



引用格式:王 可,左书梅,李 昆,等.石家庄市公交站点尘土重金属的生物可给性及人体健康风险评估[J].科学技术与工程,2020,20(35):14737-14742

Wang Ke, Zuo Shumei, Li Kun, et al. Bioaccessibility and health risk assessment of heavy metals in the dusts in bus stops in Shijiazhuang City[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(35): 14737-14742

环境科学、安全科学

石家庄市公交站点尘土重金属的生物可给性及人体健康风险评估

王 可,左书梅,李 昆,花中霞,陈龙星,何 燕

(石家庄市疾病预防控制中心毒物检测中心,石家庄 050011)

摘要 利用生理提取试验(physiologically based extraction test, PBET)法研究石家庄市建设大街15个公交站点表层尘土中Cr、Mn、Cu、Zn、Cd、Pb的生物可给性,并采用美国环保局人体健康风险模型对6种重金属的健康风险进行评价。结果表明:与河北省土壤元素背景值相比,Mn和Cr在各站点的含量未超过背景值,Cu、Zn、Cd、Pb在各站点含量均超过背景值,其中Cd的富集程度最大。重金属溶解态量在胃和肠阶段差异较大,除在运河桥客运站Cr的溶解态量肠阶段大于胃阶段外,各重金属在所有站点溶解态量胃阶段均高于肠阶段。在所有站点中,Cu、Zn、Cd、Pb、Mn、Cr的生物可给性分别为40.57%~90.31%、45.67%~77.57%、61.03%~84.14%、49.05%~82.99%、59.46%~85.32%、11.36%~54.17%。儿童的非致癌风险商(HQ)和致癌风险商(CR)高于成人。6种重金属在各站点的HQ均小于1,在安全阈值之内。Cr和Cd在各站点的CR在 1×10^{-6} ~ 1×10^{-4} 范围内,对儿童及成人存在一定致癌风险,但尚可接受;Pb在各站点的CR小于 1×10^{-6} ,对儿童及成人的致癌风险甚微,可忽略。

关键词 公交站点;重金属;尘土;生物可给性;健康风险评估

中图分类号 X131.1; **文献标志码** A

Bioaccessibility and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Dusts in Bus Stops in Shijiazhuang City

WANG Ke, ZUO Shu-mei, LI Kun, HUA Zhong-xia, CHEN Long-xing, HE Yan

(Department of Poison Detection, Shijiazhuang Center for Disease Control and Prevention, Shijiazhuang 050011, China)

[Abstract] The physiologically based extraction test (PBET), an in vitro gastrointestinal simulation method was used to study the bioaccessibility of Cr, Mn, Cu, Zn, Cd, and Pb in the dusts samples from 15 bus stops along the Jianshe Street in Shijiazhuang City, Hebei Province, and the US EPA human health risk model was applied to assess the health risks of the six metals. Results show that the concentrations of Mn and Cr in samples of all the bus stops were below the provincial benchmarks of the background values of soil, while those of Cu, Zn, Cd, and Pb exceeded the background values, of which Cd showed the largest degree of enrichment. The bioaccessible concentrations of these heavy metals in gastric and intestinal stages were obviously different. Except that the bioaccessible concentration of Cr in the intestinal stage was larger than that in the gastric stage shown in one sample (Yunhe Bridge stop), the bioaccessible concentrations of all the six metals in the gastric stage were higher than that in the intestinal stage in all samples. The bioaccessibility of Cu, Zn, Cd, Pb, Mn, and Cr was, respectively: 40.57%~90.31%, 45.67%~77.57%, 61.03%~84.14%, 49.05%~82.99%, 59.46%~85.32%, and 11.36%~54.17%. The hazard quotients (HQs) and the carcinogenic risks (CRs) for children were higher than that for adults. The HQs of the six heavy metals in all the samples were less than 1, being within the safety threshold values. The CRs of Cr and Cd ranged from 1×10^{-6} to 1×10^{-4} , being at an acceptable level, while that of Pb was less than 1×10^{-6} in all the samples thus it could be ignored.

[Key words] bus stop; heavy metal; dust; bioaccessibility; health risk assessment

近年来,重金属污染对人体的潜在危害极大,一些重金属元素毒性大、稳定性强,在人体内易积蓄不

被排出,通过长期饮食、呼吸及皮肤接触而出现中毒症状^[1-2]。体外模拟试验主要有生理提取测试(physi-

收稿日期:2019-10-28; 修订日期:2020-06-09

基金项目:河北省医学科研重点课题计划(ZL20140019)

第一作者:王 可(1981—),男,汉族,山东临沂人,博士,副主任技师。研究方向:污染物监测与风险评估。E-mail:wkecdc@163.com。

ologically based extraction test, PBET)法、生物有效性简化提取(simple bioavailability extraction test, SBET)法和简单胃肠提取(simple gastrointestinal extraction test, SGET)法等。1996年, PBET法由Ruby等^[3]开发并应用于铅和砷在固体基质中的生物可给性的研究,从而被欧美国家建立和发展。许多研究均表明,与动物实验相比,体外模拟试验具有实验周期短、费用低和结果重现性好等优点^[4]。多数研究使用重金属总量来评价对人体健康的影响^[5-6],但在一定程度上会高估对人体的健康危害,因为重金属不能全部被人体吸收^[7]。利用体外模拟装置模拟人体消化系统,分别取胃和肠阶段反应液样本,检测样本中重金属溶解态量,溶解态量与样本中重金属的含量的比值即为样本中重金属的生物可给性。

中国已有应用体外胃肠模拟法来评价尘土重金属的生物可给性的报道,但大多是针对建筑区尘土、铁矿区尘土、煤矿区尘土、工矿区尘土以及农田尘土中的重金属污染的研究^[8-12],而针对中国城市街道表层尘土重金属的污染水平方面的研究相对较少。因此,现采用PBET法分析石家庄市建设大街公交站点尘土中重金属Cr、Mn、Cu、Zn、Cd、Pb的生物可给性,进一步对结果的差异进行分析,开展儿童及成人的健康风险评估,对控制重金属污染、预防重金属对人体危害及改善城市环境治理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集与制备

研究所用尘土样品采集于石家庄市建设大街15个公交站点,供试样品于2018年3月采集。所有样品用小铲和毛刷在不同站点采集地表积尘,采集完毕后,将样品自然风干、碾碎、干燥、过100目的样品筛,筛后样品储存备用。

1.2 实验方法

1.2.1 尘土重金属含量测定

尘土重金属总量采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 法进行消解^[13],6种重金属Cr、Mn、Cu、Zn、Cd、Pb含量利用电感耦合等离子体质谱仪ICP-MS(美国PerkinElmer公司ELAN 9000)进行测定。

1.2.2 尘土重金属生物可给性测定

尘土中重金属的生物可给性测定采用PBET体外胃肠模拟实验方法提取^[3,14]。

1.3 尘土重金属的生物可给性计算

$$BA = (D_s/T_s) \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中:BA为尘土中Cr、Mn、Cu、Zn、Cd、Pb的生物可给性,%; D_s 为尘土中Cr、Mn、Cu、Zn、Cd、Pb的溶解态量(胃液溶解态量与肠液溶解态量之和),

mg/kg; T_s 为尘土中重金属的总量,mg/kg。

1.4 健康风险评估

尘土中重金属经口摄入对人体引起健康风险,健康风险要分别考虑致癌风险和非致癌风险。研究的6种重金属均具有非致癌风险,其中Cr、Cd、Pb还具有致癌风险。具体计算模型公式、参数和风险评估准则详见文献^[15-16]。

2 结果与讨论

2.1 尘土中重金属总量分析

研究用尘土采自石家庄市建设大街各公交站点站台上下、路台缝处,研究站点尘土Cr、Mn、Cu、Zn、Cd、Pb 6种重金属元素的含量,如表1所示。由表1可知,建设大街上公交站点尘土中重金属Cr、Mn、Cu、Zn、Cd、Pb的含量范围分别为23.86~65.78、225.01~515.25、35.07~147.24、174.82~557.61、0.84~9.62、31.78~79.56 mg/kg,Cr和Mn在所有站点的含量均没有超过河北省土壤元素背景值^[17]。Cu、Zn、Cd、Pb在各个站点的含量均超过背景值,其含量分别是背景值2.06、1.61、2.82、2.55、3.77、3.56、2.85、3.88、2.62、3.80、3.73、6.75、3.85、2.15、2.00倍,3.65、2.23、2.82、3.06、3.56、2.99、3.19、3.32、3.59、4.34、3.78、5.25、5.61、4.34、7.11倍,21.60、12.77、15.74、102.34、101.17、76.70、83.62、75.11、40.32、88.40、27.77、8.94、13.94、10.11、8.94倍,1.48、2.00、2.10、2.55、2.53、2.41、3.70、3.03、2.74、2.80、2.79、3.36、2.87、2.63、2.07倍。综上,石家庄市建设大街各公

表1 建设大街公交站点尘土重金属总量

Table 1 Total content of heavy metals in dust of bus stops in Jianshe Street

站点名称	重金属总量/(mg·kg ⁻¹)					
	Cr	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb
润丰五金城	25.67	230.75	44.82	286.11	2.03	31.78
谛音寺	23.86	225.01	35.07	174.82	1.20	42.93
欧韵公园	38.39	252.92	61.46	220.97	1.48	45.15
安建桥	39.19	248.55	55.65	239.89	9.62	54.79
水务集团	43.37	243.26	82.15	279.44	9.51	54.34
新世隆	48.85	250.92	77.52	234.78	7.21	51.86
公交总公司	57.28	264.75	62.03	250.40	7.86	79.56
河北大戏院	52.39	271.40	84.69	259.95	7.06	65.16
市城管委	65.08	270.07	57.05	281.63	3.79	58.96
北国商城	65.78	290.04	82.77	340.61	8.31	60.27
省四院	50.44	251.38	81.28	296.40	2.61	60.00
建和桥北	51.51	275.22	147.24	411.59	0.84	72.23
棉五	37.68	275.87	83.84	439.84	1.31	61.77
东货场	61.87	515.25	46.96	340.06	0.95	56.56
运河桥客运站	32.73	265.99	43.65	557.61	0.84	44.49
河北省土壤元素背景值	68.30	608.00	21.80	78.40	0.094	21.50

交站点尘土重金属呈现不同程度的富集,尤其 Cd 富集量最大,最高可达到 100 倍以上。Cu、Zn、Pb 富集量相对较高。有研究显示,Cd 来源于油料泄漏、沥青或水泥路面磨损等^[18]。城市尘土中的 Cu、Zn、Pb 均与交通有关,其中 Cu 来自汽车刹车里衬的机械磨损、汽车制动系统和散热系统;Zn 主要来自汽车轮胎磨损、金属腐蚀及润滑油燃烧等;Pb 来自使用含铅汽油机动车的尾气排放^[19-20]。

2.2 尘土中重金属的溶解态量

体外胃肠模拟实验所得建设大街公交站点尘土中重金属的溶解态量如表 2 所示。由表 2 中数据可以看出,在胃阶段和肠阶段,Cr 和 Mn 在东货场站溶解态量最高,Cu 在建和桥北站溶解态量最高,Zn 在运河桥客运站溶解态量最高,Cd 在建安桥站溶解态量最高,Pb 在公交总公司站溶解态量最高;只有 Pb 在胃阶段和肠阶段的溶解态量最大值表现在不同站点,其胃阶段在公交总公司站溶解态量最高,肠阶段在东货场站溶解态量最高。

各个站点尘土中不同重金属的溶解态量在胃和肠阶段存在差异。除 Cr 外,其余 5 种重金属在各个站点溶解态量胃阶段均高于肠阶段,而 Cr 只有在运河桥客运站溶解态量肠阶段大于胃阶段,在其他站点亦是胃阶段均高于肠阶段。这种结果可能是因为模拟的胃环境溶液 pH = 1.5,在偏酸性环境下,酶活性提高,使重金属 Mn、Cu、Zn、Cd、Pb 从尘土中解吸出来,导致胃液中重金属的溶解态量高。从胃阶段到肠阶段,加入 Na₂CO₃使溶液 pH 从 1.5 升到 7.0,导致尘土对 Cr 的吸附能力降低,并且有机酸可以将残渣态中 Cr³⁺ 移动到锰氧化物表面而被氧化

成 Cr⁶⁺,增加了 Cr 的移动性,进而导致运河桥站的 Cr 在肠阶段的溶解态量高于胃阶段。对于多数重金属的溶解态量在胃阶段高于肠阶段,可能是由于 pH 升高到中性,使其在胃液中溶解出来的重金属被吸附沉淀,释放出来的重金属再次被固定吸附,导致其在肠阶段的含量降低^[21]。

2.3 尘土中重金属的生物可给性及站点分布差异

表 3 所示为 PBET 法模拟消化液对建设大街公交站点尘土中的 6 种重金属的生物可给性的计算结果,同一种重金属在不同站点尘土中的生物可给性存在差异。就 Cu 而言,其生物可给性在 40.57% ~ 90.31%,差异明显。Zn 的生物可给性大部分为 53.75% ~ 67.60%,在谛音寺站偏低,为 45.67%,在运河桥客运站偏高为 77.57%。Mn 的生物可给性多数为 70.83% ~ 85.32%,只有在北国商城站较低,为 59.46%。Cd 的生物可给性除在建安桥站、建和桥北站和运河桥客运站大于 80% 外,其他站点均在 61.03% ~ 75.97% 范围内。Pb 在公交总公司站高达 82.99%,在其他站点的生物可给性均在 49.05% ~ 65.91% 范围内。造成重金属在公交总公司站、建安桥站、建和桥北站和运河桥客运站生物可给性高的原因可能为这 4 个站点公交车停靠的车辆比其他站点多,且来往的汽车较为频繁,尾气排放以及车身漆的脱落导致重金属的生物可给性高^[22]。Cr 的生物可给性大部分在 11.36% ~ 24.04% 范围内,在省四院站、建和桥北站、棉五站、东货场站和运河桥站偏高,但与其他 5 种重金属的生物可给性相比,整体数值较低,可能是由于尘土中 Cr 主要以残渣态的形式存在,不易被消化液溶出^[23]。

表 2 建设大街公交站点尘土重金属溶解态量

Table 2 Bioaccessible concentration of heavy metals in dust of bus stops in Jianshe Street

站点名称	重金属溶解态量/(mg·kg ⁻¹)											
	胃阶段						肠阶段					
	Cr	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb
润丰五金城	2.59	107.85	14.13	159.09	1.15	21.21	1.48	85.18	10.28	6.19	0.16	0.36
谛音寺	1.83	111.75	11.34	79.65	0.69	20.67	1.00	80.23	7.86	3.02	0.11	0.07
欧韵公园	4.62	114.40	31.64	136.58	1.01	26.49	2.68	96.34	22.04	4.51	0.15	0.62
建安桥	4.17	102.36	29.51	144.84	6.82	31.54	2.03	91.76	20.75	11.25	0.95	0.72
水务集团	3.43	101.21	32.92	144.15	6.65	31.89	2.41	72.77	25.81	11.31	0.62	0.78
新世隆	5.22	101.20	32.82	125.35	4.68	26.78	3.17	78.87	24.05	4.61	0.64	1.04
公交总公司	7.23	105.74	27.26	140.12	5.04	69.91	4.97	91.80	20.63	6.26	0.63	1.66
河北大戏院	7.26	107.44	27.36	146.25	4.50	29.96	5.51	99.09	21.30	9.97	0.61	1.20
市城管委	7.80	113.70	24.23	168.51	2.43	31.89	4.61	81.10	17.61	9.43	0.29	0.90
北国商城	9.59	97.97	25.44	178.51	4.53	36.41	5.98	74.49	19.22	5.89	0.46	0.76
省四院	10.21	112.65	19.34	152.92	1.75	29.97	10.17	71.43	13.18	5.41	0.19	0.96
建和桥北	10.73	126.58	44.02	227.42	0.65	36.97	10.45	78.45	30.41	18.78	0.06	2.16
棉五	8.85	126.57	20.36	276.23	0.70	33.72	9.37	84.83	14.35	25.20	0.10	1.57
东货场	14.24	214.30	11.87	194.10	0.47	32.52	12.26	150.66	7.23	15.77	0.06	2.90
运河桥客运站	8.61	120.53	17.33	393.07	0.62	26.50	9.10	89.66	9.76	47.15	0.09	1.40

表3 建设大街公交站点尘土重金属生物可给性
Table 3 Bioavailability of heavy metals in dust of bus stops in Jianshe Street

站点名称	生物可给性/%					
	Cr	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb
润丰五金城	14.71	83.65	54.05	57.76	61.54	65.91
谛音寺	11.36	85.32	54.65	45.67	65.39	49.05
欧韵公园	16.82	83.32	87.51	64.59	73.96	60.05
安建桥	15.84	78.10	90.31	65.07	80.83	58.87
水务集团	13.60	71.52	68.79	55.39	75.97	60.13
新世隆	16.61	71.77	73.57	54.90	74.62	54.04
公交总公司	20.55	74.61	77.95	58.43	71.26	82.99
河北大戏院	24.04	76.10	58.91	59.35	72.10	50.46
市城管委	16.73	72.13	72.69	61.34	71.75	57.18
北国商城	21.77	59.46	53.32	54.06	61.52	61.74
省四院	40.45	73.23	40.57	53.75	74.22	52.97
建和桥北	41.36	74.50	55.92	56.88	80.63	55.32
棉五	48.72	76.63	46.43	67.60	62.33	57.53
东货场	44.85	70.83	43.95	61.45	61.03	61.57
运河桥客运站	54.17	79.02	62.74	77.57	84.14	62.71

2.4 重金属健康风险评估

对致癌金属采用致癌风险商(CR)评价,非致癌金属采用非致癌风险商(HQ)评价。用CR评价致癌风险时,一般认为 $CR < 1.0 \times 10^{-6}$ 表示风险甚微; CR 为 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ 表示存在一定风险,但尚可接受;当 $CR > 1.0 \times 10^{-4}$ 表示风险相对显著。HQ的高低代表非致癌风险的大小,当 $HQ < 1$ 时,表示对人群产生的潜在非致癌风险较小,当 $HQ \geq 1$ 时

则可能对敏感人群会产生潜在非致癌风险^[15]。

根据美国环保局健康风险评价模型,得出石家庄市建设大街各公交站点尘土对儿童和成人的健康风险评价,如表4和表5所示。Cr、Mn、Cu、Zn、Cd、Pb 6种重金属在各站点的HQ表明,儿童的健康风险高于成人,但均小于1,在安全阈值之内,对儿童及成人产生的潜在非致癌风险较小。Cr和Cd在各站点儿童的CR高于成人的CR, Cr对儿童和成人的致癌风险在各站点表现为:北国商城 > 市城管委 > 东货场 > 公交总公司 > 河北大戏院 > 建和桥北 > 省四院 > 新世隆 > 水务集团 > 安建桥 > 欧韵公园 > 棉五 > 运河桥客运站 > 润丰五金城 > 谛音寺, Cd对儿童和成人的致癌风险在各站点表现为:安建桥 > 水务集团 > 北国商城 > 公交总公司 > 新世隆 > 河北大戏院 > 市城管委 > 省四院 > 润丰五金城 > 欧韵公园 > 棉五 > 谛音寺 > 东货场 > 建和桥北 > 运河桥客运站,其值在 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ 范围内,存在一定风险,但尚可接受;Pb在各站点的CR亦是儿童的高于成人的,其值 $< 1.0 \times 10^{-6}$,致癌风险甚微,可忽略。

3 结论

(1)石家庄市建设大街尘土各重金属(除Mn和Cr外)总量在所有公交站点均呈现不同程度的富集。尤其Cd在安建桥站和水务集团站富集量最高,达到100倍以上。

表4 建设大街公交站点尘土中重金属的健康风险评价(儿童)
Table 4 Health risk assessment of heavy metals in dust of bus stops in Jianshe Street (children)

站点名称	健康风险评价/[$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]											
	Mn		Cd		Cu		Zn		Pb		Cr	
	HQ	CR	HQ	CR	HQ	CR	HQ	CR	HQ	CR	HQ	CR
润丰五金城	1.08×10^{-2}	—	1.33×10^{-2}	6.96×10^{-6}	7.96×10^{-3}	—	6.27×10^{-3}	—	5.85×10^{-2}	1.52×10^{-7}	5.63×10^{-2}	7.23×10^{-6}
谛音寺	1.06×10^{-2}	—	7.90×10^{-3}	4.13×10^{-6}	6.23×10^{-3}	—	3.83×10^{-3}	—	7.91×10^{-2}	2.06×10^{-7}	5.23×10^{-2}	6.72×10^{-6}
欧韵公园	1.19×10^{-2}	—	9.70×10^{-3}	5.07×10^{-6}	1.09×10^{-2}	—	4.84×10^{-3}	—	8.32×10^{-2}	2.16×10^{-7}	8.41×10^{-2}	1.08×10^{-5}
安建桥	1.17×10^{-2}	—	6.32×10^{-2}	3.31×10^{-5}	9.89×10^{-3}	—	5.26×10^{-3}	—	1.01×10^{-1}	2.62×10^{-7}	8.59×10^{-2}	1.10×10^{-5}
水务集团	1.14×10^{-2}	—	6.25×10^{-2}	3.27×10^{-5}	1.46×10^{-2}	—	6.12×10^{-3}	—	1.00×10^{-1}	2.60×10^{-7}	9.51×10^{-2}	1.22×10^{-5}
新世隆	1.18×10^{-2}	—	4.74×10^{-2}	2.48×10^{-5}	1.38×10^{-2}	—	5.15×10^{-3}	—	9.55×10^{-2}	2.48×10^{-7}	1.07×10^{-1}	1.38×10^{-5}
公交总公司	1.24×10^{-2}	—	5.17×10^{-2}	2.70×10^{-5}	1.10×10^{-2}	—	5.49×10^{-3}	—	1.47×10^{-1}	3.81×10^{-7}	1.26×10^{-1}	1.61×10^{-5}
河北大戏院	1.27×10^{-2}	—	4.64×10^{-2}	2.43×10^{-5}	1.51×10^{-2}	—	5.70×10^{-3}	—	1.20×10^{-1}	3.12×10^{-7}	1.15×10^{-1}	1.48×10^{-5}
市城管委	1.27×10^{-2}	—	2.49×10^{-2}	1.30×10^{-5}	1.01×10^{-2}	—	6.17×10^{-3}	—	1.09×10^{-1}	2.82×10^{-7}	1.43×10^{-1}	1.83×10^{-5}
北国商城	1.36×10^{-2}	—	5.46×10^{-2}	2.86×10^{-5}	1.47×10^{-2}	—	7.47×10^{-3}	—	1.11×10^{-1}	2.89×10^{-7}	1.54×10^{-1}	1.98×10^{-5}
省四院	1.18×10^{-2}	—	1.72×10^{-2}	8.97×10^{-6}	1.44×10^{-2}	—	6.50×10^{-3}	—	1.11×10^{-1}	2.87×10^{-7}	1.11×10^{-1}	1.42×10^{-5}
建和桥北	1.29×10^{-2}	—	5.54×10^{-3}	2.90×10^{-6}	2.62×10^{-2}	—	9.02×10^{-3}	—	1.33×10^{-1}	3.46×10^{-7}	1.13×10^{-1}	1.45×10^{-5}
棉五	1.30×10^{-2}	—	8.59×10^{-3}	4.49×10^{-6}	1.49×10^{-2}	—	9.64×10^{-3}	—	1.14×10^{-1}	2.96×10^{-7}	8.26×10^{-2}	1.06×10^{-5}
东货场	2.42×10^{-2}	—	6.25×10^{-3}	3.27×10^{-6}	8.35×10^{-3}	—	7.45×10^{-3}	—	1.04×10^{-1}	2.71×10^{-7}	1.36×10^{-1}	1.74×10^{-5}
运河桥客运站	1.25×10^{-2}	—	5.55×10^{-3}	2.90×10^{-6}	7.76×10^{-3}	—	1.22×10^{-2}	—	8.19×10^{-2}	2.13×10^{-7}	7.17×10^{-2}	9.22×10^{-6}

注:“—”表示无数据

表5 建设大街公交站点尘土中重金属的健康风险评价(成人)

Table 5 Health risk assessment of heavy metals in dust of bus stops in Jianshe Street (adult)

站点名称	健康风险评价/[$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]											
	Mn		Cd		Cu		Zn		Pb		Cr	
	HQ	CR	HQ	CR	HQ	CR	HQ	CR	HQ	CR	HQ	CR
润丰五金城	1.16×10^{-3}	—	1.43×10^{-3}	2.98×10^{-6}	8.53×10^{-4}	—	6.72×10^{-4}	—	6.27×10^{-3}	6.53×10^{-8}	6.03×10^{-2}	3.10×10^{-6}
谛音寺	1.13×10^{-3}	—	8.46×10^{-4}	1.77×10^{-6}	6.68×10^{-4}	—	4.11×10^{-4}	—	8.47×10^{-3}	8.81×10^{-8}	5.60×10^{-2}	2.88×10^{-6}
欧韵公园	1.27×10^{-3}	—	1.04×10^{-3}	2.17×10^{-6}	1.17×10^{-3}	—	5.19×10^{-4}	—	8.91×10^{-3}	9.27×10^{-8}	9.02×10^{-2}	4.64×10^{-6}
安建桥	1.25×10^{-3}	—	6.77×10^{-3}	1.42×10^{-5}	1.06×10^{-3}	—	5.63×10^{-4}	—	1.08×10^{-2}	1.12×10^{-7}	9.20×10^{-2}	4.73×10^{-6}
水务集团	1.22×10^{-3}	—	6.70×10^{-3}	1.40×10^{-5}	1.56×10^{-3}	—	6.56×10^{-4}	—	1.07×10^{-2}	1.12×10^{-7}	1.02×10^{-1}	5.24×10^{-6}
新世隆	1.26×10^{-3}	—	5.08×10^{-3}	1.06×10^{-5}	1.48×10^{-3}	—	5.51×10^{-4}	—	1.02×10^{-2}	1.06×10^{-7}	1.15×10^{-1}	5.90×10^{-6}
公交总公司	1.33×10^{-3}	—	5.54×10^{-3}	1.16×10^{-5}	1.18×10^{-3}	—	5.88×10^{-4}	—	1.57×10^{-2}	1.63×10^{-7}	1.35×10^{-1}	6.92×10^{-6}
河北大戏院	1.37×10^{-3}	—	4.98×10^{-3}	1.04×10^{-5}	1.61×10^{-3}	—	6.10×10^{-4}	—	1.29×10^{-2}	1.34×10^{-7}	1.23×10^{-1}	6.33×10^{-6}
市城管委	1.36×10^{-3}	—	2.67×10^{-3}	5.58×10^{-6}	1.09×10^{-3}	—	6.61×10^{-4}	—	1.16×10^{-2}	1.21×10^{-7}	1.53×10^{-1}	7.86×10^{-6}
北国商城	1.46×10^{-3}	—	5.85×10^{-3}	1.22×10^{-5}	1.58×10^{-3}	—	8.00×10^{-4}	—	1.19×10^{-2}	1.24×10^{-7}	1.65×10^{-1}	8.50×10^{-6}
省四院	1.26×10^{-3}	—	1.84×10^{-3}	3.84×10^{-6}	1.55×10^{-3}	—	6.96×10^{-4}	—	1.18×10^{-2}	1.23×10^{-7}	1.18×10^{-1}	6.09×10^{-6}
建和桥北	1.38×10^{-3}	—	5.94×10^{-4}	1.24×10^{-6}	2.80×10^{-3}	—	9.67×10^{-4}	—	1.43×10^{-2}	1.48×10^{-7}	1.21×10^{-1}	6.22×10^{-6}
棉五	1.39×10^{-3}	—	9.21×10^{-4}	1.93×10^{-6}	1.60×10^{-3}	—	1.03×10^{-3}	—	1.22×10^{-2}	1.27×10^{-7}	8.85×10^{-2}	4.55×10^{-6}
东货场	2.59×10^{-3}	—	6.69×10^{-4}	1.40×10^{-6}	8.94×10^{-4}	—	7.99×10^{-4}	—	1.12×10^{-2}	1.16×10^{-7}	1.45×10^{-1}	7.47×10^{-6}
运河桥客运站	1.34×10^{-3}	—	5.95×10^{-4}	1.24×10^{-6}	8.31×10^{-4}	—	1.31×10^{-3}	—	8.78×10^{-3}	9.13×10^{-8}	7.69×10^{-2}	3.95×10^{-6}

注:“—”表示无数据

(2)采用PBET法提取公交站点尘土重金属溶解态量发现,各站点尘土中不同重金属的溶解态量在胃和肠阶段存在差异。除在运河桥客运站Cr的溶解态量肠阶段大于胃阶段外,6种重金属在所有站点均是胃阶段溶解态量高于肠阶段。

(3)同一种重金属在建设大街各公交站点尘土中的生物可给性存在差异。Cu在40.57%~90.31%,差异明显;Zn的范围为45.67%~77.57%,在谛音寺站偏低,在运河桥客运站偏高。Cd除在安建桥站、建和桥北站和运河桥客运站偏高外,其他站点均在61.03%~75.97%范围内。Mn的生物可给性多数在70.83%~85.32%,在北国商城站较低。Pb在公交总公司站高达82.99%,其他站点均处于49.05%~65.91%范围内。Cr的生物可给性为11.36%~54.17%,差异较大,但值普遍较低。

(4)各站点重金属Cr、Mn、Cu、Zn、Cd、Pb对成人和儿童产生的非致癌风险较小。Cr和Cd对成人和儿童的致癌风险值介于癌症风险阈值范围($1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$)之内,存在可接受的致癌风险,Pb对儿童和成人的致癌风险值 $< 1.0 \times 10^{-6}$,可忽略。尽管如此,由于汽车停靠带来车身破损脱落以及燃料燃烧等会造成严重的重金属污染问题,又因人群在公交站点暴露频繁,其对成人和儿童的潜在健康风险应长期予以关注。

参 考 文 献

- Li Q, Zhou J, Chen B, et al. Toxic metal contamination and distribution in soils and plants of a typical metallurgical industrial area in southwest of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72: 2101-2109.
- Flora G, Gupta D, Tiwari A. Toxicity of lead: a review with recent updates[J]. Interdisciplinary Toxicology, 2012, 2(5): 47-58.
- Ruby M V, Davis A, Schoof R, et al. Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test[J]. Environmental Science & Technology, 1996, 30(2): 422-430.
- 崔岩山, 陈晓晨, 付瑾. 污染尘土中铅、砷的生物可给性研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 480-486.
Cui Yanshan, Chen Xiaochen, Fu Jin. Progress in study of bioaccessibility of lead and arsenic in contaminated soils[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(2): 480-486.
- Khan K, Khan H, Lu Y, et al. Evaluation of toxicological risk of foodstuffs contaminated with heavy metals in Swat, Pakistan[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 108: 224-232.
- Si W T, Ji W H, Yang F, et al. The function of constructed wetland in reducing the risk of heavy metals on human health[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 181(1-4): 531-537.
- Li J, Wei Y, Zhao L, et al. Bioaccessibility of antimony and arsenic in highly polluted soils of the mine area and health risk assessment associated with oral ingestion exposure[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 110: 308-315.
- 张辉, 刘蕊, 涂兰兰. 利用不同体外消化方法比较研究建筑灰尘Cu、Pb和Zn的生物可给性[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(8): 151-156.

- Zhang Hui, Liu Rui, Tu Lanlan. Comparison of bioaccessibility of Cu, Pb, Zn in constructive dust by *in vitro* digestion tests[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(8): 151-156.
- 9 钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 等. 利用 *in vitro* 方法研究不同铁矿对尘土砷生物可给性的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(3): 1201-1208.
- Zhong Songxiong, Yin Guangcai, Huang Runlin, et al. Effect of different iron minerals on bioaccessibility of soil arsenic using *in vitro* methods[J]. Environmental Science, 2017, 38(3): 1201-1208.
- 10 孙立强, 孙崇玉, 刘飞, 等. 淮北煤矿周边土壤重金属生物可给性及人体健康风险[J]. 环境化学, 2019, 38(7): 1453-1460.
- Sun Liqiang, Sun Chongyu, Liu Fei, et al. Bioaccessibility and healthy risk assessment of heavy metals in the soil around Huaibei coal mining area[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(7): 1453-1460.
- 11 陈廷廷, 侯艳伟, 蔡超, 等. 应用四种体外消化方法比较研究场地尘土中重金属的生物可给性及其人体健康风险[J]. 环境化学, 2018, 37(11): 2342-2350.
- Chen Tingting, Hou Yanwei, Cai Chao, et al. Bioaccessibility and human health risk assesment of heavy metals in soils by using four *in vitro* digestion methods[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(11): 2342-2350.
- 12 陈丹, 周于杰, 章佳文, 等. 基于什邡市农田尘土中 Pb、Zn 的人体健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2687-2693.
- Chen Dan, Zhou Yujie, Zhang Jiawen, et al. Human health risk assessment owing to Pb and Zn of farmland soils in Shifang City, southwest China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(12): 2687-2693.
- 13 Lee C, Li X, Shi W, et al. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics[J]. Science of the Total Environment, 2006, 356(1): 45-61.
- 14 Hu X, Zhang Y, Luo J, et al. Bioaccessibility and health risk of arsenic, mercury and other metals in urban street dusts from a megacity, Nanjing, China[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(5): 1215-1221.
- 15 U. S Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund (RAGS): EPA/540/1-89/002, part A[R]. Washington: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- 16 Hu X, Zhang Y, Ding Z H, et al. Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals(Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM2. 5 in Nanjing, China[J]. Atmospheric Environment, 2012, 57: 145-152.
- 17 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- National Environmental Protection Agency, Central Station of Environmental Monitoring of China. The background values of soil elements in China[M]. Beijing: Environmental Science Press of China, 1990.
- 18 陈丹青, 谢志宜, 张雅静, 等. 基于 PCA/APCS 和地统计学的广州市土壤重金属来源解析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6): 1014-1022.
- Chen Danqing, Xie Zhiyi, Zhang Yajing, et al. Source apportionment of soil heavy metals in guangzhou based on the PCA/APCS model and geostatistics[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(6): 1014-1022.
- 19 朱梦杰, 汤琳, 刘丹青. 交通干道沿线尘土重金属监测与评估综述[J]. 中国环境监测, 2015, 31(3): 84-91.
- Zhu Mengjie, Tang Lin, Liu Danqing. Monitor and risk assessment of heavy metals in the soils along the main road-A review[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(3): 84-91.
- 20 邵莉, 肖化云, 吴代赦, 等. 交通源重金属污染研究进展[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 445-459.
- Shao Li, Xiao Huayun, Wu Daihe, et al. Review on research on traffic-related heavy metals pollution[J]. Earth and Environment, 2012, 40(3): 445-459.
- 21 Pelfrene A, Waterlot C, Mazzuca M, et al. Assessing Cd, Pb, Zn human bioaccessibility in smelter-contaminated agricultural topsoils (northern France)[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2011, 33(5): 477-493.
- 22 Tokalioglu E, Kartal S. Multivariate analysis of the data and speciation of heavy metals in street dust samples from the organized industrial district in kayseri (turkey)[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(16): 2797-2805.
- 23 Poggio L, Vrščaj B, Schulín R, et al. Metals pollution and human bioaccessibility of topsoils in Grugliasco (Italy)[J]. Environmental Pollution, 2009, 157: 680-689.