doi：10.11838/sfsc.1673-6257.23117

烤烟根际磷库特征及其对有机无机肥配施的响应

李　蔓，吴润娟，闫茂恒，谢雯颖，宋志姣，任家兵*

（保山学院资源与环境学院，云南　保山　678000）

摘　要：为综合分析烤烟根际土壤磷库特征及其对有机无机肥配施的响应，通过田间小区试验，分析比较了烤烟产量、产值、不同等级烤烟比例以及根际土壤磷库特征的差异。结果表明，有机无机肥配施显著提高了烤烟的产量、产值、上等烟比例以及不同形态的磷组分含量。与常规施肥（处理 2）相比，化肥减量 20% 配施有机肥（处理 3）、配施生物有机肥（处理 4）以及化肥减量 30% 配施有机肥和生物有机肥（处理 5）的产量、产值和上等烟比例平均显著增加了 30.00%、59.57% 和 82.42%，活性磷、中活性磷、稳定性磷以及难溶性磷含量平均显著增加了 48.36%、67.15%、16.51% 和 12.46%，其中活性磷对烤烟产量的形成贡献最大，占到了所有磷组分可解释量的 68.23%，以树脂磷 Resin-Pi 为首要贡献因子，占到了活性磷组分可解释量的 68.70%，其次为 17.30% 的活性磷 $NaHCO_3$-Pi 和 14.10% 的活性磷 $NaHCO_3$-Po，特别是处理 4，各磷组分含量最高，显著增加烤烟产量、产值和上等烟比例的同时，显著降低了中下等烟比例，体现出化肥减量配施生物有机肥的明显产量优势和减肥增效效应。

关键词：有机无机肥配施；烤烟；根际；磷库特征

磷是植物生长发育的必需元素之一，也是农业生产中的养分限制因子。然而，磷肥的不合理施用，在造成土壤磷素流失带来的水体富营养化等环境问题的同时，也导致大部分磷素固定在土壤中，磷库有效磷含量下降，极大程度限制了作物的磷肥利用效率[1-3]。如何提高土壤磷素有效性，改善作物磷库特征，促进作物磷素的吸收利用，对实现减肥增效、环境友好、维持农业可持续发展有着重要意义。

目前已有不少研究从种植模式以及施肥方式等方面[4-7]，比较分析了土壤磷库特征的变化差异，汪玉等[4]研究表明，太湖流域典型农田土壤磷库处于盈余状态，其中长期施用无机磷肥 40 年后，黄泥土稻田有效磷源主要为 Al-P、Fe-P 和 Ca-P，无机磷库累积明显[5]，而史静等[6]在山原红壤施用磷肥 33 年后，土壤有效磷源同样为 Fe-P、Al-P；另有研究结果表明，长江流域水稻 – 油菜轮作种植区域土壤随着 Olsen-P 水平的增加，活性磷 $NaHCO_3$-Pi 和 NaOH-Pi 含量明显增加，但仍主要积累在稳定态磷库（HCl-Pi 和 Residual-P）中[7]。

收稿日期：2023-02-25；**录用日期：**2023-05-05

基金项目：云南省教育厅基础研究项目（2022J0919）；保山学院基础研究项目（ZKJC202101）。

作者简介：李蔓（2001-），本科在读，主要研究养分资源高效利用。E-mail：2792742297@qq.com。

通讯作者：任家兵，E-mail：jiabingren612@163.com。

云南是中国优质烟叶的重要产地，其中保山烟区烤烟种植历史悠久，是云南烟草的重要产区，然而，由于过去几十年间长期大量不合理施用化肥，忽视有机类肥料的施用，加之长期连作种植，造成了植烟土壤出现酸化、板结等现象，导致土壤养分性状恶化，持续供肥能力下降，严重限制了烟叶产量和品质的提高[8-10]。目前烤烟有机无机肥配施的研究主要集中在生长发育[11-12]、病虫害防控[13-14]、微生物群落多样性[13-15]以及土壤质量改良[16-17]等方面，虽已有不少报道从不同施肥和种植模式[18-21]探讨了烤烟磷素吸收利用和土壤磷素有效性的差异，但有机无机肥配施，特别是化肥减量配施有机肥对烤烟土壤磷库特征的研究，尚缺乏系统报道，农传江等[22]研究了有机肥部分替代化肥对植烟土壤有机碳库的影响，但并未就土壤磷库特征进行分析。因此，本研究以云烟 87 为研究对象，通过田间小区试验，分析烤烟根际磷库特征及其对有机无机肥配施的响应，明确其对烤烟产量和质量建成的相对贡献，以期为提高土壤养分有效性、改良土壤理化性状，实现烟叶提质增效和持续性生产提供一定的数据支撑。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

2022 年开展田间定位小区试验，试验点位于

云南省保山市龙陵县龙山镇横山村（98° 66′ N，24° 65′ E），年均气温16.4 ℃，年均降水量2110 mm，年均日照时数2071.7 h，前作植物为牧草，无轮作作物。供试土壤基本理化性状见表1。

表1　供试土壤基本理化性状

pH	有机质（g·kg^{-1}）	碱解氮（mg·kg^{-1}）	有效磷（mg·kg^{-1}）	速效钾（mg·kg^{-1}）
7.08	36.65	100.12	18.89	154.2

1.2　供试材料

烤烟品种：云烟87。

供试肥料：化肥均为烟草专用肥，其中基肥总养分比例为N∶P_2O_5∶K_2O=8∶16∶26，追肥为N∶P_2O_5∶K_2O=16∶0∶30；精制有机肥的有机质≥45%，含N 2.77%，P_2O_5 1.55%，K_2O 1.39%，生物有机肥含有机质≥25%，N 3.23%，P_2O_5 1.47%，K_2O 1.48%，芽孢杆菌属有效活菌数≥0.5×10^{8}个·g^{-1}。

1.3　试验设计

试验设置5个处理，每个处理设置3次重复。一共15个小区，完全随机区组排列。每小区植烟5行，每行9株，共计45株烟，株距和行距55 cm×120 cm。小区面积30 m^2（5 m×6 m）。具体处理为：处理1，不施肥（CK）；处理2，当地常规施肥（100%化肥）；处理3，80%化肥+3000 kg·hm^{-2}有机肥；处理4，80%化肥+3000 kg·hm^{-2}生物有机肥；处理5，70%化肥+3000 kg·hm^{-2}有机肥+1500 kg·hm^{-2}生物有机肥。

以当地常规施肥处理的氮（N）、磷（P_2O_5）、钾（K_2O）总养分用量为基准，以尿素（464 g·kg^{-1}）、普通过磷酸钙（140 g·kg^{-1}）、硫酸钾（500 g·kg^{-1}）补足。当地常规施肥处理氮肥用量按N 105 kg·hm^{-2}施入，其中基肥N 60 kg·hm^{-2}，追肥N 45 kg·hm^{-2}，总养分比例为N∶P_2O_5∶K_2O=1∶1∶2.5，生物有机肥和精制有机肥处理的化肥用量在常规化肥施用量的基础上减量相应的比例，基肥与追肥均减量。基肥环施覆土，追肥在移栽20 d后环施覆土。生物有机肥和精制有机肥做基肥使用，在移栽前一次性施入，环施并与塘中土拌匀。其余田间管理措施按正常的优质烟生产技术要求操作和管理。

1.4　样品采集与分析

分别于适烤期将各小区烟叶挂牌采烤，计算各小区的产量。依据国家烟叶分级标准（GB 2635—1992）分级后参照试验小区计算产量、上等烟比例和中等烟比例，按照当年国家烟叶收购价格计算产值。

于烤烟采烤前期采集烤烟根际土壤，多点取样法采取混合样，除去肉眼可见的石子、动植物残体，混匀风干后，用于土壤磷组分的测定。

土壤磷组分采用改良后的Hedley磷分级方法进行测定[23-25]，将土壤磷分为5类：树脂磷Resin-Pi、活性磷（$NaHCO_3$-P）、中活性磷NaOH-P和D.HCl-Pi、稳定性磷HCl-Pi和难溶性磷（残留磷）Residual-P。称取0.5 g过0.149 mm筛风干土，按以下顺序提取磷组分：

（1）树脂磷Resin-Pi，用水浸提；

（2）活性磷$NaHCO_3$-Pi和$NaHCO_3$-Po，用0.5 mol·L^{-1}$NaHCO_3$溶液浸提；

（3）中活性磷NaOH-Pi和NaOH-Po，用0.1 mol·L^{-1}NaOH溶液浸提；中活性磷D.HCl-Pi，用1 mol·L^{-1}HCl溶液浸提。

上述磷组分，每次的提取液均为30 mL，样品振荡16 h后以10000 r·min^{-1}、0℃离心10 min，分离土壤和上清液，将$NaHCO_3$和NaOH提取液分为两组，一组用钼锑抗比色法测定无机磷（Pi），一组通过过硫酸钾消化后，用钼锑抗比色法测定全磷（Pt）和无机磷（Pi），计算得出有机磷（Po），Po=Pt-Pi。

（4）稳定性磷C.HCl-Pi和C.HCl-Po，用10 mL浓盐酸浸提，于80℃水浴10 min后再加入5 mL浓盐酸，充分涡旋使其分散后离心，转移上清液并定容至50 mL，分为两组，一组用钼锑抗比色法测定无机磷（C.HCl-Pi），一组通过过硫酸钾消化后，用钼锑抗比色法测定全磷（C.HCl-Pt），计算得出有机磷（C.HCl-Po=C.HCl-Pt-C.HCl-Pi）。

（5）难溶性磷或残留磷Residual-P，在360℃下进行H_2SO_4-H_2O_2消化，用钼锑抗比色法测定难溶性磷。

1.5　数据处理与分析

试验数据用Excel 2007整理后，用SPSS 20.0在0.05水平进行单因素方差分析（ANOVA）和统计分析。采用R语言“gbmplus”函数包，基于集成推进树（Aggregated Boosted Trees，ABT）算法，通过相对重要性图描述自变量和因变量之间的相对影响大小，定量评价土壤磷组分对烤烟产量的贡献。

2　结果与分析

2.1　有机无机肥配施对烤烟产量和质量的影响

田间试验表明，有机无机肥配施显著提高了烤烟的产量、产值和上等烟比例（表2），体现出了明显的优势。与常规施肥（处理2）相比，处理3 ~ 5的烤烟产量分别显著增加了16.61%、42.38%和31.01%（$P<0.05$），平均增幅为30.00%；产值分别显著增加了36.04%、89.83%和52.84%（$P<0.05$），平均增幅为59.57%；上等烟比例分别显著增加了55.38%、116.30%、75.58%（$P<0.05$），平均增幅为82.42%。

表2　不同处理的烤烟产量、质量和经济指标

处理	产量（kg·hm^{-2}）	产值（元·hm^{-2}）	上等烟比例（%）	中等烟比例（%）	下等烟比例（%）
1	873.50 ± 29.27e	8385.60 ± 280.96e	11.90 ± 1.81e	34.50 ± 3.63b	53.60 ± 5.38a
2	1419.61 ± 94.15d	17035.28 ± 1129.70d	33.17 ± 2.62d	44.46 ± 4.05a	22.36 ± 6.65b
3	1655.37 ± 50.74c	23175.13 ± 710.28c	51.53 ± 3.14c	31.43 ± 3.73b	17.03 ± 3.23bc
4	2021.17 ± 44.68a	32338.77 ± 714.93a	71.74 ± 1.92a	18.71 ± 1.29c	9.55 ± 3.12c
5	1859.81 ± 69.52b	26037.39 ± 973.28b	58.23 ± 2.55b	32.13 ± 3.41b	9.63 ± 5.35c

注：不同小写字母代表同列不同处理之间的差异达到0.05显著水平。下同。

中下等烟比例则表现出不同程度降低的趋势，其中处理4和5的中等烟比例分别显著降低了57.92%、27.74%，平均降幅42.83%，下等烟比例分别显著降低了57.30%、56.93%，平均降幅57.12%。

在处理3 ~ 5中，以处理4的各项指标最优，除中下等烟比例外，产量、产值以及上等烟比例较处理3和5均达到显著性增加，增幅8.67% ~ 39.54%。

2.2　有机无机肥配施对植烟土壤根际磷库特征的影响

2.2.1　植烟土壤根际磷库特征

田间试验表明，有机无机肥配施显著提高了植烟土壤不同形态的磷组分含量（表3）。与常规施肥（处理2）相比，处理3 ~ 5的植烟根际土壤活性磷含量分别显著增加了34.75%、59.85%和50.48%（$P<0.05$），平均增幅为48.36%；中活性磷含量分别显著增加了32.71%、107.85%和60.90%（$P<0.05$），平均增幅为67.15%；稳定性磷含量分别显著增加了14.14%、21.99%和13.40%（$P<0.05$），平均增幅为16.51%；难溶性磷含量分别显著增加了10.46%、17.75%和9.16%（$P<0.05$），平均增幅为12.46%。

在处理3 ~ 5中，处理4的不同磷组分最高，其中活性磷和中活性磷含量较处理3和5均达到显著性增加，增幅6.23% ~ 56.63%。

表3　不同处理的植烟根际土壤磷库特征　（mg·kg^{-1}）

处理	活性磷	中活性磷	稳定性磷	难溶性磷
1	50.92 ± 1.45e	101.93 ± 8.44e	251.88 ± 12.76d	106.89 ± 3.26c
2	113.73 ± 2.51d	151.27 ± 3.62d	285.77 ± 1.37c	118.69 ± 5.85b
3	153.25 ± 7.02c	200.74 ± 10.90c	326.17 ± 8.60ab	131.11 ± 6.68a
4	181.80 ± 7.23a	314.42 ± 3.38a	348.61 ± 14.07a	139.77 ± 4.44a
5	171.14 ± 2.18b	243.40 ± 11.94b	324.07 ± 19.33b	129.57 ± 6.81a

2.2.2　植烟土壤根际活性磷

Hedley磷分级体系中，活性磷由Resin-Pi、$NaHCO_3$-Pi和$NaHCO_3$-Po 3种磷组分组成，是磷库中活性最强的磷，对保证作物生长发育的磷素供应有着重要作用。处理1 ~ 5的植烟土壤根际活性磷含量呈现出不同程度增加的趋势（图1），与常规施肥（处理2）相比，处理3 ~ 5的树脂磷Resin-Pi分别增加了25.06%、31.27%、54.33%，

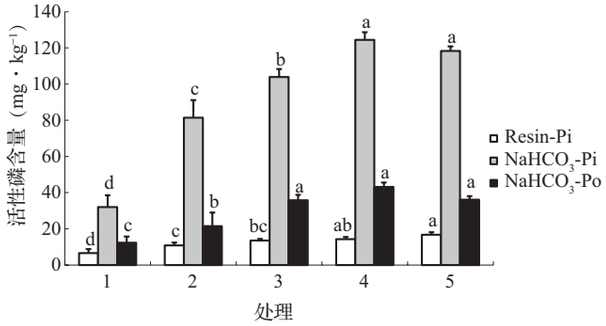

图 1　不同处理间活性磷含量

注：不同小写字母代表 3 种活性磷在不同处理之间的差异达到 0.05 显著水平。下同。

平均增幅 36.89%，处理 4 和 5 达到显著增加；活性磷 $NaHCO_3$–Pi 分别显著增加了 27.62%、52.81%、45.27%，平均增幅 41.90%；活性磷 $NaHCO_3$–Po 同样显著增加 66.74%、101.12%、68.33%，平均增幅 78.73%。

在处理 3 ~ 5 中，处理 4 的活性磷 $NaHCO_3$–Pi 和 $NaHCO_3$–Po 最高，特别是活性磷 $NaHCO_3$–Pi，较处理 3 和 5 显著平均增加了 19.74%。

2.2.3　植烟土壤根际中活性磷

Hedley 磷分级体系中，中活性磷由 NaOH–Pi、NaOH–Po 和 D.HCl–Pi 3 种磷组分组成，作为活性磷与稳定性磷互相转化的中间形态，中活性磷对维持土壤有机磷以及无机磷循环有缓冲、平衡的作用。处理 1 ~ 5 植烟土壤根际中活性磷含量呈现出不同程度增加（图 2），与常规施肥（处理 2）相比，处理 3 ~ 5 的中活性磷 NaOH–Pi 分别增加了 18.20%、46.13%、26.06%，平均增幅 30.13%，处理 4 和 5 达到显著性增幅；中活性磷 NaOH–Po 分别显著增加了 30.72%、126.67%、74.55%，平均增幅 77.31%；中活性磷 D.HCl–Pi 显著增加了 96.07%、181.35%、80.69%，平均增幅为 119.37%。

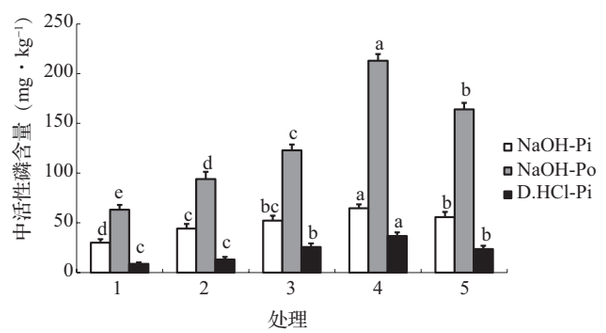

图 2　不同处理间中活性磷含量

在处理 3 ~ 5 中，处理 4 的中活性磷组分最高，较处理 3 和 5 均达到了显著性增加，增幅 15.92% ~ 73.40%。

2.2.4　植烟土壤根际稳定性磷和难溶性磷

Hedley 磷分级体系中，稳定性磷由 C.HCl–Pi 和 C.HCl–Po 两种磷组分组成，难溶性磷则为 Residual–P，主要起到了稳定土壤磷库的作用。与常规施肥（处理 2）相比，处理 3 ~ 5 的稳定性磷 C.HCl–Pi 均有不同程度的增加，增幅分别为 19.24%、7.41%、8.61%，平均增幅 11.75%，处理 3 达到显著性增幅；稳定性磷 C.HCl–Po 含量则分别增加了 4.77%、48.76%、22.20%；平均增幅 25.24%，处理 4 和 5 达到显著性增幅；难溶性磷 Residual–P 含量分别显著性增加了 10.46%、17.75%、9.16%，平均增幅 12.46%（图 3）。

处理 3 ~ 5 中，处理 4 的稳定性磷之和以及难溶性磷最高，但较处理 3 和 5 而言未达到显著性增幅。

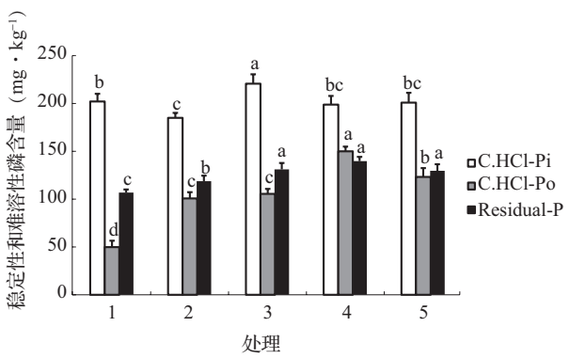

图 3　不同处理间稳定性和难溶性磷含量

2.3　磷组分对烤烟产量的相对贡献

本研究中，采用集成推进树算法，分析了不同磷形态对烤烟产量形成的单独解释量（图 4），结果表明，不同磷组分中，活性磷为首要的贡献因子，占所有因子可解释量的 68.23%，其次为中活性磷 17.56%，而稳定性和难溶性磷对烤烟产量的可解释量仅为 14.21%（图 4a）。

活性磷对烤烟产量的可解释量以树脂磷 Resin–Pi 为首要贡献因子，占所有因子可解释量的 68.70%，其次为 17.30% 的活性磷 $NaHCO_3$–Pi，而后为 14.1% 的活性磷 $NaHCO_3$–Po（图 4b）。

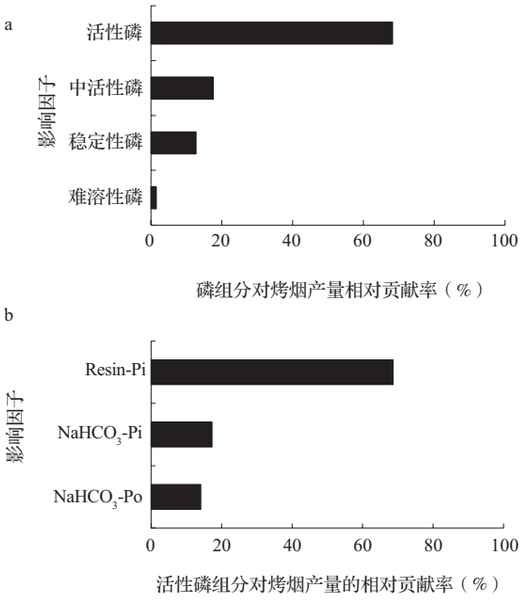

图 4　不同磷组分对烤烟产量的相对贡献

3　讨论

3.1　有机无机肥配施的烤烟产量和质量优势

国内外有大量研究表明，与施用化肥相比，有机肥和化肥联合施用，不仅能够在短期内提高作物产量，改善作物品质，同时长期施用还能提高土壤有机质含量[26-27]，获得更高的作物产量[28]，即两者的结合在一定程度上能够给作物生产力带来正向互动效应。Wei 等[29]研究了在中国 32 年的长期试验，结果表明，与单施化肥或有机肥处理相比，有机肥与化肥配施处理能够满足作物生长发育，并提高其产量及品质。就烤烟而言，已有大量研究表明，化肥减量配施不同精制有机肥和生物有机肥能够有效改善烤烟的生长发育，增加烤烟产量，提升烤烟品质，提高烤烟产值，并能够改善烤烟根际微生物代谢功能多样性，有效防控青枯病、黑胫病的发生危害程度[8，13-15]。

宋建群等[30]研究表明，在田间条件下，单季化肥减量配施生物有机肥显著提高了烟株 24.1% 氮和 15.8% 磷的累积吸收量，并提高了烟叶产值和上等烟比例，唐兴莹等[31]、赵力光等[13]、李艳红等[32]研究也表明，生物有机肥对提高烤烟产量和优质烟叶比例具有内在优势。本文通过田间小区定位试验结果表明，化肥减量配施有机肥和生物有机肥的条件下，显著增加了烤烟产量、产值、上等烟比例，增幅 16.61% ~ 116.3%，特别是处理 4，化肥减量 20% 的基础上配施生物有机肥效果最优，这可能是生物有机肥的施用改善了烤烟根际土壤的微生物群落多样性，提高了根际微生物的代谢活性，促进了土壤中养分的活化和抑病型土壤的形成，降低烤烟土传病害的发生率，同时生物有机肥与化肥配施后使植烟后土壤的养分趋于协调，烤烟的根系数量增加、活性根比例增加，促进烤烟在生产后期对大量元素的平衡吸收，增加烤烟干物质累积量，从而提高了产量和质量。

3.2　有机无机肥配施对烤烟磷库特征的调控作用

磷库的分配特征以及演变特征对于评价土壤磷素的有效性及供应状况有积极意义，目前，改进的 Hedley 磷组分划分方法包括了对植物有效程度不同的有机磷组分在内，被认为是较为合理的土壤磷素分级方法，已被越来越多的学者采用和发展。李想等[33]连续两年的盆栽试验结果表明，在磷肥施用总量相同的情况下，有机肥与化肥配施可以有效提高土壤中活性与中活性有机磷，降低闭蓄态磷含量，这主要是由于有机肥自身含有较多的微生物，施入土壤后可以促进土壤中微生物的活动与繁殖，进而将一部分化肥中的无机磷吸收，将其转化为有机磷。有机肥与化学磷肥配合施入土壤后主要以活性磷 $NaHCO_3$–Pi、中活性磷 NaOH–Pi 的组分形式存在，有机物腐解过程中产生的各类有机酸与土壤的稳定性磷化合物反应，能够有效降低土壤对磷的固定，提高施入土壤中磷肥的有效性[34]。

本研究中，化肥减量 20% 配施有机肥和生物有机肥以及化肥减量 30% 配施有机肥和生物有机肥较常规处理而言，均显著增加了土壤活性磷、中活性磷、稳定性磷以及难溶性磷的含量，平均增幅 12.46% ~ 67.15%，活性磷 $NaHCO_3$–Pi、中活性磷 D.HCl–Pi、稳定性磷 C.HCl–Po 和难溶性磷 Residual–P 平均显著增加了 41.90%、119.37%、25.24% 和 12.46%，其中以化肥减量 20% 配施生物有机肥（处理 4）的增幅最为明显，较处理 3 和处理 5 而言，不同磷形态的增幅达到了 6.23% ~ 56.63%，且产量和上等烟比例同样最高。农传江等[22]研究得出，化肥减量 20% 配施生物有机肥较化肥减量 20% 配施精制有机肥而言，连续两年的产量分别提高了 11.99% 和 9.25%，上等烟比例分别提高了 55.81% 和 24.92%，唐兴莹等[31]研究得出，上等烟比例显著增加了 33.48%，碱性磷酸酶活性显著提高了 14.71%，本研究相关结果与其表现出了很好的一致性，充分说明处理 3 中配施精制有机肥可

以部分替代化肥，维持烤烟的经济性状，处理4与处理3相比，配施生物有机肥在保障烤烟经济效益和减肥增效方面则体现出了更为明显的优越性；而处理5即化肥减量30%配施有机肥和生物有机肥的产量、上等烟比例以及磷库特征均不如处理4，这可能是由于化肥减量30%在一定程度上限制了土壤速效养分的供应，而配施的精制有机肥和生物有机肥养分释放缓慢，导致了烤烟产量和质量较处理4而言有所下降，加之处理5配施的生物有机肥用量为处理4的一半，影响了土壤微生物群落多样性、代谢活性等改善效果，使处理5相关指标较处理4而言有所降低。当下已有不少研究[8, 13-15]表明有机无机肥配施，特别是配施生物有机肥能够有效改善土壤微生物群落结构，防控土传病害，因此，后续可结合土壤微生物，特别是解磷细菌活性在土壤磷库特征变化中的作用，进一步阐明处理间差异，对更好地说明化肥减量配施有机肥和生物有机肥的产量优势和减肥增效以及揭示其养分资源高效利用和环境友好的机理有着重要意义。

另外，本文通过R语言的“gbmplus”程序包，分析了土壤磷组分对烤烟产量形成的ABT贡献率，其中以活性磷组分为首要贡献因子，占到了所有因子可解释量的68.23%，其次为17.56%的中活性磷和14.21%的稳定性、难溶性磷，活性磷中又以树脂磷Resin-Pi为首要贡献因子，占到了所有因子可解释量的68.70%，其次为17.30%的活性磷$NaHCO_3$-Pi，而后为14.1%的活性磷$NaHCO_3$-Po。充分说明了配施生物有机肥在改善土壤微生物群落多样性的同时，也可能在一定程度上促进了根区土壤磷素向根际的转运，并有效降低了土壤对磷的固定，促进了根际土壤稳定性和难溶性磷的活化和吸收，与前人研究结果表现出了一定的一致性[34]，也体现出了明显的产量优势。然而，本文仅针对烤烟采烤前期的根际土壤磷库特性进行了相关探讨，有关不同生育期以及根区土的磷库特征并未涉及，且田间定位试验尚缺少连续多年的数据支撑，因此，可以进一步探讨分析不同磷素形态在土壤中的转化以及不同生育期的动态变化，并分析其不同年际间的持续性，以期为系统阐明植烟土壤磷库特征提供翔实的数据基础。

4　结论

本研究中，化肥减量20%配施有机肥（处理3）、生物有机肥（处理4）以及化肥减量30%配施有机肥和生物有机肥（处理5）能够显著增加植烟根际土壤的不同磷组分含量，尤以处理4效果最为明显，显著增加了产量、产值以及上等烟比例，其中活性磷对产量的相对贡献达到了68.23%，以树脂磷Resin-Pi为首要贡献因子，其次为活性磷$NaHCO_3$-Pi，体现出了化肥减量配施生物有机肥明显的产量优势和减肥增效效应。

参考文献：

[1] Alewell C，Ringeval B，Ballabio C，et al. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion [J]. Nature Communications，2020，11（1）：4546.

[2] Powers S M，Bruulsema T W，Burt T P，et al. Long-term accumulation and transport of anthropogenic phosphorus in threeriver basins [J]. Nature Geoscience，2016，9（5）：353-356.

[3] Liu X，Sheng H，Jiang S Y，et al. Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2016，113（10）：2609-2614.

[4] 汪玉，袁佳慧，陈浩，等. 太湖流域典型农田土壤磷库演变特征及环境风险预测[J]. 土壤学报，2022，59（6）：1640-1649.

[5] 许琛，沈素素，何竹，等. 长期施无机磷肥对黄泥土稻田土壤磷库的影响[J]. 农业环境科学学报，2022，41（11）：2506-2514.

[6] 史静，张誉方，张乃明，等. 长期施磷对山原红壤磷库组成及有效性的影响[J]. 土壤学报，2014，51（2）：351-358.

[7] 闫金垚，郭丽璇，王昆昆，等. 长江流域稻－油轮作区土壤磷库现状及环境风险分析[J]. 土壤学报，2023，60（1）：247-257.

[8] 施河丽，向必坤，彭五星，等. 有机无机肥料配施对植烟土壤养分及细菌群落结构的影响[J]. 中国土壤与肥料，2019（4）：58-66.

[9] 穆金丽，谭钧，刘国顺，等. 腐植酸和氮肥用量及其互作对植烟土壤质量的影响[J]. 土壤，2017，49（1）：27-32.

[10] 王瑞，邓建强，谭军. 连作条件下植烟土壤保育与修复[J]. 中国烟草科学，2016，37（2）：83-88.

[11] 李青山，王德权，杜传印，等. 有机无机肥与生物炭配施对烤烟生长发育和烟叶质量的影响[J]. 土壤通报，2021，52（6）：1393-1401.

[12] 王忠平，罗应坤，张晓平，等. 不同有机－无机复合肥配施对烤烟产质量的影响[J]. 云南农业大学学报（自然科学版），2011，26（S2）：70-73.

[13] 赵力光，唐兴莹，汤利，等. 化肥减量配施生物有机肥对植烟土壤微生物群落多样性的影响及其与烤烟青枯病的关系[J]. 云南农业大学学报（自然科学版），2018，33（4）：744-750.

[14] 蔡秋华，赵正雄，左进香，等. 有机肥配施减量化肥对烤烟青枯病及其根际微生物的影响[J]. 烟草科技，2018，51（11）：20-27.

[15] 张云伟，徐智，汤利，等. 不同有机肥对烤烟根际土壤微生物的影响[J]. 应用生态学报，2013，24（9）：2551-2556.

[16] 聂庆凯，王静，孙兴广，等. 有机肥部分替代化肥对植烟土壤生化特性和烤烟品质的影响[J]. 中国烟草科学，2020，

41（4）：26–32.
[17] 马宜林，吴广海，申洪涛，等. 羊粪有机肥与化肥配施对烤烟生长及土壤肥力特性的影响[J]. 核农学报，2021，35（10）：2423–2430.
[18] 王筱滢，刘青丽，李志宏，等. 根区内不同空间施肥对植烟土壤有效磷及烤烟磷积累影响[J]. 西南农业学报，2018，31（12）：2598–2603.
[19] 张晓花，王克勤，宋娅丽，等. 有机肥施用量对滇中烤烟农田生态系统氮磷平衡的影响[J]. 水体保持研究，2020，27（6）：28–36.
[20] 吴杉，王克勤，宋娅丽，等. 秸秆堆沤还田对红壤烤烟农田生态系统磷素盈亏的影响[J]. 南方农业学报，2022，53（6）：1595–1603.
[21] 苟小梅，曾兴鑫，张毅，等. 烤烟油菜轮作与施肥对植烟土壤磷素含量及有效性的影响[J]. 四川农业大学学报，2019，37（4）：452–458.
[22] 农传江，汤利，徐智，等. 有机肥部分替代化肥对土壤有机碳库和烤烟经济性状的影响[J]. 中国土壤与肥料，2016（4）：70–75.
[23] Liao D，Zhang C，Li H，et al. Changes in soil phosphorus fractions following sole cropped and intercropped maize and faba bean grown on calcareous soil[J]. Plant Soil，2020，448：587–601.
[24] Hedley M J，White R E，Nye P H. Plant–induced changes in the rhizosphere of rape（*Brassica napus* var. emerald）seedlings[J]. New Phytologist，1982，91：45–56.
[25] Hedley M J，Stewart J W B，Chauhan B S. Changes ininorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. Soil Science Society of America Journal，1982，46：970–976.
[26] Dawe D，Dobermann A，Ladha J K，et al. Do organic amendments improve yield trends and profitability in intensive rice systems[J]. Field Crops Research. 2003，83，191–213.
[27] Zhang F S，Cui Z，Chen X，et al. Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China[J]. In：Sparks，D. L.（Ed.），Advances in Agronomy，2012，116：1–40.
[28] Zhao B，Li X Y，Li X P，et al. Long–term fertilizer experiment network in China：crop yields and soil nutrient trends[J]. Agronomy Journal，2010，102：216–230.
[29] Wei L W，Yan Y，Cao J，et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter：An integrated analysis of long–term experiments[J]. Agriculture，Ecosystems and Environment. 2016，225：86–92.
[30] 宋建群，徐智，汤利，等. 不同有机肥对烤烟养分吸收及化肥利用率的影响[J]. 云南农业大学学报（自然科学版），2015，30（3）：471–476.
[31] 唐兴莹，洪杨，赵力光，等. 连续有机无机配施对植烟土壤归一化酶活性的影响[J]. 云南农业大学学报（自然科学版），2019，34（1）：152–159.
[32] 李艳红，徐智，汤利，等. 化肥减量配施生物有机肥对烤烟青枯病及其病原菌的影响[J]. 云南农业大学学报，2015，30（4）：612–617.
[33] 李想，刘艳霞，刘益仁，等. 无机有机肥磷配施对作物产量及土壤磷形态的影响[J]. 土壤，2013，45（4）：641–647.
[34] Saleque M A，Naher U A，Islam A，et al. Inorganic and organic phosphorus fertilizer effects on the phosphorus fractionation in wetland rice soils[J]. Soil Science Society of America Journal，2004，68（5）：1635–1644.

Characteristics of phosphorus pool in rhizosphere of flue-cured tobacco and its response to combined application of organic and inorganic fertilizer

LI Man，WU Run-juan，YAN Mao-heng，XIE Wen-ying，SONG Zhi-jiao，REN Jia-bing*（College of Resources and Environmental Science，Baoshan University，Baoshan Yunnan 678000）

Abstract：In order to comprehensively analyze the characteristics of phosphorus pool in rhizosphere soil of flue-cured tobacco and its response to combined application of organic and inorganic fertilizers，this paper analyzed the differences of flue-cured tobacco yield，output value，proportion of different grades of flue-cured tobacco and phosphorus pool characteristics through field experiments. The results showed that the organic combined application of organic and inorganic fertilizers significantly increased the yield and output value of flue-cured tobacco，the proportion of superior tobacco and the content of different forms of phosphorus components. Compared with the conventional fertilization（treatment 2），the yield，output value and the proportion of high-grade tobacco significantly increased by 30.00%，59.57% and 82.42% on average，respectively，with 20% reduction of chemical fertilizer combined with organic fertilizer（treatment 3），biological organic fertilizer（treatment 4）and 30% reduction of chemical fertilizer combined with organic fertilizer and biological organic fertilizer（treatment 5），while the contents of labile P，moderately labile P，sparingly and non-labile P significantly increased by 48.36%，67.15%，16.51% and 12.46% on average，respectively. The form of phosphorus components which most contributed to the tobacco yield was labile P，accounting for 68.23% of all phosphorus components，with Resin-Pi as the primary contribution factor，accounting for 68.70% of labile P components，followed by 17.30% of $NaHCO_3$-Pi and 14.10% of $NaHCO_3$-Po. What's more，treatment 4 showed the highest content of each phosphorus component，which significantly increased the yield，output value and high grade leaves of flue-cured tobacco，while significantly reduced the middle and low grade leaves，reflecting the obvious yield advantage and weight loss and synergistic effect of chemical fertilizer reduction combined with bio-organic fertilizer.

Key words：organic-inorganic combined application；tobacco；rhizosphere；characteristics of phosphorus pool