

不同氮水平下施钙量对 烤烟叶片光合特性和干质量的影响

邹文桐¹, 陈星峰², 熊德中³

(1. 福建师范大学福清分校海洋与生化工程学院, 福建 福清 350300; 2. 福建省烟草公司, 福建 福州 350003;
3. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002)

摘要:应用双因素(2×4)随机区组设计,采用盆栽法研究了不同氮水平(0.12和0.20 g·kg⁻¹N)下不同施钙量[0.00(CK)、0.40、1.00和2.00 g·kg⁻¹Ca]对烤烟品种‘G80’(*Nicotiana tabacum* ‘G80’)叶片光合色素(包括叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素)含量、光合参数[包括净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)和胞间CO₂浓度(Ci)]、光合效率[包括饱和和光照强度下的净光合速率(Ps)、暗呼吸速率(Rd)、光补偿点(LCP)和表观光合量子效率(AQY)]和单株叶片干质量的影响。结果表明:与0.12 g·kg⁻¹N水平相比,0.20 g·kg⁻¹N水平下叶片的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量以及Ps和单株叶片干质量均极显著升高,但叶片的Pn、Tr、Gs、Ci、Rd和LCP均极显著降低,而AQY则略降低。在施钙量低于1.00 g·kg⁻¹的条件下,叶片的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量以及Pn、Gs、Ci、Ps和单株叶片干质量均随施钙量提高而升高,而Tr、Rd、LCP和AQY则随施钙量提高而降低,并且在施钙量2.00 g·kg⁻¹的条件下大多数指标均降低。方差分析结果表明:氮肥与钙肥互作对烤烟叶片上述光合特性指标和单株叶片干质量的影响均达到极显著水平。依据综合分析结果,建议在0.12 g·kg⁻¹N水平下施用1.00或2.00 g·kg⁻¹Ca或在0.20 g·kg⁻¹N水平下施用0.40 g·kg⁻¹Ca,均能够最大程度提高烤烟叶片的光合作用能力,有利于其叶片干物质的积累。

关键词: 烤烟; 施氮量; 施钙量; 光合特性; 单株叶片干质量; 方差分析

中图分类号: Q945.79; S572.06 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)01-0069-08
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.01.10

Effects of Ca application on photosynthetic characteristics and dry weight of *Nicotiana tabacum* leaf under different N levels ZOU Wentong¹, CHEN Xingfeng², XIONG Dezhong³ (1. College of Ocean Science and Biochemistry Engineering, Fuqing Branch of Fujian Normal University, Fuqing 350300, China; 2. Fujian Tobacco Company, Fuzhou 350003, China; 3. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(1): 69-76

Abstract: Using two factors (2×4) randomized block design, effects of different Ca applications [0.00 (CK), 0.40, 1.00 and 2.00 g·kg⁻¹ Ca] under different N levels (0.12 and 0.20 g·kg⁻¹ N) on photosynthetic pigment (including Chla, Chlb, total chlorophyll and carotenoid) content, photosynthetic parameters [including net photosynthetic rate (Pn), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (Gs) and intercellular CO₂ concentration (Ci)], photosynthetic efficiency [including net photosynthetic rate under saturation light intensity (Ps), dark respiration rate (Rd), light compensation point (LCP) and apparent photosynthetic quantum yield (AQY)] and leaf dry weight per plant of *Nicotiana tabacum* ‘G80’ were researched by pot experiment. The results show that as compared to 0.12 g·kg⁻¹ N level, contents of Chla, Chlb, total chlorophyll and carotenoid, and Ps in leaf and leaf dry weight per plant all increase extremely significantly under 0.20 g·kg⁻¹ N level, but Pn, Tr, Gs, Ci, Rd and LCP in leaf all decrease extremely significantly, while AQY in leaf decreases slightly. Under condition of Ca application

收稿日期: 2014-07-03

基金项目: 福建省教育厅A类项目(JA12357); 福建省教育厅B类项目(JB12263)

作者简介: 邹文桐(1981—),男,福建福清人,硕士,实验师,主要从事植物营养及植物生理生化研究。

lower than $1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, with increasing of Ca application, contents of Chla, Chlb, total chlorophyll and carotenoid, and Pn, Gs, Ci, Ps in leaf and leaf dry weight per plant all increase, while Tr, Rd, LCP and AQY in leaf all decrease. And under condition of Ca application $2.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, most of indexes decrease. Variance analysis result shows that effect of N fertilizer and Ca fertilizer interaction on above photosynthetic characteristic indexes of leaf and leaf dry weight per plant of *N. tabacum* all reach extremely significant level. According comprehensive analysis result, it is suggested that applying 1.00 or $2.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Ca under $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ N level or applying $0.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Ca under $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ N level all can the furthest improve photosynthesis ability of *N. tabacum* leaf, and are beneficial to accumulation of dry matter in leaf.

Key words: *Nicotiana tabacum* Linn.; N application; Ca application; photosynthetic characteristics; leaf dry weight per plant; variance analysis

烟草(*Nicotiana tabacum* Linn.)原产于南美洲,为茄科(Solanaceae)烟草属(*Nicotiana* Linn.)1年生草本植物。烤烟是福建省烟草的主栽类型,也是主要的大田经济作物之一^[1]。

氮素是植物生产过程中需求量最大的营养元素之一,植物叶片中75%的氮用于构建叶绿体,且其中的大部分参与了光合作用,因此,缺乏氮素常常会成为植物生长的限制因子^[2];钙是植物体结构的重要组成部分,能调节细胞内的许多生理活动,如细胞分裂、光合作用、激素调节等^[3-4]。因此,在农业生产过程中明确农作物生长的适宜氮钙配施方案对农作物增产具有非常重要的意义。迄今为止,关于氮钙配施方案对农作物光合作用影响方面的研究较少^[5],且尚未见关于氮钙配施方案对烤烟光合作用影响的研究报道,仅见有关种植密度与氮肥互作^[6-7]、氮肥基施与追施比例^[8]对烤烟叶片光合作用及氮代谢相关酶活性等方面影响的研究报道。

鉴于此,作者采用双因素(2×4)随机区组设计对不同氮水平下不同施钙量对烤烟叶片光合特性及叶片干质量的影响进行了研究,以期摸索出能大幅度提高烤烟光合特性的最佳氮肥和钙肥施用量,以指导烟农在生产中合理施肥。

1 材料和方法

1.1 材料

供试烤烟品种‘G80’种子由福建省烟草公司提供。供试土壤来自福建师范大学福清分校周边的水稻田,土壤酸碱度为pH 6.75,土壤的有机质含量为 $41.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮含量为 $74.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷含量为 $53.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量为 $123.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、

交换性钙含量为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、交换性镁含量为 $63.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 方法

1.2.1 肥料施用量的确定及施用方法 采用双因素(2×4)随机区组设计进行施肥试验。因素A为施氮量,设0.12和 $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 2个水平;因素B为施钙量,设0.00(对照)、0.40、1.00和 $2.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 4个水平。每盆栽10 kg风干土,氮肥和钙肥施用量均以纯氮和纯钙计。其中,以 NH_4NO_3 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 作为氮肥,以 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 作为钙肥,以 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 和 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 作为磷肥,以 K_2SO_4 作为钾肥,以 MgSO_4 作为镁肥,以硼砂作为硼肥。按照 $W(\text{N}):W(\text{P}_2\text{O}_5):W(\text{K}_2\text{O})=1.0:0.8:2.5$ 的比例并以常规的纯氮施用量 $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 计算各肥料的施用量,各处理组的纯 P_2O_5 施用量为 $0.096 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、纯 K_2O 施用量为 $0.300 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、纯镁施用量为 $0.045 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、硼砂施用量为 $6.000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

于2012年12月27日按照上述纯氮、纯磷、纯钾和纯钙等养分的施用量将肥料施入栽培土壤中,混匀并保持土壤湿润,确保土壤对肥料进行较充分的吸附固定。

用烤烟品种‘G80’的种子播种并育苗,于2013年3月12日选取苗高约20 cm、具2至3枚叶片且长势较一致的幼苗进行移植。每盆种植1株,每处理4盆,每盆视为1个重复,共计32盆。各组幼苗均随机排列,盆距为50 cm,用去离子水浇灌并进行常规的培养管理。

1.2.2 指标测定方法

1.2.2.1 叶片光合色素含量的测定 在叶片旺长期(种植60 d左右),每一植株选取同一叶位的叶片(第17至第19位叶片),参照李合生^[9]的方法采用体积

分数80%丙酮进行光合色素的提取,并使用7200型数显分光光度计[尤尼柯(上海)仪器有限公司]测定叶绿素 a 、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量,根据叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量计算总叶绿素含量。每株取1枚叶片,重复测定3次。

1.2.2.2 叶片光合参数的测定 在叶片旺长期(种植60 d左右),选择晴朗天气的8:30至11:30,采用CIRAS-2型光合作用测定系统(美国汉莎科学仪器有限公司)分别测定植株中上部叶片(第17或第18位叶片,叶片的空间取向和角度尽量一致)的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i),测定时光照强度为 $1\ 000\ \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。每株测定1枚叶片,每枚叶片重复测定3次。

按照上述方法,分别测定光照强度0、100、200、400、600、800、1 000和1 200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 条件下的净光合速率,以光照强度为横坐标(X)、 P_n 为纵坐标(Y)绘制光强—光响应曲线,得到饱和光照强度下的净光合速率(P_s)、暗呼吸速率(R_d ,以光强—光响应曲线与 X 轴的交点作切线,该切线的延长线与 Y 轴的交点即为 R_d)、光补偿点(LCP,为光强—光响应曲线与 X 轴的交点)和表观光合量子效率(AQY,以光强—光响应曲线与 X 轴的交点作切线,该切线的斜率

即为AQY)。

1.2.2.3 单株叶片干质量的测定 参照鲁如坤^[10]的方法测定每个单株的叶片干质量。

1.3 数据处理及统计分析

使用DPS 2005软件对所有指标进行方差分析,采用邓肯氏新复极差法对相关数据进行差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 不同氮水平下不同施钙量对烤烟叶片光合色素含量的影响

不同氮水平下不同施钙量对烤烟品种‘G80’叶片光合色素含量的影响见表1。

由表1可以看出:在施氮量 $0.12\ g \cdot kg^{-1}$ 条件下,叶片的叶绿素 a 、总叶绿素和类胡萝卜素含量均随着施钙量的增加而提高,其中施用 $2.00\ g \cdot kg^{-1}Ca$ 处理组叶片的叶绿素 a 、总叶绿素和类胡萝卜素含量均最高,分别为 1.92 、 2.64 和 $0.39\ mg \cdot g^{-1}$;叶绿素 b 含量以 $1.00\ g \cdot kg^{-1}Ca$ 处理组最高,达到 $0.74\ mg \cdot g^{-1}$ 。在施氮量 $0.12\ g \cdot kg^{-1}$ 的条件下,施用 $2.00\ g \cdot kg^{-1}Ca$ 处理组叶片的叶绿素 a 和总叶绿素含量均极显著

表1 不同氮水平下不同施钙量对烤烟品种‘G80’叶片光合色素含量的影响¹⁾

Table 1 Effect of different Ca applications on photosynthetic pigment content in leaf of *Nicotiana tabacum* ‘G80’ under different N levels¹⁾

施钙量/ $g \cdot kg^{-1}$ Ca application	不同氮水平下叶片的叶绿素 a 含量/ $mg \cdot g^{-1}$ Chla content in leaf under different N levels			不同氮水平下叶片的叶绿素 b 含量/ $mg \cdot g^{-1}$ Chlb content in leaf under different N levels		
	$0.12\ g \cdot kg^{-1}N$	$0.20\ g \cdot kg^{-1}N$	平均值 Average	$0.12\ g \cdot kg^{-1}N$	$0.20\ g \cdot kg^{-1}N$	平均值 Average
0.00(CK)	1.55dC	2.12cB	1.84cC	0.59cC	0.76bB	0.68dD
0.40	1.74cB	2.19bA	1.96bB	0.67bB	0.84aA	0.75bB
1.00	1.80bB	2.23aA	2.02aA	0.74aA	0.83aA	0.78aA
2.00	1.92aA	1.98dC	1.95bB	0.72aA	0.72cC	0.72cC
平均值 ²⁾ Average ²⁾	1.75bB	2.13aA		0.68bB	0.79aA	
施钙量/ $g \cdot kg^{-1}$ Ca application	不同氮水平下叶片的总叶绿素含量/ $mg \cdot g^{-1}$ Total chlorophyll content in leaf under different N levels			不同氮水平下叶片的类胡萝卜素含量/ $mg \cdot g^{-1}$ Carotenoid content in leaf under different N levels		
	$0.12\ g \cdot kg^{-1}N$	$0.20\ g \cdot kg^{-1}N$	平均值 Average	$0.12\ g \cdot kg^{-1}N$	$0.20\ g \cdot kg^{-1}N$	平均值 Average
0.00(CK)	2.14dD	2.88bB	2.51cC	0.33bB	0.41bB	0.37bB
0.40	2.41cC	3.03aA	2.72bB	0.33bB	0.42bAB	0.37bB
1.00	2.54bB	3.06aA	2.80aA	0.37aA	0.45aA	0.41aA
2.00	2.64aA	2.70cC	2.68bB	0.39aA	0.37cC	0.38bB
平均值 ²⁾ Average ²⁾	2.43bB	2.92aA		0.35bB	0.41aA	

¹⁾ 同列中不同的小写和大写字母分别表示不同施钙量处理组在0.05和0.01水平上差异显著和极显著 Different small letters and capitals in the same column indicate the significant and extremely significant differences among treatment groups with different Ca applications at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

²⁾ 同行中不同的小写和大写字母分别表示不同施氮量处理组在0.05和0.01水平上差异显著和极显著 Different small letters and capitals in the same row indicate the significant and extremely significant differences among treatment groups with different N applications at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

高于其他处理组;而施用 1.00 和 2.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Ca 处理组叶片的叶绿素 *b* 和类胡萝卜素含量无显著差异,但与其他处理组间存在极显著差异。在施氮量 0.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下,叶片的叶绿素 *a*、总叶绿素和类胡萝卜素含量均以 1.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Ca 处理组最高,分别为 2.23、3.06 和 0.45 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;叶绿素 *b* 含量则以 0.40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Ca 处理组最高,达到 0.84 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在施氮量 0.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下,0.40 和 1.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Ca 处理组叶片的叶绿素 *b* 和总叶绿素含量差异不显著,而叶绿素 *a* 和类胡萝卜素含量则有显著差异,并且大多极显著高于对照(0.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Ca)和 2.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Ca 处理组。

由表 1 还可见:在 0.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ N 水平下叶片的叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总叶绿素和类胡萝卜素含量的平均值均极显著高于 0.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ N 水平下;在施钙量低于 1.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下,随着施钙量的增加叶片的 4 个光合色素含量平均值均逐渐升高,但在施钙量 2.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下明显下降,且在施钙量 1.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下 4 个光合色素含量的平均值均极显著高于其他处理组。

方差分析结果(表 2)表明:氮肥、钙肥以及氮肥与钙肥互作对烤烟叶片叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总叶绿素

和类胡萝卜素含量的影响均达到极显著水平。

2.2 不同氮水平下不同施钙量对烤烟叶片光合参数的影响

不同氮水平下不同施钙量对烤烟品种‘G80’叶片的净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)和胞间 CO_2 浓度(Ci)的影响见表 3。

由表 3 可以看出:在施氮量 0.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,随着施钙量的逐渐提高,叶片的 Pn、Tr 和 Ci 均逐渐升高,Gs 则在施钙量低于 1.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下随施钙量的提高而升高、在施钙量 2.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下明显下降。在施氮量 0.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,1.00 和 2.00

表 2 氮肥和钙肥对烤烟品种‘G80’叶片光合色素含量影响的方差分析结果¹⁾

Table 2 Variance analysis result on effects of N and Ca fertilizers on photosynthetic pigment content in leaf of *Nicotiana tabacum* ‘G80’¹⁾

变异因素 Variation factor	各指标的 F 值 F value of different indexes			
	Chla	Chlb	Chl	Car
N	1 133.50**	340.35**	1 106.38**	137.28**
Ca	46.17**	62.73**	69.16**	13.13**
N×Ca	95.27**	52.90**	104.81**	23.57**

¹⁾ Chla: 叶绿素 *a* 含量 Chlorophyll *a* content; Chlb: 叶绿素 *b* 含量 Chlorophyll *b* content; Chl: 总叶绿素含量 Total chlorophyll content; Car: 类胡萝卜素含量 Carotenoid content. **: $P < 0.01$.

表 3 不同氮水平下不同施钙量对烤烟品种‘G80’叶片光合参数的影响¹⁾

Table 3 Effect of different Ca applications on photosynthetic parameter of leaf of *Nicotiana tabacum* ‘G80’ under different N levels¹⁾

施钙量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Ca application	不同氮水平下叶片的净光合速率/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Net photosynthetic rate of leaf under different N levels			不同氮水平下叶片的蒸腾速率/ $\text{mmol}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Transpiration rate of leaf under different N levels		
	0.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ N	0.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ N	平均值 Average	0.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ N	0.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ N	平均值 Average
	0.00 (CK)	9.52dC	12.14aA	10.83bB	3.35cB	3.64aA
0.40	10.93cB	10.43bB	10.68cB	3.43cB	3.25bB	3.34bB
1.00	12.10bA	10.23cBC	11.17aA	3.62bA	3.22bB	3.42aA
2.00	12.33aA	10.17cC	11.26aA	3.77aA	3.15bB	3.46aA
平均值 ²⁾ Average ²⁾	11.22aA	10.75bB		3.54aA	3.31bB	

施钙量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Ca application	不同氮水平下叶片的气孔导度/ $\text{mmol}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Stomatal conductance of leaf under different N levels			不同氮水平下叶片的胞间 CO_2 浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ Intercellular CO_2 concentration of leaf under different N levels		
	0.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ N	0.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ N	平均值 Average	0.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ N	0.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ N	平均值 Average
	0.00 (CK)	170.5dD	177.8aA	174.2bB	201.7dD	206.7aA
0.40	181.5cC	168.2bB	174.9bB	209.5cC	205.6aA	207.6aAB
1.00	189.7aA	164.7cC	177.2aA	219.3bB	197.7bB	208.5aA
2.00	184.0bB	161.3dD	172.6cC	223.0aA	188.0cC	205.5bBC
平均值 ²⁾ Average ²⁾	181.5aA	168.0bB		213.4aA	199.5bB	

¹⁾ 同列中不同的小写和大写字母分别表示不同施钙量处理组在 0.05 和 0.01 水平上差异显著和极显著 Different small letters and capitals in the same column indicate the significant and extremely significant differences among treatment groups with different Ca applications at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

²⁾ 同行中不同的小写和大写字母分别表示不同施氮量处理组在 0.05 和 0.01 水平上差异显著和极显著 Different small letters and capitals in the same row indicate the significant and extremely significant differences among treatment groups with different N applications at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}$ 处理组的 Pn、Tr、Gs 和 Ci 4 项光合参数均较高,且均极显著高于对照($0.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}$)和 $0.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}$ 处理组。在施氮量 $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,叶片的 Pn、Tr、Gs 和 Ci 均随着施钙量的提高而下降,其中仅 $0.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}$ 处理组的 Ci 与对照无显著差异,而 0.40 、 1.00 和 $2.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}$ 处理组的 Pn、Tr、Gs 和 Ci 4 项光合参数均极显著低于对照。

由表 3 还可见:在施氮量 $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下叶片的 Pn、Tr、Gs 和 Ci 的平均值均极显著低于 $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$ 处理组;在施钙量 $0.40 \sim 2.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下,Pn 和 Tr 的平均值均随施钙量提高而升高,Gs 和 Ci 的平均值则随施钙量提高而呈现低施钙量下升高、高施钙量下降的趋势,并在施钙量 $1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下达到最高。

方差分析结果(表 4)表明:氮肥、钙肥以及氮肥与钙肥互作对烤烟叶片光合参数 Pn、Tr、Gs 和 Ci 的影响均达到极显著水平。

2.3 不同氮水平下不同施钙量对烤烟叶片光合效率的影响

不同氮水平下不同施钙量对烤烟品种‘G80’叶片饱和和光照强度下的净光合速率(Ps)、暗呼吸速率

(Rd)、光补偿点(LCP)和表观光合量子效率(AQY)的影响见表 5。

由表 5 可以看出:在施氮量 $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下, 1.00 和 $2.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}$ 处理组的 Ps 较高且二者间差异不显著, 0.40 和 $1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}$ 处理组的 Rd 和 AQY 均较高且二者间也无显著差异, $1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}$ 处理组的 LCP 最高且极显著高于其他处理组。在施氮量 $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下, 0.40 、 1.00 和 $2.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}$ 处理组的 Ps、Rd、LCP 和 AQY 均低于对照($0.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}$),但各处理组间及其与对照间的 Ps 差异均不显著,而各处理组的 Rd、LCP 和 AQY 均与对

表 4 氮肥和钙肥对烤烟品种‘G80’叶片光合参数影响的方差分析结果¹⁾

Table 4 Variance analysis result on effects of N and Ca fertilizers on photosynthetic parameter of leaf of *Nicotiana tabacum* ‘G80’¹⁾

变异因素 Variation factor	各指标的 F 值 F value of different indexes			
	Pn	Tr	Gs	Ci
N	121.09**	65.16**	1 207.70**	613.67**
Ca	39.59**	5.63**	24.60**	11.85**
N×Ca	642.31**	47.90**	359.58**	256.45**

¹⁾ Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Ci: 胞间 CO_2 浓度 Inter-cellular CO_2 concentration. **: $P < 0.01$.

表 5 不同氮水平下不同施钙量对烤烟品种‘G80’叶片光合效率的影响¹⁾

Table 5 Effect of different Ca applications on photosynthetic efficiency of leaf of *Nicotiana tabacum* ‘G80’ under different N levels¹⁾

施钙量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Ca application	不同氮水平下叶片的 Ps/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Ps of leaf under different N levels			不同氮水平下叶片的 Rd/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Rd of leaf under different N levels		
	0.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$	0.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$	平均值 Average	0.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$	0.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$	平均值 Average
	0.00(CK)	9.00cC	11.37aA	10.21cB	1.288bB	1.383aA
0.40	10.27bB	11.10aA	10.68bAB	1.531aA	1.128bB	1.329aA
1.00	10.77abAB	11.00aA	10.88abA	1.519aA	1.053cBC	1.286bA
2.00	11.17aA	11.23aA	11.20aA	1.170cC	1.007cC	1.089cB
平均值 ²⁾ Average ²⁾	10.31bB	11.18aA		1.377aA	1.143bB	

施钙量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Ca application	不同氮水平下叶片的 LCP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ LCP of leaf under different N levels			不同氮水平下叶片的 AQY/ $\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ AQY of leaf under different N levels		
	0.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$	0.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$	平均值 Average	0.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$	0.20 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}$	平均值 Average
	0.00(CK)	70.56cC	87.90aA	79.23aA	18.10bA	19.00aA
0.40	76.40bB	63.74bB	70.07bB	19.05aA	18.38aAB	18.71aA
1.00	80.87aA	58.81cC	69.84bB	18.65abA	17.50bB	18.07bcAB
2.00	62.73dD	59.98cC	61.36cC	18.13bA	17.65bB	17.89cB
平均值 ²⁾ Average ²⁾	72.64aA	67.61bB		18.48aA	18.13aA	

¹⁾ Ps: 饱和和光照强度下的净光合速率 Net photosynthetic rate under saturation light intensity; Rd: 暗呼吸速率 Dark respiration rate; LCP: 光补偿点 Light compensation point; AQY: 表观光合量子效率 Apparent photosynthetic quantum yield. 同列中不同的小写和大写字母分别表示不同施钙量处理组在 0.05 和 0.01 水平上差异显著和极显著 Different small letters and capitals in the same column indicate the significant and extremely significant differences among treatment groups with different Ca applications at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

²⁾ 同行中不同的小写和大写字母分别表示不同施氮量处理组在 0.05 和 0.01 水平上差异显著和极显著 Different small letters and capitals in the same row indicate the significant and extremely significant differences among treatment groups with different N applications at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

照有显著差异(0.40 g·kg⁻¹ Ca 处理组的 AQY 除外),但 1.00 和 2.00 g·kg⁻¹ Ca 处理组间叶片的 Rd、LCP 和 AQY 无显著差异。

由表 5 还可见:在施氮量 0.20 g·kg⁻¹ 的条件下,叶片的 Ps 平均值极显著高于施氮量 0.12 g·kg⁻¹ 的条件下,其 Rd 和 LCP 的平均值均极显著低于后者;而在施氮量 0.12 和 0.20 g·kg⁻¹ 的条件下叶片的 AQY 平均值差异不显著。随着施钙量的提高,Ps 平均值呈逐渐升高的趋势,Rd 和 LCP 平均值呈逐渐降低的趋势,AQY 平均值大体上也呈逐渐降低的趋势。

方差分析结果(表 6)表明:氮肥对叶片 AQY 的影响不显著,但氮肥对叶片 Ps、Rd 和 LCP 的影响以及钙肥和氮肥与钙肥互作对叶片 Ps、Rd、LCP 和 AQY 的影响均达到极显著水平。

表 6 氮肥和钙肥对烤烟品种‘G80’叶片光合效率影响的方差分析结果¹⁾

Table 6 Variance analysis result on effects of N and Ca fertilizers on photosynthetic efficiency of leaf of *Nicotiana tabacum* ‘G80’¹⁾

变异因素 Variation factor	各指标的 F 值 F value of different indexes			
	Ps	Rd	LCP	AQY
N	39.31**	279.75**	122.44**	4.18
Ca	9.12**	70.25**	257.92**	5.26**
N×Ca	13.95**	83.66**	343.99**	6.75**

¹⁾ Ps: 饱和光照强度下的净光合速率 Net photosynthetic rate under saturation light intensity; Rd: 暗呼吸速率 Dark respiration rate; LCP: 光补偿点 Light compensation point; AQY: 表观光合量子效率 Apparent photosynthetic quantum yield. **: P<0.01.

2.4 不同氮水平下不同施钙量对烤烟单株叶片干质量的影响

不同氮水平下不同施钙量对烤烟品种‘G80’单株叶片干质量的影响见表 7。

由表 7 可以看出:在施氮量 0.12 g·kg⁻¹ 的条件下,1.00 g·kg⁻¹ Ca 处理组的单株叶片干质量最高,为 53.97 g,与对照(0.00 g·kg⁻¹ Ca)以及 0.40 和 2.00 g·kg⁻¹ Ca 处理组均有极显著差异。在施氮量 0.20 g·kg⁻¹ 的条件下,单株叶片干质量随着施钙量的提高而逐渐下降,其中,0.40 g·kg⁻¹ Ca 处理组的单株叶片干质量与对照间差异不显著,1.00 g·kg⁻¹ Ca 处理组的单株叶片干质量与对照间存在显著差异,而 2.00 g·kg⁻¹ Ca 处理组的单株叶片干质量与对照间存在极显著差异。

由表 7 还可以看出:在施氮量 0.20 g·kg⁻¹ 的条件下,单株叶片干质量的平均值极显著高于施氮量

表 7 不同氮水平下不同施钙量对烤烟品种‘G80’单株叶片干质量的影响¹⁾

Table 7 Effect of different Ca applications on leaf dry weight per plant of *Nicotiana tabacum* ‘G80’ under different N levels¹⁾

施钙量/g·kg ⁻¹ Ca application	不同氮水平下的单株叶片干质量/g Leaf dry weight per plant under different N levels		
	0.12 g·kg ⁻¹ N	0.20 g·kg ⁻¹ N	平均值 Average
0.00 (CK)	51.47bB	60.47aA	55.97bA
0.40	51.91bB	60.29abA	56.10bA
1.00	53.97aA	59.58bA	56.77aA
2.00	52.20bB	55.63cB	53.91cB
平均值 ²⁾ Average ²⁾	52.39bB	58.99aA	

¹⁾ 同列中不同的小写和大写字母分别表示不同施钙量处理组在 0.05 和 0.01 水平上差异显著和极显著 Different small letters and capitals in the same column indicate the significant and extremely significant differences among treatment groups with different Ca applications at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

²⁾ 同行中不同的小写和大写字母分别表示不同施氮量处理组在 0.05 和 0.01 水平上差异显著和极显著 Different small letters and capitals in the same row indicate the significant and extremely significant differences among treatment groups with different N applications at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

0.12 g·kg⁻¹ 的条件下。在施钙量低于 1.00 g·kg⁻¹ 的条件下,单株叶片干质量的平均值随着施钙量的提高呈逐渐升高的趋势,并在施钙量 1.00 g·kg⁻¹ 的条件下达到最高且与对照间的差异达显著水平;施钙量达到 2.00 g·kg⁻¹ 时单株叶片干质量的平均值极显著低于对照。

方差分析结果(表 8)表明:氮肥、钙肥以及氮肥与钙肥互作对烤烟单株叶片干质量的影响均达到极显著水平。

表 8 氮肥和钙肥对烤烟品种‘G80’单株叶片干质量影响的方差分析结果¹⁾

Table 8 Variance analysis result on effects of N and Ca fertilizers on leaf dry weight per plant of *Nicotiana tabacum* ‘G80’¹⁾

变异因素 Variation factor	F 值 F value
N	1 060.33**
Ca	37.02**
N×Ca	40.53**

¹⁾ **: P<0.01.

3 讨论和结论

氮素是植物体内蛋白质、核酸和叶绿素等物质的重要组成成分^[11]。在一定的施氮量范围内,增加氮肥施用量可使作物的光合速率和光饱和点提高、叶绿素含量和净光合速率(Pn)上升,并可使作物的产量增加;氮素供应失调则会导致作物的光合作用能力下

降^[2,12-14],并造成作物减产。本研究结果表明:与施氮量 $0.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理组相比较,在施氮量 $0.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的条件下烤烟叶片的叶绿素 a 、叶绿素 b 、总叶绿素和类胡萝卜素含量以及饱和光照强度下的净光合速率(P_n)和单株叶片干质量均极显著提高, P_n 、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)以及暗呼吸速率(R_d)和光补偿点(LCP)均极显著降低,表观光合量子效率(AQY)略有下降,说明在供试的2个氮水平中, $0.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施氮量的施肥效果最好。推测导致烤烟叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 4项光合参数下降的主要原因可能是 $0.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施氮量已经能够满足烤烟叶片光合作用对氮素的需求,而施氮量超过一定的阈值则会降低叶片的同化效率,其主要生理原因是光合部位氮素含量增加导致氮同化作用加强,并与光合碳同化竞争光合作用光反应后产生的同化力(ATP和NADPH),最终致使 CO_2 同化效率降低。此外,氮同化还需要碳架,氮同化作用加强后,呼吸作用向光合碳同化作用提供碳架的能力降低,导致 CO_2 同化效率降低,因此,碳架缺乏同样可导致植物同化效率降低^[15]。与 $0.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施氮量相比, $0.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施氮量能够极显著提高烤烟叶片在饱和光照强度下的净光合速率,进而提高其叶片的光饱和点、降低暗呼吸速率,最终降低光合产物的消耗量,同时降低光补偿点以减少光合产物的消耗量并保证表观光合量子速率处于稳定状态,使烤烟植株对光能的利用能力始终维持在较高水平,促进烤烟叶片光合作用能力的提高。由于植物体内90%~95%的干物质来自光合作用^[16]^[17],因此,采用 $0.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施氮量有利于烤烟叶片干物质的积累。

钙既是植物生长发育必需的大量元素,又是重要的胞内信号分子^[17],对气孔开闭和同化物的运输也具有一定的调节作用^[16]^[15]。本研究结果表明:在施钙量低于 $1.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的条件下,烤烟叶片的叶绿素 a 、叶绿素 b 、总叶绿素和类胡萝卜素含量均随着施钙量提高而升高,说明施以适量的钙肥能促进烤烟叶片的叶绿素合成或抑制其降解,这与孙金春等^[18]、韩龙慧等^[19]的研究结果一致。与对照相比,施用 0.40 和 $1.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{Ca}$ 能够显著或极显著提高烤烟叶片的净光合速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度,这与他人的研究结果^[20-22]一致。这可能是由于钙有助于植物维持叶绿体膜结构的稳定性,并增强Rubisco酶和PEP羧化酶的活性^[23],从而提高 CO_2 羧化效率,改善植物的

光合性能;同时,钙还可能在植物放氧复合体的光合放氧以及气孔关闭等光合作用过程中发挥重要作用^[24-25]。一定范围内施用适量钙还能够促进烤烟叶片干物质的积累,这可能是由于适量的钙能够促进烤烟叶片光合作用的提高,进而促进烤烟叶片干物质的积累。

本研究结果表明:氮肥与钙肥互作对烤烟叶片光合色素含量、光合参数、光合效率和单株叶片干质量的影响均达到极显著水平。在 $0.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{N}$ 水平下施用 1.00 或 $2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{Ca}$ 以及在 $0.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{N}$ 水平下施用 $0.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{Ca}$ 均能够最大程度地提高烤烟叶片的光合色素含量、光合参数、光合效率和单株叶片干质量,说明烤烟栽培中氮肥和钙肥的施用量具有一定的相关性。但是,由于氮肥和钙肥的交互作用比较复杂,与作物种类、栽培基质(土培、沙培和水培)、肥料种类及浓度等因素密切相关,因此,在实际生产中应综合考虑二者的关系,以确定不同氮水平下适宜的施钙量,只有在氮肥和钙肥施用量达到平衡时,才能最大程度地促进烤烟的生长,达到增产的目的。

参考文献:

- [1] 杨宇虹,冯柱安,晋艳,等.酸性土壤的烟株生长及烟叶产质量调控研究[J].云南农业大学学报,2004,19(1):41-44.
- [2] 关义新,林葆,凌碧莹.光氮互作对玉米叶片光合色素及其荧光特性与能量转换的影响[J].植物营养与肥料学报,2000,6(2):152-158.
- [3] BUSH D S, WANG T. Diversity of calcium-efflux transporters in wheat aleurone cells[J]. *Planta*, 1995, 197: 19-30.
- [4] JIAN L C, LI J H, LI P H. Seasonal alteration in amount of Ca^{2+} in apical bud cells of mulberry (*Morus bombycis* Koidz): an electron microscopy-cytochemical study[J]. *Tree Physiology*, 2000, 20: 623-628.
- [5] 李中勇,张媛,韩龙慧,等.氮钙互作对设施栽培油桃叶片光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(4):893-900.
- [6] 张喜峰,张立新,高梅,等.密度与氮肥互作对烤烟氮钾含量、光合特性及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2013(2):32-36,61.
- [7] 刘朝科,王军,谢玉华,等.种植密度与施氮量对烤烟光合特性及代谢酶活性的影响[J].华南农业大学学报,2013,34(4):458-464.
- [8] 罗莎莎,符云鹏,牛志强,等.氮肥基施与追施比例对烤烟光合特性及氮代谢关键酶活性的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(8):42-48.
- [9] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育

- 出版社, 2000: 134-136.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] MA B L, MORRISON M J, DWYER L M. Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize [J]. *Agronomy Journal*, 1996, 88: 915-920.
- [12] 赵平, 孙谷畴, 彭少麟. 植物氮素营养的生理生态学研究[J]. *生态科学*, 1998, 17(2): 37-42.
- [13] 曾希柏, 谢德体, 青长乐, 等. 氮肥施用量对莴笋光合特性影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(4): 323-327.
- [14] 曾希柏. 土壤肥力生物热力学及其理论进展[J]. *土壤通报*, 1996, 27(6): 273-276.
- [15] 曹翠玲, 李生秀, 苗芳. 氮素对植物某些生理生化过程影响的研究进展[J]. *西北农业大学学报*, 1999, 27(4): 96-100.
- [16] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [17] BUSH D S. Calcium regulation in plant cells and its role in signaling [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1995, 46: 95-122.
- [18] 孙金春, 张扬欢, 温泉, 等. 不同钙效应剂对长春花光合特性的影响[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2011, 33(6): 74-78.
- [19] 韩龙慧, 李中勇, 徐继忠. 不同钙素水平对设施油桃叶片光合作用的影响[J]. *河南农业科学*, 2013, 42(9): 95-98.
- [20] 齐明芳, 刘玉凤, 周龙发, 等. 钙对亚高温下番茄幼苗叶片光合作用的调控作用[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(2): 531-537.
- [21] 李同根, 王康才, 罗庆云, 等. Ca^{2+} 对皖贝母高温胁迫下抗逆生理指标及光合作用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 765-770.
- [22] HUANG Z A, JIANG D A, YANG Y, et al. Effects of nitrogen deficiency on gas exchange, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzymes in leaves of rice plants [J]. *Photosynthetica*, 2004, 42: 357-364.
- [23] Van ASSCHE F, CLIJSTERS H. Effects of metals on enzyme activity in plants [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1990, 13: 195-206.
- [24] 陈玉玲, 肖玉梅, 陈珈, 等. G蛋白可能参与细胞外钙调素促进蚕豆气孔关闭的过程[J]. *自然科学进展*, 2003, 13(4): 343-349.
- [25] 王旭, 郭世荣, 李军, 等. Ca^{2+} 对根际低氧胁迫下黄瓜幼苗生长和叶片荧光特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(5): 962-969.

(责任编辑: 佟金凤)

《植物资源与环境学报》启事

为了扩大科技期刊的信息交流、充分实现信息资源共享,《植物资源与环境学报》已先后加入“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”等网络文献资源数据库,因此,凡在本刊发表的论文将编入数据库供上网交流、查阅及检索,作者的著作权使用费与本刊稿酬一次性给付,不再另付。如作者不同意将文章收编入数据库,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。

《植物资源与环境学报》仅接受网上投稿,惟一投稿网址: <http://www.cnbg.net/Tg/Contribute/Login.aspx>。投稿咨询电话: 025-84347014; E-mail: zwzy@cnbg.net; QQ: 2219161478。

《植物资源与环境学报》编辑部

2015-02