

中国百种杰出学术期刊  
中国精品科技期刊  
中国科协优秀期刊  
中国科学院优秀科技期刊  
新中国 60 年有影响力的期刊  
国家期刊奖

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 2 期  
Vol.31 No.2  
**2011**



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 31 卷 第 2 期      2011 年 1 月    (半月刊)

## 目 次

长白山山杨种群的性比格局及其空间分布 ..... 潘春芳,赵秀海,夏富才,等 (297)

冬季融冻过程中白三叶叶片抗氧化酶活力和渗透调节物含量变化与抗冻性的关系 .....  
..... 赵 梅,周瑞莲,刘建芳,等 (306)

黄土高原主要森林类型自然性的灰色关联度分析 ..... 王乃江,刘增文,徐 钊,等 (316)

两种抗生素对龙须菜的光合生理效应 ..... 简建波,邹定辉,刘文华,等 (326)

典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征 ..... 潘复静,张 伟,王克林,等 (335)

塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响 ..... 陈亚鹏,陈亚宁,徐长春,等 (344)

基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价 ..... 宋富强,邢开雄,刘 阳,等 (354)

火因子对荒漠化草原草本层片植物群落组成的影响 ..... 贺郝钰,苏洁琼,黄 磊,等 (364)

4 种阔叶幼苗对 PEG 模拟干旱的生理响应 ..... 冯慧芳,薛 立,任向荣,等 (371)

城市带状绿地宽度与温湿效益的关系 ..... 朱春阳,李树华,纪 鹏,等 (383)

西藏斧钺水鸟多样性及斑头雁繁殖活动区的变化 ..... 张国钢,刘冬平,钱法文,等 (395)

王朗自然保护区大熊猫生境选择 ..... 康东伟,康 文,谭留夷,等 (401)

东方田鼠警觉对其功能反应的作用格局 ..... 陶双伦,杨锡福,邓凯东,等 (410)

台州市路桥区重金属污染对土壤动物群落结构的影响  
..... 白 义,施时迪,齐 鑫,等 (421)

青岛湾小型底栖生物周年数量分布与沉积环境 ..... 杜永芬,徐奎栋,类彦立,等 (431)

叉尾斗鱼种群遗传变异与亲缘地理 ..... 王培欣,白俊杰,胡隐昌,等 (441)

C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 植物寄主对华北地区棉铃虫越冬代和第一代的影响 ..... 叶乐夫,付 雪,戈 峰 (449)

3 种海拔高度茶园中 2 种害虫与其天敌间的数量和空间关系 ..... 毕守东,柯胜兵,徐劲峰,等 (455)

坝上地区农田和恢复生境地地表甲虫多样性 ..... 刘云慧,宇振荣,王长柳,等 (465)

若尔盖高寒湿地干湿土壤条件下微生物群落结构特征 ..... 牛 佳,周小奇,蒋 娜,等 (474)

红枣贮藏期果面微生物多样性 ..... 沙月霞 (483)

CO<sub>2</sub> 和温度升高情况下白粉菌侵染对西葫芦生长特性的影响 ..... 刘俊稚,葛亚明,Pugliese Massimo,等 (491)

丛枝菌根真菌对中性紫色土土壤团聚体特征的影响 ..... 彭思利,申 鸿,袁俊吉,等 (498)

新疆断裂带泉水中细菌群落结构的 PCR-DGGE 分析 ..... 吴江超,高小其,曾 军,等 (506)

石油污染对海洋浮游植物群落生长的影响 ..... 黄逸君,陈全震,曾江宁,等 (513)

不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应 ..... 何俊瑜,任艳芳,王阳阳,等 (522)

基于 CLUE-S 模型的密云县面源污染控制景观安全格局分析 ..... 潘 影,刘云慧,王 静,等 (529)

基于生态足迹的生态地租分析 ..... 龙开胜,陈利根,赵亚莉 (538)

深圳市植被受损分级评价及其与景观可达性的关系 ..... 刘语凡,陈 雪,李贵才,等 (547)

**专论与综述**

美国、加拿大环境和健康风险管理方法 ..... 贺桂珍,吕永龙 (556)

植物蜡质及其与环境的关系 ..... 李婧婧,黄俊华,谢树成 (565)

油田硫酸盐还原菌酸化腐蚀机制及防治研究进展 ..... 庄 文,初立业,邵宏波 (575)

叶际微生物研究进展 ..... 潘建刚,呼 庆,齐鸿雁,等 (583)

# 塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响

陈亚鹏<sup>1,2</sup>, 陈亚宁<sup>1,2,\*</sup>, 徐长春<sup>3</sup>, 李卫红<sup>1,2</sup>, 付爱红<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 乌鲁木齐 830011;  
3. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 为了分析干旱环境下地下水埋深变化对胡杨(*Populus euphratica* Oliv.) 光合作用的影响, 对塔里木河下游 3 个地下水埋深(4.91, 6.93m 和 8.44m) 环境下胡杨叶片的气体交换日变化、光响应曲线、 $P_N-C_i$  曲线以及叶绿素荧光特性等进行了比较研究。研究表明: 当地下水埋深从 4.91m 增加到 6.93m 和 8.44m, 胡杨光合速率( $P_N$ ) (10:00), 初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )、以及 PS II 实际光化学效率( $\Omega_{PSII}$ )、电子传递速率( $ETR$ )、非光化学猝灭系数( $NPQ$ ) 和正午叶水势( $\Psi_{midday}$ ) 等都发生了明显变化, 其中胡杨  $NPQ$  增加了 109%—127%,  $\Omega_{PSII}$ ,  $ETR$  和  $\Psi_{midday}$  分别减小了 24%—29%, 17%—22% 和 31.6%—45.6%, 表明胡杨受到的干旱胁迫程度在增加; 而当地下水埋深在 6.93—8.44m 之间时, 上述参数无显著变化, 表明胡杨很可能处于相同干旱胁迫程度; 并且在地下水埋深 4.91—8.44m 范围内, 最大光化学效率( $F_v/F_m$ ), 表观量子效率( $\phi$ ), Rubisco 羧化速率( $V_{cmax}$ ), 等参数都未发生明显变化, 表明即使地下水埋深增加到 8.44m, 此时的干旱胁迫程度也未超过胡杨的耐受能力, 其光合能力也未受到不可逆转的伤害。

**关键词:** 胡杨(*Populus euphratica* Oliv.); 叶绿素荧光; 地下水埋深; 光合作用

## Effects of groundwater depth on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River

CHEN Yapeng<sup>1,2</sup>, CHEN Yaning<sup>1,2,\*</sup>, XU Changchun<sup>3</sup>, LI Weihong<sup>1,2</sup>, FU Aihong<sup>1,2</sup>

1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

3 School of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

**Abstract:** To reveal the effects of groundwater depth change on gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Populus euphratica* grown in arid region, we measured and conducted comparative studies among the daily course of gas exchange, light response curve, photosynthetic response to CO<sub>2</sub> ( $P_N-C_i$  curve), chlorophyll fluorescence parameters, leaf water potential, and chlorophyll content of *P. euphratica* grown at different groundwater depths (4.91m, 6.93m and 8.44m) in the lower reaches of Tarim River. The results showed that the net photosynthetic rates ( $P_N$ ) measured at 10:00, the minimal fluorescence ( $F_0$ ), the maximal fluorescence ( $F_m$ ), the actual photochemical efficiency of PS II ( $\Omega_{PSII}$ ), the apparent rate of electron transport ( $ETR$ ), the non-photochemical quenching coefficient ( $NPQ$ ) and the leaf water potential measured at noon ( $\Psi_{midday}$ ) were obviously changed with the groundwater depth increasing from 4.91m to 6.93m and 8.44m. Among them  $NPQ$  increased by 109%—127%, suggesting that *P. euphratica* could increase the thermal dissipation of excess excitation energy by  $NPQ$  process to avoid suffering the damage of photosynthetic apparatus. However,  $\Omega_{PSII}$  decreased by 24%—29%, indicating that the increasing groundwater depth resulted in the photochemical change of light-adapted leaves. Moreover,  $F_0$  decreased by 12.2%—18%,  $F_m$  decreased by 7%—15.5%,  $ETR$  decreased by 17%—

基金项目: 国家自然科学基金(40871059); 国家科技支撑计划项目(2006BAC01A03); 中国科学院“西部之光”计划(XBBS 200804)

收稿日期: 2009-11-25; 修订日期: 2010-09-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

22%, and  $\Psi_{\text{midday}}$  decreased by 31.6%—45.6% respectively, showing that the degree of drought stress from which *P. euphratica* suffered would increase when the groundwater depth increased from 4.91m to 6.93m and 8.44m. Additionally, when the groundwater depth increased from 6.93m to 8.44m, the  $F_m$ ,  $F_v/F_0$  and  $F_0$  measured at predawn and noon did not change obviously, showing that *P. euphratica* could hold the PS II photochemical activity and the PS II reaction center was not damaged under this condition. Similarly,  $\Psi_{\text{midday}}$ ,  $\Omega_{\text{PS II}}$  and  $ETR$  also did not change significantly, showing that trees grown at groundwater depths between 6.93m and 8.44m likely suffered from the same degree of drought stress. When the groundwater depth ranged from 4.91m to 8.44m, the apparent quanta efficiency ( $\varphi$ ) changed slightly, with minimal damage to photosynthetic structures; and the maximum velocity of Rubisco for carboxylation ( $V_{\text{cmax}}$ ), the maximum potential rate of electron transport ( $J$ ) and the triose phosphate utilization rate ( $TPU$ ) did not change markedly, suggesting that *P. euphratica* can keep the activity of electron transport on a certain extent and the output quantity of triose phosphate from leaves; simultaneously, the photochemical quenching ( $qP$ ) changed insignificantly with the increasing groundwater depths, indicating that the opening degree of PS II reaction center of *P. euphratica* grown at different groundwater depths was approximate the same. Moreover, the maximal photochemical efficiency of PS II ( $F_v/F_m$ ) measured at predawn and noon possessed the higher values ranging from 0.85 to 0.87 and from 0.81 to 0.82, respectively, indicating that PS II original photochemical efficiency was not influenced and the photosynthetic structures were not damaged by the increasing drought stress. Overall, the drought stress degree *P. euphratica* suffered from within the groundwater depths 4.91—8.44 m was not beyond the tolerance of trees, that is, the photosynthetic capability of *P. euphratica* did not get an irreversible harm even if the groundwater depth increased to 8.44m.

**Key Words:** *Populus euphratica*; chlorophyll fluoresce; groundwater depth; photosynthesis

光合作用是绿色植物对各种内外因子最敏感的生理过程之一<sup>[1]</sup>。近年来,随着植物生理生态测试技术的发展,便携式测定仪器可以实现在野外自然状态下测定植物的气体交换过程,诊断植物体内光合机构的运转状况<sup>[2]</sup>。叶绿素荧光是研究光合作用机理的天然探针<sup>[3]</sup>,能够探测光合机构的光能捕获和电子传递的关键信息,且对环境变化特别敏感<sup>[4]</sup>,为探测光合系统的一些行为和植物对环境胁迫的响应以及直接评价植物对于胁迫忍受程度和敏感度提供了一种快速的、无损伤的试验手段<sup>[5-6]</sup>,并在强光、高温、低温、干旱等逆境生理研究中得到广泛应用。

胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)是干旱荒漠地区天然分布的惟一乔木树种,它耐盐碱、水湿,抗干旱、风沙,对维护干旱和半干旱地区生态系统功能,保障绿洲农牧业生产和为居民生活提供用材等起着重要的作用,具有较高的生态、经济和社会效益<sup>[7-8]</sup>。近50a来,由于塔里木河流域上游水资源的大量开发,塔里木河下游断流320 km,地下水埋深大幅增加,以胡杨为代表的荒漠河岸林遭受到严重的干旱胁迫,因此塔里木河下游以依靠地下水维系其生存的天然植被大面积衰败。

地下水是多数荒漠区植被生存所依赖的最为重要的水分来源<sup>[9]</sup>,一些河岸林的生长对地下水有很强的依赖性<sup>[10]</sup>,地下水埋深的变化直接影响到植被的发展、组成及变化<sup>[11-12]</sup>,并且地下水是胡杨生存与生长的先决条件<sup>[13]</sup>。在地下水埋深对胡杨影响的研究主要集中在地下水埋深对胡杨生理生化指标,胡杨生长及水势等影响的研究<sup>[14-17]</sup>。关于干旱区胡杨光合作用的研究较多,但主要集中在不同胡杨叶形<sup>[18-19]</sup>,和不同胡杨树种间<sup>[20]</sup>的对比分析,而对于不同地下水埋深下胡杨的光合作用的研究报道较少。为此,本文以塔里木河下游天然胡杨林为研究对象,研究在不同地下水埋深梯度下胡杨叶片的气体交换和叶绿素荧光特征,阐明胡杨对不同地下水埋深环境的生理响应和适应性,为该地区植被恢复与重建提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

塔里木河下游位于新疆东南部的塔克拉玛干沙漠和库鲁克沙漠之间,研究区位于塔里木河下游的喀尔达

依,距新疆生产建设兵团 34 团铁干里克 56km,该区为荒漠区,年降水量变化在 17.4—42.0mm,年平均蒸发能力为 2714.6 mm,多大风天气。年总太阳辐射变化在 5692—6360 MJ/m<sup>2</sup>,年平均日照时间在 2780—2980h,年大于 10℃ 的积温为 4040—4300℃,平均昼夜温差在 13—17℃<sup>[21]</sup>。植物种类组成以杨柳科、柽柳科、豆科、夹竹桃科、禾本科等植物为主,构成了乔木、灌木和草本植物群落。乔木主要有胡杨(*Populus euphratica*),灌木主要有柽柳(*Tamarix* spp.)、白刺(*Nitraria sibirica*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*),其中多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)、刚毛柽柳(*Tamarix hispida*)长穗柽柳(*Tamarix elongata*)等是构成柽柳灌丛的优势种。草本植物主要有芦苇(*Phragmites communis*)、罗布麻(*Poacynum hendersonii*)、疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、甘草(*Glycyrrhiza inflata*)、花花柴(*Karelinia caspica*)等<sup>[22]</sup>。

## 1.2 研究材料

本文以塔里木河下游主要建群种胡杨为研究对象。选取生长正常,无病虫害的 9 株 35—50a 树龄,8—10m 高的胡杨树进行测量。为了研究不同地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响,结合喀尔达依地下水监测井位置,在垂直于河道方向上距离河道 50、550m 和 850m 处设置 3 个样点,并在上述样点处(地下水埋深分别为 4.91、6.93m 和 8.44 m)监测胡杨的气体交换和叶绿素荧光特性。在测定胡杨光合作用的相同植株上摘取 50 片生长正常的叶片,并与地下水埋深对应编好号后立即放入液氮罐中,在实验室对胡杨叶片叶绿素含量进行测定。

## 1.3 测定方法

### 1.3.1 气体交换的测量

在 2008 年 8 月 13—15 日晴朗的天气下进行气体交换的日变化测定。在每一地下水埋深环境下选择 2—3 株胡杨树,利用 LI-6400 便携式光合作用测定仪(LiCOR Inc., Lincoln, NE, USA)对树冠中下部健康成熟的宽卵形叶片进行活体测量,每棵胡杨树上选择 3—5 片叶片进行测定,每次测定重复 3—5 次。测定时间为 8:00—20:00,测定间隔为 2h。

光响应曲线用仪器中的 Light-Curve 程序测定,测定时选取与气体交换日变化的测量的相同植株进行,并保持流量在 300 μmol/s,叶室温度在 30℃,利用 CO<sub>2</sub> 注入系统使参比室 CO<sub>2</sub> 浓度保持 370 μmol/mol,利用 6400-02B LED 光源按光合有效辐射值(PAR)从 2000 到 0 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 逐渐递减的顺序测定 P<sub>N</sub>-PAR 响应曲线,在每一地下水埋深环境下重复测定 4 次。

CO<sub>2</sub> 响应曲线利用 P<sub>N</sub>-C<sub>i</sub> 自动测定程序,设置 CO<sub>2</sub> 浓度为 370, 300, 250, 200, 150, 100, 50, 370, 450, 550, 650, 750, 900, 1100, 1300, 1500, 1800 μmol/mol,在光合有效辐射为 1600 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 下测定 CO<sub>2</sub> 响应曲线,每一地下水埋深环境下重复测定 3 次。

### 1.3.2 叶绿素荧光的测量

利用便携式荧光仪 MINI-PAM(Walz, Effeltrich, Germany)在测量气体交换日变化的相同天测定叶绿素荧光参数。在 6:00 和 12:00 测定不同地下水埋深下胡杨叶片的初始荧光(F<sub>0</sub>)和最大荧光(F<sub>m</sub>),测定前叶片暗适应 30min,光系统 II 的最大光化学效率(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>)由(F<sub>m</sub> - F<sub>0</sub>)/F<sub>m</sub> 计算而得<sup>[23]</sup>。稳态荧光(F)和光适应条件下最大荧光(F<sub>m</sub>')在 10:00—11:00 进行测量。每一地下水埋深下重复测定 15 次。PS II 实际光化学效率按 Ω<sub>psII</sub> = (F<sub>m</sub>' - F)/F<sub>m</sub>' 计算<sup>[23]</sup>,表观电子传递速率 ETR = 0.5 × Ω<sub>psII</sub> × 0.84 × PPFD<sup>[24]</sup>,其中,0.5 是假设吸收的光被两个光系统均分得到的参数,0.84 为吸光系数,PPFD 为光子通量密度。光化学淬灭系数 qP = (F<sub>m</sub>' - F)/(F<sub>m</sub>' - F<sub>0</sub>')<sup>[5]</sup>,其中光适应下的最小荧光 F<sub>0</sub>' = (F<sub>0</sub>/[(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>) + (F<sub>0</sub>/F<sub>m</sub>')])<sup>[25]</sup>;非光化学淬灭系数 NPQ = (F<sub>m</sub>/F<sub>m</sub>') - 1<sup>[26]</sup>。叶片光合功能的相对限制 L<sub>(PFT)</sub> = 1 - (F<sub>m</sub>' - F<sub>0</sub>')/F<sub>m</sub>' × qP<sup>[23]</sup>。

### 1.3.3 土壤含水量的测定

在胡杨样株附近挖取 200cm 深的土壤剖面,在 0—60cm 每 10cm 为 1 层,在 60—200cm,每 20 cm 为 1 层采集土壤样品,每层取 3 个重复。在实验室对土样进行烘干并称重,计算土壤相对含水量。

### 1.3.4 叶片特性的测定状

叶绿素含量测定<sup>[27]</sup> 称取 0.2g 植物样品置于大试管中,加入 20 mL 80% 丙酮溶液摇匀,并置于 40℃ 水浴锅中保温 5.5h(避光),之后取出倒入离心管中离心(13000 转/min,10min),将上清液转入 25 mL 容量瓶,用 80% 丙酮溶液定容。以 80% 的丙酮溶液为对照,测定 663、645nm 处的吸光度值,提取液叶绿素浓度  $C$  (mg/L) =  $8.02OD_{663} + 20.21OD_{645}$ ,再根据提取液体积计算出叶绿素含量。

叶水势测定 在测量光合作用的相同天,利用 HR-33T 露点水势仪对胡杨叶水势进行测定。在每一地下水埋深环境下摘取与光合作用测定相同植株上的叶片 3 片,分别置于 3 个露点水势仪 C-52 样品室内,待 30min 平衡后读数,每次读取 3 次,取其平均值。测定时间为 6:00 和 12:00。

### 1.3.5 地下水埋深的测定

在实验区垂直于河道从河岸到沙丘布设了 3 个监测断面,在每一个横断面上布设一眼 8—10m 深的地下水埋深监测井,在测量胡杨气体交换作用的同一天利用电导法测量每一眼监测井的地下水埋深。

## 1.4 统计分析

光响应曲线用非直角双曲线模型<sup>[28]</sup>:  $P_N = \frac{\varphi I + P_{\max} - \sqrt{(\varphi I + P_{\max})^2 - 4\varphi I K P_{\max}}}{2k} - R_d$  拟合分析,式中  $I$  为光合有效辐射, $\varphi$  为表观量子效率, $k$  为曲度系数, $P_{\max}$  为最大光合速率, $R_d$  为暗呼吸速率。光补偿点(LCP)通过光合有效辐射 0—200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  下的 PAR 与  $P_N$  的线性拟合得出。根据 Sharkey 等人的光合  $\text{CO}_2$  响应曲线的非线性拟合模型<sup>[29]</sup> 计算在叶温 25℃ 下叶片的最大 Rubisco 羧化速率( $V_{c\max}$ ),电子传输速率( $J$ )和光合产物磷酸丙糖的利用速率(TPU)的值。

采用 spss11.0 对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并运用 Tukey 检验法对显著性差异( $P < 0.05$ )进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤含水量变化特征

总体上,在 3 个不同地下水埋深环境下,在 0—80cm 土层土壤含水量不超过 5%,并且随着土层深度的增加,土壤含水量也都不超过 15%。在地下水埋深 4.91m 处各层土壤含水量较小,都小于 2.5%;在地下水埋深 6.93m 处,除了在 100—120 cm 处土壤含水量为 9.2%,而其他层都不超过 1.5%;而在地下水埋深 8.44m 处,当土层深度大于 80cm 后,土壤含水量呈现曲折增加趋势,最高达到 14.7% (图 1)。

### 2.2 不同地下水埋深下胡杨气体交换的特征

#### 2.2.1 日变化特征

在 3 个不同地下水埋深下胡杨光合速率在 10:00 时达到最大值,之后虽有波动,但总体上呈逐渐减小的趋势。气孔导度与光合速率呈现相似的趋势,其变化和光合速率一样受着饱和水汽压差的影响(图 2 A, B, F)。蒸腾速率的变化趋势与叶温的变化趋势基本一致(图 2 C, E),并且在 3 个地下水埋深之间不存在明显差异( $P > 0.05$ )。但是在 10:00,地下水埋深 4.91 m 处的光合速率要明显大于地下水埋深 6.93 m 和 8.44 m 处的光合速率( $P < 0.05$ ),平均分别高出 15% 和 30%。在地下水埋深 6.93m 处光合速率略大于 8.44m 处的光合速率,但两者并不存在明显差异( $P > 0.05$ )。

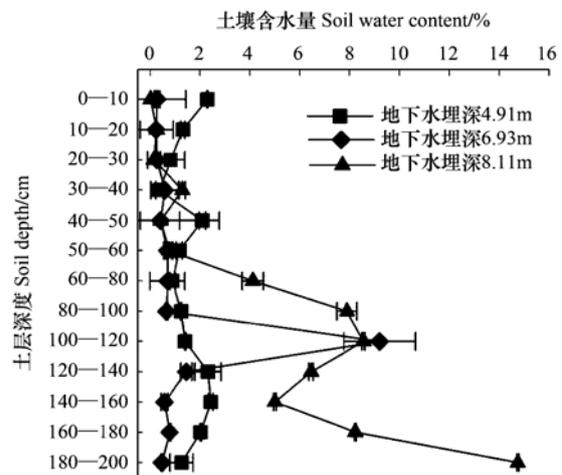


图 1 不同地下水埋深下土壤含水量的变化

Fig. 1 The change of soil water content at different groundwater depths

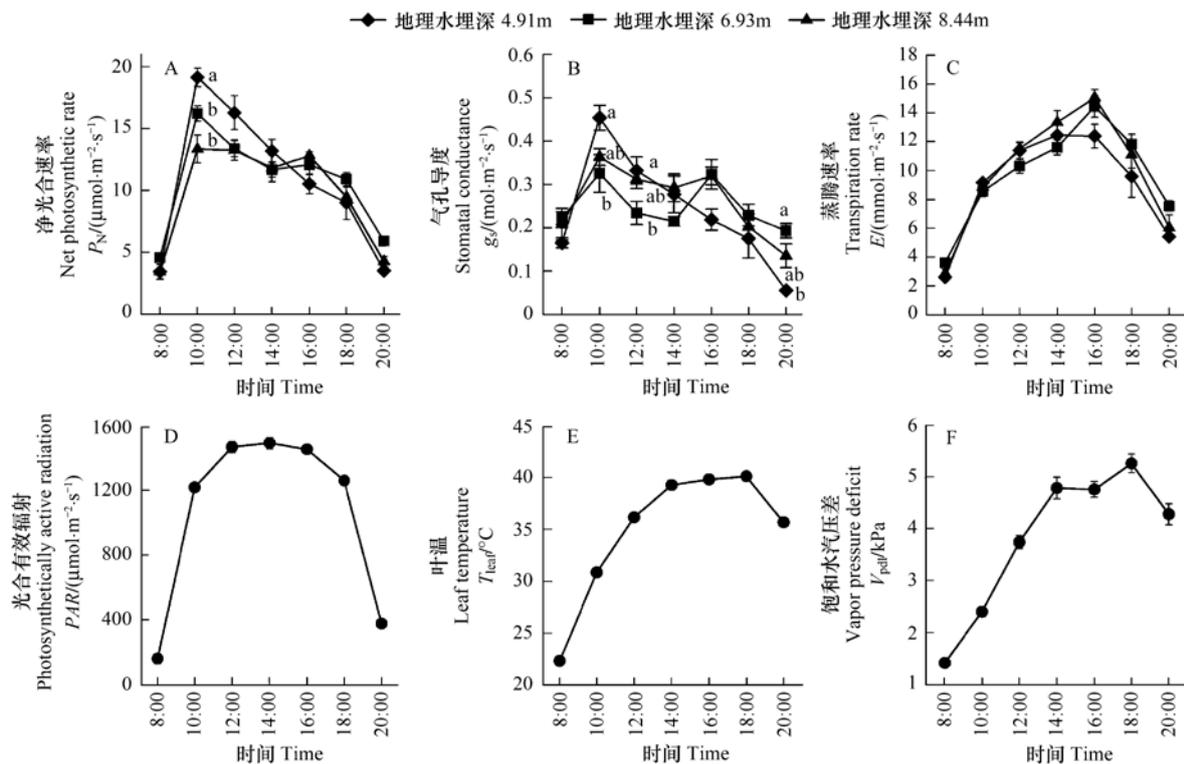


图2 不同地下水埋深下胡杨净光合速率、气孔导度、蒸腾速率及环境参数的日变化

Fig. 2 Daily course of net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and environmental parameters of *P. euphratica* grown at different groundwater depths

不同字母表示差异达到显著水平( $P < 0.05$ )

### 2.2.2 光响应曲线

在地下水埋深4.91m和6.93m处,胡杨光响应变化不存在明显差异( $P > 0.05$ ),但是在地下水埋深8.44m处,在相同光合有效辐射下其光合速率明显小于其他两处( $P < 0.05$ )。通过对光响应曲线的非线性函数拟合分析可知,最大光合速率( $P_{max}$ )以及暗呼吸速率( $R_d$ )在不同地下水埋深下存在着差异( $P < 0.05$ ),但是表观量子效率( $\varphi$ )和光补偿点( $LCP$ )却基本相同(表1)。在地下水埋深4.81m和6.93m处胡杨 $P_{max}$ 明显大于地下水埋深8.44m处的最大光合速率( $P < 0.05$ ),平均分别高43%和32%。

表1 不同地下水埋深下胡杨的光合生理参数

Table 1 Photosynthetic and physiological parameters of *P. euphratica* grown at different groundwater depths

地下水埋深/m Groundwater depth	暗呼吸速率 $R_d$ /( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) Dark respiratory rate	最大光合速率 $P_{max}$ /( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) Maximum photosynthetic rate	表观量子效率 $\varphi$ /( $\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$ photons) Apparent quanta efficiency	光补偿点 $LCP$ /( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) Light compensation point	曲度系数 $k$ Coefficient
4.91	1.60 ± 0.26a	23.32 ± 0.91a	0.058 ± 0.001	28.95 ± 6.58	0.541 ± 0.036
6.93	0.91 ± 0.08b	21.49 ± 1.76a	0.055 ± 0.001	16.09 ± 3.44	0.538 ± 0.074
8.44	1.23 ± 0.08ab	16.29 ± 1.29b	0.056 ± 0.002	22.63 ± 0.47	0.480 ± 0.045

不同字母表示差异达到显著水平( $P < 0.05$ )

### 2.2.3 $P_N-C_i$ 曲线

不同地下水埋深下胡杨 $P_N-C_i$ 曲线的非线性拟合结果表明(表2),在叶温25°C时,3个不同地下水埋深下的 $V_{cmax}$ 基本都在100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 左右, $J$ 都在100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 左右, $TPU$ 都在9  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 左右。并且

$V_{\text{cmax}}$ ,  $J$  和  $TPU$  在 3 个地下水埋深环境下不存在明显差异 ( $P > 0.05$ )。

表 2 不同地下水埋深下胡杨的  $V_{\text{cmax}}$ ,  $J$  和  $TPU$  (叶温 25℃)

Table 2  $V_{\text{cmax}}$ ,  $J$  and  $TPU$  of *P. euphratica* grown at different groundwater depths (Leaf temperature 25℃)

地下水埋深/m Groundwater depth	最大 Rubisco 羧化速率 $V_{\text{cmax}}$ /( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) Maximum velocity of Rubisco for carboxylation	最大电子传输速率 $J$ /( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) Maximum potential rate of electron transport	磷酸丙糖的利用速率 $TPU$ /( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) Triose phosphate utilization rate
4.91	93.59 ± 10.85	101.33 ± 12.70	8.19 ± 0.82
6.93	97.45 ± 17.35	104.80 ± 8.74	9.53 ± 0.55
8.44	103.22 ± 10.03	140.73 ± 6.46	9.89 ± 0.50

## 2.3 不同地下水埋深下胡杨叶片特性与叶绿素荧光的变化特征

### 2.3.1 地下水埋深对叶片特性的影响

当地下水埋深从 4.91m 增加到 6.93m 时,叶绿素含量并没有发生显著性变化 ( $P > 0.05$ ) (表 3),但是当地下水埋深增加到 8.44m 时,叶绿素含量发生明显变化 ( $P < 0.05$ ),约减少了 16%。黎明叶水势在随着地下水埋深的增加虽有微小变化,但是他们之间并不存在明显差异 ( $P > 0.05$ );而在正午时,当地下水埋深从 4.91m 增加到 6.93m 和 8.44m 时,叶水势明显减小 ( $P < 0.05$ ),分别减小了 45.6% 和 31.6%。但在地下水埋深 6.93m 和 8.44m 两处叶水势未发生明显变化 ( $P > 0.05$ )。并且在不同地下水埋深下正午较黎明时的叶水势都有所减小,在地下水埋深 4.91m 处叶水势变化幅度较小,为 72%,而在其他两处叶水势减小了约 2—3 倍。

表 3 不同地下水埋深下胡杨叶片特性

Table 3 Leaf traits of *Populus euphratica* grown at different groundwater depths

叶片特性 Leaf properties	地下水埋深 Groundwater depth/m		
	4.91	6.93	8.44
叶绿素含量 Chlorophyll content/(mg/g DW)	0.83 ± 0.01a	0.82 ± 0.01a	0.69 ± 0.03b
黎明前叶水势 $\Psi_{\text{predawn}}$ Predawn leaf water potential/(MPa)	-2.65 ± 0.39	-1.53 ± 0.28	-1.84 ± 0.23
正午叶水势 $\Psi_{\text{midday}}$ Midday leaf water potential/(MPa)	-4.56 ± 0.38a	-6.64 ± 0.44b	-6.00 ± 0.25b

不同字母表示差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )

### 2.3.2 地下水埋深对叶绿素荧光的影响

当地下水埋深从 4.91m 增加到 6.93m 和 8.44m 时,胡杨 6:00 和 12:00 初始荧光  $F_0$  明显减小 ( $P < 0.05$ ),6:00  $F_0$  分别减少了 14% 和 18%,12:00  $F_0$  分别减少了 15.6%,12.2%,但是当地下水埋深从 6.93m 增加到 8.44m 时,6:00 和 12:00  $F_0$  都不存在明显变化 ( $P > 0.05$ ) (表 4),这说明随着地下水埋深的增加胡杨 PS II 反应中心还未受到破坏;同时,当地下水埋深从 4.91 m 增加到 6.93 m 和 8.44 m 时,胡杨 6:00 和 12:00 最大荧光  $F_m$  均明显减小 ( $P < 0.05$ ),6:00  $F_m$  分别减小了 7% 和 9%,12:00  $F_m$  分别减少了 15.5% 和 13.0%;但是地下水埋深从 6.93m 增加到 8.44m 时,6:00 和 12:00  $F_m$  虽略有变化,但不存在明显差异 ( $P > 0.05$ ) (表 4),这说明在地下水埋深 4.91—8.44m 范围内,胡杨能保持一定的 PS II 光化学活性。6:00 和 12:00 胡杨的 PS II 最大光化学效率  $F_v/F_m$  值分别保持在 0.85—0.87 和 0.81—0.82 之间 (表 4),并且无论在 6:00 还是 12:00,  $F_v/F_m$  在 3 个不同地下水埋深下都不存在明显差异 ( $P > 0.05$ )。  $F_v/F_0$  可以反应 PS II 的潜在活性,从 3 个不同地下水埋深下  $F_v/F_0$  的变化可发现:当地下水埋深从 4.91m 增加到 6.93m 时,6:00  $F_v/F_0$  值增加了 10.8%,并且两者之间存在明显差异 ( $P < 0.05$ ),但是随着地下水埋深进一步从 6.93m 增加到 8.44m 时,6:00  $F_v/F_0$  却未发生显著性变化 ( $P > 0.05$ );在 12:00,  $F_v/F_0$  在不同地下水埋深下都不存在明显差异 ( $P > 0.05$ ),这表明随着地下水埋深从 4.91m 增加到 8.44m 时,胡杨 PS II 的潜在活性不会下降。

从表 4 可看出,随着地下水埋深的增加,表观光合量子传递速率  $ETR$  的变化趋势与 PS II 实际光化学效率

$\Omega_{\text{PSII}}$  相一致。并且在地下水埋深 6.93m 和 8.44m 处  $\Omega_{\text{PSII}}$  和  $ETR$  明显低于 4.91m 处的值 ( $P < 0.05$ ), 分别减少了 29%, 24% 和 22%, 17%。而在地下水埋深从 6.93m 增加到 8.44m 时, 胡杨  $\Omega_{\text{PSII}}$  和  $ETR$  却不存在明显差异 ( $P > 0.05$ )。光合功能的限制  $L_{(PFT)}$  在地下水埋深 6.93m 和 8.44m 处明显大于地下水埋深 4.91m ( $P < 0.05$ ) (表 4), 并且分别增加了 33.6% 和 27.4%。而地下水埋深 6.93m 和 8.44m 两处的  $L_{(PFT)}$  却不存在明显差异 ( $P > 0.05$ )。这与胡杨 10:00 光合速率在 3 个地下水埋深环境下的变化相对应, 即在光合功能的限制较低时光合速率较高, 而在光合功能的限制较高时光合速率较低, 并且在光合功能的限制基本一样时光合速率也未发生明显变化。

表 4 不同地下水埋深下胡杨的叶绿素荧光参数

Table 4 Chlorophyll fluorescence parameters of *P. euphratica* grown at different groundwater depths

测定时间 Measurement time	参数 Parameters	地下水埋深 Groundwater depth/m		
		4.91	6.93	8.44
6:00	初始荧光 $F_0$	304.3 ± 3.2a	261.0 ± 8.4b	249.7 ± 3.1b
	最大荧光 $F_m$	2078 ± 26a	1929 ± 33b	1885 ± 23.0b
	PS II 最大光化学效率 $F_v/F_m$	0.85 ± 0.00	0.86 ± 0.00	0.87 ± 0.00
	最大可变荧光/初始荧光 $F_v/F_0$	5.83 ± 0.08a	6.46 ± 0.24b	6.56 ± 0.08b
12:00	初始荧光 $F_0$	341.70 ± 4.73a	288.4 ± 7.1b	300.0 ± 6.5b
	最大荧光 $F_m$	1880 ± 69a	1589 ± 48.0b	1635 ± 35b
	PS II 最大光化学效率 $F_v/F_m$	0.81 ± 0.01	0.82 ± 0.00	0.81 ± 0.01
	最大可变荧光/初始荧光 $F_v/F_0$	4.52 ± 0.30	4.51 ± 0.12	4.44 ± 0.21
10:00—11:00	实际光化学效率 $\Phi_{\text{PSII}}$	0.444 ± 0.030a	0.3144 ± 0.021b	0.338 ± 0.015b
	表观光合量子传递速率 $ETR$	160.1 ± 7.87a	124.9 ± 6.67b	132.8 ± 6.00b
	光合功能的限制 $L_{(PFT)}$	0.465 ± 0.036a	0.622 ± 0.025b	0.593 ± 0.018b
	光化学淬灭系数 $qP$	0.59 ± 0.035	0.499 ± 0.022	0.514 ± 0.022
	非光化学淬灭系数 $NPQ$	1.173 ± 0.183a	2.661 ± 0.268b	2.455 ± 0.153b

不同字母表示差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )

由表 4 可看出, 虽然在地下水埋深 4.91m 处光化学淬灭系数  $qP$  虽然略大于其他两处的  $qP$  值, 但是在不同地下水埋深间  $qP$  并不存在明显差异 ( $P > 0.05$ )。可见在不同地下水埋深下胡杨 PS II 反应中心的开放程度基本相同。随着地下水埋深由 4.91m 增加到 6.93m 和 8.44m 时, 非光化学淬灭系数  $NPQ$  明显增加 ( $P < 0.05$ ), 分别平均增加了 127% 和 109%; 但是随着地下水埋深从 6.93m 增加到 8.44m 时,  $NPQ$  虽略有减少, 但并未发生明显变化 ( $P > 0.05$ ) (表 4), 可见随着地下水埋深的增加  $NPQ$  起初会明显增加, 但是随着地下水埋深的进一步增加, 胡杨叶片的  $NPQ$  却保持不变。

### 3 结论与讨论

植物在正午的时候往往会出现午休的现象<sup>[30]</sup>。本研究中, 在地下水埋深 4.91m 和 6.93m 处光合速率在正午都明显下降, 同时正午的  $PAR$  不超过  $1600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 而胡杨的光饱和点在  $1600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  左右<sup>[31]</sup>, 所以 12:00 光合速率的下降并不是由于强光引起的。许多研究都表明高饱和水汽压差会使光合速率下降<sup>[32-33]</sup>, 本研究中  $V_{pd}$  从 10:00 的 2.4 kPa 迅速增加到 12:00 的 3.7 kPa, 所以 12:00 光合速率的下降很可能与较高的饱和水汽压差有关, 并且 12:00 以后 (14:00—16:00) 饱和水汽压差的继续增加和光合速率的继续减小 (此时段  $PAR$  基本保持在  $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 进一步证实了这一结果 (图 2A, F)。表观量子效率 ( $\varphi$ ) 可以准确反映光合机构光合功能的变化<sup>[34]</sup>。本研究表明,  $\varphi$  在不同地下水埋深环境下未发生明显变化, 这表明地下水埋深从 4.91m 增加到 8.44m 时, 胡杨光合机构还未损伤, 而最大光合速率 ( $P_{\text{max}}$ ) 的减小只是胡杨对干旱环境的正常反应。水作为电子传递链中电子的提供者, 水分的变化必会影响电子传递速率, 并且水分亏缺会降低光合参数  $V_{\text{cmax}}$  和  $TPU$ <sup>[35-36]</sup>。然而本研究结果表明, 随着地下水埋深的增加, 胡杨叶片的  $V_{\text{cmax}}$ ,  $J$  和  $TPU$  都没有发生明显变化, 这说明在地下水埋深 4.91—8.44m 环境下, 胡杨可以保持一定的光合电子传递活性和

光合最初产物磷酸丙糖(*TP*)从叶片中的输出量。

在非胁迫条件下  $F_v/F_m$  的变化极小,不受物种和生长条件的影响,胁迫条件下该参数明显下降<sup>[37]</sup>。另一些研究发现轻度和中度干旱胁迫并不影响  $F_v/F_m$  值<sup>[38,39]</sup>,并且 Lu 和 Zhang 发现小麦在中度和严重水分胁迫下  $F_v/F_m$  也不发生明显的变化。在本研究中发现随着地下水埋深的增加,胡杨遭受干旱胁迫的加剧, $F_v/F_m$  也未发生明显变化(表 4),且都保持较高的值(6:00 为 0.85—0.87,12:00 为 0.81—0.82),这说明干旱胁迫的加剧并没有影响到胡杨 PS II 的原初光化学效率,光合结构未遭到破坏。然而,当地下水埋深从 4.91m 增加到 6.93 和 8.44m,干旱胁迫的加剧使得叶片  $\Omega_{PSII}$  明显减小( $P < 0.05$ )(表 4),这表明干旱胁迫导致光适应叶片 PSII 光化学发生改变。而  $qP$  在不同地下水埋深下没有发生明显的变化( $P > 0.05$ )(表 4),所以  $\Omega_{PSII}$  的减小是由于 PS II 反应中心原初光能捕获效率( $F_v'/F_m'$ )的降低引起的。在地下水埋深 6.93m 和 8.44m 处  $NPQ$  相对于地下水埋深 4.91m 处明显增加(表 4),表明在地下水埋深较深处胡杨 PS II 的潜在热耗散能力较强,可有效地避免过剩光能对光合机构的损伤。 $NPQ$  在较深地下水埋深下的急剧增加,表明干旱胁迫下胡杨可以通过非光化学淬灭过程来调整过多激发能的耗散,这很可能是光合电子传递的下调机制,以保证 ATP 和 NADPH 的生产与  $CO_2$  同化的减少相匹配<sup>[40]</sup>。而地下水埋深的变化对  $qP$  未产生明显影响,也就是说  $qP$  对干旱胁迫并不敏感,随着干旱的加剧胡杨仍能保持较高的电子传递活性。这一结果与干旱胁迫下小麦的研究结果相一致<sup>[40-41]</sup>。

水势是衡量植物水分状况的重要指标之一,表征植物从土壤或相邻细胞中吸收水分以确保其正常生理活动的的能力。清晨水势可以反映植物水分的恢复状况,可用于判断植物水分的亏缺程度,正午水势可以反映水分亏缺的最大值<sup>[13]</sup>。在本实验中,胡杨在 4.91—8.44m 范围内,黎明时叶水势的变化不显著,这表明在此地下水埋深范围内,胡杨的水势在夜间可得到充分的恢复;但是在 12:00,地下水埋深 4.91m 处叶水势相对 6.93m,8.44m 处的却明显增加,这表明在 4.91m 处胡杨的水分亏缺程度比 6.93m,8.44m 处的相对要小;而在 6.93m 和 8.44m 处 12:00 叶水势未发生明显变化,这说明这两处胡杨的水分亏缺程度是相同的。这与以前的研究结果相一致<sup>[21,42]</sup>,即在地下水埋深 4.91m 处胡杨处于轻度水分胁迫状态,而在地下水埋深 6.93m 和 8.44m 处的胡杨处于相同(中度)水分胁迫状态。当地下水埋深从 4.91m 增加到 6.93m 和 8.44m,胡杨光合速率(10:00)以及叶绿素荧光参数( $F_0$ 、 $F_m$  以及  $\Omega_{PSII}$ 、 $ETR$  和  $NPQ$ )都发生了明显变化(图 2 和表 4),而地下水埋深 6.93m 和 8.44m 处胡杨气体交换参数( $P_N$ 、 $g_s$  和  $E$ )和叶绿素荧光参数( $F_0$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_0$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Omega_{PSII}$ 、 $ETR$  以及  $NPQ$ )却不存在明显差异(图 2 和表 4)。这一结果与胡杨在不同地下水埋深环境下所处的干旱胁迫程度有关。根据不同地下水埋深下叶水势的变化可知,胡杨在地下水埋深 4.91m 处的干旱胁迫程度较小,而在 6.93m 和 8.44m 处干旱胁迫程度较大,且处于相同的干旱胁迫状态,所以在地下水埋深 6.93m 和 8.44m 处胡杨气体交换参数和叶绿素荧光参数未发生明显的变化。

司建华对极端干旱区胡杨吸水根系空间分布的研究发现<sup>[43]</sup>:胡杨吸水根系主要分布在水平方向 0—350cm,垂直方向 0—80cm 土层中。在本研究中的 3 个地下水埋深环境下,土壤含水量在 0—80cm 土层中都不超过 5%(图 1),且在胡杨林里,从土壤表层到地下毛管水边缘的距离不高于 4 m<sup>[44]</sup>,所以在土壤极为干旱,且地下水埋深较高的环境下,胡杨只能通过深根系利用地下水才能维持其正常的生长。在轻度干旱胁迫(地下水埋深为 4.91m)和中度干旱胁迫(地下水埋深为 6.93m 和 8.44m)下,胡杨  $F_v/F_m$  (6:00 为 0.85—0.87,12:00 为 0.81—0.82), $\phi$ 、 $qP$ 、 $V_{cmax}$ 、 $J$  和  $TPU$  等光合参数都没有发生明显的变化(表 1—表 4),并且随着地下水埋深从 6.93m 增加到 8.44m,叶绿素含量虽有所下降,但是胡杨却能保持一定的光合速率,这都表明此时的胁迫程度未超过胡杨的耐受能力,并且胡杨在中度干旱胁迫下光合机构还不会受到损伤。同时也说明即使在地下水埋深 8.44m 处,胡杨的光合能力也不会受到不可逆转的伤害,此时如能够补充地下水,使地下水埋深变浅,可使得胡杨恢复到正常水平。然而在地下水埋深 9.46—10.16m 处胡杨会遭受到极严重的干旱胁迫,并且处于极度衰败,甚至枯死状态<sup>[21]</sup>,所以塔里木河下游实施间歇性生态输水,不断补充地下水,维持一定的地下水埋深,对保护塔里木河下游天然胡杨林具有重要的生态意义。

致谢:上海泽泉科技有限公司顾群先生提供便携式叶绿素荧光仪。

#### References:

- [ 1 ] Yun J Y, Yang J D, Zhao H L. Research progress in the mechanism for drought and high temperature to affect plant photosynthesis. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(3): 641-648.
- [ 2 ] Xu D Q. Photosynthetic Efficiency. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2002: 4-9.
- [ 3 ] Asada K, Takahashi M. Production and scavenging of active oxygen in photosynthesis//Klye D J, Osmond C B, Amtzen C J, eds. *Photoinhibition*. Amsterdam: Elsevier, 1987: 227-287.
- [ 4 ] Baker N R, Rosenqvist E. Application of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55: 1607-1621.
- [ 5 ] Quick W P, Stitt M. An examination of factors contributing to non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence in barley leaves. *Biochimica and Biophysica Acta*, 1989, 977: 287-296.
- [ 6 ] Xu D Q, Shen Y G. Limiting factors in photosynthesis//Yu S W, Tang Z C, eds. *Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 2nd edition. Beijing: Science Press, 2001: 262-276.
- [ 7 ] Chen Y N, Wang Q, Ruan X, Li W H, Chen Y P. Physiological response of *Populus euphratica* to artificial water-recharge of the lower reaches of Tarim River. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(12): 1393-1401.
- [ 8 ] Si J H, Feng Q, Zhang X Y. Leaf water potential of *populus euphratica* and influencing factors in extreme arid region. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(4): 505-510.
- [ 9 ] Zhao W Z, Liu H. Recent advances in desert vegetation response to groundwater table changes. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2702-2708.
- [ 10 ] Shafroth P B, Auble G T, Stromberg J C, Patten D T. Establishment of woody riparian vegetation in relation to annual patterns of streamflow, Bill Williams River, Arizona. *Wetlands*, 1998, 18: 577-590.
- [ 11 ] Lammerts E J, Maas C, Grootjans A P. Groundwater variables and vegetation in dune slacks. *Ecological Engineering*, 2001, 17: 33-47.
- [ 12 ] Gries D, Zeng F, Foetzki A, Arndt K, Bruelheide H, Thomas F M, Zhang X, Runge M. Growth and water relations of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* on Taklamakan desert dunes in relation to depth to a permanent water table. *Plant Cell and Environment*, 2003, 26: 725-736.
- [ 13 ] Zeng F J, Zhang X M, Li X Y, Andrea F, Michael R. Seasonal variation of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* water potentials in southern fringe of Taklamakan Desert. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1389-1393.
- [ 14 ] Chen Y N, Wang Q, Li W H, Ruan X, Chen Y P, Zhang L H. Rational groundwater table indicated by the ecophysiological parameters of the vegetation: a case study of ecological restoration in the lower reaches of the Tarim River. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Supp. 1): 8-15.
- [ 15 ] Zhao C Y, Li S B, Jia Y H, Jiang Y C. Dynamic changes of groundwater level and vegetation in water table fluctuant belt in lower reaches of Heihe River: Coupling simulation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12): 2687-2692.
- [ 16 ] Fu A H, Chen Y N, Li W H. Analysis on water potential of *Populus euphratica* oliv and its meaning in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Supp. 1): 221-228.
- [ 17 ] Horton J L, Kolb T E, Hart S C. Response of riparian trees to interannual variation in ground water depth in a semi-arid river basin. *Plant Cell and Environment*, 2001, 24: 293-304.
- [ 18 ] Su P X, Zhang L X, Du M W, Bi Y R, Zhao A F, Liu X M. photosynthetic character and water use efficiency of different leaf shapes of *populus euphratica* and their response to CO<sub>2</sub> enrichment. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2003, 27(1): 34-40.
- [ 19 ] Zheng C X, Qiu J, Jiang C N, Gao R F. Comparison of characteristics of stomas and photosynthesis of *populus euphratica* polymorphic leaves. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(8): 19-25.
- [ 20 ] Wang H Z, Han L, Li Z J, Peng J, Ma C H. The photosynthetic and water physiological characteristics of *populus euphratica* and *populus pruinosa* in the upper reaches of Tarim River. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 5843-5850.
- [ 21 ] Chen Y N, Li W H, Xu H L, Liu J Z, Zhang H F, Chen Y P. The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 542-549.
- [ 22 ] Zhang Y M, Chen Y N, Zhang D Y. Plant communities and their interrelations with environmental factors in the middle reaches of the Tarim Rive. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 109-118.
- [ 23 ] Schreiber U, Bilger W, Neubauer C. Chlorophyll fluorescence as a nonintrusive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis//Schulze E D, Caldwell M M eds. *Ecophysiology of Photosynthesis*. Springer: Berlin Heidelberg NewYork, 1994.
- [ 24 ] Genty B, Briantais J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica and Biophysica Acta*, 1989, 990: 87-92.
- [ 25 ] Oxborough K, Baker N R. Resolving chlorophyll a fluorescence images of photosynthetic efficiency into photochemical and non-photochemical components-calculation of qP and  $Fv'/Fm'$  without measuring  $F_0'$ . *Photosynthesis Research*, 1997, 54: 135-142.
- [ 26 ] Bilger W, Bj rkman O. Role of xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance change, fluorescence and photosynthesis in *Hedera canariensis*. *Photosynthesis Research*, 1990, 25: 173-185.
- [ 27 ] Zhang Z L, Qu W J. *Plant Physiology Experimental Guide*. 3rd edition. Beijing: Higher Education Press, 2003: 67-70.
- [ 28 ] Prioul J L, Chartier P. Partitioning of transfer and carboxylation components of intracellular resistance to photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation: a critical analysis of methods used. *Annals of Botany*, 1977, 41: 789-800.
- [ 29 ] Sharkey T D, Bernacchi C J, Farquhar G D, Singaas E L. Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C<sub>3</sub> leaves. *Plant Cell and*

- Environment, 2007, 30: 1035-1040.
- [30] Tuzet A, Perrier A, Leuning R. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant Cell and Environment*, 2003, 26: 1097-1116.
- [31] Chen Y P, Chen Y N, Li W H, Xu C C. Characterization of photosynthesis of *Populus euphratica* grown in the arid region. *Photosynthetica*, 2006, 44(4): 622-626.
- [32] Day M E. Influence of temperature and leaf-to-air vapor pressure deficit on net photosynthesis and stomatal conductance in red spruce (*Picea rubens*). *Tree Physiology*, 2000, 20: 57-63.
- [33] Greg A B, Katherine A G, Ramesh M. Leaf- and stand-level responses of a forested mesocosm to independent manipulations of temperature and vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 2007, 174: 614-625.
- [34] Ke S S, Jin X Z. Effects of water stress and temperature on gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Sinocalycanthus chinensis* leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 43-49.
- [35] Zeng W, Jiang Y L, Li F, Zhou G S. Responses of *Quercus mongolica*'S photosynthetic parameters to soil moisture stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2504-2510.
- [36] Lin X L, Xu Z Z, Wang Y H, Zhou G S. Modeling the responses of leaf photosynthetic parameters of *Leymus chinensis* to drought and rewatering. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4718-4724.
- [37] Xu D Q, Zhang Y Z, Zhang R X. Photoinhibition of photosynthesis in plants. *Plant Physiology Communications*, 1992, 28(4): 237-243.
- [38] Razavi F, Pollet B, Steppe K, Vanlabeke M C. Chlorophyll fluorescence as a tool for evaluation of drought stress in strawberry. *Photosynthetica*, 2008, 46(4): 631-633.
- [39] Baker N R, Rosenqvist E. Application of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies; an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55: 1607-1621.
- [40] Lu C M, Zhang J H. Effects of water stress on photosystem II photochemistry and its thermostability in wheat plants. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50: 1199-1206.
- [41] Subrahmanyam D, Subash N, Haris A, Sikka A K. Influence of water stress on leaf photosynthetic characteristics in wheat cultivars differing in their susceptibility to drought. *Photosynthetica*, 2006, 44(1): 125-129.
- [42] Chen Y P, Chen Y N, LI W H, Zhang H F. Effect of ecological water input on MDA of *populus euphratica* oliv leaf in the lower reaches of the Tarim River. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2004, 10(4): 408-411.
- [43] Si J H, Feng Q, Li J L, Zhao J. Spatial distribution pattern of *Populus euphratica* fine roots in desert riparian forest. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(1): 1-4.
- [44] Thomas F M, Arndt S K, Bruelheide H, Foetzki A, Gries D, Huang J, Popp M, Wang G, Zhang X M, Runge M. Ecological basis for a sustainable management of the indigenous vegetation in a Central-Asian desert; Presentation and first results. *Journal of Applied Botany*, 2000, 74: 212-219.

#### 参考文献:

- [1] 云建英, 杨甲定, 赵哈林. 干旱和高温对植物光合作用的影响机制研究进展. *西北植物学报*, 2006, 26(3): 641-648.
- [2] 许大全. 光合作用效率. 上海: 上海科学技术出版社, 2002: 4-9.
- [6] 许大全, 沈允钢. 光合作用的限制因子//余叔文, 汤章城编著. 植物生理和植物分子生物学. 北京: 科学出版社, 2001: 262-276.
- [8] 司建华, 冯起, 张小由. 极端干旱区胡杨水势及影响因素研究. *中国沙漠*, 2005, 25(4): 505-510.
- [9] 赵文智, 刘鹤. 荒漠区植被对地下水埋深响应研究进展. *生态学报*, 2006, 26(8): 2702-2708.
- [13] 曾凡江, 张希明, 李向义, Andrea F, Michael R. 塔克拉玛干沙漠南缘柽柳和胡杨水势季节变化研究. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1389-1393.
- [15] 赵传燕, 李守波, 贾艳红, 姜云超. 黑河下游地下水波动带地下水与植被动态耦合模拟. *应用生态学报*, 2008, 19(12): 2687-2692.
- [18] 苏培玺, 张立新, 杜明武, 毕玉蓉, 赵爱芬, 刘新民. 胡杨不同叶形光合特性、水分利用效率及其对加富 CO<sub>2</sub> 的响应. *植物生态学报*, 2003, 27(1): 34-40.
- [19] 郑彩霞, 邱箭, 姜春宁, 高荣孚. 胡杨多形叶气孔特征及光合特性的比较. *林业科学*, 2006, 42(8): 19-25.
- [20] 王海珍, 韩路, 李志军, 彭杰, 马春晖. 塔里木河上游胡杨与灰杨光和水分生理特征. *生态学报*, 2009, 29(11): 5843-5850.
- [21] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 刘加珍, 张宏锋, 陈亚鹏. 塔里木河下游地下水对植被的影响. *地理学报*, 2003, 58(4): 542-549.
- [22] 张元明, 陈亚宁, 张道远. 塔里木河中游植物群落与环境因子的关系. *地理学报*, 2003, 58(1): 109-118.
- [27] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2003: 67-70.
- [34] 柯世省, 金则新. 水分胁迫和温度对夏蜡梅叶片气体交换和叶绿素荧光特性的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 43-49.
- [35] 曾伟, 蒋延玲, 李峰, 周广胜. 蒙古栎(*Quercus mongolica*)光合参数对水分胁迫的响应机理. *生态学报*, 2008, 28(6): 2504-2510.
- [36] 林祥磊, 许振柱, 王玉辉, 周广胜. 羊草(*Leymus Chinenisi*)叶片光合参数对干旱与复水的响应机理与模拟. *生态学报*, 2008, 28(10): 4718-4724.
- [37] 许大全, 张玉忠, 张荣统. 植物光合作用的光抑制. *植物生理学通讯*, 1992, 28(4): 237-243.
- [42] 陈亚鹏, 陈亚宁, 李卫红, 张宏锋. 新疆塔里木河下游生态输水对胡杨叶片 MDA 含量的影响. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(4): 408-411.
- [43] 司建华, 冯起, 李建林, 赵健. 荒漠河岸林胡杨吸水根系空间分布特征. *生态学报*, 2007, 26(1): 1-4.

CONTENTS

Sex ratio and spatial pattern in *Populus davidiana* in Changbai Mountain ..... PAN Chunfang, ZHAO Xiuhai, XIA Fucui, et al (297)

The relationship between freeze-tolerance and changes in activities of antioxidant enzymes and osmolyte content in the leaves of white clover during early winter freeze-thaw cycles ..... ZHAO Mei, ZHOU Ruilian, LIU Jianfang, et al (306)

Gray correlation analysis on naturalness of the primary forest types on the Losses Plateau ..... WANG Naijiang, LIU Zengwen, XU Zhao, et al (316)

Photosynthetic responses of *Gracilaria lemaneiformis* to two antibiotics ..... JIAN Jianbo, ZOU Dinghui, LIU Wenhua, et al (326)

Litter C:N:P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression ..... PAN Fujing, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (335)

Effects of groundwater depth on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River ..... CHEN Yapeng, CHEN Yaning, XU Changchun, et al (344)

Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI ..... SONG Fuqiang, XING Kaixiong, LIU Yang, et al (354)

Effects of fire on the structure of herbage synusia vegetation in desertified steppe, North China ..... HE Haoyu, SU Jieqiong, HUANG Lei, et al (364)

Physiological responses of four broadleaved seedlings to drought stress simulated by PEG ..... FENG Huifang, XUE Li, REN Xiangrong, et al (371)

Effects of the different width of urban green belts on the temperature and humidity ..... ZHU Chunyang, LI Shuhua, JI Peng, et al (383)

Diversity of waterbirds and change in home range of bar-headed geese *Anser indicus* during breeding period at Hangcuo Lake of Tibet, China ..... ZHANG Guogang, LIU Dongping, QIAN Fawen, et al (395)

The habitat selection of Giant panda in Wanglang Nature Reserve, Sichuan Province, China ..... KANG Dongwei, KANG Wen, TAN Liuyi, et al (401)

Effects of vigilance on the patterns of functional responses of foraging in voles (*Microtus fortis*) ..... TAO Shuanglun, YANG Xifu, DENG Kaidong, et al (410)

Influence of heavy metal pollution on soil animal community in Luqiao, Taizhou City ..... BAI Yi, SHI Shidi, QI Xin, et al (421)

Annual quantitative distribution of meiofauna in relation to sediment environment in Qingdao Bay ..... DU Yongfen, XU Kuidong, LEI Yanli, et al (431)

Population genetic variations and phylogeography of *Macropodus opercularis* ..... WANG Peixin, BAI Junjie, HU Yinchang, et al (441)

Contribution of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> host plants for the overwintering and 1<sup>st</sup> generation of *Helicoverpa armigera* (Hübner) in Northern China ..... YE Lefu, FU Xue, GE Feng (449)

Relationships between two species of insect pests and their natural enemies in tea gardens of three different altitudes ..... BI Shoudong, KE Shengbing, XU Jinfeng, et al (455)

The diversity of ground-dwelling beetles at cultivated land and restored habitats on the Bashang plateau ..... LIU Yunhui, YU Zhenrong, WANG Changliu, et al (465)

Characteristics of soil microbial communities under dry and wet condition in Zoige alpine wetland ..... NIU Jia, ZHOU Xiaoqi, JIANG Na, et al (474)

Microbial diversity of the jujube (*Zizyphus jujuba* Mill.) fruits surface during harvesting and storage stages ..... SHA Yuexia (483)

Effects of powdery mildew infection on zucchini growth under elevated CO<sub>2</sub> and temperature ..... LIU Junzhi, GE Yaming, Pugliese Massimo, et al (491)

Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on soil aggregation dynamics of neutral purple soil ..... PENG Sili, SHEN Hong, YUAN Junji, et al (498)

The bacterial community structures in Xinjiang fault belt spring analyzed by PCR-DGGE ..... WU Jiangchao, GAO Xiaoqi, ZENG Jun, et al (506)

The impact of oil pollution on marine phytoplankton community growth change ..... HUANG Yijun, CHEN Quanzhen, ZENG Jiangning, et al (513)

Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress ..... HE Junyu, REN Yanfang, WANG Yangyang, et al (522)

Non-point pollution control for landscape conservation analysis based on CLUE-S simulations in Miyun County ..... PAN Ying, LIU Yunhui, WANG Jing, et al (529)

Analysis on ecological land rent based on ecological footprint ..... LONG Kaisheng, CHEN Ligen, ZHAO Yali (538)

Relationship of vegetation degradation classification and landscape accessibility classification in Shenzhen ..... LIU Yufan, CHEN Xue, LI Guicai, et al (547)

**Review and Monograph**

Risk management approaches for environmental and human health risks in the United States and Canada ..... HE Guizhen, LÜ Yonglong (556)

Plant wax and its response to environmental conditions: an overview ..... LI Jingjing, HUANG Junhua, XIE Shucheng (565)

Acid corrosion mechanism of the sulfate-reducing bacteria and protecting studies in oilfield ..... ZHUANG Wen, CHU Liye, SHAO Hongbo (575)

Advance in the research of phyllospheric microorganism ..... PAN Jiangang, HU Qing, QI Hongyan, et al (583)

# 2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊\*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 2 期 (2011 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 31 No. 2 2011

**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** 冯宗炜  
**主 管** 中国科学技术协会  
**主 办** 中国生态学会  
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

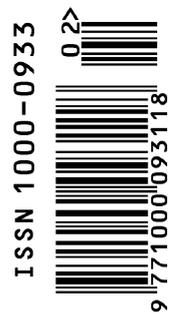
**Editor-in-chief** FENG Zong-Wei  
**Supervised** by China Association for Science and Technology  
**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

**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



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 70.00 元