黄治宏,王学瑛,陈健,等.皖南烟草生长发育及品质对不同类型生物炭的响应[J].华中农业大学学报,2026,45(2):146-154.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.015

皖南烟草生长发育及品质对不同类型生物炭的响应

黄治宏[1],王学瑛[2],陈健[3],沈毅[3],冉法芬[2],
程学文[2],任天宝[1],戴志渊[3],薛琳[2]

1.河南农业大学/河南省生物炭研究工程技术中心/生物炭技术河南省工程实验室,郑州 450002;
2.安徽皖南烟叶有限责任公司,宣城 242000;3.上海烟草集团有限责任公司,上海 200082

摘要 为探究不同碳源生物炭对植烟土壤理化性质及烟草生长发育和烟叶品质的影响,以烤烟云烟87为研究对象,以常规施肥为对照(CK),分别设置常规施肥+热解生物炭(T1)、常规施肥+植物性碳源生物炭(T2)、常规施肥+动物性碳源生物炭(T3)和常规施肥+混合碳源生物炭(T4),探究不同碳源生物炭对皖南烟草生长发育及品质的影响。结果显示,T2处理土壤有效磷和速效钾含量显著提高,分别提高了26.80%、17.84%,T4处理烟叶内化学成分协调性最佳,糖碱比、钾氯比分别为13.53、4.81,基于生物炭对烤烟产量和产值的贡献率,T4处理每公顷产值提升23.60%。结果表明,施用生物炭能促进烟株发育,改善土壤理化性质和促进烟叶生长;植物性碳源生物炭对理化性质的影响更为显著,动物性碳源生物炭对烟草生长发育及烟叶品质的提升作用最佳;在生产实践中,可根据实际需求添加合适的碳源生物炭,以改善土壤条件,并促进烟草生长发育和改善烟叶品质。

关键词 生物炭;碳源组分;土壤理化性质;烟草;烟叶品质
中图分类号 S154.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)02-0146-09

土壤有机碳(soil organic carbon,SOC)是土壤有机质的主要组成部分,对土壤健康、生态系统功能和全球碳循环具有重要影响。近年来,生物炭作为一种环境友好型土壤改良剂,因其独特的理化性质(如高孔隙度、强吸附性及丰富的碳素含量),在改善土壤质量、提升作物产量与品质方面有着巨大潜力[1-2]。烤烟是一种重要的经济作物,但生产过程中普遍面临连作障碍、土壤酸化、养分失衡及气候波动等问题,严重影响烟叶的产量与工业可用性[3-4]。研究表明,生物炭能够有效调节土壤微生态环境与土壤酶活性,改善土壤质量,促进烤烟根系发育和地上部分的生长[5-6]。植烟土壤中施加生物炭可以改善土壤微环境,促进大田烟株生长,同时提升烟叶化学成分和感官品质协调性[7]。

生物炭的理化特性受原料碳源的影响,不同碳源制备的生物炭对改善植烟土壤和调控烟株生长发育的效果不同。例如,秸秆生物炭能够改善土壤理化特性,增强土壤固碳能力,影响土壤微生物活性和群落组成,从而影响土壤有机碳的固存效率[8]。高木质素生物炭(如木屑等)具有持久固碳能力,可以改变土壤碳氮平衡,增加土壤有机碳总量[9]。动物碳源生物炭(如骨炭等)具有丰富的碳酸钙,能有效中和酸性土壤,缓解土壤重金属污染[10]。粪便生物炭富含的氮、钾等元素,可以作为缓释肥料,有效减少养分流失[11]。高温热解生物炭含碳量高、稳定性强,多用于实现农林碳封存;而秸秆类植物性碳源生物炭的氮含量丰富,更适用于土壤的改良与培肥[12]。粪便类动物性碳源生物炭中P、K养分含量高,N、Ca、Mg、Fe含量次之,其丰富的矿质养分可为贫瘠土壤补充养分[13]。秸秆类植物性碳源生物炭能够刺激土壤微生物活性和多样性,进而影响土壤保水能力和pH值,保持土壤养分[14]。不同碳源生物炭的理化特性存在显著差异,因此,有必要对其在土壤中的改良效果进行深入研究,这将有利于揭示不同碳源生物炭在土壤改良和促进作物生长发育中的作用。

基于此,本研究探讨热解、植物性、动物性3种典

收稿日期:2025-03-05
基金项目:皖南中华特色原料研究与开发项目(K2024-1-054P);烟-稻轮作区植烟土健康质量评价与保育技术研发与应用项目(2021-150)
黄治宏,E-mail:hzh9203@163.com
通信作者:戴志渊,E-mail:daizy@sh.tobacco.com.cn;薛琳,E-mail:xuelin-xx@163.com

型碳源生物炭处理对植烟土壤理化性质、烟株生理指标及烟叶品质的影响，以期为筛选适宜的烟草绿色生产用生物炭源提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本试验于2024年4—8月在安徽省宣城市宣州区进行，该烟田实行烟稻轮作制，土壤类型为水稻土，全氮、全磷含量分别为1.13、0.62 g/kg，碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为108.26、36.24 、192.34 mg/kg。供试品种为云烟87。生物炭由河南省生物炭工程技术研究中心提供，基本性质如表1所示。

表1　不同生物炭基础养分含量

Table 1　Nutrient content of different biochar bases

生物炭类型 Biochar type	原材料 Raw material	C/%	N/%	pH
热解生物炭 Pyrolysis biochar(BC)	花生壳 Peanut shell	45.60	0.83	9.05
植物性碳源生物炭 Plant-based carbon source biochar(PC)	玉米秸秆 Corn stalk	65.13	1.28	8.11
动物性碳源生物炭 Animal carbon source biochar(AC)	羊粪 Sheep manure	30.08	1.80	9.54

1.2　试验设计

采用大田试验随机区组设计，试验设置5个处理，CK：常规施肥（减氮15%）；T1：常规施肥（减氮15%）＋80 kg热解生物炭（BC）；T2：常规施肥（减氮15%）＋80 kg植物性碳源（PC）；T3：常规施肥（减氮15%）＋80 kg动物性碳源（AC）；T4：常规施肥（减氮15%）＋混合碳源生物炭（26 kg BC＋26 kg PC＋26 kg AC，生物炭总量≤80 kg，等比例混合）。所有物料于起垄前1 d均匀条施于土壤表层，随后与土壤充分混匀。植烟行距1.2 m、株距0.5 m，试验地四周设保护行，田间栽培管理按当地生产技术规范进行。

1.3　供试土样与样品采集

烤烟移栽75 d（成熟期）后，采用五点取样法收集根际土壤样品[15]。使用铲子挖出烟株，轻轻抖落根周围的松散土壤，收集紧紧附着于根表的根际土。样品置于阴凉处自然风干，研磨后依次过孔径0.85、0.25和0.15 mm筛，用于土壤理化性质分析[16]。

1.4　土壤理化指标及养分测定

土壤理化性质测定参照文献[17]进行，所有样点均设置3次重复。采用电位法（土水质量比1∶2.5）测定pH；碱解氮（AN）与速效钾（AK）分别以碱解扩散法与火焰光度计法进行测定；有效磷（AP）利用碳酸氢钠浸提法[18]进行分析。

1.5　农艺性状及烤后烟叶物理性状测定

烤烟移栽60 d（旺长期）后，在每个处理的烤烟中随机抽取10株，首先测定其株高，并在第5、10、15片叶处测量茎围后取平均值；同时，选取第10位叶片作为中部叶代表，测定其叶长与叶宽。

1.6　烟叶常规化学成分测定

依据对照组（CK）成熟时间作为基准，每个处理随机选取6株烤烟测定，选取自基部向上数第13片叶进行常规化学成分测定。总氮含量采用凯氏定氮法测定；烟碱含量采用紫外分光光度法测定；淀粉含量采用酸解法测定；还原糖含量采用DNS显色法测定；水溶性总糖含量采用蒽酮比色法测定；钾含量采用火焰光度法测定[19]。

1.7　烟叶香味物质测定

试验样品剔除主脉后，放入45 ℃烘箱中烘干，烘干后将样品磨碎过孔径0.25 mm筛，同时用蒸馏萃取法分离烟叶香味物质，采用GC-MS测定致香物质含量[19]。

1.8　烤烟经济性状调查

对各小区的烟叶进行独立采收、编杆与计产。烘烤结束后，依据烤烟42级国家标准GB 2635—1992《烤烟》对烟叶进行分级，并据此计算其产值、产量及上等烟比例。

1.9　数据分析

采用Microsoft Excel 2016对数据进行整理，采用SPSS 22.0软件进行单因素方差分析（one-way ANOVA），用R（版本）语言软件的“Vegan包”（版本）进行绘图。

2　结果与分析

2.1　不同处理对烤烟农艺性状的影响

在烟草旺长期（烟株移栽60 d），T1处理株高显著低于对照处理，其余处理间无显著差异，各处理烟

株茎围在9.7～10.6 cm，T2、T3、T4处理的叶面积分别较CK提高3.90%、6.35%、14.91%（表2）。施用不同类型生物炭对旺长期烟株株高影响不显著，但有利于烟株优势株型培育（图1）：中部叶叶面积增大、上部叶开片度提高、叶片厚薄适中、色泽均匀一致，这有利于烤后烟叶品质的提升。

表2 不同处理下烤烟农艺性状

Table 2 Agronomic traits of flue-cured tobacco under different treatments

处理 Treatments	株高/cm Plant height	茎围/cm Stem girth	最大叶长/cm Maximum leaf length	最大叶宽/cm Maximum leaf width	叶面积/cm² Leaf area
CK	117.2±4.21a	9.7±1.20a	72.9±1.25a	28.0±3.24a	1 294.70±147.64a
T1	109.6±4.51b	10.6±0.82a	70.2±3.03a	29.0±2.83a	1 293.49±159.79a
T2	112.6±5.41ab	9.9±0.89a	72.2±5.26a	29.2±3.70a	1 345.27±257.13a
T3	115.6±5.60ab	10.1±0.89a	72.2±2.49a	30.0±3.16a	1 376.99±177.15a
T4	113.2±6.02ab	10.6±0.82a	74.0±3.39a	31.6±3.29a	1 487.78±201.35a

注：不同小写字母表示在0.05水平存在显著差异，下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level, the same as below.



图1 不同处理下旺长期烟株株型

Fig. 1 Plant type of tobacco during vigorous growth period under different treatments

2.2 不同处理对土壤主要养分的影响

由表3可见，施用生物炭能提高土壤pH、有机质、有效磷、速效钾含量，施用热解生物炭（T1）较CK土壤pH含量提高了7.77%。与对照（CK）相比，混合生物炭处理（T4）土壤有机质含量显著增加了31.80%，动物性碳源生物炭（T3）土壤有效磷含量提高了57.37%。施用植物性碳源生物炭（T2）显著提高土壤有效磷和速效钾含量，分别较CK提高了26.80%、17.84%。T4处理显著降低土壤全氮含量，较CK降低23.67%。结果表明，植物性碳源对土壤有机质和速效钾的提升效果最佳，而动物性碳源对提高土壤有效磷的效果最佳。

表3 不同处理下土壤主要养分

Table 3 Soil main nutrients under different treatments

处理 Treatments	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total nitrogen	有效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium	pH
CK	19.90±1.74b	2.07±0.06a	16.75±0.77c	83.52±3.17b	5.92±0.37a
T1	23.74±0.53ab	1.69±0.08b	18.85±1.40bc	91.66±9.73ab	6.38±0.32a
T2	25.05±1.69a	1.63±0.20b	21.24±2.57ab	98.42±4.26a	6.37±0.50a
T3	23.97±2.17ab	1.97±0.14a	26.36±1.95a	93.27±7.03ab	6.15±0.45a
T4	26.23±3.08a	1.58±0.28c	23.70±2.21a	90.44±5.83ab	6.35±0.26a

2.3 不同处理对烟叶物理特性的影响

施用生物炭后，烤后烟叶面积、单叶质量均有提升。与对照相比，T1、T4处理烤后烟中部叶的叶面积分别较CK提高35.42%、35.01%（表4）。各处理烟叶质量在13～16 g，烟叶含水率、厚度、抗张强度适中，符合优质烟叶生产标准。结果表明，施用生物炭可以使烤后烟叶面积提升、叶片均匀一致、烟叶烘烤后组织疏松，符合优质烟叶生产标准。

2.4 不同处理对烟叶外观品质的影响

施用不同碳源生物炭后，烤后烟叶色泽均匀、成熟度适熟、身份适中、叶片结构疏松、有油分（表5）。中部叶处理叶色橘黄，T3处理叶色得分最高。T2处

表 4　不同处理下烤后烟中部叶物理特性

Table 4　Physical characteristics of middle leaves in flue-cured tobacco under different treatments

处理 Treatments	叶长/cm Leaf length	叶宽/cm Leaf width	叶面积/cm^2 Leaf area	单叶质量/g Single leaf weight	厚度/mm Thickness	抗张强度/N Tensile strength
CK	63.82±2.88a	19.01±0.99b	770.6±70.27b	13.14±1.33a	0.12±0.002a	2.09±0.43a
T1	63.97±1.613a	25.71±0.34a	1 043.6±33.76a	15.20±2.17a	0.12±0.004a	2.01±0.28a
T2	66.36±1.35a	21.79±1.60ab	916.8±57.36ab	14.24±2.79a	0.12±0.006a	2.26±0.16a
T3	63.07±1.49a	22.57±3.23ab	903.1±131.42ab	15.14±3.25a	0.12±0.003a	2.19±0.25a
T4	65.89±1.36a	24.86±2.24a	1 040.4±110.26a	15.00±3.39a	0.12±0.007a	2.16±0.47a

表 5　不同处理下烤烟外观质量

Table 5　Effects of different treatments on appearance quality of flue cured tobacco

处理 Treatments	颜色 Colour		成熟度 Maturity		身份 Identity		叶片结构 Blade structure		油分 Oil fraction		色度 Chroma	
	描述 Describe	得分 Score	描述 Describe	得分 Score	描述 Describe	得分 Score	描述 Describe	得分 Score	描述 Describe	得分 Score	描述 Describe	得分 Score
CK	橘黄 Orange	8.3	成熟 Mature	8.1	中等＋ Medium＋	8.3	疏松 Loose	8.3	有 Contain oil	6.3	强 Intrense	6.4
T1	橘黄 Orange	8.2	成熟 Mature	8.3	中等 Medium	8.4	疏松 Loose	8.4	有 Contain oil	6.3	强 Intrense	6.4
‘T2	橘黄 Orange	8.3	成熟 Mature	8.5	中等 Medium	8.5	疏松 Loose	8.5	有 Contain oil	6.5	强 Intrense	6.5
T3	橘黄 Orange	8.4	成熟 Mature	8.3	中等 Medium	8.4	疏松 Loose	8.4	有 Contain oil	6.4	强 Intrense	6.4
T4	橘黄 Orange	8.2	成熟 Mature	8.2	中等 Medium	8.4	疏松 Loose	8.2	有 Contain oil	6.2	强 Intrense	6.3

理中部叶成熟度、油分和色度表现最好。上部叶各处理均呈现叶色橘黄，成熟度适中，叶片结构尚疏松，有油分。T2 处理中部叶油分和色度表现最好。总的来说，T2 处理烤后烟外观质量最好，优于其他处理。

2.5　不同处理对烟叶化学成分的影响

由表 6 可见，施用不同碳源生物炭后，各处理烟叶中烟碱含量显著降低；T2、T3、T4 处理烟叶还原糖、总糖含量显著提高，分别较 CK 提高 7.92%、17.87%、17.05% 和 3.04%、11.96%、11.83%。T4 处理烟叶钾含量显著提高，较 CK 处理高 48.2%。各处理烟叶氯含量无显著差异。T4 处理烟叶内化学成分协调性最佳，糖碱比、钾氯比分别为 13.53、4.81。综合来看，施用不同碳源生物炭后，烟叶化学成分更加协调。

表 6　不同处理下烟叶化学成分

Table 6　Chemical composition of tobacco leaves under different treatments　%

处理 Treatments	烟碱 Nicotine	还原糖 Reducing sugar	总糖 Total sugar	总氮 Total nitrogen	钾 Potassium	氯 Chlorine	糖碱比 Sugar-alkaloid balance	钾氯比 Potassium-chloride balance
CK	2.32±0.34a	23.02±2.36c	28.70±3.13c	2.44±0.16a	1.01±0.04c	0.37±0.01a	10.10±0.60c	2.72±0.05c
T1	2.11±0.42b	23.10±2.43c	28.80±3.26c	2.17±0.11c	0.99±0.09c	0.38±0.01a	11.23±2.57bc	2.61±0.32c
T2	2.12±0.35b	25.00±2.26b	29.60± 3.17bc	2.16±0.18c	1.74±0.14a	0.36±0.01a	11.92±1.61b	4.84±0.32a
T3	2.12±0.22b	28.03±2.35a	32.60±2.73a	2.25±0.15b	1.09±0.10c	0.36±0.01a	13.34±0.24a	3.00±0.20b
T4	2.10±0.36b	27.75±2.11a	32.55±2.75a	2.27±0.12ab	1.65±0.13a	0.34±0.01a	13.53±2.06a	4.81±0.27a

2.6　不同处理对烟叶中性致香物质影响

施用生物炭显著提高各处理下烟叶中性致香物质含量（表 7）。T4 处理的苯丙氨酸类物质含量、类胡萝卜素类含量、新植二烯总量和中性致香物质总量高于其他处理，分别较 CK 提高 34.14%、41.82%、38.55% 和 38.54%。T2 处理棕色化反应产物含量在处理中最高，较 CK 提高 23.84%。T1 处理类西柏烷类物质含量在处理中最高，较 CK 提高 61.40%。综

表7 不同处理下烟叶中性致香物质含量

Table 7 Content of neutral aroma components in tobacco leaves under different treatments μg/g

类型 Type	中性香气物质 Neutral aroma substances	CK	T1	T2	T3	T4
苯丙氨酸类 Phenylalanine-type	苯甲醇 Benzyl alcohol	7.15	8.50	8.73	8.02	8.99
	苯乙醛 Phenylacetaldehyde	3.27	3.82	4.68	4.15	5.00
	苯乙醇 Phenylethanol	2.33	3.32	3.53	2.64	3.04
	苯甲醛 Benzaldehyde	0.52	0.68	0.82	0.67	0.77
	总计 Total	13.27	16.32	17.76	15.48	17.80
棕色化反应产物 Browning reaction product	糠醛 Furfural	10.45	11.23	12.09	11.87	12.43
	糠醇 Furfuryl alcohol	1.23	2.13	2.34	2.46	1.98
	2,6-壬二烯醛 2,6-Nonadienal	0.23	0.24	0.30	0.23	0.22
	藏花醛 Safranal	0.15	0.16	0.18	0.16	0.20
	5-甲基糠醛 5-Methylfurfural	0.34	0.40	0.43	0.40	0.39
	3,4-二甲基-2,5-呋喃二酮 3,4-Dimethyl-2,5-furandione	0.31	0.34	0.40	0.36	0.38
	总计 Total	12.71	14.50	15.74	15.48	15.60
类西柏烷类 Cembrane-type	茄酮 Solanone	28.52	46.03	45.44	38.14	39.14
	总计 Total	28.52	46.03	45.44	38.14	39.14
类胡萝卜素类 Carotenoid-type	β-大马酮 β-Damascenone	25.46	28.00	33.12	36.45	41.73
	二氢猕猴桃内酯 Dihydroactinidiolide	2.01	2.67	3.00	2.74	2.96
	3-羟基-β-二氢大马酮 3-Hydroxy-β-dihydrodamascenone	1.74	2.23	3.08	2.16	2.98
	巨豆三烯酮1 Megastigmatrienone 1	2.12	2.22	2.71	2.41	2.53
	巨豆三烯酮2 Megastigmatrienone 2	6.00	7.12	8.99	8.43	7.83
	巨豆三烯酮3 Megastigmatrienone 3	1.76	1.80	1.90	1.82	1.77
	巨豆三烯酮4 Megastigmatrienone 4	14.48	20.12	19.37	15.96	19.74
	法尼基丙酮 Farnesyl acetone	7.35	7.92	9.51	8.42	9.02
	6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one	0.91	1.21	1.53	1.35	1.44
	6-甲基-5-庚烯-2-醇 6-Methyl-5-hepten-2-ol	0.68	0.72	0.88	0.69	0.76
	香叶基丙酮 Geranyl acetone	2.07	2.33	2.54	2.42	2.23
	螺岩兰草酮 Spirovetivone	0.61	0.76	0.71	0.79	0.80
	愈创木酚 Guaiacol	1.08	1.45	1.99	1.37	1.84
	β-二氢大马酮 β-Dihydrodamascenone	19.95	26.43	27.74	25.88	26.77
	芳樟醇 Linalool	0.48	0.51	0.55	0.49	0.56
	总计 Total	86.70	105.49	117.62	111.38	122.96
	除新植二烯总量 Total excluding neophytadiene	141.20	182.34	196.56	180.48	195.50
	新植二烯总量 Total neophytadiene	861.95	1 063.96	1 131.29	1 032.25	1 194.25
	中性致香物质总量 Total neutral aromatic substances	1 003.15	1 246.30	1 327.85	1 212.73	1 389.75

合来看，T4 处理中性致香物质含量最高（1 389.75 μg/g），T2 处理次之（1 327.85 μg/g）。

2.6　不同处理对烤烟经济性状的影响

施用生物后各处理产量、产值、均价都有提升（表 8）。T4 处理上等烟比例（55%）最高，较 CK 提升 6%。T2 处理产量最高，达 2 100 kg/hm^2，较 CK 处理提高 15.53%。T4 处理产值最高，达 62 269.41 元/hm^2，较 CK 处理提升 23.60%。

表 8　不同处理下烤烟经济性状

Table 8　Economic traits of flue cured tobacco under different treatments

处理 Treatments	上等烟比例/% Proportion of superior cigarettes	产量/(kg/hm^2) Yield	产值/(yuan/hm^2) Output value	均价/(yuan/kg) Average price
CK	49	1 817.65	52 132.94	28.68
T1	51	1 879.41	57 552.35	30.62
T2	48	2 100.00	62 269.41	29.65
T3	57	1 985.29	58 651.76	29.54
T4	55	2 091.18	64 434.71	30.81

3　讨　论

3.1　施用不同碳源生物炭对土壤理化性质的影响

土壤理化性质是影响烟株生长发育和烟叶品质的重要因素。本研究发现，施用生物炭能改变土壤养分状况，特别是能显著提高土壤有效磷、速效钾、有机质含量，这与肖庆礼等[21]的研究结果一致。不同碳源生物炭对土壤养分的改良效果不同[22-24]，本研究中动物性碳源生物炭对土壤中磷、氮等营养元素的提升效果优于植物性碳源，这是由于以动物性碳源为原料制成的生物炭中灰分含量高，施用灰分含量高的生物炭更利于土壤氮素的净矿化作用[25]；而以植物性碳源为原料的生物炭因其具有较高的纤维素、半纤维素、木质素含量，对土壤有机质含量的提升效果要优于动物性碳源[26]。土壤酸碱度是评估土壤质量的关键参数。它直接关系到烟草根系的呼吸作用与生长发育，同时也在很大程度上制约着土壤中矿质养分的有效性、转化过程及释放效率。本研究结果表明，添加生物炭可以显著提高土壤 pH 值，这是由于生物炭本身含有大量的碱性物质、呈碱性，在土壤中能够发生酸碱中和反应，能提升土壤 pH 值[27]。

3.2　施用不同碳源生物炭对烟叶品质及致香物质的影响

施加生物炭可以促进烟草生长发育，本研究发现，施用混合碳源处理（T4）中部叶叶面积较 CK 提高 35.01%。同时，施用生物炭对烟株株型也有正向调控作用。这与琚晨仪等[28]研究结果一致。从烟叶物理性状上来看，植物性碳源生物炭的施用对烟叶的单叶质量及抗张强度的提升效果要优于其他处理；从外观质量上来看，植物性碳源生物炭的施用使叶片成熟度和叶片结构疏松度更好，其外观质量评分最高。这是由于适宜添加量的生物炭能够促进根系生长，有效协调地上部和地下部的比例，提高烟株干物质积累量[29]。

施用不同碳源生物炭可改善叶片内在化学成分协调性，尤其是动物性碳源生物炭施用效果更显著。施用动物性碳源生物炭对烟叶还原糖、总糖含量的影响要显著高于植物性碳源生物炭。这是由于动物性碳源生物炭含有大量的羟基磷酸钙，较其他生物炭具有更多的养分物质。另一方面，动物性碳源生物炭的多孔结构和亲水特性可以降低土壤氮素挥发及土壤磷固化带来的损失[30]。因此，动物性碳源生物炭在提升植烟土壤养分含量及促进烟叶内在成分协调方面要优于其他生物炭。烟草是典型的喜钾作物，烟叶钾含量不仅参与烟草生长发育的多种生理过程，在增强烟叶对各种胁迫的耐受性方面也起着重要作用，钾含量是衡量烟叶品质的重要指标之一[31]。研究发现，植物性碳源生物炭对烟叶钾含量提升效果显著优于动物性碳源生物炭，这是由于植物原料本身含有较高的钾元素。以 700 ℃热解制备的玉米秸秆生物炭为例，通过测量生物炭中的钾含量和秸秆热解过程中钾的转化率，发现最活跃和高效的钾供应能力可达到 33.6 g/kg[32]。因此将植物性碳源生物炭施入土壤后，能显著提升土壤速效钾含量，从而显著提高烟叶钾含量。

施用不同碳源生物炭均可以显著提高烟叶内中性致香物质类苯丙氨酸、类西柏烷和新植二烯含量。此外，生物炭的施用对烟叶的质体色素含量影响明显，且叶绿素和类胡萝卜素是烟叶重要的香气前体物质[33]。因此，施用生物炭可以显著提高烟叶香气成分。

3.3 施用不同碳源生物炭对烤烟经济性状的影响

本研究发现，施用热解生物炭和动物性碳源生物炭可提高烤烟上等烟比例及产量，且施用植物性碳源生物炭对烤烟产量的增加效果最佳，而施用动物性碳源生物炭对烟叶品质的促进作用最为显著。综合来看施用混合碳源生物炭产值最大、均价最高。

综上，本研究结果表明，施用生物炭能促进烟株生长发育，改善土壤理化性质和促进烟叶生长。植物性碳源生物炭对理化性质的影响更为显著，动物性碳源生物炭对烟草生长发育及烟叶品质的提升作用最佳。在生产实践中，可根据实际需求添加合适的碳源生物炭，以改善土壤条件，并促进烟草生长发育和改善烟叶品质。

参考文献 References

[1] 陈温福，张伟明，孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学，2013，46(16)：3324-3333. CHEN W F，ZHANG W M，MENG J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. Scientia agricultura sinica，2013，46(16)：3324-3333 (in Chinese with English abstract).

[2] ZHANG Y F，WANG J M，FENG Y. The effects of biochar addition on soil physicochemical properties：a review[J/OL]. CATENA，2021，202：105284[2025-03-05]https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105284.

[3] 刘国顺，罗贞宝，王岩，等. 绿肥翻压对烟田土壤理化性状及土壤微生物量的影响[J]. 水土保持学报，2006，20(1)：95-98. LIU G S，LUO Z B，WANG Y，et al. Effect of green manure application on soil properties and soil microbial biomass in tobacco field[J]. Journal of soil and water conservation，2006，20(1)：95-98 (in Chinese with English abstract).

[4] 张翼，张长华，王振民，等. 连作对烤烟生长和烟地土壤酶活性的影响[J]. 中国农学通报，2007，23(12)：211-215. ZHANG Y，ZHANG C H，WANG Z M，et al. The effects on the yields of flue-cured tobacco and activities of main soil enzymes[J]. Chinese agricultural science bulletin，2007，23(12)：211-215 (in Chinese with English abstract).

[5] 冯慧琳，徐辰生，何欢辉，等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. 环境科学，2021，42(1)：422-432. FENG H L，XU C S，HE H H，et al. Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism[J]. Environmental science，2021，42(1)：422-432 (in Chinese with English abstract).

[6] 李茂森，王丽渊，杨波，等. 生物炭对烤烟成熟期根际真菌群落结构的影响及功能预测分析[J]. 农业资源与环境学报，2022，39(5)：1041-1048. LI M S，WANG L Y，YANG B，et al. Effects of biochar on fungal community structure and function on flue cured tobacco[J]. Journal of agricultural resources and environment，2022，39(5)：1041-1048 (in Chinese with English abstract).

[7] 袁贵林，黄瑞寅，刘兰，等. 绿肥与生物炭对土壤养分及烤烟农艺和光合特性的影响[J]. 中国烟草科学，2024，45(6)：65-72. YUAN G L，HUANG R Y，LIU L，et al. Effects of green manure and biochar on soil nutrients and agronomic and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco[J]. Chinese tobacco science，2024，45(6)：65-72 (in Chinese with English abstract).

[8] BAI J Z，HUANG Y M，BAI Y X，et al. Impact of straw-biochar amendments on microbial activity and soil carbon dynamics in wheat-maize system[J/OL]. Soil and tillage research，2024，244：106284[2025-03-05]. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106284.

[9] 张文丽，林启美，李贵桐，等. 生物炭对两种植烟土壤活性有机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料，2022(9)：59-66. ZHANG W L，LIN Q M，LI G T，et al. Effects of biochar on liable organic carbon in two tobacco growing soils[J]. Soil and fertilizer sciences in China，2022(9)：59-66 (in Chinese with English abstract).

[10] 黄涛，胡林潮，吴佳楠，等. 不同热解温度牛骨生物炭特征及对Cd^{2+}的吸附[J]. 农业环境科学学报，2023，42(7)：1632-1644. HUANG T，HU L C，WU J N，et al. Characteristics of bovine bone biochar at different pyrolysis temperatures and its adsorption of Cd^{2+}[J]. Journal of agro-environment science，2023，42(7)：1632-1644 (in Chinese with English abstract).

[11] 李璐，权蔚慈，吴雨茜，等. 生物炭基缓释肥制备技术与农业应用的研究进展[J]. 中国环境科学，2025，45(3)：1496-1506. LI L，QUAN W C，WU Y X，et al. Research progress on biochar-based slow-release fertilizer preparation technology and agricultural application[J]. China environmental science，2025，45(3)：1496-1506 (in Chinese with English abstract).

[12] SUN T，SUN Y B，HUANG Q Q，et al. Sustainable exploitation and safe utilization of biochar：multiphase characterization and potential hazard analysis[J/OL]. Bioresource technology，2023，383：129241[2025-03-05]. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129241.

[13] 王煌平，张青，章赞德，等. 不同热解温度限氧制备的畜禽粪便生物炭养分特征[J]. 农业工程学报，2018，34(20)：233-239. WANG H P，ZHANG Q，ZHANG Z D，et al. Nutrient characteristics of biochar prepared from animal manures at different temperature with limited oxygen[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(20)：233-239 (in Chinese with English abstract).

[14] CHEN L M，SUN S L，YAO B，et al. Effects of straw return and straw biochar on soil properties and crop growth：a review[J/OL]. Frontiers in plant science，2022，13：986763[2025-03-05]. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.986763.

[15] 杨焕焕，李茂森，王丽渊，等. 生物炭对烤烟成熟期土壤养分及根际细菌群落结构的影响[J]. 华中农业大学学报，2021，40(5)：62-71. YANG H H，LI M S，WANG L Y，et al. Ef-

fects of biochar on soil nutrients and rhizosphere bacterial community structure of flue-cured tobacco at maturity stage[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 62-71 (in Chinese with English abstract).

[16] 冯慧琳.生物炭对烤烟矿质营养及根际土壤微生态的影响研究[D].郑州:河南农业大学,2021.FENG H L.Research on the effects of biochar on mineral nutrition of flue-cured tobacco and the rhizosphere soil microecology[D].Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021 (in Chinese with English abstract)..

[17] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000. LU R K.Methods for soil agro-chemical analysis[M].Beijing: China Agricultural Science and Technology Press,2000(in Chinese)

[18] 刘国顺,乔新荣,王芳,等.光照强度对烤烟光合特性及其生长和品质的影响[J].西北植物学报,2007,27(9):1833-1837. LIU G S,QIAO X R,WANG F,et al.Effects of light intensity on photosynthetic capabilities, growth and quality of flue-cured tobacco [J]. Acta botanica boreali-occidentalia sinica, 2007,27(9):1833-1837 (in Chinese with English abstract).

[19] 史宏志,刘国顺,谢子发,等.不同产地白肋烟中性香气成分及生物碱组成和含量分析[J].中国烟草学报,2008,14(4): 23-27. SHI H Z,LIU G S,XIE Z F,et al.Comparison of composition and contents of neutral aroma components and alkaloids between burley tobaccos from different producing areas [J].Acta tabacaria sinica,2008,14(4):23-27 (in Chinese with English abstract).

[20] 敖金成, 赵剑华, 戴勋, 等.有机种植方式对烟叶产量和内在品质的影响[J]. 福建农业学报, 2012, 27(6): 606-610. AO J C,ZHAO J H,DAI X,et al. Effect of organic cultivation on yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Fujian journal of agricultural sciences, 2012, 27(6): 606-610(in Chinese with English abstract).

[21] 肖庆礼,李学芹,魏子博,等.生物炭对植烟土壤养分和碳矿化的影响[J].中国烟草学报,2024,30(6):78-86. XIAO Q L,LI X Q,WEI Z B,et al.Effects of biochar on soil nutrient and carbon mineralization in tobacco-planting soil[J].Acta tabacaria sinica,2024,30(6):78-86 (in Chinese with English abstract).

[22] PUGA A P,GRUTZMACHER P,CERRI C E P,et al.Biochar-based nitrogen fertilizers: greenhouse gas emissions, use efficiency, and maize yield in tropical soils[J/OL].Science of the total environment, 2020, 704: 135375 [2025-03-05]. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135375.

[23] LIU W B,TANG Y X,MA J W,et al.Effects of biochar and inorganic amendments on soil fertility,tea yield,and quality in both Pb - Cd-contaminated and acidified tea plantations[J]. Journal of soils and sediments,2023,23(9):3275-3284.

[24] 郭文杰,邵前前,杜健,等.不同温度热解牛骨炭对菜园土壤磷素转化及小白菜产量的影响[J].土壤通报,2019,50(6): 1391-1399. GUO W J,SHAO Q Q,DU J,et al.Effects of bovine bone carbonchar pyrolyedat different temperatures on phosphorus transformation and bioavailability of vegetable soil [J].Chinese journal of soil science, 2019, 50(6): 1391-1399 (in Chinese with English abstract).

[25] 赵维彬,唐丽,王松,等.两种生物炭对滨海盐碱土的改良效果[J].生态环境学报,2023,32(4):678-686. ZHAO W B, TANG L,WANG S,et al.Improvement effect of two biochars on coastal saline-alkaline soil[J].Ecology and environmental sciences,2023,32(4):678-686 (in Chinese with English abstract).

[26] AZEEM M,SHAHEEN S M,ALI A,et al.Removal of potentially toxic elements from contaminated soil and water using bone char compared to plant- and bone-derived biochars:a review[J/OL].Journal of hazardous materials, 2022, 427: 128131[2025-03-05].https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128131.

[27] 廖珠珠,郑梅迎,姚峰,等.生物炭基肥对植烟土壤养分及根际真菌群落结构与功能影响分析[J].中国土壤与肥料,2024(5):39-47. LIAO Z Z,ZHENG M Y,YAO F,et al.Effects of biochar-based fertilizer on soil nutrients and rhizosphere fungi community structure and function in tobacco planting soil[J]. Soil and fertilizer sciences in China,2024(5):39-47 (in Chinese with English abstract).

[28] 琚晨仪,王珍珍,肖庆礼,等.生物炭添加对重庆山区烟田土壤理化性质和烤烟生长、产量及产值的影响[J].水土保持通报,2024,44(4):205-214. JU C Y,WANG Z Z,XIAO Q L, et al.Effects of different biochar additions on soil physicochemical properties and tobacco growth, yield, and output value in Chongqing mountainous region[J].Bulletin of soil and water conservation,2024,44(4):205-214 (in Chinese with English abstract).

[29] 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. LI Q S, WANG D Q, DU C Y, et al.Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers and biochar on the growth and development of flue-cured tobacco and leaf quality[J].Chinese journal of soil science, 2021, 52(6):1393-1401 (in Chinese with English abstract).

[30] LI H Y, ZHOU C, WANG L H, et al.A novel eco-friendly bamboo-based composite biochar for effective removing oxytetracycline hydrochloride[J/OL].Advanced composites and hybrid materials, 2024, 8(1): 91[2025-03-05].https://doi.org/10.1007/s42114-024-01186-w.

[31] CHEN X Y,WANG P P,AI S L,et al.Response of cigar tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) varieties to low potassium stress and dissecting biochemical determinants of low potassium tolerance mechanism[J].Journal of crop health, 2024, 76(5):1249-1262.

[32] XIU L Q,GU W Q,SUN Y Y,et al.The fate and supply capacity of potassium in biochar used in agriculture[J/OL].The

science of the total environment, 2023, 902: 165969[2025-03-05].https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165969.

[33] 闫伸.生物炭对土壤碳氮循环及烟叶中性致香物质影响机制研究[D].郑州:河南农业大学, 2020. YAN S.Study on the mechanism of biochar on soil carbon and nitrogen cycle and neutral aroma components in tobacco leaves[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).

Response of growth and development of tobacco, and quality of tobacco leaves in Southern Anhui to different types of biochar

HUANG Zhihong[1], WANG Xueying[2], CHEN Jian[3], SHEN Yi[3], RAN Fafen[2], CHENG Xuewen[2], REN Tianbao[1], DAI Zhiyuan[3], XUE Lin[2]

1. *Henan Province Biochar Research Engineering Technology Center/Henan Province Engineering Laboratory of Biochar Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China*; 2. *Southern Anhui Tobacco Co., Ltd., Xuancheng* 242000, *China*; 3. *Shanghai Tobacco Group Co., Ltd, Shanghai 200082, China*

Abstract The flue-cured tobacco Yunyan 87 was used to study the physicochemical properties of tobacco planting soil and the response of the growth, development of tobacco, and the quality of tobacco leaves to different types of biochar. The effects of different types of biochar on the growth, development of tobacco, and the quality of tobacco leaves in Southern Anhui were identified by setting up treatments including conventional fertilization (CK), conventional fertilization + pyrolysis biochar (T1), conventional fertilization + plant-based biochar (T2), conventional fertilization + animal-based biochar (T3), and conventional fertilization + mixed types of biochar (T4). The results showed that T2 significantly increased the content of available phosphorus and potassium in the soil by 26.80% and 17.84%, respectively. T3 had the best coordination of chemical composition in tobacco leaves, with sugar-alkaloid balance and potassium-chloride balance of 13.53 and 4.81, respectively. Based on the contribution rate of biochar to the yield and output value of tobacco, T4 increased the output value per hectare by 23.60%. The results showed that the application of biochar can promote tobacco plant development, improve soil physical and chemical properties, and enhance tobacco leaf growth; plant-based biochar has a more significant impact on physical and chemical properties, while animal-based biochar exhibits the best effect in promoting tobacco growth and development as well as improving tobacco leaf quality. In production practice, appropriate carbon source biochar can be added according to actual needs to improve soil conditions, and further promote tobacco growth and development and enhance tobacco leaf quality.

Keywords biochar; components of carbon source; physicochemical properties of soil; tobacco; quality of tobacco leaves

(责任编辑:张志钰)