

# 不同浓度氟对茶树幼苗叶片叶绿素荧光特性的影响

钟秋生, 林郑和, 陈常颂\*, 陈志辉, 游小妹, 陈荣冰

(福建省农业科学院茶叶研究所, 福建 福安 355000)

**摘要:** 为探讨氟对茶树 [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] 叶片叶绿素荧光特性的影响, 采用盆栽沙培法, 用不同浓度的 NaF 溶液处理 6 周, 对茶树叶片的叶绿素荧光特性进行研究。结果表明, 用 600 mg L<sup>-1</sup> 的氟处理, 茶苗叶片的 OJIP 曲线 O 相呈小幅度上升, P 相下降得非常明显, IP 相显著下降, 出现清晰的 L 点(150 μs)和 K 点(300 μs); 经过氟处理的茶苗叶片 I 点、J 点的相对可变荧光和耗散能增加; 荧光参数 RC/CS<sub>0</sub>、ET<sub>0</sub>/ABS、PI<sub>abs</sub>、PI<sub>cs</sub> 等明显下降, 而 DI<sub>0</sub>/RC、DI<sub>0</sub>/CS<sub>0</sub> 和 DI<sub>0</sub>/ABS 等参数大幅度增加; 叶片氟含量与 ET<sub>0</sub>/TR<sub>0</sub>、RE<sub>0</sub>/ABS、PI<sub>cs</sub> 呈负相关, 与 DI<sub>0</sub>/RC 呈正相关。因此, 氟胁迫处理削弱了茶树叶片的光合电子传递能力, 影响了光合机构的作用, 同时叶片以增加自身热耗散来防止受到光抑制和光破坏。

**关键词:** 茶树; 氟胁迫; 叶绿素荧光特性; 光合作用

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2014.06.005

## Effects of Fluoride Stress on Chlorophyll Fluorescence in Leaves of Tea Seedlings

ZHONG Qiu-sheng, LIN Zheng-he, CHEN Chang-song\*, CHEN Zhi-hui, YOU Xiao-mei, CHEN Rong-bing

(Tea Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fu'an 355000, China)

**Abstract:** The objective was to understand the effect of fluoride (F) stress on chlorophyll fluorescence in tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze 'Ruixiang'] leaves. Tea seedlings at 10-month-old grown in pots were fertilized with NaF three times weekly for 6 weeks. The results showed that O phase in OJIP curve rose a little treated with 600 mg L<sup>-1</sup> NaF, and P phase and IP phase decreased obviously, L-step at about 150 μs and K-step at about 300 μs appeared. Under F stress, the fluorescence parameters, such as RC/CS<sub>0</sub>, ET<sub>0</sub>/ABS, RE<sub>0</sub>/ET<sub>0</sub>, RE<sub>0</sub>/ABS, PI<sub>abs</sub> and PI<sub>cs</sub> decreased in tea leaves, while V<sub>J</sub>, V<sub>I</sub>, DI<sub>0</sub>/RC, DI<sub>0</sub>/CS<sub>0</sub>, DI<sub>0</sub>/ABS and dissipated energy increased. There were negative correlations between F content in tea leaves and ET<sub>0</sub>/TR<sub>0</sub>, RE<sub>0</sub>/ABS and PI<sub>cs</sub>, but a positive correlation with DI<sub>0</sub>/RC. Therefore, the ability of photosynthetic electron transfer in tea leaves was weakened under F stress, the whole electron transport chain from PSII to PSI was affected, meanwhile, leaves could prevent light suppression and light damage by increasing heat dissipation itself.

**Key words:** *Camellia sinensis*; Fluoride stress; Chlorophyll fluorescence; Photosynthetic characteristic

叶绿素荧光诱导动力学技术作为一种快速测量样品光合能力的新技术, 由于其快速和非破坏性的优点, 已成为研究植物光合结构功能和逆境胁迫

响应的主要工具<sup>[1-2]</sup>。植物快速叶绿素荧光诱导曲线中包含着大量关于 PSII 反应中心原初光化学反应的信息, 通过对曲线荧光参数的分析, 可以知道

收稿日期: 2014-02-26

接受日期: 2014-05-21

基金项目: 国家茶叶产业技术体系项目(nycytx-23); 福建省农科院创新团队项目(CXTD-1-1302); 福建省农科院青年科技人才创新基金项目(2010QB-14)资助

作者简介: 钟秋生(1983~), 男, 助理研究员, 主要从事茶树品种选育与种质筛选研究。E-mail: dingoqz2006@163.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ccs6536597@163.com

在环境因子影响下植物材料光合机构的变化<sup>[3]</sup>。任何逆境对光合作用各过程产生的影响都可通过体内叶绿素荧光诱导动力学变化反映出来。与“表观性”的气体交换指标相比,叶绿素荧光参数更具有反映“内在性”特点,被称为测定叶片光合功能快速、无损伤的探针<sup>[4]</sup>。

研究表明,茶树是一种富氟植物<sup>[5]</sup>,对氟具有特别的累积特性。在相似的生长环境或土壤条件下,茶树叶片的氟含量明显比其他植物高,是一般植物的20~30倍,绝大部分氟富集在叶部,尤其是老叶<sup>[6-8]</sup>。饮茶是人体摄取氟的重要途径之一。适量的氟有益于人体的骨骼和牙齿的发育,并可以防止血管钙化,但人体过量摄取氟也会引起氟中毒,如饮用含氟量极高的砖茶极可能导致“饮茶型氟中毒”<sup>[9-10]</sup>。因此,氟与人类的健康也是茶叶界、医疗卫生界研究的热点。

近几十年来,对氟在土壤的分布、茶树内氟的吸收转移特性、氟的检测方法、茶叶降氟措施等方面进行了大量研究<sup>[11-14]</sup>。不同浓度氟对茶树生理生长、生化品质有影响,高浓度氟会使茶树嫩叶焦枯、老叶脱落,仅剩光枝,根系发黑而死<sup>[15-16]</sup>;随着氟浓度的增加,茶多酚、蛋白质、总儿茶素及其单体含量降低,氨基酸组分大部分先升高后降低,金属元素Ca、K、Cu、Zn含量显著下降,香气成分总量降低,茶叶品质也是随着氟浓度的升高而下降<sup>[17]</sup>;李琼等<sup>[18]</sup>的研究表明氟对茶树生长和品质成分的影响与氟水平有关,低浓度氟对茶树生长有一定的促进作用,高浓度氟抑制茶树生长和茶多酚、氨基酸等品质成分的代谢;王小平等<sup>[19]</sup>研究表明茶叶品质的主要成分均表现为低浓度(4 mg L<sup>-1</sup>)的促进生成和高浓度(12 mg L<sup>-1</sup>)的抑制产生。但对不同浓度氟处理的茶树光合电子传递链的研究报道很少。因此,本文以无性系‘瑞香’茶树品种[*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze ‘Ruixiang’](国品鉴茶2010017)幼苗为材料,采用盆栽沙培方法,对不同浓度氟处理下茶树幼苗叶片叶绿素荧光参数进行分析,旨在为茶树的逆境生理研究以及低氟茶树品种的筛选提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

以生长健壮、长势一致的扦插‘瑞香’茶苗

[*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze ‘Ruixiang’]为材料(约10月龄),种植于花盆中,每盆栽3株,每个处理20盆,每盆均施完全营养液约500 mL,于自然温、光条件下进行培养。营养液配方参照林郑和等<sup>[20]</sup>的方法。移栽12周后茶苗均长出2~4片新叶,开始进行试验处理,每处理分别施0、100、200、600、1800 mg L<sup>-1</sup>的NaF溶液500 mL,每周3次,处理6周时出现较明显的氟胁迫症状,取完全展开的成熟叶进行叶绿素荧光参数测定。

### 1.2 方法

**OJIP 曲线测定** 按 Strasser 等<sup>[21]</sup>的方法用连续激发式叶绿素荧光仪(PEA)测定 OJIP 曲线。所有植物均暗适应 2 h 后在室温下测定。每处理 7 片叶,取平均值。

**JIP 测定** 典型的快速叶绿素荧光诱导动力学曲线有 O、J、I、P 等 4 个重要的拐点<sup>[22]</sup>, O 点说明植物光系统(PSI)释放的荧光量,可以理解为 PSI 的光合效率,该点是在 20 μs 时的荧光强度(F<sub>0</sub>);在 2 ms 时的荧光强度称为 F<sub>J</sub>, J 拐点指示 PS II 反应中心照光被激发后产生的电子经由去镁叶绿素(Pheo)传给 PS II 反应中心初级醌受体(Q<sub>A</sub>),将其还原生成 Q<sub>A</sub><sup>-</sup>,由于 PS II 反应中心次级醌受体(Q<sub>B</sub>)不能及时从 Q<sub>A</sub><sup>-</sup> 接受电子将它氧化,造成 Q<sub>A</sub><sup>-</sup> 的大量积累, J 点反映了 Q<sub>A</sub><sup>-</sup> 瞬时大量积累情况;在 30 ms 时的荧光强度值称为 F<sub>I</sub>, I 点表示 Q<sub>A</sub><sup>-</sup> 向 Q<sub>B</sub> 传递过程中,反映 PQ 库的异质性;当 Q<sub>B</sub><sup>2-</sup> 不断积累, PS II 反应中心完全关闭,此时荧光产量最高为 P 点, P 点的荧光值为最大荧光值 F<sub>m</sub>。参照前人<sup>[3,23-24]</sup>的方法从测定的参数中衍生新的参数。

**氟含量测定** 按照 NY/T 838-2004 茶叶中氟含量的测定方法,氟离子选择电极法。

### 1.3 数据分析

试验设置 7 次重复(每盆 1 株茶树计为 1 次重复),采用 LSD 法进行多重比较分析(P<0.05),用 Sigmaplot 10.0 进行图表制作。

## 2 结果和分析

### 2.1 茶树叶片氟含量的差异

由图 1 可见,茶树叶片氟含量随着氟处理浓度的增加呈线性增加,回归方程为  $y=3.81x+482.97$

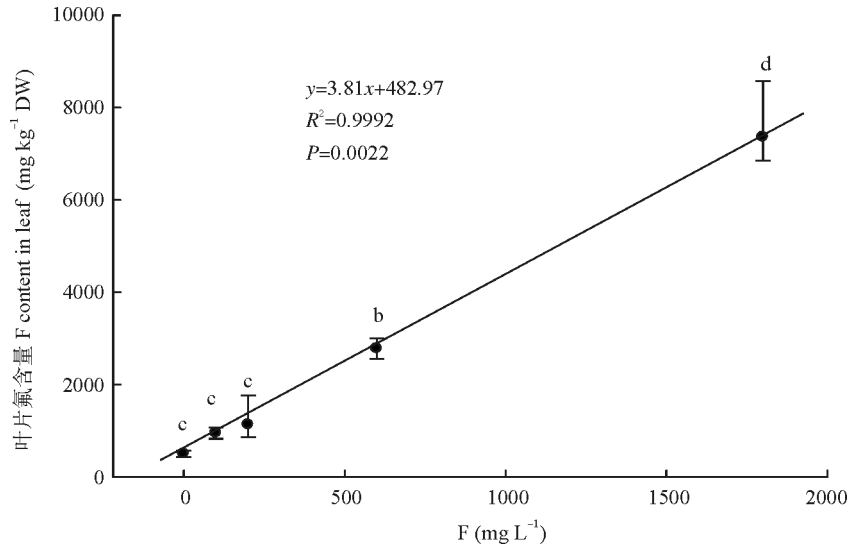


图 1 氟处理对茶树叶片中氟含量的影响  
Fig. 1 Effects of fluoride (F) stress on leaf F content

( $R^2=0.9993$ ,  $P=0.0022$ ), 叶片氟含量与氟浓度呈极显著线性正相关。茶树叶片具有超强的聚氟能力, 叶片中的氟占全株的 90% 左右。

2.2 OJIP 曲线的变化

从图 2 可见, 随着氟处理浓度的增加, 茶苗叶片的 OJIP 曲线(叶绿素荧光诱导动力学曲线)的 O 相呈小幅度上升, P 相下降得非常明显。但整个 OJIP 曲线形状变化不大(图 2: A)。从图 2: B 可见, 随着氟处理浓度的增加, IP 相曲线呈明显的下降趋势, IP 相可根据  $(F_t-F_i)/(F_t-F_0)$  计算, 当氟处理浓度达到  $1800 \text{ mg L}^{-1}$  时, 其 OJIP 曲线的 IP 相显著下降(相对其他浓度处理)。

2.3 可变荧光( $V_i$ )及相对可变荧光( $\Delta V_i$ )

茶树叶片可变荧光的叶绿素荧光动力学曲线见图 3: A, 可变荧光( $V_i$ )可根据  $(F_t-F_0)/(F_m-F_0)$  计算。图 3: B 是以  $0 \text{ mg L}^{-1}$  F 处理为对照, 其他浓度氟处理的 OJIP 曲线与其相减所得的相对可变荧光 ( $\Delta V_i$ )。可见, 相对可变荧光( $\Delta V_i$ )曲线上有 3 个拐点, 分别是位于  $300 \mu\text{s}$ 、 $2\sim 4 \text{ ms}$  和  $30\sim 100 \text{ ms}$  处的 K 点、J 点和 I 点。来自  $1800 \text{ mg L}^{-1}$  氟处理的茶苗叶片的 OJIP 曲线, 正的 K 点、J 点和 I 点尤为明显。

图 4: A 是  $0\sim 300 \mu\text{s}$  的可变荧光值( $W_K$ )的动力学曲线; 图 4: B 是氟处理与对照的可变荧光值动力学曲线之差( $\Delta W_K$ )。  $W_K$  可根据  $(F_t-F_0)/(F_{300}-F_0)$  计算。由图 4 可见, 氟浓度分别为  $600 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $1800 \text{ mg L}^{-1}$

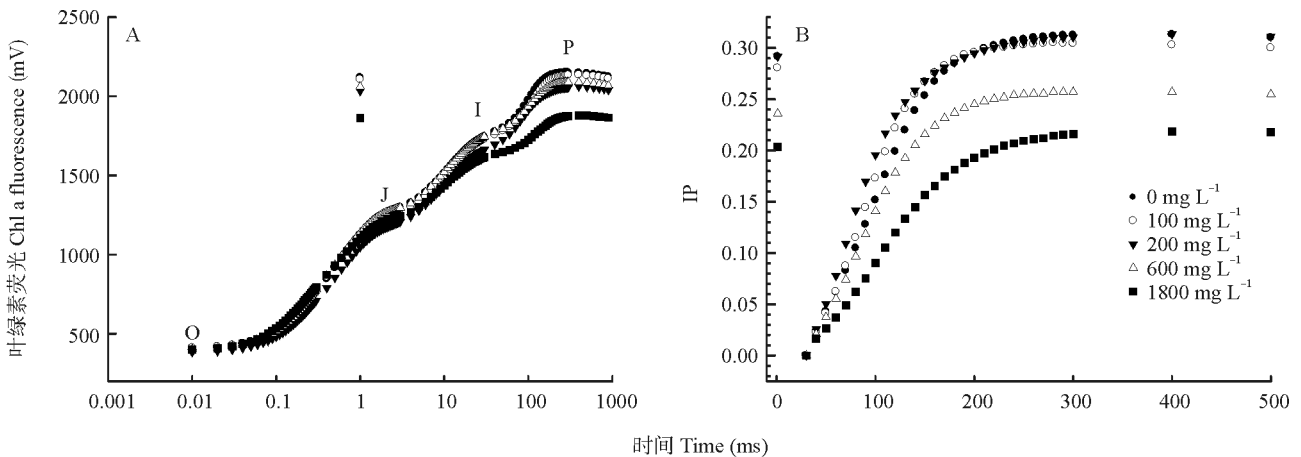


图 2 氟胁迫对茶树叶片 OJIP 曲线和 IP 相的影响  
Fig. 2 Effects of F stress on chlorophyll fluorescence and IP phase in tea leaves

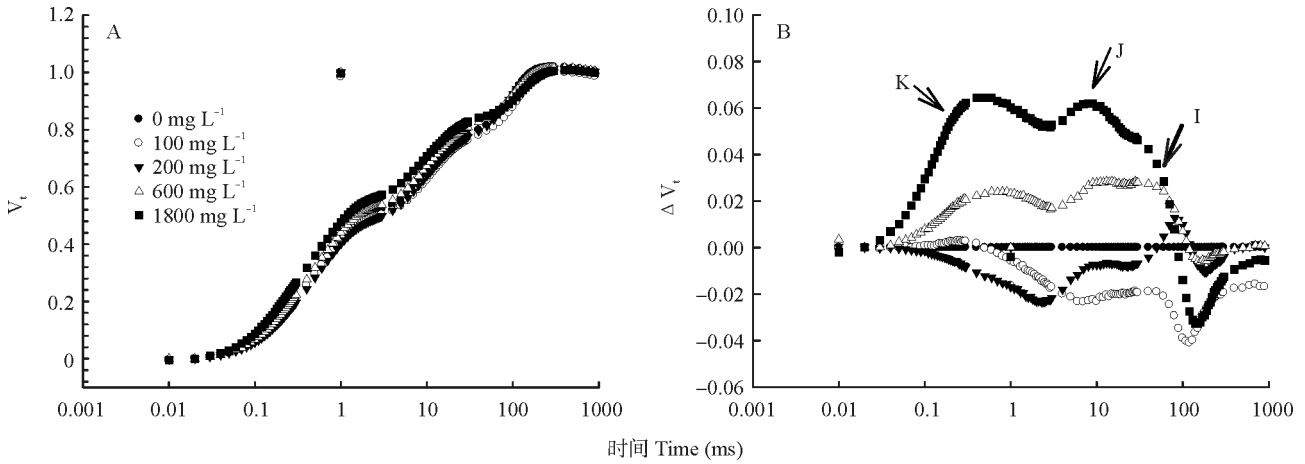


图3 氟处理对茶树叶片可变荧光( $V_t$ )和相对可变荧光( $\Delta V_t$ )的影响  
Fig. 3 Effect of F stress on variable fluorescence ( $V_t$ ) and relative variable fluorescence ( $\Delta V_t$ )

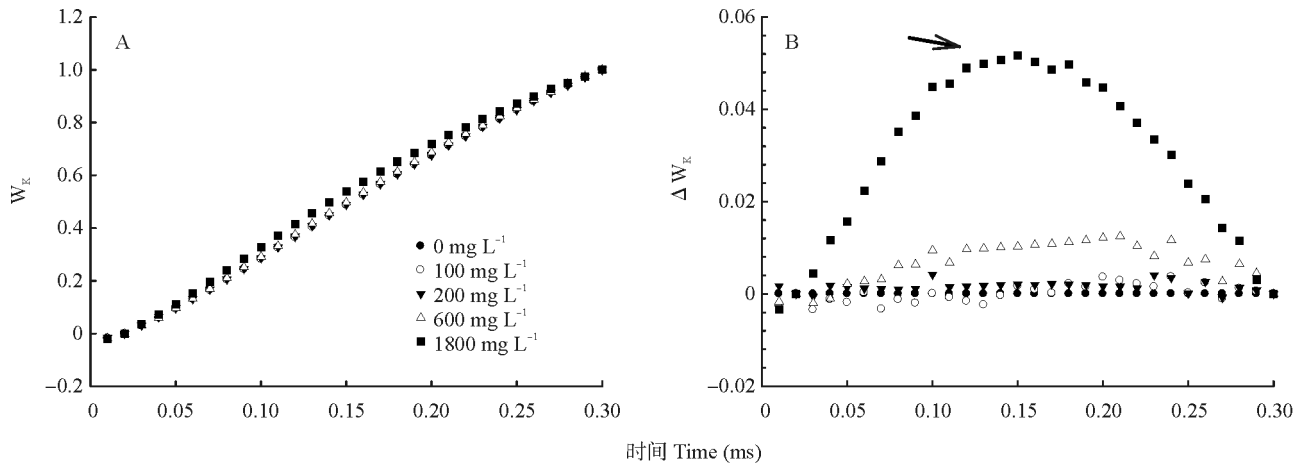


图4 不同氟处理下茶树叶片 300  $\mu$ s 内可变( $W_k$ )与相对可变荧光( $\Delta W_k$ )的变化  
Fig. 4 Effects of F on the average of variable fluorescence and relative variable fluorescence at 300  $\mu$ s

时,在 150  $\mu$ s 处有一非常清晰的 L 点,且氟处理浓度越大, L 点越明显。

2.4 氟对主要叶绿素荧光特性参数的影响

以 0  $\text{mg L}^{-1}$  NaF 处理为对照,其参数值定为 1,对所有参数进行作图(图 5)。可以看出,氟处理的茶苗叶片的一些叶绿素荧光参数呈下降趋势,这些参数包括  $\text{TR}_0/\text{CS}_0$  [单位面积捕获的光能(在  $t=0$  时)]、 $\text{RC}/\text{CS}_0$  (单位面积的反应中心的数量)、 $\text{ET}_0/\text{CS}_0$  [单位面积的电子传递的量子产额(在  $t=0$  时)](图 5: A);  $\text{ET}_0/\text{ABS}$  (用于电子传递的量子产额)、 $\text{ET}_0/\text{TR}_0$  [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)]、 $\text{RE}_0/\text{ET}_0$  (电子从还原系统传递到 PS I 的电子受体侧的效

率)、 $\text{RE}_0/\text{ABS}$  (PS I 末端受体还原的量子产额)(图 5: B);  $\text{TR}_0/\text{ABS}$  (最大光化学效率)、 $\text{PI}_{\text{abs}}$  (以吸收光能为基础的性能指数)、 $\text{PI}_{\text{cs}}$  (以单位面积为基础的性能指数)(图 5: C)。而其他一些参数,如  $\text{DI}_0/\text{RC}$  (单位反应中心耗散掉的能量)、 $\text{DI}_0/\text{CS}_0$  [单位面积的热耗散(在  $t=0$  时)]和  $\text{DI}_0/\text{ABS}$  [热耗散的量子产额比率( $\phi D_0$ )]等,却呈增加的趋势(图 5: D)。

2.5 叶片氟含量与叶绿素荧光特性参数的关系

从图 6: A 看出,叶片氟含量与量子产额或能量分配比例参数  $\psi E_0$  ( $\text{ET}_0/\text{TR}_0$ )呈负相关;同时,叶片氟含量也与 PS I 末端受体还原的量子产额 ( $\text{RE}_0/\text{ABS}$ )、以单位面积为基础的性能指数( $\text{PI}_{\text{cs}}$ )呈负相关(图 6: B,C);而叶片氟含量与单位反应中心

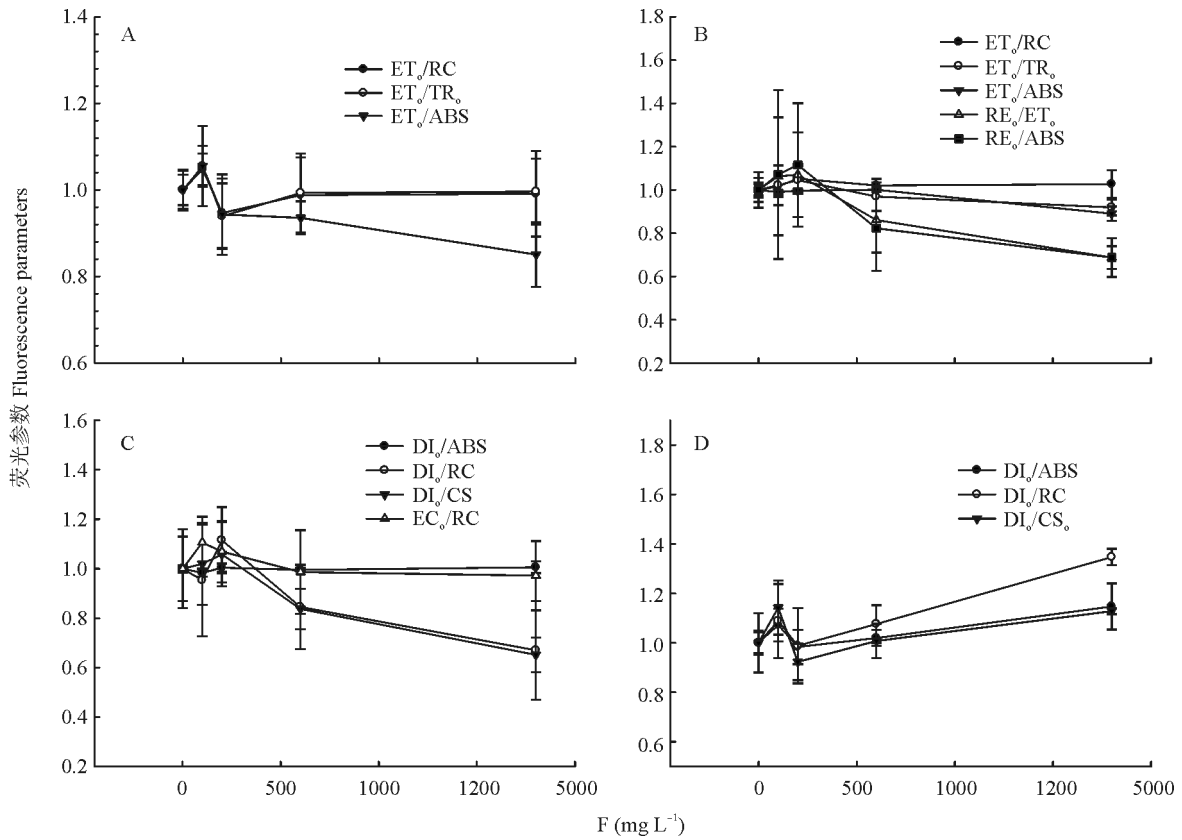


图 5 不同氟处理下茶树叶片主要荧光参数的变化

Fig. 5 Effects of F stress on the average of the main fluorescence parameters

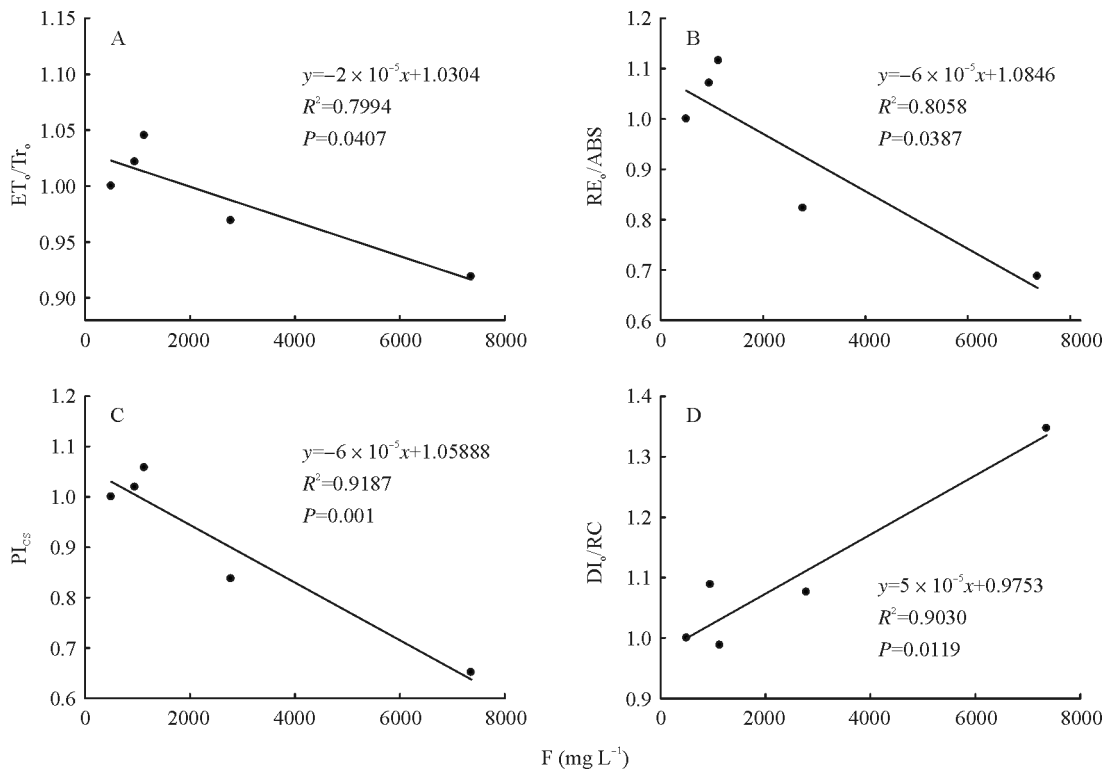


图 6 叶片氟含量与荧光参数值关系

Fig. 6 Relationship between F content in tea leaves and fluorescence parameters

耗散掉的能量( $DI_0/RC$ )呈正相关(图 6: D)。

### 3 讨论

有研究表明,植物吸收氟化物后,与光合作用相关的 RUBP 羧化酶活性和位于叶绿体膜上的 ATP 酶活性均会受到抑制<sup>[25]</sup>。氟对茶叶细胞超微结构的破坏导致了叶绿素含量和光合作用下降<sup>[11]</sup>。本研究结果表明,氟浓度较高时( $600\text{ mg L}^{-1}$ )会出现胁迫症状,此时叶片氟含量为( $2880\pm 220$ )  $\text{mg kg}^{-1}$ ;氟浓度达到  $1800\text{ mg L}^{-1}$  时,茶树的嫩叶焦枯,老叶部分脱落,根系发黑,胁迫严重。对叶绿素荧光参数进行分析,结果表明随着氟浓度的升高,茶苗叶片的 OJIP 曲线的 O 相呈小幅度上升,而 P 相下降得非常明显。说明在低浓度氟处理时,荧光参数受到的影响较小(初始荧光  $F_0$  小幅度上升),此时对 PS II 氧化侧的电子流动以及对光合机构和原初电子受体造成的影响较小,但随着氟处理浓度的增加,曲线出现很明显的下降趋势,氟浓度为  $600$ 、 $1800\text{ mg L}^{-1}$  时, IP 相下降幅度最大,说明此时对光合机构产生了较大的影响。

当 PS II 的供体侧受到伤害时,在极短的时间(在 J 点之前)内叶绿素荧光产量会上升,出现 K 点,多相荧光 OJIP 曲线变为 OKJIP 曲线<sup>[3]</sup>。受氟胁迫的茶树叶片的 OJIP 曲线在  $300\ \mu\text{s}$  左右出现 K 点(图 3: B),表明放氧复合体(OEC)受到了伤害<sup>[25-26]</sup>,而  $1800\text{ mg L}^{-1}$  氟处理的比  $600\text{ mg L}^{-1}$  的 K 点更明显,说明氟浓度越高对其伤害越大。K 点被认为是 OEC 受损的一个特殊标记, OEC 的破坏程度会对植物光合作用中的水裂解和电子传递产生影响。由于 OEC 失活,水裂解系统受抑制和  $Q_A$  之前受体侧的部分被抑制,导致电子供给受抑制<sup>[31]</sup>。在干旱和盐胁迫下的白榆(*Ulmus pumila*)叶片<sup>[27]</sup>、热胁迫下的疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)<sup>[28]</sup>、高温胁迫的沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)叶片<sup>[29]</sup>的叶绿素荧光参数曲线也观察到了 K 点。某些重金属盐,如铬酸盐,也能诱导 K 点的出现<sup>[30]</sup>。

叶绿素荧光参数曲线中的 J 点、I 点和 IP 相分别与  $Q_A$ 、质体醌及 PSII 电子受体侧末端接受体的还原状态有关<sup>[31-32]</sup>。 $V_j$  与  $V_i$  分别表示在  $2\text{ ms}$  和  $30\text{ ms}$  时的相对可变荧光。本研究结果表明,氟胁迫下茶树叶片的  $V_j$  与  $V_i$  增加(图 3: A,B), IP 相下降幅度最大(图 2: B),意味着  $Q_A$  还原量增加,

PSII 的受体侧更易氧化;与对照相比,受氟胁迫叶片的 PSII 受体侧的电子受体库容量  $S_m$  ( $EC_0/RC$ )变小,从而导致电子传递到电子传递链中超过  $Q_A^-$  的电子受体的概率( $ET_0/ABS$ )下降(图 5: B),较多的光能用来还原  $Q_A$ ,使  $Q_A$  的还原( $M_0$ ) [ $M_0=4(F_{300\ \mu\text{s}}-F_0)/(F_m-F_0)$ ] 加速(图 3: B)<sup>[3]</sup>;  $600$  和  $1800\text{ mg L}^{-1}$  氟胁迫的叶片 OJIP 曲线在  $150\ \mu\text{s}$  处出现很明显的正 L 点(图 4: B),表明受氟胁迫叶片的 PSII 单位比正常叶片(对照)的更加松散。氟浓度越高,叶片 L 点上升幅度越大,其 PSII 单位也更脆弱。因此推测,受氟胁迫的叶片 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,降低了光合速率。

$F_v/F_m$  ( $TR_0/ABS$ )为最大光化学效率,代表了 PS II 反应中心内原初光能的转换效率(最大转换效率),可以指示植物对胁迫的反应程度<sup>[33]</sup>。本研究结果表明,  $F_v/F_m$  随着氟浓度的增加而降低,但不显著(图 5: C)。Strasser 等<sup>[31]</sup>引入了新的参数,即  $PI_{\text{abs}}$  性能指数,它可以更为准确地反映植物光合机构的状态,其下降意味着 PS II 的光合结构和功能都受到了比较大的伤害。本研究中,氟处理的叶片吸收光能的性能指数( $PI_{\text{abs}}$ )和以单位面积为基础的性能指数( $PI_{\text{CS}}$ )均大幅度下降,尤其是氟浓度达到  $600\text{ mg L}^{-1}$  时,性能指数( $PI_{\text{CS}}$ )下降明显(图 5: C),此时反应中心吸收的光能减少(图 2: A),表明反应中心的活性有所下降,影响了其光合机构的功能。

氟胁迫降低了茶树叶片电子传递的能力,一些量子产额参数都降低,如  $ET_0/TR_0$ 、 $RE_0/ET_0$ 、 $ET_0/ABS$  和  $RE_0/ABS$  等(图 5: B,C)。这与茶树缺钾<sup>[20]</sup>、水分胁迫的甘蔗(*Saccharum sp.*)<sup>[34]</sup>、铝胁迫的酸柚(*Citrus grandis*)<sup>[23]</sup>的结果相似。氟胁迫下, PS II 最大光化学效率( $TR_0/ABS$ )下降(图 5: C)的同时,单位面积光合机构含有的反应中心数目( $RC/CS_0$ )下降(图 5: A),表明茶树受到氟胁迫,叶片光合电子传递仅能利用小部分吸收光能,此时  $ET_0/ABS$ 、 $RE_0/ABS$  呈下降趋势(图 5: B,C),进而导致还原  $Q_A$  的激发能( $TR_0/CS_0$ , 图 5: A)及进入超过  $Q_A^-$  的电子传递链中的还原能( $ET_0/CS_0$ , 图 5: A)减少,同时,单位反应中心以热能形式耗散的能量( $DI_0/CS_0$ 、 $DI_0/RC$ )增加(图 5: D),用于热耗散的量子产额比率( $DI_0/ABS$ )也增大(图 5: D),表明茶树幼苗叶片遭受氟胁迫后通过增加自身热耗散来减少对自身的伤害。这与低磷胁迫小麦(*Triticum aestivum*)<sup>[35]</sup>的结论相似。

总之,较高浓度氟处理(600、1800 mg L<sup>-1</sup>),茶树的IP相显著下降(图2: B),其OJIP曲线中出现明显正的K点、J点和I点,在150 μs附近出现很明显的正L点(图4: B)。因此,认为施氟浓度达到600 mg L<sup>-1</sup>时,茶树叶片的氟含量为(2780±220) mg kg<sup>-1</sup>,出现胁迫症状,影响光合效率;同时也造成了光合机构受损、原初电子受体遭到破坏、荧光产量减少、PS II活性减弱、光化学反应减少,过剩激发能增加,而叶片同时增加自身热耗散来防止受到光抑制和光破坏。

### 参考文献

- [1] Strasser R J, Srivastava A, Tsimilli-Michael M. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples [M]// Yunus M, Pathre U, Mohanty P. Probing Photosynthesis: Mechanisms, Regulation and Adaptation. London: Taylor and Francis, 2000: 445–483.
- [2] Chen J M, Yu X P, Cheng J A. The application of chlorophyll fluorescence kinetics in the study of physiological responses of plants to environmental stresses [J]. Acta Agri Zhejiang, 2006, 18(1): 51–55.  
陈建明, 俞晓平, 程家安. 叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用 [J]. 浙江农业学报, 2006, 18(1): 51–55.
- [3] Li P M, Gao H Y, Strasser R J. Application of the fast chlorophyll fluorescence induction dynamics analysis in photosynthesis study [J]. J Plant Physiol Mol Biol, 2005, 31(6): 559–566.  
李鹏民, 高辉远, Strasser R J. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用 [J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(6): 559–566.
- [4] Lin S Q, Xu C H, Zhang Q D, et al. Some application of chlorophyll fluorescence kinetics to plant stress physiology, ecology and agricultural modernization [J]. Chin Bull Bot, 1992, 9(1): 1–16.  
林世青, 许春晖, 张其德, 等. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学, 生态学和农业现代化中的应用 [J]. 植物学通报, 1992, 9(1): 1–16.
- [5] Luo X P, Li L X, He C L. Advanced study on fluoride and measures for reduction of fluoride content in tea (*Camellia sinensis*) [J]. Tea Sci Technol, 2006(2): 6–9.  
罗学平, 李丽霞, 何春雷. 茶叶氟研究现状及降氟措施研究进展 [J]. 茶叶科学技术, 2006(2): 6–9.
- [6] Ma L F, Ruan J Y, Shi Y Z, et al. Study on accumulation characteristics of fluorine in tea plants [J]. Acta Agri Zhejiang, 2004, 16(2): 96–98.  
马立锋, 阮建云, 石元值, 等. 茶树氟累积特性研究 [J]. 浙江农业学报, 2004, 16(2): 96–98.
- [7] An L R, Yin J F, Gao X R, et al. Correlation analysis between fluorine pollution in air and fluorine content in leaves of several tree species [J]. Hebei J For Orch Res, 2000, 15(3): 227–231.
- [8] 安连荣, 尹家风, 郜秀荣, 等. 大气氟污染与几种树木叶片及土壤和水中氟含量的相关性分析 [J]. 河北林果研究, 2000, 15(3): 227–231.
- [8] Xie Z M, Ye Z H, Wong M H. Distribution characteristics of fluoride and aluminium in soil profiles of an abandoned tea plantation and their uptake by six woody species [J]. Environ Inter, 2001, 26(5/6): 341–346.
- [9] Chao J, Zhao Y, Lie J W, et al. Fluorosis induced by drinking brick tea among children in high altitude areas, Tibet [J]. Publ Health J China, 2000, 16(2): 174–175.  
曹进, 赵燕, 列箭卫, 等. 西藏高海拔地区儿童的砖茶型氟中毒 [J]. 中国公共卫生, 2000, 16(2): 174–175.
- [10] Cao J, Zhao Y, Lie J W, et al. Report of brick-tea type fluorosis among Hasake population [J]. Chin J Endemiol, 1996, 15(5): 267–270.  
曹进, 赵燕, 列箭卫, 等. 哈萨克族人群砖茶型氟中毒调查报告 [J]. 中国地方病学杂志, 1996, 15(5): 267–270.
- [11] Ma L F, Ruan J Y, Shi Y Z, et al. Review of the study on fluorine status in teas from China in the past decade [J]. Ecol Environ, 2003, 12(3): 342–345.  
马立峰, 阮建云, 石元值, 等. 中国茶叶中的氟近十年来的研究进展 [J]. 生态环境, 2003, 12(3): 342–345.
- [12] Ruan J Y, Yang Y J, Ma L F. Recent progress in the research on fluoride in tea: accumulation characteristics by plants and concentrations in products with regarding to the impact on human health [J]. Tea Sci, 2007, 27(1): 1–7.  
阮建云, 杨亚军, 马立峰. 茶叶氟研究进展: 累积特性、含量及安全性评价 [J]. 茶叶科学, 2007, 27(1): 1–7.
- [13] Yi J, Cao J. Safety evaluation on fluoride content in tea commodities [J]. Foreign Med Sci (Sect Medgeogr), 2010, 26(3): 12–13.  
易娟, 曹进. 茶中氟化物安全性的讨论——历史与现实的回顾 [J]. 国外医学(医学地理册), 2005, 26(3): 13–115.
- [14] Huang H S, Dong J, Hang J C, et al. Review of the study on fluorine status in teas [J]. China Tea, 2010(6): 12–13.  
黄伙水, 董健, 韩家才, 等. 茶叶中氟的研究进展 [J]. 中国茶叶, 2010(6): 12–13.
- [15] Li L X, Du X, He C L. Absorption and accumulation characteristics of fluorine in nutrient liquid cultured tea plant [J]. J Sichuan Agri Univ, 2008, 26(1): 59–63.  
李丽霞, 杜晓, 何春雷. 水培茶苗对氟的吸收累积特性 [J]. 四川农业大学学报, 2008, 26(1): 59–64.
- [16] Fang X H, Wu C. The study of tea tree on some mineral element deficiency and excess syndrome [J]. China Tea, 1984(2): 19–21  
方兴汉, 吴采. 茶树某些矿物质元素缺乏症和过量症的研究 [J]. 中国茶叶, 1984(2): 19–21.
- [17] Li C L. Study on the effect and mechanism of fluoride in the

- physiology and biochemistry of tea seedlings [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011: 37–39.
- 李春雷. 氟对茶树幼苗生理生化的影响及其作用机制研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2011: 37–39.
- [18] Li Q, Ruan J Y. Effects of fluoride on the metabolism of tea quality components [J]. *Tea Sci*, 2009, 29(3): 207–211.
- 李琼, 阮建云. 氟对茶叶品质成分代谢的影响 [J]. *茶叶科学*, 2009, 29(3): 207–211.
- [19] Wang X P, Liu P, Luo H, et al. Effect of Al and F interaction on the tea quality [J]. *Tea Sci*, 2009, 29(1): 9–14.
- 王小平, 刘鹏, 罗虹, 等. 铝氟交互处理对茶叶品质的影响 [J]. *茶叶科学*, 2009, 29(1): 9–14.
- [20] Lin Z H, Zhong Q S, Chen C S, et al. Effects of potassium deficiency on chlorophyll fluorescence in leaves of tea seedling [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2010, 18(4): 974–980.
- 林郑和, 钟秋生, 陈常颂, 等. 缺钾对茶树幼苗叶片叶绿素荧光特性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 974–980.
- [21] Strasser R J, Srivastava A, Govindjee. Polyphasic chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria [J]. *Photochem Photobiol*, 1995, 61(1): 32–42.
- [22] Cao Y H, Zhou B Z, Zhang R M, et al. Response of chlorophyll fluorescence parameters of *Illicium lanceolatum* on different light conditions [J]. *Acta Bot Boreal-Occid Sin*, 2012, 32(3): 525–5313.
- 曹永慧, 周本智, 张汝民, 等. 披针叶茴香叶绿素荧光参数对不同光环境的响应 [J]. *西北植物学报*, 2012, 32(3): 525–5313.
- [23] Jiang H X, Chen L S, Zheng J G, et al. Aluminum-induced effects on photosystem II photochemistry in citrus leaves assessed by chlorophyll a fluorescence transient [J]. *Tree Physiol*, 2008, 28(12): 1863–1871.
- [24] Smit M F, van Heerden P D R, Pienaar J J, et al. Effect of trifluoroacetate, a persistent degradation product of fluorinated hydrocarbons, on *Phaseolus vulgaris* and *Zea mays* [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2009, 47(7): 623–634.
- [25] Hakala M, Tuominen I, Keränen M, et al. Evidence for the role of the oxygen-evolving manganese complex in photoinhibition of photosystem II [J]. *Biochim Biophys Acta*, 2005, 1706(1/2): 68–80.
- [26] Srivastava A, Guisse 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]. *Biochim Biophys Acta*, 1997, 1320(1): 95–106.
- [27] Li L, Li H. Effects of NaCl and polyethylene glycol on photosystem II activity in *Ulmus pumila* [J]. *J NE For Univ*, 2011, 39(9): 31–33.
- 李利, 李宏. 干旱和盐胁迫对白榆叶片光系统 II 活力的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(9): 32–35.
- [28] Xue W, Li X Y, Lin L S, et al. Effects of short time heat stress on photosystem II, Rubisco activities and oxidative radicals in *Alhagi sparsifolia* [J]. *Plant Ecol Sin*, 2011, 35(4): 441–451.
- 薛伟, 李向义, 林丽莎, 等. 短时间热胁迫对疏叶骆驼刺光系统 II、Rubisco 活性和活性氧化剂的影响 [J]. *植物生态学报*, 2011, 35(4): 441–451.
- [29] Zhang M, Wang H J, Yu C Q. The examination of high temperature stress of *Ammopiptanthus mongolicus* by chlorophyll fluorescence induction parameters [J]. *Ecol Environ*, 2009, 18(6): 2272–2277.
- 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 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2272–2277.
- [30] Appenroth K J, Stöckel J, Srivastava A, et al. Multiple effects of chromate on the photosynthetic apparatus of *Spirodela polyrhiza* as probed by OJIP chlorophyll a fluorescence measurements [J]. *Environ Pollut*, 2001, 115(1): 49–64.
- [31] Strasser R J, Tsimilli-Micheal M, Srivastava A. Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient [M]// Papageorgiou G C, Govindjee M. *Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis*. Dordrecht: Springer, 2004: 321–362.
- [32] Lazár D. The polyphasic chlorophyll a fluorescence rise measured under high intensity of exciting light [J]. *Funct Plant Biol*, 2006, 33(1): 9–30.
- [33] Feng S L, Ma F G, Fang Z G, et al. Effect of soil water content on diurnal changes of chlorophyll fluorescence parameter of tomato in Xinjiang [J]. *Acta Agri Boreali-Sin*, 2007, 22(5): 71–75.
- 冯胜利, 马富裕, 方志刚, 等. 土壤水分对新疆加工番茄叶绿素荧光参数日变化的影响 [J]. *华北农学报*, 2007, 22(5): 71–75.
- [34] Luo J, Lin Y Q, Lü J L, et al. Effects of water stress on the photosynthesis of sugarcane leaves [J]. *Sci Agri Sin*, 2000, 33(4): 100–102.
- 罗俊, 林彦铨, 吕建林, 等. 水分胁迫对甘蔗叶片光合性能的影响 [J]. *中国农业科学*, 2000, 33(4): 100–102.
- [35] Dong F. Effect of low phosphorus stress on photosynthetic characteristics of different wheat genotypes [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2009: 36–37.
- 董飞. 低磷胁迫对不同基因型小麦光合特性的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2009: 36–37.