

天津污灌区小麦和水稻重金属的含量及健康风险评价

孙亚芳, 王祖伟*, 孟伟庆, 胡蓓蓓, 侯迎迎, 王子璐, 张 辉

(天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300387)

摘 要:以天津污灌区农作物和土壤为研究对象,采集污灌区内 24 个小麦和 29 个水稻样品及其对应的土壤样品,清灌区内 10 个小麦样品和 14 个水稻样品及相关的土壤样品,分别采用 ICP-AES 和原子荧光分析样品中 Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、As 和 Hg 含量,在此基础上分析评价污灌区土壤重金属污染情况以及污灌区小麦和水稻中重金属可能产生的健康风险。研究表明,长期污灌导致重金属在土壤中的聚集,土壤中 Cd、Zn 和 Hg 的含量分别为 0.46、129.05、0.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过天津土壤质量二级标准。污灌区小麦和水稻中 Pb 的平均含量分别为 0.14、0.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于国家食品安全限量标准,对人类健康产生风险,其他重金属元素在小麦和水稻中的平均含量未超过国家食品安全限量标准;水稻样品中 Hg、As 的平均含量稍高于国家食品安全限量标准。计算结果显示 Cd 和 Zn 的转移因子值远高于其他元素,反映其具有更高的活动性,更容易从土壤转移到小麦和水稻子实中。目标风险指数(THQ)估算结果显示单一重金属的 THQ 值均低于 1,表明当地居民对污灌区生长的水稻或小麦的消费基本不产生健康风险;小麦和水稻中 As THQ 值的和超过 1,暗示在食用污灌区生长的水稻和小麦时 As 可对当地居民的健康产生风险。

关键词:重金属污染;日摄入量;目标风险指数;健康风险;天津污灌区

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)04-0679-07 doi:10.11654/jaes.2015.04.011

Contents and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat and Rice Grown in Tianjin Sewage Irrigation Area, China

SUN Ya-fang, WANG Zu-wei*, MENG Wei-qing, HU Bei-bei, HOU Ying-ying, WANG Zi-lu, ZHANG Hui

(College of Urban & Environment Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Sewage irrigation has caused soil heavy metal pollution. In this study, we collected 24 wheat samples and 29 rice samples and corresponding soil samples from sewage-irrigated area and 10 wheat samples and 14 rice samples and corresponding soil samples from clean water irrigation area in Tianjin sewage irrigation area. Concentrations of heavy metals such as Cd, Cu, Pb, Zn and Cr in both crops and soils were determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. Concentrations of As and Hg were measured by atomic fluorescence spectrometry. Results showed that continuous applications of wastewater had led to accumulation of heavy metals in soils. The concentrations of Cd, Zn and Hg in soils were 0.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 129.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 0.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, which exceeded the allowable limits of the second grade standards of soil environmental quality of Tianjin. The concentrations of Pb in wheat and rice were respectively 0.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and 0.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, being higher than the safe limits for human consumption and thus having human health risk. Transfer factors of Zn and Cd were higher than those of other elements. Concentrations of heavy metals such as Cd, Zn, and As in some wheat samples and Hg and As in some rice samples exceeded the safe limits of China National Food Standard, suggesting their potential ecological risks to human health. Target hazard quotient(THQ) of individual metal was below 1, implying that heavy metals through consumption of either wheat or rice had little health risks. However, the sum of THQs of As for wheat and rice was above 1, indicating As health risk to the local residents via consumption of wheat and rice.

Keywords: heavy metal pollution; daily intake; target hazard quotient; health risks; Tianjin sewage irrigated area

由于自然和人为原因,重金属成为环境中重要的污染物之一。污水灌溉、污泥使用、固废排放、机动

车尾气和工业活动是土壤受到重金属污染的主要来源。污水灌溉在世界许多地区能够见到,长期污灌可能导致重金属在土壤和农作物中聚集。许多学者对污灌区土壤重金属污染进行了研究^[1-13]。

土壤重金属污染导致的健康风险屡见报道,生长在被污染土壤上的农作物和蔬菜中重金属的含量远

收稿日期:2014-11-17

基金项目:国家自然科学基金(40973078,41301096)

作者简介:孙亚芳(1990—),女,河北廊坊人,硕士研究生,主要从事环境影响评价研究。E-mail:280540449@qq.com

* 通信作者:王祖伟 E-mail:wangzuwei@126.com

远高于生长在未被污染土壤上的农作物和蔬菜中重金属的含量^[14-19],食用被污染的农作物成为重金属毒害人体的重要途径。

天津污灌区是中国最大的污灌区,有20年的污灌历史。一些学者对污灌区的重金属污染进行了研究:王斌等(2010)和吴光红等(2008,2010)研究了天津郊区西青区大沽排污河灌区土壤重金属污染^[20-22];王祖伟等(2005)初步讨论了天津污灌区土壤重金属污染环境质量和环境效应^[23];师荣光等(2008)、翟慧泉(2010)、董卫宏(2007)、潘杰等(1997)讨论了天津郊区土壤-蔬菜系统中重金属污染及生态风险^[24-27];李宗梅(2006)分析了天津市北京排污河污灌区土壤-小麦系统重金属含量特征^[28]。上述成果从不同侧面丰富和深化了天津污灌区重金属污染的研究水平,但对污灌区生长的主要粮食作物小麦和水稻可能带来的健康风险缺乏研究。本文试图整体分析天津污灌区土壤重金属污染状况,并通过估算食用小麦和水稻时重金属的日摄入量和目标风险指数来分析讨论重金属污染产生的健康风险,为天津污灌区土壤的可持续利用和粮食安全利用提供技术支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区特征

天津污灌区的海拔高度大多在2~5 m。污灌区土壤发育在第四纪沉积物上,绝大部分为近代河流冲积物,其次为洪积物和海相沉积物。污灌区属于暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候,平均气温11~12℃,冬寒夏热,四季分明,年均降雨量570~690 mm,蒸发量是降水量的三倍。春季少雨多风,蒸发量大,气温回升快。夏季高温多雨,降雨量占全年的75%。秋季以晴为主,气候适宜。冬季寒冷,降雪量少,盛行西北风。

天津污灌区包括三部分:北京排污河污灌区(又称武、宝、宁灌区)、大沽排污河污灌区(又称南排污河灌区)和北(塘)排污河污灌区(图1)。

北京排污河污灌区主要位于北辰区和武清区,部分位于宝坻区和宁河县,污灌区面积 $8.35 \times 10^4 \text{ hm}^2$,污灌时间一般在20年左右。污灌区北辰区和武清区的土壤多为壤质潮土,部分为沙质潮土,东南部分的宝坻区和宁河县几乎全部为盐化粘质潮土。北京排污河污灌区的污水来源于北京排放的工业污水和生活废水,主要用于灌溉大田作物。

大沽排污河污灌区位于西青区和津南区,污灌区面积为 $2.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$,污灌历史最长43年,最短15~

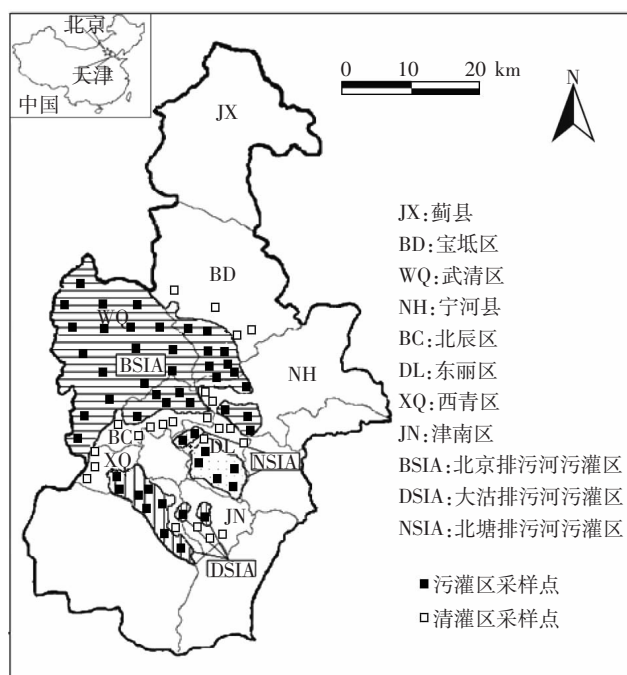


图1 天津污灌区分布及采样点位置图

Figure 1 Tianjin sewage irrigation area and sampling sites

16年,一般为27~32年,污灌区土壤西部为壤质潮土,东部为粘质潮土和盐化潮土。大沽排污河污灌区污水来源于天津市区和西青区,主要用于灌溉大田作物,菜田占污灌面积的10%左右。

北(塘)排污河污灌区位于东丽区,污灌面积 $1.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$,污灌时间一般在25~34年之间,污灌区土壤基本属于粘质潮土和盐化粘质潮土。北(塘)排污河污灌区污水来源于东丽的工业废水,污灌作物主要是水稻、旱作粮食及蔬菜。

天津污灌区土壤偏碱性,pH值范围7.5~8.7,平均8.14;土壤的有机质范围在0.79%~3.99%之间,平均值为1.90。污灌区中东部地区的宝坻区、宁河县、东丽区、津南区的土壤普遍具盐渍化,盐度范围0.11%~1.38%,绝大多数属于轻度到中度盐渍化土壤。

1.2 样品采集及分析方法

根据污灌区分布情况,结合土壤类型,对全市污灌区的农田采用网格法进行布点,从污灌区(WWI)采集了24个小麦样品和29个水稻样品。为对比分析从污灌区附近的清灌区(CWI)内采集了10个小麦样品和14个水稻样品作为对照组样品。在划分好的采样小区内,采用梅花形五点取样法采集代表性的植株。在每个采样小区内的采样点上,采集5处的植株混合组成一个代表样品。整株采集后带回实验室,按根系、茎叶、穗实分开处理:对采集的作物样品分别用自来

水和无离子水冲洗后,将洗净的植物鲜样尽快放在干燥通风处风干(茎秆样品劈开);将风干的样品去除灰尘、杂物、剪碎,再用磨碎机磨碎;将粉碎的样品过1 mm 尼龙筛;将制备好的样品装入聚乙烯塑料袋中,贴好标签,注明编号、采集地点、分析项目,并填写采样登记表。

同时采集植物采样点对应的耕作层土壤样品,采用蛇形采样方法多点采样,数量在1 kg左右,每个样品由10个取土点均匀混合。对采集的土壤样品首先经过除去植物残体、碎石,室内风干,用四分法反复舍至1.0 kg左右,玛瑙研钵研细,过100目筛待处理。

植物和土壤样品经过微波消解后,Cd、Cu、Pb、Zn和Cr采用ICP-AES法测定,As和Hg采用原子荧光法(AFS-230)测定。试验重复三次,并采用国家标准物质进行对比,实验的数据统计分析采用SPSS软件完成。

1.3 数据分析

1.3.1 转移因子(TF)

转移因子(TF)用于了解污水灌溉在小麦和水稻食用部分产生的重金属积累的风险和相关的危险程度,计算公式见Cui, et al^[29]:

TF=农作物食用部分中重金属的含量/土壤中重金属的含量

1.3.2 日摄入量(DIR)

计算公式为:

$$DIR=(C \text{ metal} \times D \text{ food intake}) / B \text{ average weight}$$

式中:C metal、D food intake、B average weight 分别代表重金属在小麦和水稻子实中的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、每人日摄入的小麦和水稻的量($\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$)和平均体重($\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$)^[30-31]。

本文中小麦的D food intake 值为 $0.242(\text{kg} \cdot \text{人}^{-1})$,水稻的D food intake 值为 $0.235(\text{kg} \cdot \text{人}^{-1})$ ^[32],B average weight 值为 55.9 kg ^[31]。

1.3.3 目标风险指数(THQ)

利用目标风险指数可以评价当地居民消费污灌区小麦和水稻后产生的健康风险。计算方法为^[33-34]:

$$THQ=10^{-3}(E_F E_D F_{IR} C / R_{FD} W_A T_A)$$

式中: E_F 是暴露频率 $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[1]; E_D 是暴露持续时间,相当于平均寿命(70 a)^[35]; F_{IR} 是食物摄入量($\text{kg} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);C是食物中重金属的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); R_{FD} 是日参考剂量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$),数据来源于USEPA^[33]; W_A 是平均体重(55.9 kg); T_A 为平均暴露时间(本研究中为70 a)。

2 结果与讨论

2.1 重金属在土壤中的含量及健康风险

天津污灌区土壤重金属的含量见表1。污灌区土壤中Cd的含量范围 $0.05 \sim 1.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Cu的含量范围 $10.9 \sim 61.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值 $28.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Pb的含量范围 $5.8 \sim 69.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值 $15.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Zn的含量范围 $62.2 \sim 333 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值 $129.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Cr的含量范围 $40.16 \sim 108 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值 $64.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;As的含量范围 $5.14 \sim 17.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值 $11.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Hg的含量范围 $0.035 \sim 1.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值 $0.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。污灌区土壤中Zn、Cu、Cd和Pb的变异系数较大,在30%~50%之间,表明各污染样点间土壤中Zn、Cu、Cd和Pb分布存在着较大的差异。

图2显示污灌区(WWI)土壤重金属平均含量与清灌区(CWI)土壤的比值。所有的比值均大于1,表明污灌区土壤中重金属有明显的富集现象;Cd和Hg的比值最大,表明其受污灌影响最大。

三大污灌区中,北京排污河污灌区土壤重金属平均含量高于清灌区18.7%~154.3%,大沽排污河污灌区土壤重金属平均含量高于清灌区7%~243.5%,北排污河污灌区土壤重金属平均含量高于清灌区12.8%~381.3%。相对而言,Cd与Zn在北排污河污灌区,Pb、As与Hg在北京排污河污灌区,Cd与Hg在大沽排污河污灌区的富集程度最大。

与天津污灌区麦田土壤相比,水田土壤中Cd、Cr、Hg的含量高,Cu的含量低,Pb、Zn、As的含量变化不大(图3)。

天津污灌区土壤重金属含量均没有超过国家土壤二级标准(GB 15618—1995)和欧盟土壤标准限值(表2),但土壤中Cd、Zn、Hg的含量超过代表清洁土壤的天津土壤质量二级标准,表明土壤已经被Cd、Zn、Hg污染,有潜在的生态风险。

2.2 重金属在水稻和小麦子实中的含量及健康风险

2.2.1 重金属在小麦子实中的含量

天津污灌区小麦子实中重金属的含量见表3。与重金属的安全限值比较,污灌区小麦子实中Cd、Cu、Zn、Cr、As和Hg的平均含量均低于国家食品安全限量标准(GB 15618—1995),但Pb的平均含量比标准高40%,意味着Pb对人体健康存在风险。

与WHO/FAO食品安全限量标准相比,除Pb外,污灌区小麦子实中其他重金属平均含量同样低于WHO/FAO食品安全限量标准^[38],但与欧盟标准相比,

表 1 天津市污灌区和清灌区土壤的重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 1 Concentrations of heavy metals in soils

重金属		北京排污河		大沽排污河		北排污河	
		WWI	CWI	WWI	CWI	WWI	CWI
Cd	范围	0.05~0.97	0.08~0.38	0.4~0.79	0.13~0.37	0.51~1.17	0.03~0.64
	均值	0.40	0.24	0.58	0.17	0.75	0.16
	标准差	0.12	0.105	0.11	0.08	0.18	0.42
Cu	范围	10.9~49.8	9.94~31.06	24.11~61.3	28.95~31.0620.68	21.64~57.55	14.83~41.0
	均值	24.98	21.05	37.38	30.31	36.89	32.00
	标准差	9.22	5.897	8.11	0.02	10.52	11.2
Pb	范围	3.8~49.77	2.81~36.95	10.29~33.5	14.13~17.95	10.19~55.5	17.5~29.0
	均值	27.10	17.21	17.66	14.51	21.30	23.20
	标准差	8.31	3.575	4.69	2.40	13.29	3.47
Zn	范围	62.2~333	60.0~213.8	72.87~307.2	81.02~152.2	83.96~233.9	46~98.33
	均值	119.87	87.11	171.20	92.31	163.17	85.30
	标准差	43.08	28.98	66.59	18.5	50.4	26.4
Cr	范围	40.16~104	36.2~56.6	61.32~108	41.6~54.55	62.23~89.26	51.67~76.33
	均值	64.67	51.91	74.88	52.92	75.33	65.92
	标准差	16.75	6.47	12.54	3.47	7.39	5.4
As	范围	7.04~16.8	4.56~9.32	8.04~17.7	6.37~14.89	8.76~17.35	5.14~13.55
	均值	11.10	7.57	12.11	11.31	10.65	9.44
	标准差	2.87	1.89	2.87	3.24	2.96	2.75
Hg	范围	0.035~1.72	0.026~0.30	0.037~1.52	0.025~0.433	0.096~1.21	0.01~0.49
	均值	0.534	0.21	0.492	0.24	0.49	0.21
	标准差	0.45	0.01	0.37	0.08	0.26	0.08

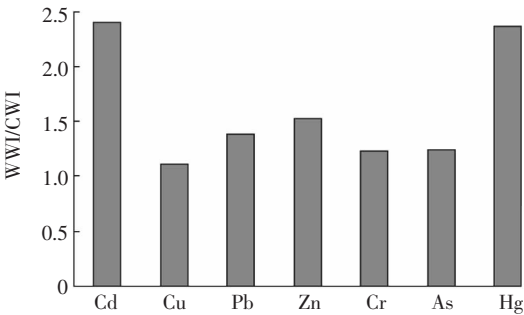


图 2 污灌土壤与清灌土壤中重金属平均含量的对比

Figure 2 Ratios of soil heavy metal concentrations in waste water irrigation(WWI) to clean water irrigation(CWI)

Pb 和 As 的含量超过安全标准(表 2)。从单个样品来看,已有 1 个样品的 Cd(0.176)、2 个样品的 Zn(50.2、52.5)和 As(0.18、0.20)的含量超过国家食品安全限量标准,暗示存在潜在的健康风险。

与清灌区相比较,污灌区小麦子实中重金属的含量均较高,体现出污灌对植物吸收重金属有明显的影响,增加了重金属在植物体内的富集量(图 4)。具体结果显示:污灌区小麦子实中 Cd 的含量比清灌区高 63.2%、Cu 高 3.8%、Pb 高 100%、Zn 高 6.6%、Cr 高 11.4%、As 高 326.7%、Hg 高 18.2%。

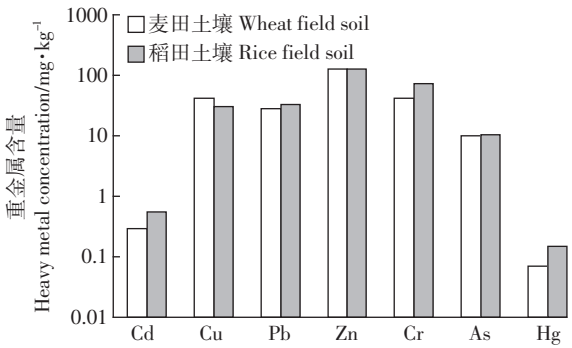


图 3 天津污灌区麦田土壤与稻田土壤重金属平均含量对比

Figure 3 Means of heavy metal concentrations in wheat and rice soils at waste water irrigation site

2.2.2 重金属在水稻子实中的含量

天津污灌区水稻子实中重金属的含量见表 3。与重金属的安全限值比较,污灌区水稻子实中 Cd、Cu、Zn、Cr 的平均含量均低于国家食品安全限量标准和 WHO/FAO 及欧盟的食品安全限量标准(表 2),但 Pb 的含量比国家和欧盟的标准高 115%,意味着 Pb 对人体健康有危险。As 和 Hg 的平均含量稍高于国家和欧盟的标准,17%的样品中 Cd 含量超过国家食品安全标准,暗示存在一定的健康风险。

表 2 重金属含量的安全限值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 2 Safe limits of heavy metals($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

标准		Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	As	Hg	
土壤	国家二级标准(GB15618—1995)	0.6	100	350	300	250 _p /350 _p	25 _D /20 _P	1.0	
	天津二级标准 *	0.159	43.71	32.83	115	107 _D /124 _p	16.64 _D /14.64 _p	0.258	
	欧盟标准(EU2002)	3.0	140	300	300	150	—	—	
	WHO/FAO	—	—	—	—	—	—	—	
植物	国家标准(GB 2762—2005)	小麦	0.1	10	0.2	50	20	0.15	0.02
		水稻	0.2	10	0.2	50	—	0.15	0.02
	欧盟标准(EC:No 629/2008)	0.2	—	0.2	—	—	0.1	0.02	
	WHO/FAO	0.2	40	5	60	—	0.15	0.02	

注:D 旱田土壤;P 水田土壤;* 天津环境监测中心,天津土壤环境背景值研究报告,1990。

表 3 天津市污灌区水稻和小麦子实中的重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 3 Concentrations of heavy metals in rice and wheat in Tianjin sewage irrigation area

项目		Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	As	Hg
小麦子实	范围	0.025~0.176	2.15~4.16	0.06~0.24	16.21~53.0	0.28~0.62	0.096~0.20	0.001~0.015
	均值	0.062	2.99	0.14	27.67	0.49	0.128	0.013
	标准差	0.020	0.51	0.05	7.33	0.10	0.059	0.006
水稻子实	范围	0.013~0.215	2.62~6.67	0.26~1.73	14.0~44.3	2.56~5.47	0.046~0.38	0.001~0.257
	均值	0.07	4.45	0.62	22.73	3.91	0.166	0.022
	标准差	0.025	0.59	0.104	2.14	0.64	0.079	0.005

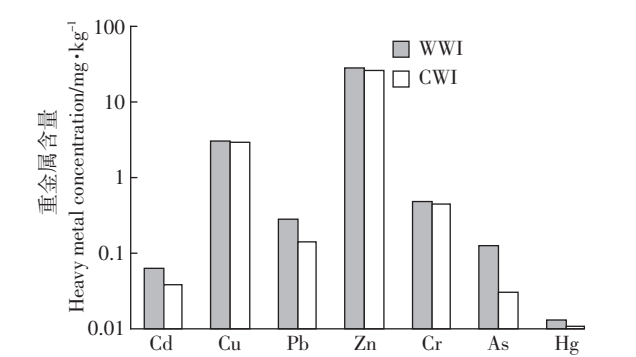


图 4 污灌区和清灌区小麦子实中重金属平均含量比较
Figure 4 Concentrations of heavy metals in wheat seeds grown in WWI and CWI areas

污灌同样增加水稻子实对重金属的吸收,与清灌区相比较(图 5),污灌区水稻子实中 Cd 的平均含量比清灌区高 27.3%、Cu 高 18.7%、Pb 高 65.4%、Zn 高 21.6%、Cr 高 46.4%、As 高 54.9%、Hg 高 40%。

2.2.3 转移因子(TF)

在小麦子实中所有重金属的转移因子排序为 Zn (0.214)值最大,其他依次为 Cd(0.111)、Cu(0.099)、Hg (0.087)、As(0.012)、Pb(0.008)和 Cr(0.007);在水稻子实中所有重金属的转移因子排序为 Cd(0.242)显示最大值,其他依次为 Zn(0.181)、Cu(0.105)、Hg(0.100)、Cr(0.095)、Pb(0.015)和 As(0.011)。显示 Zn 和 Cd 比其他金属有更高的活动性(表 4)。Lokeshwari 等也获得了同样的结论^[40]。

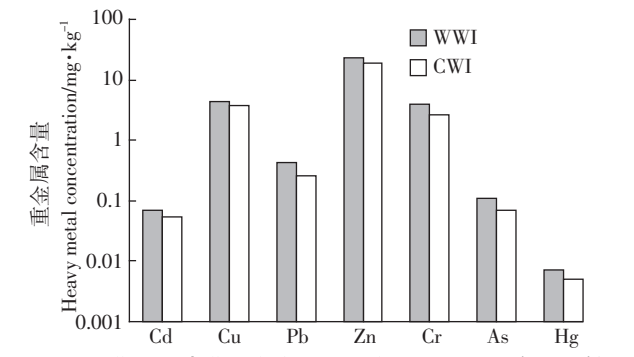


图 5 污灌区和清灌区水稻子实中重金属平均含量比较
Figure 5 Concentration of heavy metals in rice grown in WWI and CWI areas

2.2.4 日摄入量(DIR)

重金属对人体的毒害程度依赖于他们的日摄入量。估算结果表明,污灌区通过小麦和水稻对重金属的日摄入量相差不大,远远低于 FAO/WHO 推荐的参考剂量(表 4),表明食用生长在污灌区的食物风险较低。

3.2.5 目标风险指数(THQ)

目标风险指数的估算结果显示小麦和水稻中所有的重金属对当地居民均不产生健康风险(表 4)。尽管单一的重金属 THQ<1,意味着只消费小麦或水稻健康风险低,但是水稻和小麦单一重金属累加的 THQs 可能大于 1,因而健康风险更高。

水稻和小麦重金属 As 的 THQs 值大于 1,意味着小麦和水稻的消费可对当地居民产生健康风险(表

表 4 污灌区小麦和水稻的转移因子、日摄入量和目标风险指数值

Table 4 Transfer factors(TF), estimated daily intake rates(DIR) and target hazard quotient(THQ) values of heavy metals in wheat and rice

	项目	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	As	Hg
TF	小麦	0.111	0.099	0.008	0.214	0.007	0.012	0.087
	水稻	0.242	0.105	0.015	0.181	0.095	0.011	0.100
DIR	小麦	0.0002	0.0115	0.0011	0.1068	0.0019	0.0005	0.00005
	水稻	0.0003	0.0187	0.0018	0.0956	0.0164	0.0005	0.00003
	PTDI*	60	300	214	60	--		
THQ	小麦	0.0980	0.1181	0.0111	0.1457	0.0005	0.6742	0.0411
	水稻	0.1074	0.1707	0.1650	0.1163	0.0040	0.5626	0.0215
	Σ	0.2054	0.2888	0.1761	0.2620	0.0045	1.2368	0.0627

注: * PTDI(Potential tolerable daily intake); Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, 1999.

4)。Wang 等在研究天津郊区居民食用蔬菜和鱼类面临的重金属的健康风险时提出了相同的观点^[31]。

3 结论

(1) 天津污灌区土壤中 Cd 与 Hg 受污灌的影响强度大,在土壤中富集明显,Cu、Pb、Cr、As、Zn 有一定程度的富集。Cd、Zn、Hg 是主要的污染物,有潜在的生态风险。

(2)污灌区小麦、水稻子实中重金属的含量均高于清灌区,显示出污灌对植物吸收重金属有明显的影响,增加了重金属在植物体内的富集量。

(3)小麦子实和水稻子实中 Pb 以及水稻子实中 As、Hg 的平均含量高于国家标准,有一定的健康风险。部分小麦样品中的 Cd、Zn、As 和水稻样品中的 Cu、Cd 的含量超过国家食品安全限量标准,暗示存在潜在的健康风险。

(4)转移因子的计算结果显示,Cd 和 Zn 比其他重金属有更高的活动性,更容易从土壤转移到小麦和水稻子实中。

(5)估算结果表明,污灌区通过小麦和水稻对重金属的日摄入量相差不大,远低于 FAO/WHO 推荐的参考剂量,表明食用生长在污灌区的食物风险较低。目标风险指数(THQ)估算结果显示单一重金属的 THQ 值低于 1,表明对污灌区生长的水稻或小麦的消费基本不产生健康风险;小麦和水稻中 As 的 THQ 值和大于 1,暗示 As 对污灌区生长的水稻和小麦的消费对当地居民的健康产生风险。

参考文献:

[1] Singh R P, Agrawal M. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge[J]. *Waste Management*, 2008, 28(2):347-358.
[2] Singh R P, Agrawal M. Variations in heavy metal accumulation, growth

and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(4):632-641.
[3] Singh A, Sharma R K, Etal M A, et al. Risk assessment of heavy metal toxicity through contaminated vegetables from waste water irrigated area of Varanasi, India[J]. *Tropical Ecology*, 2010, 51(2S):375-387.
[4] Liu W H, Zhao J Z, Ouyang Z Y, et al. Impacts of sewage irrigation on heavy metals distribution and contamination in Beijing, China[J]. *Environment International*, 2005, 31:805-812.
[5] Mapanda F, Mangwayana E N, Nyamangara J, et al. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2005, 107:151-165.
[6] Mirjana Marković, Svjetlana Cupać, Rada Durović, et al. Assessment of heavy metal and pesticide levels in soil and plant products from agricultural area of belgrade, Serbia[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 58(2):341-351.
[7] Jamali M K, Kazi T G, Arain M B, et al. Heavy metals from soil and domestic sewage sludge and their transfer to *Sorghum* plants[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2008, 6(2):119.
[8] Jamali M K, Kazi T G, Arain M B, et al. The feasibility of using an industrial sewage sludge produce in Pakistan as agricultural fertilizer used for cultivation of *Sorghum bicolor* L.[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2007, 53(6):659-671.
[9] Kelly J J, Haggblom M, Tate III R L. Effects of the land application of sewage sludge on soil heavy metal concentrations and soil microbial communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31:1467-1470
[10] Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, et al. Long term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater: A case study[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2005, 109:310-322.
[11] Buszewski B, Kowalkowski T. A new model of heavy metal transport in the soil using nonlinear artificial neural networks[J]. *Environmental Engineering Science*, 2006, 23(4):589-595
[12] Bradl H B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 277(1):1-18
[13] Morera M T, Echeverría J, Garrido J. Bioavailability of heavy metals in soils amended with sewage sludge[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2002, 82(4):433-438

- [14] Eriyamremu G E, Asagba S O, Akpoborie I A, et al. Evaluation of lead and cadmium levels in some commonly consumed vegetables in the Niger-Delta oil area of Nigeria[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, 75: 278-283.
- [15] Satarug S, Haswell-Elkins M R, Moore M R. Safe levels of cadmium intake to prevent renal toxicity of human subjects[J]. *British Journal of Nutrition*, 2000, 84: 791-802.
- [16] Sharma R K, Agrawal M, Marshall F M. Heavy metals contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 66: 258-266.
- [17] Sharma R K, Agrawal M, Marshall F M. Heavy metals contamination in vegetables grown in waste water irrigated areas of Varanasi, India[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, 77: 311-318.
- [18] Chang A C, Page A L, Hyun H. Cadmium uptake for Swiss chard grown on composted sewage sludge treated plots: Plateau or time bomb[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(1): 11-19.
- [19] Zarcinas B A, Pongsakul P, McLaughlin M J, et al. Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia 2. Thailand[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(3-4): 359-371.
- [20] 王斌, 蒙海涛, 张震, 等. 天津近郊农田土壤重金属含量特征及潜在生态风险评价[J]. *环境研究与检测*, 2010(4): 11-15.
WANG Bin, MENG Hai-tao, ZHANG Zhen, et al. Heavy metals content and potential Ecological risk assessment in field soil in Tianjin suburbs[J]. *Environment Research and Test*, 2010(4): 11-15.
- [21] 吴光红, 苏睿先, 李万庆, 等. 大沽排污河污灌区土壤重金属富集特征和来源分析[J]. *环境科学*, 2008, 29(6): 1693-1698.
WU Guang-hong, SU Rui-xian, LI Wan-qing, et al. Source and enrichment of heavy metals in sewage-irrigated area soil of Dagou sewage discharge channel[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(6): 1693-1698.
- [22] Wu G H, Cao S S. Mercury and cadmium contamination of irrigated water, sediment, soil and shallow groundwater in a wastewater-irrigated field in Tianjin, China[J]. *Bull Environmental Contamination Toxicology*, 2010, 84(3): 336-341.
- [23] 王祖伟, 张辉. 天津污灌区土壤重金属污染环境质量与环境效应[J]. *生态环境*, 2005, 14(2): 211-213.
WANG Zu-wei, ZHANG Hui. Environment quality and effect of soil polluted by heavy metals in Tianjin sewage irrigated area [J]. *Ecological Environment*, 2005, 14(2): 211-213.
- [24] 师荣光, 周启星, 刘凤枝, 等. 天津郊区土壤-蔬菜系统中Cd的积累特征及污染风险[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(7): 634-639.
SHI Rong-guang, ZHOU Qi-xing, LIU Feng-zhi, et al. Cadmium accumulation and pollution risks to human health based on Monto-Carlo model of soil and vegetable-using vegetable field in Tianjin Suburbs as example[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(7): 634-639.
- [25] 董卫宏. 天津市重点地区灌溉水与土壤重金属的环境地球化学研究[D]. 中国地质大学, 2007: 28-42.
DONG Wei-hong. Environmental geochemistry of heavy metals in irrigated water and soil of key areas in Tianjin, China[D]. China University of Geosciences, 2007: 28-42.
- [26] 翟慧泉. 天津近郊污灌区重金属污染及其安全性影响研究[D]. 天津理工大学, 2010.
ZHAI Hui-quan. Investigation and assessment on heavy metals in soil and vegetables in sewage irrigated areas in Tianjin suburbs[D]. Tianjin Polytechnic University, 2010.
- [27] 潘洁, 陆文龙. 天津市郊区蔬菜污染情况及对策[J]. *农业环境与发展*, 1997(4): 21-23.
PAN Jie, LU Wen-long. Pollution status of vegetable in Tianjin suburb and countermeasures[J]. *Agriculture Environment and Development*, 1997(4): 21-23.
- [28] 李宗梅. 天津市污灌区土壤-小麦系统重金属污染评价与相关分析[D]. 天津师范大学, 2006: 10-20.
LI Zong-mei. Assessment to heavy metals pollution in Tianjin sewage irrigated area soil and wheat and relative analysis[D]. Tianjin Normal University, 2006: 10-20.
- [29] Cui Y J, Zhu Y G, Zhai R H, et al. Transfer of metals from near a smelter in Nanjing, China[J]. *Environmental International*, 2004, 30: 785-791.
- [30] Ge K Y. The status of nutrient and meal of Chinese in 1990s[M]. Beijing People's Hygiene Press, 1992.
- [31] Wang X, Sato T, Xing B, et al. Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish[J]. *Sci Total Environ*, 2005, 350(1-3): 28-37.
- [32] 王璇, 黄国伟, 田惠光, 等. 2000—2004年天津市居民膳食营养状况调查[J]. *中国公共卫生*, 2007, 23(10): 1245-1247.
WANG Xuan, HUANG Guo-wei, TIAN Hui-guang, et al. Investigation on dietary of urban residents in Tianjin from 2000—2004, China[J]. *J Public Health*, 2007, 23(10): 1245-1247.
- [33] USEPA. Risk-based concentration table. Philadelphia PA: United States of Environmental Protection Agency[R], Washington D. C, 2000.
- [34] Chien L C, Hung T C, Choang K Y, et al. Daily intake of TBT, Cu, Zn, Cd and As for fishermen in Taiwan[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 285: 177-185.
- [35] Bennett D H, Kastenber W E, McKoe T E. A multimedia multiple pathway risk assessment of atrazine: The impact of age differentiated exposure including joint uncertainty and variability[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 1999, 63: 185-198.
- [36] 王小霞. 天津市北京排污灌区土壤中重金属形态的空间分布及影响因素研究[D]. 天津师范大学, 2012.
WANG Xiao-xia. Spatial distribution of heavy metals contamination fractions and influence factors in Beijing sewage discharge channel sewage irrigated area of Tianjin[D]. Tianjin Normal University, 2012.
- [37] 黄静宜, 许虹, 刘思宇. 天津东丽区大毕庄土壤重金属污染综合评价[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(22): 13442-13444.
HUANG Jing-yi, XU Hong, LIU Si-yu. Comprehensive evolution on heavy metal pollution in soil of Dabizhuang in Dongli District of Tianjin [J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2011, 39(22): 13442-13444.
- [38] WHO/FAO. Joint FAO/WHO Food Standard Programme Codex Alimentarius Commission 13th Session. Report of the thirty eight session of the codex committee on food hygiene[R]. Houston, United States of America, ALINORM 07/30/13, 2007.
- [39] Yang J, Chen T B, Zheng Y M, et al. Dynamic of heavy metals in wheat grains collected from Liangfeng Irrigated Area, Beijing and a discussion of availability and human health risks[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(12): 1661-1668.
- [40] Lokeshwari H, Chandrappa G T. Impact of heavy metal contamination of Bellandur Lake on soil and cultivated vegetation[J]. *Current Science*, 2006, 91: 620-627.