

不同磷肥施用对永州烟区烟叶碳代谢效率及糖类积累的影响^①

华 喆^{1,2}, 李 虎³, 王陈量³, 唐恩贵³, 李泽军³, 杨 坤¹, 李小慧^{3*}, 彭曙光¹, 王 灿^{1*}, 廖杨文科⁴

(1 中国烟草总公司湖南省公司, 长沙 410004; 2 南京林业大学生态与环境学院, 南京 210037; 3 湖南省烟草公司永州市公司, 湖南永州 425000; 4 南京林业大学生命科学学院, 南京 210037)

摘 要: 永州是湖南烟稻轮作区重要的代表性烟叶产区之一, 但目前由于土壤磷素利用率低, 烟叶存在甜感不足、品质下降的问题, 选择合理的磷肥类型及施用方式是解决这一问题的有效途径。本研究通过设置单施磷酸一铵(P1)、单施过磷酸钙(P2)及其与腐殖酸配施(P1H、P2H)的田间小区试验, 以常规施肥处理为对照, 研究了不同磷肥处理对烟株生育期农艺性状、光合作用、碳代谢酶活性和烟叶糖积累的影响。结果表明: P1 和 P2 处理改善了烟株在团棵期、旺长期和成熟期的农艺性状, 在旺长期 P1 处理效果更好, 而团棵期和成熟期 P2 处理效果更好。P2 处理对旺长期烟叶蒸腾速率、光合速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度均有显著提升作用, 且增幅均大于 P1 处理。两种磷肥均显著促进旺长期烟叶还原糖和蔗糖的积累, 且 P2 处理还降低淀粉含量; 同时, P2 处理增强蔗糖磷酸合成酶活性的效应强于 P1 处理, 而 P1 处理显著抑制淀粉合成关键酶(腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶)活性。磷肥施用提高了烤后烟叶还原糖和总糖的含量以及糖碱比, 且 P2 处理提升幅度更明显。总体上, P2 处理效果比 P1 处理效果更好, 添加腐殖酸(P1H)可有效增强磷酸一铵在改善农艺性状、增强光合能力、提升烟叶糖分合成和积累以及协调烟叶化学成分等方面的效应。针对湘南永州地区烟田磷肥施用, 推荐磷酸一铵与腐殖酸配施(P1H)的策略, 可有效提高烟叶碳代谢效率、促进糖类积累, 进而改善烟叶品质。

关键词: 烤烟; 磷肥; 腐殖酸; 碳代谢; 糖积累

中图分类号: TQ447.3; TS41 **文献标志码:** A

Effects of Different Phosphate Fertilizers on Carbon Metabolism Efficiency and Sugar Accumulation in Tobacco Leaves

HUA Zhe^{1,2}, LI Hu³, WANG Chenliang³, TANG Engui³, LI Zejun³, YANG Kun¹, LI Xiaohui^{3*}, PENG Shuguang¹, WANG Can^{1*}, LIAO Yangwenke⁴

(1 Hunan Provincial Tobacco Corporation, China National Tobacco Corporation, Changsha 410004, China; 2 College of Ecology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3 Yongzhou Municipal Tobacco Company, Hunan Provincial Tobacco Corporation, Yongzhou, Hunan 425000, China; 4 College of Life Sciences, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The tobacco-rice rotation area in Hunan Province is one of China's most important and representative tobacco-producing regions. Yongzhou is a key tobacco-rice rotation area in Hunan. However, current challenges such as low phosphorus utilization efficiency in soil and insufficient sweetness and declining quality of tobacco leaves have emerged. Selecting appropriate phosphorus fertilizer types has become an effective solution to address these issues. In order to explore suitable phosphorus fertilizer types for Yongzhou tobacco-growing areas, this study conducted field plot experiments using ammonium dihydrogen phosphate (P1), calcium superphosphate (P2), and their compound mixtures with humic acid (P1H, P2H), investigated the effects of phosphorus fertilizer types on agronomic traits, photosynthesis, carbon metabolism enzyme activities, and sugar accumulation in tobacco leaves during different growth stages. Results showed that both P1 and P2 applications improved agronomic traits at rosette, vigorous, and maturation stages. P1 demonstrated better effects during the vigorous growth stage, while P2 showed superior performance at rosette and maturation stages. P2 significantly enhanced transpiration rate,

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(jinzhi1666@126.com; wangcanhny@163.com)

作者简介: 华喆(2000—), 男, 江苏南京人, 博士研究生, 研究方向为植物微生物生态。E-mail: huaz@njfu.edu.cn

photosynthetic rate, stomatal conductance, and intercellular CO_2 concentration during the vigorous growth stage, with greater increases than P1. Both fertilizers significantly promoted the accumulation of reducing sugars and sucrose during the vigorous growth, with P2 additionally reducing starch content. P2 demonstrated better enhancement of sucrose phosphate synthase activity compared to P1, whereas P1 significantly inhibited the activity of ADP-glucose pyrophosphorylase (a key starch synthesis enzyme). Phosphorus application increased the contents of reducing sugars, total sugars, and sugar-to-alkaloid ratio in the post-cured leaves, with more pronounced improvements from P2. Overall, P2 application showed better comprehensive effects than P1. Humic acid effectively enhanced P1's performance in improving agronomic traits, photosynthetic capacity, sugar synthesis/accumulation, and coordinating the chemical composition of leaves. For tobacco fields in southern Hunan's Yongzhou region, the strategy of combining monoammonium phosphate with humic acid is recommended, which can effectively improve tobacco carbon metabolism efficiency, promote sugar accumulation, and enhance leaf quality.

Key words: Flue-cured tobacco; Phosphatic fertilizer; Humic acid; Carbon metabolism; Sugar accumulation

烟叶是卷烟制品中的关键基础原料,其质量决定了卷烟制品的品质^[1]。湘南烟稻轮作区是我国重要的烟叶产区之一,生产的烟叶具有香气浓郁、焦香突出、醇甜感较丰富等品质特征^[2]。然而,近年来烤后烟叶出现焦香有余、甜感不足的现象^[3],一定程度上制约了烟叶的品质彰显和工业可用性。烟叶的甜感主要取决于烤烟碳代谢产物的水解以及焦糖化反应和美拉德反应^[4]。糖含量的提升有助于柔和烟气,提升烤烟甜感,其中烟叶还原糖与卷烟甜感密切相关^[5]。

磷元素深度参与糖类合成的核心过程——光合作用,可通过调控碳代谢和糖类合成、转运等代谢途径,进而影响烟叶糖分积累^[6]。缺磷条件下,烟株生长缓慢,光呼吸增强,光合作用被抑制;适量施用磷肥可促进植株生长,缩短生长周期,提高烟叶还原糖含量^[7],促进烟叶化学成分更为协调,从而提高烟叶品质、上等烟比例和经济效益^[8]。

目前,农业生产中常用磷肥有磷酸一铵、过磷酸钙、磷酸二铵、钙镁磷肥、磷矿粉以及复合磷肥等。按磷素释放浓度,磷肥可分为低浓度和高浓度两类。其中,磷酸一铵是肥效释放快的高浓度磷肥,水溶液呈酸性,适用于碱性、石灰性土壤,有助于植株初期的快速生长。过磷酸钙属于水溶性速效磷肥,呈酸性,是适合施用于碱性至微酸性土壤的低浓度磷肥^[9]。然而,如何通过合理选择磷肥类型改善烟叶碳代谢及糖积累水平仍不清楚。

施入土壤后未被植物及时吸收利用的磷,易与土壤中的铁、铝、钙、镁等组分发生吸附、沉淀或闭蓄作用,转化为植物难以直接利用的固定态磷或低有效性磷,从而降低磷肥利用率^[10-11]。因此,在生产中常配施腐殖酸等肥料增效剂,通过络合铁、铝、钙等金属离子,减弱土壤对磷的吸附和固定,并促进固定态或难溶态磷向植物可吸收利用的有效磷转化,提高磷

肥有效性^[12]。腐殖酸作为常用的肥料增效剂,其所含羧基、酚羟基等活性官能团,可络合铁、铝等金属离子,抑制磷酸盐与其形成难溶性沉淀,同时,可通过金属离子桥接形成可溶性的腐殖酸-金属-磷酸盐三元络合物,从而提高土壤磷的有效性^[13]。此外,腐殖酸还能吸附于土壤胶体(铁/铝氧化物)表面,与磷酸盐竞争吸附位点,从而将土壤中被固定的磷酸盐置换释放出来^[14]。但利用腐殖酸增强磷肥利用率的具体施肥模式仍有待进一步研究。

永州烟区是湖南主要的烟稻轮作区。调查发现,该地区土壤 pH 和有机质含量(51.4% 的烟田土壤 $\text{pH} \geq 7.5$, 69.1% 的烟田土壤有机质含量 $\geq 35 \text{ g/kg}$)均偏高,不利于土壤中磷的吸收和利用^[15]。例如,当土壤 $\text{pH} \geq 7.5$ 时,磷易与土壤中钙结合形成难溶性的磷酸钙,降低磷的有效性^[16]。科学选择烟区磷肥类型及其施用方式是解决上述问题的有效途径之一。为此,本研究通过田间小区试验,设置不同类型磷肥及其配施腐殖酸处理,探讨不同处理对烟株生育期农艺性状、光合作用、烟叶糖积累和合成的影响,为改善湘南烟区烤烟磷肥施用技术和烟叶可持续生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2024 年在湖南省永州市烟叶生产技术中心烟草试验基地(111°41'E, 26°25'N, 海拔 260 m)进行。试验区属亚热带季风性气候,年平均气温 18.7 °C,年平均降水量 1 332.5 mm,无霜期 274 d。选取近 3 年未进行过肥料试验、排灌便利、土质和肥力均匀及往年烟叶长势具有代表性的烟田开展试验。试验地基础肥力为: pH 7.45, 有机质 25.2 g/kg, 全氮 1.69 g/kg, 全磷 0.51 g/kg, 全钾 13.6 g/kg, 速效氮 113.2 mg/kg,

有效磷 12.4 mg/kg, 速效钾 178.3 mg/kg, 阳离子交换量(CEC)21.33 cmol/kg。试验地为烤烟—晚稻轮作, 2023 年 11 月上旬晚稻收割后, 布置大田小区试验。2024 年 2 月下旬烟田整地起垄, 3 月上旬施基肥并移栽, 烤烟品种为云烟 87。

1.2 试验设计

田间试验共设置 5 个处理, 具体方案如表 1 所示。每个处理 3 个重复(小区), 共 15 个小区(小区面积为 10 m×6 m), 烤烟移栽行距×株距为 1.2 m×0.5 m, 每个小区 80 株烟苗。

表 1 试验处理
Table 1 Experiment treatment

编号	磷肥处理	大田生育期施肥量(kg/hm ²)							
		饼肥	专用基肥	提苗肥	专用追肥	硫酸钾	磷酸一铵	过磷酸钙	腐殖酸
CK	常规施肥	450	1 050	112.5	450	150	0	0	0
P1	磷酸一铵	450	1 050	112.5	360	210	90	0	0
P2	过磷酸钙	450	1 050	112.5	450	150	0	225	0
P1H	磷酸一铵+腐殖酸	450	1 050	112.5	360	210	90	0	75
P2H	磷酸钙+腐殖酸	450	1 050	112.5	450	150	0	225	75

试验所用肥料均由湖南金叶众望科技股份有限公司提供, 为当地常规烟田用肥。腐殖酸基础性质为: 腐殖酸(干基)65%~70%; 黄腐酸(干基)3%~5%; 氧化钾 10%~12%; pH 8~10(1%, 即 1 g 腐殖酸溶于 99 mL 无菌水测定的 pH)。根据追肥处理中的 P₂O₅ 含量, 调整专用追肥施用量, 保证最终每个处理施肥量 N 170.25 kg/hm²、P₂O₅ 117 kg/hm²、K₂O 474.45 kg/hm²。

基肥具体施用步骤如下: 在烟垄(垄高 35 cm)上按 50 cm 株距于移栽前施入饼肥、总量 30% 专用基肥, 在上述两种肥料和土壤充分混匀后移栽烟株。待烤烟移栽后, 在植株间沿烟垄方向开 15 cm×15 cm 的施肥带, 施入剩余 70% 专用基肥。追肥具体施用步骤如下: 在烤烟移栽当天和移栽后 7~10 d 分 2 次兑水浇施提苗肥。移栽后 20 d 和 35 d 分 2 次(用量比例为 1:2)兑水浇施专用追肥、磷肥和钾肥。施用腐殖酸的处理, 则在移栽后 35 d 将腐殖酸与肥料充分混匀后进行施用。追肥位置为烟株最大叶片叶尖所对应的地下位置^[17]。其他田间管理方法参照当地常规操作。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 烟株农艺性状 在烟株团棵期(5 月)、旺长期(6 月)和成熟期(7 月)于每个小区随机选取有代表性的烟株 3~5 棵, 每个处理共 10 株, 分别测量烟株株高、叶片数、茎围、倒 3 叶长和宽、倒 6 叶长和宽、最大叶长和宽、叶面积等农艺性状。

1.3.2 烟叶光合作用 在烟株旺长期, 每个小区随机挑选 3 棵生长均一的烟株, 于晴朗天气上午 9:00—12:00, 采用 LI-COR 6800 便携式光合仪, 测定上部第 4~5 片展开叶的光合作用。测定的主要光合指标包括叶片蒸腾速率、光合速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔

导度。

1.3.3 烟叶糖、淀粉含量及蔗糖合成相关酶活性 在烟株旺长期, 每个小区随机采取上部第 4~5 片烟叶, 放入干冰盒后低温运回实验室。采用 3,5-二硝基水杨酸法测定总糖及还原糖含量, 蒽酮比色法测定淀粉含量, 间苯二酚比色法测定蔗糖含量^[18]。同时, 使用苏州科铭生物技术有限公司提供的试剂盒, 测定蔗糖磷酸合成酶(Sucrose phosphate synthase, SPS)和腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(ADP-glucose pyrophosphorylase, AGP)活性。

1.3.4 烤后烟叶化学成分 采集不同处理适宜成熟度的烟叶, 同时避免采青, 根据三段式烘烤工艺, 将烟叶烘烤至变黄程度达十成黄时, 选取代表样品各 1 kg。将烤后烟叶在 60 ℃烘箱中烘干、粉碎、过筛后, 参照王瑞新^[19]的方法, 测定烟叶中烟碱、还原糖、氯、总氮、总钾和总糖含量。

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2016、Origin 9.1 进行数据处理并作图, 采用 Fisher 最小显著差异法(LSD)比较不同磷肥处理下烟株各项指标的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同磷肥施用对烟株农艺性状的影响

与 CK 处理相比, 在团棵期, 施用不同磷肥处理已开始明显促进烟株生长和生物量积累(图 1A)。其中, P1 处理显著增加烟株株高、叶片数, 且对株高提升效果最突出, 增幅达 18.40%; P2 处理对烟株株高、叶片数的增加幅度不及 P1 处理, 但对最大叶长有明显提升。相比 P1 处理, 配施腐殖酸的 P1H 处理增强了

对烟株株高、叶片数、茎围和最大叶长的提升效果,其中对最大叶长提升最明显,增幅为 18.17%。在旺长期,相比 CK 处理, P1 和 P2 处理显著增加烟株的中部最大叶长和叶宽,叶长增幅分别为 8.77% 和 5.52%;叶宽增幅分别为 20.09% 和 18.26%,且 P1 处理的促进效果均比 P2 处理强。相比 P1 和 P2 处理,腐殖酸配施的 P1H 和 P2H 处理增强了对烟株株高、叶片数、茎围及中部叶长和叶宽等农艺性状的提升效果(图 1B)。在成熟期,相比 CK 处理, P1 处理对烟株叶片长、宽和面积提升效果均不明显,而 P2 处理显著增加倒 6 叶长 5.02%。相比 P1 处理, P1H 处理明显增强对倒 6 叶长的提升效果;相比 P2 处理, P2H 处理提升了对倒 3 叶生长的促进效应,其中对叶面积提升效果最明显,增幅达 13.09%(图 1C)。综上,两种磷肥均能有效改善烟株农艺性状,其中磷酸一铵对团棵期、旺长期烟株生长有明显改善,而过磷酸钙在全生育期均对烟株农艺性状有显著提升;配施腐殖酸可在全生育期增强两种磷肥对烟株生长的促进作用。

2.2 不同磷肥施用对烟叶光合作用的影响

由图 2 可知,与 CK 处理相比, P1 处理对旺长期烟叶光合作用影响不明显;而相比 P1 处理, P2 处理对烟叶光合作用的提升效应突出,使蒸腾速率、光合速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度均显著增加,其中蒸腾速率和气孔导度提升最明显,分别是 CK 处理的 1.98 倍和 2.11 倍。相比 P1 处理,配施腐殖酸的 P1H 处理使烟叶各项光合指标均显著增加,其中蒸腾速率和气孔导度增幅最大,分别为 92.2% 和 83.9%。然而,相比 P2 处理,配施腐殖酸的 P2H 处理仅显著提高烟叶光合速率,其他光合指标均显著降低。综上,磷酸一铵对促进烟叶光合作用的影响不显著,而过磷酸钙能显著提升烟叶各项光合指标;配施腐殖酸显著促进磷酸一铵对烟叶光合作用的提升效应,但削弱过磷酸钙增强烟叶光合能力的效果。

2.3 不同磷肥施用对烟叶糖积累的影响

与 CK 处理相比, P1 和 P2 处理可显著提升旺长期烟叶还原糖和蔗糖的含量,但对烟叶总糖含量无显著影响(图 3)。相较 P2 处理, P1 处理对烟叶蔗糖含量的提升作用更突出,烟叶蔗糖含量较 CK 处理增加了 1.63 倍。在磷肥施用基础上,配施腐殖酸可进一步显著提升烟叶还原糖的积累,与单施磷肥相比,配施腐殖酸处理下烟叶还原糖含量增加 15%~20%。总体上,施用磷肥有利于旺长期烟叶还原糖物质的积累,而配施腐殖酸可进一步增强磷肥对烟叶还原糖积累的效果。

2.4 不同磷肥施用对烟叶碳代谢合成关键酶活性的影响

由图 4 可知,相比 CK 处理, P2 处理对旺长期烟叶中 AGP 活性无显著影响;而相比 P2 处理, P1 处理使 AGP 活性显著降低 45.5%,存在不利影响。P1 和 P2 处理均显著增强 SPS 活性,分别为 CK 处理的 1.5 倍和 2.0 倍。配施腐殖酸均能显著提升烟叶 AGP 活性,但腐殖酸对磷酸一铵提升 SPS 活性的效应有所增强,大幅(27.63%)削弱过磷酸钙增强 SPS 活性的效应。综上,单施磷肥均有利于增强 SPS 活性,但对 AGP 活性存在不利或影响不显著,进一步配施腐殖酸则均增强烟叶 AGP 活性。

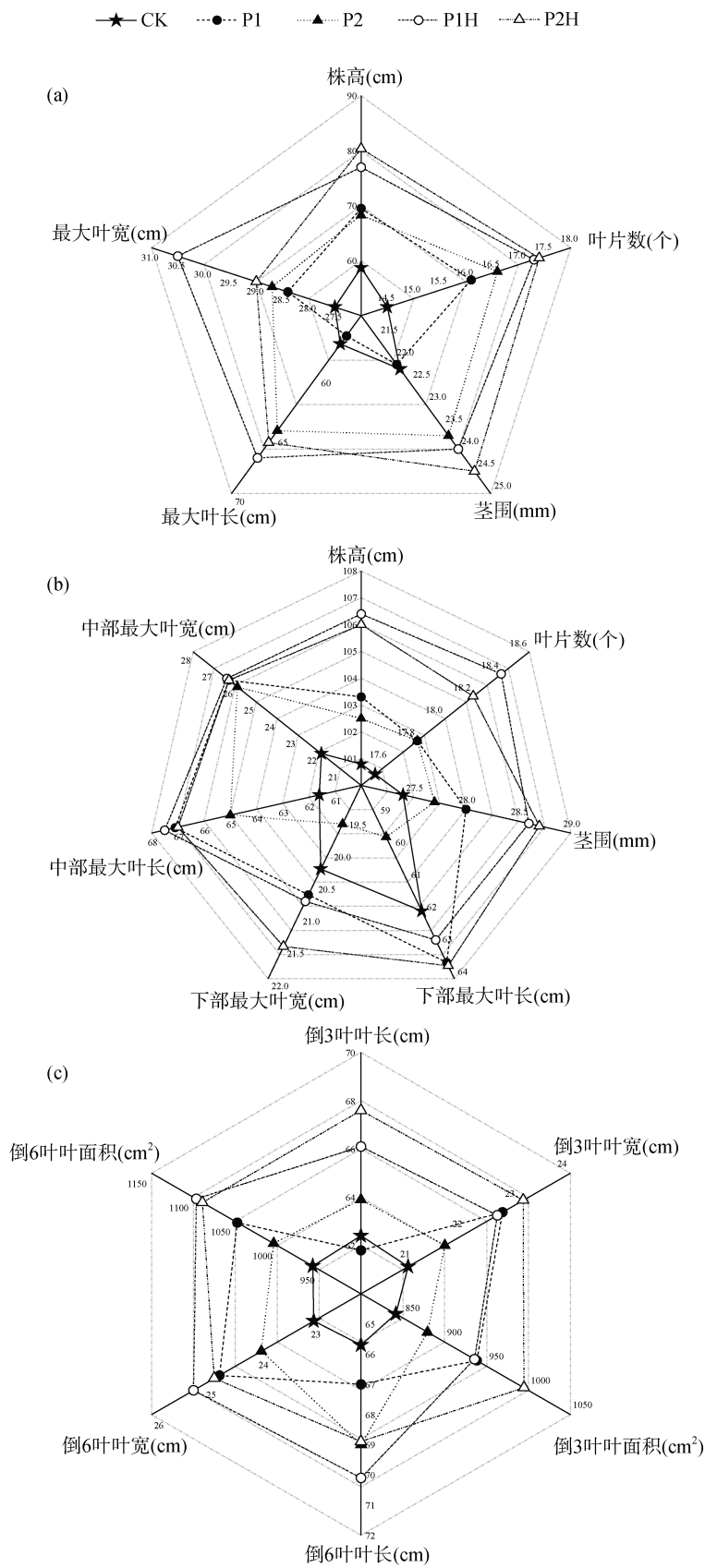
2.5 不同磷肥施用对烤后烟叶化学成分的影响

由图 5 可知,与 CK 处理相比,施用磷肥显著提高了烤后烟叶还原糖、总糖水平以及糖碱比,显著降低了烟叶中烟碱、总氯、总氮和总钾水平。其中, P2 处理对还原糖、总糖、糖碱比的提升效应明显强于 P1 处理,各指标值分别为 20.46%、24.71% 和 8.4%。相较单施磷肥,配施腐殖酸可进一步增强磷酸一铵对还原糖、总糖和糖碱比的提升作用,但削弱了过磷酸钙对还原糖、总糖、糖碱比的提升效应。综上,施用磷肥能明显提高烤后烟叶还原糖和总糖含量,而配施腐殖酸可增强磷酸一铵提升烟叶糖水平的效应,降低过磷酸钙促进烟叶糖积累的效应。

3 讨论

磷元素通过影响烟株体内碳水化合物的合成和运转,从而促进烟株生长、提高烟叶含糖量^[20]。本研究发现,磷酸一铵和过磷酸钙单施均能显著提高烟株农艺性状,且单施过磷酸钙的肥效优于单施磷酸一铵。磷酸一铵含磷量较高(20%~25%),同时还含有约 11% 的氮^[21],其磷能以水溶性磷酸盐形式迅速释放,对植株生育前期(如烟株团棵期)根系发育有显著的促进作用^[22]。过磷酸钙含磷 12%~18%,磷以钙磷酸盐形式存在,可被烟株直接吸收,且其肥效释放周期较长,更利于烟株全生育期根系和茎的生长^[21]。相应地,在团棵期和成熟期,过磷酸钙对烟株农艺性状的改善均明显优于磷酸一铵。

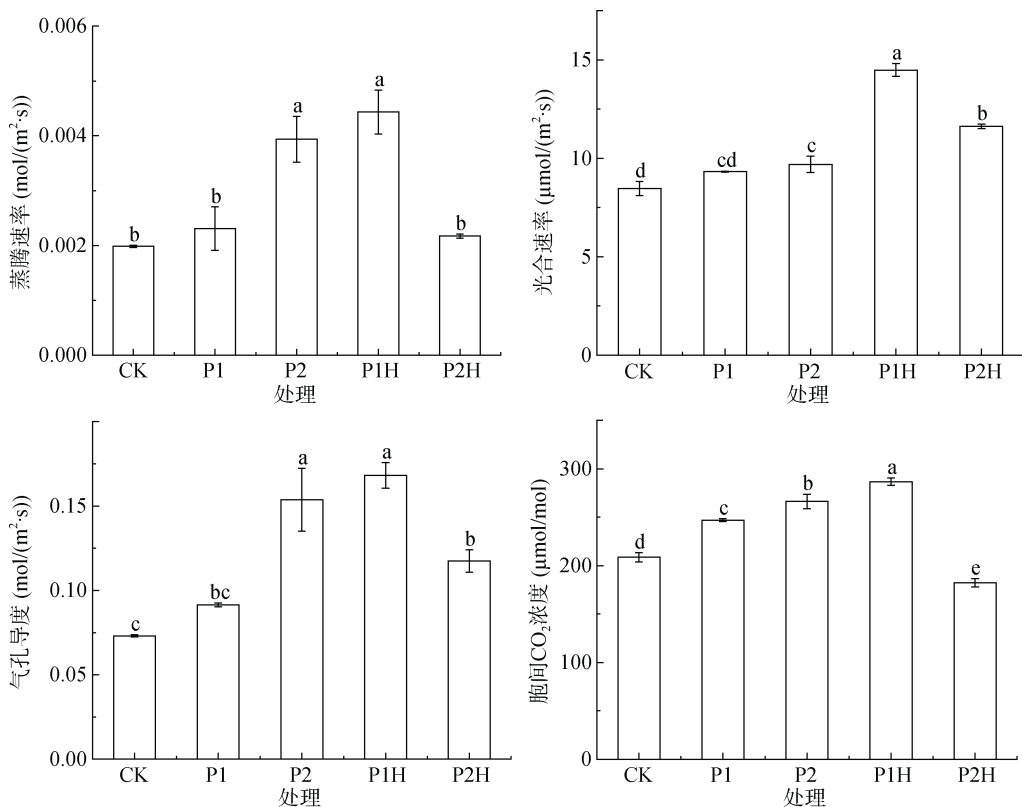
磷元素深度参与卡尔文循环,是形成腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)和 1,5-二磷酸核酮糖(RuBP)的重要组成元素,以及合成 RuBP 羧化酶的必要条件^[23]。缺磷会导致植物生长缓慢,光合器官发育滞后,叶绿素含量和与卡尔文循环相关酶的活性降低,适量施用磷肥可有效提高作物光合作用^[24-25]。本研究中,磷酸一铵和



(A: 团棵期; B: 旺盛期; C: 成熟期。图例中, CK 为常规施肥, P1 为磷酸一铵处理, P2 为过磷酸钙处理, P1H 为磷酸一铵+腐殖酸处理, P2H 为过磷酸钙+腐殖酸处理; 下同)

图 1 不同磷肥施用对烟株不同生育期农艺性状的影响

Fig. 1 Agronomic traits of tobacco in different growth stages treated by different phosphorus fertilizers



(图中误差棒表示标准差，不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), 下同)

图 2 不同磷肥施用对旺长期烟叶光合作用的影响

Fig. 2 Photosynthesis parameters of tobacco leaves at vigorous growth stage treated by different phosphorus fertilizers

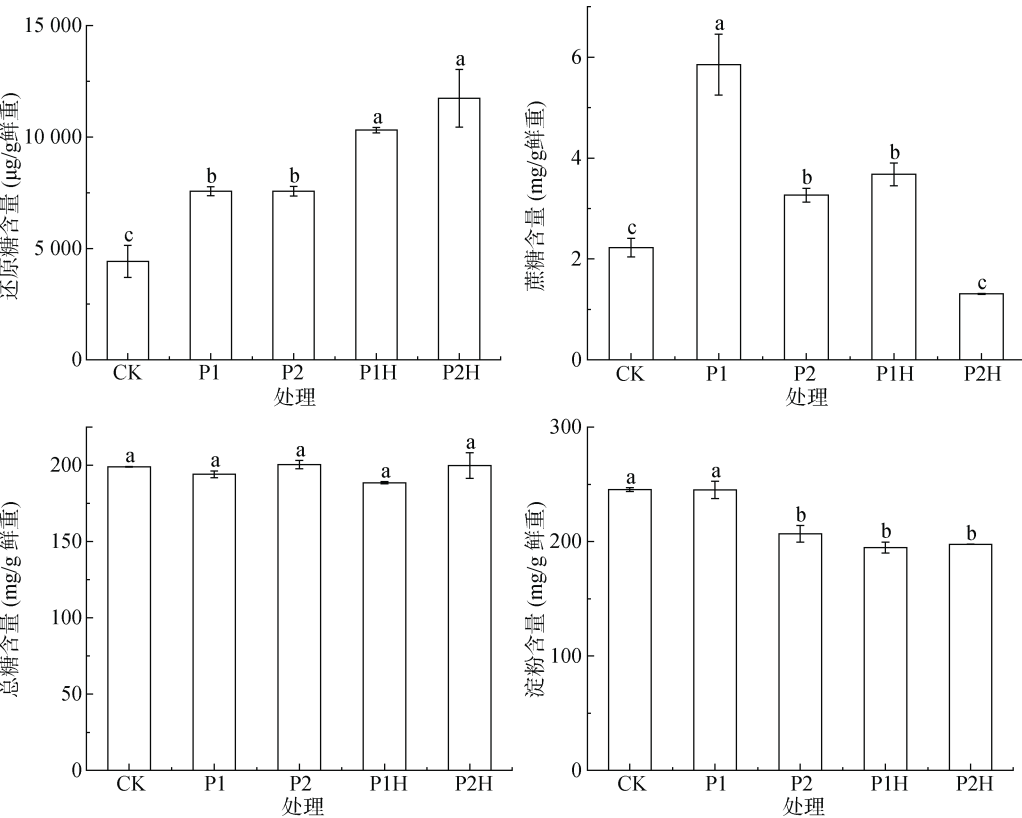


图 3 不同磷肥施用对旺长期烟叶糖含量的影响

Fig. 3 Carbohydrate contents in tobacco leaves at vigorous growth stage treated by different phosphorus fertilizers

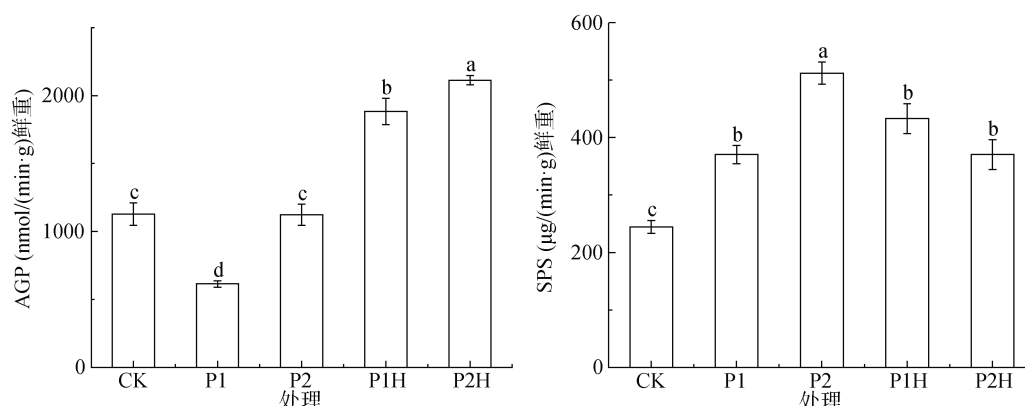


图 4 不同磷肥施用对旺长期烟叶淀粉及蔗糖合成相关酶活性的影响

Fig. 4 Enzyme activities related to starch and sucrose synthesis in tobacco leaves at vigorous growth stage treated by different phosphorus fertilizers

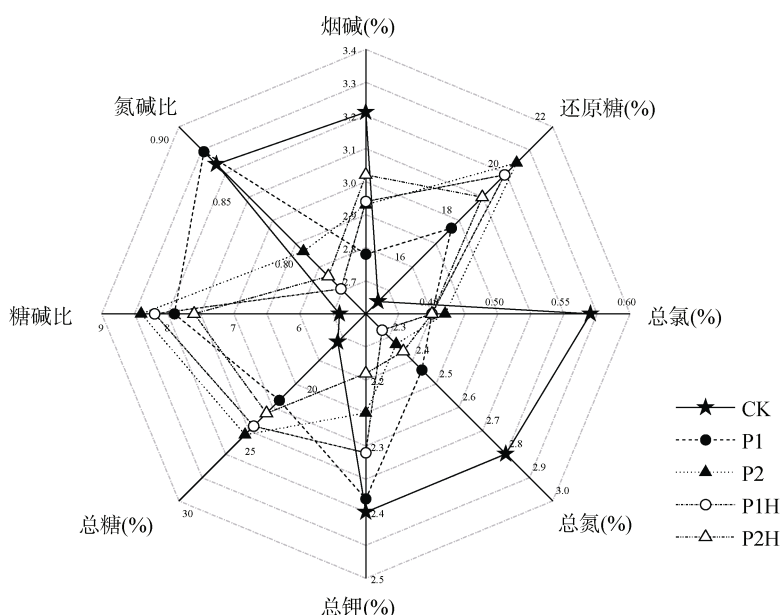


图 5 不同磷肥施用对烤后烟叶化学成分的影响

Fig. 5 Chemical component contents in cured leaves treated by different phosphorus fertilizers

过磷酸钙单施均不同程度提升烟叶净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度和气孔导度, 说明合理施用磷肥可提高烟叶光合作用。过磷酸钙较磷酸一铵肥效明显更好, 可能与不同磷肥在土壤中的溶解、扩散和固定过程存在差异有关。磷酸一铵为水溶性速效磷肥, 施入土壤后, 迅速释放磷酸盐, 未被植物吸收的磷酸盐与土壤中的铁、铝或钙等发生吸附、沉淀或固定作用, 转化为植物难以直接利用的磷形态, 从而降低后期磷素供应和磷肥利用效率^[9]。此外, 本研究测定的是旺长期烤烟叶片光合作用相关指标, 此时磷酸一铵肥效最佳时期已过。过磷酸钙则肥效缓慢, 旺长期肥效较强, 从整个生育期看来, 磷的利用率更高^[26]。

磷元素对植物同化物(如蔗糖、淀粉)的生产和积累具有重要影响^[27], 适当施磷对烟叶糖含量积累有

显著促进效果^[28]。本研究中, 过磷酸钙、磷酸一铵单施均显著增加旺长期烟叶还原糖、蔗糖含量, 但对淀粉积累有抑制作用, 与 Baxter 等^[29]的结果类似。且值得注意的是, 磷酸一铵单施促进蔗糖增加效应更显著, 过磷酸钙单施抑制淀粉积累作用更明显; 单施过磷酸钙烟叶 SPS 活性比单施磷酸一铵更高。这可能是因为: 磷酸一铵作为速效水溶性磷肥, 可为烤烟生育前期提供高浓度有效磷, 进而促使烟叶积累大量蔗糖, 但旺长期 SPS 活性可能随磷酸一铵肥效下降而减弱^[30]; 相反, 过磷酸钙肥效可能在烤烟旺长期达到高峰, 从而在该时期 SPS 活性更高, 而 SPS 促进蔗糖在该阶段大量合成并积累。但单施过磷酸钙处理植株全生育期蔗糖总积累量仍少于单施磷酸一铵处理, 与徐关印等^[31]结果类似。此外, 单施过磷酸

钙对烤后烟叶还原糖和总糖提升效果均优于单施磷酸一铵,可能是由于过磷酸钙养分释放慢,肥效持续时间长,有利于提高烟叶全生育期还原糖、蔗糖等代谢物的积累。

腐殖酸是利用生物物质经微生物作用产生的有机物质,可以活化土壤中固态磷,促进作物对土壤磷素的吸收^[32]。研究表明,腐殖酸可改变各磷组分含量,促使有效性低的磷向有效性高的磷转化,进而提高土壤有效磷含量^[33]。本研究中,添加腐殖酸总体上增强磷肥,特别是增强磷酸一铵对烟株农艺性状、光合作用、糖分合成及积累等方面的促进作用。腐殖酸中含有羧基和酚羟基等酸性官能团,能与土壤胶体结合,进而降低土壤对磷酸盐的吸附而提高磷肥的肥效^[34]。值得注意的是,腐殖酸对磷酸一铵的增效作用显著强于对过磷酸钙。张宝冲等^[35]通过 Meta 分析发现,腐殖酸并非对所有肥料均具有同样的增效效果,且其用量也会影响作物生长状况。例如,当腐殖酸用量为 0~25 kg/hm² 时,作物产量呈现先增后降的趋势,并且腐殖酸施用效应受年降水量、土壤 pH 等环境因素影响^[36]。本研究中,特别是在对光合参数、蔗糖积累、SPS 活性以及烤后烟叶化学成分的效应上,配施腐殖酸甚至抑制过磷酸钙的肥效,这可能由于以上指标均在旺长期测定,过磷酸钙肥效此时达到高峰期,腐殖酸的添加导致有效磷过高而产生负效应^[25]。

永州烟区作为湖南烟稻轮作区的重要组成部分,其土壤性质具有鲜明的区域特征。研究显示,永州烟区土壤 pH 平均为 6.95,处于适宜水平。但 pH 处于“高”或“极高”等级的土壤样品占比 61.24%,碱性土壤占比过高^[37]。这种偏碱性的土壤环境显著制约了磷有效性的发挥。本研究试验地土壤 pH 为 7.45,正处于磷有效性下降的临界范围附近,这可能是当地烟田磷素利用率偏低的重要原因之一。本研究结果表明,单施过磷酸钙在烟株全生育期的综合效果优于单施磷酸一铵。过磷酸钙为水溶性速效磷肥,呈酸性,施用于碱性至微酸性土壤时,其酸性可在根系微域内形成局部酸化环境,一定程度上缓解土壤对磷的化学固定^[38]。此外,本研究还发现,腐殖酸对磷酸一铵的增效作用显著强于过磷酸钙。这可能是由于磷酸一铵的速效磷更易被土壤固定,腐殖酸通过活化被固定磷的增效空间更大;而过磷酸钙本身肥效释放相对平缓,其酸性可局部改善土壤碱性环境,腐殖酸额外增效空间相对有限^[16]。

4 结论

磷酸一铵和过磷酸钙单施均能改善永州烟区烟株农艺性状,增强烟叶光合能力,促进烟叶还原糖和蔗糖积累,并改善烟叶化学成分协调性。过磷酸钙单施比磷酸一铵单施效果更好。腐殖酸添加可增强两种磷肥的肥效,但对磷酸一铵的肥效提升更显著。综合烟株各时期生长及生理生化指标,发现磷酸一铵与腐殖酸配施是兼顾速效供应与长效活化的有效方案。该施肥模式既利用了磷酸一铵在烟株生育前期(团棵期、旺长期)提供高浓度有效磷的优势,又借助腐殖酸对土壤中被固定磷的活化作用,弥补了磷酸一铵后期磷素供应不足的缺点,是提高永州烟区烟叶碳代谢效率、促进糖类物质积累的有效施肥措施。

参考文献:

- [1] 李小慧,李民艺,何阳,等.不同成熟度采收对湘南烟区云烟 87 上部烟叶产质量的影响[J].湖南农业科学,2023(4):90-93.
- [2] 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.
- [3] 杜坚,王珂清,张建强,等.我国不同生态区云烟 87 烟叶主要化学成分及感官风格差异[J].中国烟草科学,2018,39(2):96-102.
- [4] 贾中林,郑庆霞,戴华鑫,等.烤烟上部叶成熟过程中代谢组的差异分析[J].烟草科技,2023,56(1):1-10.
- [5] 王林,周平,贺佩,等.糖类物质对烟草香气品质的影响研究进展[J].中国烟草科学,2021,42(6):92-98.
- [6] 潘晓华,石庆华,郭进耀,等.无机磷对植物叶片光合作用的影响及其机理的研究进展[J].植物营养与肥料学报,1997,3(3):201-208.
- [7] 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,2004,25(1):28-31.
- [8] 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.
- [9] 曾之平,王扶明.化工工艺学[M].北京:化学工业出版社,2001.
- [10] 崔宸阳,李静,杨子,等.土壤闭蓄态磷的形成、转化与利用途径[J].植物营养与肥料学报,2024,30(7):1413-1421.
- [11] 马林,夏晓阳,普正仙,等.聚磷酸磷肥不同基追比对石灰性土壤上滴灌盆栽棉花生长的影响[J].植物营养与肥料学报,2022,28(5):946-952.
- [12] 李军,袁亮,赵秉强,等.磷肥中腐植酸添加比例对玉米产量、磷素吸收及土壤速效磷含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):641-648.
- [13] Gerke J. Humic (Organic Matter)-Al(Fe)-Phosphate Complexes: An Underestimated Phosphate Form in Soils and Source of Plant-Available Phosphate[J]. Soil Science, 2010, 175(9): 417-425.

- [14] Fu Z, Wu F, Song K, et al. Competitive Interaction Between Soil-Derived Humic Acid and Phosphate on Goethite[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 36: 125–131.
- [15] 靳志丽, 陈梦思, 邵兰军, 等. 永州植烟土壤几种主要化学性状特征及聚类分析[J]. *农学学报*, 2021, 11(8): 37–41.
- [16] 郝汉驰, 李耀, 肖子曼, 等. 湖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.
- [17] 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.
- [18] 李小方, 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [19] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [20] 符云鹏, 刘国顺, 韩富根, 等. 磷肥种类及用量对烤烟生长及产量、质量效应的研究[J]. *河南农业大学学报*, 1998, 32: 21–24.
- [21] 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.
- [22] 杜旭, 黄平升, 杨梅. 不同磷肥对尾巨桉 DH3229 苗木生长及抗性生理的影响[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(5): 526–533.
- [23] 肖晨星, 高璐阳, 马志明. 植物对低磷胁迫的适应机制[J]. *浙江农业科学*, 2024, 65(9): 2206–2213.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 张璐, 肖靖秀, 郑毅, 等. 不同品种磷肥施用对玉米根际土壤磷组分的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2021, 36(6): 1076–1082.
- [27] 蒋如, 宁诗琪, 隋宗明, 等. 长期轮作施肥处理对植烟土壤有机碳组分和酶活性的影响[J]. *土壤*, 2024, 56(3): 510–516.
- [28] 龙梦洁, 徐大兵, 邓建强, 等. 富磷土壤磷肥用量对烟株养分累积和烤烟产质量的影响[J]. *中国烟草科学*, 2022, 43(5): 15–21, 30.
- [29] Baxter C J, Foyer C H, Rolfe S A, et al. A comparison of the carbohydrate composition and kinetic properties of sucrose phosphate synthase (SPS) in transgenic tobacco (*Nicotiana tabacum*) leaves expressing maize SPS protein with untransformed controls[J]. *Annals of Applied Biology*, 2001, 138(1): 47–55.
- [30] 孟齐. 水稻二磷酸腺苷葡萄糖焦磷酸化酶 OsAGPase3 和 OsAGPase6 在维持水稻磷稳态中的功能研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [31] 徐关印, 刘保明, 韩宝坤, 等. 不同供磷水平对小麦植株蔗糖含量和农艺性状的影响[J]. *核农学报*, 2005, 19(3): 219–221, 180.
- [32] 郭刘明, 卢树昌. 不同调理剂施用对富磷土壤磷素吸收及其形态变化影响[J]. *土壤*, 2024, 56(3): 488–494.
- [33] Yang F, Sui L, Tang C Y, et al. Sustainable advances on phosphorus utilization in soil via addition of biochar and humic substances[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 145106.
- [34] 周丽平, 袁亮, 赵秉强, 等. 腐植酸的组成结构及其对作物根系调控的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(2): 334–343.
- [35] 张宝冲, 任志杰, 田艳艳, 等. 我国小麦和玉米施用腐植酸效果的整合分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(12): 2318–2330.
- [36] 刘诗璇, 邹洪涛, 张玉龙. 腐殖酸尿素对土壤供氮特征及东北玉米生长、产量的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2020, 51(5): 522–529.
- [37] 李春顺, 胡俊杰, 张莉, 等. 永州植烟土壤 pH 分布特征及其影响因素初探[J]. *湖南文理学院学报(自然科学版)*, 2024, 36(2): 51–57, 88.
- [38] 李春顺, 李伟鹏, 付金存, 等. 磷肥减量施用对土壤磷含量、微生物群落及烟株磷吸收的影响[J]. *作物研究*, 2023, 37(1): 28–34.

(责任编辑: 于 飞)