

6种挺水植物对水位梯度的响应研究

胡茜茜¹, 金晶¹, 兰燕月¹, 黎臻¹, 花文凤¹, 张饮江^{1,2}

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306)

摘要:选择花蔺蒲(*Iris ensata* var. *hortensis*)、泽苔草(*Caldesia parnassifolias*)、黄花鸢尾(*Iris pseudacorus*)、美人蕉(*Canna indica*)、再力花(*Thalia dealbata*)、水葱(*Scirpus tabernaemontani*)共6种常见挺水植物,研究了不同水位梯度(-5~150 cm)对6种挺水植物外伤症状、株高、分株数、存活率、发芽率、叶绿素(Chl)、超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)等生理指标的影响。结果表明:(1)除黄花鸢尾出现一定外伤症状外,其余5种挺水植物在不同水位条件下生长较好,有较高存活率和发芽率。(2)花蔺蒲在水位30 cm、美人蕉在60 cm、再力花和水葱在100 cm均有较高的株高、分株数、存活率和发芽率。(3)花蔺蒲、泽苔草、黄花鸢尾的叶绿素含量在水位-5~0 cm达到最大,水位升高,含量下降;与之相反,美人蕉在水位90 cm、再力花和水葱在水位100 cm时叶绿素含量最高。(4)6种挺水植物在水淹胁迫的水深梯度下,产生了不同程度的SOD。实验前期(10 d),不同水位梯度下6种挺水植物叶片SOD活性出现不同程度下降,随着对不同水位梯度环境的适应,SOD开始回升;花蔺蒲(-5~45 cm)、美人蕉(-5~90 cm)在水淹与干旱处理下,叶片SOD活性均高于零水位;再力花和水葱随着水位(-5~100 cm)降低SOD活性升高,水位-5 cm时达到最高,分别提高了40.57%和63.79%;泽苔草在各水位下(-5~45 cm)SOD最终与零水位基本持平;黄花鸢尾各水位下保持稳步上升趋势。(5)6种挺水植物在实验前期不同水位梯度MDA含量均有所提升,中后期呈现下降态势。综合各项指标分析,泽苔草适应各水位胁迫,花蔺蒲和黄花鸢尾在低水位生长较好,美人蕉、再力花和水葱能较好地适应高水位环境,6种植物均可用于滨水带生态修复。本研究为湿地生态修复植物选择、水生植物生长水位联动控制提供了科学依据。

关键词:挺水植物;水位梯度;生理指标;生态修复

中图分类号:Q945.17 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2019)03-0049-09

水是水生植物生长发育的基本生态因子和主要控制因素,更是维系水岸生态系统正常结构和功能的必备条件(徐治国,2006);并对湿地发育演化和水岸生态系统维持起关键性作用(崔心红,2012)。近年来,由于人类活动的影响,造成水岸面积萎缩、生境破碎化、生物多样性下降等,导致水岸带功能效益减弱,退化态势愈演愈烈(Stoate,2009)。水文条件改变是水岸生态系统功能减退的最主要原因(Yamada,2007)。水分条件和水位变化直接影响到滨水带植物生长、生物量分配、植物群落空间分布及其生产量(王海洋,1999);影响着湿地群落的稳定性

和覆盖面积,物种多样性和群落的演替,决定着湿地的类型、结构和功能。水位变化可导致植物叶片相对含水量变化(崔心红,2012),水分过少,满足不了水生植物生长需求,即发生水分亏缺现象、产生旱害、抑制植物生长;水分过多,也会造成植物受淹组织缺氧、根系活力降低、植物叶片气孔关闭、生长受限(陈芳清,2008);严重阻碍其生长发育,甚至会导致死亡(朱启红和夏红霞,2012)。水岸生态系统中,水位梯度是一个重要的环境梯度,其如何影响植物生长、繁殖以及植物对水位变化的响应、水文过程对植被群落结构与空间格局的影响,都是水岸生态系统重要的研究方面(徐治国,2006)。水文条件对滨水植被的作用机理是水岸生态研究的焦点(杨涛,2010;崔心红,2012)。国内外学者开展了水文条件对水岸生态系统植物影响(彭素琴,2010)、水位月变化的物种多样性(Riis,2002)、不同水位梯度下三江平原典型沼泽群落多样性特征变化与响应差别(杨涛,2010)以及芦苇的抗旱性等多方面研究(王俊刚,2002),但主要是针对水生植物芦苇、香根草、空心莲

收稿日期:2018-01-16

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013zx07101014-004);上海市重点学科建设项目(Y1110, S30701)。

作者简介:胡茜茜,1994年生,女,硕士研究生,专业方向为水域生态学。E-mail:huqianye@163.com

通信作者:张饮江,1961年生,男,教授,主要从事水域生态工程研究。E-mail:yjzhang@shou.edu.cn

子草等野生物种的野外调查(崔心红,2012);而在可控条件下进行挺水植物的水文响应研究相对薄弱。

本文选用常见挺水植物花菖蒲(*Iris ensata* var. *hortensis*)、泽苔草(*Caldesia parnassifolias*)、黄花鸢尾(*Iris pseudacorus*)、美人蕉(*Canna indica*)、再力花(*Thalia dealbata*)和水葱(*Scirpus tabernaemontani*)为材料,研究其在不同水位梯度的生长指标、叶绿素含量以及酶活变化等,旨在揭示水分胁迫对挺水植物生长、繁育的影响,以期为滨水带生态保护与合理利用以及退化与恢复研究提供理论依据,对湿地恢复的植物种类选择、水生植物生长水位联动控制等提供关键技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

选择生长状态良好、同类植物大小(株高)、生物量、叶片数基本相同的花菖蒲、泽苔草、黄花鸢尾、美人蕉、再力花和水葱,实验所需的底泥及水体均取于上海川沙九菊圃苗木基地。花菖蒲、泽苔草、黄花鸢尾、美人蕉、再力花和水葱植株初始地上部分高度分别为41~52 cm、64~76 cm、81~100 cm、61~88 cm、177~223 cm和141~208 cm;初始根长分别为22~28 cm、22~23 cm、22~25 cm、12~16 cm、27~28 cm和15~27 cm。

1.2 实验设计

实验于2016年7月11日至9月28日在上海海洋大学室外实验基地进行。模拟自然植物生长环境,透光圆筒容器直径50 cm,高度分别设置为50 cm、100 cm、150 cm和200 cm,为避免下雨对水位的影响,雨天将透光圆筒盖上盖子。底部铺设10 cm厚底泥,注入与底泥同高水位(认定水位0 cm),然后将6种挺水植物按25株/m²移栽至容器中,试养28 d后注水。根据不同挺水植物适合水深不同(朱启红和夏红霞,2012;张饮江,2012),把植株分为3组。第1组为湿地型花菖蒲和泽苔草,水位梯度分别为45 cm、30 cm、15 cm、0 cm和-5 cm;第2组为浅水型美人蕉和黄花鸢尾,水位梯度设置分别为90 cm、60 cm、30 cm、0 cm和-5 cm;第3组为深水型再力花与水葱,水位梯度分别设置为150 cm、100 cm、50 cm、0 cm和-5 cm;同时分别设置3个平行组,以水位0 cm为对照组。

实验期间,每日9:00和17:00对实验容器补水,以维持各容器的水位梯度,实验末期测定植物生长指标、淹水叶片叶绿素。自淹水之日起,每10 d

检测1次,共6次检测植株叶片超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)含量。

1.3 检测方法

实验末期观察外伤症状、株高、分株数等外观生长状况。通过外伤症状目测估计法(秦天才,1997)将外伤症状分4级。I级:正常生长(无伤害),目测不到伤害症状;II级:轻度伤害,仅植株中心部分失绿;III级:中度伤害,植株中心部位及成熟叶片边缘不同程度失绿;IV级:重度伤害,整株植物叶片失绿变黄,萎蔫、甚至死亡。

存活率=(原株存活株数/原株数)×100%

发芽率=(新增株数/原株数)×100%

叶绿素测定采用80%丙酮-分光光度法(朱广廉,1990),分别从3个平行组各采叶片0.20 g,研磨匀浆后过滤,丙酮定容到25 mL,用分光光度法分别在645 nm和663 nm测定吸光度;植株叶片SOD活性指标采用分光光度法;MDA含量采用硫代巴比妥酸法(朱启红和夏红霞,2012)。通过下列公式计算叶绿素a和叶绿素b含量:

$$C_a = 12.7 \times A_{663} - 2.59 \times A_{645} \quad (1)$$

$$C_b = 22.9 \times A_{645} - 4.67 \times A_{663} \quad (2)$$

式中: C_a 、 C_b 为叶绿素a、叶绿素b含量; A_{663} 、 A_{645} 为波长为663 nm、645 nm的吸光值。

1.4 数据处理

采用Excel 2003、SPSS 17.0和Prism5.0软件对数据分析与处理。

2 结果与分析

2.1 外形变化

通过比较在不同水位梯度下挺水植物生长主要形态指标(表1),发现花菖蒲在各水位能正常生长。在中水位下,植株生长较好,株高较高,分株数最多,存活率100%,发芽率最高,达55.56%;高水位下,植株出现部分枯萎和死亡,但植物能正常发芽。泽苔草在各水位下良好生长,无论株高、分株数、存活率、发芽率都较高;从外伤症状看,泽苔草较好地适应了种植环境,生长良好;从株高看,在水位15~45 cm时的株高较高。

美人蕉能在各水位正常生长,其中在中水位、高水位生长较好,在低水位、零水位和潜水位下,出现部分枯萎、死亡,因受台风(大风)影响,造成一定损伤,导致存活率较低,但仍有较高的发芽率;从分株数和发芽率看,植株在低水位生长较好。黄花鸢尾在各水位下外伤症状明显,可能是夏季高温对其生

长抑制明显,从潜水位到高水位,出现了不同程度的损伤,其中中水位、高水位下植株损伤最严重;从株高看,因大风袭击影响,对低水位、零水位、潜水位株高较低;从分株数看:低水位>潜水位>零水位=中水位>高水位;从存活率看:低水位=中水位>高水位>潜水位>零水位;从发芽率看:零水位>低水位>潜水位>高水位>中水位。

表 1 不同水位梯度下 6 种挺水植物的生长状况

Tab.1 Growth of the six emergent plants at different water levels

植物种类	水位梯度/ cm	外伤 症状	株高/ cm	分株 数	存活率/ %	发芽率/ %
花 菖 蒲	45	II	46~58	8	83.33	33.33
	30	I	47~55	14	100.00	55.56
	15	I	42~48	12	100.00	50.00
	0	I	38~50	12	100.00	20.00
	-5	I	44~51	10	100.00	20.00
泽 苔 草	45	I	78~90	30	100.00	100.00
	30	I	87~96	28	100.00	71.43
	15	I	86~96	36	100.00	111.76
	0	I	68~76	30	100.00	66.67
	-5	I	65~71	32	100.00	100.00
美 人 蕉	90	I	90~105	8	100.00	60.00
	60	I	94~143	11	100.00	120.00
	30	II	47~78	15	50.00	200.00
	0	II	45~73	11	33.33	150.00
	-5	II	40~69	10	40.00	160.00
黄 花 鸢 尾	90	III	68~79	7	71.43	28.57
	60	III	67~85	8	75.00	25.00
	30	II	38~45	10	75.00	50.00
	0	II	46~58	8	57.15	57.14
	-5	II	45~67	9	66.67	33.33
再 力 花	150	-	-	-	-	-
	100	I	115~207	10	100.00	100.00
	50	I	114~178	9	100.00	50.00
	0	I	107~156	9	100.00	80.00
	-5	I	105~145	8	100.00	60.00
水 葱	150	-	-	-	-	-
	100	I	110~173	16	100.00	220.00
	50	I	105~148	16	100.00	128.57
	0	I	116~138	18	100.00	200.00
	-5	I	96~136	15	100.00	200.00

注: I 级为正常生长(无伤害); II 级为轻度伤害; III 级为中度伤害; IV 级表示重度伤害。

Note: level I indicates normal growth (no damage); level II indicates mild damage; level III indicates moderate damage; level IV indicates severe damage.

由于受台风影响,再力花与水葱在高水位(150 cm)容器被毁坏,所以仅分析中水位、低水位、零水位和潜水位情况。从外伤症状和存活率看,再力花和水葱均能较好适应种植环境,生长良好。从株高看,两种挺水植物均表现为:中水位>低水位>

零水位>潜水位。从分株数看,再力花在中水位出现最多,其次是低水位与零水位,潜水位最少。水葱在零水位出现最多分株,为 18 株,其后是中水位、低水位以及潜水位。从发芽率看,再力花在中水位下最高,其次分别为零水位、潜水位、低水位;水葱的发芽率为:中水位>零水位=潜水位>低水位。

2.2 叶绿素含量

叶绿素含量是衡量叶片生理功能的重要生理指标。不同水位梯度对挺水植物叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 和叶绿素 a/b 的影响如图 1。

花菖蒲叶绿素 a 在潜水位最高,为 0.73 mg/g,叶绿素 b 在零水位最高,为 0.41 mg/g,叶绿素 a+b 以潜水位最高,为 1.11 mg/g,花菖蒲叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 在不同水位梯度下差异显著($P<0.05$);叶绿素 a/b 在中水位最大,达 2.11,其次潜水位、零水位、低水位、高水位,但差异均不显著($P>0.05$)。泽苔草叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 均以潜水位最高,分别为 1.01 mg/g、0.52 mg/g、1.53 mg/g;叶绿素 a/b 以低水位最高,为 2.87,且差异显著($P<0.05$)。

美人蕉叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 含量则以高水位最大,分别为 0.70 mg/g、0.24 mg/g、0.94 mg/g;叶绿素 a/b 也在高水位最大,为 2.95,其次为中水位、潜水位、低水位、零水位。黄花鸢尾则与美人蕉相反,叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 含量以潜水位最大,分别为 0.42 mg/g、0.19 mg/g、0.61 mg/g;叶绿素 a/b 在零水位最高,为 2.43,其次为潜水位、高水位、低水位、中水位,但差异均不显著($P>0.05$)。

再力花与水葱叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 均以中水位为最大,再力花分别为 1.23 mg/g、0.62 mg/g、1.85 mg/g,水葱分别为 0.92 mg/g、0.41 mg/g、1.33 mg/g;再力花叶绿素 a/b 以低水位最高,为 3.07,其次零水位、潜水位、中水位;水葱叶绿素 a/b 则以零水位最高,达 4.36,其次潜水位、中水位、低水位,且差异显著($P<0.05$)。

2.3 超氧化物歧化酶(SOD)含量

超氧化物歧化酶(SOD)是植物防御活性氧伤害的重要酶。植物的逆境伤害大都与活性氧有关,而植物体往往通过提高自身 SOD 等酶的活性来清除由胁迫而产生自由基,以增强其抗逆性(黄雪方, 2012)。图 2 显示,在整个实验阶段,花菖蒲、泽苔草、美人蕉、黄花鸢尾、再力花和水葱 6 种挺水植物在零水位下,SOD 活性总体表现较平稳。

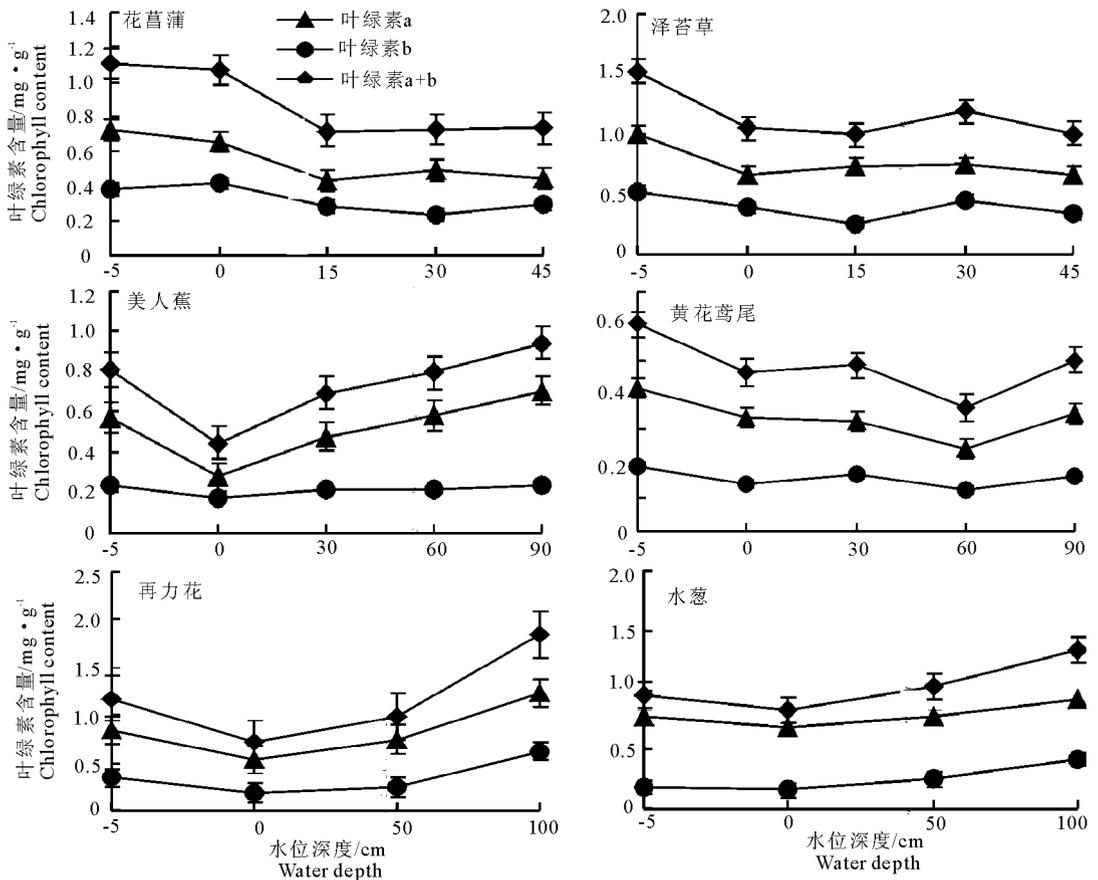


图1 不同水位梯度下6种挺水植物叶绿素含量的变化

Fig.1 Variation of leaf chlorophyll content in the six emergent plants with water level

花菖蒲叶片在实验初期(10 d)的SOD活性较稳定,而在20 d后出现明显下降,其中高水位下降幅度最大,下降了42.64%;实验后期(20~50 d),各水位下SOD均有所提高,且以高水位提高最明显,为33.19%。泽苔草叶片在实验期间的SOD活性整体均较为稳定,实验末期略有提高。

美人蕉在实验初期(10 d)高水位时下降明显,至20 d时下降至42.17%,下降幅度最大;中水位、低水位、潜水位在实验初期均表现较稳定,在20 d时略有下降,实验后期各水位也均有所提高。黄花鸢尾在实验期间各水位梯度均表现为上升趋势,且以中水位升幅最大,升高213%。

再力花在实验初期(10 d)各水位下出现不同程度的下降,其中以潜水位下降最快,下降78.74%;20 d内,低水位、潜水位保持下降态势,中水位下SOD略有回升;后期,各水位下SOD均有所提升。水葱在实验初期(10 d),低水位、高水位下SOD出现下降,以中水位降幅略高;实验后期,各水位叶片SOD有所提高。

2.4 丙二醛(MDA)含量

丙二醛(MDA)是植物在逆境胁迫过程中膜脂过氧化作用强弱的重要指标。MDA积累是活性氧毒害作用的表现(陈少裕,1991)。由图3可见,花菖蒲、泽苔草、美人蕉、黄花鸢尾、再力花和水葱6种挺水植物在零水位下,MDA总体较平稳。

花菖蒲在水位胁迫10 d时,MDA含量均迅速增加,说明其受到水位胁迫后,导致叶片细胞膜脂过氧化作用增强;实验中后期,中水位、低水位和潜位位的MDA含量呈显著下降趋势,并最终与零水位MDA相近,高水位下花菖蒲叶片MDA在30 d前呈下降趋势,实验后期,出现较大提升,较实验起始升幅89.09%。泽苔草在10 d时,各水位下叶片MDA均有提高;低水位、潜水位在20 d有明显下降,后与零水位保持稳定;中水位、高水位20 d仍保持上升趋势,实验后期开始下降,40 d同零水位相近。

美人蕉呈现了与花菖蒲MDA类似的状态,10 d内低水位、中水位和高水位明显提高,潜水位相

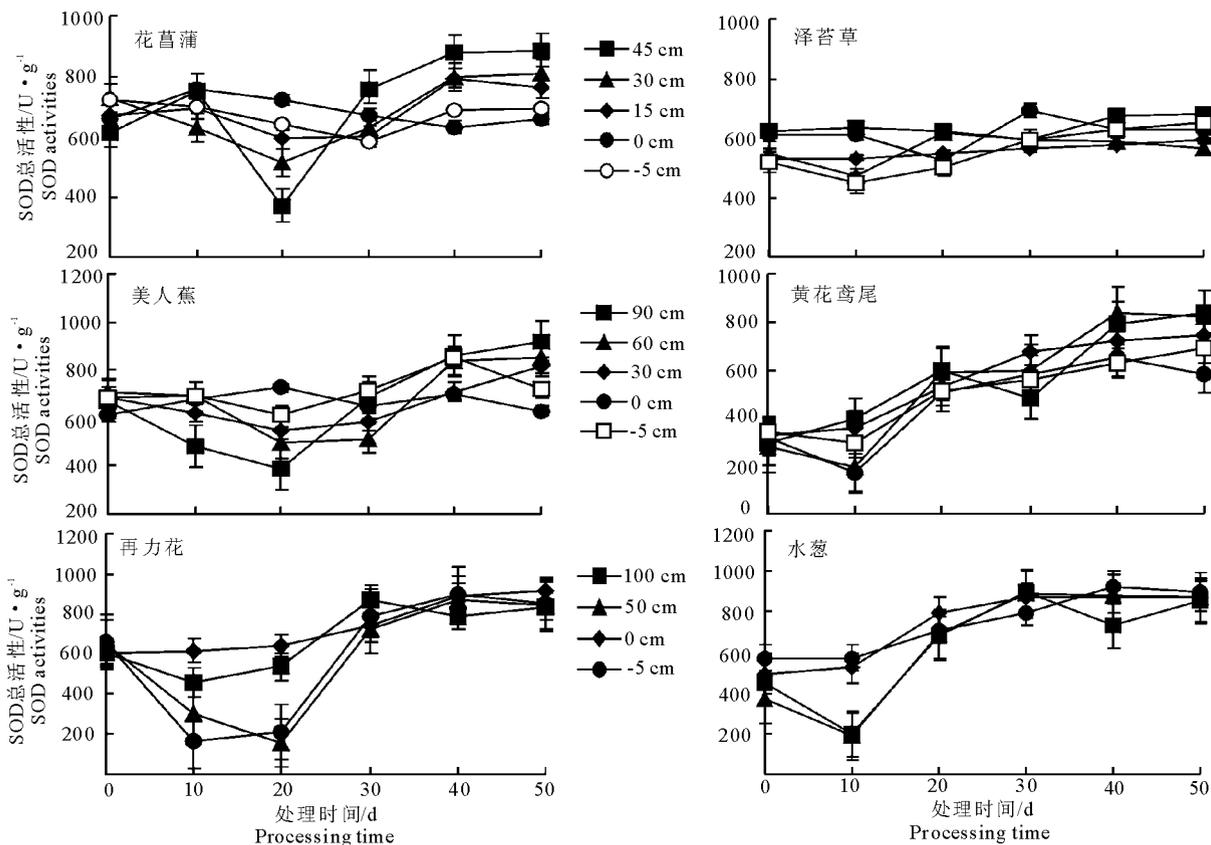


图 2 不同水位梯度下 6 种挺水植物叶片的 SOD 总活性变化

Fig.2 Variation of SOD activity in the six emergent plants with water level

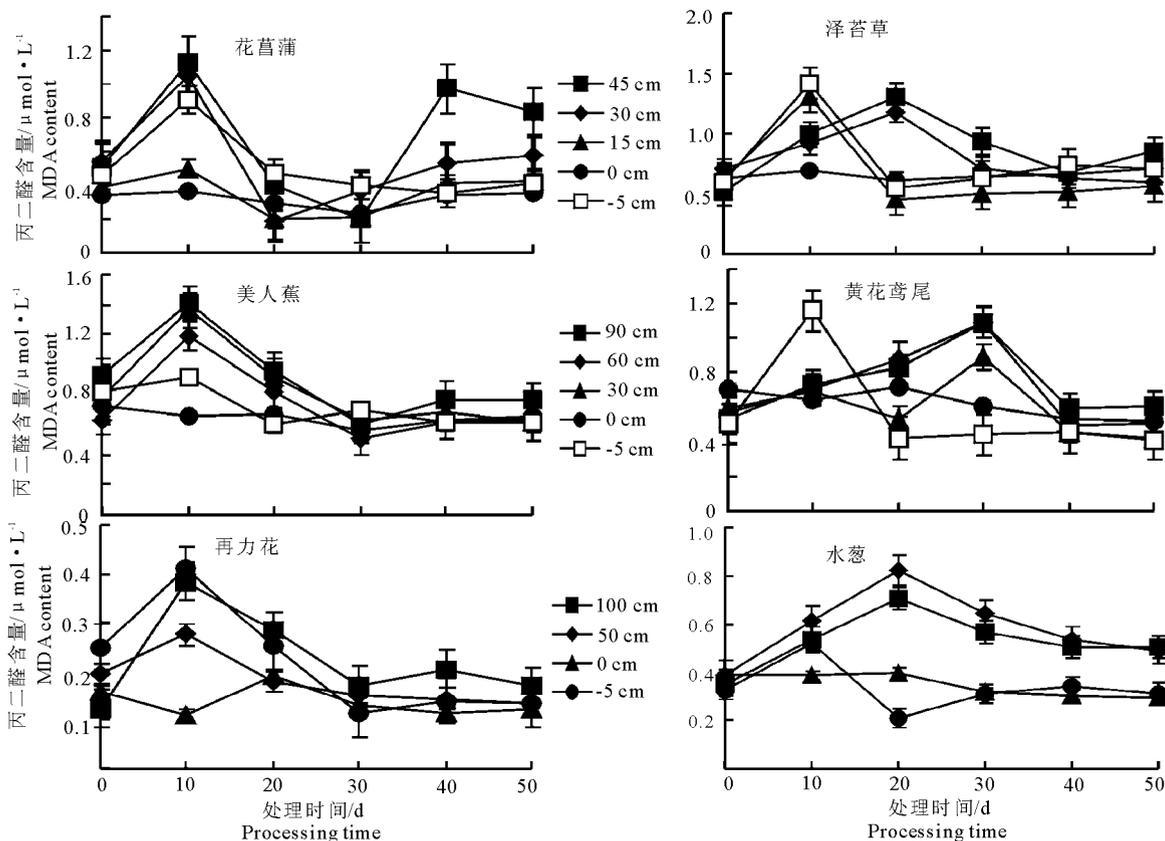


图 3 不同水位梯度下 6 种挺水植物叶片的 MDA 含量变化

Fig.3 Variation of MDA content in the six emergent plants with water level

比较平稳;10~30 d,各水位下美人蕉呈下降趋势;后期(30~50 d),趋稳定于零水位。黄花鸢尾低、中、高水位在10 d内保持稳定,潜水位出现略微提升;10 d后,低、中、高水位出现略微提升,潜水位开始下降;20 d后潜水位叶片MDA保持平稳;30 d后,低、中、高水位也出现下降,与零水位持平。

实验初期,再力花和水葱各水位叶片MDA均出现上升趋势;再力花在10 d后,各水位下MDA开始下降,20 d后与零水位持平,后保持稳定;水葱潜水位在10 d后开始下降,后稳定于零水位;低、中水位下水葱上升一直持续至20 d后下降,实验末期MDA高于潜水位、零水位。

3 讨论

3.1 不同水位梯度对挺水植物存活与生长的影响

水位胁迫对植物的危害主要是由于水分过多所导致的次生胁迫如低氧或缺氧造成的(Boamfa, 2003)。淹水条件下,湿地处于还原环境,有机残体的分解速率缓慢(徐治国, 2006),使得植物从有氧呼吸转向无氧呼吸,碳水化合物利用效率降低,加剧体内营养物质的消耗,造成植物体内积累物质减少,生物量降低(王海锋, 2008; Panda, 2008)。为了缓解水淹对植株造成的伤害,不同的耐淹植物能够采取不同的策略来适应水淹环境,有的植物可以加速枝条和叶片的伸长生长,以快速“逃离”水淹逆境(Vecsenek, 2006);而有的植物则减缓生长,降低能量消耗,依赖大量的营养储备耐受长时间的水淹(王海锋, 2008)。本研究发现,花菖蒲、泽苔草、美人蕉、黄花鸢尾、再力花和水葱高总体表现出高、中、低水位高于零、潜水位(美人蕉、再力花、水葱部分株高过低主要因受大风影响折断造成),表现出“逃离”状态。花菖蒲、黄花鸢尾新的细长叶片、再力花、水葱的伸长枝条和美人蕉、泽苔草快速产生的新叶片都是植物对水淹环境积极的适应性响应,对于植物缓解水下缺氧的环境,甚至是“逃离”水淹逆境都是有利的(Kende, 1998);同时,植物体内积累物质减少,引起物质在各种生理过程中重新分配(付天飞, 2005)。不同水淹强度带来物质积累差异,进而导致植物生长指标的变化。不同水位胁迫环境,水生植物表现出不同的分株数和发芽率(付天飞, 2005)。本实验的花菖蒲、泽苔草、美人蕉、黄花鸢尾、再力花和水葱6种挺水植物,夏季中、低水位比高水位、潜水位更有利于发芽,其中以水葱最高,达到220%。

存活率是判断植物水淹耐受能力的重要指标,

也是判断其在滨水带可能分布范围的重要参数(Vervuren, 2003)。van Eck等(2004)对莱茵河滨水带植物研究发现,植物在河岸带能够分布的最低水位线与植物在完全水淹处理下的存活率相关;植物在水下地上部分的伸长生长是“逃离”水淹逆境的重要生存策略,但在植物没有完全“逃”出逆境时,可能会因为消耗更多的营养储备而对植株的存活造成不利影响(Vecsenek, 2006)。本研究发现,6种挺水植物的生存率几乎不受实验水位的影响,能较好地逃出水淹逆境。花菖蒲在高水位45 cm的生长受到明显影响;黄花鸢尾在低水位生长较好,过高或过低的水位对其生长均造成不良影响。

3.2 挺水植物叶绿素对水位梯度的响应

叶绿素是光合作用的物质基础,光合作用水平在一定程度上取决于叶绿素含量的高低,影响植物生长的因素必然会影响到植物的光合作用水平,因此植物叶片的叶绿素含量是植物光合作用能力的重要生理指标。水位变化可导致植物叶片相对含水量变化,进而影响叶绿素的生物合成和已合成的叶绿素分解,在一定范围内叶绿素含量高低直接影响叶片的光合能力(崔心红, 2012)。本实验中,花菖蒲、泽苔草、黄花鸢尾的叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b在潜水位、零水位达到最大,水位升高,叶绿素含量下降;与之相反,美人蕉的叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b在高水位最大;再力花、水葱除高水位因台风损伤外,在中水位最大。说明美人蕉、再力花、水葱能更好地适应高水位环境。

3.3 挺水植物SOD对水位梯度的响应

水分胁迫导致植物叶片细胞产生大量的过氧化氢(H_2O_2)、羟自由基($\cdot OH$)、单线态氧(1O_2)、超氧化物阴离子自由基($O_2^{\cdot -}$)、氧烷基($RO\cdot$)、过氧基($ROO\cdot$)、氧化氮等活性氧(ROS)。在植物中活性氧会引起植物代谢失活、细胞死亡、光合作用速率下降、同化物的形成减少,甚至造成植物品质下降和产量降低等严重后果(马旭俊和朱大海, 2003)。如 $O_2^{\cdot -}$ 不能及时清除,在 Fe^{2+} 存在和一定的生理条件下, $O_2^{\cdot -}$ 可促进Fenton反应的进行,使 H_2O_2 转变为 $\cdot OH$,还可通过Haber-Weiss反应形成 $\cdot OH$,活性氧中的 $\cdot OH$ 直接诱发膜脂过氧化,导致膜组成成分比率改变,膜流动性下降,膜的生物学功能受到破坏,是对细胞毒害性最强的一种自由基(Matés, 1999)。SOD是第一个参与活性氧的清除反应,对于清除氧自由基,防止氧自由基破坏细胞的组成、结构和功能,保护细胞免受氧化损伤具有十分重要的

作用(马旭俊和朱大海, 2003), 在抗氧化酶类中处于核心地位。SOD 抗氧化酶的催化过程是: $O_2^- + 2H^+ \rightarrow H_2O_2 + O_2$; 当植株处在不同水位梯度下时, 挺水植物根系供氧不足, 电子传递受阻, ATP 的合成受到抑制, 造成植株体内 ROS 大量累积, 从而导致植物受害(王良桂和杨秀莲, 2009)。

本研究显示, 6 种挺水植物体为了抵抗不同水位对其生长的不利影响, 不同程度地启动 SOD 表达, 过氧化物酶活性增加, 清除厌氧胁迫过程中产生的 ROS, 增强自身抗性, 减少水分胁迫对植物的伤害(张丹凤, 2009); 作为植物细胞中最主要的抗氧化酶, SOD 显示出极强的调节作用, 增强了植株的抗逆性(刘文革, 2006)。本实验显示, 实验前期(10 d), 6 种挺水植物在不同水位梯度下叶片中 SOD 活性出现不同程度下降, 与其他胁迫(盐、干旱等)处理下 SOD 活性增加不同(苏慧敏, 2011), 这因为 SOD 易受底物 ROS 浓度的诱导, 但可能是淹水初期 ROS 的积累量不足以诱导 SOD 活性发生显著变化。随着挺水植物对不同水位梯度环境的适应, 植物的 SOD 开始回升, 花菖蒲、美人蕉潜水位、低、中、高水位下叶片 SOD 活性高于零水位, 且高水位 > 中水位 > 低水位 > 潜水位 > 零水位, 表明不同水位梯度下植物启动了不同程度的抗氧化酶保护系统, 从而诱导植物体内 SOD 活性升高, 清除过多的 ROS 以降低对植物的毒害程度, 说明花菖蒲、美人蕉对淹水胁迫具有较强的抗性。再力花和水葱随着水位的降低, 叶片 SOD 活性升高, 潜水位最高, 较实验初期分别提高了 40.57% 和 63.79%, 说明再力花、水葱能较好的适应淹水环境, 而对于干旱胁迫具有较强的抗性。泽苔草各水位下 SOD 最终与零水位基本持平, 说明泽苔草能较好的适应实验设置的水位梯度。黄花鸢尾各水位下保持稳步上升趋势, 可能跟植物本身特性有关, 说明植物迅速启动了抗氧化酶保护系统, 从而诱导植物体内 SOD 活性升高。

3.4 挺水植物 MDA 对水位梯度的响应

植物器官衰老或在逆境下遭受伤害, 往往发生膜脂过氧化作用, 丙二醛(MDA)是膜脂氧化的最终产物, 其含量可以反映植物遭受逆境伤害的程度, 含量越高, 其受害程度越大(林杰, 2009)。MDA 从膜上释放出来后, 可以与蛋白质和核酸反应, 从而丧失功能, 还可使纤维素分子间的桥键松弛, 或抑制蛋白质的合成。不同植物体内, 各个反应进行的程度不同, 因而最终的 MDA 含量会有所不同; 这与植物的耐受程度也是有关系的。本次研究结果表明,

在实验前期, 6 种挺水植物不同水位梯度下叶片 MDA 含量均有所提升。植物在逆境条件下体内通常产生活性氧, 从而启动膜脂过氧化或膜脂脱脂作用, 通常表现为 MDA 的积累(彭秀, 2010), 本实验也呈现相似的结果。实验中后期, 各挺水植物在不同水位梯度下植株 MDA 含量逐渐降低, 说明植物体内清除活性氧自由基的能力增强, 从而抑制了膜脂过氧化作用, 减少了细胞膜结构和功能的改变。

参考文献

- 阿娟, 张福顺, 张晓东, 等, 2012. 荒漠植物群落特征及其与气候因子的对应分析[J]. 干旱区资源与环境, 26(1): 174-178.
- 陈芳清, 李永, 鄧光武, 2008. 水蓼对模拟水淹的生理生态学响应[J]. 生态环境, 17(3): 1096-1099.
- 陈少裕, 1991. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物生理学通讯, 27(2): 84-90.
- 崔心红, 2012. 水生植物应用[M]. 上海, 上海科学技术出版社: 95-105.
- 付天飞, 曾波, 叶小齐, 等, 2005. 野古草(*Arundinella hirta*)对水淹逆境的生殖响应[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 30(2): 325-328.
- 黄雪方, 李冬林, 金雅琴, 等, 2012. 5 种挺水植物对污水浸淹的生理反应及净水效果[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 36(5): 66-70.
- 林杰, 柯金炼, 魏道军, 2009. 铅胁迫对香根草叶片膜系统及抗氧化系统的影响[J]. 福建农业学报, 24(3): 254-257.
- 刘文革, 阎志红, 王川, 等, 2006. 西瓜幼苗抗氧化系统对淹水胁迫的响应[J]. 果树学报, 23(6): 860-864.
- 马旭俊, 朱大海, 2003. 植物超氧化物歧化酶(SOD)的研究进展[J]. 遗传, 25(2): 225-231.
- 彭素琴, 2010. 植物水分胁迫研究进展[J]. 安徽农业科学, 38(15): 7748-7749, 7771.
- 彭秀, 李彬, 王铁浩, 等, 2010. 淹水胁迫对香根草生理生化特性的影响[J]. 四川林业科技, 31(2): 64-67.
- 秦天才, 吴玉树, 黄巧云, 等, 1997. 镉、铅单一和复合污染对小白菜抗坏血酸含量的影响[J]. 生态学杂志, 16(3): 31-34.
- 苏慧敏, 何丙辉, 蔡兴华, 等, 2011. 水分胁迫对太阳扇扦插苗形态和生理特征的影响[J]. 生态学杂志, 30(10): 2185-2190.
- 王海锋, 曾波, 乔普, 等, 2008. 长期水淹条件下香根草(*Vetiveria zizanioides*)、菖蒲(*Acorus calamus*)和空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)的存活及生长响应[J]. 生态学报, 28(6): 2571-2580.
- 王海洋, 陈家宽, 周进, 1999. 水位梯度对湿地植物生长、繁殖

- 和生物量分配的影响[J]. 植物生态学报, 23(3): 269 - 274.
- 王俊刚, 陈国仓, 张承烈, 2002. 水分胁迫对2种生态型芦苇 (*Phragmites communis*) 的可溶性蛋白含量、SOD、POD、CAT活性的影响[J]. 西北植物学报, 22(3): 561 - 565.
- 王良桂, 杨秀莲, 2009. 淹水对2个桂花品种生理特性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 36(3): 382 - 386.
- 徐治国, 何岩, 闫百兴, 等, 2006. 营养物及水位变化对湿地植物的影响[J]. 生态学杂志, 25(1): 87 - 92.
- 杨涛, 宫辉力, 胡金明, 2010. 长期水分胁迫对典型湿地植物群落多样性特征的影响[J]. 草业学报, 19(6): 9 - 17.
- 张丹凤, 2009. 淹水胁迫下 microRNA 介导的玉米不定根生长及抗氧化机制研究[D]. 保定: 河北农业大学.
- 张饮江, 金晶, 董悦, 等, 2012. 退化滨水景观带植物群落生态修复技术研究进展[J]. 生态环境学报, 21(7): 1366 - 1374.
- 朱广廉, 钟海文, 张爱琴, 1990. 植物生理学实验[M]. 北京: 北京大学出版社: 51 - 54.
- 朱启红, 夏红霞, 2012. 淹水胁迫对石菖蒲抗氧化酶系统的影响[J]. 水生态学杂志, 33(4): 138 - 141.
- Boamfa E I, Ram P C, Jackson M B, et al, 2003. Dynamic aspects of alcoholic fermentation of rice seedlings in response to anaerobiosis and to complete submergence: Relationship to Submergence Tolerance[J]. Annals of Botany, 91: 279 - 290.
- Kende H, van deer Knaap E, Cho H T, 1998. Deepwater rice: A model plant to study stem elongation[J]. Plant Physiology, 118: 1105 - 1110.
- Matés J M, Sánchez-Jiménez F, 1999. Antioxidant enzymes and their implications in pathophysiologic processes[J]. Front Biosci, 4: 339 - 345.
- Panda D, Sharma S G, Sorkar R K, 2008. Chlorophyll fluorescence parameters, CO₂ photosynthetic rate and regeneration capacity as a result of complete submergence and subsequent re-emergence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Aquatic Botany, 88(2): 127 - 133.
- Riis T, Hawes I, 2002. Relationships between water level fluctuations and vegetation diversity in shallow water of New Zealand lakes[J]. Aquatic Botany, 74: 133 - 148.
- Stoate C, Bldi A, Beja P, et al, 2009. Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe-A review[J]. Journal of Environmental Management, 91: 22 - 46.
- van Eck W H J M, van de Steeg H M, Blom C W P M, et al, 2004. Is tolerance to summer flooding correlated with distribution patterns in river floodplains? A comparative study of 20 terrestrial grassland species [J]. Oikos, 107: 393 - 405.
- Vecsenek L A C J, Colmer T D, Pierik R, et al, 2006. How plants cope with complete submergence[J]. New Phytologist, 170(2): 213 - 226.
- Vervuren P J A, Blom C W P M, de Kroon H, 2003. Extreme flooding events on the Rhine and the survival and distribution of riparian plant species[J]. Journal of Ecology, 91: 135 - 146.
- Yamada S, Okubo S, Kitagawa Y, et al, 2007. Restoration of weed communities in abandoned rice paddy fields in the Tama Hills, central Japan[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 119: 88 - 102.

(责任编辑 万月华)

Response of Six Emergent Plants to Water Level Stress

HU Qian-ye¹, JIN Jing¹, LAN Yan-yue¹, LI Zhen¹, HUA Wen-feng¹, ZHANG Yin-jiang^{1,2}

(1.College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University,
Shanghai 201306,P.R.China;

2.Engineering Research Center for Water Environment Ecology, Shanghai Ocean
University, Shanghai 201306,P.R.China)

Abstract: *Iris ensata var. hortensis*, *Caldesia parnassifolias*, *Iris pseudacorus*, *Canna indica*, *Thalia dealbata* and *Scirpus tabernaemontani* are emergent plants commonly selected for riparian ecosystem conservation and wetland restoration. In this study, we investigated growth parameters of the six plants at different water depths (-5 - 150 cm), focusing on external damage, plant height, ramet number, survival rate, germination rate and the chlorophyll content, SOD activity and MDA content of leaves. The aim of the study was to determine the influence of water stress on the growth and reproduction of emergent plants. From July 16 to September 28, 2016, a pot experiment was conducted that simulated the natural habitat. The plants were divided into three groups according to preferred water depth. Five water depths were set for each group: 45 cm, 30 cm, 15 cm, 0 cm and -5 cm for *Iris ensata var. hortensis* and *Caldesia parnassifolias*; 90 cm, 60 cm, 30 cm, 0 cm and -5 cm for *Iris pseudacorus* and *Canna indica*; 150 cm, 100 cm, 50 cm, 0 cm and -5 cm for *Thalia dealbata* and *Scirpus tabernaemontani*. The control group was planted at a depth of 0 cm. During the experiment, water level was adjusted at 9 : 00 and 17 : 00 each day and SOD activity and MDA content were measured at 10-day intervals. Plant height, external damage, ramet number, survival rate, germination rate and chlorophyll content were determined at the end of the experiment. The study yielded five primary findings: (1) Except for *Iris pseudacorus*, the plants showed high tolerance to water level stress and had high survival and germination rates in all treatments. (2) The optimal water depth, based on plant height, ramet number and rates of survival and germination, was 30 cm for *Iris ensata var. hortensis*, 60 cm for *Canna indica* and 100 cm for *Thalia dealbata* and *Scirpus tabernaemontani*. (3) Maximum chlorophyll content in *Iris ensata var. hortensis*, *Caldesia parnassifolias* and *Iris pseudacorus* occurred at -5 to 0 cm and decreased with water depth. Maximum chlorophyll content occurred at 90 cm for *Canna indica* and at 100 cm for *Thalia dealbata* and *Scirpus tabernaemontani*. (4) SOD activity in all six species initially decreased (day 10) and then gradually increased. SOD activity in *Iris ensata var. hortensis* and *Canna indica* in waterlogged and drought treatments was higher than in the control group. SOD activity in *Thalia dealbata* and *Scirpus tabernaemontani* increased as water level decreased, with the highest SOD activity at -5 cm. The SOD activity of *Caldesia parnassifolias* did not differ significantly from the control group for any treatment. SOD activity in *Iris pseudacorus* increased gradually at different water depth treatments. (5) The MDA content of all plants in all treatments increased early in the experiment and then decreased. In conclusion, all six plants can be used for ecological restoration of riparian zones; *Caldesia parnassifolias* tolerates different water levels, *Iris ensata var. hortensis* and *Iris pseudacorus* grow better at low water levels and *Canna indica*, *Thalia dealbata* and *Scirpus tabernaemontani* are adapted to higher water levels. This study provides a scientific basis to support riparian conservation and improve plant selection for wetland restoration.

Key words: emergent plant; water level stress; growth parameters; riparian ecosystem