

# 炭载解钾菌对土壤钾素有效性及烤烟品质的影响

唐小雨<sup>1</sup>,李冰<sup>1</sup>,王宇森<sup>1</sup>,蔡艳<sup>1</sup>,张宗锦<sup>2</sup>

(1 四川农业大学 资源学院,四川 成都 611130;2 四川省烟草公司攀枝花市公司,四川 攀枝花 617000)

**【摘要】**【目的】探究生物炭负载解钾菌(简称炭载解钾菌)对土壤钾素形态转化、烤烟钾素吸收及烟叶品质的影响。【方法】以川西南烟区常见紫色土为研究对象,设置常规施肥(CK)、生物炭(BC)、解钾菌(KSB)及生物炭负载解钾菌(BC+KSB)4个处理,对不同处理烤烟根际土壤和非根际土壤的钾素形态含量、烤烟生长发育及烟叶化学成分进行定量分析。【结果】与CK相比,BC处理烤烟根际土壤速效钾含量显著提升41.51%,而缓效钾含量显著降低6.78%( $P<0.05$ );KSB处理烤烟根际土壤速效钾含量和烤烟钾吸收总量分别显著提高8.54%和16.09%( $P<0.05$ ),但钾素活化效果有限。BC+KSB处理表现出显著协同优势,其根际土壤有效钾含量较BC处理提升13.46%,并显著弱化了根际与非根际钾形态的差异( $P<0.05$ );烤烟株高、茎围、干物质积累量较KSB处理增幅达6.74%~12.36%,钾吸收总量显著提升17.99%( $P<0.05$ );同时烟叶糖碱比、钾氯比更趋适宜,化学成分协调性显著改善。【结论】炭载解钾菌可通过协同作用促进土壤缓效钾向有效态转化,优化根际养分分布,显著提升烤烟钾素吸收效率及烟叶品质,综合效果明显优于单一施用。

**【关键词】** 烤烟;生物炭;解钾菌;钾素形态;钾吸收量;川西南烟区

**【中图分类号】** S527.44

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2027)03-0139-08

## Effects of biochar-loaded potassium-solubilizing bacteria on soil potassium availability and flue-cured tobacco quality

Tang Xiaoyu<sup>1</sup>, Li Bing<sup>1</sup>, Wang Yusen<sup>1</sup>, Cai Yan<sup>1</sup>, Zhang Zongjin<sup>2</sup>

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China;

2 Panzhihua Branch of Sichuan Tobacco Company, Panzhihua, Sichuan 617000, China)

**Abstract:** 【Objective】 This study aims to investigate the effects of biochar-loaded potassium-solubilizing bacteria on the transformation of soil potassium fractions, potassium uptake by flue-cured tobacco, and tobacco leaf quality. 【Method】 Taking the typical purple soil in the tobacco-growing areas of southwestern Sichuan as the experimental material, four treatments were established: conventional fertilization (CK), biochar (BC), potassium-solubilizing bacteria (KSB), and biochar-loaded potassium-solubilizing bacteria (BC+KSB). Quantitative analyses were performed to determine the contents of various potassium fractions in rhizosphere and non-rhizosphere soils, as well as the growth performance and leaf chemical components of flue-cured tobacco under different treatments. 【Result】 Compared with CK, BC treatment significantly increased the readily available potassium content in flue-cured tobacco rhizosphere soil by 41.51%, while decreasing slowly available potassium content by 6.78% ( $P<0.05$ ). KSB treatment significantly increased readily available potassium content in rhizosphere soil and total potassium uptake of flue-cured tobacco by 8.54% and 16.09%, respectively ( $P<0.05$ ), though its potassium activation effect was limited. BC+KSB treatment exhibited significant synergistic effects.

【收稿日期】 2026-02-06 【修回日期】 2026-04-09

【基金项目】 国家重点研发计划项目(2023YFD1901202);四川省烟草公司科技项目(SCYC202303)

【作者简介】 唐小雨(2001—),女,四川绵阳人,在读硕士,主要从事土壤肥力与植物营养研究。E-mail:txy010602@163.com

【通信作者】 蔡艳(1976—),女,四川达州人,副教授,主要从事土壤肥力与植物营养研究。E-mail:caiyya@126.com

The available potassium content in its rhizosphere soil was 13.46% higher than that of BC treatment, and the difference in potassium fractions between rhizosphere and non-rhizosphere soils was significantly narrowed ( $P < 0.05$ ). Compared with KSB treatment, plant height, stem girth and dry matter accumulation of flue-cured tobacco increased by 6.74%—12.36%, and total potassium uptake was significantly elevated by 17.99% ( $P < 0.05$ ). Meanwhile, the sugar-nicotine and potassium-chloride ratios of tobacco leaves became more appropriate, and the coordination of chemical components was significantly improved. 【Conclusion】 Biochar-loaded potassium-solubilizing bacteria can promote the transformation of soil slowly available potassium into available fractions and optimize rhizosphere nutrient distribution via synergistic effects, thereby significantly improving potassium uptake efficiency and leaf quality of flue-cured tobacco. Its comprehensive effect is distinctly superior to single treatments.

**Key words:** flue-cured tobacco; biochar; potassium-solubilizing bacteria; potassium fractions; potassium accumulation; southwestern Sichuan tobacco-growing areas

钾素是烤烟及其他植物正常生长必需的大量元素之一<sup>[1]</sup>,同时也是限制我国优质烤烟生产的重要因素。研究表明,提高土壤钾有效性并增加烤烟钾吸收量,可明显延长烟草燃烧时间,提高燃烧效率,降低烟气中有害成分,还可通过控制颗粒物的数量来改善烟气质量<sup>[2]</sup>。土壤是植物吸收钾素的主要来源,而我国耕地土壤缺钾面积达60%<sup>[3]</sup>。紫色土是川西南烟区典型的植烟土壤,其主要黏土矿物为蒙脱石和水云母,钾含量丰富但有效性不高<sup>[4]</sup>,且南方高温多雨加剧了钾素流失,导致土壤中能被烤烟直接吸收利用的钾素有限,难以满足烤烟生长需求。

为了提高土壤钾含量,农民会大量施用化学钾肥,但此种做法不仅施肥成本高,还可能会导致土壤结构受损、板结和酸化,使土壤持续生产的能力降低<sup>[5]</sup>。研究表明,生物炭可通过改良土壤物理结构、降低速效钾淋失风险等途径,直接提升土壤钾素有效性<sup>[6]</sup>。解钾菌能针对性活化土壤中固定态钾,显著增强钾素的可利用性<sup>[7]</sup>。然而,单一施用解钾菌进入土壤,其存活率会大大降低。生物炭因具有复杂的孔隙结构、强吸附力、具有生物膜网络结构等特点被认为是微生物的最佳载体材料<sup>[8]</sup>。Hale等<sup>[9]</sup>研究发现,生物炭可以作为载体吸附植物根际促生菌 *Enterobacter cloacae* UW5,并将其带入土壤后能增加其存活率,显著提高微生物肥料的施用效果。但目前关于解钾菌负载于生物炭的土壤和生物效应研究鲜见报道。为此,本研究以紫色土为试验对象,探究生物炭负载解钾菌在提升土壤钾素有效性、优化烟叶品质方面的作用,为解决川西南烟区优质烤烟生产的钾素限制问题提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

生物炭:由平昌县灵峰农业开发有限公司制备,系玉米秸秆在600~700℃下裂解而成,其基本性质为pH 10.60,全碳含量474.40 g/kg,全氮含量9.00 g/kg,全磷含量1.85 g/kg,全钾含量44.70 g/kg。

解钾菌:系实验室自主筛选,经16S RNA鉴定为 *Erwinia rhapontici* sp.,编号为XJL01。

解钾菌菌液:解钾菌经胰蛋白胨大豆肉汤培养基活化,30℃恒温恒湿培养至含菌量为 $1.0 \times 10^{12}$  CFU/mL。

生物炭负载解钾菌:称取500 g生物炭装瓶,用去离子水湿润,121℃高温高压湿热灭菌30 min,冷却后接入50 mL解钾菌菌液并混匀,30℃恒温恒湿培养至解钾菌数量达 $1.0 \times 10^{12}$  CFU/g。

供试烤烟:云烟87,是当地主栽品种之一。

供试土壤:试验地位于攀枝花市仁和区,该地属亚热带为基带的立体气候,夏季长,四季不分明,旱、雨季分明;年均气温16℃,年平均日照时数2 930 h,年平均降水量1 000 mm,年均无霜期300 d。供试土壤为紫色土,其基本肥力指标为pH 7.13,有机质含量19.87 g/kg,全氮含量0.73 g/kg,有效磷含量11.31 mg/kg,速效钾含量86.32 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验设置CK(常规施肥)、BC(施用生物炭80 g/株)、KSB(施用解钾菌菌液8 mL/株)、BC+KSB(施用负载解钾菌的生物炭80 g/株)4个处理。生物炭、KSB及生物炭负载解钾菌均于烤烟移栽前10 d施于烟窝中心处。化肥于烤烟移栽时、移栽后7~

10 d 和 30 d 分 3 次施用,所有处理 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 施用量分别为 97.5、150、315 kg/hm<sup>2</sup>。每个处理 3 次重复,共 12 个小区,小区面积 80 m<sup>2</sup> (2 m×40 m),烟株的株行距 0.50 m×1.10 m,田间随机区组排列。其他管理措施参照当地烤烟生产技术标准进行。

### 1.3 样品采集与处理

试验前在试验地按“S”形采集混合土样测定基本肥力指标,取样深度 0~20 cm。在烤烟成熟期采集土样和植物样:每个小区随机选取 3 株烟株,田间测量其农艺性状指标后采样;采用抖根法将烟株根际土与非根际土分开采集,带回实验室,挑去植物残根和石块,置阴凉处自然风干、磨细,分别过孔径 2 000 和 250 μm 标准筛备用;植物样用自来水和蒸馏水洗净后,分部位(根、茎和叶)于 105 ℃ 下杀青,80 ℃ 烘干至质量恒定,粉碎后过孔径 250 μm 标准筛待用。其他烟株按小区采收,初烤后选取 C2F 等级烟样 5 kg,40 ℃ 烘干,粉碎后过孔径 250 μm 标准筛备用。

### 1.4 测定指标及方法

1.4.1 土壤钾素形态测定 速效钾含量采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定,有效钾含量采用 HNO<sub>3</sub>(冷)浸提-火焰光度法测定,缓效钾含量采用 1 mol/L HNO<sub>3</sub>(热)浸提-火焰光度法测定。

根际富集率=[(根际土钾含量-非根际土钾含量)/非根际土钾含量]×100%<sup>[10]</sup>。

1.4.2 烟草农艺性状测定 株高、茎围、叶片数、最大叶长、最大叶宽等按照《烟草农艺性状调查测量方法》<sup>[11]</sup>测量,干物质积累量采用称重法测定。

1.4.3 烟叶钾含量测定 采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮-火焰光度法测定,各部位钾素吸收量为钾含量与各部位干物质质量的乘积,全株钾吸收总量为各部位钾吸收量之和。

1.4.4 烟叶化学成分测定 采用多功能近红外光谱仪检测烟叶中总糖、还原糖、总氮、烟碱、氯和钾化学成分含量<sup>[12]</sup>,并计算糖碱比(总糖含量/烟碱含量)、氮碱比(总氮含量/烟碱含量)、钾氯比(钾含量/氯含量)。

### 1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2024 和 Origin 2022 进行试验数据处理及绘图,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验处理间的差异显著性,多重比较采用邓肯新复极差法;多因素方差分析(two-way ANOVA)考察各变量的主效应与交互效应,多重比较采用最小显著差异法(LSD)。

## 2 结果与分析

### 2.1 炭载解钾菌对土壤各形态钾含量的影响

土壤速效钾、有效钾、缓效钾含量分别反映土壤短期、综合及长期的供钾能力<sup>[13]</sup>。方差分析结果(图 1)表明,从主效应看,试验处理对土壤速效钾、有效钾及缓效钾含量均有显著影响,而土壤区位仅对速效钾和有效钾含量影响显著;从交互效应看,试验处理与土壤区位的交互作用对土壤缓效钾及有效钾含量有显著影响。

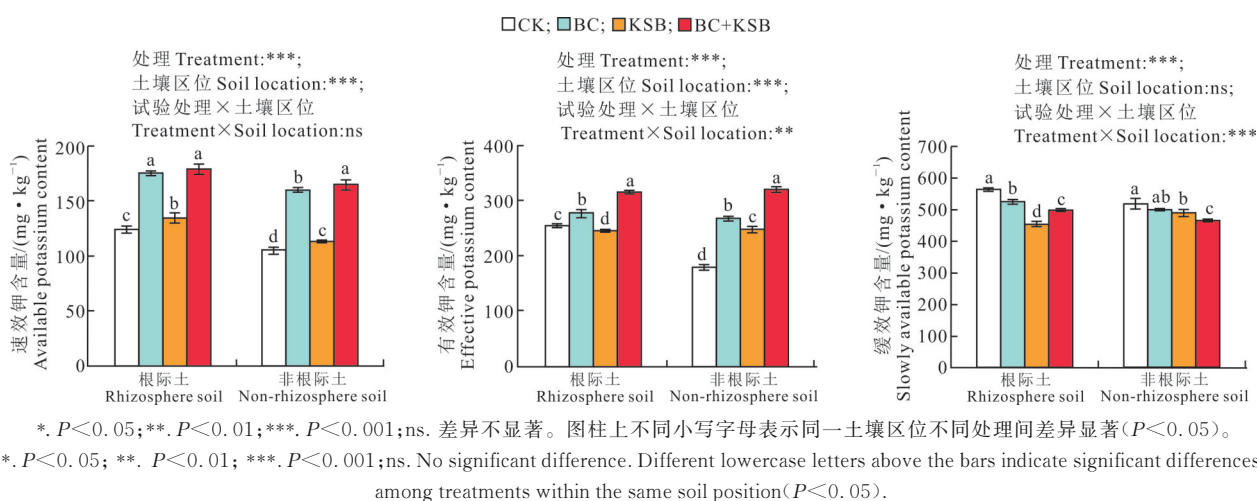


图1 炭载解钾菌对烤烟根际土和非根际土各形态钾含量的影响

Fig. 1 Effects of biochar-loaded potassium-solubilizing bacteria on contents of various potassium fractions in rhizosphere and non-rhizosphere soils of flue-cured tobacco

从图 1 可知,与 CK 相比,BC、KSB 处理显著促进了土壤速效钾和有效钾含量增长,且 BC、KSB 处

理根际土速效钾含量分别较 CK 显著提高了 41.51% 和 8.54%,而缓效钾含量分别显著降低了

6.78%和19.11%;BC+KSB处理在单施生物炭及解钾菌的基础上进一步强化了钾素活化效果,其根际土壤有效钾含量较BC处理增加13.46%,缓效钾含量较BC处理显著降低5.20% ( $P<0.05$ )。与KSB处理相比,BC+KSB处理根际土壤速效钾、有效钾含量分别显著增加33.29%和28.47%。非根际土壤的钾含量变化规律与根际土壤相似,但非根际土壤速效钾和有效钾含量显著低于根际土壤。上述结果表明,生物炭与解钾菌均能有效活化土壤钾素,促进缓效钾

向速效钾转化,二者配施可产生显著协同增效作用,对土壤钾素的活化效果优于单独施用。

根际富集率的大小反映了土壤性状值在植物根际的富集程度,炭载解钾菌对烤烟根际土壤各形态钾富集率的影响如表1所示。由表1可知,CK处理根际土壤速效钾富集率显著高于BC和BC+KSB处理;CK有效钾根际富集率远远高于其他处理,且KSB、BC+KSB处理有效钾呈根际亏缺状态;缓效钾根际富集率仅在KSB处理为负值。

表1 炭载解钾菌对烤烟根际土壤各形态钾富集率的影响

Table 1 Effects of biochar-loaded potassium-solubilizing bacteria on enrichment ratios of various potassium fractions in flue-cured tobacco rhizosphere soil

| 处理<br>Treatment | 富集率/% Enrichment ratio          |                         |                                |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
|                 | 速效钾 Readily available potassium | 有效钾 Available potassium | 缓效钾 Slowly available potassium |
| CK              | 17.95±6.10 a                    | 41.65±3.54 a            | 8.44±4.52 a                    |
| BC              | 9.64±1.85 b                     | 3.62±2.10 b             | 5.07±1.02 a                    |
| KSB             | 18.87±4.30 a                    | -0.99±2.63 b            | -7.33±0.61 b                   |
| BC+KSB          | 8.67±2.37 b                     | -1.49±1.39 b            | 7.27±1.13 a                    |

注:同列数据后标不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

2.2 炭载解钾菌对烤烟生长发育的影响

农艺性状在一定程度上能够直观反映烤烟的

质量,同时对其经济产量具有潜在预示作用。炭载解钾菌对烤烟农艺性状的影响如表2所示。

表2 炭载解钾菌对烤烟农艺性状的影响

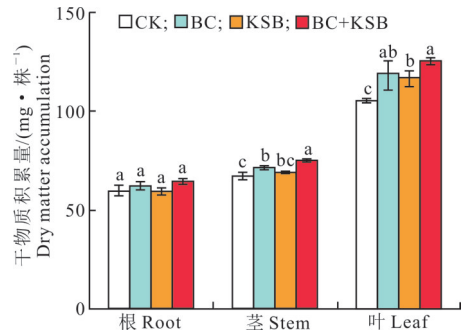
Table 2 Effects of biochar-loaded potassium-solubilizing bacteria on agronomic traits of flue-cured tobacco

| 处理<br>Treatment | 株高/cm<br>Plant height | 茎围/cm<br>Stem girth | 最大叶长/cm<br>Maximum leaf length | 最大叶宽/cm<br>Maximum leaf width | 叶片数<br>Number of leaves |
|-----------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| CK              | 81.99±1.00 c          | 10.01±0.55 c        | 64.80±2.32 c                   | 21.78±1.87 b                  | 22.33±0.58 c            |
| BC              | 102.71±1.78 b         | 11.36±0.41 b        | 76.61±4.52 ab                  | 34.84±3.41 a                  | 25.67±0.58 a            |
| KSB             | 100.97±1.74 b         | 11.12±0.78 b        | 73.11±3.57 b                   | 34.01±0.78 a                  | 24.00±0.00 b            |
| BC+KSB          | 107.78±0.50 a         | 12.78±0.53 a        | 82.15±1.43 a                   | 37.56±0.66 a                  | 26.00±0.00 a            |

由表2可知,施用生物炭、解钾菌均可促进烤烟生长,烤烟各农艺性状指标较CK显著增加7.48%~59.96%,且对烤烟各农艺性状指标的影响程度表现为最大叶宽>株高>最大叶长≈茎围≈叶片数,且BC处理烤烟的叶片数显著高于KSB处理 ( $P<0.05$ )。BC+KSB处理在单施生物炭与解钾菌的基础上进一步强化了对烤烟的促生作用,与KSB处理相比,BC+KSB处理烤烟的株高、茎围、最大叶长分别显著增加6.74%,14.93%,12.36% ( $P<0.05$ )。

由图2可知,施用生物炭显著促进了烤烟茎、叶部干物质的积累,施用解钾菌仅显著促进烤烟叶部干物质的积累,但施用生物炭和解钾菌对烤烟根部干物质的积累量均无显著促进作用。与CK相比,BC和KSB处理烤烟叶部干物质的积累量分别显著增加了13.00%和11.04% ( $P<0.05$ )。BC+KSB处理进一步促进了烤烟各部位干物质积累,与KSB

处理相比,BC+KSB处理烤烟茎和叶部干物质的积累量分别显著增加了8.80%和7.15% ( $P<0.05$ )。



图柱上不同小写字母表示同一器官不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments for the same organ ( $P<0.05$ ).

图2 炭载解钾菌对烤烟干物质积累量的影响

Fig. 2 Effects of biochar-loaded potassium-solubilizing bacteria on dry matter accumulation of flue-cured tobacco

2.3 炭载解钾菌对烤烟钾素吸收积累的影响

炭载解钾菌对烤烟各部位钾吸收量的影响如图 3 所示。

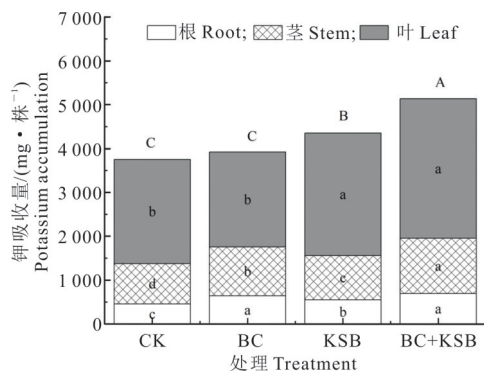


图 3 炭载解钾菌对烤烟各部位钾吸收量的影响  
Fig. 3 Effects of biochar-loaded potassium-solubilizing bacteria on potassium uptake in different parts of flue-cured tobacco

由图 3 可知,与 CK 相比,BC 处理烤烟的根、茎部钾吸收量分别显著增加了 40.59% 和 20.96%,叶部钾吸收量无显著差异;KSB 处理烤烟的根、茎、叶部钾吸收量分别显著增加 12.02%,9.33% 和 17.81%,且钾吸收总量显著增加了 16.09% ( $P<0.05$ )。生物炭负载解钾菌处理对烤烟各部位钾吸

收量皆有不同程度的促进作用,与 KSB 处理相比,其烟株根、茎部钾吸收量及钾吸收总量分别显著增加 14.10%,25.29%,17.99% ( $P<0.05$ )。

2.4 炭载解钾菌对烤烟烟叶品质的影响

一般认为,优质烤烟要求总糖含量达到 18%~22%,还原糖含量 16%~20%,总氮含量 1.5%~3.5%,烟碱含量 1.5%~3.5%,氯含量 0.3%~0.8%,钾含量  $>2\%$ ,糖碱比 8~12,氮碱比 1 左右,钾氯比  $>4$  为宜<sup>[14-15]</sup>。炭载解钾菌对烤烟烟叶化学成分的影响如表 3 所示。由表 3 可知,除 CK 外,各施肥处理烤烟总糖含量均大于 18.00%,处于适宜范围;而还原糖含量整体偏低。各施肥处理烤烟中烟碱含量为 2.28%~3.13%,氯含量为 0.33%~0.53%,均在最适范围内。除 CK 外,各施肥处理烤烟中总氮含量均达到适宜范围。除 BC 处理烟叶钾含量较低外,其余处理烟叶钾含量均大于 2.00% 且处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。各处理烟叶糖碱比偏低,仅 BC+KSB 处理烟叶的糖碱比处于适宜范围,但不同处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。烤烟杂气和刺激性大小受到氮碱比的影响,由表 3 可知,除 CK 外,其余处理烟叶氮碱比均在 1 左右,且处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。钾氯比在一定程度上表征烟叶的燃烧性,由表 3 可知,仅 BC 处理烟叶钾氯比 (3.79) 未达到适宜范围,其他处理烟叶钾氯比均大于 4,且处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。

表 3 炭载解钾菌对烟叶化学成分的影响

| Table 3 Effects of biochar-loaded potassium-solubilizing bacteria on chemical components of flue-cured tobacco leaves |                               |                                   |                            |                                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 处理<br>Treatment                                                                                                       | 总糖含量/%<br>Total sugar content | 还原糖含量/%<br>Reducing sugar content | 烟碱含量/%<br>Nicotine content | 总氮含量/%<br>Total nitrogen content | 氯含量/%<br>Chlorine content |
| CK                                                                                                                    | 16.09±0.06 b                  | 8.90±1.25 b                       | 2.50±0.88 a                | 1.44±0.38 b                      | 0.33±0.12 b               |
| BC                                                                                                                    | 18.37±0.03 a                  | 9.37±1.40 b                       | 2.76±0.47 a                | 2.65±0.28 a                      | 0.49±0.08 ab              |
| KSB                                                                                                                   | 18.02±0.75 a                  | 8.45±0.87 b                       | 3.13±0.41 a                | 2.28±0.32 a                      | 0.53±0.09 a               |
| BC+KSB                                                                                                                | 18.53±0.14 a                  | 15.75±1.14 a                      | 2.28±0.11 a                | 2.46±0.10 a                      | 0.33±0.09 b               |

| 处理<br>Treatment | 钾含量/%<br>Potassium content | 糖碱比<br>Sugar-Nicotine ratio | 氮碱比<br>Nitrogen-Nicotine ratio | 钾氯比<br>Potassium-Chlorine ratio |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| CK              | 2.25±0.18 a                | 6.92±2.11 a                 | 0.65±0.34 b                    | 7.70±3.31 a                     |
| BC              | 1.81±0.23 b                | 6.78±1.06 a                 | 0.98±0.18 ab                   | 3.79±0.95 a                     |
| KSB             | 2.39±0.16 a                | 5.81±0.57 a                 | 0.73±0.01 ab                   | 4.60±0.64 a                     |
| BC+KSB          | 2.54±0.10 a                | 8.13±0.46 a                 | 1.08±0.06 a                    | 8.11±2.51 a                     |

3 讨 论

3.1 炭载解钾菌对植烟土壤钾形态有效性的影响

土壤钾的生物有效性是衡量土壤自身供钾潜力的重要指标。本研究结果表明,与 CK 相比,单施生物炭、解钾菌使烤烟根际土壤速效钾含量分别显

著提高 41.51% 和 8.54%,生物炭负载解钾菌进一步强化了此效应,致使烤烟根际土壤速效钾含量较 KSB 处理显著增加了 33.29%。其原因可能是解钾菌虽可将含钾矿物如长石、云母等不能被作物吸收利用的矿物态钾分解产生水溶性钾,提高土壤钾的含量及有效性<sup>[16]</sup>;但其单独施用易受土壤环境影

响,难以稳定定殖,导致钾素活化效果有限<sup>[17]</sup>。负载于生物炭的解钾菌可利用生物炭的多孔结构、高比表面积及丰富的表面官能团<sup>[18]</sup>,增强其在土壤中的附着与定殖能力,同时生物炭通过高温裂解炭化浓缩富集的磷、钾等养分<sup>[19]</sup>。此外,植物根系分泌的氨基酸、糖类等有机物还能了解钾菌提供良好的营养供给<sup>[20]</sup>。另外,生物炭还可通过提升土壤温度、调节土壤水分状况、提高土壤阳离子交换量<sup>[21-23]</sup>等,优化根际微环境。一方面,适宜的水热条件与理化环境能有效推动缓效钾向有效钾、速效钾的转化,这与 Zhang 等<sup>[24]</sup>对生物炭施用提升土壤供钾能力的研究结果一致;另一方面,优化后的根际微环境契合解钾菌的生理活动需求,促进解钾菌在根际高效定殖,强化其对土壤中难溶性钾元素的溶解能力<sup>[25]</sup>,从而进一步增加紫色土试验区速效钾及有效钾含量。

本研究发现,与 CK 相比,BC 处理烤烟根际土壤中的各形态钾富集率均降低。这主要是因为生物炭本身富含钾素且具有良好的钾素缓释能力<sup>[26]</sup>,其施入土壤后削弱了根际与非根际之间的钾含量梯度。KSB 处理导致缓效钾和有效钾出现亏缺(负富集率),但其速效钾富集率却与 CK 相当。表明 KSB 处理加速了土壤缓效钾的转化与消耗形成速效钾,从而形成了缓效钾亏缺、速效钾富集的现象。BC+KSB 处理使缓效钾的富集率回归正值,在有效钾和速效钾方面保持较低的富集率。表明解钾菌在生物炭提供的优良微环境中高效地发挥了其解钾功能,活化并补充了土壤缓效钾库,保障了钾素的长期供应;而且生物炭还可通过调节根际微域环境<sup>[27]</sup>减少养分的局部富集与浪费,促进作物对养分的均衡高效吸收。

### 3.2 生物炭负载解钾菌对烤烟生长发育的影响

烤烟属于喜钾作物,其生长发育过程中对钾素的需求尤为重要<sup>[28]</sup>。本研究结果表明,施入生物炭、解钾菌均能显著提高成熟期烤烟的大田农艺性状与干物质积累量,且最大叶宽 BC 处理较 CK 增加了 59.96%。一方面,生物炭不仅能够提升土壤钾素有效性,还能加速其余养分的吸收效率,促进烤烟生长<sup>[29]</sup>;另一方面,生物炭降低了土壤体积质量、增加土壤总孔隙度与通气孔隙占比,构建疏松通透的土壤物理环境,助力根系扩展与功能强化,从而协调地上部与地下部生长平衡,最终推动烤烟干物质积累量显著增加<sup>[30]</sup>,这与李昌骏等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。解钾菌可释放多种植物激素,如吲哚-3-乙酸

(IAA)、细胞分裂素和赤霉素,这些激素能刺激根部和枝条的生长,从而改善植物生长<sup>[32]</sup>。本试验结果表明,与 KSB 处理相比,BC+KSB 处理烤烟不同部位干物质积累量进一步提升了 7.15%~8.80%,表现出良好的协同效应。Chandrakala 等<sup>[33]</sup>的研究结果表明,生物炭负载解钾菌通过协同作用,高效激活土壤生物酶活性、提高速效养分含量、改善根际微生态并促进有益菌群增殖,形成养分转化网络,以整体提升土壤肥力。这一效应为烤烟营造了更优越的生长微环境,既保障了丰富有效养分的供给,又提升了养分利用效率,最终更显著地促进其生长发育。这与 Babar 等<sup>[34]</sup>发现生物炭与钾溶解菌配施对油菜籽的生长具有显著促进作用的研究结果一致。

### 3.3 生物炭负载解钾菌对烤烟钾吸收积累及烟叶化学品质的影响

施用生物炭负载解钾菌能促进烤烟对钾素的吸收,显著提升烤烟各部位钾含量。生物炭本身含有大量钾素,施入土壤后能显著提高土壤速效钾含量,而且还能利用其多孔结构固持土壤中的钾,减少淋溶损失<sup>[35]</sup>。这与本研究单施生物炭的烟叶钾含量仅为 1.81%,显著低于 CK 的结果不一致。这可能是因为生物炭对烟叶生长的促进作用较强,烟叶生物量大幅增加,反而稀释了钾含量。本试验进一步研究发现,KSB 处理烟株在根、茎部对钾的吸收量显著低于 BC 处理,但其叶片钾吸收量及钾吸收总量均高于 BC 处理。这得益于施用解钾菌不仅增加了烟株各部位的钾素积累,还能推动钾素由根、茎向叶片转移,从而优化钾素在烟株体内的分配利用效率<sup>[36]</sup>。此外,生物炭与解钾菌间存在的协同作用,能够进一步强化两者的积极效应,促使烟株各部位钾吸收量及钾吸收总量显著提升。

本试验结果显示,除还原糖含量较低外,生物炭负载解钾菌处理的烟叶化学品质指标均处于适宜范围,且整体化学协调性显著优于单一施用生物炭或解钾菌处理。龚丝雨等<sup>[37]</sup>研究表明,施用生物炭能提高烟叶总糖含量、降低烟碱含量,使烟叶的化学品质趋于协调;解钾菌可优化根际微环境,刺激植物光合产物积累,表现为总糖含量提升,优化碳氮代谢平衡以改善烟叶化学协调性<sup>[38]</sup>。生物炭负载解钾菌可通过协同增强烤烟根系生长活力、强化养分供给效率与光合作用强度<sup>[39]</sup>,对烟叶起到控碱增糖效果,能更显著提升烟叶品质<sup>[40]</sup>。

## 4 结 论

生物炭负载解钾菌(BC+KSB)对川西南烟区紫色土烤烟种植具有显著的协同增效作用,其可有效推动土壤钾素形态转化,与BC处理相比,BC+KSB处理的烤烟根际土壤有效钾含量提升13.46%;显著弱化了根际与非根际土壤的钾素形态差异,降低缓效钾含量,大幅提升土壤整体供钾能力;显著促进烤烟生长并增强钾素吸收效率,与KSB处理相比,BC+KSB处理烤烟根、茎、叶干物质积累量提升7.15%~8.80%;可有效优化烟叶品质,使糖碱比、钾氯比更趋于合理,显著改善烟叶化学成分协调性,综合提升烤烟品质。

### [参考文献]

- [1] Riya J, Kanchan V, Shahadat H M, et al. Potassium in plants: growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 172: 56-69.
- [2] 苏德成. 中国烟草栽培学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2005:321-323.  
Su D C. Tobacco cultivation in China[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2005:321-323.
- [3] 索文宇,于倩茹,姜青新,等. 加强土壤环境管理确保公众健康安全[J]. *WTO经济导刊*, 2013(12):75-77.  
Suo W Y, Yu Q R, Jiang Q X, et al. Improve soil environment management to ensure public health and safety[J]. *China WTO Tribune*, 2013(12):75-77.
- [4] 唐时嘉,孙德江,罗有芳,等. 四川盆地紫色土肥力与母质特性的关系[J]. *土壤学报*, 1984, 21(2):123-133, 229-230.  
Tang S J, Sun D J, Luo Y F, et al. The fertility of purple soil in relation to the characteristics of parent material in Sichuan basin [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1984, 21(2):123-133, 229-230.
- [5] Vasbiyeva M T, Zavyalova N E, Shishkov D G. Changes in the agrochemical properties of albic retisol (abruptic, aric, loamic) during a long-term use of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers under *cis-ural* conditions [J]. *Eurasian Soil Science*, 2022, 55(11):1623-1632.
- [6] 谢文达,智燕彩,李玘,等. 杏壳生物炭对温室次生盐渍化土壤修复效应的研究[J]. *土壤通报*, 2019, 50(2):407-413.  
Xie W D, Zhi Y C, Li Q, et al. Effects of biochar on the restoration of secondary salinized soil in greenhouse[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(2):407-413.
- [7] 刘岱松,王义伟,蔡柯,等. 根际解钾菌的筛选及其对烟草钾素吸收的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2023, 50(4):557-562.  
Liu D S, Wang Y W, Cai K, et al. Isolation of potassium-solubilizing rhizobacteria and the effects on potassium absorption of tobacco plants[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2023, 50(4):557-562.
- [8] Ajeng A A, Abdullah R, Ling T C, et al. Adhesion of *Bacillus salmalaya* and *Bacillus amyloliquefaciens* on oil palm kernel shell biochar: a physicochemical approach [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(1):107115-107124.
- [9] Hale L, Luth M, Kenney R, et al. Evaluation of pinewood biochar as a carrier of bacterial strain *Enterobacter cloacae* UW5 for soil inoculation[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 84:192-199.
- [10] 童琪,陈玫婷,龙菁琦,等. 不同龄组南酸枣根际与非根际土壤养分特征研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(12):108-113.  
Tong Q, Chen M T, Long J Q, et al. Research on soil nutrient characteristics at rhizosphere and non-rhizosphere for different age groups of *Choerospondias axillaris* [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, 39(12):108-113.
- [11] 国家烟草专卖局. 烟草农艺性状调查测量方法:YC/T 142—2010[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.  
State Tobacco Monopoly Administration. Methods for survey and measurement of tobacco agronomic traits: YC/T 142—2010[S]. Beijing:China Standards Press, 2010.
- [12] 王毅,宋文静,吴元华,等. 小麦秸秆还田对烤烟叶片发育及产质量的影响[J]. *中国烟草科学*, 2018, 39(2):32-38.  
Wang Y, Song W J, Wu Y H, et al. Effects of returning wheat straw to soil on leaf development, yield and quality of tobacco [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2018, 39(2):32-38.
- [13] 黄昌勇. 土壤学[M]. 4版. 北京:中国农业出版社, 2019.  
Huang C Y. Soil science[M]. 4th ed. Beijing:China Agriculture Press, 2019.
- [14] 闫克玉,赵铭钦. 烟草原料科学[M]. 北京:科学出版社, 2008.  
Yan K Y, Zhao M Q. Tobacco raw material science[M]. Beijing:Science Press, 2008.
- [15] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京:中国农业出版社, 2003.  
Liu G S. Tobacco cultivation[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2003.
- [16] 田稼,吴小杰,孙超,等. 胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)的研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(6):15-22.  
Tian J, Wu X J, Sun C, et al. Research progress on *Bacillus mucilaginosus* [J]. *Sciences in China*, 2017(6):15-22.
- [17] 张瑞福,颜春荣,张楠,等. 微生物肥料研究及其在耕地质量提升中的应用前景[J]. *中国农业科技导报*, 2013, 15(5):8-16.  
Zhang R F, Yan C R, Zhang N, et al. Studies on microbial fertilizer and its application prospects in improving arable land quality [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(5):8-16.
- [18] 安启坤,唐文竹. 秸秆生物炭对土壤功能微生物生长及吸附的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2017, 48(4):411-417.  
An Q K, Tang W Z. The influences of straw biochar on growth and absorption of soil functional microorganisms[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, 48(4):411-417.
- [19] 丛铭,张梦阳,夏浩,等. 施用生物炭对红壤中不同形态钾含量及小白菜生长的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(4):22-28.  
Cong M, Zhang M Y, Xia H, et al. Effect of biochar application

- on potassium content of different forms in red soil and the growth of pakchoi[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 22-28.
- [20] Pétriacq P, Williams A, Cotton A, et al. Metabolite profiling of non-sterile rhizosphere soil[J]. The Plant Journal, 2017, 92(1): 147-162.
- [21] Niu L L, Hu W, Wang F Z, et al. Integrated transcriptomic and metabolomic analyses elucidate the mechanism by which grafting impacts potassium utilization efficiency in tobacco [J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1): 94-105.
- [22] Hien T T T, Tsubota T, Taniguchi T, et al. Correction to: enhancing soil water holding capacity and provision of a potassium source via optimization of the pyrolysis of bamboo biochar[J]. Biochar, 2021, 3(1): 63-73.
- [23] Xu G, Wei L L, Sun J N, et al. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: direct or indirect mechanism? [J]. Ecological Engineering, 2013, 52: 119-124.
- [24] Zhang M Y, Riaz M, Liu B, et al. Two-year study of biochar: achieving excellent capability of potassium supply via alter clay mineral composition and potassium-dissolving bacteria activity [J]. Science of the Total Environment, 2020, 717: 137286-137297.
- [25] Shanware A S, Kalkar S A, Trivedi M M. Original research article potassium solubilisers: occurrence, mechanism and their role as competent biofertilizers[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2014, 3(9): 622-629.
- [26] 赵泽州, 王晓玲, 李鸿博, 等. 生物质炭基肥缓释性能及对土壤改良的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 886-897.
- Zhao Z Z, Wang X L, Li H B, et al. Slow-release property and soil remediation mechanism of biochar-based fertilizers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(5): 886-897.
- [27] Muema F M, Richardson Y, Keita A, et al. An interdisciplinary overview on biochar production engineering and its agro-economic applications [J]. Biomass and Bioenergy, 2024, 190: 107416-107432.
- [28] Ding M M, Wei B, Zhang Z, et al. Effect of potassium organic and inorganic salts on thermal decomposition of reconstituted tobacco sheet [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 129(2): 975-984.
- [29] Jeffery S, Verheijen F G A, Van D M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 144(1): 175-187.
- [30] 刘卉, 周清明, 黎娟, 等. 生物炭施用量对土壤改良及烤烟生长的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(7): 1411-1419.
- Liu H, Zhou Q M, Li J, et al. Effect of biochar application amount on the soil improvement and the growth of flue-cured tobacco [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(7): 1411-1419.
- [31] 李昌骏, 李婷, 李露露, 等. 生物质炭负载解钾菌对土壤酶活性与微生物群落结构的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1531-1542.
- Li C J, Li T, Li L L, et al. Effects of potassium-solubilizing bacteria loaded biochar on soil enzyme activity and microbial community structure[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1531-1542.
- [32] Khoso M A, Wagan S, Alam I, et al. Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: current perspective[J]. Plant Stress, 2024, 11: 100341-100355.
- [33] Chandrakala C, Voleti S R, Bandeppa S, et al. Silicate solubilization and plant growth promoting potential of *Rhizobium* sp. isolated from rice rhizosphere[J]. Silicon, 2019, 11(6): 2895-2906.
- [34] Babar S, Baloch A, Qasim M, et al. Unraveling the synergistic effect of biochar and potassium solubilizing bacteria on potassium availability and rapeseed growth in acidic soil [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 380: 125109-125125.
- [35] 王耀锋, 刘玉学, 吕豪豪, 等. 水洗生物炭配施化肥对水稻产量及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1049-1055.
- Wang Y F, Liu Y X, Lü H H, et al. Effect of washing biochar and chemical fertilizers on rice yield and nutrient uptake [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(4): 1049-1055.
- [36] 李鑫, 周冀衡, 李强, 等. 枸溶性钾肥与解钾菌液配施对烤烟生长及钾素营养状况的影响[J]. 烟草科技, 2016, 49(11): 1-6.
- Li X, Zhou J H, Li Q, et al. Application of citrate soluble potassium fertilizer combined with potassium dissolving bacteria on growth and potassium nutrition of flue-cured tobacco [J]. Tobacco Science & Technology, 2016, 49(11): 1-6.
- [37] 龚丝雨, 钟思荣, 张世川, 等. 增施生物炭对烤烟生长及产量、质量的影响[J]. 作物杂志, 2018(2): 154-160.
- Gong S Y, Zhong S R, Zhang S C, et al. Effects of increased application of biochar on the growth, yield, and quality of flue-cured tobacco [J]. Crops, 2018(2): 154-160.
- [38] 胡伟华, 杨启港, 李秋坪, 等. 生防菌剂联用对连作土壤微生物生态及烟叶品质的影响[J/OL]. 农业资源与环境学报, 2025, 1-15[2025-10-17]. DOI: 10.13254/j.jare.2025.0465.
- Hu W H, Yang Q G, Li Q P, et al. Effects of combined application of biocontrol agents on rhizosphere soil microecology of continuous cropping and tobacco leaf quality [J/OL]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025, 1-15[2025-10-17]. DOI: 10.13254/j.jare.2025.0465.
- [39] Wang J Q, Luo Y P, Ye F, et al. Structures and ion transport mechanisms of plant high-affinity potassium transporters [J]. Molecular Plant, 2024, 17(3): 409-422.
- [40] 阎海涛, 常栋, 许跃奇, 等. 生物炭和微生物菌剂对烤烟产质量的影响[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(10): 21-27.
- Yan H T, Chang D, Xu Y Q, et al. Effects of biochar and microbial agent on quality and yield of flue-cured tobacco [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2021, 49(10): 21-27.

(责任编辑: 陈丽)