

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM_{2.5})排放测算方法:以上海市为例 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)

上海夏季PM_{2.5}中有机物的组分特征、空间分布和来源 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)

北京南郊区PM_{2.5}中水溶性无机盐季节变化及来源分析 高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)

基于样方法的天津市春季道路扬尘PM_{2.5}中水溶性离子特征及来源解析 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)

广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析 田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)

基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径 韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)

区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)

典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征 林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)

多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究 庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)

氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)

白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价 高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)

太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)

长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)

桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征 卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)

青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性 马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)

城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)

溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)

三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析 赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)

澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析 望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)

蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)

两种水生植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响 杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)

于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)

岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征 杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)

农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析 李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广州 (2174)

不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响 向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)

真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质 孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)

石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G 夏文君, 刘锋, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)

载镧或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制 李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)

DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验 梁雨, 何江涛, 张思 (2219)

污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征 孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)

低温污水前置强化混凝 刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)

印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性 谭玉琚, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)

生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR 付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)

两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化 高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)

铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较 王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)

热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响 代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)

曝气时间对比亚硝化颗粒污泥形成的影响 李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)

中国城市污泥中汞含量的时空分布特征 王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)

夏季太湖草/藻型湖区N₂O生成与迁移特征及其影响因素 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)

太湖藻型湖区CH₄、CO₂排放特征及其影响因素分析 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)

内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO₂、N₂O特征 李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)

黄土高原成龄苹果园生态系统CO₂通量特征 杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)

生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群玲, 汤稼豪 (2351)

不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响 李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)

ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)

不同排海方式城市尾水微生物扩散规律 郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)

旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例 吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)

不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析 朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)

生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响 阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)

铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征 房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)

湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾克宇 (2431)

反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制 张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)

广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价 张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)

三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)

水稻不同生长时期不同组织中抗内生菌的筛选与鉴定 王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)

汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征 李雨琴, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)

华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价 徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)

基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM_{2.5}健康效应 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)

中国PM_{2.5}污染空间分布的社会经济影响因素分析 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

《环境科学》征订启事(2094) 《环境科学》征稿简则(2164) 信息(2183, 2411, 2445)

中国城市污泥中汞含量的时空分布特征

王宁¹, 刘清伟², 职音², 程柳¹, 麻冰涓¹, 毛宇翔^{1*}

(1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454003; 2. 焦作市环境监测站, 焦作 454003)

摘要: 为全面了解中国城市污水处理厂脱水污泥中汞的赋存状况, 从全国 40 个城市污水处理厂采集 315 个污泥样品, 使用 DMA-80 直接测汞仪测定了样品中汞的含量. 结果表明, 全国城市污泥样品中的汞含量范围为 0.45 ~ 15.42 mg·kg⁻¹, 汞含量符合对数正态分布, 几何平均值为 (2.19 ± 3.16) mg·kg⁻¹. 所有污泥样品中的汞含量均满足《城镇污水处理厂污泥处置 混合填埋用泥质》(GB/T 23485-2009) 规定的污泥填埋标准; 97.8% 的城市污泥汞含量均满足土地改良用泥质标准 (中性、碱性土壤); 86.7% 的城市污泥汞含量满足土地改良用泥质标准 (酸性土壤). 不同城市的污泥样品汞含量存在较大差异 (变异系数 105%), 同一个污水处理厂污泥汞含量也不稳定 (7d 变异系数 0.6% ~ 53.6%). 污泥中汞含量中位数呈现华北地区 > 东北地区 > 西北地区 > 西南地区 > 华东地区 > 华中地区 > 华南地区的空间分布趋势. 以相应城市的土壤背景值为参比, 利用地累积指数法, 对于城市污泥中的汞污染现状进行了评价, 发现汞重度污染以上的省份比例达到 60% 以上. 与历史数据对比发现, 全国城市污泥中汞含量呈现先升高后降低的趋势, 峰值出现于 2000 ~ 2009 年. 研究结果为城市污水和污泥汞污染的防治工作提供了数据支持.

关键词: 城市污泥; 汞; 空间分布; 时间变化; 地累积指数

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2296-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710130

Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China

WANG Ning¹, LIU Qing-wei², ZHI Yin², CHENG Liu¹, MA Bing-juan¹, MAO Yu-xiang^{1*}

(1. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Jiaozuo Environmental Monitoring Station, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to determine the occurrence of mercury (Hg) in the dewatered sewage sludge (SS) from municipal wastewater treatment plants (MWTPs) in China, 315 SS samples were collected from 40 MWTPs. The total Hg (THg) contents of the sludge samples were analyzed using a DMA-80 Hg analyzer. It was found that THg in the samples ranged from 0.45-15.42 mg·kg⁻¹. The THg data followed a log-normal distribution with a geometric mean of (2.19 ± 3.16) mg·kg⁻¹. THg contents in all the sludge samples meet the criteria set for disposal (by co-landfilling) of MWTPs sludge (GB/T 23485-2009). In terms of THg contents, 97.8% of the sludge was suitable for land application in neutral and alkaline soils, while 86.7% of the sludge was suitable for land application in acidic soil. THg in SS varied greatly, not only among cities (variation coefficient of 105%), but also in the same MWTP (variation coefficient of 0.6%-53.6% over seven days). Mercury contents in SS of China showed a descending trend of North > Northeast > Northwest > Southwest > East > Central > South China. Using the corresponding urban soil background values of THg as references, Hg pollution levels of SS were evaluated using the geological cumulative index method. It was found that SS from more than 60% of the cities sampled were heavily polluted by Hg. Mercury contents in the SS of China showed a temporal trend of increasing then decreasing, with 2000-2009 being the peak period. Results of the present study provide significant data support for the prevention and control of mercury pollution in sewage and SS in China.

Key words: sewage sludge; mercury; spatial distribution; temporal trend; geological cumulative index

截至 2015 年底, 我国共建成城市污水处理厂 6 910 座, 污水处理厂处理能力 1.4 亿 m³·d⁻¹^[1], 2015 年全年累计处理污水量达 410.3 亿 m³^[2]. 城市污水处理能力的提高, 带来了水体环境质量的明显改善, 与之伴随的是污水处理厂剩余污泥的产量大大增加. 2015 年, 全国污水处理厂的干污泥产生量为 603.2 万 t^[1], 到 2020 年全国干污泥产量将突破 1 200 万 t^[3].

城市污泥是城市污水处理厂的副产物, 富集了

污水中的大部分污染物质, 也不可避免地含有包括汞在内的各种重金属^[4]. 国内外研究表明, 城市生活污水中总汞的质量浓度在 80 ng·L⁻¹ ~ 2.76 μg·L⁻¹ 水平, 随时间、地点不同而有很大波动^[5-9]. 经过污水处理厂的处理工艺后, 污水中的

收稿日期: 2017-10-18; 修订日期: 2017-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21377035); 河南省高校科技攻关人才支持计划项目 (15HASTIT045)

作者简介: 王宁 (1991 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制技术, E-mail: m18272739557@163.com

* 通信作者, E-mail: yuxiangmao@hpu.edu.cn

总汞大部分转移到了城市污泥中^[10,11]。国内现有研究多为针对个别城市或地区城市污水、污泥样品中汞含量的测定分析^[12-14]，针对全国范围内城市污泥中汞时空分布特征的专门研究尚未见报。鉴于《水俣公约》2017年8月16日在我国的正式生效，我国将对管控中的各行业进行履约承诺。在此背景下，开展我国城市污泥中汞的时空分布特征研究，具有显著的意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究所用城市污泥采自全国 29 个省份的 40

个城市(表 1)，其中北京、上海、兰州、哈尔滨、武汉这 5 座城市分别采集到了两座污水处理厂的样品，其余城市各采集一座污水处理厂的样品。采样时间集中在 2016 年 4~8 月之间。为保证样品的代表性，每个城市同一座污水处理厂连续采样 7d，得到 7 个污泥样品，本研究共获得 315 个污泥样品。

1.2 样品处理与分析

污泥样品在现场冷冻后，置于保温箱中快递回实验室，经过冷冻干燥和研磨后，置于干燥箱中密封保存，利用 DMA-80 直接测汞仪(Milestone, 意大利)测定污泥样品中的汞含量，该仪器检出限为 0.001 ng。

表 1 样品来源城市

Table 1 Cities where sewage samples were collected

地域划分	城市/省份
华北地区	北京、石家庄/河北、太原/山西、呼和浩特/内蒙古、鄂尔多斯/内蒙古
西南地区	重庆、成都/四川、昆明/云南、拉萨/西藏、贵阳/贵州
东北地区	沈阳/辽宁、大连/辽宁、长春/吉林、哈尔滨/黑龙江
西北地区	石河子/新疆、和田地区/新疆、兰州/甘肃、西宁/青海、西安/陕西、铜川/陕西、银川/宁夏
华东地区	青岛/山东、济南/山东、苏州/江苏、泗阳/江苏、新余/江西、上海、杭州/浙江、宁波/浙江、泉州/福建、厦门/福建
华中地区	郑州/河南、武汉/湖北、长沙/湖南、湘潭/湖南
华南地区	广州/广东、珠海/广东、东莞/广东、百色/广西、海口/海南

1.3 实验室质量控制

(1)空白样品 在进行样品分析前，首先对空白石英舟进行清洗、烘干以及灼烧，并对整个仪器进行空白值检验，消除仪器噪声对于样品检测的影响。每批次样品测定中均设置 3 个空白样品，随实际样品一起测定，确保实验过程中没有污染干扰。

(2)平行样品 所有样品均做平行样处理，每个样品设置 3 个平行样，测定值的相对标准偏差均在 10% 以内。

(3)标准参考物质 采用标准参考物质——河口沉积物(ERM-CC580)作为实验室质量控制措施。在样品测定过程中，按照 10% 的测量样品总数，称取标准物质随实际样品一起测定。标准物质的总汞标定值为 $(132 \pm 3) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，实验测量值为 $(132 \pm 5) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($n=30$)，回收率满足要求。

1.4 地累积指数法

地累积指数法是德国科学家 Muller 于 1979 年提出的用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标，以沉积物中重金属含量的高低表征污染水平^[15,16]，现在被广泛应用于评价沉积物和土壤等环境介质中的重金属污染程度。地累积指数法计算公式如下：

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_n/1.5B_n) \quad (1)$$

式中， I_{geo} 为地累积指数， C_n 为样品的实测浓度， B_n 为评价元素的背景值，本研究采用各省会城市的土壤汞含量背景值^[17]作为元素背景值。地累积指数法评价汞污染程度的分级标准^[18]参见表 2。

表 2 地累积指数法评价汞污染程度的分级标准

Table 2 Classification criteria for the evaluation of mercury contamination by the cumulative index method

I_{geo}	污染级别	污染程度
<0	0	无污染
0~1	1	轻度污染
1~2	2	偏中度污染
2~3	3	中度污染
3~4	4	偏重度污染
4~5	5	重度污染
>5	6	严重污染

1.5 数据收集

为了解我国城市污水处理厂脱水污泥中汞含量的时间演变特征，对于公开报道的相关数据进行了筛选和整理，以测定方法合理、有一定的质量控制/质量保证程序(如平行样品、空白样品、标准参考物质、加标回收)为原则，筛选出文献[19~51]中的 416 个样本，整理出 18 个省份 244 座城市污水处理厂脱水污泥的汞含量，不同研究中同一污水处理厂污泥汞含量采用算术平均值表示。

2 结果与讨论

2.1 中国城市污泥中汞含量的统计性描述

我国 40 个城市剩余污泥中汞含量(图 1)范围介于 $(0.45 \pm 0.05) \sim (15.42 \pm 3.36) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 算术平均值为 $(3.05 \pm 3.19) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 经 K-S 检验法检验, 城市污泥中汞含量符合对数正态分布(统计量 = 0.077, $df = 45$, Sig. = 0.200)(图 2), 故几何平均值 [$(2.19 \pm 3.16) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] 能更好地代表中国城市污泥中

汞的平均含量. 在 40 个城市中(图 1), 汞含量最高的为内蒙古呼和浩特市 [$(15.42 \pm 3.36) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$], 最低的为广东省广州市 [$(0.45 \pm 0.05) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$], 不同城市的剩余污泥在汞含量上表现出较大差异, 变异系数达到了 105%; 同一个城市的污泥汞含量也不稳定, 7d 变异系数范围在 0.6% ~ 53.6% 之间. 从城市污泥中总汞含量频率分布(图 3)可以看出, 86.7% 的城市污泥中汞含量都在 $0 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 汞含量在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上的城市比例仅为 13.3%.

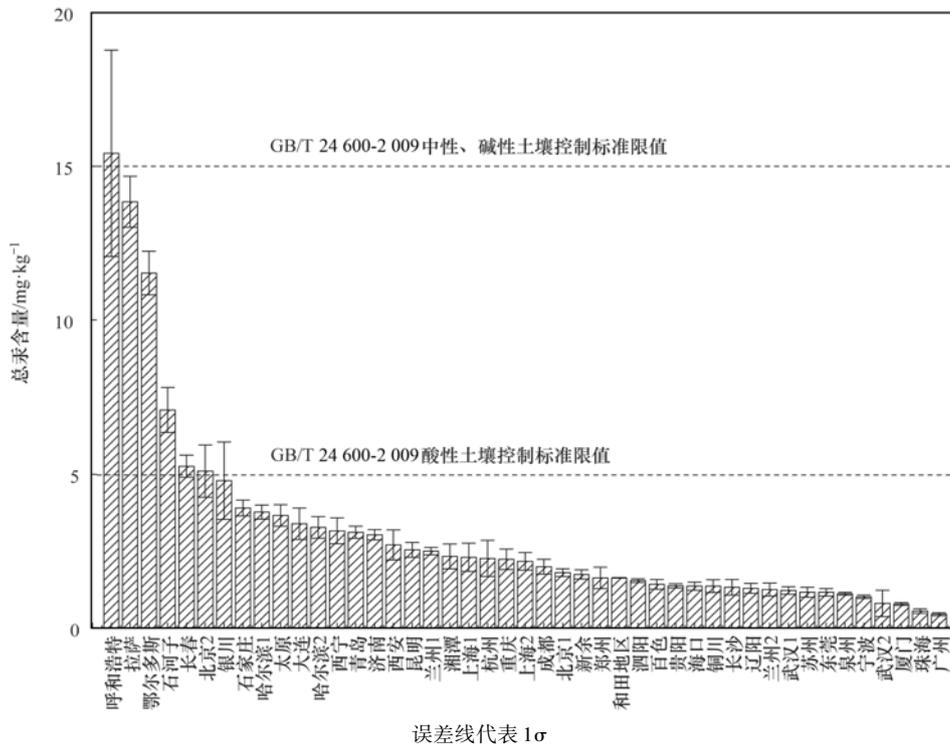


图 1 中国部分城市污泥样品中汞含量的 7 d 平均值

Fig. 1 Total mercury in the sewage sludge samples of some cities in China

与文献[52,53]规定的限值 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相比, 所有污泥样品中汞含量均在标准限值之内, 满足填埋泥质要求. 若以我国《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》^[54](GB/T 24600-2009) 规定的中性和碱性土壤($\text{pH} \geq 6.5$)控制标准限值 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为参照, 除呼和浩特外的所有城市污泥汞含量均满足标准要求, 呼和浩特市污泥汞含量 7 d 均值略微超标, 7 d 样品中有 4 d 的样品汞含量满足标准要求, 其余 3 d 超标. 如果以该标准(GB/T 24600-2009)中酸性土壤($\text{pH} < 6.5$)的控制限值标准 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为参照, 有 6 个污水处理厂样品汞含量超标, 超标率为 13.3%. 因此, 这些地区的污泥在用于土地改良时需要甄别目标土壤的酸碱性.

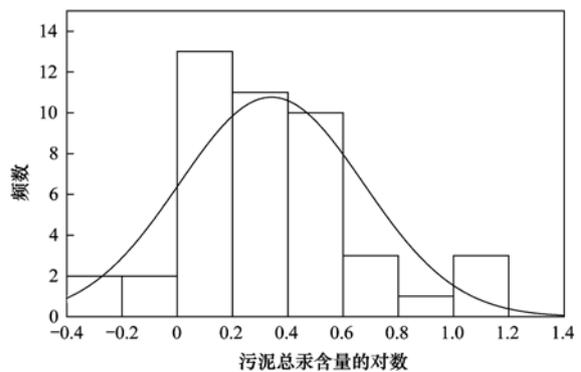


图 2 总汞含量对数的频数直方图

Fig. 2 Frequency histogram of logarithmic total mercury in the sludge samples

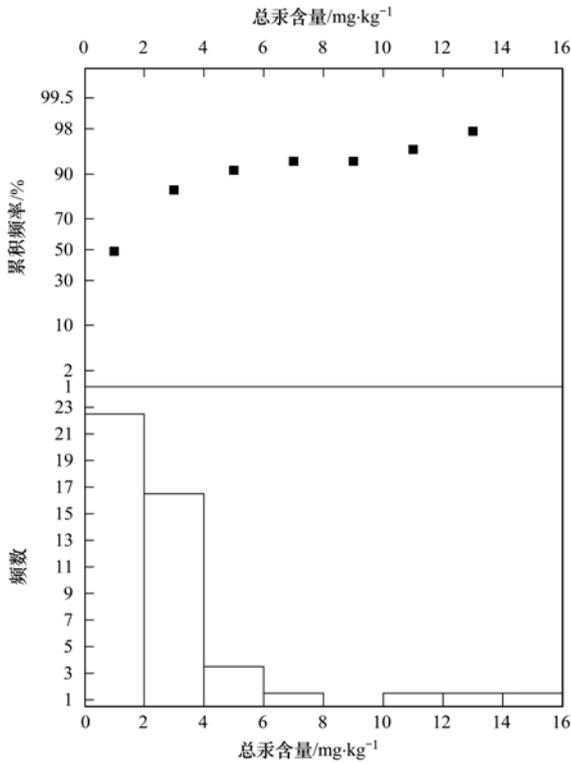


图3 污泥总汞含量频率分布

Fig. 3 Frequency histograms of total mercury in the sewage sludge samples

2.2 中国城市污泥中汞含量的区域分布特征

以各省、自治区、直辖市(香港、澳门、台湾、安徽、天津市除外)污水处理厂污泥汞含量的算术平均值,做出我国城市污泥汞含量的空间分布图(图4).可以看出,全国污泥中汞含量大致呈现出由北向南逐渐降低的趋势.如果按照中国常规7个地区划分(图5),其汞含量按照中位值由高到低依次为华北地区>东北地区>西北地区>西南地区>华东地区>华中地区>华南地区,亦呈现由北向南逐渐降低的趋势.

城市污泥中汞主要来自于城市污水,而城市污水中汞含量则可能受到当地产业布局、人口数量、生活习惯、降尘以及土壤背景值的影响.燃煤和有色金属冶炼是我国两个最大的人为汞释放源,年均释放量约占汞总释放的80%^[55].北方冬季采暖燃煤可能是造成城市污泥汞含量呈现北高南低趋势的原因之一.内蒙古为火力发电大省,燃煤电厂排入环境的汞为全国最高,超过30 t^[56],新疆石河子市每年的煤炭消耗量亦在千万吨以上,这可能是导致相应地区污泥样品汞含量较高的主要原因.另外,乌鲁木齐、呼和浩特、石河子和拉萨地处畜牧业

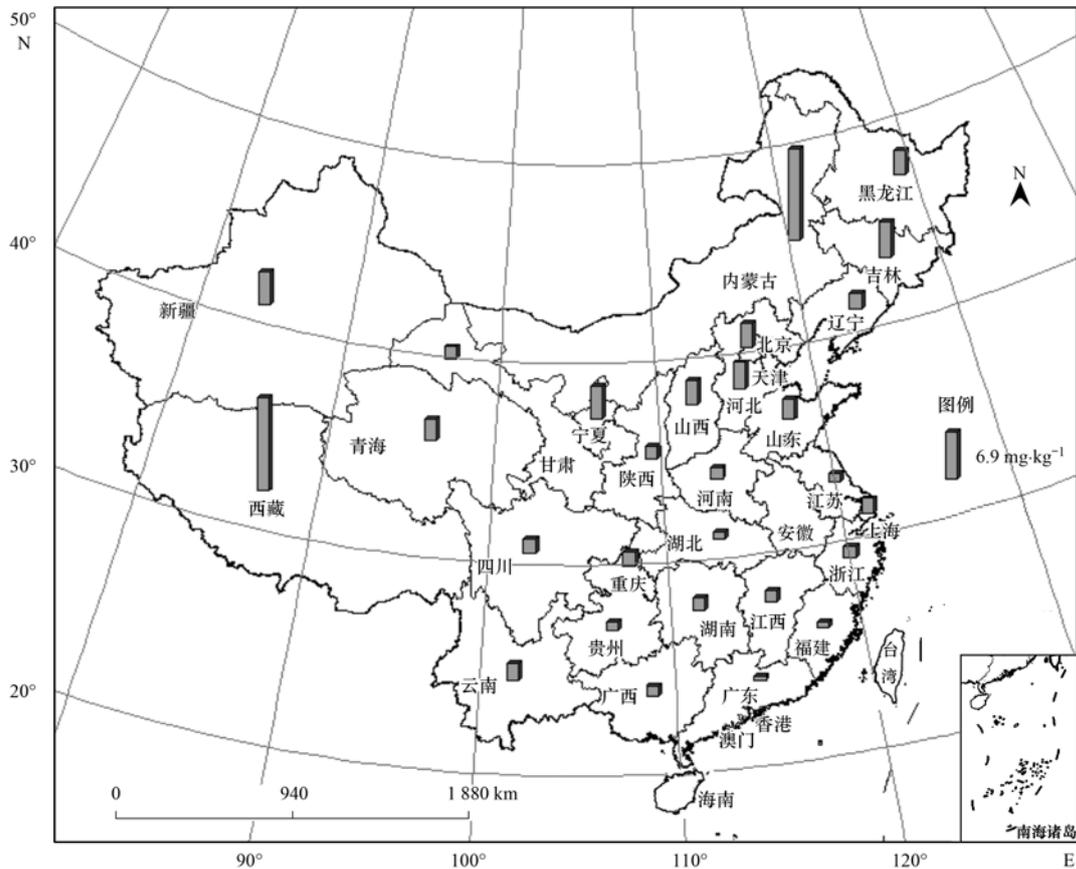


图4 中国城市污泥中汞含量的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of total mercury in the sewage sludge in China

区,其皮毛加工、毡帽等传统手工业的存在可能对相应地区城市污泥中汞含量偏高也有所贡献。

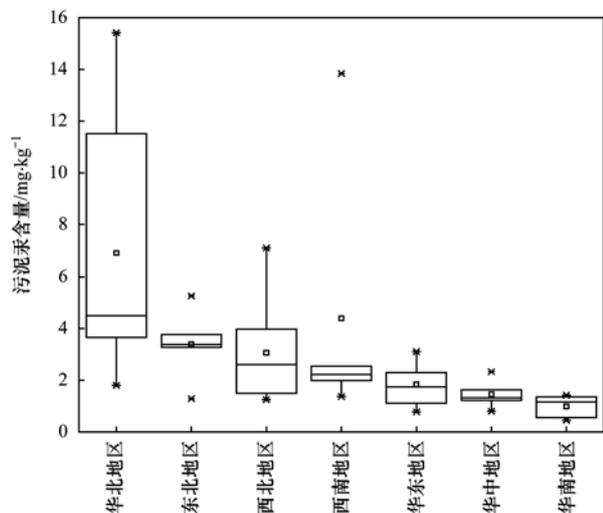


图5 不同地区污泥样品中的汞含量

Fig. 5 Total mercury contents in the sewage sludge samples from different geological regions in China

2.3 中国城市污泥中汞含量的地累积指数评价

以各省份(香港、澳门、台湾、安徽、天津市除外)城市污泥汞含量的算术平均值作为样品实测数

据,以相应省份省会城市的土壤汞含量背景值^[17]作为元素背景值,计算出各省份城市污泥汞污染的地累积指数,运用 ArcGIS 软件绘制出地累积指数空间分布图(图6)。可以看出,有6个省份城市污泥中的汞达到严重污染程度,分别是内蒙古、西藏、宁夏、新疆、吉林和青海省,占本研究所有地区的20.69%;达到重度污染程度的有12个,占比为41.38%;中度污染水平的有8个,占比27.59%;轻度污染水平的省份有贵州、福建和广东省,占比10.34%。总体上看,城市污泥中汞污染达到重度以上水平的比例超过60%,说明中国城市污泥中汞的污染程度整体较高,需要加强城市污水和污泥的汞污染防治工作。

2.4 中国城市污泥汞排放量及其空间分布

按照2015年中国环境统计年报^[1],全国城市污水处理厂剩余污泥产生量为3 015.9万t(含水率80%),相当于603.2万t干污泥,以全国污泥汞含量的几何均值 $[(2.19 \pm 3.16) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 计算,当年全国产生的城市污泥携带汞质量为13.2t,与我国城市生活垃圾焚烧行业大气汞排放量(2012年9.8 t^[57])和工业废水排放的汞总量(2015年1 t^[1])相

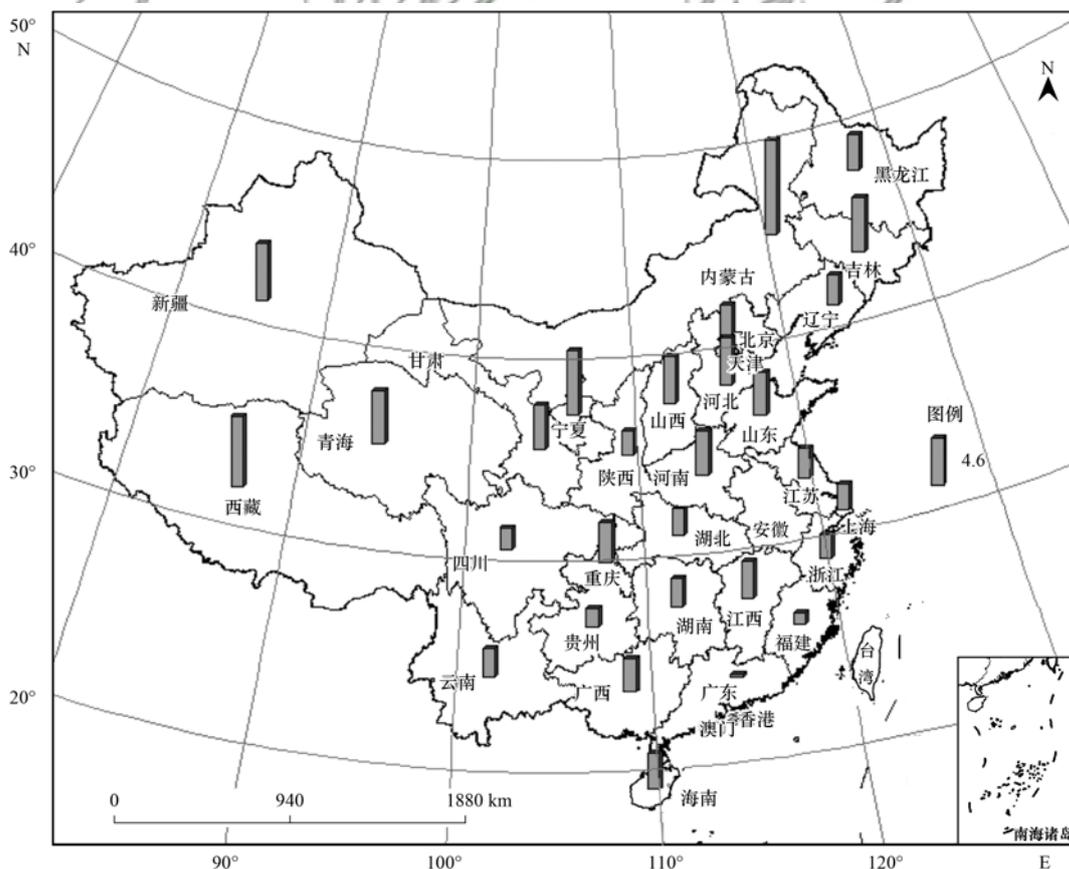


图6 中国城市污泥汞含量的地累积指数的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the geoaccumulation index of total mercury in the sewage sludge in China

比,城市污泥是一个重要的汞排放源.由于2015年中国环境统计年报未给出各地区单独的城市污泥产生量,故按照如下方法估算:由全国城市干污泥产生量(603.2万t^[1])和污水处理量(532.3亿t^[1])的比值(1.133×10^{-4}),乘以各地区2015年城市污水处理量^[58],得到各地区2015年产生的干污泥质量.然后用各地区2015年干污泥质量乘以本地区污泥汞的平均含量,可以估算出各地区随污泥排放的总汞质量(定义为该地区“污泥汞排放量”),见图7.整体上来看,污泥汞排放量大体呈现由东至西依次降低的趋势.山东省、黑龙江省、内蒙古自治区这3个地区污泥汞排放量最高,均在1000 kg以

上;贵州省、青海省、甘肃省、海南省污泥汞排放量最低,均少于100 kg.与上文中污泥中汞含量(图1、图4)进行对比发现,内蒙古自治区城市污泥汞含量和污泥汞排放量都很高,应加强污水和污泥汞污染防治工作.西藏自治区城市污泥汞含量较高而污泥汞排放量较低,其原因在于西藏城市污水处理量和城市污泥产生量均较低(2701万t^[58],3100t).广东省的污泥汞含量较低而污泥汞排放量较高,应归因于广东省较高的污水处理量和城市污泥产量(72.07亿t^[58],81.67万t).从污泥汞排放管控角度来考虑的,应优先考虑蒙、冀、黑以及东部沿海地区.

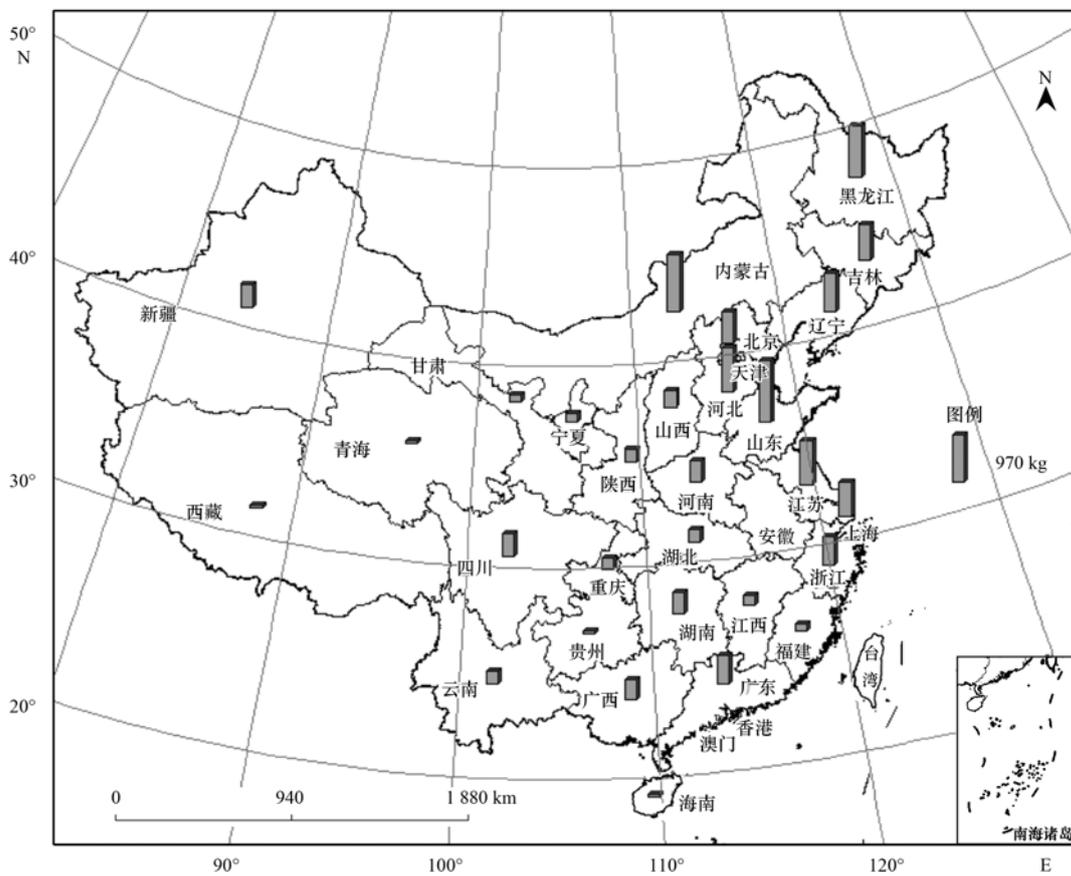


图7 中国城市污泥汞排放量的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of sludge-borne Hg loadings in different areas of China

2.5 中国城市污泥汞含量的时间变化趋势

如图8所示,1982~1999年、2000~2009年以及2010~2015年的城市污泥汞含量范围分别为0.42~12.6、0.023~19.0、0.12~28.8 mg·kg⁻¹,其汞含量算术平均值分别为(1.45±1.82)、(4.97±4.71)、(2.62±2.91)mg·kg⁻¹,几何平均值分别为(1.12±1.80)、(2.86±4.70)、(1.77±2.90)mg·kg⁻¹.各时间段汞含量分布类型相同,均为偏

态分布,其变异系数范围为95%~126%.

我国城市污泥中汞含量的算数平均值和几何平均值均呈现先升高后降低的趋势,峰值出现于2000~2009年(图8).这种城市污泥汞含量的时间演变趋势与我国PVC行业的发展及其用汞量的趋势基本吻合.2000~2009年间,我国PVC产能由342.5万t^[59]增加到2000万t^[60],氯化汞的使用量从2000年的170t左右上升到2010年的800t左右^[61~63].

PVC 行业汞使用量和排放量的增加,可能是该时段城市污泥汞含量升高的原因之一. 2010 年以后随着 PVC 行业低汞触媒普及率的提升以及汞触媒技术的不断改进,现已基本实现汞的零排放^[64],大体对应于 2009 年以后城市污泥汞含量降低的趋势. 除此之外,生活污水和工业废水逐步实现分开处理可能也对此有贡献.

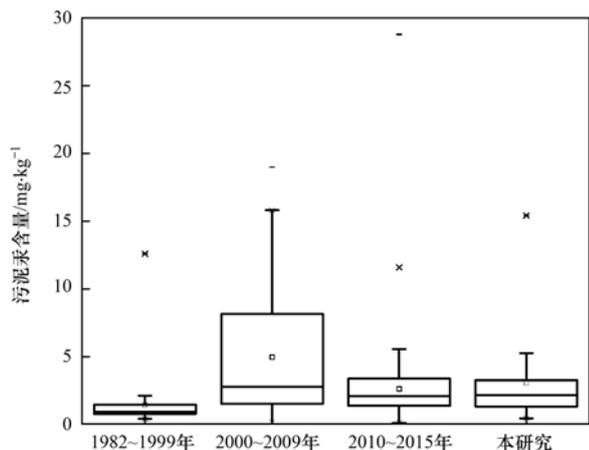


图 8 不同时间段我国污泥汞含量

Fig. 8 Total mercury contents in the sewage sludge in China during different time periods

3 结论

(1) 全国城市污泥中汞含量算术平均值为 $(3.05 \pm 3.19) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 几何平均值为 $(2.19 \pm 3.16) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 汞含量值呈对数正态分布. 所有测得的城市污泥汞含量均符合《城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质》中规定的填埋标准. 按照《城镇污水处理厂污染物排放标准》中规定的农用标准限值(中、碱性土壤), 仅有呼和浩特市平均值略微超标; 按照酸性土壤的控制限值标准则有 6 个样品超标, 超标率 13.3%. 地累积指数评价表明, 污泥中汞达到重度污染以上水平的省份比例超过 60%, 说明当前我国城市污泥汞污染问题依然严峻, 应加强城市污水和污泥的汞污染防治工作.

(2) 全国污泥中汞含量大致呈现出由北向南逐渐降低的趋势, 按照中国常规 7 大地区划分, 污泥中汞含量呈现华北地区 > 东北地区 > 西北地区 > 西南地区 > 华东地区 > 华中地区 > 华南地区的空间分布趋势, 该趋势可能与北方冬季采暖燃煤有关. 我国 2015 年城市污泥汞排放量为 13.2t, 是一个重要的汞排放源. 污泥汞排放量大体呈现由东至西依次降低的趋势. 开展城市污泥汞污染防治工作时, 应优先考虑污泥汞含量和汞排放量均较高的内蒙古自

治区和华北地区.

(3) 我国城市污泥中汞含量整体上呈现随时间先升高后降低的趋势, 峰值出现于 2000 ~ 2009 年. 城市污泥汞含量的时间演变趋势与我国 PVC 行业的发展及其用汞量的趋势基本吻合.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 2015 年中国环境统计年报 [R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 2015 年中国环境状况公报 [R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2015.
- [3] 戴晓虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考 [J]. 给水排水, 2012, **38**(2): 1-5.
- [4] 姚金玲, 王海燕, 于云江, 等. 城市污水处理厂污泥重金属污染状况及特征 [J]. 环境科学研究, 2010, **23**(6): 696-702.
Yao J L, Wang H Y, Yu Y J, *et al.* Pollution status and characteristics of heavy metals in sewage sludge from municipal wastewater treatment plant [J]. *Research of Environmental Science*, 2010, **23**(6): 696-702.
- [5] Balogh S J, Nollet Y H. Methylmercury input to the Mississippi River from a large metropolitan wastewater treatment plant [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **406**(1-2): 145-153.
- [6] Bodaly R A D, Rudd W M, Flett R J. Effect of urban sewage treatment on total and methyl mercury concentrations in effluents [J]. *Biogeochemistry*, 1998, **40**(2-3): 279-291.
- [7] Gilmour C C, Bloom N S. A case study of mercury and methylmercury dynamics in a Hg-contaminated municipal wastewater treatment plant [A]. In: Porcella D B, Huckabee J W, Wheatley B (Eds.). *Mercury as a Global Pollutant* [M]. Netherlands: Springer, 1995. 799-803.
- [8] Hope B K, Pillsbury L, Boling B. A state-wide survey in Oregon (USA) of trace metals and organic chemicals in municipal effluent [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **417-418**: 263-272.
- [9] Gbondo-Tughawa S S, McAlear J A, Driscoll C T, *et al.* Total and methyl mercury transformations and mass loadings within a wastewater treatment plant and the impact of the effluent discharge to an alkaline hypereutrophic lake [J]. *Water Research*, 2010, **44**(9): 2863-2875.
- [10] 李花, 毛宇翔, 李永, 等. 汞在城市污水处理厂的赋存特征及质量平衡——总汞 [J]. 环境化学, 2014, **33**(7): 1059-1065.
Li H, Mao Y X, Li Y, *et al.* Occurrence and mass balance of mercury at a sewage treatment plant. Part I: total mercury [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(7): 1059-1065.
- [11] Mao Y X, Cheng L, Ma B J, *et al.* The fate of mercury in municipal wastewater treatment plants in China: significance and implications for environmental cycling [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **306**: 1-7.
- [12] 王新, 贾永锋. 沈阳北部污水处理厂污泥土地利用可行性研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1543-1546.
Wang X, Jia Y F. Land application feasibility of sewage sludge from Shenyang wastewater treatment plant [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(4): 1543-1546.
- [13] 史政达, 陈俊, 郑璐. 常州市污泥处理处置现状及规划策略

- [J]. 中国给水排水, 2015, **31**(24): 30-33.
- Shi Z D, Chen J, Zheng L. Current situation and corresponding strategy of sludge treatment and disposal in Changzhou City[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, **31**(24): 30-33.
- [14] 周立祥, 张雪英, 占新华, 等. 苏南地区城市污泥的基本性质及农业利用效果问题与对策[J]. *世界科技研究与发展*, 2000, **22**(S1): 91-96.
- Zhou L X, Zhang X Y, Zhan X H, *et al.* Effectiveness, constrains and scientific perspectives of land application of sewage sludge in the southern Jiangsu Province[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2000, **22**(S1): 91-96.
- [15] 张婧, 王淑秋, 谢琰, 等. 辽河水系表层沉积物中重金属分布及污染特征研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2413-2418.
- Zhang J, Wang S Q, Xie Y, *et al.* Distribution and pollution character of heavy metals in the surface sediments of Liao river [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(9): 2413-2418.
- [16] 刘敬勇, 孙水裕, 许燕滨, 等. 广州城市污泥中重金属的存在特征及其农用生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(12): 2545-2556.
- Liu J Y, Sun S Y, Xu Y B, *et al.* Heavy metal characteristics in sewage sludge and its potential ecological risk assessment for agriculture use in Guangzhou[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(12): 2545-2556.
- [17] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. *地学前缘*, 2014, **21**(3): 265-306.
- Cheng H X, Li K, Li M, *et al.* Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, **21**(3): 265-306.
- [18] 柯馨姝. 长株潭地区大气沉降中重金属污染特征及来源分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- Ke X S. Pollution characteristics and source analysis of heavy metal in atmosphere deposition in Chang-Zhu-Tan area [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [19] 杨居荣, 王素芬, 金玉华. 污泥中重金属对土壤的污染及控制途径[J]. *环境科学*, 1982, **3**(3): 9-13.
- [20] 周立祥, 沈其荣, 陈同斌, 等. 重金属及养分元素在城市污泥主要组分中的分配及其化学形态[J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(3): 269-274.
- Zhou L X, Shen Q R, Chen T B, *et al.* Distribution and chemical form of heavy metals in the principal components of undigested sludge[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, **20**(3): 269-274.
- [21] 谭国栋. 城市污泥特性分析及其在生态修复中的应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- Tang G D. Characteristics analysis of municipal sludge and its application research in ecological restoration [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [22] 李琼. 城市污泥农用的可行性及风险评价研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2012.
- Li Q. Feasibility and risk assessment study of biosolids agricultural application[D]. Beijing: Capital Normal University, 2012.
- [23] 朱南文, 张乐华, 高廷耀, 等. 上海城市污水厂污泥的农用处置方法研究[J]. *中国给水排水*, 2002, **18**(10): 16-19.
- Zhu N W, Zhang L H, Gao T Y, *et al.* Study on agricultural disposal method for sewage sludge from Shanghai urban wastewater treatment plants [J]. *China Water & Wastewater*, 2002, **18**(10): 16-19.
- [24] 陈建国, 陈邦林. 污泥中重金属形态分析及其生物可利用性研究[J]. *净水技术*, 2008, **27**(4): 48-51.
- Chen J G, Chen B L. Morphology analysis of heavy metals in sludge and its bioavailability [J]. *Water Purification Technology*, 2008, **27**(4): 48-51.
- [25] 张灿, 陈虹, 余忆玄, 等. 我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1345-1350.
- Zhang C, Chen H, Yu Y X, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in sludge from wastewater treatment plants and sludge disposal in Chinese Coastal Areas [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1345-1350.
- [26] 蒋玲燕, 麦穗海. 上海市中心城区污水处理厂污泥特性及处理处置路线分析[J]. *给水排水*, 2015, **41**(12): 30-34.
- Jiang L Y, Mai S H. Characterization and disposal of treated sludge from municipal wastewater treatment plants in central city of Shanghai [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, **41**(12): 30-34.
- [27] 温琰茂, 韦照韬. 广州城市污泥和土壤重金属含量及其有效性研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 1996, **35**(S1): 217-221.
- Wen Y M, Wei Z T. The concentration and availability of heavy metals in municipal sewage sludge and soil in Guangzhou [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1996, **35**(S1): 217-221.
- [28] 周克利. 广州市污水污泥的最新实测资料[J]. *西南给排水*, 2006, **28**(2): 1-6.
- [29] 金杰, 俞志敏, 吴克, 等. 合肥城市污水处理系统分布及污泥产量与性质分析[J]. *环境科学与管理*, 2009, **34**(4): 29-32.
- Jin J, Yu Z M, Wu K, *et al.* Investigation on the systematic distribution of sewerage treatment and the outputs of municipal sludge with analysis on properties for Hefei [J]. *Environmental Science and Management*, 2009, **34**(4): 29-32.
- [30] 黄月娥. 城市污泥5种重金属分布特征及其环境风险评价[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- Huang Y E. Distribution characteristics and environmental risk assessment of five heavy metals in sewage sludge[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [31] 杨建劳, 刘洪涛, 陈同斌, 等. 广西壮族自治区城镇污泥特性与处置方向[J]. *中国给水排水*, 2013, **29**(3): 87-89.
- Yang J L, Liu H T, Chen T B, *et al.* Characterization and disposal direction of sewage sludge from Guangxi Zhuang autonomous region in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, **29**(3): 87-89.
- [32] 王雨生, 刘鸿雁, 李瑞, 等. 贵州省城市污泥重金属组成特征与农用风险评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(3): 392-399.
- Wang Y S, Liu H Y, Li R, *et al.* Heavy metals component in sewage sludge and its potential ecological risk assessment for agriculture in Guizhou Province, China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(3): 392-399.
- [33] 李瑞, 吴龙华, 杨俊波, 等. 贵州省典型城市污水处理厂污泥养分与重金属含量调查[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(4): 787-796.

- Li R, Wu L H, Yang J B, *et al.* Major nutrients and heavy metals of municipal sewage sludge in Guizhou Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(4): 787-796.
- [34] 马聪士. 石家庄市桥西污水处理厂污泥中重金属含量分析[J]. *河北水利*, 2011, (12): 47.
- [35] 程伟娜, 李光明, 王冰. 濮阳市城市污泥成分及资源化利用生态风险评价[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(3): 50-55, 60.
- Cheng W N, Li G M, Wang B. Composition and ecological risk assessment for resource utilization of sewage sludge in Puyang[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, **38**(3): 50-55, 60.
- [36] 乔艳, 熊桂云, 李双来. 武汉市城市污泥的组成及对水稻秧苗生长的影响[J]. *湖北农业科学*, 1998, **37**(6): 45-46, 54.
- Qiao Y, Xiong G Y, Li S L. Consisting of mud in Wuhan City and its effect to rice seedling[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 1998, **37**(6): 45-46, 54.
- [37] 汪常青, 鲁明星, 梁浩, 等. 武汉市排水污泥特性及其农用可行性分析[J]. *湖北农业科学*, 2006, **45**(4): 451-455.
- Wang C Q, Lu M X, Liang H, *et al.* Characteristics of the Wuhan draining water sludge and its feasibility used in agriculture [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2006, **45**(4): 451-455.
- [38] 吴新民, 陈德明. 施用城市污泥对土壤中重金属积累和迁移的影响[J]. *环境与健康杂志*, 2005, **22**(3): 177-179.
- Wu X M, Chen D M. Accumulation and movement of heavy metals in the environment through sewage sludge using in agriculture[J]. *Journal of Environment and Health*, 2005, **22**(3): 177-179.
- [39] 胡绵好. 应用地质累积指数评价南昌市城市污泥重金属污染[J]. *广东微量元素科学*, 2010, **17**(3): 27-31.
- Hu M H. Application of index of geoaccumulation (I_{geo}) in evaluation of heavy metals' pollution in municipal sludge from Nanchang[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2010, **17**(3): 27-31.
- [40] 李静. 山西省侯马市城市污水和污泥处理现状及资源化利用潜力[D]. 晋中: 山西农业大学, 2016.
- Li J. Treatment and utilization potential of the municipal sewage and sludge in Houma city of Shanxi province [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2016.
- [41] 李桃. 山西省部分地区城市污泥的特性及其安全农业利用[D]. 晋中: 山西农业大学, 2016.
- Li T. The characteristics and safely agricultural utilization measures of municipal sludge from some area in Shanxi province [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2016.
- [42] 蒲济生. 城市污水处理厂污泥处置及资源化利用研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- Pu J S. Study on the disposal of sludge of city sewage plants and its utilization as resource[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [43] 王宇峰, 高俊发, 侯晓峰, 等. 污泥的重金属含量及浸出毒性测定与资源化利用的研究[J]. *应用化工*, 2008, **37**(5): 576-578.
- Wang Y F, Gao J F, Hou X F, *et al.* Research on heavy metal content and leaching-out toxicity determination and resourceful utilization of sludge[J]. *Applied Chemical Industry*, 2008, **37**(5): 576-578.
- [44] 李养养, 曹磊. 陕西省城镇污水重金属污染水平及处置去向研究[J]. *资源节约与环保*, 2015, (6): 67-68.
- [45] 李天国, 王利军, 徐晓军, 等. 西安市市政污水厂剩余污泥中重金属形态特征及潜在生态风险评价[J]. *城市环境与城市生态*, 2014, **27**(4): 6-10.
- Li T G, Wang L J, Xu X J, *et al.* Morphological characteristics of heavy metals in sewage sludge and their potential ecological risk assessment in Xi'an, (Shaanxi)[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2014, **27**(4): 6-10.
- [46] 朱静平, 刘静, 王中琪. 污水处理厂剩余污泥用作果园肥料的初步研究[J]. *西南科技大学学报*, 2008, **23**(2): 92-96.
- Zhu J P, Liu J, Wang Z Q. Discussion on the application of residual sludge of SWUST wastewater treatment plant to orchard [J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2008, **23**(2): 92-96.
- [47] 李文博. 重金属元素在污泥-蚯蚓-蚯蚓粪中的迁移转化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- Li W B. The research on the migration and transformation of heavy metals in "sludge, earthworms and earthworm manure" [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [48] 安米基. 城镇污水处理厂污泥中重金属含量及化学形态研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- An M J. Concentration and chemical fractions of heavy metals in sewage sludge [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [49] 王斌, 姜伟. 天津市城镇污水处理厂污泥污染状况及再生利用途径研究[A]. 见: 全国排水委员会 2012 年年会论文集[C]. 南宁: 中国土木工程学会, 2012.
- [50] 花莉. 城市污泥堆肥资源化过程与污染物控制机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- Hua L. Research on mechanism of sludge reclamation and pollution control [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [51] 陈萍丽. 重庆市城市污泥特性及其农用安全性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- Chen P L. Characteristics of sewage sludge and its agricultural utilization in Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2006.
- [52] GB 24188-2009, 城镇污水处理厂污泥泥质[S].
- [53] GB/T 23485-2009, 城镇污水处理厂污泥处置 混合填埋用泥质[S].
- [54] GB 18918-2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- [55] 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. *化学进展*, 2009, **21**(2-3): 436-457.
- Feng X B, Qiu G L, Fu X W, *et al.* Mercury pollution in the environmental[J]. *Progress in Chemistry*, 2009, **21**(2-3): 436-457.
- [56] 惠霖霖, 张磊, 王祖光, 等. 中国燃煤电厂汞的物质流向与汞排放研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(8): 2241-2250.
- Hui M L, Zhang L, Wang Z G, *et al.* The mercury mass flow and emissions of coal-fired power plants in China [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(8): 2241-2250.
- [57] 苏海涛. 我国生活垃圾焚烧行业大气汞排放特征研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
- Su H T. Study on atmospheric mercury emission characteristics from municipal solid waste incineration industry in China [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2016.
- [58] 中华人民共和国国家统计局, 城市污水处理量[EB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/search>, 2017-10-17.
- [59] 张福青. 中国 PVC 行业发展环境分析[D]. 呼和浩特: 内蒙

- 古大学, 2006.
- [60] 邴涓林, 李承志. 中国 PVC 产业快速发展 10 年回顾与 2010 年动态分析[J]. 聚氯乙烯, 2011, **39**(5): 1-8.
Bing J L, Li C Z. Review on rapid development of China's PVC industry in the past 10 years and analysis on the trends in the year 2010[J]. Polyvinyl Chloride, 2011, **39**(5): 1-8.
- [61] 王玉晶, 臧文超, 赵静, 等. 我国电石法生产聚氯乙烯行业汞排放清单[J]. 化工环保, 2016, **36**(5): 572-576.
Wang Y J, Zang W C, Zhao J, *et al.* Mercury emission inventory of PVC production by calcium carbide process in China [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2016, **36**(5): 572-576.
- [62] 王良栋. 氯化汞触媒在电石法 PVC 生产过程中的消耗流向分析[J]. 聚氯乙烯, 2009, **37**(4): 18-21.
Wang L D. Analysis on the distribution of the consumed mercuric chloride catalyst in the production of PVC by calcium carbide method[J]. Polyvinyl Chloride, 2009, **37**(4): 18-21.
- [63] 张新力. 中国 PVC 行业发展现状及趋势[J]. 聚氯乙烯, 2010, **38**(6): 1-3.
Zhang X L. Development status and trend of China's PVC industry[J]. Polyvinyl Chloride, 2010, **38**(6): 1-3.
- [64] 李法山, 王秀娟. 电石法 PVC 行业汞的污染与治理[J]. 聚氯乙烯, 2015, **43**(4): 35-39.
Li F S, Wang X J. Pollution and treatment of mercury in calcium carbide based PVC production[J]. Polyvinyl Chloride, 2015, **43**(4): 35-39.

环境科学

CONTENTS

Estimation of Fine Particle (PM _{2.5}) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in PM _{2.5} in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in PM _{2.5} in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a MnFe ₂ O ₄ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N ₂ O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO ₂ and N ₂ O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO ₂ Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism Between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of PM _{2.5} Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)