

镉污染环境下中华蚊母树的镉积累与生长及叶绿素荧光动力学响应

甘 龙^{1,2,3}, 罗玉红^{1,2,3}, 戴泽龙^{2,3}, 王林泉^{1,2,3}, 黄应平^{1,2,3}^① [1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002]

摘要: 以三峡库区优势物种中华蚊母树(*Distylium chinense*)为试验对象,在其生长土壤中添加不同 $w(\text{Cd}^{2+})$ (0、2、5、15、30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),研究植物镉积累、生长高度及叶绿素荧光参数对不同含量镉胁迫的响应。结果表明,中、高含量镉胁迫对植物的生长高度及叶绿素总量具有显著抑制作用;叶绿素荧光参数对植物的耐受性可以进行生理学解释,镉胁迫下植物光反应中心 PS II 受到可逆性损伤,叶绿素荧光参数 F_v/F_m 与 R_{ET} 值随胁迫时间先降低后逐渐恢复;添加 $w(\text{Cd}^{2+})$ 为 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,根、茎、叶的镉富集系数最大,分别为7.4、8.1和8.2;茎、叶的转移系数最大,分别为1.01和0.94;中华蚊母树具有很强的富集性和转移能力,可以作为镉污染土壤植物修复技术的潜能物种。

关键词: 中华蚊母树; 镉污染; 荧光参数; 叶绿素; 富集; 转移

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2017)07-0665-08

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2017.07.012

Responses of *Distylium chinense* to Cd Stress in Cd Accumulation, Growth and Chlorophyll Fluorescence Dynamics. GAN Long^{1,2,3}, LUO Yu-hong^{1,2,3}, DAI Ze-long^{2,3}, WANG Lin-quan^{1,2,3}, HUANG Ying-ping^{1,2,3} (1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area Hubei Province, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: *Distylium chinense* (growth similar), a dominant species in the Three Gorges Reservoir area, is selected as object for the study to investigate responses of the tree to Cd stress [$w(\text{Cd}^{2+})$, 0, 2, 5, 15 and 30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] in Cd accumulation, growth and chlorophyll fluorescence parameters. Results show that Cd stress, moderate and high in concentration, inhibited significantly growth in height and total chlorophyll content of the plant under stress. Chlorophyll fluorescence parameters of the plant can be used to explain Cd tolerance of the plant physiologically. Cd stress damaged the plant's photoreactive center PS II, though reversibly. Chlorophyll fluorescence parameters (F_v/F_m and R_{ET}) declined first and gradually came back with the stress going on. Under the Cd stress of $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd enrichment coefficient of the plant reached up to 7.4, 8.1 and 8.2 in roots, stems and leaves, respectively, and Cd transfer coefficient up to 1.01 and 0.94 in stem and leaves, respectively. Obviously *Distylium chinense* possesses a high Cd accumulation and transfer capacity. According to the pollution status of the Three Gorges Reservoir area, *Distylium chinense* can be used as a potential species for phytoremediation of Cd contaminated soils.

Key words: *Distylium chinense*; Cd pollution; fluorescence parameter; chlorophyll; enrichment; transfer

三峡库区段的多目标地球化学调查结果表明,镉在三峡库区存在区域性轻度污染($0.2 \sim 0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)及点状中度($0.6 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)以上污染;而长江水系沉积物中镉含量为 $0.15 \sim 2.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,存在连续的中至重度污染,其中重度以上($>1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)污染占36%,镉已经成为三峡库区表层土壤中污染最严重的重金属元素^[1]。由于土壤中的镉污染易被植物富集,对环境以及人体健康造成严重影

响^[2-4]。万雪琴等^[5]研究证明镉胁迫会影响植物的呼吸与光合作用等,从而改变植物的生长趋势。植物叶片所吸收的光能有3个走向:光合驱动、热能、

收稿日期: 2016-07-07

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103-005)

① 通信作者 E-mail: hbyin@niglas.ac.cn

叶绿素荧光;3者之间相互竞争,因此通过测量叶绿素荧光,即可获得光化学过程与热耗散效率的变化信息^[6]。近年来,重金属镉对植物的胁迫影响研究在提高土壤质量、改善生态环境方面做出了重要贡献^[7-8]。

中华蚊母树(*Distylium chinense*)为金缕梅科(Hamamelidaceae)蚊母树属(*Distylium*)常绿灌木,主要分布于乌江流域及长江三峡库区湖北区域(宜昌、巴东、秭归、长阳)和重庆区域(巫山、黔江、酉阳、丰都、武隆、江津)长江三峡两岸海拔200 m以下干流消落带中上部,平均高0.8~1.2 m^[9-10]。中华蚊母树根系发达、盘根错节且具有极强的喜湿耐涝和抗洪水冲击的特性,是三峡库区消落带防沙固土的理想树种^[11-12];可以在改善土壤质量、固土防沙、改善生态环境的同时又具有经济价值^[13]。目前关于它的研究较为鲜见,仅刘泽彬等^[14]研究了不同淹水时间下中华蚊母树光响应特征。

研究不同含量镉胁迫对中华蚊母树的生理特性及荧光参数的影响,探讨其对镉的耐受能力及对重金属镉的富集和转移作用,并通过光合参数对中华蚊母树耐受镉污染的特性进行生理学解释,为重金属污染土壤的植物修复技术提供重要参数,并为库区重金属污染土壤的修复提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 实验设计

实验土壤取自三峡大学植物园,晒干磨细检测土壤中的理化性质: w (有机质)为 $279 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, w (TP)为 $445 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, w (TN)为 $316 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, w (Cd)为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, w (Pb)为 $35.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH值为7.21。选取三峡大学植物园中同一地点长势大致相同的中华蚊母树幼苗并测定初始高度。用四水硝酸镉配制 w (Cd^{2+})为0(CK)、2(T_1)、5(T_2)、15(T_3)、30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (T_4)5个梯度的处理组^[15-16],每个花盆装土4 kg,每个梯度平行设置3盆,先配好高浓度母土,再风干磨细与实验土搅拌均匀^[17]。2015年9月初,每个花盆中栽种3株幼苗,实验过程保持土壤水分正常。分别在移栽前、第1月末、第2月末共3次测定各处理植株叶片荧光参数,在第3月末测定植株不同组织所富集镉含量。

1.2 实验测定

使用米尺测量植株主干生长的绝对高度,第1月末选取植株中上部长势良好的叶片,用叶绿素仪(SPAD-502 Plus)对叶绿素含量进行测定,平行测定10次。每月月末采用便携式光合仪(LI-

6400XT)测量相同叶位下的荧光参数:初始荧光(F_0)、光下最小荧光值(F_0')、最大荧光(F_m)、光下最大荧光(F_m')以及稳态荧光(F_s),光合有效辐射(R_{PA})平行测定10次;计算得出PSII的光化学效率(F_v/F_m)、潜在荧光(F_v/F_0)、光下最大和最小荧光差($F_v' = F_m' - F_0'$)、光化学淬灭系数 $[q_p = (F_m' - F_s)/F_v']$ 、非光化学淬灭系数 $[q_n = (F_m - F_m')/(F_m - F_0)]$ 、电子传递速率 $[R_{ET} = (F_m' - F_s)/F_m' \times R_{PA} \times 0.5 \times 0.84]$ 和电子传递的实际量子产量 $[\phi_{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m']$ 等荧光参数。使用原子吸收分光光度计测定植株根、茎、叶的镉含量,平行测定3次并计算富集系数(F_{BC})和转移系数(F_T):富集系数(F_{BC})=植株中各部位重金属含量/土壤中重金属含量;转运系数(F_T)=地上部各部位重金属含量/根部重金属含量。

1.3 数据分析

采用Office 2010软件对数据进行整理,采用SPSS 20.0软件对实验数据进行单因素方差分析,采用Origin 8软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 镉对中华蚊母树生理指标的影响

经过3个月的镉胁迫,各组间植株生长的绝对高度差异显著($P=0.024<0.05$),低含量植株的生长高度明显优于中高含量处理组, T_1 组高度为1.1 cm, T_4 组为 T_1 组的49%(图1);说明高含量镉对植物胁迫作用明显,低含量有促进植物生长的作用。

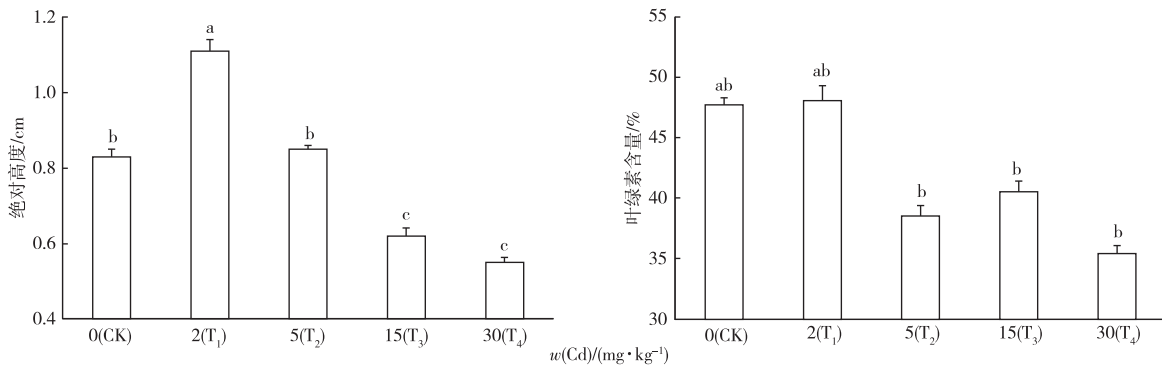
叶绿素是植物进行光合作用的重要组成部分,在对光能的吸收、传递、转化过程中起重要作用,叶绿素的变化也常常作为植物受外部胁迫影响的评价指标。中华蚊母树叶片叶绿素含量在各组间变化显著($P=0.013<0.05$), T_2 、 T_3 、 T_4 组叶绿素含量分别为CK组的80.7%、84.9%、74.2%,总体来看,叶绿素含量随着镉含量的升高而下降(图1)。这说明在低含量镉胁迫下植物能够正常生长,中、高含量镉对植株有明显的抑制作用。

2.2 镉对中华蚊母树叶片 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的影响

初始荧光(F_0)又称基底荧光或暗荧光,指经过充分暗适应的光合机构光系统II(PSII)反应中心全部开放时的叶绿素(Chl)荧光发射强度。移栽前各处理组 F_0 值与CK组差别不大($P=0.548>0.05$),移栽前植株生长状态相似,各处理组荧光参数与CK组都大致相同。由图2可知,第1个月时随镉含量的增加胁迫作用明显, F_0 值显著上升($P=$

0.014 < 0.05), T_2 、 T_3 、 T_4 组 F_o 值分别是 CK 组的 1.09、1.18、1.21 倍;这说明在镉胁迫作用下光反应

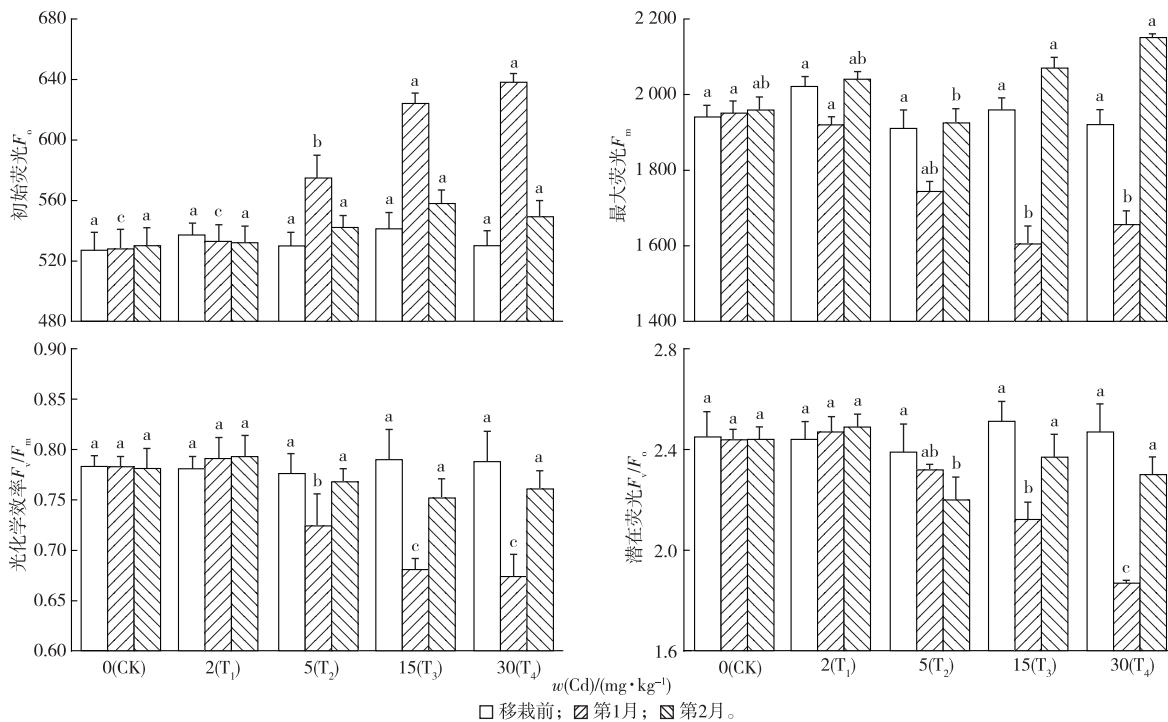
中心(PS II)受到损伤。第 2 个月时各组 F_o 值逐渐恢复正常水平,但均高于 CK 组。



直方柱上方英文小写字母不同表示各处理间某指标差异显著($P < 0.05$)。

图 1 镉胁迫对中华蚊母树叶片叶绿素含量及生长高度的影响

Fig. 1 Responses of *Distylium chinense* to Cd stress on total chlorophyll and growth height



□ 移栽前; ▨ 第1月; ▩ 第2月。

直方柱上方英文小写字母不同表示各处理间某指标差异显著($P < 0.05$)。

图 2 镉胁迫对中华蚊母树 F_o 、 F_m 、 F_v/F_m 和 F_v/F_o 的影响

Fig. 2 Responses of *Distylium chinense* to Cd stress on F_o , F_m , F_v/F_m and F_v/F_o .

最大荧光(F_m)指经过充分暗适应的 PS II 反应中心完全关闭时的 Chl 荧光发射强度。随着光化学效率的变化,热耗散(非光化学效率)效率也发生了改变,这种变化也可以通过 F_m 值的变化来体现。第 1 个月末 F_m 值随镉含量的增长而显著降低($P = 0.021 < 0.05$), T_2 、 T_3 、 T_4 组 F_m 值分别是 CK 组的 89.7%、82.9%和 83.6%; T_2 、 T_3 、 T_4 组 F_m 值随胁迫时间先降低再升高,各组 F_m 值逐渐恢复到移栽前

水平,各组间差异不显著($P = 0.236 > 0.05$)。

光化学效率(F_v/F_m)反映了反应中心最大光能捕获效率,代表植物叶片的生理状况,一般植物的数值为 0.75~0.85。由图 2 看出, F_v/F_m 值在胁迫的第 1 月各组间发生显著变化($P = 0.015 < 0.05$), F_v/F_m 值随镉含量的增加而显著降低, T_3 和 T_4 组 F_v/F_m 最低值分别是 CK 组的 85.9%和 84.6%;在胁迫的第 2 个月 F_v/F_m 值恢复到正常水平,各组之

间变化不显著($P=0.341>0.05$),但 T_3 和 T_4 组 F_v/F_m 值小于 CK 组;这说明光反应 PS II 之前因受到镉胁迫而减少的反应中心比例,在经过胁迫适应性调节后,光合电子链的传递速率在慢慢恢复,使植物能够进行正常的暗反应。

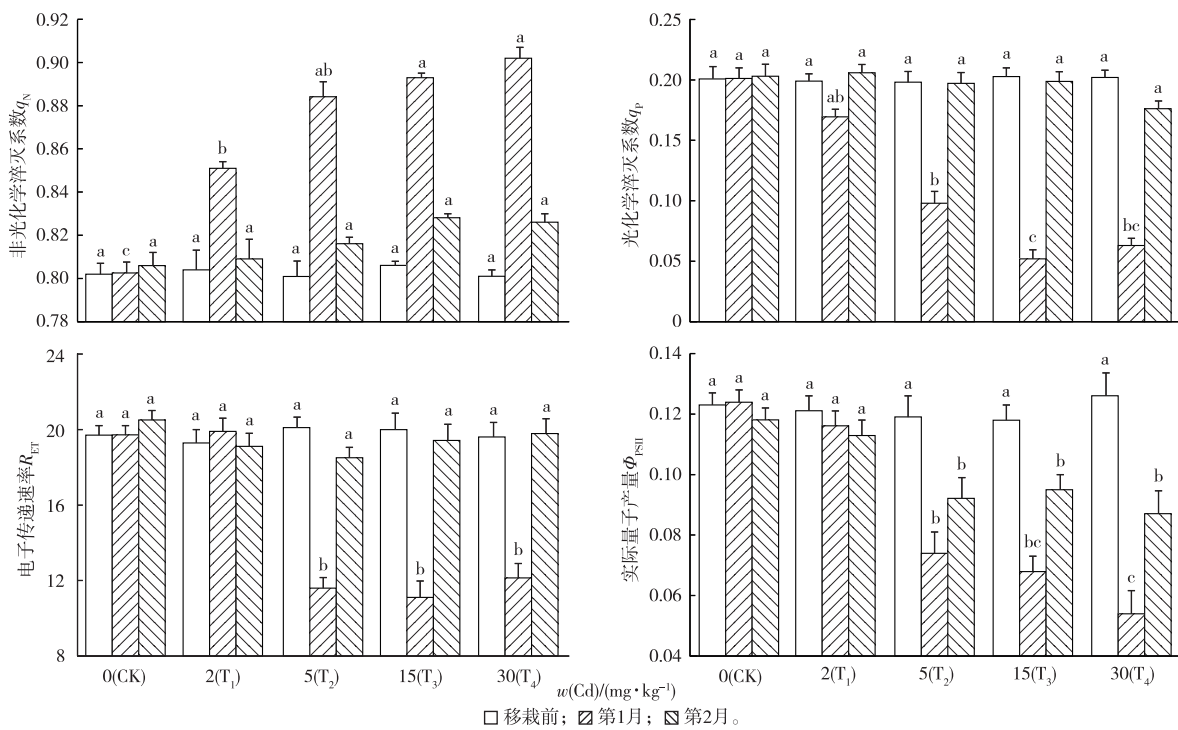
潜在荧光(F_v/F_0)是反映光反应 PS II 在反应中心的潜在活性, F_v/F_0 值与 F_v/F_m 值变化趋势相类似。第 1 月的 F_v/F_0 值随含量上升而下降,变化趋势显著($P=0.017<0.05$), T_4 组 F_v/F_0 最低,为 CK 组的 75.9%;第 2 月各处理组潜在荧光恢复正常水平,说明经胁迫适应性调节后,中华蚊母树光反应 PS II 的活性逐渐提高。

2.3 镉对中华蚊母树叶片 q_N 、 q_P 、 R_{ET} 和 ϕ_{PSII} 的影响

非光化学淬灭系数(q_N)代表光反应中心的光合机构损伤程度,反映光反应中心 PS II 对天线色素吸收多余光能后把光能以热能形式耗散的部分。如图 3 所示,移栽前各组数值差异不大($P=0.631>$

0.05),第 1 个月时各组间 q_N 值变化显著($P=0.013<0.05$),且随镉含量的增加而显著升高, T_3 和 T_4 组 q_N 值分别是 CK 组的 1.12 和 1.13 倍;第 2 个月时,各处理组 q_N 值恢复到正常水平,各组间变化不显著($P=0.368>0.05$);这说明前期中华蚊母树受胁迫时吸收的光能大多以热能形式散失,植株经适应性调节之后,光合作用恢复正常。

光化学淬灭系数(q_P)指光反应 PS II 天线色素吸收光能用于光合作用电子传递的比例,其值表示光反应中心 PSII 开放程度的大小。由图 3 所示,第 1 个月时随镉含量的增加 q_P 值显著降低($P=0.009<0.05$), T_2 、 T_3 和 T_4 组 q_P 值分别是 CK 组的 48.9%、25.8%和 31.6%。 q_P 与 q_N 变化过程相反;第 2 个月末各组间数值趋于平稳($P=0.437>0.05$),光合作用电子传递的比例恢复到正常水平;这说明中华蚊母树吸收的光能用于光化学反应部分的比例,与光合机构的损伤程度、热能的消散情况有关。



直方柱上方英文小写字母不同表示各处理间某指标差异显著($P<0.05$)。

图 3 镉胁迫对中华蚊母树 q_N 、 q_P 、 R_{ET} 和 ϕ_{PSII} 的影响

Fig. 3 Responses of *Distylium chinense* to Cd stress on q_N , q_P , R_{ET} and ϕ_{PSII}

电子传递速率(R_{ET})反映了光反应 PS II 在光适应条件下真实电子传递的情况。电子传递的实际量子产量(ϕ_{PSII})反映 PS II 相关的叶绿素吸收的光用于光化学过程的比例,它可用于衡量线性电子传

递的速率(整个光合的指示)。 R_{ET} 和 ϕ_{PSII} 的变化趋势相似,在镉胁迫的第 1 个月 ϕ_{PSII} 值随镉含量增加而显著降低, T_2 、 T_3 和 T_4 组 R_{ET} 分别是 CK 组的 58.9%、55.8%、62.6%; ϕ_{PSII} 值分别是 CK 组的

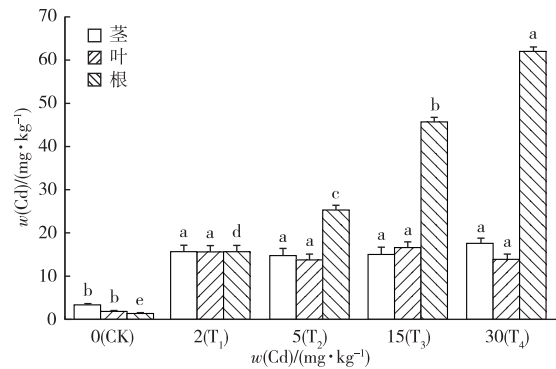
60.2%、55.3%和43.9%; R_{ET} 、 ϕ_{PSII} 与 q_N 变化过程相反。同一含量下,随胁迫时间的进行, R_{ET} 值逐渐恢复到正常水平,中、高含量处理组 ϕ_{PSII} 值低于CK组(图3)。这说明植株的电子传递速率 R_{ET} 在受胁迫后可以逐渐恢复其功能,但由于 ϕ_{PSII} 受到高含量镉的影响,叶绿素吸收的光用于光化学过程的比例要低于正常水平。

2.4 中华蚊母树各组织镉含量以及富集系数(F_{BC})和转移系数(F_T)

中华蚊母树在镉胁迫3个月之后,各组织中镉含量如图4所示,各处理组茎、叶、根镉含量与CK组相比均达到显著水平($P<0.05$), T_1 组茎、叶镉含量已达 $15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,随着镉含量的增加,茎、叶中镉吸附量大致相同;根的吸附量和镉含量呈正相关关系, T_4 组根的吸附量达 $63.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

图5表明,中华蚊母树茎、叶、根的 F_{BC} 随着镉含量增加而显著降低($P<0.05$), T_1 组茎、叶、根 F_{BC} 值均最大(7.4、8.1和8.2),茎、叶的 F_{BC} 差别不大,根的 F_{BC} 明显大于茎、叶; T_1 组茎、叶的 F_T 接近1。在

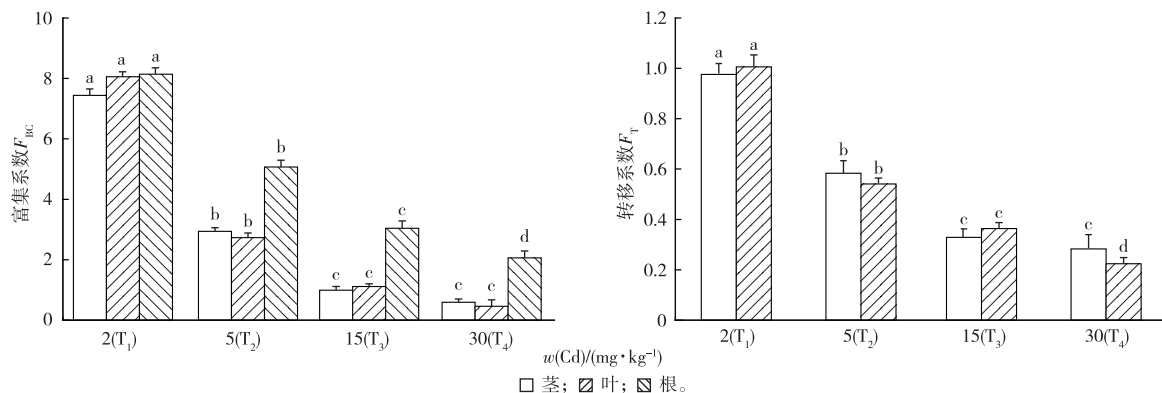
中、低含量时中华蚊母树各部位 F_{BC} 值均大于1,说明中华蚊母树具有很强的从土壤中吸附镉的能力; F_T 接近1,说明在低含量时中华蚊母树吸收镉能力的效率最高;茎、叶、根的镉含量大致相同,即植株具有很强的从地下部向地上部转移镉能力。



直方柱上方英文小写字母不同表示各处理间镉含量差异显著($P<0.05$)。

图4 中华蚊母树各部位的镉含量

Fig. 4 Cd contents in different parts of *Distylium chinense*



直方柱上方英文小写字母不同表示各处理间某指标差异显著($P<0.05$)。

图5 中华蚊母树各部位对镉的富集与转移

Fig. 5 Cd enrichment and transfer in different parts of *Distylium chinense*

3 讨论

目前,像镉一类的重金属在土壤中的危害日益加重,工农业生产在土壤中所产生的重金属污染主要以结合态形式存在^[18]。在人工栽培以及控制实验的条件下,通过对中华蚊母树的生理特性研究,能够反映出重金属污染对植物生长趋势的影响。植物外观生长状况是观察重金属对植物影响的最显著特征。中华蚊母树生长的绝对高度在不同含量间差异明显,相对于CK组低含量镉有促进作用,而中、高含量镉处理组表现出明显的抑制作用,说

明不同含量镉对植物生长状态有着很大影响^[19]。

光合作用是植物的生命之源,植株受到胁迫之后,叶绿素总量直接影响植物光合作用的效率,实验测得叶绿素总量随镉含量升高而降低,可以看出中、高含量镉对中华蚊母树有胁迫作用^[20]。在胁迫的逆境中叶绿体吸收光能所消耗的3种途径(光合电子传递、叶绿素荧光及热散失)的比例会发生变化,荧光参数是光合作用的内在指针,能够对植物的耐受性进行生理学解释^[21-22];植物受重金属胁迫的逆境情况可以通过叶绿素荧光诱导动力学参数来表现,在正常生长条件下植物的各个荧光动力学

参数比较稳定,不会出现大的波动^[23]。光合作用中受到胁迫的光合机构与光反应中心 PS II 联系紧密,且 F_o 值与光反应中心 PS II 有关,随着胁迫的进行, F_o 值增加可能反映出植物的光反应中心 PS II 受到不可逆的破坏或可逆性损伤;图 1 中的 F_o 值随胁迫时间先上升后显著下降;说明镉胁迫使植物叶片光反应中心 PS II 受到可逆性损伤^[24]。 F_v/F_m 代表着光反应中心 PS II 捕获激发能的效率即光化学效率, T_2 、 T_3 、 T_4 组 F_v/F_m 值从第 1 月末的最低值逐渐上升的变化过程,说明随着实验的进行,前期的镉胁迫影响了反应中心捕获光能的效率,后期经过适应性调节,中华蚊母树在一定程度上恢复了其功能^[25]。 F_v/F_o 与 F_v/F_m 的变化相似,说明潜在荧光在镉胁迫过程中也受到显著影响,反映出光合活性也受到镉胁迫的影响^[26]。

叶绿素荧光淬灭分为光化学淬灭系数(q_p)和非光化学淬灭系数(q_n) 2 种,都是叶绿体耗散能量的途径, R_{ET} 代表着胁迫作用下的电子传递速率, ϕ_{PSII} 反映 PS II 相关的叶绿素吸收的光用于光化学过程的比例^[27]。在镉胁迫的第 1 月, q_n 随镉含量增加显著增大, q_p 、 R_{ET} 和 ϕ_{PSII} 的变化规律则与 q_n 相反;说明中华蚊母树受到镉胁迫时的光合活性和电子传递效率随着镉含量的增加而降低,叶片吸收的大多数光能通过热耗散形式散失,这与贾中民等^[28]研究的三峡库区岸生植物秋华柳(*Salix variegata*)对镉胁迫的光合响应得出的叶片在受到胁迫时的光合活性和电子传递效率受到影响,吸收的光能多以热耗散形式散失这个结论相符;第 2 月 q_n 、 q_p 、 R_{ET} 及 ϕ_{PSII} 都逐渐恢复到正常值;说明植株通过自适应调节后,光合活性和电子传递效率恢复正常^[26]。

植物对重金属的耐性指在重金属污染土壤中能正常生长的植物,还能适应一些极端环境;通过对中华蚊母树各组织镉含量的测定以及实验过程中植物的长势,能够表明中华蚊母树对镉污染土壤表现出很强的修复性^[29]。富集系数反映植物对重金属的累积能力,其值越大,说明在某一含量下植物对重金属的累积能力越强;转移系数指植物从根部向地上部运输重金属的能力,也能反映出重金属在植物各组织的分布情况,系数越大,说明向地上部转移重金属的能力就越强^[30-31]。在不同含量镉污染下中华蚊母树各组织富集系数均大于 1, T_1 组富集系数最大;低含量镉处理组茎、叶的转移系数接近于 1,随镉含量的增加转移系数降低,周启星等^[32]认为只有当富集系数与转移系数均大于 1 时才是超富集植物,说明在治理镉污染时,中华蚊母

树与魏树和等^[33]研究的超积累植物龙葵(*Solanum nigrum*),与邹春萍等^[34]研究的超富集植物白花鬼针草(*Bidens pilosa*)都属于超富集植物;但与其他超富集植物相比,中华蚊母树生物量大,根系发达,具有固定和转移重金属的优势;在植物的修复效率上与土壤的污染程度有关,低污染区修复效率高,针对目前三峡库区的污染情况,中华蚊母树具有很高的修复效率,加强此方面的研究有助于筛选出高修复率植物^[29]。

综上所述,从植株生长高度和叶绿素总量来判断植株对不同镉含量的适应性;通过测定 F_o 、 F_v/F_m 和 R_{ET} 等荧光参数来对植物耐受性进行生理学上的解释。从中华蚊母树各器官吸附含量以及富集系数和转移系数可以看出,中华蚊母树具有很强的富集与转移性,这为库区镉污染土壤的修复提供依据,且中华蚊母树根系发达,生命力强,对固土防沙、保持库区坝坡稳定起到很好的作用,所以中华蚊母树可以作为重金属污染土壤植物修复技术的潜能物种。

参考文献:

- [1] 唐将. 三峡库区镉等重金属元素迁移富集及转化规律[D]. 成都: 成都理工大学, 2005. [TANG Jiang. Study on the Regularity of Move, Enrichment, and Translation of Cadmium and Other Heavy Metals in the District of the Three Gorges Reservoir[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.]
- [2] 王国庆, 邓绍坡, 冯艳红, 等. 国内外重金属土壤环境标准值比较: 镉[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(6): 808-821. [WANG Guo-qing, DENG Shao-po, FENG Yan-hong, et al. Comparative Study on Soil Environmental Standards for Heavy Metals in China and Other Countries: Cadmium[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(6): 808-821.]
- [3] LI Z, MA Z, VAN DER KUIJP T J, et al. A Review of Soil Heavy Metal Pollution From Mines in China: Pollution and Health Risk Assessment[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468/469: 843-853.
- [4] 黄科文, 廖明安, 林立金. 2 种生态型三叶鬼针草的不同株数混种比例对其镉累积的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5): 753-759. [HUANG Ke-wen, LIAO Ming-an, LIN Li-jin. Effects of Interplantation Ratio of Two Ecotypes of *Bidens pilosa* on Cadmium Accumulation[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(5): 753-759.]
- [5] 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]. 林业学报, 2008, 44(6): 73-78. [WAN Xue-qin, ZHANG Fan, XIA Xin-li, 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.]
- [6] 马守臣, 马守田, 邵云, 等. 矿井废水灌溉对小麦生理特性及重

- 金属积累的影响[J].应用生态学报,2013,24(11):3243-3248.[MA Shou-chen,MA Shou-tian,SHAO Yun,*et al.* Effects of Irrigation with Mine Wastewater on Physiological Characters and Heavy Metals Accumulation of Winter Wheat[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2013,24(11):3243-3248.]
- [7] 石元值,阮建云,马立峰.茶树中镉、砷元素的吸收累积特性[J].生态与农村环境学报,2006,22(3):70-75.[SHI Yuan-zhi,RUAN Jian-yun,MA Li-feng.Absorption and Accumulation of As and Cd in Tea[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2006,22(3):70-75.]
- [8] 努扎艾提·艾比布,刘云国,曾光明,等.香根草对镉毒害的生理耐性和积累特性[J].环境科学学报,2009,29(9):1959-1963.[NU Z A T·A B B,LIU Yun-guo,ZENG Guang-ming,*et al.* Cadmium Tolerance and Accumulation Characteristics of *Vetiveria zizanioides* [J].Acta Scientiae Circumstantiae,2009,29(9):1959-1963.]
- [9] LI X L,LI N,YANG J,*et al.* Morphological and Photosynthetic Responses of Riparian Plant *Distylium chinense* Seedlings to Simulated Autumn and Winter Flooding in Three Gorges Reservoir Region of the Yangtze River, China [J].Acta Ecologica Sinica,2011,31:31-39.
- [10] 刘济明.贵州茂兰喀斯特森林中华蚊母树群落种子库及其萌发特征[J].生态学报,2001,21(2):197-203.[LIU Ji-ming.The Seed Bank and It's Germinative Characters of the *Distylium chinensis* Community in Guizhou, Maolan Karst Forest[J].Acta Ecologica Sinica,2001,21(2):197-203.]
- [11] 刘泽彬,程瑞梅,肖文发,等.遮荫对中华蚊母树苗期生长及光合特性的影响[J].林业科学,2015,51(2):129-136.[LIU Ze-bin,CHENG Rui-mei,XIAO Wen-fa,*et al.* Effects of Shading on Growth and Photosynthetic Characteristics of *Distylium chinense* Seedlings [J].Scientia Silvae Sinicae,2015,51(2):129-136.]
- [12] 杨丽,张云贵,邓洪平.中华蚊母树形态多样性研究[J].南方农业,2010(1):63-65.[YANG Li,ZHANG Yun-gui,DENG Hong-ping.Study on the Morphological Diversity of *Distylium chinense* [J].South China Agriculture,2010(1):63-65.]
- [13] 谢春花,李晓玲,栾春艳,等.湖北河岸带植物中华蚊母树遗传多样性的SRAP分析[J].植物研究,2012,32(3):311-319.[XIE Chun-Hua,LI Xiao-ling,LUAN Chun-yan,*et al.* SRAP Analysis of Genetic Diversity of Riparian Plant *Distylium chinense* in Hubei Province[J].Bulletin of Botanical Research,2012,32(3):311-319.]
- [14] 刘泽彬,程瑞梅,肖文发,等.中华蚊母树幼苗对秋冬季淹水的生长及生理响应[J].湖泊科学,2016,28(2):405-413.[LIU Ze-bin,CHENG Rui-mei,XIAO Wen-fa,*et al.* Growth and Physiological Responses of *Distylium chinense* Seedlings to Autumn and Winter Flooding[J].Journal of Lake Sciences,2016,28(2):405-413.]
- [15] 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):0107-0114.[JIA Zhong-min,WEI Hong,SUN Xiao-can,*et al.* Accumulation and Tolerance of *Salix variegata* and *Pterocarya stenoptera* Seedlings to Cadmium [J].Acta Ecologica Sinica,2011,31(1):0107-0114.]
- [16] 吴福忠,杨万勤,张健,等.镉胁迫对桂花生长和养分积累、分配与利用的影响[J].植物生态学报,2010,34(10):1220-1226.[WU Fu-zhong,YANG Wan-qin,ZHANG Jian,*et al.* Effects of Cadmium Stress on Growth and Nutrient Accumulation, Distribution and Utilization in *Osmanthus fragrans* var. *thunbergii* [J].Chinese Journal of Plant Ecology,2010,34(10):1220-1226.]
- [16] 刘泽彬,程瑞梅,肖文发,等.不同淹水时间下中华蚊母树光响应特征及其模型比较[J].应用生态学报,2015,26(4):1083-1090.[LIU Ze-bin,CHENG Rui-mei,XIAO Wen-fa,*et al.* Light Response Characteristics of Photosynthesis and Model Comparison of *Distylium chinense* Indifferent Flooding Durations [J].Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(4):1083-1090.]
- [17] 易自成,贺俊波,程华,等.镉对皇竹草构件生长及生理特性的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(2):276-282.[YI Zi-cheng,HE Jun-bo,CHENG Hua,*et al.* Effects of Cd Polluted Soil on the Modular Growth and Physiological Characteristics of *Pennisetum hybridum* [J].Journal of Agro-Environment Science,2014,33(2):276-282.]
- [18] 杜瑞英,聂呈荣,林初夏,等.镉污染土壤对潜在能源植物生长的影响[J].生态环境,2006,15(4):735-738.[DU Rui-ying,NEI Cheng-rong,LIN Chu-xia,*et al.* Effects of Soil Cadmium on the Growth of Two Potential Energy Plants [J].Ecology and Environment,2006,15(4):735-738.]
- [19] 贾中民,冯汉茹,魏虹.镉对枫杨幼苗生长和光合特性的影响[J].西南大学学报,2014,36(8):27-35.[JIA Zhong-min,FENG Han-ru,WEI Hong.Effects of Effect of Cadmium on Growth and Photosynthetic Characteristics of *Pterocarya stenoptera* Seedlings [J].Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2014,36(8):27-35.]
- [20] 姚春娟,郭圣茂,陈兰兰,等.二种决明属植物叶绿素荧光特性的比较研究[J].北方园艺,2016,(02):151-153.[YAO Chun-juan,GUO Sheng-mao,CHEN Lan-lan,*et al.* Research on The Rule of Absorbing Fertilizer of *Dictamnus dasycarpus* [J].Northern Horticulture,2016,(02):151-153.]
- [21] 林世青,许春辉,张其德,等.叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的应用[J].植物学通报,1992,9(1):1-16.[LIN Shi-qing,XU Chun-hui,ZHANG Qi-dei,*et al.* Some Application of Chlorophyll Fluorescence Kinetics to Plant Stress Physiology Toecology and Agricultural Modernization [J].Chinese Bulletin of Botany,1992,9(1):1-16.]
- [22] 梁英,刁永芳,陈书秀,等.温度对小新月菱形藻叶绿素荧光特性及生长的影响[J].水产科学,2011,30(8):435-440.[LIANG Ying,DIU Yong-fang,CHEN Shu-xiu,*et al.* Effects of Temperature on Chlorophyll Fluorescence Parameters and Growth in Alga *Nitzschia closterium fminutissima* [J].Fisheries Science,2011,30(8):435-440.]
- [23] ROHACECK K.Chlorophyll Fluorescence Parameters: The Definitions, Photosynthetic Meaning and Mutual Relationships [J].Photosynthetica,2002,40(1):13-29.
- [24] 钱永强,周晓星,韩蕾,等.Cd²⁺胁迫对银芽柳PS II叶绿素荧光光响应曲线的影响[J].生态学报,2011,31(20):6134-6142.[QIAN Yong-qiang,ZHOU Xiao-xing,HAN Lei,*et al.* Rapid Light-Response Curves of PS II Chlorophyll Fluorescence Parameters in Leaves of *Salix leucopithecia* Subjected to Admium-Ion Stress [J].Acta Ecologica Sinica,2100,31(20):6134-6142.]

- [25] 贾中民,程华,魏虹,等.三峡库区岸生植物秋华柳对镉胁迫的光合响应[J].林业科学,2012,44(6):152-158.[JIA Zhong-min, CHENG Hua, WEI Hong, *et al.* Photosynthetic Responses of the Riparian *Salix variegata* to Cadmium Stress in Three Gorges Reservoir Region[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 44(6):152-158.]
- [26] 王文杰,李文馨,祖元刚.紫茎泽兰茎和叶片及叶绿素荧光相关参数对不同温度处理的响应差异[J].生态学报,2009,29(10):5424-5433.[WANG Wen-jie, LI Wen-xin, ZU Yuan-gang. Differences in Pigments and Chlorophyll Fluorescence Parameters Between Stems and Leaves *Eupatorium adcnophorum* Under Different Temperature Treatments [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10):5424-5433.]
- [27] 邓培雁,刘威,韩博平.宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)镉胁迫下的光合作用[J].生态学报,2007,27(5):1858-1862.[DENG Pei-yan, LIU Wei, HAN Bo-ping. Photosynthesis of *Viola baoshanensis* Under Cadmium Stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):1858-1862.]
- [28] 卢广超,许建新,薛立,等.干旱胁迫下4种常用植物幼苗的光合和荧光特性综合评价[J].生态学报,2013,33(24):7872-7881.[LU Guang-chao, XU Jian-xin, XUE Li, *et al.* Comprehensive Evaluation on Photosynthetic and Fluorescence Characteristics in Seedlings of 4 Drought Resistance Species [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24):7872-7881.]
- [29] 戴泽龙,黄应平,付娟,等.香溪河消落带狗牙根对重金属镉的积累特性与机制[J].武汉大学学报(理学版),2015,61(3):279-284.[DAI Ze-long, HUANG Ying-ping, FU Juan, *et al.* Accumulation Characteristics and Mechanism of Cd in Bermudagrass on Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiang Xi River [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2015, 61(3):279-284.]
- [30] 杨惟薇,刘敏,曹美珠,等.不同玉米品种对重金属铅镉的富集和转运能力[J].生态与农村环境学报,2014,30(6):774-779.[YANG Wei-wei, LIU Min, CAO Mei-zhu, *et al.* Accumulation and Transfer of Lead (Pb) and Cadmium (Cd) on Different Species of Maize [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(6):774-779.]
- [31] 王飞,胥焘,郭强,等.喜旱莲子草对Pb、Cd胁迫响应的研究[J].环境科学与技术,2013,36(5):8-16.[WANG Fei, XU Tao, GUO Qiang, *et al.* Studies on Responses of *Alternanthera philoxeroides* to Stress of Pb and Cd [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(5):8-16.]
- [32] 周启星,魏树和,张倩茹,等.生态修复[M].北京:中国环境科学出版社,2006:128.[ZHOU Qi-xing, WEI Shu-he, ZHANG Qian-ru, *et al.* *Ecological Restoration* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006:128.]
- [33] 魏树和,周启星,王新.超积累植物龙葵及其对镉的富集特征[J].环境科学学报,2005,26(3):167-171.[WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Cadmium-Hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and Its Accumulating Characteristics [J]. *Environmental Science*, 2005, 26(3):167-171.]
- [34] 邹春萍,陈金峰,孙映波,等.白花鬼针草对镉的富集与迁移特性试验研究[J].南方农业,2015,9(7):23-26.[ZHOU Chun-ping, CHEN Jin-feng, SUN Ying-bo, *et al.* Experimental Study of Cadmium Accumulation and Migration Characteristics of *Bidens pilosa* L. [J]. *South China Agriculture*, 2015, 9(7):23-26.]

作者简介:甘龙(1992—),男,安徽淮南人,硕士生,主要从事生态水利方面的研究。E-mail:821333219@qq.com.

(责任编辑:陈昕)