再生水灌溉土壤对蔬菜食用安全的风险性评价

严　兴[1]，罗　刚[1]，陈琼贤[2]，曹　健[2]，卢岳英[1]，梁毅成[1]，卜伟林[1]
（1.广州市净水有限公司，广东 广州 510163；2.广东省农业科学研究院　蔬菜研究所，广东 广州 510640）

摘要：再生水灌溉是解决水资源短缺的潜在途径之一，关于再生水灌溉条件下土壤中重金属的迁移行为及其对表层土壤的污染风险至今仍缺乏研究。为此，进行了对不同水体浇灌蔬菜的试验研究。相比较污水浇灌和自来水浇灌，再生水灌溉不仅对土壤没有污染，还极大地节约了水资源成本，并为蔬菜提供了大量的生长元素。研究结果表明，再生水浇灌蔬菜长势优于自来水和污水浇灌蔬菜，且浇灌60 d后，再生水中的Cr、Cd、As、Hg、Pb、Ni、Zn和Cu在土壤中虽有一定的富集，但随着淋溶时间的延长，各种重金属质量分数保持不变；再生水浇灌的土壤在重金属垂直迁移上的质量分数变化也不大，基本呈水平趋势；与土壤环境质量标准（GB15618-1995）相比，再生水浇灌后的土壤重金属没有额外超标，优于蔬菜种植的土壤标准要求。风险综合评价等级为可承受（一级）风险。

关键词：污水；再生水；土壤；蔬菜；富集
中图分类号：X826　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673—1689（2015）06—0660—06

Plant Irrigated by Reclaimed Water and Risk Assessment

YAN Xing，*LUO Gang*，*CHEN Qiongxian*，*CAO Jian*，*LU Yueying*，*LIANG Yicheng*，*BU Weilin*
（1.Guangzhou Sewage Purification Co.，LTD，Guangzhou 510163，China；2.Vegetable Research Institute Guangdong Academy of Agriculture Sciences，Guangzhou 510640，China）

Abstract：Reclaimed water irrigation is a potential alternate source of water to help meet water shortages. There are few studies focus on the migration of heavy metals in soil and the topsoil contamination when reclaimed water is used for irrigation. The irrigation on vegetables using reclaimed water from different sources was studied. Reclaimed water irrigation didn't cause soil contamination and conserved fresh water resources comparing with sewage irrigation and tap water irrigation, at the meanwhile, it also could provide large amounts of nutrients for vegetables. The growth of vegetable irrigated by reclaimed water was better than those using tap water or sewage. The heavy metal accumulation in soil was observed after 60 days including Cr, Cd, As, Hg, Pb, Ni, Zn and Cu, which was low in concentration and stayed stable within irrigation duration. The vertical distribution of heavy metals in soil also changed little, with trends staying intact. The heavy metal content in soil was lower than the value in the soil environment quality standard (GB15618-1995), and better than the soil quality standard of vegetable planting. Risk assessment is within the generally acceptable risk range (a).

Keyword：sewage, reclaimed water, soil, vegetable, accumulation

收稿日期：2014-05-28
基金项目：广州市天河区科技计划重点项目（201205YG088）
作者简介：严兴（1982-），男，湖南华容人，工程师，主要从事污水的处理等研究。E-mail：yanxing82001@163.com

蔬菜从土壤中摄取生长所必需的营养物质,而污染水体浇灌土壤引起土壤污染而导致蔬菜重金属超标等食品安全问题越来越严重[4-5]。再生水是指城市污水经过处理后达到一定的水质标准在一定范围内重复使用的非饮用的杂用水,因此再生水灌溉将是解决水质性水资源短缺的潜在途径[6-8]。但关于再生水灌溉条件下土壤中重金属的迁移行为、对浅层地下水的污染风险,及其再生水浇灌蔬菜过程中重金属在土壤中的富集状况至今仍缺乏研究[9],本文作者特别针对广州市城市污水处理厂再生水灌溉蔬菜过程中重金属在土壤中的垂直迁移及其污染风险作评价,为广州市蔬菜种植提供一种既安全又经济有效的浇灌水体。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 试验大棚 试验大棚采用镀锌钢管架,规格长×宽×高为30 000 mm×6 000 mm×3 000 mm,在棚一侧设一扇长×高为2 000 mm×2 500 mm大门。钢管架采用卯扣固定,接地钢管插入地下500 mm深处。大棚顶端采用透明的塑料膜封盖,防止雨水等干扰试验过程,棚周围采用密闭纱网围合,防止虫害等,大棚设4台风扇进行通风散热,确保蔬菜不因温度过高而枯萎,试验装置如图1所示。

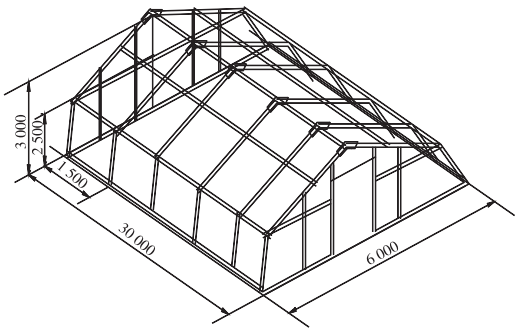


图1　蔬菜棚

Fig.1　Vegetable shed

1.1.2 蔬菜钵 蔬菜钵采用塑料材质的钵体,容积20 L。规格为直径300 mm,高400 mm,下有托盘,详见图2所示。

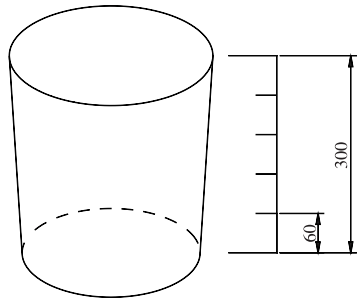


图2　蔬菜钵

Fig.2　Vegetable pot

1.1.3 试验土壤 蔬菜种植土壤就近选用约3.5 t质地较好的土壤(宜选用沙壤土),土壤在空旷室外晾干,去除草根、石粒等杂物,过20目筛备用。加入500 kg的腐熟有机肥和适量无机肥料,拌匀后作为试验土壤。将土壤装盘后充分淋水,遮盖薄膜保湿,至不滴水以后放置于实验蔬菜棚。同时取部分土壤样本烘干称质量,检测计算土壤pH值和各重金属元素,详见表1。

表1　土壤重金属含量

Table 1　Heavy metal content in soil

检测指标	量值/(mg/kg)
汞	0.23
砷	12.43
铬	26.21
铜	28.79
镍	11.83
铅	22.03
锌	69.95
镉	1.40
pH	7.5

除镉超标外,基本满足土壤环境质量标准(GB15618-1995)中的二级标准,详见表2。

表2　土壤环境质量标准值

Table 2　Sool environmental quality standard

项目		重金属标准值(mg/kg)							
级别	pH值	汞≤	砷≤	铜≤	铅≤	铬≤	锌≤	镍≤	镉≤
一级	自然背景	0.15	15	35	35	90	100	40	0.20
二级	<6.5	0.30	40	50	250	150	200	400	0.30
	6.5~7.5	0.50	30	100	300	200	250	50	0.30
	>7.5	1.0	25	100	350	250	300	60	0.60
三级	>6.5	1.5	40	400	500	300	500	200	1.0

1.1.4 试验用水 灌溉用水选用广州市石井污水处理厂进水(污水)、再生水和自来水作为实验水体,水质情况详见表3。

表3 实验用水指标

Table 3 Index of experimental water mg/L

检测指标	试验用水		
	自来水	再生水	污 水
汞	<0.001 0	0.000 1	0.000 5
砷	<0.001 0	0.004 3	0.005 6
铬	<0.010 0	0.016 0	0.039 0
铜	<0.010 0	0.020 0	0.318 0
镍	<0.010 0	0.210 0	0.065 0
铅	<0.050 0	<0.050 0	<0.050 0
锌	<0.016 0	0.036 0	0.299 0
镉	<0.003 0	<0.003 0	<0.003 0
pH	7.1	7.2	7.5

1.2 试验方法

试验设计各小区分布安排见表4,试验分为2个重复灌溉区,现选第一区的实验钵为研究对象,每小组种植5钵,在蔬菜生长过程中,每天上午8:00和下午4:00浇水一次,每次约1 L。

表4 蔬菜灌溉水试验设计安排

Table 4 Experimental design of irrigation water for vegetable

第一区			第二区		
第1组自[1)]	第1组中	第1组污	第2组污	第2组中	第2组自
第1组中[2)]	第1组污	第1组自	第2组自	第2组污	第2组中
第1组污[3)]	第1组自	第1组中	第2组中	第2组自	第2组污

注:1)“自”表示用自来水进行浇灌;2)“中”表示用再生水进行浇灌;3)“污”表示用污水进行浇灌。

实验从2013年9月1日开始至2013年12月31日为止,每月的第1日取样一次,自来水浇灌的钵体取混合样100 g,再生水和污水浇灌的钵体表层(0 mm)及深60、120、180 mm和240 mm处各取样100 g。

1.3 样品处理及方法

取样后的土壤先放置实验室通风处自然风干,然后在105℃烘箱中烘干,磨碎后,通过消解等前处理过程后开始检测分析。其中重金属铬、镉、铜、锌、镍和铅采用原子吸收分光光度法检测,汞和砷采用原子荧光分光光度法检测。

2 结果与分析

实验发现再生水浇灌的蔬菜长势明显优于自来水浇灌和污水浇灌的蔬菜,见图3、图4、图5。



图3 再生水浇灌蔬菜

Fig.3 Irrigate the vegetable with recycled water



图4 自来水浇灌蔬菜

Fig.4 Irrigate the vegetable with water



图5 污水浇灌蔬菜

Fig.5 Irrigate the Vegetable with sewage

通过收成比较发现,再生水浇灌的蔬菜产量大于自来水和污水浇灌的蔬菜。说明在相同的营养条件下,再生水较自来水含有更多的营养元素,通过土壤吸收,并最终促进蔬菜的生长;而污水中虽然含有更多的营养元素,但也含有较多的重金属,抑制了蔬菜的生长。

通过检测证实,再生水浇灌的蔬菜土壤中重金属含量较小,而污水浇灌的蔬菜土壤中重金属含量相对较大,实验数据如表5所示。

表5　实验蔬菜土壤中重金属含量

Table 5　Heavy metal content of experimental vegetable soil

日期	样品名称	泥土深度/mm	重金属质量分数(mg/kg)							
			汞	砷	铬	铜	镍	铅	锌	镉
9.1		原样	0.23	12.43	26.21	28.79	11.83	22.03	69.95	1.4
10.1	浇自来水	均样	0.23	12.43	33.63	17.38	14.51	18.51	62.50	1.44
11.1	浇自来水	均样	0.30	12.58	35.21	17.22	14.00	18.58	60.60	1.48
12.1	浇自来水	均样	0.30	13.41	35.97	13.62	14.90	20.92	59.62	1.54
10.1	浇再生水	0	0.14	10.30	32.96	23.37	15.03	15.90	74.53	1.84
11.1	浇再生水	0	0.50	12.11	44.93	14.85	28.60	17.69	59.46	1.77
12.1	浇再生水	0	0.86	60.68	42.74	24.88	28.61	20.94	82.77	2.10
10.1	浇再生水	60	0.28	10.80	48.40	25.32	39.87	23.86	80.30	1.97
11.1	浇再生水	60	0.18	12.19	34.90	25.12	24.28	23.03	78.06	1.97
12.1	浇再生水	60	0.24	11.22	35.04	21.59	24.86	18.43	68.95	1.94
10.1	浇再生水	120	0.38	12.69	42.70	19.99	25.83	23.75	80.17	1.46
11.1	浇再生水	120	0.16	13.03	41.42	19.83	26.83	14.69	65.74	1.46
12.1	浇再生水	120	0.17	10.47	42.79	21.76	27.07	15.54	69.84	1.38
10.1	浇再生水	180	1.14	10.30	43.07	22.29	27.43	24.95	88.62	1.63
11.1	浇再生水	180	0.33	10.62	33.27	24.12	23.30	15.48	75.86	1.50
12.1	浇再生水	180	0.40	11.40	32.10	20.61	22.72	17.36	69.27	1.46
10.1	浇再生水	240	0.23	15.30	33.50	20.30	23.47	16.96	68.75	1.37
11.1	浇再生水	240	0.55	10.39	38.81	24.80	32.40	20.66	67.73	1.59
12.1	浇再生水	240	0.32	11.72	39.38	14.26	26.51	18.74	60.83	1.47
10.1	浇污水	0	0.62	10.60	30.16	34.38	13.90	22.93	90.78	1.69
11.1	浇污水	0	0.46	12.52	50.99	18.27	22.50	24.55	61.36	1.44
12.1	浇污水	0	0.41	12.84	57.77	24.69	23.02	25.71	74.15	1.97
10.1	浇污水	60	0.25	7.70	62.34	26.71	28.33	25.75	77.66	1.98
11.1	浇污水	60	0.18	11.92	50.69	27.47	23.40	26.08	76.22	2.10
12.1	浇污水	60	0.19	12.48	88.84	18.86	38.22	23.26	69.51	1.47
10.1	浇污水	120	0.36	12.76	37.97	16.31	17.24	21.56	62.63	1.56
11.1	浇污水	120	0.25	15.71	38.54	10.38	18.13	19.18	55.57	1.82
12.1	浇污水	120	0.92	12.23	77.92	22.36	34.17	17.94	70.92	1.50
10.1	浇污水	180	0.57	12.02	33.47	23.98	15.06	19.70	69.38	1.48
11.1	浇污水	180	0.14	12.84	48.31	17.83	22.17	18.28	64.43	1.51
12.1	浇污水	180	0.47	14.09	72.21	19.08	31.63	21.49	72.44	1.80
10.1	浇污水	240	0.34	12.38	34.76	23.02	15.18	19.86	72.37	1.53
11.1	浇污水	240	0.71	11.91	35.98	21.47	15.28	23.42	72.95	1.51
12.1	浇污水	240	0.36	12.66	62.31	18.16	28.07	19.80	66.57	1.42

参比自来水浇灌的土壤值,选择有代表性的铅和镉作为研究对象进行数据分析,将同一时间的表层(0 mm)、60、120、180 mm和240 mm处土壤的铅和镉值平均,以时间为横坐标,铅和镉质量分数为纵坐标,得到如图6和图7所示的曲线图。从图中曲线可知:用污水浇灌的土壤随着时间的延长,土壤中重金属含量逐渐增加,时间越长,增加幅度逐渐降低,增加趋势基本满足对数方程的递增模式。而

再生水浇灌的土壤,重金属含量增加幅度较小,在土壤中富集情况基本呈水平趋势,增加幅度较小,甚至出现降低的现象,说明重金属在土壤中的富集是动态平衡的过程,因为再生水中重金属含量低,用再生水浇灌土壤的过程中,部分富集的重金属又随着水流渗透出来。而污水中的重金属质量分数高,随着时间的延长,富集的重金属量高于渗透出来的重金属,重金属含量呈递增趋势。

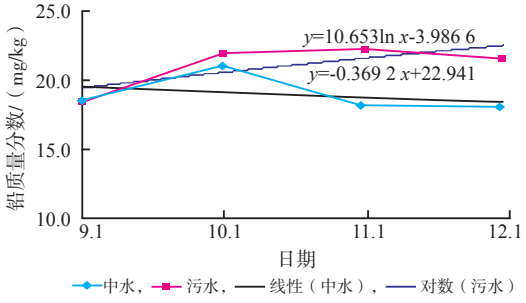


图6 蔬菜土壤中铅金属的富集状况

Fig.6 Enrichment situation of lead metal in vegetable soil

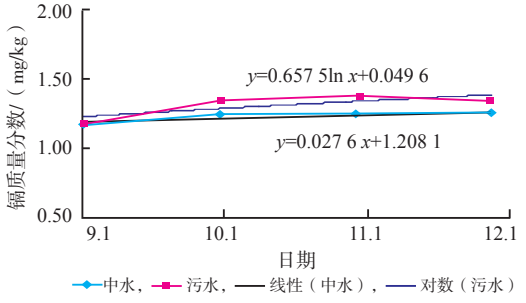


图7 蔬菜土壤中镉金属的富集状况

Fig.7 Enrichment situation of cadmium metal in vegetable soil

取不同深度的泥样检测得到重金属铅和镉的质量分数值,以土壤深度为横坐标,重金属质量分数值为纵坐标,得到图8、图9、图10和图11,从图曲线可知,用中水浇灌的蔬菜土壤中,重金属的含量基本呈水平线性,随着浇灌时间和土壤深度的变化,重金属质量分数的变化较小,这也是因为再生水中的重金属含量低,在土壤中富集遵循动态平衡的规律,富集量和脱附量基本持平,质量分数值基本与土壤底值接近,所以表现出来的重金属含量略高于原来水平,并一直呈稳定状态。而污水浇灌的土壤重金属含量在60 mm处呈现极大值,而后质量分数随着土壤深度的增加,水中的重金属脱附量增加,土壤中重金属含量逐渐降低。但随着时间的延长,重金属的含量又逐渐增加,这与图6、图7一致。

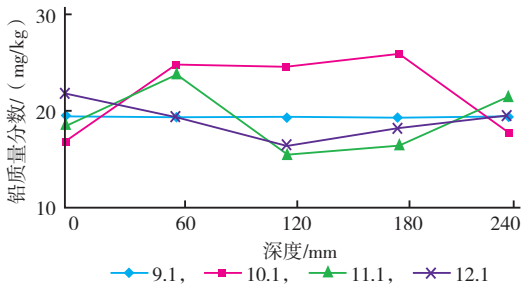


图8 再生水浇灌蔬菜土壤铅浓度随深度的变化

Fig.8 Change of vegetable soil lead content irrigation with reclaimed water with soil depth

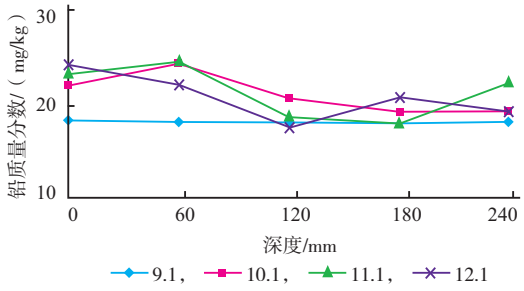


图9 污水浇灌蔬菜土壤铅浓度随深度的变化

Fig.9 Change of vegetable soil lead content irrigation with sewage with soil depth

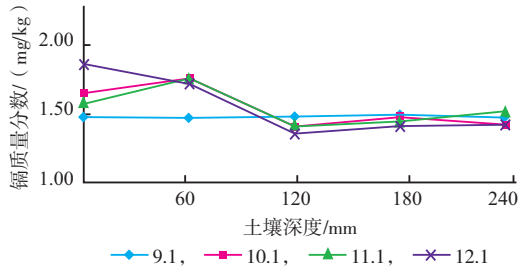


图10 再生水浇灌蔬菜土壤镉质量分数随土壤深度的变化

Fig.10 Change of vegetable soil cadmium content irrigation with reclaimed water with soil depth

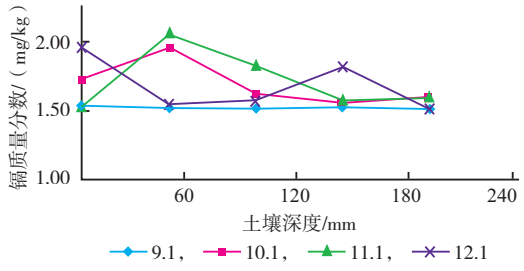


图11 污水浇灌蔬菜土壤镉质量分数随土壤深度的变化

Fig.11 Change of vegetable soil cadmium content irrigation

采用LEC风险评价法对再生水浇灌的土壤进行风险性评价,因污水处理厂每天都会对再生水检测分析,满足蔬菜灌溉的标准后才能回用于灌溉,且通过上述实验,发现再生水浇灌的土壤中重金属

的含量增加不明显,且保持稳定,达到蔬菜种植的标准要求,因此事故蔬菜食用发生的可能性属于“很不可能,可以设想”,L值为0.5;而再生水浇灌蔬菜后,假设存在蔬菜接触到浇灌水体,人体通过食用蔬菜间接置于危险环境,因人体每天都会食用蔬菜,因此暴露于风险环境的频繁程度属于最高级别“连续暴露”,E值为10;再生水中重金属含量低,富集到土壤中的重金属也较低,满足蔬菜种植的需要,因此基本上不会存在对蔬菜食用者伤害的危险,发生蔬菜食用事故的后果属于“轻伤”,C值为1;通过计算风险分值D($D=L\times E\times C$)为5,小于20,稍有危险。因此,再生水浇灌的土壤定性等级为可承受风险(一级):安全,不需要采取措施。

3 结　语

针对城市水质性缺水的实际情况开展研究,从实验研究可知,相比较污水浇灌的蔬菜土壤,再生水浇灌蔬菜土壤中的重金属含量基本满足土壤环境质量标准(GB15618-1995)中的二级标准,虽然在浇灌过程中有一定程度的重金属富集,但随着时间的延长,富集到土壤中的重金属会逐渐脱附,保持蔬菜种植的表层土壤完全符合土壤环境质量要求。

通过LEC风险评价法对再生水浇灌的蔬菜土壤进行风险性评价,定性等级为可承受风险(一级):安全,不需要采取措施。为广州市蔬菜种植提供了一种既安全又经济有效的浇灌水体。明晰了重金属在土壤中的迁移行为和对浅层地下水的污染风险,及其再生水浇灌蔬菜过程中重金属在土壤中的富集状况,为今后深入研究蔬菜重金属富集等食品安全问题初步提供了基础理论依据。

参考文献:

[1] 冯尚友.水资源持续利用与管理导论[M].北京:科学出版社,2003.

[2] Zou Jianwen, Liu Shuwei, Qin Yanmei, et al. Sewage irrigation increased methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in southeast China[J]. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 2009,129:516-522.

[3] Zhang Y L, Dai J L, Wang R Q, et al. Effects of long-term sewage irrigation on agricultural soil microbial structural and functional characterizations in Shandong, China[J]. **European Journal of Soil Biology**, 2008,44:84-91.

[4] 王贵玲,蔺文静.污水灌溉对土壤的污染及其整治[J].农业环境科学学报,2003,22(2):163-166.
WANG Guiling, MIN Wenjing.Contamination of soil from sewage irrigation and its remediation [J]. **Journal of Agro-Enbironment Science**,2003,22(2):163-166.(in Chinese)

[5] Moller A, Muller H W, Abdullah A,et al. Urban soil pollution in damascus, syria: Concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the damascus ghouta [J]. **Geoderma**, 2005, 124(1-2):63-71.

[6] Anikwe M A N, Nwobodo K C A. Long term effect of municipal waste disposal on soil properties and productivity of sites used for urban agriculture in Abakaliki, Nigeria [J]. **Bioresource Technology**, 2002, 83(3):241-250.

[7] 李国新,颜灿迪,李庆召.污水回用技术进展及发展趋势[J].环境科学与技术,2009,32(1):79-83.
LI Guoxin,YAN Candi,LI Qinzao.Improvement and development trend of wastewater reuse technology[J]. **Environmental Science & Technology**,2009,32(1):79-83.(in Chinese)

[8] 胡雪峰,朱琴.污水处理厂出水的环境质量和农业再利用[J].农业环境保护.2002,21(6):530-534.
HU Xuefeng,ZHU Qin. Environmental quality and agricultural reuse of the effluent from sewage treatment Plant [J]. **Agricultural Environment Protection**,2002,21(6):530-534.(in Chinese)

[9] 邢丽贞,孔进.城市污水回用于农业的技术经济分析[J].环境科学与技术,2003,26(5):23-24.
XING Linzhen,KONG Jin. City wastewater reuse for technical and economic analysis of agriculture [J]. **Environmental Science & Technology**,2003,26(5):23-24.(in Chinese)