

百方知库
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



2019

Vol.40 No.2

第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)

珠三角地区利用 PM_{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)

广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)

扬州市 PM_{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)

博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)

某集约化肉鸡饲养场 PM_{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)

水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)

滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)

基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)

异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林祺, 王荣, 沈吉 (614)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评估 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)

氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)

磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)

钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)

NH₄⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)

3种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)

硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 郅超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)

ZnTiO₂-TiO₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)

高指数晶面 TiO₂ 对铬的吸附及光催化去除 钟德健, 张健峰, 李尧, 谢晓丹 (701)

Fe⁰/海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)

不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何睿, 董杨, 王海港 (717)

SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)

一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 薛文清, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺通量及膜污染分析 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)

多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除 刘淑惠, 田伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)

从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水 袁文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)

硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)

乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷 (791)

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)

进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)

ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)

调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性 王杨, 朱斌, 董俊, 白晓慧 (853)

黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)

基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)

硝化作用对盐碱湿地 N₂O 排放的影响及其环境因子分析 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)

长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N₂O 和 NO 排放的影响 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)

地膜覆盖和施肥对菜地 N₂O 排放的影响 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响 李亚森, 丁松爽, 殷金玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)

工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 李锋, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献 张彦军, 郭胜利 (961)

不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓悟悟, 葛东达, 吴金水 (970)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)

热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜粪混合物料及其甲烷高值化条件 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

《环境科学》征订启事(547) 《环境科学》征稿简则(828) 信息(581, 933, 952)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价

张俊辉^{1,2}, 林青¹, 姜珊¹, 刘滨¹, 李东兴¹, 王彦虎¹

(1. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 宝鸡 721013; 2. 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)

摘要: 以宝鸡市滨河路植被叶子为研究对象, 对不同种类以及不同高度的植被叶子重金属含量和污染程度进行分析. 结果表明, 植物叶子中重金属含量随着植被高度呈递减的变化趋势; 其中 Cr、Mn 和 Pb 含量在植被叶子中富集最多, Cr、Cu、Ni 和 Mn 含量的最高值均出现在金叶女贞的植被叶子中; Pb 富集最多的是大叶女贞, Cd 富集最多的是塔松, As 富集最多的是红叶李; 运用单因子污染指数法和内梅罗综合指数法对植被叶子的污染程度进行评价, Hakanson 潜在生态风险评价法评估了滨河路不同类型植被叶子中 Cr、Cu、Ni、Mn、Pb、Cd 和 As 等 7 种重金属的潜在生态危害, 滨河路 7 种植物叶子综合污染指数属重度污染, 具有极强的综合危害性; 7 种重金属的平均潜在生态风险程度大小顺序为: Cd > Ni > Cr > As > Pb > Cu > Mn, RI 值变化范围为 19.04 ~ 4 020.29.

关键词: 宝鸡市; 植被; 重金属; 污染; 生态风险评价

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0978-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.20180210

Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City

ZHANG Jun-hui^{1,2}, LIN Qing¹, JIANG Shan¹, LIU Bin¹, LI Dong-xing¹, WANG Yan-hu¹

(1. College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Disasters Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China)

Abstract: Using seven types of vegetation and seven heavy metals (Cr, Cu, Ni, Mn, Pb, Cd, and As), the present study explored the ability of accumulation and degree of contamination in the leaves of vegetation in Binhe Road. The results demonstrated a negative trend between vegetation height and heavy metal content of vegetation leaves, i. e., as plant height increased, heavy metal contamination decreased. Leaves varied in the accumulation of heavy metals depending on the heavy metal and vegetation type. Cr, Mn, and Pb content were the most abundant in vegetation leaves. The highest values for Cr, Cu, Ni, and Mn were observed in the vegetative leaves of *Hybrida vicary privet* and were 217.33, 58.61, 36.79, 1 676.14 mg·kg⁻¹, respectively. The highest Pb content was 1 295.64 mg·kg⁻¹ in *Ligustrun lucidum*, the highest Cd content was 110.19 mg·kg⁻¹ in *Cedrus deodara*, and the highest As content was 139.42 mg·kg⁻¹ in *Prunus cerasifera*. The degree of pollution in vegetation leaves was evaluated using the comprehensive index method Single-factor pollution index method and the Nemeru Composite Index Method. The Single-factor pollution index of vegetation leaves with *Prunus cerasifera*, *Platanus acerifolia*, *Cercis chinensis* were between 0.02-1.23, and the Nemeru Composite Index values were 1.01, 0.82, 0.4, respectively, with light pollution. The Single-factor pollution index of vegetation leaves by *Cedrus deodara*, *Platycladus orientalis*, *Hybrida vicary privet* and *Ligustrun lucidum* were much higher than 1, and the Nemeru Composite Index was 16.53, 140.64, 98.80, and 37.52, respectively, with high levels of pollution. The potential ecological risk of heavy metals in vegetation leaves was determined using the Hakanson potential ecological risk assessment method. The order of the average potential ecological risk degree of the seven examined heavy metals was as follows: Cd > Ni > Cr > As > Pb > Cu > Mn, and the RI value range was 19.04-4 020.29, with high levels of pollution.

Key words: Baoji City; vegetation; heavy metals; pollution; ecological risk assessment

城市环境污染目前已成为严重的问题, 引起广泛关注^[1]. 其中重金属污染是城市环境污染的重要组成部分, 主要包括 Pb、Cu、Cr 和 Zn 等, 这些重金属元素过多或过少的含量都会引起植物或人体一系列病症^[2], 且较难降解, 所以它们具有较严重的环境危害和环境指示意义^[3-5]. 有研究表明, 城市绿地具有净化空气, 减滞粉尘的生态效应, 而这种滞尘效应主要缘于植物对于空气粉尘颗粒物的吸收、阻滞和过滤作用^[6-11]. 因此, 利用自然生长的叶子研究大气重金属污染有很多优势条件, 首先, 叶子可以通过它的蜡质层(具亲脂性)直接吸收大气环境中的粉尘、悬浮颗粒物、沉降物和不完全挥

发有机物, 特别是对粒径小于 1 μm 的细颗粒物更为敏感, 这些颗粒可通过扩散方式从表皮进入内层^[12]; 其次, 植物叶子样品分布广泛并采集容易, 可以快速获取大范围、高分辨率的重金属污染信息^[13]. 对草本植物的研究发现: 草本植物对叶子中部分重金属具有超富集作用, 但是其富集重金属种类单一、生物量小且对环境要求较为苛刻^[14-17]. 通过分析南京化工厂(污染区)和江苏省

收稿日期: 2018-02-02; 修订日期: 2018-07-29

基金项目: 陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划项目(2018JM4035); 大学生创新创业项目(201710721007)

作者简介: 张俊辉(1978~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境磁学与全球气候变化, E-mail: bwlzjh@126.com

林科院(对照区)不同绿化树种叶子重金属元素(Pb、Cd 和 Cu)的含量,发现城市绿化树种对大气重金属污染物具有一定的吸收净化能力,且随着重金属种类不同和树种的差异,对污染的净化能力也有明显的不同,同种植物对不同重金属的累积量也有很大差别^[18]。也有学者以北京地区常见绿化树种为研究对象,分析得出对 Cr、Pb 富集能力较强的是国槐和侧柏,且重金属元素含量与叶子中重金属污染程度相关性较强^[19]。除此之外,王亚宇^[20]和薛皎亮等^[21]也发现道路绿化带植被叶子对重金属(Cu、Cr、Pb、Zn)具有一定吸滞作用。城市绿化带植被重金属的含量与道路的距离有一定的关系, Pagotto^[22]通过分析认为在公路附近叶子中有 Pb、Zn 和 Cd 的积累,且随着距离的增大和叶子深度的增加而降低,交通对环境的影响主要在公路两侧范围内。Pouyat 等^[23]对纽约市 140 km 长的“城区-郊区-农区”森林生态样带研究发现,叶子中的 Cu、Ni 和 Pb 含量随着该区与市中心距离的增加而降低; Albasel 等^[24]也认为叶子中 Cu、Pb、Zn 的含量在逐渐远离公路时而迅速降低。此外,仍有许多利用工业区或交通道路沿线植被叶子的重金属含量,揭示出绿化植被叶子中重金属的含量表现出随着与污染源距离的增大而减小的变化规律^[25-27]。关于植物叶子对环境污染的重金属响应研究主要集中在北京、上海等大都市或者重点工业区^[28-32],侧重于对区域范围内同一植被记录的环境污染进行分析,缺乏植物叶子对重金属富集能力的空间变化、树种差异性,以及不同重金属污染强度下树种对重金属元素吸滞能力变化的生态风险评价等综合性研究。

本文选择交通繁忙、车流量大,植被种类相对较多,具有一定代表性的宝鸡市渭滨区滨河路不同植被的叶子研究对象,测定了其中的重金属含量,运用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数对该区域的重金属污染进行比较和评价,利用 Hakanson 潜在生态风险评价法对滨河路植被的重金属的潜在危害进行评估,试图了解该区域植被最新的重金属污染状况,帮助城市选择既能美化和净化环境又降低绿化成本的道路绿化植被提供新的科学依据,对改善城市居民生活环境具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品收集

选取宝鸡市渭滨区滨河路作为研究区域,该路段道路绿化植被种类多样,乔木如:塔松、悬铃木、大叶女贞、侧柏;灌木如:紫荆、红叶李、金叶女贞。采样时间为 2015 年 11 月初,基本为生长将近一年的叶子,同时选择了连续 7 d 晴朗的天气后采样。以 4 个不同高度(1、1.5、3、4 m)分别对不同绿化植被一年生成熟健康叶子进行采集。其中灌木植被紫荆、金叶女贞、红叶李采样高度分为 I、II 层(1 m、1.5 m),大叶女贞、塔松、白杨等乔木较高,采样高度分为 III、IV 层(3 m、4 m)。由于道路交通产生的污染物主要影响靠近道路一侧的植物,为了避免误差干扰,其中每一分层的叶子采集东、西、南和北四个方向,采集后均匀混合。同时采集不同植被样点所对应的街道粉尘样品以及校园中采集人为干扰相对较小区域的白皮松、杨树、悬铃木作为背景参照样品。共采集样品 161 个(图 1)。

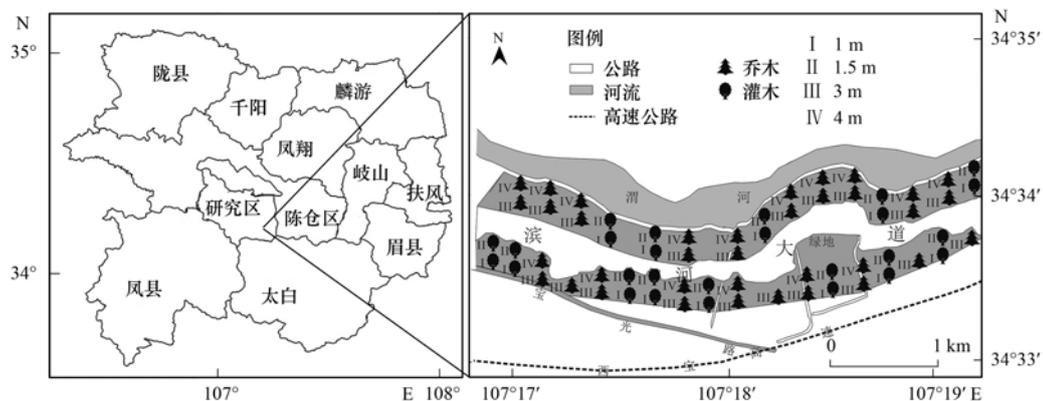


图 1 宝鸡市滨河路植被叶子采样位置示意

Fig. 1 Sampling location distribution diagram of vegetation leaves in Binhe Road of Baoji City

1.2 实验方法

样品采集后迅速带回实验室进行前处理:在 40℃ 下烘干至恒重,用研钵研磨成粉末状,取回的水样经 0.45 μm 醋酸纤维微孔滤膜过滤、酸化处理后备用;经 0.45 μm 滤膜过滤,滤液进行酸化处理后

于测定重金属含量;植物和叶子中重金属总量测定样品的前处理:称取经冷冻干燥、过 100 目筛的植物样品 0.100 g 置于消解管中,加入 HNO₃ + HClO₄ (10:3),将消解管置于 180℃ 电热板上消解。消解结束后定容将消解液转移至 50 mL 比色管中,4℃ 下保存待

测. 利用 ICP-MS 法(仪器为日本 Agilent 公司生产的电感耦合等离子体质谱仪 Agilent 7700x)测定 Cr、Cu、Ni、Mn、Pb、Cd、As 这 7 种重金属的含量. 精确称取风干土样 0.5g, 放入聚四氟乙烯消解罐中, 依次加入浓 $\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{HClO}_4$ (5:2:1), 摇匀后置于 180℃ 电热板上加热预处理约 15min, 盖好放入密闭式微波消解装置中消解. 消解完毕后, 定容转入 50 mL 容量瓶, 取上清液, 利用微波消解法(仪器为美国热电仪器公司生产的电感耦合等离子发射光谱仪 Thermo 6300)测定土壤中重金属(Cr、Cu、Ni、Mn、Pb、Cd、As)含量. 以上实验在宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室完成.

1.3 污染程度评价方法

单因子污染指数和内梅罗指数法是当前国内外进行综合污染指数计算中最常用的方法之一^[14]. 计算公式为:

$$P = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}}$$

式中, $(C_i/S_i)_{\max}^2$ 为污染样品中的污染指数最大值, $(C_i/S_i)_{\text{ave}}^2$ 为污染样品中污染指数的平均值, C_i 为重金属的实测值, S_i 为重金属的国际标准值.

1.4 潜在生态风险评估法

Hakanson 潜在生态风险指数法是目前国际广泛用于评价叶子重金属污染的潜在风险的方法之一, 该方法结合重金属的生态效应、环境效应和毒理学效应, 以数值的形式评价重金属的潜在风险程度^[16]. 计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$

$$C_f^i = C^i/C_n^i$$

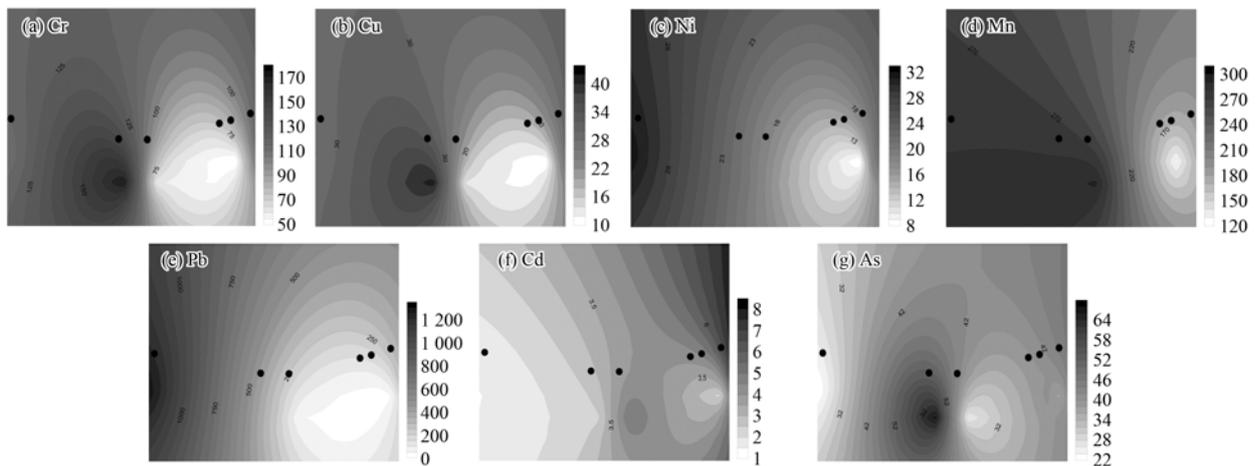
$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中, RI 为潜在生态风险系数; E_r^i 为金属元素 i 的潜在生态风险单项系数; T_r^i 为金属元素 i 的毒性响应系数; C_f^i 金属元素 i 的单项污染系数; C^i 为重金属元素的实测浓度; C_n^i 为参比值, 有关参比值, Hakanson 提出应参照现代化工业前沉积物重金属的最高值^[17], 但也有一些学者, 采用了当地叶子背景值^[18], 本实验中采用污染相对较轻的校园植被叶子作为背景值参考.

2 结果与分析

2.1 不同植被叶子重金属元素含量特征

植被叶子样品中重金属含量见表 1. 从中可知, 滨河路植被叶子 Cr、Cu、Ni、Mn、Pb、Cd 和 As 等重金属值均远远高于作为背景值的校园植被叶子重金属含量. 植被叶子不同种类(灌木、乔木)不同高度(灌木采样高度分别为 1 m、1.5 m, 乔木采样高度分别为 3 m、4 m)的重金属含量差异较大, 随着距离地面高度的增加所有植被叶子重金属含量出现明显下降趋势, Cr、Cu、Ni 和 Mn 含量的最高值均出现在金叶女贞的植被叶子中, 约为校园背景值的 7、3、3.6 和 5.6 倍. 大叶女贞叶子中 Pb 含量明显高于其它植被叶子, 塔松所含 Cd 值最高, 且远高于其它植被叶子, 而红叶李中 As 的含量最高, 表明 7 种重金属在滨河路植被叶子中均有一定程度的累积, 其中 Cr、Mn、Pb 累积得最多, 远高于其它 4 种重金属, 为该地区植被叶子中的主要重金属污染物. 所测定的 7 种重金属元素中, 部分植被叶子的 As 低于背景值, 可能是污染较为轻微的元素. 由滨河路植被叶子重金属等值线分布图也可以看出(图 2), 在污染较严重的滨河路西段十字路口地区附近, 除了 Cd 与 Ni 的重金属值变化不明显之外, 其



黑点表示样品点位置, 单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

图 2 植被叶子重金属等值线分布

Fig. 2 Isoline map of heavy metals in vegetation leaves

余 5 种重金属均表现出明显的一个峰值，特别是 Pb 的峰值尤为高。这可能是由于重金属 Pb 的高值很大部分源于汽车尾气、轮胎摩擦产生的，而在其周

围区域植被叶子的重金属含量呈现出递减的特征，这指示了距离交通污染源距离增大，重金属含量也随之降低的变化规律^[33,34]。

表 1 植被不同部位重金属的含量/mg·kg⁻¹

Table 1 Heavy metals content in different positions of vegetation/mg·kg⁻¹

植被	种类	高度	Cr	Cu	Ni	Mn	Pb	Cd	As	
灌木	紫荆	I 层	52.57	24.88	10.74	242.40	709.17	5.23	13.14	
		II 层	49.91	10.20	7.82	128.00	17.70	2.71	40.72	
	红叶李	I 层	150.20	32.03	18.64	364.58	40.00	4.04	139.42	
		II 层	61.31	13.62	15.81	292.59	54.24	5.04	26.09	
	金叶女贞	I 层	120.82	39.88	21.96	822.09	35.93	1.87	40.35	
		II 层	217.33	58.61	36.79	1676.14	41.04	1.71	29.08	
乔木	塔松	III 层	143.22	38.08	27.80	201.71	529.23	110.19	52.62	
		IV 层	58.62	29.05	13.79	144.06	104.23	6.09	50.25	
	侧柏	III 层	90.11	22.14	19.21	155.70	36.47	2.13	36.52	
		IV 层	192.70	47.71	33.12	272.88	60.50	5.39	9.67	
	悬铃木	III 层	172.51	41.31	20.25	284.27	324.48	2.36	67.89	
		IV 层	57.57	14.97	10.08	138.18	20.08	3.87	33.76	
	大叶女贞	III 层	110.62	27.64	31.74	280.13	1295.64	1.48	21.74	
		IV 层	66.10	9.49	11.59	57.36	10.39	1.04	14.99	
	白皮松	III 层	34.26	28.90	27.75	325.48	31.04	2.67	27.95	
		IV 层	26.08	23.07	14.57	490.32	26.04	1.87	16.01	
	校园清洁区	杨树	III 层	30.73	17.48	5.20	112.85	19.02	0.98	32.01
			IV 层	39.69	24.21	8.22	110.36	15.84	0.65	17.47
悬铃木		III 层	37.36	8.03	3.92	75.71	11.44	0.27	20.11	
		IV 层	22.35	5.95	8.04	42.61	24.43	0.27	19.21	

2.2 植被叶子重金属含量相关性分析

为了深入探讨滨河路植被叶子重金属的相关关系，更形象地反映指标之间的相似性，对滨河路植被叶子重金属含量进行指标标准化后，运用 SPSS 软件进行指标聚类分析(图 3)。图 3 中横坐标代表指标间的距离，距离越近，两者的相关性越高。可以看出，元素 Cu 与 Cr 之间的距离均小于 5，表明两者之间的相关性很高，Mn 和 Pb 距离也小于 5，

两者的相关性也较高。同时根据 Pearson 相关系数也可以看出这一点(表 2)，元素 Cu 与 Cr 的相关系数为 0.767，呈显著相关，Mn 与 Pb 相关性也很强，反映了元素 Cu 和 Cr，Mn 与 Pb 在来源上的本质联系。元素 Cr、Cu、Mn、Pb 与 Ni、Cd、As 重金属基本不存在相关关系。

3 讨论

3.1 不同种类植被叶子重金属污染程度评价

采用单因子污染指数和内梅罗指数法评价滨河路植被叶子重金属污染结果(表 3)。不同种类植被叶子中重金属污染程度分别为塔松(A)：Cd > Ni > Cr > As > Pb > Mn > Cu；侧柏(B)：Cd > Ni > Cr > As > Cu > Mn > Pb；金叶女贞(F)：Cd > Ni > Cr > Pb > As > Mn > Cu；大叶女贞(G)：Cd > Ni > Cr > Pb > As > Mn > Cu。分别计算出滨河路 7 种不同植被叶子重金属元素的单项污染指数 P_i (指每种植被叶子分别对 7 种重金属的污染程度)和综合污染指数 $P_{综}$ (指每种植被叶子对 7 种重金属的综合污染程度)，以校园植被叶子重金属污染等级作为背景值，并将滨河路植被叶子重金属污染分级。其中，红叶李(D)、悬铃木(E)单项污染指数均小于 1，表明这 2 种植被叶子基本未受到污染；紫荆(C)单项污染指数除 Cr、Ni 的污染指数大于 1 之外，其余重金属的

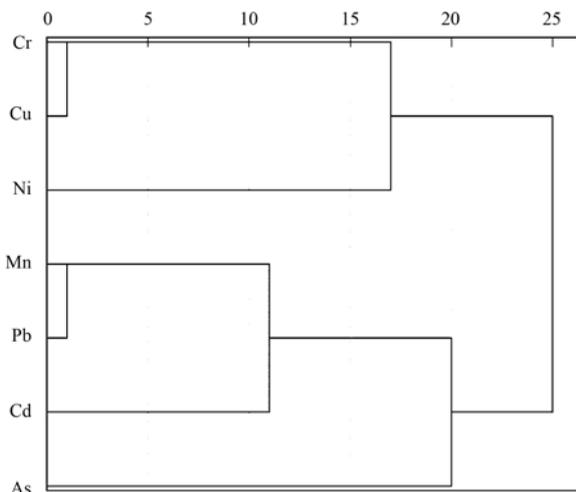


图 3 重金属元素的指标聚类树状图

Fig. 3 Indicator cluster tree of the parameters of the heavy metal elements

表 2 滨河路植被叶子 Pearson 相关系数¹⁾

Table 2 Pearson correlation coefficient of vegetation leaves in Binhe Road

	Cr	Cu	Ni	Mn	Pb	Cd	As
Cr	1						
Cu	0.767 **	1					
Ni	0.608 **	0.487 **	1				
Mn	0.530 **	0.717 **	0.331	1			
Pb	0.157	0.158	0.205	-0.092	1		
Cd	0.203	0.180	0.162	-0.084	0.287	1	
As	0.157	0.130	-0.103	0.026	0.001	0.135	1

1) ** 表示 0.01 水平相关显著性; * 表示 0.05 水平相关显著性, $n = 100$

污染指数均小于 1, 表明这种植被受 Cr、Ni 污染严重, 但总体来看为轻度污染; 而塔松、侧柏、金叶女贞、大叶女贞这 4 种植物叶子重金属的污染指数远远大于 1, 为重度污染. 从综合污染指数来看, 塔松、侧柏、金叶女贞、大叶女贞 3 种植物叶子重金属 $P_{综}$ 均远远大于 3, 表明重金属污染物严重超标, 属重度污染植被. 紫荆、红叶李、悬铃木 $P_{综}$ 小于 3, 重金属含量轻度超标, 植被叶子属轻度污染. 从 7 种植物叶子重金属元素的评价数据来看: 紫荆、红叶李、悬铃木叶子中 7 种重金属基本呈现无污染状态, 总样点中 98.72% 为无污染, 1.28% 为轻污染; Cr、Ni、Cd 是研究样点污染水平相对较高

的元素, 三者所有样点内 42.85% 的样点为安全状态, 有重度污染的样点占 57.14%, 说明有些样点 Cr、Ni 和 Cd 污染严重超标, 需要加以重视; As 安全、轻度、中度、重度污染水平的样点占所有样点的比例分别为 42.85%、28.57%、14.28%、14.28%; Pb 在总样点内有 14.28% 比例的污染水平为重度污染, 轻度污染和安全状态各占 42.85%; Mn 在不同污染程度上的样点比例分配与 Pb 较为相似, 14.28% 的样点达到重度污染, 其余样点的 Mn 均为无污染和轻污染; Cu 的污染程度较轻, 基本为无污染, 轻度污染样点有 85.71%, 重度污染有 14.28%.

表 3 滨河路植被叶子重金属污染指数

Table 3 Heavy metal pollution index of vegetation leaves in Binhe Road

种类	P_i							内梅罗综合指数 $P_{综}$	评价等级
	Cr	Cu	Ni	Mn	Pb	Cd	As		
A	8.13	1.21	8.76	1.25	1.63	21.42	2.52	16.53	重度污染
B	61.39	4.32	76.70	3.28	2.50	182.75	6.35	140.64	重度污染
C	1.13	0.02	1.23	0.04	0.03	0.95	0.07	1.01	轻度污染
D	0.08	0.02	0.09	0.03	0.04	0.99	0.07	0.82	警戒线
E	0.26	0.07	0.29	0.05	0.05	0.52	0.06	0.40	安全
F	8.78	0.85	9.52	1.49	2.20	130.62	1.96	98.80	重度污染
G	12.74	0.98	13.65	1.35	1.47	49.19	1.42	37.52	重度污染

不同种类植被叶子对 Cr 累积能力普遍较强, 而 Cu 累积能力较强的依次有金叶女贞、侧柏、塔松. 同一高度不同种类植被叶子对某一元素的累积能力存在这种显著差异是因为植物叶子重金属累积量的不同可能受生长季节、雨水径流^[25]、所处环境风向^[26]以及叶子的外部结构、内部生理生化特征和基因的差异^[27]等内外因素影响. 7 种不同重金属在不同种类植被叶子中累积量不同, 同种重金属在不同采样点的空间分布也有差异: 宝鸡市滨河路悬铃木叶子累积 Cr、Cu、Pb 和 Ni 的平均值范围分别是 57.57 ~ 172.51、14.97 ~ 41.31、20.08 ~ 324.48 和 20.25 ~ 33.12 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 Sawidis 等^[35]2011 年研究了欧洲 3 个地区悬铃木叶子累积 Cr、Cu 和 Pb 的平均值分别是 0.23 ~ 0.62、2.57 ~ 25.20 和 2.41 ~ 13.75 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 与前人研究相比, 滨河路悬铃木

叶子累积的 Pb 与前人研究最接近, Cr 和 Cu 的含量较高, 对于 Ni 元素, 本研究浓度范围 (20.25 ~ 33.12 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 略低于先前研究范围 (42 ~ 56 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[36], 而与 Bargagli 等^[37]利用橡树作为研究材料的研究结果相似, 说明宝鸡市滨河路植被叶子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. 其中滨河路植被叶子中的 Cr、Cu 和 Pb 这 3 种重金属的含量远远大于其它道路植被叶子的研究结果, 进一步表明宝鸡市滨河路繁忙的交通运行造成了严重的重金属污染, 其原因可能主要是汽车排放尾气易产生细颗粒, 吸附较多的 Cr 和 Pb 元素^[34,35]. 本研究中, 硬叶革质、枝叶密度大, 拥有较大叶量的金叶女贞因所处空间位置容易受到道路二次扬尘影响, 对重金属的吸附程度排最前, 而红叶李叶子柔弱, 紫荆叶子狭小光

滑, 极易受到降水与大风干扰, 导致所滞粉尘脱落, 因此它们的叶子吸附重金属能力一般^[19], 塔松与侧柏因株型紧密, 叶量充足, 植株滞尘能力有所提升, Nowak 等^[10]的研究也表明植物滞尘能力与植物叶子特征、株型叶量等关联较大. 因此, 植物所处空间位置含尘量, 植株自身滞尘机理及株型、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^[24~28].

宝鸡市滨河路植被叶子的重金属污染程度的空间分布表明(图 4), 宝鸡市滨河路植被叶子普遍存在污染现象, 仅有个别样点重金属污染为安全状态, 绝大多数样点的重金属污染均有重度污染的现象, 说明重金属元素对该区域植被叶子环境安全起到严重威胁, 这有可能是由于近年随着城市化进程加剧, 区域内的工业活动和人类活动对植被叶子重金属含量产生直接影响^[21]. 自西向东数值明显增大, 并且处于滨河路东部以及中部十字路口的植被叶子重金属含量较高, 这可能由于受到东部地段正处于施工期间, 而十字路口车流量大, 受到交通污染影响较大, 因此滨河路十字路口区域今后应是宝鸡市重点防治的重金属污染区域. 综上所述, 金叶女贞对重金属的吸附可能更具优势, 对改善空气质量的效果更佳, 它可能更适合公路边清除颗粒物, 减少重金属污染的一种优良绿化树种.

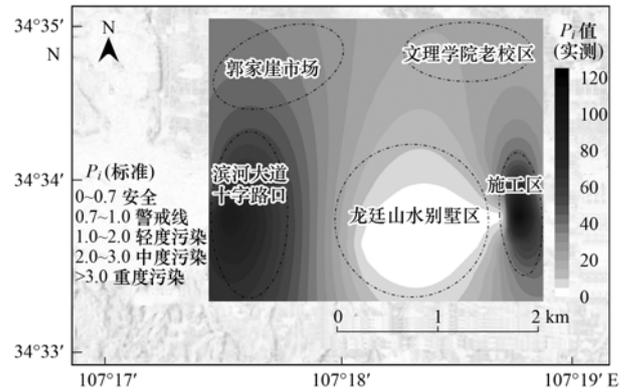


图 4 宝鸡市滨河路植被叶子重金属单项污染指数 (P_i)

Fig. 4 Single pollution index (P_i) for foliar heavy metals in Binhe Road of Baoji City

3.2 植被叶子重金属潜在生态风险评估

潜在生态危害指数法是根据重金属性质及环境行为特点, 将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起的一种对叶子或沉积物中重金属污染进行评价的方法, 采取具有可比性的等价属性指数对潜在生态危害程度进行分级^[20]. 宝鸡市滨河路植物叶子重金属元素的潜在生态危害系数 (E_r^i) 和综合危害指数 (RI) 如表 4. 根据叶子重金属的潜在风险分级标准(表 5)可知, A、B、F、G 样品中 Cd 的潜在生态危害系数 E_r^i 远远大于 320, 具有极强的潜在生态危害性, 同时也表明, Cd 的潜在生态危害

表 4 叶子重金属元素的潜在生态危害系数与综合危害指数

Table 4 Potential ecological hazard coefficient and comprehensive hazard index of foliar heavy metal elements

元素	E_r^i						
	A	B	C	D	E	F	G
Cr	16.26	122.79	2.27	0.16	0.52	17.56	25.49
Cu	6.08	21.60	0.10	0.12	0.37	4.27	4.94
Ni	43.84	383.50	6.18	0.47	1.46	47.60	68.28
Mn	1.25	3.28	0.04	0.03	0.05	1.49	1.35
Pb	8.19	12.54	0.19	0.24	0.26	11.02	7.36
Cd	642.74	5 482.59	28.77	32.87	15.64	3 918.71	1 475.90
As	25.23	63.59	0.79	0.72	0.69	19.62	14.26
综合危害指数 (RI)	743.63	6 089.91	38.38	34.64	19.04	4 020.29	1 597.61

表 5 叶子重金属的潜在风险分级标准

Table 5 Potential risk classification standard of foliar heavy metal elements

潜在生态风险	轻度	中度	较强	很强	极强
E_r^i	<40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	≥320
RI	<150	150 ~ 300	300 ~ 600	>600	

系数远远大于其它重金属, Cd 为该地区最具潜在危害性的重金属; 其次是 Ni、Cr 和 As, 尤其是在 B 样品中的 Ni 潜在生态危害系数 E_r^i 达到了 383.5, Cr 在 B 样品中潜在生态危害系数为 122.79, 表明在 B 样品中 Ni、Cr 具有较强的潜在生态危害性. 剩余 3 种元素在 A、B、F、G 样品中的潜在生态

危害系数 E_r^i 均小于 40, 尚属于轻度生态风险重金属. A、B、F、G 样品中叶子的重金属综合危害指数 RI 均超过 300, 表明 4 种叶子均具有较强的生态危害性. 其中 B、F、G 样品中叶子的 RI 分别为 6 089.91、4 020.29、1 597.61, 表明该叶子重金属具有极强潜在生态风险, A 样品中叶

子 $RI = 743.63$, 定性为很强潜在生态风险, C、D、E 样品叶子中潜在生态危害相对轻, 也达到较强程度。

依据全国叶子重金属背景值, 按照公式计算研究区 7 种植被叶子重金属的潜在生态风险系数 (E_r^i) 和综合生态风险指数 (RI), 对其潜在生态危害性进行说明。Cd 和 As 是 7 种重金属元素中最主要的生态风险贡献因子, 平均贡献分别为 22.84% 和 21.62%, 其它 5 种元素贡献相对较低, 合计为 55.54% (表 4)。研究区 7 种重金属元素潜在风险评价结果, 由综合生态风险指数可以看出整体表现为低等级风险, 14.28% 为中等级生态风险, 57.14% 的取样点的 Cd 元素具有极强等级生态风险。根据采样点重金属的平均潜在生态风险系数

值, 宝鸡市滨河路植被叶子 7 种重金属平均潜在生态风险程度大小顺序为: $Cd > Ni > Cr > As > Pb > Cu > Mn$ 。Cu、Mn 和 Pb 其所取样点潜在生态风险系数 (E_r^i) 均小于 40, 表现为低生态风险, 说明这 3 种元素对研究区的生态环境有较小的潜在危害。As 的取样点中 85.71% 的潜在生态风险系数 (E_r^i) 小于 40, 只有 14.3% 的取样点潜在生态风险系数 (E_r^i) 达到中等生态风险, 说明它的潜在危害处于轻微水平。Cd 元素有 57.14% 的潜在生态风险系数 (E_r^i) 为极强生态风险, 说明 Cd 是该研究区域最应引起注意的重金属元素。就整体而言, 滨河路植被叶子中 7 种重金属的 RI 值在 19.04 ~ 4 020.29, 除个别样品外, 其余值均远高于 150, 处于高风险, 其中仅 2% 的样品处于低风险。

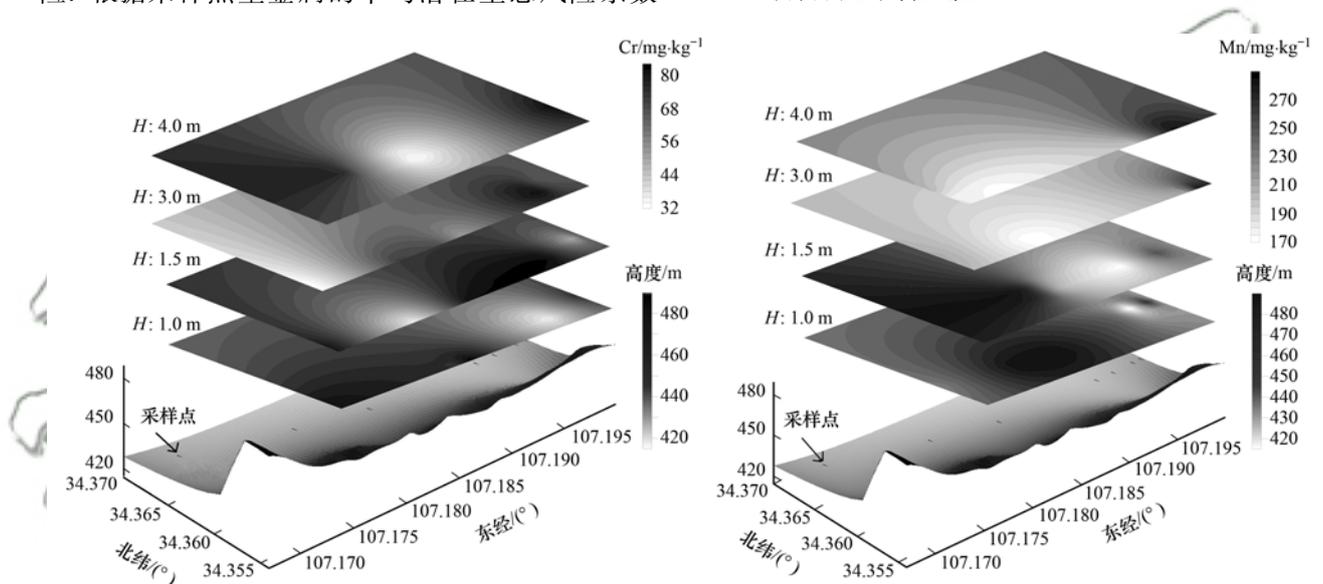


图 5 滨河路植被叶子重金属 Cr 和 Mn 含量的空间变化特征

Fig. 5 Spatial variation characteristics of heavy metal Cr and Mn content in vegetation leaves in Binhe Road

通过之前 Cr、Cd、Mn、Pb 和 Cu 的累积结果显示, 交通主干道有非常高的累积值, 这主要可能源于车辆运行过程中产生的金属物质。先前的研究表明^[21-24,33,34], 交通源是 Cr、Mn、Pb、Cd 和 Cu 等多种重金属的重要来源, 比如橡胶轮胎磨损、润滑油的耗损、刹车皮的磨损及汽车金属部件的碰撞会产生 Cr、Cd 和 Cu, 以及含铅汽油的使用会产生 Pb 等。滨河路不同植被叶子重金属元素累积量的差异性水平可能与植物本身有关, 也与采样区大气重金属污染程度、重金属种类、植被叶子空间变化等密切相关^[19], 这与许多学者的研究结果趋同。通过对滨河路植被叶子重金属含量及污染程度较高的 Cr 和 Mn 做等值线空间分布表明(图 5), 不同种类植被叶子其重金属值随着树种的高度增加而呈现减小的趋势, 重金属 Cr 和 Mn 含量均表现为距离地面 1 m 处浓度最高, 浓度随距离的增加而减小, 原因可

能是在距离地面 1 m 的高度范围内, 污染源既包括了来自地面交通污染, 又包括了大气降尘污染, 在第 1.5 m、3 m 处的不同树种中, 由于不同植被类型对重金属的吸收程度也不同, 可能远离交通等污染源, 植被叶子中重金属浓度有所下降, 也跟空气中大气降尘中的污染物质有关。另外, 图中 3 m 处植被叶子重金属含量最低, 可能由于此处高度, 既远离地面交通带来的污染, 也未达到高空大气污染的范围, 因此出现重金属含量的低峰期。而 4 m 处的重金属含量呈现出整体值明显低于 1 m、1.5 m 处的值, 原因可能是距离地面高度较高, 远离了交通污染源, 主要受大气降尘污染有关。

4 结论

(1) 宝鸡市滨河路植物叶子中重金属元素的含量富集最多为 Cr、Mn 和 Pb, Cr、Cu、Ni 和 Mn 含

量的最高值均出现在金叶女贞的植被叶子中, 对 Pb 富集最多的是大叶女贞, Cd 富集最多的是塔松, As 富集最多的是红叶李。不同种类植被叶子中, 金叶女贞对重金属表现出较强的吸附作用, 并在体内积累。植被叶子中重金属含量随着距离地面高度, 车辆尾气等污染源距离的增大而减小, 污染范围为离地面大约 1 m 高的区域。

(2) 滨河路不同种类植被叶子中重金属污染程度分别为塔松(A): Cd > Ni > Cr > As > Pb > Mn > Cu; 侧柏(B): Cd > Ni > Cr > As > Cu > Mn > Pb; 金叶女贞(F): Cd > Ni > Cr > Pb > As > Mn > Cu; 大叶女贞(G): Cd > Ni > Cr > Pb > As > Mn > Cu。塔松、柏树、金叶女贞、大叶女贞 4 种植物叶子重金属污染物严重超标, 属重度污染植被; 紫荆、红叶李、悬铃木重金属含量轻度超标, 植被叶子属轻度污染。

(3) 植被叶子中 Cr、Cu、Ni、Mn、Pb、Cd 和 As 等 7 种重金属的平均潜在生态风险程度大小顺序为: Cd > Ni > Cr > As > Pb > Cu > Mn, RI 值变化范围为 19.04 ~ 4020.29, 绝大部分数值均远高于 150, 表明处于高风险, 其中仅 2% 的样品处于低风险。

致谢: 张瑞、王海洋、周雄辉、曹宁宁、张洋、张臻参加野外采样, 在此深表感谢。

参考文献:

- [1] Wu X L, Chen S Z, Qian Y. Study on the automatic generation of emergency monitoring Scheme of atmospheric pollution based on GIS[J]. Meteorological and Environmental Research, 2010, 1(4): 7-10.
- [2] 万欣, 关庆伟, 邱靖, 等. 3 种垂直绿化植物叶片对 Zn、Cu、Pb 的富集能力[J]. 城市环境与城市生态, 2010, 23(2): 33-35.
Wan X, Guan Q W, Qiu J, et al. Accumulation ability of three vertical plants' leaves to Zn, Cu, Pb[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2010, 23(2): 33-35.
- [3] Alhassan A J, Sule M S, Atiku M K, et al. Study of correlation between heavy metal concentration, street dust and level of traffic in major roads of Kano Metropolis, Nigeria[J]. Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences, 2012, 20(2): 161-168.
- [4] Christoforidis A, Stamatis N. Heavy metal contamination in street dust and roadside soil along the major national road in Kavala's region, Greece[J]. Geoderma, 2009, 151(3-4): 257-263.
- [5] Wei X, Gao B, Wang P, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 112: 186-192.
- [6] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution[J]. Environmental Pollution, 1998, 99(3): 347-360.
- [7] 余海龙, 黄菊莹. 城市绿地滞尘机理及其效应研究进展[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 238-241.
Yu H L, Huang J Y. Research advances in mechanism and effect of dust retention of urban green areas[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(6): 238-241, 247.
- [8] 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 等. 细颗粒物(PM_{2.5})与植被关系的研究综述[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2203-2210.
Zhao C X, Wang Y J, Wang Y Q, et al. Interactions between fine particulate matter (PM_{2.5}) and vegetation: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 2203-2210.
- [9] Escobedo F J, Nowak D J. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest[J]. Landscape and Urban Planning, 2009, 90(3-4): 102-110.
- [10] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2006, 4(3-4): 115-123.
- [11] Givoni B. Impact of planted areas on urban environmental quality: a review[J]. Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere, 1991, 25(3): 289-299.
- [12] Dzierzanowski K, Popek R, Gawrońska H, et al. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species [J]. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(10): 1037-1046.
- [13] 胡守云, 段雪梅, 沈明洁, 等. 北京首钢工业区大气重金属污染树叶的磁学响应[J]. 科学通报, 2008, 53(4): 437-445.
Hu S Y, Duan X M, Shen M J, et al. Magnetic response to atmospheric heavy metal pollution recorded by dust-loaded leaves in Shougang industrial area, western Beijing [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(10): 1555-1564.
- [14] Baker A J M, McGrath S P, Sidoli C M D, et al. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants[J]. Resources, Conservation and Recycling, 1994, 11(1-4): 41-49.
- [15] Kumar P B A N, Dushenkov V, Motto H, et al. Phytoremediation: the use of plants to remove heavy metals from soils [J]. Environmental Science & Technology, 1995, 29(5): 1232-1238.
- [16] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力[J]. 中国环境科学, 2002, 22(1): 48-51.
Su D C, Huang H Z. The phytoremediation potential of oilseed rape (*B. juncea*) as a hyperaccumulator for cadmium contaminated soil [J]. China Environmental Science, 2002, 22(1): 48-51.
- [17] 刘和, 陈英旭. 环境生物修复中高效基因工程菌的构建策略[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(2): 208-212.
Liu H, Chen Y X. Construction strategies of genetically engineered bacteria for environment bioremediation [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Science), 2002, 28(2): 208-212.
- [18] 王爱霞, 张敏, 黄丽斌, 等. 南京市 14 种绿化树种对空气中重金属的累积能力[J]. 植物研究, 2009, 29(3): 368-374.
Wang A X, Zhang M, Huang L B, et al. Accumulation capacity of Nanjing 14 virescence tree species to heavy metal pollutants of the atmosphere [J]. Bulletin of Botanical Research, 2009, 29(3): 368-374.
- [19] 李少宁, 孔令伟, 鲁邵伟, 等. 北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1891-1900.
Li S N, Kong L W, Lu S W, et al. Beijing common green tree leaves' accumulation capacity for heavy metals [J]. Environmental Science, 2014, 35(5): 1891-1900.
- [20] 王亚宇. 乌鲁木齐市土壤重金属空间分布及行道树对重金属的富集特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2008.
- [21] 薛皎亮, 刘红霞, 谢映平. 城市空气中铅在国槐树体内的积

- 累[J]. 中国环境科学, 2000, **20**(6): 536-539.
- Xue J L, Liu H X, Xie Y P. Lead in city air accumulated by the green tree, *Sophora japonica*[J]. China Environmental Science, 2000, **20**(6): 536-539.
- [22] Pagotto C, Rémy N, Legret M, *et al.* Heavy metal pollution of road dust and roadside soil near a major rural highway [J]. Environmental Technology, 2001, **22**(3): 307-319.
- [23] 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**(1): 797-807.
- [24] Albasel N, Cottenie A. Heavy metal contamination near major highways, industrial and urban areas in Belgian grassland [J]. Water, Air, and soil Pollution, 1985, **24**(1): 103-109.
- [25] 范舒欣, 蔡好, 董丽. 北京市 8 种常绿阔叶树种滞尘能力 [J]. 应用生态学报, 2017, **28**(2): 408-414.
- Fan S X, Cai Y, Dong L. Dust absorption capacities of eight evergreen broad-leaved plants in Beijing, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(2): 408-414.
- [26] 段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 等. 开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2972-2980.
- Duan H J, Cai X Q, Ruan X L, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and its health risk of surface dusts from parks of Kaifeng, China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2972-2980.
- [27] 陈锐章, 彭桂英. 植物根系环境氯、硫含量对叶片氯、硫含量和抗性的影响[J]. 环境科学, 1983, **4**(3): 45-48.
- Chen Y Z, Peng G Y. Effects of chlorine, sulphur content in plant root environment to chlorine, sulphur content in leaf content and resistance [J]. Environmental Science, 1983, **4**(3): 45-48.
- [28] Wang H, Long H L, Li X B, *et al.* Evaluation of changes in ecological security in China's Qinghai Lake Basin from 2000 to 2013 and the relationship to land use and climate change [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **72**(2): 341-354.
- [29] An Z S, Wang P, Shen J, *et al.* Geophysical survey on the tectonic and sediment distribution of Qinghai Lake Basin [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, **49**(8): 851-861.
- [30] 刘飞, 褚慧敏, 郑祥民. 上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应 [J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4374-4380.
- Liu F, Chu H M, Zheng X M. Magnetic response of dust-loaded leaves in parks of Shanghai to atmospheric heavy metal pollution [J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4374-4380.
- [31] Gautam P, Blaha U, Appel E. Magnetic susceptibility of dust-loaded leaves as a proxy of traffic-related heavy metal pollution in Kathmandu city, Nepal [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(12): 2201-2211.
- [32] Bryan G W, Langston W J. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review [J]. Environmental Pollution, 1992, **76**(2): 89-131.
- [33] Dankers P. Relationship between median destructive field and remanent coercive forces for dispersed natural magnetite, titanomagnetite and hematite [J]. Geophysical Journal International, 1981, **64**(2): 447-461.
- [34] 郭广慧, 雷梅, 陈同斌, 等. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(10): 1937-1945.
- Guo G H, Lei M, Chen T B, *et al.* Effect of road traffic on heavy metals in road dusts and roadside soils [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(10): 1937-1945.
- [35] 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.
- [36] Madejón P, Marañón 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.
- [37] 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.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Jian, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)