

太原市敦化灌区土壤重金属污染特征及评价

陈翠翠¹, 梁镇海¹, 韩玉兰², 成昌顺², 罗玉², 续卫国², 马爱成²

(1. 太原理工大学化学化工学院, 太原 030024; 2. 太原市清徐县水务局, 太原 030400)

摘要:对太原市敦化灌区5个乡镇的农田土壤重金属铜、锌、汞、镍、铅、铬、镉和砷的分布特征进行调查,每个采样点分不同深度取样,共采集样品130个,其中表层土样95个,根据国标对土壤理化性质和重金属含量进行分析测定,最后采用污染指数法对土壤污染程度进行评价。结果表明,敦化灌区土壤属于壤土类,有机质含量1.69%,平均pH值为8.01,偏碱性;重金属平均含量除Cd($1.247 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)外,其余均低于国家二级标准值;采用内梅罗综合污染指数法评价,五个采样区的污染程度为:董家营村西(1.726) > 王答乡南(1.524) > 孟封镇北(1.500) > 西谷乡东(1.474) > 鹅池村南(1.344),平均综合指数为1.514。以单因子污染指数评价,在所调查的8种重金属中,Cd污染程度最严重,污染指数达2.078,其他依次为Ni(0.620) > Cu(0.392) > Zn(0.383) > As(0.247) > Hg(0.171) > Cr(0.113)。总体上,清徐县土壤重金属属于轻度污染,农作物已经开始受到污染,但重金属Cd达到中度污染,应引起注意及时进行治疗。

关键词:敦化灌区;重金属;污染指数法;污染评价

中图分类号:X825 文献标识码:A 文章编号:1672-2043(2010)增刊-0069-05

Pollution Characteristic and Evaluation of Heavy Metals in Dunhua Sewage Irrigation Area of Taiyuan City

CHEN Cui - cui¹, LIANG Zhen - hai¹, HAN Yu - lan², CHENG Chang - shun², LUO Yu², XU Wei - guo², MA Ai - cheng²

(1. Department of Chemistry and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Water Resources Bureau of Qingxu County, Taiyuan 030400, China)

Abstract: Distribution characteristics of copper, zinc, mercury, nickel, lead, chromium, cadmium and arsenic in five different towns of Dunhua sewage irrigation area in Taiyuan city were investigated. Soil physical properties and heavy metals content of 130 samples was determined according to national standard, finally the degree of soil pollution was evaluated with the pollution index method. The results shows that: the soil of Dunhua irrigation area are loam soil type, organic matter content are 1.69 percent, the average pH value are 8.01. Except the average contents of heavy metals Cd was $1.247 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, other heavy metals below the national standard value; Dong Village West(1.726) was the most serious one by Nemero pollution index, followed by Wang Da south(1.524), Meng Feng Town(1.500), West Valley Town(1.474), Goose Pond Village South(1.344), the comprehensive pollution index of soil heavy metal in Dunhua irrigation area is 1.514. And we obtained the pollution of heavy metals in sewage irrigation area followed by the degree of Cd(2.078) > Ni(0.620) > Cu(0.392) > Zn(0.383) > As(0.247) > Hg(0.171) > Cr(0.113) by single factor pollution index. In general, the heavy metals pollution of Dunhua sewage irrigation area was in light level, crop has begun to be contaminated, but pollution of Cd at moderate, attention should be paid.

Keywords: Dunhua sewage irrigation area; heavy metals; pollution index method; pollution evaluation

收稿日期:2009-08-27

基金项目:山西省水利厅科研项目(2007-647)

作者简介:陈翠翠(1986—),女,河南新乡人,硕士研究生,研究方向为土壤重金属污染评价与修复。

通讯作者:梁镇海 E-mail:liangzhenhai@tyut.edu.cn

污水灌溉是缓解农业水资源紧张状况的重要途径,但长期使用未经处理的污水进行农田灌溉,可能会导致土壤污染进而影响农产品的安全^[1-2]。重金属是土壤环境中一类具有潜在危害的污染物,具有积累性、污染周期长等特点^[3],因而引起国内外学者的普遍关注^[4-6]。在现有的重金属评价方法中,人们主要采用的是污染指数法,单因子污染指数评价法可用于评价土壤重金属元素的累积污染程度,内梅罗指数法可评价土壤重金属综合污染程度^[7]。Morton - Bermea^[8]采用污染指数法对墨西哥表层土壤的重金属进行污染评估,得出了当地重金属污染状况;郭海彦等^[9]采用污染指数法对长沙茶园土壤重金属含量进行评价,为农业生产提供指导。针对太原市敦化灌区有二十多年的污灌历史,本研究通过野外调查与室内分析,对敦化污灌土壤中的重金属 Cu、Zn、Hg、Ni、Pb、Cr、Cd 和 As 含量状况进行系统调查和分析,揭示其污染程度并采用污染指数法作出相应评价,以期以太原市土壤生态环境管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样区基本概况

敦化污灌区位于太原市南端的清徐县,是晋中平原的一部分。其地理坐标为东经 112°9′~112°38′,北纬 37°27′~37°47′,南北宽约 35.8 km,东西长约 40.5 km,土地总面积为 609.13 km²。全县地势西北高,东南低,境内海拔高差较大。清徐县土地资源较丰富,根据全国第二次土壤普查结果,全县土壤分三大土类,18 个土属,114 个土种。研究区土壤有机质含量一般为 1.00%~1.49% 之间,最高 2.14%,最低 0.15%;全氮含量一般为 0.05%~0.07%,最高 0.179%,最低 0.017%;碱解氮含量一般为 61~90 mg·kg⁻¹,最高为 108 mg·kg⁻¹,最低为 8 mg·kg⁻¹;土壤容重 1.29 g·cm⁻³,孔隙度 50.8%;pH 值 8 左右。土壤结构多为碎块和屑粒状,颜色一般为棕红色,质地多属轻壤、中壤,土层深厚,熟化程度较高,理化性能、生产性能好,是发展农业的一种较为理想的土壤。

1.2 样品采集与室内分析

考虑到采样分布的均匀性,共布设 5 个采样区。采样区主要分布在灌区的五个乡镇,具体取样位置为王答村南、董家营村西、西谷村东、鹅池村南和孟封镇北。每个采样区取表层 0~20 cm 土样 19 个,同时对不同深度的剖面土进行了采集,共采集到土壤样品 130 个。每个样品采样量不少于 1 kg。将样品自然风

干,采用四分法取 0.5 kg,去除植物残体及石子,研磨,分别过 60 目和 100 目筛备用。土壤理化性质分析参照常规方法进行^[10],土壤 pH 采用电位法测定,有机质(SOM)采用重铬酸钾法测定,土壤粒度则采用比重法测定。重金属全量采用王水消解,待测液用原子荧光法(AFS-3100 双道原子荧光光度计)测定总砷、汞的含量,火焰原子吸收法(AA240FS VARIAN)测定铜、锌、镍、铬、镉、铅的含量,每个样品平行测定三次,取平均值进行统计分析。

1.3 评价标准与方法

土壤质量评价标准采用国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中的二级标准(农用地标准),见表 1。

表 1 土壤环境质量评价标准(mg·kg⁻¹)

Table 1 Standard of soil environment qualification(mg·kg⁻¹)

评价标准	As	Hg	Cd	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
pH < 6.5	40	0.3	0.3	250	150	50	40	200
国家二级 6.5 < pH < 7.5	30	0.5	0.3	300	200	50	50	250
pH > 7.5	25	1.0	0.6	350	250	100	60	300

目前评价方法主要有单项指数法和综合指数法,其中综合指数法又分为均值型指数、加权型指数和内梅罗指数法等^[11-12]。本研究评价方法采用内梅罗污染指数法,分别计算出土壤的单因子污染指数和综合污染指数,并对土壤环境质量进行分级。单项污染指数法能够比较直观地反映环境中各项污染指标的情况^[11],其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中: P_i 为污染指数; C_i 为污染物实测值; S_i 为污染物评价标准(二级标准); i 代表某种污染物。

内梅罗综合指数法不仅考虑到所有评价因子单项污染程度的作用,又突出了污染最严重元素的重要性^[13],具体计算公式为:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{MAX}}^2}{2}}$$

式中: P_{ave} 为污染指数平均值; P_{MAX} 为污染指数最大值。

2 结果与讨论

2.1 土壤理化性质分析

土壤的酸碱度一般分为 5 级,强酸性 pH < 5.0、酸性 pH 5.0~6.5、中性 pH 6.5~7.5、碱性 pH 7.5~8.5、强碱性 pH > 8.5^[14]。从表 3 可以看出:清徐县土壤 pH 分布比较集中,以碱性土壤为主,表层土壤 pH

表 2 土壤环境质量分级标准
Table 2 Critention for the classification of
soil enviromental quality

等级	综合污染指数	污染程度	污染水平
1	$P \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P \leq 1$	警戒级	尚清洁
3	$1 < P \leq 2$	轻污染	作物开始受污染
4	$2 < P \leq 3$	中污染	土壤作物受到中度污染
5	$P > 3$	重污染	土壤作物受污染相当严重

值变化范围为 7.61 ~ 8.38,最高平均值(8.38)出现在王答村南,最低平均值(7.61)出现在董家营村西,整体平均 pH 值为 8.01。不同深度的剖面土也以碱性为主,20 ~ 40 cm 处的 pH 值最大,60 ~ 80 cm 处最小。表层土壤有机质含量在 0.83% ~ 2.23% 之间,有机质含量在表层土壤中含量最高,最大平均值可达 2.18%,清徐县表层土壤整体有机质平均含量为 1.69%,在表层至 40 cm 有机质含量变化较小,在 60 ~ 80 cm 含量明显减少,最低含量为 0.15%。从粒度比可以划分土壤的质地,五个采样点的土壤质地均属于壤土类。

表 3 土壤基本性质
Table 3 The properties of soil

采样点	孟封镇北	鹅池村南	西谷乡东	王答乡南	董家营村西
pH 平均值	8.02	7.97	8.06	8.38	7.61
有机质	2.18%	1.56%	1.40%	2.03%	1.27%
沙粒	50%	30%	41%	48%	78%
粉粒	43%	60%	48%	45%	17%
粘粒	7%	10%	11%	7%	55%
土壤质地	壤土	粉沙壤土	粉沙壤土	壤土	沙壤土

2.2 土壤重金属含量分布特征

2.2.1 不同取样点土壤重金属含量分布

将采集到的每个样品点不同深度的土壤混合均匀,对土壤重金属污染元素进行分析,五个采样区的重金属整体平均含量见表 4。从表中可以看出,Cu 的平均含量在董家营村西最高为 42.112 mg · kg⁻¹,最低含量在鹅池村南为 35.302 mg · kg⁻¹,孟封镇北的变异系数最大为 0.286,没有高于二级标准值的样品出现;Zn 的最高含量和平均最高含量均出现在采样点董家营村西,其变异系数为 0.365;重金属 Hg 的变异系数比较高,说明同一取样点处 Hg 含量的差异也较大,变化明显,整体上 Hg 的污染程度也较低,没有

表 4 敦化灌区不同区域重金属含量 (mg · kg⁻¹)
Table 4 Content of heavy metals in the different
districts of Qingxu town (mg · kg⁻¹)

测量点	王答乡南	董家营村西	西谷乡东	孟封镇北	鹅池村南
Cu	最大值	52.795	63.800	49.404	65.423
	最小值	14.634	26.692	25.183	27.723
	平均值	38.452	42.112	39.516	40.606
	变异系数	0.267	0.266	0.166	0.286
Zn	最大值	166.377	282.102	190.565	144.159
	最小值	60.764	79.973	56.206	80.440
	平均值	103.713	156.763	106.730	109.610
	变异系数	0.295	0.365	0.328	0.188
Hg	最大值	0.246	0.356	0.305	0.610
	最小值	0.086	0.028	0.012	0.076
	平均值	0.168	0.190	0.132	0.246
	变异系数	0.260	0.524	0.630	0.567
Ni	最大值	62.366	52.284	51.828	51.895
	最小值	10.542	26.791	16.108	15.333
	平均值	36.588	41.788	37.549	37.973
	变异系数	0.414	0.197	0.270	0.257
Pb	最大值	46.889	51.576	51.572	44.861
	最小值	25.890	20.827	18.570	22.528
	平均值	35.796	36.046	32.000	34.319
	变异系数	0.207	0.310	0.283	0.204
Cr	最大值	51.579	49.210	59.068	46.479
	最小值	9.715	12.568	9.831	13.662
	平均值	28.691	30.793	28.764	28.707
	变异系数	0.433	0.371	0.519	0.403
Cd	最大值	1.712	1.755	1.739	1.559
	最小值	0.973	1.195	0.925	1.040
	平均值	1.256	1.422	1.215	1.234
	变异系数	0.161	0.126	0.179	0.121
As	最大值	9.848	9.395	6.983	8.010
	最小值	3.744	4.445	5.035	5.444
	平均值	6.576	6.638	5.867	6.338
	变异系数	0.253	0.228	0.093	0.118

高于二级标准值;重金属 Ni 在王答乡南的含量高于二级标准值 60 mg · kg⁻¹,最高达 62.366 mg · kg⁻¹,最高平均值出现在董家营村西,含量为 41.788 mg · kg⁻¹。我国重金属铅的背景值含量 95%,范围为 10 ~ 56.1 mg · kg⁻¹[15],从表中可以看出,5 个采样点的 Pb 平均值都低于 56.1 mg · kg⁻¹,从最大值的分布看,采

样区孟封镇北有一部分样品的 Pb 含量较高,最高达到 $110.823\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。植物对重金属 Cr 的吸收富集作用较强,土壤中铬的含量因成土母质及生物、气候、土壤有机质含量等条件的不同而差异很大,一般土壤中铬的背景值平均约为 $90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在 $20\sim 200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,清徐县土壤中 Cr 的含量普遍较低,基本在 $30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,最高值 $59.068\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。清徐县 Cd 的污染非常严重,Cd 在土壤中的二级标准值为 $0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而从表中可以看出,Cd 最小值为 $0.904\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远远高于标准值,5 个采样点的平均值为 1.2 左右,最高 $1.422\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是标准值的二倍多。清徐县 As 处于安全水平,各采样点均没有高于背景值,最高平均值 $6.638\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 出现在董家营村西。

2.2.2 土壤中重金属平均含量

表 5 为清徐县土壤中重金属的平均含量,即 5 个采样区的平均重金属含量,与国家二级标准值对比,Cd 的含量 $1.247\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远远高于标准值。Cd 是人体健康的非必需元素,具有极高的生物毒性,它主要通过消化系统和呼吸道进入人体。土壤环境中的 Cd 主要积累在土壤表层,是植物易富集的重金属元素之一,因此针对太原市敦化污灌区的 Cd 污染,当地环保部门应采取措施进行修复治理。

其余重金属含量并未高于二级标准值,由此推测当地使用的灌溉污水中 Cd 含量比较高。

表 5 土壤重金属平均含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 5 The average concentration of soil heavy metals($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

重金属	Cu	Zn	Ni	Hg	Pb	Cr	Cd	As
含量	39.198	114.758	37.225	0.171	37.468	28.249	1.247	6.165

2.2.3 垂直方向重金属的分布特征

图 1 为 $0\sim 20\text{ cm}$ 和 $60\sim 80\text{ cm}$ 处剖面土壤重金属的平均含量。从图中可以看出,表层($0\sim 20\text{ cm}$)重金属含量明显高于 $60\sim 80\text{ cm}$ 处土壤的重金属含量,

其中重金属 Pb 的表层平均含量为 $103.93\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远远高于 $60\sim 80\text{ cm}$ 处的 $37.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明 Pb 在表层的积累最明显。这是因为土壤中铅化合物的溶解度和降解自由度低,在土壤剖面向下移动很少,随土壤剖面深度增加,含 Pb 量下降,Pb 大多积累于 $0\sim 15\text{ cm}$ 耕层中,且水平移动和垂直移动都很困难^[16]。

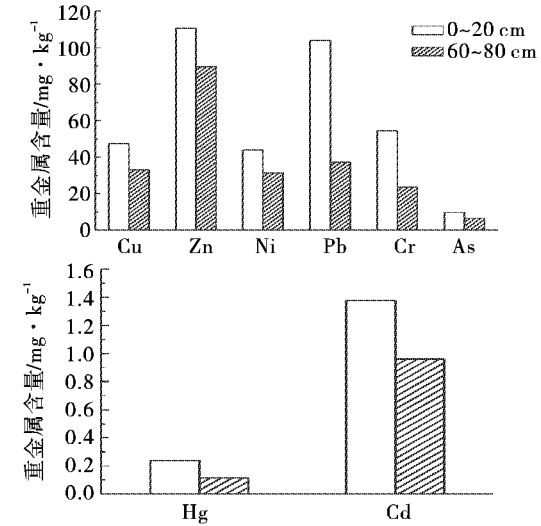


图 1 不同深度重金属含量
Figure 1 The soil heavy metals concentration in different depth

3 清徐县土壤重金属污染程度评价

污染指数法评价结果如表 6 所示。从单项污染指数 P_i 看,污染最严重的重金属为 Cd(2.078),其他依次为 $\text{Ni}(0.620) > \text{Cu}(0.392) > \text{Zn}(0.383) > \text{As}(0.247) > \text{Hg}(0.171) > \text{Cr}(0.113)$,均小于 0.7,处于安全水平,不影响农作物的正常发育。重金属 Pb 的污染程度最小,单项污染指数为 0.107;最严重的 Cd 属于中度污染水平,表明土壤 Cd 含量累积程度较高,这与其他研究者的结果基本一致^[17]。因此,对 Cd 应采取相应措施进行治理,最好从源头控制污染。

表 6 污染指数评价结果

Table 6 The results of pollution index assessment

取样点	单项污染指数 P_i								综合污染指数 P
	Cu	Zn	Hg	Ni	Pb	Cr	Cd	As	
王答乡南	0.385	0.346	0.168	0.610	0.102	0.115	2.094	0.263	1.524
董家营村西	0.421	0.523	0.190	0.696	0.103	0.123	2.370	0.266	1.726
西谷乡东	0.395	0.356	0.132	0.626	0.091 4	0.115	2.025	0.235	1.474
孟封镇北	0.406	0.365	0.246	0.633	0.098 1	0.115	2.057	0.254	1.500
鹅池村南	0.353	0.323	0.119	0.537	0.141	0.097 2	1.845	0.216	1.344
平均值	0.392	0.383	0.171	0.620	0.107	0.113	2.078	0.247	1.514

从综合指数结果来看,董家营村西的综合污染指数 P 最高,达到 1.726,所有采样点的污染程度依次为董家营村西(1.726) > 王答乡南(1.524) > 孟封镇北(1.500) > 西谷乡东(1.474) > 鹅池村南(1.344)。总体综合污染指数为 1.514,由此推断清徐县土壤整体污染程度为轻度污染,农作物已经开始受到影响,应引起有关部门的重视。

4 结论

(1) 敦化灌区土壤属于壤土类,有机质含量 1.69%,平均 pH 值为 8.0,偏碱性。表层重金属含量明显高于剖面土(60~80 cm),尤其是重金属 Pb 在表层积累最为明显,是由于长期污灌造成重金属在表层的积累。

(2) 由单因子污染指数可以得出:污灌区重金属污染程度依次为 Cd(2.078) > Ni(0.620) > Cu(0.392) > Zn(0.383) > As(0.247) > Hg(0.171) > Cr(0.113)。Cd 污染最严重,最高含量达 1.755 mg · kg⁻¹,应该及时采取措施进行重点治理。

(3) 太原敦化污灌区土壤重金属的综合污染指数为 1.514,属于轻度污染,对当地的农作物产生影响。不同采样点的污染程度为董家营村西(1.726) > 王答乡南(1.524) > 孟封镇北(1.500) > 西谷乡东(1.474) > 鹅池村南(1.344)。

参考文献:

- [1] 陈新明,蔡焕杰,孙爱华,等. 污水灌溉后土壤重金属汞和砷积累变化规律及对番茄的影响[J]. 土壤学报,2007,44(5):831-836.
- [2] Ortega M P, Siebe C, Becard G, et al. Impact of a century of wastewater 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.
- [3] Abrahams P W. Soils; Their implications to human health[J]. *Science of the Total Environment*, 2002,291(123):1232.
- [4] Colia E E, Dimirkou A, Mitsios I K. Levels of heavy metals pollution in different types of soil of central Greece[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2008 80:206-210.
- [5] 杨继松,孙丽娜,杨晓波,等. 沈阳市细河沿岸农田土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报,2007,26(5):1933-1936.
- [6] Jamali M K, Kazi T G, Arain M B. Heavy metals from soil and domestic sewage sludge and their transfer to Sorghum plants[J]. *Environ Chem Lett*, 2007, 5:209-218.
- [7] 郑国璋. 农业土壤重金属污染研究的理论与实践[M]. 北京:中国环境科学出版社,2007:102-103.
- [8] Morton - Bermea O, Hernandez - Alvarez E, Gonzalez - Hernandez G. Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 101:218-224.
- [9] 郭海彦,周卫军,张杨珠,等. 长沙“百里茶廊”茶园土壤重金属含量及环境质量特征[J]. 环境科学,2008,29(8):2320-2325.
- [10] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [11] Swaileh K M, Hussein R M, Abu - Elhaj S. Assessment of heavy metal contamination in roadside surface soil and vegetation from the west bank[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2004,47:23-30.
- [12] 朱奇宏,黄道友,樊睿,等. 环洞庭湖区典型蔬菜基地土壤重金属污染状况研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(增刊):22-26.
- [13] 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.
- [14] 郭岩,杨国义,董巧香,等. 汕头市典型区域土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学,2007,28(5):1067-1074.
- [15] 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.
- [16] 李丽光,何兴元,曹志强,等. 绿色食品生产中土壤作物系统铅的积累与迁移研究[J]. 应用生态学报,2004,15(5):891-894.
- [17] 张乃明,李保国,胡克林. 太原污灌区土壤重金属和盐分含量的空间变异特征[J]. 环境科学学报,2001,21(3):349-353.