

不同氮磷配比施肥对烤烟生长及碳代谢的影响^①

王子晨^{1,3}, 刘 婷¹, 杨晨凯¹, 严宇晨¹, 陈夏晔^{1*}, 赵婷怡¹, 杨 坤², 王 灿^{2*}, 陈德乐³, 彭曙光²

(1 湖南省烟草公司郴州市公司, 湖南郴州 423000; 2 中国烟草总公司湖南省公司, 长沙 410004; 3 南京林业大学生态与环境学院, 南京 210037)

摘 要: 为探索促进烟叶甜感物质积累的高效养分协同施肥模式, 本研究在 2 个施氮水平(常规施氮、增施氮肥)下设置 3 种氮磷配比处理(N:P₂O₅ 分别为 1:0.7、1:1 和 1:1.3), 通过田间试验研究不同氮磷比对烟叶生长、光合作用以及碳代谢中糖类合成关键酶活性的影响。结果表明, 在同样的氮磷配比下, 增施氮肥在团棵期促进了烟株株高和茎围生长; 在旺长期, 则对多数农艺性状和光合指标无显著增益, 仅显著增大了叶宽。然而, 在同一施氮水平下, 随着施磷比例的提高, 烤烟最大叶片的长度和宽度显著增加, 烟叶的胞间 CO₂ 浓度、光合速率及气孔导度显著提升。常规氮肥施用下, 增施磷肥降低氮磷比提高了烟叶蔗糖磷酸合成酶活性, 但对淀粉合成限速酶——腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶活性未有影响。增施氮肥抑制了烟叶蔗糖含量的积累, 而降低氮磷比可以缓解氮肥对糖积累的负效应, 进而促进烟叶总糖含量的积累。综上所述, 在湘南烟-稻轮作区, 适当提高磷肥施用量降低氮磷比并控制氮肥施用量, 有助于改善烟株农艺性状, 增强光合作用能力和碳代谢活性, 从而有助于提升烟叶品质。

关键词: 烤烟; 氮磷比例; 施肥模式; 烟叶糖; 碳代谢

中图分类号: S365 **文献标志码:** A

Effects of Different Nitrogen-Phosphorus Ratio Fertilization on Growth and Carbon Metabolism of Flue-Cured Tobacco

WANG Zichen^{1,3}, LIU Ting¹, YANG Chenkai¹, YAN Yuchen¹, CHEN Xiaye^{1*}, ZHAO Tingyi¹, YANG Kun², WANG Can^{2*}, CHEN Dele³, PENG Shuguang²

(1 Chenzhou Municipal Tobacco Company, Hunan Provincial Tobacco Corporation, Chenzhou, Hunan 423000, China; 2 China National Tobacco Corporation Hunan Branch, Changsha 410004, China; 3 College of Ecology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: To explore an efficient nutrient co-application fertilization mode promoting the accumulation of sweetness-related substances in tobacco leaves, a field experiment was conducted under two nitrogen (N) application levels (conventional N and increased N application) with three N-to-P ratios (1:0.7, 1:1, and 1:1.3), and the effects of different N-P ratios on tobacco growth, photosynthesis, and the activities of key enzymes involved in sugar synthesis within carbon metabolism were studied. The results showed that under the same N-P ratio, increased N application promoted plant height and stem girth at the rosette stage. At the vigorous stage, it conferred no significant gain in most agronomic traits or photosynthetic indicators, except for a significant increase in leaf width. Nevertheless, under the same N level, increasing P application significantly enhanced the length and width of the largest leaf, as well as the intercellular CO₂ concentration, photosynthetic rate, and stomatal conductance of the tobacco leaves. Under conventional N application, increased P application elevated the activity of sucrose phosphate synthase in the leaves but had no effect on the activity of ADP-glucose pyrophosphorylase (AGPase), a key rate-limiting enzyme in starch synthesis. Increased N application inhibited sucrose accumulation, while reducing the N:P ratio by adding P alleviated this negative effect and promoted total sugar accumulation. In conclusion, in the tobacco-rice rotation

①基金项目: 中国烟草总公司湖南省公司科技项目(HN2024KJ07)资助。

* 通信作者(8980047@qq.com; wangcanhny@163.com)

作者简介: 王子晨(1999—), 男, 江苏南京人, 博士研究生, 主要从事烟草栽培和土壤生态研究。E-mail: 1206327619@qq.com

system of southern Hunan, appropriately increasing P application to reduce the N:P ratio while controlling nitrogen input can improve agronomic traits, enhance photosynthetic capacity and carbon metabolism activity, and thereby improving tobacco leaf quality.

Key words: Flue-cured tobacco; Nitrogen-to-phosphorus ratio; Fertilization model; Leaf sugar; Carbon metabolism

湘南烟区是中国典型南岭丘陵生态区焦甜醇甜香型烟叶原料生产基地^[1]。近年来,烟区生产的烟叶出现了焦甜香韵不足、甜感减弱、苦味和刺激性增强的趋势,已成为影响烟叶品质和烟农收入的重要因素。烤烟甜味物质,如呋喃酮和吡喃酮类,主要源于烟叶中糖在燃烧过程中的美拉德反应^[2-3]。磷在碳代谢、糖类合成与转运等过程中起着重要的调控作用,是影响烟叶糖积累水平的关键元素^[4-6]。烟农片面追求产量而大量施用氮肥却忽视磷肥的科学施用,是影响烟叶甜感物质积累的潜在原因^[7]。

光合作用是烟叶碳代谢中糖类合成的主要途径,由一系列酶促反应协同驱动。卡尔文循环生成的磷酸丙糖会被转运到细胞质基质,并在 β -呋喃果糖苷酶(Inv)、蔗糖合成酶(SuSy)和蔗糖磷酸合成酶(PPS)等关键酶的作用下,转化为蔗糖^[8]。腺苷二磷酸焦磷酸化酶(AGP)催化 1-磷酸葡萄糖与 ATP 反应生成腺苷二磷酸葡萄糖,进而作为底物参与淀粉的合成过程^[9]。磷是光合作用过程中的关键元素,在调控糖类合成中发挥重要作用。土壤有效磷缺乏会导致植物体内磷元素优先分配至叶片细胞的生成和结构发育,从而供给叶绿体发育的磷素不足,不利于植物光合效率提升^[10]。因此,缺磷会导致植物生长速率下降、光合器官发育滞后、叶绿素含量和与卡尔文循环相关酶的活性降低等表现^[11-12]。然而,磷肥施用通过调节关键酶活性影响烟叶糖积累的具体机制仍不清楚。

湘南郴州烟-稻轮作区土壤中氮与磷含量均较为丰富,全氮和全磷含量通常介于 1.9~2.4 g/kg 和 0.9~1.3 g/kg,碱解氮和有效磷含量通常介于 130~170 mg/kg 和 40~55 mg/kg^[13-14]。烟用肥的氮磷比(N:P₂O₅)以 1:0.7 为主,磷的配施比例相对较低^[15]。烟季和稻季高频率过量施用氮肥会限制烟株对磷素的高效吸收利用,减弱烟叶碳代谢效能和糖分积累,是导致产区烟叶甜润感下降、刺激性走高的重要潜在因素^[16]。因此,本研究通过大田小区试验,设置不同的施氮水平和氮磷配比处理,探讨不同氮磷配比对烟株生育期农艺性状、光合作用、烟叶糖积累及关键酶活性的影响,探索适用于湘南烟区烤烟的高效氮磷协同施用模式,为烤烟增甜提质提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2024 年春季在湖南省郴州市桂阳县(112°39'55" E, 25°52'23" N)开展。该区域属亚热带湿润季风气候,四季分明。年平均气温 17.4 ℃,年平均日照时数 1 705.4 h,年平均降水量 1 452.1 mm^[17]。当地采用一年两熟的烟-稻轮作制度。

试验田块选择在近 3 年内未进行施肥试验、排灌条件良好且土壤质地和肥力具有代表性的地块。试验田为烟稻复种烟田,土壤 pH 7.25,有机质 34.60 g/kg,全氮 1.90 g/kg,全磷 0.94 g/kg,全钾 38.10 g/kg。试验准备工作始于 2023 年 11 月上旬晚稻收获后,于 2024 年 2 月下旬完成烟田整地和起垄作业,2024 年 3 月上旬施用基肥并正式开展试验。供试烤烟品种为“云烟 87”。

1.2 试验设计

基于植烟区氮肥施用状况^[18],本试验设置 2 个氮肥施用水平:烟区常规施氮(169.5 kg/hm²)和增施氮肥(184.5 kg/hm²)。在各施氮水平下,分别设置 3 个氮磷配比(N:P₂O₅):1:0.7、1:1 和 1:1.3,不同氮磷配比通过调节过磷酸钙施用量实现(表 1)。钾肥(K₂O)施用量维持在 N:K₂O=1:2.8。

表 1 不同氮磷配比调控烟叶生长及碳代谢的试验设计
Table 1 Experimental design for regulating tobacco leaf growth and carbon metabolism with different nitrogen-phosphorus ratios

处理	施氮量 (kg/hm ²)	施磷量 (kg/hm ²)	氮磷配比 (N:P ₂ O ₅)
LP1	169.5	117.5	1:0.7
LP2	169.5	169.5	1:1
LP3	169.5	219.5	1:1.3
HP1	184.5	129.5	1:0.7
HP2	184.5	184.5	1:1
HP3	184.5	240.0	1:1.3

试验采用随机区组设计,每个处理设置 3 个重复,共 18 个试验小区。各小区面积为 50 m²(2.5 m×20 m)。每小区移栽 80~90 株烟苗,移栽密度为 16 500 株/hm²。

1.3 田间施肥及管理

基肥施用采用“101”施肥法^[19]。于田间起垄,垄距 50 cm,在移栽前将基肥总量的 30%(包括发酵

饼肥、专用基肥、过磷酸钙)与硫酸钾总量的 20% 混合拌匀,与土壤充分混匀(即“0”肥),施于垄中间穴内;移栽后,于每株间沿垄的方向开设 15 cm×15 cm 的施肥带,施入剩余 70% 基肥(包括发酵饼肥、专用基肥、过磷酸钙在内的肥料总量的 70% 以及硫酸钾总量的 50% 混合拌匀)^[20]。移栽当天及移栽后 10 d,分 2 次兑水浇施专用提苗肥。在烟株发育约 20 d 时,兑水浇施包括专用追肥和剩余 30% 硫酸钾在内的肥料总量的 1/3;在烟株发育约 35 d 时,再施用其总量的 2/3。此外,田间管理严格遵循当地标准操作规程,及时排水以保持土壤良好通气性,避免因土壤过湿或积水对作物生长产生不利影响。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 农艺性状与光合参数 于烤烟团棵期、旺长期及成熟期,在每个小区随机选取 3 株代表性烟株,测定株高、叶片数、茎围、最大叶长和叶宽等农艺性状。选择光照条件适宜(上午 9:00—11:00)的天气,使用 LI-6800 光合仪测定上部第 4~5 片完全展开叶的净光合速率(Pn)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)和气孔导度(Gs)。

1.4.2 烟叶糖类物质及相关酶活性 于烤烟成熟期在各小区随机选取 5 株代表性烟株,采集上部第 4~5 片完全展开叶,立即置于干冰盒中,低温运输至实验室进行指标测定。采用二硝基水杨酸法测定总糖含量,蒽酮比色法测定淀粉含量,间苯二酚比色法测定蔗糖含量。同时,使用苏州科铭生物技术有限公司提供的试剂盒,测定与糖合成相关的腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(ADP-glucose pyrophosphorylase, AGP)和蔗糖磷酸合成酶(Sucrose phosphate synthase, SPS)活性。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 对试验数据进行整理,并利用 Origin 软件进行统计分析。组间差异比较采用单因素方差分析(One-way ANOVA),事后多重比较采用最小显著差数法(Least significant difference, LSD),显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷配比施肥对烤烟农艺性状的影响

为探究不同氮磷配比施肥模式对烤烟农艺性状的影响,于团棵期测定烤烟株高和茎围。结果发现,在中氮磷配比(N:P₂O₅=1:1)施肥条件下,相较于常规施氮处理(LP2),增施氮肥处理(HP2)显著提升了团棵期烤烟的株高和茎围($P<0.05$),增幅分别达 28.7% 和 13.8%(图 1A)。于旺长期进一步测定叶片数量、中

部最大叶片的叶长和叶宽,结果发现,相较于 LP2,HP2 并未显著增加烤烟叶片数量和最大叶长(图 1B、1C),但显著增大了叶宽,增幅为 7.9%($P<0.05$)。

在常规和增氮两种施氮水平下,调整磷肥用量改变氮磷配比(即增施磷肥以降低氮磷比)均未显著影响烟株株高及茎围(图 1A)。在增施氮肥水平下,与 HP1 相比,HP2 显著提高了旺长期烟株的叶片数量,但进一步增施磷肥(HP3)后,该效应未达显著水平(图 1B)。增施磷肥显著增大了叶片大小($P<0.05$,图 1C)。具体而言,在常规施氮水平下,相较于 LP1,LP2 显著提高了叶长($P<0.05$),LP3 显著提高了叶宽($P<0.05$),增幅分别达 11.9% 和 9.6%;而在增施氮肥水平下,相较于 HP1,HP2 显著增大了叶片大小($P<0.05$),叶长和叶宽的增幅分别达 6.3% 和 14.3%。

2.2 不同氮磷配比施肥对烤烟光合特性的影响

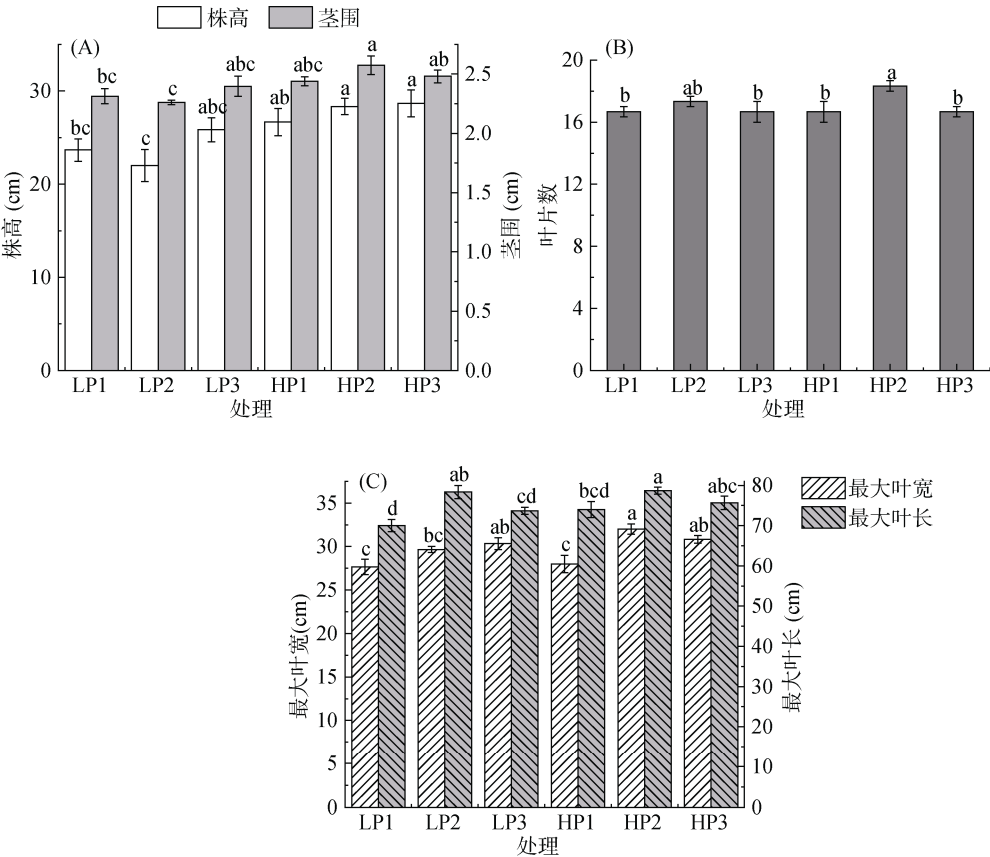
为探究不同氮磷配比施肥模式对烤烟光合特性的影响,于旺长期测定叶片的光合速率(Pn)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)和气孔导度(Gs)等光合指标。结果发现,不论在何种氮磷配比条件下,增施氮肥对 Pn 和 Ci 均无显著促进作用(图 2A、2B);但中低氮磷配比条件下,相较于常规施氮,增施氮肥处理 Gs 显著降低(图 2C)。

在常规施氮水平下,相较于 LP1,LP2 和 LP3 显著提高了烤烟叶片的 Pn($P<0.05$,图 2A),二者增幅分别达 27.7% 和 20.6%;此外,LP3 显著提高了烤烟叶片的 Gs($P<0.05$),增幅达 10.3%(图 2C)。而在增施氮肥水平下,相较于 HP1,HP3 显著提升了烤烟叶片的 Ci($P<0.05$),增幅达 3.5%(图 2B)。

2.3 不同氮磷配比施肥对烟叶碳代谢酶活性的影响

为探究不同氮磷配比施肥模式对烟叶碳代谢的影响,于成熟期测定烤烟叶片中两种典型的碳代谢相关的酶活性腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(AGP)和蔗糖磷酸合成酶(SPS)活性。结果发现,在高氮磷比(N:P₂O₅=1:0.7)施肥条件下,增施氮肥(HP1)显著降低烟叶 AGP 活性($P<0.05$);然而,在中氮磷配比(N:P₂O₅=1:1)和低氮磷配比(N:P₂O₅=1:1.3)条件下,增施氮肥(HP2、HP3)并未显著改变烟叶 AGP 活性(图 3A),表明调整磷肥用量(即增施磷肥以降低氮磷比)一定程度上可以缓解增施氮肥对烟叶 AGP 活性造成的负面效应。

在常规施氮水平下,相较于 LP1,LP3 显著提升了烟叶 SPS 活性,提升幅度达 213.4%($P<0.05$,图 3B)。而在增施氮肥水平下,HP2 和 HP3 处理下烟叶的 AGP 活性和 SPS 活性均未表现出显著差异(图 3A、3B),



(图中小写字母不同表示同一指标不同处理间差异显著($P < 0.05$), 下图同)

图 1 不同氮磷配比施肥对烤烟农艺性状的影响

Fig. 1 Effects of different nitrogen-phosphorus ratio fertilization on agronomic traits of flue-cured tobacco

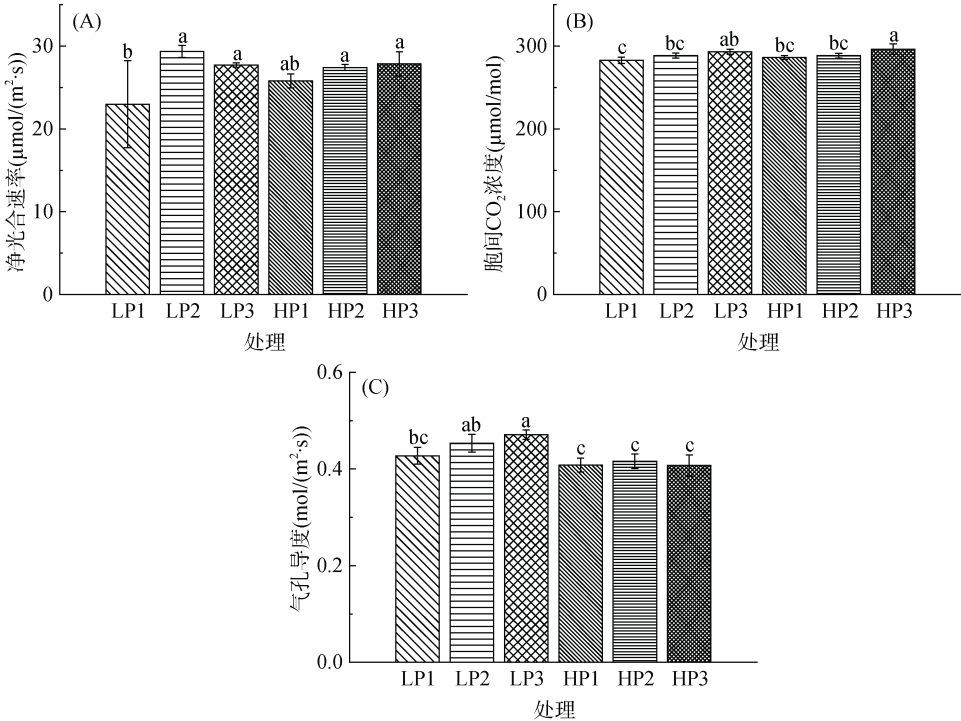


图 2 不同氮磷配比施肥对旺长期烤烟光合特性的影响

Fig. 2 Effects of different nitrogen-phosphorus ratio fertilization on photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco at vigorous growth stage

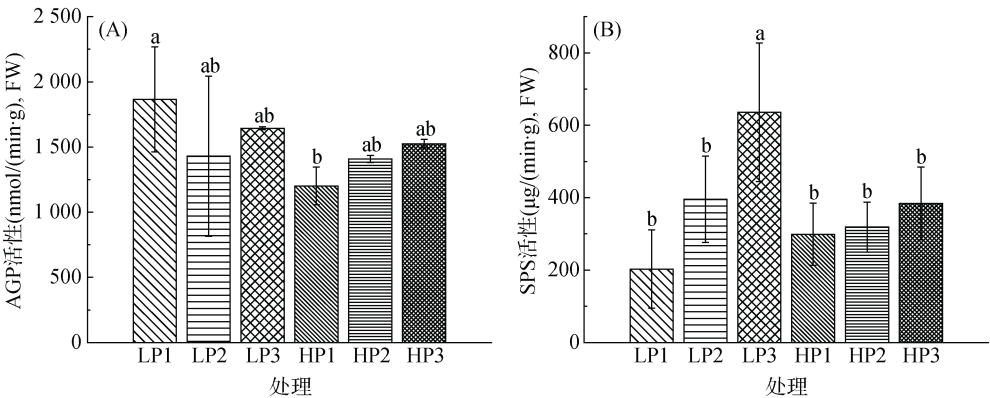


图 3 不同氮磷配比施肥对成熟期烟叶碳代谢相关酶活性的影响

Fig. 3 Effects of different nitrogen-phosphorus ratio fertilization on carbon metabolic enzyme activities in flue-cured tobacco leaves at the maturation stage

表明增施氮肥一定程度上会削弱氮磷比对烟叶 SPS 活性的提升作用。综上，增施磷肥以降低氮磷比有利于增强蔗糖合成关键酶的活性，且其效应受施氮水平调控。

2.4 不同氮磷配比施肥对烟叶糖积累特征的影响
为探究不同氮磷配比施肥模式对烟叶糖积累的影

响，于成熟期测定烟叶中总糖、淀粉和蔗糖含量(图 4)。结果发现，施氮水平和氮磷配比变化对烟叶中淀粉含量均无显著影响(图 4B)。在中氮磷配比(N:P₂O₅=1:1)下，与 LP2 相比，HP2 显著降低了烟叶中总糖和蔗糖含量($P<0.05$ ，图 4A、4C)，表明增施氮肥不利于烟叶中的糖分积累。

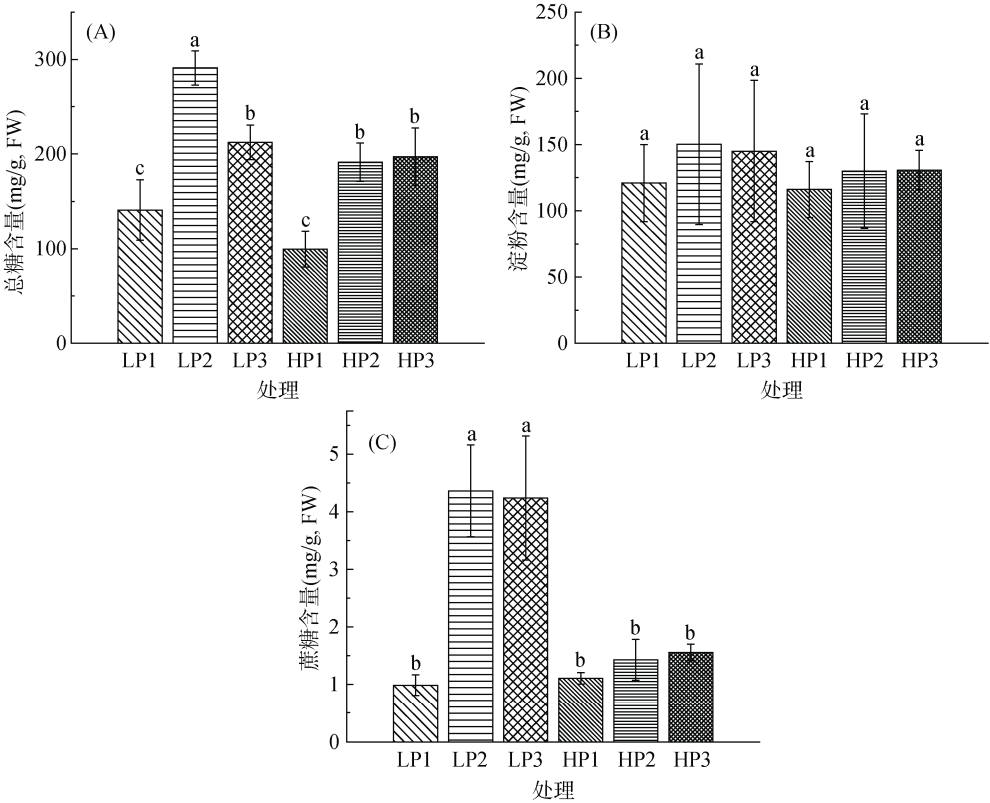


图 4 不同氮磷配比施肥对成熟期烟叶糖含量的影响

Fig. 4 Effects of different nitrogen-phosphorus ratio fertilization on sugar contents in flue-cured tobacco leaves at the maturation stage

在常规施氮水平下，与 LP1 相比，LP2、LP3 处理烟叶中总糖和蔗糖含量分别显著增加 106.0%、51.0%

和 342.2%、329.9% ($P<0.05$ ，图 4A、4C)。而在增施氮肥水平下，与 HP1 相比，HP2 和 HP3 处理总糖含量分

别显著提升 92.2% 和 98.3% ($P < 0.01$, 图 4A)。表明降低氮磷比对烟叶中糖积累具有显著的正面效应。

2.5 施氮水平与氮磷比对烟叶糖积累的量化影响

为进一步探究施氮水平和氮磷配比两种因素对烟叶中糖积累特征的影响,以施氮水平和氮磷配比为自变量,以糖积累水平为因变量,进行线性回归分析(表 2)。结果表明,施氮水平和氮磷配比均未对烟叶中淀粉含量产生显著影响;但氮磷比对烟叶中总糖积累表现出显著的负效应 ($P < 0.05$)。值得注意的是,施氮水平对烟叶中蔗糖含量具有显著的负效应 ($P < 0.01$),表明增施氮肥不利于烟叶中蔗糖的积累;氮磷比对蔗糖含量同样表现出显著的负效应 ($P < 0.05$),表明适量增施磷肥有助于促进烟叶中蔗糖积累,缓解高氮施肥模式对蔗糖合成带来的抑制作用。

表 2 施氮水平和磷氮比对烟叶糖含量影响的回归分析 ($n = 18$)

Table 2 Regression analysis of effects of nitrogen application level and phosphorus-nitrogen ratio on sugar content in tobacco leaves

糖类	因素	回归方程	P 值
淀粉	施氮水平	$y = -12.66x + 281.53$	0.459
	氮磷配比	$y = -178.40x + 277.79$	0.371
蔗糖	施氮水平	$y = -1.76x + 23.05$	0.008**
	氮磷配比	$y = -3.49x + 4.37$	0.035*
总糖	施氮水平	$y = -50.10x + 779.93$	0.087
	氮磷配比	$y = -157.27x + 332.51$	0.018*

注: *, ** 分别表示达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平。

3 讨论

氮素作为植物生长发育的关键营养元素,在促进烤烟生长发育及形态建成中发挥关键作用^[21]。本研究发现,增施氮肥虽促进烤烟早期生长(株高增加 28.7%,茎围增加 13.8%),却显著抑制成熟期糖积累(HP2 较 LP2 总糖降低 34.3%,蔗糖降低 68.2%)。这一现象表明氮素供应的双重性:作为蛋白质合成的必需元素,氮在营养生长期驱动生物量积累;但过量氮输入打破碳氮代谢平衡,促使光合产物从糖类合成转向蛋白质合成^[22-23]。回归分析进一步揭示了施氮水平对蔗糖含量具有显著负效应 ($P < 0.01$),其生理机制在于高氮环境诱导硝酸还原酶活性升高,促使三羧酸循环中的 α -酮戊二酸等碳骨架大量消耗于氨基酸合成,导致蔗糖合成前体匮乏,最终打破碳氮代谢平衡^[24]。这一现象印证了经典理论:当氮代谢过度活跃时,光合碳流将从碳水化合物合成转向含氮化合物合成,造成糖积累受阻^[25]。

增施磷肥有效缓解了高氮的负面效应。磷素是植

物生长发育的关键营养元素,参与细胞结构组成、能量代谢及物质运输等多种生理过程,对作物的生长发育与品质提升至关重要^[11, 26]。本研究发现,适量增施磷肥以降低氮磷比有利于烟株叶片生长发育,表现为叶片数、最大叶长和叶宽的增加,这与段星屹等^[27]的研究结果一致。在常规施氮水平下,LP3 处理烤烟叶片 Pn 提高 20.6%(图 2A)。这一提升主要归因于磷作为光系统 II 放氧复合体的必需组分,能够促进类囊体膜上的光合磷酸化过程,进而增强 ATP 的合成能力和卡尔文循环中 RuBP 的再生能力^[28-30]。值得注意的是,通过增施磷肥将氮磷比从 1:0.7 调整至 1:1.3,烟叶 SPS 活性提升 213.4%(图 3B)。SPS 是植物叶片蔗糖合成途径中的关键酶,在调控蔗糖合成中起重要作用^[31]。而磷元素作为磷酸基团载体与高能磷酸键供体,通过促进 UDPG-焦磷酸化酶反应加速蔗糖前体的合成,并通过磷酸化修饰 SPS 蛋白保守位点增强催化效率^[32-33]。这些协同作用最终使 LP3 的蔗糖含量提高 329.9%,表明磷素成功将碳代谢流从氨基酸合成重新定向至蔗糖积累途径。

氮磷互作对糖积累的调控呈现阈值效应。磷素对植物碳代谢产物(如蔗糖和淀粉)的合成与转运具有重要影响,适量施磷能够显著促进叶片蔗糖的合成^[34]。在常规施氮水平下,适当增施磷肥可显著增加烟叶蔗糖含量,这与姜宗庆等^[35]的研究结果一致。其中,在常规施氮下,LP2 处理达到糖积累峰值(总糖 291.0 mg/g,图 4A),但同等氮磷比的 HP2 处理下总糖降至 191.2 mg/g(降幅 34.3%,图 4A),这表明过量氮输入会打破碳氮代谢平衡,促使碳骨架转向氨基酸合成而非糖积累,而优化磷供应可部分抵消该效应(HP2 较 HP1 糖含量仍提升 92.2%)。线性回归分析进一步揭示了施氮水平对蔗糖积累的显著负效应,而氮磷配比同样表现出显著负效应,表明低氮磷比的促糖效应需以适度氮供应为前提^[36]。这可能归因于过量氮通过激活 TOR 激酶信号,抑制 SPS1 基因转录^[37];而充足磷供应则通过增强 SnRK1 激酶活性部分抵消高氮环境对蔗糖合成关键酶的转录抑制,形成氮磷信号在碳代谢通路中的动态权衡^[38]。

为使湘南烟区施肥策略更具针对性,需依据土壤有效磷水平进行差异化调控。对于土壤有效磷偏低的田块,磷素是限制烟株碳代谢的关键因子,建议在常规施氮量下将施肥氮磷比优化至 1:1.3,以快速提升土壤磷库,保障烟株生长与代谢需求。对于土壤有效磷处于中等范围的田块,应采取“控氮稳磷”的策略,将氮肥用量维持在常规水平,并将氮磷比从传统的

1:0.7 优化至 1:1, 这是本研究证实的利于糖分积累的高效配比。而对于土壤有效磷偏高的田块, 施肥重心应转向严格控制氮肥用量, 以避免过量氮素对糖积累的抑制效应, 此时氮磷比可维持 1:1, 通过精准控氮来促进土壤原有丰富磷库的高效利用。上述分类指导有利于实现湘南烟区养分资源优化与烟叶品质提升的协同。

本研究从碳代谢流分配视角系统解析了氮磷配比施肥模式对烤烟碳代谢的调控效应, 揭示了磷素通过协调光合碳同化与关键酶活性促进糖积累的生理机制, 为烟叶品质定向调控提供了理论依据。当前研究仍存在以下局限: ①土壤中氮磷互作通过转录因子网络调控碳代谢酶活性的分子机制, 尚未在蛋白质互作层面得到验证; ②高氮环境下磷素缓解效应的临界阈值需结合原位监测技术, 在土壤磷流失风险区开展田间校验^[39]。未来研究将整合同位素示踪与蛋白质组学联用技术, 量化光合碳在蔗糖/氨基酸合成中的通量分配, 解析氮磷信号交叉调控碳代谢的关键节点, 为烤烟品质提升的精准施肥策略奠定理论基础并提供应用指导。

4 结论

本研究通过系统解析不同氮磷配比施肥对烤烟生长及碳代谢的影响, 发现增施氮肥虽促进团棵期烟株形态建成, 但过量施氮打破碳氮代谢平衡, 导致成熟期糖积累显著受抑; 磷素通过提升光合碳同化效率、激活 SPS 活性、引导碳流至蔗糖途径等可缓解该效应, 但氮磷互作存在阈值效应: 在常规施氮水平下, 1:1 氮磷配比可实现糖积累峰值, 但增施氮肥使同等配比处理糖含量骤降, 表明组织氮浓度超过临界值将抑制磷促糖效应。线性回归进一步量化了施氮水平与蔗糖积累的极显著负相关, 而氮磷比同样与之呈显著负相关。基于上述发现, 在湘南烟-稻轮作区种植烤烟可选择增施磷肥、适当控氮的施肥模式: 常规施氮条件下, 将氮磷比从 1:0.7 优化至 1:1 可最大化糖积累; 但若需增施氮肥, 需同步增磷使氮磷比降低, 以通过激活 SPS 酶活性缓解高氮抑制。本研究为烤烟优质栽培提供了理论依据与技术途径。

参考文献:

[1] 罗登山, 王兵, 乔学义. 《全国烤烟烟叶香型风格区划》解析[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(4): 1-9.
[2] Fors S. Sensory properties of volatile Maillard reaction products and related compounds: A literature review[M]// The maillard reaction in foods and nutrition. Washington,

DC: American Chemical Society, 1983: 185-286.
[3] 周志磊. 烤烟主流烟气中主要甜味物质的鉴别及其形成机理[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 6-7.
[4] 任改弟, 张苗, 张文越, 等. 不同来源有机物料对菜用蚕豆生长和品质及根际土壤性状的影响[J]. 土壤, 2022, 54(4): 740-749.
[5] 姚玉波. 多组学分析磷胁迫下大豆根瘤碳氮代谢途径[J]. 大豆科学, 2024, 43(5): 624-631.
[6] 李刚, 张祥池, 李诚, 等. 不同供磷水平对小麦苗期干旱胁迫适应性的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(1): 91-101.
[7] Muhammad I I, Abdullah S N A, Saud H M, et al. The dynamic responses of oil palm leaf and root metabolome to phosphorus deficiency[J]. Metabolites, 2021, 11(4): 217.
[8] 甘彩霞, 吴楚. 蔗糖代谢中 3 类关键酶的研究进展[J]. 长江大学学报(自科版)农学卷, 2007, 4(1): 74-78.
[9] 姜丽娜, 李冬芬, 李春喜, 等. 小麦蔗糖合成酶和腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶的研究进展[J]. 作物杂志, 2008(6): 11-15.
[10] Sun M, Han H M, Feng W N, et al. Low phosphorus stress decreases cotton fiber strength by inhibiting carbohydrate metabolism[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2025, 44(7): 3865-3883.
[11] 杨叶钰萍, 郑洁, 靳乐乐, 等. 有机培肥对根际解磷细菌群落及玉米生产力的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62(3): 847-856.
[12] 张曦瑜, 沈幸, 李伟, 等. 减氮施肥对库尔勒香梨叶质和产量的影响[J]. 华北农学报, 2025, 40(2): 139-152.
[13] 贺佐胜, 张莉, 钱建财, 等. 湘南典型植烟土壤主要养分丰缺评价及其与 pH 值的关系研究[J]. 耕作与栽培, 2025, 45(2): 24-30.
[14] 郝汉驰, 李耀, 肖子曼, 等. 湘南烟稻轮作区植烟土壤养分时空演变特征及肥力评价[J]. 中国农学通报, 2024, 40(20): 54-64.
[15] 尹光彬, 李攀, 黄敏, 等. 滴灌条件下常规烟草专用肥施用技术对烟叶的影响[J]. 云南农业, 2022, 36(8): 71-74.
[16] 田有国, 谢建昌. 灌溉施肥: 水肥高效应用技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 18-28.
[17] 李想, 王浩然, 陈夏晔, 等. 健康土壤和易感烟草青枯病土壤中真菌群落的结构及功能差异[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2025, 45(3): 42-47.
[18] 黄琼慧, 肖汉乾, 肖艳松, 等. 稻茬烤烟减氮配施腐植酸碳肥的效应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 520-527.
[19] 曾誉煊, 周伟, 巢进, 等. 高硫甘油菜翻压对植烟土壤及烤烟生长和产质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(1): 117-124.
[20] 周雨, 靳志丽, 郭峰, 等. 有机物料对土壤理化性状及烟叶产质量影响定位研究[J]. 湖南农业科学, 2024(9): 54-58.
[21] 白雅凡, 李妍, 赵园园, 等. 施氮量和留叶数对低烟碱烟草品种生物碱含量和烟叶质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(6): 96-105.
[22] 赵文军, 梁婷, 王剑松, 等. 种植翻压光叶紫花苕配合

- 氮肥减施提高烤烟产量和土壤质量[J]. 草业学报, 2025, 34(10): 74–84.
- [23] 熊承飞, 陈军桥, 杨莉, 等. 不同施氮量对铜仁烟区烤烟生长发育及品质的影响[J]. 种子科技, 2021, 39(22): 21–24.
- [24] 师超, 丁敬芝, 上官力, 等. 施肥量对烤烟产量和上部烟叶质量的影响[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(4): 90–92, 95.
- [25] 吕凯, 吴伯志. 秸秆覆盖对坡地红壤养分流失及烤烟质量的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2): 320–326.
- [26] 李锋, 潘晓华. 植物适应缺磷胁迫的根系形态及生理特征研究进展[J]. 中国农学通报, 2002, 18(5): 65–69, 76.
- [27] 段星屹, 史普西, 杨成翠, 等. 不同磷肥用量对烤烟红花大金元光合特性及产质量的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(4): 557–560.
- [28] 刘启林, 王小军, 王金兰, 等. 氮磷配施对高寒区老芒麦饲草产量的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(6): 193–202.
- [29] 刘晓阳, 赵力兴, 朱铁霞, 等. 磷添加对科尔沁沙地紫花苜蓿生物量及化学计量特征的影响[J]. 中国草地学报, 2025, 47(3): 10–19.
- [30] 李跃娜, 侯立刚, 齐春艳, 等. 不同磷素营养水平对水稻剑叶光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18035–18037.
- [31] 张甜甜, 吴鹏, 杜文晴, 等. 大豆品种叶片光合特性及碳代谢酶活性演变研究[J]. 中国油料作物学报, 2025, 47(4): 993–1001.
- [32] 贺鹏, 谢伟, 马宏亮, 等. 秸秆覆盖与施磷对西南冬小麦叶肉导度和 CO_2 同化效率的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(23): 9674–9685.
- [33] 王瑛泽, 曹智, 高玉红, 等. 赤霉素和磷肥配合施用对胡麻光合酶活性及其产量形成的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(4): 71–82.
- [34] 潘晓华, 刘水英, 李锋, 等. 低磷胁迫对不同水稻品种幼苗光合作用的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 770–774.
- [35] 姜宗庆, 封超年, 刘萍, 等. 施磷量对不同类型专用小麦产量及剑叶相关生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(1): 76–80.
- [36] 苏明, 吴佳瑞, 洪自强, 等. 西北半干旱区马铃薯块茎淀粉形成及产量对磷肥减量的响应[J]. 作物学报, 2025, 51(3): 713–727.
- [37] 唐湘如, 余铁桥. 磷钾肥对饲用稻产量和蛋白质含量的影响及其机理研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(4): 372–377.
- [38] Peixoto B, Baena-González E. Management of plant central metabolism by SnRK1 protein kinases[J]. Journal of Experimental Botany, 2022, 73(20): 7068–7082.
- [39] Shah I H, Manzoor M A, Azam M, et al. Comprehensive characterization and expression profiling of sucrose phosphate synthase (SPS) and sucrose synthase (SUS) family in *Cucumis melo* under the application of nitrogen and potassium[J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1): 285.

(责任编辑：毛小芳)