

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

泰州市区重金属污染的藓袋法与路尘法评价研究

陈勤, 方炎明*, 颜赟, 陈步金

(南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘要: 以泰州市区为例, 分别用藓袋法和路尘法对城市近地面空气与道路灰尘中 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、V、Zn 等 8 种重金属污染物的含量与污染特征进行了分析, 并用潜在生态危害指数法评价了其生态危害程度。结果表明, 泰州市城区重金属污染较为严重, 存在较高的潜在生态风险。近地面空气中 Cd、Zn 和 Pb 这 3 种重金属的平均含量分别达到了土壤背景值的 8.41、6.94 和 5.85 倍, 道路灰尘中 Zn、Cd、Pb 和 Cu 的平均含量是背景值的 22.63、6.58、5.13 和 4.45 倍。重金属潜在生态危害评价结果表明, Cd 是近地面空气与道路灰尘重金属潜在生态风险偏高的主要因子, 其生态危害贡献率分别达到了 92.43% 和 72.46%。相关性分析表明, 近地面空气中的重金属来源相对单一, 各重金属之间表现出较高的相关性。汽车尾气是泰州市城区重金属污染的主要来源, 客运车站是重金属潜在生态风险最高的地区。

关键词: 重金属污染; 藓袋法; 道路灰尘; 潜在生态危害; 泰州

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1901-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.038

Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area

CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, CHEN Bu-jin

(College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The aims of this study were to examine the contents and distribution character of heavy metals in urban areas of Taizhou, Jiangsu Province. Contents of 8 kinds of metals, including As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, V and Zn, in the moss-bags and road dusts were determined, and the method of potential ecological risk index was used to assess the heavy metal contamination. The results indicated that the current situation of heavy metal contamination was serious in Taizhou, and the ecological risks of heavy metals were high. The mean concentrations of Cd, Zn, Pb in the air near the ground were 8.41, 6.94 and 5.85 times higher than the soil background values, respectively; and the mean concentrations of Zn, Cd, Pb, and Cu in the road dusts were 22.63, 6.58, 5.13 and 4.45 times higher than the soil background values, respectively. The results of potential ecological risk index showed that Cd was the main ecological risk factor both in the air near the ground and the road soils, its contribution rates in ecological risks accounted for 92.43% in the air near the ground and 72.46% in the road soils. The Pearson correlation coefficients of heavy metals showed that there was a significant correlation among the heavy metals in the air near the ground, which implied the sources of pollution in the air were fewer than those of the road dust. Analysis indicated that traffic emission was the major anthropogenic source and the key influencing factor for heavy metal contamination of Taizhou, and that the potential ecological risk of bus stations were the highest.

Key words: heavy metal contamination; moss-bag method; road dusts; potential ecological risk; Taizhou

城市是人类活动最为频繁的地区, 城市环境受到人类工业、交通等活动的强烈影响, 其中, 空气污染与大范围的雾霾已成为人们广泛关注的热点问题。人类活动排放到大气中的重金属通过干湿沉降^[1,2]输入到地表灰尘与土壤中^[3,4], 会对城市居民健康造成危害^[5-10]。然而, 已有的空气污染监测方法成本过高, 且受时空限制不易开展广泛的研究。西方学者研究表明, 生物指示在较大时空尺度上监测空气重金属污染方面具有显著优势^[2,11,12]。

苔藓植物是高等植物范畴的低等类群, 无维管束, 起附着作用的假根不能从基质中摄取养分, 其叶大多由一层细胞构成且存在大量的阳离子交换点, 能吸收其体表的矿质元素, 对环境中重金属的反应敏感度大约是种子植物的 10 倍^[12]。以苔藓为指示

物的生物监测技术是欧美发达国家研究大气重金属沉降的重要方法之一^[2,11,13], 其中欧盟已开展了 5 年一度的大气重金属沉降联合监测^[14]。但是, 空气质量较恶劣的城市中苔藓植物的正常生长往往受到抑制^[1]。藓袋法(moss-bag method)是将清洁区采集的某种苔藓植物制成藓袋, 暴露于污染环境中一定时间进行监测的方法, 具有方便灵活、准确高效、时效动态等优点^[15-18]。

城市道路灰尘是土壤颗粒、空气沉降物、轮胎

收稿日期: 2013-09-12; 修订日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370666, 30070155); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 陈勤(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境植物学, E-mail: tzchenqin@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: jwu4@njfu.com.cn

磨损碎屑等多种物质的混合^[19],在形成与移动过程中又不断接受汽车尾气排放,并受到工业设施、建筑物风化等影响^[3,4],因此,道路灰尘的成分很复杂,富集了大量的污染物质,尤其是重金属元素^[20],在外力作用下易形成扬尘,加剧空气污染的危害性.目前,关于城市道路灰尘中重金属的研究主要侧重于含量调查与来源分析^[3,19,20]、重金属迁移转化规律^[4]的研究.迄今为止,还鲜有对泰州市区重金属污染状况的研究,因此,开展相关重金属污染调查,明确泰州市区重金属污染现状,对于泰州市环境污染防治、环境质量评价等具有重要现实意义.本实验通过藓袋法与路尘法分别对泰州市城区近地面空气及道路灰尘中 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、V、Zn 等 8 种主要重金属污染物的含量与污染特征进行了分析,并用潜在生态危害指数法评价了其生态危害程度,以期城市环境污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

泰州市位于江苏省中部,长江下游北岸,北纬 $32^{\circ}01'57'' \sim 33^{\circ}10'59''$,东经 $119^{\circ}38'24'' \sim 120^{\circ}32'20''$,属北亚热带湿润气候,受季风环流影响明显.泰州工业经济基础雄厚,现有各类工业企业 3.4 万多家,其中规模以上企业 1 083 家,形成了以机电、化工、建材、医药、纺织、食品等为主体

的支柱产业.近几年泰州市经济发展迅速,城市建设取得重大进展,2012 年全市实现地区生产总值 2 701.67 亿元,比上年增长 12.5%.据统计,到 2011 年 10 月泰州市区汽车保有量达到 25.6 万辆,并以每年 15% 的速度递增.2012 年全市 SO_2 排放量达 30 万 t,市区空气质量达到国家优良标准以上的天数占全年比例的 90.2%,其中可吸入颗粒物日均值达标率虽为 91.0%,但仍是影响空气质量的首要污染物.

1.2 样品采集与处理

1.2.1 藓袋制作与悬挂

用采自浙江安吉龙王山自然保护区主峰顶沼泽地的白齿泥炭藓 (*Sphagnum girgensohnii*) 作为监测材料.苔藓采回后,选留鲜活部分,去除杂质并清洗干净,用 1% HNO_3 浸泡 24 h 以去除其吸附的阳离子^[15,16],再用去离子水清洗 2 次,自然晾干后装入尼龙筛网(网眼 $2.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$)做成的矩形袋子 ($15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$),每个 2.0 ~ 3.0 g,封紧袋口.藓袋制作过程中穿戴乳胶手套,以避免污染.

依据泰州市城区具体的交通、商业、建筑分布等状况,选择了 19 个监测点(表 1),具体分布情况见图 1.藓袋悬挂于行道树距离地面 4 ~ 5 m 的高度,保证完全暴露于空气中,没有物体遮盖,每个监测点 3 个样袋.时间为 2013-02-22 ~ 2013-04-30,满足达到最大吸附量的时间要求^[15,21].

表 1 泰州市 19 个样点的分布情况

Table 1 Distribution of the 19 sampling sites of Taizhou

样点号	样点名	样点号	样点名	样点号	样点名
1	泰州市客运西站	8	省泰州中学	15	青年路与迎春路交界
2	江州路与迎春路交界	9	新泰州市客运东站	16	万达商业广场
3	泰州市留学生创业园	10	老泰州市客运东站(已废弃)	17	三水湾停车场
4	泰州市客运南站	11	鼓楼路与东进路交界	18	鼓楼路与迎春路交界
5	泰州市政府前广场	12	河滨绿地广场	19	鼓楼北路 7 号
6	泰州市人民公园	13	青年路与东进路交界		
7	江苏省畜牧兽医学院(大学城)	14	泰山公园		

1.2.2 道路灰尘样品采集

用塑料毛刷和塑料小铲分别对各监测点附近的道路灰尘进行样品采集,时间为 2013-05-05,满足至少连续 3 d 不降雨的采样要求^[5],以确保样品的代表性.为获得较真实的分析测试所需样品,采样时避开公交站、垃圾箱、下水道口、建筑用地等容易造成干扰的地方.每个样点在 10 m^2 范围内,随机采集 5 个位点的灰尘(总量不低于 300 g),装入洁净 PE 自封袋充分混合后备用.

1.3 样品处理与测试

1.3.1 样品硝化处理

泥炭藓样品取回后自来水简略漂洗、晾干,加液氮研磨后烘干,装入洁净自封袋中备用.道路灰尘去除杂质后过 200 目尼龙筛,烘干至恒重后备用.分别称量各样品 (0.50 ± 0.0005) g 置于 50 mL 三角烧瓶中,加入 10 mL 混合酸 ($\text{HClO}_4 : \text{HNO}_3 = 1:4$) 浸泡 48 h 进行“湿法灰化”,通风橱中消煮至溶液澄清后加入 2 mL 稀硝酸 ($\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 1:1$),消煮至白烟冒尽,冷却后用蒸馏水润洗至 25 mL 容量瓶定容.每个样品均做平行双样处理,以试剂空白为对

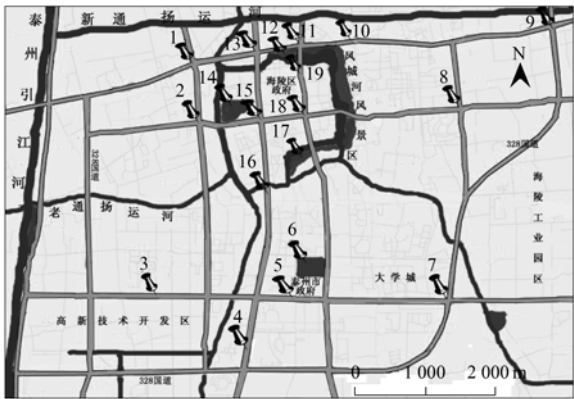


图1 泰州市区样点分布示意

Fig. 1 A sketch map showing the sampling sites in Taizhou

照,同时加测未经悬挂处理的泥炭藓样品用于消除相关影响.分析所用试剂均为优级纯,实验所用玻璃仪器均用2%的HNO₃浸泡24 h以上、超纯水冲洗干净.

1.3.2 重金属测定

用PerkinElmer公司Optima 4300DV型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、V、Zn等8种重金属的含量.标准样为GBW10020(GSB-11柑橘叶),样品回收率≥

99.236%.数据处理及统计分析用SPSS 19.0、Microsoft Excel 2003.

1.4 重金属污染潜在生态风险评价方法

潜在生态危害指数(potential ecological risk index)评价方法是目前国内外普遍使用的一种应用沉积学原理评价重金属污染与生态危害的方法.该方法是瑞典科学家Hakanson于1980年建立的,他将沉积物的重金属含量与重金属的生态效应、环境效应以及毒理学影响联系在一起,形成了一套完整的评价体系^[22].潜在生态危害指数计算方法如下:

RI = \sum E_r^i = \sum (T_r^i \times C_f^i)

式中,RI为多种重金属的综合潜在生态危害指数; $\sum E_r^i$ 为某单个重金属的潜在生态危害系数; T_r^i 为某重金属的毒性响应系数,8种重金属的毒性响应系数分别为^[23]Cd=30,As=10,Cu=Pb=5,Cr=V=2,Mn=Zn=1. C_f^i 为某单个重金属的污染系数, $C_f^i=C^i/C_n^i$,式中, C^i 为某单个重金属的浓度实测值, C_n^i 为对应重金属的评价参比值,本文以江苏省A层土壤背景值^[24]为评价参比值.重金属污染潜在生态危害指数分级标准见表2.

表2 重金属污染程度及潜在生态风险

Table 2 Heavy metal pollution degree and potential ecological risk

C_f^i		E_r^i		RI	
数值	污染程度	数值	生态危害程度	数值	生态危害程度
$C_f^i < 1$	低污染	$E_r^i < 40$	轻微生态危害	$RI < 150$	轻微生态危害
$1 \leq C_f^i < 3$	中污染	$40 \leq E_r^i < 80$	中等生态危害	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害
$3 \leq C_f^i < 6$	较高污染	$80 \leq E_r^i < 160$	较高生态危害	$300 \leq RI < 600$	较高生态危害
$C_f^i \geq 6$	高污染	$160 \leq E_r^i < 320$	高生态危害	$RI \geq 600$	高生态危害
		$E_r^i \geq 320$	极高生态危害		

2 结果与讨论

2.1 近地面空气重金属污染特征

泰州市区近地面空气重金属监测统计结果见表3. As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、V和Zn含量分别为1.24~4.71、0.35~2.36、12.72~112.19、12.49~28.71、222.90~386.15、20.04~58.72、2.98~9.25和51.40~352.48 mg·kg⁻¹.其中,Cd、Zn和Pb的平均值分别是相应背景值的8.23、2.95和1.56倍,受人为影响较严重.进一步分析发现,As、Cd、Cr、Cu、Mn和Pb的最大值均出现在样点1,即泰州市客运西站,这里位于泰州市老城区,是城西的交通汇焦点,车流量大,此外,这里还是一个集货运、汽车修理与配件的交易市场.从变异系数来看,Cr、

Cd和Zn的变异系数较大,说明它们在空间分布上存在较大的差异;As、Cu、Mn、Pb和V的变异系数较小,在区域分布上具有一定相似性,但就整体而言各样点之间并不存在明显的变化规律.

苔藓植物是配子体占优势的孢子植物,起附着作用的假根不能从基质中摄取养料,通常认为其生长所需的养分主要来自大气沉降及雨水中溶解的矿物质^[11~14].表4列出了国内外各大城市利用藓袋法监测的城市近地面空气重金属含量,可以看出泰州市空气中Cu与V的平均浓度相比较其他城市而言是比较低的,但是As与Cr却是最高;吉首市^[25]空气中Cd与Mn的浓度最高,达到了4.45 mg·kg⁻¹和405 mg·kg⁻¹;Zn最大值出现在上海^[26],为479.86 mg·kg⁻¹;Pb最大值出现在意大利的

Naples^[17]; Cu 与 V 的最大值出现在塞尔维亚的 Belgrade^[2], 分别为 144 mg·kg⁻¹ 和 14 mg·kg⁻¹. 进一步分析发现, 除了当地的交通状况^[17,26,27]、工矿产业布局^[25], 监测方法^[2] 和苔藓种类^[15,18] 也是影

响监测结果的主要因素. 就整体而言, 泰州市近地面空气重金属污染情况并不比国内其他城市^[25~27] 具备明显的优越性, 基本处于同一水平, 相比于西方发达国家^[2,17,18] 则存在较大差距.

表 3 藓袋法监测的泰州市城区近地面空气重金属

样点	重金属含量/mg·kg ⁻¹							
	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	V	Zn
1	4.71	2.36	112.19	28.71	386.15	58.72	8.32	329.52
2	1.81	0.52	24.82	16.75	235.52	27.18	3.75	82.74
3	2.48	0.35	35.44	25.83	250.70	25.78	2.98	53.89
4	3.95	1.85	86.18	23.50	354.75	52.60	8.53	280.10
5	3.70	1.05	17.53	18.90	226.30	41.10	6.68	204.13
6	1.24	0.73	12.72	12.49	228.16	32.63	3.09	78.30
7	2.66	0.79	18.59	14.20	234.32	39.72	3.52	185.55
8	2.43	0.82	22.74	13.83	253.28	36.88	4.25	176.12
9	4.45	1.80	107.60	26.41	323.28	54.96	9.25	290.35
10	3.90	1.25	85.13	23.33	327.20	49.43	8.00	232.58
11	2.64	0.94	68.24	18.87	348.83	46.55	6.59	185.62
12	2.10	0.95	62.13	19.33	308.00	43.28	5.23	125.50
13	2.92	1.17	79.86	21.42	312.41	48.92	6.22	193.50
14	3.58	0.38	32.60	24.48	222.90	20.04	3.58	51.40
15	3.90	0.93	48.65	19.85	242.80	39.00	6.08	195.43
16	2.25	1.25	69.18	18.68	291.80	45.73	7.33	353.48
17	3.18	0.95	35.33	17.08	235.28	35.33	5.20	159.10
18	3.05	0.80	35.78	16.60	269.00	39.20	6.90	155.23
19	3.03	0.83	45.03	16.75	256.93	39.30	6.50	177.98
平均值/mg·kg ⁻¹	3.05	1.04	52.62	19.84	279.35	40.86	5.89	184.76
背景值 ^[24] /mg·kg ⁻¹	10	0.126	77.8	22.3	585	26.2	83.4	62.6
平均值/背景值	0.31	8.23	0.68	0.89	0.48	1.56	0.07	2.95
变异系数	0.30	0.49	0.59	0.23	0.18	0.25	0.33	0.47

表 4 其他各大城市藓袋法监测的重金属含量

地点	藓种	金属含量/mg·kg ⁻¹								文献
		As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	V	Zn	
Belgrade	白齿泥炭藓(干沉降)	0.67	0.27	3.1	20	215	20	13	71	[2]
	白齿泥炭藓(湿沉降)	0.8	0.36	5.8	144	134	31	14	113	[2]
Naples	尖叶泥炭藓	1.3	0.7	7.9	59	—	133	10.5	239	[17]
	白齿泥炭藓	0.67	0.3	1.7	7.6	173	—	2.1	36	[18]
Sofia	柏状灰藓	1.11	0.47	3	11	53	—	6.1	24	[18]
	拟扁枝衣	1.4	0.52	3.2	16	52	—	4.2	59	[18]
泰州	白齿泥炭藓	3.05	1.04	52.62	19.84	279.35	40.86	5.89	184.76	本研究
上海	细叶小羽藓	—	1.64	1.72	25.64	—	31.85	—	388.26	[26]
	细叶小羽藓	—	1.75	1.88	28.8	—	34.08	—	479.86	[26]
铜陵	大灰藓	—	1.95	2.96	120.04	—	42.03	—	114.16	[27]
吉首	暖地泥炭藓	—	4.45	—	46.64	405	69.2	—	135.61	[25]

2.2 道路灰尘重金属含量特征

表 5 列出了 19 个样点灰尘中的重金属含量. 从中可知, 8 种重金属 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、V 和 Zn 含量分别为 2.35 ~ 8.67、0.32 ~ 2.73、45.13 ~ 184.80、59.25 ~ 298.00、300.53 ~ 733.50、76.28 ~ 287.85、18.13 ~ 42.40、485.38 ~ 2 438.33

mg·kg⁻¹. 灰尘中 Zn 相对土壤的富集程度最大, 是土壤背景值的 22.63 倍; 其次是 Cd、Pb 和 Cu, 分别是背景值的 8.41、6.94 和 5.85 倍, 说明道路灰尘中这 4 种元素受到人类活动的释放影响较大. 从空间分布看上, Cd、Cr、V 和 Zn 的最大值均出现在新泰州市客运东站, 该站虽是 2008 年新设, 但却是连接姜堰

市、兴化市和泰州火车站的大枢纽,也是泰州市交通流量最大的地区之一; Cu 与 Mn 的最大值出现在泰州市人民公园,其前身为村庄与农田,故 Cu 和 Mn 可能更多的来源于当地的自然源; 此外,As 的最大值出现在泰州市客运西站,Pb 的最大值出现在万达商业广场,这两个监测点也都是交通流量比较大的地区.从变异系数来看,Cd、Cr、Cu、Zn 的变异系数较大,可能是受人类活动影响较大的结果.

表 5 泰州市城区道路灰尘重金属含量

Table 5 Heavy metal content in urban street dust of Taizhou

样点	重金属含量/mg·kg ⁻¹							
	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	V	Zn
1	8.67	2.63	155.45	149.65	451.78	278.90	39.83	2 270.70
2	3.38	0.43	78.48	86.93	315.48	109.45	19.08	485.38
3	4.15	0.32	45.13	76.40	302.38	143.33	19.78	957.08
4	7.93	2.60	148.60	127.28	490.95	236.03	41.98	2 118.20
5	8.45	0.85	69.68	81.93	372.98	103.55	25.65	1 253.63
6	3.70	0.43	51.88	298.00	733.50	201.78	35.55	604.00
7	2.35	0.38	69.38	59.25	341.05	233.05	19.43	860.93
8	3.18	0.68	67.68	70.28	300.53	152.40	19.23	1 306.43
9	8.40	2.73	184.80	168.30	485.30	263.40	42.40	2 438.33
10	6.48	1.45	138.93	164.23	437.13	245.30	41.10	1 885.23
11	5.65	1.05	92.75	167.38	389.78	183.90	39.25	1 420.93
12	5.55	0.78	67.80	86.48	332.53	94.35	23.73	637.75
13	4.93	0.78	108.23	97.30	371.10	196.03	34.63	1 335.00
14	4.20	0.65	60.35	126.10	318.63	224.40	18.13	1 290.48
15	5.55	0.85	69.88	148.80	358.75	146.88	32.78	1 500.15
16	6.43	1.25	101.38	160.03	397.03	287.85	39.70	2 191.58
17	6.03	0.68	55.23	121.68	384.80	76.28	23.45	1 084.63
18	5.48	0.75	65.80	139.35	350.25	132.20	28.73	1 830.53
19	5.55	0.88	62.30	149.78	360.25	143.85	30.18	1 451.03
平均值/mg·kg ⁻¹	5.58	1.06	89.14	130.48	394.43	181.73	30.24	1 416.94
平均值/背景值	0.56	8.41	1.15	5.85	0.67	6.94	0.36	22.63
变异系数	0.33	0.72	0.45	0.42	0.25	0.36	0.30	0.41

相对国内外城市而言(表 6),泰州市区道路灰尘中大部分重金属的含量偏低,尤其是 As、Cd、Mn、V,与附近的南京市^[28]、合肥市^[8]基本处于同一水平;其 Zn、Cu 值偏高除了受交通尾气排放的影响外,可能还与泰州当地大力发展铝合金产业有关,在离市区不远的戴南镇坐落着全国最大的不锈钢产业基地.此外,从表 6 可以看出,工业基础较落后的安哥拉首都 Luanda^[31]道路灰尘中重金属 As、Cr、Cu、Mn、V 和 Zn 的含量均较低,受人类活动影响小;泉州市^[29]道路灰尘中 Cd、Mn、Pb 的值最大,Cu 与 Zn 的含量也较高,是重金属污染较为严重的城市,作为福建省的经济中心,泉州市曾连续14 a 夺得地区生产总值的桂冠,但当地发达的工业建设也向环境中释放了大量的重金属污染.

表 6 其他各大城市道路灰尘中的重金属含量

Table 6 Heavy metal concentrations in street dust of major cities around the world

地点	重金属含量/mg·kg ⁻¹								文献
	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	V	Zn	
泰州	5.58	1.06	89.14	130.48	394.43	181.73	30.24	1 416.94	本研究
北京	9.09	1.11	131.92	67.33	—	437.41	—	—	[6]
上海	—	0.97	218.91	186.41	—	212.94	—	687.25	[7]
南京	13.40	1.094	125.50	122.90	646.00	103.40	74.60	394.00	[28]
合肥	—	4.531	96.88	67.5	—	132.15	—	2 332.96	[8]
芜湖	—	5.85	46.19	162.78	677.14	95.21	53.48	257.70	[9]
泉州	—	20.23	114.1	273.9	1703	600.4	—	1 831.6	[29]
昆明	20.65	—	79.41	168.80	—	97.49	—	316.53	[10]
Belgrade	—	8.90	70.23	122.29	641.80	350.06	—	268.37	[30]
Luanda	5	1.1	26	42	258	351	20	317	[31]
Birmingham	—	1.62	—	466.9	—	48	—	534	[32]

2.3 藓袋法与路尘法的对比分析

2.3.1 重金属含量对比分析

从表 3 和表 5 可以看出,As、Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、V 和 Zn 路尘法的最大值分别是藓袋法最大值的 1.84、1.16、1.65、10.38、1.90、4.90、4.58 和 6.90 倍,Zn、Cu、V、Pb 路尘法的平均值与藓袋法平均值相比也分别达到了 7.67、6.58、5.13 和 4.45 倍,两种方法所得结果存在较大差别(图 2)。

1971 年 Nature 杂志对 Goodman 等^[33]首次使用藓袋法测定威尔士某工业区空气重金属含量的研究结果进行了报道,随后进行相关研究的学者越来越多^[15],国内学者 Sun 等^[16]和 Cao 等^[34]分别用藓袋监测了重庆市和上海市空气重金属污染状况,结果表明藓袋法监测结果与常规的大气环境监测数据呈现很好的相关性.一般认为,不同种类的苔藓植物对大气污染物的吸附能力不同,体表面积较大、分枝较多且有附着绒毛的种类在环境生物指示方面具有优势^[15,16,18].此外,由表 4 也可看出,同种植物同一地点^[2]监测大气湿沉降的数值比干沉降高出很多。

另一方面,藓袋法监测的是近地面空气中的重金属含量,其来源相对单一,主要是大气沉降以及一些高空扬尘^[32];而道路灰尘则是多种物质的混合物,它除了接受大气沉降物外,还受到建筑物风化、土壤颗粒、运输散落物、生物残渣,特别是汽车尾气排放的影响^[19,20],因此,就同一监测点而言,道路

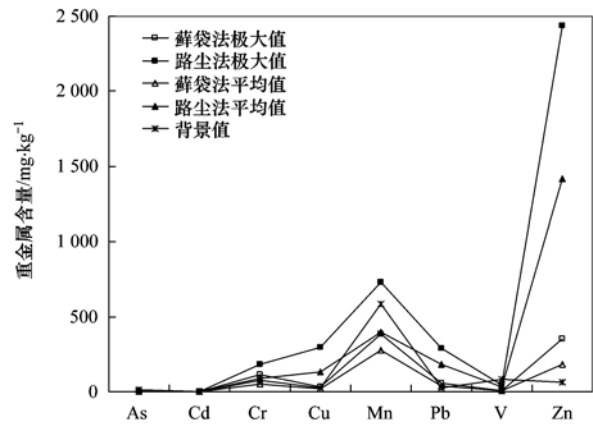


图 2 藓袋法与路尘法测得值的比较

Fig. 2 Comparison of the results measured by the moss-bag method and the road dust value

灰尘中的重金属含量要比近地面空气中的多很多。

2.3.2 重金属来源对比分析

表 7 为对藓袋法与路尘法测得的重金属含量进行的相关性分析,藓袋法中有 3 对重金属元素之间无显著相关性,分别是 As-Mn、Cu-Pb、Cu-Zn,其他重金属元素之间均呈显著正相关或极显著正相关,其中相关系数在 0.8~0.95 之间呈极显著性相关的有 11 对,比路尘法(11 对元素间无显著相关,相关系数在 0.8~0.95 之间呈极显著性相关的仅 3 对)表现出更高的一致性,说明近地面空气中的重金属来源相比于道路灰尘而言更单一、同源性较大。

表 7 泰州市城区重金属含量相关性分析¹⁾

Table 7 Correlation coefficients of heavy metals in Taizhou

	藓袋法							路尘法						
	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	V	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	V
Cd	0.659 **							0.805 **						
Cr	0.612 **	0.831 **						0.675 **	0.924 **					
Cu	0.709 **	0.523 *	0.733 **					0.184	0.224	0.173				
Mn	0.448	0.803 **	0.912 **	0.580 *				0.249	0.346	0.308	0.857 **			
Pb	0.530 *	0.907 **	0.823 **	0.359	0.843 **			0.255	0.607 **	0.682 **	0.359	0.396		
V	0.706 **	0.832 **	0.814 **	0.485 *	0.743 **	0.864 **		0.663 **	0.743 **	0.757 **	0.623 **	0.611 **	0.619 **	
Zn	0.550 *	0.859 **	0.713 **	0.320	0.659 **	0.868 **	0.843 **	0.727 **	0.830 **	0.772 **	0.214	0.149	0.649 **	0.726 **

1) * 在 5% 水平显著相关, ** 在 1% 水平显著相关,下同

由表 7 可以看出,两种监测结果中 Cd、Cr、Pb、V、Zn 之间均呈极显著正相关;As 与 Cd、Cr、V、Mn 与 V 之间也存在极显著正相关.对照具体的监测点分析发现,As、Cd、Cr、Cu、Pb、V、Zn 的高值主要集中在车流量较密集的客运车站和繁华的商业广场,而其低值则主要出现在公园绿地与大学新城.通常认为,Pb、Cu、Cd、Cr、Zn 主要来源于汽车尾气排放、轮胎摩擦碎屑以及工业源^[35,36],受人为因

素影响较大;Mn、V 主要来自土壤母质状况^[28].本研究中 Mn 与 V 之间虽存在极显著的正相关性,但 Mn 与 Cu 之间,V 与 As、Cd、Cr、Zn 之间也呈显著性相关,说明 Mn 和 V 可能也受到了人为源排放的影响。

3 泰州市城区重金属污染潜在生态风险评价

从泰州市区重金属含量潜在生态危害评价结果

来看(表 8),城市近地面空气中 8 种重金属污染系数为: Cd > Zn > Pb > Cu > Cr > Mn > As > V, 其中 Cd 为高污染, Zn 与 Pb 为中污染, 其他均为低污染; 8 种重金属潜在生态危害系数为: Cd > Pb > Cu > As > Zn > Cr > Mn > V, 其中仅 Cd 具潜在高生态危害, 其他元素均为轻微生态危害. 就整体状况而言, 泰州

市城区近地面空气中重金属潜在生态风险偏高(RI = 643. 63), Cd 是主要的生态风险因子, 其生态危害贡献率达到了 92. 43%. 近地面空气中重金属潜在生态风险最大的分别是泰州市客运西站(RI = 593. 27)、客运南站(RI = 467. 23) 以及新客运东站(RI = 457. 61).

表 8 泰州市城区重金属含量潜在生态危害评价结果

Table 8 Results of potential ecological risk assessment of heavy metals in Taizhou

	藓袋法						路尘法					
	C_i^t			E_i^t			C_i^t			E_i^t		
	范围	均值	污染程度	范围	均值	危害程度	范围	均值	污染程度	范围	均值	危害程度
As	0.12~0.47	0.31	低污染	1.24~4.71	3.05	轻微	0.24~0.87	0.56	低污染	2.35~8.67	5.58	轻微
Cd	2.78~18.73	8.23	高污染	83.33~561.90	246.99	高	2.54~21.63	8.41	高污染	76.19~648.81	252.19	高
Cr	0.16~1.44	0.68	低污染	0.33~2.88	1.35	轻微	0.58~2.38	1.15	中污染	1.16~4.75	2.29	轻微
Cu	0.56~1.29	0.89	低污染	2.80~6.44	4.45	轻微	2.66~13.36	5.85	较高污染	13.28~66.82	29.26	轻微
Mn	0.38~0.66	0.44	低污染	0.38~0.66	0.48	轻微	0.51~1.25	0.67	低污染	0.51~1.25	0.67	轻微
Pb	0.76~2.24	1.56	中污染	3.82~11.21	7.8	轻微	2.91~10.99	6.94	高污染	14.56~54.93	34.68	轻微
V	0.04~0.11	0.07	低污染	0.07~0.22	0.14	轻微	0.22~0.51	0.36	低污染	0.43~1.02	0.73	轻微
Zn	0.82~5.65	2.95	中污染	0.82~5.65	2.95	轻微	7.75~38.95	22.63	高污染	7.75~38.95	22.63	轻微
RI				2.69~4 692.86	643.63	高				12.81~4 791.67	826.59	高

泰州市区道路灰尘重金属潜在生态风险分析表明, 8 种重金属的污染系数为: Zn > Cd > Pb > Cu > Cr > Mn > As > V, 其中 Cd、Pb 和 Zn 达到了高污染水平, Cu 为较高污染, Cr 为中污染, Mn、As 和 V 为低污染, 故道路灰尘中重金属潜在生态危害程度要比近地面空气中严重些. 其中, 导致道路灰尘中重金属潜在生态风险偏高(RI = 826. 59) 的主要生态风险因子也是 Cd, 其生态危害贡献率为 72. 46%. 8 种重金属潜在生态危害系数为: Cd > Pb > Cu > Zn > As > Cr > V > Mn. 道路灰尘中重金属潜在生态风险最大的分别是新泰州市客运东站(RI = 790. 76)、客运西站(RI = 762. 45) 和客运南站(RI = 740. 06), 因此, 可以认为汽车尾气排放是泰州市区重金属污染的主要污染源.

4 结论

(1) 泰州市区近地面空气中 Cd、Zn、Pb 这 3 种重金属的平均含量超出了江苏省土壤背景值, 分别是相应背景值的 8. 23、2. 95 和 1. 56 倍, 其中泰州市客运西站是 19 个监测点中空气污染最为严重的地区.

(2) 泰州市区道路灰尘中 8 种重金属含量的变化范围较大, 存在不同程度的污染, 其中 Zn 平均值是土壤背景值的 22. 63 倍, Cd、Pb 和 Cu 也分别达到了 8. 41、6. 94 和 5. 85 倍. 新泰州客运东站道路灰尘重金属污染最为严重.

(3) 路尘法测得的 8 种重金属含量均比藓袋法监测的结果高, 道路灰尘中 Zn、Cu、V、Pb 的平均值达到近地面空气中的 7. 67、6. 58、5. 13 和 4. 45 倍. 相关性分析表明, 与道路灰尘接受多种污染源不同, 近地面空气中的重金属来源相对单一、同源性较大.

(4) 重金属潜在生态危害评价结果表明, 泰州市区近地面空气中 Cd 为高污染, Zn 与 Pb 为中污染; 道路灰尘中 Cd、Pb 和 Zn 为高污染, Cu 为较高污染, Cr 为中污染. 其中, Cd 是近地面空气与道路灰尘重金属潜在生态风险偏高的主要因子, 其生态危害贡献率分别达到 92. 43% 和 72. 46%. 重金属潜在生态风险较大的分别是交通繁忙的 3 个客运站.

参考文献:

[1] Wong C S C, Li X D, Zhang G, *et al.* Atmospheric deposition of heavy metals in the Pearl River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(6): 767-776.

[2] Anicic M, Tasic M, Frontasyeva M V, *et al.* Active moss biomonitoring of trace elements with *Sphagnum girgensohnii* moss bags in relation to atmospheric bulk deposition in Belgrade, Serbia[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(2): 673-679.

[3] Al-Khashman O A. Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(39): 6803-6812.

[4] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-4): 176-186.

- [5] 唐荣莉, 马克明, 张育新, 等. 北京城市道路灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(8): 2006-2015.
- [6] 杨孝智, 陈扬, 徐殿斗, 等. 北京地铁站灰尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(6): 944-950.
- [7] 常静, 刘敏, 李先华, 等. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(5): 548-554.
- [8] 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2661-2668.
- [9] 方凤满, 蒋炳言, 王海东, 等. 芜湖市市区地表灰尘中重金属粒径效应及其健康风险评价[J]. 地理研究, 2010, **29**(7): 1193-1202.
- [10] 梁涛, 史正涛, 吴枫, 等. 昆明市街道灰尘重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 热带地理, 2011, **31**(2): 164-170.
- [11] Harmens H, Norris D A, Koerber G R, *et al.* Temporal trends (1990-2000) in the concentration of cadmium, lead and mercury in mosses across Europe [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **151**(2): 368-376.
- [12] Cameron A J, Nickless G. Use of mosses as collectors of airborne heavy metals near a smelting complex[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1977, **7**(1): 117-125.
- [13] Poikolainen J, Kubin E, Piispanen J, *et al.* Atmospheric heavy metal deposition in Finland during 1985-2000 using mosses as bioindicators[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **330**(1-3): 171-185.
- [14] Harmens H, Norris D A, Steinnes E, *et al.* Mosses as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: Spatial patterns and temporal trends in Europe [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(10): 3144-3156.
- [15] 曹同, 王敏, 姜玉霞, 等. 监测环境污染的藓袋法技术及其应用[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2011, **40**(2): 213-220.
- [16] Sun S Q, Wang D Y, He M, *et al.* Monitoring of atmospheric metal deposition in Chongqing, China-based on moss bag technique [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **148**(1-4): 1-9.
- [17] Giordano S, Adamo P, Sorbo S, *et al.* Atmospheric trace metal pollution in the Naples urban area based on results from moss and lichen bags[J]. *Environmental Pollution*, 2005, **136**(3): 431-442.
- [18] Culicov O A, Yurukova L. Comparison of element accumulation of different moss and lichen-bags, exposed in the city of Sofia (Bulgaria) [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2006, **55**(1): 1-12.
- [19] Harrison R M, Tilling R, Romero M S C, *et al.* A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(17): 2391-2402.
- [20] Zhang M K, Wang H. Concentrations and chemical forms of potentially toxic metals in road-deposited sediments from different zones of Hangzhou, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(5): 625-631.
- [21] 王爱霞. 南京市空气重金属污染的藓类和树木监测[D]. 南京: 南京林业大学, 2010. 64-71.
- [22] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [23] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
- [24] 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. 334-378.
- [25] 姜业芳. 苔袋法监测吉首市大气重金属污染[J]. 生命科学, 2005, **9**(4): 132-134.
- [26] 吴继明. 应用小羽藓-藓袋法研究上海地区 2006~2011 年间的 5 种重金属污染变化及区域分异[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2012, **41**(4): 410-418.
- [27] 吴明开, 曹同, 张小平. 藓袋法监测铜陵市大气重金属污染的研究[J]. 激光生物学报, 2008, **17**(4): 554-558.
- [28] 张云, 张宇峰, 胡忻. 南京不同功能区街道路面积尘重金属污染评价与源分析[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(11): 1376-1381.
- [29] 刘海婷, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 泉州市街道灰尘重金属污染评价[J]. 矿物岩石, 2010, **30**(3): 116-120.
- [30] Ivan G, Rabia H A G. Potential health risk assessment for soil heavy metal contamination in the central zone of Belgrade (Serbia) [J]. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2008, **73**(8-9): 923-934.
- [31] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [32] Charlesworth S, Everett M, McCarthy R, *et al.* A comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry, West Midlands, UK [J]. *Environment International*, 2003, **29**(5): 563-573.
- [33] Goodman G T, Roberts T M. Plants and soil as indicators of metals in the air [J]. *Nature*, 1971, **231**(6): 287-292.
- [34] Cao T, Wang M, An L, *et al.* Air quality for metals and Sulfur in Shanghai, China, determined with moss bags [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(4): 1270-1278.
- [35] Kartal S, Aydn Z, Tokalioglu S. Multivariate analysis of the data and speciation of heavy metals in street dust samples from the Organized Industrial District in Kayseri (Turkey) [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(16): 2797-2805.
- [36] 韩力慧, 庄国顺, 程水源, 等. 北京地面扬尘的理化特性及其对大气颗粒物污染的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 1-8.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行