

# 滴灌减氮对植烟土壤无机氮变化及烟株氮积累的影响<sup>①</sup>

杜飞乐<sup>1,2</sup>, 任天宝<sup>1,2</sup>, 林二阁<sup>1</sup>, 李京阳<sup>1,2</sup>, 胡静宜<sup>1</sup>, 孙溢明<sup>1</sup>, 刘英杰<sup>3</sup>, 刘国顺<sup>1,2\*</sup>

(1 烟草行业烟草栽培重点实验室/河南省生物炭研究工程技术中心, 郑州 450002; 2 河南农业大学烟草学院, 郑州 450002;

3 河南省烟草公司郑州市公司, 郑州 450001)

**摘要:**为明确滴灌施肥条件下减量施氮对土壤无机氮变化特征、烟株氮积累规律的影响,于2016年在登封进行了田间试验,试验共设置5个处理:T0:不施氮肥;T1:常规施肥;T2:减氮15%;T3:减氮30%;T4:减氮45%。分析了0~20、20~40、40~60 cm土层无机氮含量及烟株氮积累量变化,并对0~20 cm土层无机氮含量拟合曲线及烟株氮积累拟合曲线特征值进行分析。结果表明,滴灌施肥能够显著提高栽后40、50 d时0~20 cm土层无机氮含量,显著降低栽后50 d时40~60 cm土层无机氮含量;减氮15%~30%对烟叶产量、生育期内烟株氮素积累量均无显著影响,减氮45%烟叶产量、烟株氮积累量、烟叶氮积累量分别显著下降11.52%、10.53%、10.50%;氮肥农学效率(AE)、氮肥偏生产力(NFP)均以T4处理最高,且随施氮量增加逐渐下降,氮肥表观利用率(ARE)以T3处理最高,氮收获指数(NHI)、氮肥生理利用率(NPE)与施氮量间无明显关系。减施氮肥土壤无机氮下降持续时间及烟株氮素快速增长时间会延长,无机氮最大下降速率及烟株最大氮积累速率降低,不利于烟株氮素快速积累。因此,综合考虑认为,在该地区条件下,滴灌施肥减氮15%~30%有利于氮肥高效应用。

**关键词:**滴灌;减氮;土壤无机氮;烟株;氮积累

中图分类号:S572.06 文献标识码:A

烤烟是我国重要经济作物,其产量、品质形成受氮素影响较大。氮素形态、用量、施用时期、施用方式等均在很大程度上影响烤烟对氮素的吸收利用<sup>[1-3]</sup>。近些年,随着研究发展,人们对氮肥利用的观念与方式有了改变,由盲目追求作物高产滥施氮肥逐步向注重用养结合、土壤保育、氮肥高效应用等<sup>[4-6]</sup>方向转变。滴灌施肥作为一种节水节肥的高效施肥模式,被广泛地应用于棉花、设施菜地、果树等经济作物<sup>[7-8]</sup>。Surendran<sup>[9]</sup>研究显示,滴灌施肥条件下,氮肥消耗量有所下降,氮肥偏生产力及肥料利用率均有所提高;方栋平<sup>[10]</sup>研究发现,滴灌施肥通过“少量多次”的施肥方式能够显著提高黄瓜产量,提高肥料利用率;樊兆博等<sup>[11]</sup>研究证明,与传统漫灌施肥相比,滴灌施肥每季氮肥用量和水分投入量分别减少78%和46%,氮肥偏生产力和灌溉效率分别提高了5倍和2倍。因此,探究在滴灌施肥的新型施肥模式下氮肥最佳施入量是目前烟草生产亟待解决的问题。目前相关研究多集中在滴灌施肥下不同施肥策略、不同水肥

组合、不同氮肥类型对土壤无机氮运移或作物产量的影响<sup>[12-14]</sup>,但对大田条件下生育期内不同施氮量对土壤无机氮含量及作物氮积累的系统研究较少。故本试验旨在探研究生育期内滴灌减氮条件下土壤无机氮分布及烟株氮积累的动态变化,明确两者的变化特征及联系,为实现滴灌施肥条件下氮肥高效利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2016年3—10月在河南省登封市君召乡范堂村(34.45°N, 112.82°E)进行,该地属北温带季风气候,四季分明,年平均气温14.3℃,年平均降雨量640.9 mm,年平均日照时数2297 h,无霜期约238 d,常年干旱少雨,降雨多集中在6—8月份,约占全年降水总量的33.8%。供试土壤类型为肥力偏低的褐土,0~20 cm土壤质地为壤土,pH 6.8,有机质含量15.51 g/kg,全氮含量0.67 g/kg,速效氮67.13 mg/kg,

基金项目:国家重点研发计划课题项目(2017YFD0200808)和河南省烟草公司项目(ZYKJ201416)资助。

\* 通讯作者(liugsh1851@163.com)

作者简介:杜飞乐(1993—),女,河南许昌人,硕士研究生,主要研究方向为烟草栽培生理生化。E-mail: 751071342@qq.com

有效磷 15.14 mg/kg, 速效钾 109.16 mg/kg, 土壤容重 1.34 g/cm<sup>3</sup>, 最大田间持水量 23.7%, 其他理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤理化性质  
Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

土层 (cm)	NO <sub>3</sub> -N (mg/kg)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/kg)	含水率 (%)	容重 (g/m <sup>3</sup> )
0~20	48.09	2.66	12.95	1.34
20~40	37.47	1.46	14.64	1.45
40~60	27.91	3.62	16.84	1.56

## 1.2 试验材料及设计

供试品种为豫烟 6 号。试验共设置 5 个处理：施入纯氮量分别为 0、45.00 kg/hm<sup>2</sup> (常规施氮量)、38.25 kg/hm<sup>2</sup> (减氮 15%)、31.50 kg/hm<sup>2</sup> (减氮 30%) 和 24.75 kg/hm<sup>2</sup> (减氮 45%)，分别以 T0、T1、T2、T3 和 T4 表示。氮肥品种为可溶性 NO<sub>3</sub>NH<sub>4</sub>，30% 于移栽前条施，10% 于移栽当天单株称肥浇施，剩余 60% 分 3 次平均于栽后 31、39、47 d 随水滴灌施用；有机肥为高碳基土壤修复肥 (C : N : P : K = 39.8 : 2.6 : 1.9 : 2.5)，购于河南省惠农土质保育有限公司，用量为 600 kg/hm<sup>2</sup>；磷、钾肥用量一致，分别为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 45.00 kg/hm<sup>2</sup> (12% 过磷酸钙) 和 K<sub>2</sub>O 135.00 kg/hm<sup>2</sup> (51% 硫酸钾) 施入，其中全部有机肥、磷肥及 70% 钾肥做基肥于移栽前一次性条施，30% 钾肥于移栽当天做窝肥穴施。试验采用随机区组设计，采样区小区面积 9.6 m × 20 m = 192 m<sup>2</sup>，重复 3 次。行距 120 cm，株距 55 cm，5 月 4 日移栽，田间管理按优质烟叶生产技术要求进行。

滴灌施肥方式采用容量压差式，滴灌带为直径 15 mm 的内镶式薄壁迷宫滴灌带，滴头间距为 15 cm，滴头流量为 1.5 L/h。施肥策略为 W-N-W，即 1/3 时间灌水，1/3 时间施肥，1/3 时间冲洗管道，每个小区前安装水表及球阀控制灌水量及施肥量，各处理全生育期灌水量一致，生育期内降雨量为 297.80 mm，灌水量如表 2 所示。

表 2 生育期内灌水施肥情况  
Table 2 Irrigation and fertilization during growth period

灌水施肥时间	灌水量 (m <sup>3</sup> )	施氮量 (kg/hm <sup>2</sup> )				
		T0	T1	T2	T3	T4
栽后 31 d	13.60	0	9.00	7.65	6.30	4.95
栽后 39 d	13.60	0	9.00	7.65	6.30	4.95
栽后 47 d	13.60	0	9.00	7.65	6.30	4.95
栽后 80 d	14.40	0	0.00	0.00	0.00	0.00
合计	55.20	0	27.00	22.95	18.90	14.85

## 1.3 样品采集与处理

移栽后每隔 10 d 用土钻采集 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土样，每小区各土层取多点混合样，取至栽后 120 d。样品采集后将鲜土过 20 目 (0.85 mm) 筛用于无机氮含量测定。

栽后 30 d 开始，每隔 10 d 采集烟样，每小区取一株，取至栽后 90 d。取回立即将烟样分部位 105 °C 杀青 30 min，后 65 °C 烘干至恒重，粉碎过筛备用。

各小区选取正常生长的 2 株为挂牌烟株，收集挂牌烟株花、杈、底脚叶，成熟期按各部位成熟度分次采集烟叶，采收结束，采集挂牌烟株根、茎。各部位采集后于 105 °C 杀青 30 min，后 65 °C 烘干至恒重，粉碎过筛备用。

烟株全氮测定采用凯氏定氮法；土壤含水量采用烘干法测定；NO<sub>3</sub>-N 含量采用紫外分光光度法测定；NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用靛酚蓝比色法测定<sup>[15]</sup>。

## 1.4 数据处理及所用公式

无机氮含量 = NO<sub>3</sub>-N 含量 + NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量；

氮肥表观利用率 (ARE, %) = (施氮区吸氮量 - 对照区吸氮量) / 施氮量 × 100；

氮收获指数 (NHI, %) = (烟叶吸氮量 / 植株吸氮量) × 100；

氮肥农学效率 (NAE, kg/kg) = (施氮区产量 - 对照区产量) / 施氮量 × 100；

氮肥生理利用率 (NPE, kg/kg) = (施氮区产量 - 对照区产量) / (施氮区地上部吸氮量 - 对照区地上部吸氮量)；

氮肥偏生产力 (NPFPP, kg/kg) = 施氮区产量 / 施氮量。

上述公式详见参考文献<sup>[16-18]</sup>。

采用 IBM Statistics SPSS 21.0 进行统计分析，多重比较采用 Duncan 法，各变量之间采用 Pearson 相关系数法进行相关分析；采用 OriginPro 9.0 绘图。

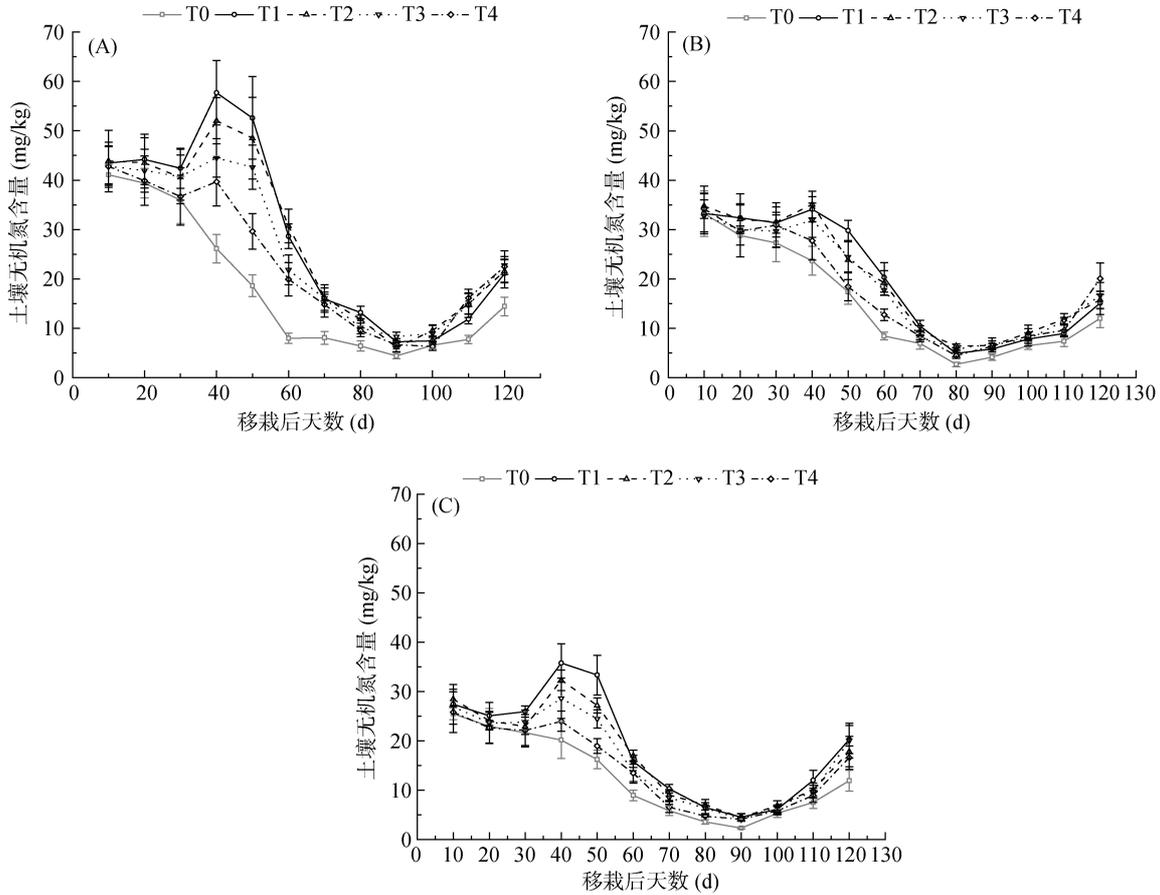
## 2 结果与分析

### 2.1 生育期内无机氮含量变化

2.1.1 生育期内各土层土壤无机氮含量分析 由图 1 可知，3 个土层无机氮含量整体变化趋势一致，均表现为先降后升。其中以 0~20 cm 土层生育期内无机氮含量变幅最大，相同时期含量最高，且受氮肥施用影响最大。各处理该层无机氮含量均在栽后 40 d 达到最高值，分别为 57.70、52.04、44.52 和 39.66 mg/kg，其中 T1 显著大于 T3 和 T4 处理，T2 显著大于 T4 处理，各施肥处理无机氮含量均显著

大于 T0( $P<0.05$ , 下同), 之后各处理无机氮含量急剧下降。60 d 之后, 各施肥处理无机氮含量与施氮量间无明显关系。20~40 cm 土层各处理无机氮含量变化与施氮量间无明显规律, 这可能是由于不同形态无机氮分布规律不同, 以及烟株吸收、无机氮淋溶等因素综合导致该层无机氮变化较为复杂。氮肥的施用对

40~60 cm 土层无机氮含量也有明显影响, 栽后 40~90 d, 各处理该层无机氮含量均随施氮量减少而下降, 在 50 d 施肥全部完成后, T1 该层无机氮含量显著大于 T2、T3、T4 和 T0 处理, 分别高出 22.71%、37.01%、75.84%、105.55%。0~60 cm 各土层无机氮含量均在 90 d 之后明显回升。



(A. 0~20 cm ; B. 20~40 cm ; C. 40~60 cm)

图 1 烤烟生育期内土壤无机氮含量变化

Fig. 1 Changes of inorganic nitrogen contents in soils

2.1.2 0~20 cm 土层无机氮拟合曲线特征值分析 为进一步明确 0~20 cm 土层无机氮变化特征, 对 0~20 cm 无机氮含量进行多项式拟合, 预测值与实测值之间

相关性达到  $P<0.01$  显著水平。对该函数进行求导, 即可得出各曲线变化特征值水平, 结果如表 3 所示。由表可知, 各施氮处理 St1 随施氮量降低而提前, St2 随施

表 3 0~20 cm 土层无机氮变化特征值

Table 3 Characteristic values of inorganic nitrogen in 0-20 cm soil

处理	方程	特征值						
		St1	St2	SAT	ST <sub>vmax</sub>	SV <sub>max</sub>	S <sub>vmax</sub>	R <sup>2</sup>
T0	$y=47.169-0.298x-0.00914x^2+0.0000785x^3$	-	91.59	-	38.85	-6.53	26.6	0.961**
T1	$y=19.849+2.445x-0.0542x^2+0.0002847x^3$	29.16	98.31	69.15	64.17	-10.11	28.37	0.854**
T2	$y=23.799+2.0467x-0.0473x^2+0.000252x^3$	27.73	97.43	69.7	62.63	-9.15	28.18	0.870**
T3	$y=29.276+1.482x-0.0382x^2+0.000213x^3$	24.20	95.45	71.25	59.88	-8.11	26.47	0.912**
T4	$y=35.358+0.832x-0.0277x^2+0.000166x^3$	17.82	93.13	75.31	55.48	-7.06	24.65	0.961**

注: St1: 无机氮含量下降起始时间; St2: 下降结束时间; SAT: St2-St1; SV<sub>max</sub>: 最大下降速率; ST<sub>vmax</sub>: 最大下降速率出现时间; S<sub>vmax</sub>: 最大下降速率出现时无机氮含量。

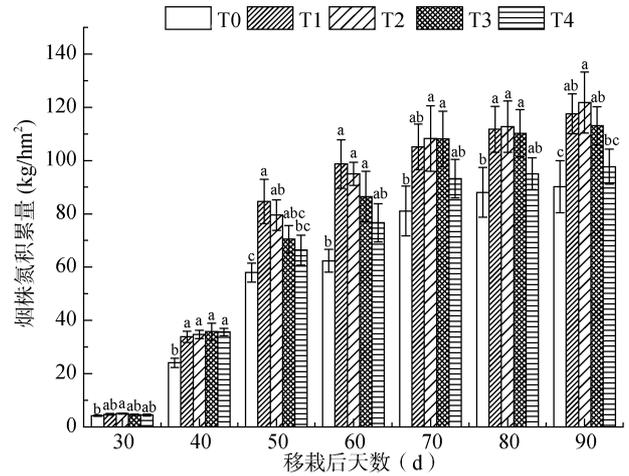
氮量增加而推迟。T0 处理从移栽开始即进入无机氮下降期。各施氮处理 SAT 随施氮量减少而延长, T1 分别比 T2、T3 和 T4 缩短 0.55、2.1 和 6.16 d。SV<sub>max</sub> 随施氮量减少也逐渐下降, T1 为 10.11 mg/(kg·d), T4 仅为 7.06 mg/(kg·d), 说明氮肥的添加能够有效提高土壤氮素供应效率, 有利于土壤氮素的快速大量供应, 与烟株的氮素吸收需求相符。各处理 ST<sub>vmax</sub> 随施氮量增加而延迟, 且此时各施氮处理无机氮含量随施氮量下降而逐渐降低, T1 比 T4 高 3.72 mg/kg。

2.2 烟株氮积累

2.2.1 不同处理烟株氮积累量变化 由图 2 可知, 各处理烟株氮积累均呈现先快速上升后趋于平稳的趋势。30 d 时烟株氮积累量较小, 除 T0 外, 其余各处理间没有显著性差异。栽后 40 d, 烟株氮积累开始急剧增加, 且各施氮处理在栽后 50 d 受施氮量影响较大, 随施氮量降低明显下降, T1 显著大于 T4, 但与 T2 和 T3 间没有显著性差异。之后各处理氮积累量与施氮量间没有明显规律, T4 处理始终小于 T1、T2 和 T3 处理。

2.2.2 不同处理烟株氮积累特征值分析 对各处理烟株氮积累量采用 Logistic 曲线拟合并求取特征值, 结果如表 4 所示。由表可知, Nt2、NΔT、NT<sub>vmax</sub>、NV<sub>vmax</sub> 受施氮量影响较大, 随施氮量增加, Nt2、NT<sub>vmax</sub>、NV<sub>vmax</sub> 均呈现增大趋势, NΔT 呈降低趋势。其中 T1 处理 NΔT 分别比 T2、T3、T4、T0 缩短 2.76、7.27、5.22、8.34 d, NT<sub>vmax</sub> 比其余处理提前 0.93、2.79、1.42、4.13 d, NV<sub>vmax</sub> 高出其余各处理 0.77、1.68、1.61、2.44 kg/(hm<sup>2</sup>·d), 说明氮肥的添加有利于烟株早生快发, 促使烟株氮素快速积累, 符合优质烟株氮积累规律。快速增长期内烟株氮积累总量以 T2 最高, 为 65.01 kg/hm<sup>2</sup>, 其次是 T3、T1、T4、T0 分别为 64.92、64.07、60.05、53.09 kg/hm<sup>2</sup>, N<sub>max</sub> 也是 T2>T3>

T1>T4>T0, 并未严格按照施氮量的降低而下降, 说明减氮 15%~30% 不会影响快速增长期内烟株氮积累量及最大氮积累量, 但减氮 45% 与不施氮肥则可能导致烟株氮积累量下降。各处理快速增长期内烟株氮积累量均占总积累量的 58% 左右, 其比例不受施氮量影响。



(图中小写字母不同表示不同处理间差异达到 P<0.05 显著水平)

图 2 不同处理烟株氮积累量

Fig. 2 Nitrogen accumulation in flue-cured tobacco plants under different treatments

2.3 氮肥利用率

由表 5 可知, T1、T2 和 T3 处理产量、整株氮积累量、烟叶氮积累量及地上部氮积累量间均无显著性差异, T4 处理产量、整株氮积累量及烟叶氮积累量均显著小于 T1。由表 6 可知, 各氮利用指标中以 ARE、NAE 和 NPFP 受施氮量影响较大, 其中 NAE 及 NPFP 均以 T4 处理最高, 说明施氮量越少, 氮肥的增产作用越明显。ARE 以 T3 处理最高, 可能由于减氮 45% 情况下, 烟株氮积累受阻, 不利于烟株正常生长, 因而导致 ARE 反而有所下降。

表 4 不同处理烟株氮积累特征值

Table 4 Characteristics of nitrogen accumulation in flue-cured tobacco plants under different treatments

处理	方程	特征值						
		Nt1	Nt2	NΔT	NT <sub>vmax</sub>	NV <sub>vmax</sub>	N <sub>max</sub>	R <sup>2</sup>
T0	$y=91.643/(1+289.589 \times e^{(-0.117x)})$	37.23	59.87	22.64	48.50	2.68	91.42	0.962**
T1	$y=110.595/(1+3670.448 \times e^{(-0.185x)})$	37.24	51.54	14.30	44.37	5.12	110.59	0.984**
T2	$y=112.225/(1+1127.525 \times e^{(-0.155x)})$	36.81	53.86	17.06	45.30	4.35	112.20	0.986**
T3	$y=112.070/(1+325.149 \times e^{(-0.123x)})$	36.42	57.99	21.57	47.16	3.44	111.90	0.976**
T4	$y=103.656/(1+494.885 \times e^{(-0.136x)})$	36.06	55.59	19.52	45.79	3.51	103.59	0.981**

注: Nt1: 整株氮素快速增长期起始时间; Nt2: 快速增长期结束时间; NΔT: Nt2-Nt1; NT<sub>vmax</sub>: 整株最大氮积累速率出现时间; NV<sub>vmax</sub>: 整株氮积累最大速率; N<sub>max</sub>: 整株最大氮积累量。

表 5 不同处理烟叶产量、氮积累量  
Table 5 Yield of tobacco leaves and nitrogen accumulation under different treatments

处理	产量(kg/hm <sup>2</sup> )	整株氮积累量(kg/hm <sup>2</sup> )	烟叶氮积累量(kg/hm <sup>2</sup> )	地上部氮积累量(kg/hm <sup>2</sup> )
T0	1 697.85 c	96.17 c	50.19 c	79.33 b
T1	2 460.15 a	125.17 a	68.94 a	108.67 a
T2	2 371.05 ab	123.04 ab	66.03 ab	106.01 a
T3	2 255.55 ab	121.43 ab	64.33 ab	101.45 a
T4	2 206.05 b	113.25 bc	61.70 bc	99.07 a

表 6 不同处理氮肥利用率  
Table 6 Nitrogen use efficiencies under different treatments

处理	ARE(%)	NHI(%)	NAE(kg/kg)	NPE(kg/kg)	NFP(kg/kg)
T0	—	52.19	—	—	—
T1	64.43	55.08	16.94	25.99	54.67
T2	70.26	53.66	17.60	25.23	61.99
T3	80.20	52.97	17.70	25.21	71.60
T4	69.02	54.48	20.53	25.74	89.13

注：ARE：氮肥表观利用率；NHI：氮收获指数；NAE：氮肥农学效率；NPE：氮肥生理利用率；NFP：氮肥偏生产力。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤无机氮变化

在烤烟大田生长期,施氮时间和施氮量能够调控烤烟不同生育期根际土壤的供氮强度,且具有直接性和时效性<sup>[19]</sup>。因此,明确烟草生长期间土壤氮供应动态变化规律,才能综合考虑施入肥料氮和土壤矿化氮对烟株吸氮的影响,有效调控植烟土壤氮素供应<sup>[20]</sup>。土壤氮素供应强度受土壤类型、生态环境、氮肥种类及烟草吸收等影响,不同土层深度氮供应质量浓度也不同<sup>[21]</sup>。本试验结果表明,烤烟生育期内 0~20、40~60 cm 土层无机氮含量受施氮量影响较大,这与袁仕豪<sup>[22]</sup>大棚模拟降雨条件下氮肥施用主要影响 0~20 cm 土层无机氮含量的试验结果有一定差异,这可能与本试验采用滴灌施肥的方式有关,滴灌施肥通过液体的方式将肥料直接输送至作物根区,但当施入肥量超出植物根系吸附能力或根区土壤含水率较高时,NO<sub>3</sub>-N 受重力作用影响较大,较易随水运移至更深土层,这也增加了无机氮损失的可能性。本研究结果显示,减量施氮能够显著降低 40~60 cm 土层无机氮含量,从而有效降低无机氮损失。

本试验条件下,氮肥的添加能够明显提高烟株栽后 40~60 d 时 0~20 cm 土层无机氮含量,之后该层无机氮含量与施氮量间无明显关系,与闫凯龙<sup>[23]</sup>和刘卫群等<sup>[24]</sup>施肥对土壤无机氮的影响持续 49 d 左右的结论相比,时间有所缩短,这可能是施肥方式及

施肥时间的差异所致。栽后 120 d,由于烟株对土壤氮素的大量吸收利用,0~40 cm 土层无机氮含量较栽前有明显下降。为保证土壤生产力可持续发展,在减施氮肥的基础上,可通过种植绿肥、施用有机肥等措施,一方面提高土壤对无机氮的储存能力,另一方面也对土壤本底氮素消耗进行补充。

#### 3.2 烟株氮积累变化

烟株氮素积累情况反映了烟株发育动态和氮素营养状况<sup>[25]</sup>。不同生态条件下烤烟对氮素的积累和利用不尽相同<sup>[26]</sup>。胡国松等<sup>[27]</sup>研究发现,河南烤烟对氮素的吸收在 30 d 之前较少,主要集中在 45~60 d;单德鑫<sup>[28]</sup>对黑龙江烤烟氮吸收研究发现,其高峰期在栽后 31~60 d。本试验结果显示,烟株在栽后 37 d 左右进入氮积累快速增长期,持续时间为 14~23 d,且施氮量越高,烟株氮素快速增长期越短,最大积累速率越高,促进烟株早生快发,有利于优质烟叶形成。T2 和 T3 处理整株最大氮积累量与 T1 处理间无显著差异,这与烟株对土壤氮素的大量吸收利用有关,刘喜庆<sup>[29]</sup>和谷海红等<sup>[30]</sup>研究均显示,烟株体内氮素积累主要来自于土壤氮,且叶位越高,土壤氮所占比例越大。在本试验中,烟田 0~20 cm 土层土壤起始无机氮积累量已达到 136.01 kg/hm<sup>2</sup>,因而在该基础上减氮 15%~30% 对烟株氮积累没有显著影响,这与刘青丽等<sup>[31]</sup>在西南地区研究的烟田起始无机氮和化肥氮输入总和超过 150 kg/hm<sup>2</sup>时,烟株氮积累趋于稳定结果一致。但减氮 45% 或不施氮肥则会显著降低烟株氮积累量,这可能是由于土壤氮矿化速率较慢,氮肥补充过少或没有氮肥补充无法满足烟株即时氮素需求,因而影响烟叶正常生长发育,造成产量显著下降。

#### 3.3 氮肥利用率变化

氮肥利用率(NUE)是用来评价氮肥施用效果及环境影响的一个综合指标<sup>[32]</sup>。在本试验中,NAE 和 NFP 均随施氮量减少而增大,以 T4 处理最高,而 NHI 和 NPE 则与施氮量间无明显关系。ARE 随施氮量降低呈先升后降的趋势,以 T3 处理最高,这可能

是过量减氮导致烟株旺长期氮积累受阻,影响烟株正常生长发育所致。该试验结果显示,通过滴灌施肥氮肥利用率可达到 64.43%~80.20%,远高于我国氮肥利用率仅为 30% 左右的传统认知,这一部分归于 ARE 算法缺陷,由于在该试验中,施氮量较低,相同吸氮量下也会得出较高氮肥利用率,因而该结果仅可用作定性分析,若要定量比较滴灌施肥下氮肥实际利用效率,则有待通过氮标记或长期定位试验等方法进行进一步验证。

#### 4 结论

本试验条件下,滴灌施肥能够显著提高 40 d 和 50 d 时 0~20 cm 土层无机氮含量,显著降低 50 d 时 40~60 cm 土层无机氮含量;0~20 cm 无机氮最大下降速率、最大下降速率出现时间及此时无机氮含量均随施氮量降低而下降(提前),无机氮下降持续时间随施氮量增加而缩短。常规施肥(T1)、减氮 15%(T2)和减氮 30%(T3)3 个处理烟株最大氮积累量、产量、烟叶氮积累量间均无显著差异,减氮 45%(T4)和不施氮肥(T0)显著小于 T1;烟株氮积累快速增长期随施氮量增加而缩短,最大氮积累速率随施氮量增加而增加。氮肥农学效率、偏生产力以 T4 最高,随施氮量增加逐渐下降;氮肥表观利用率以 T3 最高,T1 最低,氮收获指数、氮肥生理利用率与施氮量间无明显关系。综合土壤无机氮含量变化及烟株氮积累规律认为,在该地区土壤条件下,滴灌施肥下减氮 15%~30% 更有利于氮肥高效应用。

#### 参考文献:

- [1] 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
- [2] 韩锦峰,刘国顺,韩富根,等.氮素用量、形态和种类对烤烟生长发育及产量品质影响的研究[J].中国烟草学报,1992,1(1):44-52
- [3] 刘国顺.烟草栽培学[M].北京:中国农业出版社,2003
- [4] 宋莉,廖万有,王焯军,等.套种绿肥对茶园土壤理化性状的影响[J].土壤,2016,48(4):675-679
- [5] Agegnehu G, Nelson P N, Bird M I. The effects of biochar, compost and their mixture and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of barley grown on a Nitisol in the highlands of Ethiopia[J]. Science of the Total Environment, 2016, s 569-570: 869-879
- [6] 宋燕燕,赵秀娟,张淑香,等.水肥一体化配合硝化/脲酶抑制剂实现油菜减氮增效研究[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):632-640
- [7] 侯振安,李品芳,龚江,等.不同滴灌施肥策略对棉花氮素吸收和氮肥利用率的影响[J].土壤学报,2007,44(4):702-708
- [8] 杨小振,张显,马建祥,等.滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J].农业工程学报,2014,30(7):109-118
- [9] Surendran U. Drip fertigation program on growth, crop productivity, water, and fertilizer-use efficiency of Bt cotton in semi-arid tropical region of India[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2015, 46(3):293-304
- [10] 方栋平.温室黄瓜对不同灌水量和滴灌施肥方式的响应机制研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2015
- [11] 樊兆博,林杉,陈清,等.滴灌施肥对设施番茄水氮利用效率及土壤硝态氮残留的影响[J].中国农业大学学报,2015,20(1):135-143
- [12] 陈静,王迎春,李虎,等.滴灌施肥对冬小麦农田土壤 NO<sub>3</sub>-N 分布、累积及氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):927-935
- [13] Hanson B R, Šimůnek J, Hopmans J W. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1/2):102-113
- [14] Rajput T B S, Patel N. Water and nitrate movement in drip-irrigated onion under fertigation and irrigation treatments[J]. Agricultural Water Management, 2006, 79(3):293-311
- [15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,1999:442-449
- [16] 石玉,于振文.施氮量及底追比例对小麦产量、土壤硝态氮含量和氮平衡的影响[J].生态学报,2006,26(11):3661-3669
- [17] 栗丽,洪坚平,王宏庭,等.施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1358-1365
- [18] 侯云鹏,韩立国,孔丽丽,等.不同施氮水平下水稻的营养吸收、转运及土壤氮素平衡[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):836-845
- [19] 国家烟草专卖局科技教育司.跨世纪烟草农业科技展望和持续发展战略研讨会论文集[C].北京:中国商业出版社,1999:80-84
- [20] 化党领,张诗卉,王瑞,等.施氮量对植烟土壤不同土层无机氮质量含量的调控[J].中国水土保持科学,2012,10(6):86-91
- [21] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等.北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征[J].中国农业科学,2004,37(5):692-698
- [22] 袁仕豪.水氮互作对烤烟氮素吸收利用及烟叶产量和品质的影响[D].郑州:河南农业大学,2008

- [23] 闫凯龙. 凉山主要植烟土壤氮素供应及其对烟草氮素积累分配和品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014
- [24] 刘卫群, 郭群召, 张福锁, 等. 氮素在土壤中的转化及其对烤烟上部叶烟碱含量的影响[J]. 烟草科技, 2004, 37(5): 36–39
- [25] 晁逢春. 氮对烤烟生长及烟叶品质的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2003
- [26] 王军, 谢玉华, 顾学文, 等. 广东南雄烟区主要植烟土壤中氮肥淋失特征研究[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(1): 5–11
- [27] 胡国松, 郑伟, 王震东. 烤烟营养原理[M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [28] 单德鑫. 烤烟对氮肥的吸收利用及不同形态氮肥对烤烟产量和品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2002
- [29] 刘喜庆. 利用  $^{15}\text{N}$  示踪研究烤烟氮素吸收分配规律[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013
- [30] 谷海红, 刘宏斌, 王树会, 等. 应用(15)-N 示踪研究不同来源氮素在烤烟体内的累积和分配[J]. 中国农业科学, 2008(9): 2693–2702
- [31] 刘青丽, 张云贵, 焦永鸽, 等. 西南烟区氮素供应与烤烟氮素吸收的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 757–764
- [32] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 921–933

## Effects of Nitrogen Reduction with Drip Fertigation on Soil Inorganic Nitrogen and Nitrogen Accumulation in Tobacco

DU Feile<sup>1,2</sup>, REN Tianbao<sup>1,2</sup>, LIN Erge<sup>1</sup>, LI Jingyang<sup>1,2</sup>, HU Jingyi<sup>1</sup>, SUN Yiming<sup>1</sup>,  
LIU Yingjie<sup>3</sup>, LIU Guoshun<sup>1,2\*</sup>

(1 Tobacco Industry Tobacco Cultivation Key Laboratory/Henan Biochar Engineering Research Center, Zhengzhou 450002, China; 2 Tobacco College of Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002; 3 Zhengzhou Company of Henan Tobacco Company, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to clarify the effects of reducing nitrogen application on soil inorganic nitrogen and nitrogen accumulation in tobacco plants under drip fertigation, a field experiment was carried out in 2016 in Dengfeng of Henan Province, which included five treatments: T0, no nitrogen fertilization; T1, conventional fertilization; T2, 15% reduction of nitrogen; T3, 30% reduction of nitrogen; T4, 45% reduction of nitrogen. Inorganic nitrogen contents in 0–20, 20–40 and 40–60 cm soils and nitrogen accumulation in tobacco plants were analyzed. The correlation was analyzed between the characteristics values of fitting curves of inorganic nitrogen in 0–20 cm soil and nitrogen accumulation in tobacco plant. The results showed that drip fertigation could significantly increase inorganic nitrogen in 0–20 cm soil in 40 and 50 days after planting and significantly reduce soil inorganic nitrogen in 40–60 cm soil in 50 days. Fifteen percent to thirty percent reduction of nitrogen had no significant effect on the yield of tobacco leaves and on the nitrogen accumulation in tobacco plants, but the yield and nitrogen accumulation in tobacco leaves and plant decreased significantly by 11.52%, 45%, 10.53% and 10.50% respectively under 45% reduction of nitrogen. Nitrogen agronomic efficiency (NAE) and nitrogen partial factor productivity (NPFPP) were the highest in T4, and gradually decreased with the increase of nitrogen rate. Apparent recovery efficiency (ARE) of nitrogen fertilizer was the highest in T3. Nitrogen harvest index (NHI) and nitrogen physiological efficiency (NPE) had no obvious correlation with nitrogen rate. However, the decrease of nitrogen rate could prolong the decrease duration of inorganic nitrogen and the rapid growth stage of tobacco plants, and reduce the maximum decrease rate of inorganic nitrogen and the maximum nitrogen accumulation rate of tobacco plants, which is adverse to the rapid accumulation of nitrogen in tobacco plants. Therefore, it is considered that reducing nitrogen by 15%–30% under drip fertigation is beneficial to the efficient utilization of nitrogen fertilizer in this study region.

**Key words:** Drip fertigation; Reduced nitrogen; Soil inorganic nitrogen; Tobacco plant; Nitrogen accumulation