

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析	方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)
基于在线观测的天津市 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)
2017~2018年北京大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)
北京南部城区 PM _{2.5} 中碳质组分特征	董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)
成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)
南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源	谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)
2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估	朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)
保定市大气污染变化趋势及特征	苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)
郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势	卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)
郑州市少数民族运动会期间 O ₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估	赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)
我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征	柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)
典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响	张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)
不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及减排分析	张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)
天津市 2017 年移动源高分辨率排放清单	刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)
四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征	徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)
抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选	李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)
宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征	张军, 梁青芳, 高煜 (4504)
潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估	秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)
泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析	韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)
长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素	江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)
沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征	王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)
基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估	冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)
降水空间异质性和非点源关键源区识别面积变化的影响	高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)
硅藻群落指示的近 50 年来大理西湖湖泊生态系统演变规律	张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)
海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征	王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)
内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算	王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)
透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响	姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)
铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能	梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)
纳米 Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制	石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)
紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制	余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬焜, 杜尔登, 郑璐 (4626)
污水生物处理工艺低温下微生物种群结构	尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)
不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析	陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文烨 (4644)
全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析	齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)
不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性	袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)
潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应	吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)
不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征	孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)
酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响	张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)
稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响	陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)
解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发	杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)
外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响	霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾斌, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)
水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期	邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)
铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价	周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)
浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势	魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)
重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析	王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)
重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价	彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)
《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)	

宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征

张军^{1,2}, 梁青芳¹, 高煜¹

(1. 宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013; 2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710064)

摘要: 绿化植物作为城市灰尘重金属污染物的重要载体, 在反映污染指标和生物富集方面有巨大潜力, 对改善城市人居环境质量和城市园林规划具有重要意义. 为定量描述宝鸡市城区 10 种优势绿植叶片重金属污染程度、空间分布及对灰尘的富集特征, 采集并测定了宝鸡市区 0、1 和 3 m 高度上、156 个叶片样品中 Pb、Zn、Cu、Cr、Ni、Co、Cd 和 As 这 8 种元素的含量, 并计算其生物富集系数 (BCF)、污染负荷指数 (PLI) 与潜在生态风险指数 (RI). 结果表明, 宝鸡城区绿植叶片中富集最多的元素是 Cr、As、Ni、Pb 和 Cd. 沿阶草中 Cr、Ni 和 As 含量最高, 女贞叶片中的 Cd、塔松叶片中的 Pb、Ni 和 As 含量较高. BCF 结果显示, 三叶草、女贞和石楠对 Cd 有显著富集能力. 在空间分布上, Cr、As、Ni、Pb、Cd 和 Zn 元素含量均随高度增加而递减, 其中 Cr 元素递减率达 24%, 千河工业园、任家湾火车站及市政府周围为含量峰值区, PLI 在任家湾火车站、千河工业区出现中度污染, RI 值在这两区域为中度生态风险等级, 同时在新高大道沿线达到较强生态风险等级. 在绿植叶片中, Cr 和 As 的 PLI 值都 > 3, 均达到重度污染水平. E_r^i 的平均值大小顺序为: As > Cd > Cr > Ni > Pb > Co > Zn > Cu, Cd 和 As 是最具生态危害的元素. 8 种重金属的综合潜在生态风险指数 RI 范围为 10.58 ~ 2 982.72, 样点中有 18.59% 的 RI 值高于 150, 表明研究区总体上处于中等风险等级. 本研究结果对工业城市重金属污染治理及绿植遴选具有一定的理论和实践参考价值.

关键词: 绿植叶片; 重金属; 空间分布; 富集特征; 宝鸡市

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4504-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202001126

Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City

ZHANG Jun^{1,2}, LIANG Qing-fang¹, GAO Yu¹

(1. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: As an important carrier of heavy metal pollutants in urban dust, green plants play an important role in the study of heavy metal pollution in the environment. To quantitatively assess the pollution degree, spatial distribution, and characteristics of dust accumulation of heavy metals in the leaves of 10 dominant green plants in Baoji City, the contents of Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Co, Cd, and As were determined in 156 leaf samples with a ground height of 0, 1, and 3 m in Baoji City, and the biological enrichment coefficient (BCF), pollution load index (PLI), and potential ecological risk index (RI) were calculated. The enrichment amounts of Cr, As, Ni, Pb, and Cd were the highest in the leaves of the green plants in Baoji City. The contents of Cr, Ni, and As in *Ophiopogon japonicus* were the highest; the highest content of Cd was found in privet leaves, and the contents of Pb, Ni, and As in the leaves of tarasone were the highest. Clover, privet, and photinia revealed significant enrichment of Cd. The contents of Cr, As, Ni, Pb, Cd, and Zn decreased with an increase in the height of spatial distribution. Moreover, the rate of decrease in Cr was up to 24%, and the peak areas were around the Qianhe industrial zone, Renjiawan railway station, and the municipal government. According to PLI and RI values, the Renjiawan railway station and Qianhe industrial zone were moderately polluted areas with moderate ecological risk level, whereas the high-tech avenue area represented a strong ecological risk level. In addition, the PLI values of both Cr and As in the leaves of the green plants were greater than 3, indicating a level of severe pollution. Based on the average E_r^i values, Cd and As were the most ecologically harmful elements. The study area was at a medium risk level.

Key words: green plant leaf; heavy metals; spatial distribution; enrichment characteristics; Baoji City

城市灰尘是多种污染物的运载体和反应床^[1-3], 其负载的重金属已经成为最主要人体健康威胁^[4], 人类活动也影响着灰尘中重金属元素的浓度及其有效性和循环性^[5,6]. 对灰尘重金属的研究一直受到仪器监测方法与时间、空间上广泛取样的高成本限制^[7]. 城市绿化植被因其分布广泛和易获取的特点, 逐渐成为城市生态调查和环境监测的重要手段^[8]. 有研究表明, 苔藓和地衣是监测灰尘

重金属最适宜的生物标志物, 然而, 在城市和工业环境中经常缺少地衣和苔藓, 高等植物因此而获

收稿日期: 2020-01-14; 修订日期: 2020-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771215); 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室开放基金项目(300102290504); 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室项目(20JS012); 宝鸡文理学院研究生创新创业项目(YJSCX19YB05); 陕西省地理学重点学科项目

作者简介: 张军(1974~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为区域重金属污染控制及风险评价, E-mail: zhangjun1190@126.com

得了特殊的重要性^[9,10]. 作为城市之肺,绿化植被不仅能够滞留灰尘^[11,12],还可以吸收和富集其中的重金属元素,在体内通过氧化-还原反应转变成无毒物质^[13,14],起到净化空气、改善城市环境质量的重要作用. 前人成果指出,植物叶片中重金属的积累与灰尘中元素的浓度成正比,可利用叶片监测其污染状况,分析污染程度^[15],同时,根据叶片对元素的累积量,可以筛选出富集能力强的植物种. 对木本植物研究表明树叶是大气污染物很好的容器,气象条件、不同物种冠形、枝叶密度和叶片形态等是滞尘能力的制约因子^[16,17]. 对草本植物的研究发现:草本植物对叶子中的部分重金属具有超富集作用,但其富集重金属种类单一、生物量小且对环境要求较高^[18,19]. 也有学者提出低矮植被反而对城市街道机动车排放和地面扬尘的抑制作用更明显^[20]. 因此,在前人已有的基础上探究城市区域内不同植物种类对灰尘重金属的捕捉和富集能力,对准确评估城市环境质量和保障人体健康具有重要意义.

不同绿化植物种类对重金属的富集能力还受到粒子浓度和高度的影响^[21]. 工业城市中繁忙的交通运输及生产活动往往将地面灰尘扬起,悬浮于大气层结中,而地表以上至 3 m 高度的范围是人类最主要的活动空间^[22],有研究指出,在灰尘对人体暴露的 3 种方式(手-口接触摄入、呼吸系统吸入和皮肤接触)中,呼吸吸入是人体致癌暴露的唯一途径^[23,24]. 因此,基于不同高度研究城市灰尘重金属含量尤为必要. 然而,关于植物叶片对重金属污染响应的研究主要集中在上海、墨西哥等较大城市,侧重于对某种植物进行环境污染分析,缺乏城市区域内不同植物叶片本身对重金属累积量的富集能力、空间变化以及生态风险的综合性研究.

本研究通过测定 0、1 和 3 m 高度上、10 种城

市优势绿植叶片中的重金属含量,计算其生物富集系数(BCF),利用 Tomlinson 污染负荷指数法和 Hakanson 潜在生态风险法评估其污染水平和生态风险,结合空间分布探讨不同种类绿植叶片的富集能力,分析城市道路及工矿企业周边重金属污染状况,以期在城市灰尘重金属污染控制和城市园林植物合理布局提供理论和实践依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宝鸡(106°18'~108°03'E, 33°35'~35°06'N), 国家关中城市群核心城市,位于关中平原西部,温带大陆性湿润气候,市区海拔在 536~901 m 之间,渭河穿城而过,南接秦岭,北依黄土高原,铅锌矿藏丰富,有色金属冶炼产业发达,陇海线、宝成线和西宝高速交汇于此,是中国西部重要交通枢纽.

1.2 样品采集与分析

利用 ArcGIS 布设采样点,采样密度为 2 km×2 km 网格,共设置 52 个采样点(图 1),2019 年 4~5 月对宝鸡市区绿化植物进行调查和采样. 选取研究区不同高度上的优势绿植,0 m:沿阶草(*Ophiopogon japonicus*, Oph)和三叶草(*Clover*, Clo); 1 m:大叶女贞(*Ligustrum lucidum*, Lig)、红叶石楠(*Photinia fraseri*, Pho)、冬青(*Holly*, Hol)和龙柏(*Sabina chinensis*, Sab); 3 m:塔松(*Cedrus deodara*, Ced)、悬铃木(*Sycamore*, Syc)、樱花(*Cherry*, Che)和红叶李(*Prunus cerasifera*, Pru),总计 3 个高度共采集 156 个样品. 为减少误差,在采样点树冠各方向采集 10~15 片长势良好的叶片并迅速装入信封. 同时采集对应样点的地表灰尘样品,作为计算叶片累积能力的参照数据^[25].

用自来水充分冲洗叶片,去除表面灰尘、泥垢,再用去离子水冲洗 3 次,晾干,在鼓风干燥箱中烘干

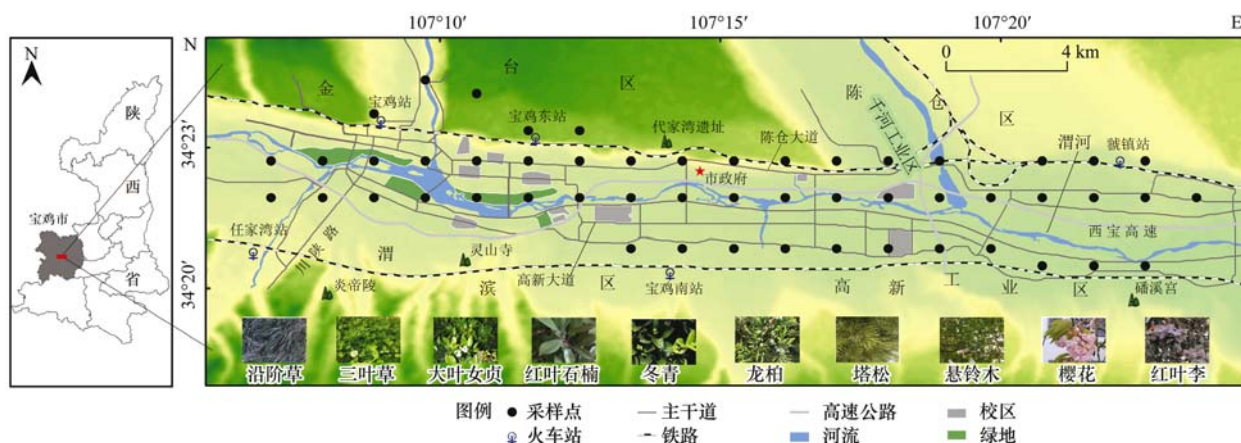


图1 研究区采样点示意

Fig. 1 Location of study area and distribution of sample sites

24 h (80 ± 1) °C, 研磨至统一大小, 过 100 目筛, 装入塑料袋, 在实验开始前保持测试条件稳定^[26,27]. 准确称取 0.100 0 g 样品, 置于消解罐中, 加入 6 mL HNO₃, 静置 30 min, 去除有机质, 加入 2 mL HCl、2 mL H₂O₂, 拧紧密封盖, 用全自动消解仪消解、电热板赶酸. 用超纯水定容于 50 mL 比色管中, 并过 0.45 μm 滤膜待测. 地表灰尘样品加入 HNO₃-HF-HClO₄ (3:1:1) 进行^[25] 消解, 赶酸、定容. 消解后的植物、灰尘样品采用 ICP-MS (NexION350X, PE, US) 进行重金属含量测定.

1.3 质量控制

实验过程中加入国家标准物质 GSF-4 进行质量控制, 每组样品 (52 个) 设 1 个空白样、2 个标准样^[27]. 元素回收率控制在 90%~105% 之间. 每个样品重复 3 次, 各元素的相对标准偏差 RSD 小于 10%. 本实验所用药剂均为优级纯, 水为超纯水.

1.4 污染评价方法

采用国内外广泛使用的潜在生态风险指数法 (ecological risk index, RI)^[28] 进行生态风险评价分级, 采用 Tomlinson 等提出的污染负荷指数 (pollution load index, PLI)^[29] 评价重金属污染水平, 计算公式如下:

$$RI = \sum E_r^i = T_r^i \times (C_i/C_n^i) \tag{1}$$

$$PLI = \sqrt[n]{\prod_i C_i/C_n^i} \tag{2}$$

式中, E_r^i 和 RI 分别代表单因子和综合潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属的毒性系数 (各元素毒性系数为 Pb = Cu = Ni = Co = 5, Zn = 1, Cr = 2, Cd = 30, As = 10)^[30], C_i 和 C_n^i 分别表示重金属 i 的实测值和校园清洁区植被叶片的实测值; PLI 为污染负荷指数. 分级列表见表 1.

表 1 分级标准

Table 1 Classification of indexes

单因子潜在生态 风险指数 (E_r^i)	风险等级	综合潜在生态 风险指数 (RI)	风险等级	污染负荷指数 PLI	污染等级
$E_r^i < 40$	I 轻度	$RI < 150$	I 轻微	$PLI < 1$	I 无污染
$40 \leq E_r^i < 80$	II 中度	$150 \leq RI < 300$	II 中等	$1 \leq PLI < 2$	II 轻度
$80 \leq E_r^i < 160$	III 较强	$300 \leq RI < 600$	III 较强	$2 \leq PLI < 3$	III 中度
$160 \leq E_r^i < 320$	IV 很强	$RI \geq 600$	IV 很强	$PLI \geq 3$	IV 重度
$E_r^i \geq 320$	V 极强				

1.5 生物富集系数

生物富集系数 (bio-concentration factor, BCF)^[31] 可定量表示生物体内重金属的污染程度, 计算方法如下:

$$BCF = C_i/C_{ref} \tag{3}$$

式中, C_i 和 C_{ref} 分别表示重金属 i 的实测值和灰尘参照值. BCF 分级标准为: $BCF \leq 2$, 无富集或轻微富集; $2 < BCF \leq 5$, 中度富集; $5 < BCF \leq 20$, 显著富集; $20 < BCF \leq 40$, 强烈富集; $BCF > 40$, 极强富集^[31].

2 结果与分析

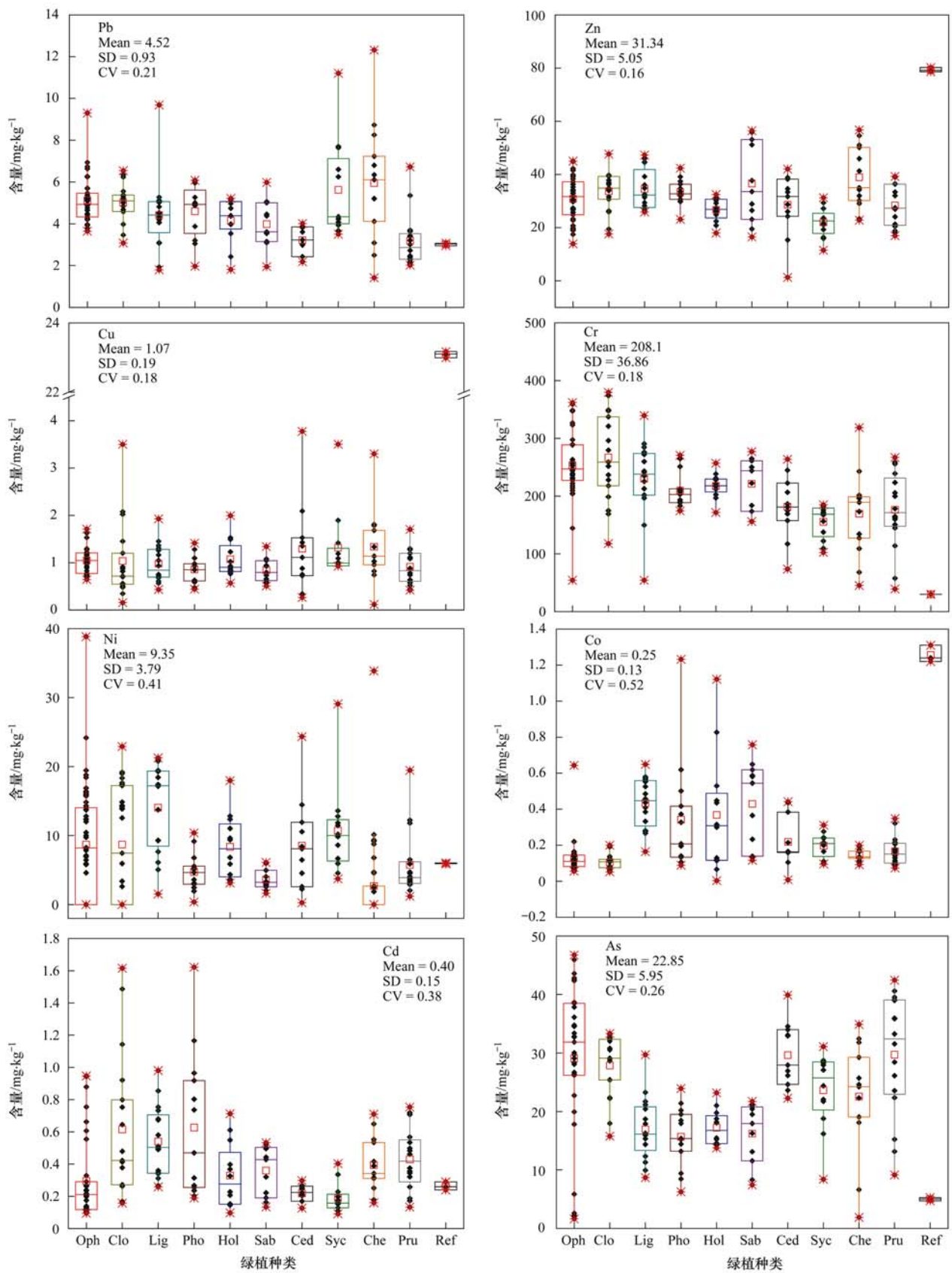
2.1 10 种植物叶片中重金属含量

宝鸡市区绿植叶片重金属含量均在国际植物重金属含量的范围之内^[32~34]. 但与宝鸡市校园清洁区植被叶子 (参考值)^[35] 相比, 重金属含量总体偏高. 其中 Cr、As、Ni、Pb 和 Cd 含量分别是参考值的 6.97、4.57、1.56、1.51 和 1.48 倍. 变异系数 (CV) 可以反映样品中元素含量的离散程度, 根据已有的研究成果, $CV \leq 20\%$ 为低变异度, $20\% < CV \leq 50\%$ 为中等变异度, $50\% < CV \leq 100\%$ 为高变异度^[36], 本研究中 Co 有最高的 CV, 为 0.52; 其他依次为

Ni (0.41)、Cd (0.38)、As (0.26) 和 Pb (0.21). 不同种类植被叶片重金属含量如图 2 所示. 沿阶草中 Cr、Ni 和 As 含量较高, 分别达到了 253.12、13.17 和 29.09 mg·kg⁻¹, 分别是参考值的 8.48、2.20 和 5.81 倍. 大叶女贞叶片中的 Ni 和 Cd 含量较高, 分别是参考值的 2.35 和 2.0 倍. 塔松叶片中的 Pb、Ni 和 As 含量分别达到了 5.62、10.6 和 23.61 mg·kg⁻¹, 都超过了参考值的 1.50 倍, 悬铃木、樱花、红叶李与塔松中的元素含量与此有相似的特征. 所有绿植叶片中, Cu、Zn 和 Co 的含量都很少.

2.2 0、1 和 3 m 高度上绿植叶片中重金属含量空间变化特征

考虑到植物种类的高度差异, 将植物叶片重金属含量空间分布划分为 0、1 和 3 m 这 3 个高度, 其空间变化特征如图 3 所示. 0 m 和 1 m 高度上的叶片重金属空间分布与地表粉尘重金属的空间分布具有部分相似特征^[25]. 除 Cu 和 Co 外, 其余元素含量均有随高度增加而递减的趋势. 将 0 m 与 3 m 高度上的均值作差, 除以 0 m 高度的均值, 得到元素含量分布的垂直递减率, Pb、Zn、As、Ni、Cd 和 Cr 的垂直递减率范围在 0.74%~24% 之间, Cr 元素递减率达到了 24%. Zn、Cr 和 As 在 0 m 和 3 m 高度上含量



Mean、SD 和 CV 分别表示算术平均值(方形点)、标准误差和变异系数; Ref 表示校园清洁叶片,下同

图2 10种植物叶片中重金属含量箱式图

Fig. 2 Box plots of the content of the heavy metals in leaves

普遍较高,高值区出现在千河工业园和市政府周围,并向南延伸。Zn、Cu、Ni 和 As 呈现出地表聚

集、高处离散的污染特征。Pb、Cu 和 Cr 空间分布变化较大,出现了明显峰值,分布在任家湾火车站

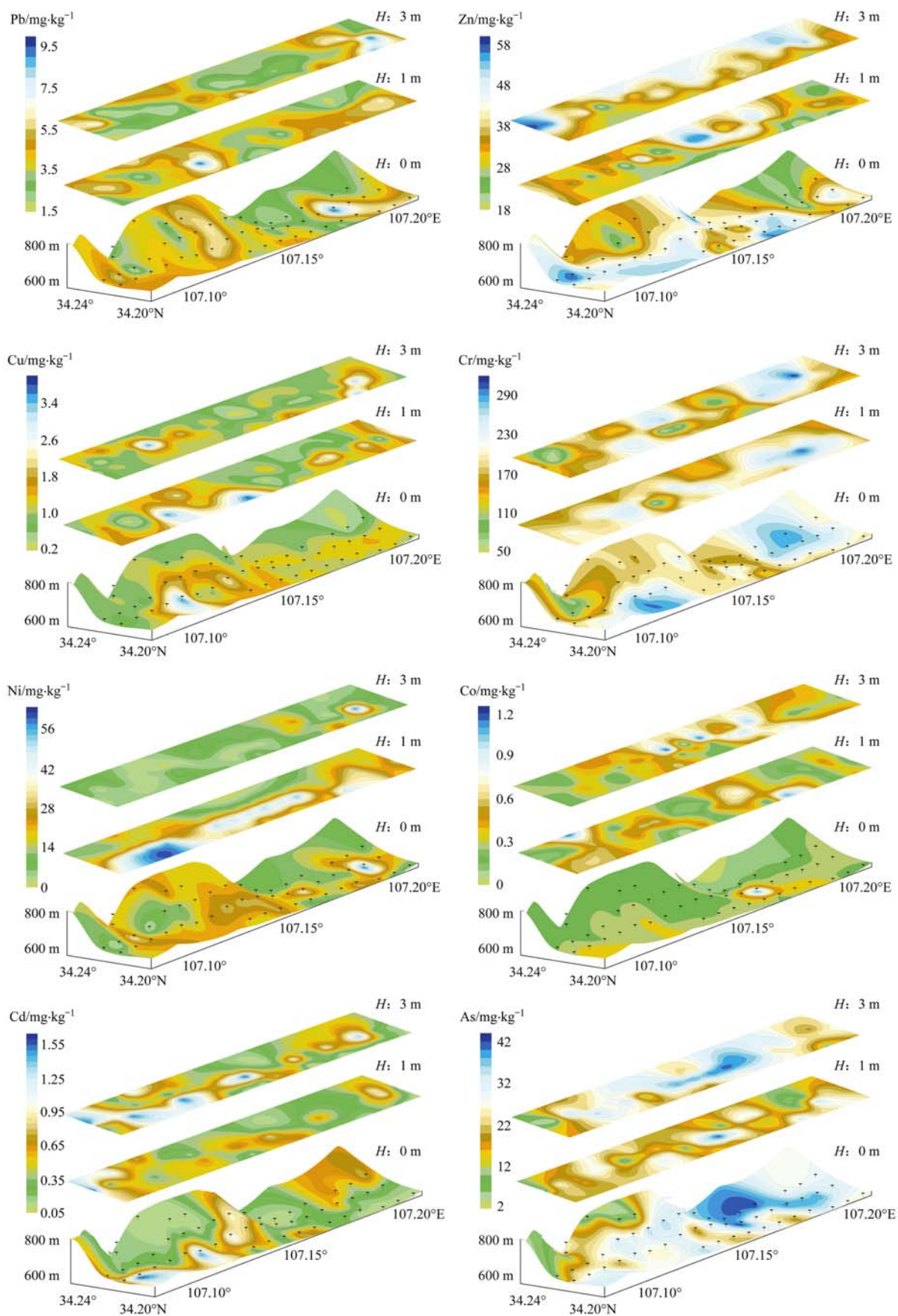


图 3 0、1 和 3 m 高度上绿植叶片中重金属含量的空间变化

Fig. 3 Spatial variation characteristics of heavy metals in leaves at height of 0, 1, and 3 m

和海浪燃煤锅炉产业园；研究区中部即金德管业产业园、宝鸡文理学院附近为低含量区。Ni 的空间

分布在 1 m 高度上呈条带状分布，从川陕路延伸至高新大道。

2.3 10 种植物叶片中重金属污染特征

不同种类绿植叶片重金属污染程度评价结果见表 2,在各种类叶片中,Cr 和 As 的 PLI 值都 >3,均达到重度污染水平,说明这两种元素是最主要的污染因子.Zn、Co 和 Cu 的 PLI 值最小,为无污染或轻微污染水平.其中,石楠、龙柏和红叶李的 PLI 排序为 Cr>As>Cd>Pb>Ni>Zn>Co>Cu,石楠叶片中 Cd 的 PLI 为 2.32,为中度污染.三叶草和女贞的

PLI 排序为 Cr>As>Ni>Cd>Pb>Zn>Co>Cu,其中三叶草叶片 Ni 和 Cd 元素的 PLI 分别为 2.31 和 2.28,达到中度污染水平,Pb 为轻度污染.女贞叶片中 Ni 的 PLI 值为 2.35,为中度污染水平,其余元素均为无污染或轻微污染水平.

2.4 10 种植物叶片中重金属生态风险分析

不同种类植被叶子重金属生态风险评价结果见表 3,沿阶草、樱花和塔松的 As 的 E_r^i 分别为 58.18、

表 2 10 种植物叶片中重金属污染负荷指数(PLI)

Table 2 Pollution load index(PLI) in leaves of ten species

绿植种类	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	Co	Cd	As
Oph	1.71	0.39	0.05	8.48	2.20	0.10	1.09	5.82
Clo	1.67	0.42	0.04	8.94	2.31	0.08	2.28	5.57
Lig	1.47	0.43	0.04	7.71	2.35	0.34	2.00	3.39
Pho	1.53	0.42	0.04	7.02	0.79	0.27	2.32	3.14
Hol	1.38	0.34	0.05	7.29	1.40	0.29	1.22	3.45
Sab	1.33	0.46	0.04	7.41	0.60	0.34	1.33	3.24
Ced	1.07	0.36	0.06	6.08	1.43	0.17	0.80	5.93
Syc	1.87	0.28	0.06	5.20	1.79	0.16	0.70	4.72
Che	1.98	0.49	0.06	5.67	1.81	0.11	1.46	4.51
Pru	1.06	0.36	0.04	5.90	0.96	0.13	1.59	5.94

59.26 和 47.22,达到中等级生态风险;女贞和石楠的 Cd 的 E_r^i 分别为 59.99 和 69.62,为中等级生态风险;三叶草、悬铃木和红叶李中的 Cd 和 As 都达到了中等级生态风险.这表明,各类植被叶片中,Cd 和 As 成为最具危害性的重金属.其余 6 种元素 E_r^i 都 <40,属于轻度生态风险等级的元素.从综合危害指数(RI)来看,仅三叶草的 RI 值达到了中等级生态风险(162.86),其余均为低等级生态风险.三叶草植株由于矮小贴近地面,又成群生长,能够累积大量粉尘^[18,19].

所有绿植叶片中,As 和 Cd 是 8 种元素中最主要的风险贡献因子,平均贡献分别为 37.76% 和 36.68%,其它 6 种元素合计贡献为 25.56%. 8 种元

素综合生态风险指数为低等级风险,取样点中 10.89% 为中等级生态风险,根据采样点重金属的平均潜在生态风险系数值,宝鸡市绿植叶片 8 种重金属平均潜在生态风险程度排序为:As>Cd>Cr>Ni>Pb>Co>Zn>Cu.除 As 和 Cd 外,其余样点 E_r^i 均小于 40,表现为低生态风险.As 的样点中 57.05% 的 E_r^i 大于 40,为中等生态风险,有 5.8% 样点的 E_r^i > 80,达到了较强风险等级.Cd 元素有 26.28% 的 E_r^i 为中度生态风险,12.82% 的 E_r^i 达到较强等级.综合来看,宝鸡市绿植叶片中 8 种重金属的 RI 值在 10.58~2982.72,样点中有 18.59% 的 RI 值高于 150,整体处于中等潜在风险等级.

表 3 10 种植物叶片重金属潜在生态风险指数(RI)

Table 3 Potential ecological risk index(RI) of heavy metals in leaves of ten species

元素	E_r^i									
	Oph	Clo	Lig	Pho	Hol	Sab	Ced	Syc	Che	Pru
Pb	8.54	8.35	7.36	7.66	6.91	6.64	5.36	9.37	9.91	5.31
Zn	0.39	0.42	0.43	0.42	0.34	0.46	0.36	0.28	0.49	0.36
Cu	0.23	0.22	0.21	0.19	0.23	0.18	0.28	0.28	0.29	0.20
Cr	16.95	17.88	15.42	14.03	14.57	14.81	12.16	10.41	11.35	11.81
Ni	11.01	11.55	11.75	3.95	7.00	3.01	7.14	8.94	9.04	4.82
Co	0.50	0.41	1.71	1.35	1.45	1.69	0.86	0.78	0.57	0.66
Cd	32.81	68.35	59.99	69.62	36.53	39.96	24.15	21.00	43.80	47.72
As	58.18	55.67	33.93	31.36	34.47	32.39	59.26	47.22	45.11	59.42
RI	128.60	162.86	130.80	128.58	101.50	99.15	109.57	98.29	120.56	130.28

2.5 0、1 和 3 m 绿植叶片中重金属生态风险空间变化分析

PLI 的空间变化特征显示(图 4),在 0 m 和 1 m

高度上,在任家湾火车站附近沿高新大道向东延伸出条带状高值区,达到中度污染等级.其原因可能主要是繁忙的交通活动造成了较严重的重金属污染,

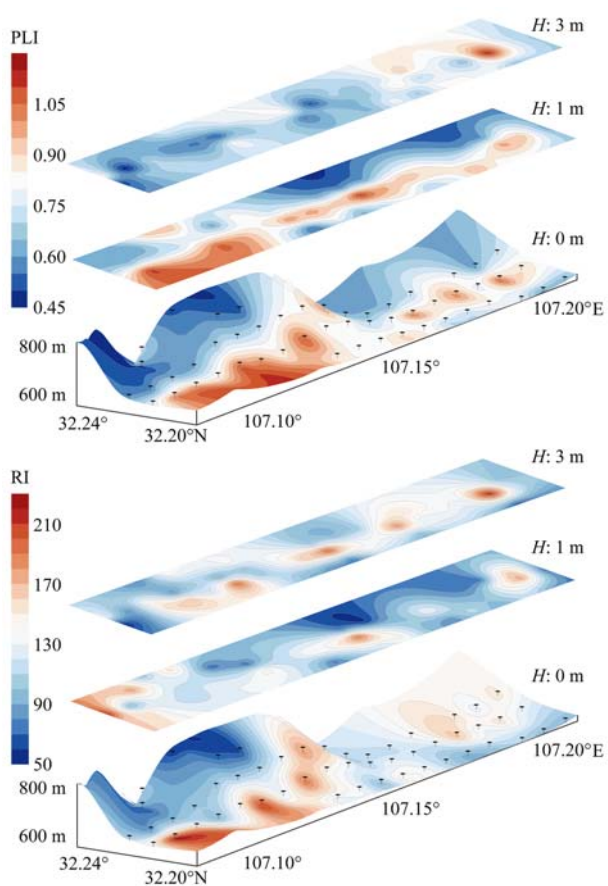


图 4 0、1 和 3 m 高度上绿植叶片中重金属
PLI 和 RI 的空间变化
Fig. 4 Spatial variation characteristics of PLI and RI
in leaves at height of 0, 1, and 3 m

表 4 10 种绿植叶片对重金属生物富集系数 (BCF)

Table 4 Bio-concentration factor of heavy metals in leaves of ten species

绿植种类	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	Co	Cd	As
Oph	0.24	0.44	0.05	4.05	0.46	0.01	3.14	2.60
Clo	0.23	0.48	0.05	4.27	0.48	0.01	6.54	2.49
Lig	0.21	0.50	0.05	3.68	0.49	0.04	5.74	1.51
Pho	0.21	0.48	0.04	3.35	0.16	0.03	6.67	1.40
Hol	0.19	0.38	0.05	3.48	0.29	0.03	3.50	1.54
Sab	0.19	0.53	0.04	3.54	0.13	0.04	3.83	1.45
Ced	0.15	0.41	0.06	2.91	0.30	0.02	2.31	2.65
Syc	0.26	0.32	0.06	2.49	0.37	0.02	2.01	2.11
Che	0.28	0.56	0.06	2.71	0.38	0.01	4.19	2.01
Pru	0.15	0.41	0.04	2.82	0.20	0.02	4.57	2.65
灰尘对照值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	21.4	69.4	21.4	62.5	28.8	10.6	0.09	11.2

元素的富集占比. 为进一步探讨 10 种绿植叶片对不同重金属元素富集能力与所处高度之间的联系, 本文计算了不同绿植所占各元素富集总量的比例(图 5), 0 m 高度上的沿阶草和三叶草对 Ni 和 Cr 富集能力都较强, 三叶草对 Cd 的富集能力大于沿阶草 (15.39% > 7.39%), 对于其余 5 种元素二者相当. 在 1 m 高度上, 女贞、石楠、冬青和龙柏对 Co 的富集能力都较强, 占 10 种绿植富集总量的 62.19%, 其中龙柏对 Ni 的富集能力远不及大叶女贞 (3.85% <

汽车排放尾气易产生细颗粒, 吸附较多的 Cr、Cd 和 Zn 元素, 3 m 高度上, 在千河工业园及其以南的宝鸡机床厂附近出现峰值, 这与当地耐火材料及铆焊工厂零件制造^[37]产生的污染有关. RI 在 0 m 高度上的高值区出现在任家湾火车站、市政府以东和千河工业园附近, 达到较强生态风险等级. 这里灰尘最终沉降至地面, 或被草本植物吸附. 1 m 处受车流等活动影响, 空气流动性大, 进而带动灰尘迁移. 3 m 高度上在川陕路沿线、高新大道中段也有污染聚集区, 主要是受大气降尘和人类活动的共同影响.

3 讨论

3.1 10 种植物叶片对重金属元素的富集特征

不同种类绿植叶片对重金属的富集能力 (BCF) 各不相同 (表 4). 每种植被叶片对 Cr 和 Cd 累积能力普遍较强. 对 Pb 富集能力较强的植物种依次为 Che > Syc > Oph > Clo > Lig > Pho > Hol > Sab > Ced > Pru. 对 Cr 的 BCF 值为: Clo > Oph > Lig > Sab > Hol > Pho > Ced > Pru > Che > Syc > 2, 均为中度富集水平. 对 Cd 的 BCF 值为: Pho > Clo > Lig > Pru > Che > Sab > Hol > Oph > Ced > Syc, 其中三叶草、女贞和石楠的值 > 5, 达到了显著富集. 对 As 的 BCF: Ced > Pru > Oph > Clo > Syc > Che > Hol > Lig > Sab > Pho.

将单种植物对某一元素的富集量除以 10 种植物对该元素的富集总量, 可得到该类绿植对某指定

15.02%), 红继木对 Cd 的富集能力 (15.67%) 比同高度的其他绿植都高. 在 3 m 高度上, 塔松-悬铃木-樱花-红叶李较能富集 Cu 和 As 两种元素, 分别占 10 种植物富集总量的 45.48% 和 46.17%; 此外悬铃木对 Pb、红叶李对 As 也具有较强富集能力. 从单种植物来看, 女贞、石楠、塔松、沿阶草和三叶草对各种元素的累积量都较其它植物更多. 其中石楠对 Cd (15.68%)、Co (13.52%) 和 Zn (10.64%)、塔松对 Pb (12.43%)、Cu (12.30%) 和 Ni (11.43%)、沿

阶草对 Ni(14.08%)、As(12.73%)和Cr(12.16%)富集较多.从生态风险评价指数来看,As和Cd是主要风险贡献元素,沿阶草、红叶石楠和红叶李则对As和Cd具有较强的富集能力,也是较为理想的绿化植物.此外,女贞对Co和Ni,冬青对Cr和Cu,龙柏对Co和Zn也有较强富集作用.

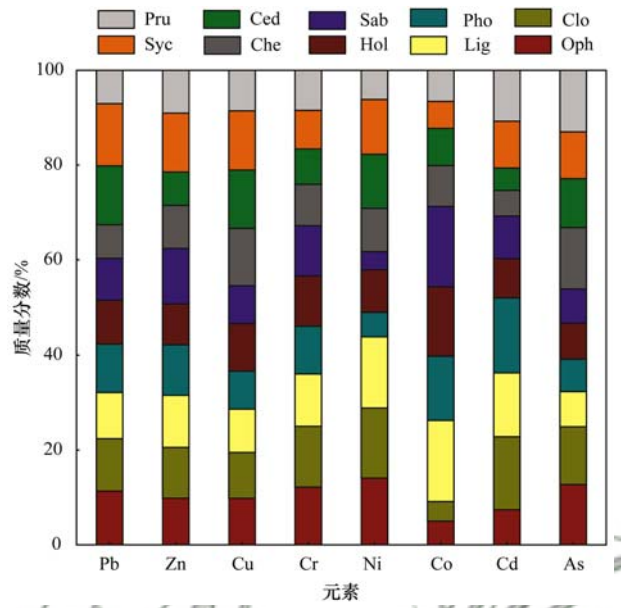


图5 10种绿植叶片对重金属元素富集占比

Fig. 5 Proportion of heavy metal elements in leaves of ten species

3.2 10种绿植叶片中重金属聚类分析

绿植叶片重金属含量的聚类分析热图(图6)将10种绿植聚为3类: Sab-Pho-Hol-Lig、Che-Syc和Pru-Ced-Clo-Oph.其中Pho-Sab和Pru-Ced之间的距离最小,其平均累积量分别为219.04~253.31 mg·kg⁻¹和269.65~275.78 mg·kg⁻¹,显示了较强的相关性. Oph-Clo之间也表明了类似的累积能力. 每组聚类之间的距离较大,呈现弱相关性^[35].

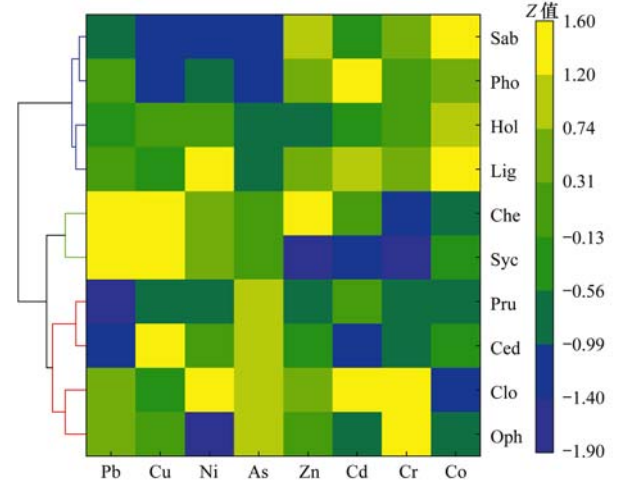


图6 聚类分析热图

Fig. 6 Heatmap with hierarchical cluster analysis

存在这种显著差异,是因为叶片重金属累积量的不同受生长季节、所处环境、风向以及叶子的外部结构、内部生理生化特征和基因差异等多种因素影响^[38~40].张俊辉等^[35]研究了宝鸡市滨河路植被叶子重金属发现,塔松与侧柏对Cr和Cu有较好地累积能力,而红叶李吸附能力较弱.对墨西哥城植物的研究证明,大叶女贞可有效控制大气污染降尘^[24].由此可见,本研究中宝鸡城区绿植叶片的BCF与前人结果具有一致性.另外,结合重金属污染和空间分布来看,在市政府周围、千河工业园以及沿川陕路—高新大道向东延伸出条带状高值区,叶片重金属含量较高,原因是当地锅炉制造、汽车生产等工业活动产生了大量工业粉尘,其中含有Cr、As和Cd等元素;市政府周围道路网密集、车流量大,极易造成严重的重金属污染.上述区域今后应是宝鸡城区重点防治的重金属污染区域.本研究中,硬叶革质和枝叶密度大的女贞和石楠因所处空间位置容易受到工业粉尘的影响,对重金属的累积能力最强,而悬铃木叶子柔弱,樱花叶子狭小光滑,极易受到大风和降水干扰,导致粉尘脱落,因此其叶片累积能力较弱,沿阶草和三叶草由于成群生长,贴近地面,能附着大量粉尘,但其生物吸收能力较弱^[41].塔松因株型紧密,叶量充足,使植株滞尘能力有所提升^[35],有研究也表明植物滞尘能力与植物叶子特征和株型叶量等关联较大^[16,17,42].因此,植物所处空间位置含尘量,植株自身滞尘机制及株型、枝叶特征特性等方面的差异将导致不同植物类型间吸附重金属能力明显不同.综上所述,女贞、石楠、塔松和冬青对重金属的富集可能更具优势,更适合吸附城市粉尘,可作为减少重金属污染的一种优良绿化树种.前人在研究中指出,对于绿植重金属累积能力筛选可优先选用聚类法进行分类评价^[43].本文聚类分析将石楠、女贞和冬青聚为一类,也显示了此类绿植具有较优良的重金属富集能力.

4 结论

(1) 宝鸡市绿植叶片中富集最多的元素是Cr、As、Ni、Pb和Cd.三叶草、女贞和石楠对Cd有显著富集能力.女贞、石楠、塔松和冬青对重金属Cr、Cd和As的富集能力最强,可优先考虑作为城市灰尘重金属污染控制的优势绿化植物品种.

(2) 绿植叶片中Cr、As、Ni、Pb、Cd和Zn元素含量在空间分布上呈现随高度增加而递减的趋势,从0~3 m高度上的垂直递减范围在0.74%~24%,Cr元素递减率最大,达24%.Zn、Cu、Ni和As随高度呈现地表聚集、高处离散的污染特征.0 m高度

同一高度不同种类叶片对某一元素的富集能力

上重金属含量高值区主要集中在任家湾火车站 (Zn、Ni 和 Cd)、高新工业区西段 (Zn、Cr 和 Co) 以及市政府以西 (Co、Cd 和 As)。1 m 高度上分别在市政府、千河工业区南部出现 Zn 和 Cr 元素的高值区。8 种重金属的 PLI 值在任家湾火车站、千河工业区属于中度污染, RI 值在火车站和千河工业区为中等生态风险等级, 在高新大道沿线达到较强生态风险等级。

(3) 10 种绿植叶片中, Cr 和 As 的 PLI 值都 >3, 均达到重度污染水平, 是主要的污染因子。E_i 的平均值的大小顺序为: As > Cd > Cr > Ni > Pb > Co > Zn > Cu, As 和 Cd 为最具生态危害的重金属。研究区内 RI 值范围为 10.58 ~ 2 982.72, 样点中有 18.59% 的 RI 值高于 150, 总体上处于中等潜在生态风险等级。

致谢: 感谢董幸枝、胡可可、李冰洁、何尧、刘绒绒和赵怡涵在采样和实验过程中对本文的帮助。

参考文献:

- [1] 王宏斌, 束文圣, 蓝崇钰. 重金属污染生态学研究现状与展望[J]. 生态学报, 2005, **25**(3): 596-605.
Wang H B, Shu W S, Lan C Y. Ecology for heavy metal pollution: recent advances and future prospects [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(3): 596-605.
- [2] 赵其国, 骆永明, 滕应, 等. 当前国内外环境保护形势及其研究进展[J]. 土壤学报, 2009, **46**(6): 1146-1154.
Zhao Q G, Luo Y M, Teng Y, et al. Development of the current domestic and international environmental protection and its research progress [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, **46**(6): 1146-1154.
- [3] 王效科, 欧阳志云, 仁玉芬, 等. 城市生态系统长期研究展望[J]. 地球科学进展, 2009, **24**(8): 928-935.
Wang X K, Ouyang Z Y, Ren Y F, et al. Perspectives in long-term studies of urban ecosystem [J]. Advances in Earth Science, 2009, **24**(8): 928-935.
- [4] 张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 等. 青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2736-2741.
Zhang C R, Wu Z L, Yao C H, et al. Health risk assessment of heavy metals in atmospheric dust of Qingdao City [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2736-2741.
- [5] 骆永明, 查宏光, 宋静, 等. 大气污染的植物修复[J]. 土壤, 2002, **34**(3): 113-119.
Luo Y M, Zha H G, Song J, et al. Phytoremediation of air pollution [J]. Soils, 2002, **34**(3): 113-119.
- [6] 韦秀文, 姚斌, 刘慧文, 等. 重金属及有机物污染土壤的树木修复研究进展[J]. 林业科学, 2011, **47**(5): 124-130.
Wei X W, Yao B, Liu H W, et al. Application of dendroremediation to the soil contaminated soil by heavy metals and organic pollutants [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, **47**(5): 124-130.
- [7] 张翠萍, 温琰茂. 大气污染植物修复的机理和影响因素研究[J]. 云南地理环境研究, 2005, **17**(6): 82-86.
Zhang C P, Wen Y M. The mechanism and influence factor of phytoremediation in air pollution [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2005, **17**(6): 82-86.
- [8] Tepanosyan G, Sahakyan L, Belyaeva O, et al. Human health risk assessment and riskiest heavy metal origin identification in urban soils of Yerevan, Armenia [J]. Chemosphere, 2017, **108**: 1230-1240.
- [9] Suzuki K, Yabuki T, Ono Y. Roadside *Rhododendron pulchrum* leaves as bioindicators of heavy metal pollution in traffic areas of Okayama, Japan [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **149**(1-4): 133-141.
- [10] 杨峥, 刘艳菊, 朱明溥. 植物叶表尘及重金属对城市大气颗粒物污染的指示与评估[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(7): 2782-2795.
Yang Z, Liu Y J, Zhu M H. Indication and assessment of urban airborne particulate pollution using plant leaf surface dust and associated metals [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(7): 2782-2795.
- [11] Demirayak A, Kutbay H G, Kilic D, et al. Heavy metal accumulation in some natural and exotic plants in Samsun City [J]. Ekoloji, 2011, **20**(79): 1-11.
- [12] Barnes D, Hamadah M A, Ottaway J M. The lead, copper and zinc content of tree rings and bark A measurement of local metallic pollution [J]. Science of the Total Environment, 1976, **5**(1): 63-67.
- [13] 戴斯迪, 马克明, 宝乐, 等. 北京城区公园及其邻近道路国槐叶面尘分布与重金属污染特征[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 154-162.
Dai S D, Ma K M, Bao L, et al. Distribution of particle matters and contamination of heavy metals in the foliar dust of *Sophora japonica* in parks and their neighboring roads in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(1): 154-162.
- [14] 杨志敏, 陈玉成. 重庆市主要绿化植物对重金属的富集与净化研究[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, **28**(3): 393-395, 401.
Yang Z M, Chen Y C. Enrichment of heavy metals by several virecence plants and their purification of the atmosphere in the central urban areas of Chongqing [J]. Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science), 2006, **28**(3): 393-395, 401.
- [15] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, et al. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city [J]. Atmospheric Environment, 2012, **61**: 283-293.
- [16] 张利敏, 王传宽. 东北东部山区 11 种温带树种粗木质残体分解与碳氮释放[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(4): 368-375.
Zhang L M, Wang C K. Carbon and nitrogen release during decomposition of coarse woody debris for eleven temperate tree species in the eastern mountain region of northeast China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, **34**(4): 368-375.
- [17] Smith K T, Shortle W C, Jellison J, et al. Concentrations of Ca and Mg in early stages of sapwood decay in red spruce, eastern hemlock, red maple, and paper birch [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2007, **37**(5): 957-965.
- [18] 吴虹玥, 包维楷, 王安. 苔藓植物的化学元素含量及其特点[J]. 生态学杂志, 2005, **24**(1): 58-64.
Wu H Y, Bao W K, Wang A. Concentrations and characteristics of chemical elements in bryophytes [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, **24**(1): 58-64.
- [19] 姜勇. 森林生态系统微量元素循环及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(1): 197-204.
Jiang Y. Micronutrient cycling and its affecting factors in forest ecosystems [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, **20**(1): 197-204.

- [20] Harmon M E, Franklin J F, Swanson F J, *et al.* Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems[J]. *Advances in Ecological Research*, 1986, **15**: 133-302.
- [21] Pouyat R V, McDonnell M J. Heavy metal accumulations in forest soils along an urban- rural gradient in southeastern New York, USA[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1991, **57-58**: 797-807.
- [22] 侯平, 潘存德. 森林生态系统中的粗死木质残体及其功能[J]. *应用生态学报*, 2001, **12**(2): 309-314.
Hou P, Pan C D. Coarse woody debris and its function in forest ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(2): 309-314.
- [23] Dragović S, Mihailović N. Analysis of mosses and topsoils for detecting sources of heavy metal pollution: multivariate and enrichment factor analysis[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **157**(1-4): 383-390.
- [24] Økland T, Økland R H, Steinnes E. Element concentrations in the boreal forest moss *Hylocomium splendens*: variation related to gradients in vegetation and local environmental factors[J]. *Plant and Soil*, 1999, **209**(1): 71-83.
- [25] 耿雅妮, 梁青芳, 杨宁宁, 等. 宝鸡市城区灰尘重金属空间分布、来源及健康风险[J]. *地球与环境*, 2019, **47**(5): 696-706.
Geng Y N, Liang Q F, Yang N N, *et al.* Distribution, sources and health risk assessment of heavy metals in dusts of the urban area of the Baoji City[J]. *Earth and Environment*, 2019, **47**(5): 696-706.
- [26] 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 等. 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5629-5639.
Chen J Y, Liu G B, Cui J L, *et al.* Mobilization of heavy metals in a soil-plant system and risk assessment in the Dabaoshan mine area, Guangdong province, China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5629-5639.
- [27] 刘翠玲, 潘存德, 梁瀛. 鳞毛蕨天山云杉林粗死木质残体贮量及其分解动态[J]. *干旱区地理*, 2009, **32**(2): 175-182.
Liu C L, Pan C D, Liang Y. Storage and decomposition dynamics of coarse woody debris in *Picea schrenkiana*-*Dryopteris filix-mas* stand[J]. *Arid Land Geography*, 2009, **32**(2): 175-182.
- [28] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [29] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, *et al.* Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, **33**(1): 566-575.
- [30] 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.
Xu Z Q, Ni J S, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [31] Bae J, Benoit D L, Watson A K. Effect of heavy metals on seed germination and seedling growth of common ragweed and roadside ground cover legumes[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **213**: 112-118.
- [32] Kabata-Pendias A. Soil-plant transfer of trace elements—an environmental issue[J]. *Geoderma*, 2004, **122**(2-4): 143-149.
- [33] 杨胜香, 田启建, 梁士楚, 等. 湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 2038-2045.
Yang S X, Tian Q J, Liang S C, *et al.* Bioaccumulation of heavy metals by the dominant plants growing in Huayuan manganese and lead/zinc mineland, Xiangxi[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(6): 2038-2045.
- [34] Ghaderian S M, Ravandi A A G. Accumulation of copper and other heavy metals by plants growing on Sarcheshmeh copper mining area, Iran[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, **123**: 25-32.
- [35] 张俊辉, 林青, 姜珊, 等. 宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 978-986.
Zhang J H, Lin Q, Jiang S, *et al.* Analysis of heavy metal pollution and ecological risk assessment on vegetation leaves in Baoji City[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 978-986.
- [36] Stoeva N, Berova M, Zlatev Z. Effect of arsenic on some physiological parameters in bean plants[J]. *Biologia Plantarum*, 2005, **49**(2): 293-296.
- [37] 唐丽清, 邱尔发, 韩玉丽, 等. 不同径级国槐行道树重金属富集效能比较[J]. *生态学报*, 2015, **35**(16): 5353-5363.
Tang L Q, Qiu E F, Han Y L, *et al.* Variation of heavy metal enrichment efficiency in roadside trees of *Sophora japonica* L. with different diameters at breast height[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(16): 5353-5363.
- [38] 王呈, 钱新, 李慧明, 等. 南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1662-1669.
Wang C, Qian X, Li H M, *et al.* Pollution evaluation and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in the parks of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1662-1669.
- [39] 李金花, 何燕, 段建平, 等. 107 杨对土壤重金属的吸收和富集[J]. *林业科学研究*, 2012, **25**(1): 65-70.
Li J H, He Y, Duan J P, *et al.* Absorption and accumulation of heavy metal from soil by leaves of *Populus euramericana* cv. 'Neva' plantatio[J]. *Forest Research*, 2012, **25**(1): 65-70.
- [40] 谭万能, 李志安, 邹碧. 植物对重金属耐性的分子生态机理[J]. *植物生态学报*, 2006, **30**(4): 703-712.
Tan W N, Li Z A, Zou B. Molecular mechanisms of plant tolerance to heavy metals[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, **30**(4): 703-712.
- [41] 王祖伟, 李宗梅, 王景刚, 等. 天津污灌区土壤重金属含量与理化性质对小麦吸收重金属的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(4): 1406-1410.
Wang Z W, Li Z M, Wang J G, *et al.* Absorption to heavy metals by wheat and influencing features in sewage- irrigated soil in Tianjin[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2007, **26**(4): 1406-1410.
- [42] 季辉, 赵健, 冯金飞, 等. 高速公路沿线农田土壤重金属总量和有效态含量的空间分布特征及其影响因素分析[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(2): 477-483.
Ji H, Zhao J, Feng J F, *et al.* Spatial distribution characteristics of total and available heavy metal contents and their influencing factors in farmland soils along expressway[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, **44**(2): 477-483.
- [43] 石惠春, 刘伟, 何剑, 等. 一种城市生态系统现状评价方法及其应用[J]. *生态学报*, 2012, **32**(17): 5542-5549.
Shi H C, Liu W, He J, *et al.* An urban ecosystem assessment method and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(17): 5542-5549.

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area ("2+26" Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101 (Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvio-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)