

DOI: 10.5846/stxb201807121519

朱光冕, 曾柏全, 曾文斌, 沈燕, 詹鹏, 陈介南, 吕贤良. 弱光下不同水深对长喙毛茛泽泻生长及生理特性的影响. 生态学报, 2019, 39(19): - .
Zhu G M, Zeng B Q, Zeng W B, Shen Y, Zhan P, Chen J N, Lü X L. Effects of different water depths on the growth and physiological characteristics of *Ranalisma rostratum* under low light intensity. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): - .

弱光下不同水深对长喙毛茛泽泻生长及生理特性的影响

朱光冕¹, 曾柏全^{1,*}, 曾文斌¹, 沈燕¹, 詹鹏¹, 陈介南¹, 吕贤良²

1 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410000

2 浙江省丽水市莲都区林业局, 丽水 323000

摘要:在人工气候箱内,通过设置不同水深梯度(0 cm; 3 cm; 6 cm)和光照强度(标准光照:400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;低光照:240 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$),对长喙毛茛泽泻生物量、叶型特征和生理特征的影响,探讨长喙毛茛泽泻对不同水深和光照强度的适应性以及其濒危原因。结果表明:在同一光照强度下长喙毛茛泽泻叶生物量、茎生物量、根生物量、总生物量、叶宽、叶面积、过氧化物酶(POD)活性、可溶性蛋白和可溶性糖都随水深的增加呈先升高后降低的趋势;丙二醛(MDA)随水深的增加呈先降低后升高的趋势;叶柄长度与水深呈正相关,脯氨酸含量与水深呈负相关。在同一水深条件下,光照强度的降低显著降低了叶生物量、茎生物量、总生物量、过氧化物酶(POD)活性、可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸的含量。由此可知,水深的变化和光照不足都将导致长喙毛茛泽泻生长减弱,且长喙毛茛泽泻对这些不利条件的适应能力较弱。剧烈的水深变化和上层植物的荫蔽可能是导致其濒危的重要原因。

关键词:水深;生长特性;弱光;生理特征;长喙毛茛泽泻

Effects of different water depths on the growth and physiological characteristics of *Ranalisma rostratum* under low light intensity

ZHU Guangmian¹, ZENG Baiquan^{1,*}, ZENG Wenbing¹, SHEN Yan¹, ZHAN Peng¹, CHEN Jienan¹, LV Xianliang²

1 College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410000 China

2 Liandu District Forestry Bureau, Lishui 323000 China

Abstract: In an artificial climatic cabinet, *Ranalisma rostratum* was subjected to three water depths which were 0 cm, 3 cm, and 6 cm, and two light intensity treatments which were 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and 240 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. By recording the biomass, foliar morphological characteristics, and other physiological characteristics, the adaption of *R. rostratum* to different water depths and light intensities, and the reason why the plant is endangered were concluded. Under the same light intensity, with increasing water depth, proline content decreased; petiole length increased; leaf biomass, stem biomass, root biomass, total biomass, leaf width, leaf area, peroxidase activity, soluble protein, and soluble sugar content initially increased but subsequently decreased; and malondialdehyde content initially decreased but subsequently increased. At the same water depth, low-light intensity stress decreased leaf biomass, stem biomass, total biomass, peroxidase activity, soluble protein, soluble sugar, and proline content. It can be concluded that lack of light intensity and a change in water depth can all lead to *R. rostratum*'s dysplasia and the plant cannot adapt well to these adverse conditions. Therefore,

基金项目:国家林业局野生动植物保护与自然保护区管理项目

收稿日期:2018-07-12; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baiquanzhn@163.com

in the wild, sharp changes in water depth and the shade from upper plants may be vital reasons for the endangerment of *R. rostratum*.

Key Words: water depth; growth; low light intensity; physiological characteristics; *Ranalisma rostratum*

在野外由于季节性降雨,水文条件较为复杂,湿生植物常生活在一个动态的环境中,经历洪水期、常水期和枯水期,水深的周期性变化对植物生长具有重要影响^[1-2]。不同植物对水深变化的响应不同,在水深不适宜时,适应性强的植物可以通过改变其生长情况和渗透调节物质的含量来适应不良的水深环境^[3-4]。光是植物生存和生长发育重要的环境因子之一,过度光照不仅会抑制植物的光合作用,还会导致光合器官的损伤^[5]。光照不足则会对植物产生不利的影响,弱光胁迫下植物的形态建成和生理生化过程往往会发生重大改变,其抗氧化酶^[6]、光合生理特性^[7]、生物量及叶型特征^[8]等生理生态特征都将出现显著性变化。

长喙毛茛泽泻(*Ranalisma rostratum*)为泽泻科(Alismataceae)毛茛泽泻属(*Ranalisma*),莲座状沼生小草本^[9]。该属有2种,在我国仅长喙毛茛泽泻1种,其天然种群仅分布在湖南茶陵,浙江丽水和江西东乡局部生境^[10]。由于人类对其生境的破坏和植物本身生存、竞争能力较差,湖南茶陵和江西东乡野外种群已消失^[11]。该种在分类学上具有特殊地位,为国家一级保护野生植物^[12]。野外调查表明,长喙毛茛泽泻分布于林下遮荫地带的浅水沼泽中,能忍受一定时间的水淹,但不能在深水中长期生存;在光照强度较高的地方,植株叶片往往发生叶片发黄的现象,而光照不足又导致植株矮小、生长缓慢。目前,对长喙毛茛泽泻的研究主要集中在生物学特性^[9-11]和繁殖特性^[13-14]等方面,但从水深和光照强度对植物的生长和生理特性的影响未见报道。本试验通过在人工气候箱内进行盆栽控水模拟不同水深和光照强度对于长喙毛茛泽泻生长和生理特性的影响,探讨植物野外濒危原因及其对环境的适应能力,为迁地保护和种群恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

供试材料采自浙江省丽水市莲都区南明山。试验地位于湖南省中南林业科技大学生命科学与技术学院(27°6′—28°10′N, 111°6′—113°10′E),属亚热带季风气候区,年降水量1300—1500 mm,年日照数1450—1686 h,年平均气温15.9—18.2℃。

1.2 试验材料

选用生长旺盛、长势基本一致的长喙毛茛泽泻作为供试材料,平均苗高(6±0.5) cm,叶片数为8叶,叶片呈卵圆形。实验采用盆栽法,盆钵规格为33 cm×19 cm×14 cm(长×宽×高)。

1.3 弱光和水深处理

2017年8月将盆栽苗移入人工气候箱内进行缓苗处理,培养条件为光照时间13 h,白天温度为(25±2)℃,夜间温度为(18±2)℃,昼夜湿度(80±5)%,光照强度(400±10) μmol m⁻² s⁻¹(在晴天9:00—10:00,采用LI—COR 6400便携式光合作用测定系统测定其光合特性)。实验采用双因素完全随机设计,共设置3个不同水深梯度:0 cm(水面与土面持平且保持表面湿润,形成气生环境)、3 cm(形成挺水环境)、6 cm(形成沉水环境)。根据长喙毛茛泽泻光合作用的特点设置400 μmol m⁻² s⁻¹(标准光照)和240 μmol m⁻² s⁻¹(低于其光饱和点,形成低光照)。每个处理设置5个重复。9月上旬开始处理,持续40 d,之后进行相关指标的测定。

1.4 生长和生物量的测定

不同水深和光照强度处理40 d后,从各处理组中随机选取5株植株,测定其叶长(游标卡尺测定)、叶宽、叶柄长度和叶面积(Li—3000型叶面积测定仪,美国LI—COR),并将根部泥土冲洗干净后,按根、茎、叶分别置于80℃烘箱内烘干至恒重,测定其生物量。

1.5 植物生理指标测定

取其叶片用于植物生理指标的测定(包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、丙二醛(MDA)、脯

氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖)。

其中 SOD 活性测定采用抑制氮蓝四唑的光还原作用来测定酶的活力^[15]、POD 活性采用愈创木酚法测定^[15]、MDA 含量采用硫代巴比妥酸法测定^[15]、脯氨酸采用酸性茚三酮法测定^[16]、可溶性糖采用蒽酮法测定^[15]、可溶性蛋白采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[15]。

1.6 数据处理

数据统计分析采用 SPSS 18.0 软件,作图采用 Origin 2018。平均值间的比较采用单因素方差分析(one-way ANOVA),多重比较采用 Duncan 新复极差法。水深与光照强度间的交互作用检验采用双因素方差分析(two-way ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 不同水深和光照强度对长喙毛茛泽泻各器官生物量及其分配的影响

从表 1 中可看出,40 d 后,在同一光照强度下,不同水深对长喙毛茛泽泻的叶生物量、茎生物量、根生物量和总生物量都具有极显著性影响($P < 0.01$),随着水深的增加,都呈现出先升高后降低的趋势,并在水深为 3 cm、标准光照下叶生物量(0.7 g)、茎生物量(0.2 g)、根生物量(0.24 g)和总生物量(1.15 g)分别出现最大值。在同一水深下,光照强度对植物叶生物量和总生物量具有极显著性影响($P < 0.01$),对植物茎生物量具有显著性影响($P < 0.05$),且水深与光照强度的交互作用对植物叶生物量和总生物量也产生显著性影响($P < 0.05$),在标准光照下植物叶生物量、茎生物量和总生物量都显著高于低光照下植物叶生物量、茎生物量和总生物量。但在同一水深条件下,不同光照强度对于植物根生物量没有显著性影响($P = 0.063$)。

表 1 不同水深和光照强度对长喙毛茛泽泻各器官生物量及其分配的影响

Table 1 Effects of water depth and light intensity on biomass of leaf, stem, root and their allocation in *Ranalisma rostratum*

处理 Treatments		叶生物量	茎生物量	根生物量	总生物量
光照 Light/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	水深 Water depth/cm	Leaf biomass/g	Stem biomass/g	Root biomass/g	Total biomass/g
标准光照	0	0.25±0.01Ac	0.13±0.03Ac	0.12±0.01Ac	0.49±0.01Ac
Standard light	3	0.70±0.01Aa	0.20±0.01Aa	0.24±0.01Aa	1.15±0.02Aa
	6	0.55±0.01Ab	0.16±0.05Ab	0.22±0.07Ab	0.92±0.03Ab
低光照	0	0.22±0.08Bc	0.12±0.02Bc	0.12±0.03Ac	0.46±0.07Bc
Low light	3	0.64±0.02Ba	0.19±0.03Ba	0.24±0.05Aa	1.05±0.03Ba
	6	0.49±0.08Bb	0.15±0.06Bb	0.22±0.05Ab	0.85±0.09Bb
方差分析	光照	49.977 **	6.517 *	4.211	49.316 **
Analysis of variance	水深	1333.752 **	229.100 **	275.697 **	1541.764 **
	光照×水深	2.549 *	0.932	0.61	4.762 *

同列中标有不同的大写字母表示不同光强间的差异,不同小写字母表示相同光强下不同水深间的差异($P < 0.05$); * 和 ** 表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著

2.2 不同水深和光照强度对长喙毛茛泽泻叶形态特征的影响

从表 2 中可看出,水深与光照强度对长喙毛茛泽泻叶型特征的影响各不相同。在同一光照强度下,不同水深对于植物叶片的叶宽和叶面积都具有极显著性影响($P < 0.01$),且水深与光照强度的交互作用对植物叶宽和叶面积也产生极显著性影响($P < 0.01$),随着水深的增加,植株叶宽和叶面积都呈现先升高后降低的趋势,并在水深处理为 3 cm 时,叶宽(2.16 cm)和叶面积(3.24 cm)出现最大值。水深与光照强度对植物叶长没有显著性影响($P = 0.061$)、($P = 0.487$),但水深与光照强度的交互作用对植物叶长有极显著性影响($P < 0.01$)。在同一水深条件下,光照强度对植物叶柄长度没有显著性影响($P = 0.859$),但在同一光照强度下,水深对于植物叶柄长度有显著性影响($P < 0.05$),植株的叶柄长度随水深的增加而增加。

表 2 不同水深和光照强度对长喙毛茛泽泻叶形态特征的影响

Table 2 Effects of water depth and light intensity on foliar morphological characteristics of *Ranalisma rostratum*

处理 Treatments		叶长	叶宽	叶柄长度	叶面积
光照 Light/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	水深 Water depth/cm	Leaf length/cm	Leaf width/cm	Petiole length/cm	Leaf area/cm ²
标准光照	0	2.39±0.64Aa	0.57±0.04Bc	4.1±0.77Ac	1.05±0.11Ac
Standard light	3	2.32±0.37Aa	1.76±0.07Ba	4.56±0.7Ab	3.24±0.51Aa
	6	1.84±0.11Aa	0.87±0.10Bb	5.79±0.97Aa	1.88±0.2Bb
低光照	0	1.63±0.16Aa	0.60±0.04Ac	3.76±0.58Ac	0.75±0.17Bc
Low light	3	2.16±0.35Aa	2.16±0.14Aa	5.16±0.32Ab	2.35±0.3Ba
	6	3.06±0.48Aa	1.48±0.14Ab	5.7±1.32Aa	1.91±0.23Ab
方差分析	光照	0.498	226.999 **	0.032	13.945 **
Analysis of variance	水深	3.159	412.268 **	9.335 *	111.416 **
	光照×水深	16.545 **	53.861 **	3.165	6.622 **

2.3 不同水深和光照强度对长喙毛茛泽泻生理指标的影响

如图 1 所示,在水深为 3 cm、标准光照下长喙毛茛泽泻叶片中 SOD 活性最高($124.78 \text{ U g}^{-1} \text{ min}^{-1}$)。在同一光照强度下,水深为 0 cm 和 6 cm 时植株叶片 SOD 活性差异不大。在同一水深条件下,不同光照强度对植物叶片中 SOD 活性变化没有显著性影响($P=0.06$)。

在同一光照强度下,不同水深对于植物叶片中 POD 活性具有极显著性影响($P<0.01$),随着水深的增加,呈现先升高后降低的趋势,水深为 3 cm 时叶片中 POD 活性最高($175.36 \text{ U g}^{-1} \text{ min}^{-1}$),随着水深的变化 POD 活性有所下降。在同一水深下,不同光照对植物叶片中 POD 活性也具有极显著性影响($P<0.01$),标准光照下的 POD 活性显著高于低光照下 POD 活性。

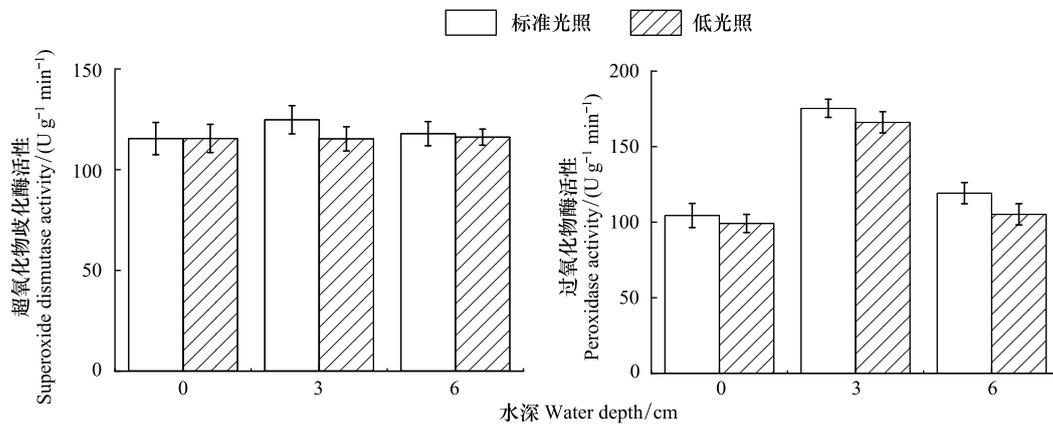


图 1 不同水深和光照强度对长喙毛茛泽泻抗氧化酶活性的影响

Fig.1 Effects of water depth and light intensity on activity of antioxidant enzyme in *Ranalisma rostratum*

如图 2 所示,在同一光照强度下,不同水深对于植物叶片中可溶性蛋白具有极显著性影响($P<0.01$),随着水深的增加呈现先升高后降低的趋势,水深为 3 cm 时叶片中可溶性蛋白含量最高(5.94 mg/g),随着水深的变化可溶性蛋白有所下降。在同一水深下,不同光照强度对植物叶片中可溶性蛋白的含量变化具有显著性影响($P<0.05$),标准光照下可溶性蛋白的含量显著高于低光照下可溶性蛋白的含量。

在同一水深条件下,光照强度对植物叶片中可溶性糖的含量变化具有极显著性影响($P<0.01$)。在标准光照下的可溶性糖的含量显著高于低光照下可溶性糖的含量。在同一光照强度下水深的变化对植物叶片中可溶性糖的含量变化有显著性影响($P<0.05$),随着水深的增加呈现先升高后降低的趋势,在水深为 3 cm 时植物叶片中可溶性糖的含量最高(9.67 mg/g)。

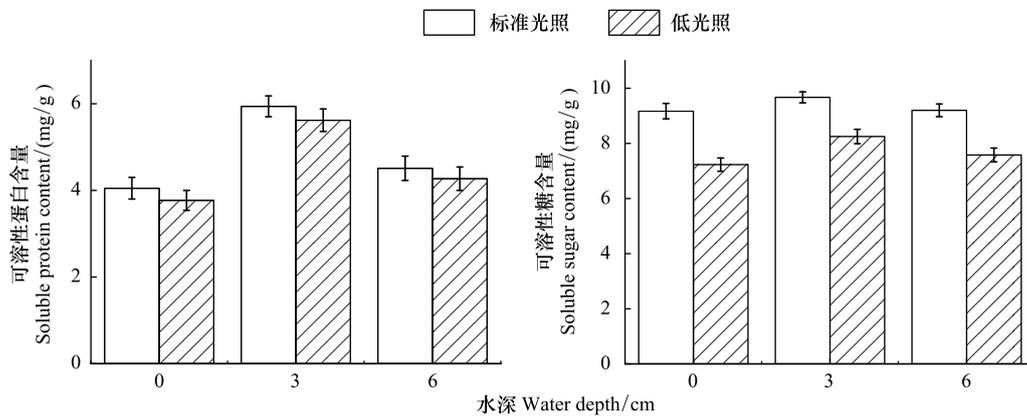


图2 不同水深和光照强度对长喙毛茛泽泻可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

Fig.2 Effects of water depth and light intensity on content of soluble protein and soluble sugar in *Ranalisma rostratum*

如图3所示,在水深为0 cm时,不同光照强度对植物叶片中MDA的含量没有显著性差异($P=0.857$),在水深为3 cm时,标准光照下MDA的含量要显著高于低光照下MDA含量($P<0.05$),而在水深为6 cm时,情况则相反,低光照下MDA的含量显著高于标准光照下MDA的含量。

在同一水深条件下,光照强度对植物叶片中脯氨酸的含量变化具有极显著影响($P<0.01$)

标准光照下脯氨酸的含量显著高于低光照下脯氨酸的含量。在同一光照条件下,水深的升高对于植物叶片中脯氨酸含量的变化有极显著影响($P<0.01$),随着水深的升高,脯氨酸的含量呈现下降的趋势,水深为0 cm时脯氨酸的含量显著高于水深为3 cm和水深为6 cm时脯氨酸的含量。

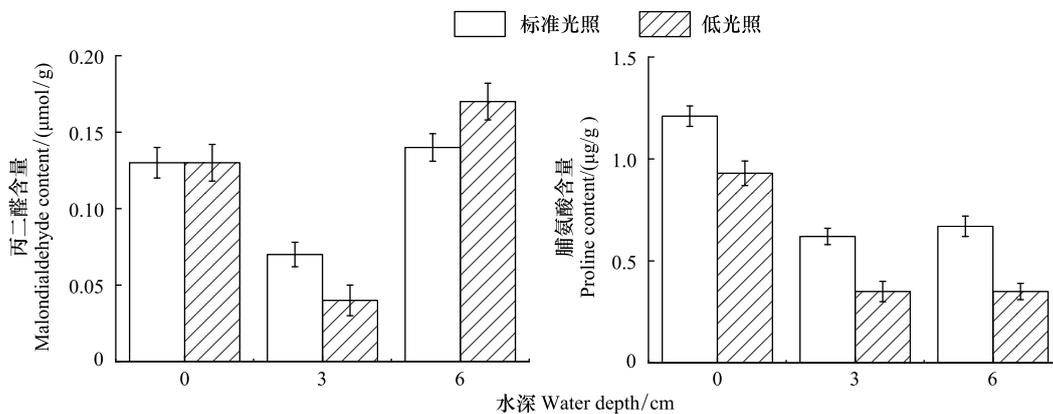


图3 不同水深和光照强度对长喙毛茛泽泻丙二醛和脯氨酸含量的影响

Fig.3 Effects of water depth and light intensity on content of malondialdehyde and proline in *Ranalisma rostratum*

3 讨论

本研究通过弱光和水深双重处理,发现长喙毛茛泽泻的生长和生理特性受弱光和水深的双重影响。生物量作为植物对环境适应性的直接表现,在适宜的水深条件下植物的生物量往往会发生显著性的提高^[17-18]。在同一光照条件下,长喙毛茛泽泻的叶生物量、茎生物量、根生物量和总生物量随水深的增加都呈现先升高后降低的趋势,并在水深为3 cm时出现最大值。这与其他水生植物生物量的变化趋势相同^[19],过浅和过深的水深都将抑制长喙毛茛泽泻的生长,这表明其生长“机会窗”较狭窄^[20],植株对于小范围内的水深变化反应较敏感,且植株不耐干旱,但能忍耐一定程度的水淹。当光照强度降低时,长喙毛茛泽泻的叶生物量、茎生物量和总生物量分别出现下降的趋势,而根生物量则没有变化,这可能是由于长喙毛茛泽泻为多年生的湿生小

草本,为适应植株在水环境中的生长,植株的根系发育微弱,所以光照强度对于植株根生物量的影响不显著。长喙毛茛泽泻为叶基生的湿生植物,其地上部分主要为叶。因此,水深和光照对于植株叶生物量有显著性影响,适宜的水深和光照强度使植物叶生物量不断增大,从而使植株总生物量也出现显著性变化。

光照强度和水深不仅对于植株的生物量及其分配有很大影响,也对植株的叶型变化有很大的影响,叶型指标的变化体现了植株对环境的适应能力^[21]。在本研究中,不同水深和光照强度对植株的叶长并无显著性影响,但植株的叶宽受水深和光照强度的双重影响。在同一光照条件下,随着水深的增加,长喙毛茛泽泻的叶宽和叶面积呈现先升高后降低的趋势,由于其叶长变化不显著,而叶宽出现显著性变化,这导致长喙毛茛泽泻叶型出现显著性变化,在气生和沉水环境下,其叶片呈披针形。据王建波等^[11]观察,长喙毛茛泽泻在沉水情况下,叶片呈披针叶形,这与本研究结果一致,但其观察到长喙毛茛泽泻在气生状态时,叶片呈卵圆形,这与本研究中结果不一致。这可能是由于,在本研究中长喙毛茛泽泻受弱光和浅水双重胁迫,导致植株整体叶片偏小,植株光合作用减弱,致使植株生长不足,叶片呈现披针形。而叶面积的变化也主要源于植株叶宽的变化。在本研究中,长喙毛茛泽泻叶柄长度不受光照强度的影响,但受水深变化的影响并随水深的增加而增加,这可能是因为长喙毛茛泽泻为适应水深变化,使叶片始终处于水面之上,而发生的适应性改变^[22]。

在不同水深和光照条件下长喙毛茛泽泻叶片中生理指标的变化进一步证实了上述结果,SOD和POD作为植物体内的抗氧化酶,起着清除体内自由基和过氧化物,缓解逆境损伤的作用^[23-24]。可溶性蛋白作为植物体内重要的渗透调节物质,对于植物缓解逆境损伤有重要作用^[25]。可溶性糖作为植物体内重要的非结构性贮藏碳水化合物,不仅对于植物抵抗逆境环境有重要作用,同时也在一定程度上表征了植物固定能量的水平^[26-27]。MDA作为植物膜脂过氧化的产物,是植物遭受逆境胁迫的重要检测指标,逆境对于植物的胁迫越严重,MDA的含量越高^[28-29]。脯氨酸作为植物体内重要的游离氨基酸,对于植物抵御水分亏缺和盐分胁迫等逆境环境具有重要作用^[30-31]。

在曹永慧等^[32]研究中,抗氧化酶活性和渗透调节物质含量的提高,可以提高幼苗对弱光的适应性。而本研究中,各处理组中SOD活性没有显著性差异,而POD活性和可溶性蛋白的含量,在同一光照条件下,都呈现先升高后降低的趋势,并在水深为3 cm、标准光照下含量最高,这说明长喙毛茛泽泻体内抗氧化酶系统和渗透调节系统没有对水深变化和光照强度的降低产生积极的响应,以适应不同水深和光照强度。在各处理中,水深变化对植株体内可溶性糖含量的变化有显著性影响。且同一水深条件下,不同光照强度对植株可溶性糖含量变化有显著性影响,光照强度的降低显著降低了可溶性糖含量,这与唐中华等^[28]研究结果相似,弱光显著性的降低了植物能量的固定。在本研究中,同一光照条件下,随着水深的增加MDA含量呈现先降低后升高的趋势,这有别于其他耐淹植物,MDA含量越高,表示膜脂破坏程度越高,植株遭受胁迫越严重。这与上述生物量和叶型指标结果相似,长喙毛茛泽泻在水深为0 cm和6 cm时,遭到了不同程度的胁迫,且弱光加剧了长喙毛茛泽泻的水淹胁迫。在水深为0 cm时,长喙毛茛泽泻处于水分亏缺的状态,气生环境不利于其生长,植株为抵御不良生境,故脯氨酸含量较高。

4 结论

在同一光照条件下,随着水深的增加其叶生物量、茎生物量、总生物量、叶宽、叶面积、POD活性、可溶性蛋白和可溶性糖含量都呈现先升高后降低的趋势;MDA含量呈现先降低后升高的趋势;叶柄长度随水深的增加而增加;脯氨酸含量随水深的增加而减少。在同一水深条件下,随着光照强度的降低其叶生物量、茎生物量、总生物量、POD活性、可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸的含量都有所下降。

在野外,长喙毛茛泽泻种子发芽率偏低、幼苗存活率不高、种群扩散困难以及生境的人为破坏都是导致其濒危的重要原因^[9]。根据本研究发现长喙毛茛泽泻对光照强度和水深变化较敏感,对动态环境适应性较差。一定范围内水深变化和上层植物的荫蔽可能也是导致其濒危的重要原因。

参考文献 (References):

- [1] 刘波, 吕宪国, 姜明, 张文广, 武海涛. 光照、水深交互作用对松嫩湿地芦苇种子萌发的影响. 植物生态学报, 2015, 39(6): 616-620.
- [2] Wei H, He F, Xu D, Zhou Q H, Xiao E R, Zhang L P, Wu Z B. A comparison of the growth and photosynthetic response of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara to a long-term water depth gradient under flowing and static water. Journal of Freshwater Ecology, 2018, 33(1): 223-237.
- [3] 马赞花, 张铜会, 刘新平. 半干旱区沙地芦苇对浅水位变化的生理生态响应. 生态学报, 2013, 33(21): 6984-6991.
- [4] 陈正勇, 王国祥, 吴晓东, 王立志, 徐伟伟, 俞振飞. 不同水深条件下菹草 (*Potamogeton crispus*) 的适应对策. 湖泊科学, 2011, 23(6): 942-948.
- [5] Cleland R E, Melis A, Neale P J. Mechanism of photoinhibition: photochemical reaction center inactivation in system II of chloroplasts. Photosynthesis Research, 1986, 9(1/2): 79-88.
- [6] 陈雄, 吴冬秀, 王根轩, 任红旭. CO₂ 浓度升高对干旱胁迫下小麦光合作用和抗氧化酶活性的影响. 应用生态学报, 2000, 11(6): 881-884.
- [7] 柴胜丰, 庄雪影, 韦霄, 王满莲, 唐建明, 陈宗游. 光照强度对濒危植物毛瓣金花茶光合生理特性的影响. 西北植物学报, 2013, 33(3): 547-554.
- [8] 何维明, 钟章成. 攀援植物绞股蓝幼苗对光照强度的形态和生长反应. 植物生态学报, 2000, 24(3): 375-378.
- [9] 陈中义, 何国庆, 陈家宽. 濒危植物长喙毛茛泽泻生物学特性观察. 武汉大学学报: 自然科学版, 1997, 43(2): 201-204.
- [10] 汪小凡, 陈家宽. 湖南境内珍稀、濒危水生植物产地的考察. 生物多样性, 1994, 2(4): 193-198.
- [11] 王建波, 陈家宽, 利容千, 何国庆. 长喙毛茛泽泻的生活史特征及濒危机制. 生物多样性, 1998, 6(3): 167-171.
- [12] 国家林业局野生动植物保护和自然保护区管理司, 中国科学院植物研究所. 中国珍稀濒危植物图鉴. 北京: 中国林业出版社, 2013: 122-123.
- [13] 胡小辉, 陈家宽, 王建波, 何国庆, 葛颂. 长喙毛茛泽泻遗传多样性及其与繁育系统的关系. 云南植物研究, 1999, 21(2): 232-238.
- [14] 王建波, 汪小凡, 陈家宽, 利容千, 王徽勤. 长喙毛茛泽泻繁殖特性的初步研究. 武汉大学学报: 自然科学版, 1993, (6): 130-132.
- [15] 刘萍, 李明军. 植物生理学实验技术. 北京: 科学出版社, 2007: 80-85.
- [16] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导(第二版). 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 66-67.
- [17] Gao F L, Wang Y H, Whitt A A, Wang H D, Ma C C, Guo H Y. Belowground responses of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* to salinity and water depth changes. Pakistan Journal of Botany, 2018, 50(3): 853-861.
- [18] Zhao F B, Zhang W, Liu Y H, Wang L Q. Responses of growth and photosynthetic fluorescent characteristics in *ottelia acuminata* to a water-depth gradient. Journal of Freshwater Ecology, 2018, 33(1): 285-297.
- [19] 柏祥, 温瑀, 魏国印, 古小治. 湿地水深梯度对芦竹 (*Arundo donax*) 生长及叶绿素荧光特性的影响. 应用与环境生物学报, 2015, 21(6): 1157-1161.
- [20] 徐金英, 陈海梅, 王晓龙. 水深对湿地植物生长和繁殖影响研究进展. 湿地科学, 2016, 14(5): 725-732.
- [21] 杜宁, 张秀茹, 王伟, 陈华, 谭向峰, 王仁卿, 郭卫华. 荆条叶性状对野外不同光环境的表型可塑性. 生态学报, 2011, 31(20): 6049-6059.
- [22] 顾燕飞, 王俊, 王洁, 方根生, 韩璐. 不同水深条件下沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 的形态响应和生长策略. 湖泊科学, 2017, 29(3): 654-661.
- [23] 玛丽娅·奴尔兰, 刘卫国, 霍举颂, 李宏侠, 张雨, 刘建国, 徐悦. 旱生芦苇对地下水位变化的生态响应及适应机制. 生态学报, 2018, 38(20): 7488-7498.
- [24] 秦洪文, 高芳, 刘正学, 李洪林, 郑丽丹, 苏华英, 孟佳媚. 水淹环境下光强对狗牙根幼苗生长及生理的影响. 草地学报, 2017, 25(3): 675-679.
- [25] 高琦, 沈广爽, 杨彤, 薛红丽, 王凯林, 石福臣. 6 种园林草本植物对水淹胁迫的生理响应的比较研究. 南开大学学报: 自然科学版, 2018, 51(2): 1-8.
- [26] 潘庆民, 韩兴国, 白永飞, 杨景成. 植物非结构性贮藏碳水化合物的生理生态学研究进展. 植物学通报, 2002, 19(1): 30-38.
- [27] 孙帅, 张小晶, 刘金平, 游明鸿, 郭碧花. 遮阴和干旱对菹草生理代谢及抗性系统影响的协同作用. 生态学报, 2018, 38(5): 1770-1779.
- [28] 唐中华, 郭晓瑞, 于景华, 杨蕾, 孙艳斐, 祖元刚. 弱光对长春花 (*Catharanthus roseus*) 幼苗中可溶性糖、生物碱及激素含量的影响. 生态学报, 2007, 27(11): 4419-4424.
- [29] 齐艳, 苏丹萍, 李薇, 刘朝玉, 崔大方. 水淹胁迫对窄叶短柱茶生理特征的影响. 亚热带植物科学, 2017, 46(2): 117-121.
- [30] 李婧, 关旻, 范海翔, 刘婷婷, 刘保东. 三种湿地濒危水韭叶片对干旱胁迫的生理响应. 湿地科学, 2015, 13(2): 217-222.
- [31] 杨颖丽, 张菁, 杨帆, 李小宁, 马海珍. 盐胁迫对两种小麦渗透性调节剂及脯氨酸代谢的影响. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2013, 49(1): 72-77, 91-91.
- [32] 曹永慧, 周本智, 陈双林. 弱光下水分胁迫对不同产地披针叶茴香幼苗生理特性的影响. 生态学报, 2014, 34(4): 814-822.