

DOI: 10.11766/trxb202009290375

陈懿, 林英超, 杨志晓, 程建中, 王志红, 孔德钧, 吴春, 林叶春. 炭基肥对黄壤烤烟生理和氮素吸收与平衡的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59 (3): 864–872.

CHEN Yi, LIN Yingchao, YANG Zhixiao, CHENG Jianzhong, WANG Zhihong, KONG Dejun, WU Chun, LIN Yechun. Effects of Biochar-based Fertilizer on Physiology and Nitrogen Uptake of Flue-cured Tobacco and Nitrogen Balance in Yellow Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (3): 864–872.

炭基肥对黄壤烤烟生理和氮素吸收与平衡的影响*

陈懿¹, 林英超^{1†}, 杨志晓¹, 程建中², 王志红¹, 孔德钧¹, 吴春¹,
林叶春¹

(1. 烟草行业山地烤烟品质与生态重点实验室(贵州省烟草科学研究院), 贵阳 550081; 2. 环境地球化学国家重点实验室(中国科学院地球化学研究所), 贵阳 550081)

摘要: 以烤烟品种云烟 87 和贵州典型黄壤为试验材料, 通过大田试验, 设置不施氮(CN)、常规肥(CF)和炭基肥(BF) 3 个处理, 探索不同施肥处理对烤烟氮素吸收相关生理、黄壤—烤烟体系氮素平衡的影响, 为优化贵州烟区黄壤氮素管理和减少烟区农田生态环境污染提供科学指导。结果表明, BF 处理显著提高土壤脲酶活性、烤烟根长度和根表面积、叶片谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性、吸氮量, 烤烟吸氮量较 CN 和 CF 处理分别显著提高 35.06% 和 14.24%。BF 处理烤烟根系活力和体积、干物质量及产量最高, 显著高于 CN 处理。不同施肥处理黄壤—烤烟体系氮素均明显盈余, 氮素输入主要是土壤起始无机氮, 氮素输出主要是土壤无机氮残留以及烤烟吸氮量。BF 处理提高了 0~20 cm 土层无机氮的残留, 氮素表观损失量显著减少 44.42 kg·hm⁻², 氮素盈余量减少 37.70 kg·hm⁻², 氮肥表观利用率显著提高 16.15%。合理施用炭基肥是贵州烟区优化黄壤氮素管理和保护烟区农田生态环境的有效途径之一。

关键词: 烤烟; 黄壤; 生物炭; 氮素平衡; 根系

中图分类号: S153; S572 **文献标志码:** A

Effects of Biochar-based Fertilizer on Physiology and Nitrogen Uptake of Flue-cured Tobacco and Nitrogen Balance in Yellow Soil

CHEN Yi¹, LIN Yingchao^{1†}, YANG Zhixiao¹, CHENG Jianzhong², WANG Zhihong¹, KONG Dejun¹, WU Chun¹,
LIN Yechun¹

(1. Upland Flue-Cured Tobacco Quality & Ecology Key Laboratory of China Tobacco, Guizhou Academy of Tobacco Science, Guiyang 550081, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

* 国家自然科学基金项目(31601273, 41773144)和贵州省烟草公司科技项目(201801, 2020XM08)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 31601273 and 41773144) and the Science and Technology Program of Guizhou Tobacco Company of China (Nos. 201801 and 2020XM08)

† 通信作者 Corresponding author, E-mail: linyingchao@outlook.com

作者简介: 陈懿(1982—), 男, 四川威远人, 硕士, 副研究员, 主要从事烤烟栽培与生理生态研究。E-mail: 59012819@qq.com

收稿日期: 2020-09-29; 收到修改稿日期: 2020-12-04; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-03-05

Abstract: This study was conducted to explore effects of biochar-based fertilizer on physiology and nitrogen uptake of flue-cured tobacco and nitrogen balance in the yellow soil - flue-cured tobacco system, which will provide certain scientific guidance for optimizing nitrogen management in the yellow soil of the tobacco-planting areas in Guizhou and reducing pollution in the ecological environment of the farmland of tobacco-planting areas in Guizhou. A field experiment, carried out with flue-cured (Yunyan 87) in yellow soil for the study, was designed to have three treatments, i.e. no nitrogen (CN), conventional fertilizer (CF), biochar-based fertilizer (BF). Results show that Treatment BF significantly increased soil urease activity, root length and surface area, glutamine synthase and glutamate synthetase activities in leaves, and nitrogen uptake of flue-cured tobacco. Treatment BF was significantly 35.06% and 14.24% higher than Treatments CN and CF in nitrogen uptake of flue-cured tobacco, respectively. Treatment BF was the highest in activity, volume and dry biomass of root and yield of flue-cured tobacco, and significantly higher than Treatment CN. Nitrogen surplus was obviously detected in the yellow soil - flue-cured tobacco system in all the treatments, the nitrogen input was mainly the initial soil inorganic nitrogen, while the nitrogen output mainly consisted of soil inorganic nitrogen residue and nitrogen uptake of flue-cured tobacco. Treatment BF increased inorganic nitrogen residue in the 0-20 cm soil layer. Moreover, Treatment BF significantly decreased nitrogen apparent loss by $44.42 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and decreased nitrogen surplus by $37.70 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and significantly increased nitrogen apparent recovery efficiency by 16.15%. Therefore, the reasonable application of biochar-based fertilizer is an effective way to optimize management of nitrogen in the yellow soil and protect ecological environment of tobacco-planting areas in Guizhou.

Key words: Flue-cured tobacco; Yellow soil; Biochar; Nitrogen balance; Root

氮素是影响作物生长发育及产量形成的首要元素,施用氮肥是最关键的增产措施之一。根系的形态结构和活力是影响作物对氮素吸收的重要因素^[1-2]。叶片中氮素还原和同化酶(如谷氨酰胺合成酶等)活性越高,其根系吸收氮素的性能越强^[3-4]。随施氮量增加,作物谷氨酰胺合成酶活性递增,吸氮量与施氮量呈二次曲线关系^[5]。然而过量施氮导致氮肥利用率偏低,肥料增产效益下降^[6],多余氮肥通过径流、淋洗、挥发等途径污染环境^[7]。为此,土壤-作物体系氮素平衡状况对施氮的响应对于评价氮肥是否合理施用至关重要。

烟草是我国重要的经济作物。氮素是影响烟叶产量和品质最重要的营养元素,适量适时的氮素供应是烟叶品质形成的关键,氮素供应不足和过量均降低烟叶品质^[8]。我国烤烟种植中,同样普遍存在施氮量偏高、氮肥利用率偏低的问题,其氮肥利用率平均仅为 30%~40%,南方一些省份仅 20%左右^[9]。南方地区以旱作烟地为主,其氮素主要损失途径是淋溶作用,以硝态氮(NO_3^-)为主,铵态氮(NH_4^+)较少。

黄壤是我国地带性土壤之一,25.3%黄壤分布于贵州,黄壤面积占贵州土壤面积的 46.4%,是贵州主要的农业土壤类型^[10],也是贵州主要的植烟土壤类型。农户出于对烟叶高产的片面追求,通常投入

过多氮肥,造成黄壤氮素盈余,氮肥利用率过低,贵州烟草生长季节降雨量大,氮素淋洗严重^[11]。已往研究^[12]表明硝酸铵深施于黄壤后,24%~29%被烟株吸收,38%~40%渗漏,32%~35%残存土壤中。因此,科学合理施氮、提高氮肥利用率和减少氮素损失是贵州烟叶生产需待解决的问题。

近年来,为保障农田土壤利用的可持续性和提高作物产量及氮肥利用率,将生物质炭作为肥料载体制成炭基肥加以应用备受关注。相关研究^[11, 13-16]表明,炭基肥提升土壤 pH、有机质和养分有效性,增加土壤微生物生物量碳、氮、磷,改变土壤微生物群落结构组成,增加细菌丰富度和多样性,提高土壤微生物功能多样性,提高作物产量、氮素吸收和氮肥利用率。然而炭基肥施用对作物氮肥利用率提升的生理响应机制以及土壤-作物体系氮素平衡等方面的研究尚欠缺。为此,针对以上问题,本研究选择贵州典型植烟黄壤,通过大田试验,设置不同施肥处理,以不施氮和常规肥为对照,探究炭基肥对土壤脲酶活性、过氧化氢酶活性和微生物生物量氮以及烤烟根系、叶片谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性、吸氮量和产量、黄壤-烤烟体系氮素平衡等的影响,旨在为统筹优化贵州烟区黄壤氮素管理和长期保护烟区农田生态环境提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

田间试验于 2017 年在贵州省烟草科学研究所龙岗基地 (26°52' N, 107°5' E) 进行, 基地海拔 1 120 m, 年均气温约 16 °C, 降水量约 1 185 mm, 无霜期约 277 d。试验土壤类型为典型的黄壤, 基本化学性质为 pH 7.53, 有机质 46.38 g·kg⁻¹, 全氮 2.14 g·kg⁻¹, 碱解氮 132.5 mg·kg⁻¹, 全磷 1.16 g·kg⁻¹, 有效磷 24.63 mg·kg⁻¹, 全钾 15.30 g·kg⁻¹, 速效钾 361.0 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验烤烟品种为云烟 87。试验肥料包括: 烤烟专用基肥 (N:P₂O₅:K₂O=9:14:22), 炭基复混肥 (N:P₂O₅:K₂O=9:14:22, 采用玉米秸秆炭和烤烟专用基础肥复混圆盘造粒制成, 玉米秸秆炭添加比例为 150 g·kg⁻¹), 以上肥料由毕节灵丰复肥有限公司加工制成。

设置不施氮 (CN, 施用过磷酸钙和硫酸钾)、常规肥 (CF, 施用烤烟专用基肥) 和炭基肥 (BF, 施用炭基复混肥) 3 个处理, 每个处理 3 次重复。每个试验小区面积为 36.3 m², 合计 9 个小区, 随机区组排列。烤烟移栽株行距为 1.1 m×0.55 m, 每个小区种烟 60 株。

常规肥和炭基肥处理的施氮量为 83.70 kg·hm⁻² (以 N 计), 3 个处理磷、钾肥用量相同, 分别为 125.0 kg·hm⁻² (以 P₂O₅ 计)、192.9 kg·hm⁻² (以 K₂O 计), 不施氮处理磷钾肥为过磷酸钙 (含 P₂O₅ 120 g·kg⁻¹) 和硫酸钾 (含 K₂O 500 g·kg⁻¹), 所有处理肥料均在烤烟移栽后一周穴施, 施肥深度为 20 cm 左右。烤烟生产其他措施均按当地优质烟叶生产规范进行操作。

1.3 样品采集与检测

在施肥前和烟叶全部采收后, 各小区内随机 3 点按 20 cm 间距采集 0~100 cm 土层的环刀土样和农化分析土样, 同层农化土样充分混合后放入冰盒带回实验室, 采用 1:10 土水比 0.01 mol·L⁻¹CaCl₂ 浸提—流动分析仪 (SmartChem200, Westco, 意大利) 测定硝态氮和铵态氮^[17]。土壤容重采用环刀法测定。

烤烟栽后 50 d 左右 (旺长期), 采用抖土法采

集根际土样, 装入无菌自封袋, 置于冰盒带回实验室。一部分冰箱 4°C 冷藏保存, 采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法测定土壤微生物生物量氮^[18]。另外一部分自然风干保存, 采用靛酚比色法测定土壤脲酶活性, 采用紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性^[19]。同时采集第 10 叶位测定谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性^[20]。在每个小区中随机选择 3 株烤烟, 拔取整个烟株, 抖落和洗净土壤, 吸干水分, 置于冰盒中带回实验室, 采用氯化三苯基四氮唑法测定根系活力。

烟叶于成熟采收前一天取样, 105°C 杀青 30 min, 60°C 烘至恒重后称重保存。烟叶采收结束后, 采集茎和根, 杀青烘干称重保存。分器官粉碎、过筛, 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 使用凯氏定氮仪 (K2460, FOSS, 丹麦) 测定全氮含量^[11]。

烟叶采收结束后, 采集烤烟完整根系带回实验室, 水中浸泡 6 h, 用流水冲洗干净并吸干水分, 采用扫描仪 (Expression 1000XL, EPSON, 加拿大) 扫描根系, 利用 WinRHIZO 根系分析系统分析根系扫描图片, 获取根系形态指标数据。

烟叶烘烤结束后, 将各小区各炕次初烤烟叶定级称重累加除以种植面积, 统计产量。

1.4 数据计算与统计分析

贵州地区大气干湿沉降输入的氮素数值较低 (14.44~22.3 kg·hm⁻²·a⁻¹^[21-22]), 故本试验不考虑。氮输入包含肥料氮、土壤起始无机氮累积量、土壤氮素净矿化量。不考虑氮肥的激发效应, 假定施氮处理土壤氮素净矿化量与不施氮处理相同。氮平衡相关参数按以下方法计算。

土壤氮素净矿化量/(kg·hm⁻²) = 不施氮处理作物吸氮量 + 不施氮处理土壤残留无机氮累积量 - 不施氮处理土壤起始无机氮累积量;

氮素表观损失量/(kg·hm⁻²) = (施氮量 + 土壤起始无机氮累积量 + 土壤氮素净矿化量) - (作物吸氮量 + 土壤残留无机氮累积量);

氮素盈余量/(kg·hm⁻²) = 氮素表观损失量 + 土壤残留无机氮累积量;

氮肥表观利用率/% = (施氮处理作物吸氮量 - 不施氮处理作物吸氮量) / 施氮量 × 100;

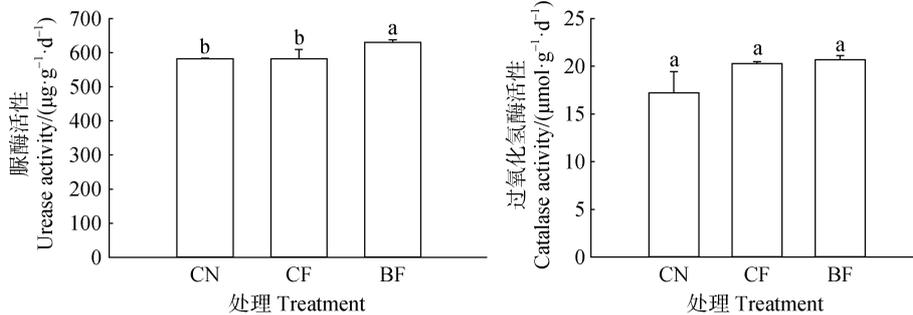
氮肥表观残留率/% = (施氮处理土壤残留无机氮累积量 - 不施氮处理土壤残留无机氮累积量) / 施

氮量 $\times 100$;

氮肥表观损失率/ $\% = 100 - \text{氮肥表观利用率} - \text{氮肥表观残留率}$ 。

土壤各土层无机氮(硝态氮和铵态氮)累积量(N_{\min} , $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)计算公式: $N_{\min} = h \times C \times B / 10$ 。式中, h 为土层厚度, cm ; C 为无机氮含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; B 为土层土壤容重, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

采用 Systat SigmaPlot 10.0 进行制图, 利用 IBM SPSS Statistics 20.0 进行单因素方差分析, 多重比较采用邓肯(Duncan)法。



注: CN、CF、BF 分别表示不施氮、常规肥、炭基肥; 方柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: CN, CF and BF mean no nitrogen, conventional fertilizer and biochar-based fertilizer, respectively. Different lowercase letters above the bars mean significant difference between treatments at 0.05 level. The same as below.

图 1 不同施肥处理下土壤脲酶和过氧化氢酶活性
Fig. 1 Soil urease and catalase activities in different treatments

土壤微生物生物量氮可综合反映土壤微生物对氮素的固持和矿化作用强度^[24]。从图 2 可以看出, 不同施肥处理间土壤微生物生物量氮差异不显著, CN、CF、BF 处理含量分别为 $93.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $98.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $109.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.2 不同施肥处理对烤烟根系形态和根系活力的影响

表 1 表明, BF 处理烤烟根长度较 CN 和 CF 处理分别显著提高 44.63% 和 39.08%。不同处理间烤烟根表面积差异显著, BF 处理较 CN 和 CF 处理分别增加 29.64% 和 48.74%。BF 处理烤烟根体积最大, CN 处理显著小于 CF 和 BF 处理。BF 处理烤烟根系活力最高, 显著高于 CN 处理。表明施用炭基肥增强烤烟根系活力, 显著提高根长度和根表面积, 促进根系生长。

2.3 不同施肥处理对烤烟叶片酶活性的影响

谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸合成酶(GOGAT)是植物氮素同化过程中的重要功能酶。GS/GOGAT

2 结果

2.1 不同施肥处理对土壤酶活性和微生物生物量氮的影响

脲酶是参与土壤氮素循环的重要水解酶, 其活性可反映土壤对氮素的需求和利用^[23]。图 1 表明, BF 处理的土壤脲酶活性最高, 达 $630.7 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 较 CN 和 CF 处理分别显著提高 7.63% 和 7.74%。不同施肥处理间土壤过氧化氢酶活性差异不显著。表明施用炭基肥对提升土壤脲酶活性效果显著。

循环是植物体同化 NH_4^+ 的主要途径, 在催化无机氮转化为有机氮的过程中起关键作用^[25]。由图 3 可以看出, BF 处理烤烟叶片 GS 和 GOGAT 活性最高, 较 CN 处理分别显著提高 33.72% 和 60.40%, 较 CF 处理分别显著提高 33.88% 和 47.05%。说明施用炭基肥显著提高烤烟叶片氮素同化能力。

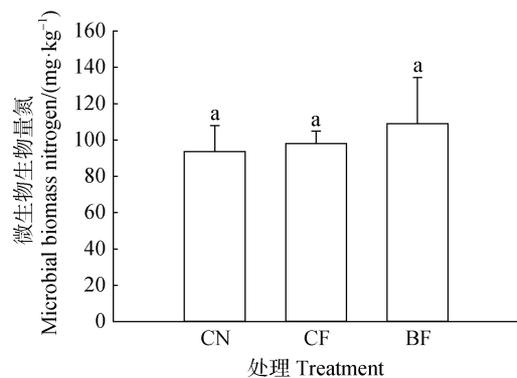


图 2 不同施肥处理下土壤微生物生物量氮
Fig. 2 Soil microbial biomass nitrogen in different treatments

表 1 不同施肥处理下烤烟根系形态和根系活力

Table 1 Morphology and activity of the flue-cured tobacco root in different treatments

处理 Treatment	根长度 Root length/cm	根表面积 Root surface area/cm ²	根体积 Root volume/cm ³	根系活力 Root activity/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
CN	4 862±857b	1 600±205c	54.41±14.36b	86.95±32.34b
CF	5 349±885b	2 196±209b	85.79±4.74a	103.1±22.42ab
BF	8 781±1 654a	3 121±374a	100.2±8.29a	149.8±17.58a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters in the same column mean significant difference between treatments at 0.05 level. The same as below.

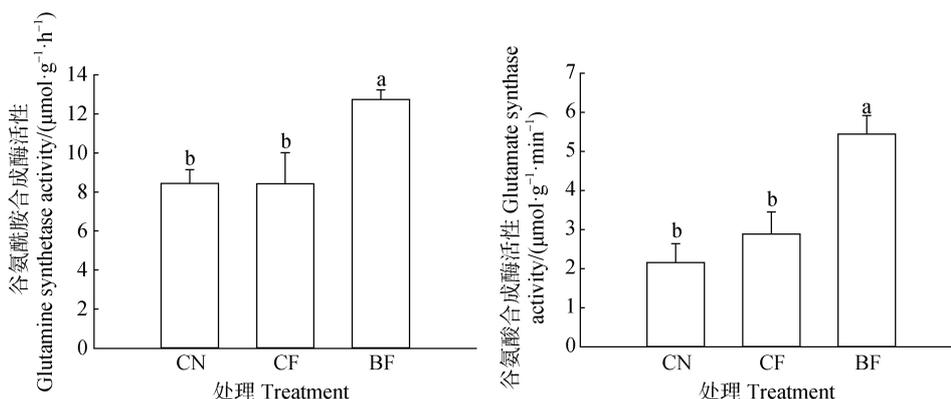


图 3 不同施肥处理下烟叶谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性

Fig. 3 Glutamine synthetase and glutamate synthase activities in the tobacco leaves of different treatments

2.4 不同施肥处理对烤烟吸氮量和产量的影响

由于土壤供氮水平和烟叶同化氮素能力的差异, 导致不同施肥处理的烤烟干物质质量、吸氮量和烟叶产量差异较大 (表 2)。BF 处理烤烟干物质质量、吸氮量和烟叶产量最高, CF 处理居中, CN 处理最低。其中, BF 和 CF 处理烤烟干物质质量显著高于 CN 处理, 分别高出 32.25% 和 31.15%; 不同施肥处理之间烤烟吸氮量差异显著, 相比于 CN 和 CF 处理, BF 处理烤烟吸氮量分别提高 33.28 kg·hm⁻² 和 13.52 kg·hm⁻², 增幅分别为 35.06% 和 14.24%; 与 CN 处理比较, CF 和 BF 处理烟叶产量分别显著提高 931 kg·hm⁻² 和 1 004 kg·hm⁻², 增幅分别为 44.57% 和 48.07%。表明炭基肥对烤烟的干物质和氮素积累及增产效果优于常规肥。

2.5 不同施肥处理对烟叶收获后土壤无机氮含量的影响

图 4 表明, 烟叶收获后, 不同施肥处理的土壤无机氮含量均以 0~20 cm 土层最高, 0~60 cm 深度范围内土壤无机氮含量随深度的增加明显下降, 60 cm 之后含量基本趋于稳定。0~20 cm 土层, BF 处理土

壤无机氮含量最高, 达 24.63 mg·kg⁻¹, 较 CN 和 CF 处理分别高 9.45 mg·kg⁻¹ 和 2.62 mg·kg⁻¹, 增幅分别为 38.37% 和 10.65%; CN 处理无机氮含量显著低于 CF 和 BF 两个处理。表明施用炭基肥可提高 0~20 cm 土层无机氮的残留, 减少无机氮向土壤深层的淋洗。

表 2 不同施肥处理下的烤烟干物质质量、吸氮量和产量

Table 2 Dry biomass, nitrogen uptake and yield of flue-cured tobacco in different treatments / (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	干物质质量 Dry biomass	吸氮量 Nitrogen uptake	产量 Yield
CN	5 579±355b	61.63±12.02c	2 089±381b
CF	7 316±891a	81.39±11.38b	3 020±432a
BF	7 383±667a	94.91±8.31a	3 093±73a

2.6 不同施肥处理对黄壤—烤烟体系氮素平衡和氮肥表观去向的影响

通过不同施肥处理下黄壤—烤烟体系氮素平衡分析 (表 3), 施氮处理的氮素输入以土壤起始无机氮输入为主, 占氮素输入总量的 52.58%~56.40%;

其次是肥料氮投入，占氮素输入总量的 27.87%~30.32%；而净矿化量比例最低，占氮素输入总量的 15.73%~17.11%。施氮处理的氮素输出以无机氮残留为主，占氮素输出总量的 52.53%~59.57%；其次为烤烟吸氮量，占氮素输出总量的 27.10%~34.38%；氮素表观损失量占比最低，占氮素输出总量的 6.06%~20.36%。不同施肥处理间土壤残留无机氮差异不显著。与 CF 处理比较，BF 处理氮素表观损失量显著减少 44.42 kg·hm⁻²。不同施肥处理均表现出氮素盈余，盈余量介于 137.7~218.9 kg·hm⁻²，其中 CF 处理氮素盈余量最高，显著高于 CN 处理，CF 处理氮素盈余量较 CN 和 BF 处理分别高出 81.24 kg·hm⁻² 和 37.70 kg·hm⁻²。

由表 4 可以看出，与 CF 处理比较，BF 处理氮肥表观利用率显著提高 16.15%，氮肥表观残留率和氮肥表观损失率差异不显著。

表 3 不同施肥处理黄壤—烤烟体系氮素平衡

Table 3 Nitrogen balance in the yellow soil—flue-cured tobacco system of different treatments/ (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	氮素输入 Nitrogen input			氮素输出 Nitrogen output			
	施氮量 Nitrogen application rate	起始无机氮 Initial inorganic nitrogen	净矿化量 Net mineralization	烤烟吸氮量 Nitrogen uptake of flue-cured tobacco	残留无机氮 Residual inorganic nitrogen	氮素表观损失量 Nitrogen apparent loss	氮素盈余量 Nitrogen surplus
	CN	0	152.1±3.56a	47.23	61.63±12.02c	137.7±5.59a	0b
CF	83.70	169.4±19.12a	47.23	81.39±11.38b	157.8±17.31a	61.14±1.81a	218.9±19.12a
BF	83.70	145.2±37.73a	47.23	94.91±8.31a	164.5±17.54a	16.72±20.34 b	181.2±37.73ab

表 4 不同施肥处理氮肥表观去向

Table 4 Apparent fate of nitrogen fertilizer in different treatments/%

处理 Treatment	氮肥表观利用率 Nitrogen apparent recovery efficiency	氮肥表观残留率 Nitrogen apparent residual rate	氮肥表观损失率 Nitrogen apparent loss rate
CF	23.61±13.60b	24.01±20.68a	52.38±20.68a
BF	39.76±9.92a	32.05±20.96a	28.19±20.96a

3 讨论

3.1 不同施肥处理对土壤供氮水平的影响

不同的施肥措施可改变土壤微生物的群落结构和功能多样性，改变土壤酶活性和微生物生物量。脲酶可促有机质中肽键的水解，其活性与微生物数量、土壤有机质和速效氮相关^[26]。微生物生物量氮

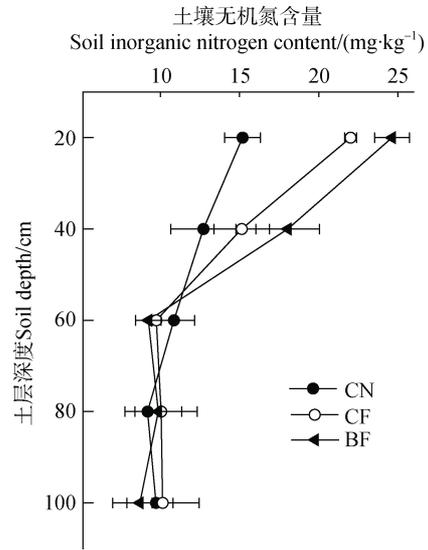


图 4 不同施肥处理不同深度土层无机氮含量

Fig. 4 Soil inorganic nitrogen content at different layers of soil profiles with different fertilization treatments

是土壤氮素的重要储备库^[27]，在土壤氮素的循环和转化过程中起重要调节作用，大部分无机氮矿化自土壤微生物生物量氮。本研究表明，施用炭基肥显著提高土壤脲酶活性，对微生物生物量氮无显著影响（图 1 和图 2），这与已有研究^[23, 28]报道一致。炭基肥以生物质炭为肥料载体，通过生物质炭、肥料与土壤微生物产生生物化学反应，生物质炭的多微孔结构

和少量易利用的碳源促进了微生物繁殖,肥料携带的无机氮,促进土壤微生物利用,短期实现土壤氮固定,减少肥料氮损失,这部分氮成为脲酶的反应底物,在作物生长期可矿化释放,成为有效氮源,提高土壤持续供氮水平,促使土壤-作物体系的氮素良性循环。

3.2 不同施肥处理对烤烟氮吸收及相关生理的影响

根系既是作物吸收水分和养分的主要器官,又是激素合成的重要场所,其形态和生理特征密切影响氮素吸收、地上部生长和产量形成^[1-2]。本研究结果表明,施用炭基肥增强了烤烟根系活力,显著提高了根长度和根表面积(表1),促进了根系生长。炭基肥施用后,生物质炭多微孔结构和吸附的肥料优化了土壤水、气、养分条件^[29],为烤烟根系形态构建以及生理代谢提供了良好的生态环境,可向地上部转运更多的氮素。

GS/GOGAT 循环是植物铵同化利用的主要途径,其酶活性高低可密切表征氮素同化效率。玉米叶片氮含量与可溶性蛋白、GS 和 GOGAT 的活性极显著正相关^[30];GS 活性的提高有助于玉米铵同化和氮素转运^[31]。本研究中,施用炭基肥显著提高烤烟叶片 GS 和 GOGAT 活性(图3),提升氮素同化和转运能力,与玉米的结果相似。

氮素吸收与干物质积累和产量形成密切相关。麦秸秆炭制作的炭基肥提高了土壤 Eh,增加了根际土壤与根膜之间的电位差,降低了水稻根系养分积累所需的自由能,促进根吸收养分,尤其是硝酸盐,进而提高水稻氮吸收和生物量^[32]。炭基肥提高烤烟氮积累量和产量^[11]。本研究结果也得出了上述积极效果,与常规肥处理相比,炭基肥处理烤烟干物质质量、吸氮量及烟叶产量均提高,吸氮量增幅显著,达 14.24%(表2)。

3.3 不同施肥处理对土壤-烤烟体系氮素平衡的影响及机理

氮肥施入土壤-作物体系后,其去向主要包含 3 方面:一被作物吸收,二在土壤剖面中以无机氮的形态或有机结合的形态残留,三以淋洗或径流、硝化-反硝化、氨挥发等途径损失^[33]。氮素损失过多,不仅降低肥效,并且污染环境^[6]。本研究发现,施用炭基肥提高了 0~20 cm 土层无机氮的残留,减少了向土壤深层的淋洗(图4)。不同施肥处理黄壤-烤烟体系均表现出氮素明显盈余,氮素输入以土壤

起始无机氮输入为主,输出以土壤无机氮残留为主,其次为烤烟吸氮量;不施氮处理氮素盈余量最低,显著低于常规肥处理,炭基肥处理居中。与常规肥处理比较,炭基肥处理氮素表观损失量显著减少 44.42 kg·hm⁻²,氮素盈余量减少 37.70 kg·hm⁻²,氮肥表观利用率显著提高 16.15 个百分点(表3和表4)。炭基肥显著提高氮肥表观利用率的原因,可能是炭基肥显著提高了土壤脲酶活性,增加了土壤供氮水平,促进烤烟根系生长和增强根系生理能力,根系吸收更多的氮素运输至地上部,显著提升烟叶氮素同化关键酶 GS 和 GOGAT 活性,烟叶同化更多的氮素。与常规肥比较,施用炭基肥优化了黄壤-烤烟体系氮素平衡,其作用机理可能涉及以下三方面:首先,炭基肥显著提高氮肥表观利用率;其次,生物质炭增加土壤 pH 和影响反硝化功能基因丰度进而降低土壤反硝化作用,减少 N₂O 排放^[34-35];再者,通过碳源的增加,施用炭基肥可实现短期的土壤微生物固氮,由于生物质炭对 NO₃⁻和 NH₄⁺具有很强的吸附能力^[36],土壤可能主要以非生物固持作用为主要途径实现长期固氮,减少氮素淋洗的结果在项目组本次和以往的研究^[37]报道中均已证实。

4 结 论

贵州黄壤-烤烟体系中氮素明显盈余,氮素输入以土壤起始无机氮输入为主,次要输入是肥料氮投入,输出以土壤无机氮残留为主,其次为烤烟吸氮量。施用炭基肥可显著提高土壤脲酶活性;显著提升烤烟根系长度和表面积、叶片谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性以及吸氮量;优化了土壤-烟草体系氮素平衡,提高了 0~20 cm 土层无机氮的残留,显著降低了氮素表观损失量,显著提高了氮肥表观利用率。施用炭基肥对减少氮素投入、提高氮肥利用率和减少氮素损失以及保护贵州黄壤烟区生态环境具有积极意义。

参考文献 (References)

- [1] Fan J B, Shen Q R, Tan J Z, et al. Difference of root physiological and ecological indices in rice cultivars with different N use efficiency[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3052—3058. [樊剑波,沈其荣,谭炯壮,等.不同氮效率水稻品种根系生理生态指标的差异[J].

- 生态学报, 2009, 29 (6): 3052—3058.]
- [2] Cheng Y, Wang H Z, Liu P, et al. Effect of different maize varieties and nitrogen supply on root characteristics and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (12): 2259—2269. [程乙, 王洪章, 刘鹏, 等. 品种和氮素供应对玉米根系特征及氮素吸收利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50 (12): 2259—2269.]
- [3] Yang X E, Sun X. Varietal difference of rice plants in response to N and its mechanisms[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29 (1): 73—79. [杨肖娥, 孙羲. 不同水稻品种对低氮反应的差异及其机制的研究[J]. *土壤学报*, 1992, 29 (1): 73—79.]
- [4] Jiang L G, Cao W X. Physiological mechanism and approaches for efficient nitrogen utilization in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2002, 16 (3): 261—264. [江立庚, 曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径[J]. *中国水稻科学*, 2002, 16 (3): 261—264.]
- [5] Li P C, Dong H L, Liu A Z, et al. Effects of nitrogen application rates on physiological characteristics of functional leaves, nitrogen use efficiency and yield of cotton[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21 (1): 81—91. [李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 施氮量对棉花功能叶片生理特性、氮素利用效率及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (1): 81—91.]
- [6] Shi D Y, Zhang H Y, Dong S T. Effects of nitrogen application on nitrogen balance and use efficiency and yield of summer maize in soil with high residual nitrogen[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19 (1): 37—44. [石德杨, 张海艳, 董树亭. 土壤高残留氮条件下施氮对夏玉米氮素平衡、利用及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19 (1): 37—44.]
- [7] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China - Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63 (2/3): 117—127.
- [8] Tobacco Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences. *Chinese tobacco cultivation*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2005. [中国农业科学院烟草研究所. *中国烟草栽培学*[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005.]
- [9] Yang Z X, Wang Y, Wang Z H, et al. Research advance in nitrogen nutrition of flue-cured tobacco[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2012, 24 (1): 72—76. [杨志晓, 王轶, 王志红, 等. 烤烟氮素营养研究进展[J]. *江西农业学报*, 2012, 24 (1): 72—76.]
- [10] Luo L Z, Li Y, Zhang W A, et al. Variation characteristics of maize yield and fertilizer utilization rate on an upland yellow soil under long term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (10): 2793—2798. [罗龙皂, 李渝, 张文安, 等. 长期施肥下黄壤旱地玉米产量及肥料利用率的变化特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24 (10): 2793—2798.]
- [11] Chen Y, Lin Y C, Huang H G, et al. Effect of biochar-based fertilizer on properties of tobacco-planting yellow soil, and nutrient accumulation, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (2): 534—543. [陈懿, 林英超, 黄化刚, 等. 炭基肥对植烟黄壤性状和烤烟养分积累、产量及品质的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (2): 534—543.]
- [12] Lu Y G, Yang H M. The fate of ammonium nitrate application by tobacco in soil [J]. *Tobacco Science & Technology*, 1990, 23 (2): 39—40. [陆引罡, 杨宏敏. 硝酸铵施入烟草土壤中的去向[J]. *烟草科技*, 1990, 23 (2): 39—40.]
- [13] Li D W, Zhou J S, Pan G X, et al. Effect of biochar-based compound fertilizer on the yield, fruit quality and N use efficiency of vegetables[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39 (3): 433—440. [李大伟, 周加顺, 潘根兴, 等. 生物质炭基肥施用对蔬菜产量和品质以及氮素农学利用率的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39 (3): 433—440.]
- [14] Zhou Z D, Gao T, Van Zwieten L, et al. Soil microbial community structure shifts induced by biochar and biochar-based fertilizer amendment to Karst calcareous soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83 (2): 398—408.
- [15] Ge S H, Yan H T, Chen Q, et al. Effects of biochar combing with nitrogen fertilizer on functional diversity of microbial communities in tobacco-planting soil[J]. *Soils*, 2019, 51 (4): 708—714. [葛少华, 阎海涛, 陈奇, 等. 生物质炭与化肥氮配施对植烟土壤微生物功能多样性的影响[J]. *土壤*, 2019, 51 (4): 708—714.]
- [16] Chen Y, Wu C, Li C B, et al. Effect of biochar-based fertilizer on bacterial and fungal community composition, diversity in tobacco-planting yellow soil[J]. *Acta microbiologica sinica*, 2020, 60 (4): 653—666. [陈懿, 吴春, 李彩斌, 等. 炭基肥对植烟黄壤细菌、真菌群落结构和多样性的影响[J]. *微生物学报*, 2020, 60 (4): 653—666.]
- [17] Si D X, Cui Z L, Chen X P, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer application on dry matter accumulation and nitrogen balance of summer maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (6): 1745—1751. [司东霞, 崔振岭, 陈新平, 等. 不同控释氮肥对夏玉米同化物积累及氮平衡的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25 (6): 1745—1751.]
- [18] Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. The measurement method and its application of soil microbial biomass[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006. [吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. *土壤微生物生物量测定方法及应用*[M]. 北京: 气象出版社, 2006.]
- [19] Yang L F, Zeng Q, Li H B, et al. Measurement of catalase activity in soil by ultraviolet spectrophotometry[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42 (1): 207—210. [杨兰

- 芳, 曾巧, 李海波, 等. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. 土壤通报, 2011, 42 (1): 207—210.]
- [20] Liu S Y, Dong S T, Zhao B Q, et al. Effects of long-term fertilization on activities of key enzymes related to nitrogen metabolism (ENM) of maize leaf[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33 (2): 278—283. [刘淑云, 董树亭, 赵秉强, 等. 长期施肥对夏玉米叶片氮代谢关键酶活性的影响[J]. 作物学报, 2007, 33 (2): 278—283.]
- [21] Luo Y. Characteristic of different tillage practices on nitrogen loss from run-off of yellow soil on sloping farm land[D]. Guiyang: Guizhou University, 2015. [罗益. 不同耕作模式下黄壤坡耕地地表径流氮素流失特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.]
- [22] Zeng J. Chemical characterization of rainwater and spatial-temporal variation of nitrogen deposition in a small Karst catchment[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018. [曾杰. 喀斯特小流域降水化学特征及氮沉降时空差异[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.]
- [23] Xu Y X, He L L, Liu Y X, et al. Effects of biochar addition on enzyme activity and fertility in paddy soil after six years [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (4): 1110—1118. [许云翔, 何莉莉, 刘玉学, 等. 施用生物炭 6 年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (4): 1110—1118.]
- [24] Zhao J, Geng Z C, Shang J, et al. Effects of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (8): 2355—2362. [赵军, 耿增超, 尚杰, 等. 生物炭及炭基硝酸铵对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36 (8): 2355—2362.]
- [25] Lea P J, Mifflin B J. Alternative route for nitrogen assimilation in higher plants[J]. *Nature*, 1974, 251 (5476): 614—616.
- [26] Li J, Zhao B Q, Li X Y, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41 (1): 144—152. [李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41 (1): 144—152.]
- [27] Schnürer J, Rosswall T. Mineralization of nitrogen from ^{15}N labelled fungi, soil microbial biomass and roots and its uptake by barley plants[J]. *Plant and Soil*, 1987, 102 (1): 71—78.
- [28] Zhou F, Geng Z C, Xu C Y, et al. Effect of biochar addition on soil microbial biomass and metabolic activities of carbon sources in Lou soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 (8): 1277—1289. [周凤, 耿增超, 许晨阳, 等. 生物炭用量对壤土微生物量及碳源代谢活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (8): 1277—1289.]
- [29] Chen Y, Chen W, Lin Y C, et al. Effects of biochar on the micro-ecology of tobacco-planting soil and physiology of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (12): 3781—3787. [陈懿, 陈伟, 林叶春, 等. 生物炭对植烟土壤微生态和烤烟生理的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (12): 3781—3787.]
- [30] Liu C X, Zhao H J, Dong S T, et al. Study on characteristics of nitrogen metabolism in diallel cross generation of different maize genotypes after silking[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (1): 33—42. [刘春晓, 赵海军, 董树亭, 等. 玉米不同基因型双列杂交代抽丝后氮素代谢特性[J]. 中国农业科学, 2014, 47 (1): 33—42.]
- [31] González-Moro B, Mena-Petite A, Lacuesta M, et al. Glutamine synthetase from mesophyll and bundle sheath maize cells: Isoenzyme complements and different sensitivities to phosphinothricin[J]. *Plant Cell Reports*, 2000, 19 (11): 1127—1134.
- [32] Chew J, Zhu L L, Nielsen S, et al. Biochar-based fertilizer: Supercharging root membrane potential and biomass yield of rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136431.
- [33] Ju X T, Liu X J, Zou G Y, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35 (12): 1493—1499. [巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35 (12): 1493—1499.]
- [34] Cayuela M L, Sánchez-Monederol M A, Roig A, et al. Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N_2O emissions? [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3 (1732): 1—6.
- [35] Wang J, Shi Y, Li Z Y, et al. Effects of biochar application on N_2O emission in degraded vegetable soil and in remediation process of the soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (3): 713—723. [王军, 施雨, 李子媛, 等. 生物炭对退化蔬菜地土壤及其修复过程中 N_2O 产排的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53 (3): 713—723.]
- [36] Liu Y, Li Z H, Zou B, et al. Research progress in effects of biochar application on crop growth and synergistic mechanism of biochar with fertilizer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28 (3): 1030—1038. [刘悦, 黎子涵, 邹博, 等. 生物炭影响作物生长及其与化肥混施的增效机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (3): 1030—1038.]
- [37] Li Y L, Cheng J Z, Lee X, et al. Effects of biochar-based fertilizers on nutrient leaching in a tobacco-planting soil[J]. *Acta Geochimica*, 2019, 38 (1): 1—7.

(责任编辑: 陈荣府)