

粤西某硫酸厂周边作物及其种植土壤中 铊污染及其潜在生态风险

王春霖¹, 陈永亨^{2*}, 齐剑英³, 刘乙敏¹, 张永波¹, 曾武涛¹, 王 津², 邓红梅²

(1.广东省环境科学研究院 环境科学研究中心, 广州 510045; 2.广州大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 3.环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘 要:对粤西某硫酸厂周边农田的农作物及其种植土壤中重金属 Tl 的含量分布、潜在生态风险进行了探讨。结果表明,硫酸厂周边农作物及其种植土壤均受到了 Tl 污染,其中作物种植土壤中 Tl 的含量变化范围为 3.76~7.24 mg·kg⁻¹,表现出中度以上的 Tl 污染和较高等度的潜在生态风险;Tl 在 6 种不同农作物中的含量变化范围为 20.69~176.7 mg·kg⁻¹,表现出明显的生物富集效应。其中番薯中 Tl 的富集系数最大,为 26.9;油菜菜中 Tl 的富集系数最小,为 4.11。农作物中 Tl 的健康风险评价表明,在硫酸厂周边农田种植的作物中除毛豆外,其余的农作物可食用部分中 Tl 的危险商(HQ)值均大于 1.0,食用这些农作物将可能对人体产生健康风险,应当引起足够的重视。

关键词:铊;农作物;土壤;潜在生态风险;健康风险评价

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)07-1276-06

Thallium Contamination and Its Potential Ecological Risk from Crops and Their Arable Soils Around a Sulfuric Acid Factory in Western Guangdong Province, China

WANG Chun-lin¹, CHEN Yong-heng^{2*}, QI Jian-ying³, LIU Yi-min¹, ZHANG Yong-bo¹, ZENG Wu-tao¹, WANG Jin², DENG Hong-mei²

(1. Research Center for Environmental Science, Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China; 2.School of Environmental Science and Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 3. South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: The distribution and potential ecological risk of thallium in six vegetables and arable soils taken from a sulfuric acid plant in western Guangdong Province were investigated in this paper. The concentrations of thallium in sweet potato, lettuce, eggplant, dasheen, green soy bean and leaf lettuce were 176.7, 110.0, 56.3, 20.69, 51.2, 22.2 mg·kg⁻¹, respectively; While the concentrations of thallium in arable soils were 6.56, 7.24, 4.27, 5.03, 3.76, 5.32 mg·kg⁻¹, respectively. The Single Factor Pollution Index and the Single Factor Potential Pollution index were in the range of 2.05~3.96 and 82.0~158, respectively. The potential ecological risk assessment indicated thallium pollution in arable soils around the sulfuric acid plant was moderate or severe. Furthermore, the bio-concentration factor of thallium in the crops were in the range of 4.11~26.9, which in sweet potato and leaf lettuce were the maximum and minimum value respectively. The aforementioned results revealed that the crops and their arable soils around the sulfuric acid factory were both contaminated by thallium and vegetables showed significant bioaccumulation effect on thallium. Basing on the health risk assessments, the hazard quotients(HQ) of the crops except green soy bean were all above 1.0. Therefore, much attention should be paid to consume these Tl contaminated vegetables which may cause great potential risks.

Keywords: thallium; crops; soil; potential ecological risk; heal risk assessment

收稿日期:2010-12-20

基金项目:国家自然科学基金委-广东省人民政府联合基金(U0633001);国家青年科学基金资助项目(40903044)

作者简介:王春霖(1982—),男,广东电白人,博士,工程师,主要从事环境监测与重金属污染防治研究。E-mail:wangchunlin1982@163.com

* 通讯作者:陈永亨 E-mail:chenyongheng@eyou.com

铊(Tl)作为一种稀有分散重金属元素,其高潜在毒害性已被广泛证实^[1];它对哺乳动物的毒害性要高于镉、铅、铜和锌,因此被美国 EPA 列为优先控制的毒害污染物之一^[2]。环境中的 Tl 污染物主要来源于富 Tl 矿石(如铅、锌、铜、铁矿)的开采及冶炼活动的残余物,包括富 Tl 尾砂矿、烟道尘、冶炼废渣等;此外,燃煤发电厂、水泥厂、精炼厂也是环境中 Tl 污染物的重要释放源^[3-4]。伴随含 Tl 矿产资源的利用,由矿业生产活动而产生的 Tl 的人为污染已日益凸现^[5-9]。Tl 在表生环境中是一个很活泼的元素,容易从硫化物中淋滤出来进入表生环境,并通过食物链对人体健康产生严重危害。

有关 Tl 的环境问题已引起了国内外学者的高度重视。目前,相关的研究主要集中在 Tl 的毒害性及环境健康危害、土壤中 Tl 的生物有效性及其环境效应、Tl 污染土壤的植物修复、淡水浮游生物和鱼体中 Tl 的含量分布特征及氧化效应、海水中 Tl 的通量及质量平衡、微生物技术处理含 Tl 工业废水、Tl 的形态分析、污染土壤中 Tl 的地球化学分布特征及其影响等方面^[10-17]。对于种植在 Tl 污染土壤上农作物中 Tl 的含量分布特征的研究也有相关报道^[18-21],但相关报道大都是集中在矿山开采区域的 Tl 污染地区,对于化工厂周边农作物及其种植土壤中 Tl 污染及其潜在生态风险的研究还显得比较薄弱。本研究以粤西某硫酸厂周边为研究对象,分析了周边农田土壤及其种植农作物中 Tl 的含量分布情况,明确周边农田土壤 Tl 污染的状况和 Tl 在农作物中的富集分布特征,为农产品潜在的安全风险评价提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2009 年 3 月于粤西某硫酸厂周边的农田采集了 6 种农作物,每种农作物分别采集 5 件样品,同步采集农作物根部耕层土。植物样品清洗干净,去除表面和根部的泥土,按根、茎、叶、果等分割后风干,然后用不锈钢粉碎机粉碎,过 1.0 mm 塑料筛。土壤样品自然风干,然后用玛瑙研钵磨碎,过 0.18 mm 塑料筛,以备测定。

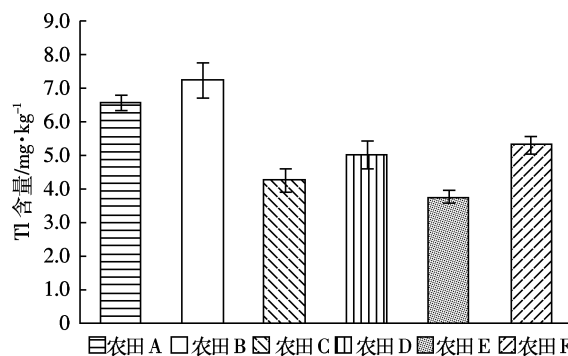
1.2 样品分析

农作物样品和土壤样品中 Tl 的测定分别采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 和 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2\text{-HF}$ 体系进行微波消解,用 PESCIEX ELAN 6100 DRC II 型电感耦合等离子体质谱仪测定^[22]。

2 结果与讨论

2.1 硫酸厂周边农田土壤中 Tl 的含量

硫酸厂周边农田土壤中 Tl 含量分析结果如图 1 所示。可以看出,硫酸厂周边农田土壤中 Tl 含量变化范围在 $3.763.76\sim 7.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,其中种植生菜的农田中 Tl 含量最高,为 $7.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;种植毛豆的农田中 Tl 含量最小,为 $3.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。硫酸厂周边农田土壤中的 Tl 含量不仅高于我国土壤中 Tl 的平均含量($0.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[23],也高于当地背景土壤中 Tl 的含量($1.83\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[17];可见硫酸厂周边农田土壤已受到一定的 Tl 污染。由于 Tl 在环境当中的来源相对单一,主要来源于含 Tl 矿产资源的开采利用。资料表明,该硫酸厂主要利用云浮硫铁矿为生产原料,其生产废水中 Tl 含量为 $15.0\sim 400\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[24],厂区气溶胶中 Tl 含量为 $18.6\sim 33.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[25]。因此,硫酸厂周边土壤中 Tl 主要来自含 Tl 灌溉水和含 Tl 粉尘的干湿沉降。



农田 A~农田 F 分别种植番薯、生菜、茄子、芋头、毛豆、油菜, $n=5$
cropland A to F grows sweet potato, lettuce, eggplant, dasheen, green soy
bean, and leaf lettuce respectively; $n=5$

图 1 硫酸厂周边农田土壤中 Tl 含量

Figure 1 Tl concentrations of soils in cropland nearby
sulfuric acid plant

2.2 硫酸厂周边农田作物中 Tl 的含量分布

土壤中金属元素(生物可利用部分)被作物根系吸收,进而传输到植株的地上部分。通过对硫酸厂周边农田作物中 Tl 含量分布特征进行分析,可为进一步分析 Tl 从土壤进入植物体系的迁移机理提供依据。表 1 列出了硫酸厂周边农田土壤中 6 种主要农作物的 Tl 含量特征。

由表 1 可知,硫酸厂周边农田农作物中 Tl 的含量变化范围在 $20.69\sim 176.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,这不仅远远高于生长在未受 Tl 污染土壤中植物体内的 Tl 含量 $0.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[13],也高于德国某水泥厂周边被含铊粉尘

表 1 硫酸厂周边农田农作物中 Tl 的含量(mg·kg⁻¹, 干重, n=5)

作物	番薯	生菜	茄子	芋头	毛豆	油麦菜
Tl 含量	176.7±1.04	110.0±1.68	56.3±1.54	20.69±0.78	51.2±0.64	22.2±0.56

污染的农田土壤中植物的 Tl 含量(9.5~45 mg·kg⁻¹)^[26]。可见硫酸厂周边农田种植的农作物受到明显的 Tl 污染。不同农作物对 Tl 的吸收程度有所差异,番薯对 Tl 具有明显的吸收,油麦菜对铊的吸收最小,其顺序为番薯>生菜>茄子>毛豆>芋头>油麦菜。

图 2 反映了硫酸厂周边农田中生长的 6 种主要农作物各部分(根、茎、叶、果)的 Tl 分布情况。可以看出,Tl 在不同农作物器官中吸收累积程度不同。番薯中,Tl 在茎部的富集最明显,其次是在根部,在叶中的吸收富集最小;生菜中,Tl 在根部明显富集,远远大于其地上部分(叶子);茄子中,Tl 在各器官中的吸收累积程度相当,其在根部的吸收最大,在果实中的吸收富集最小;芋头中,Tl 在果实中吸收最明显,这主要是芋头的果实是在地下部分,且其直接连接根系;毛豆中,Tl 在根、茎、叶、果中的吸收富集程度逐渐减小;油麦菜中,Tl 在叶中的吸收富集最大,茎对 Tl 的吸收富集最小。从图 2 可知,Tl 基本上富集在作物的根和叶中,茎中有所降低,果实和块茎中相对最低。即在农作物中,Tl 基本上遵循根和叶的含量高于茎的规律,这与肖唐付、张忠等报道的结果基本一致^[18-19]。作物根部 Tl 含量相对较高,这是由于一方面农作物一般是通过根系来吸收土壤中的 Tl,另一方面是由于植物根际微生物和腐植酸有助于根部对 Tl 的固定和吸收^[27]。

2.3 硫酸厂周边农田土壤中 Tl 的潜在生态风险评价

为了定量表达农田污染土壤中 Tl 的潜在生态风险,采用潜在生态危害指数法对硫酸厂周边农田土壤进行评价,计算方法如下所示^[28]:

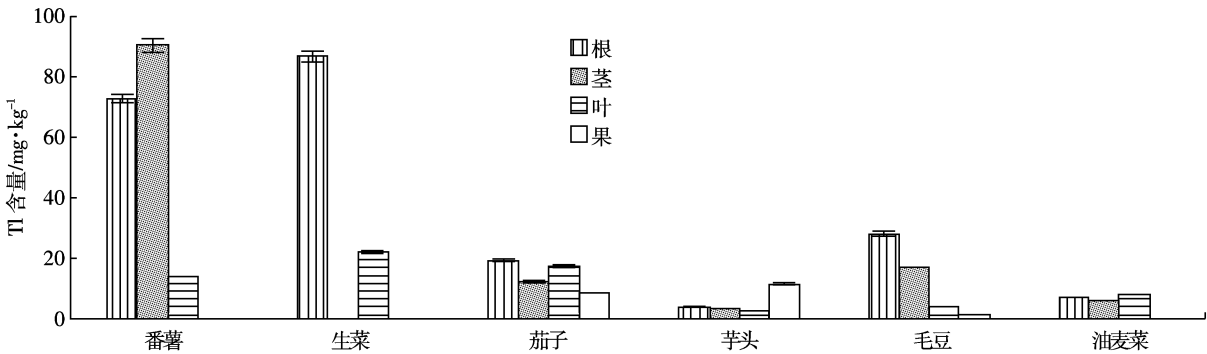


图 2 硫酸厂周边农田农作物中 Tl 含量分布(n=5)

Figure 2 Tl concentrations of crops growing in croplands around the sulfuric acid factory(n=5)

$$C_f=\frac{C_x}{C_0}$$
(1)

$$E_\gamma=T_\gamma\times C_f$$
(2)

式(1)中: C_f 为 Tl 的单因子污染指数; C_x 为土壤中 Tl 含量的实测值; C_0 为 Tl 的参照标准值,此处选用研究区域土壤的 Tl 背景值(1.83 mg·kg⁻¹)^[17]作为参照标准值。式(2)中: E_γ 为 Tl 的毒性相应系数,目前还没有可以参考的 Tl 的毒性响应系数,故在此定义 Tl 的毒性响应系数为 40^[29]。

单因子污染指数 C_f 和单因子潜在生态风险指数值 E_γ 所对应的污染程度以及潜在生态风险程度见表 2。

按式(1)、(2)中计算硫酸厂周边农田土壤中 Tl 的污染指数和潜在生态风险值,其结果见表 3。

根据表 3 的分析结果可看出,硫酸厂周边农田土壤中,Tl 的单因子污染指数变化范围在 2.05~3.96 之间,属于中度到较高的 Tl 污染水平。其中,生菜种植

表 2 C_f 和 E_γ 值所对应的污染程度以及潜在生态风险程度*

Table 2 Values of C_f and E_γ corresponding to the degree of pollution and ecological risk			
单因子污染指数	污染程度	单因子潜在生态危害指数	潜在生态风险
$C_f<1$	低度	$E_\gamma<40$	低度
$1\leq C_f<3$	中度	$40\leq E_\gamma<80$	中度
$3\leq C_f<6$	较高	$80\leq E_\gamma<160$	较高
$C_f\geq 6$	高度	$160\leq E_\gamma<320$	高度
		$E_\gamma\geq 320$	极高

注:* 参考文献^[28]。

表 3 硫酸厂周边农田土壤中 Tl 的污染指数和
潜在生态风险指数

Table 3 Pollution and potential ecological risk index of Tl from the
soils of croplands around the sulfuric acid factory

农田土壤	C_f	污染程度	E_y	潜在生态风险
番薯种植地	3.58	较高	143	较高
生菜种植地	3.96	较高	158	较高
茄子种植地	2.33	中度	93.2	较高
芋头种植地	2.75	中度	110	较高
毛豆种植地	2.05	中度	82.0	较高
油麦菜种植地	2.91	中度	116	较高

地土壤的 Tl 单因子污染指数最高,为 3.96,属于较高级别的 Tl 污染水平;而毛豆种植地土壤的 Tl 单因子污染指数最小,为 2.05,属于中度程度的 Tl 污染水平。硫酸厂周边农田土壤中,Tl 的单因子潜在生态风险指数变化范围在 82.0~158 之间,其潜在生态风险处于较高的程度。其中,生菜种植地土壤中 Tl 的单因子潜在生态风险指数最大,为 158,表现为较高的潜在生态风险程度;而毛豆种植地土壤中 Tl 的单因子潜在生态风险指数最小,为 82.0,表现出较高级别的潜在生态风险。可见无论是从 Tl 的单因子污染指数还是潜在生态风险指数来看,硫酸厂周边农田土壤都受到了中度以上的 Tl 污染,存在较高的 Tl 潜在生态风险程度。

2.4 硫酸厂周边农田种植作物中 Tl 的蓄积效应及健康风险评价

农作物中重金属的蓄积程度可采用生物富集系数来表示,其计算公式如下所示^[30]:

$$A_i = L_i / N_i \quad (3)$$

式中: A_i 为元素 i 的生物富集系数; L_i 为元素 i 在生物中的含量; N_i 为元素 i 在作物种植土壤中的含量。

硫酸厂周边农田种植作物中 Tl 的生物富集系数采用式(3)进行计算,其结果如表 4 所示。

从表 4 可知,不同农作物对 Tl 的富集程度是不同的,硫酸厂周边农田种植作物中,番薯对 Tl 的吸收富集最明显,其富集系数为 26.9,芋头对 Tl 的富集系数最小,为 4.11。可见重金属 Tl 容易被农作物吸收并在体内富集。Tl 容易被农作物吸收,这是因为 Tl

表 4 农作物中 Tl 的生物富集系数(A_i)

Table 4 Bioaccumulation factor of Tl in crops(A_i)

作物名称	番薯	生菜	茄子	毛豆	油麦菜	芋头
A_i	26.9	15.2	13.2	13.6	4.17	4.11

与 K 具有相近的地球化学性质;Tl⁺(0.159 nm)与 K⁺(0.151 nm)具有相似的离子半径^[24],Tl 遵从 K 的分布规律并且能够在生物化学过程中置换植物体中的 K⁺,从而得以在植物体中富集。鉴于 Tl 对哺乳动物的高毒性,若长期食用受 Tl 污染的农作物,势必对人体健康造成极大的潜在危害。

为了评价当地居民食用硫酸厂周边农田农作物的健康风险,采用危险商(HQ)评估作物中 Tl 对人体健康的风险,其计算公式如下^[31]:

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} \quad (4)$$

$$ADD = \frac{C_f \times IR \times ED \times EF}{BW \times AT \times 365} \quad (5)$$

式中,ADD 是重金属 Tl 的日摄入量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); C_f 为农作物中 Tl 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)(若测定过程中是作物中 Tl 的干重含量,则在计算过程中 C_f 应转化为鲜重的含量);Tl 的取值为 $8 \times 10^{-5} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[32];IR 是成年人每日食用的农作物量,薯类、干豆类、深色蔬菜和浅色蔬菜取值分别为 0.05、0.005、0.1、0.2 kg^[32];ED 是暴露时间,取值为 30 a^[33];EF 是暴露频率,取值为 350 d·a⁻¹^[34];BW 是成年人的平均体重,取值为 62.7 kg^[35];AT 是生命期望值,取值为 70 a;365 为转化系数(按 1 a 365 d 计)。

假定农作物烹调过程中不影响 Tl 的活性和毒性,当 $HQ \leq 1.0$,表明没有明显的负面影响, $HQ > 1.0$,表明对人体健康产生影响的可能性很大, $HQ > 10$ 时,表明存在慢性毒性。

根据式(4)~(5),计算得到硫酸厂周边农田农作物中 Tl 的 ADD 和 HQ 值如表 5 所示。

由表 5 可知,在所有样品中 Tl 的 ADD 值很小,都在 10^{-4} 数量级以上,表明当地一个成年居民每日从这些农作物中摄入 Tl 的量较少。毛豆中 Tl 的 HQ 值小于 1.0,表示 Tl 的单一健康危害较小;但番薯、生菜、芋头、油麦菜、茄子中 Tl 的 HQ 值均大于 1.0,表

表 5 硫酸厂周边农田农作物中 Tl 的 ADD 和 HQ 值

Table 5 The ADD and HQ values of Tl in crops growing in
croplands nearby sulfuric acid plant

农作物名称	ADD/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$	HQ
番薯	2.47×10^{-4}	3.1
生菜	7.21×10^{-4}	9.0
茄子	2.98×10^{-4}	3.7
毛豆	3.77×10^{-5}	0.47
油麦菜	3.33×10^{-4}	4.2
芋头	2.0×10^{-4}	2.5

明食用这些蔬菜农作物对人体健康影响较大,也说明硫酸厂周边农田种植的农作物存在 Tl 的潜在健康危害。

3 结论

粤西某硫酸厂周边农田土壤中 Tl 的含量变化范围在 $3.76\sim 7.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,其 Tl 的单因子污染指数和潜在生态风险指数变化范围分别为 $2.05\sim 3.96$ 和 $82\sim 158$,表明硫酸厂周边农田土壤受到了中度以上的 Tl 污染,存在较高度度的 Tl 潜在生态风险。

该农田种植的农作物中 Tl 的含量变化范围为 $20.69\sim 176.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,生物富集系数为 $4.11\sim 26.9$;硫酸厂周边农作物对 Tl 表现出明显的富集效应,其中番薯对 Tl 的富集最明显,其富集系数达到 20.69,油菜对 Tl 的富集系数最小,为 4.11,且各农作物中 Tl 的含量分布基本上遵循根、叶中的含量高于块、茎的一般规律。

农作物中 Tl 的健康风险评价表明,硫酸厂周边农田种植的作物中除毛豆外,其余的农作物可食用部分中 Tl 的 HQ 值均大于 1.0,食用这些农作物将可能对人体产生健康风险,应当引起人们足够的重视。

参考文献:

- [1] Mulkey J P, Oehme F W. A review of thallium toxicity[J]. *Veterinary and Human Toxicology*, 1993, 35(5):445-453.
- [2] Peter A L, Viraraghavan T. Thallium: A review of public health and environmental concerns [J]. *Environment International*, 2005, 31:493-501.
- [3] Nriagu J O. Thallium in the environment [M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1998.
- [4] Yang C X, Chen Y H, Peng P A, et al. Trace element transformations and partitioning during the roasting of pyrite ores in the sulfuric acid industry[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167:835-845.
- [5] Brockhaus A, Dolgner R, Ewers U, et al. Intake and health effects of thallium among a population living in the vicinity of cement plant emitting thallium-containing dust[J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 1981, 44:375-389.
- [6] 张忠,陈国丽,张宝贵,等.尿液、头发、指(趾)甲高铊汞砷是铊矿区污染标志[J]. *中国环境科学*, 1999, 19(6):481-484.
ZHANG Zhong, CHEN Guo-li, ZHANG Bao-gui, et al. Contaminative markers of Tl-mining district from the high contents of Tl, Hg and As of urine hair and nail in the villagers[J]. *China Environmental Science*, 1999, 19(6):481-484.
- [7] Grimalt J O, Ferrer M, Macpherson E. The mine tailing accident in Aznalcollar[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, 242:3-11.
- [8] 张兴茂.云南南华铊矿床和地球化学[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1998, 17(1):44-45.
ZHANG Xing-mao. Nanhua arsenic thallium deposit and its environmental geochemistry in Yunnan[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 1998, 17(1):44-45.
- [9] Wierzbicka M, Szarek-Lukaszewska G, Grodzinska. Highly toxic thallium in plants from the vicinity of Olkusz(Poland)[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, 59:84-88.
- [10] Lan C H, Lin T S. Acute toxicity of trivalent thallium compounds to *Daphnia magna*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 61:432-435.
- [11] Al-Najar H, Kaschl A, Schulz R, et al. Effect of thallium fractions in the soil and pollution origins on Tl uptake by hyper-accumulator plants: a key factor for the assessment of phytoextraction[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2005, 7:55-67.
- [12] Al-Najar H, Kaschl A, Schulz R, et al. Plant availability of thallium in rhizosphere of hyperaccumulator plants: A key factor for assessment of phytoextraction[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249:97-105.
- [13] Twiss M R, Twining B S, Fisher N S. Partitioning of dissolved thallium by seston in Lakes Erie and Ontario[J]. *Canadian Journal of Fish and Aquatic Science*, 2003, 60:1369-1375.
- [14] Rehkamper M, Siddiqui S A. The determination of thallium in sediments and natural waters[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1986, 181:117-123.
- [15] Mueller R F. Microbially mediated thallium immobilization in bench scale systems[J]. *Mine Water and Environment*, 2001, 20:17-29.
- [16] Karlsson U, Duker A, Karlsson S. Separation and quantification of Tl(I) and Tl(III) in fresh water samples[J]. *Journal of Environmental Science and Health(Part A)*, 2006, 41:1155-1167.
- [17] Yang C X, Chen Y H, Peng P A, et al. Distribution of natural and anthropogenic thallium in the soils in an industrial pyrite and slag disposing area[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 341:159-172.
- [18] 张忠,张宝贵,龙江平,等.中国铊矿床开发过程中铊环境污染研究[J]. *中国科学(D辑)*, 1997, 27(4):331-336.
ZHANG Zhong, ZHANG Bao-gui, LONG Jiang-ping, et al. The research of thallium environmental pollution during the development process of thallium deposits[J]. *Science in China(Series D)*, 1997, 27(4):331-336.
- [19] Xiao Tang-fu, Guha Jayanta, Boyle Dan, et al. Environmental concerns related to high thallium levels in soils and thallium uptake by plants in southwest Guizhou, China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2004, 318:223-244.
- [20] 聂爱国,龙江平.贵州西南地区慢性铊中毒途径研究[J]. *环境科学与技术*, 1997, (1):12-14.
NIE Ai-guo, LONG Jiang-ping. A research on pathway of chronic thallium poisoning in Southwestern of Guizhou Province, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, (1):12-14.
- [21] Sager M. Thallium in agricultural practice//Nriagu J O(Eds.). *Thallium in the Environment*[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998: 59-87.
- [22] WANG Chunlin, CHEN Yongheng, PAN Jianyang, et al. Speciation analysis of metals(Tl, Cd and Pb) in Tl-containing pyrite and its cinder from Yunfu Mine, China, by ICP-MS with sequential extraction[J].

- Chinese Journal of Geochemistry*, 2010, 29:113–119.
- [23] 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: 88.
- China National Environmental Monitoring Centre. The background values of elements in Chinese soils[M]. Beijing: China Environmental Sciences Press, 1990: 88.
- [24] 陈永亨, 谢文彪, 吴颖娟, 等. 中国含铊资源开发与铊环境污染[J]. 深圳大学学报(理工版), 2001, 18(3): 57–63.
- CHEN Yong-heng, XIE Wen-biao, WU Ying-juan, et al. Utilization of mineral resources containing thallium and thallium pollution in China [J]. *Journal of Shenzhen University (Science & Engineering)*, 2001, 18(3): 57–63.
- [25] 王春霖. 含铊硫铁矿中铊在硫酸生产过程的赋存形态转化、分布特征及对环境铊污染的贡献[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- WANG Chun-lin. The transformation and distribution characteristics of thallium forms within Tl-containing pyrite in the process of sulfuric acid production and its contribution of thallium pollution on the environment[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [26] Allus M A, Martin M H, Nickless G. Comparative toxicity of thallium to two plant species[J]. *Chemosphere*, 1987, 16: 929–932.
- [27] Leblanc M, Petit D, Deram A, et al. The phytomining and environmental significance of hyperaccumulation of thallium by *Iberis intermedia* from Southern France[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society*, 1999, 94: 109–114.
- [28] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14: 975–1001.
- [29] 高博, 孙可, 任明忠, 等. 北江表层沉积物中铊污染的生态风险[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 528–532.
- GAO Bo, SUN Ke, REN Ming-zhong, et al. Ecological risk assessment of thallium pollution in the surface sediment of Beijiang River[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 528–532.
- [30] 周启星, 孔繁翔, 朱琳. 生态毒理学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- ZHOU Qi-xing, KONG Fan-xiang, ZHU Lin. *Ecotoxicology*[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [31] USEPA. Risk assessment guidance for superfund, vol. I: Human health evaluation manual (Part A) [R]. EPA 540/1–89/002. US Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response. Washington D C, 1989.
- [32] USEPA. Toxicological review of thallium and compounds[R]. EPA 635/R–08/001F. US Environmental Protection Agency, Washington D C, 2009.
- [33] 中华人民共和国卫生部. 中国居民营养与健康现状[R]. 2004.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. National Nutrition and Health Status of Chinese Residents[R]. 2004.
- [34] USEPA. Exposure Factors Handbook [R]. EPA/600/P–95/002Fa (Update to Exposure Factors Handbook (EPA/600/8–89/043)). Washington, D C: Environmental Protection Agency Region I, 1997.
- [35] 王陇德. 中国居民营养与健康状况调查之一——2002 综合报告 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2005: 19–32.
- WANG Long-de. One of surveys for national nutrition and health status of Chinese residents[M]. Beijing: People's Medical Press, 2005: 19–32.