

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.04.024

# 成都市成人血、尿液重金属浓度及铅同位素比

柳祥雲, 李佩璇, 林学忠, 干志伟, 侯麟

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610207)

**摘要:** 在成都市城市及农村地区共采集了 98 份成人血液和 42 份成人尿液样品, 利用 ICP-MS 分析了 Pb、Cd、Cr、As、Sn 等 14 种重金属浓度和铅同位素比。城市成人血液中重金属几何平均浓度(GM)为 0.01~3 129.06  $\mu\text{g/g}$  胆固醇, 城市成人尿液中重金属 GM 为 n. d. ~ 275.26  $\mu\text{g/g}$  肌酐, 农村成人血液中重金属 GM 为 0.02~3 353.58  $\mu\text{g/g}$  胆固醇。研究发现城市成人血液与尿液重金属浓度不存在显著相关, 但同一介质各重金属之间存在一定的相关性。城市、农村成人血液中 Cd、Pb、Sr、Tl、Co、Cu、Ni、V、Zn 的浓度存在显著性差异( $P < 0.05$ ), 城市成人血液、尿液, 农村成人血液中大部分元素在性别方面不存在显著性差异( $P > 0.05$ )。主成分分析发现膳食是城市和农村血液重金属的重要来源, 但来源也存在差别: 城市成人血液重金属来源还有燃煤燃烧、合金制造和交通活动, 农村的来源则是矿石开采, 农药、化肥、油漆、电子产品等的使用。整体而言, 四种同位素以<sup>208</sup>Pb 为主, <sup>206</sup>Pb、<sup>207</sup>Pb 次之, <sup>204</sup>Pb 占比最低。

**关键词:** 血液; 尿液; 重金属; 铅同位素; 来源解析

**中图分类号:** X5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2020)04-0774-07

## Concentration of heavy metals and ratios of lead isotope in human whole blood and urine from Chengdu

LIU Xiang-Yun, LI Pei-Xuan, LIN Xue-Zhong, GAN Zhi-Wei, HOU Lin

(Department of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610207, China)

**Abstract:** A total of 98 bloods and 42 urines were collected to estimate 14 heavy metals and lead isotopic ratio in adults from Chengdu using inductively coupled plasma mass spectrometry. The geometric mean concentrations (GMs) of the heavy metals in the whole blood of urban adults are in the range of 0.01 to 3 129.06  $\mu\text{g/g}$  cholesterol, and n. d. to 275.26  $\mu\text{g/g}$  urinary creatinine in the urine of adults from rural area, while the GMs of the heavy metals in the whole blood of rural adults are in the range of 0.02 to 3 353.58  $\mu\text{g/g}$  cholesterol. No significant correlation is found in heavy metal concentration between urban blood and urine, but there is a certain correlation among the heavy metals in the same medium. The concentrations of Cd, Pb, Sr, Tl, Co, Cu, Ni, V and Zn in the blood of urban and rural adults are significantly different ( $P < 0.05$ ). There is no significant difference in sex between the concentration of the heavy metals in urban adults' blood, urine and rural adults' blood ( $P > 0.05$ ). Diet is an important source of heavy metals in the urban and rural blood, and urban heavy metal sources include coal burning, alloy manufacturing and transportation activities, while rural sources contain the mining of ore, the use of pesticides, fertilizers, paints, etc. Generally, the four lead isotopes are in the order of <sup>208</sup>Pb,

收稿日期: 2019-04-11

作者简介: 柳祥雲(1997-), 男, 汉族, 重庆市奉节县人, 本科生, 研究方向为环境污染对人类健康的影响。

E-mail: 13219068127@163.com

通讯作者: 干志伟. E-mail: ganzhiwei.nk@gmail.com

$^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ , and  $^{204}\text{Pb}$ .

**Keywords:** Blood; Urine; Heavy metal; Lead isotope; Source analysis

## 1 引言

重金属污染具有长期性、累积性、隐蔽性和不可逆性等特点,它可以通过空气、水、食物等进入人体,具有显著的生物毒性<sup>[1]</sup>.此外,它们也是造成包括神经、肾脏、免疫系统的功能性紊乱以及细胞癌变在内的生物机体功能失调的成因<sup>[2]</sup>.例如铬盐主要刺激、腐蚀消化道<sup>[3]</sup>;铅超标会减缓儿童认知发展甚至降低儿童智力<sup>[4]</sup>;镉会引起人体肾衰竭<sup>[5]</sup>;钒能对内脏造成破坏,锌可以对人类神经系统和呼吸系统功能产生影响<sup>[6]</sup>;锡进入身体凝结成块后甚至会致人死亡<sup>[7]</sup>,即使是铁和铜等营养素,过量也会造成神经损伤<sup>[8]</sup>.

1999—2001年由四川省地质调查院开展的《成都盆地多目标地球化学调查》发现:成都市污染面积达到了总面积的40%,主要污染物为Hg、Cd、Pb、As、Ni<sup>[9]</sup>,矿业开采和工业污染物的大量排放是成都市土壤重金属污染、农作物含量超标的重要原因<sup>[10-11]</sup>.Guo等人<sup>[12]</sup>研究发现血液中铜和硒的含量与代谢综合征成明显正相关;Wang等人<sup>[13]</sup>通过对成都市食物研究发现膳食暴露是主要的金属暴露途径,成都市居民尤其是儿童面临着致癌和非致癌风险.Forte等人<sup>[14]</sup>发现吸烟暴露可导致血汞、血铅浓度升高,进食受污染的食物会导致尿Cd浓度升高,职业暴露可导致血液铅含量升高.国家预防医学科学院环境卫生监测历时八年的数据表明我国超过一半的城区儿童血铅超标,其中八成左右集中在工业区和车流量大的地区,28个城市儿童的血铅调查结果显示51.6%的儿童铅中毒<sup>[15]</sup>.Zeng等人<sup>[16]</sup>发现儿童血液中铅 $>5\mu\text{g/L}$ 与哮喘显著相关,且血铅和血锰的含量越高,哮喘和喘息的发生率也相应增高;而且血铅的含量同电子垃圾接触、户外活动呈正相关,同体重呈负相关.He等人<sup>[17]</sup>认为高浓度的血铅与环境中的铅污染和多种暴露途径相关.目前重金属铅污染来源解析有主成分分析法、铅同位素比等方法,而铅同位素比具有稳定可靠的优点,因此广泛用于其污染来源解析.

尿铅是从血细胞中释放然后经肾脏过滤后的液体,可以作为铅暴露水平的潜在评价指标<sup>[18]</sup>.但Barbosa等人<sup>[19]</sup>认为血铅相比于发铅、唾液铅、尿铅和粪铅是评价人体铅暴露情况最可靠的指标;

Cao等人<sup>[20]</sup>对上海市儿童血铅和尿铅的研究表明,尿铅不能作为血铅的评价指标,但血铅与尿铅呈现出相同的铅来源,可以用于分析人体铅来源;He等人<sup>[17]</sup>研究表明中国自2000年7月禁止使用含铅汽油后,儿童血铅含量有了明显的下降,但仍高于发达国家,儿童铅中毒预防和控制仍然是中国的一项长期任务.

综上所述,关于成都市非职业暴露人群人体血、尿液中重金属的相关数据报道较少,本研究目的为:1)对人体血、尿液内As、Co、Sr、Cd等14种重金属元素进行测定;2)对人体血、尿液中铅同位素的丰度进行测定;3)结合统计学方法和现有数据推测成都市人体重金属的可能来源.

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

在成都市市区和周边农村地区随机征召非职业暴露志愿者,最终分别选取60名市区和农村地区志愿者采集血液和尿液样品,并现场签订样品采集及使用同意书.采样前一天要求志愿者第二天早晨空腹来医院采集第一次晨尿样品.其中,血液样品由护士采集,每位志愿者采集4 mL静脉全血;尿液样品由志愿者现场领取采样瓶后立即收集,要求不低于20 mL.由于一部分志愿者临时放弃或采集的量不足,因此,最终采集到城市血液样品55份(男27份,女28份),城市尿液样品42份(男20份,女19份),农村地区血液样品43份(男17份,女26份).样品采集后冷藏运回实验室,并在1周内完成处理.

### 2.2 仪器和材料

仪器:美国Perkin-Elmer Sciex公司ICP-MS(NEXION300)、高速离心机(TG16-W)、电加热板(ECH-II).

材料:铅同位素丰度比标准参考物,SRM981、微量金属(PE, USA)、铈(Charleston, SC, USA)、硝酸(UPS级)、过氧化氢(UPS级).

### 2.3 样品前处理

尿液:2 mL尿液,加入2 mL 1%  $\text{HNO}_3$ ,振荡摇匀,静置30 min后用离心机1 5000 r/min高速离心10 min,随后取上清液于PP管待测.

血液:1 mL血液,依次加入2 mL  $\text{HNO}_3$ 和

1 mL  $H_2O_2$ , 振荡摇匀, 静置 30 min 后放置在加热板上 120 °C 加热 10 min, 自然冷却至室温后, 用超纯水定容至 5 mL 振荡摇匀, 1 5000 r/min 高速离心 10 min, 随后取上清液于 PP 管待测。

## 2.4 测定分析

血、尿液中重金属浓度使用 ICP-MS 进行仪器分析, 其中 As、Co、Cr、Cu、Ni、Se、V、Zn 利用碰撞模式检测, Sr、Cd、Sn、Sb、Tl、Pb 利用标准模式检测; 仪器设置如下: 射频功率 1 200 W, 等离子气体(氩气)流速 15 L/min, 雾化器气体流速 0.94 L/min, 检测器模拟级电压 -1 900 V, 检测器脉冲级电压 950 V, 扫描模式为跳峰, 峰通道数为 1, 停留时间 50 ms, 积分时间 1 000 ms, 读数重复次数为 3 次。

铅同位素丰度由 ICP-MS 测定, 仪器设置如下: 射频功率 1 200 W, 等离子气体(氩气)流速 15 L/min, 雾化器气体流速 0.94 L/min, 检测器模拟级电压 -1 900 V, 检测器脉冲级电压 950 V, 扫描模式为跳峰, 峰通道数为 1, 每个峰停留时间 1 ms,

积分时间 10 000 ms, 读数重复次数为 10 次。

## 2.5 质量控制

在血、尿重金属浓度研究中, 每 20 个样品做一个过程空白(1%  $HNO_3$ ), 过程空白与样品同步进行保证实验过程中方法的准确性。在分析过程中, 采用内标法定量所有元素, 内标为铑(Rh), 浓度为 40  $\mu\text{g/L}$ 。在测样时, 每测 20 个样品后, 测 1 个试剂空白和 1 个 20  $\mu\text{g/L}$  的标准物质。仪器的精密度和准确度表达为回收率和相对标准偏差(表 1)。在过程空白和试剂空白中都检测出了重金属, 但是其含量都低于最低样品检出浓度的 0.01%, 因此, 空白中的含量可以忽略不计。研究结果没有进行过空白含量的纠正。

在血、尿铅同位素比研究中, 采用铅同位素标准物质(SRM981)对整个测定过程进行质量控制。每 10 个样品测定一组 25  $\mu\text{g/L}$  的铅同位素标准样品, 并将其测量结果以  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表示, 测定结果均在标准范围内。

表 1 质控标准物质测定( $n=9$ )

Tab. 1 Measurement results of standard reference materials ( $n=9$ )

元素	Cd	Pb	Sb	Sn	Sr	Tl	As	Co	Cr	Cu	Ni	Se	V	Zn
RSD/%	7.8	4.7	7.9	7.2	7.7	5.7	3.8	4.5	3.6	3.9	4.8	7.8	2.1	5.6
回收率/%	98.0	104.8	95.3	94.2	97.5	104.4	99.4	102.1	100.0	99.6	101.9	103.2	98.6	114.1

## 3 结果与讨论

### 3.1 成都市成人血液、尿液中重金属含量

成都市成人血、尿液重金属浓度见表 2, 用胆固醇、尿肌酐校正后的浓度见表 3。城市成人血液中重金属几何平均浓度(GM)为 0.01~3129.06  $\mu\text{g/g}$  胆固醇, 各金属 GM 顺序为  $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Se} > \text{Sr} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Sb} > \text{V} > \text{Cd} > \text{Co} > \text{Sn} > \text{Tl}$ , 城市成人尿液中重金属 GM 为 n. d. ~275.26  $\mu\text{g/g}$  肌酐。由表 3 可知, 城市成人尿液中 Cd、Sn、Sr、Tl、As、Co、Se 的 GM 高于血液, 而 Pb、Sb、Cr、Cu、Ni、V、Zn 则相反; 血液和尿液中 Cd、Pb、Tl 和 As 呈现显著的正相关( $P < 0.05$ ), 而血 Sb 与尿 Sb 呈显著负相关( $P < 0.05$ ), Sn、Sr、Co、Cu、Ni、Se、Zn 在血液和尿液中的分布并不存在相关性( $P > 0.05$ )。农村成人血液重金属 GM 为 0.02~3 353.58  $\mu\text{g/g}$  胆固醇, 各金属 GM 顺序为  $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Se} > \text{Sr} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Sb} > \text{Co} > \text{V} > \text{Sn} > \text{Tl}$ 。农村成人血液中的 Cd、Pb、Sr、Tl、Co、Cu、Ni、V、Zn 的平均

浓度高于城市, 而 As、Sb、Sn、Cr、Se 则相反。城市和农村成人血液中 Cd、Pb、Sr、Tl、Co、Cu、Ni、V、Zn 的浓度有显著差异( $P < 0.05$ )。在性别方面, 城市成人血液中 Sn、Co、Cu 浓度存在显著性差异, 城市成人尿液中 Co、Zn 的浓度存在显著性差异, 农村成人血液中 Cd、Sr 的浓度存在显著性差异。2007 年人类生物监测委员会第二次公布的成人尿镉浓度为 4  $\mu\text{g/L}$ , 第一次公布的尿铊浓度为 5  $\mu\text{g/L}$ [21]。成都市成人尿液中这两种重金属浓度略低于以上相应数值。成都市成人血镉浓度与曼苏拉市(2.07  $\mu\text{g/L}$ )相比偏低, 而略高于德国(0.99  $\mu\text{g/L}$ )、比利时(0.69  $\mu\text{g/L}$ ) [22]。2014 年 Li 等人 [23] 报道珠江三角洲人体血液重金属中血镉为 92.82  $\mu\text{g/L}$ , 血砷为 0.55  $\mu\text{g/L}$ , 血镉为 2.45  $\mu\text{g/L}$ , 血铊为 1.92  $\mu\text{g/L}$ , 血铅为 158.84  $\mu\text{g/L}$ , 除了砷和镉以外, 其他元素浓度均高于成都。本研究中成都市成人血铅浓度(9  $\mu\text{g/L}$ )低于韩国(19.1  $\mu\text{g/L}$ )、德国(30.7  $\mu\text{g/L}$ )和美国(17.5  $\mu\text{g/L}$ ), 并且显著低于人类生物监测委员会第一次公布

的150  $\mu\text{g/L}$ <sup>[24]</sup>.

成都市工业集中且加工水平普遍不高<sup>[25]</sup>, 工业污染物大量排放到城市周边的土壤及地下水, 这可以在一定程度上解释成都市农村地区成人血液

中某些重金属浓度高于城市地区. 另外, 高志友等人<sup>[15]</sup>将成都市铅污染物的来源分为燃油铅和燃煤铅, 城市主要以燃油为主, 农村以燃煤为主, 这在一定程度上解释了城市和农村污染出现差异的原因.

表 2 成都市成人血、尿液重金属浓度( $\mu\text{g/L}$ )

Tab. 2 Adult blood and urine heavy metal concentrations in Chengdu ( $\mu\text{g/L}$ )

Content	value	Cd	Pb	Sb	Sn	Sr	Tl	As	Co	Cr	Cu	Ni	Se	V	Zn
城市 成人 血液	25%	0.22	11.07	1.10	n. d.	19.34	n. d.	1.87	0.12	5.90	691.26	2.48	213.86	0.31	4 331.62
	median	0.32	13.89	1.32	n. d.	20.59	n. d.	2.47	0.15	7.08	730.50	3.76	240.64	0.38	4 913.60
	75%	0.43	18.06	1.47	0.01	24.72	0.01	3.22	0.20	10.64	805.49	5.99	268.69	0.46	5 481.25
	Geomean	0.32	13.82	1.30	0.32	22.56	0.01	2.43	0.17	8.50	727.90	4.19	238.19	0.39	4 750.46
城市 成人 尿液	25%	1.00	2.07	0.26	n. d.	149.36	0.50	22.29	0.11	n. d.	3.65	n. d.	312.90	n. d.	251.67
	median	1.46	3.26	0.36	n. d.	197.52	0.78	40.33	0.21	n. d.	7.12	0.72	323.08	n. d.	470.29
	75%	2.66	4.74	0.43	n. d.	299.95	1.24	99.47	0.35	n. d.	13.16	3.03	331.38	n. d.	730.31
	Geomean	1.49	3.15	0.36	0.60	126.15	0.79	39.99	0.20	n. d.	6.40	1.81	320.05	n. d.	398.15
农村 成人 血液	25%	1.20	17.40	1.08	n. d.	24.64	n. d.	2.07	0.41	4.86	1 128.01	6.12	202.03	0.33	5 304.49
	median	1.88	24.07	1.52	n. d.	31.63	0.02	2.64	0.76	7.11	4 272.07	27.33	241.19	0.53	6 460.57
	75%	3.61	34.25	1.87	0.23	44.21	0.07	3.45	1.18	8.17	8 566.46	46.72	274.07	0.69	8 326.29
	Geomean	1.99	24.50	1.38	0.37	33.21	0.04	2.57	0.69	6.77	3 368.95	20.15	233.49	0.49	6 732.02

“n. d.”表示未检出

表 3 胆固醇和尿肌酐校准后成都市成人血、尿液重金属浓度( $\mu\text{g/g}$ )

Tab. 3 Heavy metal concentrations in adult blood and urine of Chengdu adults after calibration of cholesterol and urinary creatinine ( $\mu\text{g/g}$ )

Content	value	Cd	Pb	Sb	Sn	Sr	Tl	As	Co	Cr	Cu	Ni	Se	V	Zn
城市 成人 血液	25%	0.14	7.40	0.67	n. d.	11.05	n. d.	1.25	0.08	3.48	409.41	1.58	141.79	0.18	2 652.47
	median	0.20	9.09	0.87	n. d.	13.43	n. d.	1.51	0.10	5.11	471.32	2.56	156.13	0.25	3 207.20
	75%	0.31	11.12	1.00	0.01	17.36	0.01	2.01	0.14	8.10	528.92	3.67	180.60	0.32	3 684.75
	Geomean	0.23	9.00	0.85	0.19	14.25	0.01	1.62	0.11	5.43	469.20	2.57	155.95	0.24	3 129.06
城市 成人 尿液	25%	0.55	1.54	0.14	n. d.	95.77	0.39	17.37	0.09	n. d.	3.28	n. d.	148.20	n. d.	192.04
	median	1.17	2.14	0.24	n. d.	135.37	0.53	28.53	0.13	n. d.	5.33	0.29	216.00	n. d.	290.69
	75%	1.79	2.96	0.36	n. d.	204.90	0.73	48.97	0.18	n. d.	7.01	1.76	349.28	n. d.	412.25
	Geomean	1.03	2.18	0.25	0.38	87.21	0.55	27.65	0.14	n. d.	4.42	1.11	221.27	n. d.	275.26
农村 成人 血液	25%	0.57	8.05	0.53	n. d.	11.90	n. d.	2.07	0.19	2.25	610.03	3.15	96.60	0.16	2 523.16
	median	0.99	13.66	0.70	n. d.	15.73	0.01	2.64	0.41	3.40	2 042.34	12.09	122.13	0.25	3 399.43
	75%	1.69	15.97	0.94	0.13	21.57	0.03	3.45	0.59	4.31	4 090.57	23.37	139.26	0.35	4 517.19
	Geomean	0.99	12.21	0.69	0.18	16.54	0.02	1.28	0.34	3.37	1 678.25	10.04	116.32	0.25	3 353.58

“n. d.”表示未检出

### 3.2 成都市成人血液重金属污染源分析

3.2.1 城市成人血液重金属污染源分析 旋转后因子载荷矩阵见表 4. 因子 1 主要是由 Cd、Pb、

As、Se、Zn 组成. 煤炭是 Pb、Cd、Cr、As 的重要来源<sup>[26]</sup>, 燃煤产生的颗粒物可通过呼吸等途径进入人体<sup>[27]</sup>. 另外我们前期研究成都市食品重金属污

染时发现 Zn、Cu、As、Cd、Pb 也是主要污染物<sup>[13]</sup>, 因此我们认为膳食暴露是人体重金属的主要来源. 因子 2 主要是由 Sr、Cu、V 组成. Cu、V、Sr 组成的材料广泛用于催化、储能、传感器等领域<sup>[28-29]</sup>, 在日常生活中通过人体接触或制造过程中产生的碎屑经呼吸道进入人体, 因此生活中电子产品的使用过程可能是血液重金属的来源之一. 因子 3 主要由 Sn、Sb 组成. Sn、Sb 应用于合金制造业<sup>[30]</sup>, 生活中合金使用过程产生的碎屑可能是血液中 Sn 和 Sb 的主要来源. 因子 4 主要是 Co. Co、Cr 和 Pb 与交通活动有关, Co 和 Cr 也是汽车零部件生产所用的不锈钢和合金钢必不可少的添加物质<sup>[31]</sup>, 因此, 交通运输也是人体血液重金属的重要来源之一.

表 4 因子载荷矩阵

Tab. 4 The component matrix

指标	方差极大正交旋转后因子载荷矩阵			
	F1	F2	F3	F4
Cd	0.617	-0.014	-0.110	0.326
Pb	0.828	-0.037	-0.126	0.262
Sb	0.248	0.159	0.862	0.141
Sn	-0.071	-0.135	0.917	0.046
Sr	0.216	0.704	-0.117	0.000
Tl	-0.015	-0.113	0.443	-0.266
As	0.656	0.220	0.035	-0.327
Co	0.053	0.161	0.040	0.799
Cr	-0.231	0.540	-0.225	0.134
Cu	0.485	0.644	0.006	-0.073
Ni	0.041	0.322	0.221	0.147
Se	0.692	0.294	0.351	-0.279
V	0.103	0.822	0.059	0.058
Zn	0.721	0.126	0.250	-0.006

3.2.2 农村成人血液重金属污染源分析 由表 5 可知, 因子 1 为 Zn、Cu、Co 的组合. 同城市人群一致, 结合前期研究<sup>[13]</sup>, 我们认为食物可能是农村人体血液重金属的来源之一. 因子 2 为 Sn、Sb、Tl 的组合. 张红英等<sup>[32]</sup>曾报道以广东云浮黄铁矿为原料的硫酸厂几乎遍布全国, 云浮黄铁矿年产量 300 万吨, 每年进入环境中的 Tl 达 15 吨, 并且在其他的矿业生产中也产生了大量的 Sn、Sb, 同时 Sn、Sb 应用在合金制造业<sup>[30]</sup>, 因此矿山的开采活动以及合金的使用是血液重金属 Sn、Sb、Tl 的来源之一. 因子 3 为 As、Se、Pb 的组合. Pb 被用于珠宝、油漆、餐盒、电池的制作, As 主要来源于化

肥、农药以及黄铁矿和砷黄铁矿<sup>[33]</sup>, 通过农作物吸收, 最终进入人体<sup>[16]</sup>. 而因子 4 是 Cr、Sr、V 的组合. 大米中 Cr 含量较高, 深色蔬菜中 Mn、Sb 和 Sr 含量<sup>[34]</sup>, Sr 和 V 同时也被广泛用于催化、储能等领域<sup>[33-34]</sup>, 因此我们认为饮食和储能材料的生产使用是血液中重金属的可能来源之一. 因子 5 是 Cd. 而 Cd 是生产镍铬电池的主要物质、也是杀虫剂、除草剂和杀菌剂的添加剂, 当其产品在日常生活中被使用或被丢弃时就可以通过摄入、直接接触等方式进入人体<sup>[35]</sup>, 因此, 农业生产也是血液重金属的重要来源之一.

表 5 因子载荷矩阵

Tab. 5 The component matrix

指标	方差极大正交旋转后因子载荷矩阵				
	F1	F2	F3	F4	F5
Cd	0.041	-0.115	-0.033	-0.024	0.787
Pb	0.305	0.013	0.676	-0.094	0.258
Sb	0.312	0.870	0.057	0.124	-0.020
Sn	-0.037	0.927	-0.034	0.159	-0.036
Sr	0.123	0.059	-0.089	0.734	0.477
Tl	-0.012	0.860	0.101	-0.078	0.023
As	-0.025	0.026	0.744	0.325	-0.128
Co	0.867	0.131	-0.092	0.240	-0.088
Cr	0.117	0.036	0.280	0.815	-0.135
Cu	0.890	0.042	0.175	0.229	-0.007
Ni	0.252	-0.195	-0.266	0.069	-0.472
Se	0.106	0.065	0.742	0.159	0.013
V	0.299	0.163	0.266	0.642	-0.321
Zn	0.782	0.048	0.447	-0.085	0.013

### 3.3 成都市成人居民血液和尿液中铅同位素丰度比

血液被认为是评价环境毒理学生物监测最具代表性的方法, 而铅同位素被广泛用于铅污染源解析的研究. 铅有四种稳定的同位素, 其中<sup>204</sup>Pb 在古老的矿石和陨石中含量较高, 但在现代环境中含量低并且很稳定, 所以大多数研究者并不将其当作一种放射性元素, 而是作为一种基准去判断其他三种同位素的增长情况<sup>[4]</sup>. 本研究中城市、农村血、尿液铅同位素丰度比值列于表 6. 整体而言, 四种同位素以<sup>208</sup>Pb 为主, <sup>206</sup>Pb <sup>207</sup>Pb 次之, <sup>204</sup>Pb 占比最低. 由于目前研究成都市居民铅同位素比的报道较少, 所以无法进行进一步分析, 但现有数据

可以为今后人体血液、尿液中铅污染来源解析奠定 一定的基础。

表6 成都市成人血、尿液铅同位素比值

Tab. 6 Adult blood and urine lead isotope ratios in Chengdu

Value	城市成人尿液( $n=59$ )			城市成人血液( $n=55$ )			农村成人血液( $n=50$ )		
	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
Mean	2.114 6	0.860 9	0.054 0	2.110 9	0.855 4	0.054 5	2.119 5	0.859 2	0.054 4
Std. Deviation	0.012 9	0.005 5	0.003 2	0.013 4	0.004 3	0.000 3	0.013 1	0.006 4	0.000 4
Minimum	2.093 9	0.853 1	0.034 3	2.089 7	0.847 7	0.053 7	2.094 7	0.849 6	0.053 7
Maximum	2.158 7	0.878 7	0.055 6	2.132 9	0.863 3	0.055 3	2.173 0	0.882 9	0.056 0

## 4 结 论

14种重金属元素在城市成人血液、尿液以及农村成人血液中的含量检测结果显示:

1) 人体中的重金属元素并不是独立存在,相互之间存在着复杂的相关关系,其中城市成人尿液中的Cd、Sn、Sr、Tl、As、Co、Se的几何平均浓度高于血液,而Pb、Sb、Cr、Cu、Ni、V、Zn出现了相反的现象;

2) 城市、农村成人血液中Cd、Pb、Sr、Tl、Co、Cu、Ni、V、Zn的浓度有显著差异( $P<0.05$ ),城市成人血液、尿液,农村成人血液中大部分元素在性别方面不存在显著性差异( $P>0.05$ );

3) 尽管主成分的结果显示膳食是城市、农村血液重金属的重要来源,但是城市的来源还有燃煤燃烧、合金制造和交通活动,农村的来源还存在矿石开采,农药、化肥、油漆等的使用;另外,我们也对成都市人体铅同位素进行了报道,整体而言,四种同位素以 $^{208}\text{Pb}$ 为主、 $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}$ 次之, $^{204}\text{Pb}$ 占比最低。

### 参考文献:

[1] 徐赐贤. 人体生物材料中重金属的 ICP-MS 分析方法研究[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2013.

[2] Zukowska J, Biziuk M. Methodological evaluation of method for dietary heavy metal intake [J]. J Food Sci, 2010, 73: R21.

[3] 严丽, 刘慧颖. 几种常见金属污染环境对人体危害的简介[J]. 黑龙江冶金, 2004(4): 45.

[4] Oskarsson A, Hallén I P, Sundberg J. Exposure to toxic elements via breast milk [J]. Analyst, 1995, 120: 765.

[5] 王懿. 食品中重金属对人体的危害及预防探析[J]. 现代食品, 2016(08): 27.

[6] Chatterjee A, Banerjee R N. Determination of lead

and other metals in a residential area of Greater Calcutta [J]. Sci Total Environ, 1999, 227: 175.

[7] 肖安东, 匡光伟. 重金属对畜产品安全的危害与对策[J]. 中国兽药杂志, 2011, 45: 49.

[8] Madsen E, Gitlin J D. Copper and iron disorders of the brain [J]. Annu Rev Neurosci, 2007, 30: 317.

[9] 杨波. 成都市近地表大气尘铅同位素示踪铅污染来源研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2004.

[10] 朱礼学. 成都平原西部土壤中镉的分布与镉污染[J]. 四川环境, 2001, 20: 41.

[11] 谭婷, 王昌全, 李冰, 等. 成都平原土壤铅污染及其评价[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14: 71.

[12] Guo X, Yang Q, Zhang W, et al. Associations of blood levels of trace elements and heavy metals with metabolic syndrome in Chinese male adults with microRNA as mediators involved [J]. Environ Pollut, 2019, 248: 66.

[13] Wang R, Zhong B, Pi L, et al. Concentrations and exposure evaluation of metals in diverse food items from Chengdu, China [J]. Arch Environ Con Tox, 2017, 74: 1.

[14] Forte G, Fadda C, Bocca B, et al. Association between exposure to heavy metals and systemic sclerosis: the levels of Al, Cd, Hg, and Pb in blood and urine of patients [J/OL]. Biol Trace Elem Res, 2019, 190: 1 [2019-03-21]. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1509-5>.

[15] 高志友, 尹观, 倪师军, 等. 成都市城市环境铅同位素地球化学特征[J]. 中国岩溶, 2004, 23: 267.

[16] Zeng X, Xu X, Zheng X, et al. Heavy metals in PM<sub>2.5</sub> and in blood, and children's respiratory symptoms and asthma from an e-waste recycling area [J]. Environ Pollut, 2016, 210: 346.

[17] He K, Wang S, Zhang J. Blood lead levels of children and its trend in China [J]. Sci Total Environ, 2009, 407: 3986.

[18] Angle C R, Manton W I, Stanek K L. Stable iso-

- tope identification of lead sources in preschool children—the Omaha study [J]. *Clin Toxicol*, 1995, 33: 657.
- [19] Barbosa F J, Tanus-Santos J E, Gerlach R F, *et al.* A critical review of biomarkers used for monitoring human exposure to lead: advantages, limitations, and future needs [J]. *Environ Health Persp*, 2005, 113: 1669.
- [20] Cao S, Duan X, Zhao X, *et al.* Levels and source apportionment of children's lead exposure: could urinary lead be used to identify the levels and sources of children's lead pollution? [J]. *Environ Pollut*, 2015, 199: 18.
- [21] Schulz C, Wilhelm M, Heudorf U, *et al.* Update of the reference and HBM values derived by the German human biomonitoring commission [J]. *Int J Hyg Envir Heal*, 2012, 215: 26.
- [22] 王小京. 人体中镉、铅、汞有毒重金属含量水平的对比研究[J]. *国外医学情报*, 2003(8): 14.
- [23] Li J, Cen D, Huang D, *et al.* Detection and analysis of 12 heavy metals in blood and hair sample from a general population of pearl river delta area [J]. *Cell Biochem Biophys*, 2014, 70: 1663.
- [24] Lee J W, Lee C K, Chan S M, *et al.* Korea national survey for environmental pollutants in the human body 2008: heavy metals in the blood or urine of the Korean population [J]. *Int J Hyg Envir Heal*, 2012, 215: 449.
- [25] 张长青, 毛景文, 吴锁平, 等. 川滇黔地区 MVT 铅锌矿床分布、特征及成因[J]. *矿床地质*, 2005, 24: 336.
- [26] 王雄军, 赖健清, 鲁艳红, 等. 基于因子分析法研究太原市土壤重金属污染的主要来源[J]. *生态环境*, 2008, 17: 671.
- [27] 张银晓, 卢春颖, 张剑, 等. 民用燃煤排放细颗粒中金属元素排放特征及单颗粒分析[J]. *中国环境科学*, 2018, 38: 75.
- [28] 吴颖, 朱曾涛. 钒对金刚石工具新型铜基结合剂组织和性能的影响[J]. *云南民族大学学报: 自然科学版*, 2016, 25: 322.
- [29] 魏晓丽. 有序多孔  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  储能材料的制备[D]. 唐山: 华北理工大学, 2017.
- [30] Jiang B, Yin H M, Yang Q S, *et al.* Effect of stannum addition on microstructure of as-cast and as-extruded Mg-5Li alloys [J]. *T Nonferrous Metal Soc*, 2011, 21: 2378.
- [31] Dhillon A S, Tarbutton G L, Levin J L, *et al.* Pesticide/environmental exposures and Parkinson's disease in East Texas [J]. *J Agromedicine*, 2008, 13: 37.
- [32] 张红英, 陈永亨. 铊的环境污染与迁移转化[J]. *广东微量元素科学*, 2000, 7: 1.
- [33] Gumpu M B, Swaminathan S, Uma M K, *et al.* A review on detection of heavy metal ions in water—an electrochemical approach [J]. *Sensor Actuat B: Chem*, 2015, 213: 515.
- [34] Liu X, Jiang J, Yan Y, *et al.* Distribution and risk assessment of metals in water, sediments, and wild fish from Jinjiang River in Chengdu, China [J]. *Chemosphere*, 2018, 196: 45.
- [35] 梁林涵, 钟格梅, 黄林, 等. 广西环境镉污染重点地区居民饮用水、食物和空气镉暴露量调查[J]. *实用预防医学*, 2018, 25: 1340.

#### 引用本文格式:

中文: 柳祥雲, 李佩璇, 林学忠, 等. 成都市成人血、尿液重金属浓度及铅同位素比[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2020, 57: 774.

英文: Liu X Y, Li P X, Lin X Z, *et al.* Concentration of heavy metals and ratios of lead isotope in human whole blood and urine from Chengdu [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2020, 57: 774.