

## 乌鲁木齐河滩快速路绿化树种不同器官重金属含量的比较

卡得力亚·加帕尔<sup>1</sup>, 玉米提·哈力克<sup>1\*</sup>, 史磊<sup>1</sup>, 丁全斌<sup>2</sup>,  
美合日阿依·希尔亚孜旦<sup>1,3</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院/新疆维吾尔自治区绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;  
2. 乌鲁木齐市林业和草原局(市园林管理局) 燕尔窝风景区管理处, 新疆 乌鲁木齐 830049; 3. 和田师范专科学校, 新疆 和田 848000)

**摘要:**探究园林植物不同器官对重金属富集能力的差异,为城市绿化植物选配提供科学依据。以乌鲁木齐市河滩快速路绿化带为对象,利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)对5种常见绿化树种(海棠、山楂、丁香、白榆、大叶白蜡)叶片、树枝和树皮中Cr、Cu、Zn、Ni、Pb、Mn含量进行测定,对比分析5种植物不同器官的重金属富集能力,解析不同器官重金属元素含量(文中提到的含量为质量分数)的相关关系。结果表明,5种绿化树种不同器官对6种重金属的富集能力有显著差异。在叶片尺度上,山楂的富集能力最强,对Cu、Cr、Ni、Zn、Mn元素的富集含量高于其他树种;海棠叶片对Pb元素富集能力相对较强。在树枝尺度上,山楂和白榆的重金属富集含量较高,而丁香和海棠的富集含量较低。在树皮尺度上,丁香的重金属含量高达 $233.861\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中Mn和Zn的比重较大,分别占47%和29%。各器官相关性分析可知,叶片与树枝重金属含量呈极显著相关,相关系数为0.444;树枝与树皮重金属含量呈极显著相关性,相关系数为0.572。各器官6种不同重金属含量的相关性分析得知,叶片中Cu与Cr、Ni、Zn和Mn呈显著正相关,与Pb呈负相关(-0.101);树枝中Cu和Mn呈显著正相关(0.891);树皮中Cu与Cr呈负相关性,相关系数为-0.406。通过隶属函数法分析可知,山楂的重金属富集能力最强,海棠的最差。通过3个器官的重金属含量比较发现,叶片的重金属富集能力优于树枝和树皮,3种器官重金属富集含量由大到小排序为:叶片、树皮、树枝。以5种绿化树木重金属富集能力看,将山楂和丁香可作为乌鲁木齐道路绿化中优选并推广的园林植物。

**关键词:**绿化树种;重金属;富集能力;河滩快速路;乌鲁木齐

**中图分类号:**S731.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2022)01-0240-07

### Comparison of Heavy Metal Contents in Different Organs of Greening Tree Species on the Hetan Expressway in Urumqi

Kadeliya Jiapaer<sup>1</sup>, Ümüt Halik<sup>1\*</sup>, SHI Lei<sup>1</sup>, DING Quan-bin<sup>2</sup>, Mihray Xiryazdan<sup>1,3</sup>

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University/Ministry of Education, Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2. Urumqi Forestry and Grassland Bureau, Yanerwo Scenic Area Management Office, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 3. Hetian Normal School, Hetian 848000, Xinjiang, China)

**Abstract:** Heavy metals are one of the most common pollutants in the urban ecosystems, they can be easily accumulated in roadside vegetations and soils. Different greening tree species present different enrichment capacities of heavy metals, however, plant pruning management may affect absorption ability of the vegetation. Therefore, to provide scientific basis for the selection of urban greening plants, it is necessary to ana-

收稿日期:2021-03-07 修回日期:2021-05-21

基金项目:国家自然科学基金(31770750)。

第一作者:卡得力亚·加帕尔。研究方向:城市生态。E-mail: kadiryajappar@qq.com

\* 通信作者:玉米提·哈力克,教授,博士生导师。研究方向:生态系统生态学。E-mail: halik@xju.edu.cn

lyze the differences of heavy metal absorption ability of plant organs. Taking the greening belt of Urumqi Hetan Expressway as the research object, the contents of the metals (Cr, Cu, Zn, Ni, Pb and Mn) in the plant leaves, twigs and barks of five common tree species (*Malus spectabilis*, *Crataegus pinnatifida*, *Syringa oblata*, *Ulmus pumila*, *Fraxinus rhynchophylla*) were measured by using optical emission spectrometer (ICP-OES). The correlation between six heavy metal contents in different organs were analyzed to reveal the correlation of different organs. It was found that the heavy metal contents in different organs of 5 tree species were significantly different. In the plant leaves, *C. pinnatifida* demonstrated the strongest enrichment capacity to heavy metals, especially to Cu, Cr, Ni, Zn, and Mn. The leaves of *M. spectabilis* had relatively strong ability to absorb Pb. In twigs, *C. pinnatifida* and *U. pumila* were found to contain higher amount of heavy metals content, while the enrichment ability of *S. oblata* and *M. spectabilis* was weak. In the barks, the heavy metal content of *S. oblata* was up to  $233.861 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , among which Mn and Zn account for 47% and 29%, respectively. The correlation analysis showed that the heavy metal content in the leaves was significantly correlated with twigs, the coefficient was 0.444. The content of heavy metal in twigs was significantly correlated with bark, with a correlation coefficient of 0.572. In the leaves, Cu was significantly and positively correlated with Cr, Ni, Zn and Mn, and negatively correlated with Pb ( $-0.101$ ). In trigs, there was significant correlation between Cu and Mn, with the correlation coefficient of 0.891. In barks, Cu was negatively correlated with Cr ( $-0.406$ ). A Membership function analysis showed that *C. pinnatifida* had the strongest enrichment ability to heavy metals, while *M. spectabilis* had the weakest enrichment ability. The order of heavy metal accumulation ability of three organs was leaf > bark > twig. Based on the heavy metal absorption ability of the five trees, *C. pinnatifida* and *S. oblata* can be used as preferred plants for roadside greening in Urumqi.

**Key words:** greening tree; heavy metal; enrichment ability; Hetan Expressway; Urumqi

重金属是城市生态系统中常见的污染物之一, 由于难分解、易累积, 对动植物和人类健康造成影响<sup>[1]</sup>。随着乌鲁木齐市机动车拥有量的急速增长, 交通尾气和降尘中的重金属污染引起了广泛的重视<sup>[2]</sup>。城市交通排放的重金属颗粒会沉积在路边的绿化带土壤中, 由绿化植物吸收而逐步富集<sup>[3]</sup>。已有研究表明<sup>[4-6]</sup>, 草本、地衣植物重金属富集能力较强, 但在乌鲁木齐等干旱区绿洲城市, 由于灌溉用水的限制, 草本和地衣植物量少, 主要依靠乔灌木绿化植物来降低大气和土壤中的重金属含量。众多研究表明<sup>[7-12]</sup>, 绿化植物的配置结构、年龄、物候以及树木种类、株高、胸径、树冠、叶片密度等差异会影响植物对重金属的富集能力。此外, 同一树种不同器官的重金属富集能力也有显著差异<sup>[13]</sup>。

然而, 针对干旱区绿化植物叶片、树枝、树皮等不同器官对重金属的吸收能力的研究相对较少。此外, 城市绿地维护工作中定期对路边乔灌木叶片、树枝进行修剪, 而正是树木不同器官对周围环境中的重金属具有一定的吸收和富集作用。因此, 探索干旱区城市绿化树种不同器官重金属富集能力, 对合理配置城市绿化树种以及促进城市生态环境的良性循环具有重要意义。

本研究以乌鲁木齐市河滩快速路绿化带 5 种常

见行道树为样本, 分别测定其叶片、枝条、树皮中 Cr、Cu、Zn、Ni、Pb、Mn 等 6 种重金属元素的含量 (文中提到的含量均为质量分数), 并通过隶属函数法对 5 种绿化树木叶片、树枝和树皮等不同器官的重金属富集特征进行对比分析, 旨在对乌鲁木齐市城市绿化树种的筛选与合理管理提供理论参考。

## 1 研究区概况

乌鲁木齐市地处亚欧大陆腹地 ( $42^{\circ}45' - 45^{\circ}20' \text{ N}$ ,  $86^{\circ}37' - 88^{\circ}58' \text{ E}$ ), 行政区域面积为  $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 2019 年底常驻人口为  $355.2 \times 10^4$ <sup>[14]</sup>。地处中温带大陆性干旱气候, 年平均气温  $6.6^{\circ} \text{ C}$ , 年均降水量  $270 \text{ mm}$ , 年均风速  $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。乌鲁木齐河滩快速路是贯通城市南北区的主干道, 全长  $28 \text{ km}$ , 现有道路绿地面积  $262 \text{ hm}^2$ 。该路段绿化树种相对丰富, 且涵盖了乌鲁木齐城市街道绿化中的主要树种。常见的树种有白榆 (*Ulmus pumila*)、云杉 (*Picea asperata*)、大叶白蜡 (*Fraxinus rhynchophylla*)、山楂 (*Crataegus pinnatifida*)、丁香 (*Syringa oblata*)、新疆杨 (*Populus alba* var. *pyramidalis*)、圆冠榆 (*Ulmus densa*)、垂柳 (*Salix babylonica*)、复叶槭 (*Acer negundo*)、榆叶梅 (*Prunus triloba*)、夏橡 (*Quercus robur*)、海棠 (*Malus spectabilis*) 等<sup>[6, 15]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

选取乌鲁木齐河滩快速路广汇桥至珠江桥段为研究区,该路段是乌鲁木齐市城南主要进城入口及道路交汇点,车流量较大,周围没有明显工业污染源,汽车尾气排放严重。野外样品采集工作在 2018 年 5—6 月进行,在该路段两侧绿化带离快速路 10~20 m 距离,植物生长茂密处设定 3 个取样点,根据林带配置结构和园林植物种类、多度、频度,筛选了海棠、山楂、丁香、白榆、大叶白蜡等 5 种常见乔木。各样点内每种树选取 3 棵胸径基本一致的健康树木,分别用高枝剪和树皮刮刀对其叶片、枝条和树皮进行采集。为减少误差,从树冠的东、南、西、北 4 个方向,在整个冠层内均匀采样,装入密封袋,带回实验室测定分析。采集叶片时,选择长势良好的叶片,数量为 15~20 片;采集树枝时,为减少给树木带来的损失,以树梢前端幼嫩枝条为主,取 4~5 枝;采集的树皮样品大小为 4~5 cm<sup>2</sup>,取 5~6 个。

### 2.2 样品预处理与测定方法

样品带回实验室后,用自来水清洗 1 次,超纯水清洗 3 次,在 105 ℃烘干箱杀青 30 min,相继 60 ℃烘干至恒重;随后将已烘干的植物样品粉碎(FZ570 型粉碎机),过 100 目筛后保存至自封袋。

准确称取 0.2 g 已粉碎好的样本于消解管中,加入 8 mL 混合酸 HClO<sub>4</sub>—HNO<sub>3</sub>—H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (6:1:1),振荡均匀,用带孔管塞塞严,静置过夜。然后在马弗炉上 80 ℃消解 3~4 h 至溶液变绿,140 ℃加热 30 min,然后置于 180 ℃继续消解 1 h。取出消化管,冷却至室温,每管加入 1 mL 浓硝酸,180 ℃加热 1~2 h,至溶液透明澄清,产生白烟,反应达到终点。经过冷却,过滤,定容到 10 mL。

采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)

进行 Cr、Cu、Zn、Ni、Pb、Mn 的含量测定,每种植物测定 3 个样品,重复 3 次,取均值。在测试过程中,使用国家标准物质样品信息中心[GBW 10052(GSB-30)]作标样进一步验证测试的精度和稳定性。

### 2.3 植物重金属富集能力评价

隶属函数评估法是通过模糊数学原理,利用函数法进行综合评估。采用隶属函数法来对植物的富集能力进行评价<sup>[13,16]</sup>。计算 5 种植物的隶属函数值,最后根据平均值综合评价植物对 Cu、Pb、Zn、Ni、Mn 和 Cr 的综合富集能力。计算公式为:

$$X(\mu) = [X - X_{\min}] / [X_{\max} - X_{\min}] \quad (1)$$

式中: $X$  为鉴定样品某一指标的测定值; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$  为测定值中的最大和最小值。

采用 Excel 2010 进行数据预处理,SPSS 17.0 进行方差分析、相关性分析;图表可视化通过 Origin 2019 和 Excel 2010 来完成的。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同植物富集的重金属含量

5 种植物叶片、树枝和树皮中重金属总含量平均值见表 1。不同植物器官对重金属元素富集能力具有明显差异。Cu 元素在 5 种植物体内的平均含量幅度为 48.87~81.63 mg·kg<sup>-1</sup>;其中,大叶白蜡的 Cu 含量最高,为 81.63 mg·kg<sup>-1</sup>,海棠的最低,为 48.87 mg·kg<sup>-1</sup>;对于 Pb 元素,除了富集含量最高的海棠(41.05 mg·kg<sup>-1</sup>)之外,其他植物的富集量较均匀。5 种绿化树种对 Cr 和 Ni 的富集特征具有一定的相似性,其中山楂的富集含量最高,分别为 42.74 mg·kg<sup>-1</sup> 和 34.22 mg·kg<sup>-1</sup>。5 种树木对 Zn 元素的富集能力较均匀;其中,较突出的为山楂,333.52 mg·kg<sup>-1</sup>。对 Mn 元素各植物的富集含量相差较大,其中山楂的富集含量高达 293.27 mg·kg<sup>-1</sup>,而海棠树的相对较低至 88.25 mg·kg<sup>-1</sup>。

表 1 5 种绿化树木体内重金属平均含量

Table 1 Heavy metal contents of 5 greening trees

(mg·kg<sup>-1</sup>)

植物名称	Cu	Pb	Cr	Ni	Zn	Mn
大叶白蜡	81.63±0.10a	33.61±0.09c	13.88±0.11d	19.50±0.01c	135.20±0.72c	133.83±0.29b
山楂	78.30±0.01a	38.01±0.12b	42.74±0.04a	34.22±0.18a	333.52±0.91a	293.27±0.27a
白榆	65.84±0.22b	35.96±0.03b	16.74±0.09c	18.21±0.09c	137.92±0.30c	94.98±0.13c
丁香	61.13±0.18c	37.87±0.02b	20.37±0.04b	18.10±0.14c	140.61±0.53c	183.33±0.29b
海棠树	48.87±0.16d	41.05±0.04a	14.58±0.21d	16.27±0.11c	58.59±0.53d	88.25±0.73c

注:不同小写字母表示各树种间差异显著( $P<0.05$ )。

将某一种植物单一元素的富集含量除以该元素 5 种植物总富集量得到不同植物的富集比(图 1)。结果显示,大叶白蜡和山楂对 Cu 元素富集能力最强,各占 5 种树木总 Cu 含量的 16.16% 和 15.50%;海棠对 Pb 元素的富集比最高,可达 14.01%,其他

植物对 Pb 的富集比差异较小;山楂对 Cr、Ni、Zn、Mn 元素的累积含量较高,所占百分比分别为 25.18%、20.96%、24.02%、31.97%。

聚类分析热图将 5 种园林植物聚为 3 类(图 2)。山楂为第 1 类,重金属总含量累积为 820.016

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 富集的 Zn 和 Mn 元素含量相对很高; 白榆、大叶白蜡和丁香为第 2 类, 重金属总含量  $356.337 \sim 461.402 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 对 Cu、Pb、Zn、Mn 元素富集能力相对较强。第 3 类为海棠, 其富集的重金属总含量为  $267.618 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 3.2 不同器官积累的重金属含量特征

不同植物叶片、树枝及树皮的重金属富集含量

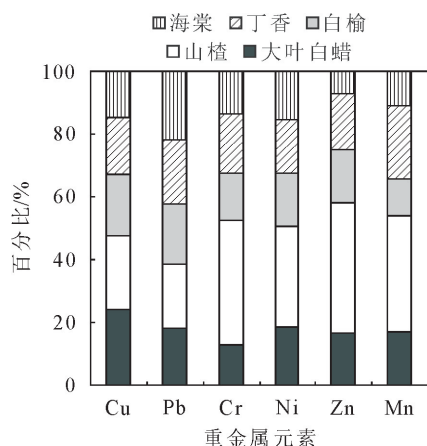


图 1 5 种树种对重金属元素含量占比

Fig. 1 Proportion of heavy metal content in 5 greening trees

有所差异(图 3)。叶片、树枝和树皮的 Cu 含量见图 3-Cu。树皮中, 大叶白蜡和白榆的 Cu 含量高于其树叶和树枝。大叶白蜡树皮的 Cu 含量高达  $41.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与 Cu 含量最低的海棠相比高出 2.5 倍。叶片中, 山楂的含量最高, 达  $42.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 海棠树依然最低,  $17.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。树枝中所有树种平均 Cu 含量较低, 为  $14.05 \sim 23.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

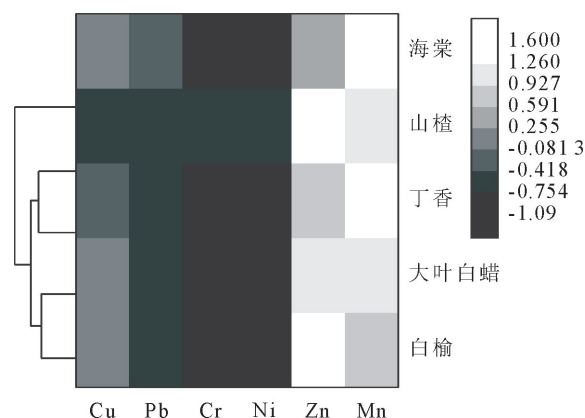


图 2 聚类分析热图

Fig. 2 Heat-map with hierarchical cluster analysis

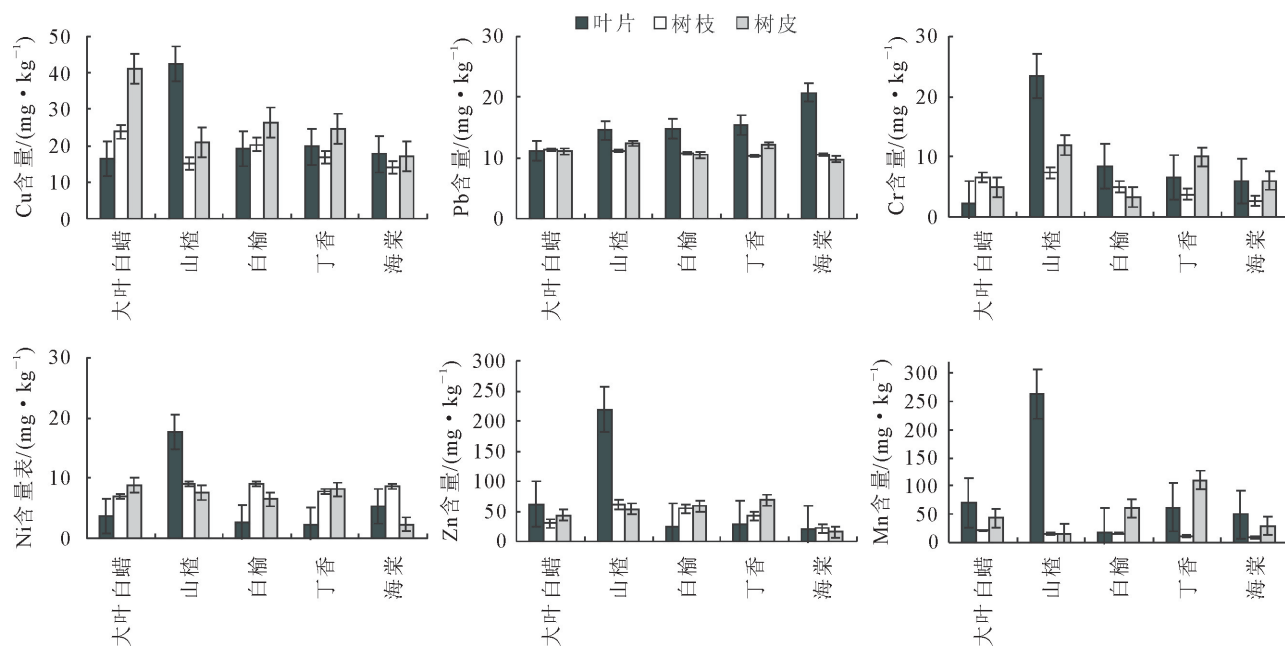


图 3 不同绿化树种叶片、枝条和树皮重金属含量变化

Fig. 3 Heavy metal content changes from leaves, twigs and barks of 5 greening tree species

从各器官的 Pb 含量来看(图 3), 海棠、白榆、山楂叶片的 Pb 含量均高于枝条和树皮。海棠叶片中 Pb 含量最高, 为  $20.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对比之下, 大叶白蜡的累积含量最低, 为  $11.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。5 种植物的树枝富集含量相对较接近, 为  $10.37 \sim 11.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。所有树种枝条与树皮间的 Pb 含量差值较小。海棠的叶片与枝条、树皮间含量差值比较大。

不同器官的 Cr 含量(图 3)山楂和白榆叶片的

含量较高, 其中山楂高达  $23.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。树皮中山楂含量较高( $11.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); 相比之下, 树枝富集含量较低。不同器官 Ni 含量 5 种树木树枝富集 Ni 的能力相差不大, 而山楂的叶片对其呈现较强的富集效应; 相对而言, 其他树种叶片富集能力较弱。树皮中大叶白蜡的含量最高, 为  $8.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 海棠最低, 为  $2.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

从图 3 可见, 叶片尺度上, 5 种树木对 Zn 的累



积含量相差较大,其中,山楂为 218.97 mg · kg<sup>-1</sup>,其余 4 种树木 Zn 含量为 21.00~61.84 mg · kg<sup>-1</sup>。树皮尺度上,除最低的海棠树(15.51 mg · kg<sup>-1</sup>),其余较均匀(42.93~69.12 mg · kg<sup>-1</sup>);树枝中各种树 Zn 含量相差并不大,最高为山楂(61.20 mg · kg<sup>-1</sup>),最低为海棠(21.87 mg · kg<sup>-1</sup>)。叶片中山楂的 Mn 含量高达 262.44 mg · kg<sup>-1</sup>,与其树枝、树皮含量差异显著;树皮中丁香的 Mn 累积含量最高

(109.97 mg · kg<sup>-1</sup>)。

分析叶片、树枝、树皮中重金属含量相关性(表 2)。叶片中 Cu 与 Cr、Ni、Zn 和 Mn 呈极显著相关,与 Pb 呈负相关,相关系数为-0.101。树枝中 Cu 与 Mn 呈显著相关性,相关系数为 0.891;Ni 与 Cu、Pb 和 Mn 呈负相关性,相关系数分别为-0.586、-0.294 和-0.387。树皮中 Cu 与 Cr 呈负相关,负相关系数为-0.406,其他元素未呈现相关性。

表 2 叶片、树枝、树皮中不同重金属的相关性

Table 2 Correlation of different heavy metals in the leaves, twigs and barks

	植物器官	Cu	Pb	Cr	Ni	Zn	Mn
Cu	叶片	1					
	树枝	1					
	树皮	1					
Pb	叶片	-0.101	1				
	树枝	0.562	1				
	树皮	0.920	1				
Cr	叶片	0.983 **	0.050	1			
	树枝	0.424	0.850	1			
	树皮	-0.406	0.814	1			
Ni	叶片	0.965 **	-0.033	0.934 *	1		
	树枝	-0.586	-0.294	0.047	1		
	树皮	0.679	0.759	0.250	1		
Zn	叶片	0.959 **	-0.281	0.900 *	0.966 *	1	
	树枝	0.062	1.050	0.586	0.576	1	
	树皮	0.205	0.726	0.318	0.781	1	
Mn	叶片	0.961 **	0.176	0.898 *	0.969 **	0.985 **	1
	树枝	0.891 *	0.848	0.764	-0.387	0.180	1
	树皮	0.124	0.233	0.009	0.342	0.641	1

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关, \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。下同。

通过不同器官相关性分析可知,叶片的重金属含量与树枝的重金属含量呈极显著相关,相关系数为 0.444;叶片与树皮之间未呈现相关性,而树枝与树皮之间呈极显著相关性,相关系数为 0.572(表 3)。

3.3 5 种绿化树种重金属富集能力排序

通过隶属函数值的对比来判断 5 种植物的重金属富集能力,其中 Δ 值越大表示植物富集能力越强(表 4)。根据 Δ 值可看出,山楂的重金属富集能力

最强。乌鲁木齐市河滩快速路绿化带 5 种树木中对 6 种重金属综合富集效果较强的为山楂和丁香,而海棠的富集能力相对较弱。

表 3 不同器官中重金属含量相关性

Table 3 Correlation of heavy metals in different organs

植物器官	叶片	树枝	树皮
叶片	1	0.444 **	0.279
树枝		1	0.572 **
树皮			1

表 4 不同树种对 6 种重金属富集能力的隶属函数值

Table 4 Comparison of comprehensive absorption capacity of six heavy metals in five greening trees species

植物种类	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn	Δ	排序
山楂	0.458	0.593	0.485	0.624	0.541	0.598	0.550	1
丁香	0.560	0.533	0.497	0.477	0.571	0.572	0.535	2
大叶白蜡	0.500	0.418	0.444	0.645	0.532	0.648	0.531	3
白榆	0.516	0.400	0.508	0.638	0.474	0.620	0.526	4
海棠	0.500	0.463	0.420	0.650	0.428	0.510	0.495	5

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

不同器官(树叶、树枝及树皮)中重金属富集含量差异因重金属种类不同而异。3种器官而言,叶片与树枝具有极显著相关性,与树皮无相关;树皮与树枝呈现极显著相关性。

6种重金属在各器官的相关性有所不同。叶片中,除Cu与Cr呈负相关,其他均呈极显著正相关;树皮中6种元素未呈现显著相关性;树枝中Cu与Mn具有显著相关性。

山楂和丁香对6种重金属元素的综合富集能力较强,可作为乌鲁木齐市城市环境绿化中优先选择的绿化物种。

### 4.2 讨论

乌鲁木齐市河滩快速路绿化带5种绿化树种对不同重金属的富集含量各不相同。每种植物对Mn、Zn、Cu的累积能力普遍较强,这可能与城市交通区域大气中重金属颗粒物浓度偏高有关<sup>[17]</sup>。此外,李彩霞等<sup>[18]</sup>对长沙市绿化带内乔木枝叶重金属富集能力研究而提出的“乔木对Cu的富集能力普遍较低”的结论与本研究相反,原因可能由于本研究主要在干旱区多风沙地区进行,样本采集涉及植物多种器官(枝、叶、皮),多器官研究对植物重金属富集能力提供更充分的依据。

植物叶片吸收的重金属来自大气污染沉降和根系提供的营养矿物质元素。本研究结果显示,叶片和树皮对重金属元素的富集贡献较大。特别是叶片对Mn、Zn的富集效能明显于其他器官。整体而言,叶片的重金属富集能力较强于树枝和树皮,这可能是因为叶片在光合作用中吸收体外气体,也可能积蓄重金属元素而敦促物质代谢,这与东部沿海城市的研究结果基本一致<sup>[9]</sup>。根据本研究结果可知,城市园林植物的树皮可以积累大气和土壤中的重金属,但叶片仍是对重金属富集方面起主导作用。

本研究结果显示,树叶中的部分重金属之间具有一定的显著相关性,而在树皮中却呈现微弱相关性。这可能由于植物不同器官的富集重金属途径不同而造成的;树皮更倾向于从根系土壤中吸收重金属元素,而叶片更善于从大气中吸收重金属<sup>[19-20]</sup>。此外,相比于其他城市,乌鲁木齐市近几年机动车流量剧增,道路交通密度、排染重金属含量也随之增加,促进了其累积到绿化带土壤中和园林植物体内<sup>[3,21-22]</sup>。

研究得出,乌鲁木齐市河滩快速路绿化带同一种植物的树叶、树枝及树皮中重金属含量有所差异,

表明植物不同器官的重金属富集能力具有显著差异性,这与大多数研究结论一致<sup>[13,16]</sup>。植物不同器官富集重金属能力可能受到植物体内复杂的生理机制等内在因素,并大气、土壤等外界环境因素以及交通工具等污染源的综合影响<sup>[23-24]</sup>。本研究中未展开所选植物生理机制和区域污染物来源分析,今后的研究中应综合考虑植物根系与其他器官的相关研究,以及大气和土壤的重金属本底值为参考依据,力求解析园林植物各器官内积累的重金属元素的来源。

### 参考文献:

- [1] HINI G, EZIZ M, WANG W, *et al.* Spatial distribution, contamination levels, sources, and potential health risk assessment of trace elements in street dusts of Urumqi City, NW China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2019, 26(8): 2112-2128.
- [2] 李珂,王燕军,王涛,等.乌鲁木齐市机动车排放清单研究[J]. *环境科学*, 2010, 23(4): 407-412.
- [3] SEVIK H, OZEL H B, CETIN M, *et al.* Determination of changes in heavy metal accumulation depending on plant species, plant organism, and traffic density in some landscape plants[J]. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2019, 12(2): 189-195.
- [4] HALIK U. Urban greening in arid regions: the example of the oasis cities in southern Xinjiang/China, with special consideration of ecological, socio-economic, and cultural aspects [M]. Berlin: TU Berlin Press, 2003: 343.
- [5] 阿衣古丽·艾力亚斯, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 等. 乌鲁木齐市主要绿化树种重金属累积能力比较[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(5): 18-21.  
AYIGULI A, UMUT H, TAYIERJIANG A, *et al.* Heavy metal accumulation capability of greening tree species in urban areas of Urumqi, China [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(5): 18-21. (in Chinese)
- [6] 美合日·阿依·希尔亚孜旦. 乌鲁木齐市城市道路绿化带不同配置模式植物重金属富集效能研究[D]. 乌鲁木齐, 新疆大学, 2019.
- [7] 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, UMUT H, ALIYA B, *et al.* Distribution of heavy metal contents of common urban tree leaves in Aksu [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(1): 192-196. (in Chinese)
- [8] 唐敏, 张欣, 王美仙. 北京37种园林植物对4种重金属的富集力及其分级评价研究[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(05): 263-268.  
TANG M, ZHANG X, WANG M X. Heavy metal enrichment ability and grade evaluation of 37 garden plants in Beijing [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(5): 263-268. (in Chinese)
- [9] 车继鲁, 余树全, 刘晖, 等. 城市绿化树种香樟不同器官对土壤

- 重金属的富集特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 2907-2916.
- CHE J L, YU S Q, LIU H, *et al.* Characteristics of heavy metal enrichment efficiency in different organs of urban green tree *Cinnamomum camphora* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(9): 2907-2916. (in Chinese)
- [10] NISSIM W G, PALM E, MANCUSO S, *et al.* Trace element partitioning in a poplar phytoextraction stand in relation to stem size[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 247, 688-697.
- [11] 唐丽清, 邱尔发, 韩玉丽, 等. 不同径级国槐行道树重金属富集效能比较[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5353-5363.
- TANG L Q, QIU E F, HAN Y L, *et al.* Variation of heavy metal enrichment efficiency in roadside trees of *Sophora japonica* L. with different diameters at breast height[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5353-5363. (in Chinese)
- [12] JOCHNER S, MARKEVYCH I, BECK I, *et al.* The effects of short-term and long-term air pollutants on plant phenology and leaf characteristics[J]. Environmental Pollution, 2015, 206(11): 382-389.
- [13] 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, 2019, 35(9): 124-128.
- CHENG J X, WU L H, REN R F, *et al.* Comparison of five heavy metals contents in leaves annual branches of six ornamental trees in Beijing garden green space[J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(9): 124-128. (in Chinese)
- [14] 乌鲁木齐统计局. 乌鲁木齐统计年鉴[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2019.
- [15] 阿衣古丽·艾力亚斯, 玉米提·哈力克, 阿不都拉·阿不力孜, 等. 乌鲁木齐市 17 种园林树种的 Pb, Cd 积累特征[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12): 143-147.
- ALIYASI A, HALIK U, ABLIZ A, *et al.* The characteristics of heavy metal (Pb and Cd) accumulation in leaves of 17 garden tree species from the urban areas of Urumqi City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(12): 143-147. (in Chinese)
- [16] 兰欣宇, 解莹然, 程佳雪, 等. 北京园林绿地 29 种树木 3 种重金属含量的比较[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 36(9): 115-121.
- LAN X Y, XIE Y R, CHENG J X, *et al.* Comparison of three heavy metal contents in 29 ornamental trees in Beijing garden green land[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 36(9): 115-121. (in Chinese)
- [17] 杨鹏月, 帕丽达·牙合甫. 乌鲁木齐市大气颗粒物中重金属的污染特征及风险水平评价[J]. 环境科学研究, 2019, 32(12): 2084-2090.
- YANG P Y, YAHEFU P. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in atmospheric particulates in Urumqi City[J]. Research of Environmental Science, 2019, 32(12): 2084-2090. (in Chinese)
- [18] 李彩霞, 朱国强, 彭坤. 绿化带土壤重金属污染特征及植物富集研究—以长沙市为例[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(10): 101-107.
- LI C X, ZHU G Q, PENG K. Study on soil pollution characteristics by heavy metals and the plant concentration in green belts[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(10): 101-107. (in Chinese)
- [19] BERLIZOV A N, BLUM O B, FILBY R H, *et al.* Testing applicability of black poplar (*Populus nigra* L.) bark to heavy metal air pollution monitoring in urban and industrial regions [J]. Science of the Total Environment, 2007, 372(2/3): 693-706.
- [20] 黄会一, 张春兴, 张有标. 木本植物对大气重金属污染物铅、镉吸收积累作用的初步研究[J]. 林业科学, 1982, 18(1): 93-97.
- [21] 依再提古丽·外力, 王明力, 杨建军, 等. 2015—2018 年乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub> 及 PM<sub>10</sub> 时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2020, 33(8): 1749-1757.
- WAILI Y, WANG M L, YANG J J, *et al.* Spatial and temporal characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Urumqi City from 2015 to 2018[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(8): 1749-1757. (in Chinese)
- [22] ARICAK B, CETIN M, ERDEM R, *et al.* The change of some heavy metal concentrations in Scotch pine (*Pinus sylvestris*) depending on traffic density, organelle and washing[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(3): 6723-6734.
- [23] BAKER A J M. Accumulators and excluders—strategies in the response of plants to heavy metals[J]. Journal of Plant Nutrition, 1981, 3(1/4): 643-654.
- [24] 杨斌, 张文辉. 竹柳对 Pb<sup>2+</sup> 胁迫的响应及其 Pb 富集能力[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 36-41.
- YANG B, ZHANG W H. Response of *Salix matsudana* Koidz cv. Zhuliu to Pb<sup>2+</sup> stress and its accumulation ability [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 36-41. (in Chinese)