

樊佳奇,牛来春,庞 磊. 云南地区不同园林植物对土壤重金属的吸收富集特征[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):467-472.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.07.133

云南地区不同园林植物对土壤重金属的吸收富集特征

樊佳奇,牛来春,庞 磊

(云南师范大学文理学院,云南昆明 650222)

摘要:以云南省昆明市道路园林绿化植物(紫薇、石榴、石楠、海棠、枇杷)为试材,采用等离子体原子发射光谱法(ICP-AES),分析 5 种园林绿化植物对 6 种重金属元素(Mn、Zn、Cu、Ni、Cd、Pb)的吸收富集特征。结果表明:不同园林植物土壤重金属平均含量大小依次为 $Zn > Mn > Pb > Cu > Ni > Cd$,不同园林植物土壤重金属含量基本表现为石楠 > 枇杷 > 石榴 > 海棠 > 紫薇,局部有所波动。昆明市土壤中 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 6.0~15.5 倍。不同园林植物相同器官中重金属含量基本表现为石楠 > 枇杷 > 石榴 > 海棠 > 紫薇,局部有所波动,重金属平均含量基本表现为 $Zn > Mn > Pb > Cu > Ni > Cd$,重金属含量在各器官基本表现为叶 > 茎 > 根。不同园林植物对重金属的富集能力基本表现为 $Cu = Mn = Zn > Ni > Pb > Cd$,各器官对重金属元素的富集能力基本表现为叶 > 茎 > 根;不同园林植物对 Cu、Mn、Zn 的平均富集系数均大于 1,对 Ni 的平均富集系数接近于 1,对 Pb、Cd 的平均富集系数均小于 1;不同园林植物对重金属的转移能力依次表现为 $Cd > Pb > Ni > Cu > Mn > Zn$ 。相关性分析表明,不同园林植物体内重金属含量主要依赖于土壤重金属含量。紫薇、石榴、石楠对重金属的吸收和富集作用强于其他园林植物。

关键词:园林植物;土壤重金属;吸收;富集

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)07-0467-05

重金属元素是一类难降解、污染严重、具有累积性的元素,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威胁,也对城市本身的生存与发展提出严峻挑战^[1-3]。园林植物是城市-景观复合生态系统的重要组成部分,对大气中的粉尘、颗粒物有过滤、阻挡、吸附的作用,在净化空气、修复重金属、调节气候、改善城市生态环境等方面起着“除污吐新”的作用,通过种植园林植物修复重金属污染土壤已成为近年来的研究热点^[4-5]。为建立良性的城市生态系统,迫切需要认识园林植物与生态环境之间的关系,尤其是园林植物在土壤重金属修复方面的作用^[4-5]。园林植物因其自身的生存环境和生长规律,对重金属的富集及修复能力差异较大,城市绿地建设必须遵循植物本身的生长规律^[6-7]。因此,选择适合城市建设的园林绿化树种是城市绿地设计的基础及改善城市环境质量的重要保障。近年来,有关园林植物对重金属元素吸收富集特征的研究较多,关注的焦点也主要集中在对城市生态系统园林植物区系和种类划分等方面,忽视了园林植物在城市建设过程中的重要作用。云南省昆明市是我国通往东南亚及南亚次大陆的重要交通枢纽,享有“春城”“花城”的美誉^[8-9]。本研究对昆明市园林植物现状进行摸底调查,最后在昆明市主要街道选取紫薇(*Lagerstroemia indica*)、石榴(*Punica granatum*)、石楠(*Photinia serrulata*)、海棠

(*Chaenomeles speciosa*)、枇杷(*Eriobotrya japonica*)等 5 种主要园林植物,采用等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)分析这 5 种主要的园林植物对 Mn、Zn、Cu、Ni、Cd、Pb 等 6 种重金属元素的吸收富集特征,并且对植物体内不同器官及土壤中重金属含量进行比较,旨在为不同园林植物在城市景观配置、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。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

昆明市(102°10'~102°40'E,24°23'~26°22'N)地处滇中高原的东北部,面积约 2.16 万 km²,属亚热带高原山地季风气候,植物资源丰富,日照时间长,紫外线强度较高,相对湿度为 74%,年平均气温 14.5℃,年极端最高温度为 30.4℃,最低温度为 -7.8℃,无霜期 240 d,年平均降水量 1 030 mm,中心海拔约 1 800 m,大部分地区海拔为 1 500~2 800 m。市区土壤类型复杂多样,多由石灰岩玄、页岩、武岩等成土母岩发育而成,主要包括棕壤、红壤、石灰岩土、水稻土、黄棕壤、沼泽土等,多呈弱酸性,红壤为基带土壤,在城市建设过程中,大量的煤渣和灰烬混杂在土壤中,导致市区土壤肥力较低。作为中国生物资源和植物区系最丰富的省份,云南省拥有占全国 50% 以上的植物种类,近几年,昆明市城市绿地覆盖率从 1985 年的 12.23% 上升至 2012 年的 43.6%。笔者实地考察发现,昆明市道路园林绿化植物中基调树种包括香樟(*Cinnamomum camphora*)、紫薇、石榴、天竺桂(*Cinnamomum pedunculatum*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、悬铃木(*Platanus acerifolia*)、荷花玉兰(*Magnolia grandiflora*)、三角枫(*Acer buergerianum*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)、

收稿日期:2015-10-19

基金项目:云南省教育厅科学研究基金(编号:2014Y622)。

作者简介:樊佳奇(1984—),男,贵州贞丰人,硕士,讲师,研究方向为风景园林生态学、园林植物等。E-mail:Jiaqi_fan84@163.com。

通信作者:牛来春,硕士,副教授,主要从事风景植物栽培及其土壤修复等工作。E-mail:n990346@qq.com。

柳杉 (*Cryptomeria fortunei*)、桂花 (*Osmanthus fragrans*)、山茶 (*Camellia japonica*)、海棠、枇杷、红叶檵木 (*Redflowered loropetalum*)、小叶女贞 (*Ligustrum quihoui*)、南天竹 (*Nandina domestica*)、八角金盘 (*Fatsia japonica*)、杜鹃 (*Rhododendron*)、石楠等。

1.2 采样方法

根据昆明市城区道路园林绿化植物的分布及种类,2013—2015 年 7 月中旬分别在昆明市区 3 条主要街道采集紫薇、石榴、石楠、海棠、枇杷等园林植物(作为 3 次重复,统计见表 1,统计数据时间为 2015 年),每条街道分别选取 5 株

表 1 不同园林植物基本生长情况

植物	冠幅 (m)	株高 (m)	茎粗 (cm)	生长年限 (年)	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)
紫薇	1.6 ± 0.6b	1.9 ± 0.2c	1.7 ± 0.2c	5	13.7 ± 2.4d	1.42 ± 0.23c	1.25 ± 0.14b	30.05 ± 3.25c
石榴	1.9 ± 0.5ab	2.5 ± 0.8b	4.7 ± 0.5b	8	17.9 ± 2.0b	1.81 ± 0.47ab	1.31 ± 0.26a	32.85 ± 3.57b
石楠	0.7 ± 0.2c	1.5 ± 0.4c	2.1 ± 0.3c	4	18.6 ± 1.9a	1.86 ± 0.51a	1.34 ± 0.35a	35.41 ± 2.58a
海棠	2.3 ± 0.8a	5.2 ± 0.9a	6.3 ± 0.7a	9	16.2 ± 2.7c	1.53 ± 0.25c	1.17 ± 0.19b	33.14 ± 4.18b
枇杷	0.9 ± 0.3c	2.8 ± 0.4b	5.2 ± 0.6ab	12	17.9 ± 1.4b	1.73 ± 0.41b	1.30 ± 0.21a	34.21 ± 4.25ab

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下表同。

1.3 测定指标

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 $\text{HClO}_4 - \text{HNO}_3 - \text{HF}$ (HNO_3 和 HClO_4 体积比为 5 : 1)后采用新仪 MDS6 型微波消解仪消解,消解后的样品经加热赶酸后蒸馏水定容,采用等离子体原子发射光谱法(ICP - AES)测定植物或者土壤样品中 Zn、Mn、Pb、Cu、Ni、Cd 含量。

植物各器官重金属含量富集系数 = 各器官重金属含量/土壤重金属含量^[10-11];
转移系数 = 植物地上(茎和叶的平均值)重金属含量/地下(根)重金属含量^[10-11]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件进行数据统计和方差分析,进行 LSD 多重比较,Pearson 分析土壤与植物重金属含量的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同园林植物土壤重金属含量

由图 1 可知,不同园林植物土壤重金属平均含量由高到低依次为 $\text{Zn} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cd}$,土壤 Mn 含量变化范围为 81.7 ~ 95.6 mg/kg,平均含量为 88.3 mg/kg;土壤 Cu 含量的变化范围为 53.7 ~ 69.5 mg/kg,平均含量为 61.5 mg/kg;土壤 Zn 含量的变化范围为 187.2 ~ 203.5 mg/kg,平均含量为 195.7 mg/kg;土壤 Ni 含量的变化范围为 35.4 ~ 48.6 mg/kg,平均含量为 40.9 mg/kg;土壤 Cd 含量的变化范围为 3.6 ~ 9.3 mg/kg,平均含量为 6.9 mg/kg;土壤 Pb 含量的变化范围为 76.3 ~ 85.6 mg/kg,平均含量为 81.6 mg/kg。不同园林植物土壤重金属含量基本表现为石楠 > 枇杷 > 石榴 > 海棠 > 紫薇,局部有所波动,其中土壤 Pb 含量在不同园林植物之间多差异不显著($P > 0.05$)。不同园林植物各重金属含量变异程度不一致,其中 Cd 含量变异程度较大,Zn 含量变异程度较小。

紫薇、石榴、石楠、海棠、枇杷作为研究对象,2013 年 7 月中旬第 1 次取样时做标记以便长期观测,分别从每个植株的东、西、南、北方向均匀收集叶片,枝剪剪取上、中、下部分茎(去皮,尽量不要干扰植物),将剪取的茎、叶封存于锥形瓶内,蒸馏水洗净,晾干,105 ℃杀青 30 min,70 ℃烘干至恒质量,粉碎过 40 目筛保存备用。同时挖取不同园林植物的部分根系(够测量即可),带回实验室,采用四分法采集不同园林植物根系周围的土壤(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。

与 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 6.0 ~ 15.5 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 2.38 ~ 3.08、2.61 ~ 2.74、1.18 ~ 1.81、37.11 ~ 95.88、2.93 ~ 3.29 倍,综合比较可知,云南省存在较为严重的重金属污染,其中以 Cd 污染最为严重。造成这种现象的原因主要是城市园林植物土壤受人类活动影响程度不同或是园林植物栽培过程中土壤来源不同,也可能由环境和大气污染所致(表 2)。

2.2 不同园林植物不同器官重金属含量

由表 3 可知,不同园林植物相同器官中重金属含量差异较大,不同园林植物各器官重金属含量变化趋势相一致,基本表现为石楠 > 枇杷 > 石榴 > 海棠 > 紫薇,局部有所波动。不同园林植物重金属平均含量基本表现为 $\text{Zn} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cd}$;即使是相同种植物,相同重金属在不同器官中的含量也不尽相同,同种植物重金属含量在各器官基本表现为叶 > 茎 > 根,并且叶和茎中含量远高于根,表现出明显的富集作用。不同园林植物中 Mn 含量平均值变化范围在 109.5 ~ 129.0 mg/kg 之间,Cu 含量平均值变化范围在 76.4 ~ 91.3 mg/kg 之间,Zn 含量平均值变化范围在 263.7 ~ 278.1 mg/kg 之间,Ni 含量平均值变化范围在 29.8 ~ 45.7 mg/kg 之间,Cd 含量平均值变化范围在 3.1 ~ 4.7 mg/kg 之间,Pb 含量平均值变化范围在 40.6 ~ 57.0 mg/kg 之间。其中紫薇和海棠植株体内平均 Mn 含量差异不显著($P > 0.05$),二者显著低于其他园林植物($P < 0.05$);石楠植株体内平均 Mn、Cu、Zn、Ni、Pb 含量均显著高于其他园林植物($P < 0.05$);石榴和海棠植株体内 Zn 平均含量差异不显著($P > 0.05$);紫薇植株体内 Cu、Zn 平均含量显著低于其他园林植物($P < 0.05$);石榴和石楠植株体内 Cd 含量平均差异不显著($P > 0.05$);紫薇和海棠植株体内 Cd 含量差异不显著($P > 0.05$),显著低于其他园林植物($P < 0.05$);石榴和石楠植株体内 Pb 平均含量差异不显著($P > 0.05$)。

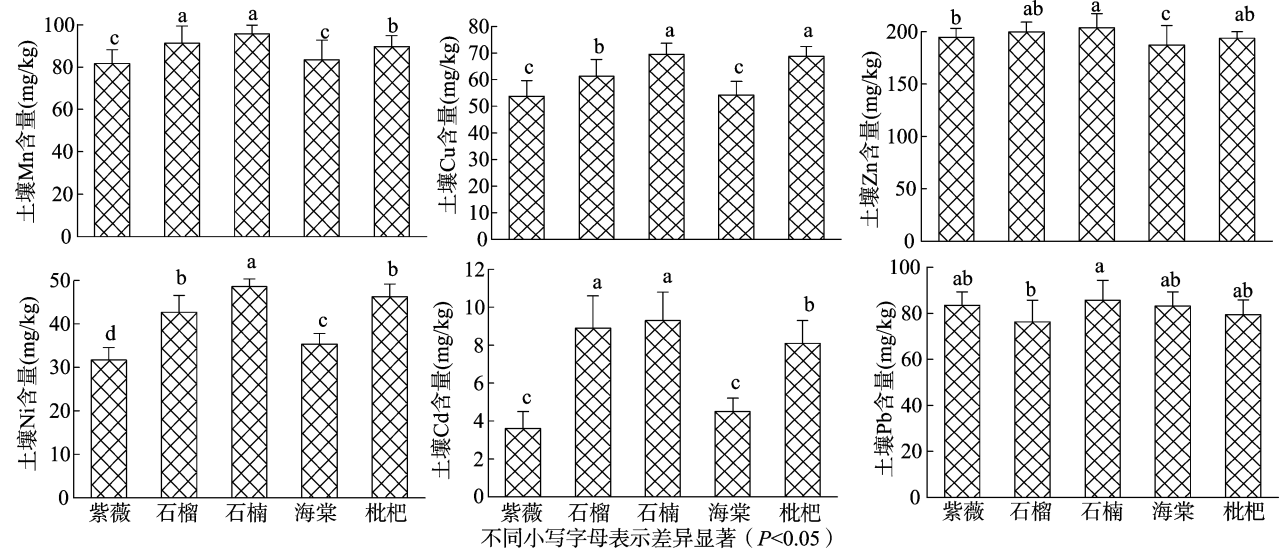


图1 不同园林植物土壤重金属含量

表 2 国家土壤环境质量二级标准及土壤背景值

植物	Mn 含量 (mg/kg)	Cu 含量 (mg/kg)	Zn 含量 (mg/kg)	Ni 含量 (mg/kg)	Cd 含量 (mg/kg)	Pb 含量 (mg/kg)
紫薇	81.7	53.7	194.5	31.7	3.6	83.4
石榴	91.2	61.3	199.5	42.7	8.9	76.3
石楠	95.6	69.5	203.5	48.6	9.3	85.6
海棠	83.4	54.2	187.2	35.4	4.5	83.1
枇杷	89.7	68.7	193.7	46.3	8.1	79.4
国家二级标准		100.0	250.0	50.0	0.6	300.0
中国土壤平均值	583.0	22.6	74.2	26.9	0.097	26.0

表 3 不同园林植物不同器官重金属含量

植物	器官	Mn 含量 (mg/kg)	Cu 含量 (mg/kg)	Zn 含量 (mg/kg)	Ni 含量 (mg/kg)	Cd 含量 (mg/kg)	Pb 含量 (mg/kg)
紫薇	根	106.4 ± 6.8	71.5 ± 6.2	254.7 ± 25.3	25.6 ± 2.3	2.2 ± 0.5	37.2 ± 3.2
	茎	115.2 ± 5.7	76.4 ± 5.7	265.1 ± 32.8	34.7 ± 3.1	3.2 ± 0.9	41.4 ± 2.6
	叶	119.7 ± 8.1	81.3 ± 9.2	271.4 ± 27.1	37.5 ± 2.7	4.1 ± 0.7	43.1 ± 4.3
	平均值	113.8 ± 6.8c	76.4 ± 4.9d	263.7 ± 8.4c	32.6 ± 6.2c	3.2 ± 1.0c	40.6 ± 3.0d
石榴	根	115.1 ± 9.3	79.2 ± 6.3	265.4 ± 18.3	35.2 ± 3.6	4.3 ± 0.4	45.2 ± 4.9
	茎	124.7 ± 12.3	85.1 ± 7.1	271.0 ± 23.7	43.7 ± 2.7	4.6 ± 0.6	59.7 ± 5.1
	叶	132.4 ± 10.4	89.4 ± 8.4	281.4 ± 19.7	48.3 ± 6.4	5.1 ± 0.9	63.7 ± 4.2
	平均值	124.1 ± 8.7b	84.6 ± 5.1b	272.6 ± 8.1b	42.4 ± 6.6b	4.7 ± 0.4a	56.2 ± 9.7a
石楠	根	123.9 ± 16.1	84.7 ± 6.8	271.1 ± 26.4	41.3 ± 5.2	3.6 ± 0.6	52.1 ± 6.2
	茎	127.4 ± 15.7	92.4 ± 5.4	273.5 ± 29.1	46.2 ± 4.8	4.7 ± 0.9	57.3 ± 3.7
	叶	135.8 ± 8.3	96.8 ± 7.3	289.6 ± 19.3	49.6 ± 6.1	4.8 ± 0.4	61.7 ± 4.8
	平均值	129.0 ± 6.1a	91.3 ± 6.1a	278.1 ± 10.1a	45.7 ± 4.2a	4.4 ± 0.7ab	57.0 ± 4.8a
海棠	根	103.7 ± 6.2	73.1 ± 8.9	264.2 ± 25.4	26.7 ± 1.5	2.4 ± 0.6	43.2 ± 3.5
	茎	109.2 ± 8.3	81.4 ± 5.2	271.3 ± 32.7	31.3 ± 2.3	3.2 ± 0.7	51.7 ± 4.7
	叶	115.7 ± 7.1	83.7 ± 6.4	276.3 ± 28.3	38.1 ± 3.8	3.8 ± 0.5	53.1 ± 5.2
	平均值	109.5 ± 6.0c	79.4 ± 5.6c	270.6 ± 6.1b	29.8 ± 2.7d	3.1 ± 0.7c	49.3 ± 5.4c
枇杷	根	121.5 ± 9.5	84.3 ± 7.2	269.7 ± 35.7	38.4 ± 3.2	3.2 ± 0.9	48.7 ± 3.4
	茎	129.7 ± 8.7	85.2 ± 6.3	275.4 ± 24.6	43.5 ± 4.1	4.1 ± 0.6	55.3 ± 5.7
	叶	131.4 ± 13.0	91.0 ± 8.1	283.1 ± 28.1	47.1 ± 3.5	4.3 ± 0.7	58.6 ± 6.1
	平均值	127.5 ± 5.3ab	86.8 ± 3.6b	276.1 ± 6.7a	43.0 ± 4.4b	3.9 ± 0.6b	54.2 ± 5.0b

2.3 不同园林植物重金属的富集系数

富集系数是衡量超富集植物的重要特征,园林植物不同器官对重金属的吸收富集作用明显不同,富集系数能反映植

物对重金属的富集和吸收能力^[10-11]。结合不同园林植物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(表 4、表 5),不同园林植物

对重金属的吸收富集规律不尽相同。不同园林植物对 Mn 的平均富集系数变化范围在 1.3 ~ 1.4 之间,Cu 的平均富集系数变化范围在 1.3 ~ 1.4 之间,Zn 的平均富集系数变化范围在 1.3 ~ 1.4 之间,Ni 的平均富集系数变化范围在 0.9 ~ 1.0 之间,Cd 的平均富集系数变化范围在 0.5 ~ 0.9 之间,Pb 的平均富集系数变化范围在 0.5 ~ 0.7 之间。不同园林植物对 Cu、Mn、Zn、Ni、Pb 的平均富集系数差异均不显著。石榴、石

楠、枇杷对 Cd 的平均富集系数差异不显著($P < 0.05$),显著低于紫薇。不同园林植物对重金属的富集能力从高到低基本表现为 $Cu = Mn = Zn > Ni > Pb > Cd$,局部有所波动;不同园林植物各器官对重金属元素的富集能力存在着一定的差异,基本表现为叶 > 茎 > 根;不同园林植物对 Cu、Mn、Zn 的平均富集系数接近一致,并且均大于 1,对 Ni 的平均富集系数接近于 1,对 Pb、Cd 的平均富集系数均小于 1。

表 4 不同园林植物重金属的富集系数

植物	器官	富集系数					
		Mn	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb
紫薇	根	1.3 ± 0.2	1.3 ± 0.3	1.3 ± 0.3	0.8 ± 0.2	0.6 ± 0.2	0.4 ± 0.1
	茎	1.4 ± 0.4	1.4 ± 0.6	1.4 ± 0.5	1.1 ± 0.1	0.9 ± 0.2	0.5 ± 0.1
	叶	1.5 ± 0.6	1.5 ± 0.5	1.4 ± 0.3	1.2 ± 0.3	1.1 ± 0.3	0.5 ± 0.2
	平均值	1.4 ± 0.1a	1.4 ± 0.1a	1.4 ± 0.1a	1.0 ± 0.2a	0.9 ± 0.3a	0.5 ± 0.1a
石榴	根	1.3 ± 0.3	1.3 ± 0.3	1.3 ± 0.5	0.8 ± 0.2	0.5 ± 0.1	0.6 ± 0.2
	茎	1.4 ± 0.4	1.4 ± 0.4	1.4 ± 0.2	1.0 ± 0.3	0.5 ± 0.1	0.8 ± 0.2
	叶	1.5 ± 0.5	1.5 ± 0.5	1.4 ± 0.3	1.1 ± 0.2	0.6 ± 0.2	0.8 ± 0.3
	平均值	1.4 ± 0.1a	1.4 ± 0.1a	1.4 ± 0.1a	1.0 ± 0.2a	0.5 ± 0.1b	0.7 ± 0.1a
石楠	根	1.3 ± 0.2	1.2 ± 0.2	1.3 ± 0.3	0.8 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.6 ± 0.1
	茎	1.3 ± 0.6	1.3 ± 0.6	1.3 ± 0.4	1.0 ± 0.3	0.5 ± 0.2	0.7 ± 0.2
	叶	1.4 ± 0.4	1.4 ± 0.3	1.4 ± 0.3	1.0 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.1
	平均值	1.3 ± 0.1a	1.3 ± 0.1a	1.3 ± 0.1a	0.9 ± 0.1a	0.5 ± 0.1b	0.7 ± 0.1a
海棠	根	1.2 ± 0.2	1.3 ± 0.3	1.4 ± 0.3	0.8 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1
	茎	1.3 ± 0.3	1.5 ± 0.4	1.4 ± 0.6	0.9 ± 0.3	0.7 ± 0.2	0.6 ± 0.2
	叶	1.4 ± 0.2	1.5 ± 0.5	1.5 ± 0.5	0.9 ± 0.1	0.8 ± 0.2	0.6 ± 0.2
	平均值	1.3 ± 0.1a	1.4 ± 0.1a	1.4 ± 0.1a	0.9 ± 0.1a	0.7 ± 0.2ab	0.6 ± 0.1a
枇杷	根	1.5 ± 0.3	1.6 ± 0.6	1.4 ± 0.6	1.2 ± 0.1	0.9 ± 0.2	0.6 ± 0.1
	茎	1.4 ± 0.5	1.2 ± 0.3	1.4 ± 0.5	0.9 ± 0.3	0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.2
	叶	1.0 ± 0.4	1.3 ± 0.5	1.5 ± 0.3	1.0 ± 0.2	0.5 ± 0.1	0.7 ± 0.2
	平均值	1.3 ± 0.3a	1.4 ± 0.2a	1.4 ± 0.1a	1.0 ± 0.2a	0.6 ± 0.2b	0.7 ± 0.1a

表 5 不同园林植物重金属的转移系数

植物	转移系数					
	Mn	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb
紫薇	1.10 ± 0.13ab	1.10 ± 0.15ab	1.05 ± 0.18a	1.41 ± 0.15a	1.66 ± 0.32a	1.14 ± 0.26c
石榴	1.12 ± 0.17a	1.10 ± 0.17ab	1.04 ± 0.14a	1.31 ± 0.13b	1.13 ± 0.27d	1.37 ± 0.34a
石楠	1.06 ± 0.15b	1.12 ± 0.23a	1.04 ± 0.09a	1.16 ± 0.11c	1.32 ± 0.16c	1.14 ± 0.19c
海棠	1.08 ± 0.19b	1.13 ± 0.18a	1.04 ± 0.16a	1.17 ± 0.25c	1.46 ± 0.19b	1.21 ± 0.25b
枇杷	1.07 ± 0.21b	1.05 ± 0.25b	1.04 ± 0.24a	1.18 ± 0.19c	1.31 ± 0.22c	1.17 ± 0.19c

2.4 不同园林植物重金属的转移系数

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,常被用来评价植物将重金属从地下向地上的运输和富集能力^[10-11]。转移系数越大,表明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元素平均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^[10-11]。由表 5 可知,不同园林植物对 Mn 的转移系数变化范围在 1.06 ~ 1.12 之间,Cu 的转移系数变化范围在 1.05 ~ 1.13 之间,Zn 的转移系数变化范围在 1.04 ~ 1.05 之间,Ni 的转移系数变化范围在 1.16 ~ 1.41 之间,Cd 的转移系数变化范围在 1.13 ~ 1.66 之间,Pb 的转移系数变化范围在 1.14 ~ 1.37 之间。石榴、紫薇对 Mn 的转移能力较高,石楠和海棠对 Cu 的转移能力较高,6 种园林植物对 Zn 的转移能力基本一致,紫薇、石榴对 Ni 的转移能力较高,紫薇对 Cd 的转移能力较高,石榴对 Pb 的转移能力较高。综合比较而言,石

榴和紫薇对重金属的转移能力较高。不同园林植物对重金属的转移能力依次表现为 $Cd > Pb > Ni > Cu > Mn > Zn$ 。

2.5 不同器官与土壤重金属含量相关性分析

对不同园林植物各器官中重金属的含量与土壤重金属含量相关性进行分析。由表 6 可知,紫薇根中 Mn、Cu、Zn、Ni、Cd、Pb 含量与土壤中 Mn、Cu、Zn、Ni、Cd、Pb 含量呈极显著正相关($P < 0.01$);茎中 Cu、Zn、Cd 含量与土壤中 Cu、Zn、Cd 含量呈极显著正相关($P < 0.01$);叶中 Mn、Cu、Cd 含量与土壤中 Mn、Cu、Cd 含量呈显著正相关($P < 0.05$)。石榴根中 Cu、Zn、Cd 含量与土壤中 Cu、Zn、Cd 含量呈极显著正相关($P < 0.01$),Mn、Ni、Pb 含量与土壤中 Mn、Ni、Pb 含量呈显著正相关($P < 0.05$);茎中 Cu、Zn、Ni、Cd 含量与土壤中 Cu、Zn、Ni、Cd 含量呈极显著正相关($P < 0.01$);叶中 Cd 含量与土壤中 Cd 含量呈极显著正相关($P < 0.01$),Cu、Zn 含量与土壤中 Cu、Zn 含量呈显著正相关($P < 0.05$)。石楠根中 Cu、Zn、Cd、

Pb 与土壤中 Cu、Zn、Cd、Pb 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), Ni 含量与土壤中 Ni 含量显著正相关 ($P < 0.05$); 茎中 Cu、Zn、Cd、Pb 含量与土壤中 Cu、Zn、Cd、Pb 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 叶中 Cu、Zn、Cd 含量与土壤中 Cu、Zn、Cd 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。海棠根中 Cu、Cd 含量与土壤中 Cu、Cd 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), Mn、Zn、Ni 含量与土壤中 Mn、Zn、Ni 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$); 茎中 Zn、Cd

含量与土壤中 Zn、Cd 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), Pb 含量与土壤中 Pb 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$); 叶中 Cu、Cd 含量与土壤中 Cu、Cd 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。枇杷根中 Mn、Cu、Cd 含量与土壤中 Mn、Cu、Cd 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), Zn、Pb 含量与土壤中 Zn、Pb 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$); 茎中 Cu、Zn、Cd 含量与土壤中 Cu、Zn、Cd 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

表 6 园林植物不同器官重金属含量与土壤重金属含量的相关性

植物	器官	Mn	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb
紫薇	根	0.623 **	0.856 **	0.913 **	0.624 **	0.856 **	0.623 **
	茎	0.421	0.721 **	0.789 **	0.147	0.765 **	0.147
	叶	0.513 *	0.563 *	0.412	0.369	0.523 *	0.236
石榴	根	0.512 *	0.821 **	0.845 **	0.569 *	0.856 **	0.596 *
	茎	0.425	0.614 **	0.823 **	0.658 **	0.769 **	0.421
	叶	0.124	0.514 *	0.568 *	0.387	0.623 **	0.323
石楠	根	0.326	0.896 **	0.769 **	0.562 *	0.814 **	0.768 **
	茎	0.124	0.723 **	0.895 **	0.324	0.823 **	0.629 **
	叶	0.238	0.886 **	0.634 **	0.156	0.645 **	0.257
海棠	根	0.523 *	0.635 **	0.568 *	0.517 *	0.897 **	0.385
	茎	0.446	0.324	0.638 **	0.258	0.789 **	0.576 *
	叶	0.321	0.619 **	0.356	0.314	0.912 **	0.426
枇杷	根	0.639 **	0.667 **	0.527 *	0.369	0.763 **	0.567 *
	茎	0.258	0.623 **	0.627 **	0.241	0.614 **	0.452
	叶	0.364	0.136	0.413	0.089	0.413	0.356

3 结论与讨论

云南省昆明市土壤中 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 6.0 ~ 15.5 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。造成这种现象的主要原因是城市园林植物土壤受人类活动影响程度不同或园林植物栽培过程中土壤来源不同,也可能由环境和大气污染所导致。

不同园林植物对 Mn、Cu、Zn 的富集系数最大,但对 Mn、Cu、Zn 的转移系数并不是最大,表明不同园林植物对 Mn、Cu、Zn 元素同时具有超富集植物的 2 个基本特征,不同园林植物对土壤 Mn、Cu、Zn 污染比较敏感,植物能将重金属 Mn、Cu、Zn 大量富集在地下部,表现出一定的富集重金属能力;不同园林植物对 Ni、Cd、Pb 富集系数较小,但对 Ni、Cd、Pb 转移系数最大。可见,富集系数和转移系数有一定区别,分别表征植物的富集能力和转运能力,与植物的生理生化 and 遗传变异关系密切^[6-7]。有研究认为,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^[10-11]。对于园林植物,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,不同园林植物对重金属的转移系数均大于 1,对于植物修复来说非常有利,是良好的园林绿化植物,对 Ni、Cd、Pb 的吸收能力较强。综合分析可知,紫薇、石榴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,不同园林植物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。

不同园林植物对不同重金属元素吸收、迁移、累积能力不

一样,植物不同器官对不同重金属元素吸收、富集特性也不同。研究不同园林植物对重金属元素吸收、富集特性,一方面反映植物本身特性,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^[4-5]。紫薇、石榴、石楠不同器官中重金属含量与土壤重金属含量的相关系数基本高于其他园林植物,表明不同园林植物体内重金属含量主要依赖于土壤重金属含量,紫薇、石榴、石楠对重金属的吸收和富集作用高于其他园林植物。不同园林植物土壤重金属平均含量大小依次表现为 Zn > Mn > Pb > Cu > Ni > Cd,不同园林植物土壤重金属含量基本表现为石楠 > 枇杷 > 石榴 > 海棠 > 紫薇,局部有所波动。不同园林植物中各种重金属含量变异程度不一致,Cd 的变异程度较大,Zn 的变异程度较小。

不同园林植物对重金属的富集能力基本表现为 Cu = Mn = Zn > Ni > Pb > Cd,植物各器官对重金属元素的富集能力基本表现为叶 > 茎 > 根;不同园林植物对 Cu、Mn、Zn 的平均富集系数接近一致,并且均大于 1,对 Ni 的平均富集系数接近于 1,对 Pb、Cd 的平均富集系数均小于 1。石榴、紫薇对重金属的转移能力较高;不同园林植物对重金属的转移能力依次表现为 Cd > Pb > Ni > Cu > Mn > Zn。紫薇、石榴、石楠不同器官中重金属含量与土壤重金属含量的相关系数基本高于其他园林植物,表明不同园林植物体内的重金属含量主要依赖于土壤重金属含量。综合比较而言,紫薇、石榴、石楠对重金属的吸收和富集作用高于其他园林植物。

参考文献:

[1] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, et al. Heavy metals in urban soils; a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy [J]. Science of the Total Environment, 2002, 300(1/2/3): 229 - 243.

刘瑞瑞,危 期,刘梦函,等. 高效固氮花生根瘤菌株的筛选[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):472-475.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.07.134

高效固氮花生根瘤菌株的筛选

刘瑞瑞,危 期,刘梦函,刘朋飞,刘晓云

(河北大学生命科学学院/河北省微生物多样性研究与应用重点实验室,河北保定 071002)

摘要:以采自河北省保定市涞水县的花生根瘤为原材料,进行花生根瘤的采集、菌株分离纯化和回接试验,通过研究接种不同根瘤菌菌株对天府 3 号花生生长的影响,成功筛选出可与该种花生高效固氮的优良菌株。研究结果表明:接种 Hbu074005 菌株效果最佳,花生植株干质量较对照组提高 52.29%,其结瘤数、果穗数、植株株高等指标也明显优于对照组及其他处理,分别较对照提高 235.56%、112.00%、31.31%;菌株 Hbu074012、Hbu074004 的表现仅次于 Hbu074005,干质量分别较对照提高 43.13%、35.88%。由结果可以看出,菌株 Hbu074005 可显著提高天府 3 号花生的生产性状,是较为优良的花生高效共生固氮菌株。研究结果为高效固氮根瘤菌在花生农业生产中的应用奠定理论基础,具有一定的现实生产意义。

关键词:花生;根瘤菌;高效固氮;盆栽试验

中图分类号: S182;S154.39 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)07-0472-04

花生(*Arachis hypogaea*)别称落花生、番豆、地豆、长生果,属豆科落花生属,为 1 年生草本植物,是中国主要的油粮两用作物。2012 年,中国花生播种面积为 470 万 hm^2 ,产量居油料作物首位,占世界花生产量的 40.8%^[1]。花生富含蛋白质、脂肪等多种营养成分,且供给相对均衡,是目前较为理想的种植作物,具有良好的经济价值和药用价值^[2]。花生果仁通常用作食用油提取的原材料,花生油脂在纺织、印染工业上可用作乳化剂、润滑剂,为工业生产提供便利^[3]。相关研究证实,花生根茎中含有丰富的白藜芦醇^[4-5]。白藜芦醇是一种良好的植物抗菌素,具有抗氧化、抗肿瘤、保护心血管的作用,被喻

为继紫杉醇之后又一新的绿色抗癌药物^[6-7]。目前,白藜芦醇的产量远不能满足医药市场的需求,开发花生根茎白藜芦醇生产产业具有重大的医药用价值和深远的社会意义。我国花生多种植在辽东半岛、山东半岛、东南沿海地区以及黄河、长江流域的部分地区。与其他常规作物相比,花生具有强抗逆、耐瘠薄、适应性强、生产效益高的特点。在能源短缺和环境危机日益严峻的社会背景下,花生壳、花生枝条等自然状态下的生物质可以通过生物转换和热化学交换制备焦油、焦炭、液态燃料等,即可用作能源,又可作为化工原料。相关研究报道,1 t 花生油下脚料可以转化为近 1 t 的生物柴油,这种利用花生油下脚料转化的生物柴油与传统柴油相比不含对人体有害的硫和苯,燃烧后污染物排放量减少 50%,是一种绿色、清洁、可再生的能源^[8]。因此,花生作为一种生物质新能源必将得到更快更好的发展^[9]。近年来,许多国家在扩大豆科植物的生产面积,但在实际生产中过分依赖化学合成肥料,使得土壤中氮磷单一养分过高,造成土壤板结,土壤养分失调^[10]。并且化肥施用会导致土壤和水污染等一系列环境问题的产生。在化肥零增加的政策下,如何提高作物产量并保良土壤

收稿日期:2016-03-01

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(编号:201103005-7);河北省生物学强势特色学科建设项目;河北省生物工程重点学科建设项目(编号:1050-5030023)。

作者简介:刘瑞瑞(1990—),女,山东滨州人,硕士研究生,主要从事根瘤菌资源与多样性研究。E-mail:liuruirui@126.com。

通信作者:刘晓云,教授,主要从事微生物分子系统学与资源应用研究。Tel:(0312)5079696;E-mail:liuxiaoyun@126.com。

[2] Imperato M, Adamo P, Naimo D, et al. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples City (Italy) [J]. Environmental Pollution, 2003, 124(2): 247-256.

[3] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. Microchemical Journal, 2010, 94(2): 99-107.

[4] Cui S, Zhang T A, Zhao S L, et al. Evaluation of three ornamental plants for phytoremediation of Pb-contaminated soil [J]. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(4): 299-306.

[5] Sun Y, Zhou Q, Xu Y, et al. Phytoremediation for Co-contaminated soils of benzo [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(2): 2075-2082.

[6] Fawzy M A, Badr N E, El-Khatib A, et al. Heavy metal biomonitoring and phytoremediation potentialities of aquatic macrophytes in

River Nile [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(3): 1753-1771.

[7] Cao Z W, Wang S X, Wang T, et al. Using contaminated plants involved in phytoremediation for anaerobic digestion [J]. International Journal of Phytoremediation, 2015, 17(1/2/3/4/5/6): 201-207.

[8] 王彦予. 昆明市园林植物配置与造景特色研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2013.

[9] 郭胜男, 林 萍, 吴 荣, 等. 昆明市园林植物树冠截留降雨及其影响因素研究 [J]. 广东农业科学, 2014, 41(23): 47-51.

[10] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展 [J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1196-1203.

[11] 金文芬, 方 晰, 唐志娟. 3 种园林植物对土壤重金属的吸收富集特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(3): 21-25.