

酒糟有机无机复混肥对酒用高粱产量、品质、养分吸收及利用的影响

徐浩¹ 魏全全² 谭洪伟¹ 苟久兰² 冉雪松¹
张萌² 宋南伶¹ 柳玲玲² 顾小凤² 吕锡斌¹

(¹贵州茅台酒厂(集团)循环经济产业投资开发有限公司, 563100, 贵州遵义; ²贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 550006, 贵州贵阳)

摘要 于2022-2023年连续2年在贵州省遵义市开展大田定位试验, 设不施肥(T1), 农民习惯施肥、基施普通复合肥900 kg/hm²、穗期追施纯氮45 kg/hm²(T2), 基施I型肥料1800 kg/hm²、不追肥(T3), 基施II型肥料3000 kg/hm²、不追肥(T4)和基施III型肥料1500 kg/hm²、穗期追施纯氮90 kg/hm²(T5)5个处理, 研究不同酒糟有机无机复混肥对高粱产量、品质、养分吸收及利用的影响。结果表明, 与T2处理相比, T3、T4和T5处理高粱产量平均分别提高76.57、107.57和164.66 kg/hm², 总生物量平均分别提高328.40、358.98和463.54 kg/hm²。T3~T5处理高粱支链淀粉含量较T2处理平均增加1.13%~7.02%, 单宁含量增加1.63%~4.35%。与T2处理相比, T3、T4和T5处理氮素累积量平均分别提高7.27、6.22和9.07 kg/hm², 磷素累积量平均分别提高1.27、1.72和2.47 kg/hm², 钾素累积量平均分别提高13.35、12.38和9.15 kg/hm²。高粱收获后, T3、T4和T5处理均能维持或提高土壤养分含量。经济效益方面, T5处理的2年平均净收益为45 189.7元/hm², 产投比为2.679, 高于T2、T3和T4处理。综上, 采用一次性基施I型、II型和基施III型+穗期追氮肥施肥方式的高粱产量、养分吸收利用均优于农民习惯施肥, 建议当劳动力不足时, 优先选择前者, 当劳动力充足时, 可选择后者。

关键词 酒糟有机无机复混肥; 高粱; 产量; 品质; 养分吸收及利用

高粱是贵州白酒主产区的主要种植作物, 近年来, 随着贵州白酒产业产能的增加, 高粱种植面积逐年扩大^[1-2]。但长期以来, 因过度追求产量与经济效益, 当前生产中存在单一且大量施用化肥的现象, “重化肥轻有机肥”问题愈发严重, 这不仅会导致高粱产量和品质的降低, 同时还会导致农田土壤板结和养分失衡等生态问题, 在一定程度上已威胁到贵州高粱产业可持续发展。

酒糟是高粱酿酒后的最大副产物, 随着贵州白酒产业产能的增加, 酒糟产生量也逐年增加^[3]。酒糟中氮含量丰富, 最高可达39.0 g/kg, 是一种较好的高氮源大宗废弃资源, 其发酵产物可作为重要的有机肥源^[4]替代部分化肥, 这契合我国化肥“零增长”的行动和理念^[5-6], 同时实现酒糟“从土里来, 到土里去”的生态循环目标。目前, 酒糟的利用方式呈现多样化。将酒糟炭化后可以提高土壤氮素养分, 改变土壤细菌群落结构和多样

性, 提高土壤氮素有效性, 减少铵态氮、有效磷和速效钾的淋失^[7-8], 但酒糟生物炭制作成本较高; 将酒糟和窖泥发酵后添加辅料(草炭、珍珠岩和蛭石)能调节育苗机制的理化性质, 有利于高粱出苗^[9], 但酒糟消耗量相对较少; 将发酵的酒糟有机肥单独施用于高粱和茶叶, 虽能满足高粱和茶叶生长所需的养分, 但用量太大^[10-11], 劳动力成本增加, 不利于实际操作; 将酒糟有机肥与化肥配施, 可提高油菜和高粱产量^[12], 且酒糟消耗量满足产业需求, 但酒糟有机肥和化肥为分次施用, 不能解决一次施用的问题。前人关于酒糟利用方式的研究很多, 取得了较好的应用结果。将酒糟有机肥与无机化肥配合制备成有机无机复混肥可以解决上述问题, 但其研究鲜有报道, 尤其运用于高粱上的研究更是未见报道。

因此, 本研究针对利用酒糟发酵物自主研发制备成的不同养分类型酒糟有机无机复混肥开展

作者简介: 徐浩, 主要从事酿酒废弃物的资源化利用研究, E-mail: 2594775535@qq.com

吕锡斌为通信作者, 主要从事酿酒废弃物的资源化利用研究, E-mail: gzmtxhct@163.com

基金项目: 贵州省土壤肥料研究所成果转化技术服务项目(XHFW2022085, XHFW2022060)

收稿日期: 2024-09-14; 修回日期: 2024-12-05; 网络出版日期: 2025-01-07

大田试验，探讨该肥料对高粱产量、品质、养分吸收及利用的影响，旨在为进一步利用贵州酒糟资源及其在高粱主产区生产上的高效利用提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况与材料

试验分别于 2022 年和 2023 年 5-10 月在贵州省遵义市播州区新民镇进行，连续开展 2 年的田间定位试验。试验田块土壤为黄壤旱地，基本理化性状：pH 5.04、有机质 45.7 g/kg、全氮 2.30 g/kg、有效磷 28.2 mg/kg、速效钾 168.9 mg/kg。

供试高粱品种为红缨子。供试肥料为 3 种自主研发的酒糟有机无机复混肥：I 型有机无机复混肥，酒糟有机肥 484.2 g/kg，总 N:P₂O₅:K₂O=10%:8%:8%，有机质含量 34.2%，每 100 kg 需尿素 17.39 kg、磷酸一铵 18.19 kg、硫酸钾 16.00 kg、

酒糟有机肥 48.42 kg；II 型有机无机复混肥，总 N:P₂O₅:K₂O=6%:5%:5%，酒糟有机肥 680.3 g/kg，有机质含量 39.4%，每 100 kg 需尿素 10.33 kg、磷酸一铵 11.37 kg、硫酸钾 10.00 kg、酒糟有机肥 68.30 kg；III 型有机无机复混肥，酒糟有机肥 496.6 g/kg，总 N:P₂O₅:K₂O=6%:10%:10%，有机质含量 33.7%，每 100 kg 需尿素 7.61 kg、磷酸一铵 20.46 kg、硫酸钾 20.00 kg、酒糟有机肥 49.66 kg。普通复合肥（N:P₂O₅:K₂O=15%:15%:15%）、尿素（含 N 46%）。

1.2 试验设计

试验共设 5 个处理，各处理具体肥料施用量如表 1 所示。试验小区面积均为 24.5 m²（长 7 m×宽 3.5 m），3 次重复，随机区组排列，每小区 5 行，每行 26 窝，每窝 2 株，密度 10.61×10⁵ 株/hm²。试验的其他田间生产管理均采用农业技术推广部门的推荐技术。

表 1 不同施肥处理的肥料施用量
Table 1 The amount of fertilizer applied under different fertilization treatments kg/hm²

处理 Treatment	肥料 Fertilizer	总养分投入量 Total nutrient input		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T1	不施肥	0	0	0
T2	农民习惯施肥，基施普通复合肥 900 kg/hm ² ，穗期追纯氮 45 kg/hm ²	180	135	135
T3	基施 I 型肥料 1800 kg/hm ² ，不追肥	180	144	144
T4	基施 II 型肥料 3000 kg/hm ² ，不追肥	180	150	150
T5	基施 III 型肥料 1500 kg/hm ² ，穗期追纯氮 90 kg/hm ²	180	150	150

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤养分 试验前在整个田块按照“S”形取样法采集 0~20 cm 的土壤样品，并于收获期在每个小区采集 0~20 cm 的土壤样品，采用 pH 计法测定 pH，采用重铬酸钾容量法测定有机质含量，采用开氏定氮法测定全氮含量，采用钼锑抗比色法测定有效磷含量，采用火焰光度法测定速效钾含量^[13]。

1.3.2 生物量 于高粱成熟期，每小区选取生长状况一致且具有代表性的植株 10 株，将其分为茎叶和籽粒 2 部分，分别于 105 °C 下杀青 30 min，60 °C 烘箱中烘至恒重，记录干重，依次折算地上部生物量。

1.3.3 农艺性状 高粱收获时，每小区选取长势一致且具有代表性的高粱植株 6 株，测定株高、

茎粗、穗长和千粒重等农艺性状。株高为高粱根茎部到穗顶部之间的距离；茎粗为高粱距离地面第一节中部节间的直径；穗长为穗茎节处到穗顶部之间的距离；千粒重为随机 1000 粒高粱的重量。

1.3.4 单宁和支链淀粉 取部分磨碎过筛的高粱籽粒样品用于测定品质指标单宁和支链淀粉，采用薄层色谱法测定单宁含量（占籽粒百分比），采用分光光度法测定支链淀粉含量（占籽粒百分比）^[14-16]。

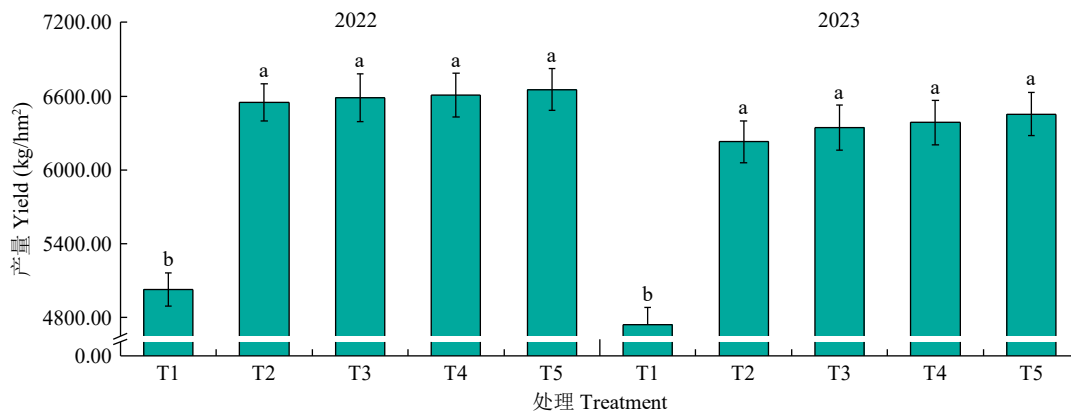
1.3.5 氮、磷、钾积累量 在高粱收获前，每个小区随机采集 6 株相对长势一致的高粱植株，用于分析植株养分指标。将高粱植株分为茎叶和籽粒 2 部分，分别于 105 °C 杀青 30 min 后，于 60 °C 恒温烘干称量，然后将植物样品磨碎过筛后，采用 H₂SO₄-H₂O₂ 联合消煮，采用凯氏定氮法测定全

氮含量、钼锱抗比色法测定全磷含量、火焰光度法测定全钾含量,并计算植株氮、磷和钾素积累量^[13]。氮素表观利用率(%)=高粱氮素总吸收量/施氮量×100;氮素农学效率(kg/kg)=(施氮区产量-对照区产量)/施氮量,同理,计算磷素和钾素表观利用率和农学效率^[17-19]。

1.3.6 产量 于高粱收获时,各个小区高粱实收实打。高粱风干至恒重,并折合每公顷产量。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2010 及 DPS 数据处理系统进行数据处理与分析,利用最小显著差异法(LSD)进行方差分析,采用 Origin 8.0 软件制图。



不同的小写字母表示达到 $P < 0.05$ 的差异显著水平。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level. The same below.

图 1 不同处理高粱产量
Fig.1 Yield of sorghum of different treatments

2.2 不同处理对高粱生物量的影响

由表 2 可知,与 T1 处理相比,施肥处理的高粱总生物量平均增加了 3251.89~3715.43 kg/hm²,增幅为 29.33%~33.51%,各处理 2 年籽粒和茎叶生物量均显著高于 T1 处理。T3、T4 和 T5 处理的 2

2 结果与分析

2.1 不同处理对高粱产量的影响

由图 1 可知,与 T1 处理相比,各施肥处理的高粱平均产量显著提高了 1504.27~1668.93 kg/hm²,增幅为 30.79%~34.16%,各处理高粱 2 年产量均显著高于 T1 处理。T3、T4 和 T5 处理的高粱 2 年平均产量分别为 6466.45、6497.45 和 6554.54 kg/hm²,较 T2 处理分别提高 76.57、107.57 和 164.66 kg/hm²,增幅分别为 1.20%、1.68%和 2.58%,除 T1 处理外,各处理高粱产量 2 年差异均不显著。可见,3 个有机无机复混肥与常规施肥相比,更能促进作物对养分的吸收,从而提高高粱产量。

年高粱总生物量平均分别为 14 666.62、14 697.20 和 14 801.76 kg/hm²,较 T2 处理分别增加了 328.40、358.98 和 463.54 kg/hm²,增幅分别为 2.29%、2.50%和 3.23%,除 T1 处理外,各处理间籽粒和茎叶生物量 2 年差异均不显著。

表 2 不同施肥处理的高粱生物量
Table 2 Biomass of sorghum of different treatments

处理 Treatment	籽粒生物量 Grain biomass			茎叶生物量 Stem and leaf biomass			总生物量 Total biomass		
	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean
T1	5029.50±134.40b	4741.72±139.80b	4885.61	6319.50±281.40b	6081.94±163.95b	6200.72	11 349.00	10 823.67	11 086.33
T2	6549.00±149.70a	6230.75±169.95a	6389.88	8128.50±266.55a	7768.18±298.20a	7948.34	14 677.50	13 998.93	14 338.22
T3	6588.00±191.85a	6344.89±185.10a	6466.45	8269.50±228.30a	8130.85±270.30a	8200.17	14 857.50	14 475.74	14 666.62
T4	6609.00±175.55a	6385.90±179.70a	6497.45	8356.50±292.80a	8043.00±255.00a	8199.75	14 965.50	14 428.90	14 697.20
T5	6654.00±169.95a	6455.08±173.85a	6554.54	8407.50±280.65a	8086.95±299.85a	8247.22	15 061.50	14 542.03	14 801.76

不同的小写字母表示达到 $P < 0.05$ 的差异显著水平。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level. The same below.

2.3 不同处理对高粱农艺性状的影响

由表 3 可知，从株高结果看，与 T1 处理相比，各施肥处理的高粱株高平均增加了 0.09~0.15 m，增幅为 3.66%~6.09%，各处理株高 2 年均显著高于 T1 处理；与 T2 处理相比，T3、T4 和 T5 处理的高粱株高分别平均增加了 0.04、0.06 和 0.07 m，增幅分别为 1.57%、2.35%和 2.75%，其中 T5 处理的高粱平均株高最高，达到 2.61 m，高于其他处理，除 T1 处理外，各处理间 2 年株高均差异不显著。从茎粗结果看，与 T1 处理相比，施肥处理的高粱平均茎粗增加了 1.77~2.83 mm，增幅为 13.30%~21.28%，各处理 2 年均显著高于 T1 处理，以 T5 处理的平均茎粗最大，为 16.13 mm，高于其他处理，除 T1 处理外，各处理间茎粗 2 年均差异不显著。从穗长结果来看，与 T1 处理相比，

施肥处理的高粱平均穗长增加了 1.67~2.55 cm，增幅为 5.14%~7.84%，各处理间穗长 2 年均显著高于 T1 处理；与 T2 处理相比，T3、T4 和 T5 处理的高粱平均穗长增加了 0.67、0.54 和 0.88 cm，增幅分别为 1.96%、1.58%和 2.57%，其中 T5 处理的高粱平均穗长为 35.06 cm，高于其他处理，除 T1 处理外，各处理间穗长 2 年均差异不显著。从千粒重结果看，与 T1 处理相比，施肥处理的高粱平均千粒重增加了 2.51~3.55 g，增幅为 13.60%~19.23%，各处理 2 年均显著高于 T1 处理；与 T2 处理相比，T3、T4 和 T5 处理的高粱平均千粒重分别增加了 0.80、0.56 和 1.04 g，增幅分别为 3.81%、2.67%和 4.96%，其中 T5 处理的高粱平均千粒重最大，为 22.01 g，高于其他处理，除 T1 处理外，各处理间千粒重 2 年均差异不显著。

表 3 不同施肥处理的高粱农艺性状
Table 3 Agronomic traits of sorghum of different treatments

处理 Treatment	株高 Plant height (m)			茎粗 Stem diameter (mm)			穗长 Panicle length (cm)			千粒重 1000-grain weight (g)		
	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean
T1	2.55±0.13b	2.37±0.11b	2.46	14.17±0.53b	12.43±0.23b	13.30	33.00±1.42b	32.02±1.43b	32.51	19.90±0.44b	17.01±0.43b	18.46
T2	2.65±0.15a	2.44±0.13a	2.55	15.60±0.45a	14.53±0.34a	15.07	34.44±1.62a	33.92±1.34a	34.18	23.20±0.54a	18.73±0.34a	20.97
T3	2.67±0.17a	2.51±0.12a	2.59	15.60±0.56a	15.03±0.29a	15.32	34.89±1.43a	34.81±1.28a	34.85	24.50±0.51a	19.05±0.37a	21.77
T4	2.72±0.15a	2.48±0.13a	2.60	16.97±0.62a	15.17±0.27a	16.07	34.78±1.42a	34.67±1.42a	34.72	24.30±0.37a	18.77±0.33a	21.53
T5	2.69±0.19a	2.54±0.12a	2.61	16.88±0.51a	15.39±0.23a	16.13	35.11±1.28a	35.01±1.33a	35.06	24.80±0.67a	19.21±0.26a	22.01

2.4 不同处理对高粱品质的影响

由表 4 可知，施用酒糟有机无机复混肥对高粱籽粒品质产生了影响。从支链淀粉含量看，与 T1 处理相比，施肥处理的高粱支链淀粉含量平均增加了 3.12%~10.36%，T4 和 T5 处理 2 年均显著高于 T1 处理；与 T2 处理相比，不同有机无机复混肥处理的高粱支链淀粉含量平均增加了 1.13%~

7.02%，各处理 2 年均差异不显著。从单宁含量看，与 T1 处理相比，施肥处理的高粱单宁含量分别平均增加了 3.95%~8.47%，2022 年 T4 和 T5 处理显著高于 T1 处理，2023 年各处理差异不显著；与 T2 处理相比，T3、T4 和 T5 处理的高粱单宁含量分别平均增加了 1.63%、3.80%和 4.35%，各处理 2 年差异均不显著。

表 4 不同施肥处理的高粱品质
Table 4 Quality of sorghum of different treatments

处理 Treatment	支链淀粉含量 Amylopectin content			单宁含量 Tannin content		
	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean
T1	51.91±1.27b	51.14±1.25b	51.53	1.79±0.05b	1.73±0.06a	1.77
T2	53.52±1.36ab	52.75±1.37ab	53.14	1.86±0.06ab	1.81±0.07a	1.84
T3	54.14±1.54ab	53.33±1.49ab	53.74	1.90±0.08ab	1.83±0.09a	1.87
T4	56.05±1.51a	55.76±1.39a	55.91	1.93±0.06a	1.89±0.10a	1.91
T5	57.07±1.40a	56.67±1.34a	56.87	1.95±0.07a	1.88±0.10a	1.92

2.5 不同处理对高粱氮、磷、钾养分积累量的影响

图 2 显示了不同施肥处理的高粱氮、磷、钾养

分情况。从氮素积累量看，与 T2 处理相比，T3、T4 和 T5 处理的氮素积累量平均分别提高了 7.27、

6.22 和 9.07 kg/hm², 增幅分别为 5.03%、4.31% 和 6.28%, T5 处理的氮素积累量最高, 平均为 153.60 kg/hm², 2022 年各施肥处理间差异不显著, 2023 年 T3~T5 处理显著高于 T2 处理。从磷素积累量看, 与 T2 处理相比, T3、T4 和 T5 处理的磷素积累量平均分别提高了 1.27、1.72 和 2.47 kg/hm², 增幅分别为 4.00%、5.41% 和 7.76%, T5 处理的磷素积累量最高, 平均为 34.35 kg/hm²,

2022 年各施肥处理间差异不显著, 2023 年 T5 处理显著高于 T2 处理。从钾素积累量看, 与 T2 处理相比, T3、T4 和 T5 处理的钾素积累量平均分别提高了 13.35、12.38 和 9.15 kg/hm², 增幅分别为 7.44%、6.89% 和 5.10%, 以 T3 处理的钾素积累量最高, 平均为 192.90 kg/hm², 2022 年 T3、T5 处理与 T2 处理差异显著, 2023 年 T3~T5 处理显著高于 T2 处理。

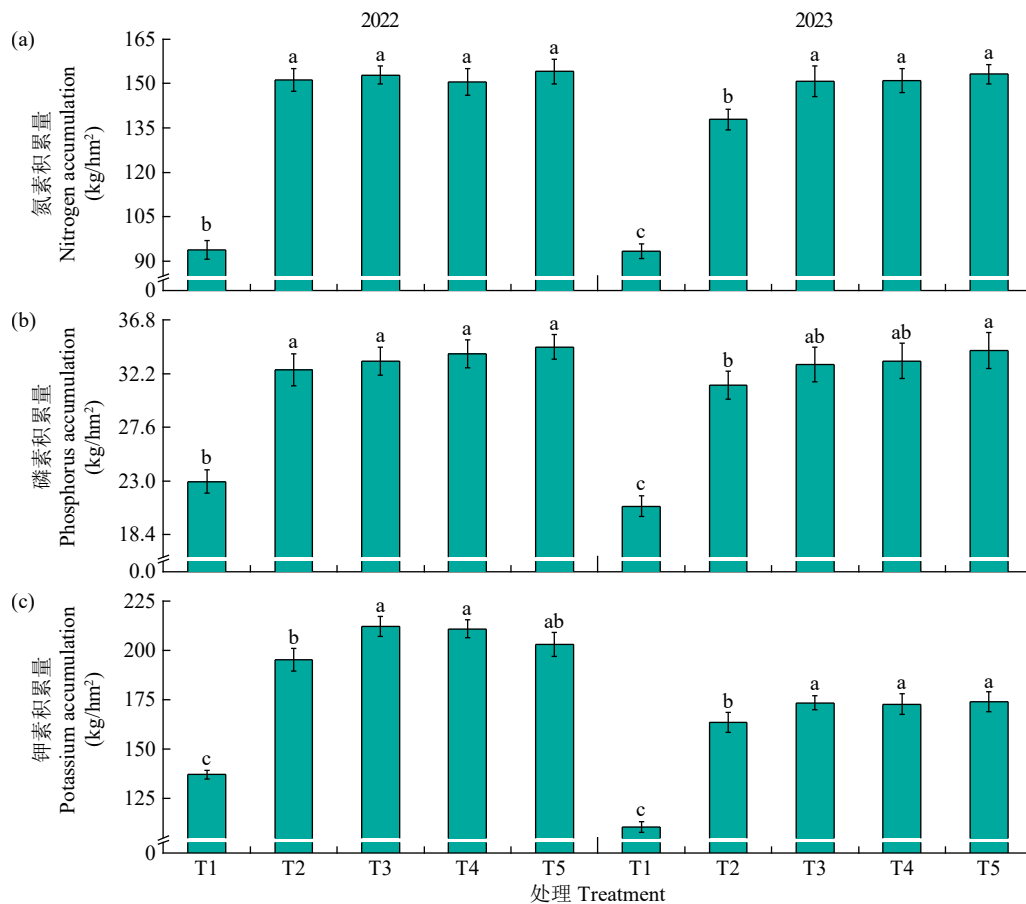


图 2 不同施肥处理对高粱氮、磷、钾养分积累量的影响

Fig.2 Effects of different fertilization treatments on nitrogen, phosphorus, and potassium nutrient accumulation in sorghum

2.6 不同处理对高粱肥料利用率的影响

表 5 显示了不同施肥处理的肥料利用率情况。从表观利用率看, 与 T2 处理相比, T3~T5 处理的氮肥表观利用率分别平均提高了 16.32%~22.14%, 其中 T5 处理的平均氮肥表观利用率达到 33.38%, 2022 年 T3 和 T5 处理显著高于 T2 处理, 2023 年各处理均显著高于 T2 处理; 与 T2 处理相比, T3、T4 和 T5 处理的平均磷肥表观利用率分别提高了 5.72%、6.13% 和 12.40%, 其中 T5 处理的平均磷肥表观利用率最大, 为 8.25%, T5 处理 2 年均显

著高于 T2 处理; 与 T2 处理相比, T3、T4 和 T5 处理的平均钾肥表观利用率分别提高了 16.36%、10.12% 和 4.85%, 其中 T3 处理的平均钾肥表观利用率最高, 为 47.95%, 2022 年 T4 处理显著高于 T2 处理, 2023 年各处理显著高于 T2 处理。

从肥料农学效率看, 与 T2 处理相比, T3~T5 处理的氮肥农学效率分别平均提高了 0.73~1.23 kg/kg, 其中 T5 处理的平均氮肥农学效率达到了 9.28 kg/kg, 高于其他处理 0.33~1.23 kg/kg, 各处理 2 年均显著高于 T2 处理; 与 T2 处理相比, T3、

表 5 不同施肥处理的高粱肥料利用率
Table 5 Fertilizer utilization rate of sorghum of different treatments

处理 Treatment	表观利用率 Appearance utilization rate (%)								
	氮 Nitrogen			磷 Phosphorus			钾 Potassium		
	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean
T1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
T2	30.76±1.58b	23.89±1.76b	27.33	7.09±0.49b	7.60±0.29c	7.34	43.11±1.56b	39.32±1.90b	41.21
T3	32.83±1.33a	31.90±2.14a	32.37	7.14±0.42ab	8.39±0.44b	7.76	43.81±1.74b	43.81±1.85a	47.95
T4	31.58±1.71ab	32.00±1.88a	31.79	7.26±0.35ab	8.32±0.27b	7.79	49.20±2.11a	41.55±1.95a	45.38
T5	33.50±1.34a	33.26±1.30a	33.38	7.61±0.31a	8.90±0.34a	8.25	44.00±2.03b	42.43±1.95a	43.21

处理 Treatment	农学效率 Agricultural efficiency (kg/kg)								
	氮 Nitrogen			磷 Phosphorus			钾 Potassium		
	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean
T1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
T2	8.14±0.22c	7.97±0.19c	8.05	11.26±0.34a	11.03±0.25a	11.14	11.26±0.34a	11.03±0.25a	11.14
T3	8.66±0.15b	8.91±0.15b	8.78	10.82±0.29a	11.13±0.30a	10.98	10.82±0.29a	11.13±0.30a	10.98
T4	8.78±0.29b	9.13±0.37ab	8.95	10.53±0.40a	10.96±0.33a	10.75	10.53±0.40a	10.96±0.33a	10.75
T5	9.03±0.38a	9.52±0.39a	9.28	10.83±0.36a	11.42±0.32a	11.13	10.83±0.36a	11.42±0.32a	11.13

T4 和 T5 处理的磷肥农学效率分别平均降低了 0.16、0.39 和 0.01 kg/kg，其中 T5 处理高于 T3 和 T4 处理，各处理 2 年均差异不显著；与 T2 处理相比，T3、T4 和 T5 处理的钾肥农学效率分别平均降低了 0.16、0.39 和 0.01 kg/kg，其中 T5 处理高于 T3 和 T4 处理，各处理 2 年差异均不显著。

2.7 不同处理对土壤肥力的影响

高粱收获后，各处理土壤肥力变化不同（表 6）。pH 方面，土壤 pH 呈现升高的趋势，各处理 pH 平均较 T1 处理分别提升 0.13~0.23；与 T2 处理相比，各处理土壤 pH 均有降低的趋势，各处理 2 年差异均不显著。有机质方面，各处理有机质较

T1 处理平均增加 1.39~3.18 g/kg；与 T2 处理相比，T3、T4 和 T5 处理的有机质均有增加的趋势，平均增加 0.92~1.79 g/kg，除 T1 处理外，各处理 2 年差异均不显著。全氮方面，各处理全氮较 T1 处理平均增加 0.08~0.21 g/kg；与 T2 处理相比，T3、T4 和 T5 处理的全氮均有增加的趋势，平均增加 0.09~0.13 g/kg，除 T1 处理外，各处理 2 年差异均不显著。有效磷方面，各处理有效磷较 T1 处理平均增加 24.00~37.37 mg/kg，各处理 2 年均显著高于 T1 处理；与 T2 处理相比，T3、T4 和 T5 处理有效磷积累量均有增加的趋势，平均增加 6.42~13.37 mg/kg，除 T1 处理外，2022 年各处理显著

表 6 不同施肥处理的土壤肥力状况
Table 6 Soil fertility status of different treatments

处理 Treatment	pH			有机质 Organic matter (g/kg)			全氮 Total nitrogen (g/kg)		
	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean
T1	5.03±0.10a	5.04±0.13a	5.04	45.50±1.33b	43.80±1.11b	44.65	1.95±0.05b	1.90±0.05b	1.93
T2	5.17±0.13a	5.36±0.10a	5.27	46.90±1.08ab	45.17±1.15a	46.04	2.04±0.07ab	1.97±0.08ab	2.01
T3	5.09±0.11a	5.29±0.20a	5.19	47.30±1.19ab	46.61±1.27a	46.96	2.10±0.04a	2.10±0.10a	2.10
T4	5.15±0.12a	5.18±0.18a	5.17	49.00±1.32a	46.66±1.29a	47.83	2.14±0.05a	2.10±0.09a	2.12
T5	5.15±0.20a	5.19±0.13a	5.17	48.30±1.35a	46.54±1.51a	47.42	2.16±0.04a	2.11±0.04a	2.14

处理 Treatment	有效磷 Available phosphorus (mg/kg)			速效钾 Available potassium (mg/kg)		
	2022	2023	均值 Mean	2022	2023	均值 Mean
T1	54.90±2.51d	49.33±2.57c	52.12	181.30±4.55c	141.26±3.43c	161.28
T2	70.00±2.16c	82.23±3.11a	76.12	335.40±5.70b	286.48±5.78b	310.94
T3	94.20±3.24a	82.93±2.89a	88.57	339.70±5.08b	289.78±6.52b	314.74
T4	85.30±3.33b	79.77±3.01b	82.54	374.80±5.99a	304.51±6.47a	339.66
T5	95.80±3.59a	83.18±3.10a	89.49	381.60±6.15a	285.48±6.67b	333.54

高于 T2 处理, 2023 年 T3 和 T5 处理与 T2 处理差异不显著。速效钾方面, 各处理速效钾较 T1 处理平均增加 149.66~178.38 mg/kg, 各处理 2 年均显著高于 T1 处理; 与 T2 处理相比, T3、T4 和 T5 处理积累量均有增加的趋势, 平均增加 3.80~28.72 mg/kg, 除 T1 处理外, 2022 年 T4 和 T5 处理显著高于 T2 处理, 2023 年 T4 处理显著高于 T2 处理。研究结果表明, I 型、II 型和 III 型有机无机复混肥能维持或提高土壤养分含量, 维持土壤地力。

2.8 不同处理对高粱经济效益的影响

由表 7 可知, 不同处理的高粱经济效益不同。产值方面, 2 年平均产值以 T5 处理最高, 为 72 099.5 元/hm², 高于其他处理 627.0~18 687.9 元/hm²。总成本方面, 由于不同肥料制造成本以及后期追肥成本不同, 导致总成本不同, 2 年平均成本以 T2 处理最高, 为 28 584.8 元/hm², 高于其他处理 414.8~5784.8 元/hm²。净收益方面, T5 处理 2 年平均净收益为 45 189.7 元/hm², 高于其他处理 1002.9~14 578.1 元/hm²。产投比方面,

表 7 不同施肥处理的高粱经济效益
Table 7 Economic benefits of sorghum of different treatments

处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm ²)	产值 Output value	成本 Cost					净收益 Net benefit	产投比 Output/ input ratio
			种子 Seed	肥料 Fertilizer	农药 Pesticide	其他 Others	合计 Total		
T1	4855.6	53 411.6	450.0	0.0	600.0	21 750.0	22 800.0	30 611.6	2.343
T2	6389.9	70 288.9	450.0	4284.8	600.0	23 250.0	285 84.8	41 704.1	2.459
T3	6466.4	71 130.4	450.0	4143.6	600.0	21 750.0	26 943.6	44 186.8	2.640
T4	6497.5	71 472.5	450.0	5370.0	600.0	21 750.0	28 170.0	43 302.5	2.537
T5	6554.5	72 099.5	450.0	2609.8	600.0	23 250.0	26 909.8	45 189.7	2.679

产值=产量×单价; 净收益=高粱总产值-成本总投入。2022~2023 年高粱平均收购单价为 11.0 元/kg, 复合肥 4.5 元/kg, 尿素 2.4 元/kg, 磷酸一铵 3.8 元/kg, 硫酸钾 3.6 元/kg, 酒糟有机肥 0.562 元/kg, I 型 2.302 元/kg, II 型 1.790 元/kg, III 型 2.378 元/kg, 种子 15.0 元/kg, 其他成本主要包括机械整地、人工育苗移栽、追肥、打药和收获。

Output value = yield × price; Net benefit = total output value of sorghum - total cost. From 2022 to 2023, the average purchase price of sorghum was 11.0 yuan/kg, compound fertilizer was 4.5 yuan/kg, urea was 2.4 yuan/kg, monopotassium phosphate was 3.8 yuan/kg, potassium sulfate was 3.6 yuan/kg, organic fertilizer from distiller's grains was 0.562 yuan/kg, type I was 2.302 yuan/kg, type II was 1.790 yuan/kg, type III was 2.378 yuan/kg, and seed was 15.0 yuan/kg. Other costs include mechanical land preparation and artificial seedling transplanting, topdressing, spray insecticide and harvesting.

由于不同处理高粱产值和总成本不同, 导致不同处理产投比不同, T5 处理 2 年平均产投比为 2.679, 高于其他处理 0.039~0.336。

3 讨论

有机无机复混肥同时具有无机肥和有机肥的特点, 既具备无机肥的速效特性, 又具备有机肥的缓效特性, 能够表现出正交互作用, 对改良土壤结构与肥力^[20-21]、保障作物产量与品质^[22-23]以及促进农业废弃物综合利用^[3-4]均发挥着重要作用。市售的肥料多以单质化肥和复合肥为主, 虽然肥料养分释放快, 但其肥效不能满足作物整个生育期养分需求, 且大量施用化肥会造成导致农田土壤板结和养分失衡等生态问题。酒糟作为高粱酿酒后的最大副产物, 养分含量较高, 是较好的有机肥源, 具有良好的替代化学肥料潜力, 且呈现出

有机肥缓释的效果^[10-11]。本研究对独立自主研制的 3 个酒糟有机无机复混肥高粱专用配方的研究表明, 在总养分投入相当的情况下, 施用 I 型、II 型和 III 型酒糟有机无机复混肥的高粱产量分别为 6466.45、6497.45 和 6554.54 kg/hm², 较农民习惯施肥分别提高 76.57、107.57 和 164.66 kg/hm², 增幅分别为 1.20%、1.68%和 2.58%, 说明酒糟有机无机复混肥能提高高粱产量, 这与前人^[24-26]的研究结果相类似。I 型、II 型和 III 型的高粱品质以及收获后土壤养分也有一定程度提升, 其中基施 III 型+穗期追氮肥处理的高粱产量略高于一次性基施 I 型、II 型, 说明高粱生长后期适当追施氮肥有利于养分向籽粒运输, 从而增加产量, 但 III 型酒糟有机无机复混肥需追施氮肥, 需要投入劳动力。从高粱经济效益来看, I 型、II 型和 III 型肥料处理高粱净收益和产投比均高于农民习惯施肥, 虽然基施

III型+穗期追氮肥处理增加了劳动力,但由于其较高的高粱产值,使其净收益和产投比均高于一次性基施I型、II型处理,II型虽然未产生追肥劳动成本,但其过高的肥料施用量增加了肥料成本,从而导致其净收益和产投比略低于I型。因此,在酒糟有机无机复混肥选择时应根据实际情况选择,当劳动力充足时,应优先选择基施III型+穗期追氮处理,当劳动力不足时,可选择一次性基施I型或II型酒糟有机无机复混肥。

肥料利用效率是反映作物对肥料吸收与利用的主要指标,农学效率、吸收利用效率和偏生产力是表达肥料利用率的常用指标,其与产量、施肥量和土壤肥力水平关系最为密切^[27-28],本研究条件下的高粱肥料利用率低于现代农业生产标准的肥料利用率^[27],这可能是因为有有机肥施入后,其养分释放缓慢造成的,同时黄壤独特的结构也是造成肥料利用率低的主要原因,因此,如何提高黄壤肥力,提高肥料利用效率是未来的研究方向。酒糟有机无机复混肥施入土壤后对土壤微生物的影响尚不明确,未来会定向监测长期酒糟有机无机复混肥施用下的土壤微生物演变规律,从地下角度阐明酒糟有机无机复混肥增产机制与减肥潜力。

4 结论

酒糟有机无机复混肥采用一次性基施I型、II型和基施III型+穗期追氮肥施肥形式的高粱产量、养分吸收利用以及土壤养分均优于农民习惯施肥。考虑到经济效益和劳动力,当劳动力不足时,可选择一次性基施I型或II型酒糟有机无机复混肥;当劳动力充足时,优先选择基施III型+穗期追氮处理。

参考文献

- [1] 叶雨, 闫松显. 贵州省高粱种植产业发展现状及展望. 河南农业, 2023(29): 10-12.
- [2] 郭旭, 刘鹤, 赵晓峰, 等. 产业集群视角下贵州酿酒高粱产业发展对策研究. 贵州商学院学报, 2023, 36(3): 68-78.
- [3] 曹忠耀, 陶雪, 闫松显, 等. 贵州省酒糟利用方式分析及能源潜力评估. 化工设计通讯, 2023, 49(9): 118-120, 123.
- [4] 蔡凤娇, 蔡林洋, 孔博, 等. 白酒糟的多元化利用研究进展. 酿酒, 2020, 47(2): 11-15.
- [5] 中华人民共和国农业农村部. 农业部关于印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》的通知. (2015-05-25)[2024-12-05]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201505/t20150525_4614695.htm.
- [6] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部关于印发《到 2025 年化肥减量化行动方案》和《到 2025 年化学农药减量化行动方案》的通知. (2022-11-18)[2024-12-05]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202212/t20221201_6416398.htm.
- [7] 张萌, 刘彦伶, 魏全全, 等. 酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响. 环境科学, 2020, 41(10): 4690-4700.
- [8] 许华杰, 陈芹卉, 吴永琴, 等. 酒糟炭基肥对红缨子高粱生长、产量及土壤养分的影响研究. 中国酿造, 2021, 40(12): 199-203.
- [9] 赵福培, 顾小凤, 张萌, 等. 酿酒废弃物不同配比基质对有机高粱幼苗生长发育的影响. 贵州农业科学, 2023, 51(8): 18-27.
- [10] 胡伟, 魏全全, 苟久兰, 等. 酒糟发酵有机肥对酒用高粱生长及养分吸收的影响. 贵州农业科学, 2021, 49(12): 33-40.
- [11] 胡伟, 张萌, 苟久兰, 等. 酒糟有机肥连续施用对湄潭翠芽茶叶生物效应的影响. 华北农学报, 2022, 37(增1): 268-274.
- [12] 胡京钰. 酒糟生物炭和有机肥施用的土壤及作物效应研究. 重庆: 西南大学, 2023.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 郇睿, 张崇玉. 高粱单宁测定方法比较分析. 贵州农业科学, 2008, 36(6): 38-39.
- [15] 霍权恭, 范璐, 周展明. 高粱单宁含量的测定: GB/T 15686—2008. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 孟广琴, 李霞辉, 何照范. 水稻、玉米、谷子籽粒直链淀粉测定法: GB 7648—1987. 北京: 中国标准出版社, 1987.
- [17] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [18] Fageria N K, Baligar V C. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency. Plant Nutrition, 2003, 26: 1315-1333.
- [19] Takahashi S, Anwar M K. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. Field Crops Research, 2007, 101: 160-171.
- [20] 樊吴静, 杨鑫, 韦玉恒, 等. 有机无机复混肥对旱藕生长发育及土壤理化性状的影响. 热带作物学报, 2021, 42(7): 1981-1987.
- [21] 杨旭, 刘海林, 黄艳艳, 等. 有机无机复混肥施用量对热带水稻土微生物群落和酶活性的影响. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(4): 619-629.
- [22] 杨旭, 林清火, 史东梅, 等. 有机无机复混肥在热带地区双季稻上化肥减施的应用效果. 热带作物学报, 2021, 42(1): 85-91.
- [23] 余小芬, 杨树明, 邹炳礼, 等. 菜籽油枯有机无机复混肥对烤烟产质量及养分利用率的影响. 土壤学报, 2020, 57(6): 1564-1574.
- [24] 鲁帅, 罗晓刚, 刘全伟, 等. 有机无机复混肥对小麦生长、土壤养分和重金属含量的影响. 浙江农业学报, 2023, 35(4): 922-930.
- [25] 戴黎, 胡诚, 万建华, 等. 有机-无机复混肥料对水稻产量及养分吸收利用的影响. 中国土壤与肥料, 2024(2): 111-119.
- [26] 王艳阳, 叶爱萍, 王平平, 等. 蚯蚓粪有机无机复混肥对陕南烟田有机碳及烤烟品质的影响. 江苏农业科学, 2024, 52(2): 78-83.
- [27] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [28] Congreves K A, Otchere O, Ferland D, et al. Nitrogen use efficiency definitions of today and tomorrow. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 637108.

Effect of Organic-Inorganic Compound Fertilizer from Distiller's Grains on Yield, Quality, Nutrient Uptake and Utilization of Sorghum

Xu Hao¹, Wei Quanquan², Tan Hongwei¹, Gou Jiulan², Ran Xuesong¹, Zhang Meng², Song Nanling¹, Liu Lingling², Gu Xiaofeng², Lü Xibin¹

(¹Kweichow Moutai Distillery (Group) Circular Economy Industrial Investment and Development Co., Ltd., Zunyi 563100, Guizhou, China; ²Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, Guizhou, China)

Abstract A two-year field experiment was conducted from 2022 to 2023 in Zunyi, Guizhou Province. Five fertilization treatments, no fertilization (T1), farmer's habit fertilization, basal application ordinary compound fertilizer 900 kg/ha and topdressing of pure N 45.0 kg/ha during panicle stage (T2), basal application type I fertilizer 1800 kg/ha, no topdressing (T3), basal application type II fertilizer 3000 kg/ha, no topdressing (T4), basal application type III fertilizer 1500 kg/ha and topdressing of pure N 90.0 kg/ha during panicle stage (T5) were set up to study the effects of different organic-inorganic compound fertilizers from distiller's grains on sorghum yield, quality, nutrient uptake and utilization. The result showed that compared with T2 treatment, the sorghum yield of T3, T4, and T5 treatment increased by 76.57, 107.57, 164.66 kg/ha and total biomass increased 328.40, 358.98, and 463.54 kg/ha. Compared with T2 treatment, the amylopectin content in sorghum from T3 to T5 treatment increased by 1.13%-7.02% and tannin content increased by 1.63%-4.35%. Compared with T2 treatment, the nitrogen accumulation of T3, T4 and T5 treatments were increased by 7.27, 6.22, 9.07 kg/ha, the phosphorus accumulation were increased by 1.27, 1.72, 2.47 kg/ha, the potassium accumulation were increased by 13.35, 12.38, 9.15 kg/ha. After harvesting of sorghum, T3, T4 and T5 treatments could all maintain or increase soil nutrient content. The two-year average net benefit of T5 treatment were 45 189.7 yuan/ha, and output/input ratio were 2.679, higher than T2, T3, and T4 treatments. In summary, both the one-time basal application of Type I and Type II and basal application of Type III + topdressing of nitrogen at panicle stage methods could improve the yield, nutrient absorption and utilization, and maintain soil fertility levels. We suggested that when labor is in sufficient, the former is preferred; when labor is sufficient, the latter is an alternative.

Key words Organic-inorganic compound fertilizer from distiller's grains; Sorghum; Yield; Quality; Nutrient uptake and utilization