

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

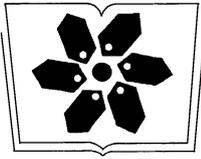
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

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 32 卷 第 23 期 2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等	(7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等	(7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等	(7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等	(7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等	(7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等	(7302)
基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等	(7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华	(7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星	(7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等	(7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉	(7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等	(7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利	(7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等	(7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等	(7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等	(7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成	(7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等	(7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等	(7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚	(7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等	(7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现	(7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等	(7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等	(7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等	(7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等	(7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等	(7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等	(7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等	(7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等	(7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等	(7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅	(7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等	(7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等	(7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等	(7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等	(7595)
专论与综述		
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智	(7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等	(7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

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

DOI: 10.5846/stxb201201150088

魏晓东,陈国祥,施大伟,刘丹,唐加红,李霞. 干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响. 生态学报, 2012, 32(23): 7492-7500.

Wei X D, Chen G X, Shi D W, Liu D, Tang J H, Li X. Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba*. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(23): 7492-7500.

干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响

魏晓东^{1,2}, 陈国祥^{1,*}, 施大伟¹, 刘丹¹, 唐加红¹, 李霞²

(1. 南京师范大学生命科学学院 植物资源与环境研究所, 南京 210046;

2. 江苏省农业科学院粮食作物研究所, 南京 210014)

摘要:为了探讨银杏叶片在长期干旱胁迫下光合性能的变化,采用盆栽控水法对银杏幼苗进行干旱处理,并分别在处理后第 0、20、30、40、50 天,对荧光动力学曲线和荧光参数进行了测定和 JIP-test 分析。结果表明:随着干旱的加剧,叶片叶绿素含量逐渐递减。由于干旱导致银杏叶片的光合系统 II (PS II) 结构破坏和稳固性减弱,其荧光动力学曲线出现了 K 相和 L 相的升高,在干旱处理 40 d 后升高加剧。PS II 结构的变化导致了一系列荧光参数的变化,初始荧光 F_0 逐渐升高,最大荧光 F_m 逐渐降低;代表单位反应中心活性的参数 ABS/RC 、 ET_0/RC 、 TR_0/RC 逐渐升高;单位面积捕获的光能 TR_0/CS_0 高于对照,单位面积用于电子传递的光能 ET_0/CS_0 后期下降;表示受体侧电子传递活性的参数 S_m 、 ψ_0 、 ϕE_0 逐渐下降, M_0 、 V_j 、 V_i 逐渐升高;表示热耗散的参数 DI_0/RC 、 DI_0/CS_0 随干旱时间延长而急剧升高;活性反应中心数目 RC/CS_0 减少;代表 PS II 光合效率的参数 F_v/F_m 、 PI_{abs} 逐渐下降;代表 PS II 供体侧活性的参数 W_k 随干旱时间延长而逐渐升高, OEC 逐渐减少。干旱胁迫导致银杏叶片 PS II 反应中心失活,能流分配失衡,电子传递受阻,PS II 放氧复合体失活和 PS II 稳固性减弱,从而破坏 PS II 光合功能。而反应中心失活和受体侧电子 Q_A^- 的累积是造成 PS II 电子传递活性减弱的主要原因。干旱条件下,银杏 PS II 的 PI_{abs} 比 F_v/F_m 对干旱的反应更灵敏,可作为银杏叶片受到伤害的指标。

关键词:银杏; 荧光动力学; 干旱; 光系统 II

Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba*

WEI Xiaodong^{1,2}, CHEN Guoxiang^{1,*}, SHI Dawei¹, LIU Dan¹, TANG Jiahong¹, LI Xia²

1 Institute of Plant Resources and Environment, College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

2 Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China

Abstract: In plants, photosynthesis is one of the physiological processes that are sensitive to drought stress. Leaves of drought-stressed plants show decreases in biomass and chlorophyll content and changes in chlorophyll fluorescence parameters. Photosystem II (PS II) is the most sensitive component of the photosynthetic apparatus to environmental stresses. Analyses of chlorophyll fluorescence dynamics are useful to determine the effects of environmental stresses on PS II structure, and to study the response mechanisms of the photosynthetic machinery. *Ginkgo* (*Ginkgo biloba*) is often subjected to drought during its growth season. However, little is known about the physiological mechanisms underlying changes in the photochemical activities of PS II in *Ginkgo*. In this study, therefore, we analyzed changes in the fluorescence characteristics of PS II in chloroplasts of mesophyll cells in drought-stressed leaves of the *G. biloba* cultivar 'Taixingdafuzhi'. Five-year-old ginkgo trees were grown in pots in a greenhouse and subjected to one of four drought treatments (20, 30, 40, or 50 days without watering) and compared with control trees (0 days without watering). We

基金项目:江苏省高校自然科学基金(11KJA180001)

收稿日期:2012-01-15; 修订日期:2012-09-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gxchen@njnu.edu.cn

determined chlorophyll fluorescence dynamic curves and parameters and performed a JIP-test. The chlorophyll content in ginkgo leaves decreased gradually with increasing levels of drought stress. The fluorescence dynamics curves showed increased values at K and L phases. These increases in the values of fluorescence dynamics curves were particularly significant at 40 days of drought treatment, and were attributed to PS II destruction and instability. The damage to PS II structure was accompanied by changes in the fluorescence characteristics. The minimal fluorescence (F_0) increased and maximal fluorescence (F_m) decreased gradually with increasing levels of drought stress. The absorption flux per reaction center (RC)- ABS/RC , electron transport flux per RC (ET_0/RC), trapped energy flux per RC (TR_0/RC), and trapped energy flux per cross section (CS)- TR_0/CS_0 increased significantly, while the electron transport flux per CS (ET_0/CS_0) decreased as the period of drought lengthened. During drought stress, there were gradual decreases in the normalized total complementary area above the O-J-I-P transient (S_m), the probability that a trapped exciton will move an electron into the electron transport chain beyond $Q_A(\psi_0)$, and quantum yield for electron transport (ϕE_0), which reflect electron transport activities of the PS II acceptor side. During drought stress, there were gradual increases in the approximated initial slope of the fluorescence transient (M_0) and the relative variable fluorescence intensity at the J-step and I-step (V_j and V_i). The dissipated energy flux per RC (DI_0/RC) and dissipated energy flux per CS (DI_0/CS_0), which reflect heat dissipation, significantly increased in response to drought stress. As the period of drought stress lengthened, there were decreases in the density of RCs (RC/CS_0), F_v/F_m and performance index on an absorption basis (PI_{abs}), which reflect the photochemical efficiency of PS II, while there were increases in relative variable fluorescence at 300 μs of the chlorophyll fluorescence transient (W_k), reflecting electron transport activities of the donor side. Moreover, we observed degradation of the oxygen-evolving complex (OEC) as the period of drought stress lengthened. Taken together, these results indicated that the decline of PS II function in ginkgo leaves was due to an imbalance in energy flux allocation, instability of PS II units, inactivation of reaction centers, disturbance of electron transport, and damage to the oxygen-evolving complex under drought stress. Q_A accumulation on the PS II acceptor side may have played a major role in the decrease in PS II electron transport activity that accompanied reaction center inactivation. PI_{abs} was more sensitive than F_v/F_m to drought stress, and may be used as a biomarker to determine the extent of drought stress in ginkgo leaves.

Key Words: *Ginkgo biloba*; chlorophyll fluorescence kinetics; drought; PS II

有关研究预测,全球气温在今后不断升高,多个地区会遭受更多的干旱天气^[1]。而干旱胁迫所导致的作物和树木减产,可超过其它环境造成的减产总和^[2]。已有的研究表明,干旱胁迫会破坏植物的很多代谢和生理过程^[3]。干旱胁迫会导致植物生物量减少,叶绿素含量减少,叶绿素荧光参数发生变化^[4-10]。而光合作用是植物在干旱胁迫下被抑制的最重要的生理过程之一^[8],但对于其复杂而精密的生理生化调节过程尚不明确。研究表明,在光合作用对环境胁迫响应的过程中,光合系统 II (PS II) 扮演着重要角色^[11]。叶绿素荧光动力学的应用可以深入细致地分析环境胁迫对植物光合机构尤其是 PS II 的影响以及光合机构对环境变化的适应机制^[12]。

银杏是孑遗裸子植物,素有“活化石”之称,也是中国重要的经济树种和观赏树种,在各地都广为栽植。然而,在中国占总面积 52.2% 的干旱和半干旱地区,年降雨量仅在 250—500 mm,土壤水分严重亏缺,银杏在生长季节往往受到水分胁迫。前人的研究表明,银杏在短期轻度干旱下,叶片光合能力的下降主要是气孔因素所致,而在长期干旱条件下,叶肉细胞光化学活性的降低成为主导因素^[13-14]。至今,国内外对银杏在干旱胁迫下叶肉细胞光化学活性的变化机理研究尚很少,本研究试图利用叶绿素荧光动力学的研究方法,分析银杏叶片 PS II 在干旱胁迫下的生理状态和对干旱胁迫的响应机制。

1 材料与方法

1.1 材料

采用 5 年生大小一致的泰兴大佛指实生苗作为研究材料,2009 年 2 月从江苏省泰兴市银杏种质资源圃

移栽至南京师范大学植物园。盆栽处理,每盆 1 株,共 40 株。土壤成分为粘土:腐殖质:珍珠岩=2:2:1。

1.2 干旱处理

4 月上旬,将实验材料搬进南京师范大学塑料大棚内适应 1 个月,大棚透光率约为 70%。5 月上旬,将实验材料随机分成对照组和干旱处理组,每组 20 盆,并对干旱处理组停止浇水,模拟自然干旱;对照组正常浇水,维持适宜生长的需水量。干旱处理后第 0、20、30、40、50 天,进行各项指标的活体测定。每次采样每组随机选取 10 株苗木,采集植株上部 4—7 节位的功能叶 15 片。样品存储于冰盒中带回实验室,立即进行各项指标的离体测定,并备份样品于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中。

1.3 土壤和叶片含水量的测定

土壤含水量采用称重法测定,每组测定 20 盆。叶片组织的水分状况用叶片相对含水量(RWC)表示: $\text{RWC} = (\text{FW} - \text{DW}) / (\text{SW} - \text{DW})$,其中 FW、DW 和 SW 分别表示叶片鲜重、干重和饱和质量^[15],测定 10 个重复。

1.4 叶片叶绿素含量的测定

叶片的叶绿素含量参照 Lichtenthaler and Wellburn^[16]的方法进行。取 5 cm^2 面积的银杏叶片剪碎,在 80% 丙酮中冰浴研磨成浆后, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下 $6000\text{ r}/\text{min}$ (7596 g) 离心 10 min,取上清,沉淀用 80% 丙酮悬浮后再离心,合并上清。在 663、646、470 nm 处用 GENESYS 10UV (Thermo) 型分光光度计测定光吸收值,并计算叶绿素含量。重复测定 5 次。

1.5 叶片叶绿素荧光动力学参数的测定

叶绿素快速荧光诱导曲线用植物效率仪(PEA, Hansatech Instruments Ltd, King's Lynn, UK)测定,记录从 $10\text{ }\mu\text{s}$ —1 s 间隔中的叶绿素荧光的诱导参数。每次测定随机选用 20 片叶,重复测定 3 次,所有被测样品均暗适应 20 min 后再测试。最大光强为 $3000\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 。将叶绿素荧光反应的时间坐标改为对数坐标,呈现出一个多相上升的曲线,称为 O-J-I-P 诱导曲线,同时对曲线进行 JIP-test 分析,其中由诱导曲线计算其他参数的方法参照 Strasser^[17-18]。荧光参数表示的生物学意义见表 1。

表 1 JIP-test 快速叶绿素荧光诱导动力学曲线(O-J-I-P)的参数

Table 1 Formulate and glossary of terms used by JIP-test for the analysis of the fluorescence transient O-J-I-P

荧光参数 fluorescence parameters	生物学意义 Biological significance
F_t (Fluorescence intensity at t time)	暗适应后照光 t 时间时的荧光
F_0 (Fluorescence intensity at $50\mu\text{s}$)	暗适应最小荧光
$W_{OJ} = (F_t - F_0) / (F_J - F_0)$ (Relative variable fluorescence for the normalization between F_0 and F_J)	可变荧光 F_t 占 $F_J - F_0$ 振幅的比例
$W_{OK} = (F_t - F_0) / (F_{300\mu\text{s}} - F_0)$ (Relative variable fluorescence for the normalization between F_0 and $F_{300\mu\text{s}}$)	可变荧光 F_t 占 $F_{300\mu\text{s}} - F_0$ 振幅的比例
F_m (Maximal fluorescence intensity)	暗适应最大荧光
$F_v = F_m - F_0$ (Variable fluorescence)	在 t 时间时的可变荧光
F_v/F_0 (Conformation term for primary photochemistry)	PS II 潜在活性
ABS/RC (Absorption flux per RC)	单位反应中心吸收的光能
TR_0/RC (Trapped energy flux per RC at $t = 0$)	单位反应中心捕获的光能
ET_0/RC (Electron transport flux per RC at $t = 0$)	单位反应中心用于电子传递的能量
DI_0/RC (Dissipated energy flux per RC at $t = 0$)	单位反应中心耗散掉的能量
RC/CS_0 (Density of reaction centers per cross-section)	单位面积有活性反应中心数(在 $t=0$ 时)
TR_0/CS_0 (Trapped energy flux per CS at $t = 0$)	单位截面捕获的光能
ET_0/CS_0 (Electron transport flux per CS at $t = 0$)	单位截面用于电子传递的能量
DI_0/CS_0 (Dissipated energy flux per CS at $t = 0$)	单位截面耗散掉的能量
PI_{abs} (Performance Index)	光合性能指数
$V_J = (F_J - F_0) / (F_m - F_0)$ (Relative variable fluorescence at 2ms)	J 点的相对可变荧光
S_m (Relative area between F_m and F_t)	标准化后的 J-P 相和直线 $F = F_m$ 之间的面积

续表

荧光参数 fluorescence parameters	生物学意义 Biological significance
$W_K = (F_K - F_0) / (F_J - F_0)$ (Ratio of variable fluorescence at K-step to the amplitude $F_J - F_0$)	可变荧光 F_K 占 $F_J - F_0$ 振幅的比例
$M_0 = 4(F_{300\mu s} - F_0) / (F_m - F_0)$ (Approximated initial slope (in ms^{-1}) of the fluorescence transient)	OJIP 荧光诱导曲线的初始斜率
$\psi_0 = 1 - V_J$ (Probability that a trapped exciton moves an electron further than Q_A^-)	捕获的激子将电子传递到电子传递链中超过 Q_A 的其它电子受体的概率(在 $t=0$ 时)
$\phi E_0 = [1 - (F_0/F_m)](1 - V_J)$ (Quantum yield for electron transport at $t = 0$)	用于电子传递的量子产额(在 $t=0$ 时)
F_v/F_m (Quantum yield of primary photochemistry)	最大光化学效率
$V_K = (F_K - F_0) / (F_m - F_0)$ (Relative variable fluorescence at $300\mu s$)	K 点的相对可变荧光
$OEC = [1 - (V_K/V_J)]$ drought sample / $[1 - (V_K/V_J)]$ control (The fraction of OEC in comparison with the control)	与对照相比的放氧复合体的组分
$V_I = (F_I - F_0) / (F_m - F_0)$ (Relative variable fluorescence at 30 ms)	I 点的相对可变荧光

2 结果与分析

2.1 土壤、叶片含水量和叶片叶绿素含量

土壤的含水量在处理 20d 后就出现极显著下降(图 1),为 45.23%,随着干旱胁迫进程,一直处于不断下降的趋势,处理 50d 后土壤的含水量只有 8.09%。叶片的相对含水量也出现了与土壤相同的逐渐下降的趋势(图 1),但下降幅度较土壤含水量下降幅度小。处理后 20 d 和 30 d,叶片的相对含水量显著低于对照,而到了第 40 天和 50 天,叶片的相对含水量已极显著低于对照,干旱处理 50 天后,叶片的相对含水量仅为 39.04%,比对照低 43.6%。

干旱胁迫对银杏叶片叶绿素含量的影响显著(图 2)。干旱处理后 20 d,干旱比对照的叶片叶绿素含量低 23.3%。干旱处理 20 d 后,叶绿素的含量持续减少,至处理后 50 d,干旱处理的单位面积叶片叶绿素的含量只有对照的 13.9%。

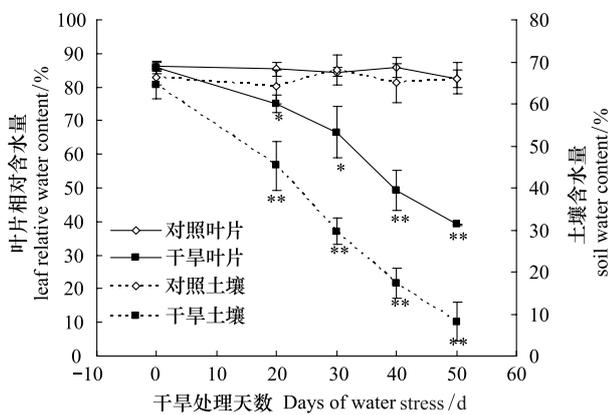


图 1 干旱处理不同天数土壤和叶片含水量的变化

Fig.1 Water stress on water content of soil and leaf at different treatment days Significantly different from control

* 表示差异达显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示差异达极显著水平 ($P < 0.01$)

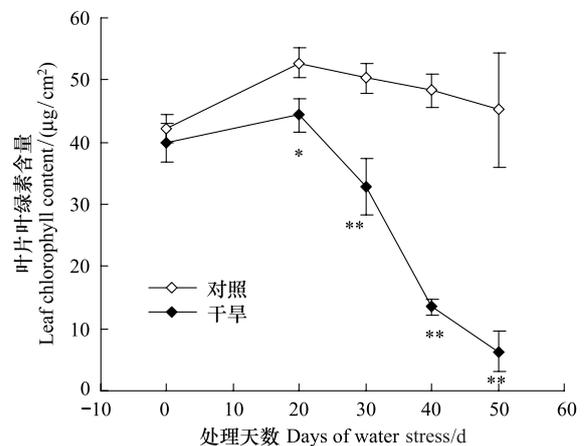


图 2 处理不同天数叶片叶绿素含量的变化

Fig.2 Leaf chlorophyll content at different treatment days

* 表示差异达显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示差异达极显著水平 ($P < 0.01$)

2.2 叶绿素荧光动力学曲线及标准化分析

叶绿素荧光动力学曲线是叶片经过充分的暗适应,以强光照射后呈现的一个多相上升的荧光曲线,通常会在特定的时间点出现 O、J、I、P 4 个特征位点。比较干旱处理与对照的荧光曲线后发现(图 3),对照在不同

时期荧光曲线基本没有变化,而干旱组则发生了较大变化。在干旱条件下,O点表示的初始荧光上升了,而P点表示的最大荧光值下降了,O-J段的荧光位点出现了明显升高,J-P段的荧光位点明显下降。

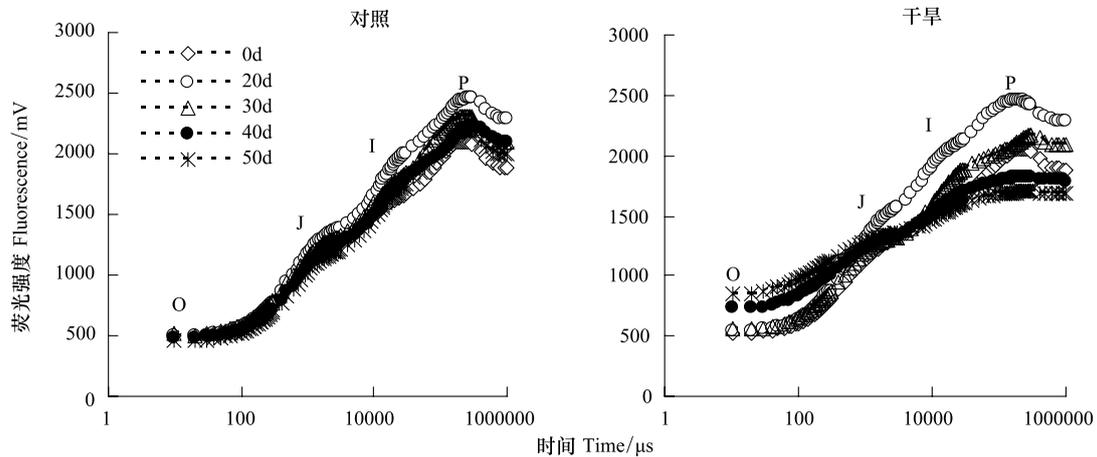


图3 不同处理天数的荧光 OJIP 曲线

Fig.3 Average OJIP transient at different treatment days

图4 是以对照的荧光值为基准,干旱组在处理不同时期得到的 ΔW_{OJ} 值和 ΔW_{OK} 值。从图中可看出,在200—300 μs 处出现了很明显的K位点的正向升高,随着干旱处理进程, ΔW_{OJ} 值不断升高,处理后40d,在土壤水分含量为17.33%左右时呈现急剧升高的趋势。

同时,在120—150 μs 处的 ΔW_{OK} 值出现了明显的L位点升高(图4),该值也是随着干旱处理时间的延长而逐渐上升,至处理后40d,土壤水分含量少于20%, ΔW_{OK} 值呈现急剧升高的趋势。

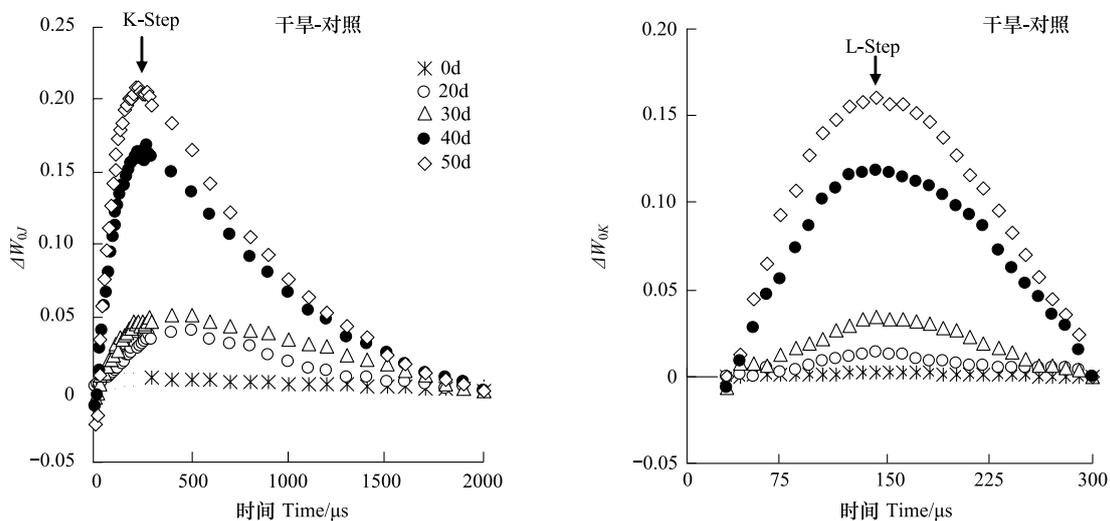


图4 干旱相对于对照在处理不同时期的 ΔW_{OJ} 和 ΔW_{OK} 值

Fig.4 ΔW_{OJ} and ΔW_{OK} of Drought/Control at different treatment days

$$W_{OK} = (F_i - F_0) / (F_{300\mu\text{s}} - F_0), W_{OJ} = (F_i - F_0) / (F_j - F_0); \Delta W_{OK} = W_{OK\text{干旱}} - W_{OK\text{对照}}, \Delta W_{OJ} = W_{OJ\text{干旱}} - W_{OJ\text{对照}}$$

2.4 荧光参数变化的比较

处理期间,干旱组的初始荧光 F_0 (图5)呈现逐渐上升的趋势,且一直比对照高,而对照在处理20d后基本没有变化。干旱处理40d后,二者的差距进一步加大,处理后50d,干旱组的 F_0 值为对照组的1.8倍。干旱组的最大荧光 F_m (图5B)在处理20d后呈现逐渐下降的趋势,且从30d后一直比对照低。代表PS II 潜

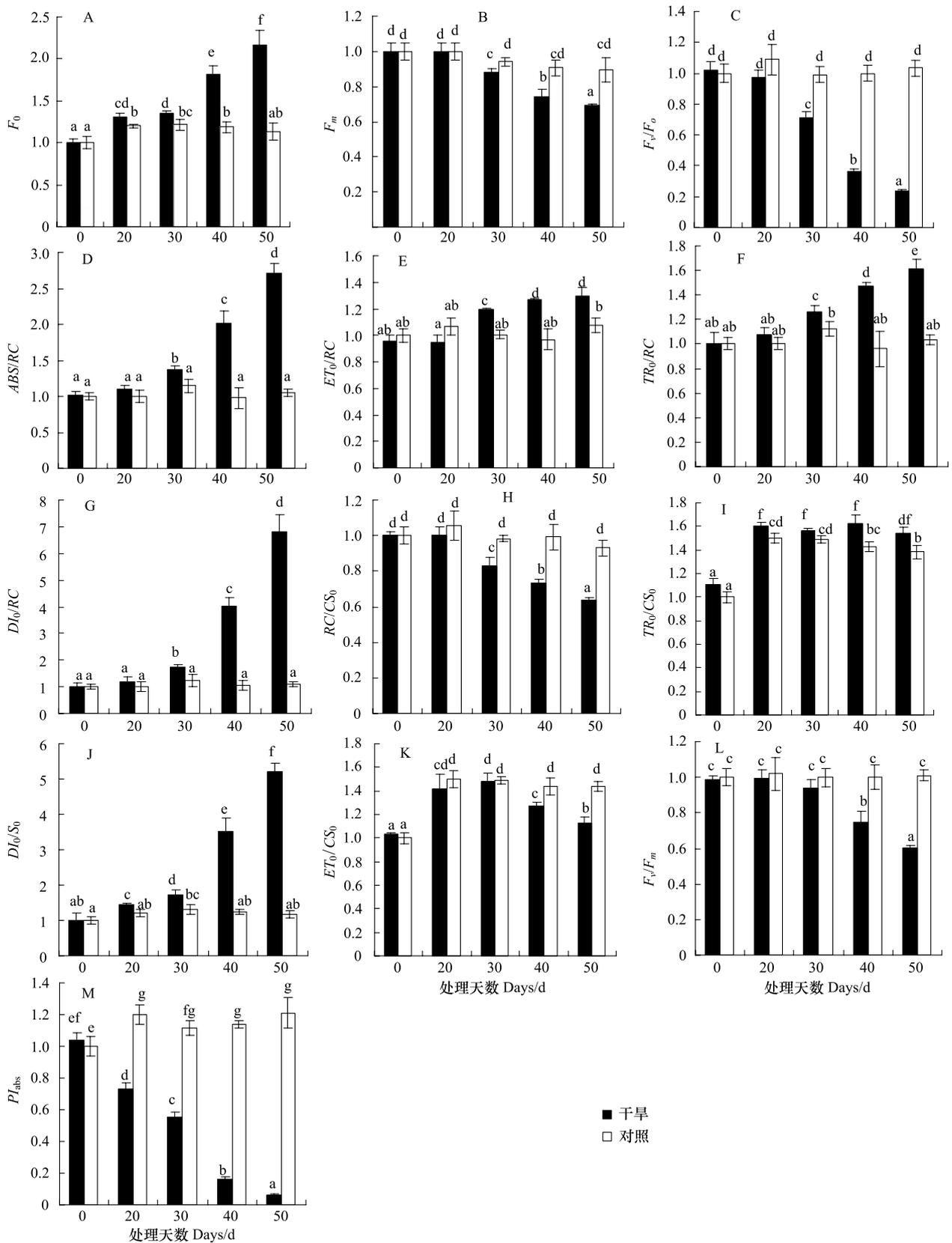


图 5 不同处理天数的荧光参数

Fig. 5 Chl-a fluorescence parameters at different treatment days

所有参数均是是与对照处理 0d 的比值;图中不同字母表示差异达显著水平 ($P < 0.05$)

在活性的 F_v/F_0 (图 5C) 在处理后期呈现大幅度降低, 到干旱处理 50d 时只有对照的 24% 左右, 而对照组则变化不明显。

干旱组的 ABS/RC 、 ET_0/RC 、 TR_0/RC 、 DI_0/RC (图 5) 在处理 20 d 后都呈现增加的趋势, 其中 DI_0/RC 增加最多, 在处理 50 d 时, 是对照的 6.8 倍, 此时干旱组的单个反应中心吸收的光能 ABS/RC 值是对照的 2.7 倍。而 TR_0/RC 和 ET_0/RC 在处理 50 d 时, 分别是对照的 1.6 倍和 1.3 倍, 对照则整个生长期基本无变化。单位面积活性反应中心数 RC/CS_0 (图 5) 在处理期间呈现逐渐下降的趋势, DI_0/CS_0 (图 5) 在处理后期则有所增加, 在处理 50 d 时急剧增加至对照的 4.3 倍。 TR_0/CS_0 (图 5) 一直比对照高, 但并没有随干旱处理时间的延长而增高。 ET_0/CS_0 (图 5) 在后期有所下降。

F_v/F_m (图 5) 值的高低通常用来衡量植物受外界胁迫的程度。从图中可看出, 在干旱早期该值下降不明显, 到干旱处理 40 d 时下降幅度加大, 至处理 50 d 时, 该值仅为对照的 59%。但降低更为迅速且剧烈的是 PI_{abs} (图 5), 在干旱胁迫 20 d 时就开始明显下降, 到 50 d 时, 干旱组仅为对照的 5.4%。

图 6 是以对照在 0 d 时的各参数为基准的雷达图。

在图 6 中, S_m 、 ψ_0 、 M_0 、 φE_0 主要反映 PS II 受体侧的变化, OEC 和 W_K 主要反映 PS II 供体侧的变化。从图中可看出, 对照组在整个生长期的各参数基本无变化。而在干旱处理组中, 变化最大的是 M_0 , 随着处理时间的增加 M_0 也逐渐增加, 到处理 50 d 时, 该值达到最大, 为对照的 2.1 倍, 说明此时 Q_A 被还原得最快, Q_A 向下传递电子的能力受到抑制。 φE_0 、 ψ_0 、 S_m 随着处理时间的延长而逐渐下降, 说明受体库容量减小, 电子传递受到抑制。 OEC 复合体含量在干旱胁迫后有所减少, W_K 值的升高也说明叶片的放氧复合体受到了伤害。干旱胁迫后, V_j 和 V_i 均出现了小幅度升高, 其中 V_j 升高的幅度比 V_i 大。

3 讨论

土壤干旱导致叶片含水量减少, 叶片的失水使其光合机构遭到破坏, 从而导致叶绿素荧光变化和叶绿素含量减少。许多研究表明, 叶片的 PS II 是植物在诸多逆境胁迫中最原初的伤害部位^[19-23], 通过对植物叶片 PS II 的荧光动力学测定, 可深入细致地分析环境因子影响下植物材料光合机构的变化。Strasser 在生物膜能量流动基础上建立了针对叶绿素快速荧光诱导曲线的数据分析和处理方法——JIP-test, 为深入研究光合作用原初反应提供了有力而便捷的工具^[24]。本实验对各个时期荧光动力学曲线的 JIP-test 分析发现, 干旱能改变银杏叶片 PS II 荧光动力学曲线的特征位点。对于干旱组和对照组 W_{OJ} 的差值分析发现, K 相升高, 在干旱后期尤为剧烈。有研究表明, 植物在热胁迫条件下也会出现 K 相升高^[25-26], 但在干旱胁迫下更为明显^[27-28], 此值的升高通常由叶片 PS II 放氧复合体的失活而导致的供体侧电子捐赠受到抑制而造成, 可以作为判断 OEC 受到伤害的指标^[25]。本实验中, 在干旱处理后期土壤含水量为 17% 左右时, K 相的相对值出现了显著增加, 说明此时叶片 PS II 的 OEC 受到了严重伤害, 这也与结果中 OEC 值相吻合。与此同时, 在 50—300 μ s 处出现了 L 相升高, 表明 PS II 单位之间的连接更加松散, 稳固性减弱^[29]。银杏在干旱胁迫时出现 L 相的升高, 说明干旱能破坏银杏叶片 PS II 的结构, 从而影响正常的光合生理过程。而 F_0 在干旱后期的急剧升高和 F_m 的降低, 进一步说明干旱破坏了 PS II 的反应中心和部分蛋白复合体的结构^[30]。

由于 PS II 结构的破坏, 电子传递和能量转化受到了较大影响。 ABS/RC 、 ET_0/RC 、 TR_0/RC 、 DI_0/RC 受到干旱胁迫后增加显著, 这是由于单位面积有活性的反应中心数目 (RC/CS_0) 减少和单个反应中心效率增强的

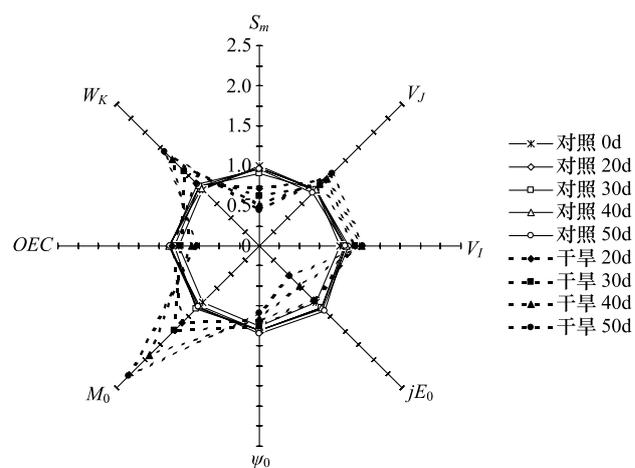


图 6 不同处理时期荧光参数雷达图

Fig. 6 Fluorescence parameters radar plot of different treatment period Each parameter was normalized with the control at 0 days

缘故。而在这个过程中,吸收和捕获的光能却并没有增加单位面积用于电子传递的能量 ET_0/CS_0 ,反而急剧增加了 DI_0/RC 和 DI_0/CS_0 ,说明反应中心吸收和捕获的光能除了保证电子传递外,大部分都以热量的形式耗散,这可能也是银杏叶片在干旱条件下的一种自我保护机制。能量的传递失衡进而影响电子的传递。从图 6 可看出,由于 Q_A^- 的大量累积,导致 M_0 在干旱后期大幅度升高,进而导致电子传递受阻, φE_0 和 ψ_0 下降。 PQ 库的减小导致 S_m 减小。从雷达图中还可看出,表示供体侧参数的变化量比受体侧参数的变化量少,由此可推断,在干旱胁迫下,银杏叶片 PS II 受体侧受到的伤害比供体侧大,这也可从 J 点和 I 点的相对荧光 V_j 和 V_i 的升高得到反映。

由以上分析可看出,在干旱胁迫下,特别是在土壤水分含量低于 20% 时,由于叶片失水,导致银杏叶片 PS II 结构发生破坏,叶绿素发生降解,PS II 电子传递受阻,从而进一步导致了 PS II 光化学活性的降低。长期干旱胁迫是通过破坏银杏叶片叶肉细胞的光系统结构和电子传递来降低光化学活性。在这个过程中,由于 PS II 的结构和生理状态受到破坏,导致 PS II 最大光化学活性 F_v/F_m 在后期大幅度下降,而综合指标 PI_{abs} 在 F_v/F_m 尚未出现较大变化时就已经大幅度下降。已有众多研究证实, PI_{abs} 具有比 F_v/F_m 更灵敏的特点^[31-32]。本试验中, PI_{abs} 也具有比 F_v/F_m 更灵敏的特点,可作为银杏叶片受到伤害的指标。

致谢:南京林业大学谢寅峰教授提供实验材料,江苏省农业科学院吕川根研究员对写作给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Breshears D D, Cobb NS, Rich PM, Price K P, Allen C D, Balice R G, Romme W H, Kastens J H, Lisa Floyd M, Belnap J, Anderson J J, Myers O B, Meyer C W. Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102(42): 15144-15148.
- [2] Kramer P J, Boyer J S. *Water Relations of Plants and Soil*. New York and London: Academic Press, 1995: 380-383.
- [3] Levitt J. *Responses of Plants to Environmental Stresses, Water, Radiation, Salt and Other Stresses*. New York: Academic Press, 1980: 25-280.
- [4] Ekmekci Y, Bohms A, Thomson J A, Mundree S G. Photochemical and antioxidant responses in the leaves of *Xerophyta viscosa* Baker and *Digitaria sanguinalis* L. under water deficit. *Zeitschrift fur Naturforschung*, 2005, 60(5/6): 435-443.
- [5] Mohsenzadeh S, Malboobi M A, Razavi K, Farrahi-Ashtiani S. Physiological and molecular responses of *Aeluropus lagopoides* (Poaceae) to water deficit. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56(3): 314-322.
- [6] Li R H, MSc C, Guo P G, Michael B, Stefania G, Salvatore C. Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley. *Agricultural in Sciences in China*, 2006, 5(10): 751-757.
- [7] Nayyar H, Gupta D. Differential sensitivity of C_3 and C_4 plants to water deficit stress: association with oxidative stress and antioxidants. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 58(1/3): 106-113.
- [8] Yang X H, Chen X Y, Ge Q Y, Li B, Tong Y P, Zhang A M, Li Z S, Kuang T Y, Lu C M. Tolerance of photosynthesis to photo inhibition, high temperature and drought stress in flag leaves of wheat: a comparison between a hybridization line and its parents grown under field conditions. *Plant Science*, 2006, 171(3): 389-397.
- [9] Yang Y, Liu Q, Han C, Qiao Y Z, Yao X Q, Yin H J. Influence of water stress and low irradiance on morphological and physiological characteristics of *Picea asperata* seedlings. *Photosynthetica*, 2007, 45(4): 613-619.
- [10] Han R H, Lu X S, Gao G J, Yang X J. Photosynthetic physiological response of alfalfa (*Medicago sativa*) to drought stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5229-5237.
- [11] Kaiser W M. Effects of water deficit on photosynthetic capacity. *Physiologia Plantarum*, 1987, 71(1): 142-149.
- [12] Baker N R. A possible role for photosystem II in environmental perturbations of photosynthesis. *Physiologia Plantarum*, 1991, 81(4): 563-570.
- [13] Jing M, Cao F L, Wang G B, Hao M Z. The effects of soil water contents on photosynthetic characteristics of Ginkgo. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2005, 29(4): 83-86.
- [14] Zhang W X, Cao F L. Influence of drought stress on photosynthesis and photochemistry efficiency in leaves of *Ginkgo bilobaduring* high temperature days. *Forest Research*, 2002, 15(6): 672-679.
- [15] Turner N C. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and Soil*, 1981, 58(1/3): 339-366.
- [16] Lichtenthaler H K, Wellburn A R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 1983, 11: 591-592.
- [17] Strasser R J, Srivastava A, Tsimilli-Michael M. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples // Yunus M,

- Pathre U, Mohanty P, eds. Probing Photosynthesis: Mechanisms, Regulation and Adaptation. London: Taylor and Francis, 2000, 445-483.
- [18] Strasser R J, Tsimilli-Micheal M, Srivastava A. Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient // Papageorgiou G C, Govindjee, eds. Advances in Photosynthesis and Respiration. Dordrecht: Springer-Verlag, 2004, 19: 321-326.
- [19] Weis E, Berry J A. Plants and high temperature stress. Symposia of Society for Experimental Biology, 1988, 42: 329-346.
- [20] Havan X M, Tardy F. Temperature-dependent adjustment of the thermal stability of photosystem II in vivo: possible involvement of xanthophyll cycle pigments. Planta, 1996, 198(3): 324-333.
- [21] Papageorgiou G C, Govindjee. Advances in Photosynthesis and Respiration. Dordrecht: Springer-Verlag, 2004, 19: 623-635.
- [22] Papageorgiou G C, Govindjee. Advances in Photosynthesis and Respiration. Dordrecht: Springer-Verlag, 2004, 19: 637-661.
- [23] 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.
- [24] Strasser R J, Srivastava A, Govindjee. Polyphasic chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria. Photochemistry and Photobiology, 1995, 61(1): 32-42.
- [25] Srivastava A, Guissé B, Greppin H, Strasser R J. Regulation of antenna structure and electron transport in photosystem II of *Pisum sativum* under elevated temperature probed by the fast polyphasic chlorophyll a fluorescence transient; OKJIP. Biochimica et Biophysica Acta Bioenergetics, 1997, 1320(1): 95-106.
- [26] Tóth S Z, Schansker G, Kissimon J, Kovács L, Garab G, Strasser R J. Biophysical studies of photosystem II-related recovery processes after a heat pulse in barley seedlings (*Hordeum vulgare* L.). Journal of Plant Physiology, 2005, 162(2): 181-194.
- [27] De Ronde J A, Cress W A, Krüger G H J, Strasser R J, van Staden J. Photosynthetic response of transgenic soybean plants, containing an *Arabidopsis P5CR* gene, during heat and drought stress. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(11): 1211-1224.
- [28] Piniór A, Grunewaldt-Stöcker G, von Alten H, Strasser R J. Mycorrhizal impact on drought stress tolerance of rose plants probed by chlorophyll a fluorescence, proline content and visual scoring. Mycorrhiza, 2005, 15(8): 596-605.
- [29] Akoyunoglou G, Argyroudi-Akoyunoglou J H. Chloroplast Development. Dordrecht: Elsevier, 1978: 513-524.
- [30] Oukarroum A, Schansker G, Strasser R J. Drought stress effects on photosystem I content and photosystem II thermotolerance analyzed using Chl a fluorescence kinetics in barley varieties differing in their drought tolerance. Physiologia Plantarum, 2009, 137(2): 188-199.
- [31] Christen D, Schonmanna S, Jermini M, Strasser R J, Défago G. Characterization and early detection of grapevine (*Vitis vinifera*) stress responses to esca disease by in situ chlorophyll fluorescence and comparison with drought stress. Environmental and Experimental Botany, 2007, 60(3): 504-514.
- [32] Chen L S, Cheng L. Photosystem 2 is more tolerant to high temperature in apple (*Malus domestica* Borkh.) leaves than in fruit peel. Photosynthetica, 2009, 47(1): 112-120.

参考文献:

- [10] 韩瑞宏, 卢欣石, 高桂娟, 杨秀娟. 紫花苜蓿对干旱胁迫的光合生理响应. 生态学报, 2007, 27(12): 5229-5237.
- [13] 景茂, 曹福亮, 汪贵斌, 郝明灼. 土壤水分含量对银杏光合特性的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2005, 29(4): 83-86.
- [14] 张往祥, 曹福亮. 高温期间水分对银杏光合作用和光化学效率的影响. 林业科学研究, 2002, 15(6): 672-679.
- [23] 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.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (*Eumeces chinensis*): testing the maternal manipulation hypothesis LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)

Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (*Tamias sibiricus*) SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)

Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)

Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese *Anser indicus* wintering at Caohai Lake of Guizhou, China YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)

Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)

Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)

Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)

Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)

Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)

Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)

Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)

The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)

Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)

The dynamic variation of maize (*Setaria mays* L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)

Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)

Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)

Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv.) FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)

Photosynthetic response of different ecotype of *Illicium lanceolatum* seedlings to drought stress and rewatering CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)

Seasonal variations in the stems of *Larix principis-rupprechtii* at the treeline of the Luya Mountains DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)

Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)

Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)

Effects of fire damages on *Larix gmelinii* radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)

A model for water consumption by mountain jujube pear-like XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)

Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《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 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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:100071	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:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.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 70.00 元