

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

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

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)

基于重庆本地碳成分谱的 PM_{2.5} 碳组分来源分析 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)

基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)

典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)

火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 王占山, 潘丽波 (853)

国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)

河口湿地近地面大气 CO₂ 浓度日变化和季节变化 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)

三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)

施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)

干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)

长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)

三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)

太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)

纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)

铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)

预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)

冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)

高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 李飞, 徐敏 (1035)

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)

瓦埠湖流域庄集镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)

三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评估 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)

基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)

三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)

天然林土壤有机碳及矿化特征研究 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)

硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)

6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)

基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)

人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)

农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)

苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)

对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 宋彩霞, 邓新平, 厉阆, 肖伟 (1176)

克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)

铅元素人为循环环境释放物形态分析 梁静, 毛建素 (1191)

污染排放与环境质量关系模型构建与应用 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)

《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价

刘玲^{1,2}, 方炎明^{2*}, 王顺昌¹, 谢影¹, 汪承润¹

(1. 淮南师范学院生命科学系, 淮南 232001; 2. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘要: 以悬铃木叶片为监测器官, 对淮南市 6 种大气环境 20 个样区 Cd 等 6 种重金属的累积量进行了测量和聚类, 并分析了叶片富集重金属的 EF 值。结果表明, 不同样区悬铃木叶片累积的 6 种重金属含量不同, 平均值大小表现为 Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd; 环境不同, 叶片累积同种重金属的量也存在差异, 水泥厂周边环境悬铃木叶片累积的 Cd 和矿区 Cu 以及交通主干道大气环境中 Cr、Ni、Pb 和 Zn 显著高于其他环境; 除风景区、自然村 Cr 外, 其他采样环境中被测重金属 EF 平均值全部超过 1, 矿区、电厂、交通主干道及水泥厂周边环境中的 6 种重金属的 EF 值全部大于 3, 淮南市总体大气环境重金属污染为 Cd > Cu > Zn > Ni > Pb > Cr。

关键词: 悬铃木; 重金属; 污染; 分析; 评价

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0839-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.005

Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in *Platanus acerifolia* Leaves

LIU Ling^{1,2}, FANG Yan-ming², WANG Shun-chang¹, XIE Ying¹, WANG Cheng-run¹

(1. School of Life Science, Huainan Normal University, Huainan 232001, China; 2. College of Forest Resource and Environment, Nanjing Forest University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The present work was aimed to evaluate the heavy metal pollution in the atmosphere of Huainan City. We measured and clustered the accumulation of six heavy metals in *Platanus acerifolia* leaves in 20 sampling fields with six types of environmental conditions, and analyzed the EF value of heavy metal enrichment in the leaves. The results showed that the accumulations in *Platanus acerifolia* leaves varied according to different types of metals, following the order of Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd. Environmental conditions also had great influence on the accumulation of heavy metals. Cd and Cu were mostly found in cement plant and mine, respectively, and Cr, Ni, Pb and Zn were significant higher in main road, compared with other environmental conditions. The average values of EF for all the metals except Cr in scenic and village area were over 1. The average values of EF for all the metals in mine, power plant, main road and cement plant were above 3. The overall pollution condition of heavy metals in Huainan City followed the order of Cd > Cu > Zn > Ni > Pb > Cr.

Key words: *Platanus acerifolia*; heavy metals; pollution; analysis; assessment

木本植物一般具有较深的直根系和繁茂的地上部分, 叶片是木本植物地上的主要组成, 根吸收土壤的重金属元素主要都滞留在根部^[1], 而叶片是大气污染物的重要吸收器官, 因树木总叶表面积通常为植物本身占地面积的 20 倍以上, 截尘量大^[2], 随着绿化覆盖率的增高, 空气中颗粒物的沉降和碰撞过程增加, 粗糙湿润的叶片表面能够有效地滞留大气颗粒物^[3], 累积颗粒物中的重金属^[4,5]。因此, 确定环境污染物的范围以及对生命有机体威胁的最好方法是测定有机体本身的污染水平^[6], 也可根据同一植物相同时间在不同地区重金属累积的量, 估计样区空气污染状况, 分析和鉴别环境的污染程度, 进行环境质量评价和污染等级确定等^[7]。木本植物分布广泛, 种类繁多, 不同种类的木本植物对大气污染物的富集能力不同。目前, 国外用作监测大气重金属

污染的木本植物种类主要有松柏科^[8,9]和壳斗科植物^[10-13]; 常绿被子植物也作为监测空气重金属污染树种^[14,15]; 在欧洲或者美国北部, 许多研究已经成功地利用了悬铃木对灰尘的磁效应^[16]和重金属的累积^[17]做了大量工作。我国关于植物累积重金属的研究也已开始, 但是大多数是利用苔藓作为环境监测器^[18], 利用悬铃木作为监测植物的研究不多^[19]。而悬铃木作为引种树种, 因其叶片面积大, 遮荫效果良好, 已被广布栽植于淮南市街道、公路的两边, 是目前我市主要的城市绿化落叶树种, 加之

收稿日期: 2013-07-08; 修订日期: 2013-10-19

基金项目: 安徽省教育厅项目(KJ2013Z301); 淮南师范学院科研项目(2012LK21); 卓越农林人才项目(2012hszy03)

作者简介: 刘玲(1967~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为植物与环境, E-mail: lliuu494@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: jwu4@njfn.edu.cn

笔者先前的研究发现矿区悬铃木叶片重金属含量高于相对清洁区,悬铃木在交通污染环境累积特征元素 Pb、Ni 含量高于其他树种^[20],生理变化也能够适应环境污染的加重,所以本研究利用悬铃木叶片作为大气重金属沉积物的指示器官监测淮南市整个辖区的空气污染情况. 由于淮南是中国的能源基地,是重点建设的 13 个亿吨煤基地和 6 个煤电基地之一,有未来“火电三峡”之称,六区一县多有煤矿、电厂和化肥厂,依托于煤、电、化发展的经济逐渐导致机动车辆迅速增加,环境大气质量呈恶化趋势,将会引起当地居民的健康问题. 因此加强空气重金属污染监测,开展其健康危害度评估,从而控制污染水平,对环保措施的落实具有重要的意义.

表 1 样区环境特点

Table 1 Characteristics of environment in the sampling areas

样区号	样区名称	地理位置	样区环境类型	样区地表特征
1	田家庵区上窑镇森林公园	32°43'55.85"E, 117°09'29.03"N	风景区	绿地
2	八公山森林公园	32°37'46.30"E, 116°50'13.16"N	风景区	绿地
3	田家庵区洛河电厂	32°40'38.80"E, 117°04'53.29"N	电厂	居民区
4	潘集区潘集镇	32°48'55.79"E, 116°44'39.90"N	电厂	居民区
5	凤台县丁集	32°49'41.45"E, 116°38'48.95"N	电厂	居民区
6	田家庵区田家庵电厂	32°39'56.31"E, 117°01'08.04"N	电厂	居民区
7	田家庵区孙庙乡范咀村	32°26'56.92"E, 116°54'51.97"N	自然村	居民区
8	田家庵区孙庙乡	32°24'24.41"E, 116°54'52.54"N	自然村	居民区
9	潘集区贺疃乡	32°52'44.36"E, 116°44'18.38"N	自然村	居民区
10	田家庵区孙庙乡	32°26'20.05"E, 116°57'19.38"N	自然村	居民区
11	潘集区潘二矿	32°48'57.98"E, 116°53'49.35"N	煤矿	矿区
12	谢家集区望峰岗	32°36'46.59"E, 116°53'57.72"N	煤矿	矿区
13	潘集区潘三矿	32°51'45.86"E, 116°48'01.55"N	煤矿	矿区
14	潘集区潘一矿	32°47'29.76"E, 116°49'12.41"N	煤矿	矿区
15	凤台县关店乡	32°53'02.73"E, 116°37'51.19"N	煤矿	矿区
16	凤台县新集镇新集一矿	32°41'37.84"E, 116°32'09.98"N	煤矿	矿区
17	潘集区架河乡	32°45'50.00"E, 116°49'02.64"N	水泥厂	居民区
18	凤台县刘集乡	32°42'34.66"E, 116°40'04.18"N	水泥厂	居民区
19	国庆西路	32°65'01.00"E, 117°02'02.18"N	交通主干道	绿地
20	市委西路	32°62'09.66"E, 117°40'04.18"N	交通主干道	绿地

1.2 取样

样树特点: 供试树种二球悬铃木 *Platanus acerifolia* 常常被称为悬铃木,是英国树种(一球和三球杂交),现广泛分布于淮南市城乡之地. 悬铃木是一种落叶树种,有掌状浅裂的阔叶,生长期是 4~11 月. 幼叶有细小表皮毛,成叶时大部分表皮毛脱落,但是叶片上下表皮粗糙,细小表皮毛和粗糙叶片表皮可以吸附灰尘.

取样过程: 2012 年 7 月中旬对样区进行了调查,了解污染源类型和特征(表 1),确定每个样区的 5~10 个采样点,每个采样点选择高度和胸径相近的 10 株悬铃木,采样点与当地的污染源距离大于

1 材料与方法

1.1 样地分布和周边环境

本实验在淮南市选择 20 个代表性样区,根据采样点空气颗粒物主要来源不同,将 20 个样区分属于风景区、自然村、电厂、煤矿、水泥厂及交通主干道 6 种采样环境. 车辆排放尾气是风景区和交通主干道大气环境污染物的主要来源;煤矿、电厂类样区空气悬浮颗粒物来自煤炭的燃烧、运输和车辆运行产生的粉尘;居民日常生活需要的能源物质燃烧是自然村样区空气颗粒物的主要来源;水泥生产和车辆运输是水泥厂周边环境污染源. 具体样区、所属环境类型、地理位置和样区地表特征见表 1 和图 1.

0.5 km,城市取样距离交通主干道 200~300 m. 2012 年 8 月中旬,在晴朗天气状况下,采集每样株的冠层外东南西北 4 个方向当年生枝条上着生的健康叶片 4 枚,采集好的叶片放入自封袋,留待实验室处理.

1.3 样品处理

采好的样品先用清水冲洗叶片表面浮尘,1 mol·L⁻¹的盐酸浸泡 15 min,再用蒸馏水润洗 3~4 次,用干净纱布将样品上的水吸干,于 75℃ 干燥箱内烘干 24 h,干燥至恒重,之后在陶瓷研钵内研磨成碎末状,放入干燥器保存. 以上过程严禁使用金属器具,避免金属物质的介入,影响最终测定结果.

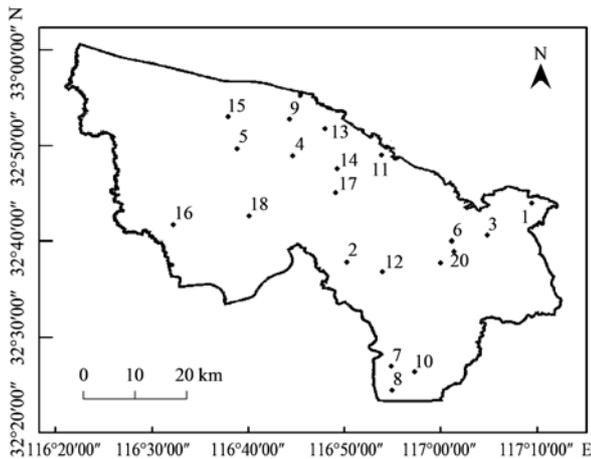


图1 样区分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling areas

1.4 叶片6种重金属和铝元素含量测定

叶片消解:在25 mL小烧杯中加入采样点悬铃木叶片的研磨粉0.5 g,10 mL混合酸(浓硝酸与高

氯酸体积比为4:1)浸泡过夜,次日于电热板上加热180℃至棕色气体基本冒尽,小烧杯溶液澄清透明,蒸至近干(少于0.5 mL),取下稍冷,加入0.5 mL稀硝酸(1/1 000),用去离子水将溶液和残渣定容至8 mL后一并转移至10 mL聚乙烯离心管中^[21],以上过程均带3个空白、3个标准样(GBW-11柑橘叶)。

叶片金属含量测定:利用美国PerkinElmer公司4300DV型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定消煮液中的待测元素。待测元素为铅(Pb)、镉(Cd)和铜(Cu)、锌(Zn)、铬(Cr)、镍(Ni)、铝(Al),样品回收率≥90.3%。

1.5 污染评价方法

以铝作为基质污染的标记物,富集因子 $EF = \text{叶片中}(C_x/C_{Al}) / \text{土壤中}(C_x/C_{Al})$ 。若EF的值低于1,元素则来自于土壤;如果值高于1,则叶片中富集的元素主要来自大气;如果值高于3,则空气污染较为严重^[22,23]。不同环境元素丰度如表2。

表2 不同环境Al和部分重金属背景丰度

Table 2 Background concentration of Al and some heavy metals in different environment

环境	Al	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Cr	文献
土壤/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	83 000	26.0	22.6	74.2	26.9	0.097	61	[24]
水泥灰尘/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	—	150~400	15~45	180~250	100~120	1.09~2.62	40~80	[25]
煤炭/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	—	32.22	42.05	58.48	—	2.42	50.66	[26]
汽车尾气颗粒/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	—	35	—	—	32.6	3.0	21.4	[27]

1.6 数据处理

采用SPSS 13.0统计分析软件对采样区悬铃木叶片内重金属含量进行方差分析和聚类分析;利用Origi 7.5和Excel对数据分析结果做图;采样点地理分布图由软件Arcgis 9.0绘制。

2 结果与分析

2.1 不同环境悬铃木叶片累积重金属含量分析

由图2可知,20个样区悬铃木叶片累积的6种重金属含量不同,平均值表现出 $Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd$ 的趋势,Zn和Cu含量高于Cr、Ni、Pb一个数量级,Cd低于Cr、Ni、Pb一个数量级;Cd、Cr、Cu和Ni的极差较大,Pb和Zn的极差较小,表明样区不同悬铃木叶片累积Cd、Cr、Cu和Ni的含量差异较Pb和Zn大。此外,环境不同,叶片累积同种重金属的量也存在差异,图3显示,在6种环境中,水泥厂周边悬铃木叶片累积Cd量最大,显著高于其他5种环境,煤矿环境中叶片累积Cd量又显著高于风景区、自然村、电厂和交通主干道,6种环境叶片Cd含量从大到小的顺序为:水泥厂>煤矿>电厂>

风景区>交通主干道>自然村;就Cr、Ni累积量而言,交通主干道环境下两种元素含量高于煤矿和水泥厂周边环境,自然村的Cr、Ni最小;煤矿、水泥厂和交通主干道、电厂悬铃木叶片累积Cu量显著高于自然村;Pb、Zn累积表现出相同的现象,含量由大至小为交通主干道>电厂>煤矿>水泥厂>风景区>自然村。

2.2 悬铃木叶片累积重金属的聚类分析

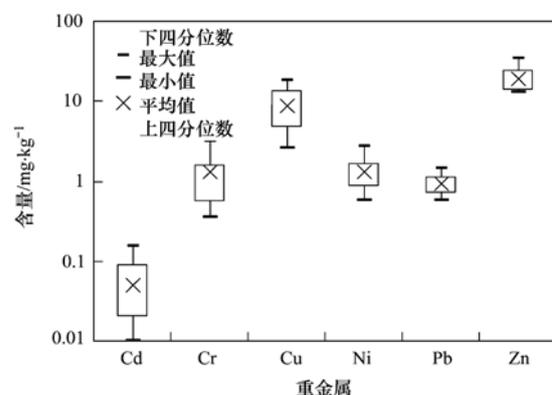
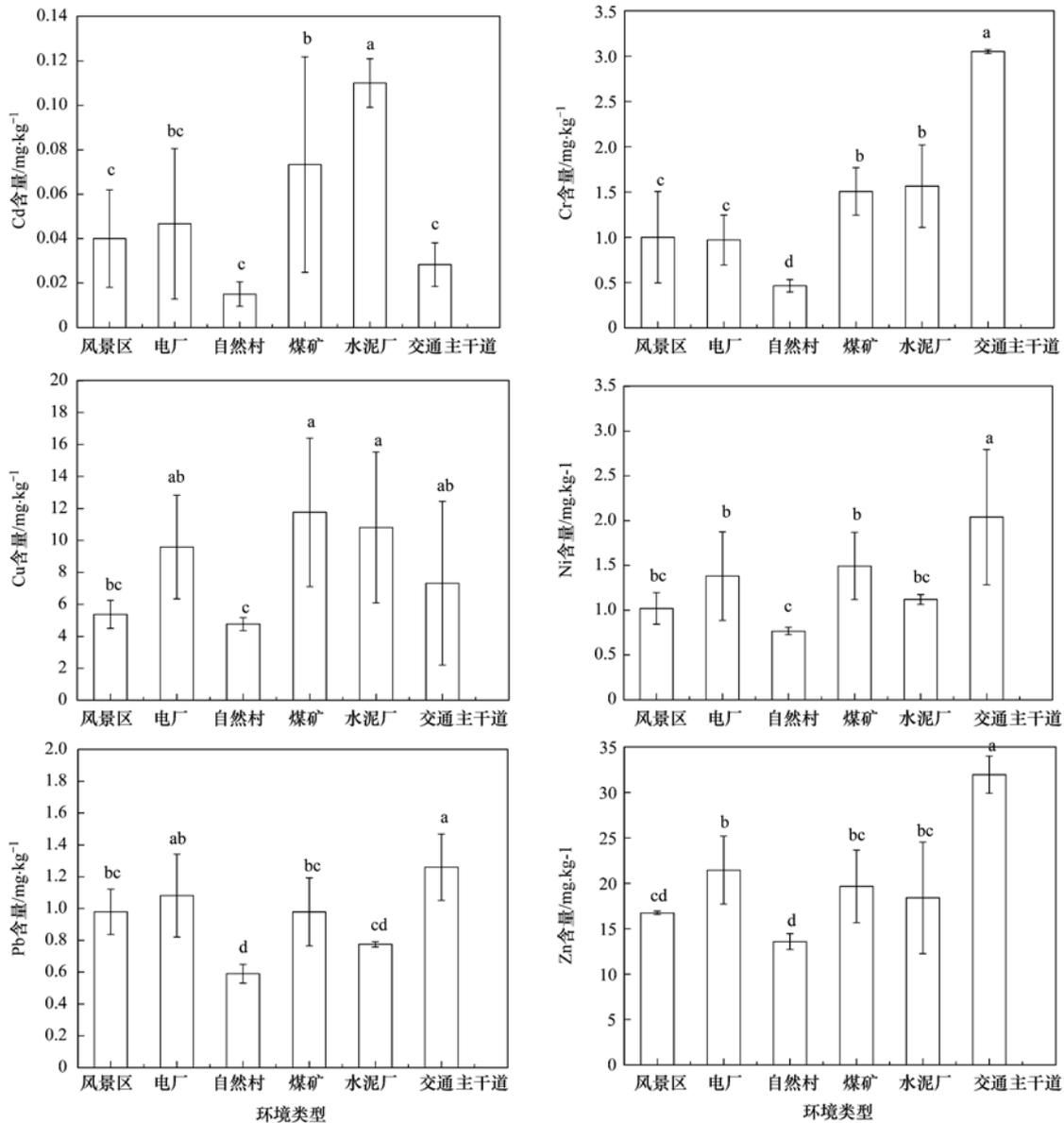


图2 20个样区悬铃木叶片累积重金属

Fig. 2 Accumulation of heavy metals by leaves of *Platanus acerifolia* in twenty sampling areas



小写字母表示在 0.05 水平上差异性

图 3 不同环境悬铃木叶片累积 6 种重金属的差异

Fig. 3 Difference in contents of six heavy metals accumulated in leaves of *Platanus acerifolia* in different environments

利用软件 SPSS 13.0,以悬铃木叶片累积的 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 这 6 种重金属元素含量测定结果为依据,对淮南市 20 个样区各重金属平均含量进行聚类分析,结果如图 4 所示,聚类结果将淮南市的 20 个样区按环境重金属污染程度分为 3 个组. I 组:高含量样区; II 组:较高含量样区, III 组:低含量样区. 对于 Cd 元素,高含量样区 (I 组) 主要包括风台县新集镇 ($0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),属于矿区环境; II 组悬铃木叶片 Cd 含量范围是 $0.09 \sim 0.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,包括风台县刘集乡煤矿、潘集区架河乡水泥厂、潘集区潘三矿、风台县关店乡煤矿、风台县丁集乡电厂;其余属于 III 组,含 Cd 范围是 $0.01 \sim$

$0.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 就 Cr 元素而言,含量最高样区 I 组是市委西路、国庆西路, Cr 的平均值分别是 $3.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于交通繁忙状况的环境; II 组样区有 11 个,含量范围是 $1.15 \sim 1.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,多分布在风台县和潘集区,包含所有的煤矿、水泥厂和部分电厂;其余则为含量低的样区,叶片 Cr 含量范围是 $0.35 \sim 0.99 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 对于 Cu 元素,高含量的样区只有一个:潘集区潘三矿,叶片含 Cu 量为 $18.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; II 组悬铃木叶片累积 Cu 含量范围是 $12.00 \sim 15.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,样区包括风台县的关店乡煤矿、刘集乡水泥厂和丁集煤矿及潘集区潘一矿和市委西路;低含量样区较多,占总采

样区的 70%, 含量范围是 $4.30 \sim 9.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 多分布在淮南市(除凤台县以外)其他 5 个区域. 对于 Ni 元素, I 组只包含交通主干道市委西路样区; II 组有 5 个样区, 分别是田家庵区田家庵电厂、潘集区潘一矿、潘集区潘三矿、凤台县丁集电厂和关店煤矿, 叶片 Ni 含量范围是 $1.54 \sim 1.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; III 组有 14 个样区, Ni 含量范围是 $0.75 \sim 1.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 悬铃木叶片 Pb 含量较高组范围是 $0.94 \sim 1.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 包括 5 个样区, 主要属于电厂、煤矿和交通主干道环境; 国庆西路($1.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、田家庵区电厂($1.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、谢家集区望峰岗选煤厂($1.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、田家庵洛河电厂($1.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)4 个样区包括在最高组; 其余 11 样区属于 III 组, Pb 含量范围是 $0.56 \sim 0.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 对于 Zn 元素, 样品含量最高的样区有国庆西路($33.82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、市委西路($30.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 较高含量的样区有 5 个, 分别是田家庵电厂、凤台县刘集水泥厂、丁集电厂、关店煤矿及潘集区潘二矿, 含量分别是 25.02、25.00、23.00、23.24 和 24

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 其余 13 个样区叶片对 Zn 的累积都包括在较低组, 平均值范围是 $12.80 \sim 19.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.3 不同大气环境重金属污染的 EF 分析

叶片累积重金属的 EF 值可反映大气环境重金属污染程度. 由表 3 可知, 重金属种类不同, 悬铃木叶片在不同大气环境中富集值 EF 有差异. 就 Cd 而言, 叶片累积量虽然在 6 种重金属中最少, 但是 EF 值相比之下较高, 6 种环境叶片富集 Cd 的 EF 值全部大于 3, 污染状况表现为水泥厂 > 煤矿 > 电厂 > 风景区 > 交通主干道 > 自然村; Cr 是土壤中除 Zn 外含量较高的重金属, 然而 EF 值大于 3 的只有交通主干道、水泥厂和煤矿, 分别为 5.58、5.07 和 3.95, 风景区、自然村 EF 值均小于 1, 电厂 EF 值大于 1 而小于 3, 表明悬铃木叶片中累积的 Cr 也是主要来自大气环境; Cu、Ni、Pb 和 Zn 这 4 种重金属在 6 种大气环境中悬铃木叶片的 EF 值全部大于 1, 污染等级各是交通水泥厂 > 煤矿 > 交通主干道 > 电厂 > 自然村 > 风景区; 煤矿 > 交通主干道 > 水泥厂 > 电厂 > 风景区 > 自然村; 煤矿 > 水泥厂 > 交通主

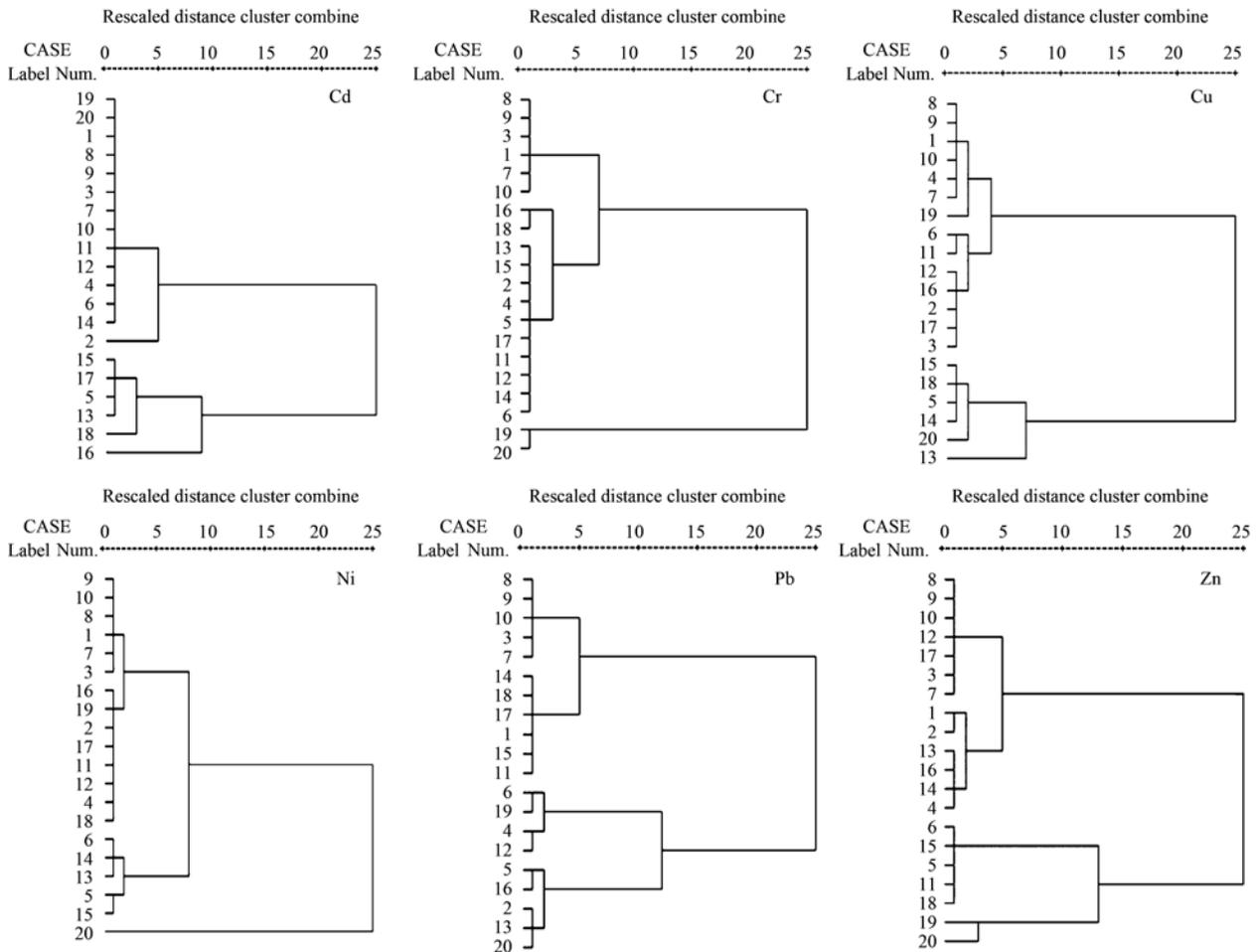


图 4 不同采样区悬铃木叶片累积重金属的聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of different areas based on concentrations of heavy metals accumulated in *Platanus acerifolia* leaves

干道 > 电厂 > 风景区 > 自然村; 水泥厂 > 交通主干道 > 煤矿 > 电厂 > 自然村 > 风景区。

此外,同一环境中悬铃木叶片富集不同重金属的 EF 值也有差异,本研究所选择的 6 种取样环境除交通主干道外悬铃木叶片对 6 种重金属的富集都表现出了 Cd > Cu > Zn > Ni > Pb > Cr 趋势,Cd、Cu 和 Zn 的 EF 值全部超越 10,水泥厂和煤矿周边环境 Cd、Cu 和 Zn 的 EF 值较大,分别为 223.17、93.85、

48.91 和 112.00、82.90、42.80,表明水泥和煤炭粉尘能导致大气环境 Cd、Cu 和 Zn 严重污染。Cr、Ni、Pb 的 EF 值虽然偏低,但是除了风景区和自然村 Cr 的 EF 值小于 1 外,其他环境的这 3 种重金属的 EF 值都大于 1,其中交通主干道、煤矿和水泥厂周边 3 种大气环境 Cr、Ni、Pb 的 EF 值全部大于 3,进一步表明交通运输、煤炭燃烧及水泥生产也能致使大气环境 Cr、Ni、Pb 污染。

表 3 不同类型大气环境悬铃木叶片富集重金属的 EF 值

Table 3 EF values of enriched heavy metals by *Platanus acerifolia* leaves indifferent atmospheric environments

类型	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
风景区	22.90 ± 11.20	0.96 ± 0.45	13.83 ± 2.32	2.20 ± 0.40	2.19 ± 0.33	13.06 ± 0.38
电厂	41.60 ± 27.75	1.47 ± 0.54	36.20 ± 15.43	4.34 ± 1.68	3.82 ± 1.04	25.64 ± 5.17
自然村	13.41 ± 3.09	0.55 ± 0.05	15.56 ± 2.17	2.18 ± 0.28	1.76 ± 0.19	14.15 ± 1.85
煤矿	112.00 ± 57.51	3.95 ± 0.42	82.90 ± 26.55	8.84 ± 1.57	6.30 ± 2.40	42.80 ± 9.11
水泥厂	223.17 ± 10.33	5.07 ± 1.05	93.80 ± 32.40	8.37 ± 0.87	5.99 ± 0.48	48.90 ± 12.10
交通主干道	21.38 ± 3.59	5.58 ± 0.22	36.90 ± 24.30	8.56 ± 3.14	5.39 ± 0.63	47.95 ± 1.19
平均	82.38 ± 82.20	2.93 ± 2.21	46.56 ± 34.00	5.75 ± 3.22	4.24 ± 1.90	32.09 ± 16.63

3 讨论

树木作为有效监测来自于大气的低浓度污染物的监测器官已被大量运用^[28-30],其体内重金属含量水平可反映监测区的大气环境状况^[8,14,31]。本研究利用悬铃木叶片累积 Cd 等 6 种重金属含量及 EF 值评价研究样区的大气环境污染。由研究结果可知,6 种采样环境中悬铃木叶片累积 6 种重金属的含量都表现出 Zn > Cu > Ni > Pb > Cr > Cd 的现象,这可能与元素对植物具有不同的作用有关,Zn、Cu 和 Ni 这 3 种元素虽然是重金属,但是它们参与植物体的代谢活动,能活化植物体内的某些酶,是植物需要的微量元素,而 Pb、Cr 和 Cd 这 3 种重金属是影响植物生长的毒性元素,所以,悬铃木在正常生长过程中叶片累积了相对较多的 Zn、Cu 和 Ni。不仅 6 种重金属在不同大气环境悬铃木叶片中累积量不同,同种重金属在不同采样区的空间分布也有差异:就 Cd 而言,较多的悬铃木叶片累积量存在于水泥厂和煤矿周边环境,这可能与水泥粉尘^[25]和煤灰^[26]逸出较多的 Cd 量有关;作为对照的风景区,虽然环境相比市区和电厂较好,但是 Cd 的累积高于二者,因为取样的风景区都是森林公园,采石对森林公园的破坏可能导致大气颗粒中 Cd 浓度的增加。Cr、Ni、Zn、Pb 的累积结果显示,交通主干道有非常高的累积值,随后是煤矿,这可能归功于车辆运行排放的尾气^[27]和煤炭的运输、燃烧。煤矿是 6 种大气环境中 Cu 累积最多的,其次是水泥厂,两种大

气环境的高 Cu 值可能源于运用重型车辆对煤炭、水泥的运输^[26]。6 种重金属累积值在自然村都处于最低,进一步表明重工业生产和繁忙的车辆运行都能导致大气悬浮颗粒中重金属浓度的增加。将该研究环境被测重金属累积值与前人研究结果比较可推测利用叶片监测大气环境污染的可行性,淮南市 20 个样区悬铃木叶片累积 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 的平均值范围分别是 0.01 ~ 0.15、0.35 ~ 3.07、2.65 ~ 18.50、0.56 ~ 1.45、12.80 ~ 33.82、0.56 ~ 2.73 mg·kg⁻¹,而 Sawidis 等^[17]2011 年研究了欧洲 3 个地区悬铃木叶片累积 Cr、Cu 和 Pb 的平均值分别是 0.23 ~ 0.62、2.57 ~ 25.20 和 2.41 ~ 13.75 mg·kg⁻¹。与前人研究相比,淮南市悬铃木叶累积的 Cu 与前人研究最接近,Pb 和 Cr 的含量范围略高,但是与橡树叶^[4]和橄榄叶^[11]比较,Cr 和 Pb 的累积数值几乎都处于一个数量级。对于 Zn、Ni 元素,本研究浓度范围(12.80 ~ 33.82 mg·kg⁻¹、0.56 ~ 2.73 mg·kg⁻¹)略低于先前研究 42 ~ 56 mg·kg⁻¹、1.1 ~ 3.5 mg·kg⁻¹^[11],而与 Bargagli 等^[4]利用橡树作为研究材料的研究结果相似(表 4),说明淮南市空气中 6 种重金属污染程度与国外一些城市有不同之处但是数据变化范围基本一致。

EF 值是反映大气环境是否污染的指标之一,20 个样区不同元素的 EF 值不同,除风景区、自然村 Cr 外,其他环境中被测重金属 EF 平均值全部超过 1,表明淮南市不同环境悬铃木叶片累积的重金属主要来自大气;由 6 种大气环境悬铃木叶片富集重金

属的 EF 值可知,煤矿、电厂、水泥厂和交通主干道环境中,悬铃木叶片富集重金属的 EF 值远远大于 3,进一步表明淮南市重工业生产和繁忙的交通运行造成了环境严重的重金属污染,其原因是煤炭开采运输燃烧时形成的矿物灰尘是 Cr、Cu、Pb、Zn 元素

的主要源^[32,33],化石燃料的燃烧和汽车排放尾气易产生细颗粒,吸附较多的 Cd、Ni、Pb 元素^[34,35]. 淮南市风景区和自然村 6 种重金属的 EF 值相对较低,但是风景区的 Cd、Cr EF 值接近自然村的 2 倍,这与风景区周边环境存在不合理的开采有关.

表 4 不同地区树木叶片累积重金属含量比较/mg·kg⁻¹

Table 4 Content range of heavy metals in *Platanus acerifolia* in different areas/mg·kg⁻¹

监测材料	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	文献
橄榄	0.04~0.05	—	3.5~4.8	1.1~3.5	0.09~4.90	42~56	[11]
悬铃木	—	0.23~0.62	2.57~25.20	—	2.41~13.75	—	[17]
橡树	0.04~0.07	0.91~1.53	5.15~6.41	3.09~8.21	0.37~0.61	15.0~22.7	[4]
悬铃木	0.01~0.07	0.35~2.46	3.01~18.50	0.08~1.95	0.07~1.87	11.63~29.00	本研究

4 结论

机动车辆排放的尾气、重工业生产及其他的人为源等是淮南市主要的空气污染源,煤矿、水泥厂、交通主干道和电厂这 4 种大气环境中悬铃木叶片累积的 Cd 等 6 种重金属绝大部分高于风景区和自然村,煤矿、水泥生产的粉尘和汽车尾气逸出的 Cd 等 6 种重金属在叶片中的 EF 值显著高于 3,说明悬铃木叶片累积的重金属主要来自大气粉尘颗粒,悬铃木叶片不仅是一种比较有效的重金属累积器官,同时由于广布性和能被系统地采样与分析,它也是一种较好的城市污染监测器官. 当然,沉积在悬铃木叶片上不同粒径磁性颗粒的分布及其含有的重金属与叶片累积重金属的相关性应做进一步的研究.

参考文献:

- [1] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 7-15.
- [2] 栗志峰, 刘艳, 彭倩芳. 不同绿地类型在城市中的滞尘作用研究[J]. 干旱环境监测, 2002, 16(3): 162-163.
- [3] 王亚超. 城市植物叶面尘理化特性及源解析研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007. 3-7.
- [4] Bargagli R, Monaci F, Agnorelli C. Oak leaves as accumulators of airborne elements in an area with geochemical and geothermal anomalies[J]. Environmental Pollution, 2003, 124(2): 321-329.
- [5] Al-Alawi M M, Mandiwana K L. The use of Aleppo pine needles as a bio-monitor of heavy metals in the atmosphere[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 148(1-2): 43-46.
- [6] Fernández J A, Rey A, Carballeira A. An extended study of heavy metal deposition in Galicia (NW Spain) based on moss analysis[J]. Science of the Total Environment, 2000, 254(1): 31-44.
- [7] 王建龙, 文湘华. 现代环境生物技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 315-317.
- [8] Onder S, Dursun S. Air borne heavy metal pollution of *Cedrus libani* (A. Rich.) in the city centre of Konya (Turkey) [J].

- Atmospheric Environment, 2006, 40(6): 1122-1133.
- [9] Reimann C, Arnoldussen A, Boyd R, et al. Element contents in leaves of four plant species (birch, mountain ash, fern and spruce) along anthropogenic and geogenic concentration gradients [J]. Science of the Total Environment, 2007, 377(2-3): 416-433.
- [10] Sardans J, Peñuelas J. Trace element accumulation in the moss *Hypnum cupressiforme* Hedw. and trees *Quercus ilex* L. and *Pinus halepensis* Mill in Catalonia [J]. Chemosphere, 2005, 60(9): 1293-1307.
- [11] Madejón P, Maraón T, Murillo J M. Biomonitoring of trace elements in the leaves and fruits of wild olive and holm oak trees [J]. Science of the Total Environment, 2006, 355(1-3): 187-203.
- [12] Gratani L, Crescente M F, Varone L. Long-term monitoring of metal pollution by urban trees [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(35): 8273-8277.
- [13] De Nicola F, Maisto G, Prati M V, et al. Leaf accumulation of trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in *Quercus ilex* L [J]. Environmental Pollution, 2008, 153(2): 376-383.
- [14] Lorenzini G, Grassi C, Nali C, et al. Leaves of *Pittosporum tobira* as indicators of airborne trace element and PM₁₀ distribution in central Italy [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(22): 4025-4036.
- [15] Oliva S R, Espinosa A J F. Monitoring of heavy metals in topsoils, atmospheric particles and plant leaves to identify possible contamination sources [J]. Microchemical Journal, 2007, 86(1): 131-139.
- [16] McIntosh G, Gómez-Paccard M, Osete M L. The magnetic properties of particles deposited on *Platanus x hispanica* leaves in Madrid, Spain, and their temporal and spatial variations [J]. Science of the Total Environment, 2007, 382(1): 135-146.
- [17] Sawidis T, Breuste J, Mitrovic M, et al. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(12): 3560-3570.
- [18] Cao T, An L, Wang M, et al. Spatial and temporal changes of heavy metal concentrations in mosses and its indication to the

- environments in the past 40 years in the city of Shanghai, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (21): 5390-5402.
- [19] 王爱霞, 张敏, 方炎明, 等. 行道树对重金属污染的响应及其功能型分组[J]. *北京林业大学学报*, 2010, **32**(2): 187-193.
- [20] 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 等. 7种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征[J]. *环境科学*, 2013, **34** (6): 2361-2367.
- [21] Wang C R, Wang X R, Tian Y A, *et al.* Oxidative stress, defense response, and early biomarkers for lead-contaminated soil in vicia faba seedlings [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **27**(4): 970-977.
- [22] Dongarra G, Varrica D. The presence of heavy metals in air particulate at Vulcano Island (Italy) [J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **212**(1): 1-9.
- [23] Markert B. Sample preparation (cleaning, drying, homogenization) for trace element analysis in plant matrices[J]. *Science of the Total Environment*, 1995, **176**(1-3): 45-61.
- [24] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. *中国环境监测*, 1991, **7**(1): 1-6.
- [25] 陈懿懿. 煅烧水泥熟料过程中 Hg、Pb、Cd 的逸放及其污染防治的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005. 28-31.
- [26] 白建峰, 崔龙鹏, 黄文辉, 等. 煤矸石释放重金属环境效应研究——淮南煤矿塌陷区水体试验场实例调查[J]. *煤田地质与勘探*, 2004, **32**(4): 7-10.
- [27] 顾继光, 周启星, 王新. 土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, **11**(2): 143-151.
- [28] Aksoy A, Sahin U, Duman F. *Robinia pseudo-acacia* L. as a possible biomonitor of heavy metal pollution in Kayseri [J]. *Turkish Journal of Botany*, 2000, **24**(5): 279-284.
- [29] Berlizov A N, Blum O B, Filby R H, *et al.* Testing applicability of black poplar (*Populus nigra* L.) bark to heavy metal air pollution monitoring in urban and industrial regions[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **372**(2-3): 693-706.
- [30] Lau O W, Luk S F. Leaves of *Bauhinia blakeana* as indicators of atmospheric pollution in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(18): 3113-3120.
- [31] Baycu G, Tolunay D, Özden H, *et al.* Ecophysiological and seasonal variations in Cd, Pb, Zn, and Ni concentrations in the leaves of urban deciduous trees in Istanbul [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **143**(3): 545-554.
- [32] Sternbeck J, Sjödin Å, Andréason K. Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension—results from two tunnel studies[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(30): 4735-4744.
- [33] Rampazzo G, Masiol M, Visin F, *et al.* Gaseous and PM₁₀-bound pollutants monitored in three site with differing environmental conditions in the Venice area (Italy) [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008, **195**(1-4): 161-176.
- [34] Moreno T, Alastuey A, Querol X, *et al.* The identification of metallic elements in airborne particulate matter derived from fossil fuels at Puertollano, Spain [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, **71**(2-3): 122-128.
- [35] Harrison R M, Smith D J T, Pio C A, *et al.* Comparative receptor modelling study of airborne particulate pollutants in Birmingham (United Kingdom), Coimbra (Portugal) and Lahore (Pakistan). *Atmos* [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31** (30): 3309-3321.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron: Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangnu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Xiong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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