

长期种植施肥对烤烟产质量和土壤氮素形态的影响

肖庆亮¹, 刘京², 李治模², 袁玲^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 贵州省烟草公司遵义市公司, 贵州 遵义 563000)

摘要: 依托在遵义市 2004 年建立的烤烟长期田间定位试验, 研究了不同烤烟种植 (烤烟连作和烤烟 // 玉米轮作) 和施肥 (单施化肥和化肥有机肥配施) 制度下, 2017、2019 和 2021 年烟叶产质量、肥料农学效率、土壤氮素和酶活性的变化, 解析长期种植及施肥对植烟黄壤氮素形态的影响及其机制, 为植烟土壤氮素营养管理提供科学依据。结果表明, 轮作烤烟的产量、中上等烟比例、产值、肥料农学效率分别比连作处理增加 31.4%、6.2%、37.2%、35.9%, 说明烤烟轮作有益于提高烤烟产量和质量。在烤烟连作模式中, 化肥配施有机肥使上述参数依次比单施化肥增高 24.7%、9.1%、28.9% 和 24.8%; 在烤烟轮作的土壤上, 化肥配施有机肥使烤烟产量产值在 3 季中 2 季增加, 总体上改善了烟叶质量。这些现象与轮作减轻烤烟的自毒作用, 有机无机配施增加土壤全量和碱解氮、铵态氮、硝态氮含量, 提高土壤酶 (蛋白酶、脲酶、硝酸和亚硝酸还原酶) 活性, 促进土壤氮素转化, 改善土壤氮素供应, 以及烤烟 // 玉米轮作和化肥配施有机肥提高土壤硝态氮含量密切相关。因此, 在黔北烟区, 值得提倡烤烟 // 玉米轮作和化肥配施有机肥。

关键词: 氮素形态; 烤烟; 种植; 施肥

烤烟是一种收获叶片的经济作物, 氮素营养对烟株的生长发育和烟叶产质量至关重要。作物吸收的氮主要来源于土壤和肥料, 土壤对烤烟氮的贡献率大于 60%^[1], 对中上部烟叶的供应比例高达 60%, 在烟碱合成过程中, 来自于土壤的氮显著大于肥料^[2]。因此, 土壤氮素形态和供应对烤烟产量、品质影响极大。在不同种植制度中, 由于作物不同, 施肥管理各异, 土壤中的氮素形态和含量也不一样^[3]。以往人们较多关注施肥 (尤其是氮肥) 对烟叶产量和品质的影响^[4], 较少在不同种植及施肥条件下, 长期跟踪烟叶产质量和土壤氮素肥力的变化规律, 而开展有关研究可为烤烟种植的氮素营养管理和烟地长期可持续利用提供科学依据。

贵州省是我国第二大烤烟主产区, 烤烟是烟农的主要经济来源。尽管烤烟连作存在弊端^[5], 但因耕地资源有限和烤烟经济收益高于其他夏粮作物, 烤烟连作和烤烟 // 玉米轮作是当地长期共存的两种主要种植模式。在不同种植制度中, 合理施肥

是作物高产优质的重要措施^[6]。目前, 虽然对化学氮肥投入过量造成的危害已有充分的认识, 但在烤烟不同的种植制度中, 长期施肥 (包括单施化肥和化肥配施有机肥) 如何影响土壤氮素转化与供应, 土壤氮供应与烤烟产质量有何关系, 化肥与有机肥配施是否有益于改善土壤氮素供应并提高肥料利用效率? 显然, 要回答这些问题需要进行长期肥料试验。但我国的烤烟种植与施肥的研究多为短期试验^[7-8], 而种植制度和肥料施用对土壤的影响却很难在短期看到效果, 更不易揭示其变异规律。为此, 本文依托贵州省遵义市的烟地肥力肥效长期定位试验 (建于 2004 年, 至今已正常运行 18 年), 探究了不同种植 (烤烟连作与烤烟 // 玉米轮作) 和施肥 (单施化肥和化肥有机肥配施) 制度下, 5 年 3 季烟叶产量、产值、品质、土壤氮素形态的变化, 目的是为黔北烟区黄壤合理种植及科学施肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于贵州省遵义市三岔烟草科技园 (27° 32' 2" N, 106° 56' 32" E), 海拔 885 m, 年均温 15.5 °C, 年均降水量 1100 mm, 年均日照 1150 h, 无霜期 270 d。供试土壤为黄壤, pH 7.45, 有机质

收稿日期: 2022-09-26; 录用日期: 2022-10-08

基金项目: 贵州省烟草公司遵义市公司科技项目 (2020XM03)。

作者简介: 肖庆亮 (1998-), 硕士研究生, 研究方向为植物营养与环境。E-mail: xql1029237229@163.com。

通讯作者: 袁玲, E-mail: 879937430@qq.com。

17.91 g · kg⁻¹, 全氮 0.78 g · kg⁻¹, 全磷 0.61 g · kg⁻¹, 全钾 18.35 g · kg⁻¹, 碱解氮 69.96 mg · kg⁻¹, 有效磷 18.72 mg · kg⁻¹, 速效钾 286.4 mg · kg⁻¹。

1.2 试验设计

本研究设置 6 个试验处理: (1) 烤烟连作 - 不施肥 (C-CK); (2) 烤烟连作 - 单施化肥 (C-CF); (3) 烤烟连作 - 化肥配施有机肥 (C-MCF); (4) 烤烟 // 玉米轮作 - 不施肥 (R-CK); (5) 烤烟 // 玉米轮作 - 单施化肥 (R-CF); (6) 烤烟 // 玉米轮作 - 化肥配施有机肥 (R-MCF)。试验始于 2004 年, 在烤烟 // 玉米轮作处理中, 奇数年夏季种植烤烟, 偶数年夏季种植玉米; 自 2016 年起, 冬季种植黑麦草, 不施肥, 来年烤烟种植前 25 ~ 30 d 翻耕入土作基肥。

除 CK 外, 在单施化肥 (CF) 与化肥配施有机肥处理 (MCF) 中, 氮、磷、钾养分的用量相等, 基肥与追肥施用比例相同。CF 的基肥全部为烤烟专用基肥 (N: P₂O₅: K₂O=9: 9: 25, 750 kg · hm⁻²), 而 MCF 的基肥分别由烤烟专用基肥 (375 kg · hm⁻²) 和商品有机肥 (总养分 5%, 1687.5 kg · hm⁻²) 组成, 不足的磷、钾分别用过磷酸钙 (P₂O₅ 12%) 和硫酸钾 (K₂O 50%) 补足; CF 和 MCF 的追肥均在移栽后第 10 d 和 30 d 左右施用烤烟专用追肥 (N: P₂O₅: K₂O=15: 0: 30) 75 和 150 kg · hm⁻²。小区面积为 20 m², 各处理重复 3 次, 随机区组排列, 供试烤烟品种为 K326。田间管理按当地优质烟叶生产技术标准进行。

1.3 测定项目及方法

烘烤烟叶按照《烤烟》GB 2635 - 1992 进行测定, 参照当地当年烟叶收购价格计算产值。

在烤烟成熟后, 各小区烤烟统一由当地农户烘烤, 选取烤后代表性中部烟叶, 65 °C 烘干至恒重, 粉碎过 0.25 mm 筛, 用 NIR256-2.5 近红外光谱分析仪 (Ocean Optics 有限公司, 波长范围: 900 ~ 2500 nm) 测定烟碱、还原糖、氮、钾、氯、蛋白质和淀粉含量; 植株样品用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化, 分别用凯氏定氮法测定总氮, 钼蓝比色法测定总磷, 火焰光度计测定总钾, 并计算烟叶养分 (N、P、K) 吸收量, 以及肥料 (指施用的全部肥料之和, 按 N、P₂O₅、K₂O 计) 农学效率和经济学效率^[9]。

肥料经济学效率 = 作物产量 / 作物养分吸收量

肥料农学效率 = (施肥的作物产量 - 不施肥的作物产量) / 肥料施用量

在烤烟移栽前, 利用五点取样法采集 0 ~ 20 cm 耕层的土壤, 常规分析测定土壤全氮、碱解氮、铵态氮和硝态氮^[10]; 采用氯仿熏蒸 - 0.5 mol/L K₂SO₄ 提取、靛酚蓝比色法测定微生物量氮^[11]。采用 Folin 比色法、靛酚蓝比色法、酚二磺酸比色法和格里试剂显色法分别测定土壤蛋白酶、脲酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶^[12]。

本研究基于 2017、2019 和 2021 年 (奇数年) 所有处理均种植烤烟的产量、品质数据, 以及 2021 年烤烟移栽前的土壤分析数据。

1.4 统计分析

分别用 Excel 2016、SPSS 19.0 和 Origin 8.1 对数据进行基本计算、分析和作图, 处理之间差异显著性比较采用邓肯 (Duncan) 法 (P < 0.05)。

2 结果与分析

2.1 长期种植施肥对烤烟产量和质量的影响

2.1.1 烤烟产量

图 1 为近 5 年 (2017—2021 年) 3 次烤烟种植年份 (2017、2019 和 2021 年) 各处理的烟叶平均产量。种植模式显著影响烟叶产量, 即轮作施肥的烤烟产量显著高于连作施肥, 分别增产 11.9% (2017 年)、9.0% (2019 年) 和 31.4% (2021 年)。在相同种植制度下, 不同施肥模式也显著影响烤烟产量。在烤烟连作时, C-MCF 处理的烟叶产量均高于 C-CF 处理; 在烤烟 // 玉米轮作时, 3 年中有 2 年 R-MCF 处理的烟叶产量高于 R-CF 处理。此外, 烟叶产量在年际上也存在显著差异, 以 2021 年的产量最高, 其余两年无显著差异。在 CK 中, 烟叶产量则是随着种植年限的延长而显著下降。

2.1.2 烤烟中上等烟叶比例和化学品质

表 1 是种植施肥对中上等烟的比例和部分化学成分的影响。(1) 中上等烟比例: CK 最低, 连作 - 单施化肥次之; 轮作施肥显著高于连作施肥, 平均增加 6.2%; 烤烟连作、化肥配施有机肥显著高于单施化肥, 平均增高 9.1%。(2) 烟碱: CK 最低; 施肥处理的烟碱含量介于 1.25% ~ 1.51%。其中, 以 C-MCF 处理的最高, R-MCF 处理的最低。(3) 还原糖: 种植模式和施肥对烟叶还原糖含量均无显

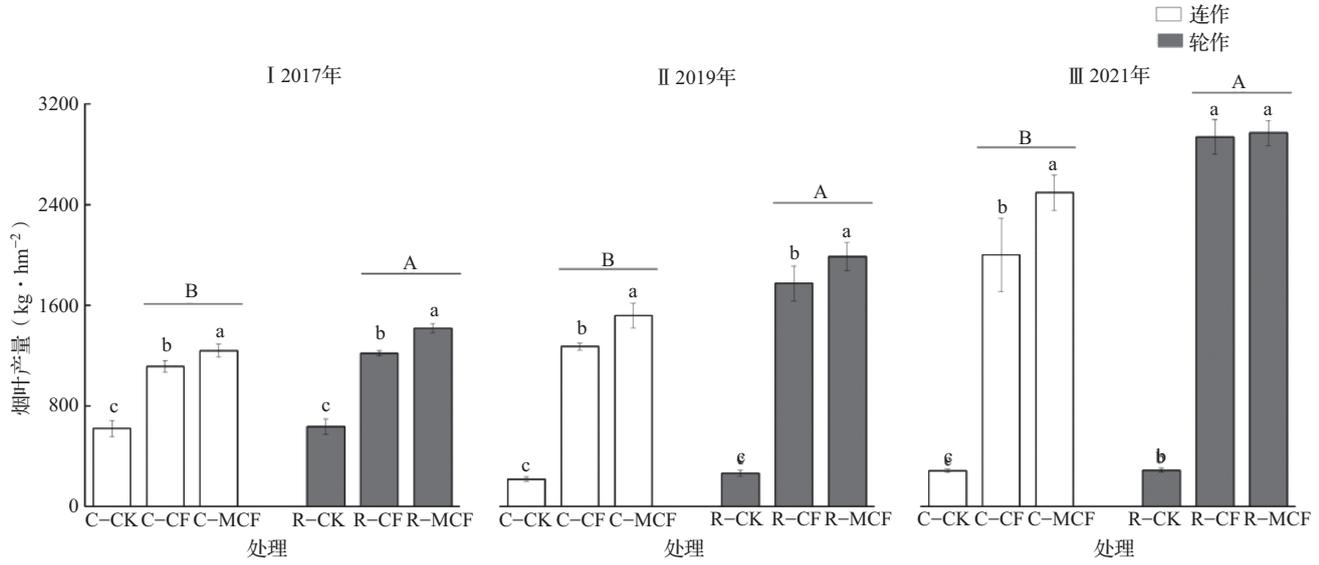


图 1 长期种植施肥对烟叶产量的影响

注：图中的不同大写字母表示相同年份种植模式之间的差异显著，不同小写字母表示同一种种植模式中施肥处理之间的差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

著影响。(4) 氮含量: CK 最低, 种植模式之间无差异, 单施化肥高于有化肥配施机肥。(5) 钾含量: CK 最高, R-MCF 处理次之, 种植模式之间和施肥模式之间无差异。(6) 氯含量: CK 最高, 轮作、连作之间和施肥处理之间无差异。(7) 糖碱比: CK 最高, C-MCF 处理最低, 轮作、连作之间和施肥处

理之间无差异。(8) 氮碱比: CK 最高, C-MCF 处理最低, 轮作烟叶的氮碱比高于连作, 但施肥处理之间无差异。(9) 钾氯比: R-MCF 处理最高, 轮作、连作之间和施肥处理之间无差异。总之, 在烤烟轮作和化肥有机肥配施处理中, 烟叶品质总体上有所改善。

表 1 种植施肥对中上等烟比例和烟叶部分化学成分的影响

种植模式	施肥模式	中上等烟比例 (%)	烟碱 (%)	还原糖 (%)	氮 (%)	钾 (%)	氯 (%)	糖碱比	氮碱比	钾氯比
烤烟连作	CK	13.33c	0.97c	24.70a	1.28b	2.52a	0.53a	25.38a	1.31a	4.78b
	CF	69.67b	1.38ab	24.88a	1.67a	2.15abc	0.40b	18.10b	1.21bc	5.38ab
	MCF	76.00a	1.51a	24.63a	1.66a	1.96c	0.42b	16.62b	1.10c	4.71b
烤烟//玉米轮作	CK	15.33c	0.97c	24.70a	1.28b	2.52a	0.53a	25.38a	1.31a	4.78b
	CF	76.33a	1.38ab	23.49a	1.76a	2.04bc	0.42b	17.09b	1.27ab	4.89b
	MCF	78.33a	1.25b	24.15a	1.61a	2.44ab	0.42b	19.30b	1.28ab	5.85a
模式间差异显著性分析										
种植模式		**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns
施肥模式		**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
种植 × 施肥		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注：同列数据后不同小写字母者表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$)，*、** 分别表示两种种植模式或施肥模式之间差异显著、极显著，ns 为不显著，下同。

由图 2 可见, 烤烟//玉米轮作的烟叶产值显著高于烤烟连作, 平均增加 17.1% (2017 年)、34.9% (2019 年) 和 37.2% (2021 年)。施肥显著影响烟叶产值, 尤其在烤烟连作模式中, 有机肥化肥配施处

理显著高于单施化肥处理, 2017、2019 和 2021 年分别提高 19.0%、19.4% 和 33.3%; 在轮作烟地上, 3 年中有 2 年 (2017 和 2019 年) 表现出有机肥配施化肥的烟叶产值高于单施化肥处理。

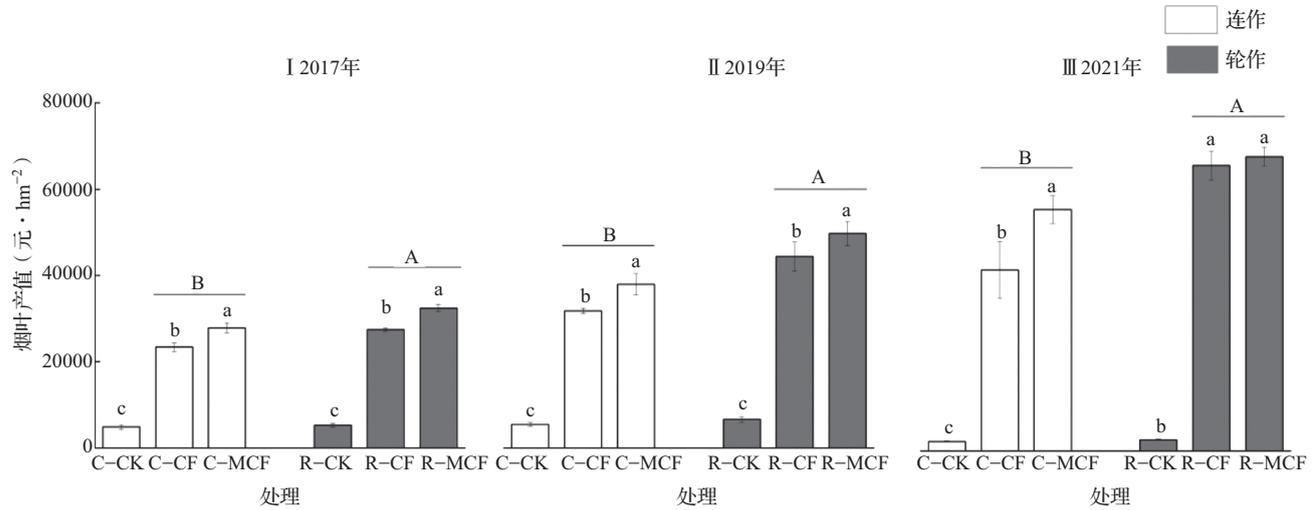


图 2 种植施肥模式对烟叶产值的影响

2.2 种植施肥模式对烟叶养分积累和养分利用效率的影响

表 2 为种植、施肥模式对烟叶养分积累和养分利用效率的影响。

氮积累量: CK 最低, R-CF 处理最高, 依次变化为 R-CF > R-MCF > C-MCF > C-CF > C-CK = R-CK; 轮作烟株的氮积累量极显著高于连作; 单施化肥与化肥配施有机肥之间无显著差异, 但连作与单施化肥存在显著的负交互作用, 即 C-CF 处理显著降低了烤烟叶片氮的积累量。

磷积累量: CK 最低; 在施肥条件下, 烟叶磷

积累量烤烟轮作显著高于连作; 施肥处理之间无差异, 种植模式和施肥处理之间无交互作用。

钾积累量: CK 最低, R-MCF 处理最高, 依次变化为 R-MCF > R-CF > C-MCF > C-CF > C-CK = R-CK; 在施肥条件下, 烟叶钾积累量烤烟轮作显著高于连作; 化肥配施有机肥高于单施化肥, 种植模式和施肥处理之间无交互作用。

肥料农学效率: C-CF 处理最低, 烤烟//玉米轮作极显著高于烤烟连作, 肥料农学效率增加 35.9%; 烤烟连作模式中, 化肥配施有机肥显著高于单施化肥, 肥料农学效率无交互作用。

表 2 种植施肥模式对烟叶养分积累量及养分利用效率的影响

种植模式	施肥模式	氮积累量 (kg · hm ⁻²)	磷积累量 (kg · hm ⁻²)	钾积累量 (kg · hm ⁻²)	肥料农学效率 (kg · kg ⁻¹)	肥料经济学效率 (kg · kg ⁻¹)
烤烟连作	CK	1.38d	1.65c	7.59d	—	—
	CF	13.50c	5.45b	40.12c	4.05c	33.86a
	MCF	16.30bc	6.34ab	52.21b	5.22b	33.35ab
烤烟//玉米 轮作	CK	1.38d	1.75c	7.59d	—	—
	CF	21.08a	8.04a	60.99b	6.26a	32.75ab
	MCF	18.11ab	7.28a	71.02a	6.34a	30.88b
模式间差异显著性分析						
种植模式		**	*	**	**	*
施肥模式		ns	ns	*	*	ns
种植 × 施肥		*	ns	ns	ns	ns

肥料经济学效率: C-CF 最高, R-MCF 最低; 烤烟连作显著高于烤烟 // 玉米轮作, 但施肥处理之间无差异, 种植模式和施肥处理之间无交互作用。

2.3 长期种植施肥对植烟土壤氮素养分及相关酶活性的影响

2.3.1 土壤氮素养分

表 3 为长期种植、施肥模式对植烟土壤几种氮素形态的影响。

土壤全氮: CK 最低, CF 次之, MCF 处理最高。其中, CF 比 CK 增高了 7.63% ~ 10.85%, 化肥配施有机肥比单施化肥增加 2.23% ~ 3.50%, 两种种植模式之间无显著差异。

碱解氮: 土壤碱解氮的变化类似全氮, 即施肥显著影响土壤碱解氮含量, 化肥配施有机肥的土壤碱解氮含量显著高于单施化肥, 平均增加 6.69% ~ 25.67%, 但种植模式对碱解氮无显著影响。

微生物量氮: MCF 处理最高, CF 处理次之,

CK 最低。施肥模式显著影响土壤微生物量氮的含量, 化肥配施有机肥的土壤微生物量氮含量显著高于单施化肥, 增加 10.49% ~ 13.9%。种植模式之间无差异。

铵态氮: 土壤铵态氮含量的变化类似全氮和碱解氮, 即施肥模式极显著地影响其含量, 化肥配施有机肥的土壤铵态氮含量显著高于单施化肥, 增加 9.52% ~ 16.05%, 但种植模式之间无差异。

硝态氮: 处理间差异显著, MCF 和 R-CF 处理均显著高于其他处理; 烤烟 // 玉米轮作的土壤硝态氮含量显著高于连作, 增加 7.25% ~ 20.23%; 在烤烟连作的土壤中, 化肥配施有机肥的土壤硝态氮含量显著高于单施化肥, 平均增加 18.40%。

相关分析表明, 土壤全氮与碱解氮、微生物量氮分别呈极显著正相关关系 (相关系数分别是 0.925^{**}、0.942^{**}, n=18); 土壤铵态氮与硝态氮呈显著正相关 (相关系数为 0.48^{*}, n=18)。

表 3 长期种植施肥模式对土壤不同形态氮的影响

种植模式	施肥模式	全氮 (g · kg ⁻¹)	碱解氮 (mg · kg ⁻¹)	微生物量氮 (mg · kg ⁻¹)	铵态氮 (mg · kg ⁻¹)	硝态氮 (mg · kg ⁻¹)
烤烟连作	CK	1.31d	54.86d	5.46d	6.63d	6.29c
	CF	1.41c	105.83b	7.05c	14.55b	13.76b
	MCF	1.44b	112.91ab	8.03ab	15.93a	16.30a
烤烟 // 玉米 轮作	CK	1.29d	55.08d	5.67d	5.99d	5.70c
	CF	1.43bc	94.99c	7.53bc	13.61c	16.55a
	MCF	1.48a	119.37a	8.32a	15.79a	17.48a
模式间差异显著性分析						
种植模式		ns	ns	ns	ns	**
施肥模式		**	**	*	**	**
种植 × 施肥		ns	ns	ns	ns	ns

2.3.2 土壤酶活性

表 4 可见, 蛋白酶: CK 最低, R-MCF 处理最高, 烤烟 // 玉米轮作极显著高于连作, 化肥配施有机肥极显著高于单施化肥。连作与单施化肥存在显著负交互作用, 即 C-CF 处理显著降低土壤蛋白酶的活性。脲酶: CK 最低, R-MCF 处理最高, 轮作、连作之间无显著差异, 化肥配施有机肥处理

极显著高于单施化肥处理。硝酸还原酶: CK 最低, C-MCF 处理最高, 烤烟连作极显著高于烤烟 // 玉米轮作, 化肥配施有机肥处理极显著高于单施化肥处理。亚硝酸还原酶: 土壤亚硝酸还原酶活性 MCF 处理最高, 单施化肥次之, CK 最低; 种植模式之间无显著差异, 化肥配施有机肥极显著高于单施化肥。

表 4 长期种植施肥模式对土壤酶活性的影响

种植模式	施肥模式	蛋白酶	脲酶	硝酸还原酶	亚硝酸还原酶
		($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
烤烟连作	CK	143.76d	209.87de	3.01e	0.56c
	CF	189.84c	244.28cd	5.32c	1.12b
	MCF	197.19c	381.58b	6.84a	1.26a
烤烟 // 玉米轮作	CK	147.18d	194.78e	2.79e	0.61c
	CF	215.27b	255.42c	4.58d	1.15b
	MCF	239.36a	431.02a	6.35b	1.33a
模式间差异显著性分析					
种植模式		**	ns	**	ns
施肥模式		**	**	**	**
种植 × 施肥		*	ns	ns	ns

2.3.3 植烟土壤不同形态的氮与相关酶活性的关系

在植烟土壤中，不同形态的氮与酶活性的相关关系见表 5。土壤蛋白酶、脲酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的活性均与 5 种氮形态呈极显著正相关关系，相关系数变幅为 0.732 ~ 0.975。

其中，蛋白酶活性与全氮的相关系数最大 ($r = 0.927$)；脲酶活性与微生物量氮的相关系数最大 ($r = 0.831$)；硝酸还原酶活性与碱解氮的相关系数最大 ($r=0.953$)；亚硝酸还原酶与铵态氮的相关系数最大 ($r=0.975$)。

表 5 植烟土壤氮素形态与相关土壤酶活性的相关分析

土壤酶	土壤氮素形态指标				
	全氮	碱解氮	微生物量氮	铵态氮	硝态氮
蛋白酶	0.927**	0.867**	0.888**	0.874**	0.866**
脲酶	0.787**	0.783**	0.831**	0.760**	0.732**
硝酸还原酶	0.920**	0.953**	0.898**	0.946**	0.927**
亚硝酸还原酶	0.958**	0.961**	0.939**	0.975**	0.954**

注: n=18, ** 表示 $P \leq 0.01$ 。

2.4 烟叶产质量与土壤不同形态氮和土壤酶活性的相关性分析

表 6 可见，土壤不同氮形态（全氮、碱解氮、铵态氮、硝态氮和微生物量氮含量）与烟叶产量、中上等烟比例、氮含量、烟碱、总糖、蛋白质含量呈极显著正相关，与烟叶淀粉含量、糖碱比呈极显著负相关；除土壤全氮含量以外，碱解氮、铵态氮、硝态氮和微生物量氮含量还与氮碱比呈显著或极显著的负相关。

土壤蛋白酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性与烟叶产量、中上等烟比例、氮含量、烟碱、总糖、蛋白质含量呈极显著正相关，与淀粉含量和糖碱比呈极显著负相关；硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性与氮碱比呈极显著或显著负相关；土壤脲酶活性与烟叶产量和中上等烟比例呈极显著正相关，与烟叶含氮量、烟碱和总糖呈显著正相关，与糖碱比呈显著负相关。

表 6 烟叶产质量与土壤不同形态氮和相关酶活性的相关性分析

烟叶指标	土壤的不同形态的氮和相关酶活性指标								
	全氮	碱解氮	铵态氮	硝态氮	微生物量氮	蛋白酶	脲酶	硝酸还原酶	亚硝酸还原酶
产量	0.928**	0.900**	0.932**	0.902**	0.924**	0.949**	0.736**	0.828**	0.955**
中上等烟叶比例	0.942**	0.944**	0.977**	0.956**	0.912**	0.911**	0.698**	0.886**	0.977**
氮含量	0.750**	0.749**	0.798**	0.784**	0.703**	0.754**	0.477*	0.676**	0.798**
烟碱	0.730**	0.777**	0.831**	0.815**	0.713**	0.665**	0.526*	0.765**	0.792**
总糖	0.683**	0.823**	0.825**	0.797**	0.746**	0.601**	0.567*	0.786**	0.767**
蛋白质	0.713**	0.733**	0.771**	0.748**	0.656**	0.706**	0.434	0.645**	0.738**
淀粉	-0.904**	-0.780**	-0.770**	-0.780**	-0.741**	-0.830**	-0.635**	-0.767**	-0.825**
糖碱比	-0.784**	-0.801**	-0.850**	-0.842**	-0.758**	-0.751**	-0.542*	-0.755**	-0.821**
氮碱比	-0.438	-0.557*	-0.593**	-0.579*	-0.492*	-0.282	-0.409	-0.636**	-0.501*

注: n=18, * 表示 $P \leq 0.05$, ** 表示 $P \leq 0.01$ 。

3 讨论

3.1 长期轮作和化肥配施有机肥提高烤烟产质量和肥料利用效率

相对于烤烟连作, 长期烤烟//玉米轮作显著提高了烟叶产量、产值、养分吸收量, 肥料农学效率 and 经济学效率, 并在总体上改善了烟叶品质。据报道, 烤烟连作根系能分泌化感物质, 产生自毒作用, 抑制其生长^[13]。因此, 在长期连作的土壤中, 烤烟生长受到抑制, 生长发育欠佳, 产量、产值和品质降低^[14]。玉米为禾本科, 与烤烟的亲缘关系较远, 根系分泌物差异较大, 互相影响的可能较小。此外, 从植物营养的角度看, 烤烟和玉米对土壤养分的需求比例也不一样, 施肥方案也不同, 具有互补作用。在长期烤烟//玉米轮作的处理中, 烤烟生长较好, 不仅烟叶产量较高, 而且吸收养分较多, 肥料利用率增加。需要指出的是, 在烤烟种植中, 叶片被收获, 根茎被移除; 在玉米种植过程中, 留下大量的根茬于土壤中, 间接起到补充土壤有机质和养分之作用, 长期如此, 积微成显, 改良土壤的作用不可忽视, 也有益于在长期烤烟//玉米轮作处理中提高烟叶产量品质。

化肥配施有机肥比单施化肥显著提高烤烟的产量、产值、养分吸收量和肥料利用效率, 并在总体上改善了烟叶品质, 类似前人研究^[15]。在遵义地区, 基肥在移栽前 3 ~ 4 周施入土壤, 烟苗 4 月下旬移栽, 5 月下旬进入养分需要最多的旺长期, 施用基肥的时间与烟株吸收养分最多的时期相差约 2

个月。在单施化肥的处理中, 烟株在进入旺长期前, 基肥中的化学养分可能出现较多的淋溶、挥发和反硝化损失(氮肥)或转化成无效态(磷钾肥), 造成肥料利用率降低; 若要满足烟株氮素营养, 必需加大用量。相反, 化肥配施有机肥, 缓急相济, 养分供应协调, 这可能是在烤烟种植过程中, 化肥配施有机肥显著提高养分吸收量和肥料利用效率的重要原因之一。

3.2 长期轮作和施肥对土壤氮素含量的影响

化肥配施有机肥分别比单施化肥提高了土壤氮素含量(全氮、碱解氮、铵态氮、硝态氮和微生物量氮)。土壤氮素 95% 以上存在于有机质中^[16], 化肥配施有机肥使土壤全氮增加意味着有机质含量提高, 对于改善土壤物理、化学和生物学性质有积极作用。烤烟是收获叶片的经济作物, 需氮量一般大于禾本科作物。氮素供应对烟叶产质量的影响极大^[17]。Meta 分析也发现, 长期施用有机肥可以提高我国土壤生产力和作物产量, 化肥配施有机肥比单施化肥显著提高土壤速效氮含量^[18]。在本试验中, 土壤有效氮(碱解氮、铵态氮和硝态氮, 下同)均与烟叶产量、中上等烟叶比例和烟叶含氮量呈显著或极显著正相关, 支持化肥配施有机肥改善土壤氮素供应, 提高烟叶产量、品质和产值的观点^[19]。值得注意的是, 烤烟//玉米轮作极显著地提高了烟地土壤中的硝态氮含量。烤烟是喜硝态氮的作物, 供应硝态氮促进烟株生长发育, 改善烟叶产质量。因此, 仅土壤氮素组成看, 烤烟//玉米轮作优于

连作。

3.3 长期轮作和施肥对土壤酶活的影响

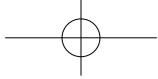
长期化肥配施有机肥极显著提高土壤蛋白酶、脲酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的活性, 烤烟//玉米轮作极显著增加蛋白酶和硝酸还原酶的活性。土壤酶来源于有机质施入、作物和微生物分泌, 其中微生物的持续分泌是土壤酶的重要来源之一^[12]。据报道, 施用有机肥提供土壤微生物需要的碳源, 促进微生物生长繁殖, 增强土壤酶活性^[20]。在本试验中, 土壤蛋白酶、脲酶、硝酸和亚硝酸还原酶活性与不同形态氮素呈极显著正相关(0.732 ~ 0.961)。在土壤中, 蛋白质占有有机氮的80%以上, 它们与大分子碳水化合物和矿物结合, 蛋白质矿化为 NH_3 , 包括蛋白质水解成氨基酸和氨基酸经氨化作用形成 NH_3 ^[21]。其中, 蛋白酶催化的蛋白质水解作用的反应速率远低于氨化作用, 故蛋白质水解是 NH_3 的限速反应^[22]。烟地土壤中的蛋白酶活性与有效氮呈极显著正相关, 意味着蛋白酶活性增强是有效氮含量增加的驱动因子之一。试验施用的有机肥源于动植物, 土壤脲酶活性增强有益于其中的尿素转化成 NH_3 , 供给烟株氮素营养。植烟土壤硝酸和亚硝酸还原酶活性增强, 硝态氮含量提高, 这种现象可解释为硝酸还原酶催化氨氧化为亚硝酸盐, 亚硝酸还原酶催化亚硝酸盐转化为硝酸盐^[23]。

4 结论

相对于烤烟连作和单施化肥, 烤烟//玉米轮作和化肥配施有机肥显著提高烟叶产量、产值、肥料农学效率和经济学效率, 总体上改善烟叶品质。这些现象与轮作减轻烤烟的自毒作用, 有机无机配施增加土壤全量和有效氮含量, 提高氮转化酶(蛋白酶、脲酶、硝酸和亚硝酸还原酶)活性, 促进土壤氮素转化, 改善土壤氮素供应, 以及烤烟//玉米轮作和化肥配施有机肥提高土壤硝态氮含量密切相关。因此, 在贵州遵义烟区, 提倡烤烟//玉米轮作和化肥配施有机肥有益于高质量发展的烤烟种植。

参考文献:

- [1] 刘青丽, 陈阜, 张云贵, 等. 我国西南烟区典型植烟土壤烤烟氮素的吸收规律[J]. 作物学报, 2013, 39(3): 486-493.
- [2] 刁向银, 赵正雄, 李春俭. 肥料氮和土壤氮对烤烟氮素吸收和烟碱合成的影响[J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 750-753.
- [3] 聂兆君, 秦世玉, 刘红恩, 等. 氮锌配施对冬小麦产量及土壤氮素转化相关酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 431-441.
- [4] 余小芬, 杨树明, 邹炳礼, 等. 菜籽油枯有机无机复混肥对烤烟产质量及养分利用率的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1564-1574.
- [5] 杜杏蓉, 李运国, 邓小鹏, 等. 连作对不同类型植烟土壤化学性状、酶活性及细菌群落的影响[J]. 中国烟草科学, 2021, 42(5): 30-35.
- [6] 陈华, 赵文军, 王正旭, 等. 不同轮作模式下氮素调控对烤烟产质量及氮肥利用的影响[J]. 河南农业科学, 2021, 50(9): 87-95.
- [7] 陈雪, 翟欣, 杨振智, 等. 特制酒糟有机肥对喀斯特烟区烤烟生长与品质的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1151-1160.
- [8] 饶德安, 刘潘洋, 邹路易, 等. 长期连作及强还原土壤灭菌处理对烤烟根际土壤真菌群落的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(4): 47-56.
- [9] 王鹏, 段焰, 张建军, 等. 缓释肥配合减氮对烤烟品质和氮素利用的影响[J]. 中国烟草科学, 2021, 42(5): 23-29.
- [10] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [11] Frostegard A, Tunlid A, Baath E. Phospholipid fatty acid composition, biomass, and activity of microbial communities from two soil types experimentally exposed to different heavy metals[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, 59(11): 3605-3617.
- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [13] 郭亚利, 李明海, 吴洪田, 等. 烤烟根系分泌物对烤烟幼苗生长和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 14(3): 458-463.
- [14] 李柘锦, 朱文桥, 黄坤, 等. 连作对烤烟农艺性状、根系形态与土壤养分的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(2): 67-72.
- [15] 韩鹤鸣. 有机肥配施减量化肥对烟草产量、品质及水肥利用效率的影响[D]. 滁州: 安徽科技学院, 2020.
- [16] 周健民, 沈仁芳. 土壤学大辞典[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [17] 李春俭, 张福锁, 李文卿, 等. 我国烤烟生产中的氮素管理及其与烟叶品质的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 331-337.
- [18] Yadan D, Bingjing C, Qian Z, et al. Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: a meta-analysis[J]. Catena, 2020, 193(5): 3231-3239.
- [19] 卢钰升, 顾文杰, 李集勤, 等. 化肥有机替代对烤烟产质量、土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(16): 22-27.
- [20] 程万莉, 樊廷录, 张建军, 等. 等氮条件下长期施用有机物料氮替代部分无机氮对黑垆土氮素及相关酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 42-47.
- [21] 焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 等. 施氮量对农田土壤有机氮组分及酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(12):



- 2423–2434.
- [22] Katsuji W, Koichi H. Seasonal variation of soil protease activities and their relation to proteolytic bacteria and *Bacillus* spp. in paddy field soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27 (2): 197–203.
- [23] 奚雅静, 汪俊玉, 李银坤, 等. 滴灌水肥一体化配施有机肥对土壤 N₂O 排放与酶活性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (20): 3611–3624.

Effects of long-term cultivation and fertilization on yield and quality of flue-cured tobacco and soil nitrogen forms

XIAO Qing-liang¹, LIU Jing², LI Zhi-mo², YUAN Ling^{1*} (1. School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715; 2. Guizhou Tobacco Company Zunyi City Company, Zunyi Guizhou 563000)

Abstract: A long-term field experiment on soil fertility and fertilizer efficiency in flue-cured tobacco cultivation was established in 2004 at Zunyi, Guizhou. Relying on this long-term field experiment, the changes in tobacco leaf yield and quality, fertilizer agronomic efficiency, and nitrogen (N) and enzyme activity in the soil under the different tobacco planting (continuous tobacco cultivation, tobacco-maize rotation) and different fertilization (chemical fertilizer alone, combined application of manure plus chemical fertilizers) were investigated in 2017, 2019, and 2021. The objectives were to realize the relationships between tobacco agronomic performances and cultivation models or fertilization practices and to provide a scientific basis for N application in flue-cured tobacco cultivation. Compared with continuous tobacco cultivation, tobacco-maize rotation was increased the leaf yield by 31.4%, the proportion of middle and top grade leaves by 6.2%, leaf economic output by 37.2%, fertilizer agronomic efficiency by 35.9%, and fertilizer economic utilization efficiency by 31.4%. These results indicated that tobacco-maize rotation was beneficial to the improvement of the tobacco leaf yield, quality. In the continuous cropping mode, combined application of manure plus chemical fertilizer application (MCF) increased the abovementioned parameters by 24.7%, 9.1%, 28.9%, and 24.8%, respectively, compared with chemical fertilizer alone. In the tobacco-maize rotation soil, MCF also increased the leaf yield and economic output in two of the three seasons and generally improved the leaf quality. These phenomena are closely related to autotoxicity alleviation, increase in total and alkaline hydrolyzed N, ammonium N, nitrate N, enzyme stimulation (protease, urease, nitrate and nitrite reductase), N transformation promotion, nitrogen supply improvement, and nitrate N enhancement by MCF in the tobacco-maize rotation soil. Taken together, it is worth advocating tobacco-corn rotation and chemical fertilizer combined with organic fertilizer in the northern Guizhou tobacco region.

Key words: nitrogen form; flue-cured tobacco; cultivation; fertilization