

徐凤丹,李亮,范艺宽,等. 不同磷肥种类及用量对烤烟光合作用、磷素积累及产量的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(19):272-280.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.19.034

不同磷肥种类及用量对烤烟光合作用、磷素积累及产量的影响

徐凤丹¹,李亮¹,范艺宽²,叶协峰³,程培军¹,李倩¹,张翔¹

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所,河南郑州 450002; 2. 中国烟草总公司河南省公司,河南郑州 450046;
3. 河南农业大学烟草学院,河南郑州 450046)

摘要:研究不同种类磷肥及用量对烤烟光合作用、磷素积累及产量的影响,探讨适合河南黄淮豫南烟区的最佳磷肥组合,指导优质烟叶生产中磷肥的选择。参试品种为云烟 87,试验设计为双因素裂区设计,以不同磷肥种类为主区(A1 聚磷酸铵、A2 过磷酸钙、A3 钙镁磷肥),设置 4 个施磷水平(B30:30 kg/hm²、B60:60 kg/hm²、B90:90 kg/hm²、B120:120 kg/hm²),以不施磷为对照,连续 2 年观测烤烟的光合作用指标、农艺性状、经济性状的变化。与对照相比,不同磷肥组合处理的叶片叶绿素 a/b 值、SPAD 值、净光合速率及蒸腾速率不同程度增大,表现为圆顶期钙镁磷肥 > 过磷酸钙 > 聚磷酸铵。施用钙镁磷肥各器官的干物质积累和磷素积累明显高于其他磷肥处理,其中在施磷量 60 kg/hm² 时,烟株的总干物质积累、叶片干物质积累显著高于其他磷用量处理。聚磷酸铵 30 kg/hm²、过磷酸钙 90 kg/hm²、钙镁磷肥 60 kg/hm² 处理的农艺性状明显优于其他处理,烟叶烘烤后其产量和中上等烟比例分别提高 18.23%、15.59%、25.67% 和 4.34%、5.86%、3.59%。综上所述,钙镁磷肥对烤烟的影响优于过磷酸钙和聚磷酸铵,以 60 kg/hm² 效果最好,是适合该区施用的磷肥品种,建议在河南黄淮豫南烟区及相近烟区的磷肥选择中推广应用。

关键词:磷肥;烤烟;叶绿素;光合作用;产量;聚磷酸铵;过磷酸钙;钙镁磷肥

中图分类号:S572.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)19-0272-09

磷是植物生长发育的必需元素,随着化肥逐年增量施入,虽然土壤的含磷总量较高,但磷素在土

壤中的垂直淋溶也日益加剧,导致有效磷含量严重不足,只有施入合适的磷肥才能满足烤烟生长^[1-2]。前人研究发现,磷素不同程度地参与或调控烤烟叶片光合作用的每个环节,其中光反应所必需的 RuBP 羧化酶,只有细胞内的磷酸浓度达到阈值及以上才能激活 RuBP 羧化酶的再生能力和活性^[3-4]。然而光合作用的光反应每吸收同化 3 分子 CO₂ 产生的能量与转化 1 分子磷酸相同,因此随着光反应的发生植株体内的磷酸不断消耗,需要从外

收稿日期:2024-09-23

基金项目:河南省烟草公司重点项目(编号:2020410000270019、2021410000240020)。

作者简介:徐凤丹(1989—),女,河南驻马店人,博士,助理研究员,研究方向为土壤与养分资源利用。E-mail:1003554583@qq.com。

通信作者:李亮,博士,副研究员,研究方向为烟草栽培。E-mail:joyce121@163.com。

[33] Li P F, Liu M, Li G L, et al. Phosphorus availability increases pathobiome abundance and invasion of rhizosphere microbial networks by *Ralstonia* [J]. *Environmental Microbiology*, 2021, 23(10):5992-6003.

[34] Adamczyk B, Kilpeläinen P, Kitunen V, et al. Potential activities of enzymes involved in N, C, P and S cycling in boreal forest soil under different tree species [J]. *Pedobiologia*, 2014, 57(2):97-102.

[35] 张雪梅,陈检锋,尹梅,等. 不同绿肥翻压对马铃薯产量及土壤肥力的影响[J]. *西南农业学报*, 2025, 38(3):629-635.

[36] 李国怀,伊华林. 生草栽培对柑橘园土壤水分与有效养分及果实产量、品质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(2):161-163.

[37] Xie B, Chen Y H, Cheng C G, et al. Long-term soil management

practices influence the rhizosphere microbial community structure and bacterial function of hilly apple orchard soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 180:104627.

[38] 孙文泰,杨阳,马明,等. 覆膜对陇东旱地苹果根际土壤化感物质积累与真菌群落特征的影响[J]. *果树学报*, 2024, 41(7):1342-1358.

[39] Lauber C L, Hamady M, Knight R, et al. Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(15):5111-5120.

[40] 王峰,陈玉真,吴志丹,等. 种植模式和坡位对茶园土壤细菌群落结构及功能类群的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(20):8435-8452.

部环境补充适量的磷酸才能维持所需的磷酸浓度,保证叶片光合作用的正常进行^[5-6]。当植株缺磷时,细胞中的磷酸根浓度不足,ATP 合成也受阻,无法激活 RuBP 羧化酶,影响同化产物的运输能力^[7-8]。外施磷肥有利于植株从外界吸取磷酸以满足光反应需要及增强叶片光合作用,而且叶片的叶绿素 a、b 含量在光补偿点以内正向影响光合速率^[9-10]。

磷素不仅影响烟草前期的营养生长及生理变化,对后期烟叶的成熟落黄也至关重要^[11],是烟叶产质量形成的重要因素之一^[11-15]。周越等在云南烟区的试验表明,当磷肥用量为 225 kg/hm² 时,烤烟农艺性状、烟叶品质及经济效益最高;金霞等在云南烟区进一步研究还发现,外施磷肥不仅可提高烟叶产质量还能降低赤星病发生率^[16-17]。余建飞通过喷施液体磷肥发现,合适的磷浓度可改善中后期上部叶的生理酶活性,提高烟叶的上等烟比例^[18]。目前市面上的磷肥种类繁多,由于其本身物理性质的不同,受土壤类型、气候条件、水利情况等影响其肥效也有很大差异^[19-20]。前人关于磷素对烤烟的研究多集中在单一类型磷肥对光合作用及烟叶的产质量方面,关于不同种类磷肥对黄淮豫南烟区烟草的生长发育及其产值影响尚未见报道。本试验通过测定叶片的光合指标、烟株的形态、各器官干物质及磷素积累和烟叶的经济指标,探索不同磷肥类型及施用量在河南黄淮地区豫南烟区的最佳组合,以期对烟草生产上磷肥的选择及用量提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2021、2022、2023 年 4—9 月在河南省南阳市方城县(113°0' 23" E, 33°15' 21" N),连续 3 年原位开展磷肥施用的二因素裂区试验。以 3 种磷肥种类为主区,设聚磷酸铵(A1)、过磷酸钙(A2)、钙镁磷肥(A3);以 4 个磷用量为副区,设 30 kg/hm² (B30)、60 kg/hm² (B60)、90 kg/hm² (B90)、120 kg/hm² (B120);另设不施磷肥处理(CK)。3 次生物学重复,共计 39 个小区。

供试烤烟品种为云烟 87,由河南省烟草专卖局南阳分公司提供。每个小区面积为 35.2 m² (4.4 m × 8.0 m),行距为 1.1 m,株距为 0.5 m,种植 64 株左右。起垄时条施氮肥 60 kg/hm²、钾肥 60 kg/hm²,

烟苗移栽时穴施氮肥 30 kg/hm²、钾肥 60 kg/hm² 及全部磷肥。移栽后 30 d 追施钾肥 30 kg/hm²。试验地肥料类型:硝酸铵(N 35%)、聚磷酸铵(P₂O₅ 13.6%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)、钙镁磷肥(P₂O₅ 11.5%)、硫酸钾(K₂O 50%)、芝麻饼肥(N 5%)。试验移栽时间为每年 4 月 10 日,采烤结束时间为 8 月 31 日,试验地种植模式为大蒜—烤烟轮作,熟制为一年两熟。

1.2 测试指标及方法

1.2.1 农艺性状及干物质、磷素积累 分别在育苗移栽后 35、60、85 d,连续调查 10 株烤烟的株高、叶片数、叶长、叶宽、茎围。在移栽 75 d 时挖出整株烟株,并用剪刀将植株分根、茎、叶后,再分别装入纸质档案袋或信封烘干称重,参考化党领等的方法测定各器官磷素含量及磷素吸收利用率^[22]。

1.2.2 叶绿素含量及光合指标测定 育苗移栽 75 d 后,(1)每个小区选取 5 株长势均匀一致的烟株测定倒 4 叶的 SPAD 值(便携式 SPAD 仪,JC-YLS,美国)。(2)分别取相同叶位的烟草叶片,清洗后测定叶绿素 a、b 含量^[21]。(3)选择晴朗天气 10:00—12:00、14:00—16:00 时,测定每个小区 3 株烟株的倒 4 叶净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i) (便携式光合系统测量仪,Li-6400,美国)。

1.2.3 产量及产值计算 所有烟叶收获采烤后,参考门思润等的方法进行烤烟分级、产量和产值计算^[8]。

1.3 数据处理

第 1 年由于新冠疫情管控无法调查,第 2 年、第 3 年原位继续开展试验,用 Excel 2010 进行数据统计并绘图,Duncan's 法检验数据的差异显著性和多重比较。

2 结果与分析

2.1 外源磷肥对烤烟农艺指标的影响

由表 1 可知,不同磷肥种类及其用量对烤烟的农艺性状影响不同,2 年试验结果基本一致。在同一磷肥条件下,烟株的农艺性状整体随磷肥用量的增加呈先升高后降低的趋势。在 A1(聚磷酸铵)处理下,B30、B60、B90 和 B120 处理的烟株株高无显著差异,但均显著高于 CK,增幅为 3.73% ~ 9.92%;在 A2(过磷酸钙)处理下,B90 处理的株高显著高于 B30、B60 和 B120 处理,与 CK 相比株高平

均提高了 7.02% ;在 A3(钙镁磷肥)处理下,不同磷肥用量处理下株高表现为 B60 > B90 > B30 > B120,处理间差异显著。与 CK 相比,不同处理的叶片数提高了 4.88% ~ 14.63%,叶长提高 -1.17% ~ 17.47%,叶宽提高 -6.56% ~ 17.94%,茎围提高 -17.49% ~ 21.28%;增幅最大的为 A3B60 处理,

其次为 A1B30,再次为 A2B60。方差分析表明,钙镁磷肥对烟株的发育促进效果最好,其次是过磷酸钙,再次是聚磷酸铵,尤其在株高、叶长、叶宽。不同水平磷肥处理之间达到显著水平。不同磷肥处理效果 2023 年比 2022 年更明显,当施入 60 kg/hm² 时促进效果最明显。

表 1 不同磷肥种类及用量对烤烟农艺性状的影响

年份	处理	株高 (cm)	叶片数 (张)	叶长 (cm)	叶宽 (cm)	茎围 (cm)	
2022	CK	107.35c	20.50c	68.30c	28.75c	11.15ab	
	A1	B30	118.00ab	23.00b	77.50a	34.00b	11.50ab
		B60	111.35b	21.50c	69.25c	29.70c	10.85b
		B90	111.65b	22.01bc	70.55b	28.80c	9.20c
		B120	114.00b	22.23bc	70.50b	31.15bc	9.50c
	A2	B30	108.35c	21.00c	67.50c	29.30c	10.60b
		B60	109.25c	22.35b	69.35c	30.10bc	11.60ab
		B90	112.75b	23.50b	73.00b	30.05bc	11.35ab
		B120	108.50c	23.00b	69.00c	30.15bc	10.65b
	A3	B30	108.75c	21.50c	73.50b	33.70b	11.75a
		B60	115.75b	23.00b	76.25ab	31.15bc	12.50a
		B90	110.65b	21.50c	73.00b	29.75c	11.95a
B120		104.50c	22.00bc	70.00bc	32.30bc	9.90c	
2023	CK	111.00b	24.33b	68.67b	35.67b	10.01bc	
	A1	B30	121.00a	26.33a	73.67b	35.00b	12.04a
		B60	124.33a	25.33ab	71.00b	38.67ab	11.93a
		B90	124.33a	25.67ab	70.67b	38.67ab	11.30ab
		B120	116.33b	24.83b	72.00b	36.00ab	11.83a
	A2	B30	115.00b	27.17a	80.17a	33.33b	11.20ab
		B60	118.00ab	27.67a	80.67a	34.33b	11.30ab
		B90	121.00a	24.67b	68.67c	40.00a	11.41ab
		B120	112.33b	25.00ab	69.67c	35.00b	11.30ab
	A3	B30	116.00b	25.02ab	67.83c	42.00a	11.51ab
		B60	124.33a	25.34ab	73.50b	42.07a	11.72a
		B90	124.00a	24.67b	69.67c	40.33a	11.41ab
B120		114.17b	24.33b	73.50b	38.37ab	12.14a	
方差分析	磷肥种类	*	ns	*	*	ns	
	磷肥用量	ns	*	**	*	*	
	年份	**	**	**	**	*	
	A × Y	ns	*	*	*	*	
	B × Y	ns	*	**	*	**	
	A × B	*	*	**	*	**	
A × B × Y	*	*	**	*	**		

注:同列数据后不同小写字母表示该指标在 0.05 水平上差异显著;*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平影响显著,ns 表示影响不显著。下表同。

2.2 外源磷肥对烤烟叶片叶绿素含量的影响

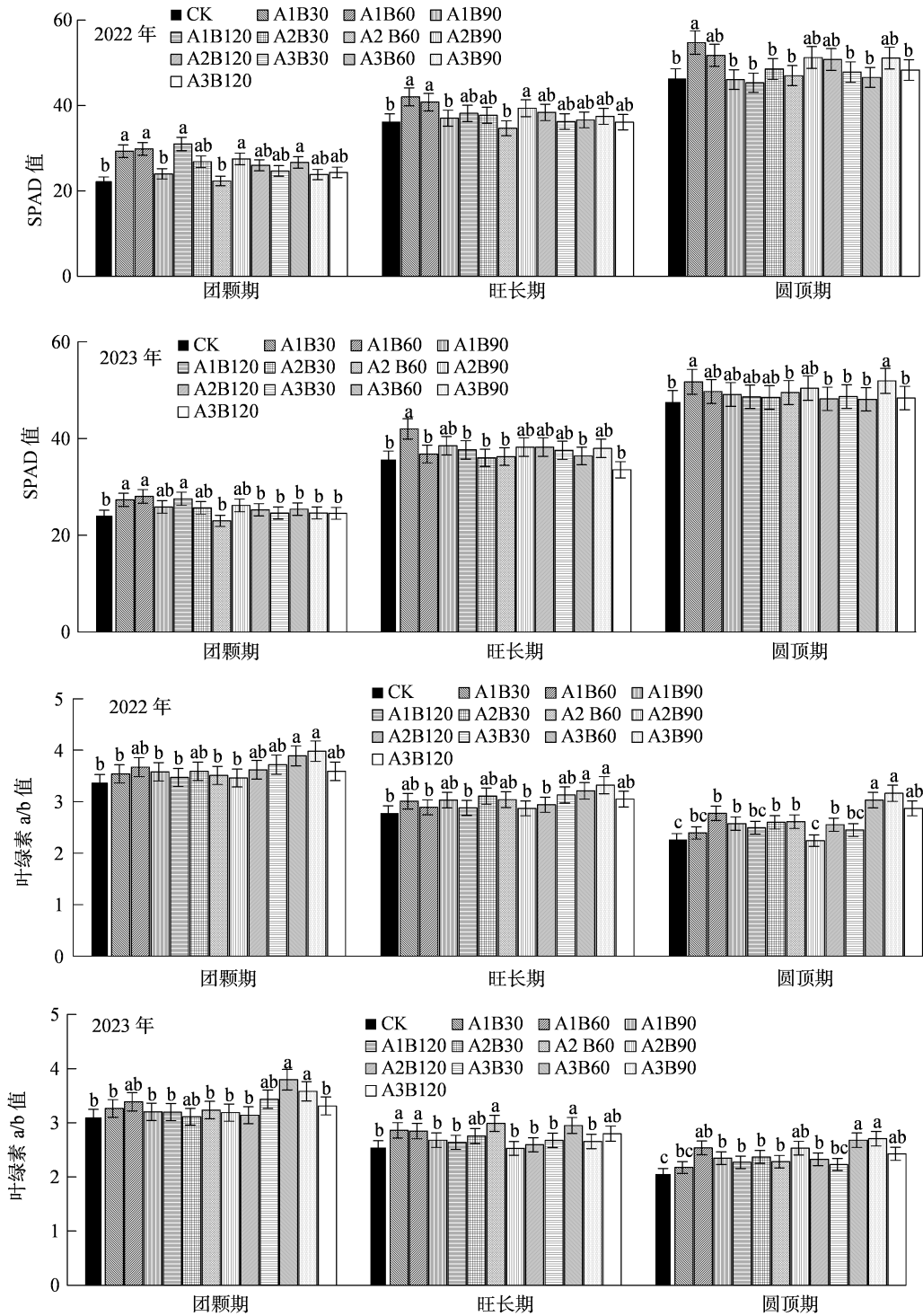
由图 1 可知,烤烟从团颗期到圆顶期,叶片的 SPAD 值逐渐升高。在团颗期时,SPAD 值在 20 ~

30,均高于对照组均值(22.21,24.00);且在旺长期和圆顶期同一磷肥水平下叶片的 SPAD 值均表现为 A1 > A3 ≈ A2,其中 A1B120 最大,A2B60 最低。进

入旺长期后,叶片 SPAD 值大幅度提高,施用聚磷酸铵处理后明显大于其他磷肥种类处理, A1B30、A1B60、A1B90、A1B120 处理叶片的 SPAD 值比 CK 提高 2.23% ~ 16.54%;在圆顶期,各处理组 SPAD 值达到 50 左右,不同磷肥处理下的 SPAD 值均高于 CK 组,在 A1 条件下,叶片 SPAD 值随着磷用量的增

加而下降;在 A2、A3 条件下,叶片 SPAD 值均在施磷量 90 kg/hm² 达到最大,施磷量过多对叶片 SPAD 值影响较小。

烤烟叶片的叶绿素 a/b 值随着生育期的推进不断降低,磷肥种类间表现为 A3 > A1 > A2,均高于 CK, 年际间趋势一致。在团顶期,A3B60、A3B90 处



柱上不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。图 2 同

图1 不同磷肥种类及用量对烤烟叶片 SPAD 值及叶绿素 a/b 的影响

理叶片的叶绿素 a/b 值比 CK 分别平均提高 19.32% 和 17.13%，且达到显著水平；在旺长期，A1B30、A2B60、A3B60 处理叶片的叶绿素 a/b 值比 CK 分别平均提高 10.41%、13.44% 和 15.72%；在圆顶期，各处理组叶片的叶绿素 a/b 值下降到 2.5 左右，其中 A3B60、A3B90 最大，2023 年除了 A1B30 和 A3B30 提高幅度偏小，其余不同磷肥组合的叶片叶绿素 a/b 值均显著高于 CK 处理(图 1)。说明施磷肥可以提高圆顶期叶片的持绿性，为烟叶的高产提供物质光合反应场所。

2.3 外源磷肥对烤烟叶片光合指标的影响

由表 2 可知，不同磷肥组合对烤烟叶片的光合作用指标影响也不尽相同。在 A1 处理下，不同磷用量之间烤烟叶片的净光合速率均高于 CK，其中 B30、B90、B120 达到显著水平；在 A2 处理下，B30 和 B90 叶片的净光合速率显著高于对照，分别平均提高 23.16% 和 32.45%；在 A3 处理下，与 CK 相比，不同磷肥用量处理的叶片净光合速率提高 28.73% ~ 53.54%，且达到显著差异水平。在 A1 处理下，B120 处理显著提高叶片的蒸腾速率，与 CK

表 2 不同磷肥种类及用量对烤烟叶片光合指标的影响

年份	处理	净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间 CO_2 浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	
2022	CK	12.35c	5.59c	0.57b	318.76b	
	A1	B30	14.33c	6.49b	0.56b	308.43b
		B60	13.33bc	5.76c	0.43bc	233.36c
		B90	15.30b	6.46c	0.49bc	229.92c
		B120	15.08b	7.10b	0.54b	269.67c
	A2	B30	15.33b	8.15a	0.59b	275.12bc
		B60	12.72c	7.22b	0.49b	261.81c
		B90	16.52b	7.56b	0.63ab	303.71b
		B120	14.32bc	6.26c	0.72a	301.17b
	A3	B30	15.97b	6.01c	0.61ab	286.27bc
		B60	16.42b	8.21a	0.68a	302.37b
		B90	19.10a	8.13a	0.68a	306.73b
B120		17.39ab	7.66b	0.74a	345.29a	
2023	CK	13.53c	6.06c	0.39c	369.22a	
	A1	B30	15.61b	6.98bc	0.38c	358.35a
		B60	14.56bc	6.23c	0.34c	279.33bc
		B90	16.63b	6.95bc	0.31c	275.70bc
		B120	16.40b	7.60b	0.36c	317.55ab
	A2	B30	16.66b	8.67a	0.41bc	323.28ab
		B60	13.92c	7.73b	0.31c	309.27b
		B90	17.92ab	8.07a	0.45bc	353.38a
		B120	15.60c	6.74bc	0.55b	350.70a
	A3	B30	17.34ab	6.49c	0.43bc	335.02a
		B60	17.81ab	8.73a	0.51b	334.60a
		B90	20.63a	8.65a	0.50b	349.19a
B120		18.83a	8.17a	0.57b	359.78a	
方差分析	A	*	*	*	*	
	B	*	ns	*	ns	
	Y	**	**	**	*	
	A × Y	*	*	*	*	
	B × Y	*	*	*	*	
	A × B	*	*	*	*	
	A × B × Y	**	**	**	**	

相比平均提高了 21.64%；在 A2 处理下, B30、B60、B90 处理显著提高叶片的蒸腾速率, 与 CK 相比平均提高了 44.07%、27.56%、33.16%；在 A3 处理下, B60、B90、B120 处理显著提高叶片的蒸腾速率, 与 CK 相比平均提高了 34.82%~44.06%。在 A1 处理下, 不同磷用量处理降低了叶片的胞间 CO₂ 浓度, 不同磷用量总体表现 B30 > B120 > B60 ≈ B90；在 A2 处理下, 与对照相比不同磷用量处理的胞间 CO₂ 浓度降低幅度为 4.29%~16.24%；在 A3 处理下, 不同磷用量处理提高了气孔导度同时降低了胞间 CO₂ 浓度, 与对照相比, B60、B90、B120 处理的气孔导度平均降低了 25.38%、23.26%、38.06%, 且达到显著差异水平。方差分析表明, 与对照相比,

施磷肥显著降低了烟株叶片的胞间 CO₂ 浓度, 但显著提高叶片的净光合速率和蒸腾速率, 进而提高叶片的光合能力。

2.4 外源磷肥对烤烟干物质和磷素积累的影响

由图 2 可知, 在 A1 处理下, 烤烟不同器官的干物质积累量随磷用量的增加而减少, 且 A1B30、A1B60 处理的总干物质和叶片干物质积累量显著高于 CK, 分别平均提高 15.37%、11.07% 和 6.82%、24.94%；在 A2 处理下, 根、茎、叶的干物质积累量最多的均是 A2B90 处理, A2B120 处理最少；在 A3 处理下, A3B60 处理的总干物质和叶片干物质积累量均高于 CK, 且达到显著水平, 分别平均提高 15.37%、11.07% 和 26.74%、28.59%。

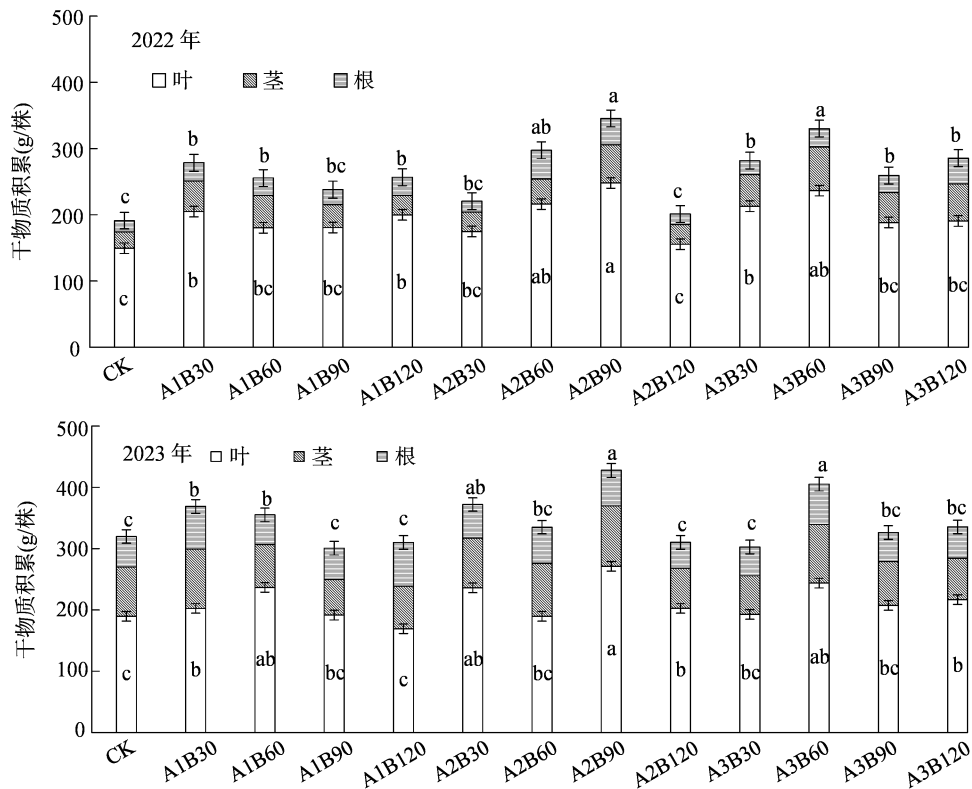


图2 不同磷肥种类及用量对烤烟各器官干物质积累的影响

由表 3 可知, 在 3 种磷肥种类下, 不同器官的磷素积累量总体表现为叶 > 茎 > 根, 随着磷用量的增加, 在 A1 处理下, 任意磷用量的叶片磷的积累量均大于 CK, 茎磷素积累量均显著小于 CK, 其中 A1B30 处理的叶片磷素积累量最高, 与 CK 相比叶片磷素积累量平均提高 53.53%, 且达到显著水平；在 A2 处理下, 不同磷肥处理叶片的磷素积累量趋势为 B90 > B120 > B60 > B30, 其中 A2B90 处理的叶片磷素积累量显著大于 CK, 平均提高 72.91%；在 A3 处

理下, A3B60 处理的叶片磷素积累量和磷素吸收利用率最高, A3B120 处理的叶片磷素积累量和磷素吸收利用率最低, 与 CK 相比, A3B60 处理的叶片磷素积累量平均提高了 81.18%。方差分析表明, A3 处理茎、叶的磷素积累量大于 A1 和 A2 处理, 不同磷肥处理可以促进烟株叶的磷素积累, 降低茎的磷素积累, 进而提高磷素吸收利用率且不同处理之间达到显著水平。

表 3 不同磷肥种类及用量对烤烟磷素积累及利用的影响

年份	处理	磷素积累量(mg/株)			磷素吸收利用率(%)	
		叶	茎	根		
2022	CK	409.54d	183.08b	31.41b	—	
	A1	B30	686.04b	92.39c	53.66a	11.78cd
		B60	553.56c	70.97cd	27.76c	43.35b
		B90	534.20c	115.71c	50.33a	10.58cd
		B120	676.84b	67.58d	42.79b	17.00c
	A2	B30	672.55b	62.49d	65.37a	33.49b
		B60	677.26b	67.78d	27.54c	28.86c
		B90	807.53a	104.10c	64.94a	48.97b
		B120	680.82b	98.06c	63.31a	22.73c
	A3	B30	632.11b	53.38d	24.98c	36.02b
		B60	820.30a	100.32c	37.34b	69.57a
		B90	815.30a	179.03b	50.59a	58.46a
B120		621.90b	109.95c	53.92a	16.84c	
2023	CK	574.72c	231.93a	30.47b	—	
	A1	B30	802.00a	147.58b	42.65b	16.26c
		B60	738.13b	114.05bc	23.96c	32.31b
		B90	701.14b	165.36b	23.22c	7.31d
		B120	677.83b	193.72b	33.98b	7.13d
	A2	B30	650.75b	147.69b	23.08c	14.33c
		B60	666.74b	140.98b	24.14c	19.74c
		B90	854.27a	153.96b	21.29c	26.72c
		B120	808.58a	117.46c	16.73c	11.01cd
	A3	B30	696.37b	171.62b	21.34c	21.75c
		B60	938.72a	200.49a	29.31c	69.04a
		B90	752.66b	142.40b	20.86c	10.94cd
B120		664.68b	174.49b	24.65c	2.78e	
方差分析	A	*	ns	*	*	
	B	*	*	*	*	
	Y	**	*	*	*	
	A × Y	*	*	*	*	
	B × Y	*	*	*	*	
	A × B	**	*	*	**	
A × B × Y	**	**	*	**		

2.5 外源磷肥对烤烟产量及经济性状的影响

由表 4 可知,相对于 CK,不同磷肥组合处理下烤烟的产量及中上等烟比例均有提高,经济产值总体表现为 A3 > A2 ≈ A1。在 A1 处理下,产值表现为 B30 > B90 > B60 > B120,均大于 CK,其中 A1B30 的产量、产值、中上等烟比例比 CK 分别平均提高 18.23%、17.94% 和 4.54%;在 A2 处理下,A2B90 的产值最高,A2B60 的产值最低,与 CK 相比,A2B90 的产量、经济产值和上等烟比例分别平均提

高 15.59%、16.42% 和 5.86%,且达到显著水平;在 A3 处理下,不同磷用量的产值均显著大于 CK,其中 A3B60 处理的经济产值和上等烟比例也大于 A3B120 处理,与 CK 相比,A3B30、A3B60、A3B90、A3B120 的经济产值分别提高 16.50%、26.79%、14.27% 和 9.88%。从整体而言,A1B30、A2B90、A3B60 可显著提高烟株产量和中上等烟比例,进而提高烟叶均价和经济产值,使农民增产增收。

3 讨论与结论

磷肥不仅影响烟株的生育进程并调节其农艺性状,当施磷量在 75 ~ 120 kg/hm² 时,随着磷肥用量的增加烟株进入不同生育时期的时间均有提前,在云南大理地区磷肥用量为 90 kg/hm² 时显著提高烤烟的叶面积指数^[6];在河南郑州地区施磷量为 112.46 kg/hm² 时,明显改善烟株的农艺性状,株高及叶片显著提高^[22]。吴庚福等对不同类型磷肥进行研究,施用磷酸二铵和钙镁磷肥的烟草叶片的鲜重、叶片数、茎围显著高于不施磷肥处理^[23]。本研究也有类似的研究结果,当用聚磷酸铵 30 kg/hm²,过磷酸钙 90 kg/hm²,钙镁磷肥 60 kg/hm² 时,能显著改善烟株的形态构成(株高及叶片性状),综合表现为钙镁磷肥 > 过磷酸钙 > 聚磷酸铵。由于聚磷酸盐对金属阳离子具有一定的螯合能力^[24],在本试验条件下的偏酸性粉沙黄褐土土壤下,施用聚磷酸铵后,正磷酸根留在土壤中,起到活化土壤有效磷的作用,有利于烟株的生长。然而烤烟喜偏酸性土壤,pH 值为 5.5 ~ 6.5 长势最优,当施用聚磷酸铵 30 kg/hm² 时显著提高烟株的农艺性状,而施用超过 30 kg/hm² 可能打破烟株需求的酸碱平衡,不利于烟叶生长。而过磷酸钙容易被 Residual 结合固定到土壤中,不易转化成有效磷^[25],在黄淮地区偏酸性土壤上最佳施肥量为 90 kg/hm²,过低满足不了烟株生长的磷肥需求,过高容易造成土壤板结不利于促进烟株的生长。钙镁磷肥具有微碱性,在弱酸性土壤施用后土壤的 pH 值有所提高,增加土壤有效磷含量,有助于调控烟草对 P 的吸收^[14]。尤其较低量(60 kg/hm²)的钙镁磷肥处理可以提高烤烟的叶片数、叶长、叶宽等,但施入较高量(120 kg/hm²)的钙镁磷肥,土壤中金属离子与磷酸根离子形成沉淀,使磷素固化到土壤中,不利于烟株叶片的生长。

磷素以多种方式参与烟株体内能量转化、干物质积累、遗传信息传递,光合作用的每一个过程都

表 4 不同磷肥种类及用量下的烤烟产量及经济性状

年份	处理	产量 (kg/hm ²)	经济产值 (元/hm ²)	均价 (元/kg)	中上等烟比例 (%)	
2022	CK	1 685.39b	45 540.94d	26.52b	43.71c	
	A1	B30	1 983.26a	53 664.54bc	26.36b	48.01ab
		B60	1 899.69ab	51 503.48c	26.46b	47.22b
		B90	1 896.65ab	51 560.77c	26.53b	46.39b
		B120	1 797.97b	48 298.01cd	26.28b	45.14b
	A2	B30	1 824.03a	49 824.43cd	26.69b	45.93b
		B60	1 781.89b	47 979.87d	26.36b	48.29ab
		B90	1 940.08a	52 979.03b	26.6b	49.26a
		B120	1 928.32a	51 948.93c	26.28b	46.24b
	A3	B30	1 948.43a	53 014.02b	26.52b	45.43b
		B60	2 104.73a	57 675.01ab	26.62b	47.11b
		B90	1 909.71a	52 004.47bc	26.57b	45.41b
B120		1 848.49a	50 017.28c	26.44b	44.76bc	
2023	CK	1 761.54b	50 045.49c	28.41a	46.34b	
	A1	B30	2 092.52a	59 071.72ab	28.23a	51.12a
		B60	1 999.67a	56 670.54b	28.34a	49.33a
		B90	1 996.28a	56 734.19b	28.42a	50.24a
		B120	1 886.64ab	53 108.90bc	28.15a	47.94b
	A2	B30	1 915.59ab	54 804.92b	28.61a	48.81ab
		B60	1 868.77ab	52 755.41bc	28.23a	51.44a
		B90	2 044.53a	58 310.03ab	28.52a	52.51a
		B120	2 031.47a	57 165.48ab	28.14a	49.15ab
	A3	B30	2 053.82a	58 348.92ab	28.41a	48.26ab
		B60	2 227.48a	63 527.78a	28.52a	50.12a
		B90	2 010.79a	57 227.19ab	28.46a	48.23ab
B120		1 942.77ab	55 019.20b	28.32a	47.51b	
方差分析	A	ns	ns	ns	ns	
	B	ns	ns	ns	*	
	Y	*	*	*	*	
	A × Y	*	*	ns	*	
	B × Y	*	*	ns	*	
	A × B	*	**	ns	*	
A × B × Y	*	**	ns	**		

离不开磷元素的参与^[14],其中叶片 SPAD 值、叶绿素 a/b 值可作为叶片光合能力强弱的反应指标之一^[11,26-27]。在本研究中,烟株叶片的 SPAD 值随着生育期的推进而升高,叶绿素 a/b 值随着生育期的推进而降低。施用聚磷酸铵、过磷酸钙、钙镁磷肥均可提高烤烟叶片的 SPAD 值和叶绿素 a/b 值,不同生育时期表现一致,这一现象反映了施用磷肥可以延缓叶片叶绿素 a 含量的下降,使叶片持绿期延长,为光合作用提供反应场所。施用钙镁磷肥和过

磷酸钙后,烤烟叶片的光合作用指标(净光合速率、蒸腾速率)均为中磷 > 高磷 > 低磷,与郭东海的研究结果^[12]相一致。在相同的磷用量处理下,烤烟叶片的光合指标总体趋势是钙镁磷肥 > 过磷酸钙 > 聚磷酸铵,尤其是钙镁磷肥用量在 60 kg/hm² 时烟株光合性能最好,加速光合产物的积累,为烤烟叶片数和形态的增大提供可能性。

烟株产量与光合作用密切相关,本研究施用不同的磷肥组合后,烤烟叶片的光合能力均有提高,

增加了各器官的干物质积累,不仅保障了烟草的产量还优化了烟叶的品质,使中上等烟比例及经济产值也不同程度的增加。前人对烟草的适宜磷肥用量做了大量工作,研究发现在连作砂质低磷烟田中(有效磷含量 $<10\text{ mg/kg}$)最佳施磷量为 135 kg/hm^2 ,在高山磷烟田中(有效磷含量 $10\sim 30\text{ mg/kg}$)磷肥用量为 90 kg/hm^2 烟叶中上等烟比例最高,在红壤高磷烟田中(有效磷含量 $>30\text{ mg/kg}$)磷肥用量为 45 kg/hm^2 经济产值最高^[15,28]。周劲东等进一步研究发现,当钙镁磷肥为 375 kg/hm^2 时,烟叶的产量和品质最好、经济产值也最高,显著大于不施磷肥处理^[13]。在黄淮豫南烟区高磷土壤上(有效磷含量 31 mg/kg),施用聚磷酸铵为 30 kg/hm^2 、过磷酸钙为 90 kg/hm^2 ,钙镁磷肥为 60 kg/hm^2 时,与对照相比产量显著提高,可能是在这些磷肥处理下能更好地协调土壤氮、磷、钾水平,正好与烟叶生长的养分需求相吻合;然而继续增加磷肥用量,烤烟的产量和上等烟比例反而降低,可能是磷过高会打破烟叶的氮、磷、钾需求平衡,本研究中烟草各器官的磷素累积量的研究结果也从另一个方面印证了这一原因。综上,在黄淮烟区的河南省南阳地区施用聚磷酸铵为 30 kg/hm^2 、过磷酸钙为 90 kg/hm^2 、钙镁磷肥为 60 kg/hm^2 时大大提高了烟叶经济产值,有利于烟农收入,建议在本烟区和相近不缺磷地区推广应用。

参考文献:

- [1]王艳丽,王京,刘国顺,等.磷施用量对烤烟根系生理及叶片光合特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2):410-417.
- [2]Schachtman D P, Reid R J, Ayling S M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell[J]. Plant Physiology, 1998, 116(2): 447-453.
- [3]Sa T M, Israel D W. Energy status and functioning of phosphorus-deficient soybean nodules[J]. Plant Physiology, 1991, 97(3): 928-935.
- [4]Jacob J, Lawlor D W. Stomatal and mesophyll limitations of photosynthesis in phosphate deficient sunflower, maize and wheat plants[J]. Journal of Experimental Botany, 1991, 42(8): 1003-1011.
- [5]胡锋,黄俊丽,秦峰,等.植物叶绿体类囊体膜及膜蛋白研究进展[J].生命科学,2011,3(3):291-298.
- [6]周伟.磷肥用量对烤烟生长发育及产质量的影响[D].长沙:湖南农业大学,2008.
- [7]李建平,彭图治.生物活性膜复合修饰电极安培法测定痕量光合抑制类除草剂[J].化学学报,2004,62(15):1419-1424,1371.
- [8]门思润,朱列书,彭妙.磷肥类型及施用量对烤烟光合特性的影响[J].江苏农业科学,2018,46(9):76-79.
- [9]徐洪文,卢妍,朱先灿.丛枝菌根对玉米叶片SPAD值及光合作用光响应特征的影响[J].江苏农业科学,2016,44(11):119-121.
- [10]杨荣超,田海清,李斐,等.基于甜菜冠层高光谱红边参数的SPAD值诊断[J].江苏农业科学,2017,45(11):153-156.
- [11]杨怀千,周冀衡,邓小刚,等.烤烟漂浮育苗中不同水位炼苗对烟株生长发育及生理特性的影响[J].烟草科技,2009,42(9):55-58.
- [12]郭东海.不同烤烟品种对磷胁迫的生理响应[D].长沙:湖南农业大学,2014.
- [13]周劲东,李玉辉,范才银,等.钙镁磷肥施用量对烤烟‘K326’产质量的影响[J].作物研究,2017,31(6):695-698.
- [14]普匡,高家合,田旺海,等.烤烟施磷量与经济性状·评吸质量的相关分析[J].安徽农业科学,2013,41(11):4811-4812,4814.
- [15]席雪琴.土壤磷素环境阈值与农学阈值研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [16]周越,周冀衡,沈晗,等.云南腾冲火山灰土不同施磷量对烤烟产质量的影响[J].西南农业学报,2014,27(3):1185-1189.
- [17]金霞,赵正雄,吕芬,等.施磷量对烤烟几种生理生化物质含量、赤星病发生及烟叶产质量的影响[J].中国烟草学报,2010,16(3):53-56.
- [18]余建飞.磷营养对烤烟上部叶生理生化及品质的影响[D].长沙:湖南农业大学,2015.
- [19]朱宏斌,王晓波,蒋光月,等.不同品种磷肥运筹对砂姜黑土玉米生长及产量的影响[J].中国农学通报,2014,30(30):209-212.
- [20]秦永林,田艳花,樊明寿,等.磷肥种类对石灰性土壤马铃薯产量和磷肥利用率的影响[J].中国蔬菜,2019(5):70-75.
- [21]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.
- [22]化党领,曹荣,魏修彬,等.不同氮磷钾施用量对烤烟农艺性状及养分吸收的影响[J].中国土壤与肥料,2012(4):53-58.
- [23]吴庚福,黄振瑞,陈迪文,等.不同类型磷肥对土壤磷素形态和烟草生长的影响[J].中国烟草科学,2021,42(6):1-7.
- [24]杨旭,张承林,胡义熬,等.农用聚磷酸铵在土壤中的有效性研究进展及在农业上的应用[J].中国土壤与肥料,2018(3):1-6.
- [25]Meyer G, Bell M J, Doolette C L, et al. Plant-available phosphorus in highly concentrated fertilizer bands: effects of soil type, phosphorus form, and coapplied potassium [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(29): 7571-7580.
- [26]江智敏,张仲文,章程,等.稻茬烤烟下部4片烟叶一次性采收成熟度研究[J].作物杂志,2024(2):129-138.
- [27]高庭猛,黄婷君,付丽美,等.土壤改良剂对云南双江烤烟K326生长发育和品质的影响[J].江苏农业科学,2024,52(13):108-116.
- [28]万越.湘西龙山烟区磷肥用量对烤烟生长发育和产质量的影响[D].长沙:湖南农业大学,2012.