

4个绿化树种叶片和枝条重金属含量差异研究

周婷婷, 刘文建, 王静, 郭军康, 李 珊* (陕西科技大学环境科学与工程学院, 陕西西安 710021)

摘要 [目的]了解不同车流量区域中不同园林绿化树种对不同重金属的吸收情况,探讨其影响因素。[方法]选取陕西科技大学校园内外红叶石楠、女贞、冬青和广玉兰4个园林绿化树种展开相关调查。分别选取校园内无车流、校园外车流较大处4个树种的叶片和枝条为研究对象,利用电感耦合等离子体光谱仪对叶片和枝条内重金属(铬、镍、锌、铜、铅、镉)含量进行分析,使用扫描电子显微镜对其叶片上下表皮形态结构进行观察。[结果]4个树种对Zn的吸收能力显著高于其他5种重金属,校园外红叶石楠叶片对Cr、Cu、Ni的吸收能力较强,红叶石楠枝条对Ni的吸收能力较强,广玉兰枝条对Cu的吸收能力较强;校园内冬青叶片对Cd的吸收能力较强。广玉兰枝条中的Zn含量校园内显著高于校园外,广玉兰叶片及其他树种叶片和枝条的重金属含量在校内外无明显差异。校园内外不同树种叶片和枝条中重金属含量部分有显著差异,且因重金属种类而异。不同园林绿化树种叶片表皮具有不同的形态结构,叶表皮的蜡质结构、沟壑、脊柱、绒毛等增加了其表面粗糙度,从而吸滞不同的重金属元素颗粒。[结论]该研究结果为选择城市防污树种提供参考依据。

关键词 园林绿化树种;叶片;枝条;重金属;含量;吸收能力

中图分类号 X173 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)19-0089-06

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.19.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on the Difference of Heavy Metal Contents in Leaves and Branches of Four Landscaping Tree Species

ZHOU Ting-ting, LIU Wen-jian, WANG Jing et al (School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an, Shaanxi 710021)

Abstract [Objective] To understand the uptake of different heavy metals by different landscape tree species in regions of different traffic density and to explore their influencing factors. [Method] Four landscaping tree species, including *Photinia serrulate*, *Ligustrum lucidum*, *Ilex chinensis*, *Magnolia grandiflora*, were selected inside and outside the campus of Shaanxi University of Science and Technology to carry out related investigations. The leaves and branches of four tree species in the campus without traffic flow and outside the campus with large traffic flow were selected as the research objects, the contents of heavy metals (Cr, Ni, Zn, Cu, Pb, Cd) in leaves and branches were analyzed by inductively coupled plasma spectrometer, and the morphology and structure of the upper and lower epidermis of leaves were observed by scanning electron microscope. [Result] The absorption capacity of four tree species for Zn was significantly higher than the other five heavy metals, and the absorption capacity of the leaves of *P. serrulate* outside the campus for Cr, Cu and Ni was stronger, the absorption capacity of the branches of *P. serrulate* for Ni was stronger, the absorption content of the branches of *M. grandiflora* outside the campus for Cu was stronger, and the absorption capacity of the leaves of *I. chinensis* inside the campus for Cd was higher. The Zn content in the branches of *M. grandiflora* was significantly higher outside the campus than inside the campus, there were no significant differences for content of other heavy metals in leaves of *M. grandiflora*. nor between branches and leaves of other species inside and outside the campus. The content of heavy metals in the leaves and branches of different tree species inside and outside the campus partially differed significantly, and varied according to the type of heavy metals. The leaf epidermis of different landscaping tree species had different morphological structures, and the waxy structure, furrows, ridges and villi of the leaf epidermis increased the roughness of the leaf surface, thus absorbing different heavy metal particles. [Conclusion] The results of this study will provide a reference for the selection of anti-pollution tree species.

Key words Landscaping tree species; Leaves; Branches; Heavy metals; Content; Absorptive capacity

城市绿化树种有许多作用,除了可以有效阻碍太阳辐射、改善噪音问题、美化城市形象之外,还可以通过吸收、附着有效防治重金属污染的扩散^[1-2]。美国环境保护署(EPA)强调21种有毒物质与道路交通有关,其中包括铬、镍、锌、铜、铅、镉6种重金属元素^[3]。该研究采取陕西科技大学学校附近车流量较大处和校内无车流的科大湖畔、图书馆附近处2个不同地点的广玉兰(*Magnolia grandiflora*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、红叶石楠(*Photinia serrulata*)、冬青(*Ilex chinensis*)4个常见园林绿叶树种的叶片和枝条进行研究,利用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-MS)分析技术,测量其中铬、镍、锌、铜、铅、镉6种重金属含量,探讨不同绿化树种对不同重金属元素的吸收作用差异;利用扫描电子显微镜(SEM)观察4个树种叶片结构,研究不同叶片结构差异对重

金属吸收含量的影响;通过对车流量不同的相同树种叶片和枝条中重金属含量进行测定分析,探究交通尾气污染对绿化树种的影响,以期城市防污绿化树种的选择、生物监测和环境质量评价提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理 每个树种校园内外各采集3株树的叶片和枝条。将所采集的样品带到实验室用自来水冲洗3次,剪碎放在锡箔纸中标号,放置60℃烘箱中烘干24h至恒重,备用。

1.2 样品消解 样品110℃杀青,70℃烘干至恒重。准确称取粉碎后的植物样品0.1g置于玻璃消解管中,一个待测样品设置3个消解平行,加入10mL浓硝酸浸泡10h,在消解炉中80℃条件下加热1.5h,120℃条件下加热1.5h,150℃条件下加热3h;打开消解盖,175℃条件下赶酸液体至1mL左右;待消解样冷却后用1%硝酸定容样品至10mL得到待测样品。

1.3 重金属含量测定方法 使用ICP-MS测定叶片和枝条中Cr、Ni、Zn、Cu、Pb、Cd的含量。

基金项目 陕西科技大学“青年拔尖”人才支持项目(126022037)。
作者简介 周婷婷(1998—),女,陕西安康人,从事重金属污染植物修复研究。*通信作者,副教授,博士,从事植物抗逆生物学研究。
收稿日期 2021-10-02

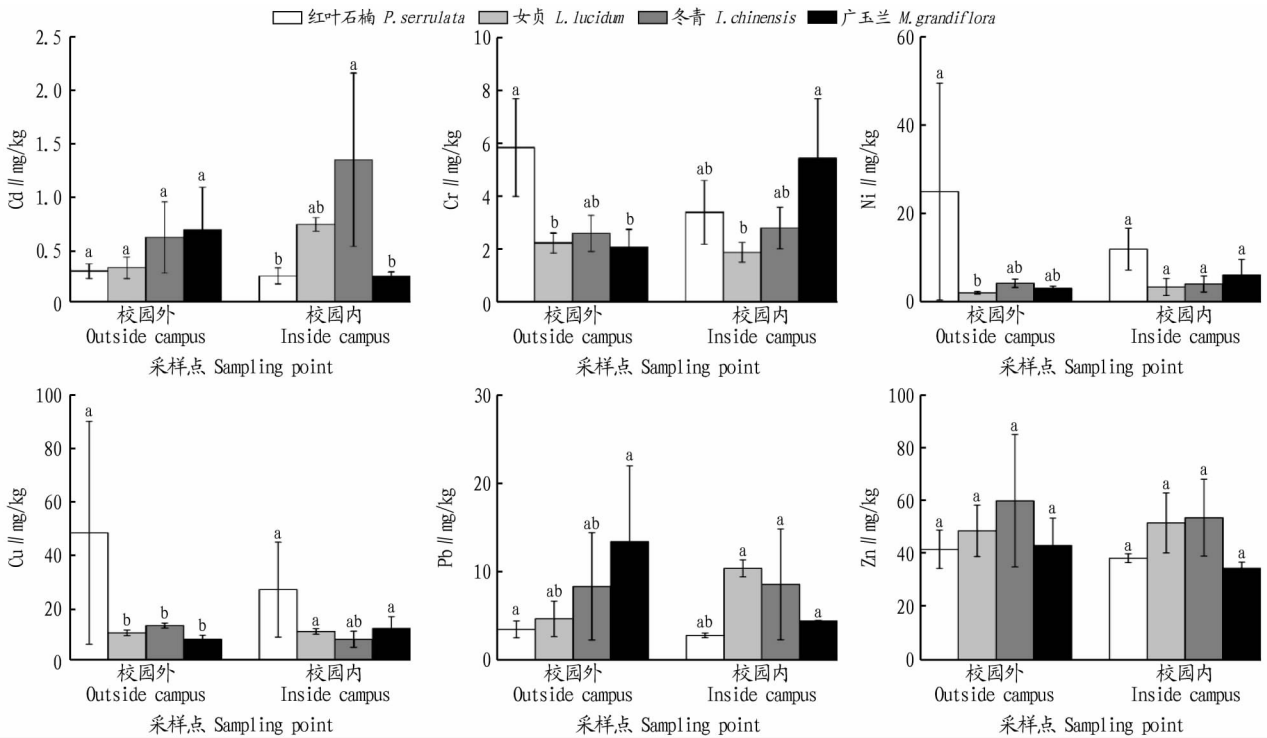
1.4 标准曲线的绘制(以 Cd 为例) 在 1 000 $\mu\text{L/mL}$ 的标准 Cd 溶液中吸取 37.5 μL 定容至 50 mL,此梯度为 0.75 mg/L,并依次稀释,分别为 0.75、0.60、0.45、0.30、0.15 mg/L。按上述 Cd 的测定条件,对各梯度浓度标准溶液进行 ICP-MS 测定,绘制 Cd 浓度(mg/L)对应吸光度的标准曲线。

1.5 叶片形态结构观察 样品在 2.5%的戊二醇溶液中 4 $^{\circ}\text{C}$ 固定过夜,然后按照下列步骤处理样品:①采用 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液(pH 7.0)漂洗样品 3 次,每次 15 min;②采用 1%的锇酸溶液固定样品 1~2 h,再采用 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液(pH 7.0)漂洗样品 3 次,每次 15 min;③采用梯度浓度(30%、50%、70%、80%、90%和 95%)的乙醇溶液对样品进行脱水处理,每种浓度处理 15 min,再用 100%的乙醇处理 2 次,每次 20 min;④临界点干燥;⑤镀膜,观察。处理好的样品在日立 SU-8010 型场发射扫描电镜中观察。

1.6 数据分析 采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 进行数据分析。采用 SPSS 软件进行方差分析,图表绘制采用 origin 软件,图版采用 Photoshop 制作。

2 结果与分析

2.1 不同园林绿化树种各重金属含量的差异 从图 1~2 可以看出,不同的园林绿化树种中同一重金属含量不同。Cd 含量最低,不超过 2.5 mg/kg;校园外 4 个树种叶片和枝条中 Cd 含量没有显著差异;校园内冬青叶片中 Cd 含量显著大于红叶石楠和广玉兰,校园内 4 个树种枝条中 Cd 含量没有显著差异。校园外红叶石楠叶片中 Cr 含量显著大于女贞和广玉兰,校园内广玉兰叶片中 Cr 含量显著大于女贞;校园内外 4 个树种枝条中 Cr 含量均没有显著差异。校园外红叶石楠叶片中 Cu 含量显著大于女贞、冬青和广玉兰,但校园外广玉兰枝条中 Cu 含量显著大于其他 3 个树种;校园内 4 个树种叶片和枝条中 Cu 含量均没有显著差异。校园外红叶石楠叶片中 Ni 含量显著大于女贞,校园外红叶石楠枝条中 Ni 含量显著大于其他 3 个树种;校园内 4 个树种叶片和枝条中 Ni 含量均没有显著差异。4 个园林绿化树种叶片和枝条中 Zn 含量明显高于其他重金属含量,均高于 30 mg/kg,校园内外 4 个树种叶片和枝条中 Zn 含量均没有显著差异。校园内外 4 个树种叶片和枝条中 Pb 含量也没有显著差异。



注:不同小写字母表示同一采样点不同树种间重金属含量差异显著($P<0.05$)

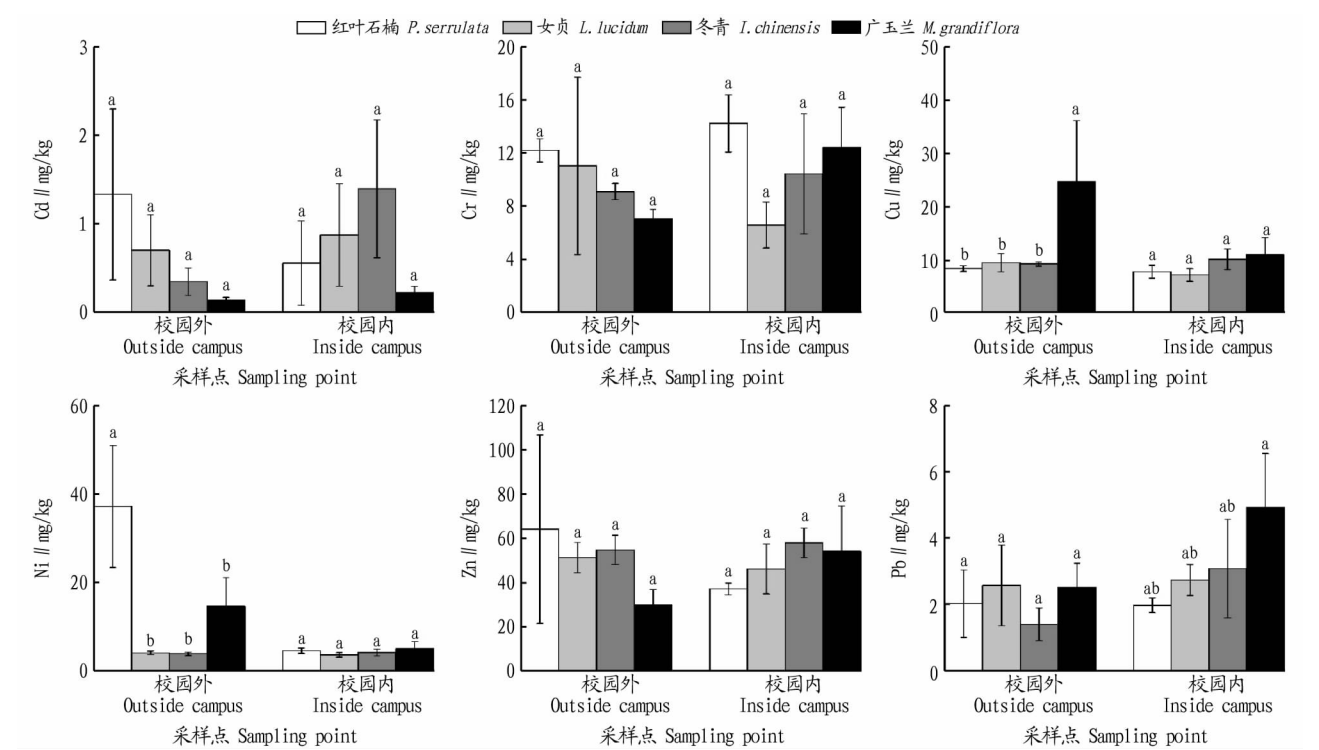
Note: Different lowercase letters indicate significant differences in heavy metal content among different tree species at the same sampling point ($P<0.05$)

图 1 同一重金属在 4 个不同园林绿化树种叶片中的含量

Fig. 1 Contents of the same heavy metals in leaves of four different landscaping tree species

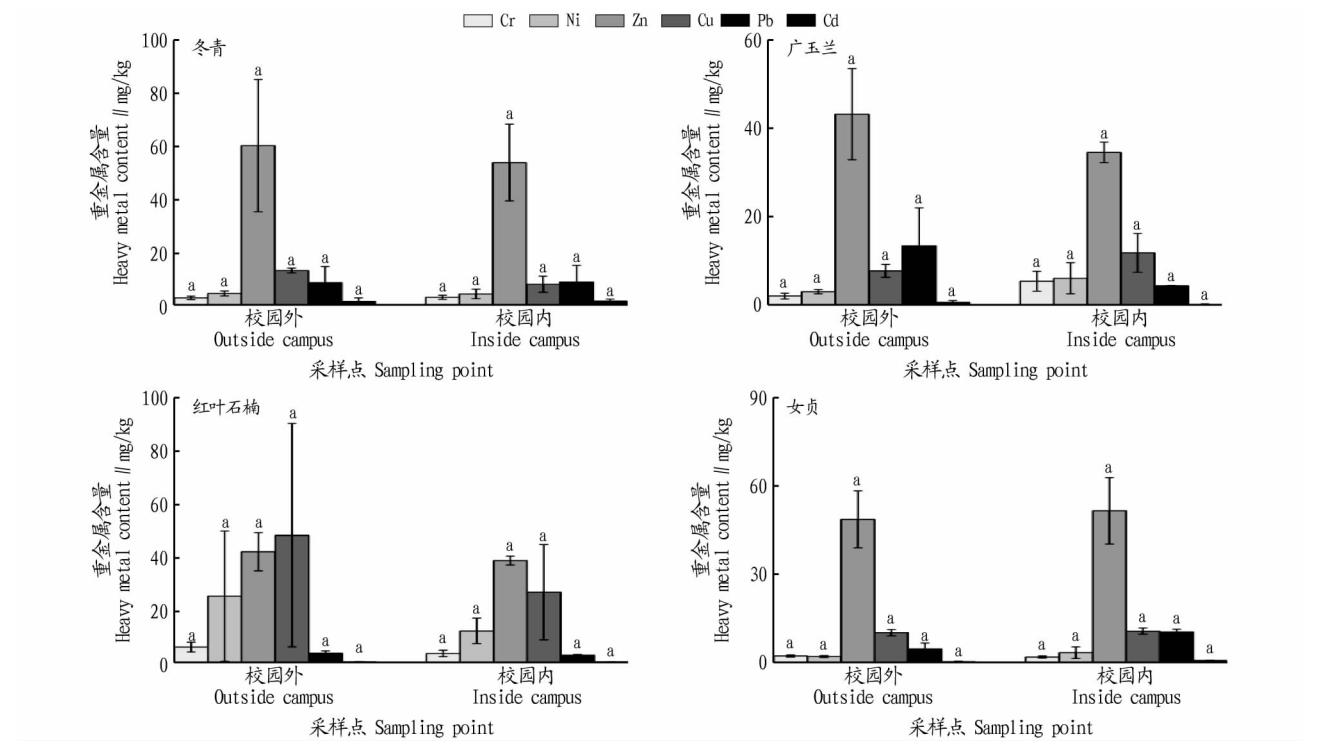
综上所述,4 个树种吸收 Zn 的能力显著高于吸收其他几种重金属,且 4 个树种吸收 Zn 的能力没有显著差异。校园外红叶石楠叶片对 Cr、Cu、Ni 的吸收能力较强,红叶石楠枝条对 Ni 的吸收能力较强,广玉兰枝条对 Cu 的吸收能力较强;校园内冬青叶片对 Cd 的吸收能力较强。校园内外 4 个树种对 Pb 的吸收能力没有显著差异。

2.2 同种园林绿化树种各重金属含量在不同车流量处的差异 从图 3~4 可以看出,校园内冬青、女贞和红叶石楠的叶片和枝条中 6 种重金属(Cr、Ni、Zn、Cu、Pb、Cd)的含量与校园外无显著差异。校园内广玉兰叶片中 6 种重金属的含量与校园外无显著性差异,但校园内广玉兰枝条中 Zn 含量显著高于校园外,其他 5 种重金属含量没有显著差异。



注:不同小写字母表示同一采样点不同树种间重金属含量差异显著($P < 0.05$)
Note: Different lowercase letters indicate significant differences in heavy metal content among different tree species at the same sampling point ($P < 0.05$)

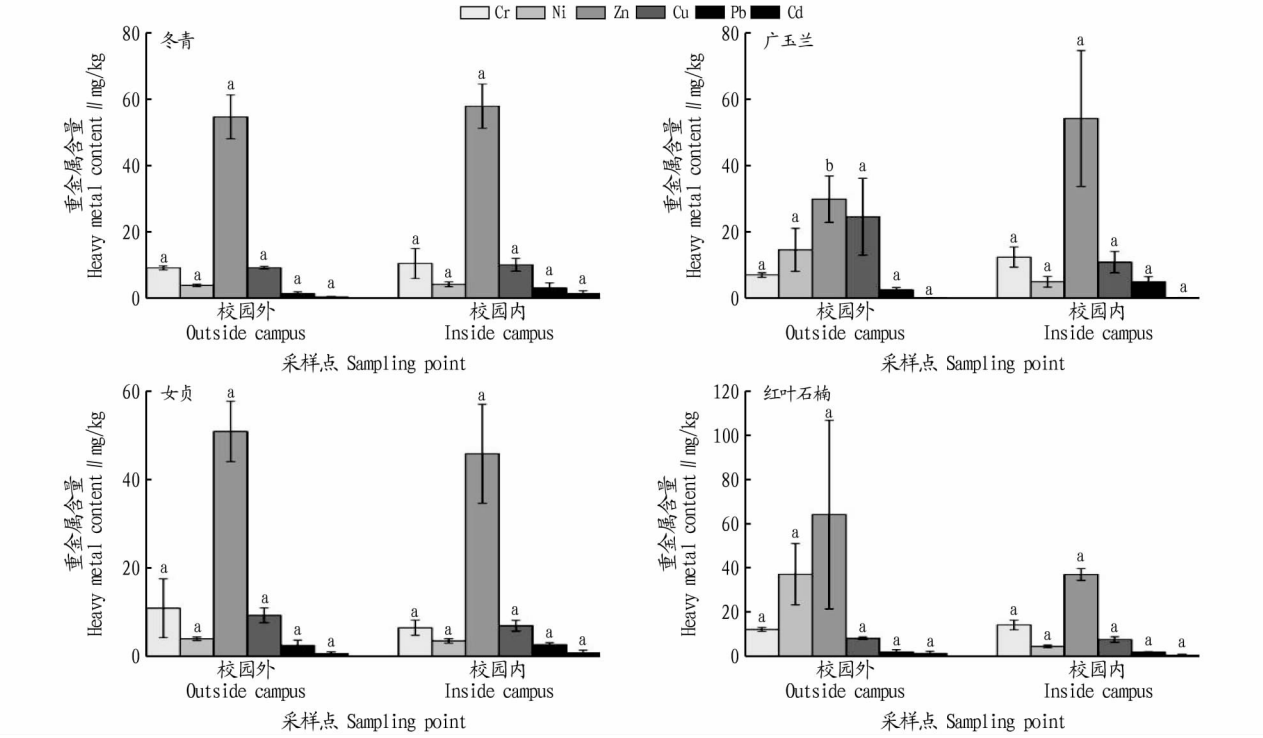
图 2 同一重金属在 4 个不同园林绿化树种枝条中的含量
Fig. 2 Contents of the same heavy metals in branches of four different landscaping tree species



注:不同小写字母表示同一重金属校园内外含量差异显著($P < 0.05$)
Note: Different lowercase letters indicate significant differences in the content of the same heavy metal inside and outside the campus ($P < 0.05$)

图 3 同种园林绿化树种叶片中 6 种重金属校园内外含量
Fig. 3 Contents of six heavy metals in leaves of the same landscaping tree species inside and outside the campus

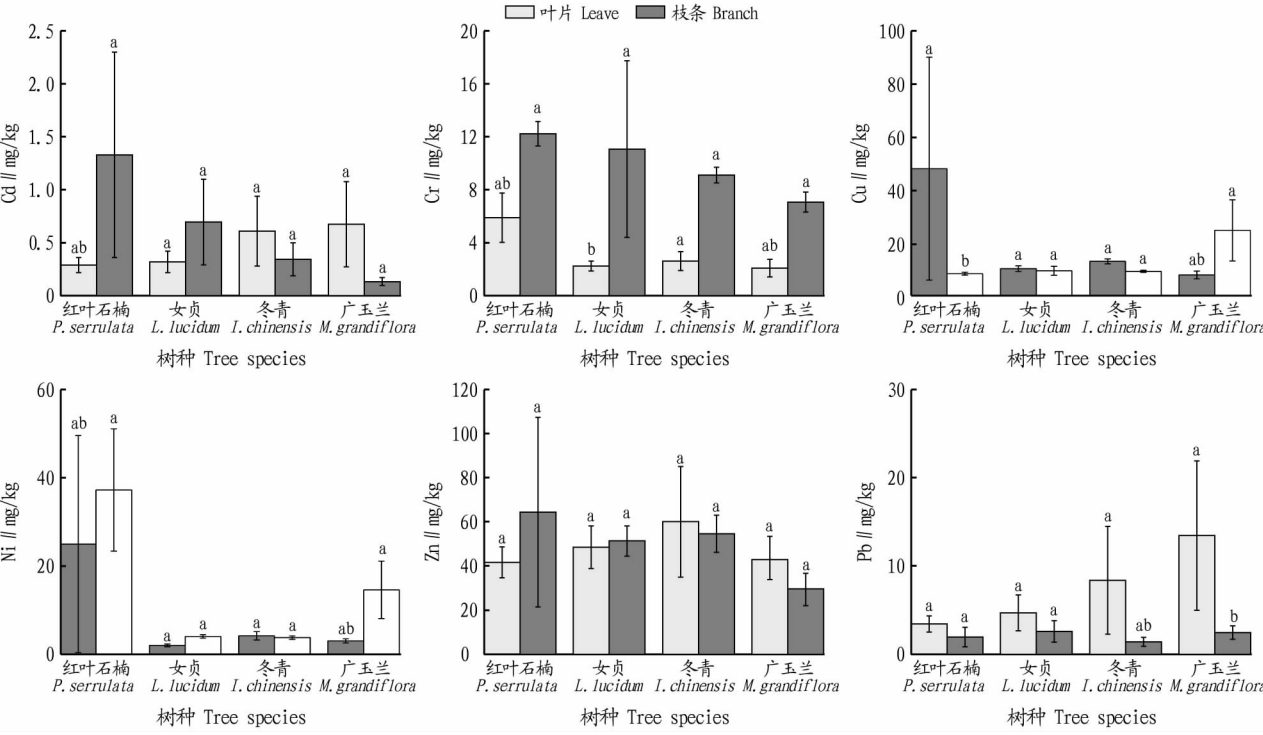
2.3 同一园林绿化树种叶片和枝条重金属含量差异 从图 5~6 可以看出,校园内外的 4 个园林绿化树种叶片和枝条内 Cd、Ni、Zn 的含量均无显著差异。校园外女贞枝条中 Cr 含量显著大于叶片,其他 3 个园林绿化树种叶片和枝条中 Cr 含



注:不同小写字母表示同一重金属校园内外含量差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters indicate significant differences in the content of the same heavy metal inside and outside the campus ($P<0.05$)

图 4 同种园林绿化树种枝条中 6 种重金属校园内外含量

Fig. 4 Contents of six heavy metals in branches of the same landscaping tree species inside and outside the campus

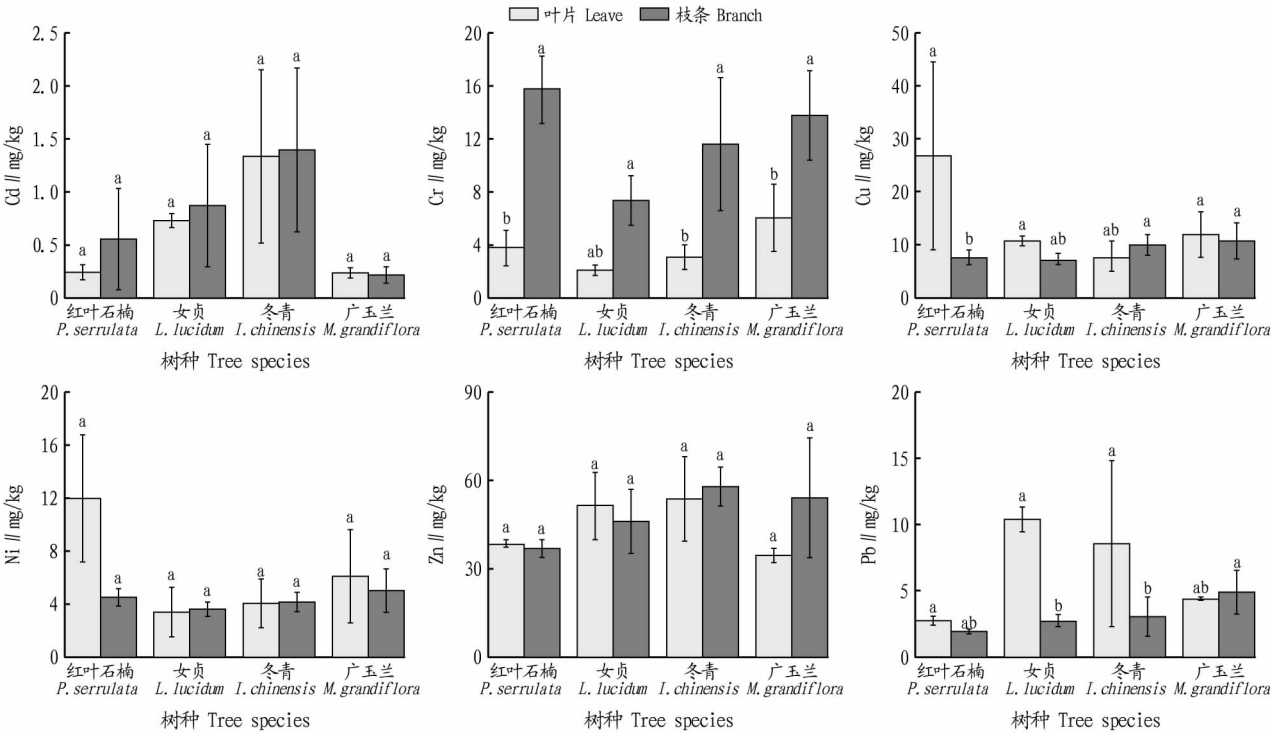


注:不同小写字母表示同一树种叶片和枝条间重金属含量差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters indicate significant differences in heavy metal content between leaves and branches of the same tree species ($P<0.05$)

图 5 同一重金属在校外 4 个园林绿化树种叶片和枝条中的含量

Fig. 5 Contents of the same heavy metals in leaves and branches of four landscaping tree species outside the campus

量无显著差异;校园内红叶石楠、冬青、广玉兰枝条中 Cr 含量显著大于叶片,女贞叶片和枝条中 Cr 含量无显著差异。校园内外红叶石楠叶片中 Cu 含量均显著大于枝条,其他 3 个园林绿化树种叶片和枝条中 Cu 含量无显著差异。校园外



注:不同小写字母表示同一树种叶片和枝条间重金属含量差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters indicate significant differences in heavy metal content between leaves and branches of the same tree species ($P<0.05$)

图 6 同一重金属在校内 4 个园林绿化树种叶片和枝条中的含量

Fig. 6 Contents of the same heavy metals in leaves and branches of four landscaping tree species inside the campus

广玉兰叶片中 Pb 含量显著大于枝条,其他 3 个园林绿化树种叶片和枝条中 Pb 含量无显著差异;校园内女贞和冬青叶片中 Pb 含量显著大于枝条,广玉兰和红叶石楠叶片与枝条中 Pb 含量没有显著差异。

2.4 不同园林绿化树种叶片表皮超微结构 通过扫描电子显微镜可以观察到,4 个树种的叶片具有气孔、绒毛、脊柱等形态结构特征,其中的白色颗粒状物质为吸附的重金属元素(图 7a₁、a₂、b₁、b₂、c₁、c₂、d₁、d₂)。冬青叶片上、下表面均较平整(图 7a),上表面具有蜡质结构,蜡质结构增加了叶片表面的粗糙度,可以更好地吸滞重金属元素颗粒,下表面有大量密集的裸露且排列规则的气孔,可以吸收更多的重金属元素。女贞表皮分布着沟状、孔状沟壑,沟壑突起的程度增加了金属颗粒与叶表皮的接触面积(图 7b)。红叶石楠上表皮具有脊柱,脊柱突起的程度同样增加了金属颗粒与叶表皮的接触面积,使其吸收更多的重金属元素(图 7d)。广玉兰表面具有许多绒毛,气孔被遮掩在绒毛之下,表皮的绒毛可以有效地阻碍金属颗粒的流动,将其滞留在叶表面(图 7c)。

3 结论与讨论

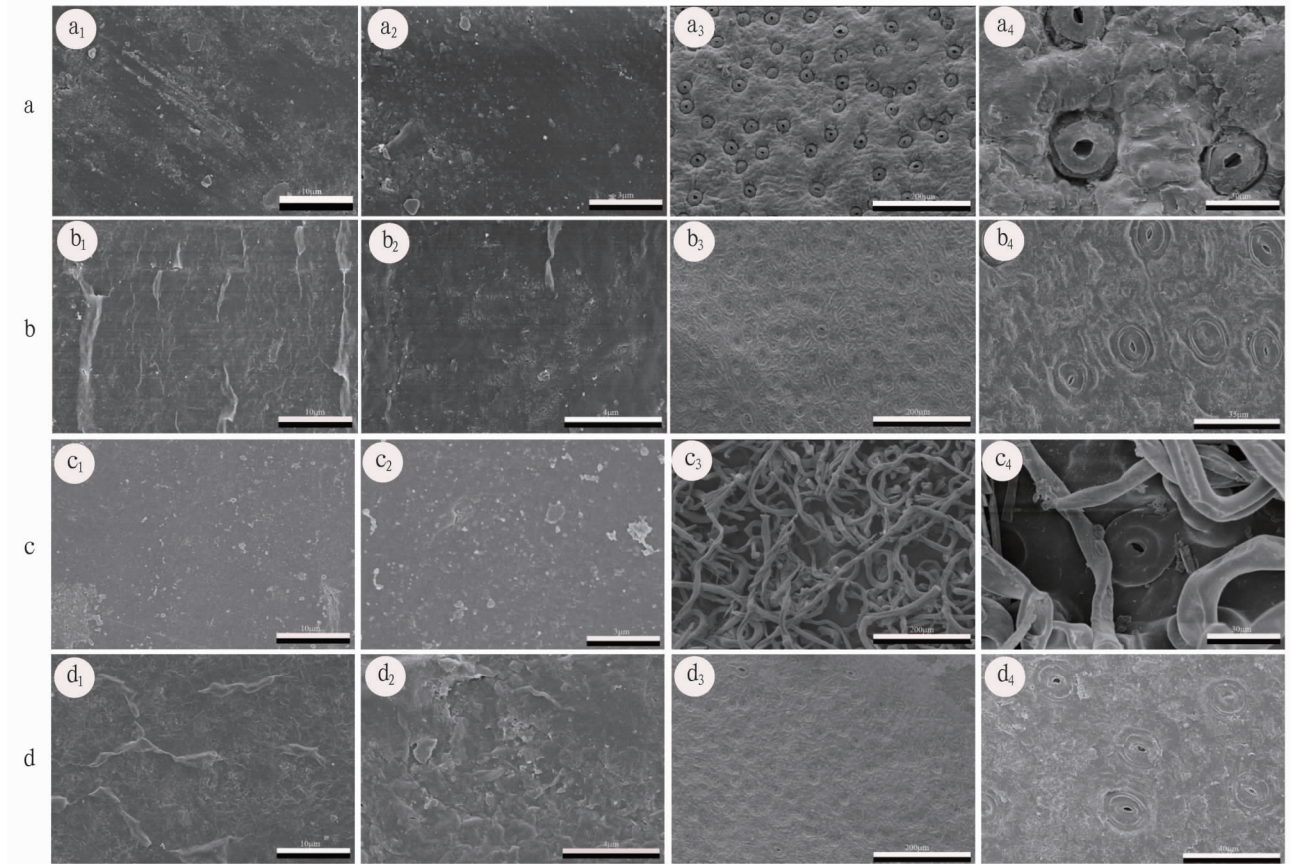
3.1 不同绿化树种吸收重金属含量能力 4 个树种对 Zn 的吸收能力显著高于其他几种重金属,这是因为 Zn 是植物生长所必需的微量元素,这一结论与鲁绍伟等^[4-5]的研究结果一致。兰欣宇^[6]在对北京园林 40 种树木一年生枝条和叶片吸收 Cd、Pd、Cu 能力评价及筛选中,指出对于 Cd 的吸收含量最低,这与该研究结果一致。有研究表明,不同树种叶片单位面积吸附量并非与叶片面积完全呈现正相关,而与上下

表皮平滑程度、表皮毛的有无、气孔密度及气孔大小可能有关系^[7]。在王磊等^[8]的研究中,蜡质表层较厚的旱柳对 Cd 的吸收较好,这与该研究中蜡质结构较厚的冬青对 Cd 吸收能力较强的结果一致。校园外红叶石楠叶片对 Cr、Cu、Ni 的吸收能力较强,校园外广玉兰枝条对 Cu 的吸收能力较强,可能是由于不同树种对重金属的积累能力和耐受机理不同而造成的^[9-10]。

根据各树种叶片表面显微结构扫描的结果可以发现,表面存在较多气孔、凹凸不平、具有细密沟状组织的叶片,其对重金属吸收能力较好,这与王磊等^[8]的研究结果一致。植物通过叶片吸收大气中重金属能力的差异,与叶片特征如气孔的密度、叶片表面性质、内部结构等均具有关系^[11]。该研究中冬青因其密集的气孔对 Cd 吸滞能力较强;广玉兰叶片表皮的绒毛、女贞叶片表皮的脊柱凸起能很好地留滞 Cu 元素;红叶石楠由于表皮具有的特殊结构对 Ni、Cr、Cu 也具有良好的吸附能力。

柴一新等^[12]认为,树种间滞尘能力的差异由叶片形态结构决定,叶片的粗糙程度及叶片上、下表皮具有的形状是造成滞尘能力差异的原因。叶表面具有较深且宽的沟槽,有利于大气颗粒物积累,进而吸收重金属;叶表面存在蜡质结构,有利于大气颗粒物滞留;密集分布有较窄沟槽、较长表皮毛的叶片,滞留大气颗粒物能力较弱。这与该研究结果中冬青叶片吸附 Cd 能力最强符合,但也有研究认为,表面平滑且有蜡质结构的叶片滞尘能力较弱^[13]。测定的季节、树龄、采样时间等均会造成结果的差异性。综上所述,不同园林绿化

树种叶片具有不同的形态结构,都会对元素吸收过程产生影响。



注:a. 冬青;b. 女贞;c. 广玉兰;d. 红叶石楠;a₁、a₂、b₁、b₂、c₁、c₂、d₁、d₂ 为上表皮;a₃、a₄、b₃、b₄、c₃、c₄、d₃、d₄ 为下表皮
Note:a. *I. chinensis*;b. *L. lucidum*;c. *M. grandiflora*;d. *P. serrulata*

图 7 不同园林绿化树种叶片表皮结构

Fig. 7 Leaf epidermis structure of different landscape tree species

3.2 同种绿化树种吸收重金属含量与车流量的关系 同种绿化树种在不同车流量的采样区,叶表皮中的重金属元素含量不同。田媛等^[14]研究发现北京市土壤中 Cu、Pb、Cd 存在不同程度的污染,尤以高速公路区和交通繁忙区较重,通过综合污染评价方法得出北京土壤重金属污染排序为高速公路区>交通繁忙区>工业区>居民区>城市>公园休闲区。陈潇霖等^[15]研究发现公园内土壤重金属含量整体较公园外交通干道土壤重金属含量低,早晚高峰时段堵车频发地区土壤中重金属含量较高。通过北京市航天桥道路尘土附近道路土壤及玉渊潭公园土壤重金属含量的对比研究表明,道路尘土的重金属污染最为严重,道路绿地植物对重金属的富集效应基本均大于公园植物^[16]。韩玉丽等^[17]对北京不同功能区重金属分布进行研究,结果发现,土壤重金属元素含量总体表现为交通区、工业区、居民区的含量高于相对清洁的公园区。这些研究表明车流量是影响植物体内重金属含量差异的原因。但该研究广玉兰枝条中 Zn 含量在校内明显高于校外,笔者分析可能由于一种重金属的变化会影响其他重金属吸收,由于是校园外广玉兰中 Cu 含量较高,导致 Zn 含量下降。

3.3 不同绿化树种叶片与枝条吸收重金属含量差异 重金属在植物体内不同器官中的分布存在显著差异,该研究中叶

片和枝条重金属含量因树种、重金属种类的不同而异,可能与各重金属元素在植物体内的转运机制及其重金属形态等因素的差异有关^[18]。宋雪英等^[19]对沈阳市工业搬迁区 8 种常见乔木树种重金属进行叶片和枝条 Zn 含量测定,结果显示,除 2 种树木叶片大于枝条外,其他树种差异均不显著,这与该研究结果一致。王爱霞等^[20]选择在交通繁忙区(污染点)研究二球悬铃木各器官重金属(Cu、Ni、Pb、Zn)含量,结果发现,4 种重金属元素的累积量及其分布比例均在叶片中最高,在一年生枝条中较低。这与该研究中校园外广玉兰 Pb 含量、红叶石楠 Cu 含量呈叶片显著大于枝条一致,但与校园外 4 个园林绿化树种 Ni、Zn 含量在枝条和叶片中均无显著差异不一致。可能是污染情况和树种的不同导致吸收含量的差异性。程佳雪等^[21]在北京 6 种园林树木的研究中得到一年生枝条 Zn 和 Cr 含量均高于叶片,5 种树木一年生枝条 Ni 和 As 含量与叶片之间没有显著差异,这与该研究中 Cr 和 Ni 含量差异性的研究结果相吻合。

参考文献

[1] KULSHRESHTHA K,RAI A,MOHANTY C S,et al. Particulate pollution mitigating ability of some plant species[J]. International journal of environmental research,2009,3(1):137-141.

河流均为轻度污染水平。2 种水质评价方法存在一定差异,推测为 Shannon-Wiener 多样性指数分析较为保守,对耐污种增多或耐污种取代敏感种的变化不太灵敏,对水体污染状况分析精确度相对偏低^[22],而 BI 指数分析法能够较为全面的分析评价底栖动物的耐污能力以及水域生态环境的多样性,评价结果较为客观、准确,适用于黄河干流与黑河、白河水质评价。水质理化指标结果显示,3 条河流均属于国家 II 类水质标准,结合上述大型底栖动物生物评价指数进行综合分析,可初步认为 3 条河流均属于清洁状态。

底栖动物移动能力差、世代交替较长,对外界干扰反应迅速,定性采样方便^[23]等特点。在该研究调查采样过程中,由于底栖动物个体分布散乱,采样中出现一定误差性,鉴定底栖动物样本也需要大量的人力物力和时间等,这给该次调查研究带来较大的困难。目前,黄河上游干流及两条支流黑、白河的水质状况几乎未见报道,该研究能够初步展现 3 条水体的水质状况,同时也为黄河上游水域水生环境保护提供基础资料和理论数据。后续将进行更加深入全面的研究,为保护黄河上游水环境提供科学依据和参考。

参考文献

- [1] 王兆印,田世民. 黄河的综合治理方略[J]. 天津大学学报,2008,41(9): 1130-1135.
- [2] 赵鑫,王琳,郑帅,等. 黄河中游支流无定河流域源头区浮游生物和底栖动物群落特征与环境因子分析[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(10): 121-132.
- [3] 中国科学院西北高原生物研究所. 青海经济动物志[M]. 西宁:青海人民出版社,1989.
- [4] 沈毓芳,章宗涉,龚循矩,等. 微生物检测新技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [5] 王硕,林育青,陈求稳,等. 漓江大型底栖动物群落时空分布及水质生物评价[J]. 环境科学学报,2018,38(3): 1207-1213.
- [6] BARBIERO R P, RUDSTAM L G, WATKINS J M, et al. A cross-lake comparison of crustacean zooplankton communities in the Laurentian Great

- Lakes, 1997-2016[J]. Journal of great lakes research, 2019, 45(3): 672-690.
- [7] STAMOU G, KATSIAPIS M, MOUSTAKA-GOUNI M, et al. Trophic state assessment based on zooplankton communities in Mediterranean lakes[J]. Hydrobiologia, 2019, 844(1): 83-103.
- [8] ELLIOTT J M, HELLAWELL J M. Biological indicators of freshwater pollution and environmental management[J]. Journal of animal ecology, 1987, 56(3): 1084-1085.
- [9] 王琦琳,李亚翠,王旭,等. 河流生态健康评价中底栖动物采样方法研究进展[J]. 环境生态学, 2021, 3(7): 36-41.
- [10] 陆晓晗,曹宸,李叙勇. 付幢河流域中下游大型底栖动物群落结构与水质生物学评价[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 3201-3214.
- [11] 胡晓静,刘佳明,王思棋,等. 白河、潮河底栖动物分布与特征研究[J]. 北京水务, 2021(4): 16-20.
- [12] 侯易明,潘保柱,蒋小明,等. 汉江上游干流和秦岭南麓典型支流的底栖动物群落特征及水质生物评价[J]. 湖泊科学, 2020, 32(4): 1140-1153.
- [13] 王涛,童春富,吴逢润,等. 崇明岛内河大型底栖动物群落组成及分布特征[J]. 海洋学报, 2021, 43(9): 71-80.
- [14] 孙瑜瑜,李宁,陈阿兰,等. 涅水河上游大型底栖动物群落结构及水质生物评价[J]. 青海大学学报, 2018, 36(2): 65-71.
- [15] 王备新. 大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究[D]. 南京:南京农业大学, 2003.
- [16] ZHAO W. Hydrobiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [17] 顾晓昀,徐宗学,王汨,等. 北运河水系底栖动物群落结构与水环境质量评价[J]. 湖泊科学, 2017, 29(6): 1444-1454.
- [18] 许浩,蔡永久,汤祥明,等. 太湖大型底栖动物群落结构与水环境生物评价[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 840-852.
- [19] 邢树威,王俊才,丁振军,等. 辽宁省大型底栖无脊椎动物耐污性及水质评价[J]. 环境保护科学, 2013, 39(3): 29-33.
- [20] BARBOUR M T, STRIBLING J B, VERDONSCHOT P F M. The multi-habitat approach of USEPA's rapid bioassessment protocols: Benthic macroinvertebrates[J]. Limnetica, 2006, 25(3): 839-850.
- [21] BUSS D F, VITORINO A S. Rapid Bioassessment Protocols using benthic macroinvertebrates in Brazil: Evaluation of taxonomic sufficiency[J]. Journal of the North American benthological society, 2010, 29(2): 562-571.
- [22] 单云芝,潘文斌,蔡如钰. 底栖动物在水质评价中应用的中文文献统计和分析研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(3): 183-186.
- [23] 卞少伟,姜伟,梅鹏蔚,等. 基于底栖动物指数法的湖泊生态系统健康评价研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2016, 36(10): 49-52.

(上接第 94 页)

- [2] 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.
- [3] GOVERNMENT U S. Control of Emissions of Hazardous Air Pollutants from Mobile Sources; Final Rule. Federal Register 40, CFR Parts 80 and 86[M]. Washington, DC: US Government Printing Office, 2001.
- [4] 鲁绍伟,高琛,杨新兵,等. 北京市不同污染区主要绿化树种对土壤重金属的富集能力[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(5): 22-26.
- [5] 刘维涛,张银龙,陈喆敏,等. 矿区绿化树木对镉和锌的吸收与分布[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 752-756.
- [6] 兰欣宇. 北京园林绿地 40 种树木一年生枝和叶片吸收镉、铅、铜能力评价及筛选[D]. 北京:北京林业大学, 2019.
- [7] 刘玲,方炎明,王顺昌,等. 7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2361-2367.
- [8] 王磊,刘静,谷利伟,等. 六种城市行道树叶表皮重金属元素含量及形态结构的研究[J]. 电子显微学报, 2014, 33(2): 172-179.
- [9] AVERY P B, KUMAR V, XIAO Y F, et al. Selecting an ornamental pepper banker plant for *Amblyseius swirskii* in floriculture crops[J]. Arthropod-plant interactions, 2014, 8(1): 49-56.
- [10] WANG Y B, YAN A L, DAI J, et al. Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in *Chlorophytum comosum*: A popular ornamental plant and potential Cd hyperaccumulator[J]. Environmental monitoring and assessment, 2012, 184(2): 929-937.

- [11] 卢绘,张银龙,吴永波. 植物叶面吸收污染物机制研究进展[J]. 环境化学, 2020, 39(12): 3371-3383.
- [12] 柴一新,祝宇,韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应:以哈尔滨市为例[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1121-1126.
- [13] 刘璐,管东生,陈永勤. 广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2604-2614.
- [14] 田媛,郭希娟,刘效兰. 北京市不同功能区土壤重金属污染探究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S2): 83-86.
- [15] 陈潇霖,杨丹,胡迪青,等. 北京土壤重金属分布及评价:以五环以内为例[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(S2): 78-81.
- [16] 赵钰,董黎明,张艳萍,等. 北京道路尘土与土壤植物中重金属形态分析与评价[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(9): 169-174.
- [17] 韩玉丽,邱尔发,王亚飞,等. 北京市土壤和 TSP 中重金属分布特征及相关性研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 146-155.
- [18] FAN J M, DAI W, WANG Y Y, et al. Seasonal disparities in airborne lead (Pb) and associated foliar uptake by ryegrass (*Lolium perenne* L.): A Pb isotopic approach [J/OL]. Science of the total environment, 2020, 708 [2021-05-25]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134734>.
- [19] 宋雪英,胡晓钧,郝一力,等. 工业搬迁区常见乔木树种重金属累积特征分析[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2012, 24(2): 10-14.
- [20] 王爱霞,方炎明. 二球悬铃木不同器官对空气中 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的累积作用[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(2): 67-72.
- [21] 程佳雪,巫丽华,任瑞芬,等. 北京园林绿地 6 种树木的叶片和一年生枝中 5 种重金属含量比较[J]. 中国园林, 2020, 36(11): 139-144.