

网络出版时间:2014-05-28 11:34

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.06.021

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.06.021.html

北方污灌区土壤重金属污染特征分析

李小牛^{1,2}, 周长松³, 杜 斌⁴, 冯民权¹

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2 山西泽城西安水电有限公司, 山西 太原 030001;

3 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 4 中国煤炭地质总局, 北京 100039)

[摘要] **【目的】**研究我国北方污灌区农田土壤 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni、As、Hg 等 8 种重金属元素的污染特征, 为污灌区土壤环境质量评价、土壤重金属污染修复提供参考。**【方法】**以我国北方 30 个污灌区土壤重金属污染数据为基础, 采用统计分析方法、内梅罗综合污染指数法及地质累积指数法, 对北方污灌区土壤重金属的污染特征进行分析。**【结果】**结果表明, 北方污灌区农田土壤中 8 种重金属元素含量均未超过土壤环境质量二级标准, 但除 Cr 外, 其余 7 种重金属的平均含量均显著高于全国背景值; 8 种重金属含量变异系数从大到小依次为 Cd>Hg>Pb>As>Zn>Cu>Cr>Ni, 其中 Cu、Cr、Ni 在不同灌区差异性相对较小, Cd、Hg、Pb 在不同灌区差异较大; Cu 与 Zn、Cr、Cd、As、Hg, Zn 与 Ni, Cr 与 Pb、Ni、As、Hg, Cd 与 As 呈显著相关的概率较大, Pb 与 Cu、Zn、Ni、Hg, Hg 与 Zn、Cd、Ni、As 呈高度相关的概率较大; 各种重金属内梅罗综合指数和地质累积指数由大至小依次为 Cd>Hg>Cu>As>Zn>Pb>Ni>Cr。**【结论】**我国北方污灌区农田土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni、As、Hg 等 8 种重金属元素明显积累, 应该引起有关部门的足够重视。

[关键词] 土壤; 污灌区; 重金属污染; 相关系数; 内梅罗指数法; 地质累积指数法

[中图分类号] X825

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)06-0205-08

Pollution characteristics of heavy metals in sewage irrigated soil of Northern China

LI Xiao-niu^{1,2}, ZHOU Chang-song³, DU Bin⁴, FENG Min-quan¹

(1 Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 The Shanxi Zecheng Xi'an Hydropower Limited Company, Taiyuan, Shanxi 030001, China;

3 Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China;

4 China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China)

Abstract: **【Objective】**This research aimed to investigate the pollution characteristics of heavy metals Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, Ni, As and Hg in the surface soil of farmland in sewage irrigation area, which will provide a reference for the quality evaluation of soil environment and remediation of heavy mental pollution in sewage irrigated area. **【Method】**Based on the statistical data of 30 sewage irrigation regions in Northern China, this article analyzed the heavy mental pollution in sewage irrigation area with statistical analysis methods, Nemerow index method and geoaccumulation index method. **【Result】**Contents of tested heavy metals in the surface soil in sewage irrigation area in Northern China were all lower than the secondary standards regulated in Soil Environment Standards. However, the average contents of all the heavy metals except Cr were higher than their national background values. Their variation coefficients were in a decrea-

[收稿日期] 2013-06-24

[基金项目] 国家科技部创新基金项目(12C26213714122); 山西省水利科学技术研究项目(2012KW3603)

[作者简介] 李小牛(1966—), 男, 湖南临湘人, 高级工程师, 博士, 主要从事水污染控制和环境水力学研究。

E-mail: sxtylxn@163.com

sing order of $Cd > Hg > Pb > As > Zn > Cu > Cr > Ni$, among which Cu, Cr, and Ni had very small differences and Cd, Hg, and Pb had large differences. Significant relationships were found between Cu with Zn, Cr, Cd, As, and Hg, Zn with Ni, Cr with Pb, Ni, As, and Hg, and Cd with As, while extremely significant relationships were found between Pb with Cu, Zn, Ni and Hg, and Hg with Zn, Cd, Ni and As. The Nemerow indexes and geoaccumulation indexes of studied heavy metals were in a decreasing order of $Cd > Hg > Cu > As > Zn > Pb > Ni > Cr$. 【Conclusion】 Heavy metals Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, Ni, As and Hg were accumulated in soil of Northern China due to human activities.

Key words: soil; sewage irrigation area; heavy mental pollution; correlation coefficient; Nemerow index; geoaccumulation index

我国是一个农业大国,污水灌溉在区域农业经济发展中有着重要作用^[1]。目前,我国污水灌溉面积已达 361.84 万 hm^2 ,占灌溉总面积的 7.33%,其中 90%分布在水资源严重短缺的黄河流域及其以北的广大干旱半干旱地区^[2]。随着污水灌溉面积的扩大和污灌时间的延长,其在带来社会经济效益的同时,也带来了土壤重金属污染、作物减产等生态环境问题。截止 2010 年底,我国因污水灌溉而污染的耕地有 216.67 万 hm^2 ,每年因重金属污染的粮食达 1 200 万吨,造成的直接经济损失超过 200 亿元^[3]。这些问题已在一定程度上制约了区域农业,特别是我国北方缺水地区农业的持续发展,并对人类的健康构成了潜在威胁。因此,开展污灌区土壤重金属污染特征研究,对合理开发、利用、保护土地资源,实现工农业可持续发展具有重要的现实意义。

目前,国内外关于污灌区土壤重金属污染的研究比较多,代表性的研究成果有:2001 年 Ortega-Larrocea 等^[4]对墨西哥 Mezquital 河谷污灌区中的重金属进行了研究,得出土壤中重金属的富集程度与污灌时间密切相关;2005 年杨军等^[5]对北京市通州污灌区重金属污染特征进行了研究,得出土壤中多数重金属含量处于上升趋势的结论;2007 年陈牧霞等^[6]对新疆污灌区重金属含量及其形态进行了研究,发现 Cu、Zn、Ni、Cr、Pb 主要富集在 0~20 cm 表土中;2009 年林海鹏等^[7]对沈抚污灌区土壤重金属污染潜在的生态风险进行了评价,表明整个灌区土壤重金属污染的潜在生态危害为中等水平。然而上述研究均是针对某一或某两个灌溉区进行的点状研究,研究成果仅反映部分污灌区的重金属污染特征,对区域性污灌区重金属污染的共性特征缺乏系统认识。因此,开展跨地域污灌区重金属污染对比研究显得尤其必要。鉴于此,本研究以前人研究成果为基础,采用统计、综合指数等分析方法对我国北方污灌区重金属污染特征进行了研究。以期为我国北方

缺水地区土地资源的合理利用提供有益参考。

1 研究区概况

研究区包括黄河附近及其以北地区(见图 1),主要涉及河北、山西、宁夏、新疆、内蒙、北京、天津、辽宁、吉林、河南、山东等省区,地理坐标为北纬 $32^{\circ}22' \sim 53^{\circ}33'$,东经 $73^{\circ}21' \sim 135^{\circ}05'$,面积约 540 万 km^2 。研究区大多属于干旱半干旱气候区,地表水和地下水资源短缺。为了保证区域农业可持续发展,自 20 世纪 80 年代以来,很多地区陆续实施污水灌溉。目前大部分污水灌溉区均具有长达 30 年以上的灌溉历史。

2 污灌区土壤重金属数据来源与分析方法

2.1 数据来源

本研究所用的数据均来自“中国学术期刊全文数据库”、“中国博士学位论文全文数据库”、“中国优秀硕士学位论文全文数据库”中 2000 至 2012 年的相关污灌区土壤重金属污染的 25 篇文献(文献[5]~[29]),涉及新疆、内蒙、宁夏、山西、山东、河南、河北、北京、天津、辽宁和吉林等 11 个省区的 30 个灌区(见图 1),涉及的 0~20 cm 土样共 723 份,土壤重金属包括 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni、As 和 Hg。

2.2 分析评价方法

2.2.1 相关性分析 样品中重金属元素之间的相关性分析用软件 SPSS19.0 完成,其精度采用 Pearson 相关系数表示。Pearson 相关系数分为 $|\geq 0 \sim \leq 0.3|$ 、 $|\geq 0.3 \sim \leq 0.5|$ 、 $|\geq 0.5 \sim \leq 0.8|$ 、 $|\geq 0.8 \sim \leq 1.0|$ 4 个区间,每个区间对应的相关程度分别为微相关、实相关、显著相关和高度相关。在相关分析过程中,采用概率分布表征重金属落入某个相关区间的可能性。

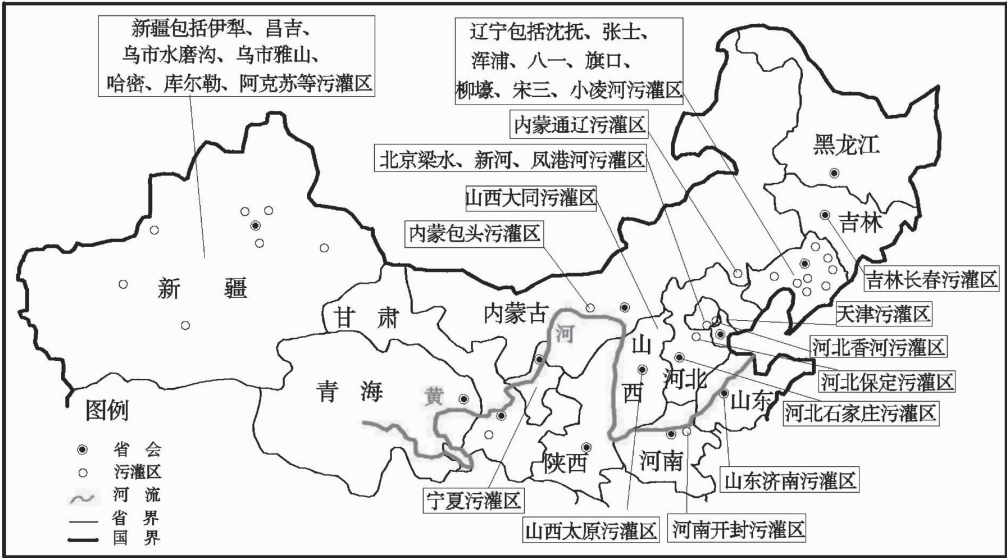


图 1 中国北方主要污水灌溉区分布图

Fig. 1 Distribution of sewage irrigated areas in Northern China

2.2.2 综合评价 目前应用于土壤重金属污染的评价方法比较多,主要有单指标法、潜在生态危害指数法^[30]、模糊数学评价法^[31]、内梅罗综合指数法^[32-33]、地质累积指数法^[34-35]等。其中,单指标法简单实用,潜在生态危害指数法强调多种重金属的综合作用,模糊数学评价法仅能定性地表征土壤的污染状况,内梅罗综合指数法和地质累积指数法均能表征单个重金属的污染程度和多种重金属共同作用下土壤的污染状况,但这些方法单独使用时均存在一定缺陷,评价结果不尽如人意。针对上述评价方法单独应用时的缺点,本研究将内梅罗综合指数法和地质累积指数法相结合。通过对 2 种方法评价结果的对比,揭示污灌区土壤中各种重金属的污染程度。

1)内梅罗综合指数法。内梅罗综合指数法兼顾了单项污染指数平均值和最大值,能够综合反映重金属对土壤的污染程度,是目前国内外进行土壤污染综合评价最常用的方法之一^[32-33],其计算公式如下:

$$I_i = C_i / S_i \tag{1}$$

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \tag{2}$$

$$P_N = \sqrt{\frac{I_{iMax}^2 + \bar{I}^2}{2}} \tag{3}$$

式中: I_i 为污染物 i 的污染指数; C_i 为污染物 i 的实测浓度; S_i 为污染物 i 的评价标准,本研究采用中国环境监测总站 1990 年土壤重金属元素全国背景值作为标准^[36]; $\bar{I}$ 为单项污染指数平均值; I_{iMax} 为单项

污染指数最大值; P_N 为内梅罗综合污染指数。

按照内梅罗综合污染指数的大小,可将土壤污染程度划分为如表 1 所示的 5 个等级。

表 1 内梅罗综合污染指数污染程度分级标准

Table 1 Grade standards of Nemerow index method

等级 Grading	综合污染指数 Complex pollutants index	污染程度 Pollution degree
I	$P_N \leq 0.7$	安全 Safety
II	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒级 Caution
III	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染 Mildly polluted
IV	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染 Moderately polluted
V	$P_N > 3.0$	重度污染 Heavily polluted

2)地质累积指数法。地质累积指数(I_{geo})法是德国科学家 Muller 于 20 世纪 70 年代提出的用于研究重金属污染程度的一种方法^[34-35], I_{geo} 计算公式如下。

$$I_{geo} = \lg(C_i / (1.5 B_i)) \tag{4}$$

式中: C_i 为样品中第 i 种元素的实测含量(mg/kg); B_i 为第 i 种元素的背景值(mg/kg),土壤重金属元素全国背景值采用文献[36]的标准;1.5 为修正指数。

按照地质累积指数的大小,可将污染分为 7 个等级^[37],表 2 给出了地质累积指数的分级标准与污染程度划分标准^[7,34]。

3 结果与分析

3.1 土壤中重金属含量的分布及富集状况

表 3 给出了污灌区重金属空间分布特征及在土壤中的富集状况。由表 3 可知,不同污灌区土壤中重

金属含量分布差异较大,总体上看,8 种重金属含量均值由大到小依次为:Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>As>Cd>Hg;其含量变异系数从大到小依次为 Cd>Hg>Pb>As>Zn>Cu>Cr>Ni,其中 Cd、Hg、Pb 变异系数均在 0.65 以上,表明此 3 种重金属在不同灌区存在着较大差异,而 Zn、Cu、Cr、Ni 变异系数在 0.39~0.26,表明它们在不同灌区差异性相对较小。

表 2 地质累积指数污染程度划分标准
Table 2 Grade standards of geoaccumulation index method

等级 Grading	地质累积指数 Geoaccumulation index	污染程度 Pollution level
I	$I_{geo} < 0$	无 Non
II	$0 \leq I_{geo} < 1$	无-中度 Non- Moderate
III	$1 \leq I_{geo} < 2$	中度 Moderate
IV	$2 \leq I_{geo} < 3$	中度-强 Moderate-Strong
V	$3 \leq I_{geo} < 4$	强污染 Strong
VI	$4 \leq I_{geo} < 5$	强-极强 Strong-Extremely
VII	$I_{geo} \geq 5$	极强 Extremely

土壤重金属元素的标准值和背景值是判别土壤

表 3 研究区表层土壤的重金属含量特征
Table 3 Distribution of heavy metals in top soil of sewage irrigated area

项目 Items	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni	As	Hg
含量/(mg·kg ⁻¹)	16.5~	9.97~	52.83~	35.96~	0.05~	6.27~	4.53~	0.04~
Content range	66.2	109.5	203.52	96.85	2.23	49.00	32.34	0.73
均值/(mg·kg ⁻¹) Average	34.51	27.80	93.96	55.95	0.56	33.29	11.35	0.20
中值/(mg·kg ⁻¹) Median	31.18	25.11	87.34	49.06	0.27	33.61	9.40	0.15
变异系数 Variation coefficient	0.36	0.69	0.39	0.32	1.33	0.29	0.62	0.88
超标率/% Exceeding rate	82	47	67	35	77	89	33	93

3.2 重金属元素间的相关性分析

相关分析是研究不同因子之间相关程度的一种统计方法。土壤重金属元素间相关性显著,说明元

污染程度的一项重要依据^[37-38]。将本研究数据与《土壤环境质量标准》^[33]中的二级标准(Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni、As 和 Hg 含量分别不超过 100,350,300,350,0.6,60,20 和 1.0 mg/kg)进行对比分析,结果显示,8 种重金属均值均未超过土壤环境质量二级标准;与全国土壤重金属元素背景值(Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni、As 和 Hg 含量分别为 22.6,26,74.2,61,0.097,26.9,11.2 和 0.065 mg/kg)^[36]相比,除 Cr 外,其余 7 种重金属的平均含量均显著高于全国背景值,其中重金属 Cd 含量与背景值的差异最大,其平均值为背景值的 5.75 倍。在统计的污灌区中,Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni、As、Hg 均不同程度地超过全国背景值(表 3),其中有近 90%的污灌区土壤 Hg 和 Ni 含量超过全国背景值。可见,随着污水灌溉年限的增加和范围的扩大,污灌区土壤已呈现出不同程度的重金属污染。

素间一般具有同源关系或是复合污染^[23,38]。对污灌区土壤中 8 种重金属进行相关性统计分析,结果见表 4。

表 4 污灌区表层土壤重金属元素间相关关系的概率分布特征
Table 4 Probability distribution of correlation between heavy metals in top soil in sewage irrigated area %

项目 Item	微相关 Low correlation	实相关 True correlation	显著相关 Significant correlation	高度相关 High correlation	项目 Item	微相关 Low correlation	实相关 True correlation	显著相关 Significant correlation	高度相关 High correlation
Cu-Pb(15)	20	13	27	40	Zn-Cd(9)	0	44	33	22
Cu-Zn(14)	0	21	50	29	Zn-Ni(9)	11	22	44	22
Cu-Cr(12)	17	8	42	33	Zn-As(5)	80	0	0	20
Cu-Cd(12)	8	17	42	33	Zn-Hg(5)	40	0	20	40
Cu-Ni(10)	20	40	20	20	Cr-Cd(10)	60	0	30	10
Cu-As(6)	0	0	50	50	Cr-Ni(10)	30	30	40	0
Cu-Hg(6)	0	0	67	33	Cr-As(7)	0	14	57	29
Pb-Zn(14)	14	21	21	43	Cr-Hg(7)	0	14	43	43
Pb-Cr(13)	23	23	46	8	Cd-Ni(9)	11	44	33	11
Pb-Cd(14)	21	43	21	14	Cd-As(8)	25	13	50	13
Pb-Ni(11)	9	27	18	45	Cd-Hg(8)	13	25	25	38
Pb-As(8)	25	38	13	25	Ni-As(6)	33	17	17	33
Pb-Hg(8)	0	25	25	50	Ni-Hg(6)	33	17	17	33
Zn-Cr(11)	45	9	27	18	As-Hg(7)	14	14	29	43

注:Cu-Pb(15)代表 Cu 与 Pb 两元素的相关性,15 代表统计的样本个数,其他项目意义依此类推。
Note:Cu-Pb represents correlation between Cu and Pb. and 15 is number of samples,the same for others.

由表 4 可知,Cu 与 Zn、Cr、Cd、As、Hg, Zn 与 Ni,Cr 与 Pb、Ni、As、Hg,Cd 与 As 呈显著相关的概率较大,Pb 与 Cu、Zn、Ni、Hg,Hg 与 Zn、Cd、Ni、As 呈高度相关的概率较大,说明 Cu、Cr、Pb 和 Hg 与其他元素常常是以复合型污染存在的,污灌区土壤重金属污染应该是由灌区土壤接纳了来自多个污染源所排放的污水所致。

3.3 土壤重金属污染评价

本研究采用内梅罗综合指数法和地质累积指数法对研究区土壤重金属污染进行评价,结果见表 5 和表 6。

3.3.1 内梅罗综合指数 由表 5 可知,各污灌区农田表土 8 种重金属的内梅罗指数落在 I 和 II 级区间的概率排序为 As(67%)>Pb(39%)>Cr(28%)>Zn(27%)>Cd(20%)>Hg(13%)>Ni(10%)>Cu(6%);落在 III 区间的概率排序为 Ni(90%)>Cr(64%)>Pb(39%)>Cu(38%)>Zn(33%)>As(22%)>Cd(13%)>Hg(0);落在 IV 和 V 区间的概率排序为 Hg(88%)>Cd(67%)>Cu(57%)>

Zn(40%)>Pb(22%)>As(11%)>Cr(7%)>Ni(0)。综合评价结果表明,8 种重金属对污灌区造成了不同程度的污染,其中 Pb、Cr、Ni 达到了 III 级标准,Cu、Zn、As 达到了 IV 级标准,Cd、Hg 达到了 V 级标准。污灌区 8 种重金属的综合指数排序为 Cd>Hg>Cu>As>Zn>Pb>Ni>Cr。

3.3.2 地质累积指数 由表 6 可知,研究区农田表土 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、As 6 种重金属的地质累积指数落在 I、II 2 个等级的概率最大,这说明污灌区土壤重金属以无污染和中度污染为主。综合评价结果表明,Cu、Cd、Hg 的地质累积指数达到了中度污染的标准,是污灌区中的主要污染物,污灌区 8 种重金属的地质累积指数排序为 Cd>Hg>Cu>As>Zn>Pb>Ni>Cr。

由上述 2 种方法的评价结果可以看出,8 种重金属在研究区的污染程度不同,其中以 Cu、Cd 和 Hg 污染尤为严重。说明污水灌溉已导致重金属元素在污灌区农田土壤中明显积累,虽然其未达到失控的程度,但提前进行治理和预防已显得非常必要。

表 5 污灌区农田表层土壤重金属污染内梅罗综合指数评价结果
Table 5 Nemerow indexes of heavy metals in top soil in sewage irrigated area

项目 Items	内梅罗综合指数在各等级间的概率分布/% Probability distribution of Nemerow index					综合评价等级(指数) Comprehensive assessment (Index)
	I	II	III	IV	V	
Cu(16)	0	6	38	44	13	IV (2.34)
Pb(18)	33	6	39	11	11	III (1.58)
Zn(15)	0	27	33	27	13	IV (2.14)
Cr(14)	7	21	64	7	0	III (1.30)
Cd(15)	0	20	13	0	67	V (16.78)
Ni(10)	10	0	90	0	0	III (1.56)
As(9)	11	56	22	0	11	IV (2.16)
Hg(8)	0	13	0	63	25	V (8.19)

注:Cu(16)表示 Cu 元素和统计的灌区数为 16,其他项目意义依此类推。下表同。
Note:Cu shows the element Cu,and 16 means the number of irrigation area,the same for others. The same for Table 6.

表 6 污灌区农田表层土壤重金属污染地质累积指数评价结果
Table 6 Geoaccumulation indexes of heavy metals in top soil in sewage irrigated area

项目 Items	地质累积指数在各等级间的概率分布/% Probability distribution of geoaccumulation index							综合评价等级(指数) Comprehensive assessment (Index)
	I	II	III	IV	V	VI	VII	
Cu(18)	56	44	0	0	0	0	0	II (0.03)
Pb(20)	85	15	0	0	0	0	0	I (-0.58)
Zn(15)	67	33	0	0	0	0	0	I (-0.28)
Cr(14)	100	0	0	0	0	0	0	I (-0.71)
Cd(18)	39	11	28	0	22	0	0	III (1.94)
Ni(10)	90	10	0	0	0	0	0	I (-0.64)
As(9)	89	11	0	0	0	0	0	I (-0.24)
Hg(11)	27	36	18	18	0	0	0	II (1.04)

4 结 语

研究表明,研究区地表土壤 8 种重金属含

量均值大小依次为:Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>As>Cd>Hg。8 种重金属的变异系数从大到小依次为 Cd>Hg>Pb>As>Zn>Cu>Cr>Ni,其中 Cu、

Cr、Ni 重金属在不同灌溉区差异性相对较小,Cd、Hg、Pb 在不同灌区存在着较大差异。通过与评价标准对比分析,8 种重金属未超过《土壤环境质量标准》的二级标准,但不同程度的超过全国土壤重金属元素背景值,其中 Cd 的超标最为严重,其平均值达到背景值的 5.75 倍,同时有将近 90% 的污灌区土壤 Hg 和 Ni 含量超过背景值。重金属元素间的相关性分析表明,Cu 与 Zn、Cr、Cd、As、Hg,Zn 与 Ni,Cr 与 Pb、Ni、As、Hg,Cd 与 As 呈显著相关的概率比较大,Pb 与 Cu、Zn、Ni、Hg,Hg 与 Zn、Cd、Ni、As 呈高度相关的概率比较大,表明 Cu、Cr、Pb 和 Hg 常常与其他元素以复合型污染存在。内梅罗综合指数法和地质累积指数法评价结果均表明,8 种重金属在污灌区有着不同程度的污染,且以 Cu、Cd 和 Hg 污染为主。污灌区 8 种重金属的内梅罗综合指数和地质累积指数排序一致,为 $Cd > Hg > Cu > As > Zn > Pb > Ni > Cr$ 。

研究区污水灌溉对农田土壤的影响既有历史继承性,又有现实持续性。这意味着污灌区将在相当长的时间内存在着重金属污染风险。建议密切关注外源毒性重金属元素在污灌区土壤环境中的累积性变化,进一步加强重金属污染物在垂直方向的迁移特征及其对潜水影响的研究。

[参考文献]

[1] Abdellah A R,Nicholas J A. Innorative production treatment hgdronic farm for primary municipal sewage utilization [J]. Water Resource,2000,34(3):825-834.

[2] 曾德付,朱维斌.我国污水灌溉存在问题和对策探讨 [J]. 干旱地区农业研究,2004,22(4):221-224.

Zeng D F,Zhu W B. Discussion on problems of sewage irrigation and countermeasures in China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2004,22(4):221-224. (in Chinese)

[3] 梁 为. 粮食重金属污染趋重:被污染耕地仍在种植,部分粮食流向市场 [EB/OL]. (2013/2/7)[2014/3/18]. <http://time-weekly.com/story/2013-02-07/128898.html>.

Liang W. Heavy metal contamination of food is becoming more and more serious;polluted farmland is still planted,part of the polluted grain is going to the market [EB/OL]. (2013/2/7)[2014/3/18]. <http://time-weekly.com/story/2013-02-07/128898.html>. (in Chinese)

[4] Ortega-Larrocea M P,Siebe C,Bécard G,et al. Impact of a century of wasterwater irrigation on the abundance of arbuscular mycorrhizal spores in the soil of the Mlezquital Vally of Mexio [J]. Applied Soil Ecology,2001,16:149-157.

[5] 杨 军,郑袁明,陈同斌.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 J,Zheng Y M,Chen T B. Accumulation and temporal

variation of heavy metals in the soils from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005,25(9):1175-1181. (in Chinese)

[6] 陈牧霞,地里拜尔·苏力坦,杨 潇. 新疆污灌区重金属含量及形态研究 [J]. 干旱区资源与环境,2007,21(1):150-154.

Chen M X,Dilibar S,Yang X. Research on concentration and chemical speciation of heavy metals in sewage irrigated soil of xin jiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2007,21(1):150-154. (in Chinese)

[7] 林海鹏,于云江,李定龙. 沈抚污灌区土壤重金属污染潜在生态风险评价 [J]. 环境与健康杂志,2009,26(4):320-322.

Lin H P,Yu Y J,Li D L,et al. Assessment of heavy metal pollution using potential ecological risk indexes in the shen-fu sewage irrigation regions [J]. Journal of Environment and Health,2009,26(4):320-322. (in Chinese)

[8] 孙正风,王金保,马京军. 宁夏污水灌溉对土壤和农产品质量的影响 [J]. 宁夏农林科技,1999(4):7-11.

Sun Z F,Wang J B,Ma J J. Sewage irrigation on the quality of the soil and agricultural products in ningxia [J]. Ningxia Journal Agriculture and Forestry Science and Technology, 1999 (4):7-11. (in Chinese)

[9] 韩晋仙. 开封市化肥河污灌区土壤-小麦系统重金属污染及其迁移 [D]. 郑州:河南大学,2000.

Han J X. Pollution and migration of heavy metals of the soil-wheat system at sewage irrigation region of huafei river in kaifeng city [D]. Zhengzhou:Henan University,2000. (in Chinese)

[10] 刘建武. 郑州市郊区不同灌区土壤——作物系统有害元素富集规律研究 [D]. 郑州:河南农业大学,2000.

Liu J W. Study on regulations that harmful elements are absorbed in soil-crop (rice,wheat)system in the four sorts of irrigation fields in the suburb of zhengzhou city [D]. Zhengzhou:Henan Agricultural University,2000. (in Chinese)

[11] 张乃英. 鞍山宋三污灌区土壤重金属污染状况评价 [J]. 农业环境与发展,2005,24(3):41-44.

Zhang N Y. The assessment of heavy mental pollution in songsan sewage irrigation region [J]. Agro-environment and Development,2005,24(3):41-44. (in Chinese)

[12] 卢桂兰,韩 梅,李发生. 北京市通州污灌区土壤环境质量监测和蔬菜重金属污染状况研究 [J]. 中国环境监测,2005,21(6):54-56.

Lu G L,Han M,Li F S. Monitoring of soil environment pollution and vegetable contamination by heavy metals in Tongzhou irrigation area of Beijing city [J]. Environmental Monitoring in China,2005,21(6):54-56. (in Chinese)

[13] 万金颖,纪玉琨,巨振海. 污水灌溉区土壤重金属的空间分布特征 [J]. 环境工程,2006,24(2):87-88.

Wan J Y,ji Y K,Ju Z H,et al. Characteristics of heavy metals space distributing in wastewater irrigation area [J]. Environmental Engineering,2006,24(2):87-88. (in Chinese)

[14] 李 宁. 长春市污灌区土壤-植物系统中 Cd 的污染与形态研究 [D]. 长春:东北师范大学,2006.

- Li N. Study on cadmium pollution and its forms analysis of soil-vegetable system in wastewater irrigation region in changchun city [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2006. (in Chinese)
- [15] 陈俊, 范文宏, 孙如梦. 新河污灌区土壤中重金属的形态分布和生物有效性研究 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(5): 831-837.
- Chen J, Fan W H, Sun R M. Bioavailability and species distribution of heavy metals in sewage-irrigated soil from Xinhe [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(5): 831-837. (in Chinese)
- [16] 唐家黎, 李洪香, 曹志全. 通辽地区污灌区土壤重金属污染状况的调查与评价 [J]. 光谱实验室, 2007, 24(5): 949-952.
- Tang J L, Li H X, Cao Z Q. Investigation and appraisal of the heavy metal pollution of sewaged soil in tongliao [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2007, 24(5): 949-952. (in Chinese)
- [17] 葛红梅. 大同市污灌区土壤重金属污染现状 [J]. 农业环境与发展, 2007, 38(2): 107-109.
- Ge H M. The heavy metal pollution of datong city [J]. Agro-Environment & Development, 2007, 38(2): 107-109. (in Chinese)
- [18] 徐晟徽, 郭书海, 胡筱敏. 沈阳张士灌区重金属污染再评价及镉的形态分析 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2144-2148.
- Xu S H, Guo S H, Hu X M, et al. Revaluation of soil heavy metals pollution in zhangshi irrigation area of shenyang and analysis of cd forms in soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(9): 2144-2148. (in Chinese)
- [19] 向梅华. 北京市东南郊原污灌区土壤重金属污染评价及生物有效性分析 [D]. 北京: 中国地质大学, 2007.
- Xiang M H. The assessment of contamination and bioavailability of heavy metals in soil, east-south area of Beijing [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007. (in Chinese)
- [20] 周振民, 朱彦云, 冯飞. 开封市污灌区土壤重金属污染评价 [J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2267-2270.
- Zhou Z M, Zhu Y Y, Feng F. The assessment of heavy metal pollution in KaiFeng's sewage irrigation region [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(6): 2267-2270. (in Chinese)
- [21] 王玉红. 北京市凉水河污灌区土壤重金属污染研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- Wang Y H. Heavy metal pollution in sewage-irrigated soils along the liangshui river of beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008. (in Chinese)
- [22] 隋文义, 孙晓怡, 唐伟. 抚顺李石污灌区土壤环境质量初评 [J]. 环境科学与管理, 2009, 34(7): 131-136.
- Sui W Y, Sun X Y, Tang W. Assessment of soil environmental quality of lishi sewagewater irrigation region in fushun [J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(7): 131-136. (in Chinese)
- [23] 李名升, 佟连军. 辽宁省污灌区土壤重金属污染特征与生态风险评价 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1517-1522.
- Li M S, Tong L J. Specificity and ecological risk of heavy metal pollution in Liaoning sewage irrigation district [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(6): 1517-1522. (in Chinese)
- [24] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平. 太原市污灌区土壤重金属污染现状评价 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1553-1560.
- Xie W Y, Fan G S, Zhou H P. Access of heavy metals pollution of the sewage irrigation region in taiyuan, china [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(8): 1553-1560. (in Chinese)
- [25] 刘燕玲. 保定市郊污灌区土壤重金属时空分布特征与潜在生态风险评价 [D]. 河北保定: 河北农业大学, 2011.
- Liu Y L. Distribution and risk evaluation of heavy metals in sewage irrigated area of baoding [D]. Baoding, Hebei: Agricultural University of Hebei, 2011. (in Chinese)
- [26] 袁鑫. 通辽市孔家乡污灌区重金属的分布特性的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- Yuan X. Study of the distribution of heavy metals of sewage irrigation region in kongjia, tong liao [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [27] 张庆辉, 王贵, 朱晋. 包头南郊污灌区农田表层土壤重金属潜在生态风险综合评价 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(7): 181-186.
- Zhang Q H, Wang G, Zhu J. Comprehensive evaluation of potential ecological risk of heavy metals in the surface soil of the farmland in wastewater irrigation area of southern suburbs in Baotou [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2012, 40(7): 181-186. (in Chinese)
- [28] 贾曼. 石家庄污灌区土壤重金属污染现状调查及其风险评价 [D]. 石家庄: 河北医科大学, 2012.
- Jia M. The investigation and the assessment of the heavy metal pollution on sewage irrigation region in shijiazhuang city [D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2012. (in Chinese)
- [29] 杜晓林. 小清河污灌区土壤重金属形态分析及生物有效性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
- Du X L. Chemical fractionation and bioavailability of heavy metals in sewage-irrigated soils from xiaoqing river [D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [30] Hakanson L. An ecology risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14: 975-1001.
- [31] 石晓翠, 钱翌, 熊建新. 模糊数学模型在土壤重金属污染评价中的应用 [J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 334-336.
- Shi X C, Qian Y, Xiong J X. Application of fuzzy mathematics models in the evaluation of soil heavy metal pollution [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(2): 334-336. (in Chinese)
- [32] Ogunkunle, Clement Oluseye, Fatoba, et al. Pollution loads and the ecological risk assessment of soil heavy metals around a mega cement factory in Southwest Nigeria [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2013, 22(2): 487-493.
- [33] 杜斌, 孙强, 祁志冲, 等. 太原市小店污灌区土壤重金属污

染现状评价 [J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(3): 329-335.

Du B, Sun Q, Qi Z C, et al. Evaluation of heavy metal pollution in soil of xiaodian sewage irrigation area in taiyuan [J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2011, 32(3): 329-335. (in Chinese)

[34] Colak, Mumtaz. Heavy metal concentrations in sultana-cultivation soils and sultana raisins from Manisa (Turkey) [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(3): 695-712.

[35] Lee Pyeong-Koo, Youm Seung-Jun, Jo Ho-Young, et al. Heavy metal concentrations and contamination levels from Asian dust and identification of sources: A case-study [J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 1018-1025.

[36] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

China National Environmental Monitoring Centre. China's soil element background values [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. (in Chinese)

[37] 贾振邦, 周 华, 赵智杰, 等. 应用地积累指数法评价太子河沉积物中重金属污染 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2000, 36(4): 525-530.

Jia Z B, Zhou H, Zhao Z J, et al. The application of the index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution in sediments in the benxi section of the taizi river [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis: Natural Science Edition, 2000, 36(4): 525-530. (in Chinese)

[38] 裴延全, 王里奥, 包 亮, 等. 三峡库区小江流域土壤重金属的分布特征与评价分析 [J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 206-211.

Pei Y Q, Wang L A, Bao L, et al. Distribution characteristics and evaluation of soil heavy metals in water-level-fluctuating zone in xiaojiang river [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(2): 206-211. (in Chinese)

(上接第 204 页)

[20] Zaady E, Kuhn U, Wilske B, et al. Patterns of CO₂ exchange in biological soil crusts of successional age [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 959-966.

[21] 肖 波, 赵允格, 许明祥, 等. 陕北黄土区生物结皮条件下土壤养分的积累及流失风险 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1019-1026.

Xiao B, Zhao Y G, Xu M X, et al. Soil nutrients accumulation and their loss risk under effects of biological soil crust in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 1019-1026. (in Chinese)

[22] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 等. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析 [J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 344-352.

Li Z P, Zhang T L, Chen B Y, et al. Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 344-352. (in Chinese)

[23] 申丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 200-205.

Chuan L M, Zhao T K, An Z Z, et al. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(11): 200-205. (in Chinese)

[24] 马 骞, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区不同覆被棕壤理化特征对径流溶解态氮磷输出的影响 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1526-1536.

Ma Q, Yu X X, Liu Q J, et al. Effect of physicochemical properties of brown earth under different land cover in the Yimeng mountainous area on the output of dissolved nitrogen and phosphorus in runoff [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(7): 1526-1536. (in Chinese)

[25] 杨 凯, 赵允格, 马昕昕. 黄土丘陵区生物土壤结皮层水稳性 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 173-177.

Yang K, Zhao Y G, Ma X X. Water stability of biological soil crusts in hilly regions of Loess Plateau, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 173-177. (in Chinese)