员,主要研究方向为水资源与环境。E-mail: qxb6301@yahoo.com.cn

收稿日期:2007-01-29 接受日期:2007-06-14

淡水资源日益紧缺与农产品质量安全是近年来困扰全球的主要问题。面对日趋严重的水危机,世界各国都在寻求相应的对策,而地球上淡水资源有限,所以再生水开发成为人类解决水危机的根本出路之一。再生水是指城市污水经处理设施深度净化后达到一定水质标准,能在一定范围内重复使用的水。再生水作为一种边界水源,除用作工业冷却、住宅冲厕、河湖景观、洗车用水等方面外,在农业灌溉利用方面越来越受到重视<sup>[1]</sup>。据统计,2004年中国废污水排放量为693亿m<sup>3</sup>,污水处理率20%左右,预计到2030年全国再生水资源量为680亿~850亿m<sup>3</sup><sup>[2,3]</sup>。按再生水灌溉回用率30%计算,到2030年再生水至少可替代204亿m<sup>3</sup>清洁水资源,这对缓解中国水资源危机具有重要意义。然而,再生水中除含有丰富的营养元素有利于作物生长外,还含有大量盐分、痕量有机污染物、痕量重金属等不利于作物生长和导致土壤质量恶化的污染物,特别是多数重金属在土壤中不为生物所分解,还可在生物体内富集和转化,超过一定限度时产生毒害,并且一旦其毒害作用表现出来就难以消除。

表 1 田间试验设计

Tab. 1 Design of plot experimental treatments

处理 Treatment	灌水水质 Irrigated water quality	灌溉技术 Irrigation technique	灌水量 Irrigated water amount
E	二级处理污水加氯 Treated waste-water with chloride	地下滴灌 Subsurface drip irrigation	分根交替灌溉 Partial rootzone drying
F	二级处理污水加氯 Treated waste-water with chloride	地下滴灌 Subsurface drip irrigation	充分灌溉 Full irrigation
G	清水 Fresh water	沟灌 Furrow irrigation	分根交替灌溉 Partial rootzone drying
H	清水 Fresh water	沟灌 Furrow irrigation	充分灌溉 Full irrigation
I	二级处理污水 Treated waste-water	地下滴灌 Subsurface drip irrigation	分根交替灌溉 Partial rootzone drying
J	二级处理污水 Treated waste-water	地下滴灌 Subsurface drip irrigation	充分灌溉 Full irrigation
K	二级处理污水 Treated waste-water	沟灌 Furrow irrigation	分根交替灌溉 Partial rootzone drying
L	二级处理污水 Treated waste-water	沟灌 Furrow irrigation	充分灌溉 Full irrigation

试验所用二级处理污水化学成分为:Pb 0.43  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , Cr 0.389  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , pH 6.65, 总磷 2.4  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 总氮 40  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+ < 5 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , COD  $< 20 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

田间试验在中国农业科学院农田灌溉研究所洪门试验站进行,试验作物为马铃薯,试验小区24个,小区长、宽分别为11.7 m、6.0 m,随机区组设置。2006年6月3日结合灌水施肥(每小区施尿素430 g)。全生育期内其他管理措施相同。马铃薯移栽时间和收获时间分别为2006年4月5日和2006

分根交替灌溉技术是对传统灌溉技术的改进,可提高水分利用效率<sup>[4,5]</sup>,改善作物价值如促进早熟、增加含糖量等<sup>[6,7]</sup>。地下滴灌与分根交替灌溉技术相结合用于再生水灌溉,节水、杀菌效果明显,但实施这些新技术对重金属在土壤中迁移转化规律及残留有无影响,目前尚未见报道。鉴于此,本文通过小区试验,研究了不同再生水灌溉技术(地下滴灌、沟灌)和灌水方式(充分灌、分根交替灌溉)下重金属在土壤中的累积过程,为防止重金属对土壤环境的污染,进而为再生水资源的农业安全高效利用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

试验用灌溉水源为河南省新乡市骆驼湾污水处理厂处理后的再生水,污水水源主要为生活污水,含有少量的工业污水。试验采用3因素试验设计:因素A为灌溉技术,分地下滴灌和沟灌2个水平;因素B为灌水水质,分清水、再生水(二级处理污水)和二级处理污水加氯3个水平;因素C为灌水量,分充分灌溉和分根交替灌溉2个水平。试验共设8个处理(表1),每个处理设3个重复。

年6月20日。

土壤中Cd、Pb及土壤含水量的测定:马铃薯全生育期内,分别于2006年4月4日、5月26日、6月16日和6月20日取样分析土壤Cd、Pb含量。每个小区取1个混合样,取样深度0~60 cm。滴灌处理,以滴头为中心,半径为15 cm的圆内布置4个取样点;沟灌处理,在以两个作物间距(30 cm)为直径的圆内布置4个取样点。土壤含水量1周测定2次,测定深度同前。土壤Cd、Pb含量采用王水-高氯酸法、原子吸收分光光度计测定。土壤含水量采

用 TDR 测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 Cd 在土壤中残留累积特征

#### 2.1.1 灌水量对 Cd 在土壤中残留动态的影响

相同灌溉技术和灌水水质下,土壤中 Cd 含量充分灌水小区(F、H、L)高于分根交替灌水小区(E、G、K),可能的原因有两点:一是充分灌溉灌水定额大于分根交替灌溉,向土壤输入的 Cd 较多;二是土壤 Cd 在低浓度时( $<10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )有刺激作物生长的作用<sup>[8]</sup>,分根交替灌水条件下土壤 Cd 对作物的刺激作用较充分灌溉更强,增加了作物对土壤 Cd 吸收(表 2)。

#### 2.1.2 灌水水质对 Cd 在土壤中残留动态的影响

相同灌水水量和灌溉技术下,不同灌水水质处理对比分析表明:地下滴灌条件下,二级处理污水灌溉小区(I、J)土壤 Cd 含量高于二级处理污水加氯灌溉小区(E、F);沟灌条件下,二级处理污水灌溉小区(K、L)土壤 Cd 含量高于清水灌溉小区(G、H)。地下滴灌条件下两种水质处理土壤 Cd 含量差异可能的原因:一是影响土壤 Cd 离子浓度的因素包括吸附、沉淀和络合等作用<sup>[9]</sup>,二级处理污水加氯条件下,Cd 与氯化物络合形成的络离子可溶于水,增加了 Cd 活性,降低了土壤 Cd 含量;二是土壤 Cd 在低浓度时对微生物有刺激作用,微生物可将土壤有机质矿化,产生无机养分,间接刺激作物生长增加了作物对土壤 Cd 的吸收。沟灌条件下两种水质处理土壤 Cd 含量差异原因,除土壤中 Cd 对微生物刺激作用增加了作物对土壤 Cd 的吸收外,还由于二级处理污水灌溉较清水灌溉向土壤输入了更多 Cd 离子(表 2)。

表 2 不同再生水灌溉处理下不同时期土壤 Cd 含量

Tab.2 Soil Cd contents under different irrigation treatments of treated waste-water at different time  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理 Treatment	取样日期(月-日) Sampling date (month-day)			
	04-04	05-26	06-16	06-27
E	1.299	1.095	1.094	1.208
F	1.299	1.120	1.184	1.293
G	1.299	1.200	1.186	1.173
H	1.299	1.247	1.221	1.191
I	1.299	1.433	1.416	1.400
J	1.299	1.329	1.340	1.376
K	1.299	1.235	1.199	1.307
L	1.299	1.342	1.359	1.385

#### 2.1.3 灌溉技术对 Cd 在土壤中残留动态的影响

相同灌水水质和灌水量下,沟灌和滴灌技术对土壤 Cd 残留的影响不同。二级处理污水充分灌水

沟灌处理(L)马铃薯收获后(6月27日)土壤 Cd 累积较滴灌处理(J)高 0.66%,而分根交替沟灌处理(K)收获后土壤 Cd 累积较滴灌处理(I)低 6.65%(表 2)。

### 2.2 Pb 在土壤中残留累积特征

#### 2.2.1 灌水量对 Pb 在土壤中残留动态的影响

相同灌溉技术和灌水水质下,充分灌溉小区(F、H、J、L)土壤 Pb 含量高于分根交替灌溉小区(E、G、I、K);收获后(6月27日)充分灌溉小区土壤 Pb 平均含量较分根交替灌溉小区高  $0.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 3)。

表 3 不同再生水灌溉处理下不同时期土壤 Pb 含量

Tab.3 Soil Pb contents under different irrigation treatments of treated waste-water at different time  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理 Treatment	取样日期(月-日) Sampling date (month-day)			
	04-04	05-26	06-16	06-27
E	4.782	4.583	3.851	3.242
F	4.782	4.672	4.232	3.594
G	4.782	4.282	3.376	3.050
H	4.782	4.388	3.853	3.490
I	4.782	3.847	3.295	3.061
J	4.782	4.538	3.984	3.405
K	4.782	4.393	3.712	3.328
L	4.782	4.637	4.114	3.987

#### 2.2.2 灌水水质对 Pb 在土壤中残留动态的影响

相同灌溉技术和灌水水量下,不同灌水水质对土壤 Pb 含量影响的分析表明:地下滴灌下,二级处理污水加氯灌溉小区(E、F)土壤 Pb 含量高于二级处理污水灌溉小区(I、J);沟灌条件下,二级处理污水灌溉小区(K、L)土壤 Pb 含量高于清水灌溉小区(G、H)。说明沟灌下二级处理污水灌溉(K、L)较清水灌溉(G、H)增加了 Pb 向土壤中的输入(表 3)。

#### 2.2.3 灌溉技术对 Pb 在土壤中残留动态的影响

相同灌水水质和灌水量下,沟灌处理(K、L)土壤 Pb 残留累积较滴灌处理(I、J)高;收获期(6月27日)二级处理污水充分灌水沟灌处理(L)较滴灌处理(J)高 17.09%,分根交替沟灌处理(K)较滴灌处理(I)高 8.72%。地下滴灌条件下土壤水分较高,有利于马铃薯的生长,也间接促进了马铃薯对重金属的吸收(表 3),从而使土壤 Pb 积累较少。

### 2.3 Cd 和 Pb 在土壤中残留累积特征

土壤 Cd、Pb 残留累积分析结果见表 4。从表 4 可知,不同处理 Cd 和 Pb 在土壤中残留累积规律不同。二级处理污水灌溉较二级处理污水加氯灌溉和清水灌溉小区 Cd 残留量多,且收获后土壤 Cd 含量较本底值增加 0.62%~7.78%;收获后清水和二

级处理污水加氯分根交替灌溉 (G、E) 和充分灌溉 (H、F) 处理小区土壤 Cd 含量较本底值减少 9.70%、1.96%、8.31% 和 0.46%。收获后各个小区土壤 Pb 含量均有不同程度减小,最大减少量达本底值的 36.22%,最小为本底值的 16.62%。土壤 Pb 残留累积顺序为:二级处理污水加氯分根交替灌溉 > 二级处理污水分根交替灌溉,二级处理污水加氯充分灌溉 > 二级处理污水充分灌溉,清水分根交替灌

溉 < 二级处理污水分根交替灌溉,清水充分灌溉 < 二级处理污水充分灌溉。而 Cd 残留累积则表现为:二级处理污水加氯分根交替灌溉 < 二级处理污水分根交替灌溉,二级处理污水加氯充分灌溉 < 二级处理污水充分灌溉,清水分根交替灌溉 < 二级处理污水分根交替灌溉,清水充分灌溉 < 二级处理污水充分灌溉。灌水量对土壤 Cd、Pb 残留累积均表现为:分根交替灌溉 < 充分灌溉。

表 4 种植前(本底值)和收获后不同处理土壤的 Cd 和 Pb 含量

Tab. 4 Contents of Pb and Cd before planting (background) and after harvest under different treatments

处理 Treatment	Cd ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			Pb ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )		
	本底值 Background	收获后 After harvest	累积 Accumulation	本底值 Background	收获后 After harvest	累积 Accumulation
E	1.299	1.208	-0.091	4.782	3.242	-1.540
F	1.299	1.293	-0.006	4.782	3.594	-1.188
G	1.299	1.173	-0.126	4.782	3.050	-1.732
H	1.299	1.191	-0.108	4.782	3.490	-1.292
I	1.299	1.400	0.101	4.782	3.061	-1.721
J	1.299	1.376	0.077	4.782	3.405	-1.377
K	1.299	1.307	0.008	4.782	3.328	-1.454
L	1.299	1.385	0.086	4.782	3.987	-0.795

### 3 结论

对灌水水质、灌溉技术和灌溉量对土壤 Cd、Pb 含量影响的研究表明:相同灌溉技术和灌水水质下,马铃薯收获后充分灌溉土壤 Cd、Pb 含量高于分根交替灌溉土壤;相同灌溉技术和灌水量下,二级处理污水灌溉土壤 Cd 含量高于二级处理污水加氯灌溉;二级处理污水灌溉土壤 Cd 含量高于清水灌溉。灌水水质对 Pb 在土壤中残留的影响表现为:二级处理污水灌溉 < 二级处理污水加氯灌溉,二级处理污水灌溉 > 清水灌溉。马铃薯收获后,清水灌溉土壤 Cd 减少量较二级处理污水灌溉土壤多,清水分根交替灌溉和充分灌溉土壤 Cd 减少量达本底值的 9.70% 和 8.31%;各处理土壤 Pb 含量均有不同程度的减小,减少量最大达本底值的 36.22%,最小为本底值的 16.62%。不同灌溉技术对比分析表明:沟灌处理土壤 Pb 残留累积较滴灌处理高,因为地下滴灌条件下土壤水分较高,有利于马铃薯生长,也间接促进了马铃薯对重金属的吸收。相同灌水水质和灌水量下,充分灌水沟灌土壤 Cd 含量高于充分灌水地下滴灌土壤,分根交替沟灌土壤 Cd 含量小于分根交替地下滴灌土壤。

该研究是在田间试验的基础上,初步分析了再生水不同灌溉技术和灌溉方式下土壤重金属残留

累积规律,其运移机理有待于进一步研究。

### 参考文献

- [1] 侯利伟,黄占斌,苗战霞,等.再生水灌溉对玉米与大豆生长及水分利用效率的影响[J].中国生态农业学报,2007,15(6):35-39
- [2] 刘昌明,陈志凯.中国水资源现状评价和供需平衡发展趋势分析[M].北京:中国水利水电出版社,2001:25-26
- [3] 齐学斌,钱炬炬,樊向阳,等.污水灌溉国内外研究现状与进展[J].中国农村水利水电,2006,279(1):13-15
- [4] 孙景生,康绍忠,蔡焕杰,等.控制性交替灌溉技术的研究进展[J].农业工程学报,2001,17(4):1-5
- [5] 梁宗锁,康绍忠.控制性分根交替灌溉的节水效应[J].农业工程学报,1997,13(4):58-63
- [6] Loveys B. R., Dry P. R., Stoll M., et al. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops[J]. Acta Horticulturae,2001,537:187-197
- [7] Stikic R., Popovic S., Srdic M., et al. Partial root drying (PRD): A new technique for growing plants that saves water and improves the quality of fruit[J]. Bulg. J. Plant Physiol.,2003 (Special Issue):164-171
- [8] 陈怀满.土壤-植物系统中的重金属污染[M].北京:科学出版社,1996:34-87
- [9] 邵洪波.污水灌溉条件下冬小麦生长及重金属分布规律的试验研究[D].北京:中国农业大学,2002:24-30