

麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 买托合提·阿那依提, 等. 焉耆盆地小麦地土壤重金属污染及生态风险[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 921-929.

Mamattursun EZIZ, Ajigul MAMUT, Mattohti ANAYIT, et al. The soil heavy metal pollution and ecological risk assessment of wheat fields in Yanqi Basin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(4): 921-929.

焉耆盆地小麦地土壤重金属污染及生态风险

麦麦提吐尔逊·艾则孜^{1,2}, 阿吉古丽·马木提¹, 买托合提·阿那依提¹, 艾尼瓦尔·买买提³

(1.新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2.丝绸之路经济带城市发展研究中心, 新疆师范大学, 乌鲁木齐 830054; 3.新疆大学化学与化工学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要:从新疆焉耆盆地采集 35 个小麦地土壤样品,测定其中 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 8 种重金属元素的含量,采用内梅罗污染指数(*NPI*)、潜在生态风险指数(*RI*)和生态风险预警指数(*I_{ER}*)对小麦地土壤重金属污染及生态风险进行评价。结果表明:焉耆盆地小麦地 Cd 含量平均值超出国家土壤环境质量二级标准的 11.12 倍,Cd、Cr、Ni、Pb 和 Zn 含量的平均值分别超出新疆灌耕土背景值的 55.58、1.32、1.48、3.21 倍和 4.47 倍。小麦地 Cd、Pb 和 Zn 呈现重度污染,Cr 和 Ni 轻度污染,As 和 Cu 轻微污染,Mn 无污染;研究区 *NPI* 平均值为 7.93(呈现重度污染状态),*RI* 平均值为 342.95(属于较强生态风险水平),*I_{ER}* 平均值为 5.68(属于重警级别),土壤 *RI* 和 *I_{ER}* 从研究区北向南呈现逐渐增加趋势。小麦地 Ni、Pb 与 Zn 主要受到人为污染源的影响,Cu、Mn 和 Cr 主要受到土壤地球化学特征的控制,As 和 Cd 可能受人为污染和自然因素共同影响。综上所述,Cd 是焉耆盆地小麦地主要的污染因子和生态风险因子,对研究区耕地 Cd 污染应予关注。

关键词:耕地;重金属;污染;生态风险;焉耆盆地

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2017)05-0921-09 doi:10.11654/jaes.2016-1633

The soil heavy metal pollution and ecological risk assessment of wheat fields in Yanqi Basin

Mamattursun EZIZ^{1,2}, Ajigul MAMUT¹, Mattohti ANAYIT¹, Anwar MOHAMMAD³

(1.College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2.Research Center for Urban Development in Silk Road Economic Belt, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 3.College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: A total of 35 soil samples were collected from wheat fields in Yanqi Basin, Xinjiang, and determined the contents of eight heavy metal elements(As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn) by standard methods. The soil heavy metal pollution of wheat fields was analyzed based on Nemerow pollution index(*NPI*), potential ecological risk index(*RI*) and ecological risk warning index(*I_{ER}*). Results of the research indicated that: the average contents of Cd in wheat field soils of Yanqi Basin exceeded 11.12 times of the National Soil Environmental Quality Standard(Grade II); The average contents of Cd, Cr, Ni, Pb and Zn exceeded 55.58, 1.32, 1.48, 3.21 times and 4.47 times of the background values for irrigation soils in Xinjiang, respectively; Cd, Pb and Zn fell into high pollution level, whereas Cr and Ni fell into light pollution level, As and Cu fell into slightly pollution level, and Mn fell into no pollution level for wheat field soils. The average value of *NPI* was 7.93, which showed a heavy pollution level; The average value of *RI* of soil was 342.95, which showed a highly ecological risk situation; The average value of *I_{ER}* of soil was 5.68, which showed a serious warning situation. The *RI* and *I_{ER}* of soil gradually increased from the northern

收稿日期:2016-12-20

作者简介:麦麦提吐尔逊·艾则孜(1981—),男,维吾尔族,新疆喀什人,博士后,副教授。研究方向为干旱区绿洲土壤环境安全。

E-mail: oasiseco@126.com

基金项目:新疆杰出青年科技人才培养项目(qn2015jq003);国家自然科学基金项目(41561073,41361002)

Project supported: The Fund for Training Program of Distinguished Young Scientists of Xinjiang(qn2015jq003); The National Natural Science Foundation of China(41561073,41361002)

parts to the southern parts of study area; Ni, Pb and Zn of wheat field were affected mainly by the human activities, whereas Cu, Mn and Cr were controlled mainly by the geochemical background of soils, and the main sources of As and Cd may be affected by the interaction of human activities and natural factors. Cd was the main pollution factor and the main ecological risk factor of wheat fields in Yanqi Basin, the pollution risk of Cd should be a major concern in the study area.

Keywords: farmland; heavy metal; pollution; ecological risk; Yanqi Basin

农产品质量安全与农田土壤环境质量有着密切联系^[1]。重金属由于具有迁移速率慢、污染后果严重以及生态环境效应复杂等特点,不仅影响土壤与农产品质量安全,而且还通过生态系统间的循环进入人体,威胁人类的健康,因而受到普遍关注^[2-4]。

2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》指出,我国土壤污染类型以重金属污染为主,农田土壤污染点位超标率达19.4%^[5]。我国受重金属As、Cr、Cd、Hg和Pb污染的耕地总面积约 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$,每年因重金属污染而损失的粮食约 $1 \times 10^7 \text{ t}$ ^[6]。我国学者采用Nemerow污染指数与Håkanson潜在生态风险指数在我国不同区域农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价方面开展了大量研究^[7-14],但关于我国内陆盆地绿洲农田土壤重金属污染及生态风险方面研究很少。近年来,随着我国内陆盆地绿洲人类活动对土地资源开发利用程度的加剧,绿洲土壤环境安全正日趋严峻,其中重金属污染是影响绿洲农田土壤环境安全的主要因素之一^[15-16]。

基于此,本文通过采集新疆焉耆盆地小麦地土壤样品,测定其中As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn 8种重金属元素的含量,采用Nemerow污染指数和Håkanson潜在生态风险指数,对焉耆盆地小麦地土壤重金属污染及潜在生态风险进行评估,以期对焉耆盆地农田土壤环境安全提供综合参考,同时为干旱区绿洲农田土壤环境保护及污染防治提供数据基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区($86^{\circ}15' \sim 86^{\circ}45' \text{ E}$, $41^{\circ}50' \sim 42^{\circ}10' \text{ N}$)位于新疆焉耆盆地腹地,博斯腾湖西部,开都河下游地区,总面积约 $120\,000 \text{ km}^2$,在行政区划上属于新疆维吾尔自治区焉耆县和博湖县(图1)。

研究区气候属于暖温带大陆性干旱荒漠气候,海拔 $1050 \sim 1120 \text{ m}$,多年平均降水量约 70 mm ,多年平均蒸发量约 2500 mm ,多年平均气温约 8.6°C 。研究区东部是我国最大的内陆淡水湖——博斯腾湖,因受博

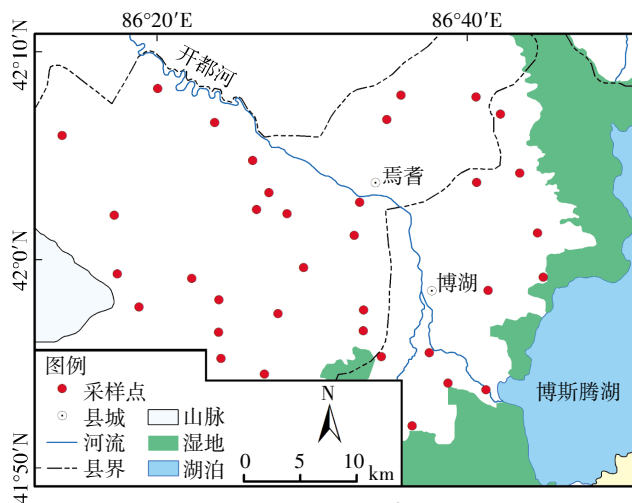


图1 研究区与采样点位置

Figure 1 Location of study area and sampling sites

斯腾湖水域的调节,研究区冷热变化较小,热量较丰富, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温约 3700°C ,农作物生长期为4—9月。研究区土壤类型主要为灌耕草甸土、灌耕棕漠土、灌耕沼泽土、潮土、灌漠土、灌耕石质土、灌耕风沙土、盐土等。自然植被以红柳(*Tamarix ramosissima*)、芦苇(*Phragmites communis*)、香蒲(*Typha orientalis*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)和麻黄(*Ephedra przewalskii* Stapf)等为主^[15]。

1.2 土壤样品采集与测定

2016年5月在研究区采集小麦地表层(0~20 cm)土壤样品35个。样品采集过程中,参照《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395—2000)^[17]。土壤样品室温下风干,用塑料棒碾碎,剔除沙砾及植物残体等,充分混合后从中多点(约40点)取样 20 g ,用玛瑙研钵进一步研磨,通过 0.15 mm 尼龙筛混匀后备用。小麦地土壤样品中As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb与Zn含量的测定方法参考《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)^[18],采用 $\text{HNO}_3\text{--HCl--HF--HClO}_4$ 法电热板加热消解并处理后,As含量用PERSEE原子荧光光度计(PF-7)测定,Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn含量用火焰原子吸收光谱仪(Agilent 200AA)测定。每批土样做3次空白样和平行样,取平均值作为样品重

金属元素的最终含量。测试过程中加入国家标准土壤参比物质(GSS-5)进行质量控制,各重金属的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。土壤重金属含量委托新疆大学理化测试中心测定。

1.3 污染评价方法

以新疆灌耕土背景值^[19]作为参比值,采用单因子污染指数(P_i)对研究区小麦地单一重金属元素污染水平进行评价。以《土壤环境质量标准》^[20](GB 15618—1995)的二级标准($pH>7.5$)作为参比值,采用内梅罗综合污染指数(NPI)^[21]评价小麦地土壤重金属综合污染水平。采用 Håkanson 潜在生态风险指数(RI)^[22]对耕地土壤重金属污染的潜在生态风险态势进行评价,重金属元素毒性响应系数参照 Håkanson 提出的参考值^[22-24];采用 Rapant 等提出的生态风险预警指数(I_{ER})^[25-26],对小麦地土壤重金属污染生态风险进行生态风险预警评估。 P_i 、 NPI 、 RI 和 I_{ER} 的计算方法见表 1,污染水平与生态风险级别的分级标准见表 2。

2 结果与讨论

2.1 焉耆盆地小麦地土壤重金属含量统计特征

由统计分析结果可知(表 3),研究区小麦地土壤中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 含量平均值分

别为 7.92、6.67、52.32、31.04、480.78、38.98、43.37、75.03 $mg \cdot kg^{-1}$ 。Cd 含量平均值超出国家土壤环境质量标准二级标准的 11.12 倍,As、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量平均值均未超出国家土壤环境质量二级标准的限值。小麦地土壤 As、Cu 和 Mn 含量的平均值未超出新疆灌耕土背景值,Cd、Cr、Ni、Pb、Zn 含量的平均值分别超出新疆灌耕土背景值的 55.58、1.32、1.48、3.21、4.47 倍。As 和 Mn 含量的平均值未超出新疆土壤背景值^[27],Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含量的平均值分别超出新疆土壤背景值的 55.58、1.06、1.16、1.47、2.24、1.09 倍。研究区小麦地 As 和 Cd 的超标率分别为 5.56%和 100%,Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 均未超标。

变异系数反映各采样点重金属元素含量的平均变异程度,变异系数越大,表明重金属含量空间分布越不均匀,存在点源污染可能性也越大^[28]。研究区土壤中重金属 As 和 Pb 的变异系数分别为 1.43 和 0.64,变异比较明显,表明 As 和 Pb 很可能受某些局部污染源的影响;Cd、Cr、Ni 和 Zn 的变异系数分别为 0.32、0.33、0.32 和 0.39,呈现中等变异,表明人为因素对重金属积累有一定的影响;Cu 和 Mn 的变异系数均小于 0.25,呈现弱变异,表明其含量受人为因素的影响较小。

表 1 土壤重金属污染评价方法
Table 1 Evaluation methods of heavy metal contamination in soils

指数 Index	计算公式 Expressions	参数特征 Parameters
P_i	$P_i = C_i / S_i$	P_i 为重金属 i 的污染指数; C_i 为重金属 i 的实测浓度; S_i 为参比值
NPI	$NPI = \sqrt{(P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2) / 2}$	NPI 为土壤综合污染指数; $P_{\max}$ 为土壤中单项污染物的最大污染指数; P_{ave} 为土壤中各污染物的平均污染指数
RI	$RI_j = \sum_{i=1}^n E_j^i = \sum_{i=1}^n T_i C_j^i = \sum_{i=1}^n T_i c_j^i / c_i^i$	RI_j 为 j 样点多种重金属综合潜在生态风险指数; E_j^i 为 j 样点重金属 i 的单项潜在生态风险指数; C_j^i 为 j 样点重金属 i 的污染指数; c_j^i 为 j 样点土壤重金属 i 的实测浓度; c_i^i 为重金属 i 的参比值; T_i 为重金属 i 的毒性系数, As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的毒性系数分别取 10、30、2、5、5、5 和 1
I_{ER}	$I_{ER} = \sum_{i=1}^n I_{ERi} = \sum_{i=1}^n (P_i - 1)$	I_{ER} 为生态风险预警指数; P_i 为重金属 i 的污染指数

表 2 土壤重金属污染指数、潜在生态风险与预警指数等级划分
Table 2 Grades of pollution load index and potential ecological risk for soil heavy metals

单因子污染指数 Individual pollution index		内梅罗污染指数 Nemerow pollution index		潜在生态风险指数 Potential ecological risk index				生态风险预警指数 Ecological risk warning index	
P_i	分级	NPI	分级	E	分级	RI	分级	I_{ER}	分级
$P_i \leq 0.7$	清洁	$NPI \leq 1$	清洁	$E \leq 40$	轻微	$RI \leq 150$	轻微	$I_{ER} \leq 0$	无警
$0.7 < P_i \leq 1$	轻微	$1 < NPI \leq 2$	轻微	$40 < E \leq 80$	中等	$150 < RI \leq 300$	中等	$0 < I_{ER} \leq 1$	预警
$1 < P_i \leq 2$	轻度	$2 < NPI \leq 3$	轻度	$80 < E \leq 160$	较强	$300 < RI \leq 600$	较强	$1 < I_{ER} \leq 3$	轻警
$2 < P_i \leq 3$	中度	$3 < NPI \leq 5$	中度	$160 < E \leq 320$	很强	$600 < RI \leq 1200$	很强	$3 < I_{ER} \leq 5$	中警
$P_i > 3$	重度	$NPI > 5$	重度	$E > 320$	极强	$RI > 1200$	极强	$I_{ER} > 5$	重警

表3 焉耆盆地小麦地土壤重金属含量统计($n=35$)Table 3 Statistic of soil heavy metal concentrations of wheat field in Yanqi Basin($n=35$)

项目 Item	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
最小值 Minimum/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.79	4.25	42.38	22.19	406.71	26.18	0.99	53.16
最大值 Maximum/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	63.87	12.28	76.52	54.53	620.46	101.54	81.99	170.99
平均值 Average/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.92	6.67	52.32	31.04	480.78	38.98	43.37	75.03
标准误差 Standard deviation/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	11.36	2.15	17.22	7.41	54.79	12.32	27.58	29.01
变异系数 Coefficient of variation	1.43	0.32	0.33	0.24	0.11	0.32	0.64	0.39
新疆灌耕土背景值 Background value of irrigation soils in Xinjiang/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	9.09	0.12	39.60	35.80	688.0	26.40	13.5	16.80
新疆土壤背景值 Background value of soils in Xinjiang/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	11.20	0.12	49.30	26.70	688.0	26.60	19.40	68.8
国家二级标准 Second grade of National Standard of China/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	25	0.6	250	100	—	60	350	300
超标率 Over-standard rate/%	5.56	100	0	0	—	0	0	0

2.2 土壤重金属污染评价

焉耆盆地小麦地土壤重金属元素单项污染指数(P_i)的平均值从大到小依次为 Cd(55.45)、Zn(4.47)、Pb(3.24)、Ni(1.47)、Cr(1.31)、As(0.86)、Cu(0.85)、Mn(0.70),其中 Cd、Pb 和 Zn 呈现重度污染,Cr 和 Ni 呈现轻度污染,As 和 Cu 呈现轻微污染,Mn 呈现无污染。从各重金属元素不同污染级别样点数占样点总数的比例来看(表4),大部分样点 As 和 Mn 的 P_i 呈现无污染,As 和 Mn 无污染样点数分别占样点总数的 68.58%和 62.86%;大部分样点 Ni 的 P_i 呈现轻度污染,其占样点总数的 91.42%;所有样点 Cd 和 Zn 的 P_i 呈现重度污染;大部分样点 Cr 的 P_i 呈现轻度污染,其占样点总数的 91.43%;大部分样点 Cu 的 P_i 呈现轻微污染,其占样点总数的 54.29%;Pb 呈现无污染、轻微污染、轻度污染、中度污染和重度污染样点数分别占样点总数的 14.29%、8.57%、11.43%、8.57%和 57.14%。小麦地土壤重金属综合污染指数(NPI)的变化范围介于 5.07~14.62 之间,平均值为 7.93,所有样点 NPI 均呈现重度污染态势。

基于 GIS 技术,绘制焉耆盆地小麦地各重金属元素 P_i 的空间分布图(图2)。由图可知,小麦地 8 种重金属元素 P_i 的空间分布格局各不相同。Cd、Zn 与 Pb

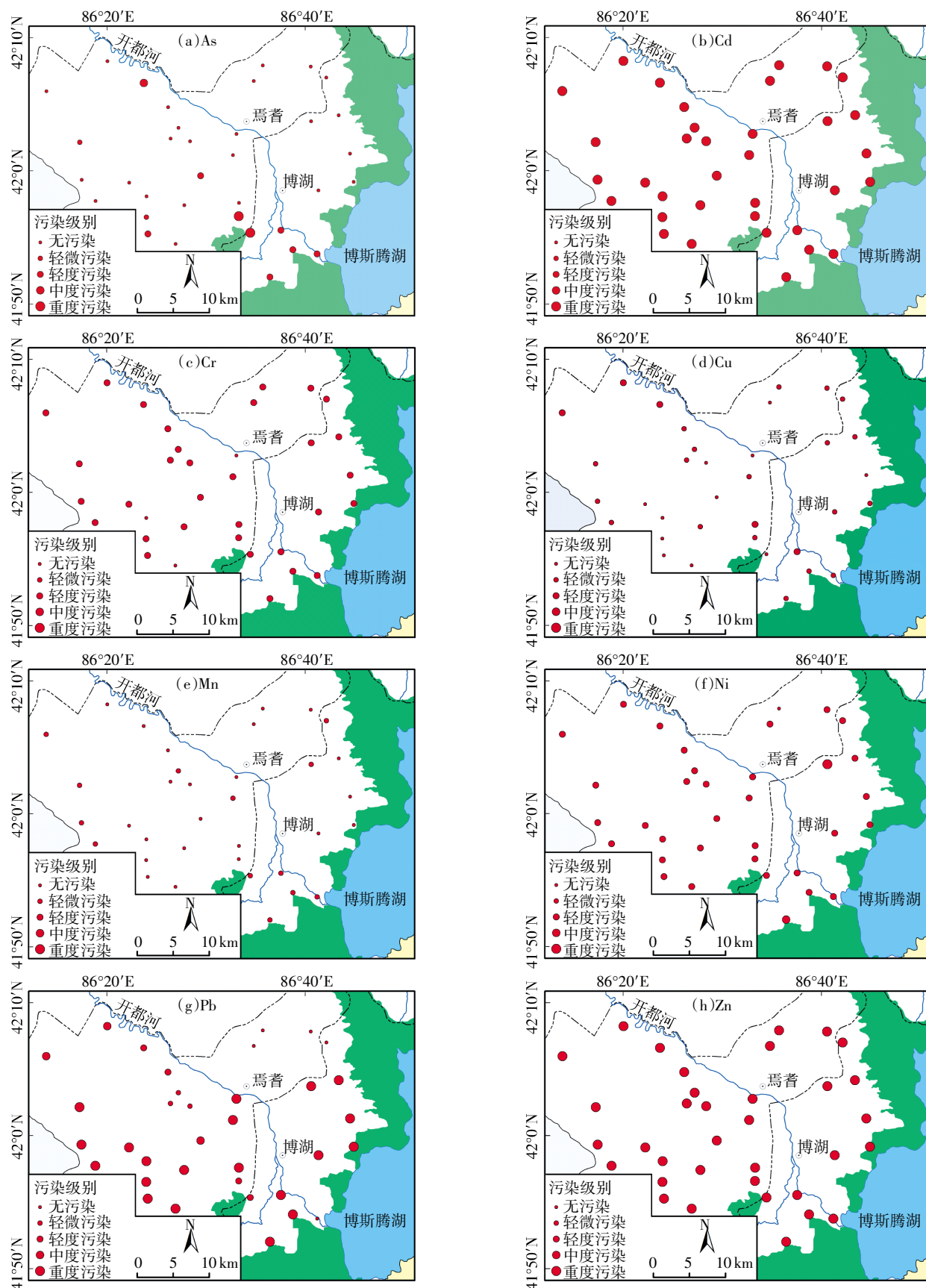
的 P_i 从研究区北部向南部呈现逐渐增加趋势;As 在博湖县南部出现污染高值区,其他大部分区域基本属于清洁水平;Cr 在研究区内大部分区域分布比较均匀,主要呈现轻度污染态势;Cu 和 Mn 在研究区内大部分区域表现为无污染态势,含量高值区主要分布于博湖县南部与焉耆县西部;Ni 在研究区内大部分区域表现为轻度污染态势,博湖县南部与北部存在污染高值点。可以看出:Cd 是污染程度最高的元素,所有样点土壤 Cd 含量均表现为重度污染态势;Zn 是研究区污染程度第二高的元素,其态势以重度污染为主;Pb 是研究区土壤污染程度第三高的元素,在研究区南部以重度污染为主。

2.3 土壤重金属污染生态风险

焉耆盆地小麦地土壤重金属单项潜在生态风险指数(E_i^j)的平均值从大到小依次为 Cd(333.69)>Ni(3.25)>As(3.17)>Cu(1.55)>Pb(0.62)>Cr(0.42)>Zn(0.25)。所有样本 As、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的 E_i^j 均小于 40,处于轻微生态风险水平;Cd 的潜在生态风险程度极高,其 E_i^j 的变化范围介于 212.50~614.00 之间,平均值呈现极强生态风险水平,是研究区主要的生态风险因子。研究区综合潜在生态风险指数(RI)变化范围介于 145.66~626.57 之间,平均值为 342.95,属于较强

表4 不同污染级别样点数占样点总数的百分数($n=35$)Table 4 Percentages of sites at different pollution levels in the total sample sites($n=35$)

污染级别 Pollution degree	P_i								NPI
	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	
无污染 No pollution	68.58	0	8.57	31.42	62.86	2.86	14.29	0	0
轻微污染 Slightly pollution	5.71	0	0	54.29	37.14	0	8.57	0	0
轻度污染 Light pollution	17.14	0	91.43	14.29	0	91.42	11.43	0	0
中度污染 Moderate pollution	2.86	0	0	0	0	2.86	8.57	0	0
重度污染 Heavy pollution	5.71	100	0	0	0	2.86	57.14	100	100

图 2 焉耆盆地小麦地土壤重金属的 P_i 空间分布Figure 2 Spatial distribution of P_i value of soil heavy metal of wheat fields in Yanqi Basin

生态风险水平,其中属于轻微、中等、较强和很强生态风险级别的样本数分别占样本总数的 2.86%、42.86%、48.57%和 5.71%(表 5)。

从小麦地 RI 的空间分布格局可见(图 3),属于很强生态风险态势的区域主要分布于博湖县南部,属于较强生态风险的区域主要分布于焉耆县与博湖县南部,研究区北部区域主要表现为中等生态风险态势。总体上, RI 从研究区北部向南部呈现逐渐增加的趋势。

2.4 土壤重金属污染的生态风险预警

生态风险预警评价源于生态风险评价,它更强调对生态系统可能存在风险的警示研究^[26]。生态风险预警评价结果表明,研究区生态风险预警指数(I_{ER})的平均值为 5.68,属于重警级别, I_{ER} 变化范围介于 1.10~15.60 之间。按照生态风险预警级别划分标准,焉耆盆地小麦地属于无警、预警、轻警、中警和重警级别的样本数分别占样本总数的 2.86%、0%、22.86%、20.0%和 54.28%。从各样点 I_{ER} 的空间分布情况可以看出(图 4),研究区 I_{ER} 的空间分布格局与 RI 的空间分布格局基本一致,呈现较明显的地带性分布规律,从北部向南部呈现逐渐增加趋势。

2.5 土壤重金属来源解析

2.5.1 相关分析

相关分析法可以用来判别土壤中重金属的来源。若重金属元素间相关性极显著,则说明重金属元素间可能具有相似的来源途径^[29]。利用 SPSS 19.0 软件计算得到小麦地土壤中各重金属元素间相关系数(表 6)。由表 6 可见,小麦地土壤 Pb 与 Ni 之间的 Person 相关系数较高,通过了 0.01 水平的显著性检验;As 与 Cd,Cr 与 Mn、Pb,Cu 与 Mn、Pb 与 Zn 之间的相关系数也较高,并通过了 0.05 水平的显著性检验。这表明小麦地土壤中 Pb-Ni、As-Cd、Cu-Mn、Pb-Zn 和 Cr-Mn-Pb 元素可能具有相同来源。

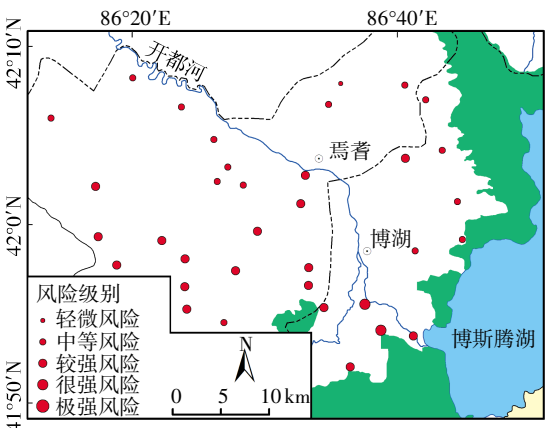


图 3 焉耆盆地小麦地土壤重金属 RI 空间分布
Figure 3 Spatial distribution of RI value of heavy metal of wheat fields in Yanqi Basin

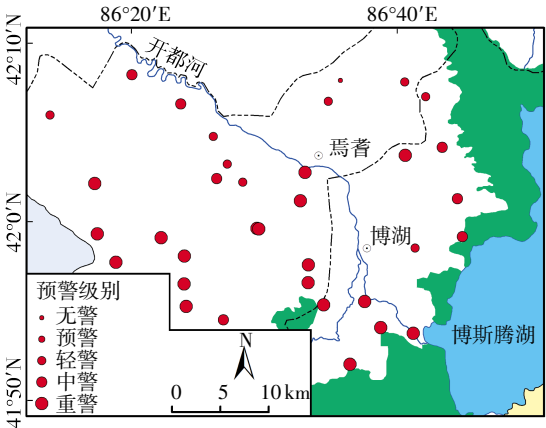


图 4 焉耆盆地小麦地 I_{ER} 空间分布
Figure 4 Spatial distribution of I_{ER} value of wheat fields in Yanqi Basin

2.5.2 因子分析

因子分析是用于区分重金属元素自然来源和人为来源常用的一类方法^[7]。因子分析结果表明(表 7),前 3 个主成分特征值大于 1,累计方差贡献率达到 70.56%,符合分析要求,对分析的指标能给出较充分

表 5 不同生态风险级别样点数占样点总数的百分数($n=35$)
Table 5 Percentages of sites at different risk levels in the total sample sites($n=35$)

风险级别 Risk degree	E_i^i							RI
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
轻微生态风险 Light ecological risk	100	0	100	100	100	100	100	2.86
中等生态风险 Moderate ecological risk	0	0	0	0	0	0	0	42.86
较强生态风险 Highly ecological risk	0	0	0	0	0	0	0	48.57
很强生态风险 High ecological risk	0	54.29	0	0	0	0	0	5.71
极强生态风险 Serious ecological risk	0	45.71	0	0	0	0	0	0

表 6 重金属元素相关性分析结果($n=35$)

Table 6 Correlation coefficients between heavy metal elements ($n=35$)							
元素 Elements	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
As	0.29*	-0.01	0.08	0.03	0.05	-0.21	-0.21
Cd		-0.26	0.05	0.24	0.17	0.23	-0.15
Cr			0.16	0.28*	-0.14	0.36*	-0.07
Cu				0.37*	0.06	-0.02	0.05
Mn					0.31	0.26	0.18
Ni						-0.48**	0.26
Pb							0.32*

注:** 极显著相关($P<0.01$);* 显著相关($P<0.05$)。
Note: **Extremely significant correlation($P<0.01$);*Significant correlation($P<0.05$).

的概括。

第一主成分(F1)的方差贡献率为 29.51%,Ni、Pb 与 Zn 在 F1 上具有较大载荷,分别为 0.72、0.83、-0.61。研究区小麦地土壤中 Ni、Pb 和 Zn 的变异系数呈现中等或强变异(表 3),表明人为因素对 Ni、Pb 和 Zn 积累影响较大。此外,Ni、Pb 和 Zn 含量的平均值分别超出新疆灌耕土背景值的 1.48、3.21、4.47 倍(表 3)。以上分析可以看出,F1 能代表“人为源因子”,研究区农业生产活动带入的重金属很可能是导致小麦地土壤中 Ni、Pb 和 Zn 累积的重要因素。

第二主成分(F2)上 Cr、Cu 与 Mn 具有较高的载荷,分别为 0.67、0.69、0.66。相关研究认为^[30],土壤中 Cr、Cu 和 Mn 等元素主要受地球化学成因影响,主要为地质来源。由于研究区 Cu 和 Mn 平均含量低于新疆灌耕土背景值,Cr 平均含量与新疆灌耕土背景值较接近(表 3),故研究区小麦地土壤 Cr、Cu 和 Mn 主要受到土壤地球化学特征(成土母质和地形条件)的控制。因此,F2 可以代表“自然源因子”。

第三主成分(F3)上重金属元素 As 与 Cd 具有较高的载荷,为 0.68 与 0.69。从 As 含量空间分布图来看,虽然大部分区域处于清洁水平,但是研究区南部

存在 2 个污染高值点。这表明 As 在部分区域受到人类活动导致的点源污染的影响,其他区域主要受到土壤地球化学特征的影响。Cd 含量从研究区北部向南部呈现有规律的变化趋势,Cd 的变异系数也较小(表 3),表明成土母质一定程度控制 Cd 含量。相关研究表明^[31],Cd 一般可作为施用化肥与农药等农业活动的标识元素。因此,可以认为研究区小麦地土壤中 As 与 Cd 含量受自然因素和人类活动共同控制。以上分析可以看出,F3 可以代表“自然-人为源复合因子”。

2.5.3 聚类分析

聚类分析可以直观地反映重金属元素之间的相互联系^[15]。首先对重金属元素含量数据进行标准化处理,然后采用欧氏距离衡量数据之间的距离,并基于离差平方和法绘制 8 种重金属元素的聚类树状图。由图 5 可见,焉耆盆地小麦地土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 可归为 3 类,即 Ni-Pb-Zn、Cu-Mn-Cr 以及 As-Cd。聚类分析分类结果与因子分析结果相对应,进一步验证因子分析结果的可靠性。

结合相关分析、因子分析和聚类分析结果可知,焉耆盆地小麦地土壤中 8 种重金属元素分为 3 组:第一组元素包括 Ni、Pb 与 Zn,主要受人类活动的影响;第二组元素包括 Cu、Mn 和 Cr,主要受成土母质和地

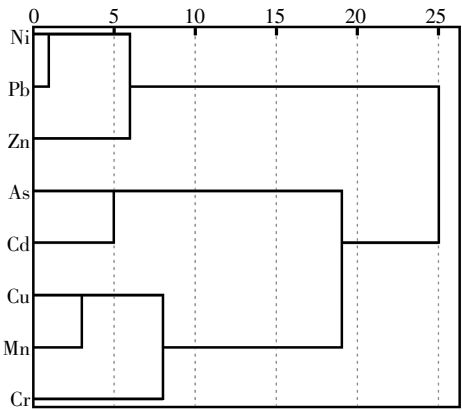


图 5 重金属元素聚类分析树状图
Figure 5 Clustering tree of heavy metal elements

表 7 土壤重金属元素因子载荷($n=35$)
Table 7 Factor matrix for soil heavy metal elements($n=35$)

主成分 Principal components	初始特征值 Initial eigenvalue			主成分载荷 Principal component loading							
	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution/%	累计贡献率 Accumulative contribution/%	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
F1	2.36	29.51	29.51	-0.07	0.44	-0.41	0.19	0.55	0.72	0.83	-0.61
F2	1.57	21.67	51.18	0.31	0.12	0.67	0.69	0.66	0.05	-0.32	-0.05
F3	1.47	19.38	70.56	0.68	0.69	-0.37	-0.07	-0.07	-0.03	-0.07	0.36

形条件的控制;第三组元素包括 As 和 Cd,受人为因素和自然因素共同影响。

3 结论

(1)焉耆盆地小麦地各重金属元素含量有一定的积累,其中 Cd、Pb 和 Zn 污染严重。小麦地土壤 RI 呈现较强生态风险水平, I_{ER} 呈现重警态势。Cd 是主要的污染因子,研究区耕地土壤 Cd 污染值得关注。

(2)小麦地各重金属元素 P_i 反映的污染水平空间分布格局不相同。 RI 和 I_{ER} 值的空间分布格局均呈现明显的水平地带性分布规律,并从研究区北部向南部呈现逐渐增加趋势。

(3)小麦地土壤中 Ni、Pb 与 Zn 受到人为污染源的影响,Cu、Mn 和 Cr 主要受到土壤地球化学特征的控制,As 和 Cd 则受人为因素和自然因素共同影响。

参考文献:

- [1] 孙超,陈振楼,毕春娟,等.上海市崇明岛农田土壤重金属的环境质量评价[J]. 地理学报, 2009, 64(5): 619-628.
SUN Chao, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, et al. Evaluation on environmental quality of heavy metals in agricultural soils of Chongming Island, Shanghai[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 619-628.
- [2] 李玉梅,李海鹏,张连科,等.包头某铜厂周边土壤重金属分布特征及来源分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1321-1328.
LI Yu-mei, LI Hai-peng, ZHANG Lian-ke, et al. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in soil around a copper plant in Baotou, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1321-1328.
- [3] Zhang Z Y, Abuduwaili J, Jiang F Q. Determination of occurrence characteristics of heavy metals in soil and water environments in Tianshan Mountains, Central Asia[J]. *Analytical Letters*, 2013, 46(13): 2122-2131.
- [4] 郭朝晖,肖细元,陈同斌,等.湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 3-11.
GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, CHEN Tong-bin, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables from midstream and downstream of Xiangjiang River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 3-11.
- [5] 和苗苗,方晓波.蔬菜种植基地土壤重金属污染修复技术[M]. 杭州: 杭州出版社, 2015.
HE Miao-miao, FANG Xiao-bo. Remediation technology of soil heavy metal pollution in vegetable planting base[M]. Hangzhou: Hangzhou Press, 2015.
- [6] Wu G, Kang H B, Zhang X Y, et al. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1): 1-8.
- [7] 陈志凡,范礼东,陈云增,等.城乡交错区农田土壤重金属总量及形态空间分布特征与源分析:以河南省某市东郊城乡交错区为例[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1317-1327.
CHEN Zhi-fan, FAN Li-dong, CHEN Yun-zeng, et al. Spatial distribution and source analysis of heavy metals in agricultural soils in a peri-urban area based on IDW interpolation and chemical fractions: A case study in Henan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(4): 1317-1327.
- [8] 姚荣江,杨劲松,谢文萍,等.江苏沿海某设施农区土壤重金属累积特点及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1498-1506.
YAO Rong-jiang, YANG Jin-song, XIE Wen-ping, et al. Accumulation and potential ecological risk assessment of heavy metals in greenhouse soils from coastal area of Jiangsu Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1498-1506.
- [9] 赵筱青,李丽娇,杨红辉,等.云南泚江流域农田土壤重金属 Pb、Zn、Cd、As 的地球化学特征[J]. 地球学报, 2012, 33(3): 331-340.
ZHAO Xiao-qing, LI Li-jiao, YANG Hong-hui, et al. The geochemical characteristics of heavy metals in agricultural soils of the Bijiang Watershed in Yunnan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(3): 331-340.
- [10] 韦绪好,孙庆业,程建华,等.焦岗湖流域农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2304-2311.
WEI Xu-hao, SUN Qing-ye, CHENG Jian-hua, et al. Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils in Jiaogang Lake Basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 34(12): 2304-2311.
- [11] 胡森,吴家强,彭佩钦,等.矿区耕地土壤重金属污染评价模型与实例研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 423-430.
HU Miao, WU Jia-qiang, PENG Pei-qin, et al. Assessment model of heavy metal pollution for arable soils and a case study in a mining area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2): 423-430.
- [12] 吴洋,杨军,周小勇,等.广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2964-2971.
WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, et al. Risk assessment of heavy metal contamination in farmland soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 2964-2971.
- [13] 王爽,李荣华,张增强,等.陕西潼关农田土壤及农作物重金属污染及潜在风险[J]. 中国环境科学, 2014, 34(9): 2313-2320.
WANG Shuang, LI Rong-hua, ZHANG Zeng-qiang, et al. Assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazardous in agricultural soils and crops of Tongguan, Shaanxi Province[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(9): 2313-2320.
- [14] 刘洪莲,李艳慧,李恋卿,等.太湖地区某地农田土壤及农产品中重金属污染及风险评价[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 60-63.
LIU Hong-lian, LI Yan-hui, LI Lian-qing, et al. Pollution and risk evaluation of heavy metals in soil and agro-products from an area in the Taihu Lake region[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(5): 60-63.
- [15] 麦提提吐尔逊·艾则孜.内陆河流域环境演变与生态安全[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2016.
Mamattursun EZIZ. Environmental evolution and ecological security in

- inner river basin[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016.
- [16] Zulpiya MAMAT, Hamid YIMIT, Ruozhi AJI, et al. Source identification and hazardous risk delineation of heavy metal contamination in Yanqi Basin, Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493(15):1098–1111.
- [17] 农业部. NY/Y 395—2000 农田土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- Ministry of Agriculture. NY/Y 395—2000 Technical specification for farmland soil environmental quality monitoring[S]. Beijing: China Standards Press, 2000.
- [18] 国家环保总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- State Environmental Protection Administration. HJ/T 166—2004 Technical specification for soil environmental monitoring[S]. Beijing: China Standards Press, 2004.
- [19] 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.
- ZHENG Guo-zhang. Theory and practice of research on heavy metal pollution in agricultural soil[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007.
- [20] 国家环保总局, 国家技术监督局. GB/T 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- State Environmental Protection Administration, State Bureau of Technical Supervision. GB/T 15618—1995 National Soil Quality Standard of China[S]. Beijing: China Standards Press, 1995.
- [21] Nemerow N L. Stream, lake, estuary, and ocean pollution[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Publishing Co., 1985.
- [22] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975–1001.
- [23] 关莹, 臧淑英, 肖海丰. 连环湖马圈泡沉积物重金属污染及潜在生态风险[J]. 地理科学, 2014, 34(4):505–512.
- GUAN Ying, ZANG Shu-ying, XIAO Hai-feng. Pollution and potential ecological risk of heavy metals in core sediments from Majuan Lake in Lianhuan Lake, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(4):505–512.
- [24] 于万辉, 王俊杰, 臧淑英. 松嫩平原湖泊底泥重金属空间变异特征及其风险评价[J]. 地理科学, 2012, 32(8):1000–1005.
- YU Wan-hui, WANG Jun-jie, ZANG Shu-ying. The spatial variability characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals of lake sediments in the Songnen Plain[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(8):1000–1005.
- [25] Rapant S, Kordik J. An environmental risk assessment map of the Slovak Republic: Application of data from geochemical atlases[J]. *Environmental Geology*, 2003, 44(4):400–407.
- [26] 王军, 陈振楼, 王初, 等. 上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 环境科学, 2007, 28(3):647–653.
- WANG Jun, CHEN Zhen-lou, WANG Chu, et al. Heavy metal content and ecological risk warning assessment of vegetable soils in Chongming Island, Shanghai City[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(3):647–653.
- [27] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清, 等. 艾比湖流域农田土壤重金属的环境风险及化学形态研究[J]. 地理科学, 2015, 35(9):1198–1206.
- ZHANG Zhao-yong, ABUDUWAILI Jilili, JIANG Feng-qing, et al. Environment risk and chemical forms of heavy metals in farmland of Ebinur basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(9):1198–1206.
- [28] 雷国建, 陈志良, 刘千钧, 等. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33(增刊1):49–53.
- LEI Guo-jian, CHEN Zhi-liang, LIU Qian-jun, et al. The assessments of polluted degree and potential ecological hazards of heavy metals in suburban soil of Guangzhou City[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(Suppl1):49–53.
- [29] 陈秀端, 卢新卫, 赵彩凤, 等. 西安市二环内表层土壤重金属空间分布特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9):1281–1288.
- CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, ZHAO Cai-feng, et al. The spatial distribution of heavy metals in the urban topsoil collected from the interior area of the second ring road, Xi'an[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9):1281–1288.
- [30] Boruvka L, Vacek O, Jehlicka J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils[J]. *Geoderma*, 2005, 128(3):289–300.
- [31] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C. The effect of long-term phosphatic fertilizer applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54(3):267–277.