

施氮肥和钙肥对烤烟根系形态、生理代谢及产量的影响

邹文桐, 项雷文, 金美芳

(福建师范大学福清分校海洋与生化工程学院, 福建 福清 350300)

摘要: 为了解氮肥和钙肥对烤烟(*Nicotiana tabacum*)生长的影响,对成熟期烤烟的根系形态、生理代谢指标和产量进行了研究。结果表明,与施 0.12 g kg⁻¹氮相比,施 0.20 g kg⁻¹氮的烤烟根系最长侧根长、根系体积、根干重、叶干重和可溶性蛋白质含量均极显著升高,MDA含量极显著下降,SOD活性显著下降,但对侧根数、CAT活性和 O₂⁻的影响均不显著。施钙 0.40 g kg⁻¹,根系体积、侧根数、CAT和SOD活性以及可溶性蛋白质含量均比对照提高,MDA含量和 O₂⁻则降低;施钙 1.00 g kg⁻¹,最长侧根长、根干重和叶干重均提高。氮 × 钙互作对烤烟的最长侧根长、根系体积、根干重、叶干重和生理代谢指标的影响均极显著,但对侧根数的影响不显著。因此,施 0.20 g kg⁻¹氮和 0.40 g kg⁻¹钙能最大限度地改善烤烟根系形态、生理状况及提高产量。

关键词: 烤烟; 氮肥; 钙肥; 根系; 产量

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2015.06.012

Effects of N and Ca Fertilizers on Root Morphology, Physiological Metabolism and Yield of *Nicotiana tabacum*

ZOU Wen-tong, XIANG Lei-wen, JIN Mei-fang

(College of Ocean Science and Biochemistry Engineering, Fuqing Branch of Fujian Normal University, Fuqing 350300, Fujian, China)

Abstract: In order to understand the influence of N and Ca fertilizers on growth of *Nicotiana tabacum*, the changes in root morphology and physiological indexes and yield were studied at mature stage. The results showed that length of the longest lateral root, root volume, dry weights of root and leaf, and soluble protein content in root of *N. tabacum* all increase significantly treated with 0.20 g kg⁻¹ N than those with 0.12 g kg⁻¹ N, malondialdehyde (MDA) content and superoxide dismutase (SOD) activity decreased significantly, the numbers of lateral root, catalase (CAT) activity and superoxide anion radical (O₂⁻) all had not significant differences. The root volume, number of lateral root, activities of CAT and SOD, and soluble protein content in root treated with 0.40 g kg⁻¹ Ca were all higher than those under control, while both of MDA content and O₂⁻ decreased. If treated with 1.00 g kg⁻¹ Ca, length of the longest lateral root, dry weights of root and leaf increased. The effect of N×Ca interaction on length of the longest lateral root, root volume, dry weights of root and leaf, and physiological metabolism indexes of *N. tabacum* were all significant, but that on number of lateral root was not significant. Therefore, the root morphology, physiological metabolism and yield of *N. tabacum* could be furthest improved supplement with 0.20 g kg⁻¹ N and 0.40 g kg⁻¹ Ca.

Key words: *Nicotiana tabacum*; N fertilizer; Ca fertilizer; Root; Yield

收稿日期: 2015-03-05

接受日期: 2015-05-17

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)资助

作者简介: 邹文桐(1981~),男,硕士,实验师,主要从事植物营养生理生化研究。E-mail:wzt_5267370@163.com

烟草(*Nicotiana tabacum* Linn.)原产于南美洲,一年生或有限多年生草本植物,为茄科(Solanaceae)烟草属植物,是福建主栽烟草类型,也是主要的大田经济作物^[1]。植物的根系是吸收水分和养分的主要器官,同时又是物质同化、转化和合成的重要器官,在生长发育和产量形成中起重要作用^[2]。根系发育状况、数量及其在土壤中的分布与作物对水分和养分的吸收能力密切相关^[3-4]。根系数量、大小、分布和生理状况等直接影响作物的抗性,因而研究根系的生理生态反应更能揭示作物抗性的本质。氮是作物生长必需的元素,它对作物的根系生长和生理特性具有十分重要的影响。钙是烟草生长需要量较大的营养元素^[5],大量研究表明,钙作为细胞的第二信使在植物的生长发育以及对环境的反应与适应中有极其重要的作用^[6-9]。对于氮钙配施的研究主要集中于番茄(*Lycopersicon esculentum*)^[10],油桃(*Prunus persica* var. *nectarina*)^[11],黄瓜(*Cucumis sativus*)^[12]等,而关于氮钙互作对植物根系的研究目前还未见报道,但氮肥与其他因素的互作对植物根系的研究已有不少,如不同密度和氮肥^[13]、氮素供应和 pH 值^[14]、施氮量和耕作方式^[15]、水氮互作^[16]等。因此,本研究探讨施氮和施钙对烤烟成熟期根系形态、生理代谢及产量的影响,以指导烟农合理地施用氮肥和钙肥,对提高烤烟生长、抗性和产量具有重要的生产实践意义。

1 材料和方法

1.1 材料

试验于 2012 年 12 月至 2013 年 7 月在福建师范大学福清分校后山盆栽房进行,其中 2012 年 12 月至 2013 年 2 月是肥料固定期,2013 年 3 月至 7 月是烟叶生长期。供试烤烟(*Nicotiana tabacum* Linn.)品种为‘G80’(福建省烟草公司提供)。供试土壤取自福建师范大学福清分校周边水稻田,参照《土壤农业化学分析方法》^[17]测定土壤基本理化性状, pH 为 6.75、有机质含量 41.8 g kg⁻¹、碱解氮含量 74.5 mg kg⁻¹、速效磷含量 53.4 mg kg⁻¹、速效钾含量 123.3 mg kg⁻¹、交换性钙含量 1.5 g kg⁻¹、交换性镁含量 63.5 mg kg⁻¹。

1.2 处理

试验采用双因素(2×4)随机区组设计,因素 A

设 2 个供氮水平: N₁ (0.12 g kg⁻¹) 和 N₂ (0.20 g kg⁻¹); 因素 B 设 4 个供钙水平: Ca₁ (0 g kg⁻¹, 对照)、Ca₂ (0.40 g kg⁻¹)、Ca₃ (1.00 g kg⁻¹) 和 Ca₄ (2.00 g kg⁻¹)。盆近似圆柱形,直径为 32 cm,高度为 32 cm,每盆装风干土 10 kg,氮肥和钙肥均以每盆纯氮和纯钙来计,每盆种植 1 株幼苗,盆距为 50 cm,每处理 4 盆视为 4 个重复,共计 32 盆。各组幼苗均随机排列,用去离子水浇灌,并进行常规的日常管理。氮肥用硝酸铵和硝酸钙,钙肥用硝酸钙、氢氧化钙和磷酸二氢钙,磷肥用磷酸氢二铵和磷酸二氢钙,钾肥用硫酸钾,镁肥用硫酸镁,硼肥用硼砂。按照肥料配比 N:P₂O₅:K₂O=1.0:0.80:2.5 和常规施纯氮 0.12 g kg⁻¹ 来计算,各处理的纯 P₂O₅ 用量为 0.096 g kg⁻¹,纯 K₂O 用量为 0.30 g kg⁻¹,纯镁用量为 0.045 g kg⁻¹,硼砂用量为 6.0 mg kg⁻¹。在烤烟种植前 3 个月按量施入土壤并保持土壤湿润,使土壤对施用的肥料进行较充分的吸附固定。

1.3 测量方法

烤烟成熟后小心取出整棵烟株,冲洗干净根系,用刀分割开根与茎备用。将侧根自根结处剪下,冲洗干净,自然拉直,测定每条侧根根长,确定每株的最长侧根长^[18]。参考张志良等^[19]方法进行测定根系体积。借助测量标尺,统计成熟侧根的数量(长度大于 0.5 mm)^[20-22]。参照鲁如坤^[23]用烘干法测定烤烟根系和叶片的干重。

称取 0.20 g 新鲜烤烟根系,加 2 mL 酶提取液(含 38.125 mL 0.2 mol L⁻¹ Na₂HPO₄·12H₂O + 24.375 mL 0.2 mol L⁻¹ NaH₂PO₄·2H₂O)冰浴下研磨成匀浆,转入离心管,再分别用 4 mL 酶提取液(pH 7.0, 50 mmol L⁻¹ PBS)少量多次冲洗研钵并入离心管,总体积共 6 mL,离心机先预冷,在 -4℃ 下 9690×g 离心 10 min,上清液于 -4℃ 冰箱保存。过氧化氢酶(CAT)活性参照王晶英^[24]的方法测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性参照 Giannoplitis^[25]的方法测定;可溶性蛋白质和丙二醛(MDA)含量依照李合生^[26]的方法测定;超氧阴离子自由基(O₂⁻)参照王爱国等^[27]的方法测定。

1.4 数据处理及分析

试验数据采用 DPS2005 软件进行方差分析,利用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果和分析

2.1 施氮和钙对烤烟根系形态的影响

从表 1 可以看出,施 0.12 g kg⁻¹氮时,成熟期烤烟的最长侧根长、根系体积、侧根数和根干重均随施钙量增加呈先升高后降低的趋势,最长侧根长、根系体积和根干重均以 1.00 g kg⁻¹钙处理的最高,分别为 43.98 cm、28.18 mL和 7.60 g;侧根数以 0.40 g kg⁻¹钙处理的最高。1.00 g kg⁻¹和 2.00 g kg⁻¹钙处理的最长侧根长差异不显著,但它们均与其他处理的存在极显著差异,1.00 g kg⁻¹钙处理的根系体积和根干重均显著或极显著高于其他处理,0.40 g kg⁻¹和 1.00 g kg⁻¹钙处理的侧根数差异显著,但 0.40 g kg⁻¹钙处理与其他处理存在极显著差异。

施 0.20 g kg⁻¹氮时,成熟期烤烟的最长侧根长、根系体积、侧根数和根干重均以 0.40 g kg⁻¹钙处理的最高,分别为 43.20 cm、39.53 mL、42.67 条和 10.64 g。在 0.20 g kg⁻¹氮条件下,0.40 g kg⁻¹和 1.00 g kg⁻¹

钙处理组的最长侧根长和侧根数差异均不显著,但 0.40 g kg⁻¹钙处理的均显著或极显著高于其他处理组,0.40 g kg⁻¹钙处理的根系体积极显著高于其他处理,0.40、1.00 和 2.00 g kg⁻¹钙处理间的根干重差异不显著,但均极显著高于对照。

总体上看,施 0.20 g kg⁻¹氮的最长侧根长、根系体积和根干重均极显著高于施 0.12 g kg⁻¹氮,但侧根数的差异不显著。随施钙量的增加,烤烟的最长侧根长、侧根数、根系体积和根干重均呈先增后减的趋势,最长侧根长和根干重均以 1.00 g kg⁻¹ Ca 处理的最高,分别比对照极显著升高了 19.19% 和 25.24%;根系体积和侧根数均以 0.40 g kg⁻¹ Ca 处理的最高,分别比对照极显著提高了 26.51%和 18.57%。但随钙肥用量的继续增加,烤烟根系形态呈下滑的趋势。

方差分析表明(表 2):氮肥、钙肥和氮肥 × 钙肥互作对烤烟的最长侧根长、根系体积和根干重的影响均达极显著水平,钙肥对侧根数的影响极显著,而氮肥和氮肥 × 钙肥互作对侧根数的影响不显著。

表 1 施氮和钙对烤烟根系形态的影响

Table 1 Effects of N and Ca fertilizer on root morphology of *Nicotiana tabacum*

	Ca (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)		平均 Mean
		0.12	0.20	
最长侧根长 Length of the longest lateral root (cm)	0 (Control)	32.42cC	40.42bcAB	36.42cC
	0.40	38.23bB	43.20aA	40.71bB
	1.00	43.98aA	42.84abA	43.41aA
	2.00	42.43aA	38.32cB	40.37bB
	平均 Mean		39.26bB	41.19aA
根系体积 Root volume (mL)	0 (Control)	20.55cB	31.13cC	25.84cB
	0.40	25.85bA	39.53aA	32.69aA
	1.00	28.18aA	34.68bB	31.43aA
	2.00	22.66cB	32.45cBC	27.55bB
	平均 Mean		24.31bB	34.45aA
侧根数 Number of lateral root	0 (Control)	36.00dC	37.67cB	36.83cC
	0.40	44.67aA	42.67aA	43.67aA
	1.00	42.00bAB	40.67abAB	41.33bB
	2.00	39.33cB	40.00bcAB	39.67bB
	平均 Mean		40.50aA	40.25aA
根干重 Dry weight of root (g)	0 (Control)	5.43cC	8.83bB	7.13cC
	0.40	5.65cC	10.64aA	8.15bB
	1.00	7.60aA	10.46aA	8.93aA
	2.00	6.94bB	10.26aA	8.70aA
	平均 Mean		6.41bB	10.05aA

数据后不同小写和大写字母分别表示显著($P < 0.05$)和极显著差异($P < 0.01$)。下表同。

Data followed different small and capital letters indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same is following Tables.

表2 氮肥和钙肥对根系形态影响的方差分析

Table 2 Variance analysis between N and Ca fertilizers and root morphology

变异因子 Variation factor	F			
	最长侧根长 Length of the longest lateral root	侧根数 Number of lateral root	根系体积 Root volume	根干重 Dry weight of root
N	10.53**	0.2052	418.9**	861.0**
Ca	23.49**	27.14**	42.16**	40.68**
N×Ca	21.72**	2.394	8.882**	15.03**

** : $P < 0.01$.

2.2 施氮和钙对烤烟根系生理代谢的影响

由表3可见,施0.12 g kg⁻¹氮时,施0.40 g kg⁻¹钙的成熟期烤烟根系CAT和SOD活性提高,MDA含量和O₂⁻则下降,但施1.00和2.00 g kg⁻¹钙的CAT和SOD活性明显下降,且MDA含量和O₂⁻明显提高;可溶性蛋白质含量则以施1.00 g kg⁻¹钙处理的最高,施2.00 g kg⁻¹钙的下降。方差分析表明,0.40 g kg⁻¹钙处理的CAT、SOD活性、MDA含量和O₂⁻均与其他处理达显著或极显著差异,施钙处理间的可溶性蛋白质含量差异不显著,但显著高于对照。

施0.20 g kg⁻¹氮时,施0.40 g kg⁻¹钙处理的成熟期烤烟根系CAT、SOD活性和可溶性蛋白质含量提高,MDA含量和O₂⁻则下降,但施钙高于1.00 g kg⁻¹时,CAT、SOD活性和可溶性蛋白质含量明显下降,而MDA含量和O₂⁻明显提高。方差分析表明,施0.40 g kg⁻¹钙处理的CAT活性和可溶性蛋白质含量极显著高于其他处理,施0.40和1.00 g kg⁻¹钙处理的SOD活性差异不显著,但显著或极显著高于其他处理,施0.40 g kg⁻¹钙处理的MDA含量极显著低于其他处理,施0.40和1.00 g kg⁻¹钙处理的O₂⁻差异不显著,但极显著低于其他处理。

总体来说,施0.20 g kg⁻¹氮的SOD活性显著低于施0.12 g kg⁻¹氮的,施0.20 g kg⁻¹氮的可溶性蛋白质含量极显著高于施0.12 g kg⁻¹氮的,施0.20 g kg⁻¹氮的MDA含量极显著低于施0.12 g kg⁻¹氮的,而CAT活性和O₂⁻的差异不显著。随施钙量的增加,烤烟根系CAT、SOD活性和可溶性蛋白质含量均呈现先升高后降低的趋势,以施0.40 g kg⁻¹钙的最高,而MDA含量和O₂⁻均呈现先下降后上升的趋势,以0.40 g kg⁻¹施钙量为最低。方差分析表明(表4),氮肥对烤烟根系CAT活性和O₂⁻的影响不显著,对SOD活性的影响显著,但氮肥对可溶性蛋白质和

MDA含量的影响极显著;钙肥和氮肥×钙肥互作对成熟期烤烟根系的CAT、SOD活性、可溶性蛋白质、MDA含量和O₂⁻的影响极显著。

2.3 施氮和钙对烤烟叶片干重的影响

由表5可见,施0.12 g kg⁻¹氮和1.00 g kg⁻¹钙的

表3 施氮和钙对烤烟根系生理代谢的影响

Table 3 Effects of N and Ca fertilizers on root physiological metabolism of *Nicotiana tabacum*

变异因子 Variation factor	Ca (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)		平均 Mean
		0.12	0.20	
CAT (U g ⁻¹ min ⁻¹)	0 (Control)	47.1bB	50.2bB	48.7bB
	0.40	60.9aA	59.7aA	60.3aA
	1.00	46.3bB	47.1cB	46.7cB
	2.00	36.0cC	30.4dC	33.2dC
平均 Mean		47.6aA	46.9aA	
SOD (U g ⁻¹ min ⁻¹)	0 (Control)	10.7cB	13.8bAB	12.3cB
	0.40	21.9aA	16.9aA	19.4aA
	1.00	19.2bA	15.8abA	17.5bA
	2.00	11.1cB	10.9cB	11.0cB
平均 Mean		15.7aA	14.4bA	
可溶性蛋白质含量 Soluble protein content (mg g ⁻¹)	0 (Control)	5.99bA	9.30bB	7.65bB
	0.40	7.27aA	11.7aA	9.49aA
	1.00	7.33aA	8.59bB	7.96bB
	2.00	6.43abA	6.52cC	6.48cC
平均 Mean		6.76bB	9.03aA	
MDA (nmol g ⁻¹)	0 (Control)	6.28aA	5.19aA	5.73aA
	0.40	2.84cC	1.55dD	2.20dD
	1.00	4.29bB	3.04cC	3.66cC
	2.00	4.45bB	4.22bB	4.33bB
平均 Mean		4.46aA	3.50bB	
O ₂ ⁻ (nmol g ⁻¹ min ⁻¹)	0 (Control)	28.3aA	24.0bB	26.2bB
	0.40	18.8cB	11.0cC	14.9dD
	1.00	24.3bA	13.6cC	18.9cC
	2.00	25.3bA	48.8aA	37.0aA
平均 Mean		24.2aA	24.3aA	

表4 氮肥和钙肥对根系生理代谢影响的方差分析

Table 4 Variance analysis between N and Ca fertilizers and root physiological metabolism

变异因素 Variation factor	F				
	CAT	SOD	可溶性蛋白质 Soluble protein	MDA	O ₂ ⁻
N	1.228	5.445*	81.73**	147.9**	0.0778
Ca	311.6**	49.99**	24.39**	343.2**	228.5**
N×Ca	8.552**	9.916**	15.24**	9.876**	151.0**

**: $P<0.01$

叶干重最高,极显著高于其他处理组。施 0.20 g kg^{-1} 氮时,叶干重随着施钙量的提高而逐渐下降,施 0.40 g kg^{-1} 钙处理与对照的差异不显著,施 1.00 和 2.00 g kg^{-1} 钙处理的与对照的差异分别达显著和极显著水平。

施 0.20 g kg^{-1} 氮的叶干重极显著高于施 0.12 g kg^{-1} 氮的。随着施钙量的增加,烤烟叶干重呈现先升高后下降的趋势,以施 1.00 g kg^{-1} 钙处理的最高,且与对照的差异显著,施 2.00 g kg^{-1} 钙的叶干重与对照相比极显著下降。

方差分析结果表明,氮肥、钙肥以及氮肥×钙肥互作对成熟期烤烟叶干重的影响均达极显著水平, F 值分别为 1060.33^{**} 、 37.02^{**} 和 40.53^{**} 。

表5 施氮和钙对烤烟叶干重(g)的影响

Table 5 Effects of N and Ca fertilizers on dry weight (g) in leaves of *Nicotiana tabacum*

Ca (g kg^{-1})	N (g kg^{-1})		平均 Mean
	0.12	0.20	
0 (Control)	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	53.92cB
平均 Mean	52.75bB	58.99aA	

3 结论和讨论

植物生长所需的氮主要靠根系吸收,且氮素对根系形态、生长及其分布的影响是所有矿质营养中最大的^[28]。具有较长的根长和多而发达侧根的植物,其根系与介质中养分的接触面积大,因而对氮素的吸收和产量形成也具有更大的潜力^[29]。本研究结果表明,与 0.12 g kg^{-1} 施氮量比较,施 0.20 g kg^{-1} 氮的烤烟最长侧根长、根系体积、根干重和叶干重、

根系可溶性蛋白质含量均极显著提高,SOD活性显著下降,MDA含量极显著下降,但侧根数、CAT活性和O₂⁻的差异均不显著。这说明适宜的施氮量可以促进烤烟根系的生长以及产量的形成,结合烤烟根系生理代谢的影响来看, 0.20 g kg^{-1} 是促进烤烟根系生长和产量积累的适宜施氮量。这与刘哲等^[30]的研究结果一致,即较高的氮素水平促进水稻(*Oryza sativa*)根系生长,迅速提高根干重。王树起等^[31]的研究也表明,在一定范围内施氮使大豆(*Glycine max*)植株生物量增加,同时对其根系的生长发育有促进作用。这可以用碳氮平衡和碳水化合物定向分配来解释,碳氮代谢是作物最基本的代谢过程,其变化动态直接影响着光合产物的形成、转化以及蛋白质的合成等。养分缺乏时植物总是通过调节地上部和根系间的碳和氮养分分布,以最大程度地获取限制其生长的养分资源^[31]。氮素吸收所消耗的碳主要用于维持吸收器官(一般指根)的生长,大部分生物物质向根的分配意味着消耗大量的碳^[32]。植物地上部及根系的相对生长速率受植物体内氮素营养状况相关信号的调节,在一定范围内,增加氮素供应可以促进地上部和根系的生长^[33]。

钙是植物生长发育所必需的大量元素,是偶联胞外信号与胞内生理反应的第二信使^[34]。研究表明,钙能提高植物组织或细胞的多种抗性,在胁迫条件下,细胞内游离Ca²⁺常显著增加,以启动基因表达,激活一系列生化反应,使植物适应环境胁迫^[35-37]。本研究结果表明,在一定范围内施钙,烤烟根系形态和产量均有所增加。这与张恩让等^[38]对辣椒(*Capsicum annuum*)幼苗的研究结果一致,可能是由于适当增加钙肥能促进根系细胞内Ca²⁺浓度的增加, Ca²⁺与钙调素(CaM)结合,引起蛋白激酶的活化,最终促进细胞的伸长和生长。烤烟根系CAT、SOD活性和可溶性蛋白质含量随施钙量的增加呈先升后降的趋势,以施 0.40 g kg^{-1} 钙处理的最大,烤烟根系MDA含量和O₂⁻则呈先降后升的趋势,以施 0.40 g kg^{-1} 钙处理的最小,这与生利霞等^[39]对樱桃(*Prunus subhirtella*)砧木根系、王长义等^[40]对黄瓜幼苗根系和李天来等^[41]对番茄幼苗根系的研究结果一致。由于植物保护酶CAT和SOD活性受Ca²⁺诱导和调控, Ca²⁺激活了细胞质膜氧化还原酶类,使得线粒体产生的活性氧能很快被还原,缓解了膜质过氧化作用(MDA含量和O₂⁻的减

少),降低了对电子传递链的阻抑,使得线粒体呼吸作用能比较正常地进行,从而提供了细胞代谢所需的能量,增强植株对逆境的抗性^[39];可溶性蛋白质含量的增加可能是由于Ca²⁺作为第二信使,在一定程度上增强渗透调节物质的含量。

对番茄^[10]、油桃^[11]、黄瓜^[12]的研究表明氮肥和钙肥用量之间具有相关性。本研究结果表明,氮钙互作对烤烟成熟期的根系形态、生理代谢及产量等的影响显著。施0.12 g kg⁻¹氮同时配施 0.40 g kg⁻¹钙能够有效促进烤烟根系生理代谢,配施 1.00 g kg⁻¹钙能够最大限度改善根系形态及提高产量;而施 0.20 g kg⁻¹氮时配施 0.40 g kg⁻¹钙能够有效促进烤烟根系生理代谢、改善根系形态,但产量变化不显著。根系是植物吸收养分的主要器官,其形态及构型在很大程度上决定着植物获取养分的能力^[42],其数量的多少、活力的强弱与作物的衰老、物质生产、同化产物的运输分配等关系密切^[43],对产量形成具有举足轻重的影响。同时,有研究表明植物对养分的吸收以及最终产量的形成是根系形态特征和生理特性共同影响的结果^[42]。由于氮钙的交互作用比较复杂,与作物种类、培养基质、肥料种类以及浓度等密切相关,因此,在实际生产中应该综合考虑二者的关系,以确定适宜的氮、钙比例,只有两者用量平衡时,才能充分发挥烤烟根系生长的最大潜能,对提高烤烟产量具有重要生产实践意义。

参考文献

- [1] Yang Y H, Feng Z A, Jin Y, et al. Influence of acid soil on the quality of tobacco leaf and yield and regulation to tobacco's growth [J]. J Yunnan Agri Univ, 2004, 19(1): 41–44.
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] Cheng J F, Dai T B, Jing Q, et al. Root morphological and physiological characteristics in relation to nitrogen absorption efficiency in different rice genotypes [J]. Acta Pedol Sin, 2007, 44(2): 266–272.
程建峰, 戴廷波, 荆奇, 等. 不同水稻基因型的根系形态生理特性与高效氮素吸收 [J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 266–272.
- [3] Zhang X L, Li H. Relationship between maize roots and the environmental conditions [J]. J Shanxi Agri Sci, 2010, 38(7): 120–122.
张旭丽, 李洪. 玉米根系与环境条件的关系 [J]. 山西农业科学, 2010, 38(7): 120–122.
- [4] Shierlaw J, Alston A M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorous [J]. Plant Soil, 1984, 77(1): 15–28.
- [5] Zi D Z, Guo Y Q. Tobacco Cultivation [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1996: 1–113.
瞿大镇, 郭月清. 烟草栽培 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 1–113.
- [6] Igarashi H, Vidali L, Yokota E, et al. Actin filaments purified from tobacco cultured BY-2 cells can be translocated by plant myosin [J]. Plant Cell Physiol, 1999, 40(11): 1167–1171.
- [7] Bush D S, Wang T. Diversity of calcium-efflux transporters in wheat aleurone cells [J]. Planta, 1995, 197(1): 19–30.
- [8] Jian L C, Li J H, Chen W P, et al. Cytochemical localization of calcium and Ca²⁺-ATPase activity in plant cells under chilling stress: A comparative study between the chilling-sensitive maize and the chilling-insensitive winter wheat [J]. Plant Cell Physiol, 1999, 40(10): 1061–1071.
- [9] Jian L C, Li J H, Li P H. Seasonal alteration in amount of Ca²⁺ in apical bud cells of mulberry (*Morus bombycis* Koidz): An electron microscopy-cytochemical study [J]. Tree Physiol, 2000, 20(9): 623–628.
- [10] Lou C R, Han X R, Xiao Q M, et al. Interactive effect of N and Ca on N uptake by tomato [J]. Chin J Appl Ecol, 2004, 15(4): 667–672.
娄春荣, 韩晓日, 肖千明, 等. 氮和钙交互作用对番茄氮素吸收的影响 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 667–672.
- [11] Li Z Y, Zhang Y, Han L H, et al. The interactive effects of nitrogen and calcium on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of nectarine under protected culture [J]. Plant Nutr Fert Sci, 2013, 19(4): 893–900.
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.
- [12] Zhao P, Li X H, Wang K A, et al. Interactive effect of N and Ca on nitrate metabolism in greenhouse cucumber [J]. Shandong Agri Sci, 2008(3): 68–70.
赵朋, 李絮花, 王克安, 等. 氮钙互作对日光温室中黄瓜硝酸盐代谢的影响 [J]. 山东农业科学, 2008(3): 68–70.
- [13] Zhao K, Li H T. Effect of different nitrogen application levels and density levels on peanut seedling root [J]. Agri Sci Techn Equip, 2011(6): 7–8.
赵坤, 李红婷. 不同密度和氮肥水平对花生苗期根的影响 [J]. 农业科技与装备, 2011(6): 7–8.
- [14] Xiao C X, Liu Y S, Chen F J, et al. Effect of nitrogen supply and solution pH on maize root morphology [J]. J Maize Sci, 2013, 21(5): 113–116.
肖长新, 刘壬双, 陈范骏, 等. 氮素供应和pH值对玉米根系形态的影响 [J]. 玉米科学, 2013, 21(5): 113–116.
- [15] Han G G, Feng Y H, Zhao T J, et al. Effects of fertilizer-N application rate and tillage patterns on root properties and yield of transplanted hybrid rice Qiannanyou 2058 [J]. Res Agri Mod,

- 2009, 30(2): 225–228.
- 韩钢钢, 冯跃华, 赵田径, 等. 施氮量和耕作方式对杂交水稻黔南优2058根系特性及产量的影响 [J]. 农业现代化研究, 2009, 30(2): 225–228.
- [16] Wang H R, Zhang Y Q. Effect of water and nitrogen supply on physiological characteristics of *Broomcorn millet* root at jointing stage [J]. *Acta Bot Boreal-Occid Sin*, 2013, 33(9): 1859–1866.
- 王海茹, 张永清. 水氮互作对拔节期黍稷根系生理特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2013, 33(9): 1859–1866.
- [17] Lu R K. Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science Press, 1999: 33–55, 73–89, 213–218.
- 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, 1999: 33–55, 73–89, 213–218.
- [18] Wang P, Chen Q, Chen D J, et al. Effect of exogenous IAA on root growth of black soybean under aluminum stress [J]. *Soybean Sci*, 2013, 32(5): 650–654.
- 王平, 陈奇, 陈东杰, 等. 外源添加IAA对铝胁迫下黑大豆根系生长的影响 [J]. 大豆科学, 2013, 32(5): 650–654.
- [19] Zhang Z L, Qu W J. Instruction of Plant Physiology Experiment [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003: 1–34.
- 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 1–34.
- [20] Zhang H M, Jennings A, Barlow P W, et al. Dual pathways for regulation of root branching by nitrate [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1999, 96(11): 6529–6534.
- [21] Li B H, Li Q, Su Y H, et al. Shoot-supplied ammonium targets the root auxin-influx carrier AUX1 and inhibits lateral root emergence in *Arabidopsis* [J]. *Plant Cell Environ*, 2011, 34(6): 933–946.
- [22] Feng X Y, Li G J, Dong G Q, et al. The effects of different concentrations of NH_4^+ and K^+ treatments on lateral root development of *Arabidopsis amos2* mutant [J]. *J Plant Physiol*, 2013, 49(5): 463–468.
- 冯晓宇, 李光杰, 董刚强, 等. 不同浓度 NH_4^+ 和 K^+ 处理对拟南芥突变体 amos2 侧根发育的影响 [J]. 植物生理学报, 2013, 49(5): 463–468.
- [23] Lu R K. Analysis method of Soil Agricultural Chemistry [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999: 204–206.
- 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999: 204–206.
- [24] Wang J Y. Experimental Techniques and Principles for Plant Physiology and Biochemistry [M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2003: 6–83.
- 王晶英. 植物生理生化实验技术与原理 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003: 6–83.
- [25] Giannopolitis C N, Rice S K. Superoxide dismutases: II. Purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings [J]. *Plant Physiol*, 1997, 59(2): 315–318.
- [26] Li H S. Experimental Principles and Techniques for Plant Physiology and Biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 184–185.
- 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: 184–185.
- [27] Wang A G, Luo G H. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants [J]. *Plant Physiol Commun*, 1990(6): 55–57.
- 王爱国, 罗广华. 植物的超氧物自由基与羟胺反应的定量关系 [J]. 植物生理学通讯, 1990(6): 55–57.
- [28] Kamh M, Wiesler F, Ulas A, et al. Root growth and N-uptake activity of oilseed rape (*Brassica napus* L.) cultivars differing in nitrogen efficiency [J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2005, 168(1): 130–137.
- [29] Huang G B, Zhang E H, Hu H J. Eco-physiological mechanism on nitrogen use efficiency difference of corn varieties [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2001, 7(3): 293–297.
- 黄高宝, 张恩和, 胡恒觉. 不同玉米品种氮素营养效率差异的生态生理机制 [J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 293–297.
- [30] Liu Z, Ma D R, Chen W F. Influence of nitrogen applying in different levels on physiological characteristics of root system of rice [J]. *Reclaim Rice Cult*, 2006(3): 58–59.
- 刘哲, 马殿荣, 陈温福. 不同施氮水平对水稻根系生理特性的影响 [J]. 垦殖与稻作, 2006(3): 58–59.
- [31] Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Root morphology and nitrogen accumulation in soybean (*Glycine max* L.) under different nitrogen application levels [J]. *Chin J Eco-Agri*, 2009, 17(6): 1069–1073.
- 王数起, 韩晓增, 乔云发, 等. 施氮对大豆根系形态和氮素吸收积累的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1069–1073.
- [32] Cai Y, Zheng D F, Feng N J, et al. Effect of nitrogen fertilizer on growth tendency, dry matter accumulation and distribution in soybean [J]. *J Heilongjiang Aug First Land Reclam Univ*, 2007, 19(2): 13–16.
- 才艳, 郑殿峰, 冯乃杰, 等. 氮肥施用量对大豆生长动态及干物质积累的影响 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2007, 19(2): 13–16.
- [33] Shi Z J, Fan X L. Progress in root morphology for nitrogen efficient acquisition in crop [J]. *J Guangxi Agri Biol Sci*, 2003, 22(3): 225–229.
- 史正军, 樊小林. 作物对氮素养分高效吸收的根系形态学研究进展 [J]. 广西农业生物科学, 2003, 22(3): 225–229.
- [34] Xiong L M, Schumaker K S, Zhu J K. Cell signaling during cold, drought, and salt stress [J]. *Plant Cell*, 2002, 14(S): S165–S183.
- [35] Gong M, Chen S N, Song Y Q, et al. Effect of calcium and

- calmodulin on intrinsic heat tolerance in relation to antioxidant systems in maize seedlings [J]. *Aust J Plant Physiol*, 1997, 24(3): 371–379.
- [36] Gong M, van der Luit A H, Knight M R, et al. Heat-shock-induced changes in intracellular Ca^{2+} level in tobacco seedlings in relation to thermotolerance [J]. *Plant Physiol*, 1998, 116(1): 429–437.
- [37] Zhang F, Luo C D, Zhang J. Alleviation effect of exogenous Ca, P and N on the growth of Chinese fir seedlings under Al stress [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(2): 213–217.
张帆, 罗承德, 张健. 外源钙、磷、氮对铝胁迫下杉木幼苗生长影响的调控研究 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 213–217.
- [38] Zhang E R, Ren Y Y, Hu H Q, et al. Effects of calcium on growth and respiratory metabolism of hot pepper seedling roots under flood stress [J]. *Acta Hor Sin*, 2009, 36(12): 1749–1754.
张恩让, 任媛媛, 胡华群, 等. 钙对淹水胁迫下辣椒幼苗根系生长和呼吸代谢的影响 [J]. *园艺学报*, 2009, 36(12): 1749–1754.
- [39] Sheng L X, Feng L G, Shu H R. Effect of calcium on the functions of antioxidant systems and mitochondria in cherry rootstock roots under hypoxia stress [J]. *Sci Agri Sin*, 2008, 41(11): 3913–3919.
生利霞, 冯立国, 束怀瑞. 低氧胁迫下钙对樱桃砧木根系抗氧化化系统及线粒体功能的影响 [J]. *中国农业科学*, 2008, 41(11): 3913–3919.
- [40] Wang C Y, Guo S R, Liu C J. Effects of calcium on expression of defense enzymes isoenzymes in roots of cucumber seedlings under root-zone hypoxic stress [J]. *Acta Bot Boreal-Occid Sin*, 2009, 29(9): 1874–1880.
王长义, 郭世荣, 刘超杰. 钙对根际低氧胁迫下黄瓜幼苗根系保护酶同工酶表达的影响 [J]. *西北植物学报*, 2009, 29(9): 1874–1880.
- [41] Li T L, Gao X Q, Liu Y F. Effects of calcium on root activity and metabolism of reactive oxygen species of tomato seedlings under low night temperature stress [J]. *Acta Agri Boreal-Occid Sin*, 2011, 20(8): 127–132.
李天来, 高晓倩, 刘玉凤. 夜间低温胁迫下钙对番茄幼苗根系活力及活性氧代谢的调控作用 [J]. *西北农业学报*, 2011, 20(8): 127–132.
- [42] Lynch J P. Root architecture and plant productivity [J]. *Plant Physiol*, 1995, 109(1): 7–13.
- [43] Wang Y L, Yao Y L, Liu B Y, et al. Effect of nitrogen supplying levels and timings on the development of roots in hybrid *Indica* rice [J]. *Acta Agron Sin*, 1997, 23(6): 699–706.
王余龙, 姚友礼, 刘宝玉, 等. 不同生育时期氮素供应水平对杂交水稻根系生长及其活力的影响 [J]. *作物学报*, 1997, 23(6): 699–706.