

# 不同生态型铺地黍在镉胁迫下的生长适应性

李志丹<sup>1</sup>,周怡<sup>1</sup>,黄文萍<sup>2</sup>,王俊梅<sup>1</sup>,余婷婷<sup>1</sup>,高桂娟<sup>1\*</sup>

(1. 广东第二师范学院环境教育研究所,广东 广州 510303;2. 佛山市南海区狮山镇桃园初级中学,广东 佛山 528234)

**摘要:**【目的】了解不同生态型铺地黍(*Panicum repens*)在污染河岸消涨带水淹条件下对镉胁迫的生长适应性和生理响应,筛选优异生态型铺地黍。【方法】选取3种生态型铺地黍(E-dabaoshan、E-guangdong、E-hainan),利用水培试验模拟消涨带水淹环境,比较镉胁迫下不同生态型铺地黍的形态指标和生理指标。【结果】3种生态型铺地黍完全能够耐受12 mg/L浓度的镉胁迫,植株存活率高达70%~100%,但是分枝能力降低。E-dabaoshan在12 mg/L镉处理下的地上生物量分别达到E-guangdong和E-hainan的1.76和1.86倍,其形态特征(分枝数、节间长、茎粗、植株高度和地上部生物量)均显著高于E-guangdong和E-hainan( $P<0.05$ ),表现出更强的表型可塑性。铺地黍过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性均受到抑制,叶绿素(Chl)含量降低,叶绿素受镉胁迫影响敏感度为 $\text{Chl a}>\text{Chl a+b}>\text{Chl b}$ ,但随胁迫时间延长,POD和CAT活性抑制率减小,叶绿素含量逐渐增加。E-dabaoshan受抑制最小,镉胁迫28 d后,POD和CAT活性与CK无显著差异,这与形态指标表现相符。【结论】E-dabaoshan能够逐渐修复镉伤害,有较高的镉耐受性。根据3种生态型铺地黍的表现,结合土壤生境条件,推断铺地黍原生境条件对镉胁迫的生长适应性影响较大。

**关键词:**铺地黍;生态型;镉胁迫;生长适应性

**中图分类号:**Q945 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)02-0158-09

**DOI:**10.13817/j.cnki.cyycp.2023.02.019



随着中国工业化和城市化进程的加快,重金属污染环境已引起社会高度重视,《全国土壤污染状况调查公报》显示,重金属污染约占我国土壤全部污染的82%,其中,镉污染状况尤为严重,其污染点位超标率高达7%<sup>[1]</sup>。同时,湖泊和河流等的河岸消涨带生态系统也受到了重金属的严重破坏。中国三峡水库145~175 m的水体消涨带受到Hg、As、Cr、Cd、Pb、Cu、Zn、Fe和Mn的污染,其中,59%的Cd来自工业

废物<sup>[2]</sup>。

植物修复技术因其较强的自我修复能力及低成本、可持续等特点,优势越来越明显,被广泛用于重金属污染环境的生态治理。在各类重金属污染环境中,河流、湖泊、水库等河岸消涨带的修复最为困难,因该地区长期处于极端干旱和水涝交替状态<sup>[3-4]</sup>,给修复植物的生长带来很大困难。近年来,针对此类受损生态系统的植物筛选和污染沉积物的植物修复技术研究受到越来越多的关注<sup>[5]</sup>。多年生草本植物铺地黍(*Panicum repens*)因其发达的根茎,超强的繁殖力<sup>[6-7]</sup>,可长期在水、陆两种生境中生长<sup>[8-9]</sup>,并具较强重金属耐性和净化能力<sup>[10-11]</sup>,常用于河岸消涨带这种特殊生境的生态修复。

前期研究显示,采集于中国南部的29种生态型铺地黍<sup>[12]</sup>,不仅具备适应极端干旱和长期水淹的抗性,且大部分表现出较强的铅镉累积能力和耐受能力。

**收稿日期:**2023-01-03;**修回日期:**2023-04-14

**基金项目:**广东省普通高校重点领域专项项目(2021ZDZX4004);广东省自然科学基金项目(2016ZC0204);大学生创新创业训练项目(202214278012)

**作者简介:**李志丹(1977-),男,内蒙古西乌旗人,硕士,副研究员,主要研究方向为草地生物多样性。

E-mail:xwqlzd@126.com

\*通信作者。E-mail:15973617@qq.com

依托前期研究基础,选取生境不同(一般土壤条件和重金属污染严重土壤条件)的 3 种代表性生态型铺地黍作为进一步研究的材料,进行不同浓度镉胁迫水培试验,比较水淹条件下镉胁迫对不同生态型铺地黍生长特征和生理特性的影响,筛选适用于重金属镉污染河岸消涨带生态修复的优异生态型铺地黍。

## 1 材料和方法

### 1.1 植物材料

供试的 3 种生态型铺地黍分别采集于广东省广州市番禺区,编码 E-guangdong, N 22.79°, E 113.41°; 海南省五指山市郊区,编码 E-hainan, N 18.77°, E 109.51° 及广东省韶关市大宝山矿区,编码 E-dabaoshan, N 24.60°, E 113.67°。采集地土壤理化性质见表 1。

### 1.2 试验设计

试验场地设置在广东第二师范学院楼顶开放式大棚,通风良好,棚顶采用透光玻璃遮雨设置。采用

水培盆栽方式,盆的规格为长×高×宽=60 cm×40 cm×50 cm。重金属镉(Cd)胁迫溶液采用 CdSO<sub>4</sub> 和 Hoagland 营养液配置<sup>[13]</sup>,设置 4 种镉处理浓度,包括对照(CK: 0 mg/L Cd)、低镉浓度(Cd<sub>4</sub>: 4 mg/L Cd)、中镉浓度(Cd<sub>8</sub>: 8 mg/L Cd)和高镉浓度(Cd<sub>12</sub>: 12 mg/L Cd),共 12 种处理,每处理 3 个重复。选取 10 cm 左右,含两茎节粗细基本一致的繁殖枝条进行营养液水培扦插繁殖,用 KT 板固定,漂浮于水面,两个茎节分别在水面和水下。培养至植株 15 cm 高后留取长势基本一致的植株 20 株,均匀分布,开始进行镉胁迫处理。处理期间每 7 天更换含处理浓度镉离子的营养液,并每天补充散失水分至水位线。胁迫后每盆固定 10 株每 7 天测定植株高度、茎粗、分枝数、节间长形态指标,共测定 4 次,28 d 后收获植株地上部分称取生物量。另 10 株选取植株成熟叶片,测定过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性和叶绿素含量,共测定 4 次。

表 1 3 种生态型铺地黍的样本采集点土壤理化特性

Table 1 Background values of soil physical and chemical properties of three torpedograss ecotypes

生态型铺地黍	重金属含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )				含水率/%	pH 值
	铅	锌	镉	铜		
E-hainan	0	11.58	0	0.25	11.20	5.92
E-guangdong	67.56	20.78	1.59	3.28	16.71	6.52
E-dabaoshan	1170.35	852.32	10.53	41.26	89.33	6.80

### 1.3 指标测定

铺地黍的分枝数、植株高度和节间长均采用常规标尺测量方法,茎粗采用游标卡尺测量。地上部生物量(鲜重)用去离子水洗净,吸干水分,称量。叶绿素的测定参照 Lichtenthaler and Wellburn 的方法<sup>[14]</sup>, POD 活性采用愈创木酚显色法, CAT 活性采用紫外吸收法,每分钟 ΔA<sub>240</sub> 下降 0.01 为一个酶活力单位<sup>[15]</sup>。

计算分枝数、节间长、茎粗、植株高度等指标的相对变化值(ΔValue)和生理指标的变化率(RTS),计算公式如下:

$$\Delta \text{Value} = (V_t - V_0)$$

式中: V<sub>t</sub> 分别指 3 种生态型在 4 种镉浓度处理下(CK, Cd<sub>4</sub>, Cd<sub>8</sub> 和 Cd<sub>12</sub>) 第 7 天、第 14 天、第 21 天和第 28 天的指标观测值, V<sub>0</sub> 指各处理条件下的植物材料在开始处理当天测试数据。

$$\text{RTS}(\%) = (V_t - V_{\text{CK}}) / V_{\text{CK}} \times 100\%$$

式中: V<sub>t</sub> 分别指 Cd<sub>4</sub>, Cd<sub>8</sub> 和 Cd<sub>12</sub> 条件下的生理指标值, V<sub>CK</sub> 指与 V<sub>t</sub> 在同一镉处理时间梯度的对照值。

### 1.4 数据分析

采用 SPSS 21.0 进行数据分析,单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)分析处理之间的差异显著性(P<0.05)。各变量之间的相关性采用 Pearson's 相关系数呈现。

## 2 结果与分析

### 2.1 镉胁迫下的不同生态型铺地黍形态特征变化

Cd<sub>12</sub> 处理下, E-dabaoshan、E-guangdong 和 E-hainan 3 种生态型存活率分别为 100%、87% 和 72%, 随时间延长, 植株高度、节间长、生物量都逐渐增加, 茎粗变化趋势也和 CK 一致, 呈现先升高后降低再升高变化。镉胁迫对铺地黍生长具有一定的抑制作用, 随胁迫浓度增加, 铺地黍植株高度、节间长、生物量增

长速度减小,在Cd<sub>12</sub>处理下与CK差异显著( $P < 0.05$ ) (图1-2)。分枝数受镉胁迫抑制明显,Cd<sub>4</sub>和Cd<sub>12</sub>胁迫下,分枝数增长缓慢甚至降低,且与CK差异显著( $P < 0.05$ )。镉胁迫影响了铺地黍茎粗变化幅度,胁迫处理下茎粗减小幅度增加,而增粗幅度减小,但不同胁迫浓度间无显著差异。

3种生态型铺地黍之间,E-dabaoshan的镉耐受能力最强,其植株高度、茎粗和地上部生物量明显高于另外两个生态型,表现出更强的可塑性能力。镉处理28 d后,E-dabaoshan在Cd<sub>4</sub>,Cd<sub>8</sub>和Cd<sub>12</sub>处理下的地上部生物量分别达到51.04,40.44和39.10 g/株,极显著高于E-guangdong(39.48,35.70和

22.27 g/株)和E-hainan(40.08,33.83和21.06 g/株)( $P < 0.01$ )。E-dabaoshan在Cd<sub>4</sub>处理下的植株高度增加量和地上部生物量与CK无显著差异。E-guangdong和E-hainan在Cd<sub>4</sub>条件下植株高度和地上部生物量显著低于CK( $P < 0.05$ )。同时,Cd<sub>8</sub>处理下的E-dabaoshan的植株高度和地上部生物量与Cd<sub>12</sub>处理下的差异不显著,即镉浓度从8 mg/kg增加到12 mg/kg,并未加剧E-dabaoshan的伤害程度。表明E-dabaoshan具有相对较强的镉耐受性。E-hainan的表现居中,而E-guangdong的表现相对较弱,尤其是茎粗相对于处理初始的 $\Delta$ 值多为负值。

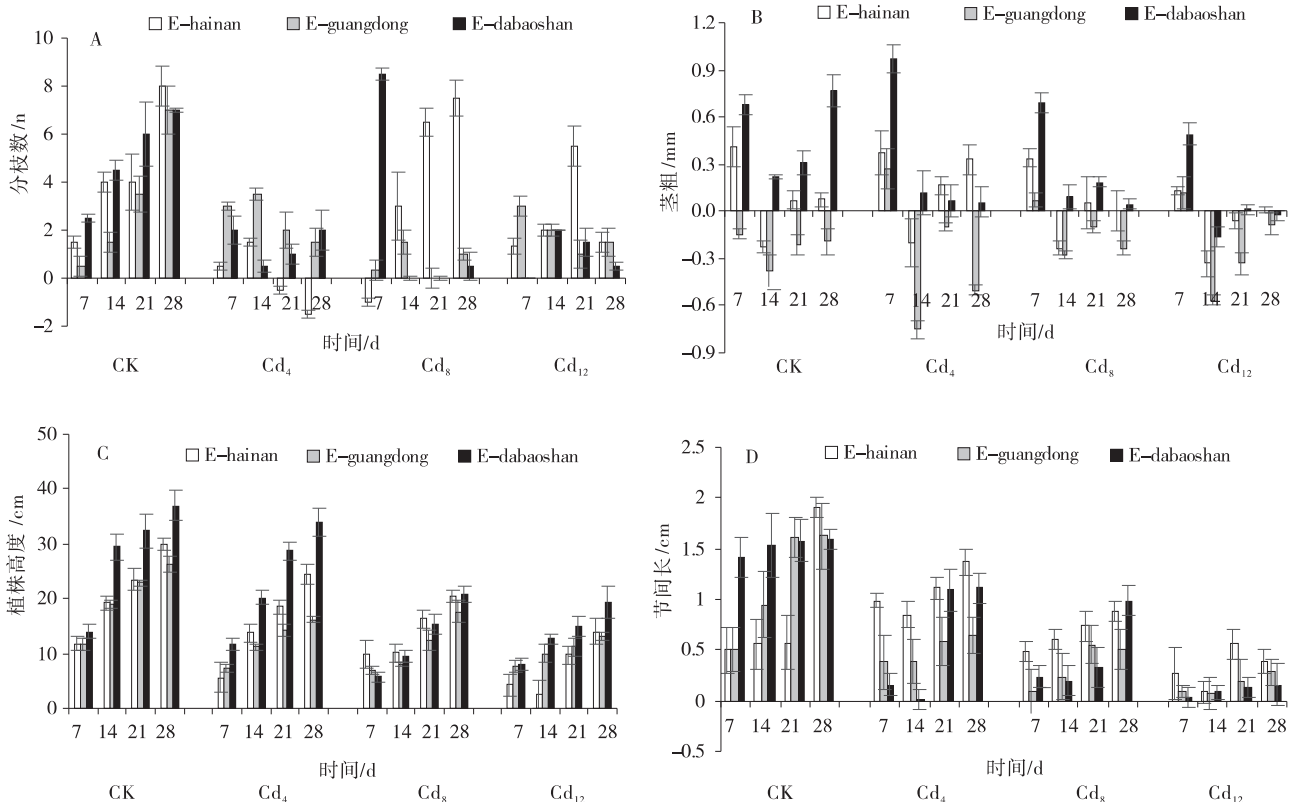


图1 不同生态型铺地黍在各浓度镉处理条件下的形态特征

Fig. 1 Dynamic changes of morphological characteristics of different torpedograss ecotypes under different cadmium treatment

2.2 镉胁迫下的不同生态型铺地黍生理特性动态变化

镉胁迫下,铺地黍的POD活性受到抑制,抑制程度受胁迫强度和时间影响较大(图3)。在处理初期(7 d)高浓度镉胁迫(Cd<sub>12</sub>)POD活性与对照无显著差异,而中低浓度受抑制明显,如E-guangdong在Cd<sub>12</sub>镉胁迫7 d后的POD活性为99.51 μg/g,显著高于Cd<sub>4</sub>和Cd<sub>8</sub>条件下的75.84和55.96 μg/g( $P < 0.05$ )。E-hainan有同样表现,E-dabaoshan在Cd<sub>12</sub>下的POD活

性也高于Cd<sub>8</sub>和Cd<sub>4</sub>处理,且与Cd<sub>4</sub>达到显著差异( $P < 0.05$ )。随处理时间延长,镉胁迫抑制效果增加,处理28 d,除E-guangdongCd<sub>8</sub>处理外,各生态型不同处理POD活性显著低于CK( $P < 0.05$ )。

通过不同生态型铺地黍POD活性抑制率分析得出(图4),E-dabaoshan在同一时间的各处理整体平均POD活性抑制率(Cd<sub>4</sub>,Cd<sub>8</sub>和Cd<sub>12</sub>),始终高于另外两个生态型。相对于CK,3种生态型的POD活性受抑制程度,表现为E-dabaoshan < E-guangdong <

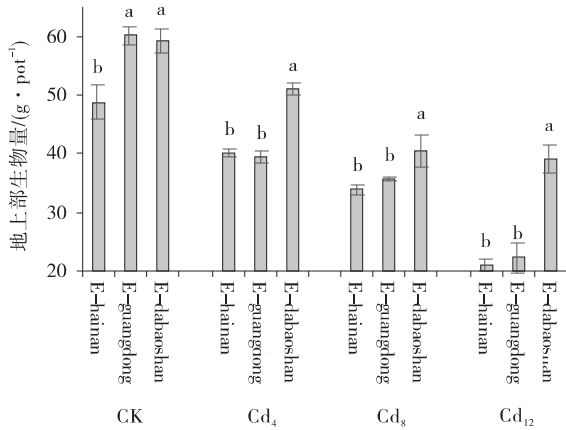


图 2 镉处理 28d 不同生态型铺地黍地上部生物量

Fig. 2 Significance difference of shoot biomass between different torpedograss ecotypes on the 28<sup>th</sup> day under cadmium treatment

注:字母 ab 表示单因素方差分析结果(LSD),即在同一镉胁迫浓度下的不同铺地黍生态型之间的差异显著性( $P < 0.05$ )

E-hainan, Cd<sub>12</sub>胁迫后的第 21 天,3 种生态型 POD 活性相对于 CK 的减少幅度分别为 -31.33%, -50.95% 和 -58.99%。

过氧化氢酶(CAT)活性在镉胁迫下也受到抑制

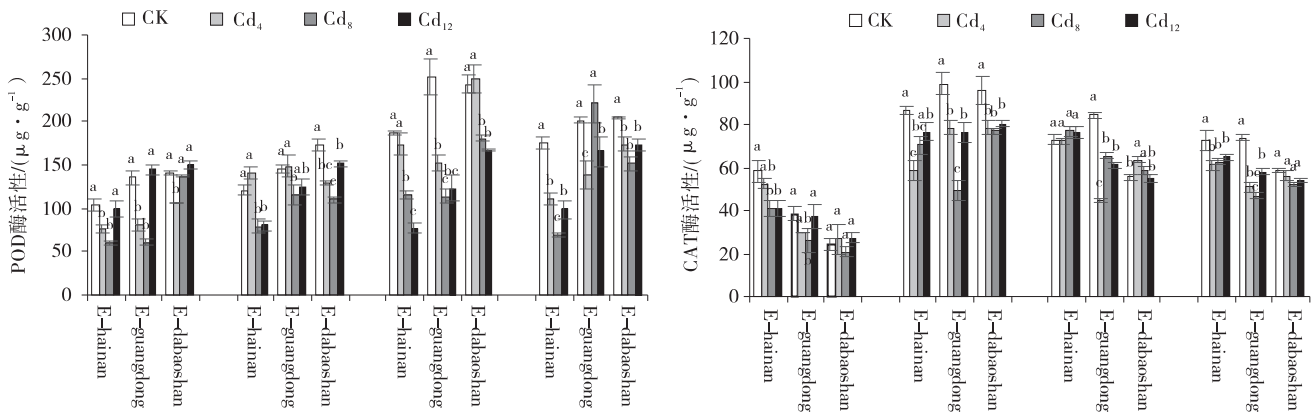


图 3 不同生态型铺地黍在镉处理下的酶活性

Fig. 3 Dynamic changes of enzyme activities of different torpedograss ecotypes under different cadmium treatment

注:图中不同小写字母 abc 分别表示同一铺地黍生态型在同一时间梯度内的不同重金属处理浓度之间的差异显著性( $P < 0.05$ )

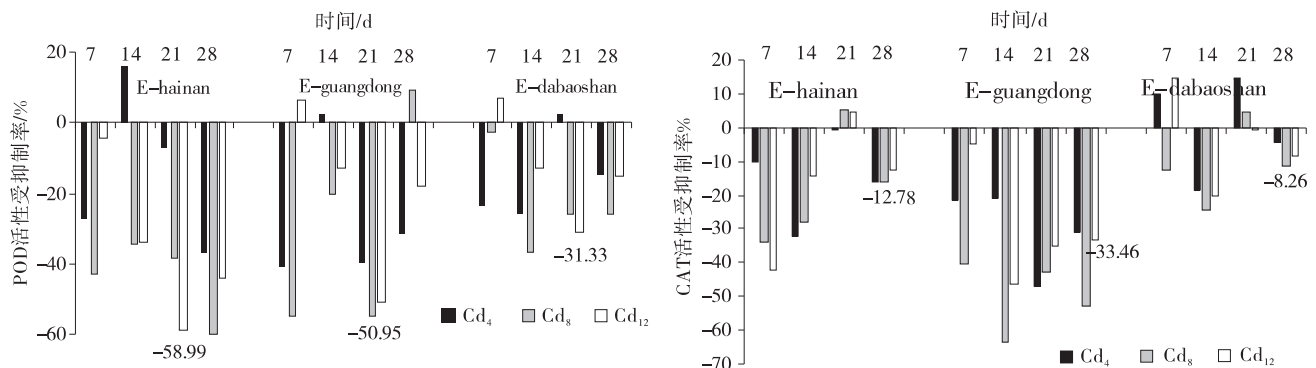


图 4 相同时间不同镉处理下酶活性相对于 CK 的变化率

Fig. 4 At the same treatment time RTS of enzyme activities of each value under cadmium treatment relative to CK

(图 4),不同生态型受抑制程度不同,其中 E-dabaoshan 受抑制小,在初期和后期不同浓度镉胁迫下 CAT 活性均与 CK 无显著差异,其活性受抑制程度表现为  $E-dabaoshan < E-hainan < E-guangdong$ , Cd<sub>12</sub> 胁迫的第 28 天,3 种生态型铺地黍 CAT 活性相对于 CK 的减少幅度分别为 -8.26%, -12.78% 和 -33.46%。

正常条件铺地黍叶绿素 a 和叶绿素 b 无显著变化(图 5)。在镉胁迫处理下,3 种生态型铺地黍叶绿素 a 和叶绿素 a+b 在初期显著降低,在处理 7 d 和 14 d,3 种生态型的叶绿素 a 和叶绿素 a+b 的 RTS 值均为负值,显著低于对照 ( $P < 0.05$ ), E-dabaoshan、E-guangdong 和 E-hainan 相对 CK 的降低幅度最低分别为 31.04% (Cd<sub>12</sub> 胁迫 14d), 19.52% (Cd<sub>4</sub> 胁迫 7 d) 和 27.13% (Cd<sub>4</sub> 胁迫 7 d)。3 种生态型铺地黍之间,叶绿素 a 和叶绿素 a+b 的降低幅度表现为  $E-dabaoshan > E-guangdong > E-hainan$ 。随胁迫时间延长铺地黍叶绿素含量有逐渐升高的趋势(图 6),中、低浓度处理恢

复较快,而高浓度处理恢复较慢。中低浓度镉胁迫下铺地黍叶绿素a和叶绿素a+b含量在21 d和28 d已经恢复到或超过CK。铺地黍叶绿素b含量变化受生态型影响大,不同生态型变化趋势不同,Chl-a/b变化差异性也较大,E-guangdong和E-hainan的Chl-a/b整体是随胁迫时间延长而呈增加趋势,分别由第7天的1.91(Cd<sub>4</sub>)和2.42(Cd<sub>8</sub>)k/kg上升到第28天的4.72和3.99 k/kg。而E-dabaoshan的变化比较平缓,其最大变化幅度为2.44~3.57 k/kg。

同一时间不同生态型之间叶绿素方差分析显示,E-dabaoshan的叶绿素a和叶绿素a+b的整体平均含量(Cd<sub>4</sub>, Cd<sub>8</sub>和 Cd<sub>12</sub>),显著低于E-guangdong和E-hainan( $P < 0.05$ ),且镉胁迫浓度越高,差距越明显。而E-dabaoshan的叶绿素b含量和叶绿素a+b变化与E-guangdong和E-hainan的差异性较小(除Cd<sub>12</sub>的处理条件下的值显著低于其他生态型外)。同一生态型不同镉处理浓度之间的方差分析显示,E-dabaoshan叶绿素含量受胁迫强度的影响较大,在Cd<sub>12</sub>胁迫下的叶绿素a、叶绿素b和叶绿素a+b含量显著低于Cd<sub>4</sub>和Cd<sub>8</sub>

条件( $P < 0.05$ )。而E-guangdong和E-hainan在不同浓度之间的差异性不显著。

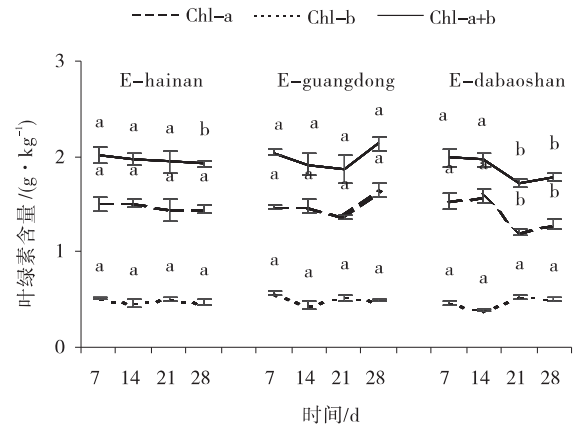


图5 不同生态型铺地黍在CK条件下的叶绿素含量  
Fig. 5 Dynamic changes of chlorophyll content under CK of different torpedograss ecotypes

2.3 不同生态型铺地黍形态指标与生理指标的相关性分析

形态特征变量与生理响应指标进行相关性分析(表2),表明铺地黍的形态特征与生理指标变化趋势相同,在镉处理前期(7~14 d),铺地黍的Chl-a含量和CAT活性均与株高、地上部生物量等呈显著或极显著

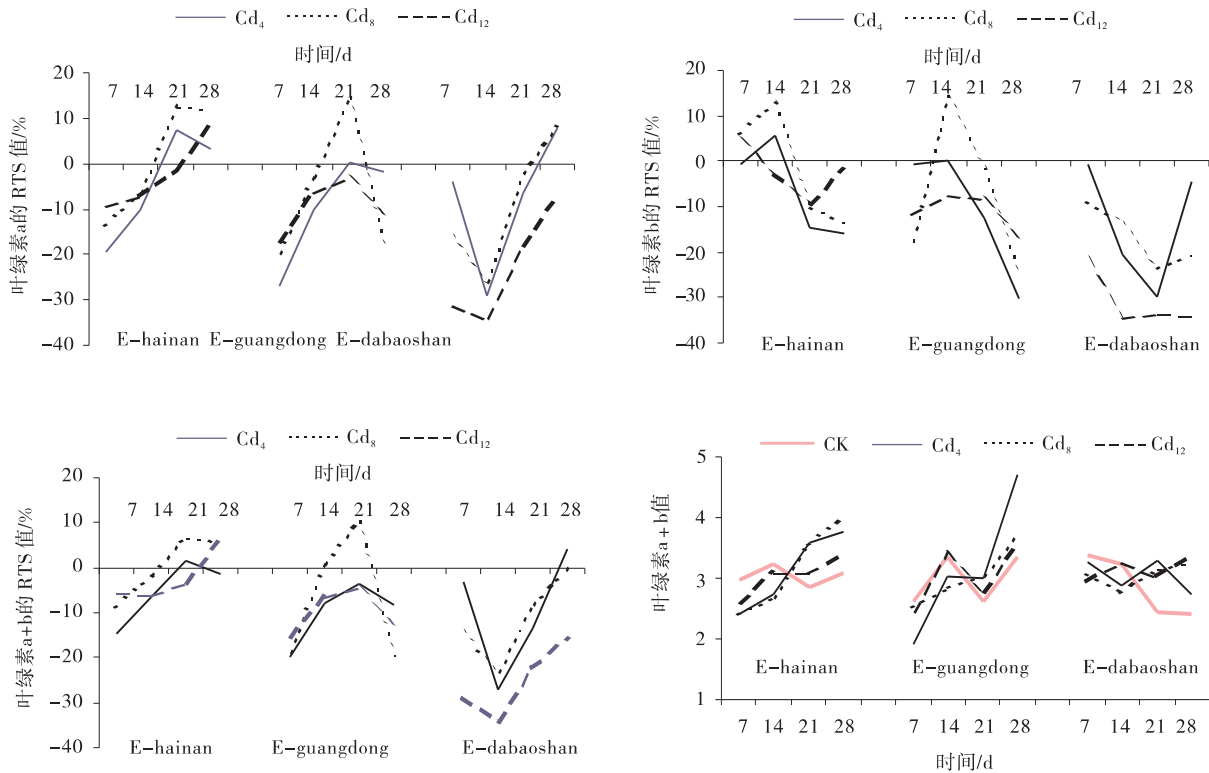


图6 相同时间不同镉处理下叶绿素相对于CK的变化率

Fig. 6 At the same treatment time, RTS of chlorophyll content of each value under cadmium treatment relative to CK

正相关( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ ),而在镉处理后期(21~28 d),chl-b 含量和 POD 活性均与株高、分枝数、茎粗、地上部生物量等呈显著或极显著正相关( $P < 0.05$  或

$P < 0.01$ )。同时,铺地黍在不同镉浓度胁迫下 POD 和 CAT 活性在处理后的第 21 天呈现显著相关性( $r = 0.59$ )(表 2)。

表 2 生态型铺地黍的形态指标与生理指标之间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between morphological and physiological variables of ecotypes tested (Pearson's)

	chl a	chl a	chl a	chl a	chl b	chl b	chl b	chl b	chl a+b	chl a+b	chl a+b	POD	POD	POD	CAT	CAT		
	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	14 d	28 d		
chl b	7 d	0.63*	0.62*	0.98**														
chl b	14 d		0.99**	0.68*														
chl b	21 d		0.96**															
chl b	28 d	0.98**																
chl a+b	7 d	0.95**	0.63*					0.95**										
chl a+b	14 d		0.97**	0.71*	0.65*	0.70*	0.72**	0.93**										
chl a+b	21 d		0.71*	0.97**	0.71*	0.69*	0.97**	0.67*										
chl a+b	28 d		0.65*	0.60*	0.95**	0.96**	0.62*	0.58*										
POD	7 d			-0.83**										-0.73*				
POD	14 d			-0.58*										*				
CAT	14 d								0.58*					0.69*	0.59*	0.61*		
CAT	21 d													0.61*				
CAT	28 d	0.64*							0.67*	0.72**				0.65*				
Shootbiomass														0.64*	0.93**			
Branches	28 d	0.68*	0.62*							0.72**						0.61*	0.64*	
Internode length	14 d		0.64*															
Internode length	21 d	0.63*								0.72**	0.67*					0.66*		
Internode length	28 d	0.607								0.62*	0.58*					0.62*	0.59*	0.71*
Plant height	7 d	0.68*								0.60*	0.60*					0.73**	0.65*	
Plant height	14 d	0.62*														0.71**	0.88**	0.61*
Plant height	21 d	0.729**								0.66*	0.61*					0.88**		
Plant height	28 d	0.738**								0.65*	0.60*					0.85**		

注:\*代表相关性显著水平( $P < 0.05$ ),\*\*代表相关性极显著水平( $P < 0.01$ )。每指标变量的数据包括该指标的 3 种生态型和 4 种镉处理浓度数据( $n = 12$ )。但均在同一镉处理时间梯度内进行

### 3 讨论

#### 3.1 不同生态型铺地黍形态特征对镉胁迫的响应

大量的研究已证明低浓度的镉胁迫会促进植物生长<sup>[16]</sup>,如低浓度镉、铅胁迫对高羊茅(*Festuca elata*)种子萌发及幼苗生长有促进作用<sup>[17]</sup>。5 mg/kg 镉胁迫下的萱草(*Hemerocallis fulva*)生物量显著高于对照<sup>[18]</sup>。铺地黍在低浓度镉胁迫下也有相似表现,低浓度镉胁迫未影响 E-dabaoshan 的正常生长,植株高度和生物量未显著降低,但分枝能力降低。于洪伟研究指出,环境异质性会导致克隆植物表现出适应性的生长繁殖对策<sup>[19]</sup>。本研究 3 种生态型铺地黍之间的形态特征表现差异性较大,总体上受镉抑制程度表现为 E-dabaoshan < E-hainan < E-guangdong, 大宝山尾矿

地生境下采集的铺地黍表现出最强的镉耐受性。主要体现在受镉胁迫后,E-dabaoshan 的植株高度,茎粗和地上部生物量均显著高于另外两个生态型( $P < 0.05$ ),表现出更强的可塑性,这可能是由于不同生境的异质性,导致铺地黍不同生态型之间的表型可塑性能力变化。在没有发生遗传变异的前提下,植物体通过增强表型可塑性提高环境适应性的现象广泛存在植物中,如羊草(*Leymus chinensis*)在不同土壤条件之间的形态特征变化明显<sup>[20]</sup>,普通野生稻(*Oryza rufipogon*)在适应当前的气候变暖方面也表现出了较强的表型可塑性能力<sup>[21]</sup>。

#### 3.2 不同生态型铺地黍生理特性对镉胁迫的响应

有关植物通过提高抗氧化酶活性来增强对重金属的耐受性已有大量研究,如莠麦(*Avena chinensis*)

幼苗在镉胁迫下会促进分裂原活化蛋白激酶介导  $H_2O_2$  信号通路,提高抗氧化酶活性的清除能力,从而提高苜蓿幼苗对镉的耐受性<sup>[22]</sup>。镉进入植物组织后,通过一系列代谢产生一些对植物体有害的过氧化物,植物通过酶活性的增加清除毒害,维持细胞正常功能<sup>[23-25]</sup>。本研究显示,铺地黍在镉胁迫下通过 POD 和 CAT 酶活性的增加,进行镉毒害防御,各生态型铺地黍在镉胁迫下的 POD 和 CAT 酶活性相对于 CK 的 RTS 值上升趋势明显,表明镉胁迫刺激了 POD 和 CAT 活性增加,且镉胁迫浓度越大,激活越剧烈。随胁迫时间延长,E-dabaoshan 和 E-hainan 的 POD 酶活性有增加趋势,这可能是随着时间的延长,两种生态型逐渐修复了部分严重受伤害细胞,重新启动了部分细胞的酶激活机制<sup>[26]</sup>。E-dabaoshan 在高 Cd 胁迫下( $Cd_{12}$ )第 28 天的 POD 活性最高为  $173 \mu g/(g \cdot min)$ ,说明其清除细胞内过多活性氧的能力较强,进而对 Cd 胁迫保持较高的耐性。其它重金属胁迫也有类似结果,铺地黍 POD 活性在  $600 mg/kg$  重金属 Zn 胁迫一个月后仍能保持较高的活性<sup>[27]</sup>。在对镉胁迫响应时间上,酶活性响应明显滞后于形态表现,胁迫初期铺地黍生长受到抑制,形态特征指标降低,但 POD 酶活性和 CAT 酶活性与 CK 无显著差异,而随胁迫时间延长,POD 和 CAT 酶活性逐渐增强。

铺地黍叶绿素 a 和总量对镉胁迫的响应比叶绿素 b 更敏感些。胁迫初期,chl-a 和 chl-a+b 均低于 CK,这与芹菜(*Apium graveolens*)幼苗的受胁迫的抑制机制相似<sup>[28]</sup>。铺地黍对镉胁迫伤害的后期修复在叶绿素的表现上也产生了协同反应,E-dabaoshan 和 E-hainan 相对于 CK 的叶绿素变化率在胁迫后期(21~28 d)均呈上升的趋势,且超过了 CK 含量,说明铺地黍随时间延长可能已经修复了伤害。其他植物也有类似现象,如钻叶紫菀(*Aster subulatus*)随着 Cd 处理浓度的增大及培养时间的延长,叶片 CAT 和 POD 活性及叶绿素含量均呈先上升后下降再上升的变化趋势,最终均高于 CK<sup>[29]</sup>。

面对逆境胁迫植物有不同的应对策略,如甘西鼠尾草(*Salvia przewalskii*)可通过快速成熟增加碳在枝干和根系的储存来增强环境可塑性<sup>[30]</sup>,而披针叶茴香(*Illicium lanceolatum*)则是通过获取更多光照资源来适应弱光逆境条件<sup>[31]</sup>,E-dabaoshan 叶绿素变化对镉胁迫的响应慢于另外两种生态型而生物量增加较多,

说明 E-dabaoshan 初期可能通过增加碳在枝干中的存储来增加适应逆境环境的可塑性,而不是通过获取更多的光照资源途径。 $4 \sim 12 mg/L$  镉处理下,铺地黍叶绿素含量后期基本恢复到对照水平,与 CK 之间的差异均不显著,说明铺地黍完全能耐受  $12 mg/L$  以下镉胁迫,远高于一些植物的耐镉能力。如 Gyula Sipos 等研究显示<sup>[32]</sup>,能量草(*Elymus elongatus* subsp. *ponticus*)在  $10 \mu mol/L$  的 Cd 胁迫下的叶绿素已显著低于 CK 水平( $P < 0.05$ )。

### 3.3 镉胁迫下的铺地黍形态特征与生理特性的协同响应

植物通过提高抗氧化酶活性(快速清除  $H^+$  毒害)和叶绿素含量增强对重金属的耐受性,通过不同酶协同作用,保护植株体的正常形态生长。在  $600 mg/kg$  重金属 Zn 胁迫下,铺地黍地上部生物量与 CAT 活性显著正相关性( $P < 0.05$ ),并通过调节 POD 和 CAT 活性协同抵御 Zn 对铺地黍的伤害<sup>[27]</sup>。玉米(*Zea mays*)幼苗和三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)在镉胁迫下的地上生物量也分别与 POD 和 CAT 活性显著正相关( $P < 0.05$ )<sup>[33-34]</sup>。NaCl 盐胁迫下水稻的地上部生物量的增加也分别与 POD 和 CAT 活性显著正相关( $P < 0.05$ )<sup>[35]</sup>。

## 4 结论

3 种生态型铺地黍均能耐受水培环境下  $12 mg/L$  的镉胁迫,存活率达  $70\% \sim 100\%$ 。在不同浓度镉胁迫下,铺地黍生长受到一定抑制,分枝数、节间长、茎粗、植株高度和地上部生物量都有所降低,E-dabaoshan 抑制率最低,生物量和株高均显著高于其他生态型。铺地黍通过提高酶活性和叶绿素含量协同抵御镉胁迫,维持正常生长,E-dabaoshan 酶活性的抑制率最低,恢复最快。铺地黍无论在长期水淹环境,还是在长期干旱胁迫环境,甚至在重金属尾矿地均能正常生长,其较宽的生态幅和繁殖能力呈现出较强的可塑性,具备重金属污染河岸消淤带修复潜力,E-dabaoshan 作为表现突出生态型,值得进一步深入评价。

### 参考文献:

- [1] 环境保护部和国土资源部,全国土壤污染状况调查公报[R/OL](2014-04-17)[2020-07-09]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417\\_](https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_)

270670. htm.
- [2] YE CHANG, LI SY, ZHANG YL, *et al.* Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of Hazard Mater.*:2011, 191:366–372.
- [3] 付奇峰, 方华, 林建平. 华南地区水库消涨带生态重建的植物筛选[J]. *生态环境*, 2008, 17(6):2325–2329.
- [4] 付奇峰, 林素彬, 黎晨, 等. 水库消涨带铺地黍植被护坡技术研究[J]. *中国水土保持*, 2006(7):17–19, 52.
- [5] 张云, 费艳旭, 孙琪旗, 等. 狗牙根根际土壤 pH、有机质含量及重金属形态分布[J]. *草原与草坪*, 2021, 41(5):99–105.
- [6] 高桂娟, 李志丹, 李唯伟. 不同培植方式下铺地黍扩繁效果比较研究[J]. *广东第二师范学院学报*, 2016, 36(5):71–75.
- [7] 张金桃. 铺地黍在铅锌矿冶工业区应用研究[J]. *有色冶金设计与研究*, 2008, 29(3):17–18.
- [8] HARWELL M C, SHARFSTEIN B. Submerged aquatic vegetation and bulrush in Lake Okeechobee as indicators of grater Everglades ecosystem restoration [J]. *Ecological Indications*, 2008, 6(9):46–55.
- [9] BUNCH A J, ALLEN M S, GWINN D C. Spatial and temporal hypoxia dynamics in dense emergent macrophytes in a Florida Lake [J]. *Wetlands*, 2010, 30(3):429–435.
- [10] 高桂娟, 李志丹, 何世君, 等. 不同水分条件与重金属复合处理对铺地黍生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(18):56–60.
- [11] GAO GUIJUAN, ZENG XIAOLONG, LI ZHIDAN, *et al.* Variations in several morphological characteristics and Cd/Pb accumulation capacities among different ecotypes of torpedograss responding to Cd–Pb stresses [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2017, 19(9):844–861.
- [12] ZENG XIAOLONG, GAO GUIJUAN, YANG JUNZHI, *et al.* The integrated response of torpedograss (*Panicum repens*) to Cd–Pb co-exposures[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82:428–431.
- [13] KHAN SARDAR, CAO QING, HESHAM ABD EL-LATIF, *et al.* Soil enzymatic activities and microbial community structure with different application rates of Cd and Pb [J]. *Journal of Environment Science*, 2007, 19(7):834–840.
- [14] LICHTENTHALER HK, WELLBURN AR. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents[J]. *Biochemical Society Transactions*, 1983, 11(50):591–592.
- [15] 李玲. 植物生理学实验指导[M]. 北京:科学出版社, 2009:90–100.
- [16] 薛晨阳, 高英美, 曲波. 镉胁迫对瘤突苍耳、苍耳及其杂合体种子萌发与幼苗生长的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(1):345–355.
- [17] 刘骥华, 王慧慧, 刘璐, 等. 铜、镉、铅对高羊茅种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *草原与草坪*, 2019, 39(4):10–18.
- [18] 王硕. 萱草和石榴对镉、铅、锌污染土壤的修复潜力研究[D]. 天津:天津理工大学, 2018.
- [19] 于洪伟. 生境异质性对水生克隆植物生长和竞争的影响[D]. 武汉:武汉大学, 2018.
- [20] 张雪. 松嫩平原异质土壤生境中羊草表型可塑性及其分子机制[D]. 长春:东北师范大学, 2021.
- [21] 邵雯雯, 范国祯, 何知舟, 等. 多地同质园实验揭示普通野生稻的表型可塑性与本地适应性[J]. *生物多样性*, 2023, 31(3):1–8.
- [22] 贺瑾瑾. 褪黑素对镉、铅胁迫下苜蓿幼苗抗氧化能力的影响[D]. 西安:西北大学, 2021.
- [23] 崔婷, 王勇, 吴万鑫, 等. 镉胁迫下草地早熟禾离子吸收及生理响应特征分析[J]. *草原与草坪*, 2022, 42(3):115–124.
- [24] 辛建攀, 李文明, 祁茜, 等. 镉对梭鱼草叶片保护酶活性、光合及荧光特性的影响[J]. *草业学报*, 2018, 27(10):23–34.
- [25] 陈伟, 张苗苗, 宋阳阳, 等. 镉胁迫对 4 种草坪草抗逆生理特性的影响[J]. *草原与草坪*, 2015, 35(2):65–69.
- [26] 贾茵, 刘才磊, 兰晓悦, 等. 镉胁迫对小报春幼苗生长及生理特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(3):454–462.
- [27] 杨俊兴, 胡健, 雷梅, 等. 锌胁迫下湿地植物抗氧化系统反应及锌富集能力[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(8):2274–2281.
- [28] 程雪, 宋晓萱, 刘毓鑫, 等. 镉胁迫对芹菜幼苗叶绿素含量和生理指标的影响[J]. *农业科技通讯*, 2020(4):168–171.
- [29] 刘俊祥, 孙振元, 巨关升, 等. 结缕草对重金属镉的生理响应[J]. *生态学报*, 2011, 31(20):6149–6156.
- [30] 武高林, 陈敏, 杜国祯. 三种高寒植物幼苗生物量分配及性状特征对光照和养分的响应[J]. *生态学报*, 2010, 30(1):60–66.
- [31] 成向荣, 邢文黎, 苑海静, 等. 披针叶茴香对变化光环境的表型可塑性[J]. *生态学报*, 2019, 39(6):1935–



- 1944.
- [32] GYULA SIPOS, ÁDAM SOLTI, VIKTORIA CZECH, *et al.* Heavy metal accumulation and tolerance of energy grass (*Elymus elongatus* subsp. *ponticus* cv. Szarvasi-1) grown in hydroponic culture [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, 68: 96–103.
- [33] 陈晶, 庞思琪, 赵秀兰. 外源生长素对镉胁迫下玉米幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. *植物生理学报*, 2016, 52(8): 11910–1198.
- [34] 杨青, 谢俊婷, 张志盼, 等. 外源植物激素喷对三叶鬼针草修复镉污染土壤的影响[J/OL]. *环境科学*, 网络首发. <https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202210352>
- [35] 孟枫岩, 冯乃杰, 郑殿峰, 等. 氯化血红素缓解水稻幼苗期 NaCl 胁迫的生理特性研究[J/OL]. *热带作物学报*, 网络首发, <https://kns.cnki.net/kcms/detail//46.1019.S.20230216.1725.010.htm>.

## Growth adaptability and difference response among different ecotypes of torpedograss responding to Cd

LI Zhi-dan<sup>1</sup>, ZHOU Yi<sup>1</sup>, HUANG Wen-ping<sup>2</sup>, WANG Jun-mei<sup>1</sup>, SHE Ting-ting<sup>1</sup>, GAO Gui-juan<sup>1\*</sup>

(1. *Institute of Environmental Education, Guangdong University of Education, Guangdong 510303, China*; 2. *Taoyuan Junior High School, Shishan Town, Nanhai District, Foshan 528234, China*)

**Abstract:** It is very difficult for plants to grow in the polluted riparian flood zones due to the alternative changes of extreme drought and flooding. Torpedo grass (*Panicum repens* L.) has strong ability to tolerate to drought, flood and heavy metal, thus it can be used to improve the damaged riparian flood zones. In order to understand the adaptability and physiological response of torpedo grass to Cd stress under the condition of flooding, ecotypes of torpedo grass were screened. Hydroponics Experiments were conducted to simulate flooding environment in the riparian flood zones. Three ecotypes of torpedo grass collected from different habitats and regions were used to study its ecological adaptability and physiological responses to Cd stress. Three ecotypes including E-dabaoshan (collected from Dabaoshan Tailings Land), E-guangdong (collected from Guangdong) and E-hainan (collected from Hainan) could fully tolerate Cd stress at concentrations below 12 mg/L, and their plant survival rates were as high as 70%~100%. However, the ability of branching decreased compared with CK. The shoot biomass of E-dabaoshan under Cd treatment (12 mg/L) was 1.76–1.86 times of E-guangdong and E-hainan, respectively. Their morphological characteristics, such as branches, internode length, stem diameter, plant height and shoot biomass, were significantly higher than those of E-guangdong and E-hainan ( $P < 0.05$ ), showing stronger phenotypic plasticity. The activities of peroxidase (POD) and catalase (CAT) and chlorophyll content of torpedo grass were inhibited under the Cd stress. The sensitivity of chlorophyll affected by Cd showed the trend: Chl-a > Chl-a+b > Chl-b in the early stage of Cd stress. But with the prolongation of stress time, the inhibition rate of the activity of POD and CAT and chlorophyll content decrease. E-dabaoshan was least inhibited. There was no significant differences between the activity of POD and CAT of E-dabaoshan and CK on the 28dth ( $P > 0.05$ ), which is consistent with the performance of morphological indicators. The results suggest that E-dabaoshan may gradually repair cadmium damage leading to high cadmium tolerance. According to the performance of three ecotypes, combined with the soil habitat conditions, it implies that the original habitat conditions of torpedo grass have a greater impact on the adaptability of Cd stress.

**Key words:** torpedograss; ecotypes; cadmium stress; growth adaptability