

夏冰, 司志国. 郑州市不同污染区主要绿化树种对土壤重金属的富集能力研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 123-129.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.18.031

# 郑州市不同污染区主要绿化树种对土壤重金属的富集能力研究

夏冰, 司志国

(河南职业技术学院环境艺术工程系, 河南郑州 450046)

**摘要:**以郑州市不同污染区绿化树种(冬青、龙爪槐、香樟、桂花、大叶女贞、广玉兰)为试验材料,采用等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)研究这些树种对Mn、Zn、Cu、Ni、Cd、Pb等6种重金属元素的吸收富集特征。结果发现:(1)不同绿化树种土壤重金属平均含量大小依次表现为Zn > Mn > Cu > Pb > Ni > Cd,不同绿化树种土壤重金属含量基本表现为龙爪槐和冬青较高,香樟和大叶女贞次之,桂花和广玉兰最低,土壤中Zn、Pb、Cu、Ni平均含量均没有超标,但Cd含量是国家土壤环境质量二级标准的5.93~0.85倍。(2)冬青和龙爪槐的综合污染指数( $P_i$ 值)最大,分别为2.03、2.14,达到了中度污染,其他植物 $P_i$ 值均为1~2,为轻度污染,各绿化树种土壤重金属污染程度由大到小的排序为冬青 > 龙爪槐 > 香樟 > 桂花 > 大叶女贞 > 广玉兰。(3)不同绿化树种叶片叶绿素a和b含量、可溶性蛋白和可溶性糖含量、叶片重金属含量均以冬青和龙爪槐较高,香樟和大叶女贞次之,桂花和广玉兰相对较低。(4)不同绿化树种对6种重金属元素的富集能力及其转移系数存在一定的差异,以冬青和龙爪槐较高,香樟和大叶女贞次之,桂花和广玉兰相对较低。其中对Mn、Cu、Zn的富集系数较大,并且均大于1,对重金属的转移能力依次表现为Cd > Pb > Ni > Cu > Mn > Zn。(5)郑州市绿化树种叶片生理特性(尤其是叶绿素和可溶性蛋白)与土壤重金属含量之间具有一定的相关性,叶片重金属含量与土壤重金属含量呈极显著正相关,说明不同绿化树种体内的重金属含量主要依赖于土壤重金属含量。结果表明,冬青和龙爪槐对重金属的吸收和富集作用高于其他绿化树种。

**关键词:**绿化树种;污染区;土壤重金属;富集能力

**中图分类号:** S684.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)18-0123-07

绿化植物是城市、自然和景观复合生态系统中具有重要自净功能的组成部分,对大气中的粉尘、颗粒物有过滤、阻挡和吸附的作用,在改善生态环境、减少阳光辐射、增大空气湿度、净化空气、调节气候等方面起着“除污吐新”的作用,被称为城市粉尘过滤器<sup>[1-3]</sup>。重金属元素是一类难降解、污染严重、累积性元素,通过生物链的富集作用危及人类健康,对生态系统构成了潜在的威胁,也对城市本身的生存与发展提出严峻的挑战<sup>[4-5]</sup>。通过种植绿化树种修复污染土壤重金属已成为近年来的热点。为建立良性的城市生态系统,迫切需要认识绿化树种与生态环境之间的关系,尤其是绿化树种在土壤重金属修复方面的作用<sup>[1-3]</sup>。绿化树种因其自身的生存环境和生命规律,对重金属的富集及修复能力差异较大,城市绿地的建设必须遵循植物本身的生长规律。因此,选择适合城市发展的园林绿化树种,是城市绿地设计的基础和改善城市环境质量的重要保障。近年来,有关绿化树种对重金属元素吸收富集特征的研究不断涌现,而人们关注的焦点也主要集中在对城市生态系统绿化树种区系和种类划分等方面的研究,忽视了绿化树种在城市建设过程中发挥的重要作用<sup>[6-7]</sup>。

郑州市是我国中心枢纽城市,近年来经济发展迅猛,随着

工业、人口快速增长及农药化肥大量施用,重金属污染已成为城市污染的主要问题,严重威胁居民身体健康和城市生态环境,也对城市本身的生存与发展提出了严峻挑战<sup>[8-9]</sup>。绿化植物在土壤重金属修复过程中起着重要作用,通过种植绿化树种逐步提取土壤中的重金属元素,进而修复污染土壤的方法——植物修复技术,已成为人们研究的热点,研究城市园林绿化植物对重金属的修复是促进城市绿化高效发展的有效途径之一,将其作为特色经济植物用于土壤重金属修复具有重要的实用和经济意义<sup>[10-11]</sup>。当前重金属超富集植物的筛选备受国内外广泛关注,有关绿化树种对土壤重金属元素吸收富集特征的研究在不断涌现<sup>[1-3,12]</sup>。为了使研究结果更加具有科学性和严谨性,笔者通过对郑州市不同污染区绿化树种进行长期监测,最后确定在不同污染区——中原区(西郊)、惠济区(北郊)、金水区、二七区、回族区(市区)、航空港区、高新技术开发区选取主要的绿化树种冬青、龙爪槐、香樟、桂花、大叶女贞、广玉兰,采用等离子体原子发射光谱法(ICP-AES),研究这些植物对Mn、Zn、Cu、Ni、Cd、Pb等6种重金属元素的吸收富集特征,并且对其叶片和土壤重金属进行比较,为不同绿化树种在城市景观配置、重金属污染防治、选择合适城建植物等方面提供更多的物种资源和基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

郑州市地处河南省中部偏北,位于黄河中游的南岸

收稿日期:2016-04-28

基金项目:河南省科学技术厅软科学研究(编号:162400410327)。

作者简介:夏冰(1984—),女,河南郑州人,硕士,讲师,主要研究方向为绿化树种生态学。E-mail: xia\_bing84@163.com。

(112°42′~114°14′E, 34°16′~34°58′N), 北临黄河, 西依嵩山, 东南部依靠黄淮平原。属暖温带大陆性季风气候, 四季分明, 呈现春季温暖少雨, 夏季炎热多雨, 秋季晴朗日照长, 冬季寒冷多风。年平均气温 14.4℃, 极端最高温度 42.3℃, 极端最低温度 -17.9℃, 7 月份最热, 平均 27.3℃, 1 月份最冷, 平均 0.2℃。年降水量 652.9 mm, 多集中在夏季(6—8 月), 占全年降水量的 52.3%。土壤类型较多, 以褐土和潮土分布面积最大, 分别占土壤面积的 64.4%、30.17%, 土壤湿度较大, 地势差异较为悬殊, 为多种绿化树种生长提供了有利的环境条件。郑州市绿化树种种类繁多, 可开发利用的园林观赏植物资源丰富, 据不完全统计, 种子植物共 2 000 多种, 属于 150 科 800 多属, 与全国植物科属种数相比, 科占 35.2%, 属占 16.4%, 种占 8.4%, 足以说明郑州市植物区系成分的丰富, 绿化树种约有 42 科 106 属 200 余种(含变种、变型和亚种)。20 世纪 80 年代中期, 郑州市绿化覆盖面积居全国省会城市前列, 为郑州赢得了“绿城”的美誉。2000 年郑州市提出创建国家园林城市的目标, 通过大规模的建造绿地工程, 先后

获得“河南省园林城市”“全国园林绿化先进城市”的称号, 2006 年正式成为“国家园林城市”<sup>[8-9]</sup>。

### 1.2 试验方法

2013—2015 年连续 3 年的 9 月初, 对郑州市不同污染区中原区(西郊)、惠济区(北郊)、金水区、二七区、回族区(市区)、航空港区、高新技术开发区采集不同绿化植物叶片和根系, 根据景观分类单元选取主要的绿化植物(冬青、龙爪槐、香樟、桂花、大叶女贞、广玉兰)进行标记以便于长期观测, 每 10 d 左右采集 1 次样本, 共采集 3 次, 叶片分别从每个植株的东、西、南、北均匀收集, 枝剪剪取上、中、下部分茎(去皮, 尽量不要干扰植物), 剪取完整的叶片封存于锥形瓶内, 蒸馏水洗净, 晾干, 在 105℃ 杀青 30 min, 70℃ 烘干至恒重, 粉碎过 40 目筛保存备用; 同时挖取部分根系(够测量即可), 4 分法采集不同绿化树种根系周围的土壤(0~20 cm), 土壤经自然风干, 去除石块、植物残体等残杂物, 研磨后过 60 目筛后备用(表 1、表 2)。应用数字图像处理技术测定叶面积(包括叶柄), 比叶重(SLW) = 单位面积叶干重/单位叶面积。

表 1 不同绿化植物基本生长特性

树种	株数	高度(m)	冠幅(m)	基茎(cm)	枝下高(m)	叶面积指数	比叶重
香樟	30	4.3~6.7	2.6~4.1	7.5~12.3	2.4~3.5	26.9±2.3	14.3±0.3
大叶女贞	29	2.9~4.3	3.4~5.2	6.8~9.7	0.6~0.9	32.7±1.5	15.2±0.6
桂花	30	3.1~5.2	3.1~5.4	4.3~8.2	0.2~0.5	28.4±2.7	15.1±0.9
广玉兰	30	2.6~4.8	1.5~3.2	7.6~11.5	0.8~1.3	46.8±1.6	18.7±0.5
冬青	30	2.4~4.1	1.2~2.8	4.2~8.6	0.2~0.6	34.5±1.3	17.3±0.7
龙爪槐	30	2.6~3.9	1.3~3.4	6.7~13.5	0.8~1.5	16.3±2.8	12.7±0.4

表 2 不同绿化树种土壤特性

树种	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	速效磷(mg/kg)	碱解氮(mg/kg)
香樟	15.23±1.23	1.58±0.36	1.23±0.25	30.25±3.26	1.42±0.36	32.56±4.25
大叶女贞	16.45±2.03	1.42±0.51	1.27±0.16	32.37±2.01	1.37±0.25	33.17±3.28
桂花	14.16±1.56	1.13±0.25	1.15±0.35	26.58±2.98	1.03±0.16	26.34±3.14
广玉兰	13.82±2.14	1.05±0.39	1.19±0.19	27.13±3.25	1.15±0.28	21.38±2.99
冬青	18.79±2.04	1.53±0.42	1.32±0.21	34.12±2.47	1.58±0.41	37.45±3.06
龙爪槐	19.21±1.89	1.62±0.46	1.35±0.17	35.69±2.06	1.69±0.33	39.25±2.74

### 1.3 测定指标

1.3.1 叶片生理指标的测定 选取新鲜叶片样品进行各项生理指标的测定, 每项试验重复测定 3 次。植物叶片洗净, 65℃ 烘箱烘干, 粉碎后过 1.5 mm 筛, 除去叶脉研磨混合, 以 80% 丙酮溶液浸提, 比色法测定叶绿素 a、b 含量; 考马斯亮蓝-G250 染色法测定可溶性蛋白<sup>[13]</sup>。

1.3.2 植物及土壤样品重金属的测定 称取粉碎后的植物或者自然晾干的土壤样品 0.2 g, 放入聚四氟乙烯消解罐中, 加入混合酸后 HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub>-HF(HNO<sub>3</sub> 和 HClO<sub>4</sub> 体积比为 5:1) 后新仪 MDS6 型微波消解仪消解, 消解后的样品经加热后蒸馏水定容, 采用 ICP-AES 测定 Zn、Mn、Pb、Cu、Ni 和 Cd 含量, 冷原子吸收微分测定仪、为 ICP 配置氢化物发生器, 确保所需仪器的灵敏度<sup>[14-15]</sup>。

植物叶片重金属含量富集系数 = 叶片重金属含量/土壤重金属含量。

转移系数 = 植物叶片重金属含量/根重金属含量。

1.3.3 土壤重金属评价方法 评价方法: 采用指数法对土壤重金属污染程度进行评价, 计算各因子的分指数和各类土壤重金属污染综合指数, 根据分指数和综合指数来分析各类土壤重金属污染现状。单因子指数法指土壤单项污染物的实测值与评价标准之比, 比值用以表示土壤中该污染物的污染程度<sup>[16]</sup>:

$$P_i = C_i/S_i。$$

式中:  $P_i$  为污染指数;  $C_i$  为污染物实测值;  $S_i$  为污染物评价标准;  $i$  代表某种污染物。

$P_i$  为第  $i$  种污染物的污染分指数;  $C_i$  为实测质量分数;  $S_i$  为其评价标准。一般  $P_i \leq 1$  为未污染,  $P_i > 1$  为已污染,  $1 < P_i \leq 2$  为轻度污染,  $2 < P_i \leq 3$  为中度污染,  $P_i > 3$  为重度污染,  $P_i$  值越大土壤受到的污染越严重。

Nemerow 综合污染指数法<sup>[1-3]</sup>。

$$P_i = \{ [(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2] / 2 \}^{1/2}。$$

式中:  $P_i$  为综合污染指数;  $(C_i/S_i)_{\max}$  为土壤重金属元素中污染指数最大值;  $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$  为土壤各污染指数的平均值。用评

价公式计算出污染指数,按照土壤环境质量分级标准进行评价(表3)。

表3 土壤质量分级标准

等级划分	单因子污染指数	潜在生态风险程度	污染程度
1	$P_i < 0.7$	$P_1 < 0.7$	安全
2	$0.7 < P_i \leq 1$	$0.7 < P_1 \leq 1$	警戒级
3	$1 < P_i \leq 2$	$1 < P_1 \leq 2$	轻度污染
4	$2 < P_i \leq 3$	$2 < P_1 \leq 3$	中度污染
5	$P_i \geq 3$	$P_1 \geq 3$	重度污染

#### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据的统计和整理,采用 SPSS 21.0 进行方差分析和统计学检验, LSD 多重比较, 单因素方差分析 (One-way ANOVA) 比较其差异显著性, Pearson 分析各指标的相关性 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同绿化树种土壤重金属含量

不同绿化树种土壤重金属平均含量大小依次表现为:  $Zn > Mn > Cu > Pb > Ni > Cd$ , 土壤 Mn 含量的变化范围为 80.5 ~ 92.6 mg/kg, 平均含量为 85.9 mg/kg; 土壤 Cu 含量的变化范围为 63.5 ~ 75.1 mg/kg, 平均含量为 69.3 mg/kg; 土壤 Zn 含量的变化范围为 195.4 ~ 235.6 mg/kg, 平均含量为 219.3 mg/kg; 土壤 Ni 含量的变化范围为 34.2 ~ 48.9 mg/kg, 平均含量为 41.2 mg/kg; 土壤 Cd 含量的变化范围为 3.56 ~ 6.51 mg/kg, 平均含量为 5.20 mg/kg; 土壤 Pb 含量的变化范

围为 56.2 ~ 76.5 mg/kg, 平均含量为 66.6 mg/kg (表 4)。不同绿化树种土壤重金属含量基本表现为龙爪槐、冬青较高, 香樟、大叶女贞次之, 桂花、广玉兰最低。由表 4 还可知, 与国家土壤环境质量 (GB 15618—1995《土壤环境质量标准》) 二级标准比较, 除 Mn 外, 土壤中 Zn、Pb、Cu、Ni 平均含量均没有超标, 但 Cd 含量是国家土壤环境质量二级标准的 5.93 ~ 10.85 倍; 除 Mn 外, Cu、Zn、Ni、Cd、Pb 含量分别是中国土壤重金属平均值的 2.81 ~ 3.08、2.63 ~ 3.18、1.27 ~ 1.82、36.70 ~ 67.11、2.16 ~ 2.94 倍, 综合比较可知, 郑州市存在较为严重的重金属污染, 其中以 Cd 的污染最为严重。

### 2.2 不同绿化树种土壤重金属污染程度

根据单因子和多因子指数评价方法, 结合采样点土壤重金属元素测定值和土壤背景值, 计算各研究区单项污染指数及综合污染指数值。由单因子指数评价法可知, 对于 Mn 而言, 不同绿化树种均表现为未污染; 对于 Cu 而言, 大叶女贞、桂花和广玉兰表现为轻度污染, 香樟、冬青和龙爪槐表现为中度污染; 对于 Zn 而言, 桂花表现为未污染, 其余表现为轻度污染; 对于 Ni 而言, 香樟、桂花和广玉兰表现为轻度污染, 大叶女贞、冬青和龙爪槐表现为中度污染; 对于 Cd 而言, 大叶女贞表现为中度污染, 其他植物均表现为重度污染; 对于 Pb 而言, 广玉兰和冬青表现为重度污染, 其他植物表现为轻度污染。由多因子评价法可知, 冬青和龙爪槐  $P_1$  值最大, 分别为 2.03、2.14, 达到了中度污染, 其他植物  $P_1$  值均为 1 ~ 2, 为轻度污染, 各绿化树种土壤重金属污染程度由大到小的排序为冬青 > 龙爪槐 > 香樟 > 桂花 > 大叶女贞 > 广玉兰 (表 5)。

表4 各树种土壤重金属含量与国家土壤环境质量标准及土壤背景值

树种	Mn 含量	Cu 含量	Zn 含量	Ni 含量	Cd 含量	Pb 含量
香樟	85.3 ± 3.6	70.4 ± 3.2	213.6 ± 23.6	42.0 ± 6.3	5.63 ± 0.92	69.7 ± 5.6
大叶女贞	83.7 ± 5.2	69.5 ± 1.5	225.7 ± 15.8	41.3 ± 9.5	5.21 ± 1.63	65.4 ± 8.2
桂花	80.5 ± 6.1	63.5 ± 2.6	203.6 ± 35.2	35.6 ± 3.4	3.56 ± 0.84	59.3 ± 7.9
广玉兰	82.1 ± 7.3	65.2 ± 5.6	195.4 ± 36.9	34.2 ± 5.1	3.98 ± 1.71	56.2 ± 5.3
冬青	91.4 ± 4.2	72.3 ± 4.3	241.7 ± 25.3	45.3 ± 4.2	6.03 ± 1.35	72.3 ± 4.1
龙爪槐	92.6 ± 3.4	75.1 ± 5.9	235.6 ± 27.8	48.9 ± 3.1	6.51 ± 1.52	76.5 ± 6.8
平均值	85.9 ± 5.0	69.3 ± 4.3	219.3 ± 18.2	41.2 ± 5.6	5.20 ± 1.21	66.6 ± 7.8
国家二级标准		100	250	50	0.6	300
中国土壤平均值	583	22.6	74.2	26.9	0.097	26.0

表5 不同绿化树种土壤重金属污染程度

树种	单因子指数评价法 $P_i$										多因子指数评价法			
	Mn	污染程度	Cu	污染程度	Zn	污染程度	Ni	污染程度	Cd	污染程度	Pb	污染程度	$P_1$	污染程度
香樟	0.34	未污染	2.03	中度	1.23	轻度	1.56	轻度	3.02	重度	1.26	轻度	1.59	轻度
大叶女贞	0.58	未污染	1.89	轻度	1.56	轻度	2.03	中度	2.77	中度	1.58	轻度	1.26	轻度
桂花	0.67	未污染	1.78	轻度	0.98	未污染	1.68	轻度	3.08	重度	1.03	轻度	1.34	轻度
广玉兰	0.98	未污染	1.56	轻度	1.45	轻度	1.26	轻度	3.56	重度	2.41	中度	1.12	轻度
冬青	0.13	未污染	2.11	中度	1.36	轻度	2.65	中度	3.15	重度	2.13	中度	2.14	中度
龙爪槐	0.63	未污染	2.65	中度	1.87	轻度	2.52	中度	3.69	重度	1.15	轻度	2.03	中度

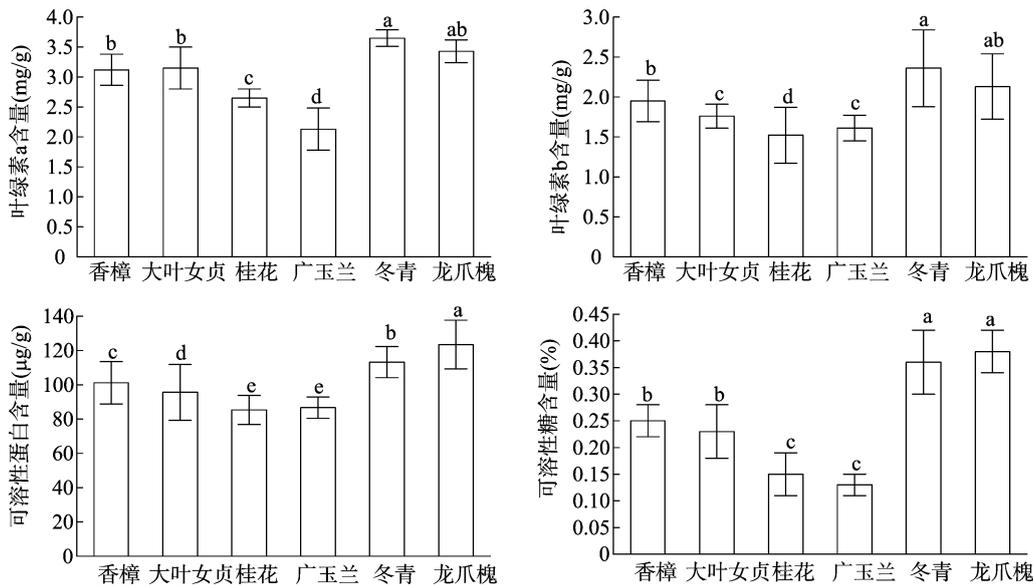
### 2.3 不同绿化树种叶片生理特性

绿化树种叶片叶绿素 a 和 b 含量、可溶性蛋白和可溶性糖含量均以冬青和龙爪槐较高, 香樟和大叶女贞次之, 桂花和广玉兰相对较低; 郑州市绿化树种叶片叶绿素 a 含量变化范围在 2.13 ~ 3.65 mg/g 之间, 冬青和龙爪槐叶片叶绿素 a 含量差异不显著, 香樟和大叶女贞叶片叶绿素 a 含量差异不显

著, 显著高于桂花和广玉兰; 郑州市绿化树种叶片叶绿素 b 含量范围在 1.61 ~ 2.36 mg/g 之间, 其中冬青和龙爪槐叶片叶绿素 b 含量差异不显著, 大叶女贞和广玉兰叶片叶绿素 b 含量差异不显著, 显著高于桂花; 郑州市绿化树种叶片可溶性蛋白含量变化范围在 85.3 ~ 123.5 μg/g 之间, 其中桂花和广玉兰叶片可溶性蛋白含量差异不显著, 其他 4 种植物叶片可溶

性蛋白含量差异均显著,并且显著高于桂花和广玉兰;郑州市绿化树种叶片可溶性糖含量变化范围在0.13%~0.38%之间,冬青和龙爪槐叶片可溶性糖含量差异不显著,香樟和大叶

女贞叶片可溶性糖含量差异不显著,桂花和广玉兰叶片可溶性糖含量差异不显著(图1)。



不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

图1 粉尘污染对绿化树种叶片生理特性的影响

#### 2.4 不同绿化树种叶片重金属含量

不同绿化树种叶片重金属含量差异较大,基本表现为冬青和龙爪槐较高,香樟和大叶女贞次之,桂花和广玉兰相对较低,局部有所波动;不同绿化树种重金属平均含量基本表现为:  $Zn > Mn > Pb > Cu > Ni > Cd$ 。不同绿化树种 Mn 含量变化范围在 98.7~125.3 mg/kg 之间,其中冬青和龙爪槐叶片 Mn 含量差异不显著,香樟和大叶女贞叶片 Mn 含量差异不显著,桂花和广玉兰叶片 Mn 含量差异不显著;Cu 含量变化范围在 61.4~86.3 mg/kg 之间,其中冬青和龙爪槐叶片 Cu 含量差异不显著,香樟和大叶女贞叶片 Cu 含量差异不显著,桂花和广玉兰叶片 Cu 含量差异不显著;Zn 含量变化范围在 226.9~265.3 mg/kg 之间,其中冬青、龙爪槐和香樟叶片 Zn 含量差异不显著,显著高于其他 3 种植物;Ni 含量变化范围在 29.8~38.5 mg/kg 之间,其中冬青和龙爪槐叶片 Ni 含量差异不显著,香樟和广玉兰叶片 Ni 含量差异不显著,桂花叶片 Ni 含量最低;Cd 含量变化范围在 3.12~4.45 mg/kg 之间,其中冬青、龙爪槐和大叶女贞叶片 Cd 含量差异不显著,桂花和广玉兰叶片 Cd 含量差异不显著;Pb 含量变化范围在 44.3~56.3 mg/kg 之间,其中冬青和龙爪槐叶片 Pb 含量差异不显著,冬青和香樟叶片 Pb 含量差异不显著,桂花和广玉兰叶片 Pb 含量差异不显著(图2)。

#### 2.5 不同绿化树种重金属的富集系数和转移系数

富集系数是衡量超富集植物的重要特征,绿化树种不同器官对重金属的吸收富集作用明显不同,更能够反映植物对重金属的富集和吸收能力。结合不同绿化树种不同器官重金属含量和土壤重金属含量可计算出各器官对重金属元素的富集系数及转移系数。由图3可知,不同绿化树种重金属富集系数差异较大,基本表现为冬青和龙爪槐较高,香樟和大叶女贞次之,桂花和广玉兰相对较低,局部有所波动,不同绿化树

种对 Mn 的平均富集系数变化范围在 1.28~1.43 之间,Cu 的平均富集系数变化范围在 1.26~1.42 之间,Zn 的平均富集系数变化范围在 1.23~1.52 之间,Ni 的平均富集系数变化范围在 1.15~1.36 之间,Cd 的平均富集系数变化范围在 1.16~1.48 之间,Pb 的平均富集系数变化范围在 1.09~1.42 之间。由图3还可知,不同绿化树种对重金属的平均富集系数接近一致,并且均大于 1。

转移系数是植物地上部分元素的含量与地下部分同种元素含量的比值,用来评价植物将重金属从地下向地上的运输和富集能力。转移系数越大,则重金属从根系向地上器官转运能力越强。本研究采用植物叶和茎平均元素含量与植物根系中元素含量的比值作为该元素的转移系数。不同绿化树种重金属转移系数差异较大,基本表现为冬青和龙爪槐较高,香樟和大叶女贞次之,桂花和广玉兰相对较低,局部有所波动;不同绿化树种对 Mn 的转移系数变化范围在 1.06~1.13 之间,Cu 的转移系数变化范围在 1.03~1.15 之间,Zn 的转移系数变化范围在 1.06~1.18 之间,Ni 的转移系数变化范围在 1.16~1.78 之间,Cd 的转移系数变化范围在 1.26~1.62 之间,Pb 的转移系数变化范围在 1.15~1.41 之间。综合比较来看,冬青和龙爪槐对重金属的转移能力较高;不同绿化树种对重金属的转移能力依次表现为  $Cd > Pb > Ni > Cu > Mn > Zn$ (图4)。

#### 2.6 不同绿化树种叶片属性与土壤重金属含量的相关性分析

对不同绿化树种叶片属性与土壤重金属含量相关性进行分析,土壤 Mn 含量与叶片 Mn、Zn、Cd 含量呈极显著的相关性,与叶片 Ni 含量、叶绿素 a 和 b、可溶性蛋白呈显著的相关性;土壤 Cu 含量与叶片 Cu 含量呈极显著的相关性,与叶片 Zn、Cd、Pb 含量、叶绿素 a 和 b、可溶性蛋白呈显著的相关性;

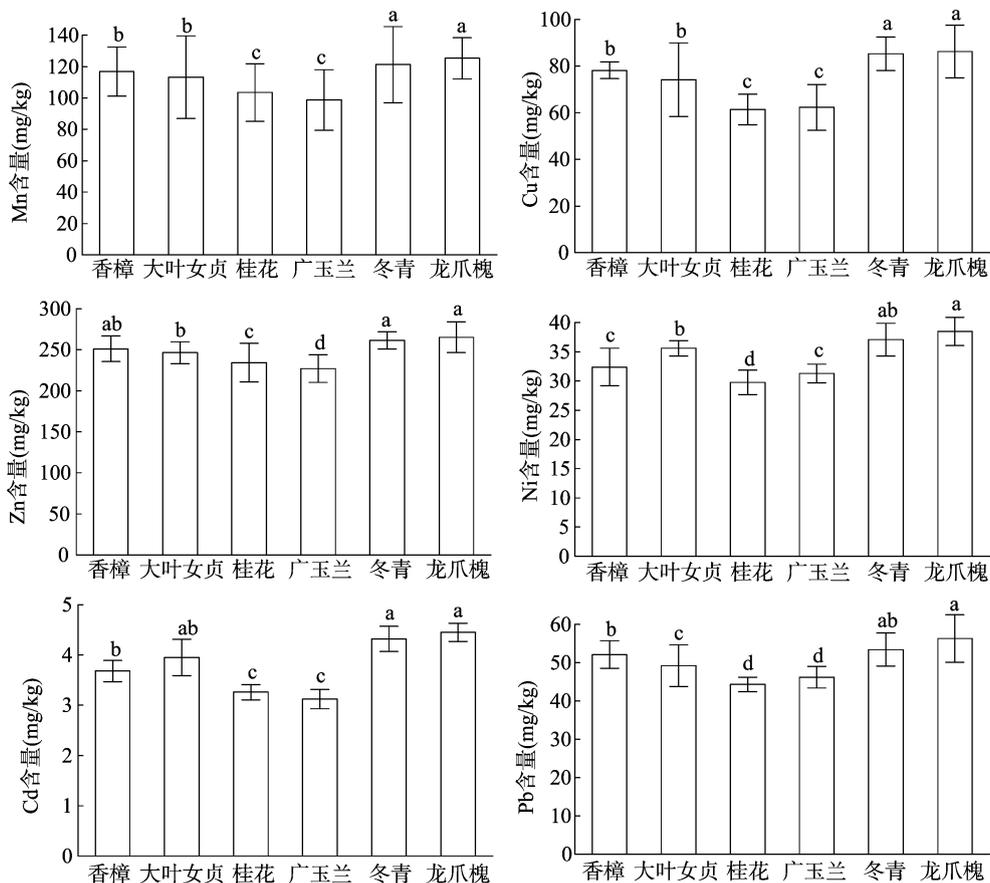


图2 不同绿化树种不同器官重金属含量

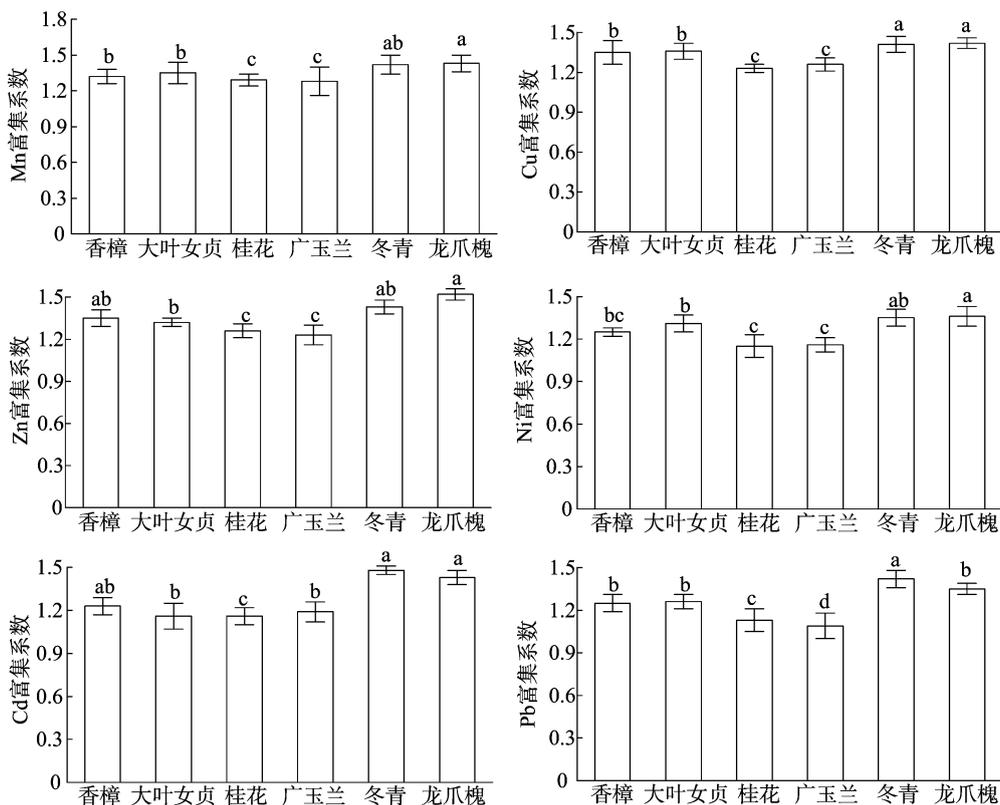


图3 不同绿化树种重金属的富集系数

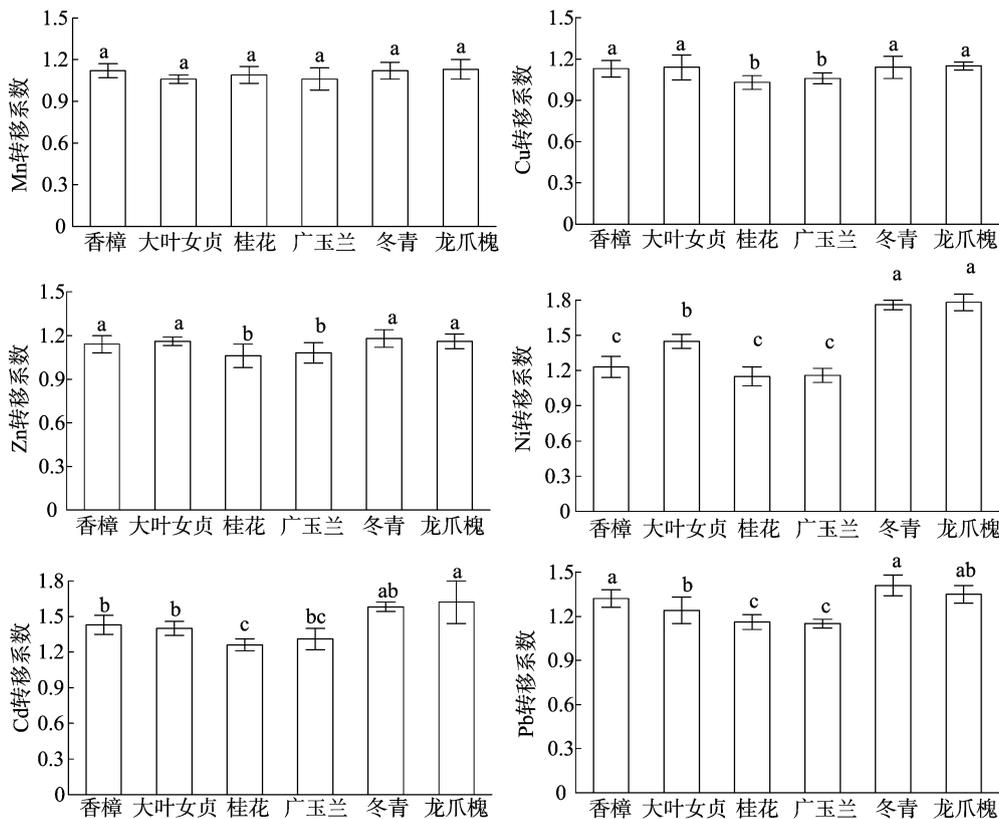


图4 不同绿化树种重金属的转移系数

土壤 Zn 含量与叶片 Zn 含量、叶绿素 a 和 b、可溶性蛋白呈极显著的相关性,与叶片 Cd 含量呈显著的相关性;土壤 Ni 含量与叶片 Mn、Ni 含量、可溶性蛋白呈极显著的相关性,与叶片 Cd 含量、叶绿素 a 和 b、可溶性糖呈显著的相关性;土壤 Cd

含量与叶片 Cd 含量、叶绿素 a 和 b 呈极显著的相关性,与叶片 Cu 和 Ni 含量、可溶性蛋白呈显著的相关性;土壤 Pb 含量与叶片 Ni 和 Pb 含量、可溶性蛋白呈极显著的相关性,与叶片 Zn 含量、叶绿素 a 和可溶性糖含量呈显著的相关性(表 6)。

表 6 不同绿化树种叶片属性与土壤重金属含量的相关性

叶片属性		土壤重金属					
		Mn	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb
叶片重金属	Mn	0.758 **	0.367	0.141	0.763 **	0.236	0.365
	Cu	0.324	0.698 **	0.236	0.256	0.566 *	0.215
	Zn	0.699 **	0.541 *	0.756 **	0.184	0.278	0.566 *
	Ni	0.533 *	0.369	0.325	0.863 **	0.526 *	0.742 **
	Cd	0.714 **	0.614 *	0.503 *	0.562 *	0.912 **	0.134
	Pb	0.368	0.528 *	0.447	0.336	0.419	0.869 **
叶片生理特性	叶绿素 a	0.613 *	0.558 *	0.699 **	0.542 *	0.855 **	0.623 *
	叶绿素 b	0.633 *	0.657 *	0.714 **	0.589 *	0.723 **	0.324
	可溶性蛋白	0.526 *	0.523 *	0.699 **	0.725 **	0.541 *	0.874 **
	可溶性糖	0.364	0.314	0.156	0.566 *	0.326	0.511 *

注：“\*\*”相关性在 0.01 水平上显著(双尾)，“\*”相关性在 0.05 水平上显著(双尾)。

### 3 讨论与结论

本研究中河南省郑州市不同污染区土壤中 Zn、Pb、Cu、Ni 平均含量均没有超标,但 Cd 含量是国家土壤环境质量二级标准的 5.93 ~ 10.85 倍;除 Mn 外,Cu、Zn、Ni、Cd、Pb 含量分别高出中国土壤重金属平均值,存在较为严重的重金属污染,其中以 Cd 的污染最为严重。造成这种现象主要是由于城市绿化树种土壤受人类活动影响程度不同或是栽培绿化树种过

程中土壤来源不同,也可能是由于环境和大气污染所导致的<sup>[17-18]</sup>。从本研究结果来看,不同绿化树种叶片重金属的平均含量由高到低的顺序基本为:Zn > Mn > Pb > Cu > Ni > Cd,对 6 种重金属元素的富集能力存在一定差异。说明即使是同一种植物对不同元素吸收迁移、累积也不一样,一方面反映植物本身的特性,另一方面也反映重金属对植物的影响及其在植物体内的迁移能力<sup>[19]</sup>。不同绿化树种对 Mn、Cu、Zn 的富集系数较大,但对 Mn、Cu、Zn 的转移系数并不是最大,表明了

不同绿化树种对 Mn、Cu、Zn 元素同时具有超富集植物的 2 个基本特征,同时也表明了不同绿化树种对土壤 Cd 污染比较敏感,也即植物能将重金属大量富集在地下部,表现出一定的富集重金属的能力;相反,不同绿化树种对 Cd 富集系数较小,但对 Cd 转移系数最大。由此可见,富集系数和转移系数是有一定区别的,分别表征植物的富集能力和转运能力,与植物的生理生化和遗传变异关系密切<sup>[20]</sup>。有研究<sup>[21-22]</sup>认为地上部分重金属含量大于根部(转移系数大于 1)的植物对于重金属超富集植物的筛选可能更有意义。因此,对于绿化树种,转移系数越大说明其对土壤重金属的修复效应越大。本研究中,冬青和龙爪槐对 6 种重金属的转移系数均大于 1,对于植物修复来说非常有利,是良好的具有土壤修复效应的园林绿化植物。综合分析可知,冬青和龙爪槐对土壤重金属的吸收能力均较强,具备超富集植物的潜能,植物叶片的贡献相对较大,不同绿化树种均具有修复重金属污染土壤的潜力,今后应再进一步对它们所存在的环境风险进行评估。

植物在逆境下遭受伤害,往往发生膜脂过氧化作用,丙二醛是膜脂过氧化作用的主要产物之一,其含量高低和质膜透性的大小都是膜脂过氧化强弱和质膜破坏程度的重要指标<sup>[23]</sup>。在正常生长条件下,植物体内活性氧的产生和清除处于平衡中,当处于各种逆境胁迫时,植物体内活性氧产生和清除的平衡受到破坏,从而有利于体内活性氧的产生,所积累的活性氧引发了膜脂过氧化,植物所处环境越恶劣受到的污染也就越严重<sup>[24-27]</sup>。本研究中不同绿化树种叶片生理特性与土壤重金属含量基本保持一致的变化趋势,相关性分析结果表明,郑州市绿化树种叶片生理特性(尤其是叶绿素和可溶性蛋白)与土壤重金属含量之间具有一定的相关性;相关性分析还显示不同绿化树种叶片重金属含量与土壤重金属含量呈极显著正相关,表明了不同绿化树种体内的重金属含量主要依赖于土壤重金属含量,同时对于土壤重金属的吸收也保持一定的独立性。综合来看,冬青和龙爪槐对重金属的吸收和富集作用高于其他绿化树种。

#### 参考文献:

- [1] Chen H, Zheng C, Tu C, et al. Heavy metal pollution in soils in China; status and countermeasures [J]. *Ambio*, 1999, 2(2): 130 - 134.
- [2] Jiang X, Zhao K. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2001, 7(1): 92 - 99.
- [3] Yang X, Tang D, Xu D, et al. Characters of greening tree species in heavy metal pollution protection in Shanghai [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(15): 687 - 690.
- [4] Kuperman R G, Carreiro M M. Soil heavy metal concentrations, microbial biomass and enzyme activities in a contaminated grassland ecosystem [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(2): 179 - 190.
- [5] Atafar Z, Mesdaghinia A, Nouri J, et al. Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 160(1/2/3/4): 83 - 89.
- [6] Stewart C, Norton D A, Fergusson J E. Historical monitoring of heavy metals in kahikatea ring wood in Christchurch, New Zealand [J]. *Science of the Total Environment*, 1991, 105(91): 171 - 190.
- [7] Shaw B P, Sahu S K, Mishra R K. Heavy metal induced oxidative damage in terrestrial plants [M] // *Heavy metal stress in plants*. Berlin Heidelberg: Springer, 2004: 84 - 126.
- [8] 李玲, 吴克宁, 张雷, 等. 郑州市郊区土壤重金属污染评价分析 [J]. *土壤通报*, 2008, 39(5): 1164 - 1168.
- [9] 朱玉周, 刘和平, 郭学峰, 等. 郑州市空气质量状况及冬季持续污染过程的气象机理分析 [J]. *气象与环境科学*, 2009, 32(3): 47 - 50.
- [10] Baker A, McGrath S P, Sidoli C, et al. The possibility of *in situ* heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 1994, 11(1/2/3/4): 41 - 49.
- [11] Hernandez L, Probst A, Probst J L, et al. Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 312(1): 195 - 219.
- [12] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(3): 313 - 324.
- [13] 孙天国, 沙伟, 刘岩. 复合重金属胁迫对两种藜类植物生理特性的影响 [J]. *生态学报*, 2010, 30(9): 2332 - 2339.
- [14] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展 [J]. *土壤通报*, 2004, 35(3): 366 - 370.
- [15] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价 [J]. *地理科学*, 2005, 25(1): 108 - 112.
- [16] 吴新民, 潘根兴. 影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析 [J]. *土壤学报*, 2003, 40(6): 921 - 928.
- [17] 顾继光, 林秋奇, 胡韧, 等. 土壤-植物系统中重金属污染的治理途径及其研究展望 [J]. *土壤通报*, 2005, 36(1): 128 - 133.
- [18] 沈振国, 陈怀满. 土壤重金属污染生物修复的研究进展 [J]. *农村生态环境*, 2000, 16(2): 39 - 44.
- [19] 刘玉燕, 刘敏, 刘浩峰. 城市土壤重金属污染特征分析 [J]. *土壤通报*, 2006, 37(1): 184 - 188.
- [20] 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.
- [21] 宋玉芳, 许华夏, 任丽萍, 等. 土壤重金属污染对蔬菜生长的抑制作用及其生态毒性 [J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(1): 13 - 15.
- [22] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法 [J]. *生态学杂志*, 2011, 30(5): 889 - 896.
- [23] 张利红, 李培军, 李雪梅, 等. 镉胁迫对小麦幼苗生长及生理特性的影响 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24(4): 458 - 460.
- [24] 齐付国, 刘小飞, 孙景生. 不同供水水平对间作甜瓜叶片活性氧代谢及光合特性的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(9): 199 - 201.
- [25] 张永福, 黄鹤平, 银立新, 等. 冷(热)激对干旱胁迫下玉米活性氧清除及膜脂过氧化的调控机制 [J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(5): 56 - 60.
- [26] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 123 - 126.
- [27] 吴新民, 潘根兴. 影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析 [J]. *土壤学报*, 2003, 40(6): 921 - 928.