

某再生铅工业园区周边土壤中铅和镉的生物可给性 及其对人体的健康风险评估

常夏源¹, 童仁军², 司友斌^{1*}, 司雄元³, 彭怀银¹, 胡彦¹

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 安徽省广德县环境保护局, 广德 242200;
3. 安徽农业大学生物技术中心, 合肥 230036)

摘要: 基于表层土壤重金属实测含量, 模拟体外 (*in vitro*) 实验对铅和镉的生物可给性分析, 评价某再生铅工业园区周边土壤中铅和镉对人体的健康风险。结果表明, 再生铅工业园区周边土壤中铅、镉的平均值分别为 124.05、0.394 mg·kg⁻¹, 是背景值的 4.98、2.90 倍。再生铅工业园区周边土壤中铅和镉的生物可给性差异较大, 园区附近土壤中铅已经达到一定程度的累积, 对人体有较高的健康风险, 土壤中镉对人体的健康风险较低; 研究区内无意摄入土壤中铅对人体总铅的贡献率较高, 对儿童的贡献率更高; 研究区土壤中铅对成人有较高的非致癌风险, 土壤中镉对成人有较高的致癌风险。

关键词: 再生铅工业园; 重金属污染; 生物可给性; 铅; 镉; 健康风险评估

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2014)06-1055-06

Bioaccessibility and risk assessment to human health of lead and cadmium in the soil around recycled lead industrial park

CHANG Xiayuan¹, TONG Renjun², SI Youbin¹, SI Xiongyuan³, PENG Huaiyin¹, HU Yan¹

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. Anhui Guangde Environment Protection Bureau, Guangde 242200;

3. Biotechnology Center, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: Based on the heavy metal contents and the bioaccessibility of lead and cadmium analyzed using *in vitro* methods in the soil around recycled lead industrial park, risks of soil lead and cadmium to human health were evaluated. Results showed that the average values of lead and cadmium contents in the soil were 124.05, 0.394 mg·kg⁻¹, which were 4.98 and 2.90 times higher than the background value, respectively. The bioaccessibility of lead and cadmium was significantly different. Lead can accumulate in the soil and would cause a greater risk to human health compared to cadmium. Unintentional intake of lead from the soil provided a great contribution to the total lead in human body, particularly in the population of children. Soil lead could cause the non-carcinogenic risk and soil cadmium may cause carcinogenic risk to adults.

Key words: recycled lead industrial park; heavy metal pollution; bioaccessibility; lead; cadmium; health risk assessment

土壤重金属污染已经成为一个世界范围的环境问题, 其中铅、镉是土壤中 2 种主要的重金属污染物^[1]。土壤中重金属的累积会对土壤的理化性质、土壤中的微生物群落多样性等带来不同程度的影

响, 甚至通过食物链富集对人类健康造成危害。土壤中的铅和镉进入人体的途径主要包括食物链、无意口部摄入、呼吸和皮肤接触等^[2]。据报道, 无意摄入铅或镉污染土壤对人体, 尤其是儿童铅或镉获

收稿日期: 2014-06-04

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费课题(201303101-06)和财政部、环境保护部重金属污染防治专项资金(财建[2010]375号)共同资助。

作者简介: 常夏源, 硕士研究生。

* 通信作者: 司友斌, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: youbinsi@ahau.edu.cn

得总量的贡献率越来越高,甚至成为主要途径。研究土壤中铅或镉对人体的健康风险,需准确判断土壤中铅或镉的生物可给性、溶解态量等生物有效性^[3]。因而近年来模拟体外 (*in vitro*) 实验受到越来越多的研究者关注。

我国重金属资源相对短缺,对重金属循环利用可以缓解资源短缺现状,减少原生矿产的开发,实现资源的可持续发展。但是目前,在很多会对土壤造成污染的重金属循环再生产业园区附近,还是有比较多的居民居住,而我国重金属循环再生产业发展起步晚,工艺技术相对落后,在资源再生过程中对废杂金属材料或废杂金属化工产品的拆解、预处理、熔炼等工艺有可能对土壤、大气、水体等造成重金属污染,会对附近居民产生身体健康的威胁^[4]。本研究基于表层土壤重金属的实测含量,模拟体外 (*in vitro*) 实验对铅和镉的生物可给性进行分析,评价再生铅工业园周边土壤中铅和镉对人体的健康风险。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

某再生铅工业园,地处中部平原,周边地形宽阔平坦,农业生产较为发达。该区域处于亚热带和暖温带的过渡区域,属于暖温带半湿润季风气候,年平均温度 15℃,年降雨量 910 mm。区域内土壤主要为潮土和砂姜黑土, pH 在 8.2~8.6 之间。



图 1 工业园采样点分布示意图

Figure 1 The sketch map of soil sampling sites in industry park

再生铅工业园组建于 2005 年,占地面积 5 km²。

工业园以再生粗铅、精铅、氧化铅、合金铅、再生塑料颗粒、电瓶壳、极板、蓄电池和电动车等 10 多种产品为主。工业园再生铅产量约占全国的 1/3,极板和蓄电池的产量占全国的 1/5,是全国最大的再生铅循环经济产业基地。

1.2 样品采集与处理

在综合考虑研究区域的地理地貌、土壤类型等自然因素以及工业园区分布、交通网络等人为因素的基础上,采集工业园周围农田中耕层土壤 (0~20 cm),每个采样点以 GPS 精准定位,在 50 m×50 m 范围内采用蛇形布点法取 7~9 个点混匀,四分法取样 1 kg 左右装入聚乙烯塑料袋中。在阴凉通风处自然风干土壤,剔除样品中有机残渣、植物根系等杂质,使用木质工具碾磨,过 100 目尼龙筛,装瓶待测。样品采样区域分布如图 1 所示。

在工业园区周边土壤重金属含量实测数据的基础上,选取环绕工业园区 3 个污染较重的样点 A、B、C (距离工业园中心分别为 50 m、100 m 和 200 m),以及距离园区较远区域 3 个随机样点 D、E、F (距离工业园中心分别为 500 m、1000 m 和 2000 m),进行土壤中铅和镉的生物可给性及其对人体的健康风险评价。

1.3 实验仪器及试剂

实验仪器:上海雷磁 PHS-3C 型 pH 计,美国 Thermo iCAP6000 电感耦合等离子体发射光谱仪, SpectrAA-220Z 型石墨炉原子吸收分光光度计。

实验试剂:HCl(分析纯)、HF(分析纯)、HClO₄(优级纯)、MgCl₂(优级纯)、NaAc(分析纯)、NH₂OH·HCl(分析纯)、HAc(分析纯)、Na₄P₂O₄(分析纯)、HNO₃(分析纯)、双氧水(分析纯)、NH₄Ac(分析纯)、蛋白酶(生化试剂)、柠檬酸(分析纯)、苹果酸(纯度 99.0%)、乳酸(分析纯)、猪胆盐(生化试剂)、猪胰酶(生化试剂)、超纯水、去离子水。

1.4 实验方法

1.4.1 再生铅工业园区周边土壤 pH 测定 采用水土比 2.5:1,称取 10 g 土并加入 25 mL 去离子水,间断搅拌 30 min,将调试好的 pH 计放入液面以下并持续水平晃动烧杯。待 pH 计示数 45 s 左右不变动时,读取记录数据。

1.4.2 再生铅工业园区周边土壤中重金属含量测定

(1) 称取 0.500 g 土壤样品置于聚四氟乙烯材质的消解管中,于通风橱中加入混酸 5HNO₃+2HCl+2HClO₄+1HF 溶液共 20 mL,完全润湿土壤样品,摇匀后放置于石墨消解炉中消解。

(2) 设定消解温度, 先在 90℃ 预消解 30 min, 然后在 130℃ 消解 120 min, 消解至溶液中无固体颗粒沉淀。如果溶液仍然有固体颗粒可适量补加酸溶液继续消解, 直至溶液无明显沉淀, 再去掉消解管盖, 于 190℃ 赶酸至浓烟散尽或剩余溶液 1~2 mL 左右。

(3) 冷却后转移至 25 mL 容量瓶中, 以 1% 左右稀硝酸定容至刻度线, 摇匀待测。

1.4.3 再生铅工业园区周边土壤中铅和镉的生物可给性人工肠胃模拟试验 土壤中重金属的生物可给性测定采用 Ruby 等提出的 PBET 方法提取^[5-6]。

(1) 胃阶段 配置模拟胃液, 将模拟胃液与土壤按 100(mL):1(g), 加入塑料瓶中, 每个土壤样品设置 3 个重复, 调节反应器温度为 37℃ 以模拟人体温度。以 100 r·min⁻¹ 水浴振荡 1 h, 然后用针筒吸取 10 mL 反应液, 过 0.45 μm 膜, 待测。

(2) 小肠阶段 胃阶段 1 h 后, 添加 NaHCO₃ 粉末将反应液 pH 调至 7.0, 并在每个反应器中分别加入胰酶、胆盐, 以 100 r·min⁻¹ 水浴振荡 4 h, 其间每隔一定时间测定反应液的 pH 值, 若偏离 7.0 则用 12 mol·L⁻¹ 的浓盐酸和 NaHCO₃ 饱和溶液调节, 使反应液 pH 值维持在 7.0。4 h 后, 用针筒吸取 10 mL 反应液, 离心后过 0.45 μm 膜、HCl 酸化, 待测。

1.5 测定方法与数据处理

1.5.1 重金属测定 根据中华人民共和国国家标准土壤环境质量标准《GB15618-1995》, 铅、镉采用 SpectrAA-220Z 型石墨炉原子吸收分光光度计测定, As、Cr、Cu、Ni 和 Zn 采用 iCAP6000 电感耦合等离子体发射光谱仪测定^[7]。

1.5.2 铅和镉的生物可给性计算 (1) 溶解态量在生物可给性模拟体内实验中, 胃阶段和小肠阶段, 能从单位质量土壤中溶出重金属的量, 称为土壤重金属的溶解态量, 由下式计算:

$$D_s = (C_{iv} \times v_{iv}) / m_s$$

其中, D_s 为溶解态量, C_{iv} 为各阶段反应器中铅含量, v_{iv} 为反应器中反应液的体积, m_s 为反应器中土样质量。

(2) 生物可给性。

$$BA = D_s / T_s \times 100\%$$

其中, BA 为土壤重金属的生物可给性, D_s 为溶解态量, T_s 为土壤中重金属的总量。

1.5.3 口部摄入铅镉对人体总铅镉贡献率计算^[1-2] WHO 建议镉的每周允许摄入量 (PTW I) 为 0.007 mg·kg⁻¹·周⁻¹, 铅为 0.025 mg·kg⁻¹·周⁻¹。儿童和成人无意口部摄入土壤量按 200 mg 计算, 儿童体重按卫生

部全国第四次儿童体格发育调查报告中 2~6 岁儿童平均体重 15.4 kg, 成人 (男子) 按 56 kg 计算^[1]。

无意口部铅/镉摄入对人体的贡献率 (%) = (模拟胃或小肠中铅/镉溶解态含量 × 摄入土壤量 × 7) / (体重 × PTW I) × 100%。

1.5.4 铅和镉对人体健康风险评价模型计算^[8] 根据生物可给性试验结果, 定量计算儿童和成人摄入土壤产生的致癌和非致癌风险。镉具有较强致癌能力, 对镉进行致癌和非致癌风险评价, 对铅进行非致癌风险评价^[9]。

经口部摄入土壤中重金属的慢性日摄入量计算:

$$CDI = C \times (E_F \times E_D \times I_R) / (W_{AB} \times T_A \times 365)$$

式中: CDI 为慢性日摄入量 (mg·kg⁻¹·d⁻¹); I_R 为摄入速率 (mg·d⁻¹); E_F 为暴露频率 (d·a⁻¹); E_D 为暴露年限, a; W_{AB} 为体质量 (kg); T_A 为平均作用时间 (a); C 为土壤重金属暴露浓度 (mg·kg⁻¹)。

重金属的非致癌风险计算:

$$HQ = (CDI \times OBA) / R_f D_0$$

式中: HQ 为非致癌风险指数; $R_f D_0$ 为经口摄入参考剂量 (mg·kg⁻¹·d⁻¹); OBA 为生物可给性 (%)。

致癌风险计算:

$$CR = CDI \times OBA \times SF_0$$

式中: CR 为致癌风险指数, SF_0 为斜率因子 (mg·kg⁻¹·d⁻¹)。

HQ 用来评价敏感人群受到非致癌风险的可能性。当 $HQ > 1$ 时, 表示可能产生潜在的非致癌风险。 CR 用来评价致癌风险的可能性。一般认为 CR 在 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 之间是可以接受的^[10]。根据 US EPA (美国国家环境保护局) 导则和现有研究资料, 确定风险评价计算所涉及的参数^[11]、各重金属健康风险评价参考剂量 $R_f D_0$ 和斜率因子 SF_0 ^[12-13]。

1.5.5 数据处理 数据处理使用 Excel, 制图使用 Origin Pro 8.0 软件, 相关性分析、主成分分析使用 SPSS 19.0 软件。

2 结果与分析

2.1 再生铅工业园区周边土壤重金属含量统计分析 土壤重金属含量统计结果见表 1。由表 1 可知, 重金属中 Pb、Cd、As、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的含量范围分别为 28.67~540.67、0.219~0.984、15.74~26.60、68.16~104.80、15.56~29.94、23.09~52.78 和 49.72~77.12 mg·kg⁻¹, 相应的平均值为 124.05、0.394、21.18、82.72、24.23、35.47 和 62.04 mg·kg⁻¹。

对安徽省江淮流域土壤背景值的研究表明^[14],

区域内土壤重金属 Pb、Cd、As、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的背景值分别为 25.0、0.136、11.5、82.9、27.8、35.5 和 63.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而本研究中 Pb、Cd、As、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的平均值分别是背景值的 4.96、2.90、1.84、1.00、0.87、1.00 和 0.98 倍。重金属 Pb 的变异系数最大，其平均值为 121.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，说明重金属 Pb 含量受到当地工业区的影响最大；其次是 Cd 的变异系数为 38.95%，其受工业区的影响也较大；而 As、Cr、Ni、Cu、Zn 等变异系数较小，说明这几种重金属基本未受到工业区的影响。

2.2 再生铅工业园区周边土壤中铅和镉的生物可给性

表 2 为生物可给性模拟体内实验铅的溶解态量

和生物可给性的统计。从表中可以发现，各样品中 Pb 在胃阶段的生物可给性均大于小肠阶段。郑顺安等的研究认为这是因为重金属元素从 pH 为酸性的胃阶段进入中性的小肠阶段后发生吸附沉淀反应，从而降低了其在消化液中的溶解量和生物可给性^[15]。

在 6 个试验土样中，铅总量最高的土样 (292.41 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，其铅在胃阶段和小肠阶段的生物可给性分别为 36.97% 和 9.01%，均低于平均值 55.87% 和 13.00%。铅总量最低的土样 (39.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，其铅在胃阶段的生物可给性为 49.86%，略低于平均值。因此，具有较高的铅溶解态量且具有较高生物可给性的土壤才会对人体健康产生较大的威胁。

表 1 工业园周边土壤重金属含量统计分析

Table 1 Descriptive statistics of heavy metals in the soils around recycled lead industrial park

重金属 Heavy metal	最小值 /mg·kg ⁻¹ Minimum	最大值 /mg·kg ⁻¹ Maximum	平均值±标准差 /mg·kg ⁻¹ Average ± SD	变异系数/% CV	背景值/mg·kg ⁻¹ Background value	平均值/背景值 Average/ Background value
Pb	28.67	540.67	124.05±98.01	79.01%	25.0	4.98
Cd	0.219	0.984	0.394±0.155	39.34%	0.136	2.90
As	15.74	26.60	21.18±2.48	11.76%	11.5	1.84
Cr	68.16	104.80	82.72±7.06	8.53%	82.9	1.00
Cu	15.56	29.94	24.23±3.03	12.52%	27.8	0.87
Ni	23.09	52.78	35.47±8.34	23.51%	35.5	1.00
Zn	49.72	77.12	62.04±6.90	11.12%	63.2	0.98

表 2 工业园周边土壤中铅的溶解态量及生物可给性

Table 2 The dissolved content and bioaccessibility of lead in soils around recycled lead industrial park

土壤样品 Soil sample	胃阶段 Gastric phase		小肠阶段 Intestinal phase	
	溶解态/mg·kg ⁻¹ Dissolved content	生物可给性/% Bioaccessibility	溶解态/mg·kg ⁻¹ Dissolved content	生物可给性/% Bioaccessibility
A	101.86±3.53	36.97±4.34	24.8±0.54	9.01±1.99
B	195.75±10.31	82.19±5.13	71.16±6.79	29.88±4.11
C	161.45±8.49	55.21±0.81	42.23±4.14	14.44±1.19
D	15.53±8.59	49.86±2.45	1.82±4.82	5.85±2.67
E	28.09±7.83	62.33±2.54	4.65±4.52	10.32±1.64
F	33.65±7.47	48.66±2.69	5.88±4.38	8.51±2.12

表 3 工业园周边土壤中镉的溶解态量及生物可给性

Table 3 The dissolved content and bioaccessibility of cadmium in soils around recycled lead industrial park

土壤样品 Soil sample	胃阶段 Gastric phase		小肠阶段 Intestinal phase	
	溶解态/mg·kg ⁻¹ Dissolved content	生物可给性/% Bioaccessibility	溶解态/mg·kg ⁻¹ Dissolved content	生物可给性/% Bioaccessibility
A	1.16±0.47	25.16±1.83	0.54±0.48	11.71±1.22
B	4.12±1.65	58.64±6.07	2.48±1.31	35.29±4.70
C	1.39±0.09	22.01±0.46	0.62±0.39	9.82±1.84
D	0.32±1.03	10.29±3.39	0.13±0.80	4.18±3.00
E	0.48±0.95	14.69±2.67	0.27±0.71	8.27±2.22
F	0.82±0.75	19.68±4.67	0.61±0.41	9.93±1.81

表 4 成人和儿童在胃和小肠阶段可能摄入铅对铅每周允许摄入量的贡献率

Table 4 Contribution of adults and children uptake lead from soils to PTW I

%

土壤样品 Soil sample	胃阶段 Gastric phase		小肠阶段 Intestinal phase	
	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children
A	10.19±1.12	37.04±2.13	2.48±0.17	9.02±0.32
B	19.58±3.26	71.19±6.22	7.12±2.15	25.88±4.9
C	16.15±2.68	58.71±5.12	4.22±1.31	15.36±2.49
D	1.55±2.72	5.65±5.18	0.18±1.53	0.66±2.91
E	2.81±2.48	10.21±4.72	0.47±1.43	1.69±2.72
F	3.37±2.36	12.24±4.50	0.59±1.39	2.14±2.64

对供试样点和随机样点的铅溶解态量和生物可给性进行比较, 距离工业园区较近供试样点 A、B、C 的铅溶解态量比距离工业园区较远随机样点 D、E、F 的高, 但随机土样的铅生物可给性同样很高。因此, 自工业园区建成以来, 园区附近的土壤中铅已经不同程度地累积, 并且将会威胁到附近居民的身体健康。

从表 3 中可以看出, 距离工业园区较近样点 A、B、C 的镉溶解态量和生物可给性均高于距离工业园区较远样点 D、E、F。同时, 比较镉和铅的溶解态量和生物可给性及其变异系数可以发现, 土壤中镉的溶解态量和生物可给性明显小于铅, 变异系数明显高于铅。表明在工业园区附近土壤中没有较高

的镉累积度, 对附近居民的健康风险较低。

2.3 再生铅工业园区周边土壤中铅和镉对人体的健康风险评价

2.3.1 口部摄入铅镉对人体总铅镉的贡献率 从表 4 中可以看出土壤中铅对人体有较高的健康风险, 仅以胃阶段结果进行判断时, 被测样品中 3 个浓度较高的样品贡献率均超过 10%, 儿童贡献率更高, 均高于 30%, 甚至达到 71.19%。

从表 5 可以看出土壤中镉对人体并没有很高的健康风险, 仅以胃阶段结果进行判断时, 无意口部摄入土壤中镉对儿童镉的 PTW I 贡献高于成人, 但均不超过 6%。

表 5 成人和儿童在胃和小肠阶段可能摄入镉对镉每周允许摄入量的贡献率

Table 5 Contribution of adults and children uptake cadmium from soils to PTW I

%

土壤样品 Soil sample	胃阶段 Gastric phase		小肠阶段 Intestinal phase	
	成人 Adults	儿童 Children	成人 Adults	儿童 Children
A	0.43±0.32	1.54±0.54	0.25±0.64	0.72±1.32
B	1.52±0.99	5.43±1.90	0.15±0.57	3.27±2.07
C	0.55±0.14	1.84±0.04	0.23±0.64	0.82±1.35
D	0.16±0.61	0.47±1.12	0.15±0.57	0.23±1.11
E	0.22±0.56	0.63±1.10	0.12±0.54	0.47±1.22
F	0.31±0.47	1.12±0.84	0.16±0.57	0.58±1.26

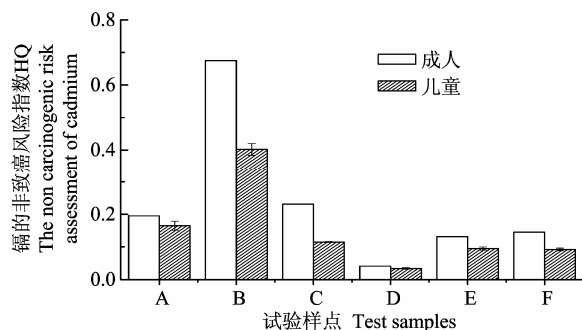


图 2 再生铅工业园区周边土壤中镉的非致癌风险评价
Figure 2 The non carcinogenic risk assessment of cadmium in soils around recycled lead industrial park

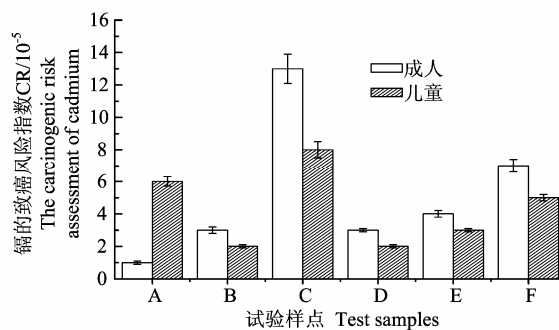


图 3 再生铅工业园区周边土壤中镉的致癌风险评价
Figure 3 The carcinogenic risk assessment of cadmium in soils around recycled lead industrial park

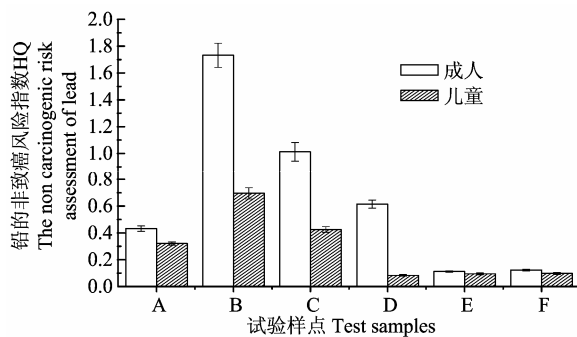


图4 再生铅工业园区周边土壤中铅的非致癌风险评价
Figure 4 The non carcinogenic risk assessment of lead in soils around recycled lead industrial park

2.3.2 再生铅工业园区土壤中铅和镉对人体的致癌和非致癌风险 图2和图3为镉的非致癌和致癌评价,对于儿童,采样区镉的非致癌风险指数平均值为0.13,所有采样点的非致癌风险指数均小于1,说明镉对儿童潜在的非致癌风险相对较小;采样区的致癌风险指数均处于 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 之间,说明镉对儿童潜在的致癌风险较小。对于成人,采样区镉的非致癌风险指数处于安全范围,对成人的非致癌风险较小;研究样点C土壤中镉的致癌风险指数大于 1×10^{-4} ,对成人有较高的致癌风险。

图4为铅的非致癌评价,从图中可以看出铅的非致癌风险指数明显高于镉的非致癌风险指数。同时,对于成人,研究样点B、C土壤中铅的非致癌风险指数大于1,对成人有较高的潜在非致癌风险;对于儿童,所有采样点的非致癌风险指数均小于1,对儿童的潜在非致癌风险相对较小。

3 结论

再生铅工业园区周边土壤中重金属Pb和Cd含量范围分别为28.67~540.67、0.219~0.984 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,相应平均值为124.05、0.394,分别是背景值的4.98、2.90倍,且变异系数较大,受工业区的影响较大,其他几种元素As、Cr、Cu、Ni、Zn的变异系数较小,受工业区的影响较小。

研究样点土壤中铅和镉的生物可给性差异较大,距离工业园区越近,铅的溶解态量和生物可给性越大,对人体有较高的健康风险;镉没有明显的累积,对人体的健康风险较低。

研究区内无意口部摄入土壤中的铅对人体总铅的贡献率较高,对儿童的贡献率更高;无意口部摄入土壤中镉对儿童镉的贡献率比成人高,但均没有

达到6%,对人体健康风险较低。

研究区土壤中Pb对成人有较高的非致癌风险,对儿童的非致癌风险较低;研究区土壤中Cd对成人有较高致癌风险,对儿童的非致癌风险和致癌风险均较低。

参考文献:

- [1] 曾希柏,李莲芳,梅旭荣.中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J].中国农业科学,2007,40(11):2507-2517.
- [2] 崔岩山,陈晓晨.土壤中镉的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J].环境科学,2010,31(2):403-408.
- [3] 崔岩山,陈晓晨,朱永官.利用三种*in vitro*方法比较研究污染土壤中铅、砷生物可给性[J].农业环境科学学报,2008,27(2):414-419.
- [4] 乐华斌.废金属再生过程中“三废”综合治理思路[J].有色金属再生与利用,2011(2):60-61.
- [5] Ruby M V, Davis A, Schoof R, et al. Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test [J]. Environ Sci Technol, 1996, 30(2): 422-430.
- [6] Ruby M V, Schoof R, Brattin W, et al. Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment [J]. Environ Sci Technol, 1999, 33(21): 3697-3705.
- [7] 张霖琳,梁宵,加那尔别克·西里甫汗,等.在土壤及底泥重金属测定中不同前处理和分析方法的比较[J].环境化学,2013,32(2):302-306.
- [8] 李继宁,候红,魏源,等.株洲市农田土壤重金属生物可给性及其人体健康风险评价[J].环境科学研究,2013,26(10):1139-1146.
- [9] Wang X L, Sato L, Xing B S, et al. Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish [J]. Sci Total Environ, 2005, 350(1/3): 28-37.
- [10] Hu X, Zhang Y, Luo J, et al. Bioaccessibility and health risk of arsenic, mercury and other metals in urban street dust in the zinc smelting district, northeast of China [J]. Environ Pollut, 2011, 159(5):1215-1221.
- [11] Luo X S, Ding J, Xu B, et al. Incorporating bioaccessibility into human health risk assessments of heavy metals in urban park soils [J]. Sci Total Environ, 2012, 424: 88-96.
- [12] 林晓峰,胡恭任,于瑞莲,等.泉州市重要工业区土壤重金属健康风险评价[J].有色金属,2011,63(2):297-301.
- [13] US EPA. Standard operating procedure for an *in vitro* bioaccessibility assay for lead in soil [S]. Washington, US: Environmental Protection Agency, EPA9200, 1-86, 2008.
- [14] 陈兴仁,陈富荣,贾十军,等.安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J].中国地质,2012,39(2):302-310.
- [15] 郑顺安,王飞,李晓华,等.应用*in vitro*法评估土壤性质对土壤中Pb的生物可给性的影响[J].环境科学研究,2013,26(8):851-857.