西北林学院学报 2020,35(4):249-255
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2020.04.39

园林树木吸收汞(Hg)的评价方法

程佳雪,万映伶,巫丽华,朱妙馨,刘　燕*

(北京林业大学 花卉种质创新与分子育种北京市重点实验室,国家花卉工程技术研究中心,城乡生态环境北京实验室,园林学院,北京 100083)

摘　要:为明确园林树木吸收 Hg 的评价方法,了解常见园林树木对汞(Hg)的吸收能力强弱,以北京市陶然亭公园、中科院植物园、紫竹院公园为样地,将测定的 30 种树种的不同器官(叶片、枝条)、不同年份(2016 年、2018 年)Hg 含量数据,采用不同聚类进行排序,并分析对比不同排序的差异。结果表明:1)采用 2 a 测定木本植物叶器官的 Hg 含量,能更稳定地指征不同树木吸收重金属 Hg 的能力强弱。2)按照上述评价方法,基于单位重量角度看,阔叶树种单位重量吸收 Hg 含量能力强于针叶树种,流苏树、蒙椴、紫丁香 3 种园林树木吸收 Hg 的能力较强,白皮松、白扦等 9 种针叶植物吸收 Hg 的能力较弱。本研究以园林绿地中成年园林树木为对象,测定结果对了解园林树木单位重量吸收 Hg 能力和更为准确的评价不同树木差异有指导作用。

关键词:重金属;Hg 含量;园林树木;评价方法

中图分类号:S718.4　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2020)04-0249-07

Evaluation Methods of Hg Absorption by Ornamental Trees

CHENG Jia-xue, WAN Ying-ling, WU Li-hua, ZHU Miao-xin, LIU Yan*

(*Beijing Key Laboratory of Ornamental Plants Germplasm Innovation&Molecular Breeding, National Engineering Research Center for Floriculture, Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to clarify the evaluation method of mercury (Hg) absorption by garden trees and to understand the capabilities of common garden trees to absorb Hg, the contents of Hg in different plant organs (leaves, branches) and different years (2016, 2018) of 30 plant species occurring in Taoranting Park, Botanical Garden of Chinese Academy of Sciences, and Zizhuyuan Park in Beijing were measured. The measured data were sequenced by different clustering methods. Differences in the results of ranks were analyzed and compared. The results showed that 1) the ability of different trees to absorb heavy metal Hg could be more stably indicated by the determination of Hg content in leaves and organs of woody plants for two years. 2) According to the above evaluation methods, the absorptive capacity to Hg per unit weight of broad-leaved tree species was stronger than that of coniferous tree species. *Chionanthus retusus*, *Tilia mongolica* and *Syringa oblata* had stronger ability to absorb Hg, while nine coniferous plants, such as *Pinus bungeana* and *Picea meyeri* had weaker ability to absorb Hg. The results of measurement can be used to understand the capacity to Hg absorption per unit weight of garden trees and to evaluate the differences of different trees more accurately.

Key words: heavy metal; Hg content; ornamental trees; evaluation method

收稿日期:2019-10-31　**修回日期**:2019-11-20

基金项目:北京林业大学建设世界一流学科和特色发展引导专项资金"'健康城市'视角下园林植物功能研究"(2019XKJS0322)。

作者简介:程佳雪。研究方向:园林植物应用与园林生态。E-mail:bjfuchengjiaxue@163.com

* **通信作者**:刘　燕,教授,博士生导师。研究方向:园林植物应用与园林生态。E-mail:chblyan@sohu.com

由于经济的快速发展和人类活动的加剧，重金属污染，尤其是大气与土壤中重金属污染问题，一直受到广泛的关注[1-2]。汞(Hg)为毒性最大的重金属之一，能以零价形态存在于大气、土壤和水体中，具有持久性、易迁移性和高度生物蓄积性的特点，可在大气和食物链中长期存在，严重危害环境和人体健康[3]。北京作为我国城市发展迅速的代表城市之一，相关研究表明其土壤[4]及大气[5-6]中存在汞污染问题。园林树木对汞有吸收能力，同时又兼具景观功能，对改善城市环境中汞污染的作用具有重要意义。目前国内外少量关于木本植物吸收 Hg 的评价研究中，大多是以叶片中 Hg 含量的 1 a 数据为依据对 Hg 吸收能力进行评价排序[7-8]，由于研究地、测定树种和时间的差异，使得结果没有可比性。木本植物的哪个器官更能指征树木吸收 Hg 能力强弱，1 a测定的数据是否具有稳定性从而评价不同树种的差异，目前缺乏系统研究，故探讨更准确判断树木吸收 Hg 能力差异的方法，对城市园林绿地树种选择，提高生态功能有重要实际意义。本研究选取环境相似的 3 个公园样地，测定不同器官以及不同年份 30 种树木单位重量对重金属 Hg 的吸收量，用不同数据分别进行排序并进行对比，以期获得较为稳定地判断树木吸收重金属 Hg 的能力的方法。

1 材料与方法

1.1 样品采集

以环境相似，有相同树种且同树种株龄相同、长势相似为原则，选择陶然亭公园、紫竹院公园、中国科学院北京植物研究所为研究样地。其中，陶然亭公园位于北京市南二环，公园南面毗邻二环路，其余三面为居住区，占地面积 56.56 hm^2，园内几乎机动车行驶；紫竹院公园位于北京市西三环，全园总面积为 47.35 hm^2，除西面紧邻居住区外，其余三面都为城市道路，公园人流量较大，几乎无机动车行驶；中国科学院北京植物研究所北京植物园位于北京市四环、五环之间，两面临路，其余两边是居住区，现有土地面积为 74 hm^2，附近车流量相对较少且公园内几乎无机动车行驶。

为避免连续采样的干扰，本研究采取隔年采样。分别于 2016 年 10 月和 2018 年 10 月，在上述 3 个样地，选择生长健康，灌木胸径在 5～7 cm、乔木胸径在 20～23 cm 的植株 30 种(表 1)；2 a 采集的样树完全一致；每株从距地面 1～1.5 m 树冠的东、南、西、北 4 个方向采集 1 年生叶片及枝条。

参照韩玉丽、李馨等[9-10]的采样方法，每个样地每个树种选择 3 株树木采样，混合后作为 1 个样品；来自 3 个不同样地同树种样品作 3 个重复，即每种植物样品来自 9 株植物。封存于聚乙烯塑料中立即带回实验室，每份样品将叶片及 1 年生枝条用去离子水冲洗干净后晾干，于 105℃ 杀青 30 min 后，40℃烘干至恒重，粉碎，过 80 目筛，放入自封袋中存于 4℃至分析。

1.2 Hg 含量测定

使用微波消解-电感耦合等离子体质谱法[11-12]进行样品 Hg 含量的测定。准确称取 0.200 0 g 植物样品于 30 mL 聚四氟乙烯(PTFE)罐中，移入 8 mL 硝酸优级纯，加盖，在 40℃电热板上预消解 1 夜。微波消解后，定容至 50 mL，最后进入 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7700x)进行 Hg 含量的测定，重复 3 次，取均值。每次测定样品时皆

表 1 测试树种

Table 1 List of tree species for testing

序号	植物名称	序号	植物名称
1	白皮松(*Pinus bungeana*)	16	蒙椴(*Tilia mongolica*)
2	圆柏(*Sabina chinensis*)	17	山桃(*Amygdalus davidiana*)
3	侧柏(*Platycladus orientalis*)	18	山杏(*Armeniaca sibirica*)
4	油松(*Pinus tabuliformis*)	29	山茱萸(*Cornus officinalis*)
5	雪松(*Cedrus deodara*)	20	小叶朴(*Celtis sinensis*)
6	白扦(*Picea meyeri*)	21	元宝枫(*Acer truncatum*)
7	华山松(*Pinus armandii*)	22	梓树(*Catalpa ovata*)
8	砂地柏(*Sabina vulgaris*)	23	紫荆(*Cercis chinensis*)
9	粗榧(*Cephalotaxus sinensis*)	24	鸡麻(*Rhodotypos scandens*)
10	暴马丁香(*Syringa reticulata* var. *amurensis*)	25	锦带(*Weigela florida*)
11	杜仲(*Eucommia ulmoides*)	26	木槿(*Hibiscus syriacus*)
12	枫杨(*Pterocarya stenoptera*)	27	太平花(*Philadelphus pekinensis*)
13	槲栎(*Quercus aliena*)	28	贴梗海棠(*Chaenomeles speciosa*)
14	流苏树(*Chionanthus retusus*)	29	紫丁香(*Syringa oblata*)
15	栾树(*Koelreuteria paniculata*)	30	金银木(*Lonicera maackii*)

进行空白试验,以确保测定结果准确可靠。

1.3 数据分析

采用 SPSS20.0 进行单因素方差、聚类分析,Microsoft Excel 2016 进行基础数据整理、数据平均值和标准差的计算以及图表制作。

2 结果与分析

2.1 30 种树木不同器官 Hg 含量测定结果

2016 年及 2018 年 30 种树木叶片和 1 年生枝条中 Hg 含量如表 2 所示。2 a 的结果都显示,不同树木叶片和 1 年生枝条中 Hg 含量不同,且差异显著($P<0.05$)。

从叶器官 Hg 含量看,2016 年 30 种树木叶片在 0.027～0.169 mg/kg,2018 年在 0.025～0.143 mg/kg。2016 年乔木叶片 Hg 含量在 0.039～0.169 mg/kg,其中针叶树在 0.039～0.053 mg/kg,阔叶树在 0.057～0.169 mg/kg;灌木叶片 Hg 含量在 0.027～0.145 mg/kg。2018 乔木叶片 Hg 含量在 0.028～0.144 mg/kg,其中针叶树在 0.028～0.039 mg/kg,阔叶树在 0.157～0.144 mg/kg;灌木叶片 Hg 含量在 0.051～0.108 mg/kg。从 2 a 叶片单位重量 Hg 含量测定结果看,2016 年含量最高的树种为流苏树(0.169 mg/kg),2018 年为蒙椴(0.143 mg/kg);叶片含量最小的,2 a 皆为砂地柏,分别为 0.027 mg/kg 和 0.045 mg/kg。针叶树种叶片单位重量 Hg 含量明显低于阔叶树种,乔木单位重量叶片 Hg 含量高于灌木。具体排序见图 1A 及图 2A。

表 2　30 种园林树木 2 a 不同器官中 Hg 含量

Table 2　Results of 2-year-measurement of Hg content in different organs of 30 tree species　(mg·kg^{-1})

	叶片		当年生枝条		叶片+当年生枝条	
	2016	2018	2016	2018	2016	2018
白皮松	0.053±0.010cd	0.039±0.003d	0.029±0.017b	0.024±0.008b	0.082±0.023c	0.063±0.011d
圆柏	0.041±0.004d	0.039±0.009d	0.030±0.010bc	0.028±0.016ab	0.071±0.014c	0.068±0.017cd
侧柏	0.039±0.009d	0.028±0.003d	0.027±0.007bc	0.038±0.011ab	0.066±0.015c	0.066±0.009d
油松	0.045±0.014cd	0.039±0.003d	0.022±0.013bc	0.019±0.010b	0.067±0.017c	0.058±0.010d
雪松	0.044±0.010cd	0.034±0.005d	0.031±0.014b	0.036±0.015ab	0.075±0.004c	0.070±0.011cd
砂地柏	0.027±0.013d	0.025±0.006d	0.018±0.008bc	0.021±0.003b	0.045±0.021c	0.046±0.008d
白扦	0.045±0.011cd	0.031±0.001d	0.049±0.010a	0.051±0.014a	0.094±0.016bc	0.082±0.013cd
华山松	0.041±0.008d	0.034±0.008d	0.019±0.013bc	0.019±0.005b	0.060±0.017c	0.053±0.005d
粗榧	0.041±0.013d	0.037±0.015d	0.026±0.010bc	0.048±0.011ab	0.067±0.019c	0.084±0.012cd
紫丁香	0.145±0.013a	0.108±0.001b	0.015±0.003c	0.005±0.003b	0.160±0.011ab	0.112±0.007bc
金银木	0.079±0.012c	0.089±0.009bc	0.036±0.009ab	0.035±0.003ab	0.115±0.021bc	0.124±0.012bc
锦带	0.064±0.014cd	0.051±0.008cd	0.038±0.004ab	0.020±0.009b	0.102±0.018bc	0.071±0.010cd
太平花	0.110±0.012bc	0.086±0.013bc	0.017±0.012bc	0.011±0.002b	0.127±0.006bc	0.097±0.012cd
贴梗海棠	0.118±0.012bc	0.087±0.011bc	0.015±0.012c	0.030±0.011ab	0.134±0.001bc	0.117±0.012bc
蒙椴	0.113±0.025bc	0.144±0.010a	0.020±0.006bc	0.030±0.010ab	0.133±0.021bc	0.173±0.001a
流苏树	0.169±0.006a	0.116±0.005a	0.018±0.006bc	0.019±0.011b	0.188±0.010a	0.135±0.013b
暴马丁香	0.120±0.011b	0.083±0.008bc	0.016±0.008c	0.045±0.011ab	0.136±0.012b	0.128±0.009bc
山杏	0.084±0.012bc	0.078±0.012c	0.014±0.004c	0.030±0.010ab	0.098±0.007bc	0.093±0.016cd
梓树	0.108±0.020bc	0.095±0.010bc	0.012±0.003c	0.017±0.009b	0.120±0.022bc	0.112±0.002bc
枫杨	0.084±0.019bc	0.083±0.008bc	0.025±0.011bc	0.007±0.003b	0.109±0.014bc	0.090±0.010cd
紫荆	0.097±0.024bc	0.103±0.007bc	0.012±0.002c	0.014±0.003b	0.109±0.004bc	0.117±0.004bc
槲栎	0.061±0.006cd	0.058±0.012cd	0.026±0.002bc	0.012±0.002b	0.087±0.007c	0.070±0.010cd
杜仲	0.057±.0.001cd	0.057±0.004cd	0.018±0.016bc	0.020±0.008b	0.075±0.014c	0.077±0.012cd
小叶朴	0.074±0.010cd	0.062±0.005cd	0.021±0.012bc	0.018±0.009b	0.095±0.019bc	0.080±0.004cd
木槿	0.105±0.014bc	0.094±0.009bc	0.016±0.001c	0.005±0.002b	0.121±0.014c	0.099±0.008c
鸡麻	0.077±0.015cd	0.055±0.007cd	0.010±0.010c	0.007±0.004b	0.087±0.025c	0.062±0.003d
山茱萸	0.090±0.006cd	0.085±0.015bc	0.016±0.012c	0.007±0.003b	0.106±0.006bc	0.092±0.017cd
元宝枫	0.078±0.004bc	0.074±0.007c	0.015±0.011c	0.011±0.005b	0.093±0.011bc	0.085±0.007cd
山桃	0.085±0.010bc	0.067±0.013cd	0.004±0.001c	0.010±0.006b	0.089±0.010c	0.077±0.010cd
栾树	0.085±0.006bc	0.068±0.004c	0.004±0.001c	0.003±0.001b	0.089±0.005c	0.01±0.005cd

注:不同字母表示差异显著性($P<0.05$)。

从当年生枝 Hg 含量看,2016 年在 0.004～0.049 mg/kg,2018 年在 0.003～0.051 mg/kg。与叶片 Hg 含量相比,30 种树种的枝条 Hg 含量远低于叶片 Hg 含量。从 2 a 的当年生枝单位重量 Hg 含量测定结果看,2016 年和 2018 年 1 年生枝条中 Hg 含量最高的树种均为白扦,分别为 0.049 mg/

kg、0.051 mg/kg；含量最低的树种分别为山桃(0.004 mg/kg)和栾树(0.003 mg/kg)，但针叶树种单位重量枝条 Hg 含量和阔叶树种无明显差异。具体排序见图 1B 及图 2B。

因此，从 2 a 不同器官单位重量测定结果看，树种排序并不完全一致，有必要探索准确评价植物 Hg 吸收能力方法。

2.2 不同数据表征的 30 种树木 Hg 吸收能力排序对比

2.2.1 30 种树木依据不同器官 Hg 含量排序 由于不同树种 Hg 含量测定数值有时彼此差异不大，简单排序可能缺乏客观性，因此根据系统聚类法，采用平方 Euclidean 距离，在欧式距离 7 处，对 30 种树木吸收 Hg 含量进行聚类分析，认定同一类植物具有相似的能力。

用 2016 年叶片单位重量 Hg 含量测定数据进行排序聚类，结果如图 1A，可将 30 种树木分为 3 类：流苏树、丁香为第 1 类，这类树木 Hg 含量较高(0.145～0.169 mg/kg)；暴马丁香、贴梗海棠、蒙椴、太平花等 16 种树木为第 2 类，Hg 含量中等(0.074～0.120 mg/kg)；锦带、槲栎、杜仲和白扦等 12 种针叶为第 3 类，Hg 含量较低(0.027～0.064 mg/kg)。

用 2016 年当年生枝条 Hg 含量测定数据进行聚类，结果如图 1B。30 种树木分为 3 类：白扦为第 1 类，Hg 含量较高(0.049 mg/kg)；锦带、金银木、雪松等 10 种树木为第 2 类，Hg 含量中等(0.022～0.038 mg/kg)；小叶朴、蒙椴等 19 种为第 3 类，这类树木 Hg 含量较低(0.004～0.021 mg/kg)。

聚类成员(A)

案例号	树种	聚类
1	流苏树	1
2	丁香	1
3	暴马丁香	2
4	贴梗海棠	2
5	蒙椴	2
6	太平花	2
7	梓树	2
8	木槿	2
9	紫荆	2
10	山茱萸	2
11	山桃	2
12	栾树	2
13	枫杨	2
14	山杏	2
15	金银木	2
16	元宝枫	2
17	鸡麻	2
18	小叶朴	2
19	锦带	3
20	槲栎	3
21	杜仲	3
22	白皮松	3
23	白扦	3
24	油松	3
25	雪松	3
26	华山松	3
27	圆柏	3
28	粗榧	3
29	侧柏	3
30	砂地柏	3

聚类成员(B)

案例号	树种	聚类
1	白扦	1
2	锦带	1
3	金银木	2
4	雪松	2
5	圆柏	2
6	白皮松	2
7	侧柏	2
8	粗榧	2
9	槲栎	2
10	枫杨	2
11	油松	2
12	小叶朴	3
13	蒙椴	3
14	华山松	3
15	杜仲	3
16	流苏树	3
17	砂地柏	3
18	太平花	3
19	暴马丁香	3
20	山茱萸	3
21	木槿	3
22	元宝枫	3
23	贴梗海棠	3
24	丁香	3
25	山杏	3
26	梓树	3
27	紫荆	3
28	鸡麻	3
29	栾树	3
30	山桃	3

聚类成员(C)

案例号	树种	聚类
1	流苏树	1
2	丁香	1
3	暴马丁香	2
4	贴梗海棠	2
5	蒙椴	2
6	太平花	2
7	木槿	2
8	梓树	2
9	金银木	2
10	紫荆	2
11	枫杨	2
12	山茱萸	2
13	锦带	2
14	山杏	3
15	小叶朴	3
16	白扦	3
17	元宝枫	3
18	山桃	3
19	栾树	3
20	鸡麻	3
21	槲栎	3
22	白皮松	3
23	杜仲	3
24	雪松	3
25	圆柏	3
26	粗榧	3
27	油松	3
28	侧柏	3
29	华山松	3
30	砂地柏	3

图 1 30 种园林树木不同器官中 Hg 含量系统聚类分析(2016)

Fig. 1 Systematic cluster analysis of Hg content in the organs of 30 ornamental trees(2016)

用 2016 年叶片和当年生枝条 Hg 总含量数据聚类，结果如图 1C。流苏树、丁香为第 1 类，Hg 含量较高(0.160～0.188 mg/kg)；暴马丁香、贴梗海棠等 11 种树木为第 2 类，Hg 含量中等(0.102～0.136 mg/kg)；山杏、小叶朴等 17 种为第 3 类，Hg 含量较低(0.045～0.098 mg/kg)。

将 2016 年数据所做的 3 种不同聚类的结果进行对比分析,可以看出,用叶片 Hg 含量的排序与叶片和当年生枝条总含量的排序吻合度较高,吸收 Hg 能力均表现出强弱一致的树种见表 3。

表 3　叶片吸收 Hg 含量和叶枝吸收 Hg 总含量排序一致的树种(2016)

Table 3　Tree species with the same order of Hg uptake by leaves and total Hg uptake by branches (2016)

第 1 类	第 2 类	第 3 类
流苏树、丁香	暴马丁香、贴梗海棠、蒙椴、太平花、梓树、木槿、金银木、紫荆、枫杨、山茱萸	槲栎、杜仲、白皮松、白扦、油松、雪松、华山松、圆柏、粗榧、侧柏、砂地柏

用 2018 年数据做相同分析,叶片 Hg 含量进行聚类,结果如图 2A。蒙椴为第 1 类,Hg 含量较高;流苏树、丁香紫荆等 11 种树木为第 2 类,Hg 含量中等;山杏、元宝枫和 9 种针叶树种等 18 种树木为第 3 类,这类树木 Hg 含量较低。

用当年生枝条 Hg 含量数据聚类,结果如图 2B。白扦、粗榧、暴马丁香为第 1 类,Hg 含量较高;侧柏、金银木、雪松等 6 种树木为第 2 类,Hg 含量中等;白皮松、砂地柏、锦带等 21 种为第 3 类,这类树木 Hg 含量较低。

用叶片和当年生枝条总含量进行聚类,结果如图 2C。蒙椴为第 1 类,Hg 含量较高;流苏树、暴马丁香、金银木等 7 种树木为第 2 类,Hg 含量中等;木槿、太平花、山杏和 9 种针叶树种等 22 种为第 3 类,这类树木 Hg 含量较低。

结果表明,与 2016 年的结果一致,叶片 Hg 含量的排序与叶片和当年生枝条总含量的排序吻合度很高。

聚类成员(A)

案例号	树种	聚类
1	蒙椴	1
2	流苏树	2
3	丁香	2
4	紫荆	2
5	梓树	2
6	木槿	2
7	金银木	2
8	贴梗海棠	2
9	太平花	2
10	山茱萸	2
11	枫杨	2
12	暴马丁香	2
13	山杏	3
14	元宝枫	3
15	栾树	3
16	山桃	3
17	小叶朴	3
18	槲栎	3
19	杜仲	3
20	鸡麻	3
21	锦带	3
22	圆柏	3
23	油松	3
24	白皮松	3
25	粗榧	3
26	雪松	3
27	华山松	3
28	白扦	3
29	侧柏	3
30	砂地柏	3

聚类成员(B)

案例号	树种	聚类
1	白扦	1
2	粗榧	1
3	暴马丁香	1
4	侧柏	2
5	雪松	2
6	金银木	2
7	贴梗海棠	2
8	蒙椴	2
9	圆柏	2
10	白皮松	3
11	砂地柏	3
12	锦带	3
13	杜仲	3
14	华山松	3
15	油松	3
16	流苏树	3
17	小叶朴	3
18	梓树	3
19	山杏	3
20	紫荆	3
21	槲栎	3
22	元宝枫	3
23	太平花	3
24	山桃	3
25	鸡麻	3
26	山茱萸	3
27	枫杨	3
28	木槿	3
29	丁香	3
30	栾树	3

聚类成员(C)

案例号	树种	聚类
1	蒙椴	1
2	流苏树	2
3	暴马丁香	2
4	金银木	2
5	贴梗海棠	2
6	紫荆	2
7	丁香	2
8	梓树	2
9	木槿	3
10	太平花	3
11	山杏	3
12	山茱萸	3
13	枫杨	3
14	元宝枫	3
15	粗榧	3
16	白扦	3
17	小叶朴	3
18	山桃	3
19	杜仲	3
20	栾树	3
21	锦带	3
22	槲栎	3
23	雪松	3
24	圆柏	3
25	侧柏	3
26	白皮松	3
27	鸡麻	3
28	油松	3
29	华山松	3
30	砂地柏	3

图 2　30 种园林树木各器官中 Hg 含量系统聚类结果(2018)

Fig. 2　Systematic clustering of Hg content in the organs of 30 ornamental trees(2018)

综上,叶片 Hg 含量较当年生枝条,更适合作为树木单位重量吸收汞能力判断的器官。

2.2.2　30 种树木不同年份吸收 Hg 含量聚类分析　上述分析结果表明,叶片可以作为不同树种 Hg 吸收能力的取样器官,对 30 种树木叶片单位重量 Hg 含量从 2016 年和 2018 年以及 2 a 均值(2016 年和

2018 年)3 个角度,分别进行聚类,结果如图 3 所示。

可以看出,2016 年与 2018 年 30 种树种 Hg 含量的排序不一致,聚类也呈现出一些差异:丁香 2016 年聚类在第 1 类,2018 年则聚类在第 2 类;蒙椴 2016 年聚类在含量中等的第 2 类,2018 年则在排序较高的第 1 类;小叶朴、鸡麻 2 a 的聚类结果也不一致。

2016 年和 2018 年的 Hg 含量平均值的聚类结果(图 3C)显示,聚类为第 1 位 Hg 含量较高的为流苏树、蒙椴、丁香,都包含了 2016 年和 2018 年聚类在第 1 类的树种,第 2 类的贴梗海棠、梓树等 13 种树木均为 2016 年和 2018 年第 2 类的共有树种,9 种针叶树等树木也稳定聚类在第 3 类。

因此,综合 2 个年份的 Hg 含量数据,能更稳定地判断树木吸收 Hg 的能力。

聚类成员(A)

案例号	树种	聚类
1	流苏树	1
2	丁香	1
3	暴马丁香	2
4	贴梗海棠	2
5	蒙椴	2
6	太平花	2
7	梓树	2
8	木槿	2
9	紫荆	2
10	山茱萸	2
11	山桃	2
12	栾树	2
13	枫杨	2
14	山杏	2
15	金银木	2
16	元宝枫	2
17	鸡麻	2
18	小叶朴	2
19	锦带	3
20	榔栎	3
21	杜仲	3
22	白皮松	3
23	白扦	3
24	油松	3
25	雪松	3
26	华山松	3
27	圆柏	3
28	粗榧	3
29	侧柏	3
30	砂地柏	3

聚类成员(B)

案例号	树种	聚类
1	蒙椴	1
2	流苏树	2
3	丁香	2
4	紫荆	2
5	梓树	2
6	木槿	2
7	金银木	2
8	贴梗海棠	2
9	太平花	2
10	山茱萸	2
11	枫杨	2
12	暴马丁香	2
13	山杏	3
14	元宝枫	3
15	栾树	3
16	山桃	3
17	小叶朴	3
18	榔栎	3
19	杜仲	3
20	鸡麻	3
21	锦带	3
22	圆柏	3
23	油松	3
24	白皮松	3
25	粗榧	3
26	雪松	3
27	华山松	3
28	白扦	3
29	侧柏	3
30	砂地柏	3

聚类成员(C)

案例号	树种	聚类
1	流苏树	1
2	蒙椴	1
3	丁香	1
4	贴梗海棠	2
5	梓树	2
6	暴马丁香	2
7	紫荆	2
8	木槿	2
9	太平花	2
10	山茱萸	2
11	枫杨	2
12	金银木	2
13	山杏	2
14	栾树	2
15	山桃	2
16	元宝枫	2
17	小叶朴	3
18	鸡麻	3
19	榔栎	3
20	锦带	3
21	杜仲	3
22	白皮松	3
23	油松	3
24	圆柏	3
25	雪松	3
26	粗榧	3
27	白扦	3
28	华山松	3
29	侧柏	3
30	砂地柏	3

图 3 30 种园林树木叶片中 Hg 含量各年份系统聚类结果

Fig. 3 Systematic cluster results analysis of Hg content in the organs of 30 ornamental trees(2018)

2.3 北京园林 30 种树木吸收 Hg 含量能力排序

采用本研究提出的方法,依据 2016 年和 2018 年单位重量叶片 Hg 含量数据对 30 种树木 Hg 吸收能力进行排序图 3C,由高到低依次为流苏树、蒙椴、丁香、贴梗海棠、梓树、暴马丁香、紫荆、木槿、太平花、山茱萸、枫杨、金银木、山杏、栾树、山桃、元宝枫、小叶朴、鸡麻、榔栎、锦带、杜仲、白皮松、油松、圆柏、雪松、粗榧、白扦、华山松、侧柏、砂地柏。流苏树、蒙椴、丁香排在第 1 类,吸收 Hg 含量较高;贴梗海棠、梓树等 13 种树木排在第 2 类,吸收 Hg 含量中等;小叶朴、鸡麻以及 9 种针叶树等 13 种树木吸收 Hg 含量较低。9 种针叶树吸收 Hg 含量最低,低于阔叶树种。

3 结论与讨论

采用 2 a、测定木本植物叶器官的 Hg 含量,能更稳定地指征不同树木吸收重金属 Hg 的能力强弱。对比不同器官树木吸收 Hg 能力的排序,2 a 的数据结果均显示,30 种树木的叶片、枝条共同吸收 Hg 的能力吻合度很高,同时考虑到树木叶片的 Hg 含量均远大于枝条 Hg 含量,叶片 Hg 能够作为树木单位重量吸收汞能力强弱的判断依据。对比不同

年份树木叶片吸收 Hg 能力的排序,2 a 的平均值进行对比的结果表现的与 2 a 的数据重合度更高,测定 2 a 甚至多年数据的平均值的结果相比 1 a 的测定结果,可能更能稳定地指征树木吸收 Hg 能力强弱。

按照上述评价方法,基于单位重量角度看,北京园林中阔叶树种单位重量吸收 Hg 含量能力强于针叶树种;乔木高于灌木。

基于单位重量,流苏树、蒙椴、紫丁香 3 种园林树木吸收 Hg 的能力较强,白皮松、白扦等 9 种针叶植物吸收 Hg 的能力较弱。这可能是由于植物地上部分(主要是叶片)中的汞主要来自于大气[13-14],阔叶树和针叶树压吸收 Hg 的差异可能是与 2 种叶片特征(如叶片气孔形态结构、叶片表面特征、叶片比表面积等)有关,阔叶林植物的叶面积较大,更容易对大气中的 Hg 进行吸附并吸收。另外由于本研究中提到的阔叶树均为落叶树种,其叶片到秋季可以随落叶移除,吸收大气汞相比常绿针叶树种更有价值。

需要注意的是,本研究结论是基于园林树木单位重量 Hg 含量吸收能力的排序,树种吸收 Hg 的整体能力应该考虑地上部绿量和地下根系吸收力,如借助一些地上绿量测定模型[15-16]等,进行整体推算才能获得该树种地上部分对 Hg 的吸收量。

参考文献:

[1] 何博,赵慧,王铁宇,等.典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价[J].环境科学,2019,40(6):2869-2876.
HE B,ZHAO H,WANG T Y,*et al*. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soils from a typical urbanized area[J]. Environmental Science,2019,40(6):2869-2876. (in Chinese)

[2] 阿衣古丽·艾力亚斯,玉米提·哈力克,阿丽亚·拜都热拉,等.阿克苏市常见园林树种叶片重金属含量分布特征[J].西北林学院学报,2014,29(1):192-196.
AYIGULI A, UMITI H, ALIYA B, *et al*. Distributions of heavy metal contents of common urban tree leaves in Aksu[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(1): 192-196. (in Chinese)

[3] MAHAFFEY KATHRYN R. Fish and shellfish as dietary sources of methylmercury and the omega-3 fatty acids, eicosahexaenoic acid and docosahexaenoic acid: risks and benefits[J]. Environmental Research, 2004, 95(3): 414-428.

[4] 杨少斌,于鑫,孙向阳,等.北京城区绿地土壤重金属污染评价与空间分析[J].生态环境学报,2018,27(5):933-941.
YANG S B,YU X,SUN X Y,*et al*. Pollution assessment and spatial structure analysis of heavy metals of greenbelt soil in Beijing urban area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018,27(5):933-941. (in Chinese)

[5] 杨孝智,陈扬,徐殿斗,等.北京地铁站灰尘中重金属污染特征及健康风险评价[J].中国环境科学,2011,31(6):944-950.
YANG X Z,CHEN Y,XU D D,*et al*. Characteristics of heavy metal pollution and health risk assessment in subway dust in Beijing[J]. China Environmental Science, 2011, 31(6): 944-950. (in Chinese)

[6] 刘春华,岑况.北京市街道灰尘的化学成分及其可能来源[J].环境科学学报,2007,27(7):1181-1188.
LIU C H, CEN K, *et al*. Chemical composition and possible sources of elements in street dusts in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(7): 1181-1188. (in Chinese)

[7] 田珮.城市典型工业区绿地汞污染研究[D].上海:华东师范大学,2017.

[8] 郑冬梅,王起超,郑娜,等.葫芦岛市有色冶金-化工区土壤与植物汞污染[J].生态环境,2007,16(3):822-824.
ZHENG D M,WANG Q C,ZHENG N,*et al*,Mercury pollution onto soil and plants in the non-ferrous metallurgy and chemical industrial areas of Huludao city[J]. Ecology and Environment,2007,16(3):822-824. (in Chinese)

[9] 韩玉丽.北京市不同功能区 5 种常见树种对重金属富集特征研究[D].北京:中国林业科学研究院,2015.

[10] 李馨.内蒙古包头市耐大气和土壤重金属污染的园林树种选择研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.

[11] 王素燕,陈学泽,肖艳辉,等.微波消解-电感耦合等离子发射光谱法测定茶树体中重金属镉和铬[J].西北林学院学报,2008,23(1):146-148,153.
WANG S Y,CHEN X Z,XIAO Y H,*et al*. Determination of heavy metals cd and cr in tea plant by microwave aided digestion and inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008,23(1):146-148,153. (in Chinese)

[12] 陈福强.微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定植物样品中的 Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Cr、As、Hg[J].资源节约与环保,2017(7):41-42.

[13] NIU Z C,ZHANG X S,WANG Z W,*et al*. Field controlled experiments of mercury accumulation in crops from air and soil[J]. Environmental Pollution,2011,159(10):2684-2689.

[14] NIU Z C,ZHANG X S,WANG S,*et al*. The linear accumulation of atmospheric mercury by vegetable and grass leaves: potential biomonitors for atmospheric mercury pollution[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2013, 20(9): 6337-6343.

[15] 胡春,马渊洁,曾凡景,等.城市绿地系统规划中园林植物绿量计算模型构建及应用[J].绿色科技,2013(4):88-92.
HU C,MA Y J,ZENG F J,*et al*. Establishment and application of plants' leaf area index model in urban green system planning[J]. Journal of Green Science and Technology, 2013(4):88-92. (in Chinese)

[16] 陈自新,苏雪痕,刘少宗,等.北京城市园林绿化生态效益的研究(2)[J].中国园林,1998(2):49-52.