

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

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

北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究

李少宁¹, 孔令伟², 鲁绍伟^{1*}, 陈波¹, 高琛³, 石媛³

(1. 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093; 2. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 3. 河北农业大学林学院, 保定 071000)

摘要: 以北京地区常见绿化树种为研究对象, 测定叶片和土壤重金属含量, 对其季节变化规律和污染程度的相关性进行分析, 探究植物叶片对土壤中重金属的富集能力。结果表明: ①植物叶片中重金属 Cu、Pb、Zn 含量随季节变化(由春到冬)呈先下降后升高再下降的变化趋势; Cr 含量变化呈先升高后下降的趋势, 秋季达最高值; 春、夏、秋这3季对 Cu 富集能力较强的为柳树和国槐, 冬季为油松; 对 Cr、Pb 富集能力较强的是国槐和侧柏, 冬季为侧柏和白皮松; 对 Zn 富集能力较强的为柳树和白皮松, 冬季为侧柏; ②由市中心至远郊, 4种重金属(Cu、Cr、Pb、Zn)污染程度为: 景山($C=2.48$, C 为污染系数) > 奥林匹克($C=1.27$) > 松山($C=1.20$) > 水关($C=1.18$); ③水关长城景区植物叶片中重金属含量变化较大, 其它3个研究区域重金属含量排序为: 景山 > 奥林匹克 > 松山; 同一树种叶片对不同重金属富集能力排序均为: $Zn > Cu > Pb > Cr$, 且 Zn 含量与 Cr 含量差异极显著($P < 0.01$); ④植物叶片中重金属含量与土壤中相应重金属元素污染程度呈二次多项式关系, 除 Cu 元素外, 其余3种重金属元素含量与土壤中重金属污染程度相关性较强, 且相关系数均达 0.9 以上。

关键词: 土壤; 重金属; 植物叶片; 富集能力; 季节

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1891-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.05.037

Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals

LI Shao-ning¹, KONG Ling-wei², LU Shao-wei¹, CHEN Bo¹, GAO Chen³, SHI Yuan³

(1. Forestry and Pomology Institute, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China; 2. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: Seasonal variation of heavy metal contents in leaves and their relationships with soil heavy metal pollution levels were studied through measuring and analyzing the leaves of the common tree species in Beijing and soil heavy metal contents, to detect heavy metal accumulation ability of plant leaves. The results showed that: ① the contents of Cu, Pb, Zn in plant leaves first decreased and then increased, again declined with changing the seasons (from spring to winter). Cr concentration showed the trend of first increase and then decrease from spring to winter, and the highest in the autumn; the accumulation capacities of Cu for *Babylonica* and *Japonica* were higher in the spring, summer and autumn, while *Tabuliformis* was in winter; the higher accumulation capacities for Cr, Pb were *Japonica* and *Platycladus*, and in winter were *Platycladus* and *Bungeana*; the higher accumulation capacities for Zn were *Babylonica* and *Bungeana*, while *Platycladus* in winter; ② the pollution degree of four kinds of heavy metals (Cu, Cr, Pb, Zn) from downtown to suburbs showed that: Jingshan ($C=2.48$, C is contamination factor) > Olympic ($C=1.27$) > Songshan ($C=1.20$) > Shuiguan ($C=1.18$); ③ the heavy metals concentration of same plant leaves in the water of the Great Wall changed larger, but those in the other three areas showed that: Jingshan > Olympic > Songshan; the ability of same species leaf to absorb different sorts of heavy metals showed that: $Zn > Cu > Pb > Cr$; the difference between Zn content and Cr content was significant ($P < 0.01$); ④ the relationship between heavy metal content in plant leaves and soil heavy metal pollution levels presented a quadratic polynomial relation; the significant correlation was found between other three heavy metal contents of plant samples and soil samples, but they were not the case for the Cu, and the correlation coefficients were above 0.9.

Key words: soil; heavy metals; plant leaves; accumulation capacity; season

随着我国城市化、工业化、现代化建设不断加快, 城市化水平不断提高, 城市“三废”问题突出, 其中大气与土壤中重金属污染问题尤为严重^[1,2], 对人类健康造成严重的威胁。重金属污染主要包括 Zn、Cu、Cr、Pb 等^[3], 这些重金属元素均为植物生长和人类生存不可或缺的营养元素, 但是过多或过少的重金属含量都会引起植物和人体一系列病症。而植物对一定浓度范围内大气污染物和土壤重金属

污染物具有一定程度的吸滞能力, 因此利用植物治理大气和土壤中重金属污染问题具有重要意义^[4,5]。

国内的研究主要集中在木本植物对大气污染物

收稿日期: 2013-08-19; 修订日期: 2013-11-19

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201204108)

作者简介: 李少宁(1975~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为生态功能监测与评价, E-mail: lishaoning@126.com

* 通讯联系人, E-mail: hblsw8@163.com

SO₂、氯气和 HF 的吸滞作用,而对重金属吸滞作用的研究相对较少. 鲁敏等^[6,7]、陈卓梅等^[8]、张颖等^[9]证实了植物对大气污染物中硫、氯、氟具有一定的富集能力. 而植物对重金属的提取主要是通过植物根系吸收,将重金属富集在可收割的部位(根、茎、叶)^[10],也可以通过叶片的持留和去除过程,持留过程主要是截获或吸附大气中污染物,而去除过程主要包括吸收、转化以及同化过程^[11]. Baker 等^[12]、Kumar 等^[13]、苏德纯等^[14]、刘和等^[15]发现草本植物对土壤中部分重金属具有超富集作用,如印度芥菜 (*Brassica juncea*)、油菜 (*Brassica campestris*) 和高秆牧草 (*Agropyron elongatum*) 等,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,而对木本植物吸收重金属研究相对较少. 王亚宇等^[16]和薛皎亮等^[17]发现林木对土壤中重金属 (Cu、Cr、Pb、Zn) 具有一定吸滞作用,但是缺乏植物叶片对重金属富集能力的季节动态变化、空间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综合性研究. 因此,本研究选取北京市常见绿化树种植物叶片对土壤中重金属的富集能力进行了相关分析,以期对相关研究提供一定的理论依据和数据支持.

1 材料与方法

1.1 研究地点和研究对象

本研究地点选择在北京景山公园(市中心)、奥林匹克森林公园(位于北五环的近郊风景区)、水关长城景区(远郊)以及松山自然保护区(延庆县海坨山南麓);选择北京 5 种常见的绿化树种国槐 (*Sophora japonica* Linn.)、柳树 (*Salix babylonica*)、银杏 (*Ginkgo biloba*)、侧柏 [*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco]、白皮松 (*Pinus bungeana* Zucc.) 以及油松 (*Pinus tabulaeformis*) 为研究对象.

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与处理

2012 年 5、8、10、12 月采集植物叶片和相应土壤.

叶片采集与处理:每个树种选取 3 棵样树(长势良好,树龄相近),在其东、西、南、北 4 个方向的上、中、下 3 个层次均匀采集 50 个左右叶片,封存于塑料袋中带回实验室;将叶片用去离子水清洗,晾干,在 105℃ 下杀青后,65℃ 烘干至恒重,粉碎,过 100 目筛.

土壤样品采集与处理:同步采集可以代表样树

附近的典型表层(0 ~ 20 cm)土壤,自然条件下风干,磨碎,过 100 目筛.

1.2.2 样品测定方法

利用 HNO₃-H₂O₂ 微波消解法(仪器为电感耦合等离子发射光谱仪 Thermo 6300)测定土壤中重金属 (Cu、Cr、Pb、Zn) 含量,利用 HNO₃-H₂O₂ 消煮-ICP-OES 法(仪器为电感耦合等离子发射光谱仪 Thermo 6300)测定叶片中重金属 Cu、Cr 和 Zn 含量,利用 HNO₃-H₂O₂ 消煮-ICP-MS 法(仪器为电感耦合等离子体质谱仪 Agilent 7700x)测定 Pb 含量. 具体方法详见文献[18].

1.2.3 数据处理及分析

本研究运用 Mielke 等^[19]提出的生态危害指数法 (potential ecological risk index) 对北京市表层土壤重金属污染进行评价,其中单项污染系数 (C_i) 计算公式为:

$$C_i = C_s^i / C_n^i \quad (1)$$

式中, C_s^i 为土壤表层重金属 i 的实测浓度值; C_n^i 为北京市土壤表层中重金属元素 i 的背景值.

采用 Excel 2003 进行数据处理和制图,并利用 Mintab 15.0 软件对数据进行方差和显著性分析.

2 结果与分析

2.1 植物叶片富集重金属能力的季节变化

2.1.1 植物叶片中 Cu 含量的季节变化

由图 1 可知,同一地区不同树种叶片中 Cu 元素含量差异显著;同一树种在不同季节叶片中 Cu 元素含量差异显著. 从整体来看,侧柏、白皮松、油松叶片中 Cu 元素含量变化(由春到冬,下同),呈先下降后上升再下降的趋势,且秋季叶片中 Cu 含量较高;而柳树和国槐叶片对 Cu 元素含量季节变化(由春到秋,下同)规律性相似,呈逐渐升高的趋势.

由于柳树与国槐为落叶阔叶树种,因此在比较叶片中 Cu 含量全年平均值时仅选择春、夏、秋这 3 个季节(下同). 景山、奥林、水关和松山地区叶片中 Cu 含量(全年平均值)最高的分别为:柳树 (10.80 mg·kg⁻¹)、柳树 (10.62 mg·kg⁻¹)、国槐 (12.79 mg·kg⁻¹)、国槐 (5.68 mg·kg⁻¹),冬季含量最高的均为油松,其含量分别为 5.59、5.18、6.86 和 4.75 mg·kg⁻¹,且全年平均值均大于其它针叶树种.

2.1.2 植物叶片中 Cr 含量的季节变化

图 2 显示,同一地区不同树种叶片中 Cr 含量差异显著;同一树种不同季节叶片中 Cr 元素含量差

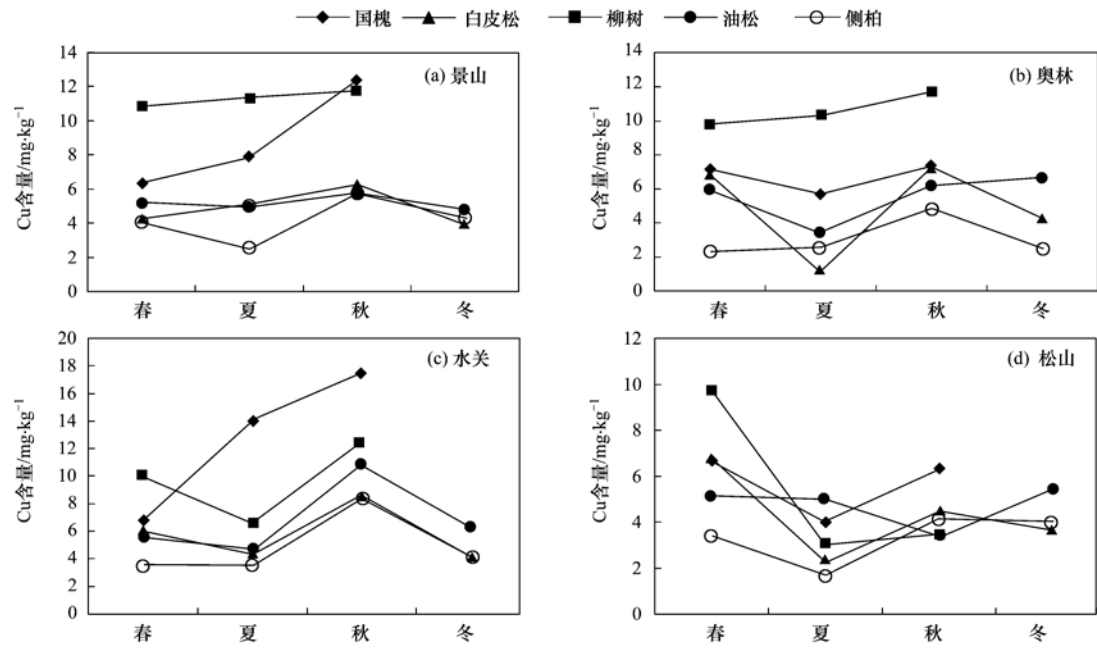


图1 植物叶片中 Cu 含量季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of Cu concentration in leaves

异显著. 从整体来看国槐叶片中 Cr 含量的季节变化基本呈先下降后上升的趋势,且均为秋季含量最高;柳树和白皮松叶片中 Cr 含量随季节变化基本呈逐渐升高趋势;侧柏和油松叶片中 Cr 含量随季节变化呈先升高后下降的变化趋势. 对叶片中 Cr 含量全年平均值比较:景山区和水关区含量最高的均为侧柏,其值分别为 $6.09\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,含量最低的均为白皮松,其含量最高与含量最低的比值分别为:3.12 和 1.87;奥林区和松山

区含量最高的均为国槐,其值分别为 $3.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,含量最低的分别为白皮松和柳树,其比值分别为 2.34 和 1.97. 冬季景山、奥林、水关和松山植物叶片中 Cr 含量最高的分别为:侧柏 ($5.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、侧柏 ($2.34\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、白皮松 ($2.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和白皮松($2.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

2.1.3 植物叶片中 Pb 含量的季节变化

由图 3 可知,发现同一地区不同树种叶片中 Pb 含量差异显著;不同季节同一树种叶片中 Pb 元素

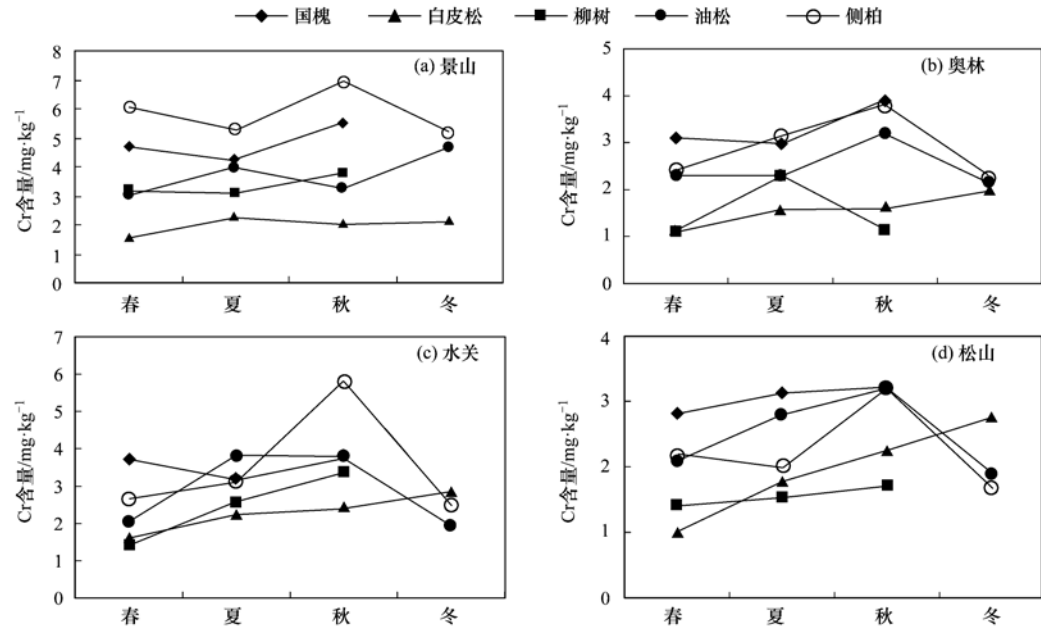


图2 植物叶片中 Cr 含量季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of Cr concentration in leaves

含量差异显著。侧柏、白皮松、油松叶片中 Pb 元素含量变化,呈先下降后上升的趋势;而柳树和国槐叶片中 Pb 含量随季节变化呈先下降后升高的趋势,且秋季含量相对较高。

比较叶片中 Pb 含量全年平均值:景山区和松山区植物叶片中 Pb 含量最高的均为国槐,其值分别为 $9.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别为含量最低的白

皮松和柳树的 3.14 倍和 1.71 倍;奥林区和水关区植物叶片中 Pb 含量最高的均为侧柏,其值分别为 $4.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别为含量最低的柳树和白皮松的 1.97 倍和 1.43 倍。冬季各研究区域叶片中 Pb 含量最高的分别为:侧柏 $9.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (景山)、侧柏 $5.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (奥林)、侧柏 $5.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (水关)和白皮松 $2.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (松山)。

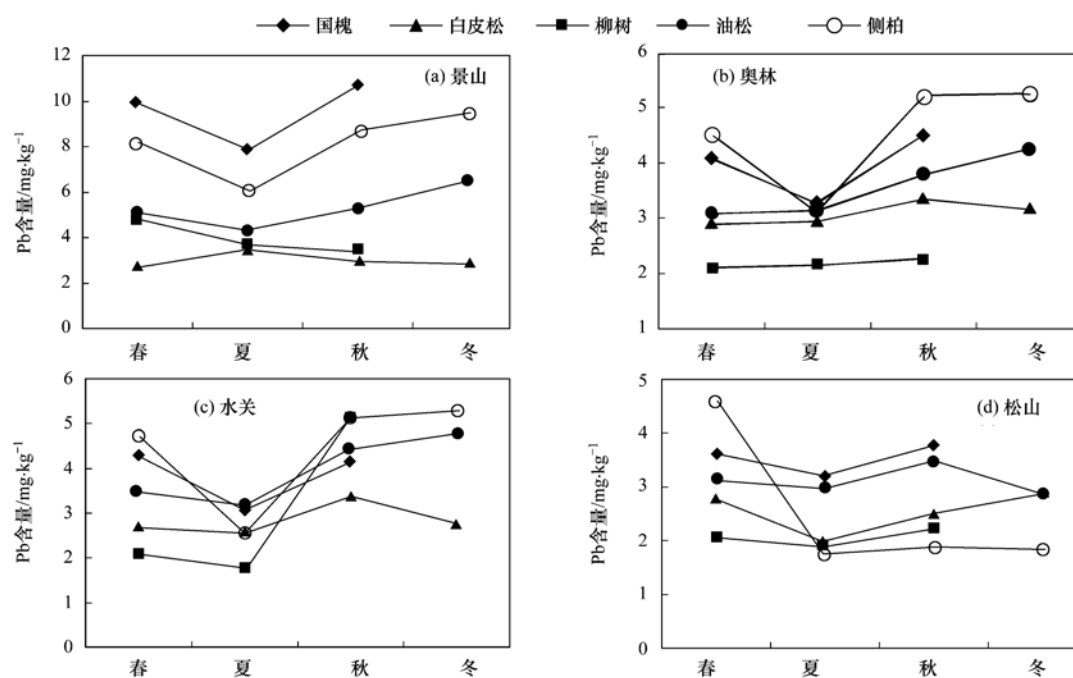


图3 植物叶片中 Pb 含量季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of Pb concentration in leaves

2.1.4 植物叶片中 Zn 含量的季节变化

图4显示,同一地区不同树种叶片中 Zn 含量差异显著;同一树种在不同季节叶片中 Zn 元素含量差异显著。国槐叶片中 Zn 含量随季节变化呈先下降后上升趋势;柳树叶片中 Zn 元素对季节变化规律性不强;侧柏、油松叶片中 Zn 含量随季节变化基本呈先下降后上升在下降的变化的趋势;白皮松叶片中 Zn 含量随季节变化呈先下降后上升的变化趋势。

对叶片中 Zn 含量全年平均值比较:景山区、奥林区、水关区植物叶片中 Zn 含量最高的均为柳树,其含量分别为 43.14 、 38.75 、 $51.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,含量最低的分别是油松、油松、侧柏,最高值分别为最低值的 1.84 倍、1.78 倍和 2.29 倍;松山区含量最高的为白皮松($32.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),含量最低的为油松($16.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);冬季各研究区域叶片中 Zn 含量最高的均为白皮松,其含量变化范围为 $36.78 \sim 57.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2 不同地点土壤重金属含量

通过对 4 个研究区域中土壤重金属含量进行测定,发现土壤中重金属含量季节变化差异不显著($P > 0.05$),因此本文对各研究区域中重金属含量进行年平均,结果见表 1。

由表 1 可知,不同地点重金属含量差异显著,同一地点不同重金属含量差异亦显著。各研究区域中 Cu、Cr、Pb、Zn 含量最高的是景山地区,分别为 56.30 、 58.01 、 79.59 、 $97.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;其中 Cu、Cr、Zn 含量最小的是水关地区,分别为 19.10 、 49.15 、 $67.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Pb 含量最小的是松山地区,其值为 $14.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这说明景山公园(市区)污染物含量相对最高,水关污染物(远郊)含量相对较小。其中各研究区域中 Cu、Cr 和 Zn 这 3 种重金属元素含量均超过北京市土壤重金属含量背景值^[18],表明各研究区域均存在不同程度的 Cu、Cr 和 Zn 污染。

依据 Meilke 等^[19]提出的重金属污染评价指标将土壤中重金属潜在生态危害状况进行分级:污染

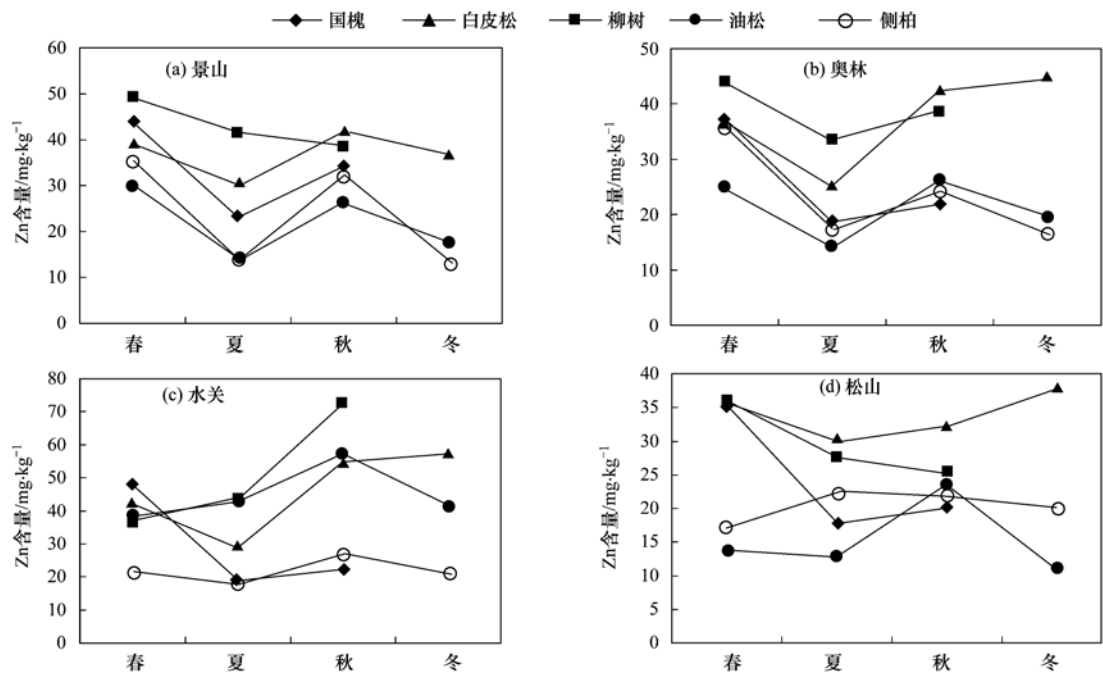


图4 植物叶片中 Zn 含量季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of Zn concentration in leaves

表1 各采样点土壤重金属含量

Table 1 Concentrations of heavy metals in different plots

地点	Cu/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹
景山	56.30	58.01	79.59	97.76
奥林	25.97	53.12	15.42	72.22
水关	19.10	49.15	22.22	67.94
松山	19.41	54.63	14.31	76.00
背景值	18.7	29.8	24.6	57.5

系数 $C_i < 1$ 时,污染强度为轻微; $1 \leq C_i < 3$ 时,污染强度为中度; $3 \leq C_i < 6$ 时,污染强度为强; $C_i \geq 6$ 时,污染强度达到很强.

表2 显示,景山公园重金属污染程度最强,其中 Cu ($C_{Cu} = 3.01$)、Pb ($C_{Pb} = 3.24$) 污染为强度污染. Cr 污染和 Zn 污染在各研究区域均为中等程度污

染,Pb 污染(除景山公园)均为轻微污染. 根据各重金属 C_i 平均值可知土壤中不同重金属污染程度大小为 Cr (1.80) > Cu (1.61) > Zn (1.36) > Pb (1.34). 综合分析各研究区域重金属污染程度:景山($C = 2.48$) > 奥林($C = 1.27$) > 松山($C = 1.20$) > 水关($C = 1.18$).

表2 各研究区域土壤重金属污染程度

Table 2 Soil pollution levels of heavy metals in different plots

地点	Cu	污染程度	Cr	污染程度	Pb	污染程度	Zn	污染程度
C_i 景山	3.01	强	1.95	中度	3.24	强	1.70	中度
C_i 奥林	1.39	中度	1.78	中度	0.63	轻微	1.26	中度
C_i 水关	1.02	中度	1.65	中度	0.90	轻微	1.18	中度
C_i 松山	1.04	中度	1.83	中度	0.58	轻微	1.32	中度
C_i 平均值	1.61	中度	1.80	中度	1.34	中度	1.36	中度

2.3 不同地点植物富集重金属能力的变化

利用春、夏、秋这3个季节的平均值,对不同地点各植物叶片中重金属含量进行对比分析(见图5). 经 Mintanb 软件分析,不同地点同一树种叶片

中重金属元素含量差异显著. 水关区国槐叶片中重金属 Cu 含量最高为 12.79 mg·kg⁻¹,而重金属 Cr、Pb、Zn 含量最高的均为景山区,其含量分别为 4.79、9.52、33.77 mg·kg⁻¹,含量最低的均为松山

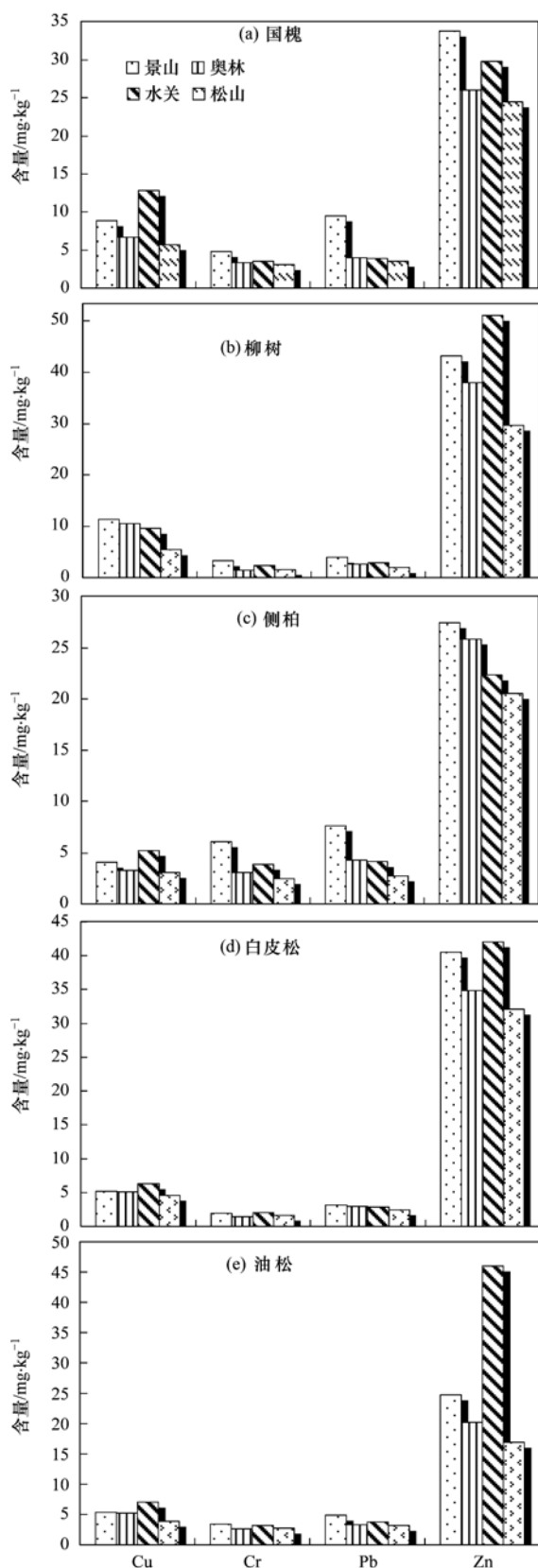


图5 不同地点各树种叶片中重金属含量

Fig. 5 Concentrations of heavy metals in different leaves from each sampling site

区分别是 5.68 、 3.05 、 3.53 和 $24.47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；柳树叶片中 Cu、Cr、Pb 含量最高值均为景山地区，而 Zn 含量最高的为水关区，其含量最高值分别是含量最低值（松山地区）的 2.09 、 2.17 、 1.93 和 1.72 倍；侧柏叶片中 Cu、Cr 含量排序为：水关 > 景山 > 奥林 > 松山，其值变化范围分别为 $3.09 \sim 5.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.46 \sim 6.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，Pb、Zn 含量排序为：景山 > 奥林 > 水关 > 松山，其值变化范围分别为 $2.76 \sim 7.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20.51 \sim 27.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；白皮松叶片中 Cu、Cr、Pb、Zn 含量最高的分别为景山 $5.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、水关 $2.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、景山 $3.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、水关 $32.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；油松叶片中 Cu、Zn 含量排序为：水关 > 景山 > 奥林 > 松山，其值变化范围分别为 $3.38 \sim 7.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $16.84 \sim 46.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，Cr、Pb 含量排序为：景山 > 水关 > 奥林 > 松山，其值变化范围分别为 $2.60 \sim 3.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.20 \sim 4.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

国槐叶片中对不同重金属元素富集能力排序（此值为 4 个不同地点的平均值，下同）为：Zn ($28.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cu ($8.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Pb ($5.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cr ($3.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，其 Zn 含量是 Cr 含量的 7.75 倍；柳树叶片对重金属元素的富集能力排序为：Zn ($40.47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cu ($9.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Pb ($2.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cr ($2.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，其 Zn 含量为 Cr 含量的 18.22 倍；侧柏叶片对重金属元素的富集能力排序为：Zn ($24.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Pb ($4.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cu ($3.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cr ($3.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，其 Zn 含量为 Cr 含量的 6.18 倍；白皮松叶片对重金属元素的富集能力排序为：Zn ($37.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cu ($5.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Pb ($2.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cr ($1.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，其 Zn 含量为 Cr 含量的 20.95 倍；油松叶片对重金属元素的富集能力排序为：Zn ($26.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cu ($5.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Pb ($3.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cr ($2.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，其 Zn 含量为 Cr 含量的 9.05 倍；综上所述各树种叶片对 Zn 元素的富集能力都较高，而对 Cr 元素的富集能力都较弱，且二者差异极显著 ($P < 0.01$)。

2.4 不同污染程度下叶片富集重金属能力的变化

结合土壤中重金属污染程度（表 2）对植物叶片富集重金属元素能力变化进行研究，结果见表 3，其中 y 代表叶片对重金属元素的吸滞量， x 代表土壤中相应重金属元素的污染程度。由表 3 可知，叶片中重金属元素含量与土壤中相应重金属程度均呈二次多项式关系，其中各植物叶片中 Cr、Pb、Zn 的含量与土

壤中各重金属元素污染程度的相关性 R^2 值基本都达到 0.9 以上,表明土壤中重金属元素污染程度与叶片中重金属含量相关性较强,如国槐叶片中 Zn 含量与相应土壤中重金属 Zn 的污染程度的关系式为 $y = 120.91x^2 - 340.49x + 263.17$, R^2 值为 0.999 7; 而国槐、柳树、侧柏、白皮松、油松叶片中 Cu 含量与土壤中 Cu 的污染程度相关性不强,其 R^2 值分别为 0.211 5、0.608 7、0.155 2、0.133 8和 0.011 6.

表 3 叶片对重金属吸滞量与土壤污染程度的回归分析结果

Table 3 Regression analysis between heavy metal concentration of leaves and soil pollution levels

树种	重金属元素	函数式	R^2
国槐	Cu	$y = 4.772\ 6x^2 - 19.535\ x + 24.403$	0.211 5
	Cr	$y = 45.429\ x^2 - 159.65\ x + 143.32$	0.928
	Pb	$y = 0.704\ 6\ x^2 - 0.509\ 2\ x + 3.772\ 8$	0.996 6
	Zn	$y = 120.91\ x^2 - 340.49\ x + 263.17$	0.999 7
柳树	Cu	$y = -4.422\ 3\ x^2 + 19.803\ x - 8.222\ 7$	0.608 7
	Cr	$y = 63.879\ x^2 - 227.05\ x + 203.2$	0.995 6
	Pb	$y = -0.763\ 6\ x^2 + 3.560\ 2\ x + 0.465\ 4$	0.942
	Zn	$y = 358.33\ x^2 - 1\ 047.7\ x + 788.61$	0.998 5
侧柏	Cu	$y = 1.325\ 1\ x^2 - 5.356\ 7\ x + 8.237\ 8$	0.155 2
	Cr	$y = 101.5\ x^2 - 358.61\ x + 319.32$	0.925 3
	Pb	$y = -0.485\ 3\ x^2 + 3.463\ x + 1.540\ 5$	0.924 1
	Zn	$y = 36.647\ x^2 - 97.992\ x + 88.053$	0.505 9
白皮松	Cu	$y = 0.401\ 4\ x^2 - 1.725\ 5\ x + 6.756\ 3$	0.133 8
	Cr	$y = 21.594\ x^2 - 78.011\ x + 71.991$	0.868 9
	Pb	$y = -0.485\ 3\ x^2 + 3.463\ x + 1.540\ 5$	0.924 1
	Zn	$y = 173.87\ x^2 - 503.19\ x + 393.47$	0.988
油松	Cu	$y = 0.106\ 6\ x^2 - 0.479\ 7\ x + 5.786\ 7$	0.011 6
	Cr	$y = 30.271\ x^2 - 108.28\ x + 99.453$	0.998 1
	Pb	$y = -0.389\ 6\ x^2 + 2.115\ x + 2.129\ 8$	0.998 8
	Zn	$y = 475.1\ x^2 - 1\ 405.9\ x + 1\ 041.9$	0.938 8

本研究以国槐为例,分析不同土壤重金属污染程度下,叶片中重金属元素含量变化趋势(图 6).在本研究条件下,叶片中 Cu 含量随土壤中 Cu 元素污染程度的逐渐增加呈先下降后升高的趋势,且在污染程度为 $C_{Cu} = 1.02$ 时,叶片中 Cu 含量达到最高值为 $12.79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 叶片中重金属元素 Cr 和 Pb 含量随土壤中 Cr 和 Pb 元素污染程度的增加呈逐渐升高的趋势,其最高值分别为 $4.79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 叶片中重金属元素 Zn 含量随土壤中 Zn 元素污染程度的增加呈先下降后上升的趋势,在污染强度 $C_{Zn} = 1.70$ 时,叶片中 Zn 含量达到最大值为 $33.77\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

3 讨论

3.1 植物叶片富集重金属能力的季节变化

本研究选取的 4 个研究区域均位于北京,但其间隔距离较远,因此各研究区域温度、湿度、光照强度以及降雨量等其他环境因子均存在一定的差异性,因此对 4 个不同区域植物叶片吸滞重金属的季节变化分别进行了研究,综合分析北京地区植物叶

片对重金属吸滞能力的季节变化规律.

整体来看,植物叶片中重金属元素(Cu、Pb、Zn)含量在春、秋两季含量较高,而在夏季和冬季含量较低,叶片中 Cr 元素含量随季节变化呈先升高(秋季最高)后下降的趋势,而孙淑萍^[20]通过研究发现爬山虎在不同季节对不同的污染物富集能力变化规律不一致,如对 Zn 和 Cr 的吸滞能力表现出春、夏两季吸滞能力较强,而对 Cu 则表现出(由春至秋,下同)逐渐降低的趋势,对 Pb 则表现出逐渐升高的趋势.造成其变化的主要原因是由于所选的物种不一样,其次是由于所选的地理位置不一样,其气候环境差异较大,因表现出不一致的规律性.而不同季节叶片中重金属含量变化主要是由于根系吸收土壤中重金属元素靠叶片的蒸腾拉力通过导管运输至叶片^[21],而叶片的蒸腾拉力受空气温度、光照强度、相对湿度等环境因子影响强烈并且与叶片不同发育阶段有关.春季树木生理活动旺盛,叶片气孔张开,吸收能力强,叶片中重金属元素含量较高;夏季由于叶片大量生长,Cu、Pb、Zn 含量降低是由于“冲稀效应”所致,即元素的累积速度赶不上叶片的

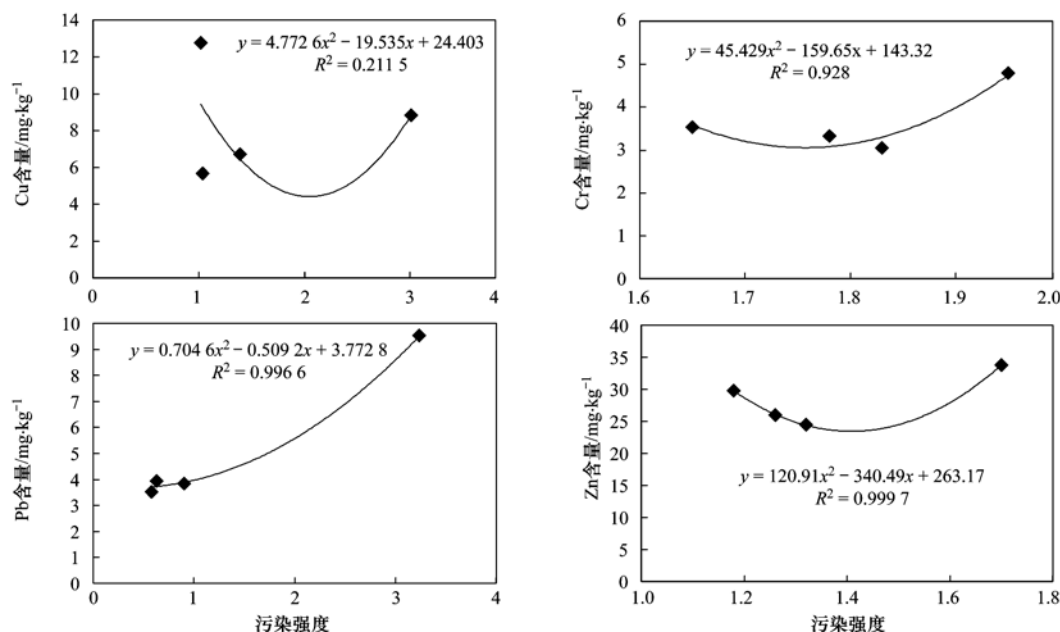


图 6 不同污染强度下国槐叶片富集重金属元素能力变化

Fig. 6 Changes of accumulation capacity of the Japonica plant leaves for heavy metals in different pollution intensities

生长速度;秋季,植物进入缓慢生长期,重金属元素不断累积,形成一个新的高峰;冬季叶片由成熟转入衰老之后,老叶中的部分重金属元素会被重新活化,通过韧皮部运向幼叶或正在发育的果实,即元素的再利用过程,从而导致叶片中重金属含量降低^[22].

3.2 不同地点土壤重金属污染程度

城市土壤重金属污染是反映城市环境污染状况的重要指标之一^[23~26],而土壤中重金属含量受工业、交通和人为因素的干扰,其分布表现出一定的规律性,交通线附近、工业区污染较为严重,而风景区和自然保护区污染则较轻^[27].李纯等^[28]研究表明,北京市区 12 个典型公园表层土壤中的铅含量从市中心向四周郊区呈同心圆逐渐降低的趋势,位于市中心的景山公园表层土壤污染指数最高. Pouyat 等^[29]研究发现在纽约市城区-郊区-农区的土壤中重金属含量(Cu、Ni、Pb)呈现递减的趋势,如 Cu 含量依次为 29.54、14.92、13.84 kg·hm⁻²,而本研究通过测定北京不同区域土壤中重金属含量,结果表明景山公园污染程度最强(如土壤中 Cu 含量为 56.30 mg·kg⁻¹),其次是奥林和松山地区(25.97 mg·kg⁻¹和 19.41 mg·kg⁻¹),水关长城景区污染程度较轻(19.10 mg·kg⁻¹),其研究结果与以往学者得出的土壤中重金属污染程度随研究区域与市区距离呈负相关这一结论不一致.这主要是由自然和人为等因素干扰造成的,景山公园地处北京市城区中心,

人口稠密,污染物排放量较多,造成景山地区土壤重金属污染严重;奥林匹克公园位于北京北五环,相对于市中心污染较小,而松山自然保护区位于北京市郊区延庆县距北京城区最远,是降低北京市受沙尘暴等恶劣天气影响的天然屏障,而且区内野生动物资源丰富也可能造成表层土壤的扰动,促使松山自然保护区部分重金属污染程度高于水关长城景区,但也有部分原因是由于松山自然保护区土壤成土母质与其他研究区域不一致造成的.

3.3 不同地点植物富集重金属能力的变化

对不同研究区域植物叶片中重金属含量进行测试,发现相同树种对同一种金属元素富集能力随地点不同呈现出一定的变化规律.位于景山、奥林和松山的植物叶片中重金属含量呈依次递减的规律,即同一树种叶片中同一重金属元素含量排序为:景山>奥林>松山,而由于水关长城景区位于交通线附近,而汽车尾气的排放,汽车轮胎、发动机、镀金部分都会因为磨损而释放出 Zn、Pb、Cu 等重金属元素,造成空气中重金属含量升高^[30].而植物叶片可以通过气孔直接从大气中吸收重金属元素^[31],使水关区植物叶片中部分重金属含量(Cu、Zn)高于其他地区. Rossini 等^[32]通过研究发现在不同污染区夹竹桃(*Nerium oleander* L.)叶片中重金属含量差异显著,在污染程度较高的地区叶片中重金属含量较高,如叶片中 Cu 含量最高值和最低值分别为 433.50 mg·kg⁻¹和 6.40 mg·kg⁻¹,二者差值达

427. $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明, 同种植物由于长期生长在不同的环境条件下, 对污染物质的吸滞能力不同。同样, 本研究所选的 4 个研究区域距离相对较远, 局部小气候也存在一定差异, 且市中心重金属污染较为严重, 因此位于市中心的植物叶片对重金属的富集能力较强, 而位于近郊和远郊地区的植物叶片吸滞重金属能力相对较弱, 表明在一定浓度范围内环境中污染物含量较高的地方, 叶片对污染物的富集能力较强, 反之, 叶片富集能力较弱。

3.4 不同污染程度下叶片富集重金属能力的变化

通过对植物叶片中重金属含量与土壤中相应重金属污染程度进行回归分析, 发现植物叶片中重金属含量与土壤中重金属污染程度相关性较强, 其中 Cr、Pb、Zn 元素相关性最强, 其相关系数 R^2 值基本都达到 0.9 以上 (如国槐叶片中 Pb 含量与土壤中 Pb 的污染程度的相关系数 R^2 为 0.996 6), 表明植物叶片对重金属的富集能力与土壤中重金属污染程度具有较强的相关性, 而 Rossini 等^[32]通过对工厂 (Cu 排放量较大) 周围不同水平梯度下的意大利石材松 (*Pinus pinea* L.) 叶片中重金属 Cu 进行测定发现, 在距离工厂 0.5 ~ 1 km 范围内, 叶片中 Cu 含量水平 $> 250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在 2 ~ 4 km 范围内, 为 $50 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在 6 ~ 8 km 范围内, 含量 $< 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明植物叶片可直接吸收大气中重金属污染物, 且叶片中重金属含量与大气中的重金属污染程度呈正相关。造成其差异的主要原因是本研究的地点尽量避开了交通线和工业区等大气中重金属严重的地区, 如景山公园、奥林匹克公园和松山自然保护区均为相对洁净区, 大气中重金属污染程度较小, 因此植物叶片中重金属含量与土壤中重金属污染程度相关性较强。但由于水关长城景区靠近交通线附近, 大气中重金属 Cu 污染严重, 从而造成水关区植物叶片中 Cu 含量较高, 最终造成植物叶片中 Cu 元素含量与土壤中 Cu 元素污染程度相关性不强, 因此在研究不同土壤污染程度下植物叶片吸滞重金属能力变化时, 应选在相对洁净区, 尽量避开交通线和工业区等大气中重金属严重的地区。本研究结果表明, 植物叶片中重金属含量与土壤中重金属污染程度呈二次多项式关系, 说明植物叶片能有效地反映当地重金属的状况污染, 可成为一个监测土壤重金属污染的有效指标。

4 结论

植物叶片中 Cu、Pb、Zn 含量随季节呈双峰曲

线, 即春季与秋季为两个峰值, 而 Cr 元素含量呈单峰曲线, 在秋季达到峰值; 不同研究区域土壤中重金属污染程度排序为: 景山 > 奥林 > 松山 > 水关; 不同地点植物叶片中重金属元素含量随研究区距城区距离呈负相关性 (除水关长城景区), 即随着研究区距城区的距离不断增大, 植物叶片中重金属元素含量呈递减趋势; 植物叶片对重金属元素的吸滞能力与相应土壤中重金属污染程度相关性较强, 均呈二次多项式关系。

参考文献:

- [1] Wu X L, Chen S Z, Qian Y. Study on the automatic generation of emergency 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.
- [3] 刘维涛. 基于重金属污染修复的城市森林配置模式的初步研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2006.
- [4] 孙向武, 朱磊, 王国锋, 等. 常见绿化树种对大气中二氧化硫的净化能力研究 [J]. 湖北农业科学, 2008, 47(3): 293-295.
- [5] 欧阳勋志, 廖为明, 刘国华. 城市森林绿地建设的生态学思考 [J]. 江西农业大学学报 (自然科学版), 2002, 24(5): 72-75.
- [6] 鲁敏, 李英杰, 鲁金鹏. 绿化树种对大气污染物吸收净化能力的研究 [J]. 城市环境与城市生态, 2002, 15(2): 7-9.
- [7] 鲁敏, 程正渭, 李英杰. 绿化树种对大气氯、氟污染物的吸滞能力 [J]. 山东建筑工程学院学报, 2005, 20(3): 39-40.
- [8] 陈卓梅, 李庆荣, 杜国坚. 浙江省 42 种园林绿化植物对 SO_2 气体的抗性及其吸收能力研究 [J]. 浙江林业科技, 2007, 27(6): 29-32.
- [9] 张颖, 何天友, 陈凌艳, 等. 麻竹等 4 种竹子 Cl 含量对比 [J]. 亚热带农业研究, 2012, 8(2): 102-104.
- [10] 武正华, 张宇峰, 王晓蓉, 等. 土壤重金属污染植物修复及基因技术的应用 [J]. 农业环境保护, 2002, 21(1): 84-86.
- [11] 陶雪琴, 卢桂宁, 周康群, 等. 大气化学污染的植物净化研究进展 [J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1546-1550.
- [12] 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.
- [13] Kumar P B A N, Dushenkov V, Motto H, et al. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils [J]. Environmental Science & Technology, 1995, 29(5): 1232-1238.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 董鸣. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法——陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [19] Mielke H W, Gonzales C R, Smith M K, *et al.* The urban environment and children's health: soils as an integrator of lead, zinc, and cadmium in New Orleans, Louisiana, USA [J]. *Environmental Research*, 1999, **81**(2): 117-129.
- [20] 孙淑萍. 3 种垂直绿化植物对污染物的富集及生理响应[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [21] 王文卿, 郑文教, 林鹏. 九龙江口红树植物叶片重金属元素含量及动态[J]. 台湾海峡, 1997, **16**(2): 233-237.
- [22] 史瑞和. 植物营养原理[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989.
- [23] De Miguel E, Jiménez de Grado M, Llamas J F, *et al.* The overlooked contribution of compost application to the trace element load in the urban soil of Madrid (Spain)[J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **215**(1): 113-122.
- [24] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(11): 1361-1368.
- [25] Cal-Prieto M J, Carlosena A, Andrade J M, *et al.* Antimony as a tracer of the anthropogenic influence on soils and estuarine sediments[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, **129**(1-4): 333-348.
- [26] Bitukova L, Shogenova A, Birke M. Urban geochemistry: a study of element distributions in the soils of Tallinn (Estonia) [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2000, **22**(2): 173-193.
- [27] Bullock P, Gregory P J, Thornton I. Metal contamination of soils in urban areas[J]. *Soils in the Urban Environment*, 1991, doi: 10.1002/9781444310603.ch4.
- [28] 李纯, 岑况, 王雪. 北京市主要公园土壤中铅含量及污染评价[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(10): 64-66.
- [29] 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**(1): 797-807.
- [30] 蒋德珍, 滕恩江, 刘延良. 土壤背景值数据差异的来源分析及土壤类型对背景值的影响[J]. 中国环境监测, 1996, **12**(2): 21-24.
- [31] Baes III C F, McLaughlin S B. Trace metal uptake and accumulation in trees as affected by environmental pollution[R]. TN (USA): Oak Ridge National Lab., 1985.
- [32] Rossini Oliva S, Mingorance M D. Assessment of airborne heavy metal pollution by aboveground plant parts[J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(2): 177-182.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行