

网络出版时间:2012-06-08 15:59

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120608.1559.011.html>

# 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

张庆辉<sup>1</sup>, 王 贵<sup>1,2</sup>, 朱 晋<sup>1</sup>, 程 莉<sup>1</sup>, 同丽嘎<sup>1</sup>, 赵 捷<sup>1</sup>

(1 包头师范学院 资源与环境学院, 内蒙古 包头 014030; 2 鄂尔多斯职业学院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**【摘要】**【目的】评价包头市南郊污灌区农田土壤 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 5 种重金属元素的潜在生态风险, 为污灌区土壤环境质量评价、土壤重金属污染修复提供科学依据。【方法】在包头市南郊四道沙河流域的麻地乡城梁村, 选取有代表性的 8 个采样点, 按照“梅花形”布点取样采取农田表层 0~20 cm 土样, 测定土壤重金属 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 元素含量, 并采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法和 Hakanson 潜在生态风险指数法, 对研究区土壤重金属的潜在生态风险进行评价。【结果】包头市南郊污灌区农田土壤中的 5 种重金属元素含量还不到污染级, 但除 Cu 含量基本接近河套地区土壤背景值外, 其他 4 种重金属元素含量的平均值均超过了当地土壤背景值, 其中以 Cr、Ni 元素含量的平均值超过地区背景值最高, 且具有明显高度富集的特征。各种重金属污染的潜在生态风险指数由强至弱依次为 Ni(49.59) > Pb(41.18) > Cu(39.70) > Cr(23.24) > Zn(8.62), 其中 Ni 的潜在污染风险指数最高, 是主要潜在生态风险因子, 其次是 Pb。【结论】人类活动导致包头南郊污灌区农田土壤中 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 5 种重金属元素明显积累, 且已表现出一定程度的潜在生态风险, 应该引起足够的重视。

**【关键词】** 重金属; 潜在生态风险; 表层土壤; 综合评价; 包头南郊污灌区

**【中图分类号】** X833; X825

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2012)07-0181-06

## 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

ZHANG Qing-hui<sup>1</sup>, WANG Gui<sup>1,2</sup>, ZHU Jin<sup>1</sup>,  
CHENG Li<sup>1</sup>, TONG Li-ga<sup>1</sup>, ZHAO Jie<sup>1</sup>

(1 College of Resource and Environment, Baotou Normal College, Baotou, Inner Mongolia 014030, China;

2 Ordos Vocational College, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

**Abstract:** 【Objective】The research aimed to evaluate the potential ecological risk of heavy metals Pb, Cr, Cu, Zn, Ni(HMPN) in the surface soil of the farmland in wastewater irrigation area of Baotou's Southern suburbs(SFWB) to provide a scientific basis to the evaluation of soil environmental quality and repair of heavy metal pollution in sewage irrigated area. 【Method】Eight representative sampling points in Chengliang village of Machi township in Sidaoshahe basin of Baotou's Southern suburbs were selected. Samples with 0—20 cm in the surface soil of the farmland were collected by using quincunx distribution to determine the content of HMPN, and Single-factor pollution index, Nemerow pollution comprehensive index and Hakanson pollution index of potential ecological risk method were employed to evaluate the potential eco-

\* [收稿日期] 2011-12-12

[基金项目] 内蒙古自治区高等学校科学研究项目“包头市四道沙河流域工业废水对生态环境的影响”(NJ09142)

[作者简介] 张庆辉(1961—), 男, 甘肃定西人, 教授, 主要从事自然资源开发与环境影响评价研究。E-mail: zqh200549@126.com

logical risk of heavy metals in 0—20 cm depth farm soil of the study area. 【Result】 The results indicated that the environmental quality of HMPN in the SFWB was lower than pollution levels. Then the average content of Pb, Cr, Zn, Ni was greater than the regional background values except that the content of Cu was close to the regional background value of soil in Hetao region, and average content of Cr, Ni was the highest and much more than regional background value with the characteristics of highly enriched. The potential ecological risk indexes of variety heavy metal pollution was  $Ni(49.59) > Pb(41.18) > Cu(39.70) > Cr(23.24) > Zn(8.62)$ , Ni was the main potential ecological risk factor and followed by Pb. 【Conclusion】 HMPN was obviously accumulated in the SFWB as human activities. Attention should be paid to heavy metals pollution with potential ecological risk to a certain extent.

**Key words:** heavy metal; potential ecological risk; surface soil; comprehensive evaluation; wastewater irrigation area of Baotou's southern suburbs

因污水灌溉积累在农田土壤中的重金属,受农业活动和大气降水等因素的影响从而发生横向和纵向的迁移,其中横向迁移使重金属污染的农田土壤面积进一步扩大,纵向迁移使重金属污染向地下延伸,进而污染地下水,因此污水灌溉对土壤、地下水等生态环境具有潜在的生态危害性。目前,我国耕地受重金属污染而导致的直接经济损失达 200 多亿元<sup>[1]</sup>。因污灌引起的土壤重金属污染是我国污灌区普遍存在的最严重的环境问题,我国的天津、北京、辽宁、山西、陕西、湖南、广东、广西等省(市)的污灌区均面临重金属污染的威胁。

方玉东<sup>[2]</sup>研究表明,天津的污灌区以重金属 Cd、Hg、As 污染为主,北京污灌区以 Zn、Cd、Hg、Pb 污染为主,辽宁污灌区以 Cd、Hg、Pb、Ni 污染为主,山西污灌区以 Hg、Cd、As 污染为主,陕西污灌区以 Ni、Hg 污染为主,湖南污灌区以 Cd、As、Hg、Pb 污染为主,广东污灌区以 Cd、Cu、Ni 污染最为严重,广西污灌区则以 As、Pb、Cd、Zn 污染为主。此外,我国其他省份的污灌区也同样面临着重金属污染问题,如湖北<sup>[3]</sup>、上海<sup>[4]</sup>、江苏<sup>[5]</sup>等。由于城市周边的农田受人类活动影响较为剧烈,关于该类地区土壤环境质量的优劣也受到了人们的广泛关注<sup>[6-8]</sup>,但目前尚未见关于包头市污灌区农田土壤重金属含量分布特征的详细研究报道。

为此,本试验以包头市郊区麻池乡城梁村连续多年的污水灌溉区农田土壤为研究对象,重点检测了污灌区农田表层土壤铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)5种元素(属于美国 EPA 公认的 129 种重点污染物<sup>[9]</sup>)的含量,并应用单因子综合污染指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态风险指数法对土壤环境质量进行了评价,以期对污灌区土壤环境质量评价、土壤重金属污染修复提供科学依据。

## 1 研究区概况

包头市( $40^{\circ}14'56'' \sim 42^{\circ}43'49''N$ ,  $109^{\circ}15'12'' \sim 111^{\circ}26'25''E$ )属于半干旱中温带大陆性季风气候区,年平均气温  $6.7^{\circ}C$ ,极端最高气温  $38.4^{\circ}C$ ,最低气温  $-31.4^{\circ}C$ , $\geq 10^{\circ}C$ 有效积温为  $2\ 019.8^{\circ}C$ ,年降水量  $240 \sim 400$  mm,一般正常降水量为  $308.9$  mm。年蒸发量  $2\ 100 \sim 2\ 700$  mm,一般正常蒸发量为  $3\ 221.1$  mm,全年无霜期  $125 \sim 130$  d。春季风速最大,常年盛行风向为西北风。包头市是以冶金、稀土、机械工业为主的综合性工业城市,研究取样区位于包头市南郊四道沙河流域污灌区。污灌区土质多为砂壤土和砂土,其渗透力强,故地下水易受重金属污染。灌区农田表层土(0~25 cm)的 pH 值为  $7.02^{[10]}$ 。研究区内种植农作物的灌溉用水均来自污水渠的污水,该区种植的粮食类作物主要有玉米和小麦。

## 2 土样的采集及测定

### 2.1 土样的采集

结合包头市南郊土地类型、土地利用状况和空间分布均匀性的特点,在四道沙河流域选定具有代表性的污灌区农田,采用“梅花形”布点取样<sup>[11]</sup>,确定了 8 个采样点,这些采样点均匀布置在重点取样研究区范围内(因研究区土地平整,没有突出的地貌特征或地名,故取样点及所得样品名称均用阿拉伯数字 1~8 代替),重点取样研究区位置如图 1 所示。

在重点取样研究区的农田土壤,采样深度为 0~20 cm,样品的采样密度为每  $2\ 000$  m<sup>2</sup> 内采集 10 个土壤小样品,将这 10 个土壤小样品均匀混合后,按四分法组合为 1 个土壤大样,共采集到 8 个大的土壤组合样。将获取的 8 个各 1.5 kg 的土壤样品装入塑料袋中,带回实验室自然阴干,剔除植物残体和

石块,碾碎并用 0.15 mm(100 目)粒级的尼龙筛筛分符合化验分析要求的土壤样品,用于测定土壤的重金属 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 含量。

## 2.2 土样重金属含量的测定

准确称取土壤样品 0.5 g 于 100 mL 三角瓶中,经  $\text{HNO}_3\text{-HCl-HClO}_4$  混酸消化,用体积分数 5% 硝酸浸提于 50 mL 容量瓶中,稀释定容后,用石墨炉

原子吸收分光光度法(GB/T 17141-1997)测定 Pb 含量,用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17139-1997)测定 Cr、Cu、Zn、Ni 含量。每个样品对各元素进行 7 次平行测定,测定 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 含量的相对标准偏差(RSD)分别为 0.6%~1.3%,0.9%~1.6%,0.7%~1.7%,0.4%~1.4%,0.7%~1.8%,完全符合试验精度的要求。

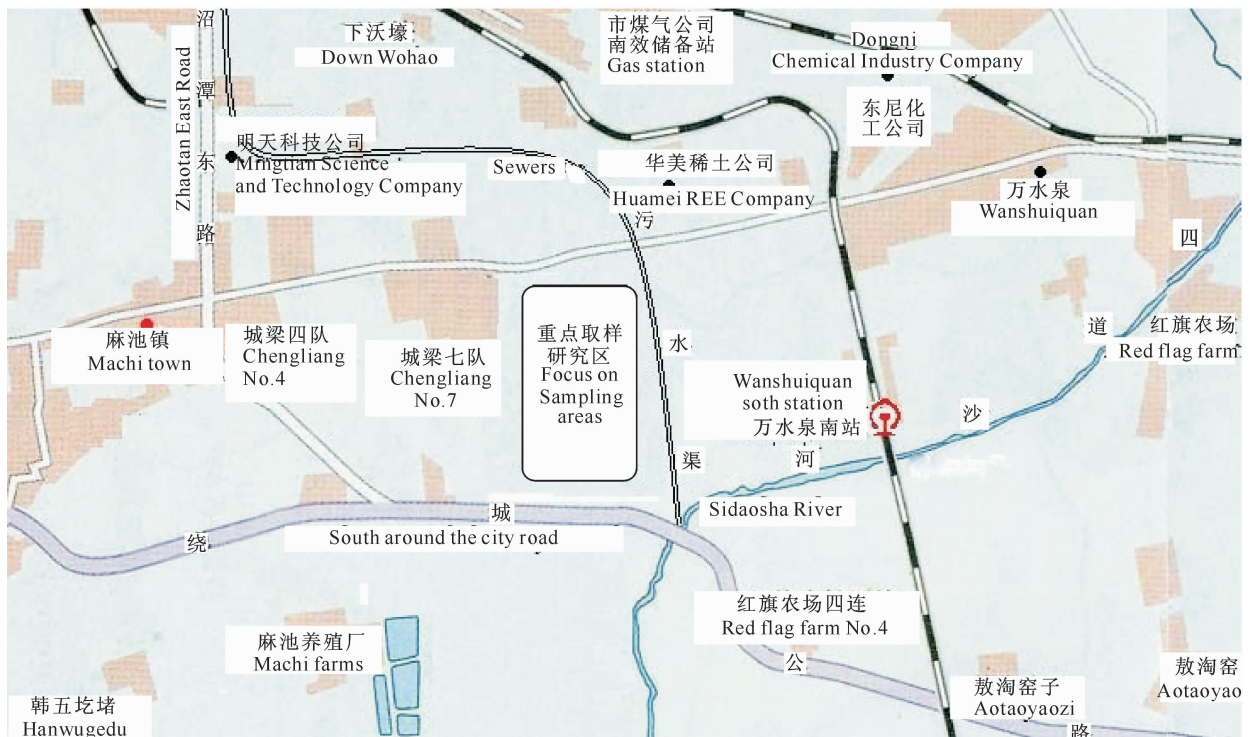


图 1 重点取样研究区位置

Fig. 1 Focus on sampling sites in main research area

## 2.3 评价方法

因研究区土壤 pH 值为 7.02,故依据文献[12],选取旱作(区别于水稻田等)土地的二级质量评价指标,即 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 的标准值分别为 80, 200, 100, 250, 50 mg/kg。单个污染物 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 的毒性响应参数  $T_i$  分别为 5, 2, 5, 1, 5<sup>[13]</sup>。

2.3.1 单因子污染指数法<sup>[14]</sup> 单因子污染指数法的计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: $P_i$  为污染物  $i$  的单项污染指数, $C_i$  为污染物  $i$  的实测质量浓度, $S_i$  为污染物  $i$  的评价标准。当  $P_i \leq 1$ ,表示土壤未受到污染; $P_i > 1$ ,表示土壤已受到了污染。

2.3.2 内梅罗综合污染指数法<sup>[14]</sup> 内梅罗综合污染指数的计算公式为:

$$P_s = \{[(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2]/2\}^{1/2} \quad (2)$$

式中: $P_s$  为内梅罗综合污染指数, $(C_i/S_i)_{\max}$  为污染物中污染指数的最大值, $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$  为污染物中污染指数的平均值。 $P_s$  的分级标准为: $P_s \leq 0.7$ ,清洁级; $0.7 < P_s \leq 1$ ,尚清洁级; $P_s > 1$ ,污染级<sup>[12]</sup>。

2.3.3 Hacanson 潜在生态风险指数法<sup>[15]</sup>

Hacanson 潜在生态风险指数法的计算步骤为:

1) 计算单项污染指数。计算公式为:

$$C_f^i = C_{\text{表层}}^i / C_n^i \quad (3)$$

式中: $C_f^i$  为单项重金属污染指数; $C_{\text{表层}}^i$  为土壤重金属的实测含量; $C_n^i$  为计算所需的参比值,即研究区域重金属含量的背景值。

2) 计算单项潜在生态风险指数。计算公式为:

$$E_i^p = T_i \times C_f^i \quad (4)$$

式中: $E_i^p$  为单项重金属的潜在生态风险指数; $T_i$  为单个污染物的毒性响应参数,可根据文献[13]确定。

3) 计算综合潜在生态风险指数。计算公式为:

$$E_i = \sum E_i^j \quad (5) \quad \text{所示。}$$

式中:  $E_i$  为土壤重金属的综合潜在生态风险指数。

## 2.4 数据处理

试验数据采用 Excel 软件进行处理。

土壤重金属潜在生态风险的分级标准<sup>[16]</sup>如表 1

表 1 土壤重金属的潜在生态风险分级标准

Table 1 Classification standard of potential ecological risk of heavy metals in soil

单项潜在生态风险指数( $E_i^j$ ) Individual potential ecological risk index	单项污染物生态风险程度 Ecological risk degree of single pollutant	综合潜在生态风险指数( $E_i$ ) Comprehensive potential ecological risk	综合潜在生态风险程度 Potential ecological risk
<40	轻度 Mild	<150	轻度 Mild
$\geq 40 \sim < 80$	中等 Moderate	$\geq 150 \sim < 300$	中等 Moderate
$\geq 80 \sim < 160$	强 Strength	$\geq 300 \sim < 600$	强 Strength
$\geq 160 \sim < 320$	很强 Strong	$\geq 600$	很强 Strong
$\geq 320$	极强 Very strong		

## 3 结果与分析

### 3.1 包头南郊污灌区农田表层土壤重金属含量的变化

污灌区土壤样品中重金属 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 含量的测定结果见表 2。表 2 显示,研究区土壤中 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 的平均含量分别为 19.46, 81.89, 19.03, 60.06, 30.38 mg/kg。对比文献[17]可以发

现,包头南郊污灌区土壤重金属元素 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 的含量分别是河套地区对应 5 种重金属背景值(Pb 18.76 mg/kg, Cr 56.39 mg/kg, Cu 19.17 mg/kg, Zn 55.68 mg/kg, Ni 24.50 mg/kg)的 1.04, 1.45, 0.99, 1.08, 1.24 倍,其中只有 Cu 元素含量的平均值接近于河套地区 Cu 的背景值,其他 4 种元素的含量值均明显高于河套地区对应重金属背景值。

表 2 包头南郊污灌区农田表层土壤的重金属含量

Table 2 Content of heavy metals in the surface soil of the farmland in wastewater irrigation area of southern suburbs in Baotou

土样编号 Sample No.	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni
1	22.12	86.37	26.96	76.50	34.54
2	19.79	85.67	22.69	60.92	32.92
3	17.83	87.85	16.54	54.65	29.42
4	18.76	79.41	17.28	59.84	28.02
5	17.16	90.30	15.67	56.33	27.90
6	18.52	83.70	19.63	56.78	32.03
7	20.49	62.39	16.92	57.42	29.78
8	20.97	79.40	16.53	58.04	28.39
最小值 Minimum	17.16	62.39	15.69	54.65	27.90
最大值 Maximum	22.12	90.30	26.96	76.50	34.54
平均值 Average value	19.46	81.89	19.03	60.06	30.38

### 3.2 包头南郊污灌区农田表层土壤重金属潜在生态风险的综合评价

采用 3 种评价方法计算包头南郊污灌区农田表

层土壤重金属的单因子污染指数( $P_i$ )、内梅罗综合污染指数( $P_s$ )和 Hacanson 潜在生态风险指数( $E_i$ ),结果见表 3。

表 3 包头南郊污灌区农田表层土壤重金属污染的评价

Table 3 Comprehensive evaluation of heavy metals pollution in the surface soil of the farmland in wastewater irrigation area of southern suburbs in Baotou

指标 Index	项目 Item	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni
$P_i$	极小值 Min	0.21	0.31	0.16	0.22	0.56
	极大值 Max	0.28	0.45	0.27	0.31	0.70
	平均值 Average	0.24	0.41	0.19	0.24	0.61
$P_s$	计算值 Calculated value	0.26	0.42	0.23	0.28	0.66
$E_i$	$E_i^j$ 极小值 Min of $E_i^j$	4.57	2.21	4.09	0.98	5.69
	$E_i^j$ 极大值 Max of $E_i^j$	5.90	3.20	7.03	1.37	7.05
	$E_i$ ( $\sum E_i^j$ )	41.18	23.24	39.70	8.62	49.59

3.2.1 单因子污染指数 由表 3 可知,包头南郊污灌区农田表层土壤重金属单因子综合污染指数平均值的排序为  $Ni(0.61) > Cr(0.41) > Pb(0.24) = Zn(0.24) > Cu(0.19)$ ,且 5 种土壤重金属的单因子污染指数均小于 1,表明土壤尚未污染,但作为污灌区农田土壤, $Ni$ 、 $Cr$ 、 $Pb$  3 种重金属元素单因子综合污染指数(单因子污染指数的算术平均值)排序靠前,应该引起足够的重视。

3.2.2 内梅罗综合污染指数 由表 3 可见,包头南郊污灌区农田表层土壤 5 种重金属的内梅罗综合污染指数排序为  $Ni(0.66) > Cr(0.42) > Zn(0.28) > Pb(0.26) > Cu(0.23)$ ,5 种重金属的内梅罗综合污染指数值均小于 0.7,尚属于清洁级。但  $Ni$  的内梅罗综合污染指数为 0.66,接近于 0.7,表明当地土壤  $Ni$  污染较为严重。

3.2.3 Hacanson 潜在生态风险指数 表 3 显示,包头南郊污灌区农田表层土壤重金属  $Pb$ 、 $Cr$ 、 $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Ni$  的单项潜在生态风险指数  $E_i^p$  的极大值均小于 40,表明当地农田 5 种重金属污染的生态风险程度均属轻度; $Pb$ 、 $Cr$ 、 $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Ni$  综合潜在生态风险指数  $E_i^p$  的排序为  $Ni(49.59) > Pb(41.18) > Cu(39.70) > Cr(23.24) > Zn(8.62)$ ,均小于 150,表明研究区土壤 5 种重金属的综合潜在生态风险程度亦属于轻度。

由上述评价结果可知,虽然包头南郊污灌区农田表层土壤中  $Ni$ 、 $Cr$ 、 $Pb$ 、 $Zn$ 、 $Cu$  的污染程度相对较轻,但与当地土壤对应重金属的背景值相比可知, $Ni$ 、 $Cr$  含量超标的样点各占总样点数的 100%, $Zn$  含量超标的样点占总样点数的 88%, $Pb$ 、 $Cu$  含量超标的样点分别占总样点数的 50% 和 38%。说明人类活动已导致重金属元素在当地农田土壤中有明显积累,提示包头市污灌区农田土壤重金属污染已存在一定的潜在生态风险,虽然重金属污染未达到严重恶化的程度,但提前进行治理和预防非常必要,尤其是对  $Ni$  和  $Pb$  污染的防治应该引起足够的重视。

## 4 讨论与结论

本研究结果表明,包头南郊污灌区农田土壤外源重金属  $Ni$ 、 $Pb$  的综合潜在生态风险指数均较高,因此污灌区种植农作物时应该特别注意  $Ni$ 、 $Pb$  通过生物链对人体健康的危害。目前污灌区种植的农作物主要为玉米、小麦,而有研究表明,当土壤中  $Ni$ <sup>[18]</sup>、 $Pb$ <sup>[19]</sup>、 $Cr$ <sup>[20]</sup> 含量升高时,玉米、小麦单株叶面积、株高、总干物质质量等形态指标会呈现降低趋

势,平均单株穗长、穗粗、穗质量、总粒数、百粒质量下降,秃尖长度增加,玉米、小麦产量下降。当土壤中铅含量为 300 mg/kg 时,玉米单位面积产量下降 21% 左右,而且玉米对  $Cu$ <sup>[21]</sup>、 $Zn$ <sup>[22]</sup> 有超积累能力。此外,土壤重金属对蔬菜也有一定的影响。王丹等<sup>[23]</sup> 研究认为,在一般的农作物中,十字花科植物积累的重金属量最高,其次是豆科植物,谷类植物最低。因此,污灌区农田应该持续以种植玉米、小麦为主,尽量不要种植对重金属元素具有高富集能力的蔬菜,以降低外源重金属对人体健康的直接影响。但有关包头南郊污灌区种植的玉米、小麦及当地常种蔬菜品种对几种重金属的富集程度,还有待于进一步详细研究。

包头市四道沙河流域污水对地下水、黄河的影响既有历史继承性,又有现在的持续性。这意味着工业污水中的重金属元素  $Pb$ 、 $Cr$ 、 $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Ni$  对地下水和黄河具有较强的潜在生态风险,应该密切关注外源毒性重金属元素在污灌区土壤、水系沉积物等环境中的累积性变化。由于本研究主要在污灌区农田采样,样品密度、覆盖面相对较小,如果要详细了解该灌区重金属  $Pb$ 、 $Cr$ 、 $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Ni$  的富集程度和扩散范围,尤其是其沿垂直方向的扩散深度及其对地下水的影响,还需要增大在污灌区的取样密度,增加取样种类(如地下水样等),进一步开展更加详细的研究工作。

总之,包头市南郊麻池乡城梁村农田土壤  $Pb$ 、 $Cr$ 、 $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Ni$  5 种重金属元素中,除  $Cu$  平均含量基本接近河套地区土壤  $Cu$  含量的背景值外,其他 4 种重金属元素含量的平均值均超过了该地区背景值,其中以  $Cr$ 、 $Ni$  元素表现较为明显,且具有明显的高度富集的特征。

本研究采用潜在生态风险综合指数法等,对包头南郊污灌区农田土壤环境进行了评价,结果显示,5 种重金属综合潜在生态风险的综合指数( $E_i^p$ )排序为  $Ni(49.59) > Pb(41.18) > Cu(39.70) > Cr(23.24) > Zn(8.62)$ ,目前土壤中的 5 种重金属元素含量虽然还不到污染级,但采样区农田土壤中的  $Pb$ 、 $Cr$ 、 $Zn$ 、 $Ni$  平均含量均已超过了当地的土壤背景值,且表现出了明显的积累趋势。由于  $Ni$ 、 $Cr$ 、 $Cu$ 、 $Pb$  的毒性极大,且易为农作物所吸收,极易富集并随食物链进入人体而长期累积,对人类的健康有持续的影响,因此重视和加强对农田土壤、地下水和黄河  $Pb$ 、 $Cr$ 、 $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Ni$  的污染与防治是非常必要的。

志谢:本项目得到了内蒙古自治区教育厅的资助。同时,在采样、加工样品过程中得到了包头师范学院 2009 级地理科学班高将、张伟、郭力文、刘智杰、张东升、张利荣、杜丽君同学和资源环境与城乡规划管理班胡洪樑等同学的帮助,在样品成果化验中中国科学院广州地球化学研究所涂湘林研究员做了大量工作,在此深表感谢!

## [参考文献]

- [1] 项 萌,张国平,李 玲,等. 广西铅锡矿冶炼区表层土壤重金属污染的分布规律 [J]. 矿物学报,2011,32(2):250-255.  
Xiang M,Zhang G P,Li L,et al. The characteristics of heavy metals in soil around the Hechi Antimony-Lead Smelter,Guangxi,China [J]. Acta Mineralogica Sinica,2011,32(2):250-255. (in Chinese)
- [2] 方玉东. 我国农田污水灌溉现状、危害及防治对策研究 [J]. 农业环境与发展,2011,28(5):1-6.  
Fang Y D. Present situation and hazardous&-solving countermeasures of sewage irrigation in farmland of China [J]. Agricultural Environment and Development,2011,28(5):1-6. (in Chinese)
- [3] 贺 跃,胡艳华,王秋潇,等. 大冶大港河水系沉积物中重金属来源分析 [J]. 地球化学,2011,40(3):258-265.  
He Y,Hu Y H,Wang Q X,et al. Analysis on the source of heavy metals in the Dagan River,Daye County,Hubei Province [J]. Geochemistry,2011,40(3):258-265. (in Chinese)
- [4] 刘 伟,陈振楼,许世远,等. 上海市小城镇河流沉积物重金属污染特征研究 [J]. 环境科学,2006,27(3):100-102.  
Liu W,Chen Z L,Xu S Y,et al. Pollution character of heavy metals in river sediments from small towns,Shanghai [J]. Journal of Environmental Science,2006,27(3):100-102. (in Chinese)
- [5] 周生路,廖富强,吴绍华,等. 基于分等样地的江苏典型区农用地土壤重金属污染研究 [J]. 农业工程学报,2008,24(5):78-83.  
Zhou S L,Liao F Q,Wu S H,et al. Farmland soil heavy metal pollution in typical areas of Jiangsu Province based on classification sample plots [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(5):78-83. (in Chinese)
- [6] William O'Connell D,Birkinshaw C,Francis O'Dwyera T,et al. Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose: A review [J]. Bioresource Technology,2008,99:6709-6724.
- [7] Malandrino M,Abollino O,Buoso S,et al. Accumulation of heavy metals from contaminated soil to plants and evaluation of soil remediation by vermiculite [J]. Chemosphere,2011,82:169-178.
- [8] Yaylali-Abanuz G. Heavy metal contamination of surface soil around Gebze industrial area, Turkey [J]. Microchemical Journal,2011,99:82-92.
- [9] 美国环境保护局. 水环境中 129 种优先污染物的名单、归宿与分类 [EB/OL]. (2005-10-06) [2011-12-10]. <http://www.qs100.com/news/NewFile/2005106141614.htm>.
- U. S. Environmental Protection Agency. 129 kinds of priority pollutants list, fate and classification in Water Environment [EB/OL]. (2005-10-06) [2011-12-10]. <http://www.qs100.com/news/NewFile/2005106141614.htm>. (in Chinese)
- [10] Guo P R,Jia X Y,Duan T C,et al. Influence of plant activity and phosphates on thorium bioavailability in soils from Baotou area,Inner Mongolia [J]. Journal of Environmental Radioactivity,2010,101:767-772.
- [11] 张庆辉,王 贵. 包头市郊区农用地表层土壤重金属锌含量的调查与评价 [J]. 安徽农业科学,2008,36(11):4674-4675.  
Zhang Q H,Wang G. Investigation and evaluation of heavy metal zinc in the surface soil of the agricultural land in Baotou Suburb [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2008,36(11):4674-4675. (in Chinese)
- [12] 国家环境保护总局. HJ/T 332-2006 食用农产品产地环境质量评价标准 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2007:1-10.  
Ministry of Environmental Protection the People's Republic of China. HJ/T 332-2006 Farmland environmental quality evaluation standards for edible agricultural products [S]. Beijing:China Environmental Science Press,2007:1-10. (in Chinese)
- [13] 徐争启,倪师军,庾先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算 [J]. 环境科学与技术,2008,31(2):112-115.  
Xu Z Q,Ni S J,Tuo X G,et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. Environmental Science&Technology,2008,31(2):112-115. (in Chinese)
- [14] 张 征. 环境评价学 [M]. 北京:高等教育出版社,2005:115-184.  
Zhang Z. Environmental assessment [M]. Beijing:Higher Education Press,2005:115-184. (in Chinese)
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sediment logical approach [J]. Water Research,1980,14(8):975-1001.
- [16] 安立会,郑丙辉,张 雷,等. 渤海湾河口沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. 中国环境科学,2010,30(5):666-670.  
An L H,Zheng B H,Zhang L,et al. Occurrence of heavy metals in surface sediments from estuaries in bohai bay and their ecological risk assessment [J]. China Environmental Science,2010,30(5):666-670. (in Chinese)
- [17] 王喜宽,黄增芳,苏美霞,等. 河套地区土壤基准值及背景值特征 [J]. 岩矿测试,2007,26(4):287-292.  
Wang X K,Huang Z F,Su M X,et al. Characteristics of reference and background values of soils in Hetao area [J]. Rock and Mineral Analysis,2007,26(4):287-292. (in Chinese)
- [18] 康立娟,谢忠雷. 镍对玉米和水稻污染效应及累积规律的研究 [J]. 农业环境科学学报,2008,27(6):2315-2318.  
Kang L J,Xie Z L. Pollution effects and accumulation rules of nickel in corn and rice [J]. Journal of Agricultural-Environment Scienc,2008,27(6):2315-2318. (in Chinese)