

4个树种叶片的重金属含量特征及其指示大气污染的研究

刘波^{1,2}, 赵建华¹, 刘曦子³, 苏禄晖², 林匡飞^{1*}, 朱丽红², 杨意⁴

(1. 华东理工大学 资源与环境工程学院 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237; 2. 上海市医药学校, 上海 200135; 3. 南京大学金陵学院 化学与生命科学学院, 南京 210037; 4. 上海市浦东新区公路管理署, 上海 200129)

摘要: 2015年3月, 对上海市浦东新区5个区域的雪松(*Cedrus deodara*)、冬青(*Ilex chinensis*)、樟(*Cinnamomum camphora*)、荷花玉兰(*Magnolia grandiflora*) 4个种树的叶片 Pb, Cd, Zn, Cu 含量进行测定和分析, 研究植物重金属含量与大气污染之间的关系。结果表明, 所测植物叶片中 Pb, Cd, Zn 和 Cu 的累积量与大气中 Pb, Cd, Zn 和 Cu 的相对含量呈显著正相关; 4个树种叶片的重金属含量因其种类、采样区域和树种的不同差异显著, 其中荷花玉兰的 Pb 和 Cu 的累积量最高, 雪松的 Cd 和 Zn 的累积量最高。分析显示出浦东新区大气质量状况, 交通流量大的杨高路金桥路属重污染区, 高桥石化分公司和郊环线 G1501 属中度污染区, 洋泾社区属轻度污染区, 对照属无污染区。

关键词: 重金属; 大气污染; 绿化树种; 叶片

中图分类号: S731.2

文献标识码: A

Heavy Metal Content in the Leaves of Four Tree Species and Its Function in Air Pollution Evaluation

LIU Bo^{1,2}, ZHAO Jian-hua¹, LIU Xi-zi³, SU Lu-hui², LIN Kuang-fei^{1*}, ZHU Li-hong², YANG Yi⁴

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Shanghai Pharmaceutical School, Shanghai 200135, China; 3. Institute of Chemistry and Life Sciences, Jinling College of Nanjing University, Nanjing 210037, China; 4. Shanghai Pudong New Area Road Administration Shanghai 200135, China)

Abstract: In 2015, determinations were implemented on Pb, Cd, Cu and Zn content in leaves of *Cedrus deodara*, *Ilex chinensis*, *Cinnamomum camphora* and *Magnolia grandiflora* at 4 typical areas and one control in Pudong New Area, Shanghai City. Analysis were made on relationship between content of heavy metals in tree leaves and that in air pollution. The results showed that Pb, Cd, Cu and Zn content in the leaves of different plants had positive relation with their own concentration in the air. The content of heavy metals varied with types of metal, tree species and sampled area. The determination demonstrated that *M. grandiflora* had the highest accumulation in Pb and Cu, and *C. deodara* had the highest in Cd and Zn. Analysis on metal content in tree leaf at different areas resulted air pollution orders of Pudong New Area, Shanghai.

Key words: heavy metals; atmospheric pollution; greening tree species; leaf

大气中的重金属如 汞 (Hg)、铬 (Cd)、铅 (Pb)、锌 (Zn) 等主要来自工业生产、生活炉灶与采暖锅炉、

收稿日期: 2016-05-06; 修回日期: 2016-08-18

基金项目: 上海市医药学校内涵建设校级课题

作者简介: 刘波 (1973-), 女, 高级讲师, 在读博士, 从事植物学、环境化学研究; *通讯作者。

交通运输所产生的有害气体和粉尘等^[1], 可经呼吸及食物链系统对人体和动物的健康产生毒害, 具有滞留时间长、明显的富集效应和迁移能力等特点^[2~4]。目前, 大气污染指示植物的研究包括用木本植物的树皮、年轮、树叶、种子及草本植物指示气体污染、粉尘以及大气重金属污染, 此外, 作为理想的大气重金属污染监测材料的苔藓越来越受到青睐^[5~26]。植物叶片是植物的重要组成部分, 是大气污染物的重要吸收器官。植物通过叶片上的气孔和树干上的皮孔, 将大气污染物吸入植物体内, 在植物体内通过氧化还原过程中合成无毒物质 (即降解作用), 通过根系排出体外或积累贮藏于植物体的某一器官内; 通过植物对大气污染物的吸收、降解、积累和排出, 从而达到净化空气的目的^[27~28]。植物在能够忍受的浓度范围内, 其叶片中重金属的累积量与大气中的相对质量分数呈显著正相关^[29], 可较好地指示不同生产企业厂区交通道的大气中重金属的污染状况^[7]。

本研究通过测定上海浦东新区不同交通流量区域的 4 个常绿绿化树种叶片中各重金属元素的含量, 了解城市大气污染状况, 分析不同绿化树种对大气重金属吸收累积能力, 探究植物体内重金属累积量与大气含污指数的相关关系, 并对上海市浦东新区的空气质量进行评价, 为上海市选择吸污能力强的行道绿化树种提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验地点位于上海市浦东新区, 30°08'20" ~ 31°23'22"N, 121°27'18" ~ 121°48'43"E。位于上海市东部, 黄浦江西侧, 东濒东海, 南临杭州湾, 长江三角洲东缘, 地处我国海岸线中点和长江入海口的交汇处。浦东新区地层为长江冲积层。地形从吴淞口起向东南展开略呈三角形。境内地势东南高, 西北低, 平均海拔 3.87 m。北亚热带南缘东亚季风盛行的滨海地带, 海洋性气候, 四季分明, 降水充沛, 光照较足, 温度适中, 气候宜人。年均气温 15.7°C, 年均降水量 1 100 mm, 全年雨日约 131 d。浦东新区经济发达, 工业发展迅速, 有 34 类工业, 并且是上海市的交通枢纽。

1.2 主要试验仪器

EthosA 微波消解仪 (Milestone 公司)、NexIon300 型电感耦合等离子体质谱仪 (PerkinElmer 公司)、FD-1D-50 型冷冻干燥仪 (上海博医康实验仪器有限公司)、SX2-10-12 型马弗炉 (上海一恒科技有限公司)。

1.3 样品采集

主要监测区域, 选择上海市区交通流量相对大的区域——工业区: 高桥石化; 交通主干道: 杨高路金桥路; 城市高速公路两侧: 郊环线 G1501; 生活区: 洋泾社区; 以相对洁净区域: 上海市医药学校院内作为对照区。选择 4 个常见常绿化树种雪松 (*Cedrus deodara*)、冬青 (*Ilex chinensis*)、樟 (*Cinnamomum camphora*)、荷花玉兰 (*Magnolia grandiflora*), 在每个采样区随机选取各树种样树 2~5 株, 在高桥石化、郊环线 G1501、杨高路金桥路、洋泾社区及对照区上海市医药学校 5 个采样点重复样树的树高、树龄、生长、叶片着生部位、叶龄。每株样树在距地面 3 m 高处, 在东南西北 4 个方向分别选择 4~5 枝, 剪下样枝, 置密封袋中带回实验室待检测, 采集同龄枝的叶片, 每枝选取第 3 至第 5 片叶作为测量的样品, 每一样树采集叶片约为 100 g。采集时间为春季叶片萌发前 (2015 年 3 月 25 日), 除对照区外, 4 个采样点采集范围在路两旁直径 30 m 以内。

1.4 样品处理

将各树种叶片样品用自来水冲洗干净, 再用蒸馏水及去离子水漂洗、烘干、粉碎后过 60 目筛, 放入清洁密封袋中备用。分别称取各树种叶片 0.200 0 g 放入消解罐中, 加 4 mL HNO₃、1 mL H₂O₂ 于微波管中, 小心摇动以使刚产生的气体立刻释出, 常温放置 24 h 后放入微波系统中加热。消解程序: 15 min 升温至 160°C, 保持 10 min, 至少冷却 10 min 后取出。先冷却至室温, 在通风橱中打开消解罐, 将样品过滤至坩埚中, 置于电热板上加热至 120°C 赶酸。赶酸后液体过 0.45 μm 滤膜, 用 2% 稀硝酸定容至 25 mL, 用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-M) S 测定重金属铜 (Cu)、锌 (Zn)、镉 (Cd)、铅 (Pb) 含量。实验过程中插入平行空白试验, 空白结果表明无污染现象, 每批样品做 10% 的平行样, 平行分析的偏差小于 10%, 标准参考样品 (NY861-2004) 元素的回收

率在 90%~115%。

1.5 质量控制

在进行树叶样品处理和测定的同时,以灌木枝叶的标准物质(GBW07603(GSV-1))作对照,以同样的试验方法处理,测定结果均在质量控制允许范围(72%~113%),证明这种方法的准确性和可行性。此外,每批处理样品中,每批次运行一个方法空白、一个平行实验用来控制整个试验过程中可能引入的环境污染,纠正实验误差。

1.6 数据处理

计算各采样点单项污染物的污染指数,采用计算公式: $C_i = C_m / C_k$ 。其中: C_i 为污染指数; C_m 为各采样区每种常绿树种的某一重金属实测值; C_k 为对照区对应的某一重金属实测值。通过单项污染指数计算,求出 C_i ,然后再运用下式求出树种的平均污染指数(T_w): $T_w = \sum_{i=1}^n C_i / n$ 。其中: C_i 为各项目的污染指数, n 为项目数量。

数据处理采用 SPSS17.0 软件,表格绘制采用 Excel 工具。

2 结果与分析

2.1 大气 Pb、Cd、Cu、Zn 在各树种叶片中的累积

2.1.1 Pb 的累积 对 4 个种绿化树种叶片中 Pb 含量的分析发现(表 1),不同树种的叶片对 Pb 的累积能力存在显著差异。樟和荷花玉兰叶片的 Pb 含量明显高于其他两种树种,前者在交通污染严重的杨高路金桥路达 $6.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干重),后者为 $7.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干重)。调查的 5 个采样区域的平均含量为 $6.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干重)。综合各区 4 个树种叶片中 Pb 含量平均值,从高到低依次为荷花玉兰 > 樟 > 雪松 > 冬青(表 1),4 个树种叶片吸收每种元素的贡献比也得到相同结果(图 1)。

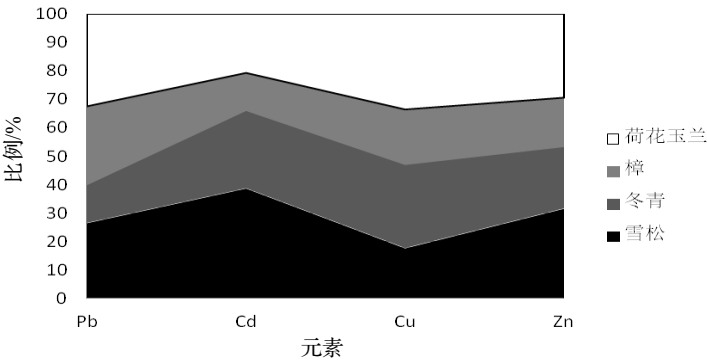


图 1 4 个树种叶片吸收重金属元素的贡献比
Figure 1 Contribution of heavy metals in leaves of tested tree

各采样区不同树种叶片 Pb 的含量存在显著差异,交通污染严重区域绿化树种叶片 Pb 的含量与对照间存在显著差异,交通污染严重区域叶片 Pb 含量明显高于交通污染轻的区域。其中以交通主干道杨高路金桥路绿化树种叶片 Pb 的含量(区平均值)最高,其他依次为郊环线 G1501 > 洋泾社区 > 高桥石化 > 对照(表 1)。

城市大气中 Pb 的最大来源是车辆排放的尾气,占城市大气污染总排放量的 90%左右,其次为含 Pb 固体废弃物的焚烧和工业生产^[15]。树木中重金属含量大部分来自于大气污染,与大气中的总悬浮颗粒物(TSP)浓度有关,受土壤的影响很小^[30-31]。本研究进一步验证了市区绿化树种叶片 Pb 的累积与大气中 Pb 的含量存在高度相关性(表 2)。

本研究通过计算市区绿化树种叶片 Pb 的总平均含量与 4 种重金属总含量的比值发现,市区绿化树种 Pb 的总平均累积量占树种重金属总累积值的 21%,较好地反映了反映了上海浦东区大气中重金属 Pb 的污染状况。

2.1.2 Cd 的累积 表 1 显示,4 个树种中,雪松叶片中 Cd 的含量明显高于其他 3 个树种,平均值达 $0.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干重),其他依次为冬青 > 荷花玉兰 > 樟。各采样区除樟叶片 Cd 含量变化不明显外,其他 3 个树种叶片中的含量随采样区污染程度的变化而变,交通污染严重的郊环线 G1501 和杨高路金桥路叶片的累积量明显高于其他采样区,以杨高路金桥路采样区的 Cd 平均含量最高,其他采样区树种叶片 Cd 含量依次为郊环线 G1501 > 高桥石化 > 洋泾社区 > 对照。

表 1 4 种植物叶片中重金属元素的含量（干重）及数据分析
Table 1 Heavy metals content in leaves of tested tree species at different sampled sites

元素	树种	元素含量/(mg·kg ⁻¹)					
		对照	高桥石化	郊环线 G1501	杨高路金桥路	洋泾社区	树种平均值
Pb	雪松	1.12 ± 0.21cC	3.47 ± 0.16bD	4.69 ± 0.05cB	5.98 ± 0.13bB	4.83 ± 0.03cA	4.02
	冬青	0.84 ± 0.06dD	1.63 ± 0.02cC	2.51 ± 0.09dA	3.23 ± 0.06cC	1.98 ± 0.01aA	2.04
	樟	1.37 ± 0.18bD	3.32 ± 0.04aA	5.21 ± 0.13bB	6.95 ± 0.01aB	4.01 ± 0.05dA	4.17
	荷花玉兰	1.52 ± 0.36bC	4.47 ± 0.13cD	6.69 ± 0.02aA	7.61 ± 0.04cA	4.35 ± 0.08	4.93
	区平均值	1.21	3.22	4.78	5.94	3.78	3.79
Cd	雪松	0.15 ± 0.03cB	0.53 ± 0.15dD	0.46 ± 0.12cA	0.67 ± 0.12dA	0.24 ± 0.16cC	0.41
	冬青	0.12 ± 0.03dD	0.28 ± 0.0dA	0.54 ± 0.03aA	0.48 ± 0.03dA	0.31 ± 0.00dC	0.29
	樟	0.07 ± 0.17dC	0.15 ± 0.03aA	0.16 ± 0.02dA	0.22 ± 0.16aA	0.08 ± 0.01dC	0.14
	荷花玉兰	0.09 ± 0.22aD	0.21 ± 0.14cD	0.26 ± 0.14aA	0.43 ± 0.18cC	0.17 ± 0.02aC	0.22
	区平均值	0.11	0.29	0.36	0.45	0.20	0.26
Cu	雪松	3.62 ± 0.13dB	7.08 ± 0.03bA	5.24 ± 0.15bB	6.43 ± 0.15dE	3.84 ± 0.04dD	5.04
	冬青	4.74 ± 0.04aD	11.38 ± 0.01dC	9.96 ± 0.14dB	9.45 ± 0.23aE	6.43 ± 0.03dA	8.39
	樟	3.70 ± 0.02dE	5.68 ± 0.12dC	4.61 ± 0.03dB	8.35 ± 0.01dA	5.19 ± 0.02dA	5.51
	荷花玉兰	5.81 ± 0.11aD	13.27 ± 0.02bA	9.38 ± 0.13bB	11.26 ± 0.14aE	8.28 ± 0.15bD	9.60
	区平均值	4.47	9.35	7.30	8.62	5.94	7.83
Zn	雪松	16.02 ± 0.14bE	41.83 ± 0.02bC	26.22 ± 0.12dB	43.28 ± 0.12dC	30.04 ± 0.03bB	31.48
	冬青	14.23 ± 0.02aE	26.91 ± 0.08aE	19.33 ± 0.02cD	26.11 ± 0.16cD	21.81 ± 0.01dE	21.68
	樟	11.56 ± 0.07aE	21.21 ± 0.30aD	15.22 ± 0.07aD	20.07 ± 0.13bE	17.53 ± 0.10bE	17.12
	荷花玉兰	18.97 ± 0.03aB	40.20 ± 0.06cE	24.94 ± 0.01aB	38.17 ± 0.12bD	25.57 ± 0.03bB	29.37
	区平均值	15.20	32.54	21.43	31.91	23.74	24.91

注: P < 0.05, 小写字母表示不同常绿树种间存在显著差异, 大写字母表示不同采样区间存在显著差异。

大气中的 Cd 主要来源于汽车尾气与与 Cd 生产相关的矿业和冶金行业。上海浦东新区与 Cd 生产相关的企业较少, 大气中排放的 Cd 污染较少, 其相对含量也较低。本研究通过计算所得出的结果也说明了上海市浦

表 2 4 个树种叶片重金属元素累积量（干重）与大气含污染指数 IPC 的相关性分析
Table 2 Relation between heavy metals accumulation in leaves of tested tree species and IPC

重金属种类	相关关系	相关系数
Pb	y=0.500 3x+1.425 3	0.869 7
Cd	y=5.572 1x+1.094 1	0.869 2
Cu	y=0.119 9x+0.779 6	0.870 3
Zn	y=0.002 1x+0.672 1	0.860 5
总重金属	y=0.449 4x+1.017 6	0.864 1

注: x 表示树种叶片重金属元素累积量, y 表示大气含污指数。

东新区 Cd 的含量相对较低。从表 1 中可看出, 4 个树种叶片 Cd 的累积量与树种和采样区域污染程度有关, 大气污染严重的交通密集区域的树种叶片 Cd 的含量明显高于其他 3 个采样区, 且交通干道树种叶片 Cd 的含量明显高于高桥石化。

2.1.3 Cu 和 Zn 的累积 Cu 和 Zn 为 2 种常见元素, 且是植物生理的必需元素^[34]。Cu 在植物体内具有非常重要的生理作用, 为植物体结构物质的组成成分; 作为植物生命活动的调节剂, 参与酶的活动及生理代谢; 起电化学作用^[32]。Zn 影响植物体碳水化合物和蛋白质的代谢^[35~37], 对生物膜的功能和结构起关键作用^[38~39], 是细胞结构的稳定性及功能完整性必不可少的元素, 是植物生长素吲哚乙酸的重要组成成分^[40], 故而植物体内 Cu、Zn 含量高于 Pb、Cd 的含量^[15~33]。

与 Cd 相反, 各树种叶片中的 Cu 含量均明显升高。除樟外, 不同采样区不同树种叶片间的 Cu 含量差异显著, 其中以荷花玉兰 Cu 的平均含量最高, 其他依次为冬青 > 樟 > 雪松 (图 2)。除郊环线 G1501 外, 不同采样区不同树种间叶片的 Cu 含量存在显著差异, 其中以高桥石化各树种叶片的 Cu 含量最高, 其次为杨高路金桥路 > 郊环线 G1501 > 洋泾社区 > 对照 (表 1)。

对不同采样区 4 个树种叶片 Cu 平均累积量进行分析, 结果显示 (表 1), 大气污染严重的高桥石化的所有树种叶片 Cu 的累积量显明高于其他 3 个采样区。除学校外, 各树种叶片间 Zn 的含量在其他 4 个采样区存在显

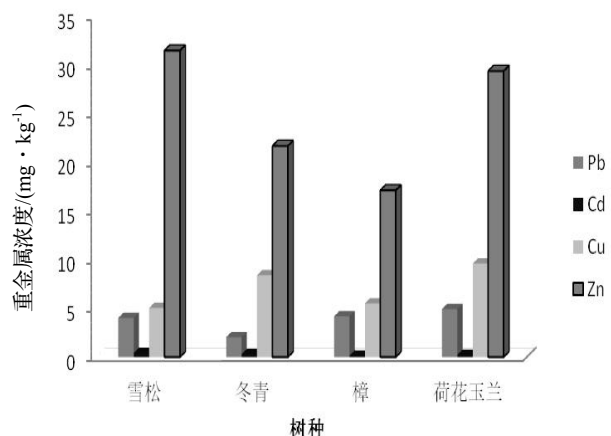


图 2 不同树种叶片重金属的含量
Figure 2 Heavy metals content in leaves of tested tree species

著差异，其中雪松的含量明显高于其他 3 个树种，平均值达 $31.48\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ （干重），其他依次为荷花玉兰 > 冬青 > 樟（表 1）。

不同采样区不同树种叶片 Zn 含量随采样区污染程度而变化显著，高桥石化和杨高路金桥路各树种叶片 Zn 的累积量明显高于其他采样区，以高桥石化 Zn 的平均含量最高，其他采样区依次为杨高路金桥路 > 洋泾社区 > 郊环线 G1501 > 对照（表 1）。对 4 个树种叶片 Cu 和 Zn 的累积进行分析，验证了大气中 Cu 和 Zn 的含量与植物叶片 Cu 和 Zn 的累积量直接相关^[15]（表 2）。高桥石化树种叶片 Cu 和 Zn 的累积量高于其他采样点可能是由于地理位置，其不仅处于大气污染严重的工业区，而且还处于交通较为密集区。

2.1.4 各采样区 4 个树种叶片重金属平均累积量 对各采样区 4 个树种叶片的重金属平均累积量的分析发现(图 3)，4 个采样区域与对照区域 4 树种叶片重金属累积量存在显著差异。杨高路金桥路的 4 个树种叶片重金属平均累积量最高，其他依次为高桥石化 > 郊环线 G1501 > 洋泾社区 > 对照。

各采样区 4 个树种重金属的累积量明显高于对照区，尤其是地处交通密集区域的杨高路金桥路，由于交通流量较大，各树种叶片的重金属平均累积量均最高；其次是高桥石化，该采样点污染严重，且交通流量相对较大，4 个树种的重金属平均累积量亦较高；再次为郊环线 G1501，因为离市区相对较远，车流量相对市区较少，且无污染严重的企业，各树种叶片重金属总累积量较前 2 个采样区少；洋泾社区，由于受交通污染和生活垃圾等的多因素影响，各树种重金属的累积量较郊环线 G1501 略低；对照的周围均为教学单位，污染源相对较少，空气相对清洁，树种叶片重金属累积量最少。

雪松、冬青、樟、荷花玉兰是上海市主要绿化树种。在 4 个采样区中，雪松叶片中的 Pb, Cd, Zn 平均累积量分别比对照的高 323.44%，216.70%，120.61%；冬青叶片中的 Pb, Cd, Cu, Zn 的平均累积量分别比对照的高 178.27%，235.42%，96.30%，64.43%；樟叶片中的 Pb, Cd, Cu, Zn 的平均累积量分别比对照的高 255.66%，117.86%，61.01%，60.10%；荷花玉兰叶片中的 Pb, Cd, Cu, Zn 的平均累积量比对照高 280.26%，197.22%，81.54%，68.53%。通过进一步分析，各树种叶片对重金属元素吸收的贡献比也得到了相同结果（图 1）。其中雪松的累积能力最强，其次为荷花玉兰，可以作为净化大气环境优先考虑种植的树种。

2.2 大气质量评价

植物体内污染物含量与大气中相应的污染物含量有很大的相关性，且能反映较长时间内大气中污染物浓度的平均值，故可作为监测环境污染的指标，并对大气质量等级进行评价。本研究计算污染指数采用的是单项污染指数公式，通过计算求出 C_i ，然后再运用公式求出植物的平均污染指数 T_w ^[41]。

目前对大气污染等级的划分无统一标准，因此，对大气污染等级的划分借鉴文献记载进行^[15,28]。树木受大气污染划分为 4 个等级：I 级：相对清洁（ ≤ 1.2 ）；II 级：轻度污染（1.21 ~ 2.00）；III 级：中度污染（2.01 ~ 3.00）；IV 级：严重污染（ > 3.00 ）。

观测结果显示，对照区（1.00）为 I 级污染，该采样区在非闹市区，周围均为教学单位，交通流量小，无大的工业污染源。洋泾社区（1.97）为 II 级污染，周围无较大的工业污染源，交通流量相对较大；郊环线 G1501（2.51）和高桥石化（2.33）为 III 级污染，这 2 个采样点地处近郊，车流量较大或是工业废气排放量大，对这两路段须采取一定措施进行环境治理，防止污染加重。杨高路金桥路（3.20）为 IV 级，属严重污染区，交通流量密集，大气污染严重，必须加大力度进行环境治理与保护。

2.3 植物重金属元素累积量与大气含污指数 IPC 的相关性分析

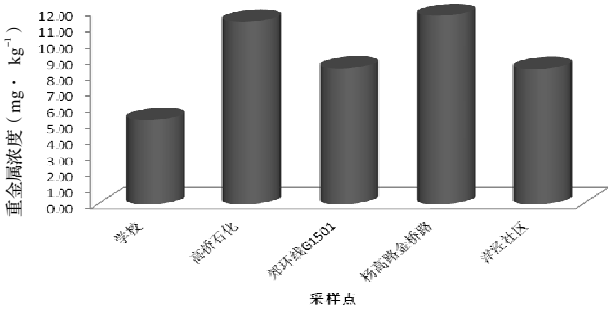


图 3 各采样区 4 个树种叶片中的重金属平均累积量
Figure 3 Heavy metals accumulation in leaves of tested tree species at different sampled sites

大气含污指数 (IPC, index of pollutant concentration) 在一定程度上反映了大气质量的污染状况。通过分析发现, 4 个树种叶片的重金属元素累积量与大气含污指数 IPC 间均有显著的相关性 ($R > 0.86$) (表 2)。验证了植物叶片中的重金属元素累积量和大气重金属浓度呈正相关^[15,28], 可以依据植物叶片的重金属的累积量来估测大气中的重金属浓度, 从而更加客观地指示大气的重金属污染状况。

3 结论

(1) 所调查的雪松、冬青、樟、荷花玉兰 4 个树种叶片对重金属的累积能力存在显著差异, 其中荷花玉兰叶片的 Pb 和 Cu 的累积量最高, 雪松的 Cd 和 Zn 的累积量最高。

(2) 4 个树种叶片的重金属含量因采样地点的不同存在显著差异。在交通流量大且工业污染严重的区域, 各树种叶片的重金属累积量较交通流量小的区明显要高, 大气中的 Pb, Cd, Cu, Zn 的含污指数与所测区树种叶片重金属累积量呈正相关。

(3) 植物叶片的重金属含量可为城市大气污染提供信息, 也可作为环境污染监测的重要指标, 为大气环境质量评价提供科学依据。本试验结果表明, 树木叶片重金属累积量与大气含污指数呈显著正相关; 浦东新区大气重金属污染物主要是 Pb, Cu, Zn, 交通流量大的杨高路金桥路属重污染区, 郊环线 G1501 和高桥石化属中度污染区, 生活区洋泾社区属轻度污染区, 对照属无污染区。

参考文献:

- [1] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11 (1): 79-84.
- [2] Jamali M K, Kazi T G, Arain M B, *et al.* A multivariate study: variation in uptake of trace and toxic elements by various varieties of *Sorghum bicolor* L[J]. J Hazard Mater, 2008, 158 (2-3): 644-651.
- [3] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. 2000. Effective tree species for local air quality management[J]. Arboriculture 26, 12-19, doi:10.1016/S0269-7491 (98) 00016-25.
- [4] OMS.. Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide, Report on a WHO Working Group[J]. WHO. 2003(6): 30.
- [5] 张银龙, 王亚超, 庞博, 等. 城市植物叶面尘中痕量元素分布特征及其生态风险评价[J]. 环境与安全学报, 2010, 10 (5): 97-101.
- [6] 葛彦双, 曹弈璘, 曾春涵, 等. 地面苔藓对成都大气沉降重金属污染的监测[J]. 生态环境学报, 2013, 22 (5): 844-850.
- [7] 知颖颀, 王再岗, 王中生, 等. 公路绿化植物油松 (*Pinus tabulaeformis*) 和小叶杨 (*Populus simonii*) 对重金属元素的吸收和积累[J]. 生态学报, 2007, 27 (5): 1863-1872.
- [8] 束文圣, 杨开颜, 张志权, 等. 湖北铜绿山古铜矿冶炼渣植被与优势植物的重金属含量研究[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7 (1): 7-12.
- [9] 邱媛, 何际泽, 杨汉彬, 等. 矿区常见乔木叶片重金属特征及其修复应用[J]. 生态环境学报 2013, 22 (1): 151-156.
- [10] 栾以玲, 姜志林, 阮宏华, 等. 南京市几种行道树年轮重金属元素含量的变化[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2009, 33 (6): 147-150.
- [11] Markert B. Instrumental analysis of plants. In: Markert, B. (Ed.), Plants as Biomonitors. Indicators for Heavy Metals in Terrestrial Environment[J]. VCH, Weinheim, 1993, 7(6): 381.
- [12] Siwik E I, Campbell S L, Mierle G. Fine-scale mercury trends in temperate deciduous tree leaves from Ontario, Canada[J]. Sci Total Environ 2009, 407 (24): 6275-6279.
- [13] Hajar E W I, Sulaiman A Z B, Sakinah A M M. Assessment of Heavy Metals Tolerance in Leaves, Stems and Flowers of *Stevia rebaudiana* Plant[J]. Proc Environ Sci 2014, 20: 386-393.
- [14] 崔爽, 周启星, 晁雷. 某冶炼厂周围 8 种植物对重金属的吸收与富集作用[J]. 应用生态学报, 2006, 17 (3): 512-515.
- [15] 王爱霞, 张敏, 方炎明, 等. 树叶中重金属含量及其指示大气污染的研究[J]. 林业科技开发, 2008, 22 (4): 38-41.
- [16] 谢维, 曹同, 韩桂春, 等. 苔藓植物对抚顺地区大气污染的指示作用研究[J]. 生态学杂志, 1999, 18 (3): 1-5.
- [17] 方炎明, 魏勇, 张小平, 等. 苔藓生物监测大气重金属污染研究进展[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2000, 24 (5): 64-68.
- [18] 曹同, 路勇, 吴玉环, 等. 苔藓植物对鞍山市环境污染生物指示的研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9 (6): 635-639.
- [19] 梅娟, 张银龙, 方炎明. 苔袋法监测大气重金属和 SO₂ 污染[J]. 苏州科技学院学报 (工程技术版), 2003, 16 (2): 18-23.

- [20] 朱秀敏. 丛藓科植物重金属含量对环境的指示作用[J]. 安徽农业科学, 2010, 38 (33): 18 935–18 937, 18 959.
- [21] 陈肖鹏, 张朝晖. 贵州木油厂汞矿区 4 种藓类植物及其基质中重金属元素分析[J]. 西北植物学报, 2009, 29 (12): 2 535–2 541.
- [22] 王鹏, 赵志忠, 马荣林, 等. 海南岛北部潮间带红树林对重金属的累积特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23 (5): 842–846.
- [23] 朱秀敏, 王僧虎, 李丽. 几种苔藓植物对五种重金属富集能力的比较[J]. 北方园艺, 2012 (23): 88–90.
- [24] 罗绪强, 陈光美, 张桂玲, 等. 茂兰喀斯特森林特有种植物叶片重金属含量特征[J]. 广东农业科学, 2014 (21): 149–152.
- [25] 王友保, 张丽琴, 刘登义. 铜尾矿区土壤与凤丹植株重金属富集研究[J]. 应用生态学, 2004 (12): 2 351–2 354.
- [26] 彭克俭, 刘益贵, 邓小鹏, 等. 湘西铅锌矿区的菊科植物及其对重金属的积累[J]. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4 (4): 11–18.
- [27] 薛皎亮, 刘红霞, 等. 城市空气中铅在国槐树体内 SO_2 的积累[J]. 中国环境科学, 2000, 20 (6): 536–539.
- [28] 任乃林, 陈炜彬, 黄俊生. 用植物叶片中重金属元素含量指示大气污染的研究[J]. 广东微量元素科学, 2004, 11 (10): 41–45.
- [29] 陈学泽, 谢耀野, 彭重华. 城市植物叶片金属元素含量与大气污染的关系[J]. 城市环境与城市生态, 1997, 10 (1): 45–47.
- [30] 蒋高明. 承德市油松针叶硫及重金属含量动态及其与大气二氧化硫之间的关系[J]. 生态学报, 1995, 15 (4): 407–412.
- [31] 陈锐章. 植物根系环境 Cl、S 含量对叶片 Cl、S 含量和抗性的影响[J]. 环境科学, 1982, 4 (3): 45–49.
- [32] 李涛, 蒲韵婷, 王全华, 等. Mn、Cu 和 Zn 在植物生长发育中的生理作用[J]. 河北农业科学, 2008, 12 (6): 12–15.
- [33] 王成, 郗光发, 杨颖, 等. 高速路林带对车辆尾气重金属污染的屏障作用[J]. 林业科学, 2007, 3 (43): 1–7.
- [34] Sommer A L, Lipman C B. Evidence on the indispensable nature of zinc and boron for higher green plant [J]. Plant Physiol, 1926, 1: 231–249.
- [35] Marschner H, Cakmak L. High light intensity enhances chlorosis and necrosis in leaves of zinc, phosphorous and magnesium deficient bean (*Phaseolus vulgaris*) plant[J]. Plant Physiol, 1989, 134: 308–315.
- [36] Shrotri C K, Tewari M N, Rathore V S. Effects of zinc nutrition on sucrose biosynthesis in maize[J]. Phytochemistry, 1980, 19: 139–140.
- [37] Seethambaram Y, Das VSR. RNA and RNase activity in *Oryza sativa* L and pearl millet (*Pennisetum americanum* L. Leeke) under zinc deficiency[J]. Plant Physiol Biochem, 1984, 11: 91–94.
- [38] Bettger W J, O'Dell B L. A critical physiological role of Zn in the structure and function of biomembrane[J]. Life Sci, 1981, 28: 1 245–1 438.
- [39] Chvapil M. New aspect in the biological role of zinc: A stabilizer of macromolecules and biological membranes[J]. Life Sci, 13: 1 041–1 049.
- [40] Takaki H, Kushizaki M. Accumulation of free tryptophan and tryptamine in zinc deficient maize seedling[J]. Plant Cell Physiol, 1970, 11: 793–804.
- [41] 丁桑岚. 环境评价概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001, 27–40.