

王琛,苗琪,郭迎新,等. 不同施肥处理对洱海流域烤烟生长及氮素利用的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(22):86-93.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.22.012

# 不同施肥处理对洱海流域烤烟生长及氮素利用的影响

王琛<sup>1</sup>,苗琪<sup>1</sup>,郭迎新<sup>1</sup>,王红叶<sup>2</sup>,李军营<sup>3</sup>,王德勋<sup>4</sup>,苏家恩<sup>4</sup>,李江美<sup>4</sup>,张玉飞<sup>5</sup>,孙军伟<sup>4</sup>,崔振岭<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193; 2. 农业农村部耕地质量监测保护中心,北京 100125;

3. 云南省烟草农业科学研究院,云南昆明 650021; 4. 云南省烟草公司大理州公司,云南大理 6710004;

5. 云南省烟草公司大理州公司鹤庆县分公司,云南大理 671500)

**摘要:**为筛选出适用于洱海流域烟田高效低损的施肥方案,以洱海流域2个烤烟主推品种(K326和红花大金元)为研究对象,在洱海西部和北部同时设置4种施肥处理:不施氮肥处理(N0)、农户传统处理(FP)、稳定性氮肥处理(NOPT-1)和缓释氮肥处理(NOPT-2)。根据烤烟经济性状和表层土壤无机氮含量等指标,分析不同施肥处理对洱海流域烤烟生长和氮素利用的影响。结果表明,对于烤烟K326,NOPT-1处理较FP处理提高了产量、产值和各农艺性状,施氮效益提高了6 826元/hm<sup>2</sup>,氮肥偏生产力显著提高78.1%,同时表观氮素损失量降低23.9%;NOPT-2处理施氮效益较FP处理提高了4 292元/hm<sup>2</sup>,氮肥偏生产力显著提高64.8%,表观氮素损失量降低19.2%。对于烤烟红花大金元,NOPT-1处理在产量、产值和农艺性状方面与烤烟K326表现一致,施氮效益提高了10 900元/hm<sup>2</sup>,氮肥偏生产力显著提高32.9%,表观氮素损失量降低58.0%;NOPT-2处理产量和产值低于FP处理,但提高了3 584元/hm<sup>2</sup>的施氮效益,氮肥偏生产力显著提高24.6%,同时表观氮素损失量降低65.5%。综上所述,稳定性氮肥和缓释氮肥处理均可以提高施氮效益,并显著提高氮肥偏生产力,减少氮素损失。其中,稳定性氮肥处理综合表现较好,有效兼顾了烤烟生长和环境效益。

**关键词:**洱海流域;烤烟;生长;氮肥利用;优化施肥;环境效益

**中图分类号:**S572.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)22-0086-08

烟草是我国重要的经济作物之一。我国烟草种植面积虽然只占我国耕地总面积的7%左右,但经济价值较高,对国民经济发展起到了重要作用<sup>[1]</sup>。大理烟区是云南省重要的烟叶产区之一,由于其独特的地理位置和气候条件,该区域烤后烟叶

具有烟气细腻、余味舒适的特点,常年种植面积在3.3万hm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。近年来,由于不合理的农业管理措施,流域内种植业成为水环境的首要污染源,其等标污染负荷在流域总等标污染负荷中的占比为36.4%<sup>[3]</sup>,其中氮为首要污染物<sup>[4]</sup>。研究表明,西南烟区在实际生产中施入土壤中的氮肥超过60%被淋洗<sup>[5]</sup>,大大增加了水体富营养化的风险,造成严重的环境污染和经济损失。

优化施肥方案是当下烤烟实现农田养分资源高效利用的重要措施<sup>[6]</sup>,其核心要求是根据植物养分吸收规律与土壤养分供给规律,确定适宜的施肥量、肥料种类,并实现作物生育期综合管理<sup>[7]</sup>。余

收稿日期:2023-02-05

基金项目:中国烟草总公司云南省公司科技计划重点项目(编号:2020530000241005)。

作者简介:王琛(1999—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事养分优化管理研究。E-mail:wangchen106069@163.com。

通信作者:孙军伟,硕士,农艺师,主要从事烟草栽培研究。E-mail:278836098@qq.com。

[31] 夏来坤,薛华政,李川,等. 水氮互作对夏玉米氮素积累运转及利用的影响[J]. 中国农学通报,2018,34(3):6-9.

[32] Thomas H, Ougham H. The stay-green trait[J]. Journal of Experimental Botany,2014,65(14):3889-3900.

[33] 史宏志,韩锦峰. 烤烟碳氮代谢几个问题的探讨[J]. 烟草科技,1998(2):34-36.

[34] 隗英华,孙文涛,韩晓日,等. 春玉米功能叶片生理特征及产量对施氮的响应[J]. 核农学报,2015,29(2):391-396.

[35] Huppe H C, Turpin D H. Integration of carbon and nitrogen metabolism in plant and algal cells[J]. Annual Review of Plant Physiology & Plant Molecular Biology,1994,45(1):577-607.

[36] 张倩,张洪生,姜雯,等. 种植方式与密度对夏玉米碳、氮代谢和氮利用效率的影响[J]. 华北农学报,2013,28(5):224-230.

[37] Chen D Q, Wang S W, Xiong B L, et al. Carbon/nitrogen imbalance associated with drought-induced leaf senescence in *Sorghum bicolor*[J]. PLoS One,2015,10(8):e0137026.

小芬等研究证明,在常规施肥的基础上减少氮、磷、钾肥的施用能够显著提高烟叶的产值、品质及肥料利用率<sup>[8]</sup>。减少 15% ~ 30% 氮肥施用量可以改善烟叶品质,增加产量和产值<sup>[9]</sup>。在合理减少氮、磷、钾肥施用之外,根据作物和土壤特性选择适宜的氮肥种类也至关重要<sup>[10]</sup>。研究发现,施用缓释氮肥提高了烟叶的产量和农艺性状,改善了烟叶的燃烧性和糖碱比<sup>[11-12]</sup>。危跃通过田间试验证实了缓释肥可以有效保持中后期土壤养分含量,促进烤烟营养元素吸收,提高肥料利用率<sup>[13]</sup>。稳定性肥料是指添加脲酶抑制剂或硝化抑制剂的肥料,能减缓尿素分解及铵态氮硝化反硝化过程中产生的氮素损失<sup>[10]</sup>。熊艳等在玉溪烟区研究发现,施用硝化抑制剂能够显著抑制铵态氮的硝化,减少氮素损失<sup>[14]</sup>。Qiao 等研究发现,肥料中添加硝化抑制剂可以显著减少  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的淋溶损失,显著提高玉米的产量和氮肥利用效率<sup>[15]</sup>。

有关施肥量、氮肥种类对烤烟生长发育、肥料利用率及品质的影响已有不少研究<sup>[11-15]</sup>,但仅减少施氮量或仅调整氮肥种类不能完全解决烟田养分利用率低所带来的相关问题,并且不同烤烟品种、不同土壤类型上存在差异,使得研究结果具有区域性和特定性。因此,在洱海流域开展不同品种烤烟

的养分管理研究,筛选适宜洱海流域烤烟高效生产的施肥方案,使氮素养分供应与烤烟需肥特征在数量上匹配、时间上同步,对提高洱海流域烤烟产量、品质以及保护洱海流域生态环境具有重要参考价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省大理白族自治州大理市,气候以低纬度高原季风气候为主,年均气温 15.1 °C,年均降水量 1 000 mm。田间试验于 2020 年 5 月至 2021 年 10 月在大理市湾桥镇(25°81'N,100°12'E)和洱源县三营镇(26°10'N,99°59'E)进行(以下简称湾桥和三营)。本研究使用数据为 2021 年试验数据。试验为烤烟/冬闲种植体系,株行距为 50 cm × 120 cm,栽培密度为 1 100 株/667 m<sup>2</sup>。湾桥试验点小区面积为 83 m<sup>2</sup>,每小区种植烤烟 137 株,试验品种为 K326,2021 年 5 月 7 日移栽,9 月 23 日为顶叶成熟期,全生育期 139 d。三营试验点小区面积为 131 m<sup>2</sup>,每小区种植烤烟 216 株,试验品种为红花大金元,2021 年 5 月 18 日移栽,9 月 8 日为顶叶成熟期,全生育期 116 d。供试土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验点烟田土壤基础理化性质

地点	土壤类型	pH 值	有机质含量 (g/kg)	总氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
湾桥	红壤	5.71	71.62	4.88	304.00	46.89	236.30
三营	黄壤	8.10	72.44	4.17	239.00	97.97	497.04

### 1.2 试验设计

湾桥镇和三营镇均设置 4 个处理:不施氮肥处理(N0)、农户传统处理(FP)、稳定性氮肥处理(NOPT-1)、缓释氮肥处理(NOPT-2),每个处理 3 个重复,随机区组排列。各处理均为单株定量施肥。

试验所用烟苗为大理市湾桥镇烟叶工作站和洱源县三营镇烟叶工作站统一育苗配发。农户传统处理(FP)施肥方式由湾桥镇和三营镇植烟区农户调研所得。试验所用固态和液态有机肥均为云南顺丰洱海环保科技股份有限公司生产,缓释氮肥为茂施农业科技有限公司生产(含氮量 45%,释放期为 48 d),稳定性氮肥为云天化集团有限责任公司生产(含氮量 26%,硝态氮含量为 10%,含有硝化抑制剂),单质磷肥为过磷酸钙(含 16%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ),单

质钾肥为农用硫酸钾(含 52%  $\text{K}_2\text{O}$ )。

湾桥镇施肥方式: N0: 起垄后环穴施磷肥( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 40 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥( $\text{K}_2\text{O}$ ) 60 kg/hm<sup>2</sup>,移栽后 45 d 追施钾肥( $\text{K}_2\text{O}$ ) 120 kg/hm<sup>2</sup>。FP: 起垄后环穴施固态有机肥(N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量分别为 3.0%、3.0%、7.5%) 1 500 kg/hm<sup>2</sup>,移栽后立即施用液态有机肥(N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量分别为 7.0%、0%、6.5%) 232 kg/hm<sup>2</sup>,移栽后 15 d 追施液态有机肥(N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量分别为 7.0%、0%、6.5%) 525 kg/hm<sup>2</sup>,移栽后 45 d 追施钾肥( $\text{K}_2\text{O}$ ) 195 kg/hm<sup>2</sup>。NOPT-1: 起垄后环穴施稳定性氮肥 30 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 40 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥( $\text{K}_2\text{O}$ ) 60 kg/hm<sup>2</sup>,移栽后 45 d 追施稳定性氮肥 30 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥( $\text{K}_2\text{O}$ ) 120 kg/hm<sup>2</sup>。NOPT-2: 起垄后环穴施缓释氮肥

60 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 40 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥 (K<sub>2</sub>O) 60 kg/hm<sup>2</sup>, 移栽后 45 d 追施钾肥 (K<sub>2</sub>O) 120 kg/hm<sup>2</sup>。各处理养分总投入量见表 2。

三营镇施肥方式: NO: 同湾桥镇施肥方式。FP: 起垄后环穴施固态有机肥 (N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 2%、4%、4%) 1 500 kg/hm<sup>2</sup>, 移栽后立即施用液

态有机肥 (N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 6%、2%、12%) 225 kg/hm<sup>2</sup>, 移栽后 15 d 追施液态有机肥 (N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 6%、2%、12%) 525 kg/hm<sup>2</sup>, 移栽后 45 d 追施钾肥 (K<sub>2</sub>O) 195 kg/hm<sup>2</sup>。NOPT-1: 同湾桥镇施肥方式。NOPT-2: 同湾桥镇施肥方式。各处理养分总投入量见表 2。

表 2 不同施肥处理的养分投入量

地点	处理	施肥方式	N 投入量 (kg/hm <sup>2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 投入量 (kg/hm <sup>2</sup> )	K <sub>2</sub> O 投入量 (kg/hm <sup>2</sup> )
湾桥	不施氮肥处理 (NO)	基施磷、钾肥, 移栽后 45 d 追钾肥	0	40	180
	农户传统处理 (FP)	基施有机肥, 当天、移栽后 15 d 追施有机肥, 45 d 追施钾肥	98	45	357
	稳定性氮肥处理 (NOPT-1)	基施氮、磷、钾肥, 移栽后 45 d 追施氮肥和钾肥	60	40	180
	缓释氮肥处理 (NOPT-2)	基施氮肥、磷肥和钾肥, 移栽后 45 d 追施钾肥	60	40	180
三营	不施氮肥处理 (NO)	基施磷、钾肥, 移栽后 45 d 追钾肥	0	40	180
	农户传统处理 (FP)	基施有机肥, 当天、移栽后 15 d 追施有机肥, 45 d 追施钾肥	75	75	345
	稳定性氮肥处理 (NOPT-1)	基施氮、磷、钾肥, 移栽后 45 d 追施氮肥和钾肥	60	40	180
	缓释氮肥处理 (NOPT-2)	基施氮、磷、钾肥, 移栽后 45 d 追施钾肥	60	40	180

### 1.3 样品采集与分析

烟株样品的采集: 每个小区选 3 株长势适中的烟株, 在成熟期采集地上部样品, 采收结束时收集根、茎、叶。带回实验室后用去离子水洗净, 在 105 ℃ 烘箱中杀青 30 min, 然后在 80 ℃ 下烘干, 恒质量时分根、茎、叶称质量, 装袋待用。样品经 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后, 采用凯氏定氮法测定烟株全氮含量。

土壤样品采集及含量测定: 用土钻采集移栽前、团棵期、打顶期和成熟期土壤样品, 采样深度为 0~60 cm, 分为 0~20、20~40、40~60 cm 3 层, 每个小区采集 2 株烤烟中间位置各 5 点, 采集时远离小区边缘, 以降低小区之间的干扰, 混匀后形成每一采样层的代表性样品。将新鲜土壤样品通过 0.5 cm 网筛, 称取 12.0 g 过筛后的土壤, 用 0.01 mol/L 氯化钙溶液浸提, 振荡 60 min 后过滤, 通过连续流动分析仪测定滤液无机氮浓度, 并根据各土层土壤容重换算为土壤无机氮含量。

测产分级: 烟叶开始成熟时按小区挂牌分批采收叶片, 并按照 GB 2635—1992《烤烟》标准对烟叶进行分级, 统计产量和中上等烟比例, 根据大理市 2021 年烤烟采购价格表计算各处理产值及均价。

农艺性状测定: 烟株打顶后每个小区选取 3 株生长状况良好、无病害的代表性植株, 按照烟草行业标准 YC/T 142—2010《烟草农艺性状调查测量方法》定点调查烟株的株高、茎围、最大叶长和最大叶

宽等农艺指标, 并计算最大叶面积:

最大叶面积 (cm<sup>2</sup>) = 最大叶长 × 最大叶宽 × 0.6345。

### 1.4 数据统计分析

经济分析包括成本投入和产值 2 个部分。本研究成本投入为氮肥投入成本, 含氮肥自身费用和劳动成本。固态有机肥、液态有机肥、稳定性氮肥和缓释氮肥的价格分别为 1.8、1.6、4.0、3.5 元/kg, 上述价格由大理市烟草公司绿色种植补贴和中国化肥网 2021 年年报价格换算而得。单次施肥的劳动力成本为 3 000 元/hm<sup>2</sup>, 由全国农产品成本收益资料汇编换算而得。计算公式如下:

施氮肥投入 (元/hm<sup>2</sup>) = 氮肥成本 + 劳动成本;

施氮效益 (元/hm<sup>2</sup>) = 总产值 - 施氮肥投入 - 不施氮肥小区产量收益;

吸氮量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 氮素含量 × 干物质质量;

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施氮处理烟叶产量 / 施氮量;

各土层无机氮积累量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 土层厚度 × 土壤容重 × (土壤硝态氮含量 + 土壤铵态氮含量);

氮素表观矿化量 = 不施氮小区的氮素输出量 (不施氮处理植株氮素吸收量 + 成熟期 0~60 cm 不施氮处理土壤无机氮含量) - 移栽前 0~60 cm 不施氮处理土壤无机氮含量;

表观氮素损失量 = 施氮处理氮素输入量 (栽前 0~60 cm 土壤无机氮含量 + 氮素表观矿化量 + 氮

肥施用量) - 施氮处理氮素输出量(植株氮素吸收量 + 成熟期 0~60 cm 土壤无机氮含量)<sup>[7]</sup>。

上述公式所有数据基于样品干质量计算, 试验数据处理及图表制作用 Microsoft Excel 2019 完成, 用 SPSS 25.0 统计软件进行单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对烤烟经济性状及施氮效益的影响

由表 3 可知, 对于烤烟 K326, 施用氮肥显著提高了其产量和产值, NOPT-1 处理在产量、产值方面均取得最大值, 较 N0 处理分别显著提高了 29.2% 和 29.0%, 较 FP 处理分别提高了 8.8% 和 6.1%, 较 NOPT-2 处理分别提高了 8.0% 和 8.7%。在施氮效益方面, 受肥料价格和施用量的影响, NOPT-2 处理氮肥费用最低, 为 467 元/hm<sup>2</sup>, FP

处理氮肥费用最高, 为 3 460 元/hm<sup>2</sup>。在 FP 处理中, 基施有机肥和移栽后立即施用液态有机肥为移栽当天施肥, 算作单次施肥, 因此 FP 处理和 NOPT-1 处理均为施 2 次氮肥, 劳动成本均为 6 000 元/hm<sup>2</sup>。NOPT-2 处理仅在移栽前施用氮肥, 因此劳动成本为 3 000 元/hm<sup>2</sup>。NOPT-1 处理施氮效益最高, 其次是 NOPT-2 处理, 分别较 FP 处理提高 6 826、4 292 元/hm<sup>2</sup>。对于烤烟红花大金元, NOPT-1 处理在产量、产值方面取得最大值, 其产量较 FP 处理和 NOPT-2 处理分别提高了 6.3% 和 6.7%, 但各施氮处理间无显著差异, 其产值较 FP 处理提高了 11.8%, 较 NOPT-2 处理显著提高了 16.4%。在施氮效益方面, NOPT-1 处理取得最大值, 其次是 NOPT-2 处理, 分别较 FP 处理提高了 10 900、3 584 元/hm<sup>2</sup>。

表 3 K326 和红花大金元不同处理间的经济性状与施氮效益

品种	处理	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	产值 (元/hm <sup>2</sup> )	氮肥费用 (元/hm <sup>2</sup> )	劳动成本 (元/hm <sup>2</sup> )	施氮效益 (元/hm <sup>2</sup> )
K326	N0	2 518.50b	58 247.85b			
	FP	2 991.00a	70 847.70a	3 460	6 000	3 140
	NOPT-1	3 252.90a	75 136.95a	923	6 000	9 966
	NOPT-2	3 011.40a	69 146.25a	467	3 000	7 432
红花大金元	N0	2 366.55b	55 098.15c			
	FP	2 764.50a	68 504.70ab	3 750	6 000	3 657
	NOPT-1	2 939.40a	76 578.00a	923	6 000	14 557
	NOPT-2	2 754.60a	65 805.45b	467	3 000	7 241

注: 相同品种下同列数据后不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下表同。

### 2.2 不同处理对烤烟打顶期农艺性状的影响

由表 4 可知, 施用氮肥对烤烟各农艺性状指标均有较好的提高效果, 在最大叶长、最大叶宽、茎围和最大叶面积方面均有显著性差异。对于烤烟 K326, 在株高、最大叶长、茎围和最大叶面积方面各处理均表现为 NOPT-1 > NOPT-2 > FP > N0, NOPT-1 处理均取得最大值, 其中, 在株高、最大叶长和茎围方面与 FP 处理差异显著, 分别提高了 6.95%、7.38% 和 7.14%。NOPT-2 处理在株高方面与 FP 处理差异显著, 较其提高了 5.73%。对于烤烟红花大金元, 在株高、茎围和最大叶面积方面各处理均表现为 NOPT-1 > NOPT-2 > FP > N0。NOPT-1 处理在最大叶宽和最大叶面积方面与 FP 处理差异显著, 分别较其提高了 6.01% 和 13.40%。NOPT-2 处理各项农艺性状指标与 FP 处理均无显著性差异。

### 2.3 不同处理对烤烟成熟期吸氮量和表观氮素平衡的影响

由表 5 可知, 对于烤烟 K326, 在施氮量方面, NOPT-1 和 NOPT-2 处理较 FP 处理减少了 38.8%。在成熟期吸氮量方面, 施用氮肥显著提高了烟株的吸氮量, 具体表现为 FP > NOPT-2 > NOPT-1 > N0。在氮肥偏生产力方面, NOPT-1 处理较 FP 处理显著提高了 78.1%, NOPT-2 处理较 FP 处理显著提高了 64.8%。对于烤烟红花大金元, 在施氮量方面, NOPT-1 与 NOPT-2 处理较 FP 处理减少了 20%。施用氮肥显著提高了烟株的吸氮量, 具体表现为 NOPT-2 > NOPT-1 > FP > N0, NOPT-2 和 NOPT-1 处理较 FP 处理提高了 37.21% 和 34.06%。在氮肥偏生产力方面, NOPT-1 处理取得最大值, 其次是 NOPT2 处理, NOPT-1 处理和 NOPT-2 处理分别较 FP 处理显著

表 4 K326 和红花大金元不同处理间打顶期农艺性状

品种	处理	株高 (cm)	最大叶长 (cm)	最大叶宽 (cm)	茎围 (cm)	最大叶面积 (cm <sup>2</sup> )
K326	N0	120.06c	63.13c	29.30b	8.67c	1 170.37b
	FP	138.68b	67.63b	33.57a	10.64b	1 435.78a
	NOPT-1	148.32a	72.62a	34.03a	11.40a	1 562.61a
	NOPT-2	146.62a	71.34ab	34.24a	10.79b	1 542.91a
红花大金元	N0	109.86b	52.34b	25.13c	9.47b	831.98c
	FP	121.79ab	59.77a	29.77b	10.39a	1 125.07b
	NOPT-1	131.71a	61.61a	31.56a	11.17a	1 275.84a
	NOPT-2	130.38a	62.57a	29.71b	10.70a	1 175.58b

表 5 K326 和红花大金元不同处理间烟株吸氮量与氮肥偏生产力

品种	处理	施氮量 (kg/hm <sup>2</sup> )	成熟期吸氮量 (kg/hm <sup>2</sup> )	氮肥偏生产力 (kg/kg)
K326	N0	0	88.51b	
	FP	98	127.55a	30.45b
	NOPT-1	60	110.06a	54.22a
	NOPT-2	60	114.31a	50.19a
红花大金元	N0	0	45.47b	
	FP	75	61.24ab	36.86b
	NOPT-1	60	82.10a	48.99a
	NOPT-2	60	84.03a	45.91a

提高 32.9% 和 24.6%。

由表 6 可知, 试验地氮素投入项包括肥料投入、移栽前 0~60 cm 土壤无机氮含量和氮素表观矿化量 3 项, 氮素输出项包括作物成熟期吸氮量、成熟期 0~60 cm 土壤无机氮含量 2 项。其中, 氮素表观矿化量是氮投入的主要来源, 占氮素投入项的 34.9%~91.2%, 且 2 个试验点土壤表观氮矿化量差异明显, 在一定程度上反映了地域和气候等因素对土壤供氮能力的影响。

对于 K326, 在移栽前 0~60 cm 土壤无机氮含量和成熟期 0~60 cm 土壤无机氮含量方面, 各处理之间无显著差异, 成熟期土壤无机氮含量具体表现为 FP>NOPT-1>NOPT-2>N0。最终烤烟 K326 的表观氮素损失量以 FP 处理最高, 为 43.65 kg/hm<sup>2</sup>, NOPT-1 与 NOPT-2 处理分别较 FP 处理降低了 23.9% 和 19.2%。对于红花大金元, 在移栽前 0~60 cm 土壤无机氮含量和成熟期 0~60 cm 土壤无机氮含量方面, 各处理之间无显著差异。最终烤烟红花大金元的表观氮素损失量以 FP 处理最高, 为 32.51 kg/hm<sup>2</sup>, NOPT-1 与 NOPT-2 处理分别较 FP 处理降低了 58.0% 和 65.5%。整体而言,

NOPT-1、NOPT-2 处理与 FP 处理相比, 可以有效降低成熟期 0~60 cm 土壤无机氮含量与表观氮素损失量。

#### 2.4 不同施肥处理对土壤无机氮含量的影响

图 1 为湾桥和三营试验点烤烟生育期 0~20 cm 土壤无机氮含量动态变化图。在湾桥试验点, 移栽前期各处理之间无显著差异。团棵期时, FP 处理土壤无机氮含量有较大提高, 并显著高于其余各处理, 具体表现为 FP>NOPT-2>NOPT-1>N0。打顶期时, FP 处理土壤无机氮含量有所下降, NOPT-2 处理土壤无机氮含量有所提高, 并显著高于 NOPT-1 和 N0 处理, 具体表现为 NOPT-2>FP>NOPT-1>N0。成熟期时, 土壤无机氮含量具体表现为 FP>N0>NOPT-2>NOPT-1, 但处理之间无显著差异, NOPT-1 处理 (45.7 kg/hm<sup>2</sup>) 和 NOPT-2 处理 (50.5 kg/hm<sup>2</sup>) 较 FP 处理 (77.0 kg/hm<sup>2</sup>) 土壤无机氮含量分别降低了 40.6% 和 34.4%。整体来看, 各施氮处理 0~20 cm 土层无机氮含量呈现先升高后降低的趋势, 各时期以团棵期土壤无机氮含量最高, 成熟期土壤无机氮含量高于移栽前。

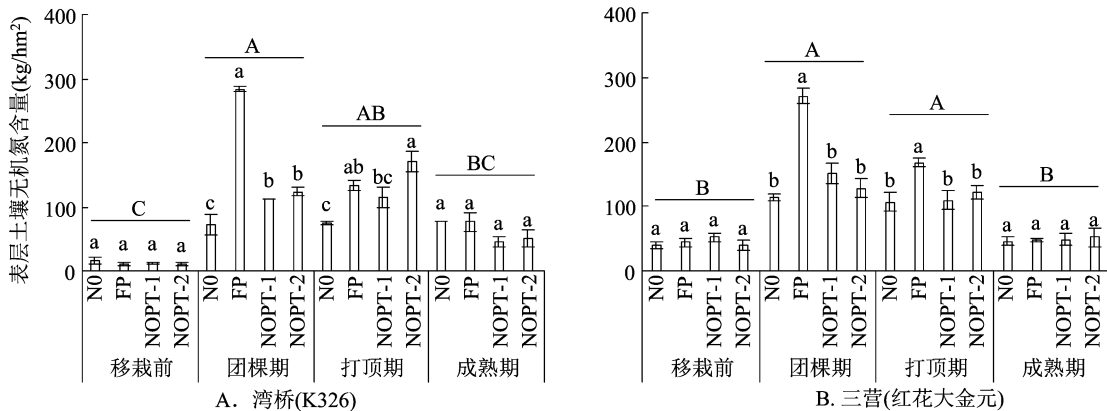
表 6 K326 和红花大金元不同处理下的表观氮素平衡

kg/hm<sup>2</sup>

品种	处理	氮投入			氮输出		表观氮素 损失量
		施氮量	移栽前 0~60 cm 土壤无机氮含量	氮素表观 矿化量	成熟期 作物吸氮量	成熟期 0~60 cm 土壤无机氮含量	
K326	NO	0	24.28a	251.20	88.51b	186.97a	0
	FP	98	19.73a	251.20	127.55a	197.73a	43.65
	NOPT-1	60	20.28a	251.20	110.06a	188.19a	33.23
	NOPT-2	60	25.39a	251.20	114.31a	187.01a	35.27
红花大金元	NO	0	80.81a	83.59	45.47b	118.94a	0
	FP	75	79.24a	83.59	61.24b	144.08a	32.51
	NOPT-1	60	95.83a	83.59	82.10a	143.67a	13.65
	NOPT-2	60	91.38a	83.59	84.03a	139.71a	11.23

在三营试验点中,移栽前期各处理土壤无机氮含量无显著差异。团棵期,各处理土壤无机氮含量均有所提高,FP 处理土壤无机氮含量显著高于其余各处理。打顶期时,FP 处理土壤无机氮含量下降较为明显,但仍显著高于其余各处理。成熟期,各处

理间土壤无机氮含量无显著差异。整体而言,各时期土壤无机氮动态变化规律与湾桥(K326)相似,呈先升高后降低趋势,团棵期与打顶期土壤无机氮含量显著高于移栽前和成熟期。



同一品种中,不同大写字母表示不同生育时期之间差异显著( $P < 0.05$ ),不同小写字母表示同一生育时期不同处理之间差异显著( $P < 0.05$ )。误差棒为标准误差

图1 湾桥和三营烤烟生育期 0~20 cm 土壤无机氮含量动态变化

### 3 讨论

#### 3.1 稳定性氮肥和缓释氮肥对烤烟经济性状及农艺性状的影响

在烤烟生产过程中,氮素是影响其经济性状最为重要的营养元素<sup>[16]</sup>。氮肥用量不足或过量投入都会导致烤烟产量的下降。前人研究表明,适度减少 10%~20% 氮肥用量有助于提高烟叶产量和产值,而氮肥用量减少超过 30% 之后则抑制烟株生长,产量和产值降低<sup>[8]</sup>。本研究表明,在湾桥(K326)试验点相比农户传统减氮 38% 后,NOPT-1 处理仍可以较好地提高烤烟的经济性状,这与郭广

正的研究结果<sup>[17]</sup>相符,而在三营(红花大金元)试验点减氮 20% 后,NOPT-2 处理产值有所下降。原因可能是硝化抑制剂延缓了铵态氮向硝态氮的转化,减少了活性氮的损失<sup>[18]</sup>,进而提高氮肥利用率,而缓释氮肥前期养分释放较慢,肥料供氮不足。尽管三营试验点中 NOPT-2 处理的产值较 FP 处理有所降低,但其肥料施用量较少,相同施肥成本的基础上减少了肥料本身的费用,因此较 FP 处理提高了施氮效益。综合 2 个试验点来看,等养分投入情况下,NOPT-1 处理较 NOPT-2 处理表现更好,该结论印证了前人在其他作物上的研究结果<sup>[19-20]</sup>。碳氮代谢是烤烟生长发育最为基本的代谢过程,其

协调程度对烤烟的品质和产量至关重要<sup>[21-22]</sup>。氮素通过调节氮碳代谢来影响碳水化合物化合物的形成<sup>[23]</sup>。王芬研究表明,硝化抑制剂促进了<sup>13</sup>C 由营养器官向果实的迁移,降低了果实对<sup>15</sup>N 吸收和征调的能力,有利于调节营养生长和生殖生长之间的平衡,提高产量和品质<sup>[24]</sup>。本研究中,NOPT-1 处理在 2 个品种烤烟中均有较好表现,各项农艺性状指标较 FP 处理均有提高,说明硝化抑制剂对烤烟同样具有调节效果。NOPT-2 处理则整体较 FP 处理无显著提高,这与何康等的研究结果<sup>[25]</sup>不同,其原因可能是本研究处理的养分投入量较低,前期无法满足烟株需求,也可能是生长后期肥料氮的释放对氮代谢的减弱起到阻碍作用<sup>[26]</sup>。

### 3.2 稳定性氮肥和缓释氮肥对烟株氮素利用和表观氮素平衡的影响

烟株吸氮量与氮肥偏生产力是衡量施氮是否合理的重要指标。杜艳彩等研究表明,烟株吸氮量与施氮量呈正相关,氮肥偏生产力随着施氮水平的提高而显著下降<sup>[27]</sup>。本研究表明,施用氮肥可以显著提高烟株成熟期吸氮量,各施氮处理的氮肥偏生产力与施氮量呈负相关。但随着施氮量的增加,烤烟红花大金元的成熟期吸氮量下降,可能是过量施氮对烟株产生负面作用,降低了烟株对氮素的需求<sup>[28]</sup>。本试验表明,NOPT-1 处理可以显著提高 K326 和红花大金元的氮肥偏生产力,这与冯小杰等的研究结果<sup>[29]</sup>相符。王鹏等研究表明,在保山烟区施用缓释氮肥能促进表层土壤吸收,提高氮素利用率<sup>[30]</sup>。本研究与之相符,试验所用缓释氮肥养分释放曲线为“S”形,25 °C 静水条件下控释尿素释放期为 48 d,其氮素释放速率与烤烟氮素吸收规律相似<sup>[31]</sup>。施用缓释氮肥提高了 K326 和红花大金元吸氮量和氮肥偏生产力,有利于提高养分利用率。

氮平衡研究是评价生态系统中氮素循环和氮肥去向的重要指标,也是研究土壤氮素利用与损失的常用方法之一<sup>[32-33]</sup>。本研究显示,湾桥和三营试验点土壤氮素表观矿化量存在明显差异,可能是湾桥试验点靠近洱海,土壤含水量较高导致<sup>[34]</sup>。相关研究证明,施氮量与土壤无机氮含量呈显著正相关关系,过量施用氮肥是地下水硝态氮污染的主要原因<sup>[35-36]</sup>。本研究中,FP 处理氮肥过量投入,导致各生育期土壤无机氮含量较高,而 NOPT-1 和 NOPT-2 处理氮素供应和作物需求趋于同步,降低了各生育期土壤无机氮积累量,从而降低了 2 个试

验点的氮素损失,这与朱经伟等的研究结果<sup>[37]</sup>一致。前人研究证明,合理施用稳定性氮肥或缓释氮肥,可以提高作物的氮素利用率,减少表观氮素损失<sup>[38]</sup>。本研究表明,NOPT-1 和 NOPT-2 处理较 FP 处理减少了 19.2%~65.5% 的表观氮素损失,但成熟期土壤无机氮含量仍保持在较高水平(2 个试验点平均为 164.65 kg/hm<sup>2</sup>),远超出国外的环境承受值(50 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[39]</sup>,考虑到土壤中无机氮的适当残留有利于小春作物的吸收利用,但残留量仍不宜超过 100 kg/hm<sup>2</sup><sup>[40]</sup>。因此,本试验下一步将继续优化施肥方案和管理措施,进一步降低烟田养分面源污染以实现洱海流域烟田绿色发展。

## 4 结论

本研究在农户传统施氮的基础上,结合烤烟养分吸收规律,优化了养分投入量和氮肥种类。与农户传统处理相比,施用稳定性氮肥处理和缓释氮肥处理在产量和产值方面没有显著差异,但大幅提高了施氮效益。优化施氮在农艺性状方面较农户传统施氮有不同程度的提高,稳定性氮肥处理对烤烟 K326 在烟株株高、最大叶长和茎围方面有显著影响,对烤烟红花大金元在最大叶宽和最大叶面积方面有显著影响。优化施氮在氮肥偏生产力方面较农户传统处理对 2 个品种烤烟均有显著提高,并降低了表观氮素损失量。2 个优化施氮处理比较来看,稳定性氮肥处理综合表现较好,该措施能够有效兼顾烤烟的生长和氮素利用,可以达到高效低损的目标。

### 参考文献:

- [1] 陈江华,刘建利,李志宏,等. 中国植烟土壤及烟草养分综合管理 [M]. 北京:科学出版社,2008:1-28.
- [2] 梁艳萍,刘静,王少先,等. 不同烤烟品种烟叶品质特性研究 [J]. 湖南农业科学,2010(9):19-21.
- [3] 项颂,吴越,吕兴菊,等. 洱海流域农业面源污染空间分布特征及分类控制策略 [J]. 环境科学研究,2020,33(11):2474-2483.
- [4] Zou L L, Liu Y S, Wang Y S, et al. Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China:1978—2017 [J]. Journal of Environmental Management,2020,263:100400.
- [5] 邓阳春,梁永江,袁玲,等. 烟地土壤养分淋失与利用研究 [J]. 水土保持学报,2009,23(2):21-24.
- [6] MacKown C T, Sutton T G. Recovery of fertilizer nitrogen applied to burley tobacco [J]. Agronomy Journal,1997,89(2):183-189.
- [7] 苗琪,于宝超,孙福来,等. 氮肥种类和用量对黄河三角洲玉米产量及氮肥利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报,2020,26

- (4):717-726.
- [8]余小芬,解燕,杨树明,等. 减施氮磷钾肥和氮肥基追比对云南曲靖烤烟产质量及养分利用的影响[J]. 西南农业学报,2020,33(4):848-854.
- [9]赵文军,薛开政,杨继周,等. 氮肥减施下光叶紫花苕不同翻压量对烟草产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(16):73-78.
- [10]李婷玉. 增效氮肥综合效应及影响因素研究[D]. 北京:中国农业大学,2018:5-15.
- [11]陈剑秋. 包膜控释肥对烤烟生长及烟叶品质的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2006:41-51.
- [12]林昌华,樊小林,陈晓远,等. 控释钾配方肥对烤烟产量和烟叶含钾量的影响[J]. 华中农业大学学报,2012,31(6):720-724.
- [13]危跃. 缓释肥对烤烟氮钾肥利用效率及烟叶产质量的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2010:15-30.
- [14]熊艳,李永梅,尹增松. 氮素形态在土壤中的转化及对烤烟产量的影响[J]. 云南农业大学学报,2003,18(4):332-336.
- [15]Qiao C L, Liu L L, Hu S J, et al. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(3):1249-1257.
- [16]Collins W K, Hawks Jr S N. Principles of flue-cured tobacco production[M]. Raleigh, NC: North Carolina State University, 1994:21-98.
- [17]郭广正. 减氮配施硝化抑制剂对西南露地蔬菜农学和环境效应的影响[D]. 重庆:西南大学,2021:36-62.
- [18]Adhikari K P, Chibuike G, Saggari S, et al. Management and implications of using nitrification inhibitors to reduce nitrous oxide emissions from urine patches on grazed pasture soils—A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 791:148099.
- [19]孙雪文. 黄土旱塬春玉米不同氮肥管理模式氮素平衡和经济效益分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022:36-46.
- [20]梁蕊芳. 增效氮肥对马铃薯氮素吸收利用及土壤温室气体排放的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2019:10-21.
- [21]黄树永,陈良存. 烟草碳氮代谢研究进展[J]. 河南农业科学, 2005,34(4):8-11.
- [22]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.
- [23]母少东,蒋光华,李浩,等. 不同植烟区土壤对烟叶碳氮代谢品质相关指标的影响[J]. 南京农业大学学报,2014,37(4):109-116.
- [24]王芬. 高氮调控苹果果实碳氮代谢的机制及氮素调控技术研究[D]. 泰安:山东农业大学,2021:27-54.
- [25]何康,屠乃美,王靖渊,等. 包膜尿素和氮素基追比例对烤烟产质量的影响[J]. 天津农业科学,2016,22(6):46-50.
- [26]王少先,彭克勤,夏石头,等. 烟草碳、氮代谢及氮肥施用对烟草产量和品质的影响[J]. 中国农学通报,2004,20(2):135-138.
- [27]杜彩艳,吴迪,周文兵,等. 施氮水平对抚仙湖流域植烟区烤烟产质量及氮素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(6):197-205.
- [28]李宏光,赵正雄,杨勇,等. 施肥量对烟田土壤氮素供应及烟叶产质量的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2007,32(4):37-42.
- [29]冯小杰,战秀梅,王颖,等. 稳定性氮肥减施对春玉米氮素吸收及土壤无机氮供应的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(7):1216-1225.
- [30]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.
- [31]李春俭. 烤烟养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京:中国农业大学出版社,2006:103-138.
- [32]郑文琦,谭文峰,刘昭,等. 氮肥减施对红壤旱坡花生地氮素径流和渗漏损失及表观平衡的影响[J]. 土壤学报,2022,59(6):1540-1550.
- [33]李健铭,刘青丽,李志宏,等. 不同有机肥料对烤烟氮素吸收和产值的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(9):83-88.
- [34]Powers R F. Nitrogen mineralization along an altitudinal gradient: interactions of soil temperature, moisture, and substrate quality[J]. *Forest Ecology and Management*, 1990,30(1/2/3/4):19-29.
- [35]周顺利,张福锁,王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏II. 夏玉米[J]. 生态学报,2002,22(1):48-53.
- [36]刘宏斌,李志宏,张云贵,等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报,2006,43(3):405-413.
- [37]朱经伟,李志宏,彭友,等. 整治烟田无机氮肥管理对烤烟氮素综合利用的影响[J]. 西南农业学报,2016,29(1):126-132.
- [38]Li Y M, Sun Y X, Liao S Q, et al. Effects of two slow-release nitrogen fertilizers and irrigation on yield, quality, and water-fertilizer productivity of greenhouse tomato[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 186:139-146.
- [39]Ploeg R R, Ringe H, Machulla G, et al. Postwar nitrogen use efficiency in west German agriculture and groundwater quality[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997,26(5):1203-1212.
- [40]刘学军,赵紫娟,巨晓棠,等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 生态学报,2002,22(7):1122-1128.