

磷施用量对烤烟根系生理及叶片光合特性的影响

王艳丽^{1,2}, 王京², 刘国顺^{1,2}, 丁松爽^{1,2*}, 张璐²

(1 烟草行业烟草栽培重点实验室, 河南郑州 450002; 2 河南农业大学烟草学院, 河南郑州 450002)

摘要: 【目的】根系作为吸收水分和养分的重要器官, 其生理功能的强弱对烟草地上部分的生长发育有重要的影响。本研究分析磷施用量对烤烟不同生育期根系生理和叶片光合生理的影响, 初步阐明磷素对烤烟生长的生理效应, 明确烤烟品质形成的生理基础, 为生产中合理施磷提供一定的参考。【方法】2014年在河南农业大学采用盆栽土培试验, 设置四个处理, 各处理 P_2O_5 用量分别为 0(CK)、3.5(T1)、7.0(T2)和 10.5 g/plant(T3), N 用量为 3.5 g/plant, N:K₂O = 1:3。在烤烟不同生育时期测定各处理烟株的根系活力、根系总吸收表面积和活跃吸收表面积等根系生理指标以及中部叶的叶面积、叶绿素含量和叶片的光合指标。【结果】在整个生育期内, T2 处理烟株的根系活力强、根系总吸收表面积和根系活跃吸收表面积大。团棵期(移栽后 30 d 左右)随施磷量的增加, 上述根系生理指标及中部叶叶面积、叶绿素含量不断增加, T3 处理显著高于不施磷处理; 成熟期(移栽后 90 d 左右)T3 处理叶片的叶绿素含量较其他处理下降更快。随生育期的推进, 各处理叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度均呈现先升后降的变化趋势, 在移栽后 60 d 达到最大值。与其它处理相比, T2 处理叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度在整个生育期内均最大, 且在移栽后 60 d 时显著高于 CK 处理。根冠比随生育期的推进呈波动变化, 但整体表现出上升的趋势。在整个生育期内, T3 处理的根冠比最大, 其次为 CK, T1、T2 处理的根冠比相对较小。【结论】施用 P_2O_5 10.5 g/plant 的烟株在团棵期快速生长及成熟期叶绿素含量迅速下降的现象证明, 在一定范围内, 充足的磷素供应能促进烟株生育前期根系发育、叶片扩展, 生长后期烟叶适时落黄。磷用量对叶片光合性能和烟株根冠比的作用证明, 磷素对叶片光合性能的促进作用建立在烟株根、冠结构和功能协调一致的基础上, 当根、冠生长的协调性被打破, 其叶片的净光合速率也随之降低。施用 P_2O_5 7.0 g/plant 烟株整体表现最优, 而施用 P_2O_5 3.5 g/plant 在基本满足烟株正常生长的同时能够降低生产成本, 这对生产中如何确定磷肥的施用量提供了一定的参考。

关键词: 烤烟; 磷; 根系生理; 叶片形态生理

中图分类号: S572.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)02-0410-08

Effects of different phosphorus levels on root physiological and leaf photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco

WANG Yan-li^{1,2}, WANG Jing², LIU Guo-shun^{1,2}, DING Song-shuang^{1,2*}, ZHANG Lu²

(1 Tobacco Industry Tobacco Cultivation Key Laboratory, Zhengzhou 450002, China;

2 Tobacco College of Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: 【Objectives】Root is the vital organ for absorbing water and nutrients. Its physiological intensity plays a very important role in the growth of aerial parts. In this research, the effects of different phosphorus levels on root physiological and leaf photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco at different growth stages were analyzed to clarify the physiological effect of phosphorus on the growth of flue-cured tobacco, to illustrate the formation mechanism of its superior quality and provide some references for reasonably application of phosphorus in tobacco production. 【Methods】Four phosphate levels were designed in a pot experiment in Henan Agricultural University

收稿日期: 2014-09-17 接受日期: 2015-04-07 网络出版日期: 2015-04-21

基金项目: 中国烟草总公司特色优质烟叶开发重大专项浓香型项目“浓香型特色优质烟叶科学保障大田生长时间配套技术”(Ts-01-2011005)。

作者简介: 王艳丽(1989—), 女, 河南三门峡人, 硕士研究生, 主要从事烟草栽培生理研究。Tel: 0371-63555713, E-mail: yanliw000@163.com

* 通信作者 Tel: 0371-63558398, E-mail: shuangsd@126.com

in 2014. The four levels were P_2O_5 : 0 (CK), 3.5 (T1), 7.0 (T2) and 10.5 g/plant (T3). In each pot, 3.5 g N and 10.5 g K_2O were applied. Root physiological traits and leaf morphological and physiological indexes were investigated at different growth stages of flue-cured tobacco. **【Results】** Higher root activity, total root absorption area, root active absorption area and the net photosynthesis rate of middle leaf in the whole growth period were achieved in T2 treatment than in other ones. With increasing of the phosphorus supply levels, all the root physiological traits, middle leaf areas and the contents of chlorophyll increased at the knee-high stage and the increase in T3 treatment was higher than CK significantly. The leaf chlorophyll content declined faster in T3 treatment than in other ones at the mature stage. For all treatments, the net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular CO_2 concentration of tobacco leaf were firstly increasing and then decreasing along with the elongation of growth period and all the indexes above reached a maximum at 60 days after transplanting. The leaf net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of T2 were all the highest in the whole growth period and the differences with those in CK were significant at 60 days after transplanting. With the elongation of growth period, the root to shoot ratio of tobacco fluctuated but showed an upward trend. During the whole growth period, the maximum root to shoot ratio was in T3 treatment, followed by CK, those in T1 and T2 were relatively small. **【Conclusions】** The rapid growth of plants at the knee-high stage and decreasing of the chlorophyll content at the mature stage in T3 treatment suggested that supplying adequate phosphorus within a certain range contributed to the development of tobacco root and the expansion of leaf at the early growth stage and the maturity of tobacco leaves in due time. The affection of phosphorus on flue-cured tobacco root to shoot ratio proved that phosphorus had positive effect on leaf photosynthetic characteristics based on the structure and function of tobacco root and shoot on a coordinated basis. Once that coordination was broken, the net photosynthesis rate of its leaves would reduce. The growth and development of T2 was superior overall, while T1 could meet the needs of the normal growth of tobacco and reduce production costs at the same time. It would provide some references to phosphate fertilizer application rate in tobacco production.

Key words: flue-cured tobacco; phosphorus; root physiological traits; leaf morphological and physiological traits

磷是植物生长发育所必需的营养元素之一,其对植物根系构型^[1]、光合作用及同化物在根、冠之间的分配起重要作用。在根系生长方面的研究表明,在一定范围内增施磷肥,烤烟根体积、总根长和根表面积增大^[2];根系伤流强度和伤流液中可溶性糖含量增加^[3],为根系吸收养分及向地上部运输养分提供了动力。贾志红等^[4]比较了高磷、低磷两种供磷水平下烟株的长势及生理机能,结果发现高磷处理烟株的长势和各项生理机能均好于低磷处理,但低磷处理烤烟根系构型优势主要在生育前期第一轮根、第二轮根及总不定根的发生,其不定根生成量超过高磷处理。刘国顺等^[3]研究认为,早期缺磷或低磷供应能促进烟株的根系发育,但随着生育进程的推进,磷胁迫会对烟株产生抑制作用,致使烟株发育受阻。在叶片生长和光合作用方面,磷不仅能促进烟叶叶肉细胞分裂和栅栏组织伸长^[5],进而促进叶片扩展,增强烟株对早期花叶病等病毒病的抵御能力,而且能提高烟叶的光能转化效率,为光合碳同化提供充足的还原力^[6]。在小麦^[7]、玉米^[8]、大

豆^[9]等作物上的研究表明,适宜的磷用量可保持植物良好的光合性能,缺乏或过量均会导致叶片光合能力降低。此外,适宜的磷供给能增强烟株对 K、Ca、P 等矿质营养的吸收,烤后烟叶化学成分协调,香气物质含量高,吃味好^[10-11];过量的磷素供给会导致烟叶变厚,组织变密^[5],木质素含量升高,烟叶品质下降。

烟草生长发育过程中对养分的需求是动态变化的,磷素对烤烟根系生理和叶片光合生理的影响在整个生育期内的动态变化尚缺乏系统的研究,本研究分析大田生育期内不同磷施用量对烤烟根系生理及叶片形态生理的影响,初步阐明磷素对烤烟生长的生理效应,明确烤烟品质形成的生理基础,以期为烤烟生产中合理施磷提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2014 年在河南农业大学烟草科教园进行盆栽试验。盆高 31.5 cm,内口径 42.0 cm,底径 28.5

cm。取当地农田 0—20 cm 耕层土,风干熏蒸消毒并过 0.5 cm × 1.0 cm 网筛,与肥料混合均匀后装盆,每盆装土 30 kg。每个处理 25 盆,按 120 cm × 55 cm 的行株距盆栽,将盆身埋于土中,起到保水、降温的作用。各处理钵钵随机区组排列,尽量避免因光照、通风等环境因素造成处理间的差异。烟株生长过程中经常转动盆体,避免根系扎入土中。5 月 4 日移栽,7 月 6 日打顶(因生长状况不同,各处理烟株打顶时间存在 1~2 d 的差异)。采用滴灌装置浇水,根据天气情况和烟草不同生育期需水规律不同,适当延长或缩短灌水时间间隔。每次浇水时,于当天 15:00 打开滴灌装置,通过调节喷头旋钮来控制流速,以不成股流下为宜,21:00 左右关闭装置,确保盆中土壤全部浸湿。其他栽培管理措施及病虫害防治均按照当地优质烟叶生产管理要求进行。

供试品种为豫烟 10 号,土壤类型为褐土,有机质含量 2.05%、碱解氮含量 47.76 mg/kg、速效磷(P)含量 9.77 mg/kg、速效钾(K)含量 133.33 mg/kg、pH 7.71。试验设置四个处理,各处理 N:P₂O₅:K₂O 分别为 1:0:3(CK)、1:1:3(T1)、1:2:3(T2)和 1:3:3(T3)。每盆施纯氮 3.5 g,氮、磷、钾肥采用分析纯硝酸铵、磷酸二氢钾和硫酸钾。以单株烟为单位,计算其肥料用量并提前分装,分装好的肥料直接与土壤充分混匀后装盆。

1.2 测定内容及方法

在烟株移栽后 30 d 至移栽后 90 d,每隔 15 d 选取长势均匀一致且受光良好的中部功能叶片(自下而上第 12 片叶),于晴天上午 9:00~11:00 使用 LI-6400 便携式光合测定系统测定叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度等指标。测定采用红蓝光源叶室,设定光量子密度(PAR)为 1000 μmol/(m²·s)。每个处理测定 3 株,每株重复 3 次。

同期选取与测定光合参数相同的同一烟株,测量中部叶叶长、叶宽,取鲜烟叶用乙醇浸提法测定叶绿素含量。用清水小心冲洗烟根以获得完整根系,采用甲烯蓝法测定整株根系总吸收表面积和活跃吸收表面积,TTC 法测定根系活力。完成上述测定后,将烟株分叶、根、茎杀青(105℃ 15 min,65℃ 烘至恒重,大约 3~4 h),并记录干重。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 绘制折线图和柱形图,采用 SPSS 18.0 对不同处理间根系指标、叶

片形态和光合生理指标进行多重比较(Duncan 法)。

2 结果与分析

2.1 磷用量对不同生育期烤烟根系生理指标的影响

2.1.1 根系活力 图 1 表明,在烤烟大田生育期内,烟株根系活力变化规律呈“双峰”曲线,两峰值分别出现在移栽后 45 d 和移栽后 75 d。打顶对烤烟根系活力的提高有一定促进作用,尤其是 T2 处理,在移栽后 75 d 其根系活力明显增强且高于第一峰值。移栽后 30 d 时,各处理烤烟根系活力随施磷量的增加而增大,除 CK 外其他各处理间差异显著。此后 T2 处理烟株的根系活力一直处于较高水平,显著高于 CK(移栽后 90 d 除外)。

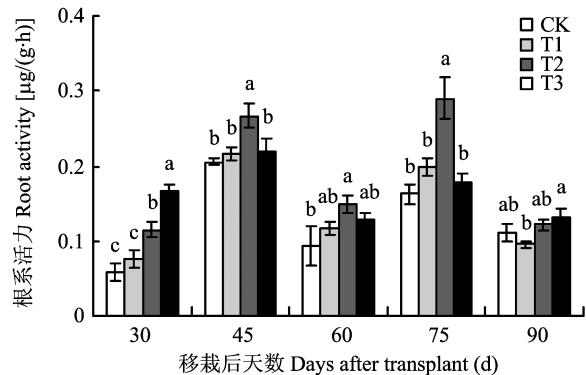


图 1 磷用量对烤烟不同生育时期根系活力的影响

Fig. 1 Effect of different P levels on the root activity during different growth periods

[注(Note): 不同小写字母表示同一生育期各处理在 0.05 水平上差异显著 Different small letters in the same growth stage mean significant difference at 0.05 level among treatments.]

2.1.2 根系吸收表面积 图 2 表明,随着生育进程的推进,烤烟根系总吸收表面积逐步增大,至移栽后 75 d 烟株根系的总吸收表面积较打顶前增加近一倍,这与此时根系活力的增加一致。随施磷量的增多,根系总吸收表面积表现出先增大后减小的趋势,即 P₂O₅ 用量为 7.0 g/plant 时更有利于烟株根系面积的扩展。移栽后 30 d 各施磷处理根系总吸收表面积较小且差异不显著,但都显著高于 CK。移栽 45 d 之后,各处理间根系总吸收表面积差异达显著水平,T2、T3 显著高于 CK 和 T1,CK 和 T1 烟株根系总吸收表面积差异达显著水平。根系活跃吸收表面积表现出与总吸收表面积类似的规律(图 2)。

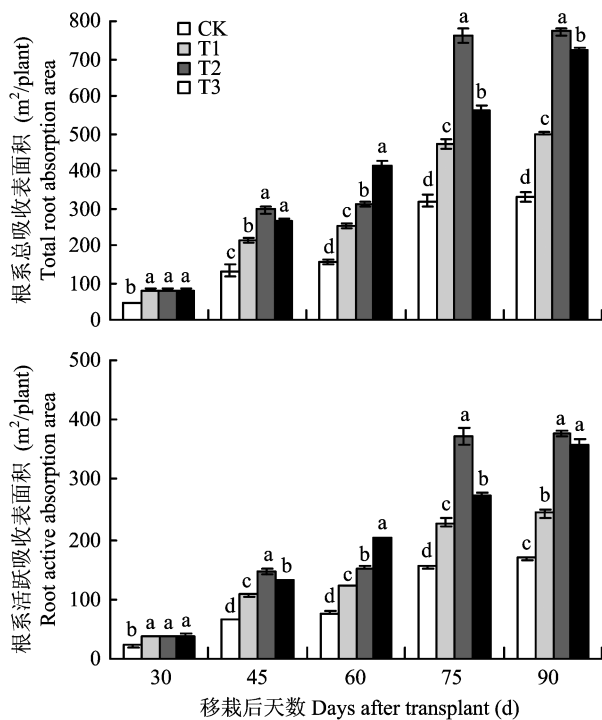


图2 磷用量对烤烟不同生育时期根系总吸收表面积、根系活跃吸收表面积的影响

Fig. 2 Effect of different P levels on total root absorption area and root active absorption area during different growth periods

[注 (Note): 不同小写字母表示同一生育期各处理在 0.05 水平上差异显著 Different small letters in the same growth stage mean significant difference at 0.05 level among treatments.]

2.2 磷用量对不同生育期烤烟叶片形态生理的影响

2.2.1 叶面积 各处理烟株中部叶在移栽 45 至 75 d 迅速扩展,叶面积是移栽后 30 d 的 10 倍左右,此后叶面积增长速度减慢,逐渐由扩展叶面向充实内含物方向转化。移栽 45 d 以前,中部叶叶面积随施磷量的增加而增加,T3 中部叶的叶面积最大,显著大于 T1 和 CK(表 1)。生育后期不同处理烤烟中部叶叶面积大小表现为 T2 > T3 > T1 > CK,T2 大于或显著大于 CK 中部叶的叶面积。

2.2.2 叶绿素含量 烤烟中部叶叶绿素 a 含量随生育期的推进呈下降趋势,在移栽后 45 d 至 60 d 叶片中叶绿素 a 含量相对稳定,此后迅速下降,至移栽后 90 d 其含量仅为移栽后 30 d 的 1/3 左右。移栽 45 d 以前,T2、T3 处理叶片的叶绿素 a 含量显著高于 CK,移栽后 60 d 各处理间差异显著,至烟叶成熟时 T3 处理叶绿素 a 大量降解,其含量又显著低于 T1 和 CK。叶绿素 b 含量的变化趋势与叶绿素 a 一致,表现出 T2、T3 叶绿素 b 含量在生育前期高后期低的特点。

2.2.3 叶片光合特性 图 3 表明,在整个生育期内,烟株叶片净光合速率(Pn)呈先增后降的变化趋势,各处理均于移栽后 60 d 达到峰值。Pn 在不同处理间均表现为 T2 最大,CK 最小,二者的差异在移栽后 60 d 以前达显著水平,其他生育期内各处理间差

表 1 烤烟不同生育时期各处理中部叶叶面积、叶绿素含量的多重比较

Table 1 Multiple comparison of different treatments on the middle leaf area and the chlorophyll content at different growth periods

项目 Item	处理 Treatment	移栽后天数 Days after transplant (d)				
		30	45	60	75	90
叶面积 (cm ²) Leaf area	CK	13.60 c	211.72 c	502.21 b	778.11 a	851.50 b
	T1	20.40 c	306.54 b	837.47 a	1061.10 a	1161.66 ab
	T2	31.33 b	386.99 a	984.63 a	1356.40 a	1399.87 a
	T3	44.65 a	404.51 a	960.26 a	1242.99 a	1287.08 ab
叶绿素 a (mg/g) Chlorophyll a	CK	1.05 c	0.97 c	1.00 d	0.60 b	0.56 a
	T1	1.33 bc	1.18 b	1.18 c	0.75 ab	0.52 a
	T2	1.55 ab	1.39 a	1.43 a	0.79 a	0.43 ab
	T3	1.67 a	1.29 ab	1.31 b	0.67 ab	0.31 b
叶绿素 b (mg/g) Chlorophyll b	CK	0.47 c	0.36 c	0.31 b	0.19 b	0.16 b
	T1	0.54 bc	0.42 bc	0.36 a	0.25 ab	0.19 a
	T2	0.61 ab	0.50 a	0.40 a	0.26 a	0.13 bc
	T3	0.64 a	0.49 ab	0.41 a	0.22 ab	0.11 c

注 (Note): 同一列数据后不同小写字母表示处理间差异达到 5% 显著水平 Different small letters in the same column mean significant difference at 0.05 level among treatments.

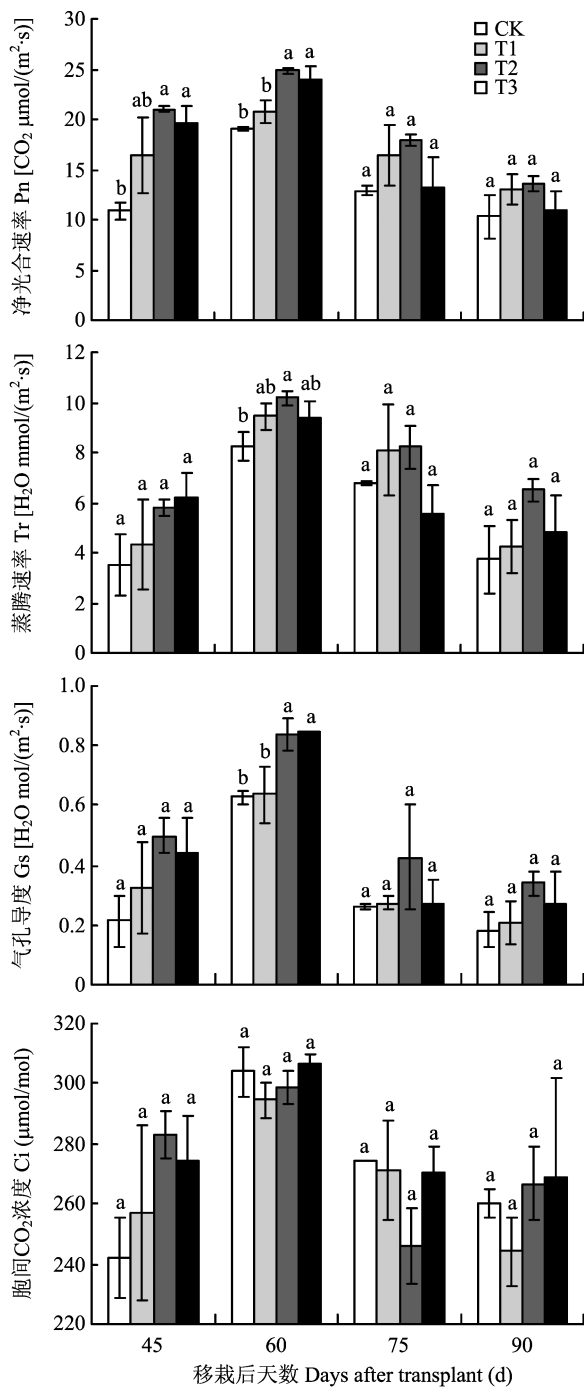


图3 磷用量对烤烟不同生育时期叶片光合特性的影响
Fig. 3 Effect of different P levels on the photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco during different growth periods

[注(Note): 柱上不同小写字母表示同一生育期各处理在 0.05 水平上差异显著 Different small letters above the bars in the same growth stage mean significant difference at 0.05 level among treatments.]

异不显著。叶片的蒸腾速率(Tr)与Pn变化趋势一致。各处理叶片气孔导度(Gs)的最大值均出现在移栽后60 d, T2、T3显著高于T1和CK, 此后Gs迅

速下降,可能由于生育后期气温较高所致。胞间CO₂浓度(Ci)在整个生育期内波动较小,各处理间差异不显著,进一步分析圆顶期、成熟期气孔限制值Ls [$Ls = 1 - Ci/Ca$]和Ci的变化认为,此时叶片Pn的下降主要是气孔限制。

2.3 磷用量对不同生育期烤烟根冠比的影响

图4表明,在整个生育期内,烤烟根冠比表现出“升-降-升”的变化趋势,前期根系快速生长,为地上部的生长做准备,根冠比增加,移栽后60 d左右烟株逐渐由营养生长转向生殖生长,更多的干物质向地上部分分配,为花芽分化提供物质基础,根冠比降低。各处理折点出现的时间存在差异。T1、T2处理烟株的根冠比在移栽后45 d达到最大值后开始下降,CK、T3处理根冠比则在移栽60 d之后逐渐下降,说明不施磷或过量施磷促使更多的干物质向根系分配,地上部快速生长的时间推迟。移栽75 d之后各处理烟株根冠比均小幅上升。整个生育期内T3处理烟株的根冠比最大,显著高于其他处理(移栽后30 d除外),T1、T2处理生育前期较大的根冠比为烟株地上部分更好地生长提供了可能,使其根冠比在移栽60 d时显著低于CK和T3。

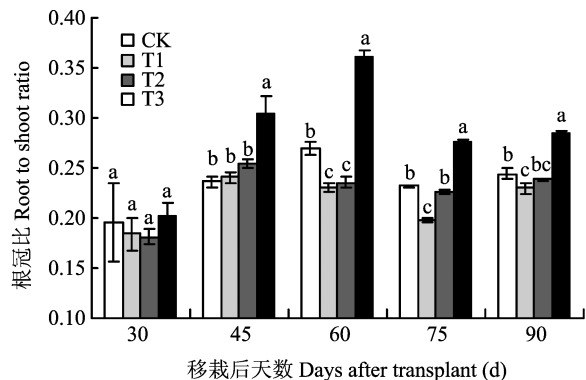


图4 磷用量对烤烟不同生育时期根冠比的影响
Fig. 4 Effect of different P levels on the root to shoot ratio of flue-cured tobacco during different growth periods
[注(Note): 柱上不同小写字母表示同一生育期各处理在 0.05 水平上差异显著 Different small letters above the bars in the same growth stage mean significant difference at 0.05 level among treatments.]

3 讨论

本研究表明,在烤烟进入旺长(移栽后40 d左右)以前,随施磷量的增多烟株叶面积不断扩展,根系健壮,根系活力、根系活跃吸收表面积等根系生理活性增强,T3处理烟株具有明显的生长优势。移栽45 d之后,T2处理烟株根系活力、总吸收表面积

和活跃吸收表面积高于或显著高于其他处理,中部叶叶面积及净光合速率也较大,但与 T1、T3 处理间差异不显著。这与本课题组于 2013 年在河南襄城县进行的同一大田试验结果趋于一致,但大田试验各处理烟株具有更高的根系活力(各处理平均值为 $0.272 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$)和较小的根冠比(各处理平均值为 0.20)。叶绿素 a 和叶绿素 b 含量表现为前期随施磷量增加而增加,在移栽后 45 至 75 d, T2 处理叶片其含量最多,至成熟期 T2、T3 处理叶片中叶绿素 a 和叶绿素 b 含量迅速下降,这是烟叶成熟落黄的表现,与李立新等^[12]的研究随施磷量的增加烟草大田生育期缩短一致。

在一定范围内,增施磷肥能显著促进植物根系的发育。贾志红等^[4]研究认为,在高磷环境下旺长期烟株的根系活力、根重均大于低磷处理。单施磷肥能使小麦根长比不施肥处理增加近 1.5 倍,根重增加近一倍,单施氮、钾肥却达不到这种促进效果^[14]。刘国顺等^[3]研究表明,低磷土壤随施磷量的增加,烤烟伤流强度增大,根冠比呈下降趋势,这与本研究结果随施磷量的增加烤烟根系活力先升后降、根冠比先降后升不一致,可能由于本研究 T3 处理的磷用量更高,超过一定量后磷素对烤烟的生长出现了抑制作用。

磷素与植物的光合特性关系密切,尤其是低磷胁迫下植物叶片的净光合速率等气体交换参数显著下降,磷高效植物品种具有维持光合器官结构和功能的作用,在一定程度上能减弱这种胁迫。如低磷处理下甘蓝型油菜两个基因型叶片叶绿素含量、Pn、Tr、Ci 及 Gs 均显著下降,磷高效基因型品种叶片的光合作用强于磷低效品种^[17]。杨晴等^[18]研究认为,小麦旗叶的光合能力随施磷量的增加而增加,叶绿素 b 含量、希尔反应活力和非环式光合磷酸化活性对高磷环境敏感,但在一定范围内对其碳同化能力影响不大,Ci 的变化并不规律,这与本研究中不同生育期烤烟叶片 Ci 在各处理间的变化无明显规律一致。本研究发现,烤烟生育后期各处理叶片 Pn 差异不显著,可能是由于低磷条件下植物光呼吸形成乙醇酸时释放的磷对光合作用所需的磷有一定的补偿作用^[19],减弱了不同磷用量处理间的差异。

植物根系的生长状况与叶片光合生理也有一定的联系。水稻灌浆结实期根系生理活性与叶片叶绿素含量呈显著正相关^[20]。赵全志等^[21]研究表明,剪根后水稻叶片的光合特性值迅速下降。付景等^[22]认为提高超级稻结实后期根系生理活性,进而

提高叶片光合性能是提高其产量的重要途径。本研究表明, T2 处理(P_2O_5 用量为 7.0 g/plant)烟株在整个生育期内具有较高的根系活力、根系总吸收表面积和活跃吸收表面积,有利于叶片保持良好的光合性能,生育后期叶绿素又能适时转化分解以促进烟叶成熟落黄,烟株根系生理和叶片生理协调一致。

植物尤其是耐低磷植物能通过增加根冠比、增加次生根数量、刺激根毛生长、增强磷高效基因表达来适应低磷胁迫^[23-24]。本研究中,CK 和 T3 处理烟株的根冠比在整个生育期内处于较高水平,向根系分配较多的碳水化合物。植物生长发育建立在根、冠结构和功能相互协调、相互适应的基础上^[25],一个器官中物质的相对增加受另一器官的供给控制,根、冠两者的任何一方都不能无限制地增大^[26]。T3 处理较高的磷用量促进了烤烟根系干物质的积累,而其叶片的叶面积、叶绿素含量、净光合速率并不高,地上地下部分生长不协调。因此,即使磷直接参与烟株光合作用的光合磷酸化和碳同化过程,当根、冠生长的协调性被打破,其叶片的净光合速率也随之降低。

4 结论

在烤烟大田生育期内,烟株的根系生理(根系活力、根系总吸收表面积、根系活跃吸收表面积)和叶片生理指标(叶绿素含量、净光合速率等)均表现为 T2 处理(P_2O_5 用量为 7.0 g/plant)最好,继续增施磷肥(T3 处理, P_2O_5 用量为 10.5 g/plant)仅在移栽后 30 d 时表现出一定的生长优势,生育后期甚至出现一定的抑制作用。磷用量对叶片光合指标和烟株根冠比的作用证明,磷素对叶片光合性能的促进作用是烟株根、冠结构和功能协调一致、共同作用的结果。

参考文献:

- [1] 刘灵,廖红,王秀荣,严小龙. 不同根构型大豆对低磷的适应性变化及其与磷效率的关系[J]. 中国农业科学, 2008, 41(4): 1089-1099.
Liu L, Liao H, Wang X R, Yan X L. Adaptive changes of soybean genotypes with different root architectures to low phosphorus availability as related to phosphorus efficiency [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(4): 1089-1099.
- [2] 高家合,邓碧儿,曾秀成,等. 烟草磷效率的基因型差异及其与根系形态构型的关系[J]. 西北植物学报, 2010, 30(8): 1606-1613.
Gao J H, Deng B E, Zeng X C, et al. Genotypic variation in phosphorus efficiency of tobacco in relation to root morphological

- characteristics and root architecture [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(8): 1606–1613.
- [3] 刘国顺, 肖庆礼, 王艳丽. 不同供磷能力的土壤施磷对烤烟根根体积和根冠比以及根系伤流组分的影响[J]. *中国烟草学报*, 2009, 15(2): 28–32.
- Liu G S, Xiao Q L, Wang Y L. Effect of different phosphorus supply capacity on root volume and root shoot ratio and root bleaching saps compositions in flue-cured tobacco [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2009, 15(2): 28–32.
- [4] 贾志红, 易建华, 符建国, 苏以荣. 磷肥处理对烤烟生长生理及根系构型的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(3): 388–391.
- Jia Z H, Yi J H, Fu J G, Su Y R. Effects of phosphorus fertilizer treatment on growth and physiology of flue-cured tobacco and configuration of root system [J]. *Soils*, 2011, 43(3): 388–391.
- [5] 高志明, 刘国顺, 张国显, 谢德平. 磷用量对烤烟烟叶发育和结构的影响[J]. *中国烟草科学*, 1995, (4): 19–23.
- Gao Z M, Liu G S, Zhang G X, Xie D P. Effect of phosphorus application on leaf growth and structure of flue-cured tobacco [J]. *Chinese Tobacco Science*, 1995, (4): 19–23.
- [6] 徐敏, 刘国顺, 杨永峰. 磷对不同基因型烤烟叶绿素荧光参数的影响[A]. *中国烟草学会 2006 年学术年会论文集* [C]. 2006.
- Xu M, Liu G S, Yang Y F. The effects of phosphorus fertilization on the chlorophyll fluorescence of different flue-cured tobacco genotypes [A]. *Proceedings of CTS annual symposium of 2006* [C]. 2006.
- [7] 张建恒, 李宾兴, 王斌, 等. 不同磷效率小麦品种光合碳同化和物质生产特性研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(11): 2200–2207.
- Zhang J H, Li B X, Wang B, *et al.* Studies on the characteristics of photosynthesis and dry matter production in wheat varieties with different P efficiency [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(11): 2200–2207.
- [8] 王帅, 杨劲峰, 韩晓日, 等. 不同施肥处理对旱作春玉米光合特性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2008, (6): 23–27.
- Wang S, Yang J F, Han X R, *et al.* Effect of fertilizer application on photosynthetic traits of spring maize [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2008, (6): 23–27.
- [9] 刘婧琦, 谢甫绶, 敖雪, 等. 磷对不同磷效率大豆品种光合生理和农艺性状的影响[J]. *大豆科学*, 2009, 28(2): 217–220.
- Liu J Q, Xie F T, A X, *et al.* Effect of different phosphorus level on photosynthetic rate and agronomic traits between soybean cultivars with different phosphorus efficiency [J]. *Soybean Science*, 2009, 28(2): 217–220.
- [10] 肖庆礼, 黄帅, 刘国顺, 等. 施磷对低磷土壤烤烟化学成分和香气物质含量的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2009, 43(5): 491–496.
- Xiao Q L, Huang S, Liu G S, *et al.* Effects of phosphorus application on chemical components and aroma substances contents of flue-cured tobacco in low phosphorus soil [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2009, 43(5): 491–496.
- [11] 汪耀富, 高华军, 刘国顺, 等. 氮、磷、钾肥配施对烤烟化学成分和致香物质含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 76–81.
- Wang Y F, Gao H J, Liu G S, *et al.* Effects of combining application of N, P, K fertilizers on chemical components and content of aroma constituents in flue-cured tobacco leaves [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1): 76–81.
- [12] 李立新, 何宽信, 肖仁平, 等. 不同施磷量对烤烟主要产质性状的影响[J]. *中国烟草科学*, 2004, (1): 28–31.
- Li L X, He K X, Xiao R P, *et al.* Effect of phosphorus application on yields and quality of flue-cured tobacco [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2004, (1): 28–31.
- [13] 周伟. 磷肥用量对烤烟生长发育及产质量的影响[D]. 湖南: 湖南农业大学硕士学位论文, 2008, 22–23.
- Zhou W. Effect of phosphorus application on growth, yield and quality of flue-cured tobacco [D]. Hunan: MS Thesis of Hunan Agricultural University, 2008, 22–23.
- [14] 苗果园, 高志强, 张云亭, 等. 水肥对小麦根系整体影响及其与地上部相关的研究[J]. *作物学报*, 2002, 28(4): 445–450.
- Miao G Y, Gao Z Q, Zhang Y T, *et al.* Effect of water and fertilizer to root system and its correlation with tops in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(4): 445–450.
- [15] 曹翠玲, 毛圆辉, 曹朋涛, 等. 低磷胁迫对豇豆幼苗叶片光合特性及根系生理特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1373–1378.
- Cao C L, Mao Y H, Cao P T, *et al.* Effect of phosphorus stress on photosynthesis rate and root physiological characteristic of cowpea seedlings [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1373–1378.
- [16] 张建恒, 李宾兴, 王斌, 等. 低磷条件下不同磷效率小麦品种及其杂种 F1 光合碳同化特性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(2): 169–176.
- Zhang J H, Li B X, Wang B, *et al.* Photosynthetic characteristics of wheat varieties with different phosphorus efficiency and their hybrid F1 under Pi-deficiency condition [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(2): 169–176.
- [17] 张伟伟, 徐芳森. 不同磷水平下甘蓝型油菜光合特性的基因型差异研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1196–1202.
- Zhang H W, Xu F S. Genotypic differences in photosynthetic characteristics in *Brassica napus* at different phosphorus levels [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1196–1202.
- [18] 杨晴, 韩金玲, 李雁鸣, 等. 不同施磷量对小麦旗叶光合性能和产量性状的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6): 816–821.
- Yang Q, Han J L, Li Y M, *et al.* Effects of phosphorus fertilization on flag leaves photosynthesis and yield components in wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 816–821.

- [19] 周开勇, 陈开枢, 李明启. 不同磷营养水平对烟草叶片光合作用和光呼吸的影响[J]. 植物生理学报, 1993, 19(1): 3-8.
Zhou K Y, Chen K S, Li M Q. Effects of different phosphate nutrition on photosynthesis and photorespiration in tobacco leaves [J]. Acta Phytophysiologica Sinica, 1993, 19(1): 3-8.
- [20] 许明, 贾德涛, 马殿荣, 等. 北方超级粳稻根系生理、叶片光合性能特点及其相互关系[J]. 作物学报, 2010, 36(6): 1030-1036.
Xu M, Jia D T, Ma D R, *et al.* Correlation of root physiology and leaf photosynthesis characteristics in northern Chinese japonica super rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(6): 1030-1036.
- [21] 赵全志, 乔江方, 刘辉, 田志强. 水稻根系与叶片光合特性的关系[J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 1064-1068.
Zhao Q Z, Qiao J F, Liu H, Tian Z Q. Relationship between root and leaf photosynthetic characteristic in rice [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(5): 1064-1068.
- [22] 付景, 陈露, 黄钻华, 等. 超级稻叶片光合特性和根系生理性状与产量的关系[J]. 作物学报, 2012, 38(7): 1264-1276.
Fu J, Chen L, Huang Z H, *et al.* Relationship of leaf photosynthetic characteristics and root physiological traits with grain yield in super rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(7): 1264-1276.
- [23] Ramaekers L, Remans R, Rao I M, *et al.* Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants [J]. Field Crops Research, 2010, 117: 169-176.
- [24] 李锋, 潘晓华, 刘水英, 等. 低磷胁迫对不同水稻品种根系形态和养分吸收的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(5): 438-442.
Li F, Pan X H, Liu S Y, *et al.* Effect of phosphorus deficiency stress on root morphology and nutrient absorption of rice cultivars [J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(5): 438-442.
- [25] 陈晓远, 高志红, 罗远培. 植物根冠关系[J]. 植物生理学通讯, 2005, 41(5): 555-562.
Chen X Y, Gao Z H, Luo Y P. Relationship between root and shoot of plants [J]. Plant Physiology Communications, 2005, 41(5): 555-562.
- [26] 高志红, 陈晓远, 罗远培. 不同土壤水分条件下冬小麦根、冠平衡与生长稳定性研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(3): 540-548.
Gao Z H, Chen X Y, Luo Y P. Winter wheat root and shoot: equilibrium and growth stability under different soil and water conditions [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(3): 540-548.