

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

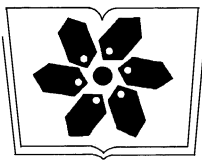
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第9期 Vol.31 No.9 **2011**

中国生态学会
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 9 期

2011 年 5 月 (半月刊)

目 次

EAM 会议专刊述评——气候变化下旱区农业生态系统的可持续性	李凤民, Kadambot H. M Siddique, Neil C Turner, 等 (I)
第二届生态系统评估与管理(EAM)国际会议综述	李朴芳, 赵旭喆, 程正国, 等 (2349)
应对全球气候变化的干旱农业生态系统研究——第二届 EAM 国际会议青年学者论坛综述	赵旭喆, 李朴芳, Kadambot H. M Siddique, 等 (2356)
微集雨模式与降雨变律对燕麦大田水生态过程的影响	强生才, 张恒嘉, 莫非, 等 (2365)
黑河中游春小麦需水量空间分布	王 瑶, 赵传燕, 田风霞, 等 (2374)
祁连山区青海云杉林蒸腾耗水估算	田风霞, 赵传燕, 冯兆东 (2383)
甘肃小陇山不同针叶林凋落物量、养分储量及持水特性	常雅军, 陈 琦, 曹 靖, 等 (2392)
灌水频率对河西走廊绿洲菊芋生活史对策及产量形成的影响	张恒嘉, 黄高宝, 杨 斌 (2401)
玛纳斯河流域水资源可持续利用评价方法	杨 广, 何新林, 李俊峰, 等 (2407)
西北旱寒区地理、地形因素与降雨量及平均温度的相关性——以甘肃省为例	杨 森, 孙国钧, 何文莹, 等 (2414)
黑河河岸植被与环境因子间的相互作用	许莎莎, 孙国钧, 刘慧明, 等 (2421)
干旱胁迫对高山柳和沙棘幼苗光合生理特征的影响	蔡海霞, 吴福忠, 杨万勤 (2430)
树锦鸡儿、柠条锦鸡儿、小叶锦鸡儿和鹰嘴豆干旱适应能力比较	方向文, 李凤民, 张海娜, 等 (2437)
胡杨异形叶绿素荧光特性对高温的响应	王海珍, 韩 路, 徐雅丽, 等 (2444)
柠条平茬处理后不同组织游离氨基酸含量	张海娜, 方向文, 蒋志荣, 等 (2454)
玛河流域扇缘带盐穗木土壤速效养分的“肥岛”特征	涂锦娜, 熊友才, 张 霞, 等 (2461)
摩西球囊霉对三叶鬼针草保护酶活性的影响	宋会兴, 钟章成, 杨万勤, 等 (2471)
燕麦属不同倍性种质资源抗旱性状评价及筛选	彭远英, 颜红海, 郭来春, 等 (2478)
光周期对燕麦生育时期和穗分化的影响	赵宝平, 张 娜, 任长忠, 等 (2492)
水肥条件对新老两个春小麦品种竞争能力和产量关系的影响	杜京旗, 魏盼盼, 袁自强, 等 (2501)
猪场沼液对蔬菜病原菌的抑制作用	尚 斌, 陈永杏, 陶秀萍, 等 (2509)
不同夏季填闲作物种植对设施菜地土壤无机氮残留和淋洗的影响	王芝义, 郭瑞英, 李凤民 (2516)
不同群体结构夏玉米灌浆期光合特征和产量变化	卫 丽, 熊友才, Baoluo Ma, 等 (2524)
脱硫废弃物对碱胁迫下油菜幼叶细胞钙分布及 Ca^{2+} -ATPase 活性的影响	毛桂莲, 许 兴, 郑国琦, 等 (2532)
过去 30a 玛纳斯河流域生态安全格局与农业生产力演变	王月健, 徐海量, 王 成, 等 (2539)
基于 RS 和转移矩阵的泾河流域生态承载力时空动态评价	岳东霞, 杜 军, 刘俊艳, 等 (2550)
毛乌素沙地农牧生态系统能值分析与耦合关系	胡兵辉, 廖允成 (2559)
民勤绿洲农田生态系统服务价值变化及其影响因子的回归分析	岳东霞, 杜 军, 巩 杰, 等 (2567)
青岛市城市绿地生态系统的环境净化服务价值	张绪良, 徐宗军, 张朝晖, 等 (2576)
基于 3S 技术的祖厉河流域农村人均纯收入空间相关性分析	许宝泉, 施为群 (2585)
专论与综述	
全球变化下植物物候研究的关键问题	莫非, 赵 鸿, 王建永, 等 (2593)
区域气候变化统计降尺度研究进展	朱宏伟, 杨 森, 赵旭喆, 等 (2602)
干旱胁迫下植物根源化学信号研究进展	李冀南, 李朴芳, 孔海燕, 等 (2610)
山黧豆毒素 ODAP 的生物合成及与抗逆性关系研究进展	张大伟, 邢更妹, 熊友才, 等 (2621)
旱地小麦理想株型研究进展	李朴芳, 程正国, 赵 鸿, 等 (2631)
小麦干旱诱导蛋白及相关基因研究进展	张小丰, 孔海燕, 李朴芳, 等 (2641)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-05



封面图说: 覆膜-垄作燕麦种植——反映了雨水高效利用和农田水生态过程的优化(详见强生才 P2365)。

彩图提供: 兰州大学干旱与草地生态教育部重点实验室莫非 E-mail: mofei371@163.com

胡杨异形叶叶绿素荧光特性对高温的响应

王海珍^{1,2,3}, 韩路^{2,3}, 徐雅丽³, 王琳³, 贾文锁^{1,*}

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100139; 2. 新疆生产建设兵团塔里木盆地生物资源保护利用重点实验室, 新疆阿拉尔 843300; 3. 塔里木大学植物科学学院, 新疆阿拉尔 843300)

摘要: 胡杨(*Populus euphratica* Oliv) 是塔里木极端干旱荒漠区优势乔木树种, 由于其生长在荒漠环境中, 极端高温远高于其它地区, 因此研究胡杨对高温胁迫的响应特征对于解释胡杨的抗逆机理与生态适应策略具有极为重要的意义。以胡杨 3 种典型的异形叶为材料, 研究不同温度对其叶绿素荧光特性和能量分配的影响。结果表明, 25—45 °C 温度下胡杨异形叶的 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 与 F_v/F_0 变化不大, 尤其 F_v/F_m 仍能保持在 0.78 左右, 光合反应正常; 高温胁迫下 (>45 °C) F_m 、 F_v/F_0 、 F_v/F_m 、 F'_v/F'_m 、 qP 、 $\Phi PS II$ 、 P 和 ETR 均大幅降低; F_0 、 qN 、 E 显著上升, 而 D 先上升后下降, 说明高温抑制了 PS II 的功能, 使 PS II 反应中心活性下降, QA^- 的还原速率加快, 光化学电子传递速率降低, 某些能量耗散途径受阻, 影响了 PS I 和 PS II 激发能的平衡分配, 最终导致光合机构受损、光合速率降低。胡杨 3 种异形叶的叶绿素荧光参数随温度升高变幅不同, 高温处理下锯齿阔卵形叶各参数均高于卵形叶与条形叶, 表明锯齿阔卵形叶比卵形叶和条形叶具有更强的高温耐受能力。用模糊数学的隶属度函数对胡杨 3 种异形叶的耐热性进行综合评价, 锯齿阔卵形叶的耐热性最强。

关键词: 胡杨; 异形叶; 高温胁迫; 叶绿素荧光特性; 耐热性

Response of chlorophyll fluorescence characteristics of *Populus euphratica* heteromorphic Leaves to high temperature

WANG Haizhen^{1,2,3}, HAN Lu^{2,3}, XU Yali³, WANG Lin³, JIA Wensuo^{1,*}

1 College of Agriculture & Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 Xinjiang Production & Construction Corps Key Laboratory of Protection and Utilization of Biological Resources in Tarim Basin, Alar 843300, China

3 College of Plant Science of Tarim University, Alar, 843300, China

Abstract: *Populus euphratica* Oliv, a member in the family Salicaceae, is typical xeromorphic mesophyte and an important tree species of desert riparian forests in arid regions. It is mainly distributed in central Asia, west Asia and the Mediterranean region, especially in the basins of inland rivers of the northwest arid regions of China where it occupies the widest distribution area. The largest and most typical desert riparian forest is found along the Tarim River and occupies over 350,000 km². *P. euphratica* possesses many excellent characteristics such as tolerance to cold, high temperature, drought, salt and alkali soils. It plays an active role in climatic regulation, desert extension management, river bank protection, channels stabilization and oasis conservation. It has not only protected desert fragile ecological system but also been an irreplaceable natural barrier. *P. euphratica* is highly prized in the Tarim Basin for its great ecological, economical and social benefits. During the growth and development of *P. euphratica*, the leaf morphology changes in order to adapt drought, high temperature stress in extremely arid desert region of Tarim basin. In most cases, a single adult tree commonly comprises polymorphic leaves, including lanceolate, oval and serrated broad-oval leaves. The lanceolate, oval and serrated broad-oval leaves come out in turn. In one plant with multiple types of leaf shapes at the same time, the heteromorphic leaf distribution in the canopy from top to bottom is serrated broad-oval, oval and lanceolate, respectively. In this study some standard adult plants with three typical leaf shapes were selected from the planted forest stands in Tarim basin. The purpose of the study

基金项目: 国家自然科学基金项目(30960033); 塔里木盆地生物资源保护利用兵团重点实验室开放基金(BR0810)

收稿日期: 2010-06-09; **修订日期:** 2011-02-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiaws@cau.edu.cn.

was to measure physiological responses of *P. euphratica* to high temperature stress and to understand drought-resistance mechanism of this tree species under heat stress conditions. . Seven temperature treatments with 25℃, 30℃, 35℃, 40℃, 45℃, 50℃ and 55℃ were designed to compare the responses of three heteromorphic leaves of *P. euphratica* including chlorophyll fluorescence characteristics and excitation energy distribution in growth chamber. The results showed that there were slight variations in F_0 , F_m , F_v/F_m and F_v/F_0 of *P. euphratica* heteromorphic leaves from 25℃ to 45℃. The ratio of F_v/F_m was observed to maintain 78% of normal photosynthesis reaction. Yet, a few parameters such as F_m , F_v/F_0 , F_v/F'_m , qP , $\Phi PS II$, P and ETR were significantly decreased with heat stress (>45℃), and the values of F_0 , qN and E were found to increase significantly. The level of D parameter increased at the initial stage and decreased at the later stage. The results indicate that high temperature stress decreased the activity of PS II reaction center and photochemical electron transfer rate, inhibited the heat dissipation and distribution balance of excitation energy between PS I and PS II, which led to the structural damage of photosynthetic apparatus and functional descend in photosynthetic ability. The chlorophyll fluorescence parameters of *P. euphratica* heteromorphic leaves varied significantly from each other in seven temperature treatments. Furthermore, the chlorophyll fluorescence level of serrated broad-oval leaf was significantly higher than that of lanceolate and oval leaf. This demonstrated that serrated broad-oval leaf had better tolerance to heat stress than other leaf types did. Finally, the membership function of fuzzy mathematics was used to analyze the tolerance abilities of three heteromorphic leaves under heat stress. The results indicates that the serrated broad-oval leaf was the most tolerant to heat stress.

Key Words: *Populus euphratica* Oliv; heteromorphic leaves; high-temperature stress; heat-tolerance; chlorophyll fluorescence characteristics

胡杨(*Populus euphratica* Oliv)是杨柳科杨属中最古老、最原始的本木植物,主要分布在中亚、西亚和地中海地区^[1],是典型潜水旱中生至中生植物,对温度大幅度变化的适应能力很强,是重要的荒漠河岸林树种。由于长期适应极端干旱的大陆性气候,其叶形多变,在幼苗、幼树和成年树下部萌生条上呈线状披针形、狭披针形或披针形;成年树上不仅存在披针形叶片,而且出现了卵状菱形、卵圆形、锯齿卵圆形或肾形等形状的叶片^[2]。胡杨异形叶的形成,是对其所在环境长期适应的结果,是一种生态适应性。在沙漠地区,干旱强光一定伴随着高温,植物对高温的耐受能力是一个决定其分布甚至生存的关键因素。胡杨长期生长在干旱荒漠地区,为适应当地干旱和高光强的生存环境,其叶的形态结构、光合与叶绿素荧光特性均会发生相应改变。不同形状的叶片由于在树体上所处位置的不同其适应性一定也有差异。中国西北荒漠植物主要生长季(5—8月,特别是7月中旬到8月中旬)的气温最高可达40℃,而地表沙面最高温度可达70—80℃^[3]。高温对植物生长乃至生存均有诸多负面影响,光合作用被认为是对高温胁迫最为敏感的生理过程。高温可以引起叶绿体类囊体膜脂过氧化,影响光合电子传递,抑制了PS II供体侧水光解反应和PS II下游碳同化反应,降低光合速率^[4]。叶绿素荧光动力学技术在测定叶片光合作用过程中光系统对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面具有独特的作用,已成为研究植物光合生理功能与各种外界因子对其细微影响及鉴定评价植物耐逆境能力的理想探针^[5],可通过此项技术剖析逆境中植物对光能的吸收、耗散和转化特性及对逆境适应的内在机制。目前,国内外学者主要针对胡杨抗逆性从解剖结构、光合特性、水分生理、干旱盐胁迫下的生理适应机制等方面开展了大量的研究工作^[2,6-9],并取得了一些研究进展。苏培玺、郑彩霞等^[2,10]对胡杨多态叶的气孔特征、光合速率及荧光特性进行了比较研究,但对胡杨异形叶叶绿素荧光特性对高温胁迫响应的研究尚未见报道。人工种植的胡杨和天然胡杨虽然生境不同但同样在生长发育进程中存在叶形分化。本文拟通过对人工栽植的胡杨异形叶离体叶片进行不同温度处理,测定其叶绿素荧光参数的变化来揭示胡杨异形叶的耐热机理,探讨胡杨叶形变化是否与其高温适应性有关,为进一步揭示胡杨叶形变化的生理生态适应机理奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验样地与供试材料

研究区位于塔克拉玛干沙漠北缘、塔里木河上游(40°35'N, 80°50'E; 海拔 1006 m)阿拉尔垦区。该区属典型的暖温带大陆性干燥气候, 境内地势平坦, 沙漠、绿洲、河流相间, 是一个生产类型多样化、特色鲜明的荒漠绿洲灌溉农业区。区内光热资源丰富, 昼夜温差大。年日照时数 2750—3029 h, 年太阳总辐射达 $5.89 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$, $\geq 0^\circ\text{C}$ 的有效积温为 4132.7 $^\circ\text{C}$, 平均气温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的持续日数为 201 d, 年平均降雨量小于 50 mm, 年平均蒸发量大于 2500 mm。在胡杨旺盛生长的 7 月下旬进行实验。在塔里木河岸边的人工胡杨林内选择叶形明显分化的典型植株, 于晴天 10:00 剪取样株上发育良好的健康枝条, 切端插于蒸馏水再剪去 2 cm 后, 迅速带回实验室。在室内蒸馏水中浸泡 4 h 后, 参照 Law 和 Crafts Brandner 文献^[11-12]报道的快速热胁迫处理方法, 选择条形叶、卵形叶和锯齿阔卵形叶 3 种典型叶片, 用湿润脱脂棉包裹叶柄, 分成 7 组(每组 6 片叶), 分别置于铺有湿润滤纸的 7 个培养皿中, 然后放入预先设置好温度的植物组织培养箱, 温度分别设置为: 25、30、35、40、45、50、55 $^\circ\text{C}$, 3 次重复, 暗中处理 60 min。

1.2 叶绿素荧光参数测定

温度处理结束后, 采用德国 Walz 公司生产的 PAM-2100 便携式调制荧光仪, 利用配备了微型光量子/温度探头的叶夹(2030-B)夹住叶片, 参考李晓峰^[13]的方法在暗室中测定暗适应下叶片的初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、可变荧光(F_v)、PS II 最大光化学效率(F_v/F_m); 光下稳态荧光(F_t)、光适应下的最大荧光(F'_m)、光适应下的最小荧光(F'_0)、PS II 实际光化学效率($\Phi\text{PS II}$)、光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(qN)和 PSII 非循环光合电子传递速率(ETR), 以上参数均由仪器自动给出。PSII 潜在光化学活性(F_v/F_0)由 $(F_m - F_0)/F_0$ 来计算、天线色素转换效率(F'_v/F'_m)由 $(F'_m - F'_0)/F'_m$ 来计算。PSII 天线色素吸收的光能分配分为 3 部分: 用于 PSII 光化学反应(P)、天线热耗散(D)和其他热耗散(E), 所占的比率根据 Demmig-Adams^[14]公式计算: $D = 1 - F'_v/F'_m$; $P = F'_v/F'_m \times qP$; $E = F'_v/F'_m \times (1 - qP)$ 。PSI 激发能分配系数(σ)、PSII 激发能分配系数(β)按 Braun 方法计算^[15]: $\sigma = qP/(1 + qP)$, $\beta = 1/(1 + qP)$, PSI 和 PSII 激发能分配平衡性用 $(\beta/\sigma - 1)$ 表示。

1.3 胡杨异形叶耐热性评价

对供试胡杨 3 种异形叶的叶绿素荧光参数进行综合评价, 采用模糊数学中隶属函数法^[16], 对各种异形叶的每一指标求其隶属值, 公式如下:

$$X(\mu) = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

式中, X 为某种异形叶某一指标的测定值, $X_{\max}$ 为某一测定指标的最大值, $X_{\min}$ 为该指标中的最小值。若某指标与耐热性呈负相关, 可通过反隶属函数计算其耐热性隶属函数值, 如下所示:

$$X(\mu) = 1 - \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

将各指标的具体耐热隶属值进行累加得到不同异形叶的耐热性综合值, 综合值越大, 其耐热性越强。

1.4 胡杨异形叶生理指标测定

考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白质含量^[17]、酸性茚三酮比色法测定脯氨酸含量^[17]、硫代巴比妥酸比色法测定丙二醛(MDA)含量^[18]。

1.5 数据处理

试验数据用 Excel 和 SAS6.12 软件进行处理并做显著性检验。

2 结果分析

2.1 高温对胡杨异形叶暗适应下叶绿素荧光参数的影响

2.1.1 高温对胡杨异形叶初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)的影响

F_0 是暗适应状态下 PS II 反应中心处于完全开放状态时并且所有非光化学过程处于最小时的荧光产量,

其变化程度可用来鉴别植物的不同抵抗或耐盐能力^[19]。由图 1 可见,胡杨 3 种异形叶的 F_0 均随着温度升高而增加,但三者增加幅度不同。25—35 °C 下三者的 F_0 变化不明显,条形叶与卵形叶分别在 35、40 °C 后升高,45 °C 后急骤增高,锯齿阔卵形叶 F_0 则一直增加缓慢。45 °C 高温下,条形叶、卵形叶与锯齿阔卵形叶的 F_0 比 25 °C 对照分别上升了 44.7%、28.4%、12.1% ;55 °C 高温下,条形叶、卵形叶与锯齿阔卵形叶的 F_0 比 25 °C 对照分别升高 144.5%、122.9% 和 26.2% ,条形叶与卵形叶的 F_0 增加极显著($P<0.01$)。表明卵形叶与锯齿阔卵形叶 PS II 反应中心在 45 °C 以下时能保持较高活性,维持正常生理功能,而 50 °C 以上的高温则使卵形叶、条形叶的 PS II 活性或叶绿体类囊体膜结构受损,锯齿阔卵形叶的 PS II 结构相对较稳定,耐热性能较卵形叶和条形叶强。

F_m 是 PS II 反应中心处于完全关闭状态时的荧光产量,可反映通过 PS II 的电子传递情况。由图 1 可见,随温度逐渐增加胡杨 3 种异形叶的 F_m 值都先略上升而后下降,各处理温度下锯齿阔卵形叶的 F_m 值均高于条形叶和卵形叶。温度大于 45 °C 后条形叶的 F_m 下降明显。与 25 °C 对照相比,55 °C 高温下条形叶、卵形叶和锯齿阔卵形叶的 F_m 值分别下降 33.4%、22.6%、15.2%。表明大于 45 °C 高温胁迫会使胡杨异形叶 PS II 的电子传递能力减弱,特别是对条形叶的光能转化效率产生较大影响。

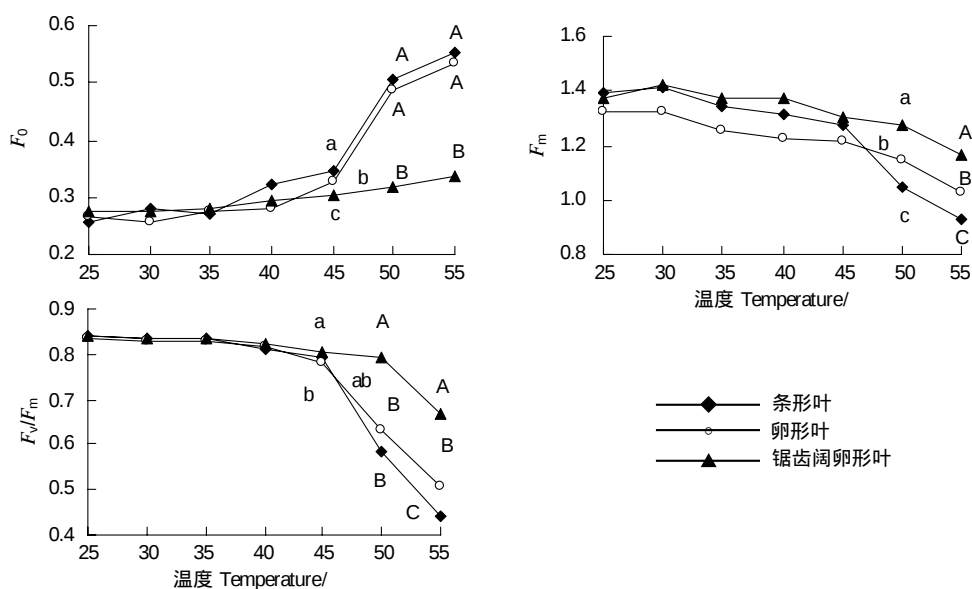


图 1 温度对胡杨异形叶初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、PS II 的最大光化学效率(F_v/F_m)的影响

Fig. 1 Effects of different temperature on minimal fluorescence(F_0), maximum fluorescence(F_m) and photochemical maximum efficiency(F_v/F_m) in heteromorphic leaves of *P. euphratica*

图中标有不同大写字母表示异形叶间的差异极显著($P<0.01$);不同小写字母表示异形叶间的差异显著($P<0.05$)

2.1.2 高温对胡杨异形叶 PS II 的最大光化学效率(F_v/F_m)和潜在光化学活性(F_v/F_0)的影响

F_v/F_m 反映 PS II 反应中心的原初光能转换效率,代表光合机构把吸收的光能用于化学反应的最大效率,常被用来表示环境胁迫程度的指标。可变荧光(F_v)与固定荧光(F_0) 的比值(F_v/F_0)可代表 PS II 的潜在光化学活性,与有活性的反应中心的数量成正比关系^[20]。图 1 可见,胡杨 3 种异形叶的 F_v/F_m 随温度的升高而下降,45 °C 以后显著降低($P<0.05$)。25—45 °C 下胡杨 3 种异形叶的 F_v/F_m 值均变化不大、稳定在 0.78 左右。条形叶与卵形叶在 45 °C 后急剧下降,锯齿阔卵形叶在 50 °C 后急剧下降。55 °C 高温下锯齿阔卵形叶、卵形叶与条形叶的 F_v/F_m 比 25 °C 对照分别降低了 20.6%、39.0%、47.6% ,表明条形叶与卵形叶的 PS II 能量转换机构的热稳定性较差。造成 F_v/F_m 值下降的原因是由于 F_0 升高和 F_m 下降所导致。 F_v/F_0 反映了 PS II 潜在光化学活性,可以衡量光合机制是否受到损害。由图 2L 可见,3 种异形叶 F_v/F_0 的变化趋势与 F_v/F_m 相似,但较 F_v/F_m 更敏感且在各温度下的降低幅度均高于 F_v/F_m 。 F_v/F_0 与 F_v/F_m 的下降,表明高温胁迫使胡杨 3 种异

形叶的 PS II 活性下降、原初光能转化效率降低、光合机构受到损伤,而且温度越高损伤越严重。

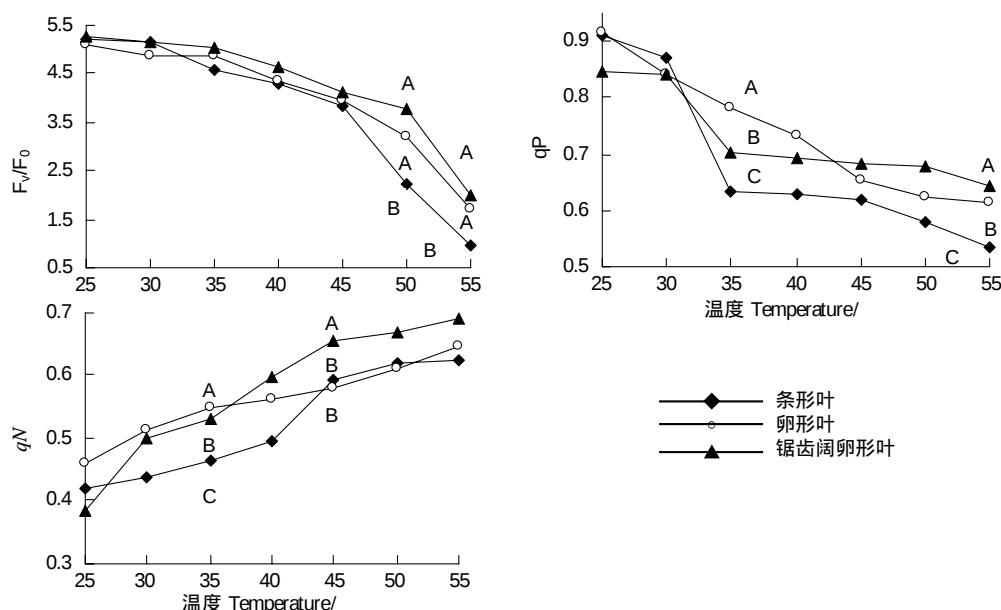


图2 温度对胡杨异形叶 PS II 潜在光化学活性 (F_v/F_0)、光化学猝灭系数 (qP) 和非光化学猝灭系数 (qN) 的影响

Fig. 2 Effects of different temperature on potential photochemical efficiency (F_v/F_0) of PS II, photochemical quenching coefficient (qP) and non-photochemical quenching coefficient (qN) in heteromorphic leaves of *P. euphratica*

2.2 高温对胡杨异形叶光适应下叶绿素荧光参数的影响

2.2.1 高温对胡杨异形叶光化学猝灭系数 (qP) 和非光化学猝灭系数 (qN) 的影响

qP 值的大小反映的是 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,说明质体醌(PQ)还原程度越小、PS II 电子传递活性越高^[19]。由图2可知,胡杨异形叶的 qP 随温度的升高而下降,25—30 °C 下变化均不大,30 °C 以后条形叶与锯齿阔卵形叶陡降,然后缓慢下降;卵形叶在 45 °C 后降幅变小。在 35 °C 下,条形叶、卵形叶与锯齿阔卵形叶的 qP 分别比 25 °C 对照下降 30.4%、15.1%、16.6%;55 °C 高温下分别比对照下降 41.4%、33.2%、24.2%。大于 45 °C 的高温下锯齿阔卵形叶的 qP 均高于其它 2 种异形叶,条形叶下降幅度最大。表明高温下条形叶 QA 重新氧化的能力大幅减弱,高温破坏了其 PS II 受体的电子传递,而锯齿阔卵形叶受伤害稍轻,对高温的适应性较强,能保证高温胁迫下具有较高的电子传递和光氧化速度,光合作用仍能进行。

qN 反映了 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^[20],热耗散是植物保护 PS II 的重要机制。由图2可知,胡杨异形叶的 qN 随温度升高而升高,表明随高温胁迫程度增加 PS II 的活性受到的抑制程度加剧。 qN 变化趋势与 qP 相反,25—40 °C 条形叶与卵形叶的 qN 上升缓慢,40 °C 以后上升加快;锯齿阔卵形叶 30 °C 后缓慢上升,大于 40 °C 的高温下锯齿阔卵形叶的 qN 均高于其它叶形。55 °C 下胡杨条形叶、卵形叶与锯齿阔卵形叶的 qN 分别比 25 °C 对照上升了 49.6%、40.7%、79.1%。表明随温度升高胡杨异形叶都能将天线色素吸收的多余能量以热能形式耗散,以减轻光合机构的破坏或避免光合酶失活,缓解光抑制程度。 qN 的升高是胡杨异形叶抵御高温伤害自我保护的一种重要机制。锯齿阔卵形叶在高温下的热耗散能力更强,受高温抑制的程度较条形叶和卵形叶轻。

2.2.2 高温对胡杨异形叶 PS II 非循环光合电子传递速率 (ETR) 和实际光化学效率 (Φ_{PSII}) 的影响

ETR 是光合机构吸收光能发生电荷分离产生电子并沿电子传递链向下传递的速率,反映实际光强条件下的表观电子传递效率。由图3可见,胡杨 3 种异形叶的 ETR 均随温度升高先上升后下降,条形叶 30 °C 后开始持续下降,卵形叶 40 °C 后下降幅度增大,30 °C 后锯齿阔卵形叶 ETR 随温度升高缓慢下降,大于 40 °C 后其

值均高于卵形叶和条形叶。说明胡杨卵形叶的 ETR 在低于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下电子传递效率较高,高于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后锯齿阔卵形叶的电子传递效率较高,PS II 在高温下仍能保持较高活性,具有良好的热稳定性。

$\Phi PS II$ 表示在环境胁迫下 PS II 反应中心有部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率,反映植物叶片在光下用于电子传递的能量占吸收光能的比例与 PS II 反应中心的开放程度,其值越小,说明电子传递活性与传递速率越小^[21]。由图 3 可见,胡杨异形叶的 $\Phi PS II$ 随温度升高总体呈下降趋势。说明随着温度的升高,胡杨异形叶可以通过降低 PS II 反应中心开放的比例、提高其关闭部分的比例来抑制叶片 PS II 电子传递的能力,降低叶片吸收的光能用于光化学反应的比例。卵形叶 $\Phi PS II$ 在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 达到峰值, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后 3 种异形叶的 $\Phi PS II$ 均急剧下降; $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后下降减慢,但锯齿阔卵形叶在高温胁迫下 ($>40\text{ }^{\circ}\text{C}$) $\Phi PS II$ 仍高于其它 2 种异形叶。高温胁迫下锯齿阔卵形叶能保持相对较高的 $\Phi PS II$,有利于更多光能参与光化学反应与提高光能转化效率,为暗反应的光合碳同化积累更多所需的能量,以促进碳同化的高效运转和有机物的积累。

2.2.3 高温对胡杨异形叶天线色素转换效率(F'_v/F'_m)与吸收光能分配的影响

F'_v/F'_m 反映光照下开放 PS II 反应中心原初光能捕获效率,代表激发能被开放的 PS II 反应中心捕获的效率,它定量了由于热耗散的竞争作用而导致光化学抑制的程度^[20]。由图 3 可见,胡杨异形叶的 F'_v/F'_m 随温度升高总体呈下降趋势。卵形叶 F'_v/F'_m 先升高至 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后下降幅度增大;条形叶在 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后下降显著,而锯齿阔卵形叶 F'_v/F'_m 在高温胁迫 ($>40\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下均高于其它 2 种异形叶,仅表现在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后急骤降低。 F'_v/F'_m 下降、 qN 升高,表明胡杨异形叶可调整天线系统的功能以适应高温逆境,通过提高热耗散来降低吸收光能的转换效率,阻止过多光能向 PS II 的传递,缓解对反应中心的伤害。

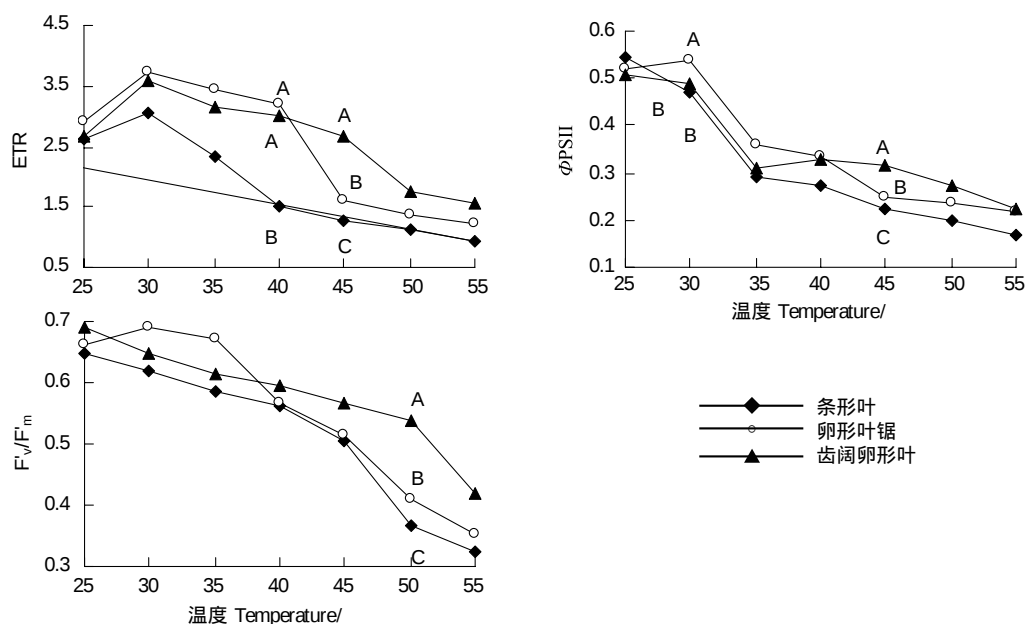


图 3 温度对胡杨异形叶非循环光合电子传递速率(ETR)、实际光化学效率($\Phi PS II$)和天线色素转换效率(F'_v/F'_m)的影响

Fig. 3 Effects of different temperature on apparent Photosynthetic electron transport rate(ETR), actual photochemical efficiency of PS II ($\Phi PS II$) and efficiency of excitation captured by open PS II center(F'_v/F'_m) in heteromorphic leaves of *P. euphratica*

由图 4 胡杨异形叶吸收的光能分配比例来看,随温度升高 PS II 反应中心的光化学反应(P)能量减少(图 4),其它方式的热耗散(E)增加(图 4),天线热耗散(D)先增高后降低(图 4)。表明高温胁迫使得 PS II 系统关闭程度增大,而使天线色素吸收的激发能进入 PS II 光化学的部分减少,通过天线色素以及其他途径耗散的激发能增加。不同叶形的 D 值变化不同,条形叶与卵形叶 D 值至 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 达到最高,其后降低,条形叶下降幅度较大;锯齿阔卵形叶则升至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后开始下降,反映出锯齿阔卵形叶耐热性较好。此外, $25\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 E 值所占份额变化不大且相对较小,但高温胁迫下则明显增大。条形叶与卵形叶在 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后急剧升高,

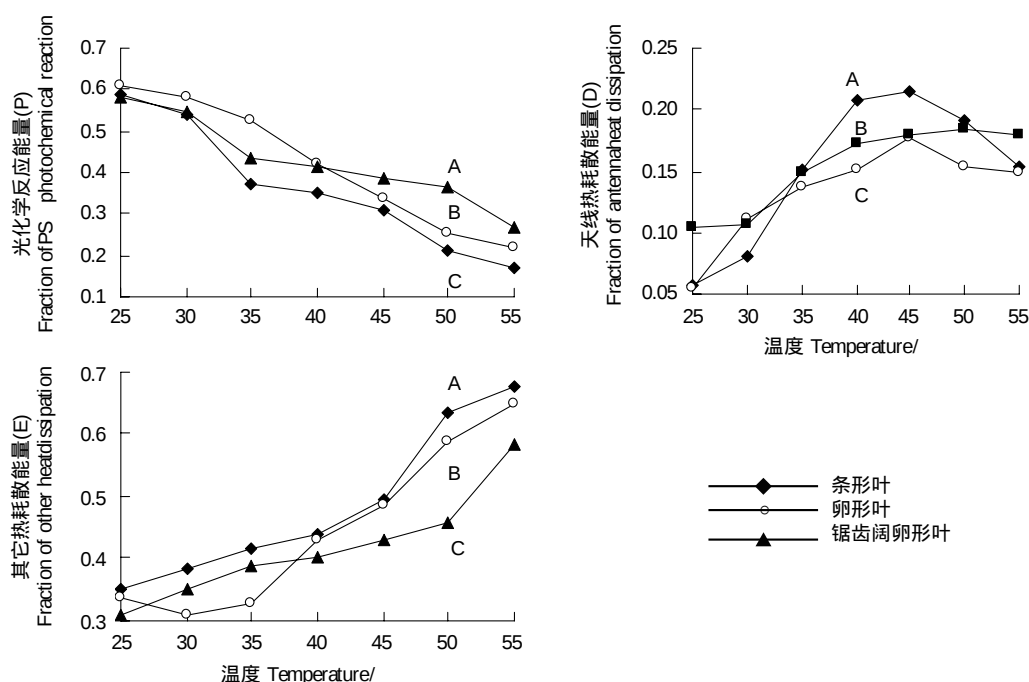


图4 温度对胡杨异形叶吸收光能分配的影响

Fig. 4 Effects of different temperature on allocation of absorbed light energy (P , D , E) in heteromorphic leaves of *P. euphratica*

至 55 °C 时分别达到 67.8% 与 64.7% ;锯齿阔卵形叶则于 50 °C 显著升高。表明 25—45 °C 胡杨异形叶大部分能量可以通过天线色素热耗散与其它热耗散 (E) 来耗散多余能量,高温胁迫下天线热耗散减弱,主要以其它方式进行热耗散为主,尤其 >45 °C 的高温胁迫更明显。表明胡杨异形叶在高温胁迫下 PS II 反应中心活性下降,自我保护机制受到影响。

2.2.4 高温对胡杨异形叶 PS I 与 PS II 激发能分配的影响

σ , β 分别表示 PS I 和 PS II 的激发能分配系数。由图 5 可见,温度升高使得胡杨异形叶 σ 下降, β 升高,分配给 PS II 的激发能比例逐渐增大,激发能分配由状态 2 向状态 1 转换,从而使激发能分配不平衡系数 ($\beta/\sigma - 1$) 逐渐加大 (图 5),使得两个光系统间的激发能分配越来越不平衡。激发能分配给 PS I 的量与分配给 PS II 的量在条形叶处于 35 °C 时变化最显著,45 °C 后 PS I 和 PS II 间分配越来越不平衡,PS II 分配增多;锯齿阔卵形叶在高温胁迫下 PS I 和 PS II 间分配较均衡。表明高温胁迫影响了激发能在两系统之间的均衡分配,使得激发能分配给 PS I 的量减少,而分配给 PS II 的量增多,造成异形叶无法摆脱过剩激发能对光合机构的抑制,这与 PS II 活性下降、关闭程度增强的结果相一致。

2.3 高温对胡杨异形叶游离脯氨酸、可溶性蛋白质及丙二醛含量的影响

由图 6 可见,当温度 >45 °C,胡杨异形叶脯氨酸含量急剧增加,50 °C 时脯氨酸含量达到峰值,然后直线下降。3 种异形叶脯氨酸含量变化趋势相似,但卵形叶变化幅度最大,其次是条形叶。图 6 可见胡杨异形叶可溶性蛋白质含量随温度升高先逐渐升高,条形叶 35 °C 时达到峰值后急剧下降,55 °C 时其含量只有 25 °C 的 30% ;锯齿阔卵形叶的蛋白质含量随温度升高而升高至 40 °C 时才缓慢下降,55 °C 时比 25 °C 仅下降了 15.8% 。25—40 °C 时卵形叶蛋白质含量的变化与条形叶相似,40—55 °C 缓慢下降的趋势与锯齿阔卵形叶相似,但 55 °C 时的蛋白质含量下降的幅度更大,比 25 °C 下降了 47.8% 。随温度升高膜质过氧化产物丙二醛 (MDA) 含量总体呈上升趋势 (图 6),条形叶 MDA 含量始终高于卵形叶和锯齿阔卵形叶。从 MDA 平均值来看锯齿阔卵形叶最低,卵形叶介于二者之间。高温会导致蛋白质热变性,加剧膜质过氧化作用。胡杨异形叶通过快速积累脯氨酸增加原生质水合程度,保护参与代谢的各种酶蛋白及生物膜的稳定性,增强对高温的耐受性,减少高温对其的伤害。

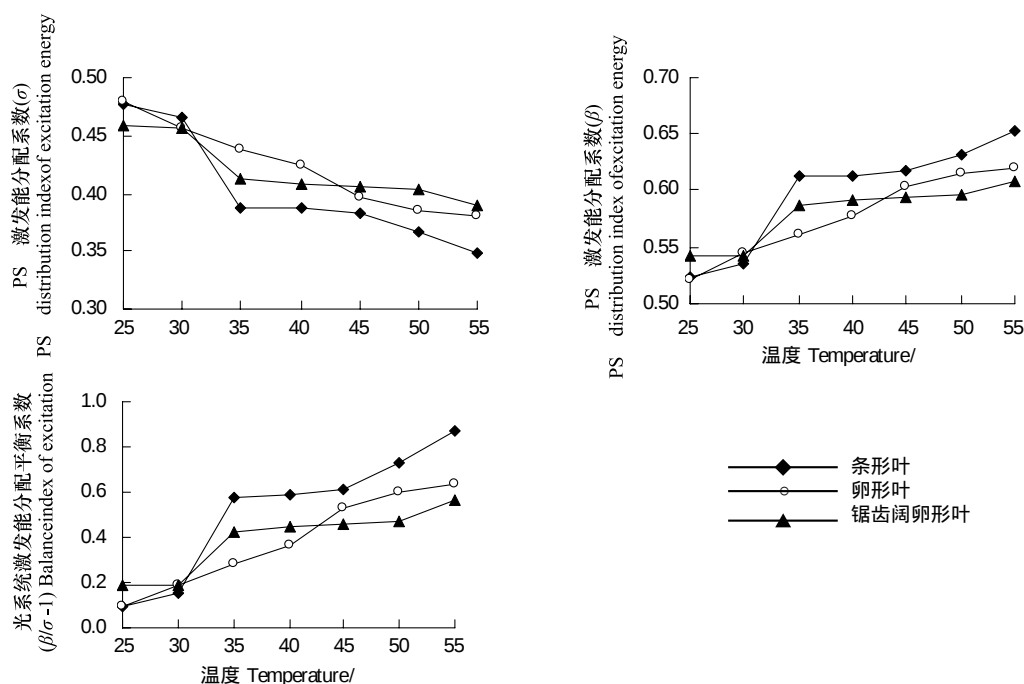


图5 温度对胡杨异形叶 PS I 与 PS II 激发能分配的影响

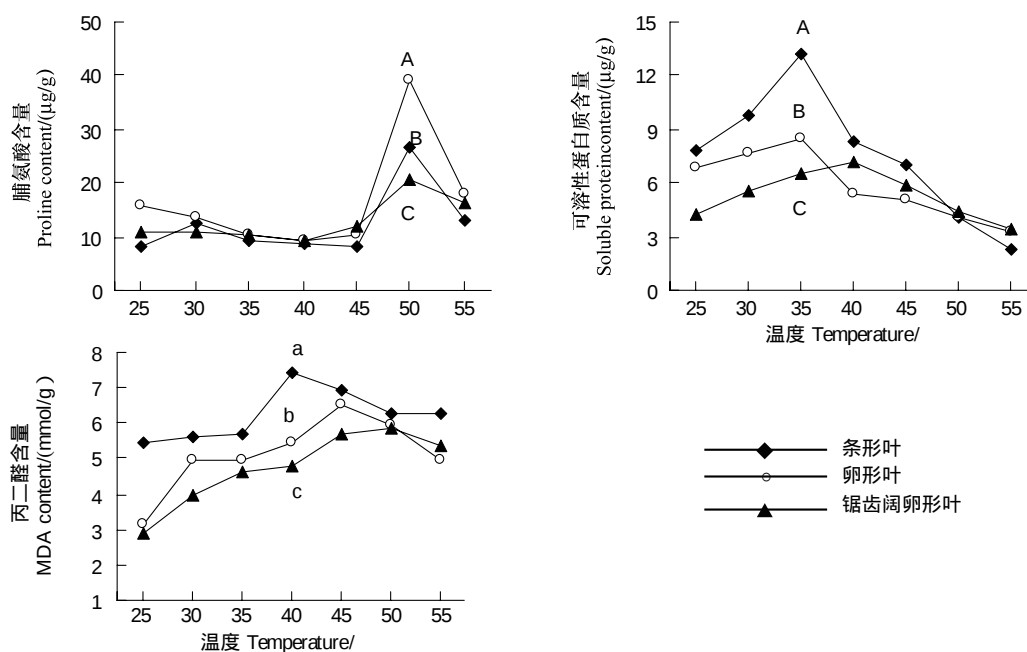
Fig. 5 Effects of different temperature on allocation of excitation energy between PS I and PS II in heteromorphic leaves of *P. euphratica*

图6 温度对胡杨异形叶脯氨酸、可溶性蛋白质及丙二醛含量的影响

Fig. 6 Effects of different temperature on the content of proline, soluble protein and MDA in heteromorphic leaves of *P. euphratica*

2.4 胡杨异形叶耐热性综合评价

用模糊数学中的隶属函数方法,对胡杨3种异形叶的12个叶绿素荧光参数进行隶属函数值计算,将耐热隶属值进行累加得出胡杨3种异形叶耐热性综合值(表1)。结果表明胡杨不同异形叶的耐热性差别较大,锯齿阔卵形叶的耐热性综合值最高,达5.897,是条形叶的3.2倍,卵形叶的1.7倍。

表 1 胡杨 3 种异形叶的耐热性综合评价

Table 1 The synthetical values of heat-tolerance of three heteromorphic leaves of <i>P. euphratica</i>													
叶形 Leave shapes	F_0	F_v/F_m	F_m	F_v/F_0	ETR	F'_v/ F'_m	$\Phi PS\ II$	qP	qN	E	P	D	耐热综合值 Heat-tolerant value
T	0.084	0.358	0.239	0.283	0.064	0.119	0.085	0.120	0.234	0.119	0.093	0.039	1.839
L	0.151	0.474	0.448	0.515	0.162	0.237	0.178	0.239	0.260	0.237	0.193	0.379	3.471
J	0.781	0.877	0.709	0.654	0.300	0.589	0.289	0.381	0.075	0.589	0.446	0.209	5.897

T: 条形叶, L: 卵形叶, J: 锯齿阔卵形叶

3 结论与讨论

随着全球变暖和气候异常,干旱荒漠区的植物将更经常地遭受高温胁迫,特别是高温和干旱相伴发生时,高温胁迫发生的频率和影响会更大。当植物光合机构吸收的光能超过光合电子传递所能利用的数量时,就有可能导致光抑制现象发生,甚至发生光破坏。以叶绿素荧光参数变化作为衡量植物是否遭受逆境胁迫是目前较为理想的方法。当前,叶绿素 a 荧光探针已广泛地被用于研究不同因子对 PS II 复合物中激发能分配的影响,分析 PS II 复合物中激发能的利用和分配对理解光合机构对环境因子的响应和调节/适应机制具有重要的意义^[21]。

本研究发现,人工模拟高温胁迫下离体胡杨异形叶的 F_0 均升高,而 F_v/F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 都下降。表明高温使胡杨异形叶 PS II 反应中心活性与原初光能转换效率降低,PS II 潜在活性受到抑制,PS II 的电子传递能力减弱。但胡杨异形叶荧光参数的变化幅度和拐点温度不同,表现出对温度的敏感性与热稳定性不同。综合 F_0 、 F_m 、 F_v/F_0 、 F_v/F_m 来看 45 °C 可能是条形叶的高温阈值,锯齿阔卵形叶则能耐 50 °C 以上的高温,耐热性能较卵形叶和条形叶强。结合 F'_v/F'_m 、 $\Phi PS II$ 、ETR、 qP 与 qN 及激发能分配系数分析锯齿阔卵形叶耐高温的生理机制,可能是锯齿阔卵形叶的 PS II 反应中心在高温下具有较强的热耗散能力,具有相对高的 P 份额与低的 E 份额,即可以通过减少 PS II 和电子传递链的过分还原,过多激发能的耗散而有效避免过剩光能对光合机构的损伤,保持较高的光能捕获效率和电子传递效率,从而保护光合机构免受高温的伤害,反映了锯齿阔卵形叶对高温逆境的一种适应能力。另外,高温胁迫下胡杨异形叶的 F'_v/F'_m 、 $\Phi PS II$ 、ETR、 qP 等参数明显下降,说明高温使天线色素光能转换效率和 PS II 反应中心开放部分的比例明显下降,用于 CO₂ 同化的光能减少,使过量的激发能在 PS II 反应中心的积累,从而降低光合电子传递能力,减少了光合碳同化所提供的 ATP 和还原型辅酶 II (NADPH) 的量,限制 RuBP 的再生能力^[22]。这也是造成干旱荒漠区胡杨光合速率低、生长慢的重要原因。

胡杨异形叶叶绿素荧光参数对高温的响应不同,表明 3 种异形叶的耐热性不同。与条形叶、卵形叶相比,锯齿阔卵形叶在高温(>45 °C)下的 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 F'_v/F'_m 和 qP 降低较慢、 F_0 上升缓慢,而 D 、 P 、 $\Phi PS II$ 下降缓慢,说明锯齿阔卵形叶在高温下可通过降低光化学效率,PS II 尚能维持部分光化学反应的功能,启动热耗散机制进行自我调节,其光合机构对高温具有较强的热稳定性与耐受能力,更能适应高温。条形叶则表现出较明显的热敏感性,在较高温度下热耗散能力与光化学反应的功能减弱。这与观察到的实际现象相吻合,条形叶主要在胡杨树冠的下层,锯齿阔卵形叶主要位于树冠中上层,处于高温强光下,其耐热性最强,卵形叶介于其中,属于过渡类型。

结合相关生理指标可溶性蛋白质含量、游离脯氨酸含量及丙二醛(MDA)含量来看,胡杨异形叶对高温的适应机制有所不同。条形叶可溶性蛋白质含量较高,表明其可通过较高的代谢水平弥补高温造成的伤害,卵形叶可通过大量积累脯氨酸降低渗透势来适应高温,而锯齿阔卵形叶则通过维持高温下蛋白质含量的稳定适应温度的升高。但生理指标的变化不如叶绿素荧光参数对温度升高的响应灵敏,二者在衡量植物耐热性方面的关系还有待进一步研究。胡杨异形叶耐热性的差异是长期适应荒漠高温干旱环境的结果。

References:

[1] Wang S J. The status, conservation and recovery of global resources of *Populus euphratica*. World Forestry Research, 1996, 9(6): 37-44.

- [2] 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_2 enrichment. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(1): 34-40.
- [3] Zhang M, Wang H J, Yu C Q. The examination of high temperature stress of *Ammopiptanthus mongolicus* by chlorophyll fluorescence induction parameters. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2272-2277.
- [4] Crafts-Brandner S J, Law R D. Effects of heat stress on the inhibition and recovery of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activation state. *Planta*, 2000, 212(1): 67-74.
- [5] Khanizadeh S, Deei J, Hakam N. Use of chlorophyll fluorescence to evaluate chilling tolerance in strawberry plants. *Acta Horticulture*, 2000, 2(538): 453-456.
- [6] Yang S D, Zheng W J, Chen G C, Zhang C L, Chen J, Wang X C. Difference of ultrastructure and photosynthetic characteristics between lanceolate and broad-ovate leaves in *Populus euphratica*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(1): 14-21.
- [7] 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.
- [8] Zhou C B, Song Y Y, Wang B J, Li R, Li M Y, Li Y Y. Effects of drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Populus euphratica*. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(4): 5-9.
- [9] Zhang F, Yang Y L, He W L, Zhao X, Zhang L X. Effect of salinity on growth and compatible solutes of callus induced from *populus euphratica*. *In Vitro Cellular& Developmental Biology-Plant*, 2004, 40(5): 491-495.
- [10] Zheng C X, Qiu J, Jiang C N, Gao R F, Wang W F. Comparison of characteristics of stomas and photosynthesis of *Populus euphratica* polymorphic leaves. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(8): 19-24.
- [11] Law R D, Crafts-Brandner S J. Inhibition and acclimation of photosynthesis to heat stress is closely correlated with activation of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase. *Plant Physiology*, 1999, 120(1): 173-181.
- [12] Yang J D, Zhao H L, Zhang T H. A comparative study on heat and drought tolerance between *Salix gordejewii* and *Salix babylonica*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(1): 42-47.
- [13] Li X F, Hou R X, Zhu Y Y, Hou X L, Zhu H F. Effects of heat stress on chlorophyll fluorescence characteristics of Chinese cabbages. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(Suppl): 49-54.
- [14] Demmig-Adams B, Adams III W W, Barker D H, Logan B A, Bowling D R, Verhoeven A S. Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation. *Physiologia Plantarum*, 1996, 98(2): 253-264.
- [15] Braun G, Malkin S. Regulation of the imbalance in light excitation between photosystem II and photosystem I by cations and by the energized state of the thylakoid membrane. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1990, 1017(1): 79-90.
- [16] Chen Z G, Xie Z Q, Zheng H S. The research of heat-tolerance of different provenances of *Betulaalnoides* seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2327-2332.
- [17] Li H S. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000: 184-185, 258-260.
- [18] Sun Q, Hu J J. Research Technology of Plant Physiology. Shanxi: Northwest Sei-Tech University of Agriculture & Forestry Press, 2006: 176-177.
- [19] Xie J M, Yu J H, Xie M H. Responses of PS II photochemical efficiencies and photosynthesis in *Brassica oleracea* L. var *Italica* leaves under strong light and high temperature. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences Edition*, 2008, 44(1): 51-55.
- [20] Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16(4): 444-448.
- [21] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345): 659-668.
- [22] Ladjal M, Epron D, Ducrey M. Effects of drought preconditioning on thermotolerance of photosystem II and susceptibility of photosynthesis to heat stress in cedar seedlings. *Tree Physiology*, 2000, 20: 1235-1241.

参考文献:

- [1] 王世绩. 全球胡杨林的现状及保护和恢复对策. *世界林业研究*, 1996, 9(6): 37-44.
- [2] 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_2 的响应. *植物生态学报*, 2003, 27(1): 34-40.
- [3] 张谧, 王慧娟, 于长青. 超旱生植物沙冬青高温胁迫下的快速叶绿素荧光动力学特征. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2272-2277.
- [6] 杨树德, 郑文菊, 陈国仓, 张承烈, 陈珈, 王学臣. 胡杨披针形叶与宽卵形叶的超微结构与光合特性的差异. *西北植物学报*, 2005, 25(1): 14-21.
- [7] 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合水分生理特性. *生态学报*, 2009, 29(11): 5843-5850.
- [8] 周朝彬, 宋于洋, 王炳举, 李荣, 李明艳, 李园园. 干旱胁迫对胡杨光合和叶绿素荧光参数的影响. *西北林学院学报*, 2009, 24(4): 5-9.
- [9] 郑彩霞, 邱箭, 姜春宁, 高荣孚, 汪万福. 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.
- [12] 杨甲定, 赵哈林, 张铜会. 黄柳与垂柳的耐热性和耐旱性比较研究. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 42-47.
- [13] 李晓锋, 侯瑞贤, 朱玉英, 侯喜林, 朱红芳. 高温胁迫对大白菜叶绿素荧光特性的影响. *农业工程学报*, 2009, 25(增刊1): 49-54.
- [16] 陈志刚, 谢宗强, 郑海水. 不同地理种源西南桦苗木的耐热性研究. *生态学报*, 2003, 23(11): 2327-2332.
- [17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000: 184-185, 258-260.
- [18] 孙群, 胡景江. 植物生理学研究技术. 陕西: 西北农林科技大学出版社, 2006: 176-177.
- [19] 颌建明, 郁继华, 颌敏华. 青花菜叶片 PS II 光化学效率和光合对强光高温的响应. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(1): 51-55.
- [20] 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.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 9 May, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Guest Editorial from EAM Workshop—Sustainability of agricultural ecosystems in arid regions in response to climate change	
..... LI Fengmin, Kadambot H. M Siddique, Neil C Turner, et al (I)	
Overview on the 2 nd international workshop on ecosystem assessment and management (EAM)	
..... LI Pufang, ZHAO Xuzhe, CHENG Zhengguo, et al (2349)	
Arid agricultural ecology in response to global change: Overview on Young Scholar Forum of the 2 nd International Workshop on	
EAM	ZHAO Xuzhe, LI Pufang, Kadambot H. M Siddique, et al (2356)
The effects of micro-rainwater harvesting pattern and rainfall variability on water ecological stoichiometry in oat (<i>Avena sativa</i> L.)	
field	QIANG Shengcai, ZHANG Hengjia, MO Fei, et al (2365)
Spatial variation of water requirement for spring wheat in the middle reaches of Heihe River basin	
..... WANG Yao, ZHAO Chuanyan, TIAN Fengxia, et al (2374)	
Model-based estimation of the canopy transpiration of Qinghai spruce (<i>Picea crassifolia</i>) forest in the Qilian Mountains	
..... TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong (2383)	
Litter amount and its nutrient storage and water holding characteristics under different coniferous forest types in Xiaolong Mountain,	
Gansu Province	CHANG Yajun, CHEN Qi, CAO Jing, et al (2392)
Effect of irrigation frequency on life history strategy and yield formation in Jerusalem artichoke (<i>Helianthus tuberosus</i> L.) in oasis	
of Hexi Corridor	ZHANG Hengjia, HUANG Gaobao, YANG Bin (2401)
The evaluation method of water resources sustainable utilization in Manas River Basin	
..... YANG Guang, HE Xinlin, LI Junfeng, et al (2407)	
Correlation of topographic factors with precipitation and surface temperature in arid and cold region of Northwest China: a case	
study in Gansu Province	YANG Sen, SUN Guojun, HE Wenying, et al (2414)
The relationship between riparian vegetation and environmental factors in Heihe River Basin	
..... XU Shasha, SUN Guojun, LIU Huiming, et al (2421)	
Effects of drought stress on the photosynthesis of <i>Salix paraqulesia</i> and <i>Hippophae rhamnoides</i> seedlings	
..... CAI Haixia, WU Fuzhong, YANG Wanqin (2430)	
The comparison of drought resistance between <i>Caragana species</i> (<i>Caragana arborescens</i> , <i>C. korshinskii</i> , <i>C. microphylla</i>) and two	
chickpea (<i>Cicer arietinum</i> L.) cultivars	FANG Xiangwen, LI Fengmin, ZHANG Haina, et al (2437)
Response of chlorophyll fluorescence characteristics of <i>Populus euphratica</i> heteromorphic Leaves to high temperature	
..... WANG Haizhen, HAN Lu, XU Yali, et al (2444)	
Free amino acid content in different tissues of <i>Caragana korshinskii</i> following all shoot removal	
..... ZHANG Haina, FANG Xiangwen, JIANG Zhirong, et al (2454)	
“Fertile Island” features of soil available nutrients around <i>Halostachys caspica</i> shrub in the alluvial fan area of Manas River watershed	
..... TU Jinna, XIONG Youcai, ZHANG Xia, et al (2461)	
Analysis of the activities of protective enzymes in <i>Bidens pilosa</i> L. inoculated with <i>Glomus mosseae</i> under drought stress	
..... SONG Huixing, ZHONG Zhangcheng, YANG Wanqin, et al (2471)	
Evaluation and selection on drought-resistance of germplasm resources of <i>Avena</i> species with different types of ploidy	
..... PENG Yuanying, YAN Honghai, GUO Laichun, et al (2478)	
Ecophysiological mechanism of photoperiod affecting phenological period and spike differentiation in oat (<i>Avena nuda</i> L.)	
..... ZHAO Baoping, ZHANG Na, REN Changzhong, et al (2492)	
Effects of water and fertilization on relationship between competitive ability and seed yield of modern and old spring wheat varieties	
..... DU Jingqi, WEI Panpan, YUAN Ziqiang, et al (2501)	

- Inhibitory effect of biogas slurry from swine farm on some vegetable pathogen SHANG Bin, CHEN Yongxing, TAO Xiuping, et al (2509)
- Effects of different summer catch crops planting on soil inorganic N residue and leaching in greenhouse vegetable cropping system WANG Zhiyi, GUO Ruiying, LI Fengmin (2516)
- Photosynthetic characterization and yield of summer corn (*Zea mays* L.) during grain filling stage under different planting pattern and population densities WEI Li, XIONG Youcai, Baoluo Ma, et al (2524)
- Effects of desulfurization waste treatment on calcium distribution and calcium ATPase activity in oil-sunflower seedlings under alkaline stress MAO Guilian, XU Xing, ZHENG Guoqi, et al (2532)
- The evolution between ecological security pattern and agricultural productive force in Manas River Basin for the past 30 years WANG Yuejian, XU Hailiang, WANG Cheng, et al (2539)
- Spatio-temporal analysis of ecological carrying capacity in Jinghe Watershed based on Remote Sensing and Transfer Matrix YUE Dongxia, DU Jun, LIU Junyan, et al (2550)
- The coupling relationship and emergy analysis of farming and grazing ecosystems in Mu Us sandland HU Binghui, LIAO Yuncheng (2559)
- Dynamic analysis of farmland ecosystem service value and multiple regression analysis of the influence factors in Minqin Oasis YUE Dongxia, DU Jun, GONG Jie, et al (2567)
- Environment purification service value of urban green space ecosystem in Qingdao City ZHANG Xuliang, XU Zongjun, ZHANG Zhaohui, et al (2576)
- The spatial relationship analysis of rural per capital revenue based on GIS in Zulihe River basin, Gansu Province XU Baoquan, SHI Weiqun (2585)

Review and Monograph

- The key issues on plant phenology under global change MO Fei, ZHAO Hong, WANG Jianyong, et al (2593)
- Recent advances on regional climate change by statistical downscaling methods ZHU Hongwei, YANG Sen, ZHAO Xuzhe, et al (2602)
- Current progress in eco-physiology of root-sourced chemical signal in plant under drought stress LI Jinan, LI Pufang, KONG Haiyan, et al (2610)
- ODAP biosynthesis: recent developments and its response to plant stress in grass pea (*Lathyrus sativus* L.) ZHANG Dawei, XING Gengmei, XIONG Youcai, et al (2621)
- Current progress in plant ideotype research of dryland wheat (*Triticum aestivum* L.) LI Pufang, CHENG Zhengguo, ZHAO Hong, et al (2631)
- Recent advances in research on drought-induced proteins and the related genes in wheat (*Triticum aestivum* L.) ZHANG Xiaofeng, KONG Haiyan, LI Pufang, et al (2641)

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

客座编辑 Guest Editors LI Fengmin XIONG Youcai Neil Turner Kadambot Siddique

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 31 卷 第 9 期 (2011 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 9 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	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 70.00 元