

# 不同铅暴露区人体离体牙铅含量和年龄关系及指示意义

李子夏<sup>1\*</sup>, 李祥忠<sup>2</sup>, 逯海<sup>3</sup>, 周芳<sup>1</sup>, 张昊琪<sup>1</sup>

1. 西安医学院 口腔医学院, 西安 710021

2. 云南大学 地球系统科学研究中心, 昆明 650500

3. 中国计量科学研究院化学计量与分析科学研究所, 北京 100013

**摘要:** 人体牙釉质是记录环境铅(Pb)暴露信息的较好载体。本研究采用微波消解-电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)联用的方法测定来自高Pb暴露区(铅锌冶炼厂地区)和Pb暴露对照区(农业种植区)附近长期居住/不同年龄段人体离体牙的Pb含量,结果显示:高Pb暴露区离体牙表现出Pb含量高且随居民年龄增长而增高的趋势,离体牙Pb含量从6—12岁儿童的 $(60.8 \pm 15.3) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到65岁以上老年人的 $(200.1 \pm 30.5) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ;而铅暴露对照区人体离体牙Pb含量低且基本随年龄增长变化不大。Pb主要通过呼吸道和消化道进入人体并在牙齿中富集,因此,牙齿中的Pb含量与生活环境密切相关。研究结果表明:生活在高Pb暴露区的人群,环境中的Pb可能通过各种介质(空气、水、实物等)不断进入人体,其牙齿不断蓄积环境来源的Pb。因此人体离体牙Pb有可能作为人体长期Pb暴露生物标志物。

**关键词:** 铅暴露;离体牙;铅含量;年龄;生物标志物

## Relationship between lead content in isolated human teeth and human age in different lead exposure areas and its significance

LI Zixia<sup>1\*</sup>, LI Xiangzhong<sup>2</sup>, LU Hai<sup>3</sup>, ZHOU Fang<sup>1</sup>, ZHANG Haoqi<sup>1</sup>

1. Department of Stomatology, Xi'an Medical University, Xi'an 710021, China

2. Research Center for Earth System Science, Yunnan University, Kunming 650500, China

3. Division of Chemical Metrology & Analytical Science, National Institute of Metrology, China, Beijing 100013, China

**Abstract: Background, aim, and scope** Heavy metal lead in human dental enamel is an archival record that can record information about environmental Pb exposure. This study analyzed the Pb content of isolated teeth from residents with different ages living in different lead exposure areas by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The purpose is to discuss the characteristics and age relationship of Pb content in human teeth from

收稿日期: 2021-10-25; 录用日期: 2022-02-05; 网络出版: 2022-02-15

Received Date: 2021-10-25; Accepted Date: 2022-02-05; Online first: 2022-02-15

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JQ-875); 国家自然科学基金项目(42003016); 2022年大学生创新创业训练计划项目(121522001)

**Foundation Item:** Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (2020JQ-875); National Natural Science Foundation of China (42003016); 2022 Student Innovation and Entrepreneurship Training Program (121522001)

通信作者: 李子夏, E-mail: zlxixiyi@163.com

**Corresponding Author:** LI Zixia, E-mail: zlxixiyi@163.com

引用格式: 李子夏, 李祥忠, 逯海, 等. 2022. 不同铅暴露区人体离体牙铅含量和年龄关系及指示意义[J]. 地球环境学报, 13(5): 612–617.

**Citation:** Li Z X, Li X Z, Lu H, et al. 2022. Relationship between lead content in isolated human teeth and human age in different lead exposure areas and its significance [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(5): 612–617.

different Pb exposure areas. **Materials and methods** The people living in different lead exposure areas, namely, lead-zinc smelter areas (high lead exposure areas) and agricultural planting areas (low lead exposure areas), were selected. Isolated human teeth from these two different lead exposure areas were collected. The isolated human teeth were dissolved via microwave digestion, and the Pb contents of the isolated human teeth after microwave digestion were analyzed using ICP-MS. **Results** The lead content in the teeth of people who lived in the high lead exposure area increased with age. The lead content in the teeth increased from  $(60.8 \pm 15.3) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  in children aged 6—12 to  $(200.1 \pm 30.5) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  in adults over than 65. However, the lead content in the teeth of people who lived in the low lead exposure areas did not increase much with age. **Discussion** Pb enters the human body through the respiratory tract and digestive tract. The level of Pb in teeth is related to various factors, such as the living environment and dietary habits. Residents in high Pb exposure areas were affected by environmental Pb. In areas where Pb concentrations are high, the Pb content in the teeth of residents is also high. In addition, the content of Pb in their teeth gradually increases with age. **Conclusions** The content of heavy metals in people living in the high lead exposure areas was higher than that in the low lead exposure areas. The lead content of teeth records the cumulative exposure to lead in the environment. **Recommendations and perspectives** The results are expected to provide an important scientific basis for the use of the lead content of teeth used as a biomarker for long-term lead exposure in humans.

**Key words:** lead exposure; isolated human teeth; lead content; age; biomarkers

铅 (Pb) 是环境中常见的有毒有害、可致癌的污染物, 广泛分布在人们的生活与工作环境中。Pb 是一种不可降解的环境污染物, 可通过食物、土壤、水和空气等, 经呼吸道、消化道、皮肤等进入机体, Pb 在人体的安全水平为零 (Byers et al, 2020; Meng et al, 2020)。含 Pb 污染物进入人体后, 可与人体内许多蛋白质、酶和氨基酸的官能团结合, 干扰机体正常的生理生化活动, 导致人体神经、血液、消化与生殖系统的损害和疾病 (Sanders et al, 2009)。目前, Pb 污染是危害人类尤其是儿童身体健康的十三种环境因素中的重大威胁之一, 因其可导致神经和智力发育障碍, 越来越受到政府和民众的重视和关注 (Byers et al, 2020; Meng et al, 2020)。据估计, 因 Pb 暴露而导致死亡的人数每年超过 14 万例, 占全球疾病负担的 0.6% (Papanikolaou et al, 2005; O'Connor et al, 2020)。随着城市化和工业化进程的加快, 现代工业迅速发展, 资源开采、化工企业生产和能源消耗不断向环境释放大量 Pb, 因此 Pb 中毒不仅是科研人员重点关注的问题, 也越来越成为一个重要的社会问题 (Robbins et al, 2010; Dong et al, 2020)。

人体 Pb 暴露通常可用人体标记物, 比如尿液、血液、唾液、头发、骨头等 Pb 含量来评估。由于血 Pb、尿 Pb 和发 Pb 样品容易获得, 其测定方法简便等优势, 被广泛用作人体内 Pb 负荷的生

物标志物。

然而, 成人体内 90% 以上的 Pb 以不溶性的磷酸铅 ( $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ ) 形式储存于身体硬组织 (牙齿和骨骼) 中, 仅少部分与血液维持动态交换。血液或者尿液能够反映人体样品采集时段内的 Pb 暴露信息, 而牙齿作为人体硬组织重要部分是人体中 Pb 积蓄的重要部位, 一旦 Pb 沉积于牙齿中, 将稳定存在, 释放量可以忽略。因此, 牙齿 Pb 含量记录了从出生至牙齿脱落前连续累积的 Pb 暴露量, 即使在血液中无法检测出的长期、连续、低剂量的 Pb 暴露也可在牙齿中检测到 (Barbosa et al, 2005; Arruda-Neto et al, 2009; de Almeida et al, 2011; Zeng et al, 2012; Cenić-Milosević et al, 2013; Akkus and Ozdenerol, 2014; Amin, 2014; Shishniashvili et al, 2016)。这也是为什么齿 Pb 逐渐被广泛用于反映环境 Pb 暴露的原因。

以上认识, 也得到一些动物培养实验证实, 因涉及到伦理, 人类一直未有现代实验验证。本文充分考虑到这些情况, 通过生活在不同铅暴露区的居民离体牙 Pb 含量的研究来进一步验证。采集了高铅暴露区 (铅锌冶炼厂地区) 和铅暴露对照区 (农业种植区) 附近长期居住、不同年龄段居民的离体牙, 采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定分析离体牙的 Pb 含量, 旨在论述不同 Pb 暴露地区人牙齿 Pb 含量特征和年龄关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器和试剂

电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS): 铂金埃尔默 300D 型 ICP-MS。

酸纯化系统: 美国 Savillex DST-1000 亚沸蒸馏系统。

超纯水系统: 密理博 Milli-Q 超纯水仪。

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 HNO<sub>3</sub> 为 UP 级 (苏州晶瑞化学股份有限公司), 其中 HNO<sub>3</sub> 经 DST-1000 亚沸蒸馏纯化后使用。

Pb 含量标准物质: (1) GSB04-1767-2004 多元素混合标准溶液: 100 μg·g<sup>-1</sup> (国家有色金属及电子材料分析测试中心研制); (2) Spex 多元素混标 CLMS-5。

超级微波消解系统: 麦尔斯通 UltraWAVE 超级微波化学平台 (Milestone 公司, 意大利; 中国莱伯泰科代理)。

### 1.2 样品采集、处理和消解

采集高铅暴露区 (西北某铅锌冶炼厂地区) 和铅暴露对照区 (农业种植区) 附近长期居住、不同年龄段居民的离体牙。按年龄段分为儿童 (6—12 岁)、青年 (13—24 岁)、成年人 (25—64 岁) 和老年人 (>65 岁) 四个组别, 每个组别的牙齿个数分别大于 35 颗。每颗离体牙样本, 首先用去离子水冲洗干净, 放入丙酮溶液中浸泡 24 h, 接着用手术刀将牙表面的血迹、附着表面的软组织等有机物仔细刮净, 用去离子水和乙醇冲洗干净后晾干, 装入编好号的样品袋。实验前将经过前处理的牙齿样品进一步处理获得牙釉质, 将牙釉质用玛瑙研钵研磨至 200 目。称取 50 mg 牙釉质样品放入消解罐, 加入 3 mL 50% 的 HNO<sub>3</sub> 和 2 mL 30% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液, 轻轻晃动消解罐, 放入 UltraCLAVE 微波系统消解, 消解完毕后冷却定容至 25 mL 待用, 同步做试剂空白实验 (Li et al, 2013; He et al, 2015; He et al, 2016; He et al, 2019)。

### 1.3 样品测定

Pb 含量采用 PE 300D 型 ICP-MS 测定, 测定前先用质量调谐液进行仪器调谐。在仪器的最佳工作参数条件下, 按仪器操作规程, 进行标准曲线的绘制、空白及样品测定, 获得测定结果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 仪器工作参数的优化

射频功率、载气流量和采样深度是 ICP-MS 最重要的参数。在实验中, 采用质量调谐溶液对仪器的灵敏度、测定精密度等仪器的工作条件进行优化, 得到优化的试验条件见表 1。

参数 Parameter	数值 Value
射频 (RF) 功率 Plasma RF power/W	1300
等离子体气体流量 Plasma gas flow/(L·min <sup>-1</sup> )	15
辅助气流量 Auxiliary gas flow/(L·min <sup>-1</sup> )	1.2
雾化器流量 Atomizer flow/(L·min <sup>-1</sup> )	0.98
蠕动泵转速 Peristaltic pump speed/(r·s <sup>-1</sup> )	0.2
样品提升速率 Sample lift rate/(mL·min <sup>-1</sup> )	0.5
积分时间 Integration time/s	0.6
内标元素及质量数 Internal standard elements and mass number	<sup>7</sup> Li、 <sup>72</sup> Ge、 <sup>115</sup> In、 <sup>209</sup> Bi
测量方式 Measurement method	跳峰 Jump

### 2.2 牙齿样品 Pb 含量特征

在选定的微波消解-ICP-MS 测定条件下, 对采集于铅锌冶炼厂地区 (高铅暴露区) 和农业种植区 (铅暴露对照区) 不同年龄段人体离体牙进行测定, 结果见图 1。

图 1 表明: 生活在不同 Pb 暴露区的居民, 牙齿 Pb 含量差异明显。生活在农业种植区的儿童、青年、成年人和老年人的牙齿平均 Pb 含量分别是 (23.6±10.4) μg·g<sup>-1</sup>、(26.5±18.3) μg·g<sup>-1</sup>、(24.3±9.4) μg·g<sup>-1</sup> 和 (28.6±11.5) μg·g<sup>-1</sup>, 而生活在铅锌冶炼厂周围儿童、青年、成年人和老年人的牙齿平均 Pb 含量则分别是 (60.8±15.3) μg·g<sup>-1</sup>、(110.7±20.6) μg·g<sup>-1</sup>、(140.3±25.9) μg·g<sup>-1</sup> 和 (200.1±30.5) μg·g<sup>-1</sup>。生活在高 Pb 暴露区居民的牙齿 Pb 含量比同年龄段农业种植区的要高。

图 1 同时表明: 生活在高 Pb 暴露区的居民, 老年人齿 Pb 含量明显高于儿童, 儿童 (6—

12岁)为 $(60.8 \pm 15.3) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 老年人(>65岁)为 $(200.1 \pm 30.5) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 约为儿童的3倍;而生活在Pb暴露对照区居民, 齿Pb含量与年龄变化无明显相关性, 儿童(6—12岁)为 $(23.6 \pm 10.4) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 老年人(>65岁)为 $(28.6 \pm 11.5) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

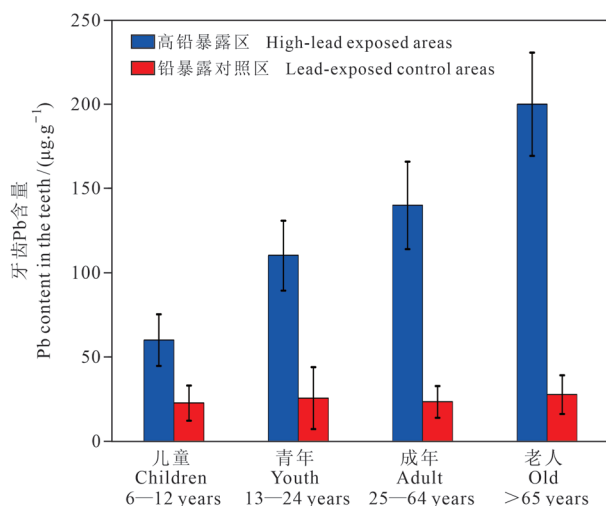


图1 不同Pb暴露区人体离体牙Pb含量和年龄关系  
Fig. 1 Relationship between lead content in human isolated teeth and age in different lead exposure areas

### 3 讨论

#### 3.1 不同暴露区居民牙齿Pb含量随年龄变化的影响因素

由污染源排入环境中的Pb主要以无机Pb或化合物的形式存在, 再通过呼吸道、消化道进入人体, 与体内一系列蛋白质、酶和氨基酸的功能团(巯基)结合, 以磷酸氢铅、甘油磷酸化合物、蛋白质化合物或 $\text{Pb}^{2+}$ 化合物形式存在, 并很难被排出体外, 仅有小部分可以通过消化系统和其他代谢途径, 如汗液、脱毛发、脱皮等方式排出。环境中的Pb无处不在, 物品本身含有铅或各种物品表面有沉淀下来的Pb, 人体通过呼吸和手直接接触这些物品都会增加摄入Pb的机会(Byers et al, 2020)。因此, 牙齿Pb水平与居住环境、生活习惯和饮食习惯等多种因素有关。

根据本研究结果, 对比Pb暴露区和Pb对照区数据, 可以明显获知环境对牙齿Pb的影响。前人研究表明: 铅锌冶炼厂周围降尘中的Pb含量较高, 是陕西省表层土壤铅背景值 $21.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的10—154倍(Li et al, 2020)。即使后期铅锌冶炼厂关闭, 其前期沉降下来的Pb仍会在下风向的

土壤中长期存在。环境中的Pb又会以各种形式被该地区的居民吸收(de Almeida et al, 2007; Hegde et al, 2010)。因此高Pb暴露区的Pb会被该地区的居民吸收并蓄积在牙齿中, 造成该地区居民牙齿Pb含量逐年增加(Arora et al, 2009; Al-Qattan and Elfawal, 2010; Fischer and Wiechula, 2016; Fernández-Escudero et al, 2020)。本研究也表明: 高Pb暴露区居民受到环境Pb的影响, 其牙齿Pb的含量随年龄增长逐渐升高。

#### 3.2 人体离体牙铅含量随年龄变化的指示意义

受环境污染和工业影响, 通过呼吸道、饮食或体表接触等方式, 人体摄入大量的Pb, 而摄入的Pb对人体健康造成严重影响。因此, 如何快速、准确地获得人体Pb含量是各医疗卫生、环境保护部门及其他社会部门所关注的重要问题。

研究和实践表明: 血Pb含量能一定程度上显示Pb在体内吸收、停留、释放、排泄的变化, 是反映近期Pb接触的重要指标。无论是在环境Pb污染较严重的情况下, 还是在稳定的低水平Pb接触状态下, 血Pb都能反映当时体内的Pb含量状况。但是, 血Pb水平只与环境Pb暴露水平呈平衡关系, 而不能直接反映人体Pb负荷量的高低, 因此不能表征Pb在人体内的积存效应。摄入人体90%—95%的Pb主要存储在骨骼和牙齿等硬组织中, 且它们存储的半衰期较长。因此, 骨Pb和齿Pb是正确反映人体受Pb污染中毒程度的理想指标, 可以作为累积接触的生物标志物(Kamberi et al, 2012; Shepherd et al, 2016; Shishniashvili et al, 2016)。虽然体内X射线荧光技术的发展, 推动了体内骨基质Pb含量的测定, 但由于技术的复杂性, 采用不同激发源测试的骨Pb含量相差较大, 无法得到广泛使用。而与骨Pb一样可以代表机体Pb负荷指标的齿Pb, 不仅适于换牙期儿童Pb毒性的研究, 也可以用于美容、医疗等拔除后的离体牙研究, 应用范围大大扩展(Arruda-Neto et al, 2009)。因此, 人体离体牙Pb有可能作为人体长期Pb暴露优选生物标志物。

### 4 结论

基于微波和ICP-MS联用测定不同Pb暴露区、不同年龄人体离体牙的Pb含量, 获得以下认识:

(1) 铅锌冶炼厂地区(高Pb暴露区)和农业种植区(Pb暴露对照区)人体离体牙Pb含量存

在显著不同的特征。生活在高 Pb 暴露区的居民, 老年人齿 Pb 含量明显高于儿童, 儿童 (6—12 岁) 为  $(60.8 \pm 15.3) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 老年人 (>65 岁) 为  $(200.1 \pm 30.5) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 约是儿童的 3 倍; 而生活在 Pb 暴露对照区居民, 齿 Pb 含量与年龄变化无明显相关性, 儿童 (6—12 岁) 为  $(23.6 \pm 10.4) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 老年人 (>65 岁) 为  $(28.6 \pm 11.5) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

(2) 生活在高 Pb 暴露区的人群, 其牙齿不断蓄积环境来源的 Pb, 而 Pb 一旦蓄积于牙齿, 将稳定存在, 因此人体离体牙 Pb 有可能作为人体长期 Pb 暴露优选生物标志物。

### 参考文献

- Akkus C, Ozdenerol E. 2014. Exploring childhood lead exposure through GIS: a review of the recent literature [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(6): 6314–6334.
- Al-Qattan S I, Elfawal M A. 2010. Significance of teeth lead accumulation in age estimation [J]. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 17(6): 325–328.
- Amin M R. 2014. Lead exposure and the risk of dental caries in urban children [D]. Cincinnati: University of Cincinnati.
- Arora M, Weuve J, Weisskopf M G, et al. 2009. Cumulative lead exposure and tooth loss in men: the normative aging study [J]. *Environmental Health Perspectives*, 117(10): 1531–1534.
- Arruda-Neto J D T, de Oliveira M C C, Sarkis J E S, et al. 2009. Study of environmental burden of lead in children using teeth as bioindicator [J]. *Environment International*, 35(3): 614–618.
- Barbosa F Jr, Tanus-Santos J E, Gerlach R F, et al. 2005. A critical review of biomarkers used for monitoring human exposure to lead: advantages, limitations, and future needs [J]. *Environmental Health Perspectives*, 113(12): 1669–1674.
- Byers H L, McHenry L J, Grundl T J. 2020. Increased risk for lead exposure in children through consumption of produce grown in urban soils [J]. *Science of the Total Environment*, 743: 140414. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140414.
- Cenić-Milosević D, Mileusnić I, Kolak V, et al. 2013. Environmental lead pollution and its possible influence on tooth loss and hard dental tissue lesions [J]. *Vojnosanitetski Pregled*, 70(8): 751–756.
- de Almeida G R C, da Conceição Pereira Saraiva M, Barbosa Jr F, et al. 2007. Lead contents in the surface enamel of deciduous teeth sampled *in vivo* from children in uncontaminated and in lead-contaminated areas [J]. *Environmental Research*, 104(3): 337–345.
- de Almeida G R C, de Sousa Guerra C, de Angelo Souza Leite G, et al. 2011. Lead contents in the surface enamel of primary and permanent teeth, whole blood, serum, and saliva of 6- to 8-year-old children [J]. *The Science of the Total Environment*, 409(10): 1799–1805.
- Dong C Y, Taylor M P, Gulson B. 2020. A 25-year record of childhood blood lead exposure and its relationship to environmental sources [J]. *Environmental Research*, 186: 109357. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109357.
- Fernández-Escudero A C, Legaz I, Prieto-Bonete G, et al. 2020. Aging and trace elements in human coronal tooth dentine [J]. *Scientific Reports*, 10: 9964. DOI: 10.1038/s41598-020-66472-1.
- Fischer A, Wiechula D. 2016. Age-dependent changes in Pb concentration in human teeth [J]. *Biological Trace Element Research*, 173(1): 47–54.
- He M Y, Jin Z D, Luo C G, et al. 2015. Determination of boron isotope ratios in tooth enamel by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) after matrix separation by ion exchange chromatography [J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 26(5): 949–954.
- He M Y, Lu H, Luo C G, et al. 2016. Determining trace metal elements in the tooth enamel from Hui and Han Ethnic groups in China using microwave digestion and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) [J]. *Microchemical Journal*, 127: 142–144.
- He M Y, Luo C G, Lu H, et al. 2019. Measurements of lithium isotopic compositions in coal using MC-ICP-MS [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 34(9): 1773–1778.
- Hegde S, Sridhar M, Bolar D R, et al. 2010. Relating tooth- and blood-lead levels in children residing near a zinc-lead smelter in India [J]. *International Journal of Paediatric Dentistry*, 20(3): 186–192.
- Kamberi B, Koçani F, Dragusha E. 2012. Teeth as indicators of environmental pollution with lead [J]. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 2(1). DOI: 10.4172/2161-0525.1000118.
- Li Z X, He M Y, Peng B, et al. 2013. Strontium concentrations

- and isotope ratios in enamel of healthy and carious teeth in southern Shaanxi, China [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 27(17): 1919–1924.
- Li Z X, Lu H, Zhou F. 2020. Lead exposure characteristics and pollution evaluation of indoor and outdoor dust in primary school campuses of Baoji City in northwest China [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 545(1): 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/545/1/012024.
- Meng Y, Tang C L, Yu J, et al. 2020. Exposure to lead increases the risk of meningioma and brain cancer: a meta-analysis [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 60: 126474. DOI: 10.1016/j.jtemb.2020.126474.
- O'Connor D, Hou D Y, Ok Y S, et al. 2020. The effects of iniquitous lead exposure on health [J]. *Nature Sustainability*, 3(2): 77–79.
- Papanikolaou N C, Hatzidaki E G, Belivanis S, et al. 2005. Lead toxicity update: a brief review [J]. *Medical Science Monitor*, 1(10): RA329–RA336.
- Robbins N, Zhang Z F, Sun J Y, et al. 2010. Childhood lead exposure and uptake in teeth in the Cleveland area during the era of leaded gasoline [J]. *Science of the Total Environment*, 408(19): 4118–4127.
- Sanders T, Liu Y M, Buchner V, et al. 2009. Neurotoxic effects and biomarkers of lead exposure: a review [J]. *Reviews on Environmental Health*, 24(1): 15–45.
- Shepherd T J, Dirks W, Roberts N M W, et al. 2016. Tracing fetal and childhood exposure to lead using isotope analysis of deciduous teeth [J]. *Environmental Research*, 146: 145–153.
- Shishniashvili T E, Suladze N N, Margvelashvili V V. 2016. Primary teeth and hair as indicators of environmental pollution [J]. *The Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 40(2): 152–155.
- Zeng J, Yan L L, Li O Y, et al. 2012. Differences in lead isotopic fingerprints between blood, hair and organs in lead-poisoned rats [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(7): 744–749.