

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

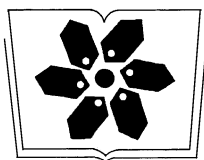
## Acta Ecologica Sinica



第33卷 第3期 Vol.33 No.3 **2013**

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 33 卷 第 3 期 2013 年 2 月 (半月刊)

## 目次

### 生态系统服务功能模拟与管理

- 保障自然资本与人类福祉:中国的创新与影响 ..... Gretchen C. Daily, 欧阳志云, 郑 华, 等 (669)
- 建立我国生态补偿机制的思路与措施 ..... 欧阳志云, 郑 华, 岳 平 (686)
- 区域生态合作机制下的可持续农户生计研究——以“稻改旱”项目为例 ..... 梁义成, 刘 纲, 马东春, 等 (693)
- 生态系统服务功能管理研究进展 ..... 郑 华, 李屹峰, 欧阳志云, 等 (702)
- 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控 ..... 白 杨, 郑 华, 庄长伟, 等 (711)
- 汶川地震灾区生物多样性热点地区分析 ..... 徐 佩, 王玉宽, 杨金凤, 等 (718)
- 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例 ..... 李屹峰, 罗跃初, 刘 纲, 等 (726)
- 森林生态效益税对陕西省产业价格水平的影响 ..... 黎 洁, 刘峰男, 韩秀华 (737)
- 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素 ..... 饶恩明, 肖 燚, 欧阳志云, 等 (746)
- 居民对文化林生态系统服务功能的认知与态度 ..... 高 虹, 欧阳志云, 郑 华, 等 (756)
- 青海省三江源自然保护区生态移民补偿标准 ..... 李屹峰, 罗玉珠, 郑 华, 等 (764)
- 张家界武陵源风景区自然景观价值评估 ..... 成 程, 肖 燚, 欧阳志云, 等 (771)
- 国家生态保护重要区域植被长势遥感监测评估 ..... 侯 鹏, 王 桥, 房 志, 等 (780)
- 都江堰市水源涵养功能空间格局 ..... 傅 斌, 徐 佩, 王玉宽, 等 (789)
- 汶川地震重灾区生态系统碳储存功能空间格局与地震破坏评估 ..... 彭 怡, 王玉宽, 傅 斌, 等 (798)

### 前沿理论与学科综述

- “波特假说”——生态创新与环境管制的关系研究述评 ..... 董 颖, 石 磊 (809)
- 生态环境保护与福祉 ..... 李惠梅, 张安录 (825)
- 丛枝菌根真菌最新分类系统与物种多样性研究概况 ..... 王宇涛, 辛国荣, 李韶山 (834)

### 个体与基础生态

- “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨 ..... 蒋 冲, 王 飞, 刘思洁, 等 (844)
- 内蒙古荒漠草原主要草食动物食性及其营养生态位 ..... 刘贵河, 王国杰, 汪诗平, 等 (856)
- 基于面向对象及光谱特征的植被信息提取与分析 ..... 崔一娇, 朱 琳, 赵力娟 (867)
- 桉树叶片光合色素含量高光谱估算模型 ..... 张永贺, 陈文惠, 郭乔影, 等 (876)
- 枫杨幼苗对土壤水分“湿-干”交替变化光合及叶绿素荧光的响应 ..... 王振夏, 魏 虹, 吕 茜, 等 (888)
- 模拟淹水对杞柳生长和光合特性的影响 ..... 赵竑绯, 赵 阳, 张 驰, 等 (898)
- 梨枣花果期耗水规律及其与茎直径变化的相关分析 ..... 张琳琳, 汪有科, 韩立新, 等 (907)
- 基于上部叶片 SPAD 值估算小麦氮营养指数 ..... 赵 犇, 姚 霞, 田永超, 等 (916)

### 种群、群落和生态系统

- 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量 ..... 王卫霞, 史作民, 罗 达, 等 (925)

低效柏木纯林不同改造措施对水土保持功能的影响..... 黎燕琼,龚固堂,郑绍伟,等 ( 934 )

浙江紧水滩水库浮游植物群落结构季节变化特征..... 张 华,胡鸿钧,晁爱敏,等 ( 944 )

黑龙江凤凰山国家级自然保护区野猪冬季容纳量及最适种群密度 ..... 孟根同,张明海,周绍春 ( 957 )

云南苍山火烧迹地不同恢复期地表蜘蛛群落多样性..... 马艳滢,李 巧,冯 萍,等 ( 964 )

**景观、区域和全球生态**

基于综合气象干旱指数的石羊河流域近 50 年气象干旱特征分析 ..... 张调风,张 勃,王有恒,等 ( 975 )

基于 CLUE-S 模型的湟水流域土地利用空间分布模拟 ..... 冯仕超,高小红,顾 娟,等 ( 985 )

**研究简报**

三大沿海城市群滨海湿地的陆源人类活动影响模式..... 王毅杰,俞 慎 ( 998 )

洋河水库富营养化发展趋势及其关键影响因素..... 王丽平,郑丙辉 ( 1011 )

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 350 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 36 \* 2013-02



**封面图说:**卧龙自然保护区核桃坪震后——汶川大地震是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最大的一次地震,地震的强度、烈度都超过了 1976 年的唐山大地震。在这次地震中,震区的野外大熊猫受到不同程度的影响,卧龙自然保护区繁育中心的赠台大熊猫团团、圆圆居住的屋舍上方巨石垮塌,房舍全部毁坏,只因两只熊猫在屋外玩耍逃过一劫。不过,圆圆一度因惊恐逃走,失踪 5 天后才被找回来。由于繁育基地两面山体滑坡,竹子短缺等原因,繁育基地只能将大熊猫全部转移下山。

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

DOI: 10.5846/stxb201204240589

王振夏,魏虹,吕茜,李昌晓,周珺,高伟,陈伟. 枫杨幼苗对土壤水分“湿-干”交替变化的光合及叶绿素荧光响应. 生态学报, 2013, 33(3): 0888-0897.

Wang Z X, Wei H, Lü Q, Li C X, Zhou J, Gao W, Chen W. Response of photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of *Pterocarya stenoptera* seedlings to submergence and drought alternation. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 0888-0897.

## 枫杨幼苗对土壤水分“湿-干”交替变化 光合及叶绿素荧光的响应

王振夏, 魏虹\*, 吕茜, 李昌晓, 周珺, 高伟, 陈伟

(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:**以盆栽 1 年生枫杨幼苗为实验材料,通过人工设置土壤水分来模拟三峡库区消落带不同土壤水分对枫杨幼苗的光合参数、光合色素含量、叶绿素荧光特性等的影响。试验设置 4 个处理组,分别为常规供水、常规供水-轻度干旱-复水、水淹、水淹-轻度干旱-复水,3 个处理期分别为前期(0—33 d)、中期(34—63 d)、后期(64—78 d)。结果表明,不同的水分处理显著地影响了枫杨幼苗“表现性”的气体交换、光合色素含量和水分利用效率等特性,但相较而言对枫杨幼苗“内在性”的叶绿素荧光特性影响较小,且影响的结果和程度因处理组和指标而异。78 d 时,除胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )、叶绿素 a/叶绿素 b、光化学猝灭值( $qP$ )和非光化学猝灭值( $qN$ )外,水淹组(FL 组)的各项指标在 4 个处理组中均为最低值;“湿-干”交替组(FD 组)的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $Tr$ )、气孔导度( $G_s$ )及总叶绿素含量则表现出先降低复水后显著增加的趋势;DR 组的变化趋势与 FD 组类似,但变化的幅度较 FD 组小。研究发现,枫杨幼苗面对不同水分状况呈现出了一定的敏感特性,但随着胁迫时间的延长其无论是从光合、水分利用还是叶绿素荧光特性方面都表现出积极的响应,较能适应干旱、水淹、“湿-干”交替等多种环境胁迫,且在胁迫解除后能够迅速恢复生长,可以考虑用于三峡库区消落带的植被重建。

**关键词:**三峡库区;水分交替;枫杨幼苗;光合参数;光合色素;叶绿素荧光特性

## Response of photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of *Pterocarya stenoptera* seedlings to submergence and drought alternation

WANG Zhenxia, WEI Hong\*, LÜ Qian, LI Changxiao, ZHOU Jun, GAO Wei, CHEN Wei

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

**Abstract:** The Three Gorges Dam has created a new riparian zone which is called 30m-water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir of the Yangtze River. Altered ecosystems of the riparian zone can disrupt the hydrological regime by reducing inundation, or creating longer term submergence, which adversely affects riparian vegetation, and in particular, the native plant species. Chinese wingnut (*Pterocarya stenoptera*) is a dominant native riparian tree species in the Three Gorges Reservoir region, and thus has to face the modified riparian environment. In order to shed light on the impacts of soil water regimes in this region on the Chinese wingnut, 4 water treatments were imposed on 1-year-old seedlings of Chinese wingnut for more than 2 months. The water treatments included normal water supply (CK), normal water supply-light drought-normal water supply (DR), flooding (FL) and flooding-light drought-normal water supply (FD), which simulated the modified hydrological regime in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir region. The treatment of 3

**基金项目:**国家林业公益性行业科研专项(201004039);国家教育部“留学回国人员科研启动金”(教外司留[2010]1561号);中央高校基本科研业务费专项资金重点项目(XDJK2009B032)

收稿日期:2012-04-24; 修订日期:2012-10-23

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



stages for DR and FD groups lasted 33, 30 and 15 days respectively. The effects of water treatments on photosynthetic parameters, photosynthetic pigment contents and chlorophyll fluorescence characteristics of Chinese wingnut seedlings were investigated after 0, 33, 63 and 78 days of water treatment. The results showed that net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), transpiration rate ( $Tr$ ), photosynthetic pigment contents (chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoid) and water use efficiency ( $WUE$ ) of Chinese wingnut seedlings were reduced significantly in DR, FL and FD treatments as compared to CK. However, the chlorophyll fluorescence features of Chinese Wingnut seedlings in these three treatments were slightly reduced comparable to that of CK. Compared to other three treatments, seedlings in FL group were adversely influenced dramatically. At the end of the treatment, the  $P_n$  of Chinese wingnut seedlings under FL treatment was reduced by 65.9%,  $WUE$  was reduced by 65.7%, and total chlorophyll content was reduced by 68.7% comparing with that of CK. In contrast to CK group,  $P_n$ ,  $Tr$ ,  $G_s$  and total chlorophyll in FD groups were also decreased significantly in the beginning of the treatment due to flooding and drought, but they were increased significantly after rehydration. The seedlings in DR groups showed similar but lower variation as to those of FD. The results suggested that the seedlings of Chinese wingnut were sensitive to soil water stress including flooding and drought, although they showed obvious tolerant ability to water stress in terms of the characteristics of morphology, photosynthesis, water use efficiency and chlorophyll fluorescence. Additionally, all of them showed excellent recovery ability after stress being released. Therefore, Chinese wingnut might be suitable to the modified hydrological regime caused by the Three Gorges Dam, and thus could be applied to vegetation reconstruction in the water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir for its adaption to drought, flooding and “flooding-drought” alternative variation.

**Key Words:** Three Gorges Reservoir Region; soil moisture alternation; *Pterocarya stenoptera* seedlings; photosynthesis; photosynthetic pigments; chlorophyll fluorescence

三峡大坝的修建给三峡库区的生态环境带来了极大的影响<sup>[1]</sup>。夏季水位 145 m, 而冬季水位可高达 175 m, 形成了落差将近 30 m 面积达 350 km<sup>2</sup> 的水位季节性涨落的消落区<sup>[2]</sup>。大幅度的水位涨落所带来的不同时期水渍、干旱及“水淹-干旱”交替环境状况将进一步加剧消落区生境的破碎、植被的退化, 严重影响三峡库区的安全、健康和可持续发展<sup>[3-5]</sup>。研究表明, 筛选适生树种进行生态修复是一个行之有效的方式<sup>[6-7]</sup>。其中乡土树种在维持库区的生态环境, 确保库岸生态系统生态功能的正常发挥等方面具有重要意义<sup>[8-9]</sup>。但是, 部分乡土树种可能出现不适应新的水分逆境而消亡, 因此研究消落区水分环境对三峡库区适生树种的生长及光合特性的影响具有重要的理论和实践意义, 研究结果可以为三峡库区消落带的植被恢复提供相应的理论支撑。

枫杨(*Pterocarya stenoptera* C. DC.) 是长江流域一种优良的乡土树种, 因其分布广泛、适应能力强、生长速度快而被广泛用于护坡护堤的造林工程中。枫杨在三峡库区也广泛分布, 经过长期的生长较能适应库区的气候和土壤环境, 但是对于其能否忍受因大坝的修建而带来新的土壤水分干湿交替变化的状况还不清楚。目前对于枫杨的耐水湿研究主要有水淹对枫杨木材特性<sup>[10]</sup>、气体交换及叶绿素荧光<sup>[11]</sup>、保护性酶<sup>[12]</sup>等的影响, 而关于土壤水分交替变化对枫杨的光合生理及叶绿素荧光特性的影响还未见报道。为了保证高水位时的航运安全, 在三峡库区消落带植被恢复治理中, 乔木将被种植在消落带上层(170 m 以上区域), 故本实验模拟了消落带上层的土壤水分状况, 特别设置了水分交替变化组, 以枫杨幼苗为实验材料进行了盆栽模拟研究。实验的研究目的为: (1) 土壤水分交替变化对枫杨幼苗的影响与单一的水淹或干旱对其的光合及叶绿素荧光特性影响有何异同; (2) 面对不同的水分胁迫, 枫杨幼苗有何应对策略。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料和地点

2009 年 6 月中旬将生长基本一致的 120 株枫杨当年实生幼苗移栽入花盆, 盆高 18 cm, 盆口直径 23 cm,

每盆 1 株。将土壤(紫色土,取自西南大学生态实验基地内)晒干去除杂质后装盆,每盆土重 3.5 kg。将所有实验植株置于重庆市西南大学生态实验基地内(海拔 249 m)进行相同条件培养,于 8 月 1 日将所有植株移入透明遮雨棚内(棚顶透明,四面通风)进行实验准备。

## 1.2 试验设计

将平均高度为 23 cm 的实验幼苗随机分成 4 组,每组 30 盆。试验处理分为 CK、DR、FL、FD 共 4 组,具体方式详见表 1。整个实验分为前期(0—33 d)、中期(34—63 d)和后期(64—78 d)3 个阶段。水分处理共分为正常供水、轻度干旱、水淹和复水 4 种方式。其中,正常供水方式保持田间持水量的 70%—80%<sup>[13]</sup>,水淹状态为土壤表面以上 5 cm 积水,轻度干旱处理为田间持水量的 50%—55% (土壤水分含量采用称重法<sup>[14]</sup>测定),复水处理为恢复至常规供水。淹水处理时将枫杨幼苗置于直径 68 cm、高 28 cm 的大塑料盆内,并向盆内注水至水面超过土壤表面 5 cm,每周换水 1 次。由于实验处理时间为夏季,故 FD 组由水淹到干旱处理时,放置两天便可以达到轻度干旱状态。从 2009 年 8 月 5 日起分别在处理 0 d、33 d、63 d、78 d 对各项指标进行测定,每个指标测定 4 次,每个处理 5 次重复。

表 1 各组水分处理方式  
Table 1 The ways of soil water treatments

处理组 Treatment groups	处理方式 Water treatments		
	0—33d	34—63d	64—78d
对照组 Control group CK	正常供水	正常供水	正常供水
轻度干旱组 Mild drought group DR	正常供水	轻度干旱	复水
水淹组 Flooded group FL	水淹	水淹	水淹
“湿-干”交替组 Wet-dry alternating group FD	水淹	轻度干旱	复水

## 1.3 测定指标及方法

### 1.3.1 光合参数的测定

于晴朗天气 9:00—11:00,选取植株从上到下第 3 或第 4 片健康叶片进行一定程度的平铺固定,使用 LI-6400 便携式光合分析仪(Licor, USA, 2 cm×3 cm 红蓝光源叶室)测定净光合速率( $P_n$ ),蒸腾速率( $T_r$ ),气孔导度( $G_s$ ),胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )等气体交换参数,并通过计算得到水分利用效率( $WUE$ )和气孔限制值( $L_s$ ):  $WUE = P_n / T_r$ <sup>[15]</sup>,  $L_s = 1 - C_i / C_a$ <sup>[16]</sup> ( $C_i$  为胞间  $CO_2$  浓度,  $C_a$  为大气  $CO_2$  浓度)。测定前,先用饱和光对植物进行 60 min 的光诱导。测定时,叶室温度设为 25 °C,控制光合有效辐射( $PAR$ )为 1000  $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ,  $CO_2$  浓度为 400  $\mu mol / mol$ ,相对湿度 60%—70%。

### 1.3.2 光合色素含量的测定

选取用于测定光合速率的叶片,称重并记录,采用浸提法<sup>[17]</sup>用岛津 UV-2550 型分光光度计分别测定叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的吸光值  $A_{663}$ 、 $A_{645}$  和  $A_{470}$ ,并计算其含量,换算成单位鲜重的含量。总叶绿素含量=叶绿素 a 含量+叶绿素 b 含量,每个样本测定 5 次重复。

### 1.3.3 叶绿素荧光参数的测定

叶绿素荧光参数的测量与光合参数的测量同天进行,于 0:00—4:00 使用 Li-6400 便携式光合分析仪荧光叶室测定叶绿素荧光参数。测量前先将样品暗适应 3 h,然后打开检测光( $PFD < 0.1 \text{ mol} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ,频率为 600 Hz)测定  $F_o$ ,再打开一次饱和脉冲光( $PFD$  为 8000  $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ,频率 20 KHz,0.8 s,1 个脉冲),测定  $F_m$  及  $F_v / F_m$ 。脉冲光结束后打开光化光( $PFD$  为 336  $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ),等荧光基本稳定时测定  $F_s$ ,之后再打开一次饱和脉冲光测定  $F_m'$ ,关闭光化光暗适应 3 s,继以一次远红光( $PFD$  约为 5  $\text{mol} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ,3 s)测定  $F_o'$ 。光化学猝灭系数( $qP$ )、非光化学猝灭系数( $qN$ )、PS II 的实际量子产量( $Yield$ )和电子传递速率( $ETR$ )按下列公式计算: $qP = (F_m' - F_t) / (F_m' - F_o)$ ,  $qN = 1 - (F_m' - F_o') / (F_m - F_o)$ ,  $Yield = (F_m' - F_s) / F_m'$ ,  $ETR = Yield \times PFD \times 0.5 \times 0.84 (PFD = 336 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$ <sup>[18]</sup>。

## 1.4 数据处理

数据统计分析采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS16.0 软件结合进行。使用单因素分析方法 (one-way ANOVA) 来揭示不同水分处理对枫杨幼苗生理生态特征的影响, 并运用 LSD 检验法检验不同组的各个生理指标显著差异性 ( $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 光合参数的变化

#### 2.1.1 水分处理对枫杨幼苗净光合速率的影响

由图 1A 可以看出 3 个处理组的土壤水分条件均显著降低枫杨幼苗的净光合速率。实验前期 (0—33 d), FL、FD 两组幼苗  $P_n$  比同期对照显著下降了 38.6% ( $P<0.05$ ); 实验中期 (34—63 d), DR、FL、FD 3 个处理组幼苗的  $P_n$  进一步降低, 与对照相比分别降低了 40.2%、60.3% 和 76.9%; 而实验后期恢复正常供水后, DR 和 FD 两组的  $P_n$  恢复迅速, 与进一步降低的 FL 组形成鲜明对比。由此可见, 干旱和水淹均对枫杨幼苗的  $P_n$  影响较大, 但在复水后 DR 组和 FD 组都能恢复到较高水平, 且随着水淹时间的延长, FL 组下降幅度减小, 这在一定程度上暗示出枫杨幼苗的抗逆特性。

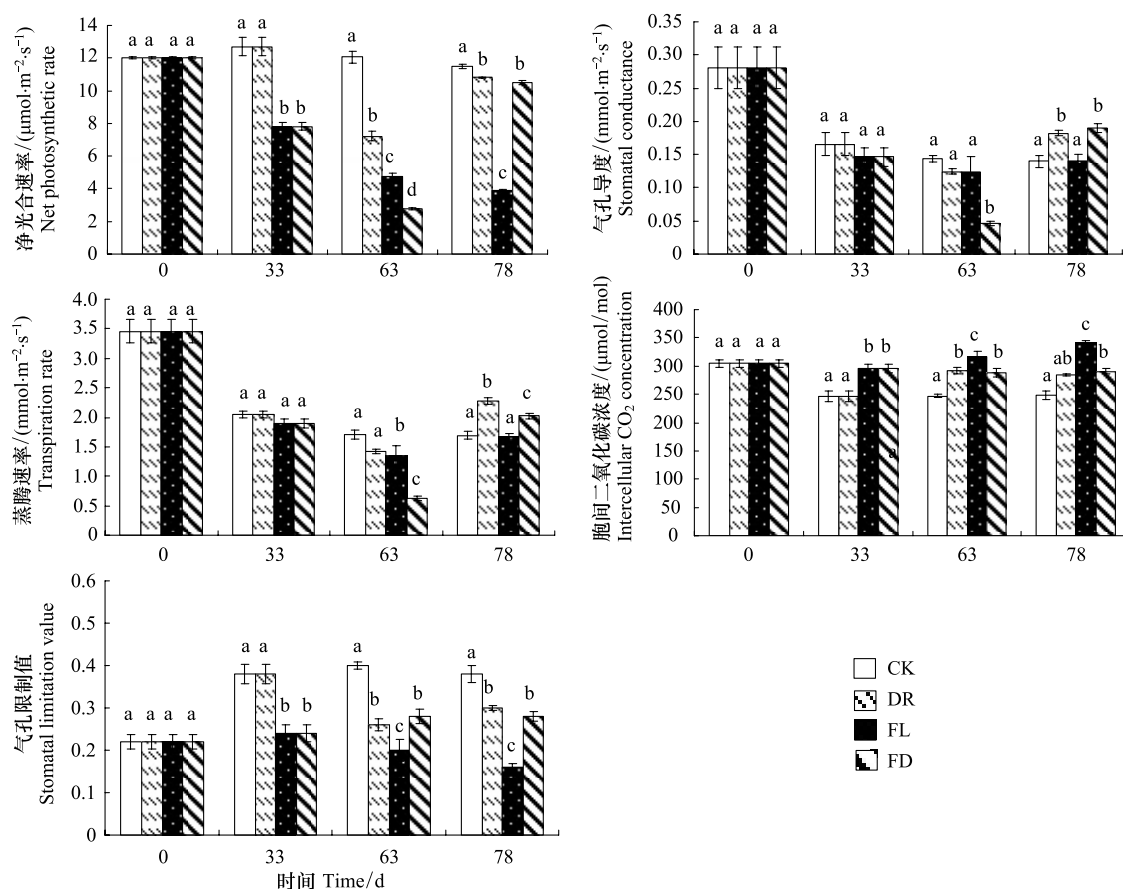


图 1 不同水分条件下枫杨幼苗光合参数的变化

Fig. 1 Photosynthetic parameters of *P. stenoptera* seedlings in different water treatments

图中数值为平均值±标准误 ( $n=5$ ); 不同小写字母分别表示在同一时间各处理之间有显著差异 ( $P<0.05$ )

#### 2.1.2 水分处理对枫杨幼苗气孔导度和蒸腾速率的影响

不同水分处理对枫杨幼苗的  $G_s$  和  $T_r$  的影响相对较小, 且 4 个实验组的  $G_s$  变化趋势与其  $T_r$  的变化趋势基本一致 (图 1)。实验前期, 3 个处理组都未与对照呈现显著差异; 实验中期, FD 组的  $G_s$  和  $T_r$  均是 4 个实验组中的最低值, 显著低于同期对照 ( $P<0.05$ ); 实验后期, 复水后 DR 和 FD 两组的  $G_s$  和  $T_r$  增加明显, 显著高

于对照组 ( $P < 0.05$ )。结果表明,“湿-干”交替胁迫对枫杨幼苗的影响要大于单一的干旱或水淹胁迫,面对不同的水分胁迫枫杨幼苗都出现  $G_s$  和  $T_r$  的降低,复水后 DR 及 FD 组的值显著高于对照可能是因为植物“补偿机制”的作用。

### 2.1.3 水分处理对枫杨幼苗胞间 $CO_2$ 浓度和气孔限制值的影响

3 个处理组幼苗均表现出  $C_i$  的增加和  $L_s$  的降低,两者的变化趋势相反(图 1)。实验前期,FL 和 FD 两组的  $C_i$  显著高于对照, $L_s$  则显著低于对照;实验中期,3 个处理组的  $C_i$  都显著高于对照, $L_s$  则均显著低于对照;实验后期,DR 组经过复水与对照无显著差异,FL 和 FD 两组仍与对照有显著差异,且整个实验期间 FL 组的  $C_i$  始终为 4 个实验组中的最大值,而其  $L_s$  则为 4 个实验组的最小值。从结果可以推测长期水淹对枫杨幼苗的  $C_i$  及  $L_s$  影响要大于短期干旱及干湿交替环境对其的影响。

### 2.2 水分处理对枫杨幼苗水分利用效率的影响

由图 2 可知,各处理组的  $WUE$  与对照相比都出现了显著的下降。实验前期,FL 和 FD 两组的  $WUE$  下降了 33.6% ( $P < 0.05$ );实验中期和后期,3 个处理组  $WUE$  都显著低于同期的对照,FL 组  $WUE$  在实验结束时仅为对照的 34.3%。由此可知,复水可明显促使枫杨幼苗  $WUE$  的恢复,持续水淹对  $WUE$  影响最大。

### 2.3 水分处理对枫杨幼苗光合色素含量的影响

FD 组、FL 组的总叶绿素含量和类胡萝卜素含量的变化趋势基本一致(图 3)。实验前期,FL 和 FD 组总叶绿素含量显著低于对照 47%,类胡萝卜素含量低于对照 38.7%;实验中后期,FL 组保持继续降低的趋势,FD 组则呈现上升的趋势,实验结束时两组的总叶绿素含量分别比对照低 68.7% 和 18.9%,类胡萝卜素含量分别比对照低 66.6%、34.9%(图 3)。

各组叶绿素 a 与叶绿素 b 的含量之比在 2.163—2.823 之间波动(图 3)。33d 时,FD 组与 FL 组的叶绿素 a 与叶绿素 b 的含量之比显著低于对照,但在实验结束时 3 个处理组都显著高于对照。总叶绿素与类胡萝卜素含量之比在 4.798—6.729 范围内波动,FL 组始终与对照无显著差异,在实验中后期 FD 与 DR 组都高于同期对照,且可以看出复水对 FD 组的影响要大于 DR 组(图 3)。

结果显示,3 个处理对植物光合色素含量均有较大影响,其中以水淹为甚,这势必会在一定程度上影响植株的光合能力。

### 2.4 水分处理对枫杨幼苗叶绿素荧光特性的影响

#### 2.4.1 水分处理对枫杨幼苗 PS II 最大光化学效率的影响

叶绿素荧光参数  $F_v/F_m$  常用以度量叶片 PS II 原初光能转换效率和 PS II 的潜在活性<sup>[19]</sup>。持续水淹对枫杨的  $F_v/F_m$  产生的影响最为显著,FL 组始终显著低于对照 ( $P < 0.05$ ),实验前中后期分别比对照下降了 6.77%、10.5% 和 8.02%,胁迫末期值为 0.749。DR 和 FD 两组在实验中后期与对照始终没有显著差异,保持相对稳定的状态(图 4)。

#### 2.4.2 水分处理对枫杨幼苗电子传递速率、实际光化学量子产量、光化学猝灭值和非光化学猝灭值的影响

各组的  $ETR$  和  $Yield$  变化趋势基本相同。实验前期,FL 和 FD 两组的  $ETR$  和  $Yield$  显著下降,分别比对照降低了 15.2% 和 14.7%。随着处理时间的延长,FL 组的  $ETR$  和  $Yield$  出现回升,胁迫末期分别比对照低 6.89% 和 6.50%,且末期  $Yield$  与对照无显著差异,而 DR 组的  $ETR$  和  $Yield$  在中期都相比对照显著下降,但复水后恢复到对照水平(图 4)。

实验前期,FL 和 FD 组的  $qP$  相比对照显著下降了 6.56% ( $P < 0.05$ );实验中后期,FL 组的  $qP$  值恢复到

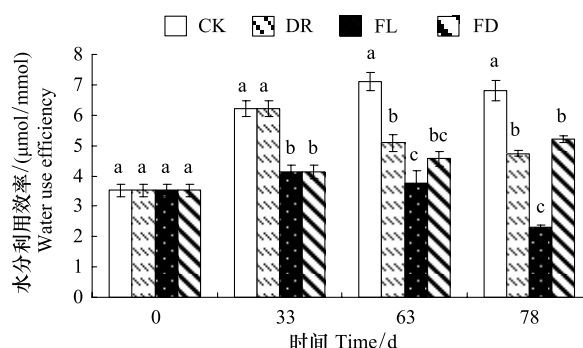


图 2 不同水分处理下枫杨幼苗的水分利用效率的变化

Fig. 2 WUE of *P. stenoptera* seedlings in different water treatments



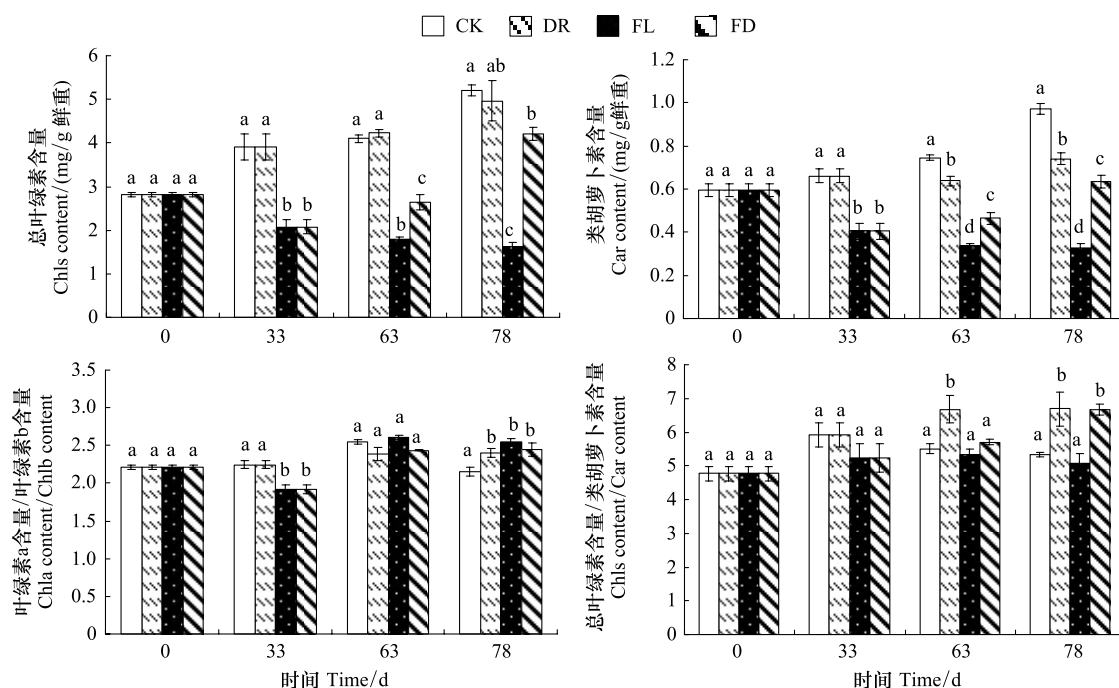
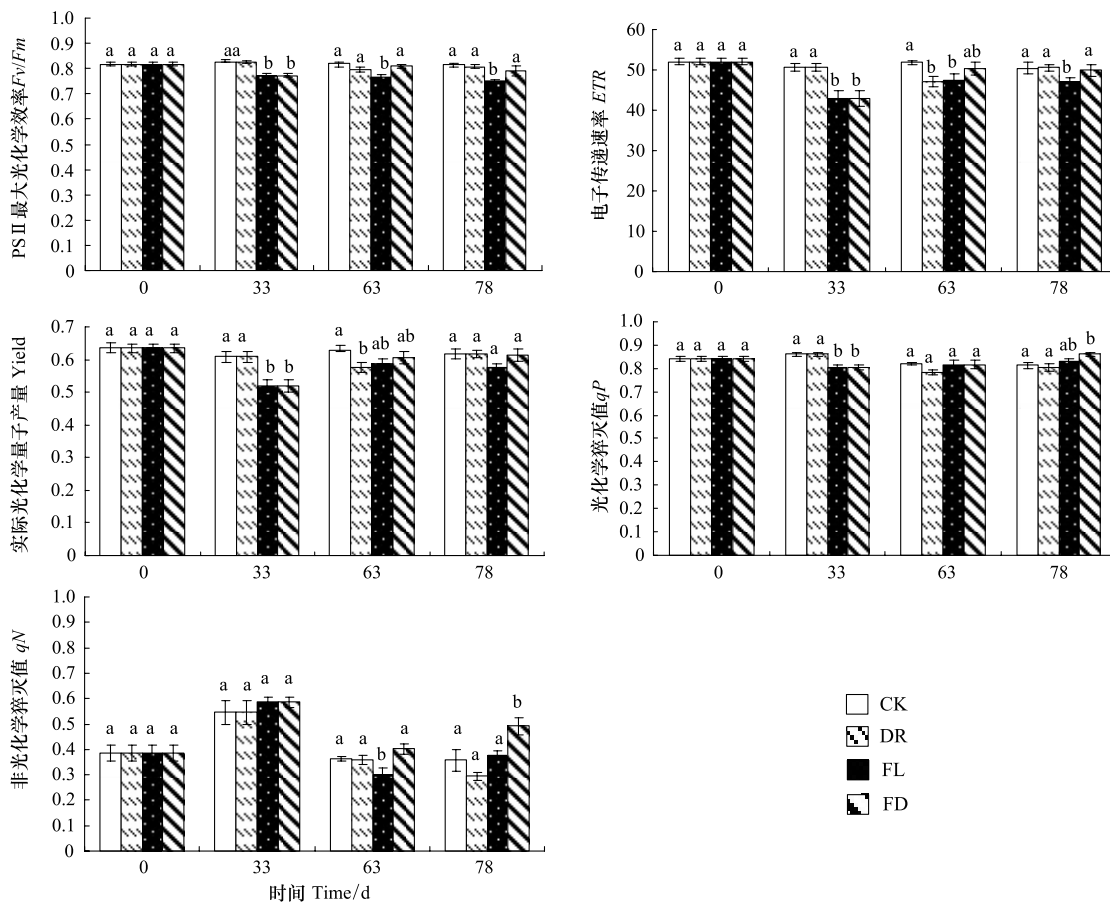


图3 不同水分处理下枫杨幼苗的光合色素含量变化

Fig. 3 The contents of photosynthetic pigment of *P. stenoptera* seedlings subjected to different water treatments图4 不同水分处理下枫杨幼苗的 ETR、Yield、 $q_P$  和  $q_N$  变化Fig. 4 ETR, Yield,  $q_P$  and  $q_N$  of *P. stenoptera* seedlings subjected to different water treatments

对照水平并维持在稳定水平,FD 组在实验结束时显著高于对照。DR 组的  $qP$  值未与对照出现显著差异。实验前期,FL 组的  $qN$  值相比对照升高了 7.48%;实验中期,FL 组的  $qN$  有所下降,FD 组的  $qN$  值比对照略微升高;实验后期,FL 组在实验末期与对照没有显著差异,FD 组的  $qN$  值显著高于对照( $P < 0.05$ )。与  $qP$  相同,DR 组的  $qN$  值始终与对照无显著差异(图 4)。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 不同水分处理条件下枫杨幼苗的光合响应

通过本研究发现,土壤水分状况的差异显著影响枫杨幼苗的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率等生理参数。水淹组 FL 组的净光合速率先显著下降,后下降幅度有所减小并保持稳定状态,符合耐淹植物的抗性表现特点<sup>[20-22]</sup>。研究表明对水淹没有耐受性的栓皮栎(*Quercus variabilis*)在水面高出土壤 8 cm 的水淹处理 50 d 后其净光合速率迅速下降为对照的 9%<sup>[23]</sup>,而枫杨幼苗在水淹 63 d 后其净光合速率为对照的 39.7%,表现出对水淹胁迫的耐受力。FD 组和 DR 组的净光合速率先大幅下降,复水后新叶生长迅速,使得其净光合速率能够基本恢复至对照水平,表现出较强的恢复生长能力,同时也说明即使是在先水淹后干旱的环境中枫杨幼苗也能维持其生长,为复水后的正常生长储备物质和能量。从 DR 和 FD 两组幼苗气孔导度的变化趋势可以看出,植物在受到干旱胁迫时降低气孔导度以减少水分的散失来抵抗水分亏缺的逆境<sup>[24-25]</sup>,而在胁迫解除后,则通过开放气孔和增强水分的蒸腾速率使植株加强光合作用,提高净光合速率。

引起植物光合速率下降的因素既包括气孔限制也包括 RuBP 羧化限制、植物体内活性氧代谢失调而引发的生物膜结构的破坏等非气孔限制因素<sup>[26]</sup>。Farquhar 和 Sharkey 认为,可用叶肉细胞  $CO_2$  浓度( $C_i$ )和气孔限制值( $L_s$ )两个指标判断光合速率下降的原因是气孔或者非气孔限制因素<sup>[27]</sup>。本实验中,FL 组幼苗  $P_n$  下降, $C_i$  升高, $L_s$  下降,可以认为其光合速率下降的决定因素是非气孔限制,说明水淹胁迫可能引起植物体内 RuBP 羧化酶效率降低或导致光合器官结构与功能受到破坏等<sup>[28]</sup>,显著影响植物光合作用的进行。同理 DR 组净光合速率的下降也主要是由叶肉细胞同化能力降低等非气孔因素限制因素引起。而 FD 组可认为主要是由于气孔导度的降低引起了枫杨幼苗净光合速率的下降。由此可以看出,单纯的水淹或干旱主要是通过非气孔限制因素来影响枫杨的净光合速率,而经历水淹-干旱交替胁迫时则是因为气孔限制而导致的净光合速率的降低,出现这种现象的内在机制目前还不清楚。

#### 3.2 不同水分处理条件下枫杨幼苗水分利用效率的响应

植物  $WUE$  是一个较为稳定的衡量碳固定与水分消耗比例的良好指标<sup>[29]</sup>。从研究结果可以看出,3 种水分处理对枫杨水分利用效率的影响较大,长期水淹使得枫杨幼苗的生理活动因缺氧或者植株和土壤之间的水力导度下降而受到抑制,其  $WUE$  也受到显著影响,这与吕茜等<sup>[30]</sup>的研究一致。而水淹后干旱对枫杨幼苗的水分利用效率有一定的促进, $WUE$  的提高对于其在干旱胁迫下维持生理活动起到了积极的作用。

#### 3.3 不同水分处理条件下枫杨幼苗光合色素含量的响应

光合色素是光合作用中能量的捕获器,其含量高低直接影响到植物对光能的捕获,进而影响光合产物的积累,最终影响植株的生长<sup>[31]</sup>。本实验中在水淹胁迫下枫杨幼苗光合色素含量下降,一定程度上降低了叶片的光合能力,这也与水淹使得植物叶片膜受损电介质外渗导致叶片失绿、发黄和凋落的结论一致<sup>[32-33]</sup>。与 FL 组相比,FD 组幼苗在土壤水分交替变化的环境中能够保持较高的总叶绿素和类胡萝卜素含量,对于维持植株的光合能力和抗胁迫能力是有利的。叶绿素  $a/b$  的升高表明植物体内的捕光色素蛋白复合物含量减少,由此带来的结果是叶片对光能的捕获量减少,降低了光合机构遭受光氧化破坏的可能性<sup>[34]</sup>。本实验中 3 个处理组在试验结束时其叶绿素  $a/b$  值都高于对照,是幼苗对不良环境的适应表现。

#### 3.4 不同水分处理条件下枫杨幼苗叶绿素荧光的响应

叶绿素荧光技术被称为研究植物光合功能的快速、无损伤探针<sup>[35-36]</sup>,因为其所检测到的植物体所发出的叶绿素荧光信号包含了十分丰富的光合作用信息,而这些特性与植物的营养和受胁迫程度密切相关<sup>[37]</sup>。该技术检测到的荧光信息主要来自叶绿体光系统 II (PS II) 的天线色素蛋白复合体中的叶绿素  $a$  分子,而淹水

会导致叶绿素的降解、气孔关闭,加速叶片衰老凋落,植物的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度都有大幅的降低,这势必会在很大程度上影响植株的叶绿素荧光特性<sup>[38-41]</sup>。 $Fv/Fm$  反映了 PS II 反应中心内禀光能转换效率,表明 PS II 利用光能的能力。实验表明,持续水淹显著降低了枫杨幼苗的  $Fv/Fm$  值,但轻度干旱对枫杨幼苗的  $Fv/Fm$  影响较小,与对照没有显著差异。由此说明,持续水淹使 PS II 反应中心受损,抑制光合作用的原初反应,而“淹-干”的水分变化条件使得枫杨幼苗能够在此过程中基本恢复 PS II 反应中心的光化学活性。短期水淹使枫杨幼苗的  $ETR$  和  $Yield$  先出现了较大幅度的下降后有所回升,可以认为这是枫杨幼苗叶绿素荧光对水淹的一种正响应。在持续水淹的环境中,枫杨幼苗通过一定程度上增大 PS II 电子传递速率和实际光能转化效率来维持植株的光合作用。轻度干旱对于 DR 组幼苗的  $ETR$  和  $Yield$  的影响大于 FD 组,这表明短时间解除水淹胁迫可以使枫杨幼苗的 PS II 反应中心的功能得到一定程度的恢复,暗示出水淹对枫杨幼苗 PS II 造成的损害可通过解除胁迫而得到修复。

光化学淬灭系数( $qP$ )的大小反映的是 PS II 原初电子受体 QA 的氧化还原状态和 PS II 开放中心的数目,其值越大,说明 PS II 具有越高的电子传递活性<sup>[42]</sup>。短期水淹使枫杨幼苗的  $qP$  值显著下降,这表明在短期水淹胁迫下,枫杨幼苗体内电子由 PS II 的氧化侧向 PS II 反应中心的传递受阻,用于进行光合作用的电子减少,以热或其他形式耗散的光能增加<sup>[43]</sup>。而持续水淹下和复水后枫杨幼苗  $qP$  回升则表明枫杨的 PS II 反应中心对于环境条件有正响应,在水淹后期增大 PS II 反应中心的开放程度来维持植株较高的净光合速率。非光化学淬灭系数( $qN$ )反映的是 PS II 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分<sup>[44]</sup>, $qN$  已经被证明为检测早期胁迫最敏感的参数<sup>[45]</sup>,当植物处于胁迫条件时, $qN$  值增大<sup>[46]</sup>。本实验中交替组的枫杨幼苗可在一定程度上以提高热耗散能力的方式对其自身形成保护。

从本实验研究结果来看,长期水淹对枫杨幼苗的影响要大于轻度干旱及“湿-干”交替胁迫,而面对不同的水分环境,枫杨幼苗也会呈现出不尽相同的适应策略。但总体来看,枫杨幼苗在水分代谢、光合生理以及叶绿素荧光等方面对水淹、轻度干旱以及“淹-干”的土壤水分含量交替变化条件都表现出较强的适应性和可塑性。此外,值得注意的是水淹组幼苗在实验中期时萌发出不定根,这更加强了植株的抗逆特性,可以考虑将枫杨用于三峡库区消落带植被的恢复重建。但是,三峡库区消落带生境复杂,对于其能否忍受复杂的环境条件和更长时间的交替胁迫有待进一步的研究。

## References:

- [ 1 ] Chen G J. Situation and problems in the Three Gorges Reservoir area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(2): 107-112.
- [ 2 ] 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*, 2007, 31(5): 910-918.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] Shi X H. Eutropication and phosphorus release of soil in drawdown area of Three Gorges Reservoir. *Soils and Fertilizers*, 2004, (1): 40-44.
- [ 5 ] Jiang H T, Xu F F, Cai Y, Yang D Y. Weathering characteristics of sloping fields in the Three Gorges Reservoir area, China. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 50-55.
- [ 6 ] Wang Y, Liu Y F, Liu S B, Huang H W. Vegetation reconstruction in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, 22(5): 513-522.
- [ 7 ] Li Y, Zeng B, Ye X Q, Qiao P, Wang H F, Luo F L. The effects of flooding on survival and recovery growth of the riparian plant (*Salix variegata* Franch.) in Three Gorges Reservoir region. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 28(5): 1923-1930.
- [ 8 ] Kozłowski T T. Physiological-ecological impacts of flooding on riparian forest ecosystems. *Wetlands*, 2002, 22(3): 550-561.
- [ 9 ] Kramer K, Vreugdenhil S J, Vanderwerf D C. Effects of flooding on the recruitment, damage and mortality of riparian tree species: a field and simulation study on the Rhine floodplain. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(11): 3893-3903.
- [ 10 ] Wang Y H, Li K Y, Yu Y B, Liu X E. Effects of flooding on the moisture content and ring width of *Pterocarya stenoptera* grown in the beaches. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2005, 32(4): 505-508.
- [ 11 ] 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 stenoptera*. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(6): 960-968.
- [ 12 ] Li J Y. Variations of activities for protecting enzymes and superoxide of lipid membrane in Chinese Wingnut tree seedlings (*Pterocarya stenoptera*)

- after flooding treatment. Journal of Anhui Agricultural University, 2006, 33(4): 450-453.
- [13] Li C X, Zhong Z C, Liu Y. Effect of soil water change on photosynthetic characteristics of *Taxodium distichum* seedlings in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 1953-1959.
- [14] Shi X L, Wang G D. Research advances in measuring method of soil water content. China Rural Water and Hydropower, 2003, 10:84-86.
- [15] Nijs I, Ferris R, Blum H. Stomatal regulation in a changing climate: a field study using free air temperature increase (FATI) and free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE). Plant, Cell and Environment, 1997, 20(8): 1041-1050.
- [16] Berry J A, Downton W J S. Environmental Regulation of Photosynthesis // Govind J, ed. Photosynthesis (Vol II). New York: Academic Press, 1982.
- [17] Hao J J, Kang Z L, Yu Y. Experimental Technology of Plant Physiology. Beijing: Chemical Industry Press, 2006:65-68.
- [18] Demmig-Adams B, Adams William W. Xanthophyll cycle and light stress in nature: uniform response to excess direct sunlight among higher plant species. Planta, 1996, 198(3): 460-470.
- [19] Wang Y, Chen J W, Di X Y. Characterization of the responses of photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters to water stress in seedlings of six provenances of Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7031-7038.
- [20] Sultan S E, Wilczek A M, Bell D L, Hand G. Physiological response to complex environments in annual *Polygonum* species of contrasting ecological breadth. Oecologia, 1998, 115(4): 564-578.
- [21] 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): 1633-1672.
- [22] Chen F Q, Guo C Y, Wang C H, Xu W N, Fan D Y, Xie Z Q. Effects of waterlogging on ecophysiological characteristics of *Salix variegata* seedlings. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1229-1233.
- [23] Yi Y H, Fan D Y, Xie Z Q, Chen F Q. The effects of waterlogging on photosynthesis-related eco-physiological processes in the seedlings of *Quercus variabilis* and *Taxodium ascendens*. Acta Ecologica Sinica, 2008, 12(28): 6025-6033.
- [24] Bennett J M, Boote K J, Hammond L C. Relationships among water potential components, relative water content, and stomatal resistance of field-grown peanut leaves. Peanut Science, 1984, 11(1): 31-35.
- [25] Midgley G F, Moll E J. Gas exchange in arid-adapted shrubs: when is efficient water use a disadvantage? South African Journal of Botany, 1993, 59(5): 491-495.
- [26] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(1): 317-345.
- [27] Guo H Y, Fan Z C. Effect of Soil Water Stress on Photosynthesis of *Allium sativum* L. Acta Horticulturae Sinica, 1999, 26(6): 404-405.
- [28] Büssis D, Heineke D. Acclimation of potato plants to polyethylene glycol-induced water deficit II. Contents and subcellular distribution of organic solutes. Journal of Experimental Botany, 1998, 49(325): 1349-1360.
- [29] Zheng S X, ShangGuan Z P. Comparison of leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in eight broad-leaved tree species. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1080-1087.
- [30] Lü Q, Wei H, Li C X. Effects of soil water condition on photosynthetic characteristics of *Pterocarya stenoptera* C. DC. seedlings. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2010, 32(3): 116-123.
- [31] Wang Z. Plant Physiology. Beijing: China Agriculture Press, 2002:128-131.
- [32] Smethurst C F, Shabala S. Screening methods for waterlogging tolerance in lucerne: comparative analysis of waterlogging effects on chlorophyll fluorescence, photosynthesis, biomass and chlorophyll content. Functional Plant Biology, 2003, 30(3): 335-343.
- [33] Islam M A, Macdonald S E. Ecophysiological adaptations of black spruce (*Picea mariana*) and tamarack (*Larix laricina*) seedlings to flooding. Trees-Structure and Function, 2004, 18(1): 35-42.
- [34] Thornber J P. Chlorophyll-proteins; light-harvesting and reaction center components of plants. Annual Review of Plant Physiology, 1975, 26(1): 127-158.
- [35] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis; the basics. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1991, 42(1): 313-349.
- [36] Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(4): 444-448.
- [37] Li X, Feng W, Zeng X C. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(10): 2186-2196.
- [38] Van Kooten O, Snel J F H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. Photosynthesis Research, 1990, 25(3): 147-150.
- [39] Gu X, Li Z Q, Jiang C D, Shi L, Zhang H J, Xing Q. Effects of submergence and subsequent re-emergence on photosynthetic characteristics and photoinhibition in *Echinodorus amazonicus* seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6466-6474.
- [40] Feng D L, Liu Y, Zhong Z C, Yang J, Xie J. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of the reed (*Phragmites communis*) grown in the hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2013-2021.
- [41] Yuan L, Zhang L Q, Gu Z Q. Responses of chlorophyll fluorescence of an invasive plant *Spartina alterniflora* to continuous waterlogging. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(4): 882-889.



- [42] Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(4): 444-448.
- [43] Liang Y, Wang S, Feng L X, Tian C Y. Effects of heavy metal stress on the growth and chlorophyll fluorescence of *Chaetoceros gracilis*. Periodical of Ocean University of China, 2004, 38(1): 59-67.
- [44] Chen X L, Li S Q, Ren X L. Effect of atmospheric  $\text{NH}_3$  and hydroponic solution nitrogen levels on chlorophyll fluorescence of corn genotypes with different nitrogen use efficiencies. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1026-1033.
- [45] Qian Y Q, Zhou X X, Han L, Sun Z Y, Ju G S. Rapid light-response curves of PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Salix leucopithecia* subjected to cadmium-ion stress. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6134-6142.
- [46] Bader M R, von Caemmerer S, Ruuska S, Nakano H. Electron flow to oxygen in higher plants and algae: rates and control of direct photoreduction (Mehler reaction) and rubisco oxygenase. Biological Sciences, 2000, 355(1402): 1433-1446.

#### 参考文献:

- [1] 陈国阶. 三峡库区发展态势与问题. 长江流域资源与环境, 2003, 12(2): 107-112.
- [2] 罗芳丽, 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.
- [3] 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.
- [4] 石孝洪. 三峡水库消落区土壤磷素释放与富营养化. 土壤肥料, 2004, (1): 40-44.
- [6] 王勇, 刘义飞, 刘松柏, 黄宏文. 三峡库区消落带植被重建. 植物学通报, 2005, 22(5): 513-522.
- [7] 李娅, 曾波, 叶小齐, 乔普, 王海峰, 罗芳丽. 水淹对三峡库区岸生植物秋华柳 (*Salix variegata* Franch.) 存活和恢复生长的影响. 生态学报, 2005, 28(5): 1923-1930.
- [10] 汪佑宏, 李克禹, 余应兵, 刘杏娥. 淹水程度对滩地枫杨木材含水率和年轮宽度的影响. 安徽农业大学学报, 2005, 32(4): 505-508.
- [11] 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.
- [12] 李纪元. 涝渍胁迫对枫杨幼苗保护酶活性及膜脂过氧化物的影响. 安徽农业大学学报, 2006, 33(4): 450-453.
- [13] 李昌晓, 钟章成, 刘芸. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉幼苗光合特性的影响. 生态学报, 2005, 25(8): 1953-1959.
- [14] 时新玲, 王国栋. 土壤含水量测定方法研究进展. 中国农村水利水电, 2003, 10: 84-86.
- [17] 郝建军, 康宗利, 于洋. 植物生理学实验技术. 北京: 化学工业出版社, 2006: 65-68.
- [19] 王琰, 陈建文, 狄晓艳. 不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征. 生态学报, 2011, 31(23): 7031-7038.
- [22] 陈芳清, 郭成圆, 王传华, 许文年, 樊大勇, 谢宗强. 水淹对秋华柳幼苗生理生态特征的影响. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1229-1233.
- [23] 衣英华, 樊大勇, 谢宗强, 陈芳清. 模拟淹水对池杉和栓皮栎光和生理生态过程的影响. 生态学报, 2008, 12(28): 6025-6033.
- [27] 郭洪芸, 樊治成. 土壤水分胁迫对大蒜光合特性的影响. 园艺学报, 1999, 26(6): 404-405.
- [30] 吕茜, 魏虹, 李昌晓. 土壤水分条件对枫杨幼苗光合生理的影响. 西南大学学报: 自然科学版, 2010, 32(3): 116-123.
- [31] 王忠. 植物生理学. 北京: 中国农业出版社, 2002: 128-131.
- [37] 李晓, 冯伟, 曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展. 西北植物学报, 2006, 26(10): 2186-2196.
- [39] 谷昕, 李志强, 姜闯道, 石雷, 张会金, 邢全. 水淹导致皇冠草光合机构发生变化并加剧其出水后光抑制. 生态学报, 2009, 29(12): 6466-6474.
- [40] 冯大兰, 刘芸, 钟章成, 杨娟, 谢君. 三峡库区消落带芦苇 (*Phragmites communis* (reed)) 的光合生理响应和叶绿素荧光特性. 生态学报, 2008, 28(5): 2013-2021.
- [41] 袁琳, 张利权, 古志钦. 入侵植物互花米草 (*Spartina alterniflora*) 叶绿素荧光对淹水胁迫的响应. 环境科学学报, 2010, 30(4): 882-889.
- [42] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. 植物学通报, 1999, 16(4): 444-448.
- [43] 梁英, 王帅, 冯力霞, 田传远. 重金属胁迫对纤细角毛藻生长及叶绿素荧光特性的影响. 中国海洋大学学报, 2004, 38(1): 59-67.
- [44] 陈小莉, 李世清, 任小龙. 大气  $\text{NH}_3$  和介质供氮水平对不同氮效率玉米基因型叶绿素荧光参数的影响. 生态学报, 2008, 28(3): 1026-1033.
- [45] 钱永强, 周晓星, 韩蕾, 孙振元, 巨关升.  $\text{Cd}^{2+}$  胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响. 生态学报, 2011, 31(20): 6134-6142.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 3 February, 2013 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Ecosystem Service Simulation and Management

- Securing Natural Capital and Human Well-Being: Innovation and Impact in China ..... Gretchen C. Daily, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, et al (677)
- Establishment of ecological compensation mechanisms in China: perspectives and strategies ..... OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, YUE Ping (686)
- Regional cooperation mechanism and sustainable livelihoods: a case study on paddy land conversion program (PLCP) ..... LIANG Yicheng, LIU Gang, MA Dongchun, et al (693)
- Progress and perspectives of ecosystem services management ..... ZHENG Hua, LI Yifeng, OUYANG Zhiyun, et al (702)
- Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian basin: Based on InVEST model ..... BAI Yang, ZHENG Hua, ZHUANG Changwei, et al (711)
- Identification of hotspots for biodiversity conservation in the Wenchuan earthquake-hit area ..... XU Pei, WANG Yukuan, YANG Jinfeng, et al (718)
- Effects of land use change on ecosystem services: a case study in Miyun reservoir watershed ..... LI Yifeng, LUO Yuechu, LIU Gang, et al (726)
- Impacts of forest eco-benefit tax on industry price levels in Shaanxi Province, China ..... LI Jie, LIU Zhengnan, HAN Xiuhua (737)
- Spatial characteristics of soil conservation service and its impact factors in Hainan Island ..... RAO Enming, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, et al (746)
- Perception and attitudes of local people concerning ecosystem services of culturally protected forests ..... GAO Hong, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (756)
- Standard of payments for ecosystem services in Sanjiangyuan Natural Reserve ..... LI Yifeng, LUO Yuzhu, ZHENG Hua, et al (764)
- Natural landscape valuation of Wulingyuan Scenic Area in Zhangjiajie City ..... CHENG Cheng, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, et al (771)
- Satellite-based monitoring and appraising vegetation growth in national key regions of ecological protection ..... HOU Peng, WANG Qiao, FANG Zhi, et al (780)
- Spatial Pattern of Water Retention in Dujiangyan County ..... FU Bin, XU Pei, WANG Yukuan, et al (789)
- Spatial distribution of carbon storage function and seismic damage in wenchuan earthquake stricken areas ..... PENG Yi, WANG Yukuan, FU Bin, et al (798)

### Frontiers and Comprehensive Review

- The Porter Hypothesis: a literature review on the relationship between eco-innovation and environmental regulation ..... DONG Ying, SHI Lei (809)
- Ecological protection and well-being ..... LI Huimei, ZHANG Anlu (825)
- An overview of the updated classification system and species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi ..... WANG Yutao, XIN Guorong, LI Shaoshan (834)

### Autecology & Fundamentals

- Evaporation paradox in the northern and southern regions of the Qinling Mountains ..... JIANG Chong, WANG Fei, LIU Sijie, et al (844)
- The diet composition and trophic niche of main herbivores in the Inner Mongolia Desert steppe ..... LIU Guihe, WANG Guojie, WANG Shiping, et al (856)
- Abstraction and analysis of vegetation information based on object-oriented and spectra features ..... CUI Yijiao, ZHU Lin, ZHAO Lijuan (867)
- Hyperspectral estimation models for photosynthetic pigment contents in leaves of *Eucalyptus* ..... ZHANG Yonghe, CHEN Wenhui, GUO Qiaoying, et al (876)
- Response of photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of *Pterocarya stenoptera* seedlings to submergence and drought alternation ..... WANG Zhenxia, WEI Hong, LÜ Qian, et al (888)

Effect of flooding stress on growth and photosynthesis characteristics of <i>Salix integra</i> .....	
.....	ZHAO Hongfei, ZHAO Yang, ZHANG Chi, et al ( 898 )
Water consumption of pear jujube trees ( <i>Ziziphus jujuba</i> Mill. ) and its correlation with trunk diameter during flowering and fruit development periods .....	ZHANG Linlin, WANG Youke, HAN Lixin, et al ( 907 )
Estimation of nitrogen nutrient index on SPAD value of top leaves in wheat .....	
.....	ZHAO Ben, YAO Xia, TIAN Yongchao, et al ( 916 )
<b>Population, Community and Ecosystem</b>	
Carbon and nitrogen storage under different plantations in subtropical south China .....	
.....	WANG Weixia, SHI Zuomin, LUO Da, et al ( 925 )
Impact on water and soil conservation of different bandwidths in low-efficiency cypress forest transformation .....	
.....	LI Yanqiong, GONG Gutang, ZHENG Shaowei, et al ( 934 )
Seasonal changes of phytoplankton community structure in Jinshuitan Reservoir, Zhejiang, China .....	
.....	ZHANG Hua, HU Hongjun , CHAO Aimin, et al ( 944 )
Winter carrying capacity and the optimum population density of wild boar in fenghuang Mountains National Nature Reserve of Heilongjiang Province .....	MENG Gentong, ZHANG Minghai, ZHOU Shaochun ( 957 )
Diversity of ground-dwelling spider community in different restoring times of post-fire forest, Cangshan Mountain, Yunnan Province .....	
.....	MA Yanyan, LI Qiao, FENG Ping, et al ( 964 )
<b>Landscape, Regional and Global Ecology</b>	
Drought characteristics in the shiyang river basin during the recent 50 years based on a composite index .....	
.....	ZHANG Tiaofeng, ZHANG Bo, WANG Youheng, et al ( 975 )
Land use spatial distribution modeling based on CLUE-S model in the Huangshui River Basin .....	
.....	FENG Shichao, GAO Xiaohong, GU Juan, et al ( 985 )
<b>Research Notes</b>	
Patterns of terrestrial anthropogenic impacts on coastal wetlands in three city clusters in China .....	WANG Yijie, YU Shen ( 998 )
Eutrophication development and its key affected factors in the Yanghe Reservoir .....	WANG Liping, ZHENG Binghui ( 1011 )

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,300 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 33 卷 第 3 期 (2013 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 3 (February, 2013)

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	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
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元