·基层园地·

基于血尿同步分析 7 种非必需微量元素暴露水平特征及健康风险

张润松，赵小颖，陈雨萍

【关键词】 非必需微量元素；血液；尿液；暴露水平；健康风险
DOI:10.3969/j.issn.1671-0800.2026.01.020
【中图分类号】 R115　【文献标志码】 A　【文章编号】 1671-0800(2026)01-0079-04

人体内的金属及类金属元素按生理必需性分为必需元素与非必需元素。其中铅、银、镉、砷、铊、锑、锶为机体新陈代谢或生长发育不需要的非必需元素，部分元素具有明确毒性：铅可损伤神经、血液、生殖及骨骼系统[1]；镉具有肾毒性且可致骨骼损伤[2]；砷被国际癌症研究机构（IARC）列为Ⅰ类致癌物，可诱发神经系统疾病、皮肤病及癌症[3]；铊具有强烈神经毒性，可经呼吸道、消化道及皮肤吸收[4]；锑可与蛋白质巯基结合抑制生物酶活性，关联肺毒性、遗传毒性及致癌风险[5]。因此，监测一般人群非必需微量元素内暴露水平，分析其影响因素，对评估健康风险、制定防控策略具有重要意义。本研究以嵊州市一般人群为对象，探讨血、尿中 7 种非必需微量元素暴露特征，为区域公共卫生干预提供依据，现报道如下。

1　资料与方法

1.1　样本量计算　基于横断面研究样本量公式 $n=(Z_{\alpha/2}+Z_{\beta})^2\sigma^2/\delta^2$ 计算，采用流行病学研究常用标准设定α=0.05（双侧，$Z_{\alpha/2}$=1.96）、β=0.2（把握度 80%，Z_{β}=0.84），设定σ=3.2 μg/L，取σ的 20%为容许误差δ，考虑 10%失访率，计算得所需最小样本量为 144 人，确保统计效能。

1.2　研究对象　以 2023 年嵊州市常住人口（调查前 12 个月内居住≥6 个月）为研究对象，排除军营等特殊机构人群，经临床确诊患有肝硬化、慢性肾衰竭（CKD 3 期及以上）等严重肝肾功能疾病者，3 个月内服用锌、硒、碘等微量元素制剂（包括膳食补充剂、药用制剂）者。采用分层随机抽样法，按区域（上中下游）选取 A 镇、B 镇和 C 镇 3 个乡镇为调查单元，每个单元按年龄（3 ～ 5 岁、6 ～ 11 岁、12 ～ 18 岁、19 ～ 39 岁、40 ～ 59 岁、60 ～ 79 岁）分为 6 层，每层再按性别分为 2 层，共 12 层，每层随机抽取 4 人，计划纳入 144 人，实际纳入 176 人。本研究获得嵊州市疾病预防控制中心伦理审查委员会审批，调查前与研究对象或其监护人签署书面知情同意书。

1.3　研究方法

1.3.1　问卷调查　由经培训后考核合格的调查员采用电子化问卷（Pad 现场录入）收集信息，核心内容包括：（1）个人基本信息，包括年龄、性别、文化程度；（2）生活习惯，包括吸烟（当前吸烟或近 1 年戒烟）、饮酒（1 年内达 12 次饮酒）；（3）家庭居住环境（居住乡镇、周边是否有污染源）。

1.3.2　生物样本采集　采集研究对象空腹静脉血（抗凝血 4 ml），4 h 内分装，2 ～ 6 ℃冷链转运至浙江省疾病预防控制中心。采集研究对象随机中段尿（12 岁及以上≥80 ml，12 岁以下≥50 ml），采用无菌聚丙烯瓶收集，同条件冷链转运。

1.3.3　检测方法　采用电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）检测血、尿中铅、银、镉、砷、铊、锑、锶元素含量，7 种元素的检出限见表 1。

1.4　质量控制　制定统一实施方案及工作手册，对调查员、检测人员进行系统培训，考核通过后开展预

表 1　7 种微量元素的检出限　μg/L

类型	铅	银	镉	砷	铊	锑	锶
检出限	0.104	0.090	0.072	0.028	0.029	0.035	0.072

基金项目：嵊州市科技计划项目（202318028）
作者单位：312400 嵊州，嵊州市疾病预防控制中心
通信作者：张润松，Email：18601504@qq.com

调查，确保一致性。ICP-MS 校准相对标准偏差（RSD）小于 5%，检测质控样品元素回收率 90%以上。问卷和数据管理采用双人核对电子问卷一致性 99%以上。

1.5　统计方法　采用 Stata1 8.0 软件进行统计分析，符合正态分布的数据（浓度）采用几何均数及其 95%置信区间（95% *CI*）进行描述，组间比较用 Mann-Whitney *U* 检验；年龄、区域分组用 Kruskal-Wallis *H* 检验。$P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2　结果

2.1　血、尿中 7 种非必需微量元素水平　血液中 7 种元素几何均数从高到低依次为锶、铅、锑、砷、镉、银、铊；尿液中依次为锶、砷、铅、镉、铊、锑、银，具体水平见表 2。

2.2　不同特征人群 7 种元素暴露水平比较

2.2.1　不同性别 7 种元素暴露水平比较　男性血铅、砷浓度高于女性（均 $P < 0.05$），其余元素和尿中 7 种元素差异均统计学意义（均 $P > 0.05$），见表 3。

2.2.2　不同年龄段 7 种元素暴露水平比较　血中铅、铊、镉浓度及尿中铅、镉浓度随年龄增长呈升高趋势（均 $P < 0.05$），血中锑浓度则随年龄增长呈下降趋势（均 $P < 0.05$），血银、砷浓度和尿中铊、锶浓度 18 ～ 59 岁人群高于其他年龄段（均 $P < 0.05$），血中锶浓度 3 ～ 17 岁人群高于其他年龄段（$P < 0.05$），其余元素差异均无统计学意义（均 $P > 0.05$），见表 4。

2.2.3　不同生活习惯 7 种非必需微量元素水平比较　成人中吸烟和饮酒者血铅浓度，饮酒者血砷浓度均高于相应者（均 $P < 0.05$），不饮酒者血锑高于饮酒者（$P < 0.05$）；尿中 7 种非必需微量元素差异均无统计学意义（均 $P > 0.05$），见表 5。

2.2.4　不同区域 7 种非必需微量元素水平比较　B 镇居民血银、锑浓度高于其他两镇，A 镇血锶浓度高于其他两镇（均 $P < 0.05$）；B 镇尿液铅、镉、锑、铊高于其他两镇，C 镇尿液砷、锶高于其他两镇（均 $P < 0.05$），见表 6。

3　讨论

本研究人群血铅几何均数为 12.77 μg/L 显著低于青岛市人群 26.03 μg/L[6]，与河南省居民血铅水平

表 2　嵊州市一般人群血、尿中 7 种非必需微量元素水平　μg/L

元素	血液		尿液	
	浓度范围	几何均数（95% *CI*）	浓度范围	几何均数（95% *CI*）
铅	5.46 ～ 58.93	12.77（11.99，13.60）	0.49 ～ 12.84	2.20（2.02，2.39）
银	0.04 ～ 1.42	0.09（0.08，0.10）	0.01 ～ 1.42	0.02（0.02，0.02）
镉	0.08 ～ 11.01	0.58（0.49，0.68）	0.14 ～ 4.15	0.94（0.84，1.05）
锑	2.47 ～ 6.47	3.42（3.30，3.54）	0.03 ～ 4.30	0.13（0.12，0.14）
铊	0.02 ～ 0.13	0.04（0.04，0.04）	0.00 ～ 1.25	0.26（0.23，0.28）
砷	0.78 ～ 29.46	2.01（1.83，2.22）	0.16 ～ 1 095.81	30.39（26.40，34.97）
锶	10.34 ～ 46.62	21.32（20.41，22.27）	0.05 ～ 2146.79	144.26（123.70，168.24）

表 3　不同性别血、尿中 7 种非必需微量元素水平比较　μg/L

类型	元素	男性（*n*=89）	女性（*n*=87）	*Z* 值	*P* 值
血液	铅	14.40（13.04，15.89）	11.30（10.54，12.12）	3.54	＜ 0.05
	银	0.09（0.08，0.10）	0.09（0.08，0.10）	0.06	＞ 0.05
	镉	0.72（0.55，0.94）	0.47（0.40，0.54）	1.31	＞ 0.05
	锑	3.34（3.18，3.51）	3.49（3.32，3.67）	1.46	＞ 0.05
	铊	0.04（0.04，0.04）	0.04（0.04，0.04）	0.61	＞ 0.05
	砷	2.12（1.88，2.40）	1.91（1.64，2.22）	1.99	＜ 0.05
	锶	21.17（19.86，22.58）	21.47（20.22，22.80）	0.07	＞ 0.05
尿液	铅	2.45（2.17，2.77）	1.97（1.75，2.21）	1.37	＞ 0.05
	银	0.02（0.02，0.03）	0.02（0.02，0.03）	0.45	＞ 0.05
	镉	0.92（0.79，1.08）	0.96（0.82，1.13）	0.36	＞ 0.05
	锑	0.13（0.12，0.15）	0.12（0.10，0.13）	0.37	＞ 0.05
	铊	0.26（0.22，0.30）	0.26（0.23，0.29）	1.92	＞ 0.05
	砷	33.41（27.25，40.95）	27.58（22.68，33.52）	0.79	＞ 0.05
	锶	149.08（115.94，191.69）	139.50（116.51，167.03）	0.25	＞ 0.05

表 4　不同年龄段血、尿中 7 种非必需微量元素水平比较　μg/L

类型	元素	3 ～ 17 岁（n=89）	18 ～ 59 岁（n=58）	60 岁及以上（n=29）	H 值	P 值
血液	铅	10.53（9.90，11.20）	14.85（13.17，16.75）	17.07（14.64，19.90）	37.96	＜ 0.05
	银	0.09（0.08，0.10）	0.10（0.08，0.11）	0.08（0.07，0.10）	6.13	＜ 0.05
	镉	0.30（0.26，0.34）	1.10（0.82，1.46）	1.28（0.98，1.67）	88.84	＜ 0.05
	锑	3.77（3.57，3.98）	3.11（2.98，3.25）	3.05（2.93，3.17）	30.97	＜ 0.05
	铊	0.038（0.036，0.040）	0.042（0.038，0.046）	0.046（0.040，0.052）	8.76	＜ 0.05
	砷	1.64（1.45，1.85）	2.51（2.07，3.04）	2.46（2.08，2.91）	26.44	＜ 0.05
	锶	22.34（20.89，23.89）	19.53（18.24，20.91）	22.00（20.07，24.12）	7.76	＜ 0.05
尿液	铅	1.88（1.69，2.10）	2.57（2.19，3.01）	2.60（2.12，3.19）	14.44	＜ 0.05
	银	0.02（0.02，0.03）	0.02（0.02，0.03）	0.02（0.02，0.03）	1.12	＞ 0.05
	镉	0.59（0.53，0.66）	1.41（1.20，1.65）	1.77（1.39，2.26）	78.04	＜ 0.05
	锑	0.14（0.12，0.16）	0.11（0.10，0.13）	0.12（0.10，0.15）	5.40	＞ 0.05
	铊	0.22（0.20，0.25）	0.31（0.25，0.39）	0.27（0.22，0.33）	18.99	＜ 0.05
	砷	29.07（24.36，34.69）	32.11（25.34，43.79）	31.18（23.73，40.96）	0.89	＞ 0.05
	锶	119.51（98.98，144.30）	184.86（132.57，257.78）	156.54（114.97，213.16）	15.80	＜ 0.05

表 5　不同吸烟、饮酒状态下成人血液、尿液中 7 种非必需微量元素水平比较　μg/L

类型	元素	吸烟（n=30）	不吸烟（n=57）	Z 值	P 值	饮酒（n=36）	不饮酒（n=51）	Z 值	P 值
血液	铅	20.10（16.88，23.95）	13.59（12.34，14.97）	3.54	＜ 0.05	18.55（15.72，21.90）	13.74（12.41，15.20）	2.69	＜ 0.05
	银	0.08（0.07，0.09）	0.10（0.08，0.12）	0.06	＞ 0.05	0.08（0.07，0.09）	0.10（0.08，0.12）	0.76	＞ 0.05
	镉	2.49（1.71，3.62）	0.77（0.64，0.93）	1.31	＞ 0.05	1.53（1.03，2.27）	0.95（0.76，1.18）	1.75	＞ 0.05
	锑	3.00（2.88，3.12）	3.14（3.00，3.28）	1.46	＞ 0.05	2.98（2.88，3.08）	3.17（3.02，3.32）	2.02	＜ 0.05
	铊	0.04（0.04，0.05）	0.05（0.04，0.05）	0.61	＞ 0.05	0.04（0.04，0.05）	0.05（0.04，0.05）	1.39	＞ 0.05
	砷	2.69（2.20，3.28）	2.40（1.99，2.88）	1.99	＞ 0.05	2.89（2.42，3.44）	2.25（1.84，2.74）	2.48	＜ 0.05
	锶	20.16（18.32，22.18）	20.41（19.04，21.88）	0.07	＞ 0.05	20.55（18.61，22.68）	20.17（18.88，21.54）	0.21	＞ 0.05
尿液	铅	3.11（2.54，3.82）	2.34（2.01，2.72）	0.19	＞ 0.05	2.62（2.17，3.16）	2.55（2.16，3.02）	0.33	＞ 0.05
	银	0.02（0.02，0.03）	0.02（0.02，0.03）	1.26	＞ 0.05	0.02（0.02，0.03）	0.02（0.02，0.03）	1.12	＞ 0.05
	镉	1.51（1.19，1.92）	1.53（1.30，1.80）	0.70	＞ 0.05	1.37（1.11，1.70）	1.64（1.38，1.94）	0.62	＞ 0.05
	锑	0.13（0.11，0.16）	0.11（0.09，0.12）	0.95	＞ 0.05	0.11（0.09，0.13）	0.12（0.10，0.14）	0.79	＞ 0.05
	铊	0.27（0.23，0.33）	0.31（0.25，0.39）	0.61	＞ 0.05	0.27（0.23，0.33）	0.31（0.25，0.40）	1.52	＞ 0.05
	砷	37.94（30.47，47.26）	28.97（21.06，39.85）	0.78	＞ 0.05	34.91（26.43，46.11）	29.76（21.35，41.46）	0.05	＞ 0.05
	锶	199.63（157.14，253.62）	163.13（114.96，231.48）	0.65	＞ 0.05	186.31（149.22，232.63）	167.20（113.55，246.37）	0.29	＞ 0.05

表 6　不同区域人群血、尿中 7 种非必需微量元素水平比较　μg/L

类型	元素	A 镇（n=54）	B 镇（n=58）	C 镇（n=64）	H 值	P 值
血液	铅	13.07（11.59，14.73）	12.57（11.20，14.10）	12.72（11.52，14.03）	0.48	＞ 0.05
	银	0.07（0.07，0.08）	0.15（0.12，0.18）	0.07（0.05，0.07）	82.91	＜ 0.05
	镉	0.60（0.45，0.79）	0.53（0.41，0.68）	0.62（0.46，0.82）	0.38	＞ 0.05
	锑	3.25（3.07，3.44）	3.71（3.46，3.97）	3.30（3.14，3.47）	14.86	＜ 0.05
	铊	0.04（0.04，0.04）	0.04（0.04，0.05）	0.04（0.04，0.04）	2.15	＞ 0.05
	砷	2.16（1.84，2.52）	1.99（1.64，2.40）	1.92（1.64，2.26）	2.55	＞ 0.05
	锶	23.13（21.32，25.11）	19.99（18.49，21.61）	21.10（19.14，22.58）	6.03	＜ 0.05
尿液	铅	2.09（1.79，2.43）	2.60（2.12，3.19）	2.24（1.91，2.63）	11.36	＜ 0.05
	银	0.02（0.02，0.02）	0.02（0.02，0.03）	0.02（0.02，0.02）	5.75	＞ 0.05
	镉	1.04（0.84，1.29）	1.77（1.39，2.26）	0.82（0.68，0.99）	49.47	＜ 0.05
	锑	0.11（0.09，0.13）	0.12（0.10，0.15）	0.12（0.11，0.13）	9.35	＜ 0.05
	铊	0.24（0.19，0.31）	0.27（0.22，0.33）	0.26（0.23，0.31）	13.50	＜ 0.05
	砷	23.91（18.21，31.41）	31.18（23.73，40.96）	35.68（29.70，42.85）	6.88	＜ 0.05
	锶	97.17（66.98，141.00）	156.54（114.97，213.16）	235.84（184.25，295.72）	27.32	＜ 0.05

（16.15 μg/L）相当[7]，血镉几何均数为 0.58 μg/L 低于海口市（0.90 μg/L）[8]和贵州省 5 县（0.612 ～ 0.915 μg/L）[9]，血锑几何均数为 3.42 μg/L 低于新疆地区（5.252 μg/L）[10]、湘潭市（19.00 μg/L）[11]，提示研究区域人群未出现明显的铅、镉、锑暴露异常；血砷几何均数为 2.01 μg/L 远高于新疆地区（0.681 ～ 0.778 μg/L）[10]、贵州省 5 县

（0.787 ～ 0.940 μg/L）[9]，提示本研究人群存在一定程度的砷暴露特征，需结合当地环境介质中砷的分布情况分析暴露来源；有关血银、铊、锶内暴露水平的报告相对较少，本研究报告为后继研究提供参考数据。

从元素暴露的整体规律来看，本研究结果进一步验证了非必需微量元素暴露的“累积效应”与“环境依赖性”。（1）年龄效应：60 岁及以上人群血铅、镉显著升高，可能与长期低剂量暴露的累积效应有关。铅、镉在骨骼、肾脏中半衰期长达数年至数十年，随年龄增长代谢能力下降，蓄积量增加；而血锑随年龄降低，可能与青少年更多接触含锑消费品（如电子产品外壳、塑料添加剂）有关[12]。（2）生活习惯影响：吸烟、饮酒者血铅、砷升高，因烟草燃烧释放铅、砷（烟草叶片可富集土壤中重金属），酒精损伤胃肠道黏膜屏障，促进重金属吸收；且二者对尿液元素无显著影响，提示血液更适合反映短期生活习惯相关的暴露变化。（3）区域差异机制：B 镇血银、锑浓度显著偏高，结合当地产业历史分析，20 世纪 90 年代近十年的蓄电池工厂生产活动或为核心诱因。从生产工艺特征来看，铅蓄电池板栅制造需添加 1.8%～ 12%的铅锑合金以提升机械强度与耐腐蚀性，熔化铸造环节挥发的 Sb_2O_3 粉尘若环保处置不足，会经大气沉降、土壤渗透长期留存，通过膳食摄入与呼吸暴露进入人体累积，这与铅电池生产中锑氧化物暴露导致人体内外锑负荷升高的研究结论一致[13]；而原料粗铅中伴生的银元素，会在电解精炼过程中富集于阳极泥（含银量可达较高水平）形成持续暴露来源。虽本研究未直接检测当地环境介质，但既往研究证实，工业历史排放与人群生物样本中对应元素浓度存在明确正相，结合 B 镇当前血银、血锑的异常暴露特征，可推测历史蓄电池工厂排放与人群暴露存在关联性。C 镇尿锶偏高，可能与当地饮用水、土壤中锶本底值较高有关（锶广泛存在于碳酸盐岩地区）[14]。

本研究局限性包括样本量有限、未追踪季节变化、未分析职业暴露细节。今后应扩大样本，结合环境介质检测（土壤、水）和健康结局（如肾功能、神经功能）开展追踪研究。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

参 考 文 献

[1] 邬堂春.职业卫生与职业医学[M].8 版.北京：人民卫生出版社，2017:389-393.

[2] Lentini P, Zanoli L, Granata A, et al. Kidney and heavy metals-The role of environmental exposure[J]. Mol Med Rep, 2017, 15(5): 3413-3419.

[3] 王秀红,边建朝.微量元素砷与人体健康[J].国外医学医学地理册，2005,26(3):101-105.

[4] 贾茹,丁勇,孟昭伟.陕西省部分地区人群血和尿中镍、锡、锑、铊的水平分析[J].现代预防医学,2021,48(1):33-37.

[5] Zhong G, Wan F, Wu S, et al. Arsenic or/and antimony induced mitophagy and apoptosis associated with metabolic abnormalities and oxidative stress in the liver of mice [J]. Sci Total Environ, 2021,777:146082.

[6] 齐炳馨.青岛市献血者血铅水平分布及影响因素分析[D].青岛：青岛大学,2023.

[7] 杨似玉,赵秋艳,张杰,等. 大气 PM2.5 暴露对河南省 3 ～ 79 岁居民血铅水平影响[J]. 中国公共卫生,2024,40(4):456-460.

[8] 黄小虎,叶专,吕守云,等. 海口地区岗前健康体检人群血中重金属铅、镉、汞负荷水平分析[J]. 标记免疫分析与临床,2020,27(6): 1033-1036.

[9] 李洪波,卢秀娟,蒋励.贵州省 5 县(区)一般人群血液重金属内暴露特征分析[J].中国预防医学杂志,2022,23(3):220-223.

[10] 祝宇铭,王琛琛,日沙来提•塔依尔,等.新疆非职业暴露人群血砷、血硒、血锑内暴露水平分析[J].职业与健康，2025,41(22): 3116-3119,3125.

[11] 谭湘武,马金辉,萧福元,等.非职业人群全血中锑暴露水平的研究[J].国际检验医学杂志,2016,37(21):2973-2975.

[12] 王彬颖.还原老化微塑料与锑（Ⅴ）在多孔介质中的迁移行为研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2025.

[13] 唐胜群,张蓉,张丽丽,等.铅酸电池中锑迁移影响因素的研究[J].蓄电池,2022,59(4):164-169,180.

[14] 孙超,黄春阳,梁爽.广西崇左市江州区碳酸盐岩地层地下水锶富集规律及成因分析[J].南方国土资源,2021(5):33-38.

收稿日期：2025-11-14

（本文编辑：孙海儿）