

DOI: 10.5846/stxb201306101560

顾翠花, 王懿祥, 白尚斌, 吴建强, 杨 一. 四种园林植物对土壤镉污染的耐受性. 生态学报, 2015, 35(8): 2536-2544.

Gu C H, Wang Y X, Bai S B, Wu J Q, Yang Y. Tolerance and accumulation of four ornamental species seedlings to soil cadmium contamination. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2536-2544.

四种园林植物对土壤镉污染的耐受性

顾翠花¹, 王懿祥^{2,*}, 白尚斌², 吴建强², 杨 一²

¹ 浙江农林大学风景园林与建筑学院, 临安 311300

² 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 临安 311300

摘要: 采用模拟 Cd 污染土壤培养法, 测定了 Cd 胁迫下山矾、桑树、绣线菊、山茶 4 种园林植物幼苗的生长、生物量变化, 根茎叶的 Cd 含量, 光合色素含量与 MDA 含量, 对耐性指数(T_i)、转移系数(TF)、生物富集系数(BCF)进行了评价。结果表明: (1) 山矾、桑树、绣线菊和山茶的平均耐性指数分别为 93.99、82.33、82.10 和 87.25; (2) 4 个树种幼苗根茎叶的 Cd 含量都随着 Cd 处理浓度的增加而增加, 转移系数值(TF)都小于 1, 转移能力为山矾>山茶>绣线菊>桑树。对 Cd 累积能力为山矾>山茶>桑树>绣线菊; 山矾和山茶生物量吸收的 Cd 总量显著高于绣线菊和桑树。(3) Cd 处理浓度的不断增加, 叶绿素 a/叶绿素 b 比值与对照相比变化不显著, 类胡萝卜素的含量持续增加; 桑树、山茶、山矾和绣线菊 MDA 含量分别平均上升为 15%、10.17%、9.69%、12.86%。不同 Cd 浓度下, MDA 上升幅度顺序为桑树>绣线菊>山茶>山矾。研究表明山矾具有很高的 Cd 耐性、转移能力、以及地上部分积累镉的能力, 是一种抗 Cd 污染较好的园林绿化树种。

关键词: 镉; 园林植物; 耐受性; 积累

Tolerance and accumulation of four ornamental species seedlings to soil cadmium contamination

GU Cuihua¹, WANG Yixiang^{2,*}, BAI Shangbin², WU Jianqiang², YANG Yi²

¹ College of Landscape and Architecture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, China

² Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China

Abstract: Four kinds of ornamental plants, *Symplocos caudate*, *Morus alba*, *Spiraea salicifolia*, and *Camellia japonica* were tested under five cadmium (Cd) application rate levels that range from 0mg/kg to 100mg/kg in a greenhouse pot experiment. Effects of Cd stress on growth indexes, biomass increment, Cd content of root, stem, leaf, content of photosynthetic pigment, and content of MDA in them were investigated after one year growth. Tolerance index (T_i), Translocation factor (TF) and bio concentration factor (BCF) of 4 species are evaluated. The results showed that (1) Cd had distinct inhibition on the growth of plant, the average tolerance index of *S. caudate*, *M. alba*, *S. salicifolia*, and *C. japonica* were 93.99, 82.33, 82.10 and 87.25 separately. (2) With increasing soil Cd content, the 4 species seedlings had a increase of Cd content of root, stem and leaf. The Translocation factor of these tree species to soil Cd contamination are all lower than 1 and followed the order of *S. caudate* > *C. japonica* > *S. salicifolia* > *M. alba*. BCF values of these tree species to soil Cd contamination followed the order of *S. caudate* > *C. japonica* > *M. alba* > *S. salicifolia*; The total contents of Cd absorbed in *S. caudate* and *C. japonica* are significantly higher than in *S. salicifolia* and *M. alba*. (3) Chlorophyll a/b values of them were not obviously changed compared with CK, but the contents of carotenoid of them increased with the increasing Cd concentration. The average content of MDA in *M. alba*, *S. salicifolia*, *C. japonica* and *S. caudate* increased 15%,

基金项目: 国家自然科学基金项目(31300581); 国家“十二五”科技支撑项目(2012BAD22B0503); 浙江省重大科技专项重点项目(2012C12909-5)

收稿日期: 2013-06-10; **网络出版日期:** 2014-05-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: w_yixiang@126.com

10.17%, 9.69% and 12.86% separately and followed the order of *M. alba* > *S. salicifolia* > *C. japonica* > *S. caudata*. The study suggested that *S. caudata* is a good candidate species for phytoremediation of Cd contaminated soil because of its higher Cd tolerance, transfer and accumulation ability of aboveground biomass.

Key Words: cadmium; ornamental plant; tolerance; accumulation

重金属污染目前已经成为全球关注的热点问题之一,其中镉(Cd)是最具污染性元素之一。镉(Cd)主要来源于冶炼、采矿等工业污水的排放、汽车尾气,农业生产中农药及化肥残留等,毒性极强,对生物体危害极大^[1-2]。尤其是土壤中积累的Cd,会渗透进入地表甚至污染地下水,最终会极大危害人类健康。在城市生态建设中,园林植物已经成为不可或缺的重要组成部分。园林植物对重金属的富集能力因物种不同而不同^[3-4],对减少城市污染、维持生态平衡都起到重要的作用^[5]。在进行城市园林绿化植物的选择时,必须考虑该植物是否对重金属污染有一定的抗性,选择既具有较高观赏价值,又对Cd有较大耐受性的园林植物来进行城市园林绿化,既能增加城市绿量、美化环境,同时也可以缓解城市中日益严重的Cd污染,甚至能对Cd重污染区域起到修复作用^[6]。

山矾(*Symplocos caudata*),山矾科常绿灌木或小乔木,早春开花,对污染物具有较强的抗性,具有很好的园林绿化前景,但目前在园林中没有得到广泛的应用。桑树(*Morus alba*),桑科落叶乔木,生长快,根系发达,萌芽力强,耐修剪,具有较强的抗性。绣线菊(*Spiraea salicifolia*),蔷薇科花灌木,小花密集,花色粉红,花期初夏至秋初,萌芽力强,抗性强,是良好的园林观赏植物。山茶(*Camellia japonica*),山茶科常绿阔叶灌木或小乔木,花大色艳,是冬季观花的园林植物。目前未见有对这4种植物的镉耐受性研究。本研究以山矾、桑树、绣线菊、山茶4种园林植物为研究对象,采用模拟Cd污染土壤培养法,对当年生实生幼苗进行土壤Cd胁迫耐受性对比实验,主要分析不同Cd浓度处理下,4个树种的生长量变化,根茎叶中Cd的含量,光合色素、MDA含量指标的变化,Cd转移能力和积累能力,对比4个园林树种对Cd胁迫的耐受性程度,以及不同浓度的Cd胁迫是否会对植物自身的生长带来影响,本研究旨在筛选对Cd胁迫具有较高耐受性和积累性的园林植物,以丰富城市生态建设尤其是镉污染地区园林中植物配置的种类。

1 材料与方法

1.1 实验材料与实验设计

本实验于2011年3月下旬播种山矾、桑树、绣线菊、山茶,采用穴盘播种方式,穴盘尺寸为540mm×280mm,聚苯乙烯材料,72孔穴。播种前用紫外线照射种子进行消毒,泥炭土、蛭石(2:1)混合基质,高温消毒。播种后喷水灌溉,萌发后移栽于花盆。花盆土壤采于浙江农林大学平山村苗圃地。土壤为红黄壤,PH值为5.52,N、P、K的含量分别为1.61、1.98、7.93g/kg。同时将采集的土壤粉碎,风干,用5mm筛筛均匀后备用。

实验方法采用模拟Cd污染土壤培养法。2012年3月初采用CdCl₂溶液处理土壤,设置5个处理浓度,分别为:0,10,20,50,100 mg/kg。搅拌稳定20d后,选取生长基本一致的一年生实生苗移入含镉土壤的花盆中,盆中土壤重量为250g,花盆内径为18cm。随机区组实验设计,每个树种每个处理5盆,每处理重复3次,总计300盆。将所有花盆放在浙江农林大学平山苗圃大棚下进行培养,实验期间按照田间常规管理,定期浇水,除草,喷洒除虫剂。实验从2011年3月下旬开始,经过1a正常土壤生长,180d镉污染土壤生长后取4个树种的幼苗进行生长、生物量和根茎叶镉含量测定。整个实验于2012年9月下旬结束。

1.2 样品测定

在镉处理之前,预先测定一年生实生苗的株高以及基径,用以计算基径增长量和主茎生长量。

2012年9月下旬,在含镉土壤的花盆中生长180d后,取成熟的新鲜叶片进行叶绿素含量测定和丙二醛

(MDA)含量测定,光合色素含量(即叶绿素 a、叶绿素 b 以及类胡萝卜素)测定时采集植物的新鲜成熟叶片,利用分光光度法进行测定^[7]。MDA(丙二醛)含量测定采用硫代巴比妥法进行测定。

将实生苗的根茎叶三部分分开,用超纯水进行冲洗(生物量测定)去除粘附于植物样品上的泥土和污物,再用去离子水冲洗,在烘干前先在 105℃ 下杀青 5min,然后在 70℃ 下于烘箱中烘至恒重。称重后用不锈钢植物粉碎机粉碎,过 60 目尼龙筛,储存于聚乙烯瓶中备用。取植物各部分样品干粉各 0.2000g 用混酸(浓 HNO_3 : HClO_4 :浓 H_2SO_4 =8:1:1)隔夜消化,采用日本岛津 AA6800 型原子吸收分光光度计测定植物体内的 Cd 含量^[8]。

1.3 数据处理与分析

基径生长量(mm)= 镉处理后基径(mm)-未处理时基径(mm)

主茎生长量(cm)= 镉处理后株高(cm)-未处理时株高(cm)

耐性指数(T_i)用两种生长指标量化:主茎生长量和根茎叶的生物量,按以下修正的公式计算:

$$T_i(\%) = [(L_s + W_R + W_S + W_L) / 4] \times 100$$

式中, L_s 代表重金属镉胁迫组主茎生长量与对照组主茎生长量的比值; W_R 、 W_S 、 W_L 分别代表镉处理后根、茎、叶平均生物量与对照平均生物量的比值^[9]。

转移系数(TF)主要用来评价从植物根部转移重金属至地上部分的能力^[10-12],计算公式为:

TF=地上部分(茎叶)平均镉浓度 / 根部镉浓度

生物富集系数(BCF)用于评价植物从土壤中积累重金属的能力^[13],计算公式为:

BCF=根或地上部分(茎叶)平均镉浓度/土壤镉浓度

生物量吸收 Cd 的总量=根的 Cd 含量×根的生物量+茎的 Cd 含量×茎的生物量+叶的 Cd 含量×叶的生物量

实验中所有数据的分析均使用 SPSS18.0 软件,主要进行单因素方差分析(ANOVA),使用 LSD(Least Significance Deviation, $P < 0.05$)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 镉对 4 个树种幼苗生物量和生长的影响

2.1.1 不同镉处理浓度下 4 个树种幼苗生物量变化

由表 1 可以看出,与 CK 相比,随着 Cd 处理浓度的不断增加,山矾、山茶根茎叶生物量均出现先上升后下降的趋势,在 Cd 浓度为 20mg/kg 时达到峰值,分别为对照的 125.45%、117.43%、110.68% 和 101.46%、106.88%、105.81%。随着 Cd 处理浓度的增加,山矾、山茶幼苗根茎叶生物量显著下降。在 100mg/kg 时,分别为对照的 58.18%、75.10%、75.24% 和 69.34%、61.93%、65.81%。

桑树、绣线菊根茎叶生物量在 Cd 处理浓度为 10、20mg/kg 时,与 CK 对比未出现显著变化,随着 Cd 浓度的增加,显著低于 CK,且两个较高处理浓度与两个较低处理浓度和对照下存在显著差异。Cd 处理浓度为 100mg/kg 时,桑树、绣线菊的根茎叶生物量分别为对照的 65.00%、60.61%、52.17% 和 68.97%、70.97%、62.07%。

Cd 浓度为 10mg/kg 时对山矾和山茶的根部生物量有一定的促进作用。Cd 浓度为 20mg/kg 时对 4 个树种的根部生物量均有一定的促进作用。

2.1.2 主茎和基径生长量、Cd 耐性指数

与对照相比较,在 Cd 浓度 10、20mg/kg 时,桑树幼苗和绣线菊幼苗主茎和基径生长量略有下降,山矾幼苗和山茶幼苗的主茎生长量略有上升,基径生长量基本没有变化。随着 Cd 处理浓度的增加,4 个种幼苗的主茎和基径生长量均呈现显著的下降趋势。

表 1 不同镉处理浓度下 4 种园林植物的生长指标

Table 1 The growth indexes of four kinds of ornamental plant under Cd stress

树种 Tree species	Cd 浓度/ (mg/kg)	主茎生长量 Stem length change/cm	基茎生长 Root collar Increase/mm	根生物量 Root Biomass/g	茎生物量 Stem Biomass/g	叶生物量 Leaf biomass/g	耐性指数 Tolerance index/%
山矾 <i>S. caudata</i>	CK	24.0±4.8a	1.5±0.3a	1.65±0.08a	2.41±0.12a	2.06±0.14a	100
	10	27.2±4.2a	1.4±0.5a	1.94±0.09a	2.67±0.13a	2.17±0.12a	111.76
	20	24.5±5a	1.5±0.4a	2.07±0.08a	2.83±0.15a	2.28±0.09a	113.91
	50	18.9±3.6b	1.1±0.5ab	1.25±0.07b	2.09±0.09b	1.83±0.08b	82.52
	100	15.0±3.7b	0.7±0.3b	0.96±0.05c	1.81±0.12c	1.55±0.09c	67.76
桑树 <i>M. alba</i>	CK	8.5±2.1a	1.2±0.2a	0.20±0.02a	0.33±0.01a	0.23±0.02a	100
	10	6.9±2.3ab	0.9±0.4ab	0.23±0.04a	0.35±0.04a	0.21±0.01a	98.39
	20	8.2±2.5a	0.7±0.2b	0.24±0.01a	0.32±0.02a	0.22±0.03a	102.27
	50	5.3±2.4b	0.6±0.3b	0.18±0.05b	0.26±0.04b	0.17±0.02b	76.26
	100	2.7±2.7c	0.3±0.2c	0.13±0.03c	0.20±0.03c	0.12±0.04c	52.39
绣线菊 <i>S. salicifolia</i>	CK	11.2±4.3a	1.7±0.4a	0.29±0.01a	0.31±0.05a	0.29±0.06a	100
	10	9.9±3.8ab	1.3±0.3ab	0.27±0.02a	0.29±0.01a	0.27±0.03a	92.04
	20	11.0±4.1a	1.6±0.6a	0.30±0.04a	0.30±0.02a	0.28±0.05a	98.75
	50	7.4±4.4b	1±0.5b	0.23±0.03b	0.25±0.04b	0.21±0.04b	74.61
	100	5.6±3.6b	0.7±0.4b	0.20±0.02b	0.22±0.06b	0.18±0.02b	63.00
山茶 <i>C. japonica</i>	CK	24.9±4.3a	1.7±0.7a	1.37±0.02a	2.18±0.03a	1.55±0.04a	100
	10	25.5±5.7a	1.6±0.6a	1.38±0.05a	2.30±0.02a	1.54±0.02a	102.00
	20	26.4±5.4a	1.4±0.8ab	1.39±0.03a	2.33±0.07a	1.64±0.06a	105.04
	50	18.5±5b	1.3±0.8b	1.11±0.04b	1.67±0.01b	1.23±0.05ab	77.82
	100	14.8±5.2b	1.1±0.9b	0.95±0.01b	1.35±0.06b	1.02±0.03b	64.13

表中数据为平均值±标准差,同一列中的不同字母表示显著性差异 ($P<0.05$)

Cd 耐性指数是反映植物对 Cd 耐受能力的大小,耐性指数高的植物在 Cd 污染严重条件下依然能够繁殖和生长,敏感植物则生长缓慢,生长量小。随着 Cd 浓度的增加,山矾和山茶的耐性指数均先上升后下降,山茶在 10mg/kg 时到达峰值,山矾在 20mg/kg 时达到峰值,并且在 Cd 浓度低于 20mg/kg 时,两者的耐性指数均大于 100。山矾、桑树、绣线菊和山茶的平均耐性指数分别为 93.99、82.33、82.10 和 87.25,4 种园林植物对 Cd 耐性能力的大小顺序为山矾>山茶>桑树>绣线菊。

2.2 4 个树种幼苗根茎叶的 Cd 含量、转移系数和生物富集系数

2.2.1 根 Cd 含量

由图 1 可看出,4 个树种幼苗根的 Cd 含量都随着土壤中 Cd 浓度增加而呈现显著的增加趋势。绣线菊的根 Cd 含量于与桑树根 Cd 含量差异不大,山矾的根 Cd 含量在 10、20、50 mg/kg 3 个处理浓度下均大于山茶的根 Cd 含量,在 100 mg/kg 处理浓度下,山矾的根 Cd 含量小于山茶的根 Cd 含量。

2.2.2 茎 Cd 含量

山矾、桑树、绣线菊、山茶的茎 Cd 含量都随着 Cd 处理浓度增加而增加,在 Cd 浓度为 100mg/kg 时达到峰值,分别达到:75.3、40.4、45.5、49.7 mg/kg。4 个树种幼苗茎的 Cd 含量顺序为山矾>绣线菊>桑树>山茶。

2.2.3 叶 Cd 含量

4 个树种幼苗叶的 Cd 含量都随着 Cd 处理浓度的增加而增加,均在 Cd 浓度为 100 mg/kg 时达到最大值,山矾、桑树、绣线菊、山茶的叶 Cd 含量最大值分别为:139.8、59.4、47.4、109.5 mg/kg。4 个树种幼苗叶的 Cd 含量顺序为山矾>山茶>绣线菊>桑树。

2.2.4 根、茎、叶 Cd 含量比较

山矾、桑树、绣线菊、山茶 4 个树种的幼苗根茎叶 Cd 含量在 4 个处理浓度下,均表现为:根>叶>茎。

2.2.5 4 个树种幼苗的 Cd 转移系数和生物富集系数

Cd 转移和富集的能力与树种类别有很大联系,4 个树种的 Cd 转移系数(TF)和生物富集系数(BCF),4 个树种 TF 总的变化范围为 0.35—0.75,山矾、桑树、绣线菊、山茶的 Cd 转移系数平均值分别为:0.7、0.44、0.48、0.50,4 个树种 Cd 转移能力顺序由高到低为:山矾>山茶>绣线菊>桑树。说明山矾、山茶两个树种根部对 Cd 的转移能力强,能将较多的 Cd 运送到茎叶等地上部分,能够很好的运输和解毒,对 Cd 的耐受能力较强,而桑树对 Cd 胁迫的应对能力最弱;4 个树种生物富集系数 BCF 总的变化范围为 0.46—7.01,山矾、桑树、绣线菊、山茶的地上生物富集系数平均值分别为 2.83、1.2、1.29、1.69,根系生物富集系数平均值分别为 3.99、2.78、2.69、3.82,表明对 Cd 的累积能力顺序由高到低为:山矾>山茶>桑树>绣线菊。

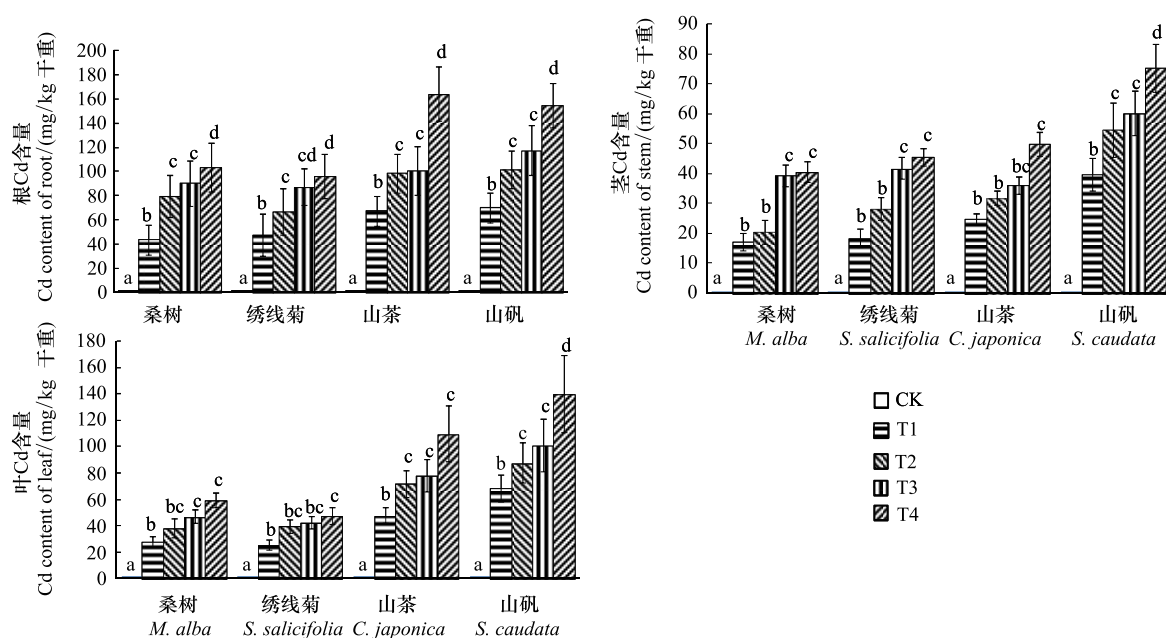


图 1 4 个树种幼苗根茎叶的 Cd 含量

Fig.1 Cd content of root, stem, leaf of 4 species

2.3 Cd 对 4 个树种生理指标的影响

2.3.1 Cd 对 4 个树种光合色素含量的影响

植物的光合作用主要决定于光合色素的含量,含量高代表植物光合作用较强,表 2 显示:Cd 处理浓度的不断增加,山矾和山茶幼苗叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量出现上升后下降的变化。山矾幼苗的叶绿素 a、b 含量在 Cd 处理浓度为 20mg/kg 时达到最大值,分别为 7.97、3.58 mg/g 鲜重,分别为对照的 1.099 倍、1.095 倍;山茶幼苗的叶绿素 a 含量在 Cd 浓度 20mg/kg 时达到最大值 3.87 mg/g 鲜重,为对照的 1.142 倍,叶绿素 b 含量则在 Cd 浓度 10mg/kg 时达到最大值 5.02 mg/g 鲜重,为对照的 1.118 倍;伴随 Cd 处理浓度的不断增加,桑树和绣线菊幼苗的叶绿素 a、b 含量持续降低,Cd 浓度 100mg/kg 时,桑树和绣线菊幼苗的叶绿素 a、b 含量达到最小值,分别为 3.86、3.12 mg/g 鲜重,3.48、2.67 mg/g 鲜重。

和叶绿素 a、b 含量变化趋势不同,伴随 Cd 处理浓度的不断增加,桑树、绣线菊、山茶三个树种幼苗的类胡萝卜素含量随着 Cd 浓度的递增而持续升高,在 Cd 浓度 100mg/kg 时与 CK 存在明显差异;而山矾的类胡萝卜素含量随着 Cd 浓度的递增出现先增加后下降的趋势,在 Cd 浓度 20mg/kg 时达到最大值。

随着 Cd 浓度的递增,桑树和绣线菊叶绿素 a/叶绿素 b 比值均呈现下降趋势,在 Cd 浓度 20mg/kg 时,山矾叶绿素 a/叶绿素 b 比值与对照没有显著差异,而山茶叶叶绿素 a/叶绿素 b 比值与对照相比有所上升,而后下降。

类胡萝卜素百分比随 Cd 处理浓度的不断递增而上升,这种变化趋势表明经过 Cd 处理后 4 个树种幼苗的叶绿素 a 受 Cd 胁迫破坏程度比叶绿素 b 大,类胡萝卜素基本未受到 Cd 胁迫的影响。

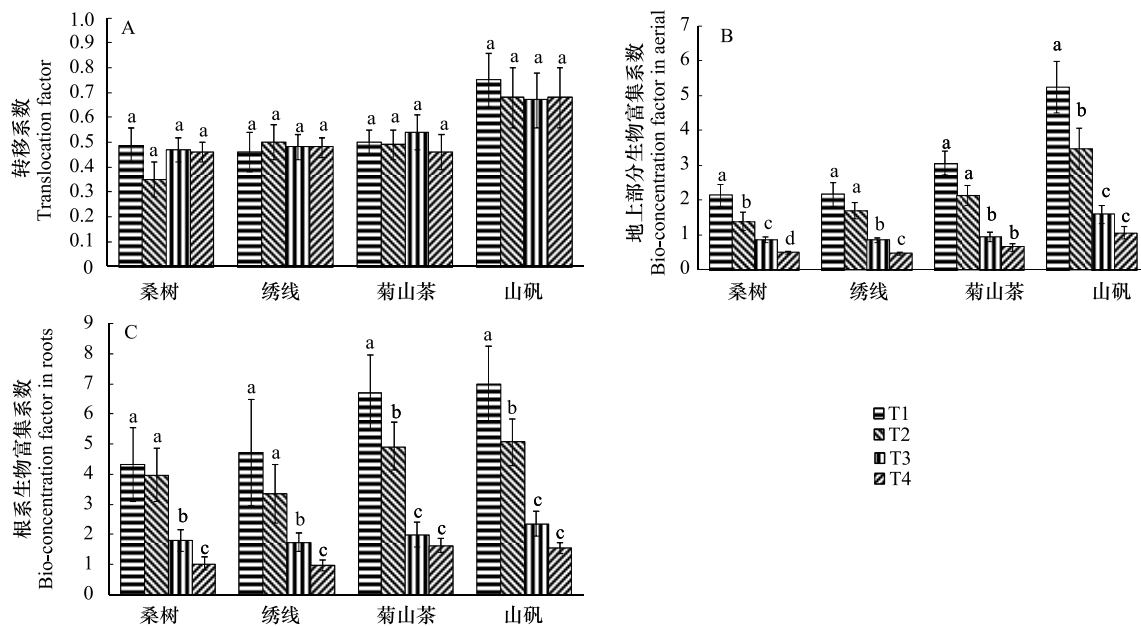


图 2 4 个树种幼苗 Cd 转移系数和生物富集系数

Fig.2 Cd Translocation factor (TF) and bio concentration factor (BCF) of 4 species

表 2 Cd 对 4 个树种光合色素含量的影响

Table 2 Effects on the content of photosynthetic pigment in four tree species under Cd stress

树种 Trees	Cd 浓度/ (mg/kg)	类胡萝卜素 Carotenoid/ (mg/g 鲜重)	叶绿素 a chlorophyll a/ (mg/g 鲜重)	叶绿素 b chlorophyll b/ (mg/g 鲜重)	叶绿素 a/叶绿素 b Chl a/Chl b	类胡萝卜素百分比 Carotencid percentage
山矾 <i>S. caudata</i>	CK	1.20±0.5a	7.25±1.30b	3.27±0.31ab	2.28±0.61a	8.78±2.10a
	10	1.36±0.32a	7.35±0.90b	3.56±0.57a	2.15±0.59a	9.36±1.09a
	20	1.45±0.04a	7.97±0.79a	3.58±0.32a	2.28±0.43a	9.48±0.98a
	50	0.96±0.03b	6.90±0.47b	3.28±0.22ab	2.12±0.29a	9.58±0.23a
	100	0.89±0.07b	5.28±0.36c	2.99±0.02b	1.77±0.13b	9.78±0.09a
桑树 <i>M. alba</i>	CK	0.19±0.02a	5.34±0.09a	3.78±0.34a	1.43±0.15a	1.78±0.34a
	10	0.21±0.05a	4.98±0.14a	3.80±0.20a	1.32±0.11a	1.96±0.85a
	20	0.27±0.08a	4.39±0.76a	3.53±0.12a	1.25±0.26a	2.02±0.60a
	50	0.39±0.04b	3.90±0.39b	3.42±0.22a	1.15±0.19a	3.29±1.40b
	100	0.45±0.06b	3.86±0.46b	3.12±0.08a	1.24±0.18a	3.45±2.10b
绣线菊 <i>S. salicifolia</i>	CK	0.16±0.08a	4.63±0.35a	3.69±0.41a	1.28±0.24a	2.10±0.87a
	10	0.23±0.09a	4.80±0.45a	3.87±0.46a	1.27±0.27a	2.40±0.45a
	20	0.28±0.05a	3.96±0.08b	3.99±0.20a	1.00±0.27a	3.12±1.20b
	50	0.43±0.06b	3.78±0.16b	3.16±0.10b	1.20±0.09a	3.76±1.95bc
	100	0.50±0.07b	3.48±0.32b	2.67±0.20c	1.22±0.22a	4.20±1.12c
山茶 <i>C. japonica</i>	CK	0.19±0.03a	3.39±0.32a	4.49±0.56a	0.78±0.17a	1.42±0.30a
	10	0.21±0.05a	3.40±0.10a	5.02±0.34a	0.68±0.07a	2.10±0.83bc
	20	0.27±0.07a	3.87±0.50a	4.37±0.26a	0.90±0.17a	2.39±0.46b
	50	0.39±0.03b	2.98±0.23b	3.87±0.19b	0.77±0.10a	2.79±0.56c
	100	0.47±0.06c	2.67±0.10b	2.95±0.50c	0.74±0.19a	2.90±0.78c

表中数据均为平均值±标准差,同一列中的不同字母表示显著性差异($P<0.05$)

2.3.2 Cd 对 4 个树种 MDA 含量的影响

MDA(丙二醛)是反映细胞膜质过氧化水平的一个重要指标,它与核酸、蛋白质、氨基酸等物质交联后会形成干扰细胞生命活动的脂褐素。由图 3 可以看出,伴随着 Cd 浓度的不断增加,4 个树种幼苗中 MDA 的含量体现不断上升的趋势,与 Cd 浓度存在极显著的正相关。MDA 含量的增加表示细胞膜结构受损伤程度增加,植物的抗逆性相对减弱。在 Cd 浓度递增的同时,山矾、桑树、绣线菊和山茶 MDA 含量平均上升的百分比分别为 15%、10.17%、9.69%、12.86%。在 4 个不同的 Cd 处理浓度条件下,MDA 的上升幅度顺序为山矾>山茶>桑树>绣线菊。

3 讨论

植物对重金属的耐受能力是衡量植物是否具有重金属污染修复功能的重要先决条件^[14]。植物在受到 Cd 污染之后,首先反映在生长量的变化^[15],即根、茎、叶等正常生长发育都会受到影响^[16]。实验结果说明随着 Cd 处理浓度的不断增加,山矾、山茶根茎叶生物量均出现先上升后下降的趋势,桑树、绣线菊根茎叶生物量则先无明显变化后下降。在 Cd 浓度为 10—20 mg/kg 时,对山矾和山茶的生长有促进作用,可能是缘于对根生长的促进,在 Cd 浓度 20mg 时,生长达到顶峰;对桑树和绣线菊的生长则无明显影响。在 Cd 浓度为 50—100mg/kg 之间时,对 4 种植物的生长有显著的抑制作用。结果表明,4 种植物都能在镉胁迫下存活和生长,山矾和山茶对土壤镉污染有较强的生长适应性。

Cd 耐性指数反映植物 Cd 耐受能力强弱,耐性指数高的植物在 Cd 污染严重条件下依然能够繁殖和生长。菖蒲、鸡冠菜对 Cd 的平均耐性指数分别为 59、52.6^[17-18],对镉耐受性较低。含羞草、白雪姬以及树马齿苋 3 种观赏植物的平均耐性指数分别为 105.57、81.35、79.88,被认为对镉具有高忍耐力^[8],本研究中设置的 Cd 处理浓度与其他研究相近,经过 1a 正常土壤生长,180d 镉污染土壤生长,耐受时间相对较长。山矾、桑树、绣线菊和山茶 4 种植物的平均耐性指数分别为 93.99、82.33、82.10 和 87.25,说明对镉耐受性较高。在 Cd 浓度增加下,山矾和山茶的耐性指数均先上升后下降,Cd 浓度低于 20mg/Kg 时,两者的耐性指数均大于 100,这可能依赖于根部可以保证营养元素的均衡吸收,因此具有较高忍耐力^[11]。耐性大小顺序为山矾>山茶>桑树>绣线菊,说明山矾的 Cd 耐性最强。

同一植物不同部位积累重金属的能力不同^[14],不同物种的重金属积累的能力也不一致^[19,3]。4 个树种的幼苗根茎叶 Cd 含量在 4 个处理浓度下均表现为:根>叶>茎,表明 Cd 从根部转移到地上茎叶的能力较低。限制重金属从根部移动到地上茎叶部分是植物的耐受重金属胁迫的机制之一^[16]。4 个树种幼苗根茎叶的 Cd 含量都随 Cd 浓度增加而增加。BCF 和 TF 可以用来评价植物修复土壤重金属污染的能力^[10]。Cd 的转移系数(TF)变化范围为:0.35—0.75,顺序为:山矾>山茶>绣线菊>桑树,说明山矾、山茶的根部能积累较多的 Cd,并运输到地上部分,从而利用植物自身的解毒机制来减少 Cd 所带来的危害,这种耐 Cd 策略与植物体 Cd 诱导合

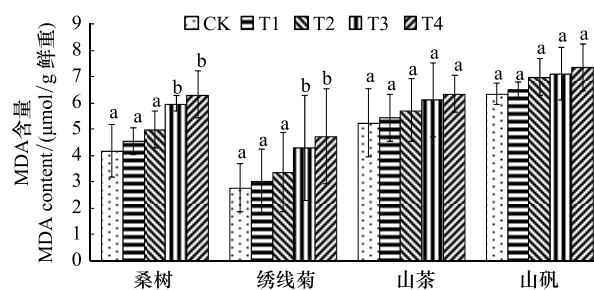


图 3 Cd 胁迫对 4 个树种丙二醛(MDA)含量的影响

Fig.3 Effects on the content of Malondialdehyde (MDA) in four landscape trees under Cd stress

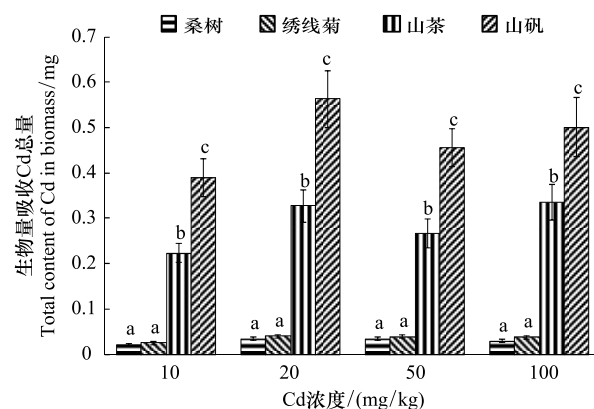


图 4 4 种植物生物量在 4 个 Cd 处理浓度下吸收 Cd 的总量

Fig.4 Total content of Cd in biomass in four landscape trees

成的植物螯合肽和金属硫蛋白有关^[20]。本实验中山矾的 Cd 富集系数(BCF)最大,地上 BCF 与根系的平均 BCF 值分别为 2.83、3.99,说明山矾的根部具有更高的 Cd 积累能力。植物各部位生物量吸收重金属的总量可以直接用来评价植物萃取土壤重金属的能力。图 4 表明了 4 种植物在 4 种 Cd 浓度下生长 180d 后吸收 Cd 的总量,山矾和山茶吸收的 Cd 总量显著高于绣线菊和桑树,每棵山矾植株在 Cd 浓度为 10、20、50、100mg/Kg 下分别吸收 0.39、0.56、0.45、0.50mg。由于 4 种植物植株各部位 Cd 含量随着处理浓度的增加而增加的同时生物量在下降,所以它们吸收 Cd 的总量不随 Cd 浓度的增加而增加。4 种植物吸收 Cd 总量的大小顺序为山矾>山茶>绣线菊>桑树。

植物的光合色素含量是反映植物光合作用强弱的主要指标,光合色素主要包括叶绿素 a、叶绿素 b 以及类胡萝卜素,光合作用的过程中叶绿素 b 收集光能,叶绿素 a 转化光能,而类胡萝卜素主要保护叶绿素分子免遭光氧化损伤^[21]。Cd 胁迫对含羞草、白雪姬、树马齿苋光合指标影响的研究表明,在 Cd 胁迫下三者的叶绿素含量均有下降趋势,受破坏的程度为含羞草<白雪姬<树马齿苋;叶绿素 a、b 比值以及类胡萝卜素百分比随着 Cd 浓度增加而升高,分析叶绿素含量下降的主要原因是胁迫抑制了叶绿体片层中捕光复合体的合成,同时叶绿素合成相关酶活性受到了抑制,阻碍了叶绿素合成^[8]。本实验中,在受到 Cd 胁迫时,山矾和山茶叶叶绿素 a、b 的含量先上升后下降,说明低 Cd 浓度可以使叶绿素含量增加,弥补光合作用中主要电子传递的成分,但浓度继续增加会破坏叶绿体的结构和功能,使叶绿素含量逐渐下降^[22];桑树、绣线菊、山茶的叶绿素 a 与叶绿素 b 比值随着 Cd 浓度增加持续升高,山矾先增加后下降,比值越高,光能利用效率越高,这种变化趋势表明适当的 Cd 条件下可以提高植物对光能的利用效率,提高光合作用的效果^[23]。而就类胡萝卜素含量变化而言,4 种植物基本未受 Cd 胁迫影响,未遭到光氧化的损伤。

细胞膜是植物细胞和外界进行物质交换的场所,它的稳定性是植物细胞完成正常生理功能的基础^[12],而 MDA 是反映细胞膜质过氧化水平的一个重要指标^[24],已有研究表明含羞草、白雪姬、树马齿苋 3 种植物的 MDA 含量随 Cd 浓度上升出现上升趋势,变化顺序为:含羞草<树马齿苋<白雪姬。本实验中随着 Cd 浓度的不断增加,4 个树种 MDA 含量均不断上升,MDA 的上升幅度顺序为桑树>绣线菊>山茶>山矾,就 MDA 含量指标来看,山矾的抗逆性较强,分析原因为 Cd 胁迫条件下,胁迫会导致活性氧代谢系统功能减弱,植物体内积累了大量的自由基和活性氧,最终造成膜质的过氧化和 MDA 含量的升高。

综上所述,在含 Cd 土壤中生长的 4 种植物均有不同程度的耐受能力,其中山矾受 Cd 的胁迫最小,耐受性最强,具有较高的 Cd 转移能力和累积能力,山茶次之,而后绣线菊,桑树最低;在 Cd 的富集和吸收方面,山矾的累积能力最强,山茶和绣线菊次之,山矾可能植物体内包含有较好的运输和解毒机制^[8]。本研究说明山矾对 Cd 具有最高的耐受力 and 最强的累积能力,因此在城市园林绿化以及 Cd 污染地区的生态建设中,山矾是一种具有巨大应用潜力和前景的园林植物,同时也可以利用它对 Cd 污染地区的土壤进行植物修复。

参考文献(References):

- [1] Pelfrène A, Waterlot C, Mazzuca M, Nisse C, Bidar G, Douay F. Assessing Cd, Pb, Zn human bioaccessibility in smelter-contaminated agricultural topsoils (northern France). *Environmental Geochemistry and Health*, 2011, 33(5): 477-493.
- [2] Šmuc N R, Dolenec T, Serafimovski T, Tasev G, Dolenec M, Vrhovnik P. Heavy metal characteristics in Kočani Field plant system (Republic of Macedonia). *Environmental Geochemistry and Health*, 2012, 34(4): 513-526.
- [3] Secu C V, Iauco O G, Buzgr N. Lead, Zinc and copper in the bioaccumulative horizon of soils from Iași and the surrounding areas. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2008, 3(2): 131-144.
- [4] Petrescu L, Bilal E. Environmental impact assessment of a uranium mine, east Catpathians, Romania metal distribution and partitioning of U and Th, Carpathian. *Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2007, 2(1): 39-50.
- [5] 曹玲,王庆成,崔东海. 土壤镉污染对四种阔叶树苗木叶绿素荧光特性和生长的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 769-772.
- [6] 荆红梅,郑海雷,赵中秋,张春光. 植物对镉胁迫响应的研究进展. *生态学报*, 2001, 21(12): 2125-2130.
- [7] 郭智,原海燕,奥岩松. 镉胁迫对龙葵幼苗光合特性和营养元素吸收的影响. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 824-829.
- [8] 燕傲蕾,吴亭亭,王友保,张旭情. 三种观赏植物对重金属镉的耐性与积累特性. *生态学报*, 2010, 30(9): 2491-2498.

- [9] 贾中民, 魏虹, 孙晓灿, 李昌晓, 孟翔飞, 谢小红. 秋华柳和枫杨幼苗对镉的积累和耐受性. 生态学报, 2011, 31(1): 107-114.
- [10] Yoon Y, Cao X D, Zhou Q X, Ma L Q. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Science of Total Environment, 2006, 368(2/3): 456-464.
- [11] Gupta A K, Sinha S. Phytoextraction capacity of the *Chenopodium album* L. growing on soil amended with tannery sludge. Bioresource Technology, 2007, 98(2): 442-446.
- [12] MacFarlane G R, Koller C E, Blomberg S P. Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies. Chemosphere, 2007, 69(9): 1454-1464.
- [13] Solan J J, Dowdy R H, Dolan M S, Linden D H. Long-term effects of biosolids applications on heavy metal bioavailability in agriculture soils. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(4): 966-974.
- [14] 杜天庆, 杨锦忠, 郝建平, 苗果园. Cd、Pb、Cr 三元胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响. 生态学报, 2009, 29(8): 4475-4482.
- [15] Shi X, Chen Y T, Wang S F, Zhang X L, Yuan Y. Growth and metal uptake of three woody species in lead/zinc and copper mine tailing. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(7): 1818-1826.
- [16] 吴桂容, 严重玲. 镉对桐花树幼苗生长及渗透调节的影响. 生态环境, 2006, 15(5): 1003-1008.
- [17] Pulford I D, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees-a review. Environment International, 2003, 29(4): 529-540.
- [18] 周守标, 王春景, 杨海军, 毕德, 李金花, 王影. 菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及其富集能力. 生态学报, 2007, 27(1): 281-287.
- [19] 徐素琴, 程旺大. 油菜、芥菜萌芽与幼苗生长的耐镉性差异. 浙江农业科学, 2005, (6): 436-438.
- [20] Alloway B J, Jackson A P, Morgan H. The accumulation of cadmium by vegetables grown on soils contaminated from a variety of sources. Science of Total Environment, 1990, 91: 223-236.
- [21] Hasan S A, Fariduddin Q, Ali B, Hayat S, Ahmad A. Cadmium: toxicity and tolerance in plants. Journal of Environmental Biology, 2009, 30(2): 165-174.
- [22] 柯世省, 张崇邦, 王江. 不同光强下镉胁迫对紫茉莉光合作用和抗氧化系统的影响. 环境科学学报, 2009, 29(6): 1302-1310.
- [23] 刘周莉, 何兴元, 陈玮. 镉胁迫对金银花生理生态特征的影响. 应用生态学报, 2009, 20(1): 40-44.
- [24] Wu F B, Zhang G P, Yu J S. Genotypic differences in effect of Cd on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of barley (*Hordeum vulgare* L.). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2003, 71(6): 1272-1281.