

燃煤电厂周边河流中氟、砷和重金属污染健康风险评价

潘莎^{1,2}, 陈再琴^{1,2}, 汪钊宇^{1,2}, 刘龙³, 韦艳^{1,2}, 谢春^{1,2}, 张华^{1,2*}

(1. 贵州医科大学公共卫生学院职业卫生与环境卫生学系, 贵州 贵阳 550004;

2. 环境污染与疾病监控教育部重点实验室(贵州医科大学), 贵州 贵阳 550004;

3. 贵州医科大学食品安全学院, 贵州 贵阳 550004)

摘要: 通过在某燃煤电厂周边河流中布设15个采样点, 监测其中氟(F)、砷(As)和重金属的含量, 并评价其通过饮水和皮肤接触途径对不同人群所产生的健康风险。结果表明: 河流中F、As、Cd、Cr监测值均未超过《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准限值, Hg严重超标; 河流中污染物所致儿童和成人健康危害的总风险分别为 $2.62 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 和 $1.76 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 均高于瑞典环保局、荷兰建设和环境部推荐的最大可接受风险水平 $1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 其中As、Cr对儿童的健康危害风险较大, 分别为 $1.69 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 和 $9.21 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 应作为风险决策管理的重点。

关键词: 氟; 砷; 重金属; 燃煤电厂; 河流; 健康风险评价

中图分类号: X522; X820.4

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2019)04-0033-05

Health Risk Assessment of Fluorine, Arsenic and Heavy Metals in River around Coal-fired Power Plant

PAN Sha^{1,2}, CHEN Zai-qin^{1,2}, WANG Zhao-yu^{1,2}, LIU Long³, WEI Yan^{1,2}, XIE Chun^{1,2}, ZHANG Hua^{1,2*}

(1. Department of Occupational Health and Environmental Hygiene, School of Public Health, Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 550004, China; 2. Key Laboratory of Environmental Pollution Monitoring and

Disease Control (Guizhou Medical University), Ministry of Education, Guiyang, Guizhou 550004, China;

3. College of Food Safety, Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 550004, China)

Abstract: The health risks of fluorine, arsenic and heavy metals through drinking water and dermal exposure were evaluated base on the monitoring data from fifteen sampling sites in river around a coal-fired power plant. The results showed that the concentration of F, As, Cd, Cr were below the standard limits of grade III in Environmental Quality Standards for Surface Water (GB 3838—2002). The concentration of Hg seriously exceeded the standard limit. The total health risk of the pollutants for children and adult were $2.62 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ and $1.76 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, respectively, both were higher than the maximum acceptable risk of $1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ recommended by Sweden and Holland Environmental Protection Bureau. As and Cr had severe health risks for children with the total health risk of $1.69 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ and $9.21 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, respectively, and should be regarded as the targets of risk control.

Key words: Fluorine; Arsenic; Heavy metals; Coal-fired power plant; River; Health risk assessment

煤是重要的能源物质, 我国煤炭资源丰富, 电力行业是主要的煤炭消费行业。煤中氟(F)、砷(As)、汞(Hg)、镉(Cd)、铬(Cr)等在燃煤电厂生产过程中可通过污水排放、地表径流、大气沉降等多种途径进入周边河流, 造成河流水环境中F、As、Hg、Cd、Cr等污染物累积和超标, 对河流生态系统

收稿日期: 2018-06-12; 修订日期: 2019-06-28

基金项目: 贵州省科技合作计划基金资助项目(黔科合LH字[2015]7332); 贵州医科大学博士启动基金资助项目(院博合J字[2014]005号)

作者简介: 潘莎(1986—), 女, 贵州金沙人, 副教授, 博士, 主要从事污染物监测与健康风险评价研究。

* 通信作者: 张华 E-mail: huazhang202@126.com

产生较大影响,并可通过饮水、人体皮肤接触等途径威胁人体健康。

健康风险评价是20世纪80年代发展起来、将环境污染与人体健康联系起来、定量描述污染物对人体健康产生危害的风险程度的一种评价方法,其有利于对由水质问题引起的人体健康损害事件发生的可能性及其严重程度认识^[1-2]。目前,虽然我国学者运用健康风险评价模型对河流、湖泊、水库等水环境进行了大量研究^[3-7],但是对燃煤电厂周边地表水环境健康风险评价的研究尚不多见。今通过调查贵州省某燃煤电厂周边河流中F、As、Hg、Cd、Cr的含量,并采用美国国家环保署(USEPA)推荐的健康风险评价模型评估其潜在健康风险水平,以期为区域水质安全控制和居民健康防护提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 样品采集与保存

以流经某燃煤电厂的河流为研究对象,结合地貌特征,选取河流开阔、水流平稳处布点采样。在河流下游每隔500 m设1个采样点,共设15个采样点,在河流上游设置1个对照点,见图1。

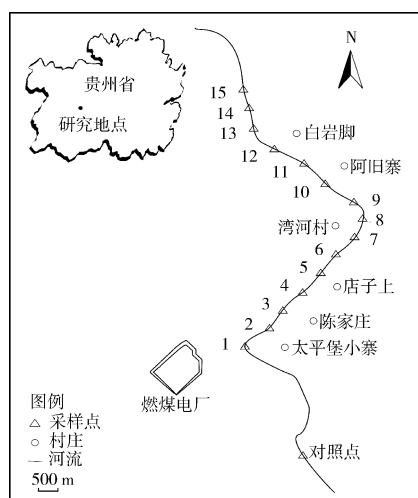


图1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites

2016年10月对各采样点在同一时段进行样品采集,同时采集平行样。在各采样点取水面下20 cm处的表层水样500 mL置于经10%硝酸溶液浸泡、洗净的聚乙烯塑料瓶中。每个水样分别采集2瓶,其中一瓶用于F含量测定,另一瓶经

0.45 μm滤膜过滤,硝酸酸化至pH值<2.0,用于As和重金属含量测定。水样带回实验室后放入冰箱于4℃下保存。

1.2 样品分析

按照《水和废水监测分析方法》(第四版)对水样中F、As、Hg、Cd和Cr的含量进行分析。F采用氟离子选择电极(春花,CSB-F-2型)检测,As和Hg含量采用原子荧光光谱仪(瑞利,AF-630A型)检测,Cd和Cr含量采用原子吸收光谱仪(耶拿,ContrAA 700型)检测。样品测定过程中加标回收率控制在80%~120%之间。

1.3 健康风险评价方法

根据世界卫生组织(WHO)和国际癌症研究机构(IARC)通过全面评价化学有毒物质致癌性可靠程度而编制的分类系统^[8],今测定的污染物中As、Cd、Cr属致癌物,F和Hg属非致癌物,饮水途径和皮肤接触途径摄入为这些物质对人体健康产生危害的主要暴露途径。鉴于研究河流通常作为饮用水水源和人体直接接触的娱乐用水,故其健康风险评价采用USEPA推荐的健康风险评价模型,主要考虑通过饮水途径、皮肤接触途径的化学致癌物和非化学致癌物对成人和儿童健康造成的危害^[9]。

1.3.1 饮水途径健康风险评价模型

$$R_i^c = [1 - \exp(-D_i \times SF)] / 71.1 \quad (1)$$

$$R_i^m = (D_i \times 10^{-6} / Rfd) / 71.1 \quad (2)$$

$$D_i = IR \times C_i / BW \quad (3)$$

式中: R_i^c 为化学致癌物经饮水途径所致健康危害的个人年均风险, a^{-1} ; D_i 为污染物经饮水途径的单位体重日均暴露剂量, $mg/(kg \cdot d)$; SF为化学致癌物经饮水途径的致癌强度系数, $mg/(kg \cdot d)$, As、Cd和Cr分别取15 $mg/(kg \cdot d)$ 、6.1 $mg/(kg \cdot d)$ 和41 $mg/(kg \cdot d)$ ^[9]; 71.1为贵州省人均期望寿命^[10],a; R_i^m 为非致癌物经饮水途径所致健康危害的个人年均风险, a^{-1} ; Rfd为非致癌物经饮水途径日均摄入的参考剂量, $mg/(kg \cdot d)$, F和Hg分别取0.06 $mg/(kg \cdot d)$ 和0.0003 $mg/(kg \cdot d)$ ^[9,11]; IR为日平均饮水量,L/d,成人和儿童分别取1.7 L/d和1 L/d^[9]; C_i 为污染物的质量浓度, mg/L ; BW为人均体重,kg,成人和儿童分别取57 kg和22.9 kg^[9]。

1.3.2 皮肤接触途径健康风险评价模型

$$R_b^p = [1 - \exp(-D_b \times SF)] / 71.1 \quad (4)$$

$$R_b^f = [D_b \times 10^{-6} / Rfd] / 71.1 \quad (5)$$

$$D_b = I_b \times A_{sb} \times FE \times EF \times ED / (BW \times AT \times f) \quad (6)$$

$$I_b = 2 \times 10^{-3} \times k \times C_b \times \sqrt{\frac{6 \times \tau \times TE}{\pi}} \quad (7)$$

式中： R_b^p 为致癌物质经皮肤接触途径所致健康危害的个人年均风险， a^{-1} ； D_b 为污染物经皮肤接触途径的单位日均暴露剂量， $mg/(kg \cdot d)$ ； R_b^f 为非致癌物质经皮肤接触途径所致健康危害的个人年均风险， a^{-1} ； I_b 为每次洗澡时皮肤对污染物的吸附量， $mg/(cm^2 \cdot 次)$ ； A_{sb} 为人体表面积， cm^2 ，成人和儿童分别取 $16\ 000\ cm^2$ 和 $6\ 660\ cm^2$ [9]； FE 为洗澡频率， $次/d$ ，取 $0.3\ 次/d$ [9]； EF 为暴露频率， d/a ，取 $350\ d/a$ [9]； ED 为暴露延时， a ，致癌物和非致癌物分别取 $70\ a$ 和 $35\ a$ [9]； AT 为平均暴露时间， a ，致癌物取 $70\ a$ ，非致癌物取 $35\ a$ [9]； f 为肠道吸附比率，取 1 [9]； k 为皮肤吸附参数， cm/h ，取 $0.001\ cm/h$ [9]； C_b 为污染物的质量浓度， mg/L ； τ 为延滞时间， h ，取 $1\ h$ [9]； TE 为洗澡时间， h ，取 $0.56\ h$ [9]。

1.3.3 水环境健康风险评价总体模型

假定每种化学物质对人体健康危害毒性作用呈相加关系，而不是协同或拮抗关系，水环境总体健康危害风险可表示为：

$$R_{\text{总}} = R^c + R^m + R^p + R^f \quad (8)$$

2 结果与讨论

2.1 F、As 和重金属监测结果

燃煤电厂周边河流中 F、As、Hg、Cd、Cr 均检出，检出率为 100%，其监测结果见表 1。由表 1 可知，依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类水质标准进行评价，F、As、Cd、Cr 均达标，Hg 是标准限值的 3 倍，超标率为 100%。各采样点 Hg 的监测值均高于对照点 ($0.151\ \mu g/L$)，与国内其他区域地表水相比也处于较高水平，如其高于乌江中上游水域水体 ($0.08\ \mu g/L \sim 0.26\ \mu g/L$) 和澜沧江 ($0\ \mu g/L \sim 0.2\ \mu g/L$)，是湘江 ($0.04\ \mu g/L$) 的 7.55 倍 [12-14]。有研究表明 [15]，燃煤电厂是环境 Hg 污染的主要来源，可对环境造成严重的 Hg 污染。燃煤电厂在生产过程中产生的含 Hg 废气和粉尘经大气输送沉降进入河流中，这是导致河流 Hg 含量较高的原因。由此可见，燃煤电厂周边地表水已受到电厂生产过程中污染物排放的影响，相关政府部门应加强对该燃煤电厂污染物排放的监督管理。

表 1 燃煤电厂周边河流中各元素的监测结果 $\mu g/L$

Table 1 Results of each element in river around

a coal-fired power plant				
元素	范围	平均值	标准差	标准限值
F	259 ~ 479	444	57.6	1 000
As	0.608 ~ 3.83	1.80	1.05	50
Hg	0.218 ~ 0.398	0.302	0.054	0.1
Cd	0.001 ~ 0.051	0.013	0.003	5
Cr	0.025 ~ 1.89	0.364	0.312	50

2.2 健康风险评价

燃煤电厂周边河流中 F、As 和重金属经饮水及皮肤接触途径引起的平均个人年健康风险评价结果见表 2 和表 3。

由表 2 可知，非致癌物对成人和儿童健康危害个人年均风险水平均低于国际辐射防护委员会推荐的最大可接受风险水平 $5.0 \times 10^{-5}\ a^{-1}$ 。致癌性污染物中，As 和 Cr 对人群的致癌风险均高于瑞典环保局、荷兰建设和环境部推荐的最大可接受风险水平 $1.0 \times 10^{-6}\ a^{-1}$ ，其中对儿童致癌风险较大，分别为 $1.69 \times 10^{-5}\ a^{-1}$ 和 $9.21 \times 10^{-6}\ a^{-1}$ 。就风险水平而言，致癌物风险水平比非致癌物高四五个数量级，这与王若师等 [16] 研究结果一致。可见，该燃煤电厂周边河流中 Hg 虽为主要污染物，但 Hg 属非致癌物，当地水环境污染所致人体健康风险主要来自致癌性污染物，As、Cr 应作为河流水环境风险决策管理的重点管控对象。

污染物所致儿童和成人健康危害的总风险分别为 $2.62 \times 10^{-5}\ a^{-1}$ 和 $1.76 \times 10^{-5}\ a^{-1}$ ，高于 $1.0 \times 10^{-6}\ a^{-1}$ 的最大可接受风险水平，说明水体存在风险。因此，政府应采取切实可行的修复措施使该地区的环境质量得到改善，以保障人民健康。儿童总健康风险大于成人，说明与成人相比，儿童是更加敏感的风险受体，受到污染物危害更大，该结果与祝慧娜等 [17]、余葱葱等 [9] 分别对湘江长株潭段水环境和电镀厂周边水环境重金属污染的健康风险研究结果一致，这可能与儿童的免疫力较为低下、生理屏障比较薄弱等有关 [18]。此外，由表 3 可知，致癌物通过饮水途径和皮肤接触途径所致的健康危害风险均比非致癌物大；水体中化学致癌物和非致癌物通过饮水途径所致的健康危害年风险值比由皮肤接触途径所致的健康危害年风险值大 3 个数量级，由此可推断污染物通过皮肤接触进入人体的量较小。

表2 各污染物对不同人群所致的健康风险

a⁻¹

Table 2 Health risks of each pollutant for different populations

a⁻¹

人群	非致癌风险			致癌风险				总健康风险
	F	Hg	合计	As	Cr	Cd	合计	
儿童	4.57×10^{-9}	6.19×10^{-10}	5.19×10^{-9}	1.69×10^{-5}	9.21×10^{-6}	4.89×10^{-8}	2.61×10^{-5}	2.62×10^{-5}
成人	3.12×10^{-9}	4.24×10^{-10}	3.54×10^{-9}	1.13×10^{-5}	6.28×10^{-6}	3.35×10^{-8}	1.76×10^{-5}	1.76×10^{-5}

表3 各途径对不同人群所致的健康风险

a⁻¹

Table 3 Health risks in various ways for different populations

a⁻¹

人群	饮水途径			皮肤接触途径			总健康风险
	非致癌风险	致癌风险	合计	非致癌风险	致癌风险	合计	
儿童	5.17×10^{-9}	2.61×10^{-5}	2.61×10^{-5}	1.94×10^{-11}	8.68×10^{-8}	8.68×10^{-8}	2.62×10^{-5}
成人	3.52×10^{-9}	1.75×10^{-5}	1.75×10^{-5}	1.89×10^{-11}	8.37×10^{-8}	8.37×10^{-8}	1.76×10^{-5}

2.3 不确定性分析

健康风险评价虽然把污染物与人体健康联系起来,定量描述污染对人体健康产生危害的风险,但是风险评价中存在许多不确定性^[19-21]。文中仅对通过饮水、皮肤接触途径的污染物的健康风险进行研究,对其他暴露途径的风险未探讨,而且仅选取几种典型的污染物。同时假定各污染物对人体健康的毒性作用是独立的,而在实际中各污染物之间可能存在着协同或拮抗等关系,因而评价结果可能会在一定程度上低估了污染物暴露的风险。另外,模型计算过程中所涉及的一些暴露参数是从相关文献中直接引用,其可能并不完全适合于研究区域人群,且对一些影响因素采取了忽略的方式,如采样的瞬时性、自然衰减过程等影响因素并没有考虑在内。鉴于评价过程中存在不确定性因素,该评价旨在引起人们对研究区域污染物对人体健康风险的重视,更为细致和深入的工作有待于进一步开展。

3 结论

(1) 燃煤电厂周边河流中 F、As、Cd、Cr 均达到地表水Ⅲ类水质标准, Hg 超标, 表明燃煤电厂周边地表水已受到电厂生产过程中 Hg 排放的影响。

(2) 研究区河流中非致癌物 F、Hg 对人群的健康危害个人年均风险均低于国际辐射防护委员会推荐的最大可接受风险水平 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$; 致癌物 As、Cr 对人群的致癌风险均高于瑞典环保局、荷兰建设和环境部推荐的最大可接受风险水平 $1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 故应将 As、Cr 作为首要的水环境健康风险管理指标。儿童总健康风险为 $2.62 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 高于成人 ($1.76 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$), 受到污染物

危害更大。水体中化学致癌物和非致癌物通过饮水途径所致的健康危害年风险远高于通过皮肤接触途径所致的健康危害风险。

(3) 鉴于燃煤电厂周边河流已受到污染, 对人群存在一定的健康风险, 建议相关部门应对河流中污染物的含量及分布状况进行长期监测、分析和研究, 并采取相应的风险应对策略, 确保河流水环境安全, 以保障当地居民的健康。

[参考文献]

- [1] CHEN J, WU H, QIAN H, et al. Assessing nitrate and fluoride contaminants in drinking water and their health risk of rural residents living in a semiarid region of northwest china[J]. *Exposure and Health*, 2017, 9(3): 183-195.
- [2] 沈扬, 冯承莲, 艾扬, 等. 下辽河平原地下水健康风险评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2017, 29(6): 36-40.
- [3] 季文佳, 王琪, 黄启飞, 等. 危险废物事故排放的湖泊水环境健康风险预测[J]. *环境工程*, 2010, 28(6): 79-82.
- [4] 司家济, 高良敏, 解志林. 焦岗湖水环境重金属分布及健康风险评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(3): 41-44.
- [5] 李祥平, 齐剑英, 陈永亨. 广州市主要饮用水源中重金属健康风险的初步评价[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(3): 547-553.
- [6] 张菊, 邓焕广, 陈诗越, 等. 东平湖水源地水环境健康风险初步评价[J]. *安全与环境学报*, 2011, 11(6): 111-115.
- [7] 张永江, 邓茂, 黄晓容, 等. 生态保护区域饮用水源地水质金属健康风险评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2017, 29(3): 32-36.
- [8] 刘美霞, 石峻岭, 吴世达, 等. IARC:900 种有害因素及接触场所对人类致癌性的综合评价(一)[J]. *环境与职业医学*, 2006, 23(2): 180-183.
- [9] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2017, 38(3): 993-1001.
- [10] 秦好丽, 程雅柔. 贵阳市西郊水厂所供管网末梢水重金属污染物季节性特征及潜在健康风险评价[J]. *生态毒理学报*,

- 2015,10(2):411-417.
- [11] 刘世明,刘泽春. 农村饮用水氟砷检测及健康风险评价[J]. 中国预防医学杂志,2015,16(6):446-449.
- [12] 樊远昆. 乌江中上游河流中汞对鱼类影响的初步研究[J]. 环保科技,1991(2):32-35.
- [13] ZHAO Q H, LIU S L, DENG L, et al. Spatio-temporal variation of heavy metals in fresh water after dam construction: a case study of the Manwan Reservoir, Lancang River[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2012,184(7):4253-4266.
- [14] ZENG X X, LIU Y G, YOU S H, et al. Spatial distribution, health risk assessment and statistical source identification of the trace elements in surface water from the Xiangjiang River, China[J]. Environmental Science and Pollution Research,2015,22(12):9400-9412.
- [15] 惠霖霖,张磊,王书肖,等. 中国燃煤部门大气汞排放协同控制效果评估及未来预测[J]. 环境科学学报,2017,37(1):11-22.
- [16] 王若师,许秋瑾,张娴,等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价[J]. 环境科学,2012,33(9):3083-3088.
- [17] 祝慧娜,袁兴中,曾光明,等. 基于区间数的河流水环境健康风险模糊综合评价模型[J]. 环境科学学报,2009,29(7):1527-1533.
- [18] 魏妮,李霁伟. 大气污染特征与儿童常见呼吸道疾病发病的相关性研究进展[J]. 医学综述,2013,19(22):4109-4111.
- [19] DUTTA P. Modeling of variability and uncertainty in human health risk assessment[J]. MethodsX,2017,4:76-85.
- [20] 王明珠,陈玲,赵宏宇,等. 养殖对虾中抗生素的残留及其健康风险[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(2):34-38.
- [21] 陈方远,吴中华,侯浩波,等. 汉江中下游水环境健康风险不确定性评价[J]. 环境科学与技术,2017,40(4):183-187.

(上接第3页)

制工程,积极发展生态循环农业,科学施用有机肥。

(2) 多渠道筹集资金,规范经费投入。一是设立治理专项资金,各级财政要将耕地土壤重金属污染治理项目纳入年度财政预算,资金统一管理使用并逐年增加;二是完善政府、企业、社会等多元化投资机制,探索“谁投资、谁受益”的市场机制;三是建立补偿机制,依法责令非法排放污染物的企业和单位对所污染的耕地进行强制性补偿;四是将重金属污染治理试点示范、重金属污染监测站点建设、技术研发协同创新列为重点支持项目。

(3) 健全体制机制,强化法制保障。进一步健全土壤污染防治体制机制,形成“源头控制—过程监管—修复治理—终点评价”相结合的全程防控保障体系^[11]。当前的工作重点一是修订标准。研究制订符合江西省省情、与土壤类型和作物种植方式等相对应的农田土壤重金属含量安全阈值,尽快修订和完善江西省农用地土壤环境质量标准评价体系。二是制定激励政策。制定重金属防控技术开发、耕地重金属污染修复治理与种植结构调整、施肥和有机肥生产、农业废弃物资源化利用等方面的激励机制。三是建立问责机制。建立健全土壤重金属污染法律责任制度,确保“谁污染、谁治理”“谁污染、谁治理”^[12]。

[参考文献]

- [1] 夏文建,徐昌旭,刘增兵,等. 江西省农田重金属污染现状及防治对策研究[J]. 江西农业学报,2015,27(1):86-89.
- [2] 徐昌旭,苏全平,李建国,等. 江西耕地土壤重金属含量与污染状况评价[C]//农业部环境监测总站. 全国耕地土壤污染监测与评价技术研讨会论文集. 天津:农业部环境监测总站,2006:144-148.
- [3] 徐玉霞,汪庆华,彭固凯,等. 煤矿周边土壤重金属影响评价及来源分析[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(3):32-36.
- [4] 黄国勤. 江西省土壤重金属污染研究[C]//中国环境科学学会. 2011年中国环境科学学会学术年会论文集:第二卷. 北京:中国环境科学出版社,2011:1731-1736.
- [5] 余进祥,刘娅菲,尧娟. 江西省水稻优势产区重金属污染及累积规律[J]. 江西农业学报,2008,20(12):57-60.
- [6] 李祖章,谢金防,蔡华东,等. 农田土壤承载畜禽粪便能力研究[J]. 江西农业学报,2010,22(8):140-145.
- [7] 白田田,史卫燕. 保卫耕地:向重金属污染宣战[N]. 经济参考报,2016-07-22(A11).
- [8] YANG Y, ZHANG F S, LI H F, et al. Accumulation of cadmium in the edible parts of six vegetable species grown in Cd-contaminated soils[J]. Journal of Environmental Management,2009,90:1117-1122.
- [9] 张桃林. 科学认识和防治耕地土壤重金属污染[J]. 土壤,2015,47(3):435-439.
- [10] 师荣光,郑向群,龚琼,等. 农产品产地土壤重金属外源污染来源解析及防控策略研究[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(4):9-13.
- [11] 周静,崔红标. 规模化治理土壤重金属污染技术工程应用与展望——以江铜贵冶周边区域九牛岗土壤修复示范工程为例[J]. 中国科学院院刊,2014,29(3):336-343.
- [12] 徐慧,闻欣,魏正学,等. 南京市重金属污染综合防治管理经验初探[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(6):9-11.