

# 城市绿化树种香樟不同器官对土壤重金属的富集特征

车继鲁 余树全\* 刘 晖 邱问心 温雅婷

(浙江农林大学林业与生物技术学院, 浙江临安 311300)

**摘 要** 为了了解不同土壤重金属浓度梯度及污染梯度下香樟不同器官的富集特征, 测定了香樟树叶、树枝、树干和根际土壤中 6 种重金属元素 (Cu、Zn、Pb、Cr、Mn、Ni) 的含量。结果表明: 香樟地上部分重金属含量因器官、元素种类、根际土壤重金属浓度的不同而存在差异。香樟树叶和树枝重金属含量的大小顺序均为:  $Mn > Zn > Cu > Cr > Pb > Ni$ , 树干重金属含量为:  $Mn > Zn > Cr > Pb > Ni > Cu$ 。树叶对 Mn 的富集系数较高, 为 2.409; 树干对 Ni 的富集系数较高, 分别为树叶、树枝的 8.6 和 17 倍, 且在不同土壤重金属浓度梯度下, 香樟树干对 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 的富集系数均明显高于其他器官。香樟地上部分器官对 Cu、Zn、Pb、Cr、Mn、Ni 6 种重金属元素的综合富集能力大小顺序为: 树叶 > 树干 > 树枝。随着土壤重金属污染等级的增加, 香樟地上部分各器官的富集系数均逐渐降低。研究区域平均胸径为 22 cm 的单株香樟对重金属元素富集效能的大小顺序为: 树叶 > 树干 > 树枝, 其中树干对 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 的积累量均显著高于树叶和树枝。表明香樟对 6 种重金属元素均有一定的富集能力, 并且树干对 Pb 和 Ni 的富集效能明显, 分别占地上部分总积累量的 82.7% 和 91.9%, 能很好地富集并稳固土壤中的 Pb 和 Ni, 可作为修复治理土壤重金属污染的备选树种。

**关键词** 香樟; 污染等级; 重金属; 富集效能; 土壤

**Characteristics of heavy metal enrichment efficiency in different organs of urban green tree *Cinnamomum camphora*.** CHE Ji-lu, YU Shu-quan\*, LIU Hui, QIU Wen-xin, WEN Ya-ting (School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Lin'an 311300, Zhejiang, China).

**Abstract:** The objective of this study was to explore the enrichment efficiency of heavy metals in *Cinnamomum camphora* organs under soil heavy metal concentration and pollution gradients. The compartments of the organs were leaf, branch, trunk, and rhizosphere soils, while the heavy metals under investigation were Cu, Zn, Pb, Cr, Mn and Ni. The results showed that the concentration of heavy metals was significantly different by organs, types of heavy metals, and concentration of rhizosphere soil heavy metals. Heavy metal concentration in leaf and branch followed the order of  $Mn > Zn > Cu > Cr > Pb > Ni$ , while in trunks it followed the order of  $Mn > Zn > Cr > Pb > Ni > Cu$ . The enrichment coefficient of Mn in leaf had the maximum of 2.409, and that of Ni in trunk was 7.6 and 16 times higher than that in leaf and branch, respectively. In addition, the enrichment coefficients of Cu, Zn, Pb, Cr and Ni in the trunk were much higher than the other organs under different soil heavy metal concentration gradients. The heavy metal enrichment capacities of Cu, Zn, Pb, Cr, Mn and Ni followed the order of leaf > trunk > branch. As the pollution gradient increased, the heavy metal enrichment coefficient decreased gradually. The heavy metal enrichment efficiency of *C. camphora* (DBH=22 cm) followed the order of leaf > trunk > branch, and the enrichment of Cu, Zn, Pb, Cr and Ni in trunk was significantly higher than in the other organs. The study showed that the *C. camphora* had a certain enrichment capacity to absorb heavy metals of Cu, Zn, Pb, Cr, Mn

本文由浙江省重点科技创新团队项目(2011R50027)资助 This work was supported by the Science and Technology Innovation Team Program of Zhejiang Province (2011R50027).

2016-12-23 Received, 2017-05-17 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yushq@zafu.edu.cn

and Ni in soils. The enrichment efficiency of Pb and Ni in trunk was significantly higher than the other organs, which accounted for 82.7% and 91.9% of the total accumulation. Thus, *C. camphora* has the potential to be an alternative option in phytoremediation of heavy metal contaminated soils.

**Key words:** *Cinnamomum camphora*; pollution gradient; heavy metal; enrichment efficiency; soil.

随着社会经济的高速发展和高强度的人类活动,影响生态安全和人体健康的土壤重金属污染问题日益凸显。总体由局部蔓延到区域,从城市、城郊延伸到乡村,从单一污染扩展到复合、混合污染,逐步形成点源与面源污染共存,生活污染、农业污染和工业排放叠加,新旧污染和二次污染相互复合或混合的态势,土壤重金属治理问题亟待解决<sup>[1]</sup>。通常,重金属污染土壤的治理大致有客土法、石灰改良法、化学淋洗法等,但在实际应用中,与植物修复技术相比,缺乏安全、廉价、低耗费等特点。植物修复技术包括植物萃取、根际过滤、植物挥发和植物固定,其前提是对重金属的超富集植物的发掘。最初这一概念由 Brooks 等<sup>[2]</sup>提出,Chaney<sup>[3]</sup>在此基础上提出了利用超富集植物治理受到重金属污染的土壤,此后针对耐重金属植物和超富集植物的研究日益增加<sup>[4-5]</sup>。目前全世界共发现 700 余种超量积累重金属植物。我国学者近年来已筛选出了一系列对重金属具有超积累能力的植物,如 As 超富集植物蜈蚣草(*Pteris vittata*)、Zn 超富集植物东南景天(*Sedum alfredii*)、Mn 超富集植物商陆(*Phytolacca acinosa*)以及 Cr 超富集植物李氏禾(*Leersia hexandra*)等<sup>[6-7]</sup>,但多以草本植物为主。然而,在城市绿化建设中,木本植物相较于草本植物能够更有效实现对重金属污染土壤的修复。木本植物的生物量高,绿化覆盖面积及绿化空间辐射占有量大,巨大的根、茎、叶面积同时作用于环境,对污染物有一定的吸收、转化和降解作用,积累的污染物不会在短期内释放到环境中,可避免进入食物链对人类健康产生危害<sup>[8]</sup>,特别是树干部位,可作为重金属元素长期稳固的积累库。

目前,国内学者主要从道路旁侧林带树种对重金属吸收和富集特征、城市绿化树种不同配置模式重金属差异性比较、叶片对大气颗粒物重金属的积累特征、不同径级对重金属吸收的影响,以及乔木树种对重金属吸滞能力的季节动态变化等方面展开诸多调查研究。有研究表明,利用杨柳科植物修复土壤重金属污染效果较好,其对重金属富集吸收能力相对较强。杨树(*Populus*)和柳树(*Salix*)能够通过植物提取或固定的方法修复多种重金属污染,其中包括放射性元素<sup>[9-10]</sup>;也有研究表明,叶片对重金属元素

也有很好的富集效能,其含量不仅与交通密度密切相关,在交通繁忙点行道树叶片重金属元素 Pb、Cd 和 Cu 含量明显高于交通稀疏点<sup>[11]</sup>,而且随着季节变化呈现一定规律。如国槐(*Sophora japonica*)叶片中 Cu、Zn、Pb 含量在春、秋两季达到峰值,且与土壤重金属污染程度相关性较强<sup>[12]</sup>。但目前研究中还未涉及不同污染程度对树木各器官重金属元素积累特性的影响,针对乔木树种的富集特征在不同器官及不同重金属元素种类方面差异性分析的讨论甚少,尤其是针对木本植物树干的富集效能研究。

香樟(*Cinnamomum camphora*)作为长江以南地区城市绿化的高频树种,不仅可以发挥其生态作用,还具有经济价值。因此,本研究选取中国最大的五金制造业生产基地浙江省永康市的绿化高频树种香樟为研究对象,研究其不同器官、不同植株对重金属元素的富集作用,并结合生境差异和土壤重金属污染程度,探讨香樟对不同重金属元素的富集效能,为今后城市绿化树种的开发管理、不同立地环境树种的选择和重金属污染土壤修复治理提供理论依据和数据支持。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究地点和研究对象

永康市(28°46′—29°07′ N, 119°53′—120°21′ E)地处浙江省中部、金衢盆地东侧低山丘陵区,属亚热带季风气候,年平均气温 17.5 °C,年平均日照时数为 1909 h,无霜期 245 d,年平均降水量 1387 mm。全市境内低山丘陵约占 72%,呈“七山一水二分田”格局,四季分明,温暖湿润。永康江自西向东穿过市区。总面积 1049 km<sup>2</sup>,城区面积 36.52 km<sup>2</sup>,现辖 11 个镇,城区设东城、西城、江南 3 个街道和浙江省永康经济开发区(五金科技工业园区)、城西新区两个新区。

选取永康市常见绿化树种香樟为研究对象,在市区范围内的工业区绿地、居住区绿地、单位附属绿地、城市公园绿地以及市区公路旁侧绿地 5 个功能区,共设置 30 个采样点。根据土壤中 Cu、Zn、Pb、Cr、Mn、Ni 6 种重金属元素在各个污染等级的分布状况,在每种重金属元素不同污染梯度下分别设置样

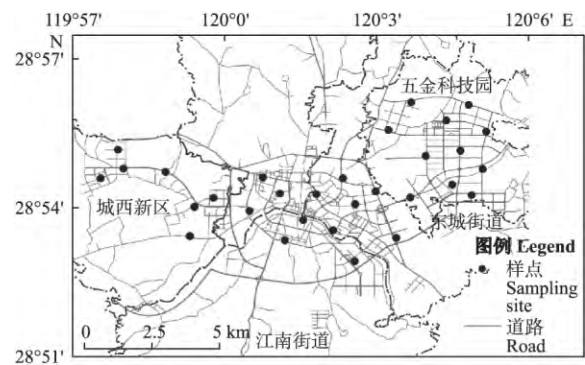


图 1 研究区样点分布  
Fig.1 Distribution of sampling points in the study area.

点,并通过实地调查选定具有代表性区域,土壤重金属基础数据参考钱力<sup>[13]</sup>的研究,采样点分布如图 1 所示.采样过程中记录周围环境状况、拍照留档,并使用 GPS 定位.

1.2 样品采集和处理

分别在每个样点选取 3 棵树龄相近、无病虫害、长势良好的相邻样树.在其东、南、西、北 4 个方向均匀采集植物叶、枝,用生长锥在胸径部位采集树干样品,并记录其胸径、树高及冠幅,样品均封存于塑料自封袋中带回实验室,用去离子水洗净,吸水纸吸干表面水分后,放入恒温烘箱,105℃下杀青,65℃烘干至恒量,高速万能粉碎机粉碎,过 100 目筛.用土钻同步采集样树根系周围 0~20 cm 表层土壤,每棵样树下采集两个土样,样品混合均匀,四分法取约 1 kg 土样装入塑料自封袋中带回实验室,剔除石子、动物残体等异物后,自然条件下风干,磨碎,过 100 目筛.

1.3 重金属元素含量测定方法

1.3.1 植物样品 称取样品 0.2500 g 置于酸煮洗净的聚四氟乙烯消解罐中,加入 5 mL HNO<sub>3</sub> 和 1 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,虚掩罐盖,置于通风橱中预消解,然后将消解罐旋紧,放入微波消解仪(MAR5,CEM,USA)消解.

消解程序结束后,待样品冷却至常温,打开密闭消解罐,将样品转移到 PET 塑料瓶中,洗涤高压消解罐内罐及盖子 3~4 次,洗液合并至 PET 瓶中,定容到 50 mL,混匀<sup>[14]</sup>.通过电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cr、Mn 和 Ni 含量.

1.3.2 土壤样品 称取土壤样品 0.2000 g 置于酸煮洗净的聚四氟乙烯消解罐中,加入 8 mL HNO<sub>3</sub> 和 2 mL HF,虚掩罐盖,置于通风橱中预消解,然后将消解罐旋紧,放入微波消解仪(MAR5,CEM,USA)消解.消解程序结束后,待样品冷却至常温,打开密闭消解罐,将样品转移到 PET 塑料瓶中,洗涤高压消解罐内罐及盖子 3~4 次,洗液合并至 PET 瓶中,定容到 50 mL,混匀<sup>[15-16]</sup>.通过电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cr、Mn 和 Ni 含量.

1.4 植物重金属富集系数计算

植物对土壤中重金属元素的吸收能力除了受其本身遗传机制外,还与大气环境、根际土壤理化性质、重金属浓度及形态等多种因素有关<sup>[17]</sup>.富集系数(bioconcentration factor,BCF)是评价植物富集重金属能力的指标之一,反映植物对某种重金属元素的富集能力.富集系数越大,其富集能力越强<sup>[18]</sup>.富集系数(BCF)公式为:

$$BCF = C_i / S_i$$

式中: C<sub>i</sub>为地上部第 i 个植物样品的重金属含量; S<sub>i</sub>为对应土壤样品重金属含量.

1.5 植物重金属富集效能估算

为了更直观地反映树木在有限的生存土地和空间里对重金属元素的吸收和富集,从土地和空间资源有效利用角度出发,利用单株重金属积累量与单株绿化覆盖面积、绿化空间辐射占有量来推算单位面积、单位空间重金属富集量,综合评价其富集效能.

表 1 土壤重金属元素浓度梯度分级及污染指数  
Table 1 Heavy metal concentration gradient and single pollution index

浓度梯度 Concentration gradient	土壤重金属元素浓度 Heavy metal concentration (mg · kg <sup>-1</sup> )					
	Cu	Zn	Pb	Cr	Mn	Ni
1	15( 0.85)	65( 1.04)	20( 0.59)	90( 1.98)	250( 0.58)	16( 0.95)
2	20( 1.13)	75( 1.20)	25( 0.74)	100( 2.20)	300( 0.70)	18( 1.07)
3	25( 1.41)	85( 1.36)	30( 0.89)	110( 2.42)	350( 0.82)	20( 1.19)
4	30( 1.69)	95( 1.52)	35( 1.04)	120( 2.64)	400( 0.93)	22( 1.31)
5	35( 1.98)	105( 1.68)	40( 1.18)	130( 2.86)	450( 1.05)	24( 1.43)
6	40( 2.26)	115( 1.84)	45( 1.33)	140( 3.08)	500( 1.17)	26( 1.55)

括号内数值为污染指数 Data in the bracket were the single pollution index.

**1.5.1 香樟各器官重金属积累量估算** 采用不同器官生物量与对应器官吸收某种重金属元素含量的乘积来估算各器官重金属元素的积累量,各器官重金属元素积累量的总和即为香樟单株重金属积累量<sup>[9]</sup>.香樟树木各器官的生物量配比为树干 36%、树枝 26%、树叶 13%,本研究中香樟的地上生物量估算参考高凯等<sup>[19]</sup>的研究,香樟单株植物生物量 (AVB/kg) 回归方程为:

$$AVB = 1.37D^{2.15} (R^2 = 0.97, P < 0.01)$$

式中:  $D$  为冠幅 (m).

**1.5.2 单株绿化覆盖面积估算** 本研究中香樟单株乔木绿化覆盖面积即树冠投影面积(不计树冠重叠部分),参考唐丽清等<sup>[9]</sup>的研究,其树冠投影面积 ( $S, m^2$ ) 计算公式为:

$$S = \pi ab$$

式中:  $a$ 、 $b$  分别为树冠南北和东西长的一半 (m).

**1.5.3 绿化空间辐射占有量估算** 绿化空间辐射占有量 (ROGS) 即树木正常生长的生存空间及发挥多种生态功能的空间范围,其计算方法参考鄧光发等<sup>[20]</sup>的研究,计算公式如下:

$$V = \pi R^2 H$$

式中:  $V$  为单株绿化空间辐射占有量 ( $m^3$ );  $R$  为树冠半径 (m);  $H$  为树高 (m).

## 1.6 土壤重金属污染评价

单项污染指数法<sup>[18]</sup>是国内外普遍采用的方法之一,是对土壤中某一污染物的污染程度进行评价.其计算公式为:

$$P_{ij} = C_{ij} / S_i$$

式中:  $P_{ij}$  为第  $j$  个采样点  $i$  污染物的污染指数;  $C_{ij}$  为第  $j$  个采样点  $i$  污染物的实测值 ( $mg \cdot kg^{-1}$ );  $S_i$  为  $i$  污染物的背景值或对照值 ( $mg \cdot kg^{-1}$ ),本研究选用浙江金衢盆地土壤重金属的背景值为参考值<sup>[21]</sup>.

## 1.7 统计分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据进行

统计分析.采用单因素 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法进行方差分析.利用 GraphPad Prism 5 软件作图,图表中数据为平均值 $\pm$ 标准差.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土壤重金属浓度梯度下香樟重金属含量特征

从表 3 可以看出,研究区各样点中土壤重金属含量因种类不同而存在差异,各元素平均含量大小分别为:  $Mn (375.00 mg \cdot kg^{-1}) > Cr (115.00 mg \cdot kg^{-1}) > Zn (90.00 mg \cdot kg^{-1}) > Pb (32.50 mg \cdot kg^{-1}) > Cu (27.50 mg \cdot kg^{-1}) > Ni (21.00 mg \cdot kg^{-1})$ .其中,  $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Cr$ 、 $Ni$  的平均值均超过金衢盆地土壤背景值,  $Cr$  平均含量超过金衢盆地土壤背景值 2.6 倍,  $Pb$  和  $Mn$  平均含量均低于背景值.

不同土壤重金属梯度中,香樟相同器官对同一元素的吸收存在差异.  $Zn$ 、 $Mn$ 、 $Ni$  在各器官中含量因土壤梯度不同存在极显著差异 ( $P < 0.05$ ).其中,树叶、树枝和树干中  $Mn$  含量在不同梯度间的最大值和最小值分别相差 2.6、2.2 和 2.5 倍,树叶、树枝中  $Ni$  含量在不同梯度间的最大值和最小值分别相差 3.2 和 2.8 倍;  $Cu$ 、 $Pb$  在部分器官中含量也因土壤梯度不同存在极显著差异,其中,树叶中  $Cu$ 、 $Pb$  以及树枝中  $Cu$  含量在不同梯度间差异极显著;而香樟各器官中  $Cr$  含量在不同梯度间差异不显著 ( $P > 0.05$ ).从同一梯度下香樟不同器官对同种元素的吸收来看,除  $Zn$  在第三梯度上各器官含量差异不显著以外,其余各梯度下香樟不同器官中同种元素的含量存在极显著差异.在 6 个梯度中,树叶  $Mn$  含量均超过树干的 7.6~11.1 倍,树干  $Ni$  含量均超过树枝的 9.8~41.5 倍,相比各器官中其他元素含量差异较为明显.

香樟各器官对重金属的吸收因不同元素、不同器官而存在差异.香樟地上部分不同重金属元素含量平均值的大小顺序为:  $Mn (321.80 mg \cdot kg^{-1}) > Zn (35.93 mg \cdot kg^{-1}) > Cr (13.83 mg \cdot kg^{-1}) > Cu (13.44 mg \cdot kg^{-1}) > Pb (9.78 mg \cdot kg^{-1}) > Ni (7.41 mg \cdot kg^{-1})$ .其中,树叶和树枝中重金属含量大小顺序均为:  $Mn > Zn > Cu > Cr > Pb > Ni$ ,树干中重金属含量大小顺序为:  $Mn > Zn > Cr > Pb > Ni > Cu$ ;从重金属元素在香樟不同器官中含量大小来看,树叶中植物必需营养元素  $Mn$  的含量较高,为  $715.28 mg \cdot kg^{-1}$ ,树干中  $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Pb$ 、 $Cr$  和  $Ni$  的含量均高于其他器官.

表 2 基于重金属污染指数的土壤污染等级划分

Table 2 Soil pollution degree based on pollution index of heavy metals

级别 Pollution	单项污染指数 Single pollution index ( $P_i$ )	污染等级 Pollution class	污染水平 Pollution level
1	$P_i \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1 < P_i \leq 2.0$	轻度污染	土壤开始受到污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	中度污染	土壤受中度污染
5	$P_i > 3.0$	重度污染	土壤受污染已相当严重

表 3 不同土壤重金属浓度梯度下香樟各器官重金属元素含量  
Table 3 Heavy metal concentration in *Cinnamomum camphora* organs in different soil heavy metal concentrations

器官 Organ	浓度梯度 Concentration gradient	重金属元素含量 Heavy metal concentration ( mg · kg <sup>-1</sup> )					
		Cu	Zn	Pb	Cr	Mn	Ni
树叶 Leaf	1	9.80±0.87b	20.73±4.04b	5.80±1.91b	10.40±1.40b	1035.67±8.96a	1.07±0.31b
	2	12.33±0.12b	30.00±3.67b	5.47±1.41b	8.33±2.25b	888.33±3.06a	1.67±0.31b
	3	11.47±0.81b	30.53±2.00a	4.53±0.50b	8.80±0.26b	650.00±10.00a	2.73±0.95b
	4	12.67±2.60ab	25.60±2.71c	4.57±0.67b	9.73±2.53b	680.67±15.31a	3.40±2.12b
	5	12.53±1.16b	24.73±3.19b	3.60±1.40b	10.27±2.05b	639.33±8.33a	2.43±0.60b
	6	13.20±0.60b	22.03±3.59b	3.43±0.32b	11.93±2.89b	397.67±2.52a	2.40±1.44b
树枝 Branch	1	14.00±3.03ab	28.07±4.77b	2.97±0.65b	7.40±2.00b	262.67±24.11b	0.53±0.31b
	2	11.20±0.72b	31.13±3.64ab	3.37±0.45b	7.13±1.14b	200.33±11.24b	1.13±0.12b
	3	10.73±1.47b	31.27±3.78a	3.43±1.55b	8.33±0.31b	168.00±21.07b	1.40±0.60b
	4	9.53±1.41b	32.00±0.72b	3.60±0.80b	8.33±1.63b	158.13±4.43b	1.50±0.44b
	5	8.68±0.50b	32.90±1.35b	4.67±0.50b	7.80±1.06b	138.07±2.10b	1.33±0.58b
	6	8.98±0.57b	33.60±7.10ab	4.80±0.53b	9.33±1.62b	122.13±3.44b	1.03±0.25b
树干 Trunk	1	17.88±1.94a	40.73±7.43a	15.27±0.64a	17.73±2.70a	97.87±5.37c	22.13±5.60a
	2	17.48±2.77a	47.93±9.77a	22.13±6.85a	20.07±2.44a	116.80±15.10c	18.68±1.41a
	3	17.48±3.41a	45.40±3.62a	25.73±4.21a	20.47±3.42a	63.53±21.02c	17.73±1.86a
	4	17.60±3.46a	52.07±6.65a	25.20±8.71a	25.53±1.86a	69.33±21.43c	14.67±1.63a
	5	17.88±0.70a	58.97±1.48a	19.20±5.05a	27.20±4.18a	57.73±2.19b	17.27±2.19a
	6	18.50±1.21a	59.07±23.17a	18.30±6.58a	30.13±10.06a	46.07±11.21c	22.27±3.50a
土壤 Soil	研究区	27.17	89.06	33.17	118.00	349.89	20.44
	金衢盆地 <sup>[21]</sup>	17.70	62.60	33.80	45.40	429.00	16.80
	浙江省 <sup>[21]</sup>	22.60	83.10	35.70	56.00	620.50	23.90

不同字母表示同一梯度不同器官相同重金属元素差异达到显著水平(  $P<0.05$  ) Different letters in same heavy metal of different organs in the same gradient meant significant difference at 0.05 level.

2.2 不同土壤重金属浓度梯度下香樟重金属富集能力

2.2.1 香樟各器官重金属富集能力 对香樟各器官中 Cu、Zn、Pb、Cr、Mn、Ni 的富集系数进行计算,结果见表 4。树叶对重金属元素富集能力依次为: Mn>Zn>Cu>Pb>Ni>Cr,树枝为: Mn>Cu>Zn>Pb>Cr>Ni,树干为: Ni>Cu>Pb>Zn>Mn>Cr,各器官对不同重金属元素的选择性吸收明显。不同器官对同种重金属元素的比较中发现,树干对 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 的富集能力均高于树叶和树枝,对 Mn 的富集能力小于树枝、远小于树叶;而树叶对 Mn 的富集系数则达到 2.409,较树干高 9 倍。这在一定程度上体现了树叶对 Mn 的高富集特征,有可能受到近地面大气污染物的影响<sup>[11 22-23]</sup>。此外,树干对 Pb 和 Ni 的富集能力

明显,对 Pb 的富集系数分别为树叶、树枝的 4.6 和 4.7 倍,对 Ni 的富集系数分别为树叶、树枝的 8.6 和 17 倍。树干作为植物体积累重金属的主要器官,富集作用显著,且随树龄逐年增加,其生物量比例增大,长期稳固在树干中的重金属累积量随之增加<sup>[24-25]</sup>。其对 Pb 和 Ni 的富集能力显著高于树叶和树枝,可能与树干长期对该重金属元素选择性吸收的积累量有关。

2.2.2 不同土壤重金属浓度梯度下香樟重金属富集能力 图 2 显示,香樟各器官对 Cu、Zn、Pb、Cr、Mn,以及树干对 Ni 的富集系数均随着土壤中该种类重金属浓度的升高总体呈下降趋势;香樟树叶和树枝对 Ni 的富集系数随着土壤中浓度的升高呈先上升后下降的趋势,但变化幅度较小。从不同器官同种元素的变化规律来看,树叶、树枝、树干对 Cu 的富集能力均随梯度递增而逐渐递减,且三者变化趋势一致,分别降低 0.36、0.68 和 0.71。各器官中 Zn 的富集系数总体上随梯度升高而降低,分别降低 0.22、0.15 和 0.16,其中树干和树枝中的富集系数变化趋势一致。树干中 Pb 随土壤梯度升高呈先升后降的趋势,树叶和树枝均随之降低,三者分别降低 0.44、0.18 和 0.02,树干随浓度梯度变化的下降趋势明显高于树

表 4 香樟各器官中重金属富集系数  
Table 4 Heavy metal bioconcentration factor of *Cinnamomum camphora* organs

器官 Organ	重金属元素 Heavy metal					
	Cu	Zn	Pb	Cr	Mn	Ni
树叶 Leaf	0.461	0.301	0.151	0.086	2.409	0.110
树枝 Branch	0.465	0.366	0.116	0.069	0.587	0.056
树干 Trunk	0.722	0.579	0.660	0.199	0.254	0.952

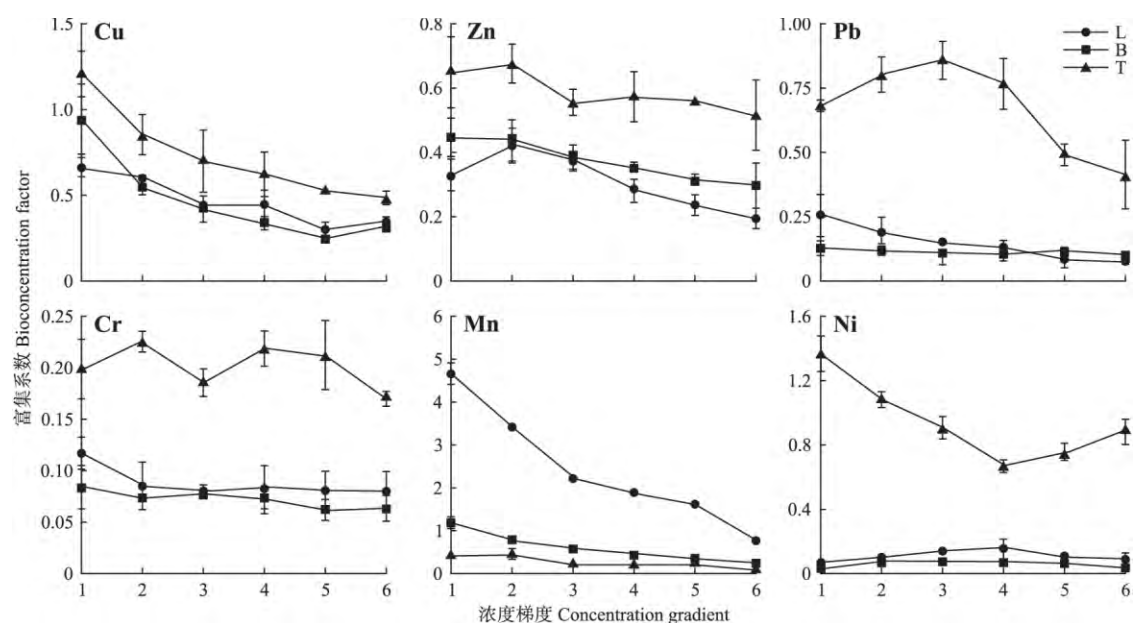


图2 不同土壤重金属浓度梯度下香樟各器官重金属富集系数

**Fig.2** Heavy metal bioconcentration factor in *Cinnamomum camphora* organs in different concentration gradients.

L: 树叶 Leaf; B: 树枝 Branch; T: 树干 Trunk.

叶和树枝.Cr 的富集系数变化较小,均随土壤浓度梯度的升高呈微波动.树叶、树枝和树干的变化值分别为0.04、0.02和0.03.对于Mn来说,各器官均随土壤浓度梯度升高而降低,树叶、树枝和树干分别降低3.90、0.96和0.36,其中树叶富集系数远高于其他器官,且下降幅度较大.香樟树干Ni的富集系数呈先降后升的变化趋势,树叶和树枝呈微波动,三者变化值分别为0.77、0.09和0.04,其中树干富集系数变化明显.综上所述,香樟树叶对Mn的富集系数明显较高,而树干对其他5种元素的富集系数明显较高.香樟各器官对不同重金属元素的富集系数随土壤浓度梯度的变化略有差异,树叶中Mn的富集系数变化明显,树干中Cu和Ni的富集系数变化明显,Cr的富集系数变化幅度较小.

2.3 不同土壤重金属污染等级下香樟重金属富集能力

对研究区内采样点的土壤重金属元素Cu、Zn、Pb、Cr、Mn、Ni的污染等级进行计算,以金衢盆地土壤重金属浓度为背景值,得到各种金属元素污染状况.不同重金属元素污染程度大小顺序为:Cr>Cu>Zn>Ni>Pb>Mn,污染指数分别为2.56、1.53、1.42、1.22、0.98和0.82.总体上Cr污染较严重,处于中度污染等级;Ni、Cu、Zn均处于轻度污染等级;Pb、Mn处于警戒线等级.从各样点土壤重金属的污染评价数据来看,Cr有16.7%的样点处于重度污染,77.8%的样点处于中度污染,其余样点为轻度污染;Cu有

16.7%的样点处于中度污染,66.7%的样点处于轻度污染;Zn、Ni、Pb、Mn分别有94.4%、83.3%、38.9%、16.7%的样点处于轻度污染,其余均处于警戒线以下.

根据土壤污染等级分类对香樟重金属富集能力进行计算,结果见表5.从同种元素的不同污染等级来看,总体上随着污染等级的增加,香樟对Cu、Zn、Pb、Cr、Mn、Ni的富集能力均逐渐下降,呈明显的负相关.由此可见,重金属污染程度的加重降低了香樟对土壤中重金属元素的吸收能力,其对重金属污染土壤的修复效能下降.由于采样区域土壤中不同种类的重金属污染等级存在差异,样点内重金属元素污染程度未涉及各个污染等级,对同一污染等级的6种元素无法共同比较,因此本文仅从该污染等级内已有的重金属元素相应数据对香樟的富集能力进行比较.由表5可知,在第1污染等级中香樟对Mn

表5 不同污染等级下香樟对重金属元素的富集能力比较

**Table 5** Comparison of heavy metal enrichment efficiency of *Cinnamomum camphora* in different soil heavy metal pollution classes

污染等级 Pollution class	重金属元素 Heavy metal					
	Cu	Zn	Pb	Cr	Mn	Ni
1	-	-	0.353	-	1.611	-
2	0.926	0.442	0.374	-	0.795	0.513
3	0.498	0.414	0.215	0.112	0.349	0.345
4	0.378	-	-	0.120	-	-
5	-	-	-	0.112	-	-

表 6 香樟单株重金属元素富集效能特征比较  
Table 6 Comparison of heavy metal enrichment efficiency of *Cinnamomum camphora* trees

器官 Organ	生物量 Biomass ( kg)	重金属元素 Heavy metal ( mg)						合计 Total ( mg)
		Cu	Zn	Pb	Cr	Mn	Ni	
树叶 Leaf	10.30	123.56	263.64	47.02	102.05	7364.75	23.51	7924.53
树枝 Branch	20.59	216.57	648.56	78.37	165.89	3601.44	23.80	4734.61
树干 Trunk	28.51	511.65	1445.45	597.98	670.69	2144.81	535.73	5906.30
合计 Total	59.4	851.77	2357.65	723.37	938.62	13111.00	583.03	18565.44
单位面积富集量 Enrichment per unit area ( mg · m <sup>-2</sup> )		25.12	69.52	21.33	27.68	386.62	17.19	547.46
单位空间富集量 Enrichment per unit space ( mg · m <sup>-3</sup> )		2.53	6.99	2.15	2.78	38.89	1.73	55.07

的富集系数较高;但随着污染程度加重,在第 2 污染等级中 Cu 的富集系数超过了 Mn,且在第 3 污染等级中 Cu 的富集系数均高于其他 5 种元素;另外,除第 2 污染等级中的 Ni 外,其他元素在同等级的比较中均表现出 Cu、Zn、Mn 3 种植物生长必需营养元素高于 Pb、Cr、Ni 3 种非必需营养元素。

2.4 香樟重金属元素富集效能

根据香樟重金属积累量估算方法,计算研究区平均胸径为 22 cm 的香樟各器官重金属元素的积累量,结果见表 6。香樟地上部分重金属元素积累量为每株 18565.44 mg,单株香樟不同重金属元素积累量大小顺序为: Mn>Zn>Cr>Cu>Pb>Ni,各器官总积累量大小顺序为: 树叶>树干>树枝。地上部分树叶、树枝、树干分别占地上生物量的 13%、26%、36%,而各器官重金属积累量分别占地上重金属积累量的 42.7%、25.5%、31.8%。由此可见,各器官生物量的占比与重金属积累量不成正比,生物量最小的树叶对重金属富集效能最高,生物量最大的树干对重金属富集效能次之,树枝对重金属富集效能最低。

从重金属修复角度来看,尽管树叶吸收积累的重金属总量较高,但受植物生理特性的影响,大部分树叶会再次回归土壤,造成二次污染。从各器官对不同重金属的积累量来看,树干对 Cu、Zn、Pb、Cr、Mn、Ni 的积累量分别占香樟地上部分各重金属积累总量的 60.1%、61.3%、82.7%、71.5%、16.4%、91.9%,除 Mn 外,树干对各重金属元素积累量明显高于树叶和树枝,尤其是树干对 Pb、Ni 的积累效能较为明显。根据香樟的冠幅、树高估算其单位面积和单位空间对重金属富集效能,香樟单株对重金属富集效能的大小顺序为: Mn>Zn>Cr>Cu>Pb>Ni,与各重金属在单株香樟中积累量大小的顺序一致。

3 讨 论

3.1 土壤中重金属浓度对植物吸收重金属的影响

土壤中无机及有机胶体对重金属阳离子具有吸附、代换、络合及生物作用的影响,使大部分元素固定于土壤表层,较其他层次浓度高。植物从土壤中吸收重金属的总量虽然与土壤中重金属总量有一定关系,但土壤中该元素总量并不是植物吸收程度的一个可靠指标。植物对土壤中重金属元素的吸收与重金属元素有效态占总量的百分比有很大关系,其有效态占比越大,越有可能在一定环境条件下随植物的蒸腾拉力、水分和营养盐运移等生理生态作用,使重金属元素在植物体中富集<sup>[26]</sup>。样点土壤数据中重金属元素平均含量大小分别为: Mn>Cr>Zn>Pb>Cu>Ni,香樟体内各元素平均含量大小顺序为: Mn>Zn>Cr>Cu>Pb>Ni,香樟对 Cr、Zn、Pb、Cu 吸收存在差异。一方面可能受到植物生理生态作用影响,Mn、Zn、Cu 作为植物必须的营养元素,对该类元素具有选择性吸收,因而吸收量较其余元素高;另一方面,研究区域存在较严重的 Cr 污染,通常,植物对土壤中重金属元素的抗性分别表现为限制重金属离子跨膜运输、使重金属离子与体外分泌物结合的避性和金属排斥、金属积累的耐性,而单一元素污染情况下,植物的抗性可能在重金属浓度达到一定水平时产生积累作用<sup>[27]</sup>。在不同土壤污染等级下,香樟对 Cu、Zn、Pb、Cr、Mn、Ni 的富集能力均呈下降趋势。这与其生理生态特征对土壤重金属的抗性表现有一定关系,从单一元素不同土壤浓度梯度的变化中可以看出,香樟树枝和树叶对 Ni 的吸收量在 1—4 梯度时富集量增加,而在 4—6 梯度时富集量下降。从现场植株的良好长势可以看出其在一定范围内对 Ni 的耐性。

3.2 植物叶片对重金属污染的积累与吸收

树叶对重金属的吸收一方面来自于根系蒸腾拉

力作用下水分矿质营养的输送,一方面来自于对大气污染物的吸收<sup>[9]</sup>.某些植物叶片对大气重金属污染物吸收能力很强<sup>[28]</sup>.在外源污染物的长期胁迫下体内蛋白质含量随之发生变化<sup>[11]</sup>,可直接吸收大气中重金属污染物,且与大气中重金属污染程度呈正相关<sup>[12]</sup>.Mn 是合金材料和建筑材料的特征元素,叶片中的 Mn 会受到由路面磨损、建筑材料风化、路边裸土等产生的扬尘的影响<sup>[23]</sup>.本研究中,香樟树叶 Mn 含量明显高于土壤及其他器官,且是土壤中的 2.04 倍,可能与大气中重金属污染物的污染程度有关.对树叶中积累吸收的重金属元素的来源需要进一步探究.方晰等<sup>[8]</sup>对樟树人工林重金属积累及徐学华等<sup>[29]</sup>对河道公路毛白杨(*Populus tomentosa*)重金属吸收与分布的研究结果表明,树叶对重金属的吸收能力高于其他器官.这与本试验对香樟树叶富集能力的研究结果一致.由于植物样品的采集均为冬季,而不同季节中叶片自根系吸收土壤重金属元素,并通过蒸腾拉力运输的过程,会受到空气温度、光照强度、相对湿度等环境因子强烈影响,因此,树叶积累重金属污染物受到诸多因素影响,相关研究有待深入进行.

### 3.3 城市绿化中香樟对重金属污染的净化作用

植物不仅可以作为土壤重金属污染的良好指示,同时也可以清除土壤重金属、改善土壤性质、促进生物多样性发展<sup>[30-31]</sup>.香樟为常绿大乔木,是南方常用的城市绿化树种,其枝叶茂密、冠大荫浓,生命周期长,具有较草本和灌木更高的重金属污染物的积累作用,在城市重金属污染治理等方面具有潜在利用价值.树干是单株植物中生物量最大的器官,其作为重金属元素的“库”,体内长期储存的重金属元素通常不直接参与人类食物链,对城市大气及土壤重金属污染具有屏蔽和缓冲等作用<sup>[32]</sup>.永康市城市绿化树种中,平均胸径为 22 cm 的香樟树种,其树干内可积累重金属元素含量为: Mn>Zn>Cr>Pb>Ni>Cu.树干对 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 的积累量明显高于树枝和树叶,分别占这 5 种重金属地上部分积累总量的 60.1%、61.3%、82.7%、71.5%、91.9%.其中,树干对 Pb 和 Ni 的富集效能较为明显,积累量占比分别为 82.7% 和 91.9%.因而,香樟可以作为土壤中 Pb、Ni 污染场地进行治理、修复的备选树种,在其提供生态价值的同时,还能发挥其经济价值.

## 4 结 论

研究区内土壤中重金属 Cu、Zn、Cr、Ni 均超过

金衢盆地土壤背景值,其中, Cr 平均含量超过金衢盆地土壤背景值 2.5 倍,而 Pb 和 Mn 平均含量均低于背景值.各元素平均含量大小分别为: Mn>Cr>Zn>Pb>Cu>Ni; 研究区土壤中重金属元素总体来看, Cr 处于中度污染等级,其中 16.7% 的样点处于重度污染.

香樟树叶中 Mn 含量较高, Zn、Cu、Pb、Cr、Ni 均在树干中含量较高.香樟各器官综合富集系数大小顺序为: 树叶>树干>树枝,各器官不同种类重金属元素的富集系数略有差异,树叶重金属富集系数大小顺序为: Mn>Zn>Cu>Pb>Ni>Cr,树枝为 Mn>Cu>Zn>Pb>Cr>Ni,树干为 Ni>Cu>Pb>Zn>Mn>Cr,其中香樟树干对 Pb、Ni 的富集系数显著高于树叶和树枝.

香樟各器官对 Cu、Zn、Pb、Mn 和树干对 Ni 的富集系数均随土壤中该种类重金属浓度的升高总体呈下降趋势;各器官对 Cr 以及树叶和树枝对 Ni 的富集系数略有差异,随土壤中 Ni 浓度的变化呈略微波动.随着污染等级的增加,香樟对 Cu、Zn、Pb、Cr、Mn、Ni 的富集能力均逐渐下降,呈明显的负相关.

单株香樟各器官对重金属富集效能的大小顺序为: 树叶>树干>树枝,对各重金属元素富集效能的大小顺序为: Mn>Zn>Cr>Cu>Pb>Ni.树干富集效能较树叶、树枝明显,对 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 的积累量均明显高于树叶和树枝,其中树干中 Pb、Ni 的积累量分别占香樟地上部分总积累量的 82.7% 和 91.9%,富集效能明显.

## 参考文献

- [1] Luo Y-M (骆永明), Teng Y (滕应), Guo Y (过园), et al. Soil remediation: A new branch discipline of soil science. *Soils (土壤)*, 2005, **37**(3): 230-235 (in Chinese)
- [2] Brooks RR, Lee J, Reeves RD, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium species of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, **7**: 49-57
- [3] Chaney RL. Plant uptake of inorganic waste constituents // Parr JF, eds. *Land Treatment of Hazardous Wastes*. Park Ridge, NJ, USA: Noyes Data Corporation, 1983: 50-76
- [4] Wei C-Y (韦朝阳), Chen T-B (陈同斌). Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: A review of studies in China and abroad. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2001, **21**(7): 1197-1203 (in Chinese)
- [5] Wang Q-R (王庆仁), Cui Y-S (崔岩山), Dong Y-T (董艺婷), et al. Phytoremediation: An effective ap-



- proach of heavy metal cleanup from contaminated soil. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2001, **21**(2): 326–331 (in Chinese)
- [6] Wang H-B (王宏斌), Shu W-S (束文圣), Lan C-Y (蓝崇钰). Ecology for heavy metal pollution: Recent advances and future prospects. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(3): 596–605 (in Chinese)
- [7] An J (安婧), Gong X-S (宫晓双), Wei S-H (魏树和). Research progress on technologies of phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2015, **34**(11): 3261–3270 (in Chinese)
- [8] Fang X (方晰), Tian D-L (田大伦), Chen J-C (陈骏超), et al. Accumulation and transportation of heavy metal elements in *Cinnamomum camphora* plantation. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2006, **6**(1): 64–68 (in Chinese)
- [9] Tang L-Q (唐丽清), Qu E-F (邱尔发), Han Y-L (韩玉丽), et al. Variation of heavy metal enrichment efficiency in roadside rees of *Sophora japonica* L. with different diameters at breast height. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(16): 5353–5363 (in Chinese)
- [10] Wei X-W (韦秀文), Yao B (姚斌), Liu H-W (刘慧文), et al. Application of dendroremediation to the soil contaminated soil by heavy metals and organic pollutants. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2011, **47**(5): 124–130 (in Chinese)
- [11] Wang A-X (王爱霞), Zhang M (张敏), Fang Y-M (方炎明), et al. Responses of street trees to heavy metal pollution and their functional-type grouping. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2010, **32**(2): 177–183 (in Chinese)
- [12] Li S-N (李少宁), Kong L-W (孔令伟), Lu S-W (鲁绍伟), et al. Beijing common green tree leaves' accumulation capacity for heavy metals. *Environmental Science* (环境科学), 2014, **35**(5): 1891–1900 (in Chinese)
- [13] Qian L (钱力). Situation Analysis and Source Identification of Heavy Metals Pollution in the Urban Topsoil of Yongkang City. Master Thesis. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2015 (in Chinese)
- [14] Sun H-Z (孙慧珍), Gao H (高禾), Cai C-J (蔡春菊), et al. Dynamic variation and accumulation characteristics of heavy metalin four broadleaved tree rings in Harbin City. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences) (南京林业大学学报), 2013, **37**(6): 65–68 (in Chinese)
- [15] Chen T-T (陈婷婷). Characteristic Analysis of Heavy Metal Contents in Soil and Bamboo Shoots in *Phyllostachys praecox* stands associated with various mulching times. Master Thesis. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2016 (in Chinese)
- [16] Lu S-W (鲁绍伟), Gao C (高琛), Yang X-B (杨新兵), et al. Main greening tree species on soil heavy metal enrichment capability in different contaminated area of Beijing. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2014, **42**(5): 22–26 (in Chinese)
- [17] Wei S-H (魏树和), Zhou Q-X (周启星). Discussion on basic principles and strengthening measures for phytoremediation of soils contaminated by heavy metals. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2004, **23**(1): 65–72 (in Chinese)
- [18] Lu D-L (卢德亮), Qiao L (乔璐), Chen L-X (陈立新), et al. Soil pollution characteristics by heavy metals and the plant enrichment in green space of urban areas of Harbin. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2012, **48**(8): 16–24 (in Chinese)
- [19] Gao K (高凯), Hu Y-H (胡永红), Leng H-B (冷寒冰), et al. Two methods of estimating biomass and productivity for *Cinnamomum camphora* at individual scale. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2014, **33**(1): 242–248 (in Chinese)
- [20] Qie G-F (郗光发), Wang C (王成). Studies on three-dimensional forest structure and radiate occupation of green space (V) in Beijing enterprise and institution areas. *Journal of Central South University of Forestry and Technology* (中南林业科技大学学报), 2011, **31**(9): 60–65 (in Chinese)
- [21] Fan Y-H (范允慧), Wang Y-Q (王艳青). Background characteristics of soil elements in four plains of Zhejiang Province. *Geophysical & Geochemical Exploration* (物探与化探), 2009, **33**(2): 132–134 (in Chinese)
- [22] Zhuang S-H (庄树宏), Wang K-M (王克明). Study on the relationship between atmospheric heavy metal pollution (Pb, Cd, Cu, Zn) and its accumulations in leaves of urban trees. *Journal of Yantai University* (Natural Science and Engineering) (烟台大学学报: 自然科学与工程版), 2000, **13**(1): 31–37 (in Chinese)
- [23] Dai S-D (戴斯迪), Ma K-M (马克明), Bao L (宝乐). Distribution and heavy metal character of foliar dust on roadside tree *Sophora japonica* of urban area in Beijing. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(16): 5095–5102 (in Chinese)
- [24] Xiang W-H (项文化), Tian D-L (田大伦). Nutrient cycling in *Pinus massoniana* stands of different age classes. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2002, **26**(1): 89–95 (in Chinese)
- [25] Zhou Q-Y (周群英), Chen S-X (陈少雄), Han F-Y (韩斐扬), et al. Comparison study on biomass and energy of five eucalypt clones. *Forest Research* (林业科学研究), 2010, **23**(1): 8–24 (in Chinese)
- [26] Chai Y-B (智颖飙), Wang Z-L (王再岚), Wang Z-S (王中生), et al. The absorption and accumulation of heavy metals pollutants in plant along highway in western Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(5): 1863–1872 (in Chinese)
- [27] Dong Y-T (董艺婷), Cui Y-S (崔岩山), Wang Q-R (王庆仁). Uptake of Cd, Zn and Pb by two susceptible plants under mono- and multiple-contamination conditions. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(5): 1018–1024 (in Chinese)

- [28] Huang H-Y (黄会一), Zhang C-X (张春兴), Zhang Y-B (张有标). Capacities of absorption and accumulation by woody plants of heavy metal Pb and Cd in the atmosphere. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 1982, **18**(1): 93-97 (in Chinese)
- [29] Xu X-H (徐学华), Huang D-Z (黄大庄), Wang X-Y (王秀彦), et al. Absorption and distribution of heavy metal in *Populus tomentosa* along stream highway. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2009, **23**(3): 78-81 (in Chinese)
- [30] An L (安丽), Cao T (曹同), Yu Y-H (俞鹰浩). Heavy metals contents in *Haplocladium* and their relationships with Shanghai City environment. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(8): 1490-1494 (in Chinese)
- [31] Wu D-M (吴道铭), Chen X-Y (陈晓阳), Zeng S-C (曾曙才). Heavy metal tolerance of *Miscanthus* plants and their phytoremediation potential in abandoned mine land. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(4): 1397-1406 (in Chinese)
- [32] Wang R-F (王荣芬), Qiu E-F (邱尔发), Tang L-Q (唐丽清). Heavy metals distribution in roadside tree trunks under a heavy urban transportation condition. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(15): 4212-4222 (in Chinese)

---

作者简介 车继鲁 男,1991 年生 硕士研究生. 主要从事污染生态学研究. E-mail: chejilu@126.com

责任编辑 肖 红

---

---

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. 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*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(9): 2907-2916 (in Chinese)