

# 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

张溢, 王慧娟, 于长青\*

清华大学环境系, 北京 100084

**摘要:** 沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus* 是温带荒漠地区唯一的常绿阔叶灌木, 由于其生长的沙漠中极端高温远高于其它地区, 因此研究沙冬青对高温胁迫的响应特征对于解释植物的抗逆机理具有极为重要的意义。快速叶绿素荧光动力学可以在无损情况下探知叶片光合机构的热损伤程度, JIP-test 方法将测量值转化为多种具有生物学意义的参数, 因而被广泛应用于高温胁迫的有关研究中。对不同环境条件下快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的分析可以深入了解植物光合机构对环境的适应机制。本文利用高频采样叶绿素荧光仪在野外测定了沙冬青在不同温度处理下的荧光响应情况。研究表明, 沙冬青耐热性在 40~45 °C; 25 °C、30 °C 及 40 °C 时的  $F_V/F_M$  在 0.80 以上, 光合反应正常。50 °C 时出现高温胁迫特征: 1)  $F_V/F_M$  降低为 0.73; 2) OJIP 曲线变形为 OKJIP 曲线, K 点出现在 300 ms 左右, 值为 245.00; 3) 反应中心的活性下降,  $Q_A$ -的还原速率加快。这些变化是由于光合反应中的电子传递受阻引起的, 而光合反应中心并没有被破坏, 胁迫条件解除后, 光合机构还可恢复, 说明沙冬青具有极强耐热性。

**关键词:** 叶绿素荧光; 光合; JIP 方法; OKJIP 曲线; 性能指数

**中图分类号:** Q945.78

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2009) 06-2272-06

许多环境因素都影响着植物的正常生长, 如光照、温度及 CO<sub>2</sub> 浓度等。在这些因素中, 植物的叶绿体对温度的变化最为敏感<sup>[1]</sup>。高温对光合膜系统的作用会导致叶绿体基粒片层的破坏, 使得天线细胞从光系统 II 复合体中离出来, 从而影响植物的光合活动。一些假说认为高温对叶绿素的影响与氧还原反应中 Mn 原素有很大的关系, 另一些研究则表明高温胁迫主要影响了从  $Q_A$  到  $Q_B$  的电子传递过程。

目前, 叶绿素荧光技术被认为是在无损情况下探讨叶片光合机构热损伤程度的有效工具, 广泛应用于高温胁迫的有关研究中<sup>[2-4]</sup>。快速叶绿素荧光技术可以记录下 1 秒内植物荧光的瞬间变化, 为探讨高温及其它环境压力对植物体的损害提供了更多的可能性<sup>[5]</sup>。常温情况下, 瞬时荧光呈现出 OJIP 曲线的形式。光强对叶绿素荧光曲线的改变主要决定于对  $Q_A$  的影响<sup>[6-7]</sup>。而 OJIP 曲线的变化正反映了光合电子传递链的传递情况。O-J 阶段反应光化学阶段, 这一阶段对光强特别敏感; J-I 阶段为则是 PQ 库减少的阶段; I-P 阶段则反应氧化铁还原蛋白的减少情况<sup>[5]</sup>。在高温胁迫下, OJIP 曲线呈现两个明显的变化。首先表现为最大荧光值  $F_P$  有所降低, 和最小荧光值  $F_0$  有所升高。其次则是 OJIP 曲线的形态发生改变, 形成 OKJIP 形态。曲线在 200~300 ms 处出现了一个峰值 K, K 峰之后, 荧光值急剧下降。

通过比较 K 点荧光强度的大小, 可以计算出放氧复合体被破坏的程度。

沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus* 是温带荒漠地区唯一的常绿阔叶灌木。主要生长于沙漠边缘的荒漠地带。其生境夏季气温高、蒸发量大, 绝对最高温度 37 °C 以上, 沙面最高温度可达 70~80 °C。那么这种沙生的常绿阔叶灌木在应对高温时有怎样的适应和保护机制呢? 当环境条件变化时, 叶绿素荧光的变化可以在一定程度上反映环境因子对植物的影响<sup>[8]</sup>, 通过对不同环境条件下快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的分析, 可深入了解以上这些因素对植物光合机构主要是 PSII 的影响以及光合机构对环境的适应机制。因此, 本文以沙冬青 *A. mongolicus* 这种生长于干旱区的特有的常绿植物为研究对象, 探讨了该种植物高温胁迫下叶绿素荧光变化及其对高温的机制。

## 1 研究地点

研究样地设在阿拉善左旗, 具体位置为 E 105°36'13.8", N 38°39'19.1"。阿拉善位于内蒙古自治区西部边陲, 是以草原畜牧业为主体经济的牧业旗。由于地处亚欧大陆腹地, 远离海洋, 东有贺兰山, 北有蒙古高原阻隔, 该地区形成了封闭的高原内陆, 海拔高度多在 800~1 500 m。气候上属典型的中温带干旱区, 特征为冬季寒而长, 夏季热而短,

作者简介: 张溢 (1976 年生), 女, 博士, 主要从事植物生态学研究。E-mail: zhangmi76@126.com

\*通讯作者, E-mail: cqyu@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2009-09-28

春季风沙大。日照充足，日温差大，降雨量少，蒸发量大，全年降水年均降水量 60~150 mm，多集中在 6、7、8 三个月。该地区地貌复杂，有荒漠草地、丘陵、滩地戈壁、沙漠及湖盆多种类型。腾格里、乌兰布和沙漠横贯全境，沙漠面积 34 133 km<sup>2</sup>。植物组成主要以旱生、超旱生灌木及半灌木为主，植物大多植株矮小、根系发达、能够防止强光灼伤、耐盐耐旱。主要建群植物以藜科 Chenopodiaceae、菊科 Asteraceae、蒺藜科 Zygophyllaceae 居多，其次为蔷薇科 Rosaceae、柽柳科 Tamaricaceae，禾本科草 Gramineae 类仅在水分条件较好的局部地区占优势，形成了荒漠特有的植被景观。

## 2 材料与方法

### 2.1 植物材料

沙冬青 *A. mongolicus* 为豆科沙冬青属旱生植物，属于第三纪亚热带常绿阔叶林旱生化类型的残遗种，是温带荒漠地区唯一的常绿阔叶灌木。沙冬青 *A. mongolicus* 天然种群主要分布在阿拉善和鄂尔多斯西部，在群落中一般为优势种。沙冬青 *A. mongolicus* 冠幅大，枝叶多，株高约 1 m，最高可达 1.8 m，干粗 6~10 cm。小枝密生平贴短柔毛。叶为掌状三出复叶，由于长期在恶劣生境中生长，沙冬青 *A. mongolicus* 具有典型的超旱生结构，叶片有厚的角质层，浓密的表皮毛，气孔下陷，栅栏组织发达。

### 2.2 取样及热处理方法

选择高度在 100~120 cm 的沙冬青 *A. mongolicus* 进行不同温度的处理。温度梯度为 30 °C、40 °C、50 °C 及 60 °C。25 °C 为当时的环境温度，为不做处理的标准曲线。温度处理的方法为将植物的叶片放入不同温度梯度的水中进行水浴处理，时间为 5 min，之后测定其荧光动力学曲线及相关参数。每个温度梯度重复 6 次。荧光测定使用的仪器为 Fluorpen, Photon Systems Instrument, Brno, Czech Republic，时间分辨率精确到纳秒，2 s 内采样 450 个。测定时间为日落后，使植物充分暗适应 30 min。

### 2.3 JIP-test 分析方法及其参数意义

JIP-test 方法是分析瞬时荧光的一种方法，也被称为荧光快速动力学研究方法<sup>[10]</sup>。测定上升部分荧光 (FLR) 曲线 (荧光动力学快速部分) 对设备要求极为严格，光源要求为高强度的饱和激发光 (强度在 3 000~10 000 μmol photons m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)，起动快速，并能快速捕获到荧光信号。本实验采用的 Photon Systems Instrument (Brno, Czech Republic) 公司的荧光仪采用特殊光源，共可测定 25 种参数，本文在众多的指标中选择一些进行分析，具体参数见表 1。

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

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

从 OJIP 快速叶绿素荧光诱导动力学曲线上直接获得的参数	
$F_0$	O 暗适应后的最小荧光产量
$F_j$	J 点处 (2 ms) 的荧光产量
$F_i$	I 点处 (30 ms) 的荧光产量
$F_m$	最大荧光 (P 点) 的荧光产量
其它可计算得到的参数	
$F_V \equiv F_I - F_0$	在 $t$ 时间时的可变荧光
$F_M \equiv F_P$	当所有反应中心完全关闭时的荧光，即暗适应后的最大荧光
$V_j \equiv (F_j - F_0) / (F_M - F_0)$	在 $t$ 时间时的相对可变荧光
$V_j \equiv (F_j - F_0) / (F_M - F_0)$	在 J 点的相对可变荧光
$M_0 \equiv 4(F_{300\mu s} - F_0) / (F_M - F_0)$	OJIP 荧光诱导曲线的初始斜率
$F_V / F_0 = (F_M / F_0) - 1$	
比活性参数 (QA 处在可还原态时，单位 PS II 反应中心的活性)	
$ABS/RC = M_0 \cdot (I / V_j) \cdot (I / \phi_{P_0})$	单位反应中心吸收的光能
$TR_0/RC = M_0 \cdot (I / V_j)$	PSII 的量捕获量。
$ET_0/RC = M_0 \cdot (I / V_j) \cdot \psi_0$	单位反应中心用于电子传递的能量
$DI_0/RC = ABS/RC - TR_0/RC$	单位反应中心的热耗散
$ABS/CS_0 = F_0$	单位面积吸收的光能
$TR_0/CS_0 = \phi_{P_0} \cdot (ABS/CS_0)$	单位面积捕获的光能
$ET_0/CS_0 = \phi_{E_0} \cdot (ABS/CS_0)$	单位面积的电子传递量子产额
$DI_0/CS_0 = (ABS/CS_0) - (TR_0/CS_0)$	单位面积的热耗散
$RC/CS_0 = \phi_{P_0} \cdot (V_j / M_0) \cdot F_0$	单位面积反应中心的数量
性能指数	
$PI_{ABS} \equiv RC/ABS \cdot [\phi_{P_0} / (1 - \phi_{P_0})] \cdot [\psi_0 / (1 - \psi_0)]$	以吸收光能为基础的性能指数

JIP-test 方法是分析荧光动力学曲线的重要方法，该方法主旨在于将测量值转化为有生物学意义的参数，可以指示通过 PSII 产生的能量强度。一般来讲，在荧光快速动力学曲线上存在着 4 个重要的拐点，即 O-J-I-P 拐点，分别为：1) O 点说明着植物光系统 (PSI) 释放的荧光量，可以理解为 PSI 的光合效率，该点是在 0.02 ms 时的荧光强度 ( $F_0$ )。2) 2 ms 时的荧光强度，称为  $F_j$ ，J 拐点指示光反应中电子受体  $Q_A^-$  到  $Q_B$  的积累情况，即  $Q$  的氧化情况，所以  $J \approx Q_A^- Q_B$ ，3) 在 30 ms 时的荧光强度值称为  $F_i$ ；4) 最大荧光值  $F_m$ 。I 和 P 阶段反应了光驱动下  $Q_B^-$  到  $Q_B^{2-}$  的还原情况  $I \approx Q_A^- Q_B^-$ ， $P \approx Q_A^- Q_B^{2-}$ <sup>[7]</sup>。这些参数中从起始点开始计算 (荧光开始产生时) 的有：单位反应中心吸收的光能 (ABS/RC)，捕获的能量  $TR_0/RC$ ，分配到天线细胞的能量  $DI_0/RC$ ，以及电子传递量  $ET_0/RC$ ；另一类有生物学意义的参数是产量类，这类参数有：1) 原初光化学反应中最大醌产量  $\psi_{P_0} = TR_0/ABS = F_V/F_M$ ；2) 捕获的激发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)，也即电子传递中醌的产量。

### 3 研究结果

#### 3.1 沙冬青 *A. mongolicus* 的荧光温度曲线特征

荧光强度随温度变化的曲线称为荧光温度曲线 (FTC)。尽管荧光温度曲线受激发光波长、强度以及温度处理的强度等因素的影响而存在一定的变化,但不同物种的荧光温度曲线的特征点还是相对稳定的<sup>[9]</sup>。荧光温度曲线的第一个峰值 (M1) 反应了光系统 II 的耐热性<sup>[11]</sup>。沙冬青 *A. mongolicus* 的耐热性在 40~45 °C 左右; 温度继续升高后光系统 II 受抑制或受损 (图 1)。

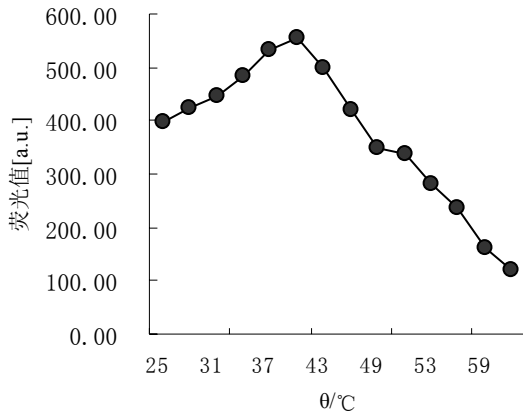


图 1 沙冬青的荧光温度曲线图

Fig.1 Fluorescence temperature curve of *Ammopiptanthus mongolicus*

#### 3.2 光线及高温胁迫下叶绿素荧光诱导曲线及拐点的变化

图 2 为沙冬青 *A. mongolicus* 不同温度处理下, OJIP 曲线的变化情况。25 °C 为常温下的标准叶绿素荧光诱导曲线。从图 2 中可以看到, 25 °C、30 °C 及 40 °C 处理下 OJIP 曲线形状变化不大。40 °C 处理

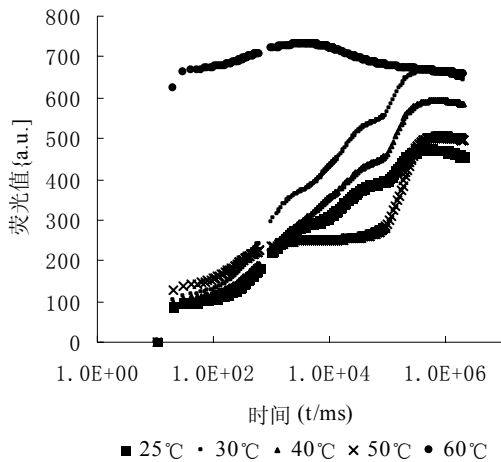


图 2 沙冬青 *A. mongolicus* 不同温度处理下的 OJIP 曲线

Fig.2 The curve of OJIP of *Ammopiptanthus mongolicus* under different temperatures treatment

下 OJIP 曲线比 25 °C 及 30 °C 时有所上升。在高温胁迫下, 叶绿素荧光曲线会变形为 OKJIP 曲线, 即在曲线中出现明显的拐点 K。沙冬青 *A. mongolicus* 50 °C 处理下 OJIP 曲线变形为 OJKIP 曲线, K 点出现在 300 ms 左右, 值为 245.00。60 °C 处理下, 不但 OJIP 曲线形态发生变化, J、I 阶段消失, 且  $F_o$  值也有大幅度的提高。沙冬青 *A. mongolicus* 叶绿素荧光曲线中的 OJIP 各拐点的值如表 2 所示。不同温度处理下,  $F_o$  值有所上升, 60 °C 时  $F_o$  值达到了 817.00。在各温度处理下, 60 °C 时的相关参数均明显高于其它温度。

表 2 不同温度处理下沙冬青 *A. mongolicus* 叶绿素荧光曲线的 OJIP 拐点值

Table 2 OJIP Chlorophyll fluorescence curve inflection point value of *A. mongolicus* in different temperatures treatment

参数	25 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
$F_o$	91.00	90.00	109.33	150.50	817.00
$F_j$	295.00	291.67	313.33	263.50	934.00
$F_i$	446.00	436.00	471.00	249.50	896.00
$F_m$	580.00	572.67	664.00	549.50	936.00

#### 3.3 高温胁迫性能指数及 $F_v/F_m$ 值的变化

$F_v/F_m$  为最大光化学效率, 可以指示植物对胁迫的反应。25 °C、30 °C 及 40 °C 时的  $F_v/F_m$  均在 0.80 以上, 沙冬青 *A. mongolicus* 可以正常进行光合作用。50 °C 时  $F_v/F_m$  降低为 0.73, 说明此时沙冬青 *A. mongolicus* 反应中心的活性有所下降。60 °C 时  $F_v/F_m$  仅为 0.13 (图 3), 反应中心被破坏, 植物的光合作用已不能正常进行。

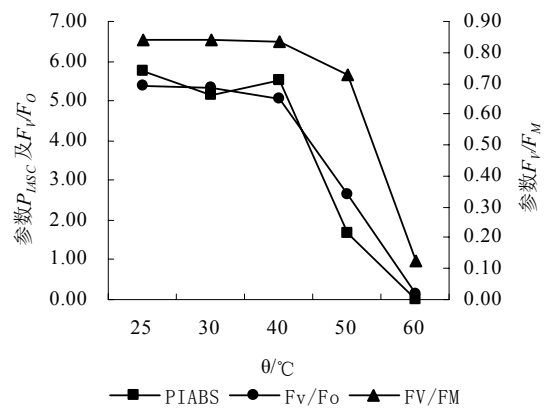


图 3 沙冬青  $F_v/F_m$  及  $PI_{ABS}$  指数

Fig.3  $F_v/F_m$ ,  $F_v/F_o$  and  $PI_{ABS}$  parameters of *Ammopiptanthus mongolicus*

高温胁迫毫无疑问会影响植物量大光化效率 ( $F_v/F_m$ ) (Havaux et al., 1991), 但很多研究发现  $F_v/F_m$  并不十分灵敏<sup>[13-14]</sup>。为此, Strasser et al. <sup>[15]</sup> 引入了新的参数,  $PI_{ABS}$  性能指数。它包含了  $RC/ABS$ 、 $\phi_{P_0}$ 、

$\psi_0$  等三个独立的参数,可以更为准确的反映植物光合机构的状态。本次研究中,虽然沙冬青 *A. mongolicus* 在 50 °C 高温处理下  $F_V/F_M$  值也有所降低,60 °C 时明显降低,但  $PI_{ABS}$  指数则显示在 50 °C 时,沙冬青的光合性能已经显著下降,因此,本次研究中  $PI_{ABS}$  也较  $F_V/F_M$  更为准确的反应了不同温度条件下,植物光合性能的变化(图 3)。

### 3.4 高温胁迫对沙冬青 *A. mongolicus* $Q_A$ 氧化还原状态

$V_j$  表示在  $J$  点关闭反应中心的数量或  $Q_A$  还原的量,即  $Q_A$  的积累量。 $M_0$  是相对荧光的初始斜率,它可以用来表示  $Q_A$  被还原的相对速率。由图 4 可以看出,当胁迫温度在 20 °C 到 40 °C 之间时, $Q_A$  积累量并没有明显的变化,当温度升高到 50 °C 时, $Q_A$  积累量显著降低。而  $Q_A$  的还原速率随温度升高而不断加快。

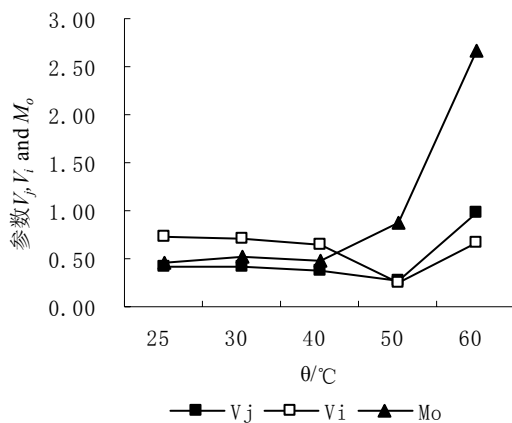


图 4 高温胁迫对沙冬青 *A. mongolicus*  $Q_A$  氧化还原状态的影响  
Fig.4  $Q_A$  redox state of *A. mongolicus* under high temperature stress

### 3.5 比活性参数的变化

叶绿素荧光曲线还可以反映光合机构的比活性,即单位面积内活跃的反应中心的各种量子效率。图 5 和图 6 分别是单位反应中心及单位截面上吸收的光能、用于还原  $Q_A$  的能量,能用于热耗散的能量。从 25 °C 到 60 °C,随着温度的升高,沙冬青叶片单位反应中心及单位截面积吸收的光能不断增加,50 °C 时用于还原  $Q_A$  还电子传递的能量最高,60 °C 时最高为 6.92,远远高于其它温度,当然 60 °C 时沙冬青热耗散的能量也极高。对于 60 °C 时反应中心收吸的光能不但不减少,反而大幅增加,可能的原因是 PSII 反应中心发生可逆失活,成为一个能量陷阱,能吸收光能但不能推动电子传递。一旦逆境解除,失活的反应中心又恢复活性,这种反应中心失活可能也是一种保护机制<sup>[10]</sup>。

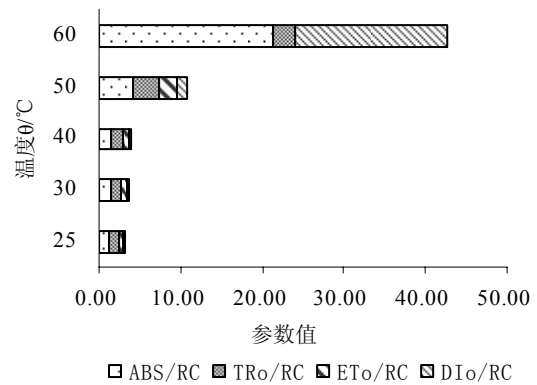


图 5 比活性参数图  
Fig.5 Activity parameters for unit reaction center

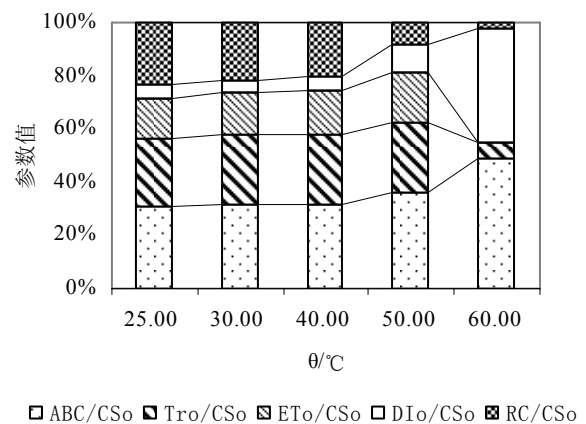


图 6 比活性参数  
Fig.6 Activity parameters for the reaction center of cross-sectional area

## 4 讨论

本文的研究目的在于应用叶绿素荧光技术,在无损的情况下比较沙漠常绿植物沙冬青 *A. mongolicus* 对高温胁迫的适应的不同之处。在对植物时行热处理时,采用的方法是将活体植物的叶片浸泡在 30 °C、40 °C、50 °C 及 60 °C 的温度下水浴,时间为 5 min。一些相关的研究也应用了相同的方法。相关研究<sup>[2-4]</sup>表明一般植物出现高温胁迫的温度在 45~50 °C 之间。尽管沙冬青高温胁迫荧光特征出现的温度与其它物种是一致的,当然沙冬青对高温的耐受能力要高于其它物种。

很多研究表明,高温胁迫会使最小荧光值( $F_0$ )升高。沙冬青 *A. mongolicus* 的  $F_0$  值由 25 °C 时的 91.00 增加到 50 °C 时的 150.50,而 60 °C 时的  $F_0$  值升高最高为 817.00。造成沙冬青 *A. mongolicus*  $F_0$  值升高的原因,可以归结为两个方面。第一,高温胁迫使得 PSII 反应中心与色素天线细胞分离,阻断了能量向 PSII 中的传递。可以认为反应中心与天线细胞的这种分离是一种激发能的猝灭器,它可以耗散过多的光能,保护邻近的反应中心不受破坏。第二,

热处理打破了 $Q_AQ_B$ 的氧还平衡,使得电子可以更加容易的从质体醌库中流回,从而导致了 $F_0$ 处的荧光有所上升<sup>[16-18]</sup>。

25℃、30℃及40℃时沙冬青*A. mongolicus*的 $F_J$ 值不断升高,说明温度升高后 $Q_A$ 的产量有所提高,这可能是由于温度升高后植物叶片吸收的光能有所增加,参与光全反应的反应中心有所增加。而50℃时的 $F_J$ 降低则与K点的出现有关。在高温处理后,经过极短的时间,在J点之前叶绿素荧光产量就会上升,叶绿素荧光曲线最大的变化是为OJIP曲线变化为OKLIP曲线。K点的出现与温度及处理时间有关<sup>[2]</sup>。一般认为,K值的出现可以指示是放氧复合体完全被破坏与PSII的电子门有关<sup>[19]</sup>。对于沙冬青*A. mongolicus*这种植物,高温处理对叶绿素荧光曲线起始部分的影响不大。沙冬青J拐点和K拐点在最初的几乎是重叠在一起的(图1)。这说明沙冬青此时的荧光升高可能是由于电子传递受阻有关,而非天线色素细胞或放氧复合体被破坏,这结果与Tóth et al.<sup>[3]</sup>对大麦进行的相类似,这可能沙冬青光合机构的微观结构有很大关系,这还需要对该种进行更这深入细致的研究。

## 5 结论

沙冬青*A. mongolicus*耐热性在40~45℃。50℃时出现高温胁迫特征,表现为:1)  $F_V/F_M$ 降低;2) OJIP曲线变形为OKJIP曲线,出现K点;3) 反应中心的活性下降, $Q_A$ -的还原速率加快。这些变化是由于光合反应中的电子传递受阻引起的,而光合反应中心并没有被破坏,胁迫条件解除后,光合机构还可恢复,说明沙冬青*A. mongolicus*具有极强耐热性。

**致谢:** 感谢易科泰生态技术公司Ecolab生态实验室提供叶绿素荧光测量仪。

## 参考文献:

- BERRY J, BJORKMAN O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1980, 31: 491-543.
- SRIVASTAVA A, GUISSSE B, GREPPIN H, et al. 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[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 1997, 1320: 95-106.
- TOUTH S Z, SCHANSKER G, GARAB G, et al. Photosynthetic electron transport activity in heat-treated barley leaves: The role of internal alternative electron donors to photosystem II[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2007, 1767: 295-305.
- LI P M, CHENG L L, GAO H Y, et al. Heterogeneous behavior of PSII in soybean (*Glycine max*) leaves with identical PSII photochemistry efficiency under different high temperature treatments[J]. Journal of Plant Physiology, in press.
- STRASSER R J, SRIVASTAVA A., GOVINDJEE. Polyphasic chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria[J]. Photochemistry and Photobiology, 1995, 61: 32-42.
- SAMSON G, PRASIL O, YAAKOUBD B. Photochemical and thermal phases of chlorophyll a fluorescence[J]. Photosynthetica, 1999, 37: 163-182.
- LAZAR D. The polyphonic chlorophylls a fluorescence rise measured under high intensity of exciting light[J]. Functional Plant Biology, 2006, 33: 9-30.
- KRAUSE G H, WEIS E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1991, 42: 313-349.
- KOURIL R, LIK P, TOMEK P, et al. Chlorophyll fluorescence temperature curve on *Klebsormidium flaccidum* cultivated at different temperature regimes[J]. Journal of Plant Physiology, 2001, 158: 1131-1136.
- HAVAUX M. Characterization of thermal damage to the photosynthetic electron transport in potato leaves[J]. Plant Science, 1993, 94: 19-33.
- HAVAUX M, TARDY F. Loss of chlorophyll with limited reduction of photosynthesis as an adaptive response of Syrian barley land races to high-light and heat stress[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1999, 26: 569-578.
- STRAUSS A J, KRUGER G H J, STRASSER R J, et al. Ranking of dark chilling tolerance in soybean genotypes probed by the chlorophyll a fluorescence transient O-J-I-P[J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 56: 147-157.
- APPENROTH K J, STOCKEL J, SRIVASTAVA A, et al. Multiple effects of chromate on the photosynthetic apparatus of *Spirodela polyrrhiza* as probed by OJIP chlorophyll a fluorescence measurements[J]. Environmental Pollution, 2001, 115: 49-64.
- STRASSER R J, SRIVASTAVA A, TSIMILLI-MICHAEL M. The fluorescent transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples[C]. //YUNUS M, PATHRE U, MOHANTY P. Probing Photosynthesis: Mechanisms, Regulation and Adaptation. London: Taylor and Francis, 2000: 445-483.
- STRASSER R J, SRIVASTAVA A, TSIMILLI-MICHAEL M. Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient[C]. //PAPAGEORGIOU G G. Advances in Photosynthesis and Respiration. Vol. 19: Chlorophyll fluorescence a Signature of Photosynthesis. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 2004: 321-362.
- ARMOND A P, BJORKMAN O, STAEHELIN LA. Dissociation of supramolecular complex in chloroplast membranes: A manifestation of heat damage to the photosynthetic apparatus[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 1980, 601: 433-442.
- GOVINDJEE. Sixty-three years since Kautsky: Chlorophyll a fluorescence[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1995, 22: 131-160.
- YAMANE Y, SHIKANAI T, KASHINO Y, et al. Reduction of  $Q_A$  in the dark: Another cause of fluorescence  $F_0$  increases by high temperature in higher plants[J]. Photosynthesis Research, 2000, 63:23-34.
- STRASSER B J. Donor side capacity of photosystem II probed by chlorophyll a fluorescence transient[J]. Photosynthesis Research, 1997, 52: 147-155.

## The examination of high temperature stress of *Ammopiptanthus mongolicus* by chlorophyll fluorescence induction parameters

ZHANG Mi, WANG Huijuan, YU Changqing

Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract:** *Ammopiptanthus mongolicus* is the only broad-leaved evergreen shrubs growing in desert area. The extremely high temperature in desert is much higher than in other regions, so the study of the response of *Ammopiptanthus mongolicus* on high temperature stress will help understanding the mechanism of the resilience of plant to heat stress. The chlorophyll fluorescence technique was considered as an effective tool in the context of non-destructive leaf photosynthetic apparatus of the degree of thermal, and has been widely used in relevant studies of high temperature stress. The JIP-test is a method for analyze the fluorescence transient, and also known as fast-kinetic research methods, which transformed the measured value to a serials biological parameters, and also detect the energy strength generated by PSII. The results show that the thermo stability of *Ammopiptanthus mongolicus* is at 40~45 °C. heat stress characteristics occurs at 50 °C, at that time: 1)  $F_v / F_M$  decreased to 0.73; 2) the chlorophyll fluorescence OJIP curve is deformation to OKJIP curve, where appears a K point in 300 ms in the curve. the value is 245.00; 3) the activity of Reaction center declined, and QA-reduction rate increases with increasing of temperature rising. All those change is due to the block of photosynthetic electron transfer, but the photosynthetic reaction center has not been destroyed. After the stress conditions, the photosynthetic apparatus can be restored, it proved that *Ammopiptanthus mongolicus* has a very strong heat resistance.

**Key words:** chlorophyll fluorescence; photosynthesis; JIP-test; OKJIP curve; performance index