

万山汞矿区居民体内汞硒的含量、分布及相互关系

涂瑞¹ 陈敏¹ 丁丽¹ 常传宇^{2,3} 王惠群¹ 李平^{2*}

(¹贵州医科大学公共卫生学院, 贵阳 550025; ²中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; ³中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 硒作为汞矿的伴生元素被释放至周围环境, 贵州万山汞矿区汞污染问题应综合考虑硒的影响。为了评估万山汞矿区居民体内汞硒的含量、分布及汞硒相互关系, 选择当地人群 30 例, 采集其血液、尿液和头发样品, 分别测定总汞、甲基汞和硒含量。结果表明: 31% 的人群血液总汞和 93% 的人群头发总汞含量分别超过美国环境保护署 (USEPA) 推荐的安全限值 ($5.8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 而 24% 的人群尿汞含量超过联合国工业发展组织 (UNIDO) 的限值 $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明研究人群存在不同程度的甲基汞和无机汞暴露风险。90% 的研究人群头发硒含量为中高水平, 体内足量硒可能对无机汞和甲基汞的积累起到抑制作用, 从而在一定程度上降低了当地居民汞暴露的健康风险。

关键词 人群; 汞; 硒; 分布; 相互关系

The concentrations, distribution, and interrelation of mercury and selenium in human body in Wanshan mercury mining area. TU Rui¹, CHEN Min¹, DING Li¹, CHANG Chuan-yu^{2,3}, WANG Hui-qun¹, LI Ping^{2*} (¹ School of Public Health, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China; ² State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; ³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: Selenium (Se) was released into the surrounding environment as an associated element of mercury (Hg). When examining the Hg pollution in Wanshan Hg mining area, Guizhou Province, we should consider the presence of Se. To assess the Hg and Se levels, distribution, and their interactions in the residents in Wanshan mercury mining area, a total of 30 people were randomly selected in this study. The blood, urine, and hair samples were collected for determination of the concentrations of total mercury (THg), methylmercury (MeHg) and Se. The results showed that THg in 31% of blood samples and 93% of hair samples from the studied population exceeded the limits of $5.8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $1 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ recommended by United States Environmental Protection Agency (USEPA), respectively. Urine Hg in 24% of the studied population exceeded the limit of $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ recommended by the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). The results indicated that the studied population was exposed to both MeHg and inorganic Hg. Hair Se contents in 90% of the study population were at the medium and high levels. Sufficient Se in the human body may inhibit the accumulation of Hg and thus reduce the health risks of Hg exposure in local residents.

Key words: population; mercury; selenium; distribution; interrelation.

汞是环境中危害性最强的化学元素之一 (WHO, 1990), 尤其是汞的有机形式甲基汞毒性最强, 其与含巯基的酶和蛋白具有高亲和力, 可以通过

血-脑屏障和胎盘屏障, 损害神经 (Clarkson *et al.*, 2003)、免疫 (Moszczyński *et al.*, 2008)、心血管系统 (Virtanen *et al.*, 2007) 和肾脏 (Rutowski *et al.*, 1997), 甚至引起 DNA 损害 (Denise *et al.*, 2009)。人类甲基汞暴露的主要途径是食用鱼类和海产品 (Mergler *et al.*, 2007)。由于长期的汞矿开采和冶炼

国家自然科学基金项目 (41373135, 41622208) 资助。
收稿日期: 2017-10-10 接受日期: 2018-01-26
* 通讯作者 E-mail: liping@mail.gyig.ac.cn

活动,贵州省万山汞矿区环境遭受严重的环境汞污染,而食用稻米是当地居民甲基汞暴露的主要途径(Feng *et al.* 2008)。

硒是万山汞矿的伴生成矿元素,其同时被释放到周围环境中并转移到食物链(振襄等,1995),因此万山汞矿区的环境汞污染问题需综合考虑硒的影响。硒是人体所必需的微量元素,是机体抗氧化酶活性基团的重要元素,具有清除脂质过氧化物、维护免疫系统的完整性、提高机体的抵抗力、拮抗某些对机体有损害作用的重金属元素(别同玉等,2010)。关于硒对无机汞和甲基汞毒性保护作用的研究已有报道。Parizek 等(1967)最早研究了硒汞拮抗作用,在大鼠体内同时注射氯化汞(HgCl_2)和亚硒酸钠(Na_2SeO_3), HgCl_2 暴露导致的汞中毒症状可以显著减轻。硒蛋氨酸对7天龄SD大鼠甲基汞暴露导致的大脑神经元退变起到保护作用(Sakamoto *et al.*, 2013)。Li 等(2012)对贵州万山汞矿区汞暴露人群补充富硒酵母,可以促进汞从尿液排出,并减轻汞暴露所致的脂质及DNA损伤。

血汞和发汞通常用来指示人体甲基汞暴露,而尿汞通常用来评价无机汞暴露(WHO,1991; USEPA,1997)。由于甲基汞在血液中的半衰期为50~70 d,因此血液指示最近的1~2个半衰期的暴露水平,而头发反映整个生长期的平均暴露(Mergler *et al.* 2007)。本研究以贵州万山汞矿区居民为研究对象,系统采集其血液、尿液和头发样品,分别测定其总汞、甲基汞和硒含量,以评估万山汞矿区人群体内汞硒的含量、分布,探讨汞硒相互关系。

1 材料与方法

1.1 研究对象

于2016年8月在万山汞矿区土坪社区采集当地居民的尿液、血液和头发样品。选择在家居住3个月以上的人群,详细记录其性别、年龄、身高、体重、职业、补牙、吸烟和饮酒习惯、疾病历史以及饮食习惯等信息,见表1。

采集尿液约30 mL于聚乙烯管中,同时加10%

表1 研究对象基本信息

Table 1 Basic information of the studied subjects

性别	人数	年龄	身高(m)	体重(kg)	体重指数($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
女	23	55.2±17.3	1.52±0.08	53.8±8.6	23.4±2.9
男	7	55.3±12.6	1.61±0.05	57.7±14.2	22.2±4.4

数据为均数±标准差。

的浓 HNO_3 (优级纯)防止汞的损失,所有样品均冷藏(4℃)保存,并迅速带回实验室待测。研究对象于肘静脉处抽血5 mL,置于事先备好的乙二胺四乙酸(EDTA)采样管内,4℃冷藏保存,并迅速带回实验室-20℃储存待检。采集自头皮根部3 cm头发样品约0.3 g,采用洗涤剂 and 丙酮超声波清洗数遍,剪碎装入自封袋内保存待测。

1.2 实验方法

总汞(THg)测定:准确称取适量生物样品(0.1~0.2 g),加入浓 HNO_3 ,采用水浴加热法进行消解,经 SnCl_2 还原、冷原子荧光光谱法(CVAFS)测定(郑伟等,2006)。

甲基汞(MeHg)测定:准确称取适量生物样品(0.1~0.2 g),采用KOH甲醇溶液水浴消解以及有机溶剂萃取技术,经水相乙基化-Tenax富集,最后经气相色谱-冷原子荧光法(GC-CVAFS)测定(仇广乐等,2005)。

硒(Se)测定:称取适量生物样品(0.1~0.2 g),放入特富龙(Teflon)消解罐中,加入2 mL HNO_3 和1 mL H_2O_2 ,经高温密闭罐消解,采用氢化物发生原子荧光光谱法(HG-AFS法)测定(朱建明等,2008)。

1.3 质量控制

以空白试验、标准物质的测定、平行样及样品加标回收实验,对实验数据进行质量控制。不同标准物质的实验测定结果与参考值的对比,如表2所示。血液甲基汞加标回收率的平均值为92%。平行样品测定的结果相对标准偏差<10%。

1.4 数据处理

采用SPSS for Windows 20.0统计软件,对数据进行正态性检验,服从正态性分布采用均数±标准差表示,偏态分布数据经对数转换呈正态分布数据,采用几何均数来表示。数据采用线性相关性分析,检验水准 $P<0.05$ 。

表2 标准物质参考值与实验测定结果的对比

Table 2 Comparison of certified and determined values for certified reference material

标准物质	类型	总汞	甲基汞	硒
Seronorm urine L-2 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	尿	44.0 (40.6)	-	71.7 (79.4)
Seronorm whole blood L-1 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	血	17 (15.4)	-	60 (55.8)
NIES-13 ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	头发	4420 (4380)	3800 (3760)	1790 (1458)

括号内为参考值。

2 结果与分析

2.1 人群体内汞、硒含量特征

2.1.1 汞含量 万山汞矿区人群尿液、血液和头发总汞含量的几何均值分别为 $2.64 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5.13 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.92 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 血液和头发甲基汞含量的几何均值分别为 $2.36 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.92 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表3)。根据美国环境保护署 (USEPA, 1997) 推荐的血液和头发总汞安全限值分别为 $5.8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 31% 的研究人群血液总汞和 93% 的研究人群头发总汞含量超过此推荐限值; 但低于万山汞矿区炼汞工人的血汞含量 $38.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (Chen *et al.* 2006)。联合国工业发展组织 (UNIDO, 2003) 推荐正常人群的尿汞含量应低于 $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 24% 的研究人群尿总汞含量超过此推荐限值。世界卫生组织 (1990) 估计甲基汞中毒的临界血汞含量为 $200 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (相应发汞含量约为 $50 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。低于临界值一般未发现有中毒病理的变化, 对人体不会构成明显的伤害。怀孕母亲不会出现甲基汞中毒症状的发汞含量临界值为 $10 \sim 14 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (NRC, 2000), 而正常人群头发甲基汞含量应小于 $1 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 研究人群血液和头发甲基汞含量最高值分别为 $8.90 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8.43 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可能与其严重的汞污染有关, 当地种植的大米具有较高的甲基汞含量 (Li *et al.* 2015), 从而导致其严重的甲基汞暴露。

2.1.2 总汞和甲基汞含量的关系 由表3可见, 血液甲基汞占总汞的平均比例为 48.8%; 头发甲基汞占总汞的平均比例为 42.5%; 血液总汞和甲基汞含量之间存在显著的正相关关系 ($r=0.731, P<0.001$, 图1)。

2.1.3 硒含量 万山汞矿区人群尿液、血液和头发硒含量的几何均值分别是 $16.3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $123 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $469 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 如表4所示。湖北施恩地区关于硒的大量研究表明, 正常人群血硒含量标准为 $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (杨光圻, 1989); 头发硒含量标准为 $365 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (谭建安, 1996), 低于此值就会发生缺

表3 万山汞矿区人群不同暴露指示物的汞含量

Table 3 Hg concentrations in different types of biological samples from Wanshan mercury mining area

类型	样数	总汞	甲基汞	甲基汞比例 (%)
尿 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	29	2.64 (1.90~3.70)*	-	-
血 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	29	5.13 (4.36~6.04)*	2.36 (1.95~2.86)*	48.8±16.0 [△]
头发 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	30	1.92 (1.56~2.37)*	0.92 (0.60~1.43)*	42.5±20.2 [△]

* 几何均值, 括号内为 5%~95% 范围; [△] 均数±标准差。

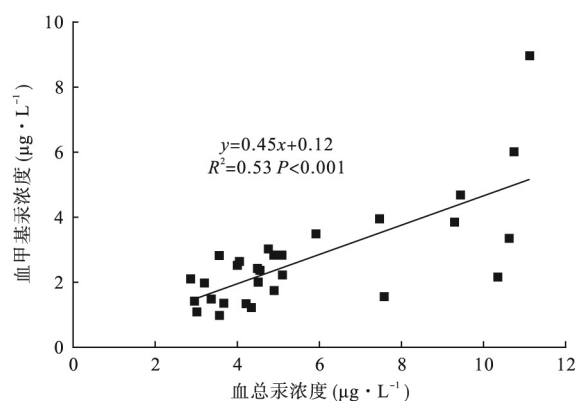


图1 万山汞矿区居民血液总汞和甲基汞含量之间的关系
Fig.1 Correlation between blood THg and MeHg concentration in the residents from Wanshan mercury mining area

表4 万山汞矿区人群不同暴露指示物硒含量

Table 4 Se concentrations in different types of biological samples from Wanshan mercury mining area

类型	例数	几何均值	硒/汞摩尔比
尿硒 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	29	16.3 (12.6~21.0)*	21 : 1
血硒 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	29	123 (115~130)*	66 : 1
头发硒 ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	30	469 (409~535)*	0.6 : 1

* 几何均值, 括号内为 5%~95% 范围。

硒症状。美国 ATSDR 推荐的成人硒膳食供给量为 $55 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, 最高耐受供给量为 $400 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, 相应血硒的最小浓度和最大浓度分别是 85 和 $618 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (Li *et al.*, 2016)。研究人群血硒浓度范围是 $85 \sim 155 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 处于上述安全范围。法罗群岛人群队列研究列 1 和队列 2 母亲脐带血硒含量的几何均值分别为 111.6 和 $102.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (Choi *et al.*, 2008)。Chen 等 (2006) 对万山地区人群研究的结果, 血硒含量的几何均值为 $100.9 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 尿硒含量几何均值为 $24.7 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。本研究人群血硒含量几何均值高于上述研究结果。陕西地方病防治环境硒与健康阈值分析表明, 发硒含量 $<200 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为硒缺乏, $200 \sim 250 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为硒缺乏边缘, $250 \sim 500 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为硒水平中等, $>500 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为硒水平较高 (陕西地方病防治 60 年编委会, 2011)。46.7% 的研究人群发硒含量在 $250 \sim 500 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围为中等水平, 43.3% 的研究人群发硒含量 $>500 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为较高水平, 表明万山汞矿区居民体内有足量的硒。

2.2 人群体内汞、硒相互关系

万山汞矿区人群的血硒/血总汞摩尔比和血硒/血甲基汞摩尔比的均值分别是 $66 : 1$ 和 $160 : 1$; 尿硒/尿总汞摩尔比的均值是 $21 : 1$; 头发硒/头发总汞摩尔比和头发硒/头发甲基汞摩尔比的均值分别

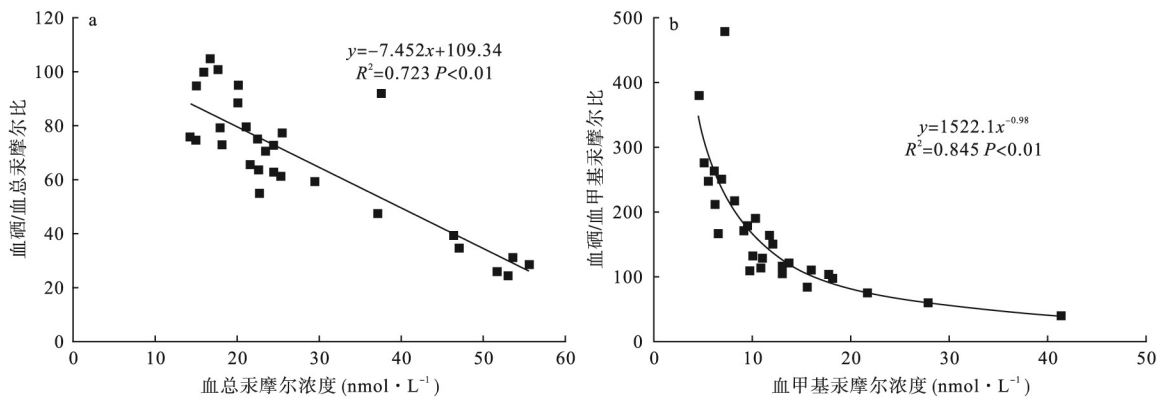


图2 血总汞、甲基汞摩尔浓度与硒/汞摩尔比的相互关系

Fig.2 Relationship between THg, MeHg molar concentration and Se/Hg molar ratios in the blood

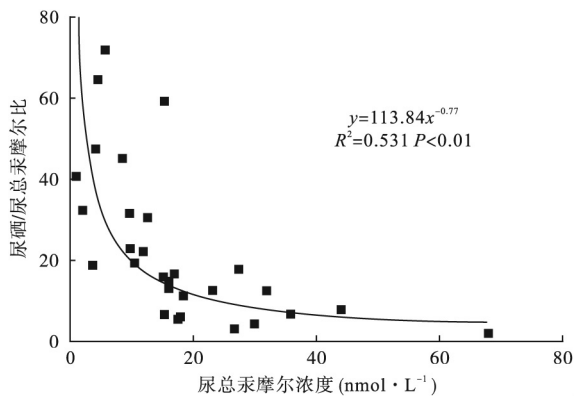


图3 尿总汞摩尔浓度与硒/汞摩尔比的相互关系

Fig.3 Relationship between THg molar concentration and Se/Hg molar ratios in the urine

是 0.6 : 1 和 2 : 1 (表 4)。血液总汞摩尔浓度与血硒/血总汞摩尔比呈显著的负相关关系 ($r = -0.850$, $P < 0.01$, 图 2a); 血甲基汞摩尔浓度与血硒/血甲基汞摩尔比呈负相关关系 ($r = -0.660$, $P < 0.01$, 图 2b)。同样的负相关关系在尿样中发现, 尿总汞摩尔浓度与尿硒/尿总汞摩尔比呈负相关关系 ($r = -0.593$, $P < 0.01$, 图 3)。

3 讨论

在高汞背景环境下生活的居民, 通过多种途径 (饮食、呼吸等) 接触汞, 导致体内汞的积蓄, 从而产生一定的生物累积效应和毒性作用。血液和头发汞含量通常用来指示人体甲基汞暴露, 而尿液汞含量通常用来评价无机汞暴露 (WHO, 1991; USEPA, 1997)。结果表明, 研究人群存在不同程度的甲基汞和无机汞暴露风险。经常食用海产品和鱼肉的人群, 其头发和血液中汞的主要形态是甲基汞, 头发和血液甲基汞占总汞的比例可以达到 80% ~ 98%

(WHO, 1990), 因此使用头发和血液总汞浓度表示甲基汞的浓度。本研究人群头发和血液甲基汞占总汞的平均比例分别为 42.5% 和 48.8%, 远远低于食鱼人群。李平等 (2011) 对贵州万山汞矿区研究发现, 头发甲基汞占总汞的平均比例为 48.6%, 本研究结果与其基本一致。万山汞矿区大米甲基汞占总汞的平均比例为 44.8% (王娅等 2015), 当地居民无机汞的主要暴露途径为食用大米和蔬菜 (Li *et al.*, 2015), 所以无机汞和甲基汞双重暴露情景下, 依据头发和血液总汞浓度评价甲基汞暴露将高估甲基汞的暴露水平。

正常人群头发和血液汞浓度的比例是 250 : 1 (USEPA, 1997), 该比例可以用于预测血液汞浓度和比较不同汞暴露的研究结果。法罗群岛人群 7 岁儿童头发总汞和血液总汞浓度的平均比例为 370 : 1, 14 岁儿童头发和血液总汞浓度的平均比例为 264 : 1 (Budtz-Jørgensen *et al.*, 2004)。瑞典 28 ~ 60 岁人群研究发现头发总汞和血液总汞浓度的比例为 373 : 1 (Berglund *et al.*, 2005)。本研究人群头发与血液总汞浓度的平均比例为 $(379 \pm 168) : 1$, 与上述人群研究结果基本一致。而头发甲基汞与血液甲基汞浓度的平均比例为 $(466 \pm 353) : 1$, 显著高于 250 : 1 和其他研究结果, 可能由于不同研究人群的样本数、饮食结构和地域不同, 出现本研究与前人研究结果有差异。

血硒、尿硒和发硒是判定机体硒状态的常用指标。头发反映人体过去某一特定时间段内营养元素代谢水平, 因而发硒能较准确地反映出人体内硒营养水平 (李顺江等 2006), 90% 的研究人群头发硒含量为中高水平, 且其血硒水平均处于安全水平范围。汞硒摩尔比可用于评价汞和硒潜在的相互作用, 动

物实验研究表明硒汞摩尔比越接近 1 : 1 ,即使是高浓度的汞(或者硒)都不会表现出汞(或者硒)相关的毒性损害作用(Choiet al.,2008; Ralston et al.,2010)。如表 4 所示,研究人群除发硒总汞平均摩尔比小于 1 : 1 ,血液和尿液硒汞平均摩尔比则远远大于 1 : 1 ,足量的硒可能在体内发挥潜在保护作用,使人体免受汞暴露的损害作用。血液总汞摩尔浓度与血液硒/血液总汞摩尔比呈显著的负相关关系($r=-0.850, P<0.01$);血液甲基汞摩尔浓度与血液硒/血液甲基汞摩尔比呈显著的负相关关系($r=-0.660, P<0.01$);尿液总汞摩尔浓度与尿液硒/尿液总汞摩尔比呈显著的负相关关系($r=-0.593, P<0.01$)。随着总汞浓度的增加,硒/汞的摩尔比不是持续不变,而是呈线性减少。Drasch 等(2001)研究也发现类似规律,195 例人群肾上腺皮质汞硒的浓度随着汞浓度的升高,硒/汞摩尔比例显著降低。这说明体内汞的增加减少硒的积累,体内汞硒存在相互抑制作用,硒/汞摩尔比是评价汞硒相互作用的重要指标,可以作为汞暴露风险评估的重要指数。

万山汞矿区部分人群血液、尿液和头发汞含量超过国际相关组织推荐的安全限值,其存在一定程度的甲基汞和无机汞双重暴露风险。研究人群血液硒和头发硒含量水平高于正常人群水平,体内足量硒可能对无机汞和甲基汞的积累起到抑制作用,从而在一定程度上降低了当地居民的汞暴露风险。

参考文献

- 别同玉,许加生. 2010. 硒的生物学效应. 微量元素与健康研究, **19**(1): 64-65.
- 李平,冯新斌,仇广乐. 2011. 贵州汞矿区居民食用大米的甲基汞暴露及健康风险评估. 生态学杂志, **30**(5): 914-921.
- 李顺江,杨林生,王五一,等. 2006. 西藏大骨节病区儿童发硒与病情分布的关系. 中国地方病学杂志, **35**(1): 70-72.
- 仇广乐,冯新斌,梁璉,等. 2005. 溶剂萃取-水相乙基化衍生 GC-CVAFS 联用测定苔藓样品中的甲基汞. 分析测试学报, **24**(1): 29-32.
- 陕西地方病防治 60 年编委会. 2011. 陕西地方病防治 60 年. 陕西: 陕西科学技术出版社.
- 谭建安. 1996. 环境生命元素与克山病. 北京: 中国医药科技出版社.
- 王娅,李平,吴永贵. 2015. 万山汞矿区大米汞污染及人体甲基汞暴露风险. 生态学杂志, **34**(5): 1396-1401.
- 杨光圻. 1989. 人的硒需要量研究. 中国地方病学杂志, **8**(5): 298-302.
- 振襄,鲍珏敏. 1995. 湘西一黔东汞矿带硒的赋存特征. 有色金属矿产与勘查, (4): 30-34.
- 郑伟,冯新斌,李广辉,等. 2006. 硝酸水浴消解-冷原子荧光光谱法测定植物中的总汞. 矿物岩石地球化学通报, **25**(3): 285-287.
- 朱建明,李璐,秦海波,等. 2008. 高压密闭罐溶样-氢化物原子荧光法测定环境样品中的硒. 矿物学报, **28**(2): 187-190.
- Berglund M, Lind B, Bjornberg KA, et al. 2005. Inter-individual variations of human mercury exposure biomarkers: A cross-sectional assessment. *Environmental Health*, **4**: 20.
- Budtz-Jørgensen E, Grandjean P, Jørgensen PJ, et al. 2004. Association between mercury concentrations in blood and hair in methylmercury-exposed subjects at different ages. *Environmental Research*, **95**: 385-393.
- Chen CY, Yu HW, Zhao JJ, et al. 2006. The roles of serum selenium and selenoproteins on mercury toxicity in environmental and occupational exposure. *Environmental Health Perspectives*, **114**: 297-301.
- Choi AL, Budtz-Jørgensen E, Jørgensen PJ, et al. 2008. Selenium as a potential protective factor against mercury developmental neurotoxicity. *Environmental Research*, **107**: 45-52.
- Clarkson TW, Magos MD, Myers MD. 2003. Mercury: Current exposures and clinical manifestations. *New England Journal of Medicine*, **349**: 1731-1737.
- Denise G, Gustavo RMB, Juliana V, et al. 2009. Low levels of methylmercury induce DNA damage in rats: Protective effects of selenium. *Archives of Toxicology*, **83**: 249-254.
- Drasch G, Böse-O'Reilly S, Beinhoff C, et al. 2001. Scientific comment on the German human biological monitoring values (HBM values) for mercury. *Science of the Total Environment*, **267**: 151-168.
- Feng XB, Li P, Qiu G, et al. 2008. Human exposure to methylmercury through rice intake in mercury mining areas, Guizhou Province. *Environmental Science & Technology*, **42**: 326-332.
- Li P, Du BY, Chan HM, et al. 2015. Human inorganic mercury exposure, renal effects and possible pathways in Wanshan mercury mining area, China. *Environmental Research*, **140**: 198-204.
- Li P, Li YF, Feng XB. 2016. Mercury and selenium interactions in human blood in the Wanshan mercury mining area, China. *Science of the Total Environment*, **573**: 376-381.
- Li YF, Dong ZQ, Chen CY, et al. 2012. Organic selenium supplementation increases mercury excretion and decreases oxidative damage in long-term mercury-exposed residents from Wanshan, China. *Environmental Science & Technology*, **46**: 11313-11318.
- Mergler D, Anderson HA, Chan HM, et al. 2007. Methylmercury exposure and health effects in humans: A worldwide concern. *Ambio*, **36**: 3-11.
- Moszczynski P, Rutowski J, Słowinski S, et al. 2008. Immunological effects of occupational exposure to metallic mercury in the population of T-cells and NK-cells. *Analyst*, **123**:

- 99-103.
- National Research Council (NRC) . 2000. Toxicological Effects of Methyl Mercury. Washington DC: National Academy Press.
- Parizek J , Ostadalo I. 1967. Protective effect of small amounts of selenite in sublimate intoxication. *Experimenta* , **23**: 142-143.
- Ralston NVC , Raymond LJ. 2010. Dietary selenium' s protective effects against methylmercury toxicity. *Toxicology* , **278**: 112-123.
- Rutowski J , Moszczynski P , Bem S , *et al.* 1997. Efficacy of urine determination of early renal damage markers for nephrotoxicity monitoring during occupational exposure to mercury vapours. *Medycyna Pracy* , **49**: 129-135.
- Sakamoto M , Yasutake A , Kakita A , *et al.* 2013. Selenomethionine protects against neuronal degeneration by methylmercury in the developing rat cerebrum. *Environmental Science & Technology* , **47**: 2862-2868.
- United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) . 2003. Protocols for environmental and health assessment of mercury released by artisanal and small-scale gold miners (ASM) . Vienna: United Nations Industrial Development Organization.
- U. S. Environmental Protection Agency (USEPA) . 1997. Health Effects of Mercury and Mercury Compounds. Mercury Study Report to the Congress , Vol. V. USEPA: Washington , USA.
- Virtanen KJ , Rissanen TH , Voutilainen S , *et al.* 2007. Mercury as a risk factor for cardiovascular diseases. *Nutritional Biochemistry* , **18**: 75-85.
- World Health Organization (WHO) . 1990. Environmental Health Criteria 101: Methylmercury. Geneva , Switzerland: WHO.
- World Health Organization (WHO) . 1991. Inorganic Mercury. Environmental Health Criteria 118. International Programme on Chemical Safety. Geneva , Switzerland: World Health Organization.

作者简介 涂 瑞,女,1992年生,硕士研究生,研究方向为营养与食品卫生学。E-mail: turui92@126.com
责任编辑 魏中青
