

赵桂茹,李世琛,丁晓瑶,等.不同烤烟主栽品种光合特性差异及其对氮利用效率的影响[J].江苏农业学报,2026,42(5):940-951.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2026.05.008

不同烤烟主栽品种光合特性差异及其对氮利用效率的影响

赵桂茹¹, 李世琛^{1,2}, 丁晓瑶¹, 张涛¹, 罗德香¹, 蒋骏¹, 杨德海³, 彭仁³, 赵正雄¹
(1.云南农业大学农学与生物技术学院,云南昆明650201; 2.云南省烟草公司昆明市石林分公司,云南昆明652200;
3.红塔烟草(集团)有限责任公司大理卷烟厂,云南大理671000)

摘要: 为明确烟草叶片光合作用参数与烟草氮素利用效率的关系,本研究以氮高效利用烟草品种红花大金元与氮低效利用品种 K326 为试验材料,设置每袋 0 g(CK)、4 g(T1)、8 g(T2) 3 个施氮水平,分析不同施氮处理对烟草叶片关键生育期光合参数的影响及光合参数与氮素利用效率的关系。结果表明,随着施氮量增加,2 个烟草品种团棵期和旺长期光响应曲线最大净光合速率($P_{\max,L}$)总体无显著变化,现蕾期、下部叶成熟期和中部叶成熟期红花大金元 $P_{\max,L}$ 先增加后减少,而 K326 $P_{\max,L}$ 先减少后增加,2 个品种生长后期表观量子效率总体呈减少趋势。现蕾期、下部叶成熟期和中部叶成熟期 T1 处理红花大金元 $P_{\max,L}$ 显著高于 K326,而 CK 和 T2 处理红花大金元 $P_{\max,L}$ 总体显著低于 K326。旺长期和现蕾期 T1 处理红花大金元光饱和点显著低于 K326,而下部叶成熟期和中部叶成熟期 T1 处理红花大金元光饱和点高于 K326。团棵期和旺长期 T2 处理红花大金元光饱和点显著高于 K326,而下部叶成熟期和中部叶成熟期 T2 处理红花大金元光饱和点低于 K326。T2 处理下,旺长期~中部叶成熟期红花大金元叶片氮积累量比 K326 显著增加 9.51%~68.39%,红花大金元整株氮积累量比 K326 显著增加 4.30%~49.81%;现蕾期~中部叶成熟期红花大金元氮素生产效率比 K326 显著增加。叶片氮分配指数主要受 CO_2 响应曲线拟合的最大净光合速率和光饱和点正向调控,受光补偿点负向调控;氮素生产效率主要受光饱和点和表观量子效率正向调控,受暗呼吸速率负向调控。本研究结果为烟草氮素高效利用的定向栽培策略制定提供了依据。

关键词: 烤烟; 光合特性; 氮素利用效率

中图分类号: S572;TQ447.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2026)05-0940-12

Differences in photosynthetic characteristics of different flue-cured tobacco cultivars and their effects on nitrogen use efficiency

ZHAO Guiru¹, LI Shichen^{1,2}, DING Xiaoyao¹, ZHANG Tao¹, LUO Dexiang¹, JIANG Tao¹, YANG Dehai³, PENG Ren³, ZHAO Zhengxiong¹

(1. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Shilin Branch of Kunming Company, Yunnan Tobacco Company, Kunming 652200, China; 3. Dali Cigarette Factory, Hongta Tobacco (Group) Co., Ltd., Dali 671000, China)

Abstract: To clarify the relationship between photosynthetic parameters of tobacco leaves and nitrogen use efficiency

收稿日期: 2025-04-16

基金项目: 红塔烟草(集团)有限责任公司科技计划项目(2020YL03); 云南省基础研究专项(202401AU070082); 云南省农业联合专项面上项目(202401BD070001-049)

作者简介: 赵桂茹(1989-),女,云南昆明人,博士,讲师,主要从事作物栽培与生态学研究。(E-mail)704136137@qq.com

通讯作者: 赵正雄, (E-mail)zhaozx0801@163.com

of tobacco, this study used Honghuadajinyuan, a tobacco cultivar with high nitrogen use efficiency, and K326, a cultivar with low nitrogen use efficiency. Three nitrogen levels of 0 g (CK), 4 g (T1) and 8 g (T2) per pot were set to analyze the effects of different nitrogen treatments on photosynthetic parameters of tobacco leaves at key growth stages and the relationship between photosynthetic parameters

ters and nitrogen use efficiency. The results showed that there was no significant change in the maximum net photosynthetic rate ($P_{\max,L}$) derived from the light response curves of the two tobacco cultivars at the rosette stage and the fast growing stage with the increase of nitrogen (N) application rate. The $P_{\max,L}$ of Honghuadajinyuan increased first and then decreased at the budding stage, the lower leaf maturity stage and the middle leaf maturity stage, while the $P_{\max,L}$ of K326 decreased first and then increased. The apparent quantum efficiency of the two cultivars in the late growth stage showed a decreasing trend. The $P_{\max,L}$ of Honghuadajinyuan under T1 treatment was significantly higher than that of K326 at squaring stage, lower leaf maturity stage and middle leaf maturity stage, while the $P_{\max,L}$ of Honghuadajinyuan under CK and T2 treatment was significantly lower than that of K326. In the fast growing stage and squaring stage, the light saturation point of Honghuadajinyuan was significantly lower than that of K326 under T1 treatment, while the light saturation point of Honghuadajinyuan was higher than that of K326 under T1 treatment in lower leaf maturity stage and middle leaf maturity stage. In the rosette stage and the fast growing stage, the light saturation point of Honghuadajinyuan treated with T2 was significantly higher than that of K326, while at the lower leaf maturity stage and middle leaf maturity stage, the light saturation point of Honghuadajinyuan treated with T2 was lower than that of K326. Under T2 treatment, the leaf nitrogen accumulation of Honghuadajinyuan was 9.51%–68.39% higher than that of K326 from vigorous growth stage to middle leaf maturity stage, and the nitrogen accumulation per plant of Honghuadajinyuan was 4.30%–49.81% higher than that of K326. The nitrogen production efficiency of Honghuadajinyuan was significantly higher than that of K326 from squaring stage to middle leaf maturity stage. The leaf nitrogen distribution index was mainly positively regulated by the maximum net photosynthetic rate and light saturation point fitted by the CO_2 response curve, and negatively regulated by the light compensation point. Nitrogen production efficiency was mainly positively regulated by light saturation point and apparent quantum efficiency, and negatively regulated by dark respiration rate. The results of this study provide a basis for the formulation of targeted cultivation strategies for efficient nitrogen utilization in tobacco.

Key words: flue-cured tobacco; photosynthetic characteristics; nitrogen use efficiency

烤烟是中国重要的经济作物之一,在国民经济体系中占据重要地位^[1]。氮素是烤烟生长所需的大量元素之一,对烤烟植株器官形成及干物质积累具有显著的调控作用^[2]。目前烤烟生产中普遍存在氮肥过量施用现象^[3],这不仅导致烤烟生产成本增加与氮素利用效率(NUE)降低,还引发烤烟种植区土壤酸化、硝态氮淋溶等环境风险^[4]。因此,解析烤烟品种间氮利用效率差异机制,建立基于生理机制的节氮增效策略,已成为烤烟产业可持续发展的关键问题。不同烤烟品种氮素利用效率存在显著差异。同等供氮条件下,烤烟品种红花大金元的干物质积累量与氮素吸收量显著高于 K326^[5-8]。官宇等^[9]的研究结果表明,红花大金元具有更强的光能捕获效率,其碳同化速率比 K326 增加 12%~18%;余凌翔等^[10]研究发现,红花大金元的光系统II实际光化学量子效率显著高于 K326。上述结果说明光合代谢水平可能是不同烟草品种氮素利用效率差异的重要原因,但具体作用机理尚缺乏系统分析。

光合作用是植物能量代谢的基础过程,涉及光能捕获、电子传递及碳同化等复杂的生理生化过程^[11-12]。目前,光合系统关键参数(如暗呼吸速率、

表观量子效率等)在作物光合代谢中的作用已有初步分析。暗呼吸速率反映作物植株基础代谢强度,适度提升可加速能量周转、促进生长^[13-15],但过高的暗呼吸速率会导致同化物净积累量下降^[16-17]。表观量子效率表征作物植株对弱光的利用能力,其与小麦干物质积累量呈显著正相关^[18-19]。光响应曲线中光饱和点、光补偿点参数与 CO_2 响应曲线中 CO_2 饱和点、 CO_2 补偿点参数共同决定作物对光资源和 CO_2 的利用阈值^[20-21]。植物叶片最大净光合速率对油菜^[22]、小麦^[23]等作物的氮素利用效率正向调控机制亦得到初步研究。目前烤烟生长中,光合系统参数对其氮素利用效率的影响机制尚未明确。

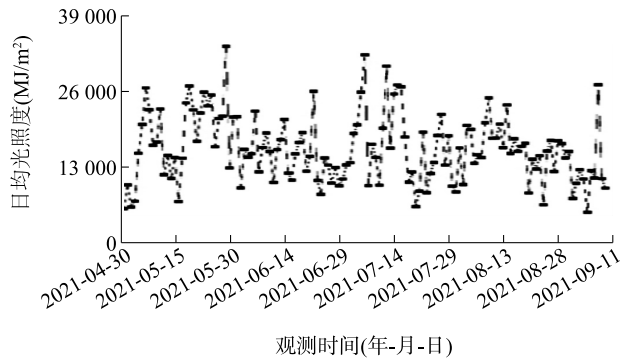
作物的氮素吸收与同化、干物质合成均需要消耗大量能量^[24]。在相同氮素环境下,氮高效品种比氮低效品种具有更强的光合能力,能吸收更多的氮素、合成更多的干物质,但其原因与机理尚不清楚。因此,本研究拟选择氮高效型烤烟品种红花大金元和氮低效型烤烟品种 K326^[7,25-26],设置不同的施氮处理,测定不同生育期(团棵期、旺长期、现蕾期、下部叶成熟期、中部叶成熟期)的叶片光合特性相关参数,利用逐步回归方法分析光合作用参数对烤烟

氮素利用效率的影响机制,解析红花大金元氮高效的光合生理机制,为烤烟精准施氮提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在云南省大理州永平县博南镇(99.5°E,



25.4°N)开展。试验地海拔1 536.5 m,土壤类型为水稻土,有机质含量 36.6 g/kg,全氮含量 2.0 g/kg,全磷含量 0.8 g/kg,全钾含量 17.9 g/kg,速效氮含量 233.1 mg/kg,速效磷含量 49.3 mg/kg,速效钾含量 236.0 mg/kg。试验期间日均光照度和日均气温的变化特征如图 1 所示。

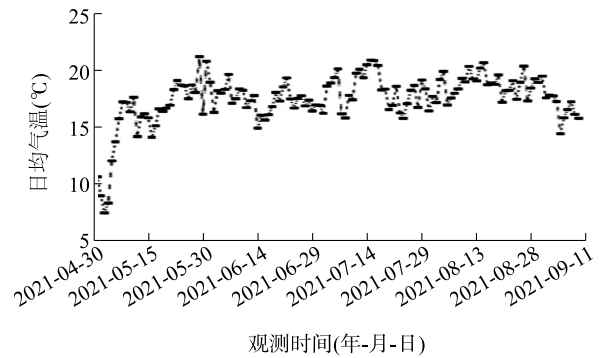


图 1 烤烟生育期间日均光照度和日均温度变化

Fig.1 Changes in daily average light intensity and temperature during tobacco growth period

1.2 试验设计

本研究选择氮高效利用品种红花大金元与氮低效利用品种 K326^[5-8]进行生长试验。2021年1月20日,在大理白族自治州烟草公司永平分公司采用漂浮育苗的方式进行育苗。移栽前,取稻田土壤干燥后过筛装入高 25 cm、直径 24 cm 的假植袋,每袋装土 15 kg。以不施氮为对照(CK),设 2 个施 N 量处理:每袋 4 g(T1)、8 g(T2)。3 个处理磷肥、钾肥用量保持一致。施 N 处理氮、磷、钾比例 1.0 : 1.0 : 2.5。研究中以 N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 15%、10%、22%的烟草专用肥为基础肥料,以 P₂O₅ 含量为 16%的普钙、K₂O 含量为 52%的硫酸钾为补充。将土壤与肥料混合均匀后备用,每处理 24 盆。当烟苗生长至 7 片真叶时(2021 年 4 月 30 日),将烟苗移栽至花盆中,每盆 1 株烟苗,按 1 hm² 16 500 株的种植密度进行摆放,行距 110 cm,株距 55 cm。根据天气与烟株水分需求对烟株进行浇灌,确保土壤湿润,处于适宜烤烟生长的状态(土壤含水量约为田间持水量的 70%),其他农艺措施与病虫害管理参考当地优质烟叶生产管理要求进行。

1.3 样品采集与测定方法

在烤烟团棵期、旺长期、现蕾期、下部叶成熟期、中部叶成熟期(分别为移栽后 25 d、50 d、75 d、100 d、125 d),2 个品种每处理中随机选取代表性烟株 3

株,分别进行烟草植株叶片、根、茎等器官干物质量与总氮含量的测定。每重复 1 株。

同样于烟草团棵期、旺长期、现蕾期、下部叶成熟期、中部叶成熟期,选择晴朗无云天气,2 个品种每处理随机选取 3 株代表性烟株,利用 LI-6400XT 便携式光合作用测定系统(美国 LI-Cor 公司产品)进行叶片光合作用参数测定。在 400 μmol/mol 的 CO₂ 浓度下,设置光照度分别为 0 μmol/(m²·s)、15 μmol/(m²·s)、30 μmol/(m²·s)、60 μmol/(m²·s)、120 μmol/(m²·s)、250 μmol/(m²·s)、500 μmol/(m²·s)、1 000 μmol/(m²·s)、1 500 μmol/(m²·s)、2 000 μmol/(m²·s),测定光响应曲线;在 1 500 μmol/(m²·s) 的光照度下,设置 CO₂ 浓度为 150 μmol/mol、300 μmol/mol、400 μmol/mol、600 μmol/mol、800 μmol/mol、1 000 μmol/mol、1 200 μmol/mol、1 500 μmol/mol、1 800 μmol/mol 测定 CO₂ 响应曲线。

利用光合助手(Photosyn assistant)软件,采用非直角双曲线模型对光响应曲线(公式 1)和 CO₂ 响应曲线(公式 2)进行拟合^[27]。根据光响应曲线拟合结果计算光响应曲线最大净光合速率、表观光量子效率和暗呼吸速率,并根据拟合曲线推算光补偿点和光饱和点;根据 CO₂ 响应曲线拟合结果计算 CO₂ 响应曲线最大净光合速率、初始羧化效率、CO₂ 补偿点和 CO₂ 饱和点,同时结合净光合速率与暗呼吸速

率的关系估算光呼吸速率。烟草叶片光响应曲线、

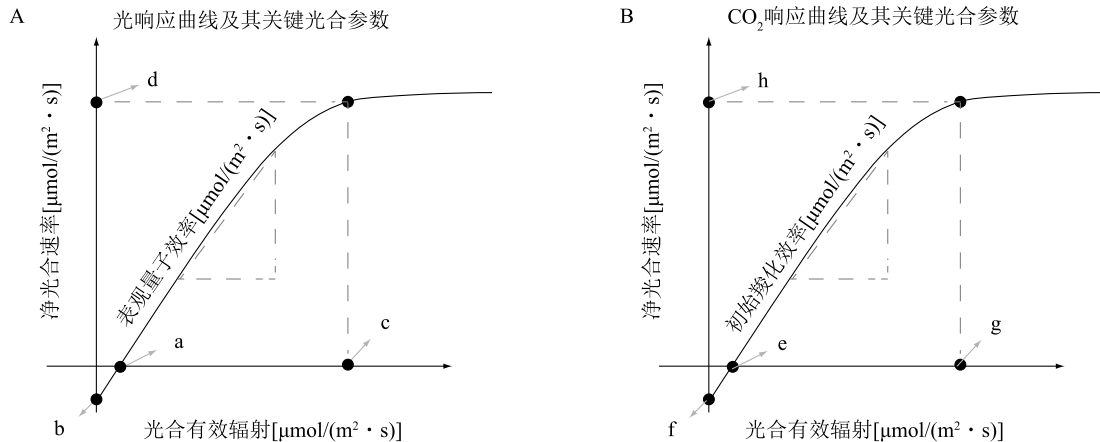
CO₂ 响应曲线及其参数示意图如图 2 所示。

$$P_{n,L} = \frac{\alpha I + P_{\max,L} - \sqrt{(\alpha I + P_{\max,L})^2 - 4\theta\alpha I P_{\max,L}}}{2\theta} - R_d \quad (1)$$

$$P_{n,CO_2} = \frac{\alpha'(C_i - \Gamma^*) + P_{\max,CO_2} - \sqrt{[\alpha'(C_i - \Gamma^*) + P_{\max,CO_2}]^2 - 4\theta\alpha'(C_i - \Gamma^*) P_{\max,CO_2}}}{2\theta} - R'_d \quad (2)$$

公式(1)中, $P_{n,L}$ 为光响应曲线净光合速率, I 为光照度, $P_{\max,L}$ 为光响应曲线最大净光合速率, α 为表观量子效率, R_d 为暗呼吸速率, θ 为曲线曲率因子;公式(2)中, P_{n,CO_2} 为 CO₂ 响应曲线净光合速率,

C_i 为胞间 CO₂ 浓度, Γ^* 为 CO₂ 补偿点, α' 为初始羧化效率, P_{\max,CO_2} 为 CO₂ 响应曲线最大净光合速率, θ 为曲线曲率因子, R'_d 为光呼吸速率。



A: 光响应曲线, a: 光补偿点; b: 暗呼吸速率; c: 光饱和点; d: 最大净光合速率。B: CO₂ 响应曲线, e: CO₂ 补偿点; f: 光呼吸速率; g: CO₂ 饱和点; h: 最大净光合速率。

图 2 叶片光合作用的光响应曲线(A)与 CO₂ 响应曲线(B)及其关键参数

Fig.2 Light-response curve (A) and CO₂-response curve (B) of leaf photosynthesis and their key parameters

1.4 烤烟氮生产效率计算及预测

本研究采用叶片氮分配指数和氮素生产效率作为评价指标,用以表征不同施氮水平下烤烟叶片对氮素的聚集能力及氮素向烟叶生物量转化的生产能力,其计算方法参照文献[28]~[31]:

$$\text{叶片氮分配指数} = \frac{GwN}{Nuptake} \quad (3)$$

$$\text{氮素生产效率} = \frac{Gw}{Nuptake} \quad (4)$$

式中, Gw 为叶片干物质重量; GwN 为叶片氮积累量; $Nuptake$ 为植株总氮。

采用逐步回归方法^[30]筛选显著影响烤烟氮生产效率的光合参数。即利用不同生育期的红花大金元和 K326 的光响应曲线参数(表观量子效率、光响应曲线最大净光合速率、光补偿点、光饱和点、暗呼吸速率)及 CO₂ 响应曲线参数(初始羧化效率、CO₂ 响应曲线最大净光合速率、CO₂ 饱和点、CO₂ 补偿

点、光呼吸速率)与叶片氮素分配指数及氮素生产效率之间的定量关系进行分析。

1.5 数据分析与处理

利用 Excel 软件进行数据统计与分析,利用 SPSS 26.0 软件进行处理间差异显著性分析及逐步回归分析,利用 Origin 2022 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理对烤烟光合作用参数的影响

不同施 N 处理对烤烟光合作用参数的影响如图 3 所示。从图中可以看出,不同施 N 处理下,2 个烟草品种光合特征参数呈现不同的变化特征。移栽初期(团棵期和旺长期),红花大金元光响应曲线拟合的最大净光合速率($P_{\max,L}$)与施 N 量无显著关系,而在现蕾期~中部叶成熟期,中肥处理(T1) $P_{\max,L}$ 显著高于不施肥对照(CK)和高肥处理(T2),而现蕾期~中部叶成熟期,T1 处理 K326 $P_{\max,L}$ 显著

低于 CK 和 T2 处理;不同施肥处理下,2 个品种表现量子效率变化趋势基本一致,现蕾期,随着施 N 量的增加,2 个品种表现量子效率均无显著变化,而在其他时期,随着施 N 量的增加,2 个品种表现量子效率均呈下降趋势。团棵期,2 个品种光饱和点与施 N 量无显著关系;旺长期,T1 处理红花大金元光饱和点显著低于 CK 和 T2 处理,而 T1 处理 K326 光饱和点显著高于 CK 和 T2 处理;中部叶成熟期,T1 处理红花大金元光饱和点显著高于 CK 和 T2 处理,而 T1 处理 K326 光饱和点显著低于 CK 和 T2 处理。现蕾期和下部叶成熟期,2 个品种光补偿点与施 N 量无显著关系;旺长期,红花大金元光补偿点随施 N 量增加而提高,而 T1 处理 K326 光补偿点高于 CK 和 T2 处理;而中部叶成熟期,T1 处理红花大金元光补偿点低于 CK 和 T2 处理,K326 光补偿点随施 N 量增加而提高。随着施 N 量的增加,2 个品种暗呼吸效率总体呈下降趋势。

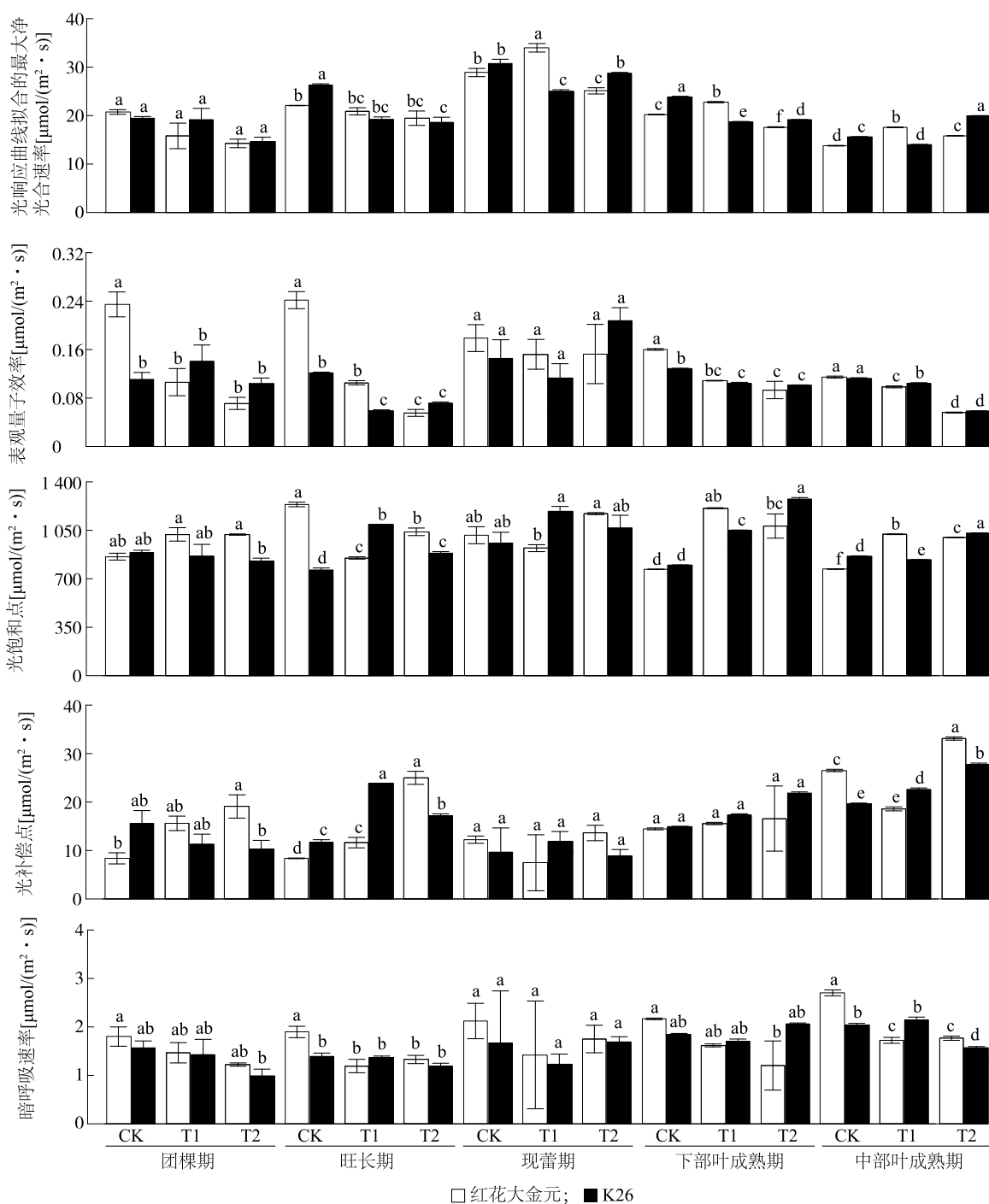
团棵期和旺长期,各处理 2 个品种 $P_{\max,L}$ 差异不大;现蕾期~下部叶成熟期,T1 处理红花大金元 $P_{\max,L}$ 显著高于 K326,而 CK 和 T2 处理红花大金元 $P_{\max,L}$ 总体显著低于 K326;团棵期、旺长期和下部叶成熟期,CK 红花大金元表现量子效率显著高于 K326,旺长期 T1 处理红花大金元表现量子效率亦显著高于 K326,而中部叶成熟期 T1 处理红花大金元表现量子效率显著低于 K326。旺长期和现蕾期,T1 处理红花大金元光饱和点显著低于 K326,而下部叶成熟期和中部叶成熟期,T1 处理红花大金元光饱和点显著高于 K326;团棵期和旺长期,T2 处理红花大金元光饱和点显著高于 K326,而下部叶成熟期和中部叶成熟期,T2 处理红花大金元光饱和点显著低于 K326。团棵期、旺长期和中部叶成熟期,T2 处理红花大金元光补偿点显著高于 K326,而旺长期 CK 和 T1 处理、中部叶成熟期 T1 处理红花大金元光补偿点显著低于 K326。

2.2 不同施氮处理对烤烟 CO₂ 利用特征参数的影响

不同施 N 处理对叶片 CO₂ 响应曲线参数影响如图 4 所示。从图中可以看出,施 N 处理对 2 个品种 CO₂ 响应曲线参数的影响有较大差异。团棵期和旺长期,随着施 N 量的增加,CO₂ 响应曲线最大光合速率(P_{\max,CO_2})总体呈减少趋势,现蕾期和下部叶成熟期, P_{\max,CO_2} 与施 N 量无显著关系,中部叶成熟期,T1 处理红花大金元 P_{\max,CO_2} 高于 CK 和 T2 处

理,而 T1 处理 K326 P_{\max,CO_2} 显著低于 CK 和 T2 处理。团棵期和旺长期,T1 处理红花大金元初始羧化效率显著高于 CK 和 T2 处理,中部叶成熟期,T1 处理红花大金元初始羧化效率显著低于 CK 和 T2 处理;旺长期,T2 处理 K326 初始羧化效率显著高于 CK 和 T1 处理;下部叶成熟期,T1 处理 K326 初始羧化效率显著高于 CK 和 T2 处理,其他时期,施 N 处理对初始羧化效率影响不显著。旺长期,T1 处理红花大金元 CO₂ 饱和点显著低于 CK 和 T2 处理,中部叶成熟期,T1 处理红花大金元 CO₂ 饱和点显著高于 T2 处理;中部叶成熟期,T1 处理 K326 CO₂ 饱和点显著低于 CK 和 T2 处理,旺长期和下部叶成熟期,随着施 N 量增加,K326 CO₂ 饱和点总体呈下降趋势。团棵期和旺长期,T1 处理红花大金元 CO₂ 补偿点总体显著低于 CK 和 T2 处理,下部叶成熟期和中部叶成熟期 T2 处理红花大金元 CO₂ 补偿点显著低于 CK 和 T1 处理,而旺长期 T2 处理 K326 CO₂ 补偿点显著低于 CK 和 T1 处理,下部叶成熟期 T1 处理 K326 显著低于 CK 和 T2 处理。旺长期 T1 处理红花大金元光呼吸速率显著高于 CK 和 T2 处理,而中部叶成熟期 T1 处理红花大金元光呼吸速率显著低于 CK 和 T2 处理,旺长期 T2 处理 K326 光呼吸速率显著高于 CK 和 T1 处理,而现蕾期 CK K326 光呼吸速率显著高于 T2 处理,下部叶成熟期 T1 处理 K326 光呼吸速率显著高于 CK 和 T2 处理。

团棵期和旺长期 CK、中部叶成熟期 T1 处理红花大金元 P_{\max,CO_2} 显著高于 K326,中部叶成熟期 CK 红花大金元 P_{\max,CO_2} 显著低于 K326。旺长期 T1 处理、中部叶成熟期 CK 和 T2 处理红花大金元初始羧化效率显著高于 K326,旺长期 T2 处理、下部叶成熟期 T1 处理红花大金元初始羧化效率显著低于 K326。下部叶成熟期 T2 处理、中部叶成熟期 T1 处理红花大金元 CO₂ 饱和点显著高于 K326,团棵期 T1 处理、旺长期 CK、T1 与 T2 处理红花大金元 CO₂ 饱和点显著低于 K326。团棵期和旺长期 T2 处理、现蕾期和下部叶成熟期 T1 处理红花大金元 CO₂ 补偿点显著高于 K326,旺长期 T1 处理、中部叶成熟期 T2 处理红花大金元 CO₂ 补偿点显著低于 K326。旺长期 T1 处理、中部叶成熟期 T2 处理红花大金元光呼吸速率显著高于 K326,旺长期 T2 处理、下部叶成熟期 T1 处理红花大金元光呼吸速率显著低于 K326。其他时期,2 个品种 CO₂ 响应曲线参数无显著差异。



CK、T1、T2 分别表示不施氮(对照)、每袋施氮 4 g 和 8 g。同一生育期图柱上不同小写字母表示处理和品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

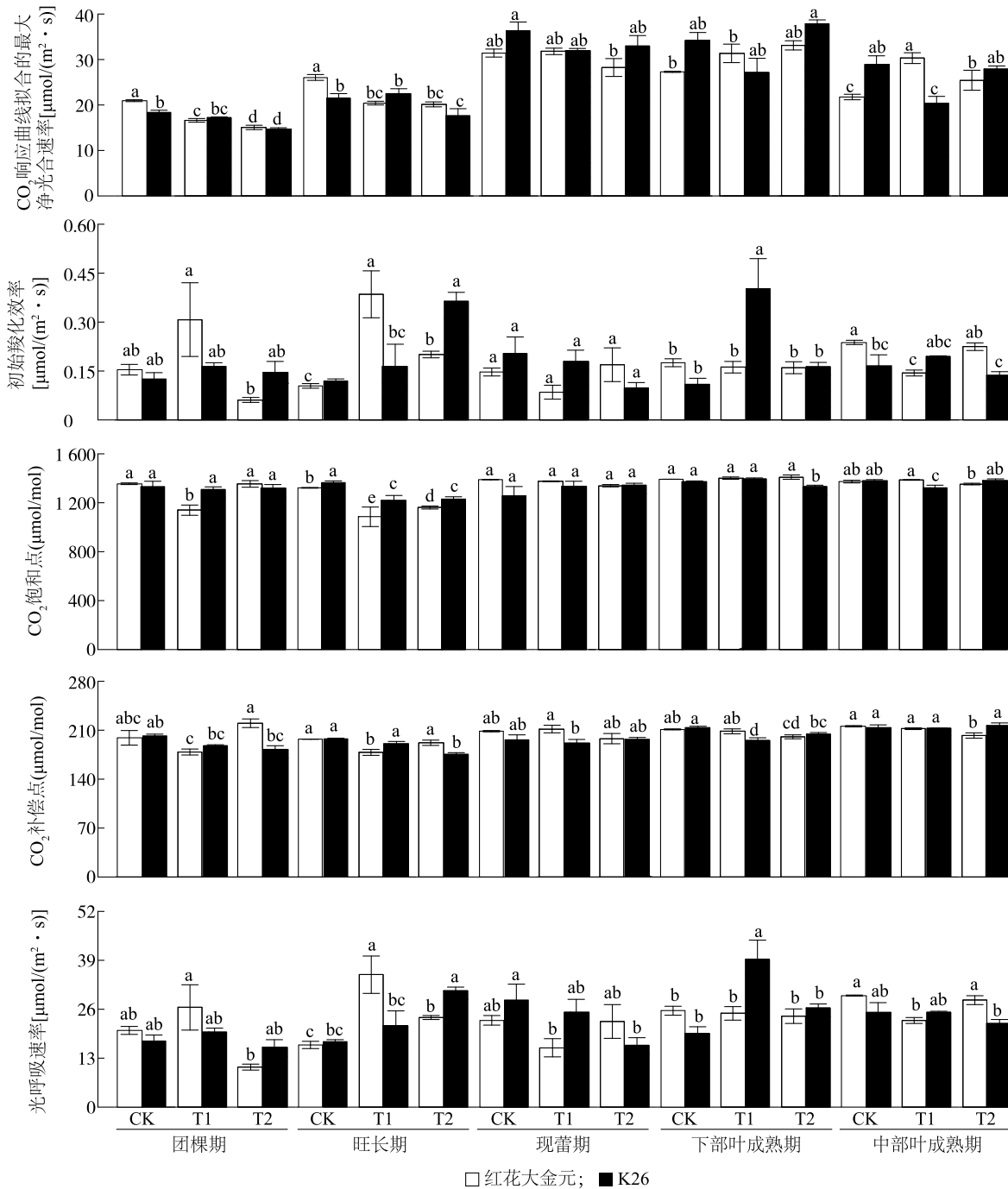
图 3 不同施氮水平对 2 个烤烟品种的光响应曲线特征参数的影响

Fig.3 Effects of different nitrogen application levels on the characteristic parameters of light response curve for two flue-cured tobacco cultivars

2.3 不同氮水平下 2 个烤烟品种的氮素积累量、生物量、氮利用效率差异

不同施氮处理下, 2 个烟草品种的生物量及氮积累量差异如表 1 所示。从表中可以看出, 在烟草

发育早期(团棵期、旺长期), 随着施 N 量的增加, 叶片生物量、叶片氮积累量和整株氮积累量呈增加趋势。而在烟草发育后期(现蕾期及烟叶成熟期), 随着施氮量增加, 2 个烟草品种的叶片生物量、叶片氮



CK、T1、T2 见图 3 注。同一生育期图柱上不同小写字母分别表示处理和品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同施氮水平对 2 个烤烟品种 CO₂ 响应曲线特征参数的影响

Fig.4 Effects of different nitrogen application levels on the characteristic parameters of CO₂ response curve for two flue-cured tobacco cultivars

积累量和整株氮积累量总体呈增加趋势。说明高氮条件下前期生长受限,而后期通过氮素再分配和光合增强实现快速积累。

同一处理下,随生育期推进,2 个烟草品种叶片生物量、叶片氮积累量及整株氮积累量均呈增加趋

势,其中团棵期至现蕾期是叶片生物量、叶片氮积累量及整株氮积累量快速增加期。CK 团棵期至现蕾期是 2 个烟草品种生物量的快速增长期,而现蕾后,生物量积累缓慢,而 T1 和 T2 处理,旺长期至下部叶成熟期是 2 个烟草品种生物量的快速积累期,下部

叶成熟期后,生物量增加缓慢,说明高氮处理有利于推迟氮素积累高峰期,有利于后期叶片功能维持。

相同处理下,红花大金元叶片氮积累量、叶片生物量及整株氮积累量总体均不低于 K326。不施肥 CK 旺长期、现蕾期、下部叶成熟期、中部叶成熟期红花大金元叶片氮积累量分别比 K326 增加 41.57%、10.97%、22.84%、26.51%,旺长期、现蕾期红花大金元叶片生物量分别比 K326 增加 37.91%、19.06%,旺长期、现蕾期、下部叶成熟期、中部叶成熟期红花

大金元整株氮积累量分别比 K326 增加 37.50%、11.26%、12.68%、12.83%。T2 处理旺长期、现蕾期、下部叶成熟期、中部叶成熟期红花大金元叶片氮积累量分别比 K326 增加 40.38%、68.39%、9.51%、11.69%,现蕾期和中部叶成熟期红花大金元叶片生物量分别比 K326 增加 75.42%和 16.70%,旺长期、现蕾期、下部叶成熟期、中部叶成熟期红花大金元整株氮积累量分别比 K326 增加 34.33%、49.81%、4.30%、6.24%。

表 1 不同施氮水平对 2 个烤烟品种氮含量与生物量的影响

Table 1 Effects of different nitrogen application levels on nitrogen content and biomass of two flue-cured tobacco cultivars

指标	处理	品种	生育期				
			团棵期	旺长期	现蕾期	下部叶成熟期	中部叶成熟期
叶片氮积累量(g,1株)	CK	红花大金元	0.66a	1.26a	1.72e	1.99e	2.10e
		K326	0.62a	0.89b	1.55f	1.62f	1.66f
	T1	红花大金元	0.65a	0.96b	2.33c	3.24c	3.27c
		K326	0.54b	0.61d	1.60d	2.93d	2.94d
	T2	红花大金元	0.51bc	0.73c	3.25a	4.26a	4.49a
		K326	0.46c	0.52e	1.93b	3.89b	4.02b
叶片生物量(g,1株)	CK	红花大金元	18.83a	50.06a	63.58bc	65.21d	69.32d
		K326	16.77ab	36.30b	53.40d	55.52d	56.36d
	T1	红花大金元	18.24a	33.36b	74.13ab	139.25b	140.58b
		K326	14.02bc	20.87c	49.03c	119.02c	120.48c
	T2	红花大金元	14.09bc	21.68c	83.92a	163.80a	179.35a
		K326	12.28c	14.70c	47.84c	146.90ab	153.68b
整株氮积累量(g,1株)	CK	红花大金元	0.74a	1.65a	3.26b	4.00e	4.31e
		K326	0.69a	1.20b	2.93c	3.55f	3.82f
	T1	红花大金元	0.72a	1.26b	3.85a	5.19c	5.37c
		K326	0.60b	0.78d	2.59d	4.83d	4.99d
	T2	红花大金元	0.54bc	0.90c	4.00a	6.06a	6.47a
		K326	0.51c	0.67e	2.67d	5.81b	6.09b

CK、T1、T2 见图 3 注。同一指标数据后不同小写字母分别表示处理和品种间差异显著($P < 0.05$)。

不同施 N 处理对 2 个烟草品种叶片氮分配指数和氮素生产效率的影响如表 2 所示。施肥处理对 2 个烟草品种团棵期叶片氮分配指数无显著影响,但对烟草中部叶成熟期叶片氮分配指数有较大影响,随着施 N 量的增加,成熟期叶片氮分配指数呈增加趋势。CK 中部叶成熟期红花大金元和 K326 叶片氮分配指数分别比团棵期减少 32.29%和 35.79%,而 T2 处理中部叶成熟期红花大金元和 K326 叶片氮分配指数分别比团棵期减少 21.65%和 21.05%。生长初期,2 个品种叶片氮分配指数差异不大,生长后期(下部叶片成熟期和中部叶成熟期),中低肥处理红花大金元叶片氮

分配指数显著高于 K326,而 T2 处理 2 个品种叶片氮分配指数无显著差异。CK 2 个烟草品种生长初期(团棵期和旺长期)氮素生产效率较高,生长后期氮素生产效率总体呈下降趋势,而 T1 和 T2 处理,2 个烟草品种氮素生产效率随生育期呈现先下降再增加的趋势,且中部叶成熟期 T2 处理氮生产效率显著高于 T1 处理。除旺长期外,其他生育期红花大金元氮素生产效率均高于 K326,且中部叶成熟期 2 个品种氮素生产效率总体高于生育前期。从上面的分析可知,氮素的施用有利于提高烟草生长后期叶片氮分配指数和氮素生产效率。

表 2 不同施氮水平对 2 个烤烟品种叶氮分配指数与氮素生产效率的影响

Table 2 Effects of different nitrogen application levels on leaf nitrogen partition index and nitrogen use efficiency of two flue-cured tobacco cultivars

指标	处理	品种	生育期				
			团棵期	旺长期	现蕾期	下部叶成熟期	中部叶成熟期
叶片氮分配指数	CK	红花大金元	0.96a	0.86b	0.73c	0.67c	0.65c
		K326	0.95b	0.86b	0.75bc	0.63d	0.61d
	T1	红花大金元	0.96a	0.83c	0.77bc	0.75a	0.74a
		K326	0.95b	0.88ab	0.79b	0.73b	0.71b
	T2	红花大金元	0.97a	0.89a	0.92a	0.77a	0.76a
		K326	0.95b	0.88ab	0.92a	0.76a	0.75a
氮素生产效率	CK	红花大金元	25.51a	30.34a	19.50a	16.31c	16.07d
		K326	24.27b	30.17a	18.24b	15.63d	13.07e
	T1	红花大金元	25.39a	26.54abc	19.28a	26.82a	32.59b
		K326	23.42b	26.89ab	18.92b	24.63b	27.93c
	T2	红花大金元	25.86a	24.10bc	20.98a	27.03a	41.58a
		K326	23.83b	21.93c	17.93b	25.27b	35.63b

CK、T1、T2 见图 3 注。同一指标数据后不同小写字母分别表示处理和品种间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 光合特性对烤烟氮效率影响的逐步回归分析

逐步回归分析结果(公式 5、公式 6)表明,对烟草叶片氮素分配指数影响较大的因子主要有 CO_2 响应曲线拟合的最大净光合速率、光饱和点和光补偿点等参数。其中 CO_2 响应曲线拟合的最大净光合速率和光饱和点是正向影响因子,而光补偿点是负向影响因子。而氮素生产效率主要受光饱和点、表观量子效率和暗呼吸速率等因子的影响,其中,光饱和点和表观量子效率是正向调控因子,即光饱和点和表观量子效率的提升可显著提高烤烟的氮素生产效率,而暗呼吸速率是负向调控因子,暗呼吸速率的增加将导致氮素生产效率的下降。

叶氮分配指数 = $0.902 + 0.01 \times \text{CO}_2$ 响应曲线拟合的最大净光合速率 + $0.01 \times$ 光饱和点 - $0.07 \times$ 光补偿点 ($R^2 = 0.86$) (5)

氮素生产效率 = $12.09 + 1.31 \times$ 光饱和点 - $14.92 \times$ 暗呼吸速率 + $126.44 \times$ 表观量子效率 ($R^2 = 0.69$) (6)

3 讨论

3.1 光合特性对烤烟氮效率的影响机制

光合作用是植物将光能转化为生物化学能并蓄积于体内的生理过程,所蓄积的能量为植物生物量的积累与生长提供支撑,是决定作物产量的核心基

础^[31]。不同烤烟品种的光合特性存在显著差异^[32-33],这导致各品种在能量蓄积及利用能量进行生长的能力上存在分化,可能是造成不同烤烟品种氮效率差异显著的重要诱因。然而,光合作用是一个复杂的能量转换与物质代谢过程^[11-12,34-39],涵盖最大净光合速率、表观量子效率、光饱和点、光补偿点、初始羧化效率等多项光合特性指标。尽管已知这些指标均对烟叶生产存在不同程度的影响,但目前关于其调控作物氮效率的具体机制仍不明确。本研究发现, CO_2 响应曲线拟合的最大净光合速率和光饱和点的提高有利于提高烟草的叶片氮分配指数,促进氮素向烟草叶片聚集,但过高的光补偿点则会降低烟草叶片氮分配指数,不利于氮素向烟叶的聚集。前人研究表明,叶片氮含量能显著影响烤烟的光合能力,烟叶氮含量低会显著抑制叶片的光合作用,导致烤烟生物量的累积减少^[12,40]。本研究发现,氮素向烟草叶片聚集的能力同样受到光合作用的调控,当烟叶 CO_2 响应曲线拟合的最大净光合速率和光饱和点较高时,能促进氮素向烟草叶片的聚集。此种情况下,较强的光合能力能为氮代谢提供更多的碳源和能量^[41],促进烟叶中的氮代谢,进而加速氮素的吸收与同化^[42],并进一步加强氮素在烟叶中的聚集。

本研究还发现,烤烟氮素生产效率受到光饱和点与表观量子效率的正向诱导和暗呼吸速率的负向抑制。高光饱和点说明烤烟可以利用更强的光照进行光合作用^[16]。而表观量子效率越高,说明烤烟利用弱光的能力越强^[43],可以捕获更多的光量子用于光合作用^[44]。更高的光饱和点与表观量子效率均能够表明烤烟光合能力更强,可以聚集更多的能量用于烤烟的生长与烟叶生物量的积累。而暗呼吸速率过高会导致作物消耗更多的能量与营养物质^[18-19],不利于烟叶生物量的积累,因此会降低烤烟的氮素生产效率^[45]。

3.2 施氮水平对不同品种烤烟光合特性差异的影响

不同的施氮水平对2个品种间光合特性的差异存在明显的影响,随着施氮量的上升,2个品种间表观量子效率、光饱和点、CO₂响应曲线拟合的最大净光合速率的差异会逐渐降低,CK、T1处理、T2处理红花大金元表观量子效率逐渐从K326的1.58倍逐渐降为1.28倍、1.16倍,光饱和点逐渐从K326的1.18倍逐渐降为1.10倍、1.08倍,CO₂响应曲线拟合的最大净光合速率分别为K326的1.22倍、1.14倍、1.08倍。可见CK处理下红花大金元利用弱光、强光、CO₂的优势更加明显,这可能是由于红花大金元对低氮环境的适应能力更强^[7,25-26],在氮素缺乏的环境下仍能吸收更多的氮素,并能够更加高效地利用氮素生产烟叶^[46],而随着氮素施用量的增加K326吸收的氮素含量逐渐增加,因此2个品种之间的差异会逐渐减少。随着施氮量的增加,红花大金元暗呼吸速率逐渐从K326的91.73%降低为89.15%、80.31%,这可能是由于K326对高氮环境的耐受能力更强^[46],在高氮环境下能够更有效的释放能量,为细胞内合成其他物质提供能量与原料^[47]。但这并不利于K326烟叶生物量的积累,造成氮素生产效率的下降。CK、T1处理下红花大金元光补偿点低于K326,分别为K326的74.96%、70.66%,说明低氮环境下K326利用弱光的能力较低,与上述表观量子效率的结论相似。但在高氮环境下,红花大金元光补偿点高于K326,说明在氮素充裕的环境下K326利用弱光的能力会高于红花大金元,这也符合前人指出的K326对高氮环境耐受能力更强的看法^[46]。

3.3 红花大金元光合优势及其对氮效率的作用

本研究中相同氮素处理下红花大金元CO₂响应曲线拟合最大净光合速率整体高于K326,这与官宇等^[9]、余凌翔等^[10]在四川、云南研究的结论相符。此外本研究中利用光合响应曲线与CO₂响应曲线进一步分析发现红花大金元表观量子效率、光饱和点也整体高于K326,而光补偿点整体低于K326。可能由于红花大金元能够合成更多的叶绿素a、叶绿素b、叶黄素、类胡萝卜素,其中叶黄素、胡萝卜素、叶绿素a和叶绿素b能够帮助红花大金元吸收更多的光谱进行光合作用,而更多的类胡萝卜素能够保护红花大金元的叶绿素,避免其光氧化^[48]。为了保护叶片免受光氧化损伤,将吸收的多余光能转化为热,促进光合作用的进行^[49]。此外红花大金元暗呼吸速率也整体低于K326,这与Song等^[50]通过转录组研究的结果相同,K326的ATP合酶的基因表达量远高于红花大金元。结合逐步回归分析结果,确定更高的CO₂响应曲线拟合的最大净光合速率、光饱和点,更低的光补偿点能够诱导红花大金元在烟叶中聚集更多的氮素,是叶片氮分配指数更高的主要原因。红花大金元更高的光饱和点与表观量子效率、较低的暗呼吸速率能够提高红花大金元利用氮素生产烟叶的能力,因此其氮素生产效率高于K326。

4 结论

本研究通过对不同施氮水平下氮高效型烤烟品种红花大金元和氮低效型烤烟品种K326光合特性与氮利用效率关系进行分析,得出以下结论:

1)相同氮水平下,红花大金元光合优势显著,光响应曲线和CO₂响应曲线拟合的最大净光合速率、表观量子效率高于K326,暗呼吸速率和光补偿点低于K326。

2)增施氮素缩小了品种间表观量子效率、光饱和点和光呼吸速率的差异,但扩大了品种间暗呼吸速率的差异。叶氮分配指数受CO₂响应曲线拟合的最大净光合速率和光饱和点正向调控,受较高光补偿点负向调控;氮素生产效率与光饱和点及表观量子效率呈显著正相关,受暗呼吸速率负向调控。

3)红花大金元叶片氮积累量、整株氮含量等氮素利用指标高于K326,其叶片氮分配指数和氮素生产效率亦高于K326。

参考文献:

- [1] 霍昭光,孙志浩,邢雪霞,等. 北方烟区水肥一体化对烤烟生长、根系形态、生理及光合特性的影响[J]. 中国生态农业学报,2017,25(9):1317-1325.
- [2] 何仲秋,王晓琳,张启明,等. 东南烟稻轮作区烤烟临界氮浓度稀释曲线的建立与验证[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(11):2001-2009.
- [3] 王日俊,黄成东,徐照丽,等. 基于中国知网的有机无机配施对烤烟产量与品质影响的整合分析[J]. 土壤,2021,53(6):1185-1191.
- [4] 黄国勤,王兴祥,钱海燕,等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. 生态环境,2004,13(4):656-660.
- [5] 李天福,冉邦定,陈萍,等. 云南烤烟主要栽培品种的耐肥特性研究[J]. 烟草科技,1995,28(2):32-34.
- [6] 钟思荣,陈仁霄,陶瑶,等. 不同烟草基因型氮素吸收效率与利用效率差异[J]. 中国烟草科学,2017,38(4):58-63.
- [7] 杨铁钊,林彩丽,丁永乐,等. 不同基因型烟草对氮素营养响应的差异研究[J]. 烟草科技,2001(6):32-35.
- [8] 陈月舞,韩智强,罗华元,等. 有机和常规种植对不同烤烟品种生长发育和产值量的影响[J]. 中国烟草学报,2011,17(4):51-55.
- [9] 官宇,吴昊,胡建新,等. 攀枝花烟区不同基因型烤烟的光合特性研究[J]. 西南农业学报,2013,26(6):2558-2561.
- [10] 余凌翔,鲁韦坤,张加云,等. 烤烟叶片光合速率日变化特征及其影响因素分析[J]. 气象与环境科学,2021,44(5):79-86.
- [11] TROUWBORST G, HOGEWONING S W, HARBINSON J, et al. Photosynthetic acclimation in relation to nitrogen allocation in cucumber leaves in response to changes in irradiance[J]. *Physiologia Plantarum*,2011,142(2):157-169.
- [12] BOUSSADIA O, STEPPE K, ZGALLAI H, et al. Effects of nitrogen deficiency on leaf photosynthesis, carbohydrate status and biomass production in two olive cultivars 'Meski' and 'Koroneiki' [J]. *Scientia Horticulturae*,2010,123(3):336-342.
- [13] 方宝华,滕振宁,刘洋,等. 超高产杂交稻的光响应曲线及其模型拟合[J]. 中国稻米,2017,23(4):1-5,13.
- [14] 雷俊,张健,赵福年,等. 春小麦开花期光合参数对土壤水分和温度变化的响应[J]. 生态环境学报,2022,31(6):1151-1159.
- [15] 刘悦,黎子涵,邹博,等. 生物炭影响作物生长及其与化肥混施的增效机制研究进展[J]. 应用生态学报,2017,28(3):1030-1038.
- [16] 孟凡超,张佳华,郝翠,等. CO₂浓度升高和不同灌溉量对东北玉米光合特性及产量的影响[J]. 生态学报,2015,35(7):2126-2135.
- [17] LEE P, CHANDEL N S, SIMON M C. Cellular adaptation to hypoxia through hypoxia inducible factors and beyond[J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*,2020,21(5):268-283.
- [18] 郑威,何琴飞,彭玉华,等. 石漠化区6种退耕树种光响应曲线研究[J]. 中南林业科技大学学报,2017,37(12):85-90.
- [19] 于显枫,张绪成. 高CO₂浓度和遮荫对小麦叶片光能利用特性及产量构成因子的影响[J]. 中国生态农业学报,2012,20(7):895-900.
- [20] 罗光宇,陈超,李月灵,等. 光照强度对濒危植物长序榆光合特性的影响[J]. 生态学杂志,2021,40(4):980-988.
- [21] 高岚,乐佳兴,张文,等. 2种树龄巴山榧对光照的响应[J]. 北京林业大学学报,2018,40(10):34-42.
- [22] 刘德明,刘强,荣湘民,等. 不同油菜品种光合作用及干物质积累对氮效率的影响[J]. 湖南农业科学,2010(9):29-31,34.
- [23] 丁永刚,汤小庆,梁鹏,等. 减氮对不同氮效率小麦品种花后光合物质生产力和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(4):490-498.
- [24] 魏红旭,徐程扬,马履一,等. 长白落叶松幼苗对铵态氮和硝态氮吸收的动力学特征[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(2):407-412.
- [25] 何明洁,范腾飞,杨超,等. ¹⁵N短标记法鉴定烟草'K326'和'红花大金元'吸收NO₃⁻和NH₄⁺的生理动力学特征[J]. 植物生理学报,2017,53(4):572-580.
- [26] 杨中义,张发明,李永智,等. 不同烤烟品种对氮素胁迫响应差异的研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学版),2011,26(2):240-245.
- [27] 李岩,何学敏,张雪妮,等. 早春短命植物鸢尾蒜和准噶尔鸢尾蒜的光合途径[J]. 西北植物学报,2020,40(8):1339-1346.
- [28] 钟思荣,龚丝雨,张世川,等. 作物不同基因型耐低氮性和氮效率研究进展[J]. 核农学报,2018,32(8):1656-1663.
- [29] 刘鹏,焦晓燕,丁玉川,等. 作物氮素高效利用研究进展[J]. 山西农业科学,2017,45(5):855-860.
- [30] 王静,刘晓静,童长春,等. 不同紫花苜蓿品种的氮效率比较及差异机制研究[J]. 草地学报,2022,30(4):889-900.
- [31] 高志源,许吉利,刘硕,等. 大田群体冬小麦氮收获指数变异特征研究[J]. 中国农业科学,2021,54(3):583-595.
- [32] LUO X Z, KEENAN T F, CHEN J M, et al. Global variation in the fraction of leaf nitrogen allocated to photosynthesis[J]. *Nature Communications*,2021,12(1):4866.
- [33] 刘柏林,李俊业,陈建军,等. 人工遮光对不同烤烟品种(系)生长发育和光合特性的影响[J]. 烟草科技,2016,49(1):14-21,53.
- [34] 肖宇,徐婧,牛翠云,等. 缓释氮和速效氮配施对旱地小麦光合特性、产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(6):111-118.
- [35] 宋思言,陈玲,王亚宁,等. 联合转录组和代谢组分析光照对番茄果实成熟的影响[J]. 南方农业学报,2025,56(2):335,601-612.
- [36] 李喜梅,赵君静,回祎,等. 郑州市4种园林树木光合特性及其影响因素研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(5):105-112.
- [37] 简少芬,黄燕芬,林杨,等. 遮阴对穿心莲光合碳氮生理、植物激素及内酯合成与积累的影响[J]. 南方农业学报,2025,56(1):214-225.

- [38] 蒋薇,张佳,贾志航,等. 草莓叶片光合及叶绿素荧光特性对喷钙的响应[J]. 江苏农业科学,2024,52(22):174-178.
- [39] 罗春燕,耿红凯,王秀军,等. NaCl胁迫下外源水杨酸对银杏生长和光合作用的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(6):91-10.
- [40] EVANS J R, CLARKE V C. The nitrogen cost of photosynthesis[J]. *Journal of Experimental Botany*,2019,70(1):7-15.
- [41] DING N, CHEN Q, ZHU Z L, et al. Effects of crop load on distribution and utilization of ^{13}C and ^{15}N and fruit quality for dwarf apple trees[J]. *Scientific Reports*,2017,7(1):14172.
- [42] 汪顺义,刘庆,史衍玺,等. 氮钾配施对甘薯光合产物积累及分配的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(14):2706-2716.
- [43] HUANG G. Temperature responses of photosynthesis and stomatal conductance in rice and wheat plants[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,2021,300:108322.
- [44] 王建华,任士福,史宝胜,等. 遮荫对连翘光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报,2011,31(7):1811-1817.
- [45] 曹勋,郑新军,李彦,等. 氮过量吸收对地肤暗呼吸速率及相对生长速率的影响[J]. 生态学杂志,2013,32(8):2002-2007.
- [46] 王海琪,王荣荣,蒋桂英,等. 施氮量对滴灌春小麦叶片光合生理性状的影响[J]. 作物学报,2023,49(1):211-224.
- [47] 李文凤,朱海焰,兰平. 策略 I 植物铁吸收稳态调控研究进展[J]. 土壤,2021,53(6):1101-1106.
- [48] 左敏,周冀衡,何伟,等. 不同品种烤烟对 UV-B 辐射的生理响应能力[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2010,36(6):644-648.
- [49] 艾伟伟,林珊,张月,等. 高含量 CO_2 对不同品种小麦光合性能的影响[J]. 江苏农业学报,2025,41(2):231-241.
- [50] SONG R F, TAN Y J, AHMED W, et al. Unraveling the expression of differentially expressed proteins and enzymatic activity in response to *Phytophthora nicotianae* across different flue-cured tobacco cultivars[J]. *BMC Microbiology*,2022,22(1):112.

(责任编辑:石春林)