

改良剂和施肥方式对土壤养分和烟叶生长的影响

李建华¹, 彭明钰², 周妍彤², 宋溢辉², 杨佳宜³, 母婷婷¹, 肖志鹏¹, 周南^{2,3*}, 周智^{2,3*}

¹湖南省烟草公司衡阳市公司, 湖南 衡阳

²湖南农业大学化学与材料科学学院, 湖南 长沙

³湖南农业大学农学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年7月8日

摘要

氮、磷、钾是植物生长必需的营养元素, 其在土壤-植物系统中的分布和含量对土壤肥力和作物营养需求至关重要。烟田土壤健康与烟草产量和品质息息相关, 长期单一种植和不合理施肥导致烟田土壤养分失衡、有机质下降等, 影响烟草生长, 可能导致营养元素流失和环境污染。本研究对比不同改良剂(微生物菌剂W2、生物有机肥W1、烟梗生物炭BC)和施肥方式(条施RF和穴施HF)对烟田土壤-植物系统中氮磷钾元素分布的影响, 探讨改良剂施用对土壤肥力、植物营养吸收和土壤环境质量的改善效果。结果表明, 移栽80天后W2*BCRF和W1*BCRF的植株生长、养分累计和经济效益明显高于其他处理组, 与BCRF相比经济产值增加了12.39%。微生物菌肥与生物炭混合条施的模式, 有利于提高氮磷钾含量和经济效益, 可以为烟田土壤改良和养分管理提供科学依据, 促进烟草产业可持续发展和农业生态环境保护。

关键词

施肥方式, 改良剂, 烟草, 氮磷钾, 作物生长

Effects of Amendments and Fertilisation Practices on Soil Nutrients and Tobacco Growth

Jianhua Li¹, Mingyu Peng², Yantong Zhou², Yihui Song², Jiayi Yang³, Tingting Mu¹, Zhipeng Xiao¹, Nan Zhou^{2,3*}, Zhi Zhou^{2,3*}

¹Hengyang Branch of Hunan Provincial Tobacco Company, Hengyang Hunan

²School of Chemistry and Materials Science, Hunan Agricultural University, Changsha Hunan

³College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha Hunan

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: May 16th, 2025; published: Jul. 8th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 李建华, 彭明钰, 周妍彤, 宋溢辉, 杨佳宜, 母婷婷, 肖志鹏, 周南, 周智. 改良剂和施肥方式对土壤养分和烟叶生长的影响[J]. 土壤科学, 2025, 13(3): 107-117. DOI: 10.12677/hjss.2025.133013

Abstract

Nitrogen, phosphorus, and potassium are essential nutrients for plant growth, and their distribution and content in the soil-plant system are crucial for maintaining soil fertility and meeting crop nutritional requirements. Tobacco field soil health is closely related to tobacco yield and quality. Long-term monoculture and the irrational application of fertiliser lead to an imbalance of soil nutrients and a decline in organic matter in tobacco fields, which affects tobacco growth and may result in nutrient loss and environmental pollution. In this study, we compared the effects of different amendments (microbial fungicide W2, bio-organic fertiliser W1, tobacco stalk biochar BC) and fertiliser application methods (strip-applied RF and hole-applied HF) on the distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in the soil-plant system of the tobacco field, and investigated the effects of the application of amendments on soil fertility, plant nutrient uptake and soil environmental quality. The results showed that the plant growth, nutrient accumulation, and economic benefits of W2*BCRF and W1*BCRF were significantly higher than those of the other treatment groups 80 days after transplanting, and the economic output value increased by 12.39% compared with that of BCRF. The mode of mixed strip application of microbial fungal fertiliser and biochar is conducive to improving the content of nitrogen, phosphorus, and potassium and economic benefits, which can provide a scientific basis for soil improvement and nutrient management in tobacco fields and promote the sustainable development of the tobacco industry and agro-ecological environmental protection.

Keywords

Fertilization Method, Improvers, Tobacco, Nitrogen, Phosphorus and Potassium, Crop Growth

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代农业中, 长期依赖化学肥料导致土壤退化, 表现为理化性质下降、肥力降低、生物多样性减少, 影响作物产量和品质, 威胁生态系统健康[1]。因此, 探索可持续土壤改良方法, 促进土壤肥力自然恢复, 成为农业科研的重要课题[2]。微生物菌肥和生物炭作为环境友好型材料[3], 在土壤改良中具有广阔应用前景。烟草秸秆的还田手段包括直接还田、腐熟还田和生物反应堆技术, 可增加土壤有机质含量, 转化为生物炭则能改善土壤结构, 提升肥力[4]。微生物菌肥通过引入有益微生物, 促进有机物分解和养分循环, 增强土壤稳定性和生产力[5][6]。

现有研究深入探讨了烟草秸秆还田后氮磷钾的迁移转化过程, 受多种因素影响[7]。氮素主要以有机态存在, 还田后转化为无机态氮[8][9]; 磷素和钾素以无机态形式存在, 还田后可直接被土壤吸附或溶解[11]-[15]。研究将设置不同改良剂混合施用和不同施肥处理, 通过化学和仪器分析方法测定土壤养分含量及其形态, 运用统计学方法揭示混合施用对土壤养分迁移的机制, 为农业可持续发展提供科学依据和技术支撑[16]。

2. 材料与方法

2.1. 实验地点

田间试验于 2024 年 3 月~9 月在中国湖南省衡阳市常宁市进行, 地理位置 112°37'N, 26°40'W, 年均气温 18.1℃, 年降水量 1440 毫米左右, 降水量常不均匀, 多集中 3 至 6 月, 年均日照时数约 1600 小时,

无霜期近 300 天, 供试土壤为水稻土, 土壤质地为壤土, pH 值 6.5, 含全氮 1.33 g/kg, 全磷 0.69 g/kg, 全钾 14.3 g/kg, 碱解氮 129.64 mg/kg, 速效磷 8.55 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 速效钾 445.6 mg/kg。

2.2. 供试材料

供试烤烟品种为当地主栽品种云烟 87, 供试肥料为生物发酵饼肥($\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} \geq 8\%$, 有机质 $\geq 47\%$); 烟草专用基肥 $[\text{m}(\text{N}):\text{m}(\text{P}_2\text{O}_5):\text{m}(\text{K}_2\text{O}) = 8:10:11]$; 烟草专用提苗肥 $[\text{m}(\text{N}):\text{m}(\text{P}_2\text{O}_5):\text{m}(\text{K}_2\text{O}) = 20:9:0]$; 硫酸钾($\text{K}_2\text{O} \geq 52\%$)及硝酸钾 $[\text{m}(\text{N}):\text{m}(\text{P}_2\text{O}_5):\text{m}(\text{K}_2\text{O}) = 13.5:0:44.5]$ 。

所施生物炭由贵州时科金年生物科技有限公司提供, 原料为烟梗, 热解温度为 500°C ; 所施生物有机肥(W1)和微生物菌肥(W2)两种产品由湖南特沃斯生态科技股份公司提供, 生物有机肥(有效活菌数 ≥ 0.20 亿/g, 有机质 $\geq 45.0\%$)、微生物菌肥(有效活菌数 ≥ 5.0 亿/g, 有机质 $\geq 45.0\%$, $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} \geq 5\%$)。

2.3. 试验设计

大田试验采用双因素裂区设计, 主区为不同施肥方式, 分为 HF 和 RF, 副区为不同改良剂处理, 分为 BC、W1、W2、BC*W1、BC*W2, 另在主区 HF 和 RF 内设置不施加改良剂 CG 对照以计算养分含量。每个处理重复 3 次, 共 32 个小区, 每个小区面积为 4 m^2 , 总面积约 2.4 亩。底部穴施, 起垄后, 根据株距 50 cm 挖 20 cm 深的移栽穴, 将烟草专用基肥 $1200\text{ kg}/\text{hm}^2$, 生物发酵饼肥 $450\text{ kg}/\text{hm}^2$ 和改良剂 $645\text{ kg}/\text{hm}^2$ 施于穴底; 底部条施, 起垄前, 在垄中开 12~15 cm 深的条沟, 将烟草专用基肥 $900\text{ kg}/\text{hm}^2$, 生物发酵饼肥 $750\text{ kg}/\text{hm}^2$ 和改良剂 $645\text{ kg}/\text{hm}^2$ 施于沟中, 然后起垄移栽烟苗; 烤烟于 2022 年 3 月 15 日移栽, 定期浇水, 其他生产管理技术措施参照田间处理《衡阳市烤烟生产技术方案》。

2.4. 测定项目及方法

2.4.1. 土壤理化性质测定

移栽 80 天后, 取烟草周围和烟草根系表层土壤样品并充分混匀, 风干后研钵粉碎过 100 目样筛。参照土壤分析标准检测方法测量其理化性质, 含全磷、全氮、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾。氮、磷含量测定参考 NY/T2017-2011《植物中氮、磷、钾的测定》, 分别采用连续流动分析仪和紫外分光光度法测定。钾含量测定可参考 NY/T2420-2013《植株全钾含量测定 火焰光度计法》采用火焰光度法测定, 植株同理。

2.4.2. 植株理化性质测定

于 2024 年 6 月 3 日烟草移栽后 80 d, 从各小区中选取 5 株具有代表性的烟草, 采取烟草根部和植株样品, 测定烟草根茎叶中营养元素含量, 包括全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾。

2.4.3. 农艺性状测定

于 2024 年 6 月 3 日烟草移栽后 80 d, 参考 YC/T142—2010《烟草农艺性状调查测量方法》调查根茎叶干鲜重, 株高、茎围、最大叶叶长、最大叶叶宽、最大叶面积和有效叶数。叶片面积 = 叶长 $\times$ 叶宽 $\times 0.6345$ 。

2.4.4. 叶片 SPAD 值测定

于 2024 年 6 月 3 日烟草移栽后 80 d, 使用 SPAD-502 plus 便携式叶绿素测定仪测定 SPAD 值, 选择田间各处理中代表性烟株 10 株, 测定从上至下数第 5 片烟叶的 SPAD 值。

2.4.5. 烟叶经济性状和效益分析

各小区单独挂牌烘烤, 单独计产, 对各处理的主要经济性状进行统计分析, 分析其经济效益。

2.4.6. 数据处理

采用 SPSS 26.0 软件中 Analyze 菜单里 General Linear Model 的 Univariate 命令进行裂区统计分析, 新复极差法进行多重比较, 同时引入 PE_{Ta}^2 值, 用于比较不同因素对评价指标的影响大小[17] [18]。

3. 结果与分析

3.1. 改良剂与施肥方式对土壤氮磷钾含量的影响

移栽 80d 后土壤氮磷钾含量如图 1 所示。在移栽后 80 天的测量中, 条施处理组的土壤全氮、全磷、全钾和碱解氮含量显著高于穴施处理组。W2BCRF 和 W1BCRF 组的含量增长最为显著, 表明微生物菌肥与生物炭混合施用配合条施能显著提升土壤氮、磷、钾含量。此外, W2BCRF 和 W1BCRF 组在速效磷和速效钾含量上也表现最高, 说明其对土壤速效养分提升效果显著。综上, 条施方式本身可显著提升土壤氮磷钾含量, 而生物炭和微生物菌肥的混合施用能进一步优化土壤养分状况, 特别是配合追肥时, 对全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量的提升效果最为突出。综上所述, 除去条施和穴施本身施肥方式导致土壤养分分布以及环境因素影响, 土壤微生物的功能也得到增强, 例如固氮菌的固氮能力、解磷菌的解磷能力以及钾细菌的溶钾能力等都显著提高。这些微生物的活动不仅直接增加了土壤中氮、磷、钾等养分的含量, 还通过促进植物生长, 间接提高了土壤的肥力。

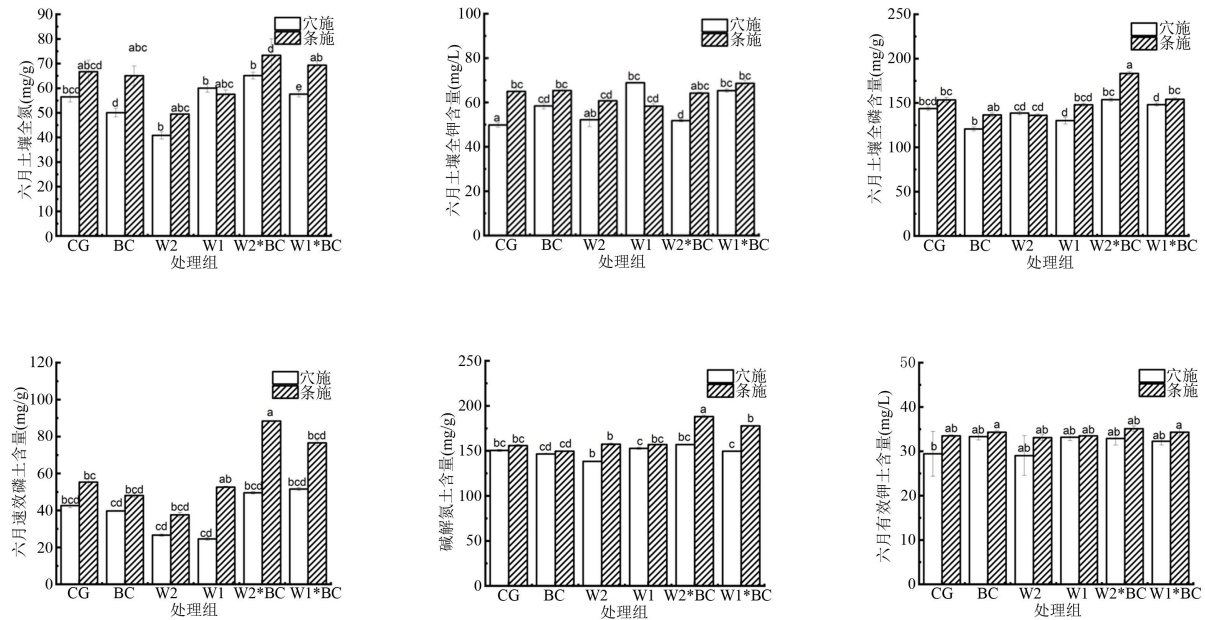


Figure 1. Distribution of soil nitrogen, phosphorus and potassium content 80 d after transplanting

图 1. 移栽 80 d 后土壤氮磷钾含量分布图

3.2. 改良剂与施肥方式对烟草氮磷钾的影响

移栽 80 天后植株氮磷钾含量如图 2 所示。移栽后 80 天时, 条施处理组的烟草全氮、全磷、全钾含量显著高于穴施处理组, 其中 W2BCRF 和 W1BCRF 组的提升效果最为显著。这表明微生物菌肥与生物炭混合施用配合条施能显著提高烟草中的氮、磷、钾含量。随着时间推移, 各处理组烟草的氮磷钾含量均有所增加, 但 W2BCRF 和 W1BCRF 组的含量持续增长, 说明这种混合施用对土壤养分的长期供应有积极作用。综上, 这种混合施用方式通过改善土壤微生物群落结构和功能, 不仅改善了土壤的化学性质,

还显著优化了土壤微生物群落结构和功能。生物炭的多孔结构为微生物提供了丰富的栖息空间，增加了微生物的多样性和活性提升了土壤生态系统的整体健康性和稳定性，为烟草的长期生长提供了有力支持。

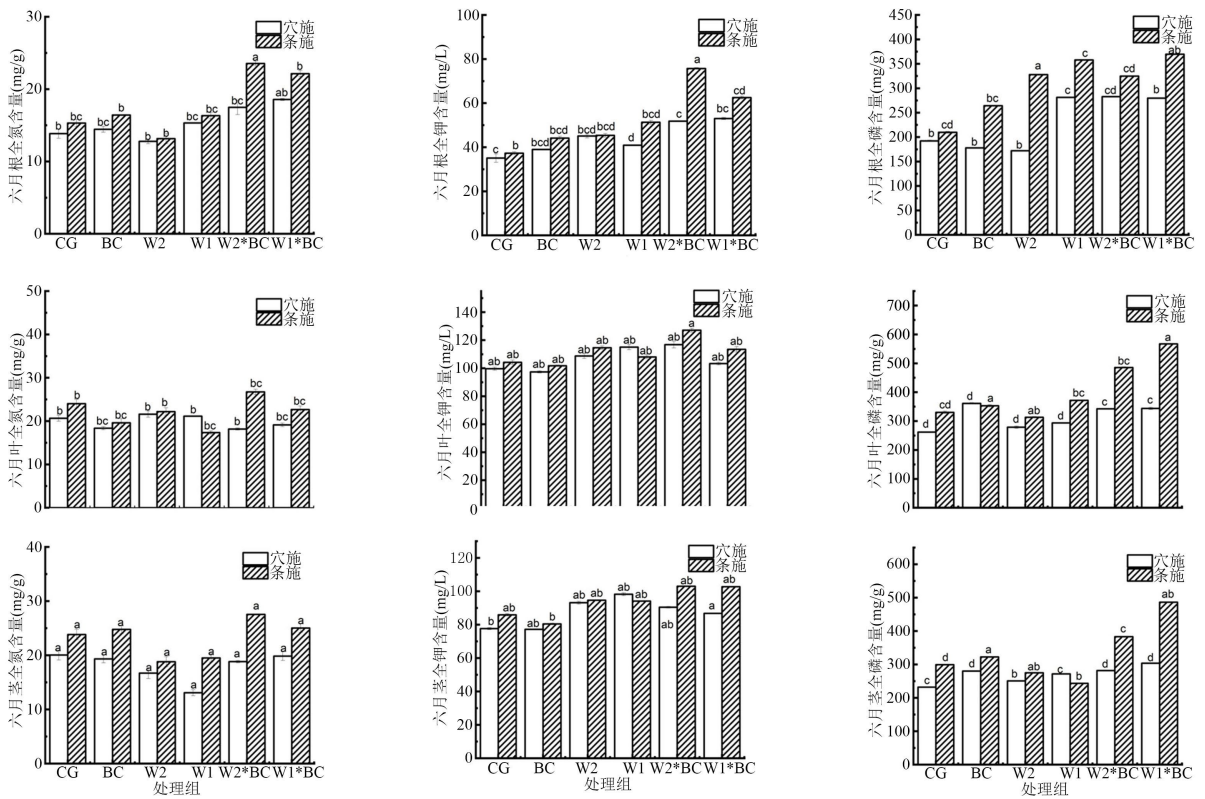


Figure 2. Distribution of nitrogen, phosphorus and potassium content of plants 80 days after transplanting
图 2. 移栽 80 天后植株氮磷钾含量分布图

3.3. 改良剂与施肥方式对烟草农艺性状的影响

改良剂与施肥方式对烟草农艺性状的影响如表 1 所示。移栽 80 天后，从施肥方式的角度来看，条施处理组的农艺性状显著高于穴施处理组。从不同处理类型来看，各项指标测量值整体上呈现微生物菌肥与生物炭混配型显著优于单独使用微生物菌肥和单独使用生物炭型优于常规，表明微生物菌肥与生物炭混合在增加烟草生物量中有显著优势。从不同因子的效应估算值(PE_{ta}^2)看，不同改良剂处理(PE_{ta}^2 平均值为 0.289)对烟草干鲜重影响最大，两者互作($PE_{ta \times z}^2$ 平均值为 0.056)对烟草干鲜重影响次之，施肥方式(PE_{ta}^2 平均值为 0.032)对烟草干鲜重影响最小；不同改良剂处理(PE_{ta}^2 平均值为 0.210)对烟草农艺性状最大，两者互作($PE_{ta \times z}^2$ 平均值为 0.124)及施肥方式(PE_{ta}^2 平均值为 0.050)对烟草农艺性状影响次之。

Table 1. Effect of different treatment groups of biochar and follow-up fertilizer methods biochar and microbial fertilizer on agronomic traits of tobacco

表 1. 改良剂与施肥方式对烟草农艺性状的影响

处理 Treatment	移栽后天数 Time after transplanting/d	根鲜重 Root Fresh weight/g	茎鲜重 Stem Fresh weight/g	叶鲜重 Leaf Fresh weight/g	根干重 Root Dry weight/g	茎干重 Stem Dry weight/g	叶干重 Leaf Dry weight/g
HF	80d	518.05 ± 10.1a	507.4 ± 4.5a	901.867 ± 9.1a	135.333 ± 2.4a	98.45 ± 1.8a	80.867 ± 1.5a
RF		549.067 ± 8.3a	536.267 ± 2.1a	1014.517 ± 6.4a	150.617 ± 1.3a	113.317 ± 1.5a	95.383 ± 1.9a

续表

P_c	0.474	0.414	0.261	0.394	0.576	0.341
$PEta_c^2$	0.023	0.029	0.055	0.032	0.014	0.04
BC	517.05 ± 12.1ab	504.55 ± 2.4ab	913.4 ± 11.7ab	157.65 ± 2.5ab	89.65 ± 3.5b	79.65 ± 1.1ab
CG	398.6 ± 7.9b	420.85 ± 2.6b	699.7 ± 11.5b	96.65 ± 1.5b	72.85 ± 2.7b	46 ± 1.8b
W1	545.5 ± 8.2ab	549.4 ± 2.5a	900.7 ± 9.5ab	133 ± 1.2ab	91.35 ± 3.7b	84.35 ± 2.1ab
W1*BC	577.6 ± 10.2ab	569.9 ± 1.5ab	1095.9 ± 9.7ab	171.35 ± 1.1ab	102.45 ± 1.0b	108.05 ± 2.2ab
W2	546.3 ± 6.3b	507.1 ± 3.5a	996.65 ± 8.1a	136 ± 1.3a	80.8 ± 4.4b	94.35 ± 3.71a
W2*BC	616.3 ± 5.3b	579.2 ± 1.1a	1142.8 ± 8.8a	163.2 ± 1.7a	198.2 ± 5.2a	94.35 ± 1.9a
P_z	0.113	0.135	0.16	0.199	0.104	0.142
$PEta_z^2$	0.306	0.292	0.277	0.258	0.312	0.287
BCHF	345.0 ± 1.1d	385.3 ± 1.3d	653.7 ± 1.1d	82.0 ± 0.6d	66.7 ± 0.5d	32.0 ± 0.6d
BCRF	454.2 ± 1.3d	458.4 ± 0.6d	747.7 ± 1.4cd	113.3 ± 0.9c	81.0 ± 1.6c	62.0 ± 1.6c
CGHF	508.0 ± 1.2c	500.2 ± 1.8cd	841.0 ± 0.9d	155.3 ± 0.3bcd	90.0 ± 0.5c	73.0 ± 0.8d
CGRF	528.1 ± 1.2c	510.9 ± 0.5cd	987.8 ± 1.6bc	162.0 ± 0.6bc	91.3 ± 0.7d	88.3 ± 0.5c
W1HF	548.5 ± 1.4d	524.9 ± 1.1a	1009.3 ± 1.0b	135.0 ± 1.7c	83.3 ± 0.7cd	103.0 ± 0.6bc
W1RF	546.1 ± 1.5d	491.3 ± 0.6b	986 ± 0.2cd	139.0 ± 1.0c	80.3 ± 0.5c	87.7 ± 1.1d
W1*BCHF	554.1 ± 1.8cd	552.3 ± 1.2d	963.8 ± 0.4bc	139.7 ± 1.5de	93.0 ± 1.3d	104.8 ± 0.9bc
W1*BCRF	603.1 ± 0.5bcd	589.5 ± 1.2cd	1230.0 ± 0.7a	205.0 ± 1.5a	113.9 ± 1.2cd	113.3 ± 1.2ab
W2HF	549.0 ± 1.3d	548.3 ± 1.6cd	917.7 ± 1.5bcd	149.3 ± 0.5cd	95.0 ± 1.0c	65.7 ± 1.1c
W2RF	544.0 ± 1.5d	552.5 ± 1.0bcd	885.7 ± 1.0cd	118.7 ± 1.3d	89.7 ± 1.0d	105.0 ± 1.0ab
W2*BCHF	609.7 ± 1.8bc	539.4 ± 1.2c	1031.7 ± 1.5b	156.7 ± 0.6bcd	268.7 ± 0.5a	111.7 ± 0.1abc
W2*BCRF	624.9 ± 0.6a	621.0 ± 0.6bc	1255.9 ± 0.2a	171.7 ± 0.7b	229.7 ± 1.2c	122.0 ± 1.5a
$P_{C \times Z}$	0.971	0.926	0.926	0.74	0.978	0.925
$PEta_{C \times Z}^2$	0.035	0.055	0.055	0.106	0.031	0.056

处理 Treatment	移栽后天数 Time after transplanting/d	茎高 Plant height/cm	茎围 Stem circumference/cm	叶片数 Numbers of leaves	最大叶长 Leaf length/cm	最大叶宽 Leaf width/cm	最大叶面积 Blade area (max)/cm ²	SPDA 值 SPAD value
HF	80d	93.65 ± 2.74a	30.367 ± 1.52a	12.5 ± 0.63ab	67.417 ± 2.71a	22.567 ± 1.6a	107.02 ± 12.37a	34.767 ± 1.49a
RF		97.7 ± 3.14a	31.317 ± 1.42a	14 ± 0.73b	68.95 ± 2.31a	25.033 ± 1.3a	1174.768 ± 12.77a	37.617 ± 1.44a
P_c		0.376	0.648	0.129	0.652	0.212	0.241	0.178
$PEta_c^2$		0.034	0.009	0.097	0.009	0.067	0.059	0.078
BC		90.3 ± 5.97a	29.35 ± 2.16a	13 ± 1a	53 ± 1.07ab	22.85 ± 2.55a	972.355 ± 16.65a	33.5 ± 2.1a
CG		88.65 ± 5.47a	26 ± 2.06a	12 ± 1a	50.5 ± 0.17b	19.1 ± 2.35a	790.19 ± 10.25b	34.1 ± 2.5a
W1		91.3 ± 5.17a	31.75 ± 1.56a	14 ± 1a	60.3 ± 2.17ab	25.6 ± 3.15a	1150.555 ± 11.15ab	34.9 ± 1.81a
W1*BC		100.35 ± 2.47a	32.85 ± 2.16a	15 ± 1a	73.2 ± 3.13ab	26.35 ± 1.37a	1313.605 ± 13.85ab	39.45 ± 1.19a
W2		98.89 ± 3.97a	31.7 ± 1.15a	14 ± 1a	61.5 ± 2.77ab	23.4 ± 1.05a	1058.565 ± 12.33ab	34.7 ± 3.71a
W2*BC		104.65 ± 6.37a	33.4 ± 3.71a	15 ± 1a	71.7 ± 3.27a	25.5 ± 0.85a	1290.095 ± 12.87a	40.5 ± 2.51a
P_z		0.266	0.343	0.775	0.372	0.302	0.218	0.255
$PEta_z^2$		0.232	0.206	0.097	0.229	0.219	0.25	0.236
BCHF		84.3 ± 1.0c	29.9 ± 0.6ab	13 ± 1ab	61.2 ± 0.6ab	21.8 ± 0.5a	1008.76 ± 1.44a	33.1 ± 0.2d

续表

BCRF	98.3 ± 1.5abc	30.8 ± 0.1ab	15 ± 1c	63.8 ± 0.5ab	25.9 ± 0.6a	1110.37 ± 1.84a	35.9 ± 0.3cd
CGHF	87.3 ± 0.8d	24.5 ± 0.1b	12 ± 1cd	58.0 ± 0.7d	16.3 ± 0.3b	999.86 ± 1.82b	33.6 ± 1.0bcd
CGRF	92.0 ± 0.8cd	29.5 ± 0.6ab	15 ± 1abc	64.6 ± 0.5cd	23.9 ± 0.5a	1082.52 ± 1.40a	36.6 ± 0.8d
W1HF	105.7 ± 1.5ab	35.8 ± 0.1a	15 ± 2abc	73.8 ± 0.2ab	25.0 ± 0.3a	1005.39 ± 1.29a	36.0 ± 0.6d
W1RF	97.0 ± 0.1abc	29.6 ± 0.6ab	13 ± 1cd	68.4 ± 0.9bc	23.8 ± 1.0a	941.32 ± 1.90a	35.4 ± 0.9cd
W1*BCH F	92.3 ± 0.5cd	32.2 ± 0.3a	13 ± 1cd	70.3 ± 0.7ab	24.9 ± 0.7a	1269.01 ± 1.74a	38.6 ± 0.3d
W1*BCR F	107.3 ± 0.1a	35.5 ± 0.7a	18 ± 1a	75.1 ± 0.6ab	29.8 ± 0.4a	1360.20 ± 1.07a	42.3 ± 0.3ab
W2HF	94.3 ± 0.9bcd	34.7 ± 0.7a	13 ± 1d	75.0 ± 0.2ab	27.6 ± 0.2a	1115.43 ± 1.87a	36.1 ± 1.0d
W2RF	90.3 ± 0.8d	30.8 ± 0.7ab	14 ± 1cd	73.4 ± 0.3ab	25.6 ± 0.1a	1187.68 ± 1.49a	35.7 ± 0.1c
W2*BCH F	104.0 ± 0.6abc	31.1 ± 1.2ab	15 ± 1abc	72.2 ± 0.6ab	25.8 ± 0.5a	1209.67 ± 1.38a	37.2 ± 1.0a
W2*BCR F	107.3 ± 0.4a	37.7 ± 0.2ab	15 ± 1abc	74.4 ± 0.8ab	27.2 ± 0.5a	14732.52 ± 1.58a	45.8 ± 0.2ab
P _{C×Z}	0.601	0.432	0.395	0.917	0.681	0.792	0.811
PEta _{C×Z} ²	0.139	0.181	0.191	0.058	0.12	0.093	0.089

注：P_C、P_Z、P_{C×Z} 分别为施肥类型、生物炭与微生物菌肥的不同处理组及其互作的差异显著性值，PEta_C²、PEta_Z²、PEta_{C×Z}² 分别为施肥类型、生物炭与微生物菌肥的不同处理组及其互作的效应值。表中不同小写字母表示处理间差异有统计学意义(p ≤ 0.05)，下同。

3.4. 改良剂与施肥方式对烤烟物理性状的影响

改良剂与施肥方式对烤烟物理性状的影响如表 2 所示。从不同改良剂看，W1*BC 和 W2*BC 显著提高烤烟的物理性状，对茎重没有显著的影响。从施肥方式来看，穴施稍有提高烤烟的物理性状。从不同改良剂和施肥方式互作看，在穴施和改良剂中，整体呈现混配施用显著优于单独施用微生物菌肥型优于单独使用生物炭型优于常规型。从不同因子的 PEta_Z² 看，不同改良剂(PEta_Z² = 0.138)对茎重的影响大于两者互作(PEta_Z² = 0.016)的影响，不同改良剂(PEta_Z² = 0.097)对叶重的影响大于两者互作(PEta_Z² = 0.028)的影响，施肥方式没有对烤烟物理性状产生显著影响。可见烤烟物理性状，特别是茎重和叶重，主要受不同改良剂影响，其次是受两者互作影响，施肥方式没有显著影响。两种改良剂配施，显著增加了烤烟的物理性状。总体上看，以“W2*BC”处理更有利于增加烤烟的物理性状，其次是“W1*BC”处理。

Table 2. Effect of different treatment groups of biochar and microbial fertilizer on tobacco dry matter accumulation
表 2. 改良剂与施肥方式对烤烟物理性状的影响

处理 Treatment	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	茎重 Stem weight/g	叶重 Leaf weight/g	叶厚度 Leaf thickness/cm
RF	68.517 ± 1.91a	19.133 ± 1.23a	2.233 ± 0.22a	5.45 ± 0.9a	2.632 ± 0.89a
HF	71.217 ± 1.59a	22.083 ± 1.62a	2.5 ± 0.12a	5.883 ± 0.4a	2.97 ± 0.19a
P _C	0.233	0.201	0.375	0.533	0.231
PEta _C ²	0.013	0.015	0.007	0.004	0.127
BC	66.5 ± 2.75ab	17.6 ± 2.11b	1.9 ± 0.37b	5 ± 0.5b	2.51 ± 0.37abc
CG	63.1 ± 2.55b	16.4 ± 2.81b	1.75 ± 0.67b	3.75 ± 0.8b	2.295 ± 0.27bc
W1	73.45 ± 1.71a	20.7 ± 1.81ab	2.15 ± 0.77b	5.55 ± 0.2ab	2.795 ± 0.17abc
W1*BC	74 ± 2.73a	26.6 ± 1.819a	3.2 ± 0.47a	6.65 ± 0.4a	3.405 ± 0.32a

续表

W2	68.5 ± 2.85ab	18.5 ± 2.71ab	1.95 ± 0.52b	5.6 ± 0.6ab	2.595 ± 0.48abc
W2*BC	73.65 ± 2.51a	23.85 ± 2.03ab	3.25 ± 0.16a	7.45 ± 0.2a	3.205 ± 0.18ab
Pz	0.233	0.09	0.007	0.05	0.214
PEta _z ²	0.013	0.084	0.138	0.097	0.436
BCRF	65.2 ± 3.97ab	16.6 ± 1.95b	1.9 ± 0.19b	4.9 ± 1.01b	2.39 ± 0.63ab
BCHF	66.8 ± 3.87ab	17.6 ± 3.05a	2.2 ± 0.59ab	5.1 ± 1.21ab	2.46 ± 0.43ab
CGRF	61.5 ± 3.17ab	15.2 ± 0.95ab	1.3 ± 0.29ab	4.3 ± 1.20b	2.22 ± 0.46a
CGHF	64.7 ± 3.37ab	17.6 ± 2.97b	1.7 ± 0.53ab	3.2 ± 0.21b	2.37 ± 0.33abc
W1RF	72.2 ± 3.07a	19.6 ± 1.75a	2.2 ± 0.21b	5.4 ± 1.70a	2.72 ± 0.48b
W1HF	74.7 ± 3.83a	21.8 ± 0.35a	2.4 ± 0.42ab	5.7 ± 1.10a	2.82 ± 0.13ab
W1*BCRF	69.6 ± 3.17b	21.6 ± 0.02ab	2.9 ± 0.27a	6.1 ± 1.33b	2.88 ± 0.23a
W1*BCHF	78.4 ± 3.28b	31.6 ± 2.27b	3.5 ± 0.31b	7.2 ± 0.31ab	3.93 ± 0.43abc
W2RF	66.8 ± 3.09a	17.2 ± 1.38b	2.2 ± 0.51ab	5.5 ± 1.41ab	2.57 ± 0.41ab
W2HF	70.2 ± 2.97ab	19.8 ± 1.39a	2.5 ± 0.61a	5.7 ± 1.61a	2.62 ± 0.40a
W2*BCRF	71.7 ± 4.89ab	23.6 ± 0.19ab	3.1 ± 0.31ab	6.1 ± 0.11b	2.94 ± 0.43abc
W2*BCHF	75.6 ± 4.09b	24.1 ± 1.05b	3.4 ± 0.09b	8.8 ± 1.01ab	3.47 ± 0.35b
P _{C×Z}	0.769	0.838	0.883	0.695	0.87
PEta _{C×Z} ²	0.023	0.019	0.016	0.028	0.138

3.5. 改良剂与施肥方式对烤烟经济性状和经济效益的影响

Table 3. Effect of different treatment groups of biochar and microbial fertilizer on economic traits and economic benefits of roasted tobacco

表 3. 生物炭与微生物菌肥的不同处理组对烤烟经济性状和经济效益的影响

处理 Treatment	上等烟比例% Ratio of upper-class tobacco	中上等烟比例% Ratio of middle-upper class tobacco	产量 Yield/kg·ha ⁻¹	均值 Mean price/yuan·ha ⁻¹	产值 Product value/yuan·ha ⁻¹
BCHF	40.32	62.65	2123.41	24.67	52384.52
BCRF	44.64	64.77	2348.58	26.34	61861.60
CGHF	46.67	68.69	2589.67	27.69	71707.96
CGRF	49.28	70.21	2499.58	27.78	69438.33
W1HF	50.37	71.84	2463.77	27.01	66546.43
W1RF	52.54	73.26	2403.12	27.93	67119.14
W1*BCHF	51.83	70.97	2489.11	27.66	68848.78
W1*BCRF	52.91	74.22	2485.64	27.97	69523.35
W2HF	53.49	75.01	2530.54	27.77	70273.10
W2RF	60.95	78.77	2500.94	27.12	67825.49
W2*BCHF	54.33	73.49	2505.83	27.58	69110.79
W2*BCRF	61.58	78.45	2581.59	26.89	69418.96

生物炭与微生物菌肥的不同处理组对烤烟经济性状和经济效益的影响如表 3 所示。在移栽后 80 天，条施处理组的烟叶产量显著高于穴施处理组，且产量增加了 10.6%，特别是 W2*BCRF 和 W1*BCRF 组。

在烟叶质量等级的评估中, W2*BCRF 和 W1*BCRF 组的烟叶品质最好, 其产值比 BC*RF 增加了 12.39%, 表现为叶片更完整、色泽更鲜亮、烟碱含量适中。经济效益的评估基于烟叶产量和质量等级, W2*BCRF 和 W1*BCRF 组烟叶产量高且质量等级好, 经济效益好。微生物菌肥与生物炭的混合施用配合底肥不仅提高了烟叶的经济价值, 随着时间的推移, 所有处理组的烤烟经济性状均有所改善, 这表明微生物菌肥与生物炭的混合施用配合底肥对烤烟经济性状的长期改善具有积极作用。本实验结果表明, 条施能够显著提升烤烟的经济性状和经济效益, 而生物炭和微生物菌肥的施用则能够进一步优化烤烟的生长环境和经济价值。

4. 讨论

本研究通过对比 12 个不同处理组的烟草生长状况, 深入探讨了施肥方式、生物炭和微生物菌肥对烟草生长的影响[19]-[21]。实验结果表明, 从不同施肥方式而言, 条施的处理组在生长的各个阶段均表现出较好的生长状况, 与穴施的处理组相比, 条施的处理组烟草的生长更为旺盛[22]。这一现象可能与施肥方式提供的持久而稳定的营养供应有关, 为烟草的初期生长提供了充足的养分[23][24]。生物炭组相较于常规组展现出更好的生长表现, 生物炭有改善土壤结构、提高土壤保水保肥能力以及增加土壤中微生物活性的能力[25]。从不同处理类型而言, 微生物菌肥的处理组生长状况优于生物炭组, 这表明微生物菌肥通过提供有益微生物、增强土壤养分循环和提高植物病害抵抗力等方面, 对烟草生长产生了积极影响[26]-[29]。特别是微生物菌肥与生物炭混合施用的处理组(W2*BCRF、W1*BCRF)在所有评估指标上均表现最佳, 这一结果强调了微生物菌肥和生物炭在提高烟草生长质量和产量方面的协同效应[30][31]。在经济效益方面, W2*BCRF 和 W1*BCRF 组因其高的产量和优质的烟叶而具有最佳的经济效益[32]。

5. 结论

本研究结果表明, 土壤改良剂的施入对土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量的显著作用, 土壤供给氮磷钾性能提高致使烟草的碱解氮、速效磷、速效钾含量的增加, 进而促进了烟叶生长质量和产量。实验中, W2*BCRF 和 W1*BCRF 的养分累积、植株生长以及烤烟的经济效益都优于其他处理组, 产值相较于 BCRF 增加了 12.39%。微生物菌肥与生物炭的混合施用在提高烟草生长质量和产量方面具有协同效应, 通过改善土壤微生物群落结构和功能, 提升了土壤生态系统的整体健康性和稳定性, 为烟草的长期生长提供了有力支持。不仅提高了土壤养分的有效性, 还促进了烟草的生长质量和产量, 具有显著的经济效益和生态效益。未来的研究可以进一步探索不同比例的微生物菌肥和生物炭混合施用对烟草生长的影响, 以及这种策略在不同土壤类型和气候条件下的适用性。

参考文献

- [1] 马爱国, 左伟标, 闫鼎, 等. 有机肥与复合肥配施对楚雄烤烟产量和质量的影响[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(4): 350-355.
- [2] Pandian, K., Mustaffa, M.R.A.F., Mahalingam, G., Paramasivam, A., John Prince, A., Gajendiren, M., *et al.* (2024) Synergistic Conservation Approaches for Nurturing Soil, Food Security and Human Health Towards Sustainable Development Goals. *Journal of Hazardous Materials Advances*, **16**, Article ID: 100479. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100479>
- [3] 张亚琪. 生物炭协同微生物菌剂修复对镉胁迫下水稻及其微生境影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 北方民族大学, 2024.
- [4] 林先塔, 许山河, 刘宏, 等. 施用不同腐熟秸秆肥对植烟土壤和烤烟品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2023, 51(6): 48-58.
- [5] Shahwar, D., Mushtaq, Z., Mushtaq, H., Alqarawi, A.A., Park, Y., Alshahrani, T.S., *et al.* (2023) Role of Microbial Inoculants as Bio Fertilizers for Improving Crop Productivity: A Review. *Heliyon*, **9**, e16134.

- <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16134>
- [6] 周启运. 配施促生功能菌对烤烟根际土壤、生长发育及产质量的影响[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
 - [7] 彭华伟, 刘国顺, 吴学巧, 等. 生物有机肥对烤烟氮磷钾积累、吸收和含量的影响[J]. 中国烟草科学, 2008(1): 25-29.
 - [8] 张弘, 李影, 张玉军, 等. 生物炭对植烟土壤氮素形态迁移及微生物量氮的影响[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(3): 26-35.
 - [9] 李京京. 炭基肥料氮素有效性及对烤烟生长发育和品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2017.
 - [10] 崔欣格, 王瑞, 赵昊, 等. 微生物菌肥对不同连作土壤及烟株生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 240-245.
 - [11] Tang, Z., Feng, J., Chen, L., Chen, Z., Shao, X. and Xia, T. (2023) Coupling Amendment of Microbial and Compound Fertilizers Increases Fungal Necromass Carbon and Soil Organic Carbon by Regulating Microbial Activity in Flue-Cured Tobacco-Planted Field. *European Journal of Soil Biology*, **117**, Article ID: 103518. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2023.103518>
 - [12] 李平, 聂浩, 郎漫, 等. 几种土壤结构改良剂对重金属污染土壤养分有效性及酶活性的影响[J]. 环境科学研究, 2025, 38(3): 599-609.
 - [13] Li, H., Ren, R., Zhang, H., Zhang, G., He, Q., Han, Z., *et al.* (2023) Factors Regulating Interaction among Inorganic Nitrogen and Phosphorus Species, Plant Uptake, and Relevant Cycling Genes in a Weakly Alkaline Soil Treated with Biochar and Inorganic Fertilizer. *Science of the Total Environment*, **905**, Article ID: 167280. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167280>
 - [14] Deinert, L., Hossen, S., Ikoyi, I., Kwapinski, W., Noll, M. and Schmalenberger, A. (2024) Poultry Litter Biochar Soil Amendment Affects Microbial Community Structures, Promotes Phosphorus Cycling and Growth of Barley (*Hordeum vulgare*). *European Journal of Soil Biology*, **120**, Article ID: 103591. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2023.103591>
 - [15] 韦建玉, 王政, 黄崇峻, 等. 增施微生物菌肥对植烟土壤理化性质及微生物量的影响[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(11): 57-61.
 - [16] 张阳, 王新月, 谢会雅, 等. 烤烟生长对水溶性追肥配施促根剂的响应[J]. 核农学报, 2023, 37(5): 1030-1039.
 - [17] 杨佳宜, 何罗驭阳, 唐昕, 等. 生物炭用量与追肥次数对烤烟生长及氮素积累的影响[J]. 中国烟草科学, 2023, 44(5): 9-17.
 - [18] 刘芳, 孟智勇, 江祥伟, 等. 缓释肥不同配比对郴州烤烟产量及品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2023(12): 33-38.
 - [19] 王勇, 李廷轩, 陈光登, 等. 不同钾基因型烟草钾吸收和生理生化特性研究[J]. 中国烟草科学, 2017, 38(5): 56-61.
 - [20] Li, Y., Yang, S. and Dong, Y. (2024) Response of Agronomic and Physiological Traits of Flue-Cured Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) to Plant Stem Cell Soil Amendments. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, **131**, Article ID: 102290. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102290>
 - [21] 陈小翔, 杨承, 贺帅, 等. 不同施肥方式对土壤理化性质和烟草生长的影响[J]. 山地农业生物学报, 2024, 43(5): 26-31, 52.
 - [22] 郑祥洲, 张晶, 张玉树, 等. 控释专用肥在烤烟生产上的应用[J]. 中国农学通报, 2016, 32(10): 53-57.
 - [23] 张艳梅. 丹江口植烟土壤养分供应状况及雪茄烟叶养分吸收规律研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
 - [24] 张涵, 赵世民, 刘占卿, 等. 生物炭对烤烟生长及烟叶品质的影响[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2017, 29(1): 44-48.
 - [25] 高志豪, 张锦韬, 何云飞, 等. 不同类型微生物菌肥对烤烟种植的影响[J]. 湖南农业科学, 2023(4): 38-44.
 - [26] 冯婷婷, 王梦雅, 符云鹏, 等. 不同有机物料对土壤和烟叶主要质量指标的影响[J]. 中国烟草科学, 2016, 37(5): 22-27, 33.
 - [27] 李茜, 苏国权, 危月辉, 等. 增施微生物菌肥对烤烟生长发育及烟叶品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(19): 123-129.
 - [28] Hou, J., Yi, G., Hao, Y., Li, L., Shen, L. and Zhang, Q. (2024) The Effect of Combined Application of Biochar and Phosphate Fertilizers on Phosphorus Transformation in Saline-Alkali Soil and Its Microbiological Mechanism. *Science of the Total Environment*, **951**, Article ID: 175610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175610>
 - [29] 王磊元, 李凤娟, 秦翠兰. 施用不同土壤改良剂对准格尔盆地盐碱地的改良作用[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(16): 259-264.

-
- [30] Yao, F., Chen, Y., Chen, Q., Qin, Z., Liu, X., Shi, Z., *et al.* (2024) Addition of Organic Amendments Derived from Invasive Apple Snails Alleviated Soil Acidification, Improved Soil Nitrogen and Phosphorus Effectiveness, Microbial Growth and Maize Yield in South China. *Environmental Technology & Innovation*, **33**, Article ID: 103475.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103475>
- [31] 谢廷鑫, 陈乾锦, 曾强, 等. 移栽方式对烤烟生长的影响及经济效益分析[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(6): 27-31.
- [32] 吴多基, 姚冬辉, 魏宗强, 等. 化肥配施土壤改良剂对双季稻产量、经济效益及土壤化学性质的影响[J]. 广东农业科学, 2019, 46(12): 49-55.