

网络出版时间:2017-12-27 09:55 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.03.009
网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20171227.0954.018.html>

柽柳和银水牛果对镉胁迫的生理响应与耐受积累特征

崔 振,李昌晓,李晓雪,贺燕燕

(西南大学 生命科学学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 北碚 400715)

[摘要] 【目的】研究镉胁迫对柽柳和银水牛果生长、叶片叶绿素含量、抗氧化酶活性的影响及 2 种植物对镉的耐受积累特征,为西部镉污染地区土壤修复提供理论依据。【方法】以柽柳和银水牛果两年生幼树为研究对象,通过向镉本底值为 0.31 mg/kg 的土壤添加外源镉($CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$)的方式设置了 CK(0 mg/kg)、T1(2 mg/kg)、T2(5 mg/kg)、T3 (10 mg/kg)4 个处理(镉添加量以纯镉计)。在试验进行至 90 d 时,测定不同镉胁迫处理下 2 种幼树功能叶叶绿素含量、株高、生物量、生理生化指标和镉含量。【结果】镉胁迫抑制了植物生长发育过程中叶绿素的合成,随镉添加量的增加,柽柳和银水牛果的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量均表现显著降低趋势,柽柳叶绿素 a/b 值显著降低,银水牛果叶绿素 a/b 值显著升高。柽柳和银水牛果的株高、生物量、耐性指数(T_i)均随土壤镉添加量的增加而下降。T1、T2、T3 处理柽柳的 T_i 分别为 67.14, 51.21, 35.21, 均大于银水牛果的 T_i (分别为 58.25, 45.48, 27.08)。镉胁迫显著增加了柽柳和银水牛果叶片的 MDA 含量,同时启动了 2 种植物体内的抗氧化酶系统,SOD、POD、CAT、APX 活性均在 T2 处理达到最大值。柽柳根部和茎部镉含量在 T3 处理达到最大值,分别为 5.03 和 4.76 mg/kg,而叶镉含量在 T2 处理达到最大值(9.64 mg/kg);银水牛果根部、茎部、叶部镉含量在 T3 处理达到最大值,分别为 2.58, 1.44, 0.50 mg/kg;银水牛果的转移系数为 0.75~0.81,柽柳的转移系数为 0.85~3.57。【结论】柽柳和银水牛果在土壤镉含量为 5.31 mg/kg 时具有较高的生长适应性和耐性,柽柳根部向地上部分转移镉的能力及地上部分积累镉的能力都远大于银水牛果,适用于镉污染区域的植物修复。

[关键词] 镉胁迫;柽柳;银水牛果;生理响应;镉积累特征

[中图分类号] Q149

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2018)03-0070-09

Physiological responses and tolerance accumulation characteristics of *Tamarix ramosissima* and *Shepherdia argentea* under cadmium stress

CUI Zhen, LI Changxiao, LI Xiaoxue, HE Yanyan

(Key Laboratory of Eco-Environments of the Three Gorges Reservoir Region of Ministry of Education,
College of Life Science, Southwest University, Beibei, Chongqing 400715, China)

Abstract:【Objective】This study investigated the response of *Tamarix ramosissima* and *Shepherdia argentea* seedlings to cadmium (Cd) to provide theoretical basis for repairing Cd pollution in western China.【Method】By adding exogenous Cd into soil with background value of 0.31 mg/kg, different Cd concentration treatments including CK (0 mg/kg), T1 (2 mg/kg), T2 (5 mg/kg), and T3 (10 mg/kg) were set up. The photosynthetic pigment contents, growth, biomass, physiological and biochemical indexes, and

〔收稿日期〕 2017-01-02

〔项目基金〕 国家国际科技合作专项(2015DFA90900);重庆市林业重点科技攻关项目(渝林科研 2016-8;2015-6);中央财政林业科技推广示范项目(渝林科推[2014-10]);重庆市研究生科研创新项目(CYB16066)。

〔作者简介〕 崔 振(1991—),男,山东枣庄人,硕士,主要从事环境生态学研究。E-mail:547889087@qq.com

〔通信作者〕 李昌晓(1970—),男,四川渠县人,教授,博士,博士生导师,主要从事植物生态学、土地退化与生态修复、生态系统健康评价研究。E-mail:Lichangx@swu.edu.cn

Cd concentrations in various parts of *T. ramosissima* and *S. argentea* seedlings were measured after 90 days. 【Result】 The contents of chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll in *T. ramosissima* and *S. argentea* decreased with the increase of Cd concentration, while chlorophyll a/b ratio of *T. ramosissima* decreased significantly, and chlorophyll a/b ratio of *S. argentea* increased significantly. The plant heights, biomass and tolerance indexes (Ti) of *T. ramosissima* and *S. argentea* decreased with increasing Cd content. The Ti values of *T. ramosissima* and *S. argentea* were 67.14, 51.21, 35.21 and 58.25, 45.48, 27.08 in three treatment groups, respectively. The synthesis of photosynthetic pigments during plant growth was inhibited by Cd stress. Malonaldehyde (MDA) contents of *T. ramosissima* and *S. argentea* significantly increased along with the increasing concentration of Cd and antioxidant enzyme activities of leaf of *T. ramosissima* and *S. argentea* presented same trends. Superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) activities raised first and then decreased with peak at T2. Cd contents in root and stem of *T. ramosissima* reached the peaks of 5.03 and 4.76 mg/kg at T3, and the highest Cd content in leaf was 9.64 mg/kg at T2. Cd contents in root, stem, and leaf of *S. argentea* reached the peaks of 2.58, 1.44, and 0.50 mg/kg at T3. The translocation factor (TF) were 0.85~3.57 for *T. ramosissima* and 0.75~0.81 for *S. argentea*. 【Conclusion】 *T. ramosissima* and *S. argentea* seedlings had high growth adaptation and tolerance under 5.31 mg/kg Cd stress, and the capacities of translocation and Cd accumulation in aboveground parts of *T. ramosissima* seedlings were higher than that of *S. argentea* seedlings. Thus, *T. ramosissima* had higher considerable potential for application to Cd contaminated areas in western China.

Key words: Cd stress; *Tamarix ramosissima*; *Shepherdia argentea*; physiological response; Cd accumulative characteristic

工业生产和农业活动带来的重金属污染问题已成为全球主要的环境问题之一^[1]。近年来,由于人类活动的影响,土壤中的部分重金属元素含量超标现象严重,并通过植物富集进入食物链,影响人类健康^[2]。镉(Cd)是一种毒性较强的重金属,易迁移、难降解。镉能够干扰植物营养元素的吸收和酶活性,导致植物体内活性氧(ROS)累积,引起氧化损伤^[3],进而抑制植物的光合作用和呼吸作用,限制植物生长发育,甚至导致死亡^[4]。

据统计,在过去的50年里,世界范围内进入土壤的镉总量为2.2万吨^[5]。目前,我国受镉等重金属污染的耕地面积近2 000万hm²,约占耕地面积的1/5^[6]。随着我国西部大开发战略的深入实施,西部地区的重金属污染问题,特别是镉的污染有可能变得更为严重,以银川市为例,其道路和工业区镉污染已达到了重度污染水平^[7-8],当地重金属镉污染土壤的修复问题急需得到高度重视和切实解决。

针对重金属污染土壤,植物修复技术因成本低、效率高,同时具有美观和长时间适用性等特点而备受关注^[9],而乔灌木树种具有庞大的根系和生物量,表现出很好的修复潜能和修复效率^[10],因此近年来其在重金属污染土壤修复中的作用日益凸显。柽柳(*Tamarix ramosissim*)具有抗干旱、耐盐碱、耐风蚀

和沙埋等特点,在西部地区得到广泛推广种植^[11]。银水牛果(*Shepherdia argentea*)于2002年从美国科罗拉多(Colorado)引进到中国西北地区,用于当地的植被重建与绿化,具有耐大风、耐贫瘠土壤、耐盐、耐寒等特点^[12-13]。而柽柳和银水牛果是否适合在镉污染土壤区栽植,并应用于宁夏银川及西部同类地区镉污染土壤的绿化与生态修复,还未见研究报道。因此,本研究以宁夏地区适生的本土物种柽柳和外来引进物种银水牛果为研究材料,探究其对不同质量浓度镉的生理生化响应机制和耐受积累特征,以探明2种树是否能有效用于宁夏乃至整个西部地区表层土壤镉污染区域的植物修复。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为银川市森森植物园提供的生长基本一致的柽柳和银水牛果2年生苗木。为模拟当地野生植物生长的土壤类型——沙壤土,使盆栽试验的植物生活在一个与当地环境类似的土壤生境条件下,将采自宁夏银川市森森植物园的土壤配制成含沙量为50%~60%的沙壤土。供试土壤初始镉含量为0.31 mg/kg。2015年5月,将沙壤土过4 mm筛,将CdCl₂·2.5H₂O以溶液形式均匀喷洒在沙壤

土中,混合均匀。参照《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995),设置对照(CK)、T1、T2 和 T3 等 4 个处理组,分别添加镉 0,2,5 和 10 mg/kg(镉添加以纯镉、风干土壤质量计)。土壤陈化 1 月后,装入高 30 cm×宽 30 cm 的塑料桶中(防止浇水时镉流失),每桶装土 7.5 kg。于 2015-06-10 选取生长一致的柽柳和银水牛果幼树随机移栽入盛有含镉土壤的塑料桶中,每处理 5 盆,每盆 1 株幼树,浇透水后置阴凉、通风处缓苗。植物驯化 1 月后于 2015-07-10 将所有盆栽试验苗置于银川市森森植物园种苗生物工程国家重点实验室实验基地大棚(棚顶透明,四周开敞)内培养,并进入试验期。整个试验期间进行常规田间管理,适时浇水。在试验进行 90 d 时进行各项指标的测定,并进行破坏性取样。

1.2 叶绿素含量的测定

取植物相同叶位健康成熟的功能叶(萌条顶端完全展开的叶片),充分研磨、浸提后,用普析 TU-1901 双光束紫外可见分光光度计于 645 和 663 nm 波长处测定吸光度,根据高俊凤^[14]的方法计算叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)及总叶绿素(Chls)含量。

1.3 生长指标和生物量的测定

使用直尺测量植株株高,收获植物全株,地上部分用超纯水彻底洗净;根部用超纯水洗净后,用 20 mmol/L EDTA-Na₂ 去除根表面吸附的镉离子,然后再迅速用超纯水冲洗干净,用直尺测量各根长度并求平均值。将植株在 105 ℃ 下杀青 30 min,80 ℃ 烘干,称量地上部和地下部干质量。计算耐性指数(*Ti*)^[15]:

$$Ti = (LR + LS + WR + WS) / 4 \times 100\%.$$

式中:*LR*、*LS*、*WR*、*WS* 分别为镉胁迫组平均总根长、株高增长量、根部平均生物量、地上部分平均生物量与对照组相应指标的比值。

1.4 生理生化指标的测定

取植株相同叶位的叶片,用于测定各项生理生化指标:超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)法^[16]测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法^[17]测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法^[16]测定;抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性采用紫外分光光度法测定^[17]。丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)氧化法^[16]测定。

1.5 植物镉含量的测定

使用球磨仪将植物粉碎,存放于聚乙烯管中备用。用万分之一分析天平精确量取植物各部分(根、

茎、叶)样品干粉各 0.050 g,用微波消解仪(Leeman SW-4, German)进行消解定容。采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES, ThermoFisher iCAP 6300, UK)测定消解液中重金属 Cd²⁺ 的含量。计算转移系数(Translocation factor, TF),以评价柽柳和银水牛果将镉转移到地上部分的能力^[18],其计算公式为:

$$TF = C_A / C_R$$

式中:*C_A*、*C_R* 分别为植物地上部分和根中的镉含量。

1.6 数据分析

利用统计分析软件 SPSS 22.0 和 Excel 2010 进行试验数据分析与处理。采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)分析不同质量浓度重金属镉胁迫对柽柳和银水牛果生长、生理与生物量的影响及对镉吸收积累的影响,并用 Duncan 检验法检验每个指标在不同处理组的差异显著性。采用 Origin 8.5 作图。

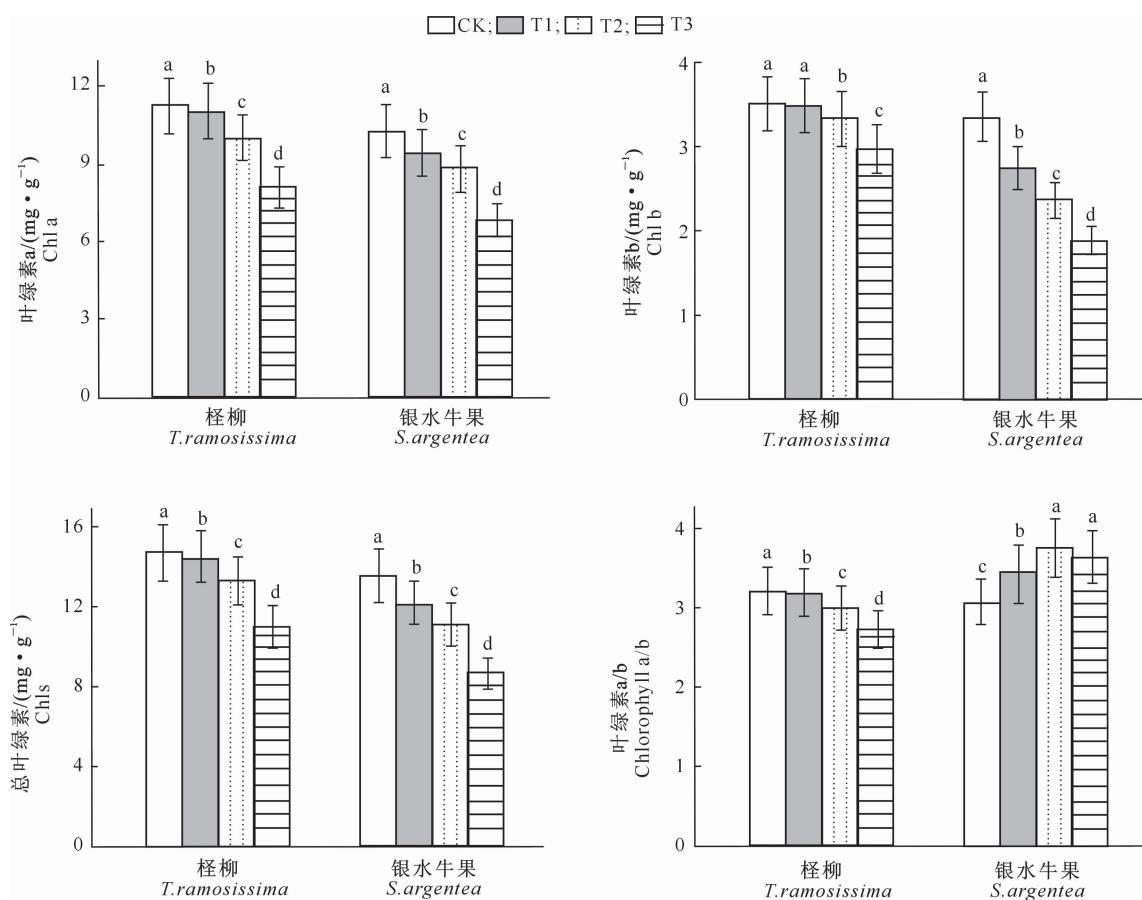
2 结果与分析

2.1 胁迫对 2 种植物叶绿素含量的影响

由图 1 可知,镉对植物叶片中的叶绿素合成有抑制作用,且除银水牛果的叶绿素 a/b 外,对其他指标的抑制程度随镉添加量的升高而加剧。随镉添加量的增大,柽柳和银水牛果 T1、T2 和 T3 处理的叶绿素 a 含量显著降低(*P*<0.05),分别为对照的 97%,89%,72% 和 91%,85%,66%。与之类似,柽柳叶绿素 b、总叶绿素含量和叶绿素 a/b 及银水牛果的总叶绿素、叶绿素 b 含量均随镉添加量的增加而呈现出显著降低趋势。银水牛果叶绿素 a/b 并未因镉添加量的增加而降低,反而呈现上升趋势,并在 T2 处理下达到最大值,为 CK 的 122%。

2.2 胁迫对 2 种植物生长和生物量的影响

如表 1 所示,不同镉胁迫处理对柽柳和银水牛果株高和生物量有显著影响。与 CK 相比,柽柳的株高、根系生物量、地上部生物量和总生物量均显著降低(*P*<0.05),均在 T3 处理降至最低值,分别降低了 48%,39%,53% 和 49%。随镉添加量的增加,银水牛果的株高、根系生物量、地上部生物量和总生物量表现出与柽柳相同的降低趋势(*P*<0.05),均在 T3 处理达到最低值,分别为 CK 的 55%,27%,33% 和 31%。柽柳和银水牛果的耐性指数 *Ti* 随镉添加量的增加而显著下降。T1、T2、T3 处理组柽柳和银水牛果苗木 *Ti* 分别降为对照的 67%,51%,35% 和 58%,45%,27%。



图柱上标不同小写字母表示同一物种同一指标不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

The different lowercase letters on the column indicate the significant difference ($P<0.05$) between different treatments of the same species and same index. The same below.

图 1 不同水平镉胁迫对桎柳和银水牛果叶片叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of different Cd concentrations on chlorophyll contents of *T. ramosissima* and *S. argentea*

表 1 不同水平镉胁迫对桎柳和银水牛果株高、生物量和耐性指数的影响

Table 1 Effects of different Cd concentrations on plant height, biomass and tolerance index of *T. ramosissima* and *S. argentea*

树种 Species	镉处理 Cd treatment	株高/cm Plant height	根系生物量/g Dry weight in root	地上部生物量/g Dry weight in shoot	总生物量/g Total biomass	耐性指数/% Tolerance Index
桎柳 <i>T. ramosissima</i>	CK	63.33±3.21 a	6.41±0.54 a	14.97±1.32 a	21.37±1.27 a	—
	T1	47.50±3.15 b	3.76±0.32 b	11.00±1.04 b	14.76±1.15 b	67.14±3.82 a
	T2	39.01±2.87 c	3.09±0.24 c	9.13±0.71 c	12.22±1.04 c	51.21±3.35 b
	T3	30.67±2.69 d	2.50±0.22 d	7.94±0.66 d	10.44±0.95 d	35.21±2.45 c
银水牛果 <i>S. argentea</i>	CK	68.65±4.26 a	7.95±0.46 a	12.54±0.93 a	20.49±1.34 a	—
	T1	57.00±4.79 b	3.37±0.30 b	7.54±0.64 b	10.90±0.81 b	58.25±3.54 a
	T2	47.17±3.87 c	2.78±0.26 c	6.12±0.57 c	8.91±0.66 c	45.48±3.05 b
	T3	38.00±3.16 d	2.18±0.18 d	4.11±0.41 d	6.29±0.48 d	27.08±2.24 c

注:同一树种同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different small letters indicate significant difference at $P<0.05$.

2.3 镉胁迫对桎柳和银水牛果叶片丙二醛含量的影响

由图 2 可知, 镉胁迫下桎柳和银水牛果叶片的 MDA 含量均显著增加, 且镉添加量越高, MDA 增

加趋势越明显。与桎柳相比, 镉胁迫处理银水牛果叶片 MAD 含量的增加幅度更高, 当镉添加量为 2, 5 和 10 mg/kg 时, 其 MDA 含量分别为桎柳的 1.34, 1.29 和 1.29 倍。

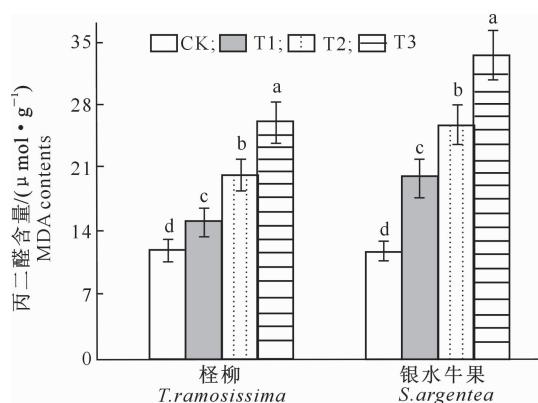


图 2 不同水平镉胁迫对柽柳和银水牛果叶片中丙二醛含量的影响

Fig. 2 Effects of different Cd concentrations on leaf MDA contents of *T. ramosissima* and *S. argentea* (mean±SE)

2.4 镉胁迫对 2 种植物叶片抗氧化酶活性的影响

由图 3 可知,总体而言,镉胁迫可以提高柽柳和银水牛果叶片的抗氧化酶活性,随镉添加量的增大,柽柳和银水牛果叶片的 SOD、POD、CAT、APX 活性均呈现先升高后降低的趋势($P<0.05$),均在 T2 处理达到最大值,分别为 CK 的 383%, 165%,

174%, 191% 和 341%, 177%, 148%, 254%。

2.5 柽柳和银水牛果各部分镉含量及转移系数

由图 4 可知,除柽柳叶部镉含量随着镉添加量的增加先上升后下降外,2 种供试植物根、茎和银水牛果叶部的镉积累量均随镉添加量的增加而升高,但升高幅度各不相同。对 3 个镉处理组而言,柽柳根部和茎部镉含量在 T3 处理达到最大值,分别为 5.03, 4.76 mg/kg, 而叶镉含量在 T2 处理达到最大值(9.64 mg/kg), 均显著高于其余处理($P<0.05$)。银水牛果根部、茎部、叶部镉含量均在 T3 处理达到最大值,分别为 2.58, 1.44, 0.50 mg/kg, 均显著高于其他处理组($P<0.05$)。

由图 4 可知,柽柳和银水牛果的转移系数均随镉添加量的增大呈先上升后下降趋势,柽柳 T1、T2、T3 处理的转移系数均显著大于 CK 组($P<0.05$);银水牛果 T1、T2 处理组的转移系数显著高于 CK 组,而 T3 组与 CK 无显著性差异($P>0.05$)。银水牛果的转移系数为 0.75~0.81;柽柳的转移系数为 0.85~3.57, 是银水牛果的 1.13~4.01 倍。

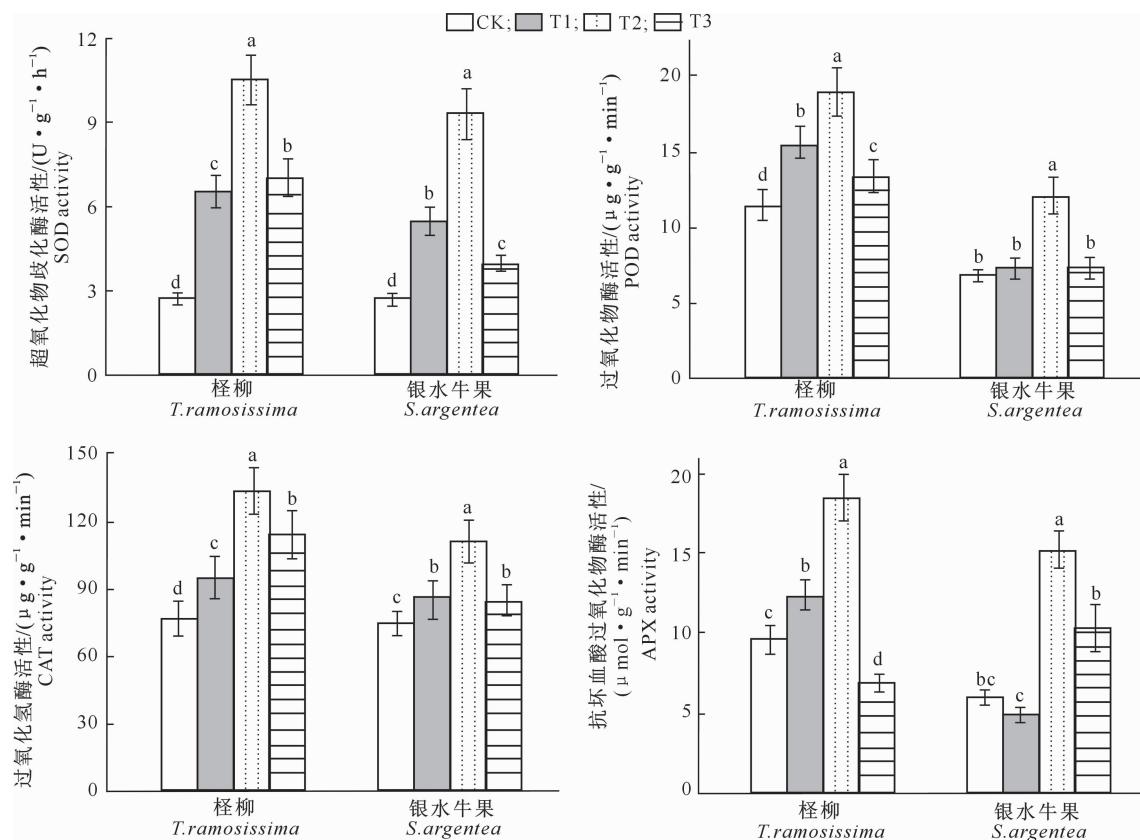


图 3 不同水平镉胁迫对柽柳和银水牛果叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effects of different Cd concentrations on leaf antioxidant enzyme activities of *T. ramosissima* and *S. argentea*

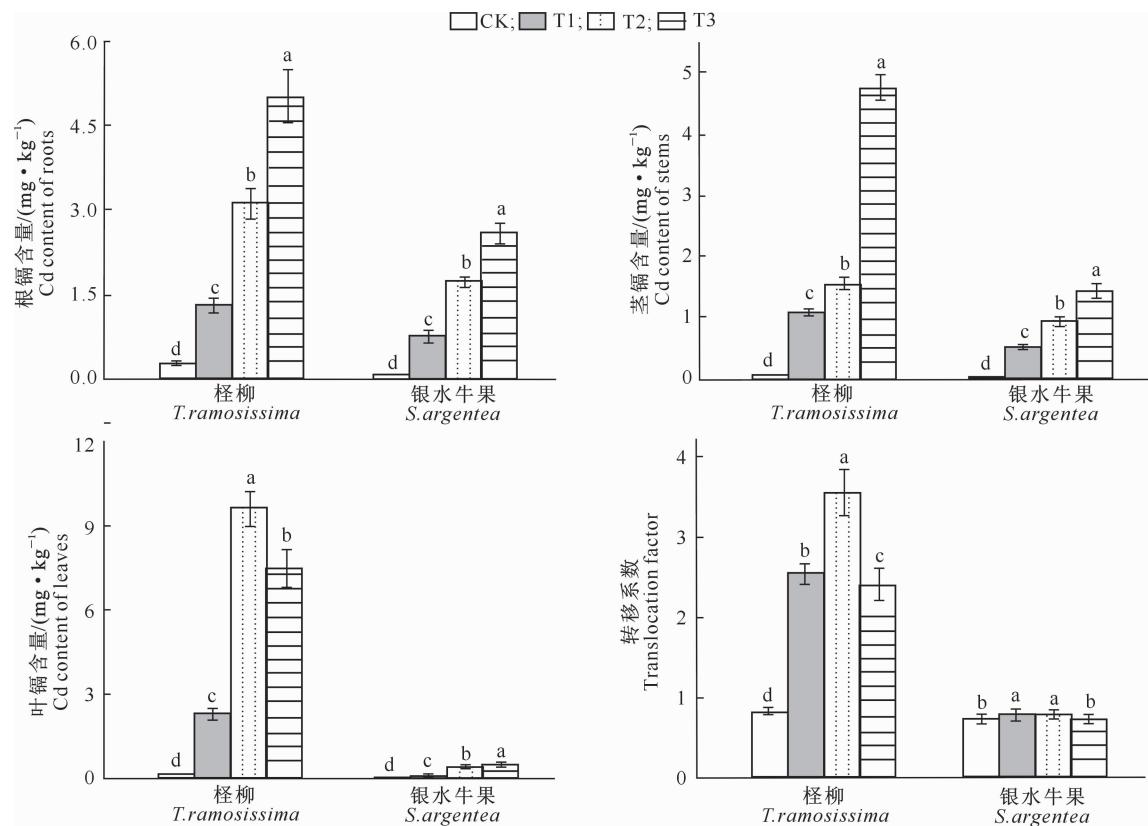


图4 不同水平镉胁迫柽柳和银水牛果根、茎、叶的镉含量及转移系数

Fig. 4 Cd contents in roots, stem and leaf and translocation factors of *T. ramosissima* and *S. argentea* under different Cd concentrations

3 讨论

生长在重金属镉环境中的植物,其叶绿素的生物合成会受到影响^[19],而作为光合作用的主要色素,叶绿素含量的减少会影响植物的光合作用,导致植物光合产物积累减少,最终导致植物的生物量降低^[20]。本研究中,柽柳和银水牛果植株叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量均随镉添加量的增加而显著下降($P<0.05$),这与万雪琴等^[21]对杨树(*Populus deltoides*)和朱宇林等^[22]对银杏(*Ginkgo biloba*)的研究结果一致。镉胁迫会减少色素合成酶含量,影响植物对Fe、Mg等元素的吸收^[23-24],导致叶绿素合成减少。各镉胁迫处理组柽柳叶绿素a/b值随镉添加量的增加而显著降低,且T2、T3处理小于3,这可保证柽柳有充足的聚光色素参与光能合成作用,使叶绿素a与b的比例更加合理,使得柽柳朝着最优化的光合作用方向发展^[25],是柽柳在逆境胁迫下的一种适应机制。而银水牛果叶绿素a/b值随镉添加量的增大而先上升后下降,3个镉胁迫处理的比值均显著高于对照,表明镉胁迫使银水牛果植物体内的叶绿素b更容易被抑制,镉胁迫降低叶绿素b

对光能的吸收和传递作用,维持捕光色素复合体Ⅱ(LHCⅡ)稳定性的功能遭到破坏^[26]。

许多研究表明,重金属镉能对植物产生很强的毒害作用^[27],导致一系列胁迫症状产生,如干扰矿质元素吸收和碳水化合物代谢^[28],影响根系形态^[29],降低植物的光合作用,导致植物叶片衰老、生物量下降甚至死亡^[30-31]。本研究发现,随镉添加量的增加,柽柳和银水牛果株高和生物量积累均受到抑制,这与对生长在镉介质中的其他植物的研究结果^[32-33]一致。

基于植物生长和生物量指标的耐性指数 T_i 可反映植物对重金属耐性的大小。有研究者将植物耐性分为敏感型($T_i < 35$)、中等程度耐受性($35 < T_i < 60$)和高耐受性($T_i > 60$)3种类型^[34],已有报道利用耐性指数界定垂柳和旱柳等植物具有相对较高的镉耐受性^[35]。本研究发现,柽柳和银水牛果的耐性指数 T_i 随土壤镉含量的升高而降低。柽柳在T1处理的 T_i 为67.14,具有较高的镉耐受性,T2、T3处理的 T_i 分别为51.21和35.21,具有中等程度的镉耐受性;银水牛果在T1、T2处理的 T_i 分别为58.25和45.48,具有中等程度的耐受性,在T3

处理的 T_i 为 27.08, 为镉耐性敏感型。3 个镉胁迫组中柽柳的 T_i 均大于银水牛果, 说明柽柳的镉耐受性大于银水牛果。

植物在遭受逆境胁迫时, 体内会产生大量的活性氧^[36], 这些活性氧与脂膜的不饱和脂肪酸发生脂质过氧化反应, 产生 MDA, MDA 的产生还能加剧膜的损伤, 因此可通过 MDA 了解膜脂过氧化的程度, 以间接测定膜系统受损程度^[37-38]。本研究发现, 镉胁迫显著增加了柽柳和银水牛果叶片中的 MDA 含量, 镉的添加量增大时, 柽柳和银水牛果叶片中的活性氧(ROS)大量产生, 膜系统损伤加剧。在相同镉添加量处理下银水牛果体内 MDA 含量大于柽柳, 表明在相同条件下, 镉对银水牛果的毒害作用更大。当植物体内 ROS 因胁迫作用大量产生时, 植物体内的 SOD、POD、CAT、APX 将参与活性氧的代谢, 其中 SOD 催化分解超氧阴离子自由基, 使之转化为过氧化氢(H_2O_2); 而 POD、CAT、APX 则被认为是清除植物 H_2O_2 的酶, 其活性变化在一定程度上反映了植物体内活性氧的代谢情况^[39]。本试验表明, 随镉添加量的增大, 柽柳体内的 SOD、POD、CAT、APX 活性均呈现先升后降的趋势, 均在 T2 处理达到最大值, 当镉添加量超过 5 mg/kg 时 4 种酶活性下降, 表明柽柳在镉添加量为 5 mg/kg 时, 体内抗氧化酶系统响应最为积极, 以清除体内产生的过多活性氧, 但当镉添加量增加到 10 mg/kg 时, 其体内活性氧的增加超过了正常的歧化能力, 对组织和细胞多种功能膜及酶系统造成破坏, 从而使 SOD、POD、CAT、APX 活性下降^[40]。银水牛果体内的 POD、APX 活性在 T1、T3 处理组与 CK 组无显著性差异, SOD、CAT 活性在 T1、T3 组显著高于 CK 组, 可见在 T1、T3 处理组银水牛果主要通过 SOD、CAT 来清除 H_2O_2 。当镉添加量达到 5 mg/kg 时, 银水牛果体内 SOD、POD、CAT、APX 活性表现出与柽柳相同的变化趋势, 并在 T2 处理达到最大值, 表明在 T2 处理条件下, 其具有较好的抗氧化酶反应体系, 抵抗镉胁迫的能力较强。

植物能否成功用于土壤重金属污染的植物修复主要取决于该植物的生物量、金属积累能力和金属在植物体内的积累位置^[41]。柽柳和银水牛果随土壤镉添加量的增加, 根和地上部分生物量下降而镉含量上升, 说明其体内高的镉积累能力和高生物量不可能同时出现, 高的镉积累能力会对植物体产生损伤, 导致潜在的生物量下降^[42]。柽柳根部镉的最大积累量为 5.03 mg/kg, 地上部分的转移系数为

0.85~3.57, 可见柽柳向地上部分转移镉的能力较强, 这可能与柽柳体内的金属硫蛋白基因(MT2)的表达有关, 该基因编码的 MT 蛋白能够与 Cd^{2+} 结合, 降低体内的镉含量, 提高植物抗重金属的能力^[43]。同时, 柽柳体内的真核翻译起始因子 1A (*eIF1A*) 基因能够参与柽柳对镉胁迫的应答。通过对转柽柳 *eIF1A* 基因的 T2 代烟草进行 $CdCl_2$ 胁迫, 发现转 *eIF1A* 基因烟草各株系的 SOD、POD 活性显著提高^[44]。由此可见, 镉胁迫时柽柳体内积极的抗氧化酶系统响应可能与 *eIF1A* 基因的表达有关, 该基因增强了植物抗氧化能力, 从而提高了植株对金属镉的抗性水平。就银水牛果而言, 其各部分镉含量表现为根>茎>叶, 镉的转移系数为 0.75~0.81, 吸收的镉主要集中于根部, 这可能是植物为减少重金属对自身其他部位损伤而采取的防御措施。而根部作为接触重金属的第一道屏障, 对重金属有很强的阻碍作用^[45], 根细胞壁由木质素、纤维素组成, 尤其是其中的低聚果糖能够结合二价和三价的重金属离子, 将重金属离子结合至细胞壁, 减少对重金属的吸收^[46]。此外, 植物根部吸收的镉进入根毛区表皮细胞后, 通过质外体途径向根内运输, 即通过细胞壁和细胞间隙等以横向流形式穿过皮层而在内皮层组织中积累。而紧密排列的内皮层细胞壁上栓质化的凯氏带结构阻断了质外体通路, 限制重金属离子的进一步运输^[47]。由此可见, 银水牛果将吸收的镉固定于根部, 以减少镉向地上部分转移而产生危害。

4 结 论

柽柳具有较好的地下部分镉积累能力及地上部分镉转移能力, 在土壤镉含量为 5.31 mg/kg 时耐受能力较强, 在宁夏地区乃至整个西部土壤表层镉污染严重地区有较强的推广应用潜力。银水牛果虽然在土壤镉含量为 5.31 mg/kg 时也具有较高的镉耐受能力, 但其根部向地上部分转移镉的能力较差, 相较于柽柳而言其应用潜力大大降低。

[参考文献]

- [1] Nouairi I, Ben A W, Ben Y N, et al. Comparative study of cadmium effects on membrane lipid composition of *Brassica juncea* and *Brassica napus* leaves [J]. Plant Science, 2006, 170(3): 511-519.
- [2] Sato A, Takeda H, Oyanagi W, et al. Reduction of cadmium uptake in spinach (*Spinacia oleracea* L.) by soil amendment with animal waste compost [J]. Journal of Hazardous Materials,

- 2010,181(3):298-304.
- [3] Hegedus A, Erdei S, Janda T, et al. Transgenic tobacco plants overproducing alfalfa aldose/aldehyde reductase show higher tolerance to low temperature and cadmium stress [J]. Plant Science, 2004, 166(5):1329-1333.
- [4] Chien H F, Kao C H. Accumulation of ammonium in rice leaves in response to excess cadmium [J]. Plant Science, 2000, 156(1):111-115.
- [5] 胡蝶,陈文清.土壤重金属污染现状及植物修复研究进展[J].安徽农业科学,2011,39(5):2706-2707.
Hu D, Chen W Q. Research progress on the heavy metal pollution status and phytoremediation [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(5):2706-2707.
- [6] 徐良将,张明礼,杨浩.土壤重金属镉污染的生物修复技术研究进展 [J].南京师范大学报(自然科学版),2011,34(1):102-106.
Xu L J, Zhang M L, Yang H. Research progress of bioremediation technology of cadmium polluted soil [J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2011, 34(1):102-106.
- [7] 樊新刚,米文宝,马振宁,等.宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征 [J].环境科学,2013,34(5):1887-1894.
Fan X G, Mi W B, Ma Z Y, et al. Spatial and temporal characteristics of heavy metal concentration of surface soil in Hebin industrial park in Shizuishan northwest China [J]. Environmental Science, 2013, 34(5):1887-1894.
- [8] 王美娥,彭驰,陈卫平.宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 [J].环境科学,2016,37(9):3532-3539.
Wang M E, Peng C, Chen W P. Impacts of industrial zone in arid area in Ningxia province on the accumulation of heavy metals in agricultural soils [J]. Environmental Science, 2016, 37(9):3532-3539.
- [9] Ahemad M. Remediation of metalliferous soils through the heavy metal resistant plant growth promoting bacteria: paradigms and prospects [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2014, 158:1-13.
- [10] Capuana M. Heavy metals and woody plants-biotechnologies for phytoremediation [J]. Iforest Biogeosciences & Forestry, 2011, 4(1):7-15.
- [11] 张喜焕,杨太新,辛贺明.不同柽柳种光合特性比较 [J].西北农业学报,2010,19(12):113-117.
Zhang X H, Yang T X, Xin H M. Comparision on photosynthesis character of different *Tamarix* L. species [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(12):113-117.
- [12] 陈静,秦景,贺康宁,等.水分胁迫对银水牛果生长及光合气体交换参数的影响 [J].西北植物学报,2009,29(8):1649-1655.
Chen J, Qin J, He K N, et al. Influences of water-stress on *Shepherdia argentea* seedlings growth and photosynthetic gas-exchange parameters [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 29(8):1649-1655.
- [13] 张雪,贺康宁,史常青,等.盐胁迫对银水牛果幼苗生长和生
理特性的影响 [J].水土保持学报,2016,30(1):212-217.
Zhang X, He K N, Shi C Q, et al. Effects of salt stress on growth and physiological characteristics of *Shepherdia argentea* seedlings [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1):212-217.
- [14] 高俊凤.植物生理学实验指导 [M].北京:高等教育出版社,2006:214-215.
Gao J F. Plant physiology experiment instruction [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:214-215.
- [15] Wilkins D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth [J]. New Phytologist, 1978, 80(3):623-633.
- [16] 李合生,孙群,赵世杰,等.植物生理生化实验原理和技术 [M].北京:高等教育出版社,2000:164-165, 167-169, 184-185, 258-261.
Li H S, Sun Q, Zhao S J, et al. Principle and technology of plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164-165, 167-169, 184-185, 258-261.
- [17] Elavarthi S, Martin B. Spectrophotometric assays for antioxidant enzymes in plants [J]. Methods in Molecular Biology, 2010, 639:273-281.
- [18] Zucchini M, Pietrini F. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2009, 197(1):23-34.
- [19] El-Shintawy F. Glutathione counteracts the inhibitory effect induced by cadmium on photosynthetic process in soybean [J]. Photosynthetica, 1999, 36(1):171-179.
- [20] Gupta B, Pathak G C, Pandey N. Induction of oxidative stress and antioxidant responses in *Vigna mungo* by zinc stress [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2011, 58(1): 85-91.
- [21] 万雪琴,张帆,夏新莉,等.镉处理对杨树光合作用及叶绿素荧光参数的影响 [J].林业科学,2008,44(6):73-78.
Wan X Q, Zhang F, Xia X L, et al. Effects of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of solution-cultured poplar plants [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(6):73-78.
- [22] 朱宇林,曹福亮,汪贵斌,等.Cd、Pb胁迫对银杏光合特性的影响 [J].西北林学院学报,2006,21(1):47-50.
Zhu Y L, Cao F L, Wang G B, et al. Effects of Cd single and combined stress on chlorophyll content and photosynthetic characteristics of *Ginkgo* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(1):47-50.
- [23] Qian H, Li J, Sun L, et al. Combined effect of copper and cadmium on *Chlorella vulgaris* growth and photosynthesis-related gene transcription [J]. Aquatic Toxicology, 2009, 94(1):56-61.
- [24] Polle A, Schützendübel A. Heavy metal signalling in plants: linking cellular and organismic responses [M]. Springer Berlin Heidelberg: Plant Responses to Abiotic Stress, 2004:187-215.
- [25] 李昌晓,钟章成.三峡库区消落带土壤水分变化条件下池杉幼

- 苗光合生理响应的模拟研究 [J]. 水生生物学报, 2005, 29(6): 712-716.
- Li C X, Zhong Z C. Simulative study on photosynthetic physio-response of *Taxodium ascendens* seedlings to soil water change in the hydro-fluctuation belt of three gorges reservoir area [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2005, 29(6): 712-716.
- [26] 郭春爱, 刘 芳, 许晓明, 等. 叶绿素 b 缺失与植物的光合作用 [J]. 植物生理学报, 2006, 42(5): 967-973.
- Guo C A, Liu F, Xu X M, et al. Chlorophyll-b deficient and photosynthesis in plants [J]. Plant Physiology Communications, 2006, 42(5): 967-973.
- [27] Prasad M N V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants [J]. Environmental & Experimental Botany, 1995, 35(4): 525-545.
- [28] Azevedo H, Pinto C G G, Fernandes J, et al. Cadmium effects on sunflower growth and photosynthesis [J]. Journal of Plant Nutrition, 2005, 28(12): 2211-2220.
- [29] Daud M K, Sun Y Q, Zhu S J. Cadmium-induced functional and ultrastructural alterations in roots of two transgenic cotton cultivars [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 161(S1): 463-473.
- [30] Liu J, Li K, Xu J, et al. Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes [J]. Field Crops Research, 2003, 83(3): 271-281.
- [31] Benavides M P, Gallego S M, Tomaro M L. Cadmium toxicity in plants [J]. Brazilian Journal of Plant Physiology, 2005, 17(1): 21-34.
- [32] 温 瑣, 穆立蔷. 土壤铅、镉胁迫对 4 种绿化植物生长、生理及积累特性的影响 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 234-239.
- Wen Y, Mu L Q. Effects of soil Pb, Cd stress on the growth, physiological and accumulating characteristics of four ornamental trees [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 234-239.
- [33] Nada E, Ferjani B A, Ali R. Cadmium-induced growth inhibition and alteration of biochemical parameters in almond seedlings grown in solution culture [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2007, 29(1): 57-62.
- [34] Lux A, Sottniková A, Opatrná J, et al. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity [J]. Physiologia Plantarum, 2004, 120(4): 537-545.
- [35] 贾中民, 王 力, 魏 虹, 等. 垂柳和旱柳对镉的积累及生长光合响应比较分析 [J]. 林业科学, 2013, 49(11): 51-59.
- Jia Z M, Wang L, Wei H, et al. Comparative analysis of *Salix babylonica* and *Salix matsudana* for their cadmium accumulation, growth and photosynthesis in response to cadmium contamination [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(11): 51-59.
- [36] Zhang H, Jiang Y, He Z, et al. Cadmium accumulation and oxidative burst in garlic (*Allium sativum*) [J]. Journal of Plant Physiology, 2005, 162(9): 977-984.
- [37] Chen Y X, He Y F, Luo Y M, et al. Physiological mechanism of plant roots exposed to cadmium [J]. Chemosphere, 2003, 50(6): 789-793.
- [38] Demiral T, Türkan İ. Comparative lipid peroxidation, antioxidant defense systems and proline content in roots of two rice cultivars differing in salt tolerance [J]. Environmental & Experimental Botany, 2005, 53(3): 247-257.
- [39] Pyngrope S, Bhoomika K, Dubey R S. Oxidative stress, protein carbonylation, proteolysis and antioxidative defense system as a model for depicting water deficit tolerance in indica rice seedlings [J]. Plant Growth Regulation, 2013, 69(2): 149-165.
- [40] Sciebba F, Arduini I, Ercoli L, et al. Cadmium effects on growth and antioxidant enzymes activities in *Miscanthus sinensis* [J]. Biologia Plantarum, 2006, 50(4): 688-692.
- [41] Riddell-Black D. Heavy metal uptake by fast growing willow species // Aronsson P, Perttu K. Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system [J]. Swedish University of Agricultural Sciences, 1994; 145-151.
- [42] 贾中民, 魏 虹, 孙晓灿, 等. 秋华柳和枫杨幼苗对镉的积累和耐受性 [J]. 生态学报, 2011, 31(1): 107-114.
- Jia Z M, Wei H, Sun X C, et al. Accumulation and tolerance of *Salix variegata* and *Pterocarya stenoptera* seedlings to cadmium [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1): 107-114.
- [43] 张 艳, 杨传平, 王玉成. 桤柳金属硫蛋白基因(MT2)的过量表达对烟草耐 Cd²⁺性的促进效应 [J]. 植物生理学报, 2007, 43(4): 693-696.
- Zhang Y, Yang C P, Wang Y C. Stimulation effect of over expression of the metallothionein gene (MT2) from *Tamarix androssowii* on the Cd²⁺ tolerance in tobacco [J]. Plant Physiology Communications, 2007, 43(4): 693-696.
- [44] 姚启超, 高彩球, 姜 静, 等. 桤柳 *eIF1A* 基因耐重金属 CdCl₂ 胁迫能力分析 [J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(2): 4-5.
- Yao Q C, Gao C Q, Jiang J, et al. Tolerance of *eIF1A* gene from *Tamarix androssowii* under CdCl₂ stress [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(2): 4-5.
- [45] Baxter I, Hosmani P S, Rus A, et al. Root suberin forms an extracellular barrier that affects water relations and mineral nutrition in *Arabidopsis* [J]. Plos Genetics, 2009, 5(5): 188-192.
- [46] Krzesłowska M. The cell wall in plant cell response to trace metals: polysaccharide remodeling and its role in defense strategy [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2011, 33(1): 35-51.
- [47] 张玉秀, 于 飞, 张媛雅, 等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1317-1321.
- Zhang Y X, Yu F, Zhang Y Y, et al. Uptake, translocation and accumulation of cadmium in plant [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(5): 1317-1321.