

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20170522001

麦麦提吐尔逊·艾则孜, 艾尼瓦尔·买买提, 阿吉古丽·马木提, 等. 新疆焉耆盆地农田土壤重金属污染及健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(2): 171-181

Mamattursun E, Anwar M, Ajigul M, et al. Assessment of heavy metals pollution and its health risk of farmland soils of Yanqi Basin in Xinjiang Province [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(2): 171-181 (in Chinese)

新疆焉耆盆地农田土壤重金属污染及健康风险评价

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

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

收稿日期: 2017-05-22 录用日期: 2017-08-21

摘要: 为研究新疆焉耆盆地绿洲农田土壤重金属的污染及潜在健康风险, 选取 194 个样点采集土壤样品, 测定 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 共 7 种重金属元素含量。利用地质累积指数(I_{geo})评价农田土壤污染水平, 采用 US EPA 健康风险评价模型, 对农田土壤重金属污染的潜在健康风险进行评估。结果表明, 研究区农田土壤 7 种重金属平均含量均未超出《食用农产品产地环境质量评价标准》中的限值, 但 Cd、Cr、Ni、Pb 和 Zn 含量平均值分别超出新疆灌耕土背景值的 1.67、1.41、1.30、3.01 和 6.78 倍。农田土壤中 Zn 呈现轻度污染, Cd 与 Pb 呈现轻微污染, As、Cr、Cu 与 Ni 呈现无污染态势。健康风险评估结果表明, 经手-口摄入是研究区农田土壤重金属日均暴露量及健康风险主要途径。农田土壤 7 种重金属通过 3 种暴露途径的非致癌风险商(HQ)与非致癌风险指数(HI), 单项致癌风险指数(CR)与总致癌风险指数(TCR)均小于安全阈值, 属于可接受风险水平。研究区农田土壤重金属对儿童的非致癌风险低于成人, 致癌风险高于成人。研究区农田土壤中 As 与 Pb 是最主要的非致癌风险因子, As 是最主要的致癌风险因子, 研究区农田土壤中 As 对人体的健康风险应当引起重视。

关键词: 土壤重金属; 农田; 健康风险; 焉耆盆地

文章编号: 1673-5897(2018)2-171-11 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Farmland Soils of Yanqi Basin in Xinjiang Province

Mamattursun Eziz^{1,*}, Anwar Mohammad², Ajigul Mamut¹, Mattohti Anayit¹

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

Received 22 May 2017 accepted 21 August 2017

Abstract: With the purpose of the heavy metal contamination and its health risk assessment of farmland soils in Yanqi Basin, Xinjiang, the contents of seven heavy metal elements (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) collected from 194 soil sampling sites were determined by standard methods. The contamination level of heavy metals of farmland soils were analyzed based on Geo-accumulation Index (I_{geo}), and the risks to human health was assessed using the US EPA Health Risk Assessment Model. Results indicated that, the average contents of seven metal elements did

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

作者简介: 麦麦提吐尔逊·艾则孜(1981-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为干旱区绿洲土壤环境安全研究, E-mail: oasiseco@126.com

not exceed the Chinese Farmland Environmental Quality Evaluation Standards for Edible Agricultural Products, but the average contents of Cd, Cr, Ni, Pb and Zn exceeded by 1.67, 1.41, 1.30, 3.01 and 6.78 times of the background values for irrigation soils in Xinjiang, respectively. The average contents of Zn in farmland soils fell into light contamination level while Cd and Pb fell into slight contamination level, and As, Cr, Cu and Ni fell into no contamination level. The results of EPA health risk assessment indicated that the hand-mouth ingest intake were the dominant pathway of the average daily exposure and health risks for both adults and children. The non-carcinogenic risk quotient (HQ) and non-carcinogenic risk index (HI), individual carcinogenic health risk index (CR) and total carcinogenic health risk index (TCR) calculated by three exposure pathways of seven metal elements were lower than their threshold values, which range within the limits of the acceptable risk level. The non-carcinogenic risks of heavy metals in farmland soils for children were lower than for adults, whereas the carcinogenic risks for children were higher than for adults. As and Pb were the main non-carcinogenic risk factors and As was the main carcinogenic risk factor. Great attentions should be paid to the contamination risks of As in farmland soils of the study area.

Keywords: soil heavy metals; farmland; health risk assessment; Yanqi Basin

农田土壤重金属污染直接影响到农产品质量安全以及人体健康^[1-2]。重金属作为一种潜在有毒污染物,由于具有严重的污染后果与复杂的环境效应,不仅影响土壤环境安全,而且通过直接接触、地面扬尘吸入和手口摄入等途径进入人体,产生健康危害^[3-5]。农田土壤中重金属元素以土壤作为媒介,在农作物中累积,通过不同途径直接危害人体健康^[6-7]。土壤重金属污染的健康风险评价作为环境科学重要研究领域之一,把土壤环境污染与人体健康联系起来,描述土壤重金属污染对人类产生健康危害的风险,为确定优先控制污染元素与潜在健康风险管理提供科学依据^[8-10]。

近年来,我国学者对我国工业化程度与经济发展水平较高的区域农田土壤重金属污染的健康风险评估方面开展了研究工作^[11-14],并取得了一定的研究成果,但关于我国工业化程度与经济发展水平较落后的新疆干旱区相关研究极少。随着西部大开发政策与丝绸之路经济带的提出以及我国东部沿海地区产业向新疆转移,新疆绿洲农田土壤重金属污染对新疆绿洲居民所带来的健康危害越来越受关注^[15]。虽然也有一些学者对新疆煤炭产业区土壤^[16]、大气降尘^[17]中重金属污染的健康风险方面进行了研究,但关于新疆绿洲农田土壤重金属污染的健康风险方面未见报道,开展绿洲农田土壤健康风险评估的需求迫切。

本研究以新疆加工辣椒、番茄主产区——焉耆盆地作为研究区,以绿洲农田土壤重金属污染的健康风险为研究对象,采用地质累积指数与US EPA健康风险评估模型,对焉耆盆地农田土壤中重金属污

染与潜在健康风险进行评估,以此来讨论新疆绿洲现代农业化强度不断提高的背景下,农田土壤重金属污染对当地居民造成的健康风险,以期为绿洲农田土壤环境风险管理提供科学依据。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区概况

焉耆盆地(86°54'~87°29' E, 41°52'~42°22' N)是天山主脉与支脉之间复杂地貌形态的中生代断陷山间盆地,位于新疆塔克拉玛干沙漠东北部(图1)。

焉耆盆地绿洲总面积278 045 hm²,在行政区划上包括新疆维吾尔自治区焉耆、博湖、和硕与和静县。研究区气候属于暖温带大陆性干旱荒漠气候,海拔1 050~1 800 m,多年平均降水量68.1 mm,多年平均蒸发量2 366 mm,多年平均气温8.63 ℃。研究区土壤类型主要为灌耕棕漠土、灌耕草甸土、灌耕沼泽土、灌耕石质土、灌耕风沙土和盐土等土壤类型。农作物主要以辣椒、棉花、番茄、小麦、玉米、向日葵等为主,是我国加工辣椒和加工番茄的重要产地^[15]。近年来引入了建材、冶金等重点企业,绿洲城市化、工业化程度不断提高,逐渐成为新疆绿洲经济发展的核心示范区^[15]。

1.2 样品采集与测定

2016年5—8月在研究区进行表层(0~20 cm)农田土壤样品采样,总采集194个样品。测定方法参考了《土壤农化分析》^[18]与《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)^[19]。土壤样品中As含量用PERSEE原子荧光光度计(PF-7)测定,其他元素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,取平均值作为样品的

最终含量。测试过程中加入标准土壤参比物质(GSS-12)进行质量控制,各重金属的回收率均在允许范围内。

1.3 地质累积指数法

采用德国科学家 Müller^[20]在 1969 年提出的地质累积指数法评价农田土壤重金属污染程度。地质累积指数(I_{geo})计算式如下^[20]:

$$I_{geo} = \log_2(C_i/1.5B_i)$$
 (1)

式中, C_i 为重金属的测定含量, B_i 为土壤背景值,1.5 是由于成岩影响而产生的背景系数矩阵校正因子。地质累积指数污染级别分级标准如表 1。

1.4 潜在人体健康风险评价模型

1.4.1 模型与参数选择

土壤中重金属可通过手-口直接摄入、皮肤接触与呼吸系统等 3 种暴露途径进入人体,长期累积后对人体健康造成危害^[21]。采用 US EPA 健康风险评价模型^[22],对研究区农田土壤中 7 种重金属元素 3

种暴露途径对儿童和成人的日平均暴露量进行计算,计算公式如下:

手-口途径摄入日均暴露量 CDI_{ingest} ,单位为 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ 。

$$CDI_{ingest} = \frac{C_{soil} \times IngR \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT}$$
 (2)

呼吸途径摄入日均暴露量 CDI_{inhale} ,单位为 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ 。

$$CDI_{inhale} = \frac{C_{soil} \times InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$
 (3)

皮肤接触途径摄入日均暴露量 CDI_{dermal} ,单位为 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ 。

$$CDI_{dermal} = \frac{C_{soil} \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT}$$
 (4)

总日均暴露量 CDI_{total} ,单位为 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ 。

$$CDI_{total} = CDI_{ingest} + CDI_{inhale} + CDI_{dermal}$$
 (5)

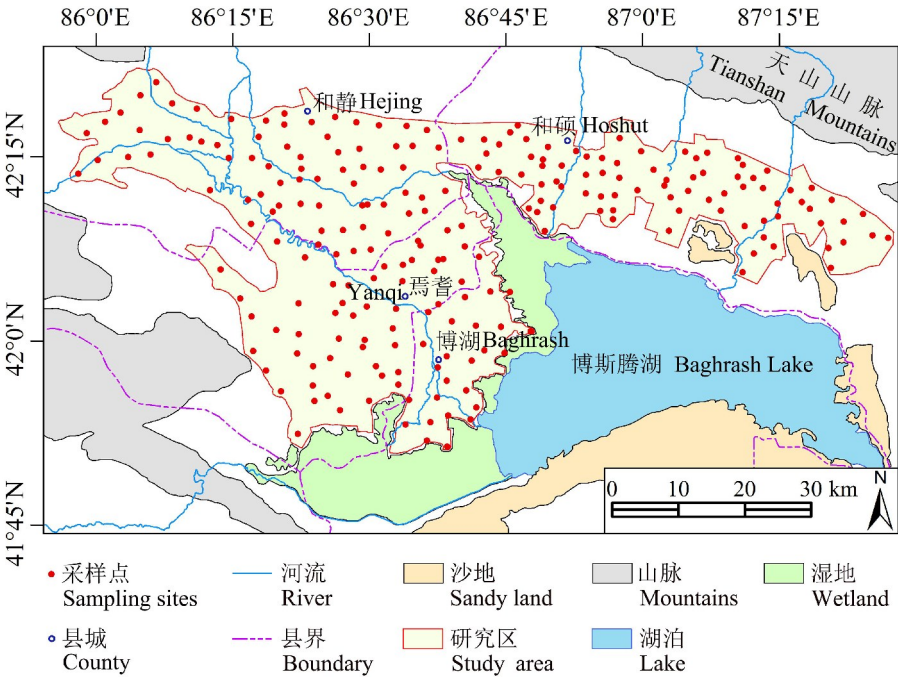


图 1 研究区位置及采样点分布图
Fig. 1 Sketch map of the study area and sampling sites

表 1 地质累积指数 (I_{geo}) 污染等级划分
Table 1 The grade of pollution degree of I_{geo}

I_{geo}	≤ 0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
污染分级	清洁	轻微	轻度	中度	重度	严重	极严重
Pollution level	Clean	Slight	Light	Moderate	Serious	Very serious	Severe

式(2)~(5)中, C_{soil} 为土壤重金属元素的实测浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), IngR 表示土壤的经手-口摄入频率($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$), CF 表示转换系数($\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$), EF 表示暴露频率($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$), BW 表示体重(kg), InhR 表示呼吸频率($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), PEF 为灰尘排放因子($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), SA 表示暴露皮肤表面积(m^2), SL 表示土壤对皮肤的黏附系数 [$\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], ABS 表示皮肤吸收因子(无量纲); ED 表示暴露期(a), AT_{nc} 和 AT_{ca} 分别代表重金属非致癌和致癌平均暴露时间(d)。根据 US EPA 暴露因子手册^[23]、Superfund 风险评价导则^[24-25] 以及农田土壤重金属污染的健康风险相关研究资料^[8, 11, 13, 26] 确定的本研究暴露评价参数见表 2。

1.4.2 人体的健康风险表征

土壤中污染物进入人体后所引起的健康风险评价模型包括致癌风险模型和非致癌风险模型^[21]。本研究中的 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等 7 种重金属对人体都具有健康风险, 因此对 7 种重金属元素都进行非致癌风险评估。由于 US EPA 只给出了 As 与 Cd 的致癌斜率(SF)值, 故本文只对 As 与 Cd 进行致癌风险评估, 讨论研究区附近或与研究区有接触的儿童和成人的健康风险表征。潜在非致癌风险用非致癌风险商(HQ)和非致癌风险指数(HI)来表示, 其计算公式为:

$$\text{HQ} = \frac{\text{CDI}}{\text{RfD}} \quad (6)$$

表 2 土壤重金属健康风险评价参数

Table 2 The parameter for health risk assessment of soil heavy metals

	IngR $/(\text{mg} \cdot \text{d}^{-1})$	InhR $/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	CF $/(\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1})$	EF $/(\text{d} \cdot \text{a}^{-1})$	ED $/\text{a}$	SA $/\text{m}^2$	AF $/(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$	ABS	PEF $/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	BW $/\text{kg}$	AT_{nc} $/\text{d}$	AT_{ca} $/\text{d}$
成人 Adults	100	20	10^{-6}	350	24	0.153	0.49	0.001	1.36×10^9	56.8	$\text{ED} \times 365$	70×365
儿童 Children	200	7.65	10^{-6}	350	6	0.086	0.65	0.001	1.36×10^9	15.9	$\text{ED} \times 365$	70×365

表 3 重金属不同暴露途径的参考剂量(RfD)和斜率因子(SF)

Table 3 References dose (RfD) for non-carcinogen metals and slope factors (SF) for carcinogen metals

元素 Elements	RfD/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$			SF/ $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$		
	手-口途径	呼吸途径	皮肤接触途径	手-口途径	呼吸途径	皮肤接触途径
	Ingest	Inhale	Dermal	Ingest	Inhale	Dermal
As	0.0003	0.300	0.000123	1.5	15.1	3.66
Cd	0.001	0.001	0.00001	6.1	6.3	—
Cr	0.003	0.0000286	0.003	—	—	—
Cu	0.040	0.040	0.012	—	—	—
Ni	0.02	0.0206	0.00540	—	—	—
Pb	0.0035	0.00352	0.000525	—	—	—
Zn	0.300	0.300	0.060	—	—	—

$$\text{HI} = \sum \text{HQ} = \text{HQ}_{\text{ingest}} + \text{HQ}_{\text{inhale}} + \text{HQ}_{\text{dermal}} \quad (7)$$

式中, CDI 为非致癌重金属元素的日均暴露量, RfD 为非致癌重金属不同暴露途径的参考剂量。当 HQ 或 $\text{HI} < 1$ 时, 表示农田土壤重金属元素产生的非致癌健康风险可以忽略; 当 HQ 或 $\text{HI} > 1$ 时, 表示存在非致癌健康风险。

潜在致癌风险用致癌风险商(CR)与致癌风险指数(TCR)来表示, 其计算公式为:

$$\text{CR} = \text{CDI} \times \text{SF} \quad (8)$$

$$\text{TCR} = \sum \text{CR} = \text{CR}_{\text{ingest}} + \text{CR}_{\text{inhale}} + \text{CR}_{\text{dermal}} \quad (9)$$

式中, CDI 为致癌重金属元素的日均暴露量, SF 为重金属在某种暴露途径的致癌风险斜率系数。CR 或 TCR 在 10^{-4} 为最大可接受风险水平, 其 $\leq 10^{-6}$ 为可忽略致癌风险水平。据 US EPA 综合危险信息系统(IRIS)中信息和相关资料^[2] 和相关研究^[8, 11, 14], 各种暴露途径的 RfD 和 SF 见表 3。

2 结果(Results)

2.1 农田土壤重金属含量统计分析

表 4 可知, 焉耆盆地绿洲农田土壤 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量变幅都较大, 分别为 0.52 ~ 28.87、0.05 ~ 0.69、33.68 ~ 123.39、19.45 ~ 73.12、19.45 ~ 55.97、1.01 ~ 96.36 和 38.99 ~ 911.98 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这 7 种元素平均含量分别为 6.0、0.20、55.91、30.63、34.34、40.70 和 113.84 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。研究区农田土壤中

所有元素含量平均值均未超出《食用农产品产地环境质量评价标准(HJ 332—2006)》^[27]中的限值。但 1.55% 样本中的 As 含量,0.52% 样本中的 Cd 含量,35.05% 样本中的 Pb 含量以及 6.19% 样本中的 Zn 含量超出了《食用农产品产地环境质量评价标准中的限值》。As 与 Cu 含量的平均值未超出新疆灌耕土背景值^[28],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 1.67、1.41、1.30、3.01 和 6.78 倍。研究区农田土壤中 As、Pb 和 Zn 的变异系数(CV)分别为 1.03、0.58、1.24,均大于 0.5,变异比较明显,表明 As、Pb 和 Zn 可能受某些局部污染源的影响。

2.2 农田土壤重金属污染评价

从 7 种重金属的平均地质累积指数(I_{geo})来看(表 5),在 194 个样本中所测重金属的平均污染级别从高到低依次为:Zn、Pb、Cd、Cr、Ni、Cu、As。重金属 Zn(1.79)的 I_{geo} 平均值表现为轻度污染,Cd(0.09)和 Pb(0.62)的 I_{geo} 平均值表现为轻微污染,As、Cr、Cu 与 Ni 平均值表现为无污染态势。从 7 种重金属元素最大累积指数的情况来看,As、Cd 与 Cr 的最大累积指数介于 1~2 之间,达到了轻度污染水平,Cu 与 Ni 的最大累积系数指数介于 0~1 之间,达到了轻微污染水平,Pb 的最大累积指数为 2.25,达到了中度污染水平,Zn 的最大累积指数为 5.18,达到了极严重

污染水平。Zn 的最小累积指数表现为轻微污染,其它 6 种元素最小累积指数表现为无污染态势。

从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,大部分样本 As 的累积指数属于无污染,As 无污染样本数占样本总数的 94.33%。Cd 样本中无污染、轻微污染和轻度污染样本数分别占样本总数的 33.51%、65.46% 和 1.03%。Cr 样本中无污染、轻微污染和轻度污染样本数分别占样本总数的 70.62%、28.86% 和 0.52%。Cu 与 Ni 样本中无污染样本的比例较大,分别占样本总数的 98.97% 与 77.23%。Pb 样本中无污染、轻微、轻度和中度污染样本数分别占样本总数的 21.65%、32.47%、40.21% 与 5.67%。Zn 的污染水平表现出很强的区域性,其轻微、轻度、中度、重度、严重和极严重污染样本数分别占样本总数的 2.58%、78.87%、10.82%、3.09%、2.58% 和 2.06%。

2.3 非致癌风险评估

根据 US EPA 健康风险评价方法的参数及重金属元素实测含量计算得到了焉耆盆地农田土壤 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 与 Zn 等元素通过不同暴露途径对成人和儿童的非致癌风险暴露剂量(表 6)。从农田土壤 7 种元素日均非致癌暴露量来看,土壤中 Zn 对成人和儿童的总日均非致癌暴露量(CDI_{total})分别

表 4 研究区农田土壤重金属含量及污染水平

Table 4 Concentrations and pollution level of heavy metals in farmland soils of the study area

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
最小值 Min/(mg·kg ⁻¹)	0.52	0.05	33.68	19.45	19.45	1.01	38.99
最大值 Max/(mg·kg ⁻¹)	28.87	0.69	123.39	73.12	55.97	96.36	911.98
平均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)	6.0	0.20	55.91	30.63	34.34	40.70	113.84
标准差 St.D/(mg·kg ⁻¹)	4.17	0.07	11.66	6.41	6.78	24.08	141.46
变异系数 CV	0.70	0.35	0.21	0.21	0.20	0.59	1.24
新疆灌耕土背景值/(mg·kg ⁻¹)	9.09	0.12	39.60	35.80	26.40	13.50	16.80
Background value of irrigation soil in Xinjiang/(mg·kg ⁻¹)							
食用农产品产地环境质量评价标准/(mg·kg ⁻¹)	20	0.40	250	100	60	50	300
Farmland environmental quality evaluation standards for edible products/(mg·kg ⁻¹)							

表 5 研究区农田土壤重金属 I_{geo} 及污染水平

Table 5 I_{geo} and pollution level of heavy metals in farmland soils of the study area

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
最小值 Min	-4.7	-1.85	-0.82	-1.47	-1.03	-4.35	0.63
最大值 Max	1.08	1.94	1.05	0.45	0.5	2.25	5.18
平均值 Mean	-1.47	0.09	-0.11	-0.84	-0.23	0.62	1.79
污染级别 Pollution level	清洁 Clean	轻微 Slight	清洁 Clean	清洁 Clean	清洁 Clean	轻微 Slight	轻度 Light

为 $3.36 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $4.39 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 其总日均非致癌暴露量最高; 而 Cd 对成人和儿童的总日均非致癌暴露量分别为 $6.07 \times 10^{-7} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $7.88 \times 10^{-7} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 其总日均非致癌暴露量最低。农田土壤中 7 种重金属通过 3 种途径的总日均非致癌暴露量从大到小依次为: Zn、Cr、Pb、Ni、Cu、As、Cd。总体而言, 农田土壤 7 种重金属对儿童的总日均非致癌暴露量均高于对成人的总日均非致癌暴露量。从暴露途径来看, 不论对于成人还是儿童, 通过手-口摄入农田土壤重金属均为该区域农田土壤中重金属最主要的暴露途径, 其次为皮肤接触途径, 通过呼吸途径对人体健康危害作用最小。农田土壤中 7 种重金属元素通过手-口途径对儿童的暴露量均大于对成人的暴露量, 通过呼吸与皮肤接触途径对儿童的暴露量均小于对成人的暴露量。

在日均暴露量分析的基础上, 根据式(6)和(7), 得到研究区农田土壤重金属的非致癌风险商(HQ)和非致癌风险指数(HI)(表 7)。

从表 7 可知, 焉耆盆地农田土壤中 7 种重金属

在 3 种暴露途径下成人的非致癌风险商(HQ)从大到小依次为: HQ_{Pb} 、 HQ_{As} 、 HQ_{Cr} 、 HQ_{Cd} 、 HQ_{Ni} 、 HQ_{Cu} 与 HQ_{Zn} ; 儿童的非致癌风险商(HQ)从大到小依次为: HQ_{As} 、 HQ_{Pb} 、 HQ_{Cr} 、 HQ_{Cd} 、 HQ_{Ni} 、 HQ_{Cu} 与 HQ_{Zn} 。对成人来说, 农田土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 与 Zn 的 HQ 对非致癌风险指数(HI)的贡献率分别为 30.45%、8.34%、17.71%、1.44%、3.50%、37.58% 和 0.97%。对儿童来说, 农田土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 与 Zn 的 HQ 对 HI 的贡献率分别为 32.69%、5.76%、23.33%、1.44%、3.40%、32.36% 和 0.89%。可以看出, 研究区农田土壤重金属元素导致的非致癌健康风险主要由重金属 As、Cr 与 Pb 不同暴露途径所贡献。在 3 种暴露途径非致癌风险中, 皮肤接触途径非致癌风险($\text{HQ}_{\text{dermal}}$)最高, 其次为手-口摄入途径非致癌风险($\text{HQ}_{\text{ingest}}$), 呼吸途径非致癌风险(HQ_{inhal})最小。农田土壤中 7 种重金属元素通过手-口途径对儿童的非致癌健康风险均大于对成人的暴露量, 通过呼吸与皮肤接触途径对儿童的非致癌健康风险均小于对成人的暴露量。总的来看, 焉耆盆

表 6 研究区农田土壤重金属非致癌风险日均暴露量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)

Table 6 The average daily exposure for non-carcinogenic risk of heavy metals in farmland soils of the study area ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)

元素 Elements	$\text{CDI}_{\text{ingest}}$		$\text{CDI}_{\text{inhal}}$		$\text{CDI}_{\text{dermal}}$		$\text{CDI}_{\text{total}}$	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children
As	1.03E-05	1.81E-05	1.49E-09	5.09E-10	7.60E-06	5.06E-06	1.79E-05	2.32E-05
Cd	3.45E-07	6.16E-07	5.07E-11	1.73E-11	2.59E-07	1.72E-07	6.04E-07	7.88E-07
Cr	9.44E-05	1.69E-04	1.39E-08	4.74E-09	7.08E-05	4.71E-05	1.65E-04	2.16E-04
Cu	5.17E-05	9.24E-05	7.60E-09	2.60E-09	3.88E-05	2.58E-05	9.05E-05	1.18E-04
Ni	5.80E-05	1.04E-04	8.54E-09	2.92E-09	4.35E-05	2.89E-05	1.02E-04	1.33E-04
Pb	6.87E-05	1.23E-04	1.01E-08	3.45E-09	5.15E-05	3.43E-05	1.20E-04	1.57E-04
Zn	1.92E-04	3.43E-04	2.83E-08	9.65E-09	1.44E-04	9.59E-05	3.36E-04	4.39E-04

表 7 研究区农田土壤重金属非致癌风险指数

Table 7 The non-carcinogenic risk index of heavy metals in farmland soils of the study area

元素 Elements	$\text{HQ}_{\text{ingest}}$		HQ_{inhal}		$\text{HQ}_{\text{dermal}}$		HQ		HI	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children
As	3.38E-02	6.03E-02	4.97E-09	1.70E-09	6.18E-02	4.11E-02	9.56E-02	1.01E-01		
Cd	3.45E-04	6.16E-04	5.07E-08	1.73E-08	2.59E-02	1.72E-02	2.62E-02	1.78E-02		
Cr	3.15E-02	5.62E-02	4.85E-04	1.66E-04	2.36E-02	1.57E-02	5.56E-02	7.21E-02		
Cu	1.29E-03	2.31E-03	1.90E-07	6.49E-08	3.23E-03	2.15E-03	4.52E-03	4.46E-03	0.314	0.309
Ni	2.90E-03	5.18E-03	4.14E-07	1.41E-07	8.05E-03	5.36E-03	1.10E-02	1.05E-02		
Pb	1.96E-02	3.51E-02	2.87E-06	9.81E-07	9.81E-02	6.53E-02	1.18E-01	1.00E-01		
Zn	6.41E-04	1.14E-03	9.42E-08	3.22E-08	2.40E-03	1.60E-03	3.04E-03	2.74E-03		

地农田土壤中 7 种重金属通过 3 种暴露途径的 HQ 与 HI 均小于 1,风险较小,属于可接受风险水平,重金属对儿童的 HI 略小于成人,表明农田土壤重金属污染对成人的非致癌健康危害更高。农田土壤中重金属 HQ 与 HI 值虽然处于可接受风险水平,但其手-口摄入途径和皮肤接触途径非致癌风险以及 HI 最大值(0.65)已达到了较高的水平,值得引起重视。

根据 194 个采样点检测数据,采用 GIS 技术与地统计法^[29],分析农田土壤中重金属对成人和儿童的非致癌风险指数(HI)的空间分布格局。首先利用 GS+9.0 软件确定空间插值需要的最佳半方差函数理论模型和相关参数,然后利用 ArcGIS 10.3 软件,选择 Kriging 最优内插法,最终生成研究区农田土壤中重金属的 HI 空间分布图(图 2)。从图 2 可见,焉耆盆地绿洲农田土壤重金属对成人和儿童的非致癌风险指数空间分布格局基本一致,并呈现了较明显的区域分异性特征。成人和儿童的非致癌风险指数空间分布上均出现高值区,HI 高值区主要分布于博湖县南部与和静县西部区域,HI 低值区分布于博湖县北部区域。结合样点采集背景分析,HI 高值区的土壤样本中 As 与 Pb 含量相对较高,因此非致癌风险指数较高。

2.4 致癌风险评估

根据 US EPA 健康风险评价方法的参数及重金属元素实测含量,得到了焉耆盆地农田土壤 As 与

Cd 通过不同暴露途径对成人和儿童的日均致癌风险暴露情况(表 8)。

从表 8 可知,焉耆盆地农田土壤中 As 对成人和儿童的总日均致癌暴露量(CDI_{total})分别为 $6.07\times10^{-6}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $7.93\times10^{-6}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$;而 Cd 对成人和儿童的总日均致癌暴露量分别为 $1.18\times10^{-7}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $2.11\times10^{-7}\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,研究区农田土壤 As 与 Cd 对人体日均致癌暴露量相差 1 个数量级,既农田土壤中 As 通过 3 种途径的致癌风险暴露量均比 Cd 高。农田土壤中 As 与 Cd 的 3 种途径对儿童日均致癌暴露量均高于对成人的日均致癌暴露量,土壤中 As 与 Cd 对儿童的致癌健康风险危害更大。从暴露途径来看,不论对于成人还是儿童,通过手-口摄入农田土壤中重金属均为该区域农田土壤中重金属最主要的致癌风险暴露途径,其次为皮肤接触途径,通过呼吸途径对人体健康致癌风险最小。

根据式(8)和(9),得到研究区农田土壤中致癌重金属的致癌风险商(CR)与致癌风险指数(TCR)(表 9)。从表 9 可知,焉耆盆地农田土壤中 As 的 CR 大于 Cd 的 CR。对成人来说,农田土壤中 As 和 Cd 的 CR 对 TCR 的贡献率分别为 95.32% 和 4.68%。对儿童来说,As 和 Cd 的 CR 对 TCR 的贡献率分别为 92.41% 和 7.59%。可以看出,研究区 TCR 主要由重金属 As 不同暴露途径所贡献,As 是研究区农田土壤中最主要的致癌风险因子。对儿童来说,在 As 的

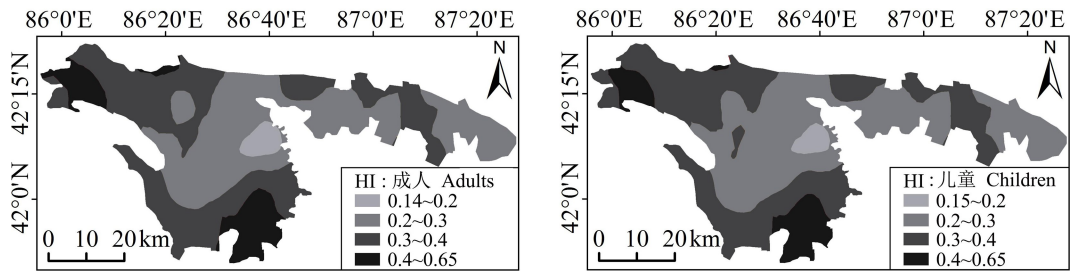


图 2 研究区农田土壤重金属 HI 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of HI of heavy metals in farmland soils of the study area

表 8 研究区农田土壤重金属致癌风险日均暴露量 (mg·kg⁻¹·d⁻¹)

Table 8 The average daily exposure for carcinogenic risk of heavy metals in farmland soils of the study area (mg·kg⁻¹·d⁻¹)

元素 Elements	CDI _{ingest}		CDI _{inhale}		CDI _{dermal}		CDI _{total}	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children
As	3.47E-06	6.20E-06	5.11E-10	1.74E-10	2.60E-06	1.73E-06	6.07E-06	7.93E-06
Cd	1.18E-07	2.11E-07	1.74E-11	5.94E-12	—	—	1.18E-07	2.11E-07

3种暴露途径中,手-口摄入途径致癌风险最高,其次为皮肤接触途径,呼吸途径致癌风险最小。对成人来说,在As的3种暴露途径中,皮肤接触途径致癌风险最高,其次为手-口摄入途径,呼吸途径致癌风险最小。Cd的2种暴露途径中,不论对于成人还是儿童,手-口摄入途径致癌风险高,呼吸途径致癌风险小。总的来看,焉耆盆地农田土壤中As和Cd通过3种暴露途径的CR与TCR均小于 10^{-4} ,属于可接受风险水平,重金属对儿童的致癌风险略高于成人。其中Cd通过2种暴露途径的CR均小于 10^{-6} ,属于可忽略致癌风险水平。As的CR虽然属于可接受风险水平($10^{-6} \sim 10^{-4}$),但其手-口摄入途径和皮肤接触途径CR与TCR最大值(成人 7.18×10^{-5} ,儿童 7.67×10^{-5})已达到了较高的水平,值得引起重视。

从焉耆盆地农田土壤重金属对成人和儿童的致癌风险指数(TCR)空间分布格局来看(图3),研究区农田土壤重金属对成人和儿童的致癌风险指数空间分布格局基本一致,并均出现高风险区。

TCR值较高的区域主要分布于博湖县南部区域,TCR值较低的区域主要分布于博湖县北部与和静县东部区域。结合样点采集背景分析,TCR高风险区的样本中As含量相对较高,这与非致癌风险指数(HI)空间分布规律一致。这些区域农业生产过程中污染物的排放、辣椒加工产业以及交通运输等

可能造成农田土壤中As含量增高,从而导致致癌风险总指数的增加。

3 讨论 (Discussion)

农田土壤中重金属元素通过不同途径进入人体,体内过量蓄积对健康产生危害。本研究检测的7种元素平均含量均未超出《食用农产品产地环境质量评价标准》的限值,表明研究区农田土壤环境质量处于可持续的安全范围之内。由于焉耆盆地是我国加工辣椒与加工番茄主产区,考虑到部分样本中As、Cd、Pb和Zn含量超出了《食用农产品产地环境质量评价标准》的限值,农田土壤中As、Cd、Pb和Zn这4种重金属污染应当引起足够的重视。重金属元素的富集程度越高,其受到人为污染的可能性越大。研究区农田土壤中As、Pb与Zn的主要来源为农药、化肥、除草剂和杀虫剂等人类活动^[30],农用的土壤中Cd可作为施用农药、化肥和有机肥等农业活动的标识元素之一^[31],绿洲灌耕土对Pb的吸附能力很大^[32]。结合采样点实际情况,Cd、Pb、Zn含量较高的采样点主要分布于研究区内人口密集的城镇周边的农田和交通主干道周边的农田。可以看出,研究区农田土壤施用的含As、Cd与Zn等重金属元素的化肥和农药,博湖县南部农产品加工产业以及研究区内交通运输状况导致农田土壤重金属积累与污染,从而导致健康风险。

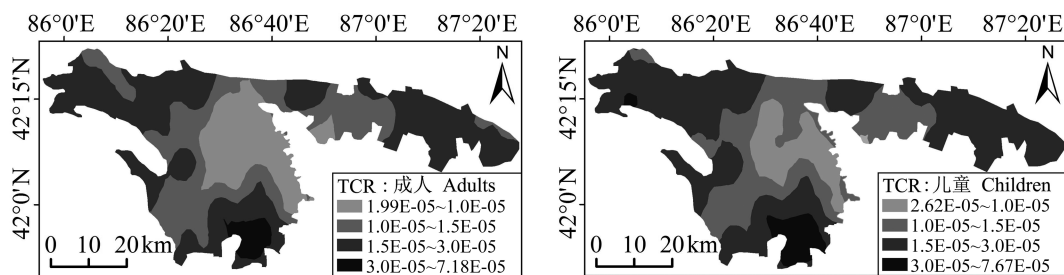


图3 研究区农田土壤重金属TCR空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of TCR of heavy metals in farmland soils of the study area

表9 研究区农田土壤重金属致癌风险指数

Table 9 The carcinogenic risk index of heavy metals in farmland soils of the study area

元素 Elements	CR _{ingest}		CR _{inhal}		CR _{dermal}		CR		TCR	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children
As	5.21E-06	9.31E-06	7.71E-09	2.63E-09	9.53E-06	6.35E-06	1.47E-05	1.57E-05	1.54E-05	1.70E-05
Cd	7.21E-07	1.29E-06	1.10E-10	3.74E-11	—	—	7.21E-07	1.29E-06	—	—

虽然焉耆盆地农田土壤重金属含量未超出安全极限,但手-口摄入途径和皮肤接触途径非致癌、致癌风险已达到了较高的水平。其中 As、Cr 与 Pb 引起的非致癌风险(对 HI 的贡献率大于 85%)以及 As 引起的致癌风险(对 TCR 的贡献率大于 92%)值得重视。研究区 As 与 Cd 对儿童的致癌风险高于成人。由于食物摄入是土壤中重金属进入人体产生健康风险最直接的途径^[33],当地农产品的食用可能对儿童造成较高的致癌健康风险,应给予更多的关注。由于农产品质量与土壤中重金属化学形态与生物有效性有关^[34],对焉耆盆地农田土壤重金属有效态含量与农产品中重金属含量相关性进行研究,可进一步弄清农田土壤重金属污染对农产品质量与人体健康的影响程度。

土壤重金属污染的人体健康风险评估是土壤环境中有毒化学物质及其各种暴露途径分析的有效方法^[35]。特殊环境背景下,重金属元素对人体的危害程度主要受到各环境介质中重金属元素含量以及人体摄入量大小等许多因素的影响。近年来,虽然国内学者采用 US EPA 健康风险模型、蒙特卡洛(Monte Carlo)模型^[36]等方法进行中国土壤重金属污染的健康风险评估,但由于研究起步晚,在评价的各环节均存在一定的局限性与不确定性。在重金属日均暴露量研究过程中,污染物的生物有效性不可忽略^[37],直接利用重金属元素全量,而不考虑其生物有效性,在计算潜在健康风险时会出现增加风险的情况。由于针对我国西北干旱区绿洲特殊的土壤环境,缺乏相应的土壤重金属污染暴露量参数,编写适合绿洲实际的环境基准手册,将是干旱区绿洲人体健康风险评估研究的重点。

本研究表明,焉耆盆地农田土壤中 Zn 呈现轻度污染,Cd 与 Pb 呈现轻微污染,As、Cr、Cu 与 Ni 呈现无污染态势。重金属元素的经手-口摄入途径为研究区农田土壤重金属日均暴露量及健康风险主要途径。农田土壤 7 种重金属通过 3 种暴露途径的非致癌风险指数与致癌风险指数均属于可接受风险水平。研究区农田土壤重金属对儿童的非致癌风险低于成人,致癌风险高于成人。As 与 Pb 是焉耆盆地农田土壤产生健康风险的主要污染物,应作为风险决策管理的优先控制对象。

通讯作者简介:麦麦提吐尔逊·艾则孜(1981—),男,地理学(自然地理学)博士,副教授,主要研究方向为干旱区绿洲土

壤环境安全研究。

参考文献(References):

- [1] Asgari K, Cornelis W M. Heavy metal accumulation in soils and grains, and health risks associated with use of treated municipal wastewater in subsurface drip irrigation [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187 (7): 4565-4573
- [2] 佟俊婷, 韦超, 郭华明. 内蒙古自治区河套平原砷中毒高发区作物中砷的检测及健康风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2013, 8(3): 426-434
Tong J T, Wei C, Guo H M. Detection and health risk of arsenic species in crops from arsenic-affected areas of Hetao Plain, Inner Mongolia [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(3): 426-434 (in Chinese)
- [3] Rouhollah K, Maryam M, Vahid K. Contamination level, distribution and health risk assessment of heavy and toxic metallic and metalloid elements in a cultivated mushroom *Pleurotus florida* (Mont.) singer [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 24(5): 1-10
- [4] 莫小荣, 吴烈善, 邓书庭, 等. 某冶炼厂拆迁场地土壤重金属污染健康风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2015, 10 (4): 235-243
Mo X R, Wu L S, Deng S T, et al. Health risk assessment of heavy metal in soil of demolished smelting site [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, 10(4): 235-243 (in Chinese)
- [5] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, et al. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 512-513: 143-153
- [6] 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估[J]. *环境科学*, 2015, 36(8): 2964-2971
Wu Y, Yang J, Zhou X Y, 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 (in Chinese)
- [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 Z F, Fan L D, Chen Y Z, 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 (in Chinese)

- [8] Fairbrother A, Wenstel R, Sappington K, et al. Framework for metals risk assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 68(2): 145-227
- [9] Poggio L, Vrscaj B, Hepperle E, et al. Introducing a method of human health risk evaluation for planning and soil quality management of heavy metal polluted soils [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 88(2-4): 64-72
- [10] 周桑港, 邹海凤, 董娴, 等. 贵阳市冬季 $PM_{2.5}$ 中典型重金属元素的化学形态分析与健康风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2017, 12(1): 277-284
- Zhou S G, Zou H F, Dong X, et al. Chemical speciation of typical heavy metals and health risk assessment in $PM_{2.5}$ during winter in Guiyang City [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12(1): 277-284 (in Chinese)
- [11] 王兰化, 李明明, 张莺, 等. 华北地区某蔬菜基地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. *地球学报*, 2014, 35(2): 191-196
- Wang L H, Li M M, Zhang Y, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil of a vegetable base in north China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2014, 35(2): 191-196 (in Chinese)
- [12] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(9): 2014-2021
- Yang G, Shen F, Zhong G J, et al. Concentration and health risk of heavy metals in crops and soils in a zinc-lead mining area in southwest mountainous regions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9): 2014-2021 (in Chinese)
- [13] Liang Q, Xue Z J, Wang F, et al. Contamination and health risks from heavy metals in cultivated soil in Zhangjiakou City of Hebei Province, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(12): 1-11
- [14] Lei L M, Liang D L, Yu D S, et al. Human health risk assessment of heavy metals in the irrigated area of Jinghui, Shaanxi, China, in terms of wheat flour consumption [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(10): 647-659
- [15] 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: 74-85
- Mamattursun E. Environmental Evolution and Ecological Security in Inner River Basin [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016: 74-85 (in Chinese)
- [16] 刘芳, 塔西甫拉提·特依拜, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 等. 准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征[J]. *环境科学*, 2016, 37(12): 4815-4829
- Liu F, Tashpolat T, Ilyas N, et al. Spatial distribution characteristics of heavy metal pollution and health risk in soil around the coal industrial area of east Junggar Basin [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(12): 4815-4829 (in Chinese)
- [17] 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 等. 新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2016, 37(7): 2453-2461
- Yang C, Tashpolat T, Hou Y J, et al. Assessment of heavy metals pollution and its health risk of atmospheric dust fall from east part of Junggar Basin in Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(7): 2453-2461 (in Chinese)
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 116-151
- Bao S D. Soil Agricultural Chemistry Analysis (Third Edition) [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2011: 116-151 (in Chinese)
- [19] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范 HJ/T 166—2004 [R]. 北京: 国家环境总局, 2004
- State Environmental Protection Administration. Technical specification for soil environmental monitoring HJ/T 166—2004 [R]. Beijing: State Environmental Protection Administration, 2004 (in Chinese)
- [20] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 1969, 2: 108-118
- [21] 吴烈善, 莫小荣, 曾东梅, 等. 废弃铅锌冶炼厂重金属污染场地的健康风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2014, 9(3): 603-608
- Wu L S, Mo X R, Zeng D M, et al. Health risk assessment of heavy metal pollution of abandoned lead-zinc smelting plant [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, 9(3): 603-608 (in Chinese)
- [22] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Exposure Factors Handbook EPA/600/P-95/002 [S]. Washington: Office of Emergency and Remedial Response, 1997: 104-126
- [23] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk Assessment Guidance for Superfund. Human Health Evaluation Manual Part A, vol.1 (EPA/540/1-89/002) [R]. Washington: Office of Emergency and Remedial Response, 1989: 1-100
- [24] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Superfund Public Health Evaluation Manual (EPA/540/1-86/060) [S]. Washington: Office of Emergency and Remedial Response, 1986: 1-52
- [25] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Electronic Code of Federal Regulations, Title 40-Protection of Environment, Part 423d Steam Electric Power Generating Point Source Category. Appendix A to Part 423e 126, Priority Pollutants [R]. Washington: US

- EPA, 2013
- [26] 杨敏, 滕应, 任文杰, 等. 石门雄黄矿周边农田土壤重金属污染及健康风险评估[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1172-1178
- Yang M, Teng Y, Ren W J, et al. Pollution and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil around Shimen Realgar Mine [J]. Soils, 2016, 48(6): 1172-1178 (in Chinese)
- [27] 国家环境保护总局. 食用农产品产地环境质量评价标准 HJ 332—2006 [S]. 北京: 国家环境保护总局, 2006
- State Environmental Protection Administration. Chinese Farmland Environmental Quality Evaluation Standards for Edible Agricultural Products HJ 332—2006 [S]. Beijing: State Environmental Protection Administration, 2006 (in Chinese)
- [28] 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: 20-25
- Zheng G Z. Theory and Practice of Research on Heavy Metal Pollution in Agricultural Soil [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007: 20-25 (in Chinese)
- [29] Yan W B, Mahmood Q, Peng D L, et al. The spatial distribution pattern of heavy metals and risk assessment of moso bamboo forest soil around lead-zinc mine in South-eastern China [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153: 120-130
- [30] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析[J]. 地理学报, 2008, 63(9): 994-1003
- Cai L M, Ma J, Zhou Y Z, et al. Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from Dongguan, Guangdong Province, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(9): 994-1003 (in Chinese)
- [31] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C. The effect of long-term phosphatic fertiliser 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
- [32] 胡小娜, 南忠仁, 王胜利, 等. 干旱区绿洲灌漠土 Cu、Zn 和 Pb 的吸附解吸特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2183-2188
- Hu X N, Nan Z R, Wang S L, et al. Sorption and desorption of copper, zinc and lead in the irrigated desert soil from the oasis in the arid regions, northwest China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(6): 2183-2188 (in Chinese)
- [33] Calabrese E J, Stanek E J, James R C, et al. Soil ingestion: A concern for acute toxicity in children [J]. Environmental Health Perspectives, 1997, 105(12): 1354-1358
- [34] 尹乃毅, 罗飞, 张霖南, 等. 土壤中铜的生物可给性及其对人体的健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(4): 670-677
- Yin N Y, Luo F, Zhang L N, et al. Bioaccessibility of soil copper and its health risk assessment [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, 9(4): 670-677 (in Chinese)
- [35] Ma H W, Hung M L, Chen P C. A systemic health risk assessment for the chromium cycle in Taiwan [J]. Environment International, 2007, 33(2): 206-218
- [36] Li Z Y, Ma Z W, Yua Z W, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2014, 468/469: 843-853
- [37] Luo X S, Ding J, Xu B, et al. Incorporating bioaccessibility into human health risk assessments of heavy metals in urban park soils [J]. Science of the Total Environment, 2012, 424(8): 88-96 ◆