

北京市再生水灌溉对土壤、农作物的重金属污染风险

杨军¹, 陈同斌^{1*}, 雷梅¹, 刘洪禄², 吴文勇², 周军³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101;

2. 北京市水利科学研究所, 北京 100044; 3. 北京市排水集团, 北京 100044)

摘要: 如何准确、客观表征再生水长期灌溉的重金属污染风险是人们关注的主要问题之一。研究通过调查不同水源灌溉条件下土壤、小麦重金属含量, 结合不同输入途径对再生水灌区土壤重金属的贡献, 评估再生水灌溉对土壤、农作物的重金属污染风险。结果表明, 污灌区、再生水灌区土壤均呈现不同程度的重金属累积, 但不同灌区小麦籽粒的重金属含量之间没有差异。北京市再生水重金属浓度远远低于农田灌溉水质标准, 再生水灌渠中采集的水样重金属浓度与地下水重金属浓度之间的差异并不显著。通过再生水灌溉途径带入的重金属与地下水灌溉相当, 低于大气沉降和有机肥施用等输入途径带入的重金属。当前再生水灌溉导致土壤重金属污染的风险较小, 并不会导致农作物重金属超标。再生水灌区土壤重金属污染并不一定是由于再生水灌溉导致, 更大程度是早期的污水灌溉或有机肥施用造成的。

关键词: 土壤; 重金属; 再生水; 农作物; 污染风险

中图分类号: X144

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2011)02-0209-09

水资源匮乏推动污水再生回用, 预计 2030 年, 我国缺水量将达到 $130 \times 10^8 \text{ m}^3$, 再生水可利用量将达到 $767 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。再生水回用的污染风险是人们关注的主要问题之一^[1]。由于早期污水灌溉导致土壤重金属污染^[2-3], 天津、沈阳、保定、兰州等工业城市的污灌区表层土壤呈现不同程度的重金属污染^[4-8], 太原市部分地区、关中交口灌区浅层地下水产生重金属污染的风险^[9-10]。因此, 有观点认为再生水来源于污水, 用其进行灌溉可能会像污水灌溉那样产生污染问题。但是也有观点认为, 再生水是城市污水厂经过再生水工艺处理后的水, 重金属等污染物浓度显著降低, 且重金属浓度远远低于国家农田灌溉水质标准, 因此用其进行灌溉重金属污染风险较小。由于缺乏数据支持, 再生水灌溉的长期风险一直处于争议之中。

关于再生水灌溉对环境的影响已受到人们的广泛关注。通常情况下, 再生水灌溉不会导致土壤 pH 值上升^[11], 但也有再生水灌溉导致土壤 pH 值发生轻微变化的报道^[12-13]。Wang 等研究发现, 长期再生水灌溉对土壤孔隙率和镁含量造成影响, 导致土壤密度增加, 营养物的吸持能力下降^[14]。Pollice 等的研究表明, 再生水灌溉莴苣、胡萝卜、白菜、芹菜、菠菜、番茄, 番茄等蔬菜的产量、品质与常规水肥灌溉的蔬菜相似^[15]。关于再生水灌溉对土壤、农作物的重金属污染风险研究明显相对不足。

随着我国城市市政设施进一步完善, 城市污水厂对污水处理设施、技术进行更新, 城市工业废水未处理达标前禁止排放的法规严格执行, 城市污水厂出水水质得到很大改善^[16],

收稿日期: 2009-09-09; 修订日期: 2010-10-29。

基金项目: 北京市重大科技公关项目 (D0706007040291-02); 中国科学院知识创新工程重大项目 (kzcx1-yw-06-03)。

第一作者简介: 杨军(1979-), 男, 河南信阳人, 博士后, 主要研究区域土壤污染风险及控制对策。

* 通信作者简介: 陈同斌(1963-), 男, 研究员, 博士生导师。E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

再生水重金属浓度并不高,通过短期的灌溉试验得到的研究结果说服力不强。在实际生产过程中,长期的再生水灌溉现场并不存在,很难通过调查反映再生水长期灌溉导致的环境风险;并且当前再生水灌区在早期均有不同程度的污水灌溉历史,通过调查得到的信息不能真实反映再生水灌溉污染风险。有鉴于此,本研究通过长期污水灌溉现场的调查信息预测再生水灌溉对环境的污染风险;与早期相同区域的调查结果比较,辨识再生水灌溉区土壤重金属的主要来源;进一步运用通量计算的手段,比较再生水灌区不同输入途径对土壤重金属的贡献,评估再生水灌溉对土壤、农作物的重金属污染风险,为北京市等缺水城市开展大规模的再生水灌溉提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于北京市东南郊,属大陆季风气候,受季风影响,春季干旱多风,年降水量约620 mm。主要土壤类型为褐潮土、砂姜土以及一些零星分布的湿潮土、盐潮土。农作物类型以玉米、小麦为主。

由于调查区域农田灌溉水来源途径的不同,调查区域存在3个典型灌区,即凉水河灌区、北野厂灌区、井水灌溉区(图1)。凉水河灌区位于北京市凉水河流域两侧。凉水河曾是北

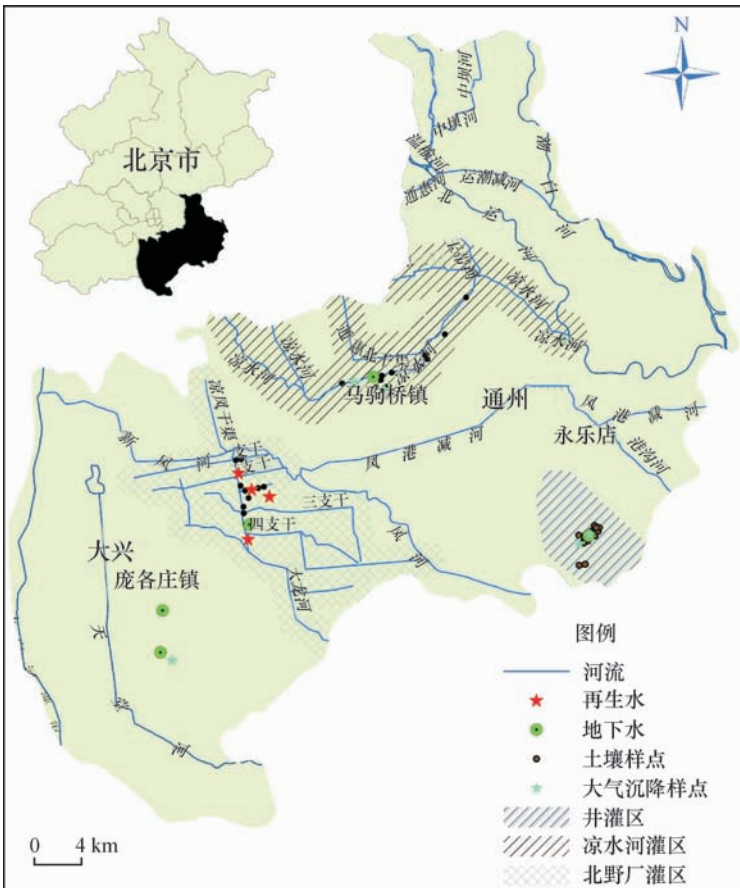


图1 调查样点分布

Fig. 1 Locations of sampling sites in the study area

京市第二排污河,自从上个世纪 60 年代,该区域进行污水灌溉(污泥施用),导致灌区土壤 Cd、Hg 污染严重^[17]。随着北京市对凉水河进行河道整治以及城市污水处理率的提高,河水水质得到明显改善。2003 年北野厂灌区作为北京市再生水灌溉示范区利用再生水进行农田灌溉。凉水干渠是研究区域内主要的灌溉河流,主要接纳小红门污水厂、黄村污水厂产生的再生水进行灌溉。早期北野厂灌区有污水灌溉的历史,导致重金属在土壤累积,但污染程度较凉水河灌区轻^[17-18]。井灌区(对照区)位于通州永乐店镇半截河村附近,该区域周边无明显的灌溉沟渠,农田灌溉长期以地下水为主。

1.2 样品采集

表层土壤样品在凉水河灌区采集 11 个,北野厂灌区 15 个,井水灌溉区 14 个;凉水河灌区小麦籽粒采集 11 个,井水灌溉区 13 个;北野厂灌区凉水干渠采集再生水水样 4 个;整个调查区域地下水样品采集 5 个;大气沉降采集点共设 6 个,具体位置如图 1,采样频率为每个月收集一次,采样时间从 2007-07 至 2008-07,共收集有效样品 66 个。

1.3 样品分析及测定

水样上机测定前体积浓缩 25 倍,加浓硝酸 10 mL 消煮至 1 mL 左右,定容于 50 mL 备测。用 ICP-MS (Perkin Elmer SCIEX ELAN DRC-e)测定溶液中的 Cr、Ni、Pb、Cd,氢化物发生-原子荧光光谱法(北京海光仪器公司,AFS2202)测定 As,火焰-原子吸收光谱法测定 Cu、Zn。

小麦籽粒用去离子水搓洗去除籽粒表层附着的灰尘,烘干至恒重。称取 5 g 左右样品,加硝酸 45 mL 过夜,采用 HNO₃-H₂O₂ 法消煮小麦籽粒,在 130 °C 左右消煮成透明溶液,如未消煮完全,冷却后加 H₂O₂ 继续消煮。用 ICP-MS (Perkin Elmer SCIEX ELAN DRC-e)测定 Cd、Cr、Ni、Pb,氢化物发生-原子荧光光谱法(北京海光仪器公司,AFS2202)测定 As,用火焰-原子吸收光谱法测 Cu、Zn。

采用美国环保局(USEPA)推荐的微波(MARS 5,CEM)消解方法 USEPA 3050 处理土壤样品^[19]。消煮液定容至 50 mL,用石墨炉-原子吸收光谱仪(Aalytic Jena,Vario 6.0)测定溶液中 Cd,用火焰-原子吸收光谱法(Aalytic Jena,Vario 6.0)测定 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn;氢化物发生-原子荧光光谱法(北京海光仪器公司,AFS2202)测定 As、Hg。

用亚沸水清洗集尘桶,用密封袋收集大气沉降样品,收集的样品在实验室冷冻干燥至恒重,测定样品重量。通过微波消解系统(MARS 5,CEM)采用美国环保局(USEPA)推荐的方法 USEPA 3050 处理大气沉降样品。消煮液定容至 50 mL,用 ICP-MS (Perkin Elmer SCIEX ELAN DRC-e)测定溶液中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn。

分析过程所用试剂均为优级纯,所用的水均为亚沸水。大气沉降样品、土壤样品分析过程中加入国家标准土壤样品(GSS-1,GSS-2);小麦籽粒样品分析过程中加入国家标准植物样品(GSV-3,GSV-4)进行分析质量控制。根据实验结果,标样中重金属的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。

2 结果

2.1 北京市城市污水处理厂出水(再生水)重金属含量

与《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)相比,北京市城市污水处理厂出水(再生水)重金属浓度平均值和加权平均值均远远低于农田灌溉水质标准,样品超标率均为 0(表 1)。表明北京市污水厂的出水重金属浓度符合农田灌溉水质标准,从重金属污染风险的角度考

虑,北京市污水厂的再生水可进行农田灌溉。

表 1 北京市污水厂出水重金属浓度 ($n=18$)

Table 1 Statistics of heavy metals in the effluent of wastewater treatment plants of Beijing ($n=18$)

重金属	重金属浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$					农田灌溉水质标准 $/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})^*$	超标率/%
	最小值	最大值	中值	算术均值	标准差		
As	1.51	21.0	3.73	5.47	4.90	100	0.00
Cd	-	0.030	0.005	0.006	0.008	10	0.00
Cr	-	2.72	0.41	0.88	0.85	100	0.00
Cu	3.13	13.3	4.82	6.34	5.65	1 000	0.00
Ni	10.3	92.9	17.0	27.2	25.1	-	-
Pb	1.40	4.45	2.85	2.81	0.90	200	0.00
Zn	22.0	149.0	45.4	63.5	38.0	2 000	0.00

注: * 表示农田灌溉水质标准(GB 5084—2005)。

2.2 再生水(再生水灌渠)与地下水重金属含量比较

与农田灌溉水质标准(GB 5084—2005)相比,北野厂灌区凉凤干渠采集的再生水水样超标率为 0,重金属浓度远远低于农田灌溉水质标准。与研究区域通州—大兴区地下水重金属浓度相比,北野厂灌区凉凤干渠的再生水 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 浓度与地下水重金属浓度无明显差异,仅 Zn 浓度显著高于地下水中 Zn 浓度。表明北野厂灌区凉凤干渠再生水重金属浓度与通州—大兴区地下水重金属浓度相当。在同等灌溉条件下,除 Zn 外,调查区域再生水灌溉带入的重金属并不一定比地下水灌溉带入的重金属多。

表 2 不同来源途径的灌溉水重金属浓度比较

Table 2 Comparison of heavy metals in irrigation water from different channels

样本量	重金属含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$							
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
通州—大兴区地下水	5	1.92a ¹⁾	0.022a	1.84a	2.66a	1.68a	0.75a	12.9a
北野厂灌渠再生水	4	1.50a	0.024a	1.13a	4.47a	2.74a	1.02a	29.2b
农田灌溉水质标准 ²⁾		100	10	100	1 000	-	200	2 000
地下水质量标准 I 类 ³⁾		5	0.1	5	10	-	5	50

注:1)表中数据后不同字母表示同一列的数据之间存在显著差异($P < 0.05$),下同;2)为农田灌溉水质标准(GB 5084—2005);3)为地下水质量标准(GB/T 14848—93)。

2.3 研究区域土壤的重金属含量

不同灌溉区土壤重金属含量的比较结果如表 3。凉水河灌区土壤重金属含量最高,尤其 As、Cr、Cu、Hg、Ni 和 Zn,其中 Cr、Cu、Hg、Zn 含量显著高于背景值,污染特征明显。北野厂灌区土壤重金属含量相对较低,尽管北野厂灌区土壤 As、Cu、Ni、Zn 含量显著高于井灌区土壤重金属含量,但与北京市土壤重金属背景值相比,北野厂灌区土壤重金属与北京市土壤重金属背景值差异不明显,污染特征不明显。井灌区土壤重金属含量最低,Ni、Pb 和 Zn 含量甚至低于北京市土壤背景值含量。

表 3 研究区域土壤重金属含量比较

Table 3 Comparison of heavy metals in soils sampled from the study area

样本量	不同灌区土壤重金属含量/(mg · kg ⁻¹)								
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
井灌区	14	6.65a	0.156a	29.8a	15.7a	0.049a	21.8a	13.1a	46.1a
北野厂灌区	15	7.99b	0.185a	31.1a	20.1b	0.005b	28.4b	17.5b	61.6b
凉水河灌区	11	8.61b	0.186a	42.0b	35.8c	0.134c	27.9b	17.4b	81.6c
北京市土壤背景值 ^[20]	115	7.81	0.145	31.1	19.7	0.0576	27.9	25.1	59.6

2.4 井灌区、凉水河灌区小麦籽粒中重金属含量

北京市通州一大兴区井灌区与凉水河灌区小麦籽粒重金属含量统计分析结果表明,二者之间的含量差异并不显著(表 4)。尽管凉水河灌区土壤 As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含量显著高于井灌区土壤重金属含量,尤其凉水河灌区土壤中 Cr、Cu、Hg、Zn 污染特征明显,但并没有导致小麦籽粒的重金属含量显著增加。

表 4 井灌区、凉水河灌区小麦籽粒重金属含量比较

Table 4 Comparison of heavy metals in wheat grain sampled from Liangshuihe irrigation district and area irrigated with groundwater

样本量	小麦重金属含量/(mg · kg ⁻¹)							
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
井灌区	13	0.038a	0.040a	0.525a	7.66a	0.367a	0.141a	36.1a
凉水河灌区	11	0.031a	0.048a	0.367a	7.57a	0.362a	0.106a	41.4a

3 讨论

3.1 再生水灌溉与其他途径的重金属输入通量

通过计算再生水灌区不同输入途径带入的重金属总量评估再生水灌溉对土壤的重金属污染风险。与其它输入途径相比,再生水灌溉途径带入的重金属远远低于大气沉降和有机肥施用等途径(表 5)。大气沉降输入的重金属是再生水灌溉输入途径的 31.4(Cd)、13.5(Cr)、4.0(Cu)、2.7(Ni)、28.8(Pb)、13.5(Zn)倍,相对于大气沉降、有机肥施用等输入途径,通过再生水灌溉途径带入的重金属量非常低。国外的研究结果也表明,使用城市污水厂处理后的再生水进行农田灌溉,并不会导致明显的重金属污染^[14,21]。当前,大气沉降或有机肥施用可能是灌区土壤重金属的主要输入途径。因此,从控制土壤重金属污染源头的角度分析,应优先监控大气沉降或有机肥施用等输入途径所带来的重金属污染风险。

表 5 北野厂灌区不同途径输入重金属含量比较

Table 5 Comparison of heavy metals from different input channels in Beiyechang irrigated area

输入途径	输入途径带入重金属含量/(g · hm ⁻² · a ⁻¹)							
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
有机肥施用 ¹⁾	18.1	14.6	401	206	1.20	142	168	892
化肥施用 ²⁾	0.244	0.013	3.84	0.513	0.017	-	0.033	6.10
再生水灌溉 ³⁾	6.75	0.11	5.09	20.1	-	12.3	4.59	131
大气沉降 ⁴⁾	-	2.72	56.2	65.0	-	28.3	147	1703

注:1)有机肥中重金属含量见参考文献[22],有机肥施用量参考城镇污水处理厂污泥处置-农用泥质标准(CJ/T 309-2009)污泥施用量以及文献[23];2)化肥中重金属含量见参考文献[24-25],化肥施用量参考中国统计年鉴,2007年全国化肥平均施用量(904 kg · hm⁻² · a⁻¹)^[26];3)再生水灌溉量参考农田灌溉水质标准(GB 5084-2005)旱地灌溉量;4)大气沉降数据来自本课题组在通州一大兴区 2007-2008 年的监测数据。

3.2 再生水灌溉对农作物的重金属污染风险

不同灌区土壤、农作物重金属含量的比较结果表明,尽管凉水河灌区土壤重金属含量高于井灌区土壤,但不同灌区的小麦籽粒重金属含量差异并不明显。在一定含量范围内,由于土壤自身的缓冲容量以及植物对土壤重金属的耐性,土壤重金属含量增加并不一定会导致小麦籽粒重金属含量相应增加。土壤重金属需要通过植物根、茎部位向上转运,最终进入小麦籽粒。由于植物根、茎对土壤重金属具有一定的阻碍作用,在一定含量范围内,土壤重金属的增加并不一定导致小麦籽粒中重金属含量相应增加。因此,从本文研究结果来看,再生水灌溉导致小麦重金属超标的可能性不大。再生水中重金属浓度与地下水重金属浓度的比较结果以及不同输入途径的比较结果均表明,再生水灌溉带入的重金属量有限,导致土壤重金属污染的风险并不高。

3.3 灌区土壤重金属的来源

与1980年北京东南郊环境污染调查组的研究结果相比,北野厂灌区土壤中仅Cd呈现一定程度的增加趋势,增幅为25.0%,其它重金属增幅并不明显,甚至有降低的趋势,如Cr、Hg、Pb和Zn。凉水河灌区土壤中As、Cu增幅较大,为15.6%和79.0%,其他重金属的增幅趋势并不明显(表6)。这表明,再生水灌区土壤中大部分重金属污染现象在1976年调查时已经存在,这种特征在凉水河灌区尤为明显。

表6 再生水灌区土壤重金属含量的比较

Table 6 Comparison of heavy metal concentrations in soils from reclaimed water irrigated area

调查区域	调查时间	不同灌区土壤重金属含量/(mg·kg ⁻¹)							
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
北野厂灌区	2007年	7.99	0.185	31.1	20.1	0.005	28.4	17.5	61.6
	1976年 ^[17]	8.27	0.148	56.5	19.0	0.131	-	23.2	87.1
凉水河灌区	2007年	8.61	0.186	42.0	35.8	0.134	27.9	17.4	81.6
	1976年 ^[17]	7.45	0.172	57.5	20.0	0.132	-	22.0	78.9

尽管再生水重金属含量非常低,但再生水灌溉的土壤仍存在重金属污染现象,如果仅通过再生水灌区的简单调查,得出的结论可能是再生水灌溉导致土壤重金属污染。通常,再生水灌区的灌溉水来源于附近的河流、灌渠,河流、灌渠主要接纳城市污水厂的出水。早期污水处理实施并不完善,污水处理率很低,出水中污染物浓度高,因此,再生水灌区均有不同程度的污水灌溉(污泥施用)历史^[27-28]。本研究区域中的北野厂灌区以及凉水河灌区曾有污水灌溉(污泥施用)的历史,研究结果表明,污水灌溉(污泥施用)容易导致土壤重金属污染^[17-29]。1980年东南郊环境污染调查及其防治途径研究结果也显示,凉水河灌区土壤Hg、Cd污染现象严重^[17]。这表明,再生水灌溉之前,凉水河灌区土壤已存在不同程度的重金属污染。随着城市污水厂污水处理设施、技术更新以及工业废水处理未达标之前禁止排放法规的严格实施,城市污水厂出水水质得到很大改善,再生水中重金属浓度远远低于农田灌溉水质标准。灌区农田灌溉水仍来源于城市污水厂出水,当前通过再生水灌溉途径带入的重金属非常少。因此,再生水灌区土壤的重金属污染并不一定是再生水灌溉导致,更大程度是早期的污水灌溉(污泥施用)或有机肥施用等造成的。

4 结论

(1) 通过再生水灌溉途径带入的重金属总量与地下水灌溉相当,且低于大气沉降和有

机肥施用等输入途径带入的重金属总量。

(2) 与对照区(井灌区)相比,再生水灌区土壤均呈现不同程度的重金属累积现象,但不同灌区小麦籽粒重金属含量没有差异,再生水灌溉并不会导致农作物重金属超标。

(3) 再生水灌区土壤重金属污染并不一定由再生水灌溉导致,更大程度是早期的污水灌溉(污泥施用)或有机肥施用等其它输入造成的。

参考文献 (References):

- [1] 刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. [LIU Chang-ming, CHEN Zhi-kai. Assessing the Current Water Resource and Studying the Trend of Supply & Demand for Water Resource in China. Beijing: China Waterpower Press, 2001.]
- [2] 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.
- [3] Möller 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.
- [4] 龚钟明, 曹军, 朱学梅, 等. 天津市郊污灌区农田土壤中的有机氯农药残留[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 459-461. [GONG Zhong-ming, CAO Jun, ZHU Xue-mei, et al. Organochlorine pesticide residues in agricultural soils from Tianjin. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(5): 459-461.]
- [5] 张乃明, 邢承玉, 贾润山, 等. 太原污灌区土壤重金属污染研究[J]. 农业环境保护, 1996, 15(1): 21-23. [ZHANG Nai-ming, XING Cheng-yu, JIA Run-shan, et al. Study on soil heavy metal pollution in sewage irrigation area of Taiyuan city. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(1): 21-23.]
- [6] 张勇. 沈阳郊区土壤及农产品重金属污染的现状评价[J]. 土壤通报, 2001, 32(4): 182-186. [ZHANG Yong. Heavy metal pollution of soil and agricultural products in Shenyang suburbs: Current situation. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(4): 182-186.]
- [7] 谢建治, 刘树庆, 刘玉柱, 等. 保定市郊土壤重金属污染对蔬菜营养品质的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(4): 325-327. [XIE Jian-zhi, LIU Shu-qing, LIU Yu-zhu, et al. Effects of heavy metal pollution in soil on nutrition, quality of vegetable in Baoding. *Agro-Environment Protection*, 2002, 21(4): 325-327.]
- [8] 王国利, 刘长仲, 卢子扬, 等. 白银市污水灌溉对农田土壤质量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, 41(1): 79-82. [WANG Guo-li, LIU Chang-zhong, LU Zhi-yang, et al. Influences of sewage irrigation on the field soil quality in Baiyin city. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2006, 41(1): 79-82.]
- [9] 王俊有. 太原市地下水水质现状及污染防治措施[J]. 环境科学动态, 2002(4): 19-21. [WANG Jun-you. The present situation of quality of groundwater and the countermeasure of pollution control in Taiyuan City. *Environmental Science Trends*, 2002(4): 19-21.]
- [10] 周海红, 张志杰. 关中清灌区农田生态系统污染现状研究[J]. 环境污染与防治, 2001, 23(6): 309-328. [ZHOU Hai-hong, ZHANG Zhi-jie. Research on agro-ecosystem pollution in Guanzhong irrigation district. *Environmental Pollution and Control*, 2001, 23(6): 309-328.]
- [11] Bouwer H, Idelovitch E. Quality requirements for irrigation with sewage water[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1987, 113: 516-535.
- [12] Stewart H T L, Hopmans P, Flinn D W, et al. Nutrient accumulation in flees and soil following irrigation with municipal effluent in Australia [J]. *Environmental Pollution*, 1990, 63: 155-177.
- [13] Qian Y L, Mecham B. Long-term effects of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways [J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(3): 717-721.
- [14] Wang Z, Chang A C, Wu L, et al. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland [J]. *Geoderma*, 2003, 114: 261-278.
- [15] Pollice A, Lopez A, Laera G, et al. Tertiary filtered municipal wastewater as alternative water source in agriculture: A field investigation in Southern Italy [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 324: 201-210.
- [16] Oliver I W, McLaughlin M J, Merrington G. Temporal trends of total and potentially available element concentrations in

- sewage biosolids; A comparison of biosolid surveys conducted 18 years apart [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 337(1/3): 139-145.
- [17] 北京东南郊环境污染调查及其防治途径研究协作组. 北京东南郊环境污染调查及防治途径研究(报告集)[C]. 1980: 625-627, 641-645, 665-666. [Study Group for Pollution Investigation and Control of Suburb of Beijing. Investigation of the Environmental Pollution and the Way of Control of Suburb of Beijing. Research Report. 1980: 625-627, 641-645, 665-666.]
- [18] 北京市水利科学研究所. 北京市再生水灌溉利用示范研究(报告集)[C]. 2005: 112. [Beijing Hydraulic Research Institute. The Experiment and Demonstration Study of Irrigation with Reclaimed Water in Beijing. Research Report. 2005: 112.]
- [19] USEPA(United States Environmental Protection Agency). Method 3050B: Acid digestion of sediments sludges and soils (revision 2) [R]. 1996.
- [20] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1): 117-122. [CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing. *Environmental Science*, 2004, 25(1): 117-122.]
- [21] Al-Nakshabandi G A, Saqqar M M, Shatanawi M R, et al. Some environmental problems associated with the use of treated wastewater for irrigation in Jordan [J]. *Agricultural Water Management*, 1997, 34(1): 81-94.
- [22] 李荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 392-397. [LIU Rong-le, LI Shu-tian, WANG Xiu-bin, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizer and organic wastes. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 392-397.]
- [23] 李晓华. 梯田玉米有机肥最佳施用量的研究[J]. 生态农业研究, 2000, 8(3): 44-46. [LI Xiao-hua. Study on the suitable application amount of organic fertilizer in maize terrace. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2000, 8(3): 44-46.]
- [24] 陈海燕, 高雪, 韩峰. 贵州省常用化肥重金属含量分析及评价[J]. 耕作与栽培, 2006(4): 18-19. [CHEN Hai-yan, GAO Xue, HAN Feng. Investigation and assessment the concentrations of heavy metals in usual fertilizer of Guizhou. *Culture with Planting*, 2006(4): 18-19.]
- [25] 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. 农村生态环境, 2004, 20(2): 62-64. [WANG Qi-chao, MA Zhuang-wei. Heavy metals in chemical fertilizer and environmental risks. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(2): 62-64.]
- [26] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007. [National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2007.]
- [27] Ramirez-Fuentes E, Lucho-Constantino C, Escamilla-Silva E, et al. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time [J]. *Bioresource Technology*, 2002, 85(2): 179-187.
- [28] 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]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 107(2/3): 151-165.
- [29] 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 北京市凉风灌区土壤重金属的积累及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9): 1175-1181. [YANG Jun, ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, et al. Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing. *Acta Science Circumstantiae*, 2005, 25(9): 1175-1181.]

Assessing the Effect of Irrigation with Reclaimed Water: The Soil and Crop Pollution Risk of Heavy Metals

YANG Jun¹, CHEN Tong-bin¹, LEI Mei¹, LIU Hong-lu², WU Wen-yong², ZHOU Jun³

(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS,

Beijing 100101, China; 2. Beijing Institute of Water Research, Beijing 100044, China;

3. Beijing Drainage Group Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: It was difficult to precisely assess the risk of heavy metals pollution of reclaimed water irrigation by field survey due to the shortage of irrigated area of long-term irrigation with reclaimed water and the interference caused by wastewater (sewage sludges) used in some reclaimed water irrigated area. The objective of this paper was to assess the pollution risk of heavy metals with reclaimed water irrigation by investigating the areas irrigated with irrigation water from different channels and comparing the heavy metals input from three different channels in the irrigated area. Compared to heavy metal concentrations of soils irrigated by groundwater, heavy metals were accumulated in the soils of wastewater irrigated area and reclaimed water irrigated area to a larger extent. However, there observed no significant difference in heavy metals concentrations of wheat grain sampled from different irrigated areas. Further investigation on the effluent of Beijing wastewater treatment plants and water sampled from Beiyechang irrigation canal showed that the heavy metal concentrations of reclaimed water were much lower than the standards for irrigation water quality. The input of heavy metals by reclaimed water irrigation was close to the input of heavy metals by groundwater irrigation, and was lower than the input by atmospheric deposition and organic fertilizer application. It was proposed that the risk of heavy metals caused by reclaimed water irrigation was small. Compared to early findings about environmental pollution of Beijing in 1976, the present study showed that the current heavy metal pollution of soils in the reclaimed water irrigated area did not necessarily result from reclaimed water irrigation but to a larger extent was caused by early wastewater irrigation (sewage sludges) or organic fertilizer application and atmospheric deposition.

Key words: reclaimed water; irrigation; soil; crop; heavy metal; risk