

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

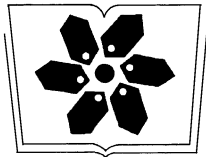
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第2期 Vol.34 No.2 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 2 期 2014 年 1 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 连续免耕对不同质地稻田土壤理化性质的影响 龚冬琴, 吕 军 (239)
- 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局 孙才志, 闫晓露, 钟敬秋 (247)
- 完全水淹环境中光照和溶氧对喜旱莲子草表型可塑性的影响 许建平, 张小萍, 曾 波, 等 (258)
- 赤潮过程中“藻-菌”关系研究进展 周 进, 陈国福, 朱小山, 等 (269)
- 盐湖微微型浮游植物多样性研究进展 王家利, 王 芳 (282)
- 臭氧胁迫对植物主要生理功能的影响 列淦文, 叶龙华, 薛 立 (294)
- 啮齿动物分子系统地理学研究进展 刘 铸, 徐艳春, 戎 可, 等 (307)
- 生态系统服务制图研究进展 张立伟, 傅伯杰 (316)

个体与基础生态

- NaCl 胁迫下沙枣幼苗生长和阳离子吸收、运输与分配特性 刘正祥, 张华新, 杨秀艳, 等 (326)
- 不同生境吉首蒲儿根叶片形态和叶绿素荧光特征的比较 向 芬, 周 强, 田向荣, 等 (337)
- 小麦 LAI-2000 观测值对辐亮度变化的响应 王 龔, 田庆久, 孙绍杰, 等 (345)
- K^+ 、 Cr^{6+} 对网纹藤壶幼虫发育和存活的影响 胡煜峰, 严 涛, 曹文浩, 等 (353)
- 马铃薯甲虫成虫田间扩散规律 李 超, 彭 赫, 程登发, 等 (359)

种群、群落和生态系统

- 莱州湾及黄河口水域鱼类群落结构的季节变化 孙鹏飞, 单秀娟, 吴 强, 等 (367)
- 黄海中南部不同断面鱼类群落结构及其多样性 单秀娟, 陈云龙, 戴芳群, 等 (377)
- 苏南地区湖泊群的富营养化状态比较及指标阈值判定分析 陈小华, 李小平, 王菲菲, 等 (390)
- 盐城淤泥质潮滩湿地潮沟发育及其对米草扩张的影响 侯明行, 刘红玉, 张华兵 (400)
- 江苏省农作物最大光能利用率时空特征及影响因子 康婷婷, 高 苹, 居为民, 等 (410)
- 1961—2010 年潜在干旱对我国夏玉米产量影响的模拟分析 曹 阳, 杨 婕, 熊 伟, 等 (421)
- 黑龙江省 20 世纪森林变化及对氧气释放量的影响 张丽娟, 姜春艳, 马 骏, 等 (430)
- 松嫩草原不同演替阶段大型土壤动物功能类群特征 李晓强, 殷秀琴, 孙立娜 (442)
- 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征 刘 纯, 刘延坤, 金光泽 (451)

景观、区域和全球生态

- 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应 徐建文, 居 辉, 刘 勤, 等 (460)

我国西南地区风速变化及其影响因素 张志斌,杨 莹,张小平,等 (471)

青海湖流域矮嵩草草甸土壤有机碳密度分布特征 曹生奎,陈克龙,曹广超,等 (482)

基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹 曹黎明,李茂柏,王新其,等 (491)

研究简报

荒漠草原区柠条固沙人工林地表草本植被季节变化特征 刘任涛,柴永青,徐 坤,等 (500)

跨地带土壤置换实验研究 靳英华,许嘉巍,秦丽杰 (509)

SWAT 模型对景观格局变化的敏感性分析——以丹江口库区老灌河流域为例
..... 魏 冲,宋 轩,陈 杰 (517)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-01



封面图说：高原盐湖——中国是世界上盐湖分布比较稠密的国家,主要分布在高寒的青藏高原以及干旱半干旱地区的新疆、内蒙古一带。尽管盐湖生态环境极端恶劣,但它们依然是陆地特别是高原生态系统中十分重要的组成部分。微微型浮游植物通常是指粒径在 0.2—3 μm 之间的光合自养型浮游生物。微微型浮游植物不仅是海洋生态系统中生物量和生产力的最重要贡献者,也是盐湖生态系统最重要的组成部分。研究显示,水体矿化度是影响微微型浮游植物平面分布及群落结构组成的重要因子,光照、营养成分和温度等也会影响盐湖水体中微微型浮游植物平面分布及群落结构组成(详见 P282)。

彩图提供：陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201301110081

许建平, 张小萍, 曾波, 袁慎鸿, 刘建辉, 刘明智. 完全水淹环境中光照和溶氧对喜旱莲子草表型可塑性的影响. 生态学报, 2014, 34(2): 258-268.
Xu J P, Zhang X P, Zeng B, Yuan S H, Liu J H, Liu M Z. Effects of light and dissolved oxygen on the phenotypic plasticity of *Alternanthera philoxeroides* in submergence conditions. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 258-268.

完全水淹环境中光照和溶氧 对喜旱莲子草表型可塑性的影响

许建平, 张小萍*, 曾波, 袁慎鸿, 刘建辉, 刘明智

(三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 西南大学生命科学学院, 重庆 400715)

摘要:光照和溶氧是水环境和陆地环境间差异显著的两个环境因子, 对水淹植物的生长和存活具有重要的意义。以三峡库区常见外来入侵植物喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 为研究对象, 考察了水体中的光照 (L) 和溶氧 (DO) 对完全水淹环境中喜旱莲子草的形态特征和生物量分配等表型可塑性的影响。实验设置水淹和非水淹对照两组处理, 对水淹组的光照和溶氧两个环境因子再分别设置有 (+)、无 (-) 以及高 (+)、低 (-) 两种水平, 共计 4 个处理。实验结果表明: (1) 水淹可促进喜旱莲子草主茎和叶片发生可塑性反应, 引发伸长生长。水淹后, 其细长的主茎以及长而薄的直立叶更有利于植株早日出露水面。 (2) 完全水淹条件下, 喜旱莲子草主茎和叶片的表型可塑性受光照和溶氧的复合影响, 其中主茎的伸长生长主要受溶氧的影响, 而叶片的形态变化则主要受光照影响。高溶氧处理下喜旱莲子草的主茎伸长生长显著 ($P<0.05$)。在相同光照条件下, 高溶氧处理下喜旱莲子草的主茎长、节间数、节间长以及主茎长/主茎直径均明显高于低溶氧处理。不论有光还是无光, 高溶氧处理下喜旱莲子草主茎长以及节间数的平均增长率均处于最高水平, 分别为 61.8%、34.2%。喜旱莲子草叶片的形态变化在有光处理下表现得尤为显著, 其平均叶片长宽比、比叶面积以及叶倾角分别较水淹前增加了 39.65%、28.3%、45.9°。 (3) 光照和溶氧对于喜旱莲子草不定根和分枝的发生及发展存在影响差异。有光条件下可促进植株抽枝, 而高溶氧处理时更有利于植株生根。这些形态变化有助于喜旱莲子草扩大株型占据有利生境, 进一步提高植株的水下存活能力。

关键词:完全水淹; 光照; 溶氧; 表型可塑性; 喜旱莲子草

Effects of light and dissolved oxygen on the phenotypic plasticity of *Alternanthera philoxeroides* in submergence conditions

XU Jianping, ZHANG Xiaoping*, ZENG Bo, YUAN Shenhong, LIU Jianhui, LIU Mingzhi

Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region of the Ministry of Education, Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, College of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Plants show phenotypic plasticity in response to changing environments via variations of morphological and ecophysiological traits, and the plasticity of plants can increase markedly the capability of survival, growth, establishment, recruitment and distribution. In the real world, terrestrial plants suffer multiple stresses when they are submerged, such as oxygen deficiency and shading due to the lower gas diffusion and light intensity in water. Light climate and dissolved oxygen availability are strikingly different in aquatic environments from that in terrestrial habitats. It has been reported in many studies that most flooding-tolerant plants adapt to flooding through high phenotypic plasticity. However, few studies have investigated the effect of both light and dissolved oxygen levels on functional response in morphological plasticity of plants under submergence condition. To reveal the effects of light (L) and dissolved oxygen (DO) in water on the morphology and

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (31070474, 31370443); 教育部高校博士点基金课题资助项目 (20100182110022); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目项目 (XDJK2013A003); 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2012CB723205)

收稿日期:2013-01-11; **修订日期:**2013-12-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zxpimmun@swu.edu.cn

growth of *Alternanthera philoxeroides*, one of the common invasive plant species in the Three Gorges reservoir region, an experiment was conducted and the morphological traits and biomass allocation of *A. philoxeroides* were analyzed in the ecological garden of Southwest University. Flooded groups and non-flooded control group were set in the experiment, *A. philoxeroides* were put to grow in water with light (+) or dark (-) and high (+) or low (-) levels of dissolved oxygen. Flooded groups included L+DO+, L+DO-, L-DO+ and L-DO- four treatments. The following parameters were measured before flooding: stem length, internode number, internode length, stem diameter, leaf number, leaf length, leaf width, leaf thickness, leaf angle. At the end of the experiment, we harvested the whole plant, including above-ground parts and below-ground parts, and measured the same parameters above mentioned and some new parameters, such as leaf disk area, adventitious root number, adventitious root length, shoot number and shoot length. The plants were separated into main stem, leaf, adventitious root, shoot, and under-ground parts, and cleaned by tap water. All plant parts were oven-dried for 72h at 75℃ and then weighed respectively. It was found that: (1) Inundation promoted the plastic responses of *A. philoxeroides* and caused the stem and leaf elongation growth. Stems and leaves became slender and erect during the flood. The elongated stems help to keep the top parts of plant above the water surface for gaseous change and photosynthesis. (2) Phenotypic plasticity of *A. philoxeroides* was influenced by light and dissolved oxygen in water. There were significant differences of responses to light and dissolved oxygen among various parts of *A. philoxeroides*. The stem elongation growth was mainly affected by dissolved oxygen level, while the leaf was mainly influenced by light intensity. Under the same illumination level, stem length, internode length and number, and stem length-to-diameter ratios were found to be greater for plants living in high dissolved oxygen environments. Whether light existed or not, the largest stem length and internode number of *A. Philoxeroides* were found at the high dissolved oxygen levels after flooding, 61.8% and 34.2%, respectively. In addition, foliar morphological characteristics of *A. philoxeroides* altered significantly when the light existed. The ratio of leaf length-to-width, specific leaf area and leaf angle of *A. philoxeroides* were increased by 39.65%, 28.3% and 45.9° after flooding. (3) Light and high dissolved oxygen can promote the emergence and growth of shoots and adventitious roots, respectively, and therefore, they improved the ability of survival and spread of *A. philoxeroides* under water. This study may help to further understand the mechanism of *A. philoxeroides* how to escape from the submergence. It also confirmed the importance of light and dissolved oxygen in affecting the population establishment of invasive *A. philoxeroides* under submergence condition.

Key Words: submergence; light; dissolved oxygen; phenotypic plasticity; *Alternanthera philoxeroides*

在我国,自然汛期以及水库的蓄水行为常常会导致河岸带被水淹没,许多岸生植物也不可避免地遭遇到了水淹的干扰^[1]。水淹所形成的水环境和陆生环境截然不同,这主要表现在水下更低的气体扩散速率(气体在水中的扩散速率比空气中低 10⁴倍)以及更弱的光照条件上(光不仅会被水体表面反射、散射,还会被水和溶解在水中的各种离子吸收)。因此,水下环境通常为弱光低氧环境^[2-4]。

相较于陆生植物,水淹植物将经历更多的弱光和低氧条件,有些甚至无光或无氧^[5]。但在自然界中观察到,很多耐淹植物在水淹环境中仍然可以长时间生长和存活。前期研究发现,秋华柳(*Salix variegata*)水淹 90 d 后存活率仍为 100%^[6];牛鞭草

(*Hemarthria altissima*)可忍耐 120 d 的完全水淹;狗牙根(*Cynodon dactylon*)忍耐时间甚至长达 180 d^[7]。近年来通过研究人们已经认识到,水淹耐受能力强的物种往往是通过高度的表型可塑性来适应环境因子的波动以度过水淹逆境期的,例如:完全水淹条件下,稗草(*Echinochloa* spp.)利用消耗碳水化合物产生的能量来促进伸长生长,使植株重新接触大气^[8];野古草(*Arundinella anomala*)可以通过扩大细胞间隙形成通气组织来加速氧气在体内运输和扩散的速率^[9];秋华柳在水淹期间则通过产生更多不定根来缓解氧气的不足^[6];水芹(*Oenanthe javanica*)在水下会生成一种有别于气生叶解剖结构的沉水叶来更好地适应水淹环境^[5]。此外,疏花水柏枝(*Myricaria*

laxiflora)、狗牙根等耐淹植物还可以通过转换代谢途径、促进相关激素、酶的合成以及休眠等可塑性反应来适应水淹^[8,10]。

喜旱莲子草是我国三峡库区常见的入侵植物^[11],可在陆生、水生、湿生等多种生境中生长,是一种极耐淹的植物^[12-13],王海锋等人发现完全水淹 120 d 后其存活率仍高达 90%^[14]。喜旱莲子草能够适应长江及其支流水位变动的河岸环境,在河岸带各个高程尤其是退水之后的滩涂荒地上广泛分布。其在陆生生境中的入侵机制及快速的生长能力一直是人们的研究热点^[15-18],然而对于水淹条件下环境因子对喜旱莲子草形态和生长的影响国内外尚未引起关注。作为水环境异质性体现最显著的两个环境因子,光照和溶氧究竟对河岸带常见外来入侵植物喜旱莲子草有无影响?如果有,又是如何影响的?再有,喜旱莲子草对这两个环境因子的影响能否产生有利于其存活和入侵的表型可塑性反应?为明确这些问题,本文在可控条件下,以喜旱莲子草为材料,人工模拟河岸带水淹条件并控制水环境中光照的有无以及溶氧的高低,研究不同光照和溶氧处理下喜旱莲子草形态特征及生物量分配的差异,以期三峡库区外来入侵植物的防治提供生态学依据和资料。

1 材料与方法

1.1 研究材料

研究物种为喜旱莲子草。喜旱莲子草又名空心莲子草、水花生、革命草,为苋科莲子草属多年生宿根草本植物,多生长于池沼和水沟内,茎长达 1.5—2.5 m。1930 年传入中国,在我国大面积分布,被列为首批外来入侵物种^[19]。

1.2 研究方法

实验于 2012 年 4—8 月在西南大学生态园内进行。2012 年 4 月,在同一喜旱莲子草克隆种群中选择大小和长势基本一致的喜旱莲子草植株剪取 20 cm 长茎段扦插在深 15 cm,直径 20 cm 的深褐色塑料花盆中,每盆 2 株。选用营养含量较高的农耕壤土装盆,栽培过程中使用支持物保证植株竖直向上生长。培养期间给予所有植株相同的光照和水分条件,并定期进行除草等常规管理。2012 年 7 月随机抽取 75 株健壮的喜旱莲子草剪去植株多余分枝,用

75%的医用酒精处理创口后涂抹凡士林,确保每个植株最终只保留一个单独主茎。将实验植株随机分成两组,60 株水淹和 15 株不水淹,其中水淹组的 60 株植株再随机分成 4 组,每组 15 株,对所有植株进行 23d 的水淹和不水淹处理。

实验设置水淹和非水淹对照两组处理,其中对水淹组的光照(L)和溶氧(DO)两个环境因子分别设计有(+)、无(-)以及高(+)、低(-)两种水平,共计 4 个处理,分别为:有光高溶氧(L+DO+)、有光低溶氧(L+DO-)、无光高溶氧(L-DO+)、无光低溶氧(L-DO-)。具体设置如下:L+DO+处理接受正常自然光照不施加任何环控措施;L+DO-处理接受正常自然光照的同时在水面上铺设厚度为 1 cm 左右的无色植物油,且每隔 3 日向水池内更换静置多日的低溶氧水(0.07—0.25 mg/L);L-DO+处理使用 6 层黑色遮荫网充分覆盖,并使用气泵进行每日 8h 的连续曝气,曝气时间为 9:00—12:00 和 13:00—18:00,通过曝气可让水池中的溶解氧达到饱和状态;L-DO-处理使用 6 层黑色遮荫网充分覆盖,同时在水面上铺设厚度为 1 cm 左右的无色植物油。对照组植株放置在水池附近空地,接受自然光照,进行正常水分供应。选择 4 个干净、紧邻的 2m 深度水池用以水淹处理,每个处理除实验因素外,其它环境因子条件保持一致或相似。每个处理 15 盆喜旱莲子草,每盆 1 个植株。每个花盆之间间距 30 cm,确保植株均匀受光,不会出现光遮荫现象。实验期间紧密关注植株生长状况,当植株顶端距离水面 20 cm 时立即注水至 50 cm,保证植株在整个实验过程中完全水淹不会出露水面。使用 HYDROLab 多参数水质测定仪、LI-1400 光量子测量记录仪定期测定环境光强、气温以及水体溶氧、水温、有效光合辐射(PAR)等环境指标,最终环境控制情况见表 1。

1.3 指标测定及数据处理

水淹前一周,对抽取出的 75 株喜旱莲子草进行主茎长、节间数、节间长、主茎直径、叶片数、叶片长、叶片宽、叶片厚与叶片倾角(叶片与水平面的夹角)的测定。水淹结束后收获水淹组和非水淹组所有植株的地上和地下部分,再次测定水淹前所有形态指标以及植株新生器官不定根和分枝的数目及长度。用自来水洗净植株主茎、叶、不定根、分枝茎以及地下部分(包括主根及根状茎),在 75 ℃ 下烘干 72 h

后分别称量。另外,水淹结束后,对每个植株处理前的老叶片和水淹后的新生叶片以打孔器分别打取 3—8 个直径为 0.7 cm 叶圆片,待烘干后称其干重,计算比叶面积(SLA)。

表 1 实验设计及各处理的环境控制概况
Table 1 The environmental design and the treatment conditions

处理 Treatments	光照 (日最大光照强度) Light (Maximum)/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	溶氧(早晨—傍晚) / 温度(平均温度) Dissolved oxygen (Morning—Evening)/(mg/L)/Temperature (Means)/℃	
		高 High	
		低 Low	
水淹组 Flooded group	自然光照	有光高溶氧 (L+DO+) 1110.800 / 11.508—12.835 / 30.237	有光低溶氧 (L+DO-) 907.440 / 0.742—1.716 / 32.005
	完全黑暗	无光高溶氧 (L-DO+) 0 / 6.713—7.252 / 28.585	无光低溶氧 (L-DO-) 0 / 0.126—0.157 / 29.055
对照组 Control group	自然光照	1985.200/-/30.976	

不同水淹处理前后植株的形态特征数据采用 SPSS16.0 作 paired-samples *T* 检验,水淹后的植株形态与生物量特征数据作 ANOVA 分析和 LSD 多重比较,其中对方差不齐的指标作对数或函数转换后再进行 ANOVA 分析和 LSD 多重比较,其差异用字母标记法表示。

2 结果与分析

2.1 不同光照和溶氧处理下植株主茎形态变化

水淹在增加喜旱莲子草节间数目的同时,显著地促进了其节间的伸长,最终引起主茎绝对长度的增加。与水淹前相比,除无光低溶氧水淹处理(L-DO-)外其它水淹处理下喜旱莲子草的节间数目以及节间和主茎长度均有显著增加(*P*<0.05)(图 1,图 2)。在 4 个水淹处理中,不论有光还是无光,喜旱莲子草主茎长和节间数目均随溶氧水平的增加而增加。其中,有光高溶氧水淹处理(L+DO+)下的喜旱莲子草的主茎长以及节间数目的平均增长率处于所

有水淹处理的最高水平,分别为 76.2%、39.6%。无光低溶氧水淹处理(L-DO-)下处于最低水平,其主茎较水淹前仅伸长了 0.8%,节间数也只增加了 14.4%。此外,在相同光照梯度下,高溶氧处理的喜旱莲子草节间长总是长于低溶氧处理(图 1)。对照组植株节间数目的增加程度大于水淹组中大部分的处理,但节间的伸长率却低于所有的水淹组处理(图 1)。

水淹条件下,喜旱莲子草主茎的伸长生长加剧,其主茎明显变得细长。不同光照和溶氧处理后喜旱莲子草主茎长与主茎直径比值和水淹前相比显著增大(*P*<0.05),其中两个高溶氧水淹处理 L+DO+和 L-DO+的增长率明显大于其它水淹处理和对照组(图 2B)。水淹后喜旱莲子草主茎长/主茎直径的增加程度依次为无光高溶氧水淹处理(L-DO+)>有光高溶氧水淹处理(L+DO+)>有光低溶氧水淹处理(L+DO-)>无光低溶氧水淹处理(L-DO-)>对照组(Control),其增长率依次为 193.7%、144.7%、

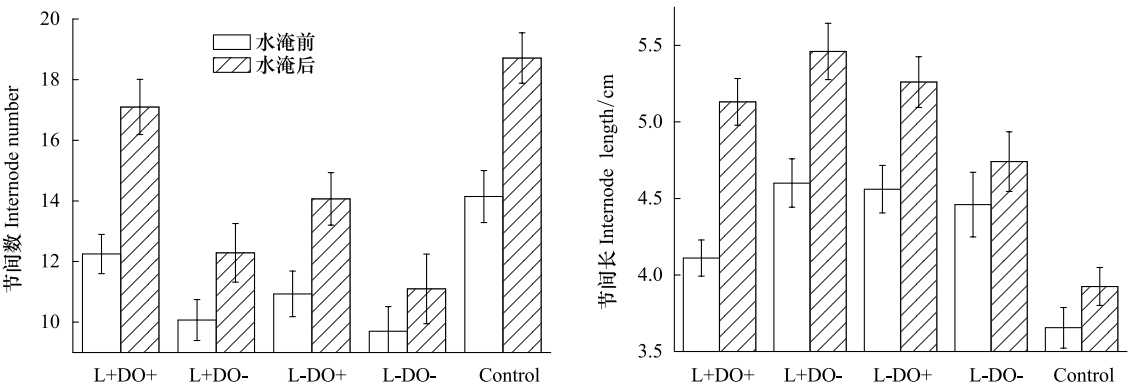


图 1 不同光照和溶氧条件下喜旱莲子草植株节间数目和节间长度
Fig.1 Internode number and internode length of *A. philoxeroides* experienced different light and dissolved oxygen treatments (±SE)

124.6%、29%、26.3%。以上结果表明,在不同水平的光照和溶氧处理下,高溶氧才是引发喜旱莲子草主茎发生水下形态可塑性变化的主导因子,高溶氧

处理后形成的细长主茎将有利于喜旱莲子草植株早日伸出水面。

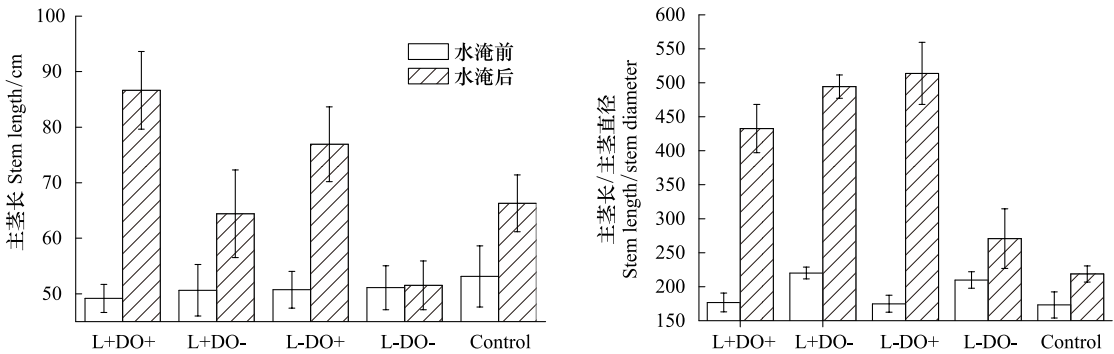


图2 不同光照和溶氧条件下喜旱莲子草主茎长和主茎长/主茎直径

Fig.2 Stem length and stem length/diameter of *A. philoxeroides* experienced different light and dissolved oxygen treatments (±SE)

2.2 不同光照和溶氧处理下植株叶片形态变化

喜旱莲子草在完全淹没的环境中,水淹前产生的叶片很快凋落,并迅速产生新叶片。而未水淹的对照植株老叶片凋落较少,同时还会长出一部分新叶片。在完全水淹条件下,不同光照和溶氧处理均可使喜旱莲子草叶片数量迅速减少,叶片厚度显著下降($P<0.05$) (表2)。实验中溶氧水平降得越低,喜旱莲子草叶片数量减少得越快。其中两个低溶氧水淹处理(L+DO-/L-DO-)下叶片平均数量减少得最多,分别较水淹前减少了89.79%和85.2%。虽然水淹促使了喜旱莲子草叶片显著变薄,但叶片厚度在不同处理间变薄的程度不一。

水淹使得喜旱莲子草叶片长宽比和叶倾角普遍增加,且这种变化在两个有光水淹处理(L+DO+/L+DO-)中表现得最为显著。和水淹前相比,其叶片长

宽比分别增加了19.3%和60.1%,叶倾角分别较水淹前增加了59.15°和32.63°。实验期间溶氧浓度的高低处理对喜旱莲子草叶片形态变化的影响较光照的有无要小得多,而不水淹的对照组在水淹前后叶片形态特征无明显差异($P>0.05$)。从叶片形态特征的变化规律可以看出,光照变化才是水下喜旱莲子草叶片发生可塑性变化的主要原因。

2.3 不同光照和溶氧处理下植株新生器官形态变化

实验中发现,喜旱莲子草具有强烈的不定根和分枝发生能力,但是不同光照和溶氧处理下其不定根与分枝在数量和长度上却存在很大差异。将水淹组 and 对照组进行比较发现,随着溶氧梯度的增加,无论是光处理还是无光处理,喜旱莲子草的不定根数目和总根长均呈上升趋势。两个高溶氧水淹处理(L+DO+/L-DO+)下喜旱莲子草的不定根数目和不

表2 不同光照和溶氧条件下喜旱莲子草的叶形态特征

Table 2 Foliar morphological characteristics of *A. philoxeroides* subjected to different light intensities and dissolved oxygen levels (means±SE)

处理 Treatments	叶片数 Leaf number		叶长/叶宽 Leaf length/leaf width		叶厚 Leaf thickness/mm		叶倾角 Leaf angle/(°)	
	水淹前 Before flooding	水淹后 After flooding	水淹前 Before flooding	水淹后 After flooding	水淹前 Before flooding	水淹后 After flooding	水淹前 Before flooding	水淹后 After flooding
L+DO+	16.50±0.93a	7.30±1.04b	2.49±0.09a	2.97±0.11b	0.27±0.004a	0.19±0.003b	15.14±7.50a	74.29±3.62b
L+DO-	11.07±0.93a	1.13±0.58b	2.78±0.12a	4.45±0.36b	0.29±0.006a	0.13±0.004b	16.85±5.51a	49.48±2.41b
L-DO+	13.60±0.80a	3.07±1.04b	2.63±0.12a	2.56±0.17a	0.29±0.006a	0.15±0.008b	10.67±10.85a	22.00±5.33a
L-DO-	12.80±0.95a	2.50±1.11b	2.88±0.29a	2.97±0.31a	0.27±0.012a	0.22±0.012b	-1.00±8.92a	14.13±4.81a
对照 Control	17.43±1.26a	19.93±1.45a	3.13±0.08a	3.16±0.06a	0.28±0.004a	0.27±0.003a	15.48±2.96a	15.59±1.66a

有光高溶氧水淹处理 L+DO+; 有光低溶氧水淹处理 L+DO-; 无光高溶氧水淹处理 L-DO+; 无光低溶氧水淹处理 L-DO-; 非水淹对照处理 Control; 对每一光照和溶氧水平,标有不同字母的各处理间差异显著(显著性水平 $P=0.05$)

定根总长明显高于其它水淹处理 ($P<0.05$), 而低溶氧水淹处理 (L+DO-/L-DO-) 时不仅不定根数量少而且根长也较短, 其中无光低溶氧水淹处理和对照组植株中甚至没有不定根发生 (图 3)。经统计, 两个高溶氧水淹处理下喜旱莲子草的不定根平均数目是两个低溶氧水淹处理的 3.25 倍 (图 3), 其平均根长是两个低溶氧水淹处理的 5.43 倍 (图 3)。

对所有处理的喜旱莲子草主茎上新生分枝进行分析发现, 有光低溶氧处理 (L+DO-) 下喜旱莲子草的分枝数目和分枝长均显著高于其它处理 ($P<0.05$), 无光低溶氧处理 (L-DO-) 下的分枝数目和分枝长显著低于所有处理 ($P<0.05$) (图 4), 两个高溶氧水淹处理 (L+DO+/L-DO+) 居中, 且不论分枝数目还是分枝长两者间均无显著差异 ($P>0.05$)。统计结果显示, 有光低溶氧水淹处理 (L+DO-) 下喜旱莲子草分枝数目和分枝长分别是无光低溶氧水淹处理 (L-DO-) 的 4.67 倍 (图 4) 和 23.41 倍 (图 4)。以

上特征表明, 光照和溶氧对于喜旱莲子草不定根和分枝的发生及发展存在影响差异, 有光条件下可促进喜旱莲子草产生更多更长的分枝, 而植株不定根的数目和长度却在高溶氧处理时增加最为显著。

2.4 不同光照和溶氧处理对植株生物量分配的影响

为进一步探讨不同光照和溶氧条件下水淹处理对植株形态影响的程度, 对不同水淹处理的植株生物量分配进行比较 (表 3)。水淹后喜旱莲子草水淹组和对照组的总生物量随溶氧水平的增加而增加, 依次为 2.04 g/株 (L-DO-)、2.07 g/株 (L+DO-)、2.15 g/株 (L-DO+)、2.33 g/株 (L+DO+)、3.63 g/株 (对照)。水淹组植株根生物量比和根冠比的变化趋势和总生物量变化相反, 这主要是因为水淹条件下溶氧的高低影响了喜旱莲草地上部分的存活情况, 从而导致地上部分生物量丧失的程度不一。

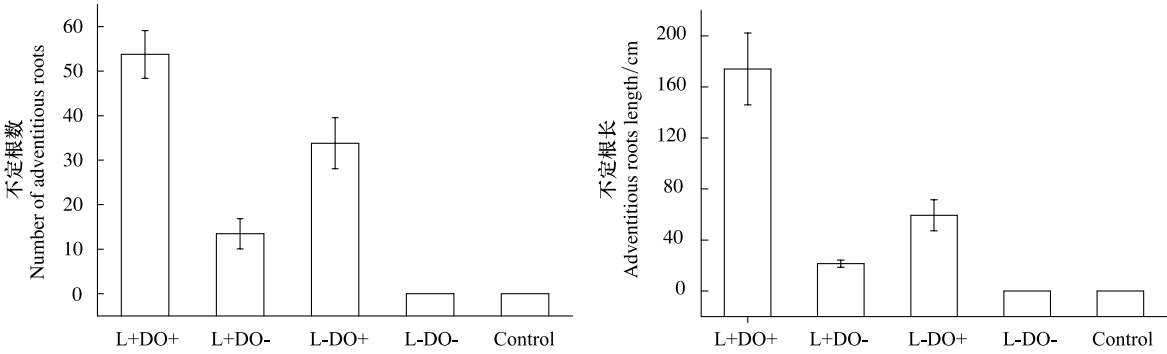


图 3 不同光照和溶氧条件下喜旱莲子草产生的不定根数目与不定根长度

Fig 3 Number and total length of adventitious roots of *A. philoxeroides* experienced different light and dissolved oxygen treatments ($\pm$ SE)

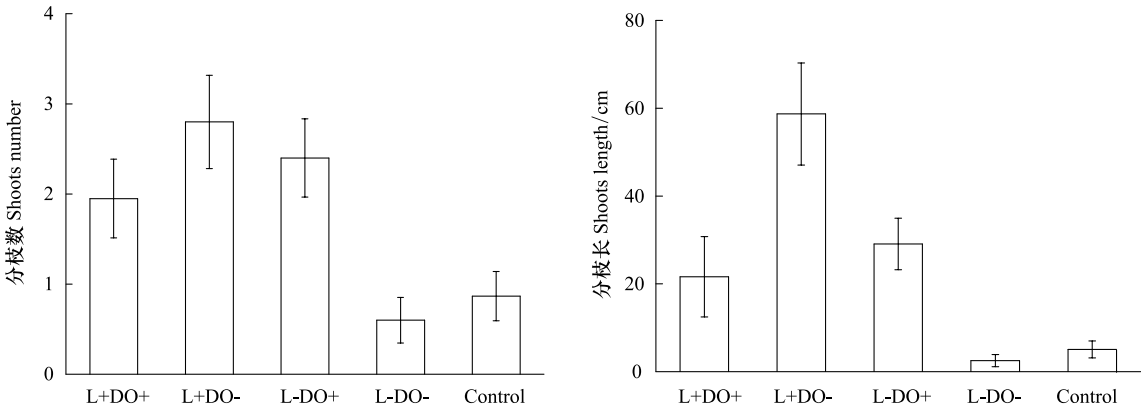


图 4 不同光照和溶氧条件下喜旱莲子草产生的分枝数目与分枝长

Fig 4 Number and total length of newly produced shoots of *A. philoxeroides* experienced different light and dissolved oxygen treatments ($\pm$ SE)

表 3 不同光照和溶氧条件下喜旱莲子草植株的生物量分配

Table 3 Biomass allocation of <i>A. philoxeroides</i> subjected to different light intensities and dissolved oxygen levels (means±SE)						
相对特征 Relative characteristics	L+DO+	L+DO-	L-DO+	L-DO-	对照 Control	P
茎生物量比 Stem mass ratio	0.29 ± 0.023a	0.28 ± 0.045a	0.39 ± 0.035b	0.27 ± 0.046a	0.22 ± 0.037a	*
分枝生物量比 Shoot mass ratio	0.030 ± 0.015ab	0.056 ± 0.014a	0.033 ± 0.011ab	0.003 ± 0.001b	0.01 ± 0.004ab	*
叶生物量比 Leaf mass ratio	0.009 ± 0.001a	0.010 ± 0.002a	0.006 ± 0.001a	0.009 ± 0.004a	0.054 ± 0.009b	* *
比叶面积 Specific leaf area/(cm ² /g)	232.33 ± 10.40	291.19 ± 27.56	215.81 ± 22.29	192.29 ± 21.64	256.08 ± 5.02	ns
根生物量比 Root mass ratio	0.54 ± 0.022a	0.55 ± 0.038a	0.56 ± 0.034a	0.71 ± 0.042b	0.63 ± 0.038ab	*
根冠比 Root shoot ratio	1.31 ± 0.109a	1.58 ± 0.271ac	1.48 ± 0.173ac	3.07 ± 0.529bc	2.183 ± 0.344c	* *

不同字母为均值间差异显著, * $P<0.05$, * * $P<0.01$

在水淹处理中,喜旱莲子草地上部分都将大部分的生物量分配到了主茎中,分枝和叶片占有比例很小。总生物量对主茎的分配在两个高溶氧水淹处理(L+DO+/L-DO+)中明显大于其它水淹处理,而总生物量对于分枝的最大分配则出现在有光低溶氧水淹处理(L+DO-)中,总生物量对于叶片的分配在所有水淹处理中均较小且无显著差异($P>0.05$)。此外,所有处理植株的比叶面积(单位重量叶面积)之间的差异同样未达到显著水平($P>0.05$)。

3 讨论

伸长生长是一种人们所熟知的植物耐淹策略,近年来更被普遍认为是逃避型耐淹植物在水淹过程中发生的重要可塑性反应之一^[20]。通过快速的伸长生长可以让植物再次与大气相接提高气体交换的速率,逃避水淹低氧荫蔽环境及时进行光合作用缓解能量危机。可以说,伸长生长能力的强弱在一定程度上可以反映植物的耐淹能力,决定其水下存活的时间和状态。Setter 和 Laureles 对水稻的研究发现深水稻(*Oryza sativa*)可以通过茎芽伸长使叶片露出水面来适应水淹环境^[21]。Dinka 和 Szeglet 同样观察到深水区芦苇(*Phragmites australis*)的存活是通过集丛生长中能够到达水面以上的分枝进行的光合作用而产生的碳水化合物来维持的^[22]。此外,Mommer 对蓼科植物酸模(*Rumex palustris*)的研究中还发现,水淹可以明显导致酸模叶柄大幅伸长^[23]。目前针对耐淹植物的伸长生长研究虽然已经深入到激素、酶以及耐淹基因的表达等方面^[24-28]。然而,环境调控作为影响生物性状的重要因素在耐淹植物伸长生长研究中仍然是一个不可回避的内容。

在本实验中,喜旱莲子草主茎与叶片的形态特征均对光照和溶氧变化表现出较高的表型可塑性。

主茎和叶片的纵向伸长均可直接促进喜旱莲子草早日露出水面,其细长的主茎以及长而薄的直立叶(喜旱莲子草的自然叶倾角范围为: -1.00°—16.85°,水淹后以与水平面夹角成 45°为分界,大于 45°的为直立叶,小于和等于 45°的为平展叶)更有利于加速主茎和叶片出露的过程。同时主茎直径的减小以及叶片厚度的降低既可以减少茎叶能耗又可以相对增大其浮力,进一步促进喜旱莲子草发生水下伸长生长。对于整个植株而言,其水下伸长生长受光照和溶氧的复合影响。其中,喜旱莲子草主茎的伸长生长主要受溶氧的影响。研究表明,水淹植物伸长生长的能力主要受乙烯、赤霉素(GA)和脱落酸(ABA)3 种植物激素调节的影响^[29]。乙烯浓度增加导致 ABA 浓度降低 GA 浓度增加,这些因素共同决定了植株茎芽的伸长。而乙烯的生物合成不可能在细胞极度缺氧的情况下发生,因为 1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)需要消耗 O₂才能在 ACC 氧化酶(ACO)的作用下转化为乙烯。所以当溶氧含量较高时,有利于植株乙烯的合成以及主茎的伸长。本研究结果显示,高溶氧处理下喜旱莲子草可以通过增加主茎生物量分配来发展主茎的长度以尽早伸出水面。在相同光照梯度下,高溶氧水淹处理时,喜旱莲子草主茎长、节间数目、节间长以及主茎长/主茎直径均高于低溶氧水淹处理。此外,不论有光还是无光,两个高溶氧处理(L+DO+/L-DO+)下喜旱莲子草主茎长以及节间数的增长率均处于所有处理的最高水平,其平均增长率分别为 61.8%、34.2%。

和主茎不同,叶片的形态可塑性变化只有在有光的情况下才能充分展现。有光处理下叶片长宽比、比叶面积、叶倾角均高于其它水淹处理。比叶面积(SLA)即叶片面积和质量的比值,是评价植物叶片功能特性的重要参数^[30]。SLA 和植物生长对策

尤其对资源的获取和利用策略紧密相关,反映植物对不同生境的适应特征^[31]。从表 3 可以看出,两个有光水淹处理 L+DO+和 L+DO-的喜旱莲子草比叶面积均大于两个无光水淹处理 L-DO+和 L-DO-,其平均值高出 28.3%。这可能是由于水下光照的有无左右了喜旱莲子草叶片生物量分配的方向,有光条件下会促使喜旱莲子草将叶生物量从叶片厚度的累积转移到扩大叶面积上,以便更有效地利用水下弱光来提高自身的光合生产能力。不同组间的比叶面积无显著性差异,其原因究竟是光照和溶氧处理的强度不够或过大,还是其它环境因子对比叶面积起了限制作用,还有待进一步研究论证。与平展叶相比,直立叶是一种更加高效的叶部性状。在早晚弱光下,直立叶不仅比平展叶反射光少而且可以双面受光,大大提高了植株的光能利用效率。而正午强光时,直立叶接受斜射光不但降低了自身光损伤产生的机率,通过反射还可以给植株远端一些老龄叶补偿光线,延长其寿命,改善植株整体的光照条件。苏书文、赵世杰及陈波等人对玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)、栲树(*Castanopsis fargesii*)的叶片倾角研究发现,平展叶较直立叶更容易发生严重的光抑制,从而影响农作物的产量以及阔叶树种的生长发育^[32-34]。本研究显示,无光水淹处理下平展叶占有比重大,叶生物量比较小。水淹使得叶片厚度普遍降低,但各处理间叶片厚度的变化情况复杂,这也许和叶片厚度的影响因素较多有关。一方面,叶片自身解剖结构决定了叶片从中间主脉到叶片边缘厚度存在很大差异^[35]。另一方面,除光照强度和溶氧含量外,日光周期、温度周期及其它因子的周期性变化都会对叶片厚度产生影响。张艳华等人的研究就发现叶片厚度的日变化与光照强度呈极显著的负相关关系,与温度呈显著的负相关关系,与相对湿度呈显著正相关关系^[36]。

喜旱莲子草是一种公认的耐淹植物,具有陆生型和水生型两种类型^[37]。在本实验中,向水环境中施加高溶氧和适量的光照可显著提高其不定根和分枝的发生率,促进喜旱莲子草由陆生型向水生型转化。研究结果表明,不同光照和溶氧处理下喜旱莲子草不定根的变化规律和主茎一样,高溶氧水淹处理下其数目和根长显著高于其它水淹处理。李绍文认为这是由于水淹条件下植物体内乙烯的增加除了

促进植物的偏上性生长外,还可以刺激植物产生不定根^[38]。此外,和王海锋等人的研究结果一致,实验中同样发现喜旱莲子草强烈的分枝发生能力^[14],尤其在有光低溶氧处理(L+DO-)中。这是喜旱莲子草对水环境中光照和溶氧变化的一种适应性反应,将地上部分的生物量投资从不定根转移到分枝中,这将有助于增加喜旱莲子草对光资源的吸收和利用。事实上,水淹时产生更多更长的不定根和分枝对于喜旱莲子草的存活和扩张都具有重要意义。一方面,从个体水平来看,更高的发根率和抽枝率不但可以扩大喜旱莲子草的根系更大程度地吸收水环境中的有限溶氧,而且也可以更有效地扩展植株地上株型系统扩大植物水下光合的作用面积。大大拓展喜旱莲子草生长空间的同时,浓缩和占据更多水下有利资源。此外,作为一种入侵物种,更多的带根分枝的形成也增加了喜旱莲子草具有潜在独立生存能力的形态学单元数量,为该物种的生存和繁衍提供了更多的机会。另一方面,从群体水平来看,这种可塑性反应还增加了喜旱莲子草的种群生态位宽度,使其在多变的恶劣环境条件下,仍能快速地适应新环境并构建和发展成为优势种群。

目前国内外研究普遍关注光照对于耐淹植物的影响^[5-6,39],对于溶氧的作用研究不多^[40],而光照和溶氧对于水淹条件下耐淹植物生长的复合影响甚至没有人注意过。实际上,除光照强度外,溶氧同样也是水环境中重要的生态因子,对水下植物的生长存在影响。完全水淹胁迫下,溶解氧不论总量还是扩散速率都比在空气中少和慢得多,这极易造成植物缺氧^[2]。大量的研究结果显示,一旦溶解氧过低将无法维持线粒体电子传递链的正常运行,抑制植物的呼吸作用,促进有害次生代谢物质的积累^[41];富集一些潜在的有害气体,损害植物器官^[42];此外缺氧还会影响营养物质的利用,导致植株地上部分迅速死亡生物量减少,最终引起植株个体完全消亡^[43]。水淹时许多耐淹植物比如秋华柳^[6]、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)^[44]和水蓼(*Polygonum hydropiper*)^[45]的光合能力并不会受到太大影响。这是因为水淹敏感植物快速死亡的主要原因并不是低光强下无法进行光合作用,而是光合产物大量积累于叶片运输受阻,对光合速率形成的反馈抑制造成的。水淹形成的弱光环境不仅不会降低植物的光合

能力,Glaz 等甚至发现有些耐淹植物在水淹时,光合作用会显著增加^[46]。Mommer 认为,这可能是由于耐淹植物的叶子中用于激活光合器官所需能量更低^[23]。综合上述可以认为,对于水淹植物的生命活动,溶氧可能比光照更重要。

水淹环境是一种相对复杂的环境体,受多种生物和非生物因素的共同影响作用。浅度水淹条件下,除光照和溶氧外,温度、CO₂以及其它因子的作用都会对水淹植物的生长和存活产生或大或小的影响。耐淹植物对这些因子的耐受限度如何,目前鲜有人研究。未来对于耐淹植物尤其是耐淹的外来入侵植物,在不同光照条件(不同光照强度、光照周期以及光质)和溶氧条件(不同溶氧浓度)下其形态特征、解剖结构、营养物质消耗、能量转化以及其它生理生化变化对水淹这种异质性生境的响应还有待进一步的探究。近年来,国内外研究均已发现不同水淹深度对于耐淹植物的生长存在影响差异^[47-48],随着水淹深度的继续加深,喜旱莲子草等耐淹植物对超深度水淹环境中光照和溶氧等因子的变化其耐受方向和程度又会如何,值得我们继续关注和研究。

4 主要结论

(1)水淹可促进喜旱莲子草主茎和叶片发生可塑性反应,引发伸长生长。水淹后,其细长的主茎以及长而薄的直立叶更有利于植株早日出露水面。同时主茎直径的减小以及叶片厚度的降低既减少了茎叶能耗又相对增加了其浮力,进一步促进喜旱莲子草发生水下伸长生长。

(2)完全水淹条件下,喜旱莲子草表型可塑性受光照和溶氧的复合影响,且二者对植株不同营养器官的影响存在差异。其中主茎伸长生长的力度主要受溶氧的影响,而叶片的形态变化则主要受光照的影响。此外,有光条件下可促进喜旱莲子草抽枝,而高溶氧处理更有利于植株生根。这些形态变化将有助于喜旱莲子草扩大株型占据有利生境,进一步提高植株的水下存活能力。

References:

[1] Wang J S, Kong L N, Lin M S, Min F Y. Review on the characteristics and functions of riparian zone. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(11): 28-35.

[2] Armstrong W. Aeration in higher plants // Wool H W, ed.

Advances in Botanical Research. London: Academic Press, 1979: 226-328.

[3] Holmes M G, Klein W H. The light and temperature environments // Crawford R M M, ed. Plant life in aquatic and amphibious habitats. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publishers, 1987: 3-22.

[4] Sand-Jensen K. Environmental variables and their effect on photosynthesis of aquatic plant communities. Aquatic Botany, 1989, 34(1/3): 5-25.

[5] Liu Y F, Qin H W, Shi L, Zhang H J, Liu L A, Jiang C D, Wang D L. Effects of submergence on leaf anatomy and photoinhibition of photosystem II in *Oenanthe javanica* plants. Bulletin of Botany, 2010, 45(4): 426-434.

[6] Luo F L, Zeng B, Chen T, Ye X Q, Liu D. Response to simulated flooding of photosynthesis and growth of riparian plant *Salix variegata* in the Three Gorges reservoir region of china. Journal of Plant Ecology: Chinese Version, 2007, 31(5): 910-918.

[7] Wang H F, Zeng B, Li Y, Qiao P, Ye X Q, Luo F L. Effects of long-term submergence on survival and recovery growth of four riparian plant species in Three Gorges reservoir region, China. Journal of Plant Ecology: Chinese Version, 2008, 32(5): 977-984.

[8] Shi M F, Zeng B, Shen J H, Lei S T, Zhu Z, Liu J H. A review of the correlation of flooding adaptability and carbohydrates in plants. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(7): 855-866.

[9] Zhang X P, Zeng B, Chen T, Ye X Q, Luo F L, Liu D. The effects of flooding on aerenchyma formation in the stem of *Arundinella anomala* var. *depauperata* Keng, a riparian plant in Three Gorges reservoir area. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1864-1871.

[10] Tan S D, Zhu M Y, Zhang K R, Dang H S, Zhang Q F. Response and adaptation of plants to submergence stress. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(9): 1871-1877.

[11] Wang Q, Liu H, Yuan X Z, Sun R, Wang J X. Pattern and biodiversity of plant community in water-level-fluctuation zone of Pengxi river after impoundment of Three Gorges reservoir. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science, 2009, 26(4): 48-54.

[12] Rogers W E, Siemann E. Effects of simulated herbivory and resource availability on native and invasive exotic tree seedlings. Basic and Applied Ecology, 2002, 3(4): 297-307.

[13] Holm L G. Distribution and biology. Honolulu, Hawaii: University Press of Hawaii, 1977: 609.

[14] Wang H F, Zeng B, Li Y, Qiao P, Ye X Q, Luo F L. Effects of submergence on growth, survival and recovery growth of *Alternanthera philoxeroides*. Journal of Wuhan Botanical Research, 2008, 26(2): 147-152.

[15] Shen G J, Xu Z H, Yu G S. Distribution and damage of alligator weed, *Alternanthera philoxeroides* and its control. *Plant Protection*, 2005, 31(3): 14-18.

[16] Shen R L, Guan B H, Cai Y, An S Q, Jiang J H, Dong L. High sediment phosphorus concentration enhanced invasiveness of *Alternanthera philoxeroides*. *Journal of Plant Ecology: Chinese Version*, 2007, 31(4): 665-672.

[17] Jiang L Z, Wang D, Liu S N, Pan R, Shen F, Zhou J. Effect of light and nitrogen on morphological traits and biomass allocation of an invasive weed *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(1): 101-107.

[18] Liu H. Phenotypic plasticity of *Alternanthera philoxeroides* in response to light intensity and plant density. *Henan Sciences*, 2011, 29(2): 159-164.

[19] Li Y H. *Weed flora of china*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998: 81-82.

[20] Bailey-Serres J, Voesenek L A C J. Flooding stress: acclimations and genetic diversity. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59(1): 313-339.

[21] Setter T L, Laureles E V. The beneficial effect of reduced elongation growth on submergence tolerance of rice. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(10): 1551-1559.

[22] Dinka M, Szeglet P. Carbohydrate and nutrient content in rhizomes of *Phragmites australis* from different habitats of lake Fertő/Neusiedlersee. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 1999, 29(1): 47-59.

[23] Mommer L, Pons T L, Visser E J W. Photosynthetic consequences of phenotypic plasticity in response to submergence; *Rumex palustris* as a case study. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(2): 283-290.

[24] Johnson J R, Cobb B G, Drew M C. Hypoxic induction of anoxia tolerance in roots of *Adh1* null *Zea mays* L. *Plant Physiology*, 1994, 105(1): 61-67.

[25] Chung H J, Ferl R J. Arabidopsis alcohol dehydrogenase expression in both shoots and roots is conditioned by root growth environment. *Plant Physiology*, 1999, 121(2): 429-436.

[26] Almeida A M, Vriezen W H, Van Der Straeten D. Molecular and physiological mechanisms of flooding avoidance and tolerance in rice. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2003, 50(6): 743-751.

[27] Hattori Y, Nagai K, Furukawa S, Song X J, Kawano R, Sakakibara H, Wu J Z, Matsumoto T, Yoshimura A, Kitano H, Matsuoka M, Mori H, Ashikari M. The ethylene response factors *SNORKEL1* and *SNORKEL2* allow rice to adapt to deep water. *Nature*, 2009, 460(7258): 1026-1030.

[28] Nagai K, Hattori Y, Ashikari M. Stunt or elongate? Two opposite strategies by which rice adapts to floods. *Journal of Plant Research*, 2010, 123(3): 303-309.

[29] Kende H. Ethylene biosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1993, 44(1): 283-307.

[30] Roche P, Diaz-Burlinson N, Gachet S. Congruency analysis of species ranking based on leaf traits: which traits are the more reliable? *Plant Ecology*, 2004, 174(1): 37-48.

[31] Li Y L, Cu J H, Su Y Z. Specific leaf area and leaf dry matter content of some plants in different dune habitats. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 304-311.

[32] Su S W, Gao H M, Guo X L. A study on the yield potential in maize hybrids with different leaf angles. *Acta Agronomica Sinica*, 1990, 16(4): 364-372.

[33] Zhao S J, Xu C C, Meng Q W, Zou Q. The photoinhibition of photosynthesis in winter wheat leaves under field conditions. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1998, 18(4): 521-526.

[34] Chen B, Da L J. Branching patterns of *Castanopsis fargesii* as affected by growth and developmental phases. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2003, 21(3): 226-231.

[35] Lu S W, Xu X S, Shen M J. *Botany* (2nd edn). Beijing: Higher Education Press, 1991: 155-163.

[36] Zhang Y H, Guo T R, Li D S. Study on the diurnal variation of leaf thickness and its relations with ecological factors. *Journal of China University of Metrology*, 2010, 21(3): 278-282.

[37] Tao Y, Chen S F, Jiang M X. Morphological adaptation of *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb to the change of water. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(5): 454-459.

[38] Li S W. *Ecological Biological Chemistry*. Beijing: Peking University Press, 2001: 338-340.

[39] Vervuren P J A, Blom C W P M, De Kroon H. Extreme flooding events on the Rhine and the survival and distribution of riparian plant species. *Journal of Ecology*, 2003, 91(1): 135-146.

[40] Li K Y, Liu Z W, Wang C Z, Wang C H, Shi J D, Hu Y H. Effects of low dissolved oxygen on the growth of *Vallisneria spiralis*. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(5): 670-673.

[41] Li C X, Zhong Z C. Influences of mimic soil water change on the contents of malic acid and shikimic acid and root-biomasses of *Taxodium distichum* seedlings in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges reservoir region. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4394-4402.

[42] Visser E J W, Blom C W P M, Voesenek L A C J. Flooding-induced adventitious rooting in *Rumex*: morphology and development in an ecological perspective. *Acta Botanica Neerlandica*, 1996, 45(1): 17-28.

[43] Chen F Q, Xie Z Q. Survival and growth responses of *Myricaria laxiflora* seedlings to summer flooding. *Aquatic Botany*, 2009, 90(4): 333-338.

[44] Yi Y H, Fan D Y, Xie Z Q, Chen F Q. Effects of waterlogging on the gas exchange, chlorophyll fluorescence and water potential of *Quercus variabilis* and *Pterocarya stanoptera*. *Journal of Plant*

Ecology, 2006, 30(6): 960-968.

[45] Chen F Q, Li Y, Qie G W. The ecophysiological response of *Polygonumhy dropiper* plants to simulated flooding. Ecology Environment, 2008, 17(3): 1096-1099.

[46] Glaz B, Morris D R, Daroub S H. Sugarcane photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance due to flooding and water table. Crop Science, 2004, 44(5): 1633-1641.

[47] Iwanaga F, Yamamoto F. Effects of flooding depth on growth, morphology and photosynthesis in *Alnus japonica* species. New Forests, 2008, 35(1): 1-14.

[48] Chen H J, Zamorano M F, Ivanoff D. Effect of flooding depth on growth, biomass, photosynthesis, and chlorophyll fluorescence of *Typha domingensis*. Wetlands, 2010, 30(5): 957-965.

参考文献:

[1] 王家生, 孔丽娜, 林木松, 闵凤阳. 河岸带特征和功能研究综述. 长江科学院院报, 2011, 28(11): 28-35.

[5] 刘云峰, 秦洪文, 石雷, 张会金, 刘立安, 姜闯道, 王德炉. 水淹对水芹叶片结构和光系统 II 光抑制的影响. 植物学报, 2010, 45(4): 426-434.

[6] 罗芳丽, 曾波, 陈婷, 叶小齐, 刘巖. 三峡库区岸生植物秋华柳对水淹的光合和生长响应. 植物生态学报, 2007, 31(5): 910-918.

[7] 王海锋, 曾波, 李娅, 乔普, 叶小齐, 罗芳丽. 长期完全水淹对 4 种三峡库区岸生植物存活及恢复生长的影响. 植物生态学报, 2008, 32(5): 977-984.

[8] 施美芬, 曾波, 申建红, 类淑桐, 朱智, 刘建辉. 植物水淹适应与碳水化合物的相关性. 植物生态学报, 2010, 34(7): 855-866.

[9] 张小萍, 曾波, 陈婷, 叶小齐, 罗芳丽, 刘巖. 三峡库区河岸植物野古草 (*Arundinella anomala* var. *depauperata* Keng) 茎通气组织发生对水淹的响应. 生态学报, 2008, 28(4): 1864-1871.

[10] 谭淑端, 朱明勇, 张克荣, 党海山, 张全发. 植物对水淹胁迫的响应与适应. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1871-1877.

[11] 王强, 刘红, 袁兴中, 孙荣, 王建修. 三峡水库蓄水后澎溪河消落带植物群落格局及多样性. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2009, 26(4): 48-54.

[14] 王海锋, 曾波, 李娅, 乔普, 叶小齐, 罗芳丽. 完全水淹条件下空心莲子草的生长、存活及出水后的恢复动态研究. 武汉植物学研究, 2008, 26(2): 147-152.

[15] 沈国军, 徐正浩, 俞谷松. 空心莲子草的分布、危害与防除对策. 植物保护, 2005, 31(3): 14-18.

[16] 申瑞玲, 关保华, 蔡颖, 安树青, 蒋金辉, 董蕾. 底泥高磷浓度提高了喜旱莲子草的入侵性. 植物生态学报, 2007, 31(4): 665-672.

[17] 姜立志, 王东, 刘树楠, 潘睿, 沈芬, 周洁. 光照和氮素对喜旱莲子草形态特征和生物量分配的影响. 水生生物学报, 2010, 34(1): 101-107.

[18] 刘惠. 喜旱莲子草对光照及植株密度的表型可塑性响应. 河南科学, 2011, 29(2): 159-164.

[19] 李扬汉. 中国杂草志. 北京: 中国农业出版社, 1998: 81-82.

[31] 李玉霖, 崔建垣, 苏永中. 不同沙丘生境主要植物比叶面积和叶干物质含量的比较. 生态学报, 2005, 25(2): 304-311.

[32] 苏书文, 高合明, 郭新林. 不同叶夹角玉米杂交种产量潜力的研究. 作物学报, 1990, 16(4): 364-372.

[33] 赵世杰, 许长成, 孟庆伟, 邹琦. 田间小麦叶片光合作用的光抑制. 西北植物学报, 1998, 18(4): 521-526.

[34] 陈波, 达良俊. 栲树不同生长发育阶段的枝系特征分析. 武汉植物学研究, 2003, 21(3): 226-231.

[35] 陆时万, 徐祥生, 沈敏健. 植物学 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 1991: 155-163.

[36] 张艳华, 郭天荣, 李东升. 植物叶片厚度日变化及其与生态因子相关性的研究. 中国计量学院学报, 2010, 21(3): 278-282.

[37] 陶勇, 陈少凤, 江明喜. 空心莲子草对水分变化的形态适应研究. 长江流域资源与环境, 2004, 13(5): 454-459.

[38] 李绍文. 生态生物化学. 北京: 北京大学出版社, 2001: 338-340.

[40] 李宽意, 刘正文, 王春忠, 王传海, 史加达, 胡耀辉. 低溶解氧对苦草生长的影响. 长江流域资源与环境, 2006, 15(5): 670-673.

[41] 李昌晓, 钟章成. 三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉 (*Taxodium distichum*) 幼苗根部次生代谢物质含量及根生物量的影响. 生态学报, 2007, 27(11): 4394-4402.

[44] 衣英华, 樊大勇, 谢宗强, 陈芳清. 模拟淹水对枫杨和栓皮栎气体交换、叶绿素荧光和水势的影响. 植物生态学报, 2006, 30(6): 960-968.

[45] 陈芳清, 李永, 郗光武. 水蓼对模拟水淹的生理生态学响应. 生态环境, 2008, 17(3): 1096-1099.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34 ,No.2 Jan. ,2014 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

Effects of soil texture on variations of paddy soil physical and chemical properties under continuous no tillage GONG Dongqin,LÜ Jun (239)

Evaluation of the landscape patterns vulnerability and analysis of spatial correlation patterns in the lower reaches of Liaohe River Plain SUN Caizhi, YAN Xiaolu,ZHONG Jingqiu (247)

Effects of light and dissolved oxygen on the phenotypic plasticity of *Alternanthera philoxeroides* in submergence conditions XU Jianping, ZHANG Xiaoping, ZENG Bo, et al (258)

A review of the relationship between algae and bacteria in harmful algal blooms ZHOU Jin, CHEN Guofu,ZHU Xiaoshan, et al (269)

Biodiversity and research progress on picophytoplankton in saline lakes WANG Jiali, WANG Fang (282)

Effects of ozone stress on major plant physiological functions LIE Ganwen, YE Longhua, XUE Li (294)

The current progress in rodents molecular phylogeography LIU Zhu, XU Yanchun, RONG Ke, et al (307)

The progress in ecosystem services mapping: a review ZHANG Liwei, FU Bojie (316)

Autecology & Fundamentals

Growth, and cationic absorption, transportation and allocation of *Elaeagnus angustifolia* seedlings under NaCl stress LIU Zhengxiang, ZHANG Huaxin, YANG Xiuyan, et al (326)

Leaf morphology and PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Sinosenecio jishouensis* in Different Habitats XIANG Fen, ZHOU Qiang,TIAN Xiangrong, et al (337)

Response of change of wheat LAI measured with LAI-2000 to the radiance WANG Yan, TIAN Qingjiu, SUN Shaojie, et al (345)

Effects of K⁺ and Cr⁶⁺ on larval development and survival rate of the acorn barnacle *Balanus reticulatus* HU Yufeng, YAN Tao, CAO Wenhao, et al (353)

Diffusion of colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*, adults in field LI Chao, PENG He, CHENG Dengfa, et al (359)

Population, Community and Ecosystem

Seasonal variations in fish community structure in the Laizhou Bay and the Yellow River Estuary SUN Pengfei, SHAN Xiujuan, WU Qiang, et al (367)

Variations in fish community structure and diversity in the sections of the central and southern Yellow Sea SHAN Xiujuan, CHEN Yunlong, DAI Fangqun, et al (377)

Research on the difference in eutrophication state and indicator threshold value determination among lakes in the Southern Jiangsu Province, China CHEN Xiaohua, LI Xiaoping, WANG Feifei,et al (390)

Effecton of tidal creek system on the expansion of the invasive *Spartina* in the coastal wetland of Yancheng HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing (400)

The spatial and temporal variations of maximum light use efficiency and possible driving factors of Croplands in Jiangsu Province KANG Tingting, GAO Ping, JU Weimin, et al (410)

Simulation of summer maize yield influenced by potential drought in China during 1961—2010 CAO Yang, YANG Jie, XIONG Wei,et al (421)

Forest change and its impact on the quantity of oxygen release in Heilongjiang Province during the Past Century ZHANG Lijuan,JIANG Chunyan,MA Jun,et al (430)

Soil macro-faunal guild characteristics at different successional stages in the Songnen grassland of China	LI Xiaoqiang, YIN Xiuqin, SUN Lina (442)
Seasonal dynamics of soil microbial biomass in six forest types in Xiaoxing'an Mountains, China	LIU Chun, LIU Yankun, JIN Guangze (451)
Landscape, Regional and Global Ecology	
Variation of drought and regional response to climate change in Huang-Huai-Hai Plain	XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (460)
Wind speed changes and its influencing factors in Southwestern China	ZHANG Zhibin, YANG Ying, ZHANG Xiaoping, et al (471)
Characteristics of soil carbon density distribution of the <i>Kobresia humilis</i> meadow in the Qinghai Lake basin	CAO Shengkui, CHEN Kelong, CAO Guangchao, et al (482)
Life cycle assessment of carbon footprint for rice production in Shanghai	CAO Liming, LI Maobai, WANG Xinqi, et al (491)
Research Notes	
Seasonal changes of ground vegetation characteristics under artificial <i>Caragana intermedia</i> plantations with age in desert steppe	LIU Rentao, CHAI Yongqing, XU Kun, et al (500)
The experimental study on trans-regional soil replacement	JIN Yinghua, XU Jiawei, QIN Lijie (509)
Sensitivity analysis of swat model on changes of landscape pattern: a case study from Lao Guanhe Watershed in Danjiangkou Reservoir Area	WEI Chong, SONG Xuan, CHEN Jie (517)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 2 期 (2014 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 2 (January, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松

主 管 中国科学技术协会

主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂

发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号

许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

