

# 氮素水平对不同品种茶树光合及叶绿素荧光特性的影响

向 芬<sup>1</sup>, 李 维<sup>1</sup>, 刘红艳<sup>1</sup>, 周凌云<sup>1</sup>, 江昌俊<sup>2\*</sup>

(1 湖南省农业科学院 茶叶研究所, 长沙 410125; 2 安徽农业大学 茶树生物学与资源利用国家重点实验室, 合肥 230036)

**摘 要:** 为探明氮素水平对不同品种茶树的光合系统的影响机制, 以‘福鼎大白茶’、‘保靖黄金茶 1 号’、‘白毫早’两年生茶苗为材料, 设置不施氮  $N_0$  (0 g)、低氮  $N_1$  (11 g)、中氮  $N_2$  (22 g) 和高氮  $N_3$  (33 g) 4 个氮素  $[(NH_4)_2SO_4]$  水平的盆栽实验, 研究了铵态氮对 3 个品种茶树的生长势、叶片叶绿素含量、光合参数与叶绿素荧光参数的影响。结果表明: (1) 施氮处理能够显著促进茶树的生长, 提高茶树叶片叶绿素含量、净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ ), 降低胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ), 并以  $N_2$  处理最好, 但水分利用率 ( $WUE$ ) 在 3 个品种茶树间表现不同。 (2) 在  $N_2$  处理下, 3 个茶树品种的叶片光系统 II (PSII) 暗适应下的最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ )、光化学淬灭系数 ( $qP$ )、PSII 的相对电子传递速率 ( $rETR$ ) 亦增加最大, 非光化学淬灭系数 ( $NPQ$ ) 降低。 (3) 茶树叶片叶绿素含量与光合参数间存在着一定的联系, 并且具有品种特异性。研究发现, 适量施氮能够显著增加茶树叶绿素含量、气孔导度、光合活性, 从而使得各品种茶树净光合速率增加; 氮素水平对各茶树品种的光合及荧光特性影响存在差异, 水分利用率亦具有品种特异性; 生产中应综合叶绿素含量、光合作用参数、叶绿素荧光参数, 可快速、直观地评价不同品种茶树对氮素营养的内在需求, 为茶园施肥管理提供指导。

**关键词:** 氮素; 茶树; 光合作用; 叶绿素荧光

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

## Characteristics of Photosynthetic and Chlorophyll Fluorescence of Tea Varieties under Different Nitrogen Application Levels

XIANG Fen<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LIU Hongyan<sup>1</sup>, ZHOU Lingyun<sup>1</sup>, JIANG Changjun<sup>2\*</sup>

(1 Tea Research Institute of Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China; 2 State Key Laboratory of Tea Plant Biology and Utilization, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** In order to ascertain the mechanism of nitrogen levels on the photosynthetic system in different tea varieties, we investigated the growth vigor, chlorophyll content, photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence parameters in three tea varieties (Fuding dabai tea, Baojing huangjin tea No. 1 and Baihaozao) by the pot experiment under nitrogen stress [(control:  $N_0$  (0 g), low nitrogen:  $N_1$  (11 g), suitable nitrogen:  $N_2$  (22 g), high nitrogen:  $N_3$  (33 g)]. Results showed that: (1) Nitrogen application significantly promoted tea growth, and the chlorophyll content, net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), transpiration rate ( $T_r$ ) increased after nitrogen application, while the intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) decreased, of which  $N_2$  treatment had the greatest impact to them. The variation trends of water use effi-

收稿日期: 2018-02-01; 修改稿收到日期: 2018-05-15

基金项目: 湖南省自然科学基金 (2016JJ4052, 2016JJ2074); 安徽农业大学茶树生物学与资源利用国家重点实验室开放基金 (SKLTOF20150202); 湖南农业科技创新资金 (2017JC17)

作者简介: 向 芬 (1983—), 女, 助理研究员, 主要从事茶树栽培学与生理生化方面的研究。E-mail: xiangfen-1210@163.com

\* 通信作者: 江昌俊, 教授, 主要从事茶树生理生态与种质创新研究。E-mail: jiangcj@ahau.edu.cn

ciency ( $WUE$ ) in 3 tea varieties were different with each other. (2) After treated with  $N_2$ , the primary maximum photochemical efficiency of PS II ( $F_v/F_m$ ), photochemical quenching coefficient ( $qP$ ) and the relative electron transport rate of PS II ( $rETR$ ) also increased most in three varieties, while the non-photochemical quenching coefficient ( $NPQ$ ) decreased. (3) The results indicated that there was a correlation between the chlorophyll content and photosynthetic parameters in tea leaves, and it represented a variety specificity between them. In conclusion, nitrogen application could increase the chlorophyll content,  $G_s$  and  $qP$ , and enhance net photosynthetic rate. Compared with control, the photosynthetic characteristics, chlorophyll fluorescence parameters and  $WUE$  showed different characteristics in tea varieties under different nitrogen levels. It indicates that we can rapidly evaluate the needs of nitrogen nutrition in tea plants based on the chlorophyll content, photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters, and provide guidance for the management of tea plantation.

**Key words:** nitrogen; *Camellia sinensis*; photosynthesis; chlorophyll fluorescence

氮素是茶树需求量最大的营养元素,对茶叶品质的形成具有重要的作用<sup>[1]</sup>。由于氮素在提高茶树产量和品质方面的贡献,茶农盲目地增施氮肥,极易造成水体及环境污染,茶园土壤酸化加剧,茶叶质量下降<sup>[2]</sup>。因此,提高茶树氮素利用效率就成为了近年来茶学研究的热点。

利用<sup>15</sup>N 标记研究发现不仅茶树品种间氮素利用率存在差异,氮素在不同茶树品种的各部位分配上也存在差异<sup>[3]</sup>,如‘福鼎大白茶’、‘薮北茶’等品种将吸收的氮素更多地转运至地上部分以供芽叶生长<sup>[4]</sup>。茶树生长周期长,从茶园新建到成园需要 3~5 年<sup>[5]</sup>,通过常规的产量统计和茶叶品质分析来确认茶树品种的营养吸收特性费时费力。光合作用是作物生长和品质形成的基础,植物对养分的吸收、利用与其光合系统密切相关<sup>[6-8]</sup>。施氮处理后茶树产量增加,品质提高,叶片的光合活性增强,茶树叶片叶绿素含量、净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、水分利用率( $WUE$ )增加,但胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )降低<sup>[9-11]</sup>。叶绿素荧光技术是研究植物光合生理与环境因子关系的探针<sup>[12]</sup>,利用叶绿素荧光分析技术可以方便快捷地反映植物光合系统对光能的吸收和利用情况。目前,施氮对茶树的影响研究着重于氮素形态对大田茶园茶树产量、品质以及光合特性的影响等方面,而茶树叶绿素荧光又多注重于对逆境响应的研究<sup>[13-14]</sup>,但对不同氮素水平下茶树的荧光特性研究较少,对氮素营养影响光合作用的机制尚不明确。因此,本研究综合叶绿素含量、光合作用、叶绿素荧光参数来分析氮素营养对茶树光合系统的影响机制,期望能够快速、直观地评价不同茶树品种对氮素营养的需求,为未来缩短研究茶树品种营养吸收特性的周期,有效提高茶树氮素利用效率奠定理论基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 材 料

供试材料为茶树品种‘福鼎大白茶’(FD)、“保靖黄金茶 1 号”(HJ1)、“白毫早”(BHZ)的一年生茶苗,由湖南省茶研所实验茶场提供。供试土壤为砂质红壤, pH 4.96, 有机质  $1.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $97.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $35.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $98.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 土壤取自长沙市马坡岭茶叶试验基地(湖南长沙,  $113^{\circ}4'30.168''\text{E}$ ,  $28^{\circ}12'20.580''\text{N}$ )。

### 1.2 试验设置

于 2013 年 1 月选取长势一致的两年生茶树品种‘福鼎大白茶’(FD)、“保靖黄金茶 1 号”(HJ1)、“白毫早”(BHZ)进行盆钵实验,盆上口直径 40 cm、高 35 cm。土壤经自然风干、去杂质、压碎过 2 mm 孔径筛后,按每盆 14.5 kg 称重装盆,每盆移栽 3 株茶树;以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  为氮源,自 2014 年连续 4 年每年春季设置 4 个氮素处理水平,即不施氮、低氮、中氮和高氮,每盆分别施  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  为 0 ( $N_0$ )、11 ( $N_1$ )、22 ( $N_2$ )和 33 g ( $N_3$ ),每个处理重复 4 次。于 2015 年 10 月测定茶树各处理的株高、茎粗、分枝,2017 年 5 月对各处理茶树进行光合气体交换参数、叶绿素含量、叶绿素荧光参数测定。

### 1.3 测定指标及方法

**1.3.1 叶绿素含量** 在暗处准确称取各处理茶树叶片 0.5 g 试材于试管中将叶片剪成  $2 \text{ mm} \times 1 \text{ cm}$  碎条,在室温下立即用丙酮、乙醇混合液(丙酮:乙醇=1:2)提取叶绿素<sup>[15]</sup>,每处理重复 3 次。浸提在黑暗中进行,每管加入浸提液 10 mL,并定时摇动,待叶片变白,约 14 h 后定容至 25 mL,待测。室温下以丙酮、乙醇混合液为参比,分别在 645 nm 和 663 nm 处测定吸光度,并由 Arnon<sup>[16]</sup> 公式计算叶

绿素 a(Chla)与叶绿素 b(Chlb)的含量。

**1.3.2 光合气体交换参数** 采用 Li-6400XT 型光合作用测定系统的红蓝光源于 9:00~11:00 测定不同氮素水平下各品种茶树完全展开的当年生成熟叶的光合参数。叶室内的光照强度为  $1\,500\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\text{CO}_2$  浓度为  $400\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 将叶片夹入叶室后,待数据稳定时记录茶树净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )和胞间二氧化碳浓度( $C_i$ ),并计算瞬时水分利用率( $WUE$ )<sup>[10,17]</sup>。

$$WUE = P_n / T_r$$

**1.3.3 叶绿素荧光参数** 每个处理选取 3 片生长基本一致且完全展开的当年生茶树成熟叶片,利用便携式调制叶绿素荧光仪 PAM-2500(德国 WALZ 公司)测定叶绿素荧光诱导的动力学参数。测定时,先将叶片置于黑暗中适应 30 min,参照 Cuddy 等<sup>[18]</sup>的方法测定慢速荧光诱导曲线。仪器自动纪录初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )、非光化学淬灭系数( $NPQ$ )、光化学淬灭系数( $qP$ )。根据所测定的参数计算光系统 II(PSII)最大光化学效率 $[F_v/F_m = (F_m/F_0)/F_m]$ <sup>[19-21]</sup>、PSII 相对电子传递速率 $[rETR = \Delta F/F_m' \times PAR \times 0.84 \times 0.5]$ 。

#### 1.4 数据统计及分析

利用 Excel 2010 软件对数据进行处理,利用 DPS14.5 与 SPSS21.0 软件进行数据统计与分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮水平对茶树生长的影响

如表 1 所示,施氮显著促进了茶树的生长,随着施氮水平的提高,3 个品种茶树的生长势均呈先升高后降低的趋势。其中,‘福鼎大白茶’(FD)和‘保靖黄金茶 1 号’(HJ1)的株高、茎粗与分枝数均以  $N_2$  处理为最佳,且多显著高于对照(CK)( $P < 0.05$ );‘白毫早’(BHZ)则以  $N_1$  处理为最佳。综合株高、茎粗、分枝等生长势来看,  $N_2$  处理对 3 个品种茶树的生长影响最大,生长势最好;3 个品种茶树中,施氮对‘保靖黄金茶 1 号’生长促进作用最明显,  $N_1$ 、 $N_2$  处理后的茶树株高、茎粗、分枝大多显著高于对照。

### 2.2 不同施氮水平对茶树叶片叶绿素含量的影响

由图 1 可知,与对照( $N_0$ )相比较,适量施氮处理能够显著或者极显著提高 3 个茶树品种的总叶绿素含量(图 1,C)。氮处理后 FD、HJ1、BHZ 3 个品种的叶绿素 a(Chla)含量最高分别比对照增加 4.0%、11.7%、9.0%,且氮处理后 HJ1、BHZ 较对照差异达到极显著水平(图 1,A; $P < 0.01$ );氮处理后 3 个茶树品种的叶绿素 b(Chlb)含量最高分别比对照显著增加 45.3%、133.8%、109.6%,增幅较 Chla 大,并以 HJ1 的增幅最大(图 1,B);施氮处理 HJ1、

表 1 不同施氮水平下不同品种茶树生长势的变化

Table 1 The growth vigor of different tea varieties under different nitrogen application levels

| 品种<br>Variety | 处理<br>Treatment | 株高<br>Height/cm       | 茎粗<br>Steam diameter/mm | 分枝数<br>Branch number |
|---------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|
| FD            | $N_0$ (CK)      | $36.63 \pm 0.19$      | $5.45 \pm 0.18$         | $6.40 \pm 0.23$      |
|               | $N_1$           | $41.38 \pm 0.18^{**}$ | $6.01 \pm 0.28$         | $6.80 \pm 0.11$      |
|               | $N_2$           | $45.01 \pm 0.21^{**}$ | $6.30 \pm 0.12^*$       | $6.80 \pm 0.22$      |
|               | $N_3$           | $44.40 \pm 0.14^{**}$ | $5.91 \pm 0.15$         | $6.20 \pm 0.17$      |
| HJ1           | $N_0$ (CK)      | $35.60 \pm 0.19$      | $5.38 \pm 0.23$         | $4.82 \pm 0.22$      |
|               | $N_1$           | $39.91 \pm 0.05^*$    | $5.89 \pm 0.14^{**}$    | $5.69 \pm 0.17^*$    |
|               | $N_2$           | $42.05 \pm 0.27^*$    | $5.92 \pm 0.17^{**}$    | $5.73 \pm 0.18^*$    |
|               | $N_3$           | $39.72 \pm 0.14^*$    | $5.50 \pm 0.07$         | $5.45 \pm 0.05$      |
| BHZ           | $N_0$ (CK)      | $35.89 \pm 0.15$      | $5.17 \pm 0.18$         | $4.60 \pm 0.20$      |
|               | $N_1$           | $39.96 \pm 0.14^*$    | $5.42 \pm 0.17$         | $4.50 \pm 0.30$      |
|               | $N_2$           | $39.24 \pm 0.24^*$    | $5.35 \pm 0.10$         | $4.38 \pm 0.23$      |
|               | $N_3$           | $38.74 \pm 0.31^*$    | $5.32 \pm 0.12$         | $4.96 \pm 0.27$      |

注:FD. 福鼎大白茶;HJ1. 保靖黄金茶 1 号;BHZ. 白毫早; $N_0$ 、 $N_1$ 、 $N_2$  和  $N_3$  分别表示 0、11、22、33 g/盆的施氮水平;\* 和 \*\* 分别代表不同施氮处理与对照间在 0.05 与 0.01 水平存在显著性差异;下同

Note: FD. Fuding Dabaicha;HJ1. Baojing Huangjin tea No. 1;BHZ. Baihaozao; $N_0$ 、 $N_1$ 、 $N_2$  and  $N_3$  stand for application level of 0,11,22,33 g/pot;\* and \*\* indicate the difference between untreated control and nitrogen treatment at 0.05 and 0.01 levels, respectively; The same as below

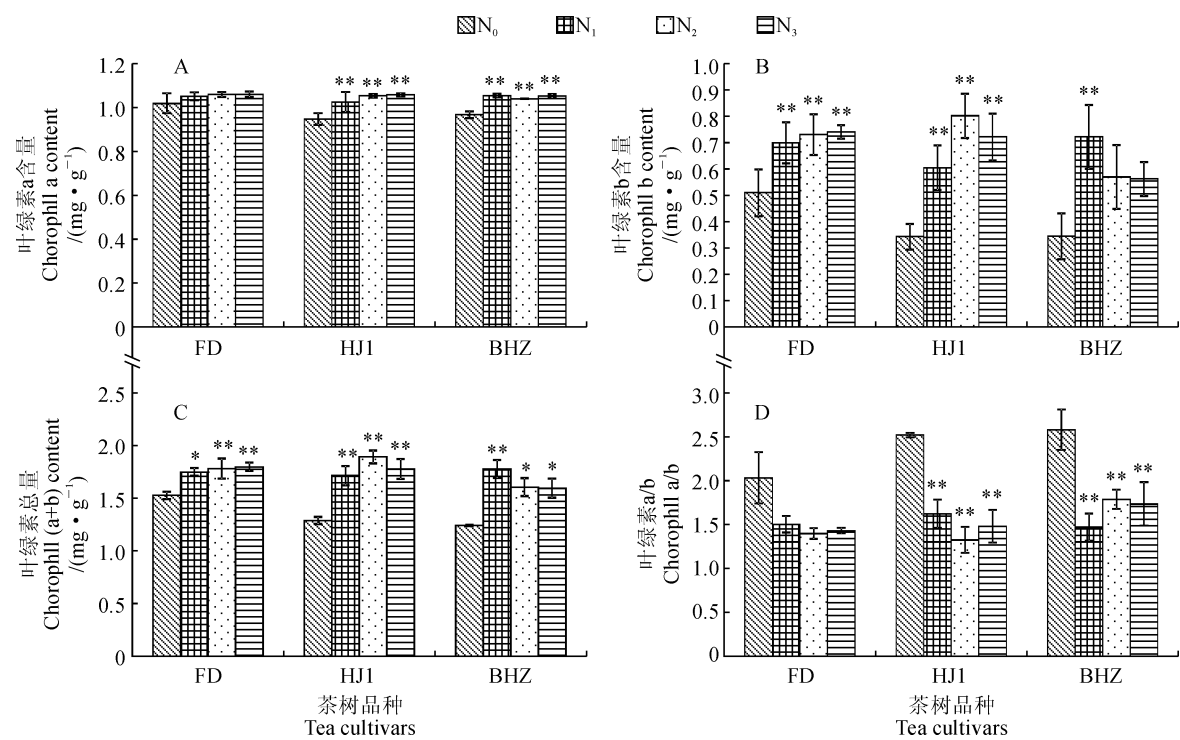


图 1 不同施氮水平下各茶树品种叶片叶绿素含量的变化

Fig. 1 The chlorophyll content of different tea varieties under different nitrogen levels

BHZ 的叶绿素 a/b(Chla/b)均比对照极显著降低,施氮 FD 的 Chla/b 虽然也比对照不同程度降低,但未达到显著水平(图 1,D;  $P>0.05$ )。可见,各品种茶树叶片 Chla 含量、Chlb 含量、叶绿素总量均以  $N_2$  处理下最高,在高氮水平处理( $N_3$ )下反而有所下降,Chla/b 则以  $N_2$  处理最低。

2.3 不同施氮水平对茶树叶片光合特性的影响

表 2 显示,随着施氮量的增加,3 个茶树品种的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )均呈现先升高后降低的变化趋势,且均在  $N_2$  处理时达到峰值。在  $N_2$  处理后,FD、HJ1、BHZ 的  $P_n$  分别较相应对照极显著增加 25.7%、33.3%、9.5%, $T_r$  分别增加 13.3%、48.4%和 5.3%,且 FD、HJ1 均达到极显著水平, $G_s$  分别增加 31.1%、41.7%和 5.1%。同时,3 个茶树品种的胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )随着施氮量的增加均呈先降后升的趋势,且均在  $N_1$  处理下最低,此时 3 个品种 FD、HJ1、BHZ 较对照分别显著降低 10.6%、6.7%、7.1%。另外,随着施氮量的增加,3 个茶树品种的水分利用率(WUE)变化趋势不一致。其中,FD 的 WUE 仅在  $N_2$  处理下显著高于对照,其余处理与对照差异不显著;HJ1 的 WUE 则随施氮量的增加呈逐渐显著下降趋势, $N_3$  处理极显著低于对照 12.5%;BHZ 的 WUE 在各处理下均较对照差异不显著。以上结果说明适量

施氮能提高茶树光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ ),降低胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ ),并均以  $N_2$  处理后效果最明显,茶树的水分利用率各品种表现不一致,具有品种特异性。

2.4 施氮水平对茶树叶片叶绿素荧光参数的影响

PS II 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )反映了 PS II 反应中心的原初光能转化效率。图 2 结果表明,与对照相比较,3 个茶树品种的  $F_v/F_m$  随着施氮量的增加均呈现先升高后降低的趋势,与 3 个品种的净光合速率及叶绿素含量等参数的表现相一致,且以  $N_2$  处理的值最高,此时 FD、HJ1、BHZ 3 品种的  $F_v/F_m$  较对照分别提高 2.4%、3.4%、4.3%,但各处理与对照间差异均未达到显著性水平。同时,随着施氮量增加,3 个茶树品种光化学淬灭系数( $qP$ )和 PS II 相对电子传递速率( $rETR$ )亦呈现先升高后降低的趋势,且均不同程度地高于对照,且 BHZ 在  $N_1$  处理的  $qP$ ,以及 HJ1 的  $N_2$  处理、BHZ 的  $N_1$ 、 $N_2$  处理的  $rETR$  均与对照差异达到显著水平。另外,随着施氮量的增加,3 个茶树品种非光化学淬灭系数(NPQ)较对照均不同程度降低,其中 HJ1 的  $N_2$ 、 $N_3$  处理与相应对照差异均达到显著水平。以上结果说明茶树的  $F_v/F_m$ 、 $qP$ 、 $rETR$  在  $N_2$  处理下增加最多,而施氮后茶树 NPQ 降低,表明施氮后各茶树的热耗散降低,光能利用率增加,与生长势、光合速率的

表 2 不同施氮水平下各品种茶树光合参数的变化

Table 2 The photosynthetic parameters of different tea varieties under different nitrogen levels

| 品种<br>Variety | 处理<br>Treatment | 净光合速率<br>$P_n$<br>$/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | 气孔导度<br>$G_s$<br>$/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | 胞间 $\text{CO}_2$ 浓度<br>$C_i$<br>$/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$ | 蒸腾速率<br>$T_r$<br>$/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | 瞬时水分利用率<br>$WUE$<br>$/(\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1})$ |
|---------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| FD            | $N_0$ (CK)      | $10.02 \pm 0.16$                                                             | $0.132 \pm 0.03$                                                         | $259.89 \pm 0.43$                                                        | $5.17 \pm 0.02$                                                           | $1.94 \pm 0.01$                                            |
|               | $N_1$           | $10.62 \pm 0.01^{**}$                                                        | $0.133 \pm 0.01^{**}$                                                    | $232.27 \pm 0.09^{**}$                                                   | $5.58 \pm 0.01^{**}$                                                      | $1.90 \pm 0.01$                                            |
|               | $N_2$           | $12.60 \pm 0.18^{**}$                                                        | $0.173 \pm 0.01^{**}$                                                    | $232.55 \pm 0.22^{**}$                                                   | $5.86 \pm 0.02^{**}$                                                      | $2.19 \pm 0.05^{**}$                                       |
|               | $N_3$           | $10.20 \pm 0.19$                                                             | $0.141 \pm 0.02^{**}$                                                    | $233.13 \pm 0.17^{**}$                                                   | $4.94 \pm 0.01^{**}$                                                      | $2.03 \pm 0.19$                                            |
| HJ1           | $N_0$ (CK)      | $9.50 \pm 0.24$                                                              | $0.127 \pm 0.03$                                                         | $241.37 \pm 0.59$                                                        | $4.75 \pm 0.03$                                                           | $2.00 \pm 0.01$                                            |
|               | $N_1$           | $10.61 \pm 0.16^{**}$                                                        | $0.128 \pm 0.01$                                                         | $225.21 \pm 0.25^*$                                                      | $5.41 \pm 0.26^{**}$                                                      | $1.95 \pm 0.03^*$                                          |
|               | $N_2$           | $12.66 \pm 0.17^{**}$                                                        | $0.180 \pm 0.01^{**}$                                                    | $232.28 \pm 0.24$                                                        | $7.05 \pm 0.02^{**}$                                                      | $1.79 \pm 0.03^{**}$                                       |
|               | $N_3$           | $11.12 \pm 0.11^{**}$                                                        | $0.234 \pm 0.02^{**}$                                                    | $237.73 \pm 0.69$                                                        | $6.32 \pm 0.25^{**}$                                                      | $1.75 \pm 0.05^{**}$                                       |
| BHZ           | $N_0$ (CK)      | $11.15 \pm 0.06$                                                             | $0.136 \pm 0.01$                                                         | $238.28 \pm 0.20$                                                        | $6.18 \pm 0.04$                                                           | $1.80 \pm 0.01$                                            |
|               | $N_1$           | $11.47 \pm 0.02^{**}$                                                        | $0.174 \pm 0.01^{**}$                                                    | $221.47 \pm 0.68^{**}$                                                   | $6.50 \pm 0.03$                                                           | $1.76 \pm 0.01$                                            |
|               | $N_2$           | $12.21 \pm 0.01^{**}$                                                        | $0.143 \pm 0.01^{**}$                                                    | $223.29 \pm 0.96^{**}$                                                   | $6.51 \pm 0.16$                                                           | $1.88 \pm 0.13$                                            |
|               | $N_3$           | $10.96 \pm 0.05^{**}$                                                        | $0.137 \pm 0.01^{**}$                                                    | $232.94 \pm 0.61^{**}$                                                   | $6.09 \pm 0.17$                                                           | $1.79 \pm 0.19$                                            |

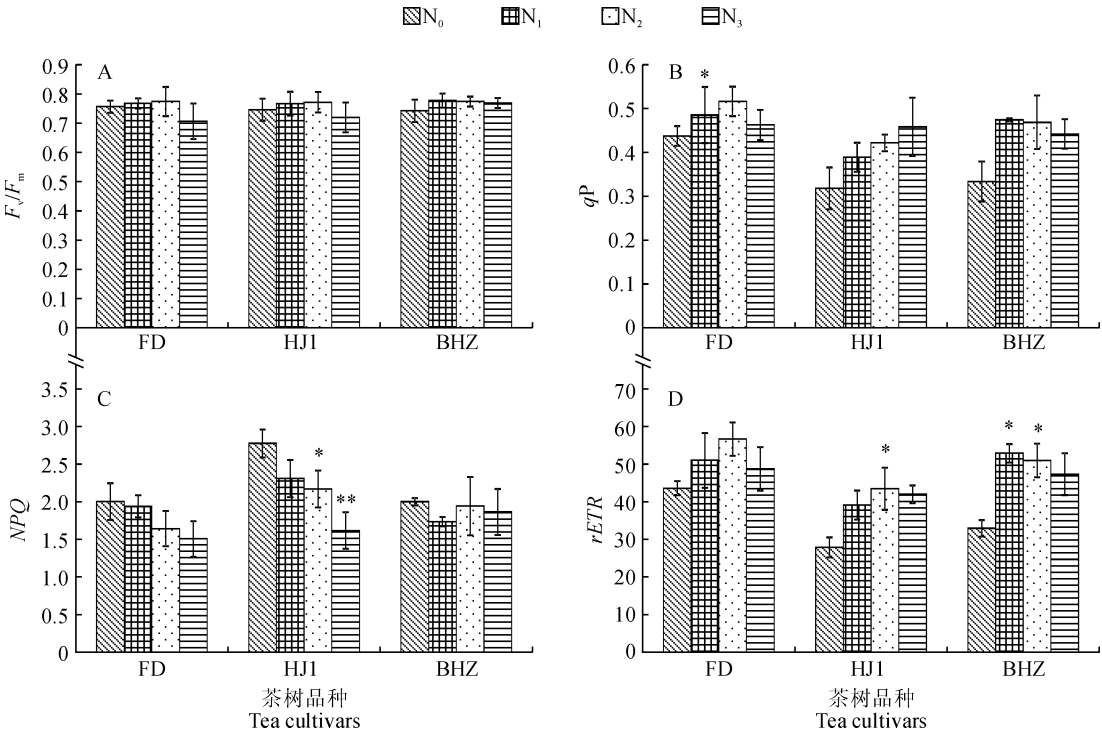


图 2 不同施氮水平下茶树叶绿素荧光参数的变化

Fig. 2 The chlorophyll fluorescence parameters of different tea varieties under different nitrogen levels

结果一致。

2.5 施氮条件下茶树叶片叶绿素含量与光合参数的相关性

各茶树叶片叶绿素含量与其光合参数间存在着一定的正相关关系,但此相关性存在品种特异性(表

3)。其中,FD 的各叶绿素含量及其比例与  $C_i$  均呈显著的正相关关系,相关系数均大于 0.9;HJ1 的叶绿素含量与  $P_n$ 、 $T_r$  的正相关系数均大于 0.8,其中的 Chlb 含量与  $T_r$  显著正相关;而 BHZ 的叶绿素含量与光合参数  $C_i$  虽然呈较好的正相关关系,但均未

表 3 各茶树品种叶绿素含量与光合参数的相关性

| 品种<br>Variety | 叶绿素<br>Chlorophyll | 净光合速率 $P_n$ | 气孔导度 $G_s$ | 胞间 $CO_2$ 浓度 $C_i$ | 蒸腾速率 $T_r$ |
|---------------|--------------------|-------------|------------|--------------------|------------|
| FD            | Chla               | 0.508       | 0.539      | 0.973 *            | 0.282      |
|               | Chlb               | 0.483       | 0.502      | 0.983 *            | 0.281      |
|               | Chl(a+b)           | 0.467       | 0.487      | 0.983 *            | 0.266      |
|               | Chla/b             | 0.478       | 0.548      | 0.987 *            | 0.360      |
| HJ1           | Chla               | 0.827       | 0.728      | 0.460              | 0.872      |
|               | Chlb               | 0.932       | 0.682      | 0.435              | 0.952 *    |
|               | Chl(a+b)           | 0.901       | 0.587      | 0.573              | 0.897      |
|               | Chla/b             | 0.873       | 0.604      | 0.577              | 0.879      |
| BHZ           | Chla               | 0.237       | 0.488      | 0.743              | 0.372      |
|               | Chlb               | 0.290       | 0.804      | 0.878              | 0.602      |
|               | Chl(a+b)           | 0.313       | 0.733      | 0.873              | 0.575      |
|               | Chla/b             | 0.341       | 0.660      | 0.832              | 0.508      |

达到显著水平。

3 讨 论

氮素是植物需求量最大的矿质营养元素之一。施氮有利于增加植物叶片的叶绿素含量,增强净光合速率,从而提高产量<sup>[10-11,22]</sup>。本研究结果表明适量施氮能提高茶树叶片的叶绿素含量、净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ ),降低胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ ),从而能显著促进茶树生长,与袁昌洪等<sup>[11]</sup>、罗凡等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。其中,本试验结果还表明施铵态氮后茶树叶片 Chlb 含量极显著提高,并且是叶绿素总量增加的主要原因,这主要是在一定的土壤含水量条件下,施加铵态氮能有效增加叶绿素 b 含量<sup>[24]</sup>。同时,本研究发现与 CK 比较,氮处理后的各品种茶树  $P_n$ 、 $qP$ 、 $T_r$  均有所提高,但  $C_i$  总体上反而呈下降趋势,这可能是由于在叶肉细胞叶绿素含量增加的同时,叶肉细胞光合活性增强、 $G_s$  增加和叶肉细胞羧化能力提高共同作用使得茶树叶片  $P_n$  的升高,并在外界  $CO_2$  保持稳定的情况下,导致了  $C_i$  的下降<sup>[10,25]</sup>。但随着施氮量的继续增加, $P_n$  反而下降,这有可能是由于叶肉叶绿素含量下降,叶肉光合活性减弱, $G_s$  下降以及叶肉细胞的羧化能力变化共同作用导致的结果。据报道,水稻在高氮条件下光合氮素利用率降低的主要原因其一是高氮致使 Rubisco 酶活性降低,其二是高氮条件下气孔开放程度相对较低<sup>[26]</sup>,高氮下茶树  $P_n$  下降的机制仍有待进一步研究。本研究结果表明,茶树水分利用率存在品种间差异,施氮能提高‘福鼎大白

茶’的水分利用率,降低了‘保靖黄金茶 1 号’的水分利用率,但对‘白毫早’的水分利用率影响较小,且各施氮肥处理水分利用率与对照均无显著差异;其中,‘保靖黄金茶 1 号’的水分利用率在施氮后降低,有可能是由于施氮处理促进‘保靖黄金茶 1 号’净光合速率显著增强,生长势显著增加,以及蒸腾速率增加,从而使得水分利用率降低。

叶绿素荧光参数可以反映光合作用光系统对光能的吸收、传递、耗能等情况<sup>[27]</sup>,通过对叶绿素荧光参数的研究可以了解植物受养分、干旱等胁迫后的生理状况<sup>[28]</sup>。 $F_v/F_m$  代表了 PSⅡ 的最大光化学效率,能反映植物对光能的利用效率,是反映植物在胁迫条件下光合作用受抑制程度的理想指标,其在非胁迫条件下较稳定,而在胁迫条件下会明显下降<sup>[29,30]</sup>。 $F_v/F_m$  在正常生长环境下一一般在 0.80~0.85 之间,本研究发现,未施氮处理、高氮处理的  $F_v/F_m$  较低,适当施氮处理  $F_v/F_m$  接近 0.8,但各处理间无显著性差异,这有可能是由于未施氮处理、高氮处理使茶树 PSⅡ 的潜在活性中心受损,抑制了光合作用的原初反应过程,从而影响了光合电子从 PSⅡ 反应中心向库源的传递过程,导致了  $F_v/F_m$  降低<sup>[31]</sup>。非光化学淬灭系数( $NPQ$ )反映了以热的形式耗散掉的光能部分,是 PSⅡ 的一种自我保护能力。本实验中 3 个品种茶树施氮处理  $NPQ$  较对照降低,其中‘保靖黄金茶 1 号’的  $N_2$ 、 $N_3$  处理还显著降低( $P<0.05$ ),证明适量施肥能降低‘保靖黄金茶 1 号’的热耗散,提高其光能利用效率,这与其净光合率的表现结果一致。各品种茶树 PSⅡ 的相对电

子传递速率( $rETR$ )和  $qP$  随着施氮量增加亦呈现出先增加后降低的趋势,这与尹海龙等<sup>[32]</sup>的研究结果一致。另外,本研究通过茶树叶片叶绿素含量与光合参数的相关性分析发现,二者存在着一定的联系,并具有品种特异性。

综上所述,氮素营养对各茶树的光合作用及叶绿素荧光特性的影响程度存在品种差异,从叶绿素荧光参数结果可知不同茶树品种的氮素利用率存在

差异,氮素营养对品种‘白毫早’的影响较小,对‘保靖黄金茶 1 号’的影响较大。同时,茶树的水分利用率亦具有品种特异性,3 个茶树品种中以‘福鼎大白茶’、‘白毫早’抗旱性较强,‘保靖黄金茶 1 号’稍弱。因此,综合叶绿素含量、光合作用参数、叶绿素荧光参数能够快速、直观地评价不同茶树品种对氮素营养的内在需求,为提高不同品种茶树氮素利用率提供科学的指导。

参考文献:

[1] WANG Y, FU D L, PAN L L, *et al.* The coupling effect of water and fertilizer on the growth of tea plants [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntz][J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2016,**39**(5): 620-627.

[2] XUE D, YAO H Y, HUANG C Y. Microbial biomass, N mineralization and nitrification, enzyme activities, and microbial community diversity in tea orchard soils[J]. *Plant & Soil*, 2006,**288**(1-2): 319-331.

[3] 王新超,杨亚军,陈 亮,等. 利用<sup>15</sup>N 标记研究不同品种茶树氮肥利用率差异[J]. 福建茶叶, 2005, (1): 4-5.

WANG X C, YANG Y J, CHEN L, *et al.* Studies on N fertilizer-utilizing efficiency of different tea varieties by using <sup>15</sup>N-tracing method[J]. *Tea in Fujian*, 2005, (1): 4-5.

[4] DU X H, PENG F R, JIANG J, *et al.* Inorganic nitrogen fertilizers induce changes in ammonium assimilation and gas exchange in *Camellia sinensis* L[J]. *Turkish Journal of Agriculture & Forestry*, 2015, 39: 28-38.

[5] 杨亚军. 中国茶树栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005.

[6] 余海云. 茶树不同冠层叶片光合作用特性及其季节变化特性的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.

[7] 王 帅, 韩晓日, 战秀梅, 等. 不同氮肥水平下玉米光响应曲线模型的比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(6): 1 403-1 412.

WANG S, HAN X R, ZHAN X M, *et al.* The comparative study on fitting light response curve model of photosynthesis of maize under different nitrogen fertilizer levels[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(6): 1 403-1 412.

[8] LIN Z H, ZHONG Q S, CHEN C S, *et al.* Carbon dioxide assimilation and photosynthetic electron transport of tea leaves under nitrogen deficiency [J]. *Botanical Studies*, 2016, **57** (1): 37.

[9] 游小妹, 陈常颂, 钟秋生, 等. 不同用氮量水平对乌龙茶产量、品质的影响[J]. 福建农业学报, 2012, **27**(8): 853-856.

YOU X M, CHEN C S, ZHONG Q S, *et al.* Preliminary study on effects of nitrogen fertilization on yield and quality of Oolong Tea [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2012, **27**(8): 853-856.

[10] 吴志丹, 尤志明, 王 峰, 等. 施氮量对茶树生长及叶片光合

特性的影响[J]. 茶叶科学技术, 2014, (4): 16-20.

WU Z D, YOU Z M, WANG F, *et al.* Effect of nitrogen application rate on the growth and leaf photosynthetic characteristics of tea[J]. *Tea Science and Technology*, 2014, (4): 16-20.

[11] 袁昌洪, 韩 冬, 杨 菲, 等. 氮肥对茶树春季光合、抗衰老特性及内源激素含量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, **40**(5): 67-73.

YUAN C H, HAN D, YANG F, *et al.* Effects of nitrogen fertilization level in soil on physiological characteristics and quality of tea leaves[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2016, **40**(5): 67-73.

[12] 耿东梅, 单立山, 李 毅, 等. 土壤水分胁迫对红砂幼苗叶绿素荧光和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物学报, 2014, **49**(3): 282-291.

GENG D M, SHAN L S, LI Y, *et al.* Effect of soil water stress on chlorophyll fluorescence and antioxidant enzyme activity in *Reaumuria soongorica* seedlings[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2014, **49**(3): 282-291.

[13] 李庆会, 徐 辉, 周 琳, 等. 低温胁迫对 2 个茶树品种叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2015, (2): 26-31.

LI Q H, XU H, ZHOU L, *et al.* Effect of low temperature stress on chlorophyll fluorescence characteristics in leaf of two cultivars of *Camellia sinensis* [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2015, (2): 26-31.

[14] 钟秋生, 林郑和, 陈常颂, 等. 不同浓度氟对茶树幼苗叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2014, (6): 576-583.

ZHONG Q S, LIN Z H, CHEN C S, *et al.* Effects of fluoride stress on chlorophyll fluorescence in leaves of tea seedlings [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2014, (6): 576-583.

[15] 向 芬, 李 维, 刘红艳, 等. 茶树叶绿素测定方法的比较研究[J]. 茶叶通讯, 2016, **43**(4): 37-40.

XIANG F, LI W, LIU H Y, *et al.* Comparison on methods of chlorophyll extraction in *Camellia sinensis* [J]. *Journal of Tea Communication*, 2016, **43**(4): 37-40.

[16] 赵先明, 汪艳霞, 杜 晓, 等. 茶叶叶绿素混合液浸提法提取

- 条件优化[J]. 西南农业学报, 2011, **24**(4): 1 303-1 308.
- ZHAO X M, WANG Y X, DU X, *et al.* Optimization of mixture extraction condition for chlorophyll from tea[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, **24**(4): 1 303-1 308.
- [17] 申文辉,李志辉,彭玉华,等. 格木不同种源光合作用光响应分析研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, **34**(6): 13-18.
- SHEN W H, LI Z H, PENG W H, *et al.* Light response of photosynthesis of different provenance *Erythrophleum fordii* oilv[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, **34**(6): 13-18.
- [18] CUDDY W S, SUMMERELL B A, GEHRINGER M M, *et al.* Nostoc, microcoleus and leptolyngbya inoculums are detrimental to the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress[J]. *Plant & Soil*, 2013, **370**(1-2): 317-332.
- [19] KOOTEN V O, SNEL J F. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology[J]. *Photosynth Res*, 1990, **25**(3): 147-50.
- [20] SU L Y, DAI Z W, LI S H, *et al.* A novel system for evaluating drought-cold tolerance of grapevines using chlorophyll fluorescence[J]. *BMC Plant Biology*, 2015, **15**(1): 82.
- [21] 唐 玲,李倩中,荣立苹,等. 盐胁迫对鸡爪槭幼苗生长及其叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报, 2015, **35**(10): 2 050-2 055.
- TANG L, LI Q Z, RONG L P, *et al.* Effects of salt stress on the growth and leaf chlorophyll fluorescence in *Acer palmatum* seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, **35**(10): 2 050-2 055.
- [22] 魏花朵,李 悦,陈忠林,等. 氮肥对镉胁迫下结缕草光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015, (4): 88-92.
- WEI H D, LI Y, CHEN Z L, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on photosynthetic and fluorescent characteristics of *Zoysia japonica* under cadmium stress[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2015, (4): 88-92.
- [23] 罗 凡,张 厅,龚雪蛟,等. 不同施肥方式对茶树新梢氮磷钾含量及光合生理的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(12): 3 499-3 506.
- LUO F, ZHANG T, GONG X J, *et al.* Effects of different fertilization ways on the contents of N, P, K in new shoots and photo-biological characters of tea tree[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(12): 3 499-3 506.
- [24] 吕豪豪,马晓东,张瑞群,等. 水分胁迫下不同氮素对多枝桂柳幼苗生长及生理的影响[J]. 草业学报, 2016, **25**(9): 54-63.
- LÜ H H, MA X D, ZHANG R Q, *et al.* Effects of different forms of nitrogen on the growth and physiology of *Tamarix ramosissima* seedlings under water stress[J]. *Acta Pratacul-turae Sinica*, 2016, **25**(9): 54-63.
- [25] 陈根云,陈 娟,许大全. 关于净光合速率和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度关系的思考[J]. 植物生理学通讯, 2010, **46**(1): 64-66.
- CHEN G Y, CHEN J, XU D Q. Thinking about the relationship between net photosynthetic rate and intercellular CO<sub>2</sub> concentration[J]. *Plant Physiology Communications*, 2010, **46**(1): 64-66.
- [26] 李 勇. 氮素营养对水稻光合作用与光合氮素利用率的影响机制研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- [27] 李 强,罗延宏,余东海,等. 低氮胁迫对耐低氮玉米品种苗期光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(5): 1 132-1 141.
- LI Q, LUO Y H, YU D H, *et al.* Effect of low nitrogen stress on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of maize cultivars tolerant to low nitrogen stress at the seedling stage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(5): 1 132-1 141.
- [28] 王 菲,曹翠玲. 磷水平对不同磷效率小麦叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(3): 758-762.
- WANG F, CAO C L. Effects of phosphorus levels on chlorophyll fluorescence parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.) with different phosphorus efficiencies[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, **16**(3): 758-762.
- [29] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, (4): 444-448.
- ZHANG S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, (4): 444-448.
- [30] 郝兴宇,韩 雪,李 萍,等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对绿豆叶片光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(10): 2 776-2 780.
- HAO X Y, HAN X, LI P, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on mung bean leaf photosynthesis and Chlorophyll fluorescence parameters[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(10): 2 776-2 780.
- [31] 白志英,李存东,赵金锋,等. 干旱胁迫对小麦代换系叶绿素荧光参数的影响及染色体效应初步分析[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(1): 47-57.
- BAI Z Y, LI C D, ZHAO J F, *et al.* Effect and preliminary analysis of chromosomal control on the chlorophyll fluorescence parameters of wheat substitution lines between synthetic hexaploid wheat and chinese spring under drought stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, **44**(1): 47-57.
- [32] 尹海龙,田长彦. 氮调控对盐环境下甜菜功能叶光系统Ⅱ荧光特性的影响[J]. 植物生态学报, 2013, **37**(2): 122-131.
- YIN H L, TIAN C Y. Effects of nitrogen regulation on photosystemⅡ chlorophyll fluorescence characteristics of functional leaves in sugar beet (*Beta vulgaris*) under salt environment [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, **37**(2): 122-131.

(编辑:裴阿卫)