

阿吉古丽·马木提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 开都河下游绿洲农田土壤微量元素污染及潜在健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2142–2149.

Ajigul Mamut, Mamattursun Eziz, Anwar Mohammad, et al. Assessment of trace element pollution of farmland soils in the oases along the lower reaches of the Kaidu River and its potential health risks[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2142–2149.

开都河下游绿洲农田土壤微量元素污染及潜在健康风险评价

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, 迪力夏提·司马义¹

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

摘要: 从新疆开都河下游绿洲农田土壤采集 98 个土壤样品, 测定其中 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量, 利用地累积指数(I_{geo})评价农田土壤污染水平, 采用 US EPA 健康风险评估模型, 对农田土壤微量元素污染的潜在健康风险进行评估。结果表明, 研究区农田土壤中 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。研究区农田土壤中 7 种微量元素在 3 种暴露途径下成人和儿童的潜在非致癌风险商(HQ)从大到小依次为 $HQ_{Pb} > HQ_{As} > HQ_{Cr} > HQ_{Cd} > HQ_{Cu} > HQ_{Ni} > HQ_{Zn}$; HQ 与潜在非致癌风险指数(HI)均小于 1, 属于可接受风险水平, 微量元素对儿童的 HI 略小于成人。As 和 Cd 在 3 种暴露途径下成人和儿童的单项致癌风险指数 CR_{As} 大于 CR_{Cd} 。CR 与总致癌风险指数(TCR)均小于 10^{-4} , 属于可接受风险水平; 微量元素对儿童的潜在致癌风险略高于成人。研究区农田土壤中 As、Cr 与 Pb 是最主要的潜在非致癌风险因子, As 是最主要的潜在致癌风险因子。

关键词: 农田土壤; 微量元素; 健康风险; 绿洲; 开都河

中图分类号: X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)10-2142-08 doi:10.11654/jaes.2018-0055

Assessment of trace element pollution of farmland soils in the oases along the lower reaches of the Kaidu River and its potential health risks

Ajigul Mamut¹, Mamattursun Eziz^{1*}, Anwar Mohammad², Dilshat Ismayil¹

(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: From the oases along the lower reaches of the Kaidu River, 98 farmland soil samples were collected, and their concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn were determined. The contamination level of trace elements of the farmland soils was analyzed based on the Geoaccumulation Index (I_{geo}), and the risk to human health was assessed using the US EPA Health Risk Assessment Model. The results obtained indicated that the average contents of Zn in the farmland soils fell in the light contamination range; Cd and Pb fell in the slight contamination range while As, Cr, Cu, and Ni fell in the no contamination range. The average noncarcinogenic risk quotient (HQ) value for each trace element in the farmland soils, was as follows: $HQ_{Pb} > HQ_{As} > HQ_{Cr} > HQ_{Cd} > HQ_{Cu} > HQ_{Ni} > HQ_{Zn}$. The HQ and noncarcinogenic risk index (HI) were lower than 1, which within the limit of acceptable risk. The HI values of trace elements in the farmland soils were lower for children than for adults. The individual carcinogenic health risk index (CR) of As, via three exposure pathways for both adults and children, was higher than that of Pb. The CR and total carcinogenic health risk index (TCR) values were lower than 10^{-4} , which means that they are within the limit of acceptable risk, and the TCR values of trace elements for children were higher than those for adults. As, Cr, and Pb were the main noncarcinogenic risk factors, whereas As was the main carcinogenic risk factor for farmland soils of the study area.

Keywords: farmland soils; trace elements; health risk assessment; oasis; Kaidu River

收稿日期: 2018-01-09 录用日期: 2018-03-29

作者简介: 阿吉古丽·马木提(1990—), 女, 维吾尔族, 新疆喀什人, 硕士研究生, 从事绿洲土壤环境安全研究。E-mail: AjigulM@126.com

*通信作者: 麦麦提吐尔逊·艾则孜 E-mail: oasiseco@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561073); 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室开放课题(XJDX0909-2013-02)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41561073); The Open Project of Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone(XJDX0909-2013-02)

土壤作为自然环境的一个基本要素,是农作物生长的基础,农业可持续发展的保障。近年来,随着区域经济的快速发展以及人类活动的加剧,各种途径释放的微量元素进入土壤系统,导致土壤污染日益严重^[1-3]。土壤微量元素可以经作物吸收后进入食物链或者通过某种方式进入水和大气中,对人类健康和生物生长造成危害^[2-4]。土壤中的微量元素由于残留时间长、隐蔽性强、毒性大,可通过手-口摄入、呼吸暴露、皮肤黏附等途径进入人体并发生沉积,导致人体机能的功能性障碍和不可逆转性损伤,从而对人体造成危害^[4-7]。

健康风险评价主要是把环境污染与人体健康联系起来,定量地描述环境污染对人体健康产生的危害风险^[8-9]。近年来,国内学者对微量元素污染的人体健康风险进行了大量研究,研究主要侧重于矿区土壤或大气降尘中的微量元素对人类健康的风险评价^[10-15]。也有学者对于干旱区绿洲土壤微量元素污染及其潜在生态风险进行了相关研究^[16-17],但对开都河下游绿洲农田土壤微量元素污染的健康风险评价的研究却鲜见报道。新疆开都河下游绿洲属于典型的干旱区绿洲灌溉农业区,特殊的生态类型决定了该地区农业生态环境的脆弱性^[18]。近年来,随着该绿洲工业化、城市化发展进程的不断加快,绿洲土壤环境受到了微量元素污染威胁,同时威胁居民身体健康^[18]。因此,对该地区农田土壤微量元素污染对人体暴露以及健康风险进行评价具有重要的意义。本研究以开都河下游绿洲为研究区,采用地累积指数与美国环境保护署(US EPA)推荐的健康风险评估模型,对研究区农田土壤中微量元素污染对周边居民3种暴露途径(经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触)进行了潜在健康风险评价,为保护研究区农产品质量安全与人体健康提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

开都河下游绿洲(86°10′~86°48′ E, 41°50′~42°13′ N)位于天山山脉之间的中生代断陷盆地,开都河下游,博斯腾湖西部,总面积71 372 hm²,在行政区划上包括新疆焉耆、和静和博湖县,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地区(图1)。

研究区气候属于温带大陆性干旱气候,降水量少,蒸发量大,太阳辐射强,日照充足。多年平均气温约8.6℃,多年平均降水量约50~80 mm,多年平均蒸

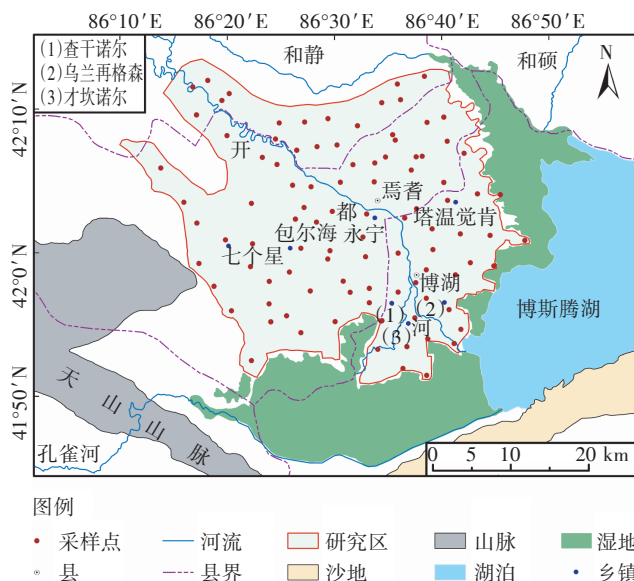


图1 研究区位置及采样点分布图

Figure 1 The location of study area and sampling points

发量约2000~2450 mm,海拔高程1050~1800 m。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、灌耕石质土、灌耕风沙土、盐土等。农作物主要以番茄、辣椒、玉米、小麦为主^[19]。

1.2 土样采集与测定

2016年5月在研究区耕地进行表层(0~20 cm)土壤样品采样,总采集98个土壤样品。采用10 m×10 m内梅花形布设5个子样点,每个子样点采集土壤200 g左右,将其充分混合后装入洁净自封塑料袋内。将采集的土样室温下风干,剔除沙砾及植物残体等杂物后装入纸袋,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。测定土壤样品中As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb与Zn含量。土壤样品采用HNO₃-HCl-HF-HClO₄法电热板加热消解并处理。测定As时,称取通过100目尼龙筛的土壤样品0.2~1.0 g(精确至0.000 2 g)于50 mL具塞比色管中,加少许水润湿样品,加入10 mL(1+1)王水,加塞摇匀于沸水浴中消解2 h,期间摇动几次,取下冷却,用水稀释至刻度,摇匀后放置。吸取一定量的消解试液于50 mL比色管中,加3 mL HCl、5 mL CH₃N₂S、5 mL C₆H₈O₆溶液,用水稀释至刻度,摇匀放置,取上清液待测。测定方法参考《土壤环境监测技术规范》^[20]。As含量用PERSEE原子荧光光度计(PF-7)测定,Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn的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,取平均值作为样品微量元素的最终含量。测试

过程中加入国家标准土壤参比物质(GSS-12)进行质量控制,各微量元素的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。

1.3 地累积指数法

农田土壤微量元素污染水平采用地累积指数^[21]。地累积指数 I_{geo} 的计算公式为:

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

式中: C_i 表示污染物实测值; B_i 是该污染物的地球化学背景值,本研究选用新疆灌耕土背景值^[22];1.5为考虑到造岩运动可能引起背景值波动而设定的常数。 I_{geo} 的污染分级标准为: $I_{geo} \leq 0$ 为无污染, $0 < I_{geo} \leq 1$ 为轻微污染, $1 < I_{geo} \leq 2$ 为轻度污染, $2 < I_{geo} \leq 3$ 为中度污染, $3 < I_{geo} \leq 4$ 为重度污染, $4 < I_{geo} \leq 5$ 为严重污染, $I_{geo} > 5$ 为极严重污染。

1.4 土壤微量元素的健康风险评估法

1.4.1 暴露量计算

健康风险评估是以风险度作为评价指标,把环境污染程度与人体健康联系起来,定量描述污染物对人体产生的健康危害^[23]。采用US EPA健康风险评估模型,对研究区耕地土壤中7种微量元素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:

经手-口途径:

$$ADD_{ing} = \frac{c \times IngR \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT_{nc/ca}} \quad (2)$$

经呼吸途径:

$$ADD_{inh} = \frac{c \times InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT_{nc/ca}} \quad (3)$$

经皮肤接触:

$$ADD_{derm} = \frac{c \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT_{nc/ca}} \quad (4)$$

总日均暴露量 ADD_{total} ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$):

$$ADD_{total} = ADD_{ing} + ADD_{inh} + ADD_{derm} \quad (5)$$

按照US EPA暴露因子手册^[24]、Superfund风险评价导则^[25-26]以及耕地土壤微量元素污染的健康风险相关研究资料^[27],参数物理意义与取值如表1。

1.4.2 健康风险表征

本研究中的As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn 7种微量元素对人体都具有健康风险,其中As和Cd为美国毒物与疾病登记署列入的致癌风险物质^[12,29]。潜在非致癌风险用风险商(HQ)和风险指数(HI)来表征,计算公式为:

$$HQ = ADD_{ij} / RfD_{ij} \quad (6)$$

$$HI = \sum HQ = HQ_{ing} + HQ_{inh} + HQ_{derm} \quad (7)$$

式中: HQ_{ij} 为非致癌元素*i*在第*j*种暴露途径下的单项非致癌风险指数(风险商); ADD_{ij} 为非致癌元素*i*第*j*种暴露途径的暴露量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; RfD_{ij} 为非致癌元素*i*在*j*种暴露途径的参考剂量; HI 为7种微量元素通过3种暴露途径所致的总非致癌风险指数;当 HQ_{ij} 或 $HI < 1$ 时表示非致癌健康风险属于可接受风险水平; HQ_{ij} 或 $HI > 1$ 时表示存在非致癌健康风险,值越大健康风险就越大^[3,12,14]。

潜在致癌风险用风险指数(TCR)来表征,计算公式为:

$$CR_{ij} = ADD_{ij} \times SF_{ij} \quad (8)$$

$$TCR = CR_{ij} \quad (9)$$

式中: CR_{ij} 为致癌元素*i*在第*j*种暴露途径下的单项致癌风险指数; ADD_{ij} 为致癌元素*i*在第*j*种暴露途径的

表1 土壤微量元素健康风险评估参数

Table 1 The parameter for health risk assessment of trace elements in soil

参数 Parameters	物理意义及单位 Physical significance and units	取值 Values		来源 Sources
		成人 Adults	儿童 Children	
$IngR$	土壤的日均摄入量/ $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	100	200	EPA
$InhR$	呼吸频率/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	20	7.65	EPA
CF	转换系数/ $\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$	1×10^{-6}	1×10^{-6}	EPA
EF	暴露频率/ $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	350	350	EPA
ED	暴露持续时间/a	24	6	EPA
SA	暴露皮肤面积/ m^2	0.153	0.086	EPA
SL	土壤对皮肤的黏附系数/ $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	0.49	0.65	EPA
ABS	皮肤吸收因子/无量纲	0.001	0.001	EPA
PEF	灰尘排放因子/ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1.36×10^9	1.36×10^9	EPA
BW	平均体重/kg	56.8	15.9	参考文献[28]
AT_{nc}	平均总的暴露时间/d	$ED \times 365$ (非致癌) 8760	$ED \times 365$ (非致癌) 8760	EPA
AT_{ca}	平均总的暴露时间/d	70×365 (致癌) 25550	70×365 (致癌) 25550	EPA

暴露量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$; SF_{ij} 为致癌元素 i 在 j 种暴露途径的斜率因子, $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{mg}^{-1}$; TCR 为 7 种微量元素通过 3 种暴露途径所致的总致癌风险指数。当 CR_{ij} 或 $TCR < 10^{-6}$, 无致癌风险; $10^{-6} < CR_{ij}$ 或 $TCR < 10^{-4}$, 人体可耐受的致癌风险; CR_{ij} 或 $TCR > 10^{-4}$, 人体不可耐受的致癌风险^[12,14]。 RfD 和 SF 的取值如表 2。

2 结果与讨论

2.1 土壤微量元素含量统计分析

由表 3 可知,开都河下游绿洲农田土壤微量元素 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量分别为 1.35、0.21、52.17、30.61、35.85、45.88 和 $4.36\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。所有元素平均值均未超出《国家土壤环境质量标准》(GB15618—1995)^[30]中的 II 级标准($\text{pH}>7.5$)的限值。土壤 As 和 Cu 含量的平均值未超出新疆灌耕土背景值, Cd、Cr、Ni 和 Pb 含量的平均值分别是新疆灌耕土背景值的 1.75、1.32、1.36 倍和 3.40 倍。农田土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Ni 与 Zn 等元素的偏度和峰度系数较大,表明部分土壤样本呈现高含量区,处于高积累状况。变异系数(CV)能反映各样点微量元素含量的平均变异程度。研究区农田土壤中 As、Cd 与 Pb 的变异系数分别为 0.47、0.38 与 0.55,属于中等变异,表明不

同采样点 As、Cd 与 Pb 的差异较大。

2.2 农田土壤微量元素污染评价

从 7 种微量元素的平均地累积指数(I_{geo})结果来看(表 4),在 98 个样本中所测微量元素的平均污染级别从高到低依次为 $\text{Zn}(1.72)>\text{Pb}(0.72)>\text{Cd}(0.13)>\text{Ni}(-0.15)>\text{Cr}(-0.21)>\text{Cu}(-0.80)>\text{As}(-1.55)$ 。Zn 的 I_{geo} 平均值表现为轻度污染, Cd 和 Pb 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 种微量元素最大累积指数的情况来看, Cr、Cu 与 Ni 的最大累积指数介于 0~1 之间,达到了轻微污染水平, Cd 的最大累积指数介于 1~2 之间,达到了轻度污染水平, As 与 Pb 的最大累积指数介于 2~3 之间,达到了中度污染水平, Zn 的最大累积指数为 5.07,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,其他 6 种元素最小累积指数表现为无污染态势。

从各微量元素不同污染级别样本数占样本总数的比例来看, As 无污染样本数占样本总数的 90.91%; 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 39.78%、57.95% 和 2.27%; Cr、Cu 和 Ni 样本中无污染样本的比例较大,分别占样本总数的 85.23%、97.73% 和 72.73%; 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 21.59%、

表 2 微量元素不同暴露途径的参考剂量(RfD)和斜率因子(SF)

Table 2 References dose (RfD) for non-carcinogen trace elements and slope factors (SF) for carcinogen trace elements

元素 Elements	$RfD/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$			$SF/\text{kg}\cdot\text{d}\cdot\text{mg}^{-1}$		
	经口摄入 Ingest	呼吸吸入 Inhale	皮肤接触 Dermal	经口摄入 Ingest	呼吸吸入 Inhale	皮肤接触 Dermal
As	0.000 3	0.300	0.000 123	1.5	15.1	3.66
Cd	0.001	0.001	0.000 01	0.38	0.38	—
Cr	0.003	0.000 028 6	0.003	—	—	—
Cu	0.040	0.040	0.012	—	—	—
Ni	0.02	0.020 6	0.005 40	—	—	—
Pb	0.003 5	0.003 52	0.000 525	—	—	—
Zn	0.300	0.300	0.060	—	—	—

表 3 研究区农田土壤微量元素含量

Table 3 Contents of trace elements in farmland soils of the study area

元素 Elements	最小值 Min/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 Max/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 Mean/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 St.D/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 CV	背景值 Background value/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	国家标准 National standard/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
As	0.52	3.09	1.35	0.63	0.32	3.74	0.47	9.09	25
Cd	0.11	0.69	0.21	0.08	1.20	4.04	0.38	0.12	0.6
Cr	33.68	87.22	52.17	9.81	1.22	4.92	0.19	39.60	250
Cu	15.91	54.53	30.61	6.01	0.79	4.82	0.20	35.80	100
Ni	19.45	53.25	35.85	5.76	0.23	3.37	0.16	26.40	60
Pb	0.99	88.44	45.88	25.29	-0.30	1.74	0.55	13.50	350
Zn	3.66	5.78	4.36	0.32	1.74	8.41	0.07	16.18	300

注:本研究选用新疆灌耕土背景值和《国家土壤环境质量标准》(GB15618—1995)中的 II 级标准($\text{pH}>7.5$)。

19.32%、56.82%与2.27%;Zn样本中轻微、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3.41%、81.82%、10.23%、2.27%、1.14%和1.14%。

2.3 潜在非致癌风险

按照公式(2)~公式(5)计算得到了开都河下游绿洲农田土壤针对成人和儿童经3种暴露途径的7种微量元素的潜在非致癌风险暴露剂量。结果表明,农田土壤中7种微量元素通过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种微量元素对儿童的总日均非致癌暴露量均高于成人,表明农田土壤微量元素污染对儿童的非致癌健康危害更高。从暴露途径来看,不论成人还是儿童,通过手-口摄入农田土壤微量元素均为该区域农田土壤中微量元素最主要的暴露途径,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种微量元素通过手-口途径对儿童的暴露量均大于成人,通过呼吸与皮肤接触途径对儿童的暴露量均小于成人。

在日均暴露量分析的基础上,根据式(6)和式(7)得到研究区农田土壤微量元素的HQ和HI值(表5)。

从表5可知,研究区农田土壤中7种微量元素在3种暴露途径下成人和儿童的HQ从大到小依次为 $HQ_{Pb}>HQ_{As}>HQ_{Cr}>HQ_{Cd}>HQ_{Cu}>HQ_{Ni}>HQ_{Zn}$;对成人来说,农田土壤中As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb与Zn的HQ对HI的贡献率分别为25.28%、8.78%、16.88%、1.54%、3.79%、

42.84%和0.89%。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27.68%、6.16%、22.58%、1.59%、3.78%、37.37%和0.87%。可以看出,研究区农田土壤中As、Cr与Pb是最主要的潜在非致癌风险因子,研究区农田土壤微量元素导致的潜在非致癌健康风险主要是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,皮肤接触途径潜在非致癌风险最高,其次为手-口摄入途径潜在非致癌风险,呼吸途径潜在非致癌风险最小。微量元素通过手-口途径对儿童的潜在非致癌健康风险均大于成人,通过呼吸与皮肤接触途径对儿童的潜在非致癌健康风险均小于成人。研究区农田土壤中7种微量元素通过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,微量元素对儿童的HI略小于成人。

根据98个采样点检测数据,采用GIS技术与地统计法,分析农田土壤中微量元素对成人和儿童的HI值的空间分布格局,结果见图2。

从图2可见,研究区农田土壤微量元素对成人和儿童的潜在非致癌风险指数空间分布格局基本一致,并呈现出较明显的区域分异性特征。成人和儿童的潜在非致癌风险指数空间分布上均出现高值区,主要位于焉耆县的四十里城子乡和博湖县的乌兰再格森乡,HI较低的区域主要分布于焉耆县的北大渠乡、查汗采开乡、焉耆镇和博湖县的塔温觉肯乡。结合样点

表4 研究区农田土壤微量元素I_{geo}统计

Table 4 Statistics of I_{geo} of trace elements in farmland soils of the study area

元素 Elements	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
最小值 Min	-4.7	-0.71	-0.82	-1.47	-1.03	-4.35	0.63
最大值 Max	2.23	1.94	0.55	0.45	0.43	2.13	5.07
平均值 Mean	-1.55	0.13	-0.21	-0.80	-0.15	0.72	1.72
污染级别 Pollution level	清洁	轻微	清洁	清洁	清洁	轻微	轻度

表5 研究区农田土壤微量元素非致癌风险指数

Table 5 Non-carcinogenic risk index of trace elements in farmland soils of the study area

元素 Elements	HQ _{ing}		HQ _{inh}		HQ _{derm}		HQ		HI	
	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children
As	2.73E-02	4.88E-02	4.02E-09	1.37E-09	5.00E-02	3.33E-02	7.73E-02	8.21E-02	0.306	0.297
Cd	3.52E-04	6.28E-04	5.17E-08	1.77E-08	2.64E-02	1.76E-02	2.68E-02	1.82E-02		
Cr	2.93E-02	5.23E-02	4.52E-04	1.54E-04	2.19E-02	1.46E-02	5.16E-02	6.71E-02		
Ni	1.33E-03	2.38E-03	1.96E-07	6.68E-08	3.32E-03	2.21E-03	4.65E-03	4.59E-03		
Cu	3.06E-03	5.47E-03	4.37E-07	1.49E-07	8.50E-03	5.66E-03	1.16E-02	1.11E-02		
Pb	2.17E-02	3.88E-02	3.20E-06	1.09E-06	1.09E-01	7.23E-02	1.31E-01	1.11E-01		
Zn	5.62E-04	1.00E-03	8.27E-08	2.83E-08	2.11E-03	1.40E-03	2.67E-03	2.40E-03		

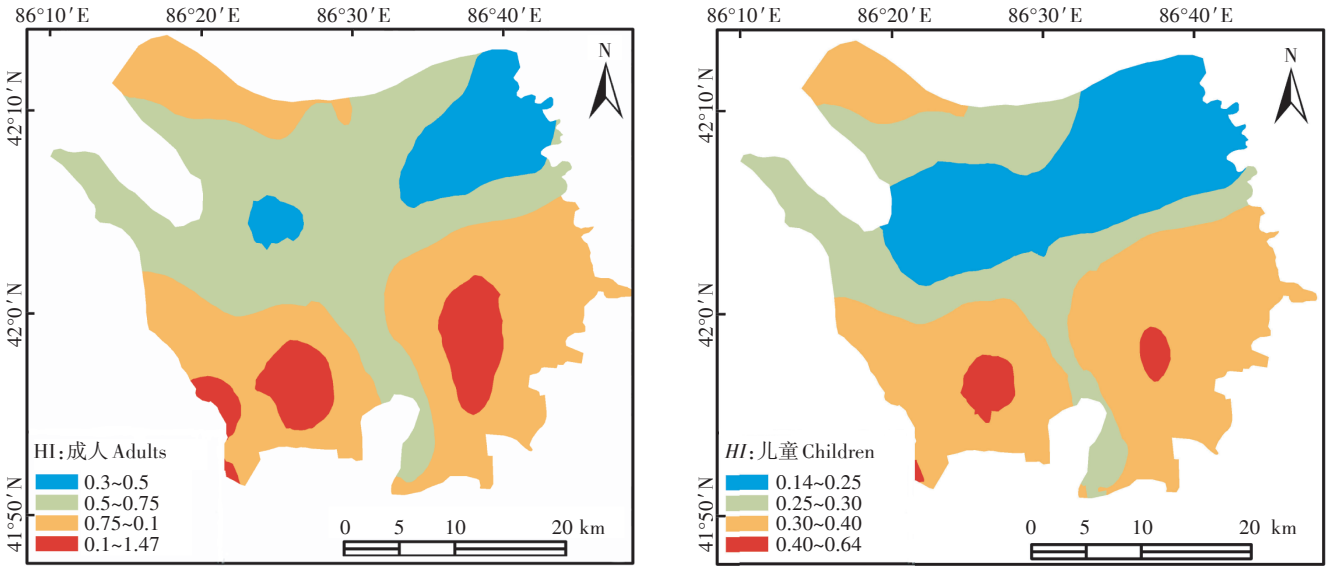


图2 研究区农田土壤微量元素HI空间分布

Figure 2 Spatial distribution of HI of trace elements in farmland soils of the study area

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,这导致这些样本潜在非致癌风险指数也较高。

2.4 潜在致癌风险评估

根据US EPA健康风险评价方法的参数及微量元素实测含量,得到了研究区农田土壤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。结果表明,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种途径的日均致癌暴露量儿童均高于成人,土壤中As与Cd对儿童的潜在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-口摄入农田土壤中微量元素均为该区域农田土壤中微量元素最主要的潜在致癌风险暴露途径,其次为皮肤接触途径,通过呼吸途径对人体潜在健康致癌风险最小。

从表6可知,研究区农田土壤中 CR_{As} 大于 CR_{Cd} 。对成人来说,农田土壤中As和Cd的CR对TCR的贡献率分别为93.78%和6.22%。对儿童来说,As和Cd的CR对TCR的贡献率分别为90.64%和9.36%。可以看出,研究区TCR主要受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,均表现为手-口摄入途径致癌风险高,呼吸途径致癌风险小。总体来看,研究区农田土壤中As和Cd的CR与TCR均小于 10^{-4} ,属于可接受风险水平,As和Cd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。

从开都河下游绿洲农田土壤微量元素对成人和儿童的TCR空间分布格局来看(图3),研究区农田土壤微量元素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焉耆县的27团、40里城子乡和查干诺尔乡,TCR值较低的区域主要分布于焉耆县的北大渠乡、查汗采开乡、七个星镇和博湖县的博湖镇。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

表6 研究区农田土壤微量元素致癌风险指数

Table 6 Carcinogenic risk index of trace elements in farmland soils of the study area											
元素	CR_{ing}		CR_{inh}		CR_{derm}		CR		TCR		
Elements	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children	
As	4.21E-06	7.53E-06	6.24E-09	2.13E-09	7.71E-06	5.13E-06	1.19E-05	1.27E-05	1.27E-05	1.40E-05	
Cd	7.36E-07	1.31E-06	1.12E-10	3.82E-11	—	—	7.36E-07	1.31E-06			

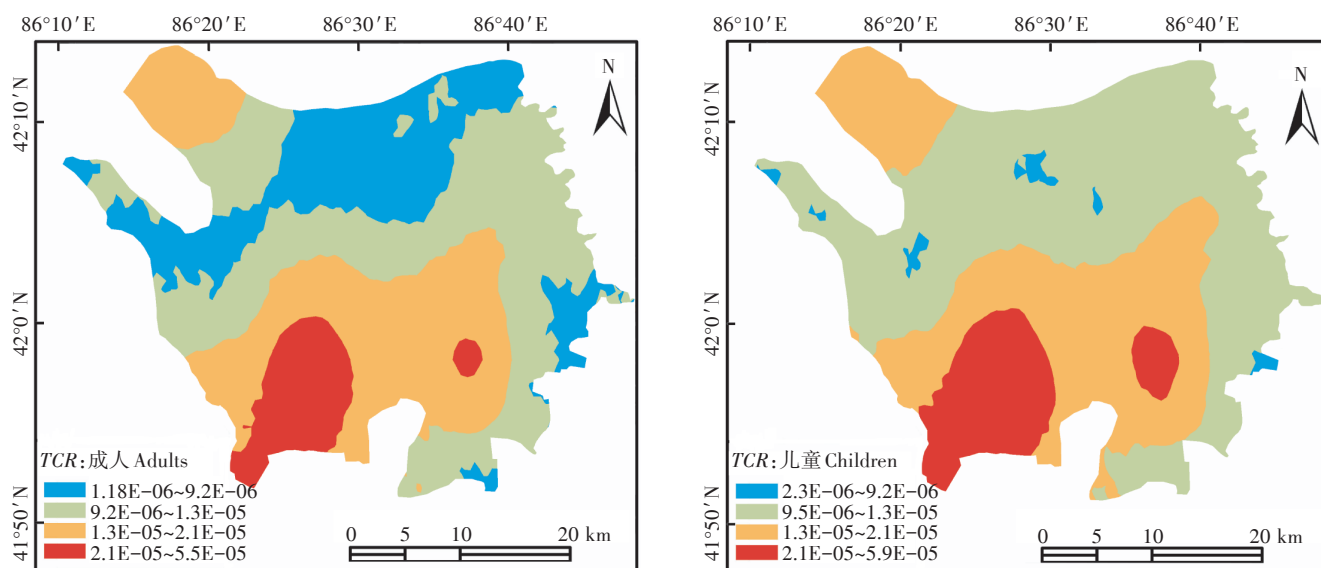


图3 研究区农田土壤微量元素TCR空间分布

Figure 3 Spatial distribution of TCR of trace elements in farmland soils of the study area

运输等可能造成土壤中As含量增高,从而导致致癌风险总指数增加。

3 结论

农田土壤中微量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。开都河下游绿洲农田土壤中检测的7种元素平均含量均未超出《国家土壤环境质量标准》中的Ⅱ级标准的限值,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。但是研究区农田土壤Zn呈现轻度污染,Cd和Pb呈现轻微污染,这些元素的污染风险值得关注。农田土壤中7种微量元素的非致癌风险指数以及As和Cd致癌风险指数均属于可接受风险水平。微量元素对儿童的HI略小于成人,对儿童的TCR略高于成人。As、Cr与Pb是开都河下游绿洲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。

参考文献:

- [1] Asgari K, Cornlis 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] 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.
- [3] 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(5):921-929.
- [4] Rouhollak K, Maryam, 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):4699-4708.
- [5] 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.
- [6] Fairbrother A, Wenstel R, Sappington K, et al. Framework for metals risk assessment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 68(2):145-227.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 周荣港, 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 Shen-gang, ZOU Hai-feng, DONG Xian, 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.
- [11] Chabukdhara M, Nema A K. Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: Probabilistic health risk approach[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 87:57-64.
- [12] 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 Lie-shan, MO Xiao-rong, ZENG Dong-mei, 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.
- [13] 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.
- [14] 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 Chun, TASHPOLAT T, HOU Yan-jun, 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.
- [15] 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 Gang, SHEN Fei, ZHONG Gui-jiang, 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.
- [16] Zulpiya M, Ssidiguli H, Zhang Z Y, et al. An ecological risk assessment of heavy metal contamination in the surface sediments of Bosten Lake, Northwest China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(8):7266.
- [17] 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 Xiao-na, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, 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.
- [18] 阿吉古丽·马木提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 开都河下游绿洲耕地土壤重金属污染及潜在生态风险[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(6):2331-2341.
- Ajigul MAMUT, Mamattursun EZIZ, Anwar MOHAMMAD, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risks of farmland soils in oasis along the lower reaches of Kaidu River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(6):2331-2341.
- [19] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *地理学报*, 2017, 72(9):1680-1694.
- Mamattursun EZIZ, Ajigul MAMUT, Anwar MOHAMMAD, et al. Assessment of heavy metal pollution and its potential ecological risks of farmland soils of oasis in Bosten Lake basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9):1680-1694.
- [20] 国家环境保护总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- State Environmental Protection Agency. HJ/T 166—2004. The technical specification for soil environmental monitoring[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.
- [21] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 1969, 2:108-118.
- [22] 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, 2007:20-22.
- ZHENG Guo-zhang. Theory and practice of research on heavy metal pollution in agricultural soil[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007:20-22.
- [23] 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(2/3/4):64-72.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Electronic code of federal regulations, Steam Electric Power Generating, Point Source Category[EB/OL]. [2017-11-22]. https://en.wikipedia.org/wiki/Power_station.
- [27] 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.
- [28] 中华人民共和国环境保护部. HJ 25.3—2014. 污染场地风险评估技术导则[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- Ministry of Environmental Protection. HJ 25.3—2014. Technical guideline for risk assessment of contaminated sites[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.
- [29] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Known to be a human carcinogen[EO/OL]. [2014-09-20]. <http://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxorganlisting.asp?sysid=23>.
- [30] 中华人民共和国环境保护部. GB 15618—1995. 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- Ministry of Environmental Protection. GB 15618—1995. Soil environmental quality standard[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995.