

新疆焉耆县耕地土壤重金属垂直分布特征与污染风险

阿吉古丽·马木提¹, 麦麦提吐尔逊·艾则孜¹, 艾尼瓦尔·买买提²

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆大学 化学与化工学院, 乌鲁木齐 830046)

摘 要:采用内梅罗综合污染指数(NPI)、潜在生态风险指数(RI)和生态风险预警指数(I_{ER}),对新疆焉耆县耕地不同土层(0—20, 20—40 cm)土壤重金属污染及生态风险进行了评估。结果表明:焉耆县耕地土壤中 As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb 与 Zn 含量有一定的积累。0—20 cm 土层的 Cd, Cr, Ni, Pb 和 Zn 含量的平均值分别超出新疆灌溉土背景值的 1.50, 1.39, 1.37, 2.13, 4.14 倍。两个土层 Zn 均呈现重度污染, Pb 呈现中度污染, Cd, Ni 和 Cr 呈现轻度污染, Cu 和 As 呈现轻微污染, Mn 无污染。两个土层 NPI 平均值均呈现轻度污染态势, RI 平均值均呈现轻微生态风险态势, I_{ER} 平均值均呈现无警态势。研究区 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤重金属的污染水平与生态风险等级差异不明显。0—20 cm 土层 As, Cd, Ni, Pb 和 Zn 主要受到人为因素的影响, Cu 和 Mn 主要受土壤地球化学特征的影响, Cr 受自然因素和人为因素共同影响。Cd 是研究区 0—20 cm 和 20—40 cm 土层最主要的污染因子和生态风险因子, 耕地土壤 Cd 污染风险必须关注。

关键词:土层; 重金属; 污染; 生态风险; 焉耆县

中图分类号: X53; X820.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)02-0367-07

Vertical Distribution Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metal Contamination of Farmlands in Yanqi County, Xinjiang

Ajiguli · Mamuti¹, Maimaitituerxun · Aizezi¹, Ainiwaer · Maimaiti²

(1. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: The contamination and ecological risks of heavy metals of farmland soils for different soil layers (0—20 cm and 20—40 cm) in Yanqi County, Xinjiang, were analyzed based on Nemerow Pollution Index (NPI), Potential Ecological Risk Index (RI) and Ecological Risk Warning (I_{ER}). As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn of farmland soils in Yanqi County have accumulated to a certain extent. The average concentrations of Cd, Cr, Ni, Pb and Zn for 0—20 cm soil layer exceeded 1.50, 1.39, 1.37, 2.13 and 4.14 times of the background values of irrigation soil in Xinjiang, respectively. For two soil layers, Zn fell into high pollution level, Pb fell into moderate pollution, Cd, Ni and Cr fell into light pollution level, Cu and As fell into slight pollution level, and Mn presented no pollution. The average NPI value for each soil layer fell into light contamination level, whereas the average RI value fell into light ecological risk statue, and the average I_{ER} value fell into no ecological warning statue. The contamination levels and ecological risk degrees of heavy metals for 0—20 cm and 20—40 cm soil layers were same. As, Cd, Ni, Pb and Zn of 0—20 cm soil layer were mainly affected by the human activities, whereas Cu and Mn were mainly affected by the geochemical background of soils, and the main sources of Cr may be affected by the interaction of human factors and natural factors. Cd was the main pollution factor, and ecological risk factor for 0—20 cm and 20—40 cm soil layers, the contamination risks of Cd in farmland soils of study area should be the major concern.

Keywords: soil layer; heavy metal; contamination; ecological risk; Yanqi County

重金属元素在环境中的化学行为和生态环境效应应具有复杂性^[1-2]。土壤重金属污染是由于人类活动将重金属加入到土壤系统中,致使土壤重金属含量超出原有含量,并造成土壤环境质量恶化的现象^[3-6]。土壤中重金属元素由于具有潜伏性强、迁移速率慢、生态环境效应复杂等特点,不仅通过积累导致土壤理化性质的恶化,阻碍植物正常生长,而且通过生态系统间的循环对生态系统安全以及人体健康产生严重威胁^[7-9]。重金属污染物在土壤上层积累后,在人为因素和自然因素作用下不断迁移,并导致不同土层土壤遭受污染。进入农田土壤中的重金属,受灌溉水淋溶作用发生横向和纵向迁移,其中重金属纵向分布反映不同元素的迁移能力和土壤污染的强度^[10]。耕地土壤重金属污染相关研究的焦点大多集中于耕地表层(0—20 cm)土壤中的重金属,针对不同深度土层中重金属的污染状况及生态风险方面报道较少^[10-12]。由于农作物根系能达到深层土壤,吸收深层土壤中的重金属元素,针对不同土层中的重金属污染风险进行研究是十分必要的。

随着我国社会经济的迅速发展,我国农田土壤重金属含量超标问题频频出现,已成为影响农产品质量安全的重要因素之一,我国大约48%蔬菜和10%粮食存在质量问题^[13-14]。2014年《全国土壤污染状况调查公报》中指出,中国土壤污染类型以重金属污染为主,耕地土壤污染点位超标率达19.4%^[15],受As,Cr,Cd,Hg和Pb污染的耕地总面积约2 000万 hm^2 ,每年因重金属污染而损失的粮食约1 000万t^[16]。随着新疆开都河流域绿洲经济的快速发展,人类活动对新疆绿洲土壤环境的干扰越来越加剧,绿洲土壤环境受到了不同程度的重金属污染威胁^[17]。因此,本文以新疆焉耆县耕地土壤不同土层(0—20 cm和20—40 cm)土壤为研究对象,采用内梅罗综合污染指数、潜在生态风险指数和生态风险预警指数,对耕地土壤重金属污染风险的剖面分布特征进行对比分析,为研究区耕地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

焉耆县位于新疆焉耆盆地腹地,东南与博湖县相邻,南与库尔勒市接界,东北与和硕县毗连,北与和静县接壤,是新疆绿洲经济发展的核心示范区之一,也是新疆加工辣椒和加工番茄的主要产地。试验区(86°10'—86°44'E,41°52'—42°10'N)位于焉耆县平原灌区,总面积约550 km^2 (图1)。气候属于暖温带大

陆性干旱荒漠气候,海拔1 050~1 100 m,多年平均降水量约68 mm,多年平均蒸发量约2 500 mm,多年平均气温约8.8℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温约3 700℃。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、灌漠土、灌耕风沙土、盐土等土壤类型。自然植被以芦苇(*Phragmites communis*)、红柳(*Tamarix ramosissima*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、香蒲(*Typha orientalis*)和麻黄(*Ephedra przewalskii* Stapf)等为主。农作物主要以加工辣椒、加工番茄和小麦等为主^[17]。

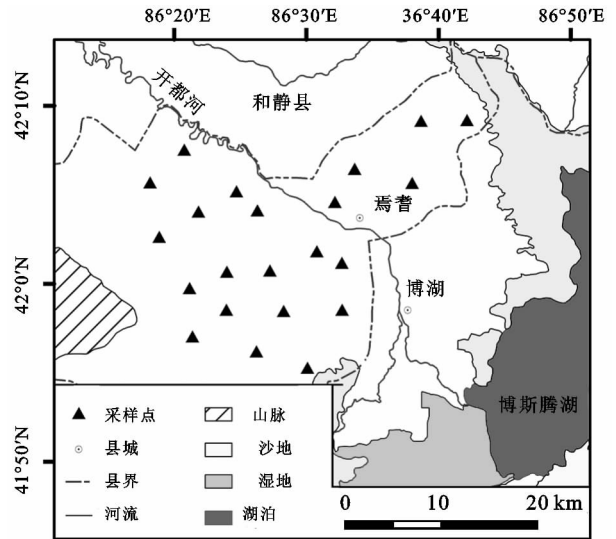


图1 研究区位置及采样点分布

1.2 样品采集与测定

2016年5月在焉耆县灌区进行耕地(辣椒地与小麦地)土壤样品采样,样品采集过程参照了《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T395—2000)^[18]。结合研究区农田土壤实际情况,设置22个点位(图1),每个点位分别采集0—20 cm和20—40 cm深度土壤样品,总采集土样44个。采样过程中,采用10 m×10 m内“梅花形”布设5个子样点,每个子样点采集表层土壤200 g左右,将其充分混合后装入洁净自封塑料袋内。将采集的土样带回实验室于室温下风干,用塑料棒碾碎,剔除沙砾及植物残体等杂物后装入纸袋,最后将其充分混合,从中多点(约40点)取样约20 g,用玛瑙研钵进一步研磨,通过100目尼龙筛混匀后备用。

土壤重金属含量委托新疆大学理化测试中心测定。重金属含量测定方法参考了《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166—2004)^[19]。土壤As含量用PERSEE原子荧光光度机(PF-7)测定,Cd,Cr,Cu,Mn,Ni,Pb与Zn含量用火焰原子吸收光谱仪(Agilent 200AA)测定。测试过程中加入国家标准土壤参比物质(GSS-12)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。

1.3 评价方法

以新疆灌耕土壤背景值^[20]作为参比值,采用内梅罗综合污染指数(NPI)^[21]评价耕地土壤重金属综合污染水平。以国家《土壤环境质量标准》^[22](GB15618—1995)中的二级标准(pH 值>7.5)作为参比值,采用 Håkanson^[23]提出的潜在生态风险指数

(RI)对耕地土壤重金属污染的潜在生态风险态势评价,重金属元素毒性响应系数参照 Håkanson 提出的参考值。土壤重金属生态风险预警评估采用 Rapant 等^[24]提出的生态风险预警指数(I_{ER}),以国家土壤环境质量二级标准作为参比值。NPI,RI 和 I_{ER} 的计算方法见表 1,NPI,RI 和 I_{ER} 的分级标准见表 2。

表 1 土壤重金属污染评价方法

指数	计算公式	参数特征
P_i	$P_i = C_i / S_i$	P_i 为元素 i 的污染指数; C_i 为元素 i 的实测浓度; S_i 为元素 i 的参比值
NPI	$NPI = \sqrt{(P_{\max}^2 + P_{ave}^2)}/2$	NPI 为土壤综合污染指数; P_{\max} 为土壤中单项元素的最大污染指数; P_{ave} 为土壤中各元素的平均污染指数
RI	$RI_j = \sum_{i=1}^n E_j^i = \sum_{i=1}^n T_i C_j^i = \sum_{i=1}^n T_i c_j^i / c_r^i$	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 样点元素 i 的单项潜在生态风险指数; C_j^i 为 j 样点元素 i 的污染指数; c_j^i 为 j 样点元素 i 的实测浓度; c_r^i 为元素 i 的参比值
I_{ER}	$I_{ER} = \sum_{i=1}^n I_{ER_i} = \sum_{i=1}^n (P_i - 1)$	I_{ER} 为生态风险预警指数; P_i 为元素 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

内梅罗污染指数		潜在生态风险指数		生态风险预警指数			
NPI	污染等级	E	风险程度	RI	风险等级	I_{ER}	预警等级
$NPI \leq 0.7$	安全	$E \leq 40$	轻微风险	$RI \leq 150$	轻微风险	$I_{ER} \leq 0$	无警
$0.7 < NPI \leq 1$	警戒线	$40 < E \leq 80$	中等风险	$150 < RI \leq 300$	中等风险	$0 < I_{ER} \leq 1$	预警
$1 < NPI \leq 2$	轻度污染	$80 < E \leq 160$	较强风险	$300 < RI \leq 600$	较强风险	$1 < I_{ER} \leq 3$	轻警
$2 < NPI \leq 3$	中度污染	$160 < E \leq 320$	很强风险	$600 < RI \leq 1200$	很强风险	$3 < I_{ER} \leq 5$	中警
$NPI > 3$	重度污染	$E > 320$	极强风险	$RI > 1200$	极强风险	$I_{ER} > 5$	重警

2 结果与分析

2.1 土壤剖面重金属含量分析

从表 3 可见,焉耆县耕地土壤 0—20 cm 土层 As, Cd,Cr,Cu,Mn,Ni,Pb 和 Zn 含量变幅都较大,分别为 2.15~63.87,0.07~0.53,45.81~76.0,24.27~73.12,406.71~535.96,26.18~45.13,1.98~72.06,58.76~

88.06 mg/kg。As,Cd,Cr,Cu,Mn,Ni,Pb 和 Zn 的平均含量分别为 8.47,0.18,54.90,31.03,465.22,36.14,28.76,69.56 mg/kg。土壤中 As,Cd,Cr,Cu,Ni,Pb 和 Zn 的平均值均未超出国家二级标准的限值。土壤中 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 和 Zn 含量的平均值分别超出新疆灌耕土背景值的 1.50,1.39,1.37,2.13,4.14 倍。

表 3 0—20 cm 土层土壤重金属含量统计 (n=22)

元素	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
最小值/(mg·kg ⁻¹)	2.15	0.07	45.81	24.27	406.71	26.18	1.98	58.76
最大值/(mg·kg ⁻¹)	63.87	0.53	76.0	73.12	536.96	45.13	72.06	88.06
平均值/(mg·kg ⁻¹)	8.47	0.18	54.90	31.03	465.22	36.14	28.76	69.56
标准误差/(mg·kg ⁻¹)	16.25	0.04	8.64	13.08	32.16	5.58	23.80	8.11
偏度系数	3.45	0.38	1.37	3.02	0.69	-0.07	0.51	0.39
峰度系数	12.13	-1.08	1.66	9.25	1.34	-1.35	-1.32	-0.45
变异系数	1.92	0.22	0.16	0.42	0.07	0.15	0.83	0.12
新疆灌耕土背景值/(mg·kg ⁻¹) ^[20]	9.09	0.12	39.60	35.80	688.0	26.40	13.50	16.80
国家二级标准/(mg·kg ⁻¹) ^[22]	25.00	0.600	250.00	100.00	—	60.00	350.00	300.00

偏度系数(Skewness)是描述数据分布形态的统计量,峰度系数(Kurtosis)是描述总体中所有取值分布形态陡缓程度的统计量^[17]。研究区 0—20 cm 土层土壤中 As,Cr 和 Cu 的偏度、峰度系数较大,表明这 3 种元素在部分土壤样本 0—20 cm 土层呈现高含量区,处于高积累状况。变异系数(Coefficient of Variation)能反映各样

点重金属含量的平均变异程度,变异系数越大,表明重金属元素含量空间分布越不均匀,存在点源污染的可能性也越大^[17]。研究区 0—20 cm 土层土壤中 As 和 Pb 的变异系数分别为 1.92,0.83,变异比较明显,表明 As 和 Pb 受某些局部污染源的影响比较明显。Cu 的变异系数为 0.42,呈现中等变异,可能人为因素对

土壤中 Cu 积累影响也较大。其他元素的变异系数均小于 0.25,呈现弱变异,表明自然因素对这些重金属元素的影响较明显。

从表 4 可见,研究区 20—40 cm 土层土壤中 As, Cd,Cr,Cu,Mn,Ni,Pb 和 Zn 含量变幅分别为 2.90~32.85,0.09~0.47,45.74~69.40,22.96~47.19, 413.96~548.56,25.38~44.27,0.98~65.85,63.28~208.47 mg/kg,这些元素平均含量分别为 7.87, 0.19,52.31,31.25,472.96,35.11,28.77,81.62 mg/kg。20—40 cm 土层土壤中,除 Mn 没有可比的国家标准值以外,As,Cd,Cr,Cu,Ni,Pb 和 Zn 的平均值均低于国家二级标准(pH 值>7.5)的限值。土

壤中 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 和 Zn 含量的平均值分别超出新疆灌耕土背景值的 1.58,1.32,1.33,2.13,4.86 倍。研究区 20—40 cm 土层土壤 As 和 Zn 偏度、峰度系数较大,表明 As 和 Zn 在部分土壤样本 20—40 cm 土层处于高积累状况。土壤中重金属 As 和 Pb 的变异系数分别为 1.00,0.83,变异比较明显,表明 As 和 Pb 受某些局部污染源的影响比较明显。Zn 的变异系数为 0.48,呈现中等变异,可能人为因素对重金属积累影响也较大。其他元素的变异系数均小于 0.25,呈现弱变异,表明自然因素对这些重金属元素的影响较明显。

表 4 20—40 cm 层土壤重金属含量统计 (n=22)

元素	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
最小值/(mg·kg ⁻¹)	2.90	0.09	45.74	22.96	413.96	25.38	0.98	63.28
最大值/(mg·kg ⁻¹)	32.85	0.47	69.40	47.19	548.56	44.27	65.85	208.47
平均值/(mg·kg ⁻¹)	7.87	0.19	52.31	31.25	472.96	35.11	28.77	81.62
标准误差/(mg·kg ⁻¹)	7.88	0.04	6.75	6.18	41.26	6.07	23.80	38.77
偏度系数	2.91	0.17	0.60	1.14	0.36	-0.05	0.45	2.87
峰度系数	9.10	-1.65	0.46	0.27	-0.38	-1.75	-1.51	9.10
变异系数	1.00	0.21	0.13	0.20	0.09	0.17	0.83	0.48
新疆灌耕土背景值/(mg·kg ⁻¹)	9.09	0.12	39.60	35.80	688.0	26.40	13.50	16.80
国家二级标准/(mg·kg ⁻¹)	25.0	0.60	250.0	100.0	—	60.0	350.0	300.0

从 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤重金属含量特征来看,各层土壤 As,Cd,Cr,Cu,Mn,Ni,Pb 和 Zn 含量的平均值基本相等,表明土壤重金属元素在 0—40 cm 土层中纵向分布规律很均匀。As,Cr 和 Ni 在 0—20 cm 土层的含量略高出 20—40 cm 土层,Cd,Cu,Mn 和 Zn 在 0—20 cm 土层的含量略低于 20—40 cm 土层。0—20 cm 土层土壤中 As,Cr,Cu 和 Pb 的积累较明显,20—40 cm 土层土壤中 As,Cu,Mn 和 Zn 的积累较明显。

2.2 土壤重金属污染的剖面分布特征

从研究区耕地土壤 0—20 cm 和 20—40 cm 土层重金属单项污染指数(P_i)与综合污染指数(NPI)可知(表 5),焉耆县耕地土壤 0—20 cm 土层土壤各重金属元素单项污染指数平均值大小顺序依次为:Zn(4.14)>Pb(2.13)>Cd(1.57)>Cr(1.39)>Ni(1.37)>As(0.93)>Cu(0.87)>Mn(0.68);研究区 20—40 cm 土层土壤各重金属元素单项污染指数平均值大小顺序依次为:Zn(4.86)>Pb(2.13)>Cd

(1.62)>Ni(1.33)>Cr(1.32)>As(0.87)=Cu(0.87)>Mn(0.69)。可以看出,研究区 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤中 Zn 呈现重度污染,Pb 呈现中度污染,Cd,Ni 和 Cr 呈现轻度污染,Cu 和 As 呈现轻微污染,Mn 无污染。研究区 0—20 cm 土层土壤重金属综合污染指数的变化范围介于 0.73~1.92,平均值为 1.56,呈现轻度污染。20—40 cm 土层土壤综合污染指数变化范围介于 0.77~1.89,平均值为 1.61,呈现轻度污染。

从研究区耕地土壤 0—20 cm 和 20—40 cm 土层重金属污染特征来看,各层土壤 As,Cd,Cr,Cu,Mn, Ni,Pb 和 Zn 的单项污染指数与土壤综合污染指数平均值基本相等,表明土壤重金属元素在 0—40 cm 土层中污染情况较均匀。As,Cr 和 Ni 在 0—20 cm 土层的单项污染指数略高出 20—40 cm 土层,Cd,Mn 和 Zn 在 0—20 cm 土层单项污染指数略低于 20—40 cm 土层。0—20 cm 土层土壤综合污染指数略低于 20—40 cm 土层。

表 5 不同土层土壤重金属污染情况

土层/cm	n	P_i								NPI		
		As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	变化范围	平均值	污染等级
0—20	22	0.93	1.57	1.39	0.87	0.68	1.37	2.13	4.14	0.73~1.92	1.56	轻度污染
20—40	22	0.87	1.62	1.32	0.87	0.69	1.33	2.13	4.86	0.77~1.89	1.61	轻度污染

从 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤中各重金属元素不同污染级别样本数占样本总数的比例来看(表 6),各层土壤大部分样本 As 呈现无污染,其中 0—20 cm 和 20—40 cm 土层无污染样本数分别占样本总数 63.64%与 86.36%;各层土壤大部分样本 Cd 呈现轻度污染,其中 0—20 cm 和 20—40 cm 土层轻度污染样本数分别占样本总数 59.08%与 54.55%;Zn 在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层所有样本均呈现重度污染;所有样本中 Cr 在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层均呈现轻度污染;各土层大部分样本 Cu 呈现轻微污染,其中 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤 Cu 呈现轻微污染样本数分别占样本总数 77.27%与 63.64%;各土层大部分样本 Mn 呈现无污染,其中

0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤 Mn 呈现无污染样本数分别占样本总数的 68.18%与 72.73%;Ni 在各土层基本处于轻度污染水平,其中 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤 Ni 呈现轻度污染样本数分别占样本总数的 100%与 86.36%;研究区 0—20 cm 土层土壤 Pb 呈现无污染、轻微、轻度、中度和重度污染的样本数分别占样本总数的 27.27%,4.55%,27.27%,9.09%和 31.82%,20—40 cm 土层土壤 Pb 呈现无污染、轻微、轻度、中度和重度污染的样本数分别占样本总数的 31.82%,4.55%,27.26%,4.55%和 31.82%;各土层土壤所有样本综合污染指数均呈现轻度污染态势,进一步说明 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤重金属污染状况基本相同。

表 6 不同污染级别样本数占总样本数的百分数

土层 污染级别	0—20 cm (n=22)					20—40 cm (n=22)				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
As	63.64	18.17	13.64	4.55	0	86.36	0	9.09	0	4.55
Cd	4.55	9.09	59.08	22.73	4.55	4.55	9.09	54.55	27.26	4.55
Cr	0	0	100	0	0	0	0	100	0	0
Cu	4.55	77.27	18.18	0	0	27.26	63.64	4.55	4.55	0
Mn	68.18	31.82	0	0	0	72.73	27.27	0	0	0
Ni	0	0	100	0	0	0	13.64	86.36	0	0
Pb	27.27	4.55	27.27	9.09	31.82	31.82	4.55	27.26	4.55	31.82
Zn	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100
NPI	31.81	68.19	0	0	0	27.27	72.23	0	0	0

注: I 指无污染, II 轻微污染, III 轻度污染, IV 中度污染, V 重度污染。

2.3 重金属污染生态风险的剖面分布特征

潜在生态风险指数(RI)能反映单个重金属元素的污染水平,也能表达参加评选的所有重金属元素的联合效应^[6]。从计算得到的研究区耕地土壤 0—20 cm 和 20—40 cm 土层重金属单项生态风险指数

(E_i)、综合生态风险指数(RI)与生态风险预警指数(I_{ER})可知(表 7),焉耆县耕地土壤 0—20 cm 和 20—40 cm 土层重金属单项生态风险指数(E_i)平均值大小顺序均为: Cd>As>Ni>Cu>Cr>Pb>Zn。

表 7 不同土层土壤重金属生态风险情况

土层/cm	n	E_i							RI 变化范围	I_{ER}		
		As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn		平均值	变化范围	平均值
0—20	22	3.36	10.13	0.46	1.57	3.01	0.38	0.22	8.62~42.36	18.12	-5.46~-1.65	-4.82
20—40	22	3.19	10.17	0.43	1.54	2.95	0.40	0.26	8.69~42.27	18.19	-5.38~-1.74	-4.73

研究区各土层所有样本 As,Cd,Cr,Cu,Ni,Pb 和 Zn 的潜在生态风险指数均小于 40,呈现轻微生态风险态势。0—20 cm 和 20—40 cm 土层 Cd 的潜在生态风险指数平均值最大,分别为 10.13,10.17,呈现轻微生态风险态势。耕地土壤 0—20 cm 和 20—40 cm 土层所有样本 Cd 及其他元素均呈现为轻微生态风险态势。可以看出,Cd 是研究区耕地土壤最主要的潜在生态风险因子。研究区 0—20 cm 土层土壤重金属综合潜在生态风险指数(RI)的变化范围介于 8.62~42.36,平均值为 18.12,呈现轻微生态风险态

势。20—40 cm 土层土壤综合潜在生态风险指数变化范围介于 8.69~42.27,平均值为 18.19,呈现轻微生态风险态势。所有样本潜在生态风险指数均呈现轻微生态风险态势。
生态风险预警评估源于生态风险评价,它更强调对生态系统可能存在风险的警示研究^[24]。以国家土壤环境质量二级标准作参比值,进行土壤重金属污染生态风险预警评估。分析结果表明,研究区 0—20 cm 土层土壤生态风险预警指数(I_{ER})介于-5.46~-1.65,平均值为-4.82,呈现无警状态。20—40 cm

土层土壤生态风险预警指数介于-5.38~-1.74,平均值为-4.73,呈现无警状态。从研究区耕地土壤 0—20 cm 和 20—40 cm 土层重金属 E_i ,NPI,RI 和 I_{ER} 来看,各层土壤 As,Cd,Cr,Cu,Ni,Pb 和 Zn 的 E_i 平均值大小基本相等,NPI,RI 和 I_{ER} 也基本相等。这表明土壤重金属元素在 0—40 cm 土层生态风险态势基本相同。RI 和 I_{ER} 在 0—20 cm 土层的平均值略

低于 20—40 cm 土层。

2.4 耕地土壤重金属来源解析

多元统计分析法可以用来判别土壤中重金属的来源^[7]。若重金属元素间相关性极显著,则说明元素间可能具有相似的来源途径。利用 SPSS 19.0 分析研究区 0—20 cm 土层耕地土壤中 As,Cd,Cr,Cu,Mn,Ni,Pb 和 Zn 的 Person 相关系数(表 8)。

表 8 0—20 cm 土层土壤重金属元素之间相关系数 (n=22)

元素	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
As	0.51**	-0.20	-0.10	-0.06	0.39*	0.38*	0.16
Cd		-0.47**	-0.13	0.09	0.56**	0.62**	0.08
Cr			0.07	0.14	-0.16	-0.37*	0.10
Cu				0.35*	0.04	-0.13	0.17
Mn					0.47**	0.16	0.12
Ni						0.54**	0.19
Pb							-0.09

注:**表示 $p<0.01$,*表示 $p<0.05$ 。

由表 8 可见,研究区耕地土壤 As-Cd,Cd-Cr-Ni-Pb,Mn-Ni 和 Ni-Pb 之间的 Person 相关系数较高,达到了 0.01 的显著性水平。这表明 0—20 cm 土层耕地土壤中这些元素来源可能相同。As-Ni-Pb,Cr-Pb 和 Cu-Mn 之间的 Person 相关系数也较高,并通过了 0.05 水平的显著性检验。Zn 与其他重金属元

素之间并无很显著的相关性,表明 Zn 可能与其他重金属的来源途径不同。为进一步了解各重金属元素间的相互关系和来源,进行因子分析。因子分析结果表明(表 9),前 3 个主成分特征值大于 1,累计解释了总方差的 74.89%,符合分析要求,对所有指标给出较充分的概括。

表 9 土壤重金属元素因子载荷

主成分	特征值			主成分载荷							
	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
F ₁	2.89	40.86	40.86	0.73	0.86	-0.57	-0.09	0.19	0.80	0.83	0.08
F ₂	1.47	20.15	61.01	-0.17	-0.11	0.45	0.76	0.80	0.21	-0.05	0.19
F ₃	1.02	13.88	74.89	0.15	0.05	0.16	-0.11	-0.20	0.03	-0.15	0.79

第一主成分(F₁)的方差贡献率为 40.86%,As,Cd,Ni 和 Pb 在 F₁ 上具有较大载荷,分别为 0.73,0.86,0.80 与 0.83。0—20 cm 土层土壤中 As,Cd,Ni 和 Pb 平均含量均与新疆灌耕土背景值之间的差异较大。相关研究表明^[25-26],农田土壤 As,Cd 与 Pb 主要来源于农药、杀虫剂和化肥。因此,研究区 0—20 cm 土层 As,Cd,Ni 和 Pb 主要受到人类活动的影响;F₂ 上重金属 Cu,Mn 具有较高的载荷,分别为 0.76 与 0.80。土壤中 Cu 和 Mn 一般主要受土壤地球化学成因的影响,主要为地质来源^[27]。研究区 0—20 cm 土层 Cu 和 Mn 平均含量与新疆灌耕土背景值很接近,故研究区耕地土壤 Cu 与 Mn 主要受到土壤地球化学特征的影响。F₃ 上重金属 Zn 具有较高的载荷,为 0.79。0—20 cm 土层土壤 Zn 平均含量超出新疆灌耕土背景值的 4.14 倍,表明受人为因素的影响较大。于此同时,Cr 在 F₁ 和 F₂ 上均具有较高的载荷,分别为-0.57 与 0.45,这表明 Cr 很可

能受人为污染和自然因素共同控制。综合上述,研究区 0—20 cm 土层土壤中 As,Cd,Ni,Pb 和 Zn 主要受人为因素的影响,Cu 和 Mn 主要受土壤地球化学特征的影响,Cr 受自然因素和人类活动共同影响。

3 结论

新疆焉耆县耕地土壤 0—20 cm 和 20—40 cm 土层重金属元素含量有一定的积累现象。各土层土壤中 Cd,Cr,Ni,Pb 和 Zn 含量的平均值均超出新疆灌耕土背景值。各土层土壤中 Zn 属于重度污染,Pb 属于中度污染,Cd,Ni 和 Cr 属于轻度污染,Cu 和 As 属于轻微污染,Mn 属于无污染。0—20 cm 土层土壤 NPI 平均值为 1.56,20—40 cm 土层土壤 NPI 平均值为 1.61,均呈现轻度污染。0—20 cm 和 20—40 cm 土层 RI 平均值分别为 18.12,18.19,均呈现轻微生态风险态势。0—20 cm 和 20—40 cm 土层 I_{ER} 平均值分别为-4.82 和-4.73,均呈现无警状态。研究区耕地土壤重金属元素污染与生

态风险剖面分布情况整体上基本相同。0—20 cm 土层土壤中 As, Cd, Ni, Pb 和 Zn 主要受人为因素的影响, Cu 和 Mn 主要受土壤地球化学特征的影响, Cr 受自然因素和人类活动共同影响。Cd 是两个土层生态风险等级最高的重金属元素, 对耕地土壤 PLI, RI 和 IER 的贡献较大。农业生产过程中必须要防范耕地土壤 Cd 的污染风险。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Maas S, Scheifler R, Benslama M, et al. Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(6): 2294-2301.
- [3] 全致琦, 陈太政, 段海静, 等. 不同耕作方式对路旁土壤重金属分布的影响: 以黄淮平原国道 310 开封段为例[J]. 地理科学, 2014, 34(3): 377-384.
- [4] 张连科, 李艳伟, 李玉梅, 等. 包头市铜厂周边土壤中重金属垂直分布特征与形态分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 354-358.
- [5] 赵璇, 李新生, 赵佐平, 等. 陕南茶区土壤重金属含量评价分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 287-290.
- [6] 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.
- [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.
- [8] 马芊红, 张光辉, 耿韧, 等. 我国水蚀区坡耕地土壤重金属空间分布及其污染评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 112-118.
- [9] 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.
- [10] Sterckeman T, Douay F, Proix N, et al. Vertical distribution of Cd, Pb and Zn in soils near smelters in the north of France[J]. Environmental Pollution, 2000, 107(3): 377-389.
- [11] 李融. 闽西中堡银多金属矿区周边农田土壤剖面重金属分布及其评价[J]. 中国农学通报, 2015, 31(31): 237-241.
- [12] 刘洪莲, 李恋卿, 潘根兴. 苏南某些水稻土中 Cu, Pb, Hg, As 的剖面分布及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1221-1227.
- [13] Wang Q R, Dong Y, Cui Y, et al. Instances of soil and crop heavy metal contamination in China[J]. Soil Sediment Contamination, 2001, 10(5): 497-510.
- [14] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 692-703.
- [15] 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.
- [16] Wu Gang, Kang Hubiao, Zhang Xiaoyang, 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.
- [17] 麦麦提吐尔逊·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.
- [18] 中华人民共和国农业部. 农田土壤环境质量监测技术规范 NY/T395—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [19] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范 HJ/T166—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [20] 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.
- [21] Nemerow N L. Stream, lake, estuary, and ocean pollution[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Publishing Co., 1985.
- [22] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 土壤环境质量标准 GB15618—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [24] 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.
- [25] Zulpiya M, Hamid Y, Ruozi A, 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.
- [26] 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: 267-277.
- [27] 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(3/4): 289-300.