

滴灌追肥统筹方式对烤烟氮磷钾吸收利用的影响^①

马二登¹, 薛如君², 高天³, 刘忠华⁴, 封幸兵⁴, 徐照丽¹, 李军营¹, 童文杰¹, 邓小鹏¹,
赵正雄^{5*}

(1 云南省烟草农业科学研究院, 昆明 650031; 2 云南省烟草公司大理州公司, 云南大理 671000; 3 海南红塔卷烟有限责任公司, 海口 571137; 4 中国烟草总公司云南省公司, 昆明 650011; 5 云南农业大学烟草学院, 昆明 650201)

摘要: 为探明适宜的烤烟滴灌追肥统筹方式, 采用田间小区试验, 以当地常规追肥干施为对照, 研究2次、3次和4次滴灌追肥对烤烟生物量、土壤矿质氮含量及烤烟氮磷钾吸收利用的影响。结果表明, 随着滴灌追肥次数的增加, 烟株成熟期叶片及全株生物量、旺长期和全生育期土壤矿质氮平均含量随之增加, 叶片氮和钾含量、氮磷钾累积量及其利用率均随之提升。成熟期烤烟叶片及全株氮素累积量与旺长期土壤矿质氮平均含量间有极显著的正相关关系($r=0.526\sim0.816$, $P<0.01$)。与追肥干施相比, 2次和3次滴灌追肥氮肥和钾肥利用率均无显著差异, 4次滴灌追肥氮肥和钾肥利用率分别显著提高了57.7%和58.5%($P<0.05$); 不同滴灌追肥次数磷肥利用率显著下降了35.7%~50.0%($P<0.05$), 且处理间无显著差异。与2次和3次滴灌追肥相比, 4次滴灌追肥有利于维持和稳定旺长期土壤矿质氮含量水平, 促进烟株的生长发育及对养分的吸收和累积利用, 是试验区域内适宜的滴灌追肥统筹方式。

关键词: 烤烟; 滴灌施肥; 氮磷钾; 吸收利用

中图分类号: S572 **文献标志码:** A

Effects of Drip Fertigation Modes for Top-dressing on N, P and K Uptake and Utilization of Tobacco

MA Erdeng¹, XUE Rujun², GAO Tian³, LIU Zhonghua⁴, FENG Xingbing⁴, XU Zhaoli¹, LI Junying¹, TONG Wenjie¹,
DENG Xiaopeng¹, ZHAO Zhengxiong^{5*}

(1 Yunnan Academy of Tobacco Agricultural Sciences, Kunming 650031, China; 2 Yunnan Provincial Tobacco Company Dali Branch, Dali, Yunnan 671000, China; 3 Hainan Hongta Cigarette Sales Co., Ltd., Haikou 571137, China; 4 China Tobacco Company Yunnan Branch, Kunming 650011, China; 5 College of Tobacco Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Inorder to explore the suitable integrated method of drip irrigation and top-dressing for tobacco, a field plot experiment was conducted, with the conventional dry fertilization as the control (CK), to study the effects of 2, 3, and 4 drip irrigation and top-dressing on the biomass of tobacco, soil mineral nitrogen contents, and the absorption and utilization of nitrogen, phosphorus, and potassium. Results showed that with the increase of drip fertigation times, the biomass of tobacco leaves and the whole plant at maturity stage, as well as the average content of soil mineral nitrogen during the vigorous growth stage and the whole growth stage, increased accordingly. Nitrogen and potassium contents in the leaves, as well as the accumulation and use efficiency of nitrogen, phosphorus, and potassium also increased. There was a significant correlation between nitrogen accumulation in the leaves and the whole plant at maturity stage and the average content of soil mineral nitrogen during the vigorous growth stage ($r=0.526\sim0.816$, $P<0.01$). Compared with CK, there was no significant difference in the utilization rates of nitrogen and potassium fertilizers under 2 and 3 times of drip fertigation. However, use efficiencies of nitrogen and potassium fertilizers were significantly improved by 57.7% and 58.5% ($P<0.05$) under 4 times of drip fertigation, while the use efficiency of phosphorus fertilizer significantly decreased by 35.7%~50.0% ($P<0.05$) under drip fertigation, with no significant difference among all

^①基金项目: 云南省技术创新人才项目(202105AD160004)和云南省烟草公司科技计划重大项目(2022530000241033, 2024530000241018)资助。

* 通信作者(zhaozx0801@163.com)

作者简介: 马二登(1983—), 男, 安徽定远人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为土壤农化与烟草栽培。E-mail: erdengma@163.com

fertigation treatments. Compared with 2 and 3 times of drip fertigation, 4 times of drip fertigation is more beneficial for maintaining and stabilizing soil mineral nitrogen content during the vigorous growth stage, promoting the growth, development, and nutrient absorption and utilization of tobacco plant, thus is most suitable for tobacco top-dressing in the experimental area.

Key words: Tobacco; Drip fertigation; N, P and K; Uptake and utilization

滴灌施肥(滴灌水肥一体化)是一项利用滴灌系统, 将肥料溶解在灌溉水中, 同时进行灌溉与施肥, 适时、适量地满足作物对水分和养分的需求, 实现水肥同步管理的生产技术^[1]。由于水肥的同步耦合效应, 滴灌施肥模式下的水肥利用效率往往得到显著提高, 从而可以基于较少的养分投入满足烤烟生长发育所需^[2-4]。因此, 滴灌施肥技术的应用和推广不仅对于节水抗旱生产, 而且对于落实农业生产“双减”行动和助推绿色发展同样具有积极作用。目前, 我国主要在大宗旱地作物, 如小麦^[5]、玉米^[6]、大豆^[7]、油菜^[8]等作物种植上实现了滴灌施肥技术的应用。滴灌施肥方案的科学制定是落实滴灌施肥技术的前提和实现滴灌施肥技术成效的重要保障。完善的滴灌施肥方案应包括肥料种类、施用次数、施用量和施用浓度等关键内容, 其中, 滴灌施肥次数(频率)是滴灌施肥方案中十分重要的技术参数。肥液总用量一定的情况下, 滴灌施肥次数本质上决定了单次滴灌的肥液量, 从而制约了作物不同时期的水肥供应, 进而影响到作物的生长发育及其对养分的吸收利用。然而, 目前有关滴灌施肥次数(频率)对作物的生长发育及其对养分的吸收利用的研究报道较少^[9]。

在一定的施肥周期内增加滴灌施肥次数(高频率滴灌施肥)对养分吸收利用往往具有促进效应^[10-11]。以往有关滴灌施肥次数(频率)研究中, 施肥周期往往较长, 涵盖了作物生长的全生育期或大部分生育期^[12-14], 这种情况下, 不同滴灌施肥次数下养分利用差异是其长期效应的结果。对于烤烟生产而言, 由于其特殊的养分管理需求^[15-16], 其施肥期主要集中在团棵期(由伸根期向旺长期过渡的短期阶段), 从而使得其追肥周期较短(一般不超过一个月)。目前, 不同滴灌施肥次数对作物养分利用的短期效应研究鲜见报道。为此, 本研究以常规追肥(干施)为对照, 在减控总施氮量并保证肥液总灌溉定额一致的前提下, 各滴灌施肥处理于烤烟伸根至旺长阶段分别滴灌追肥2次、3次和4次, 考察不同滴灌追肥统筹方式对烤烟生物量、土壤矿质氮含量变化及氮磷钾吸收利用的影响, 为滴灌施肥方案的科学制定提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2017年在云南省烟草农业科学研究院试验站($102^{\circ}30'E$, $24^{\circ}14'N$)进行。该试验地属中亚热带半湿润凉冬高原季风气候, 年均气温 $15\sim16^{\circ}\text{C}$, 年均降水量 $800\sim900\text{ mm}$, 日照时数2 265 h。土壤类型为红壤, pH 6.12, 有机质 10.84 g/kg , 全氮 0.79 g/kg , 全磷 1.16 g/kg , 全钾 6.47 g/kg , 碱解氮 52.27 mg/kg , 有效磷 51.94 mg/kg , 速效钾 275.93 mg/kg ; 地质为黏壤土, 砂粒、粉粒和黏粒含量分别为29.3%、32.7%和37.4%, 土壤田间持水率20.5%, 饱和质量含水率42.4%, 容重 1.25 g/cm^3 。

1.2 试验设计

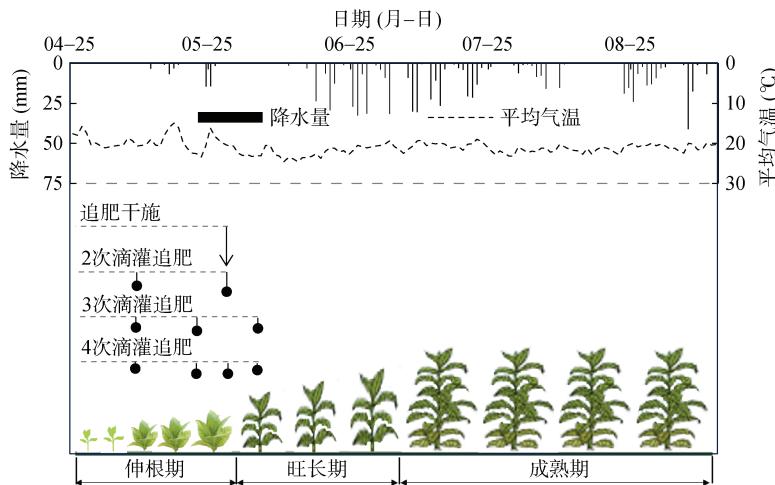
供试烤烟品种为K326, 烟苗移栽株行距为 $120\text{ cm}\times50\text{ cm}$, 中心花开第一朵封顶, 留叶 $18\sim22$ 片。

试验共设置4个追肥处理, 以常规追肥干施为对照(CK), 另设置2次、3次和4次滴灌追肥统筹方式。上述各处理均设置了相应的不施肥空白处理, 用于肥料利用率的计算。每个处理均3次重复, 每个重复(小区)约 91 m^2 , 约150株烟苗, 随机区组排列。各处理施肥量、施肥种类以及施肥方式和日期见表1。

与CK相比, 各滴灌追肥处理氮肥总用量减少18.7%, 磷肥和钾肥总用量一致。CK的基肥和追肥肥料类型均为烟草专用复合肥($\text{N-P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}=10\%-12\%-24\%$), 基肥以塘施的方式施入, 即将肥料与塘(坑穴)内土壤充分混合, 基肥施用后同一天进行烟苗移栽; 追肥为环施, 即将肥料以烟株根基部为中心, 以 10 cm 左右为半径环状撒施于土面后覆土。滴灌追肥处理下, 基肥中的氮肥和钾肥采用硝酸钾($\text{N-K}_2\text{O}=13.5\%-46\%$)和硝酸铵钙($\text{N}=15\%$)溶水后滴灌施入, 磷肥采用普钙(过磷酸钙, $\text{P}_2\text{O}_5=16\%$)以塘施的方式一次性施入; 追肥则仅施用硝酸钾($\text{N-K}_2\text{O}=13.5\%-46\%$)和硝酸铵钙($\text{N}=15\%$), 随水滴灌施用。所有滴灌施肥, 均为现配现用, 即施肥当天配制肥液并通过滴灌系统施用, 配制浓度为0.15%(质量分数)。滴灌带滴头间距为 50 cm , 滴头流量 1.8 L/h 。CK滴灌系统仅用于灌溉, 滴灌追肥处理下滴灌系统同时用于灌溉和滴灌施肥; 当滴灌施肥处理进行肥料施用时, 不施肥处理均采用等量清水滴灌。试验区降水量、平均温度及各施肥时间示意见图1。

表 1 各处理施肥时间、种类和用量管理
Table 1 Fertigation time, type and amount under each treatment

处理	日期	肥料用量(kg/hm ²)			施肥种类/施肥方式
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
干施(CK)	4月25日	22.50	11.25	33.75	基肥：复混肥/塘施
	5月30日	52.50	26.25	78.75	追肥：复混肥/环施
	合计	75.00	37.50	112.50	-
2次滴灌追肥	4月25日	22.50	37.50	33.75	基肥：硝酸钾+硝酸铵钙/随水滴灌；普钙/塘施
	5月10日	15.40	-	31.5	第1次追肥：硝酸钾+硝酸铵钙/随水滴灌
	5月30日	23.10	-	47.25	第2次追肥：硝酸钾+硝酸铵钙/随水滴灌
	合计	61.00	37.50	112.50	-
3次滴灌追肥	4月25日	22.50	37.50	33.75	基肥：硝酸钾+硝酸铵钙/随水滴灌；普钙/塘施
	5月10日	11.5	-	23.63	第1次追肥：硝酸钾+硝酸铵钙/随水滴灌
	5月23日	15.4	-	31.5	第2次追肥：硝酸钾+硝酸铵钙/随水滴灌
	6月6日	11.5	-	23.63	第3次追肥：硝酸钾+硝酸铵钙/随水滴灌
	合计	61.00	37.50	112.50	-
4次滴灌追肥	4月25日	22.5	37.5	33.75	基肥：硝酸钾+硝酸铵钙/随水滴灌；普钙/塘施
	5月10日	7.7	-	15.75	第1次追肥：硝酸钾+硝酸铵钙/随水滴灌
	5月23日	11.5	-	23.63	第2次追肥：硝酸钾+硝酸铵钙/随水滴灌
	5月30日	11.5	-	23.63	第3次追肥：硝酸钾+硝酸铵钙/随水滴灌
	6月6日	7.7	-	15.75	第4次追肥：硝酸钾+硝酸铵钙/随水滴灌
合计		61.00	37.50	112.50	-



(箭状箭头表示追肥干施处理的追肥时间，其箭头长度表示施肥(氮)量大小；圆状箭头表示滴灌追肥处理的追肥时间，其箭头长度表示施肥(氮)量大小)。

图 1 试验区降水量、平均温度及各处理追肥时间示意
Fig. 1 Daily precipitation, average temperature, and top-dressing timing at tested site

1.3 测定指标与方法

土壤矿质氮(NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N)含量：从第1次追肥前1天开始，每7~10 d采集一次10 cm耕层土样(于烟垄上的烟株两侧，距离烟株中心点约10 cm)，用2 mol/L氯化钾溶液提取新鲜土样中的速效矿质氮(土水质量比1:5)，用Skalar流动分析仪测定。

烟株生物量和氮、磷、钾含量：于烤烟成熟期，分别采集烟株的叶片、茎和根。其中，叶片一次性采

集；采集烟根时，先将烟株地上部分切除，后将烟根及周围土壤一同挖起，尽量保证根系的完整，小心抖落松散泥土后置于尼龙网袋中，室内静水清洗后晾干。烟株叶片、茎和根分别置入烘箱中105 °C杀青30 min，然后在80 °C下烘干至恒重，分别获取烟株根、茎、叶生物量，并参照相应标准^[17-19]检测根、茎、叶中的氮、磷、钾量。

$$\text{烟株氮(磷、钾)累积量} = \text{氮(磷、钾)含量} \times \text{生物量}$$

肥料利用率(%)=(肥料施用区养分吸收量-无肥区养分吸收量)/养分投入量×100

烟叶产量: 烟叶采收期, 以重复(小区)为单位进行采收、烘烤和测产, 统计烟叶产量。

1.4 数据处理

常规数据整理由 Excel 2016 完成, 方差分析和相关性分析通过 SPSS 20.0 统计软件进行。

2 结果与分析

2.1 滴灌追肥统筹方式对烟株生物量的影响

随着滴灌追肥次数的增加, 烟株根部生物量及占比、叶片生物量及占比均表现为增加的趋势(表 1)。与 CK 相比, 2 次、3 次和 4 次滴灌追肥根部生物量分别增加了 2.1%、15.0% 和 48.5%, 其占比分别增加了 9.8%、17.7% 和 41.8%; 叶片生物量分别减少了 13.4%、12.3% 和 4.1%, 其占比分别降低了 6.4%、10.0% 和 10.3%。随着滴灌追肥次数的增加, 全株生物量和根冠比均表现为增加的趋势。与 CK 相比, 2 次和 3 次滴灌追肥全株生物量分别减少了 7.4% 和 2.4%, 4 次滴灌追肥全株生物量则增加了 6.0%; 2

次、3 次和 4 次滴灌追肥根冠比分别增加了 11.5%、20.8% 和 48.0%。

2.2 滴灌追肥统筹方式对土壤矿质氮含量的影响

由图 2 可知, 试验季土壤矿质氮以硝态氮为主, 其含量范围为 3.9~75.3 mg/kg, 而土壤铵态氮含量仅为 0.5~2.8 mg/kg。CK 随着时间的增加土壤矿质氮含量随之增加, 直至其追肥实施(5月 30 日)后的第 5 天(6月 4 日)达到最高值 76.2 mg/kg, 之后逐渐下降; 3 个滴灌追肥处理土壤矿质氮含量大体上同样表现为先增加后下降的趋势, 且自采样起始日期开始其含量均低于 CK, 直至 7 月 10 日左右达到同等含量水平。3 个滴灌追肥处理中, 以 4 次滴灌追肥处理土壤矿质氮含量峰值相对最高, 达 55.2 mg/kg, 以 2 次滴灌追肥处理土壤矿质氮含量峰值相对最低, 为 50.2 mg/kg。统计表明, 随着滴灌追肥次数的增加, 烤烟旺长期和全生育期土壤矿质氮平均含量有随之增加的趋势。与 CK 相比, 2 次、3 次和 4 次滴灌追肥全生育期土壤矿质氮平均含量分别下降了 32.0%、27.9% 和 27.6%, 旺长期土壤矿质氮平均含量分别下降了 40.2%、29.1% 和 25.8%。

表 2 不同处理烟株不同部位生物量及其占比
Table 2 Biomass and proportions of different parts of tobacco plant at maturity stage under different treatments

处理	根		茎		叶		全株生物量 (g/株)	根冠比 (%)
	生物量 (g/株)	占比 (%)	生物量 (g/株)	占比 (%)	生物量 (g/株)	占比 (%)		
追肥干施(CK)	28.7 ± 1.4 b	12.9 ± 1.3 b	47.1 ± 3.1 b	21.1 ± 0.3 c	147.4 ± 9.3 a	66.0 ± 0.9 a	223.1 ± 10.9 ab	14.8 ± 1.7 b
2 次滴灌追肥	29.3 ± 4.4 b	14.2 ± 1.8 b	49.7 ± 2.4 ab	24.1 ± 0.5 ab	127.6 ± 6.3 c	61.8 ± 1.3 b	206.6 ± 10.6 c	16.5 ± 2.4 b
3 次滴灌追肥	33.0 ± 2.4 b	15.2 ± 0.9 b	55.7 ± 9.9 a	25.4 ± 2.2 a	129.2 ± 7.9 c	59.4 ± 2.0 b	217.8 ± 19.1 bc	17.9 ± 1.3 b
4 次滴灌追肥	42.6 ± 5.1 a	18.3 ± 0.5 a	52.5 ± 6.1 ab	22.5 ± 0.6 bc	137.6 ± 9.7 b	59.2 ± 1.1 b	232.6 ± 20.9 a	22.4 ± 0.8 a

注: 同列数据小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平; 下同。

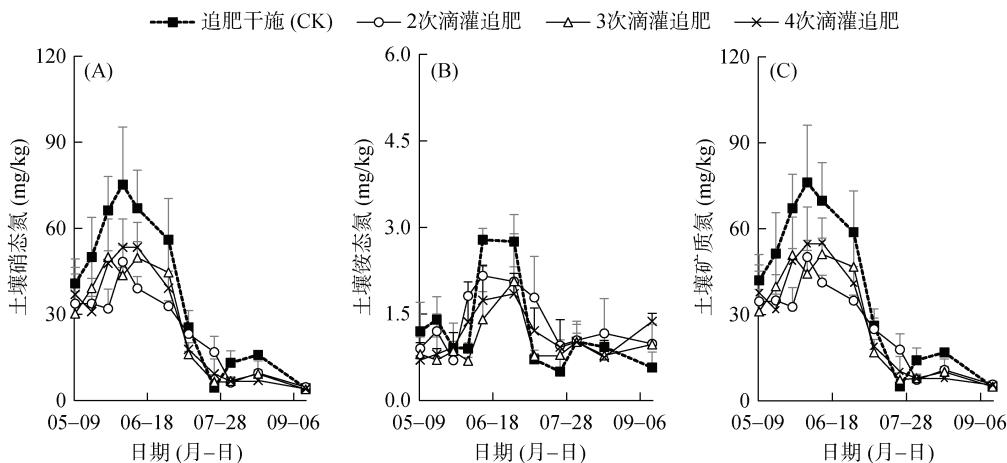


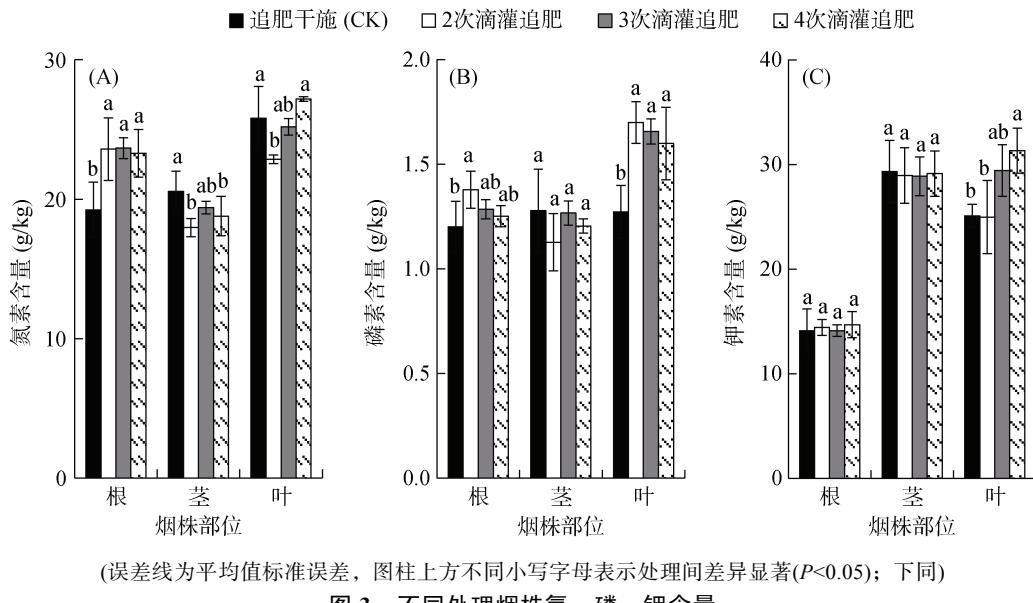
图 2 不同处理土壤硝态氮、铵态氮及矿质氮含量的变化

Fig. 2 Temporal variations of contents of soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and mineral N ($\text{NO}_3^-\text{-N} + \text{NH}_4^+\text{-N}$) under different treatments

2.3 滴灌追肥统筹方式对烟株氮、磷、钾素含量的影响

与 CK 相比, 滴灌追肥处理烟株根部氮素含量显著提高($P<0.05$), 2 次、3 次和 4 次滴灌追肥处理分别提高了 22.6%、23.0% 和 21.1%; 茎部氮素含量则有不同程度降低, 3 个滴灌追肥处理分别降低了 12.6%、5.7% 和 8.6%; 叶片氮素含量表现不一, 2 次和 3 次滴灌追肥处理叶片氮素含量分别下降了 11.4% 和 2.4%,

4 次滴灌追肥叶片氮素含量提高了 5.3%(图 3A)。与 CK 相比, 滴灌追肥处理烟株根部和茎部磷素含量大体相当; 叶片磷素含量则显著提高($P<0.05$), 但不同滴灌追肥次数间无显著差异(图 3B)。与 CK 相比, 滴灌追肥处理烟株根部和茎部钾素含量均无显著差异; 叶片钾素含量则表现不一, 2 次和 3 次滴灌追肥叶片钾素含量与 CK 相比均无显著差异, 但 4 次滴灌追肥处理叶片钾素含量显著提高了 24.9% ($P<0.05$, 图 3C)。



(误差线为平均值标准误差, 图柱上方不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$); 下同)

图 3 不同处理烟株氮、磷、钾含量

Fig. 3 N, P and K concentrations in tobacco plants under different treatments

2.4 滴灌追肥统筹方式对烟株氮、磷、钾素累积量的影响

与 CK 相比, 滴灌追肥处理烤烟根部氮素累积量有不同程度提高, 2 次、3 次和 4 次滴灌处理分别增加了 25.1%、40.9% 和 79.2%; 茎部氮素累积量无显著差异; 叶片和全株氮素累积量则表现不一, 2 次和 3 次滴灌追肥叶片和全株氮素累积量分别降低了 23.0%、15.2% 和 14.2%、3.7%, 但 4 次滴灌追肥叶片和全株氮素累积量分别提高了 1.4% 和 9.6%, 且叶片和全株氮素累积量均随着滴灌追肥次数的增加而提高。3 个滴灌追肥处理中, 2 次和 3 次滴灌追肥处理烤烟根、茎、叶磷素累积量与 CK 之间无显著差异; 4 次滴灌追肥处理根、茎、叶磷素累积量分别增加了 53.9%、6.0%、20.7%; 随着滴灌追肥次数的增加, 全株磷素累积量表现出提高的趋势, 与 CK 相比, 2 次、3 次和 4 次滴灌追肥全株磷素累积量分别增加了 11.4%、16.2% 和 21.6%。3 个滴灌追肥处理中, 2 次和 3 次滴灌追肥处理烤烟根、茎、叶、全株钾素累积量与 CK 之间均无显著差异; 4 次滴灌追肥处理根、

茎、叶、全株钾素累积量分别增加了 54.6%、11.9%、19.7%、20.3%; 随着滴灌追肥次数的增加, 根、叶和全株钾素累积量均表现出提高的趋势。

2.5 烟株氮素含量和累积量与土壤矿质氮平均含量间的相关性

相关分析表明(表 3), 烟株根部氮素含量与各生育期土壤矿质氮平均含量间均表现出极显著的负相关($P<0.01$)。烟株茎部和叶片氮素含量与团棵期、旺长期、团棵-旺长期及全生育期土壤矿质氮平均含量间均表现出显著或极显著正相关($P<0.05$ 、 $P<0.01$)。不同生育阶段中, 叶片氮素含量与旺长期土壤矿质氮平均含量相关性最高(相关系数 $r = 0.534$, $P<0.01$)。烟株根部氮素累积量与各生育期土壤矿质氮平均含量间均表现出极显著的负相关。烟株叶片和全株氮素累积量与团棵期、旺长期、团棵-旺长期及全生育期土壤矿质氮平均含量间均表现出显著或极显著的正相关。不同生育阶段中, 叶片氮素累积量及全株氮素累积量与旺长期土壤矿质氮平均含量的相关性最高($r = 0.816$ 、 0.526 , $P<0.01$)。

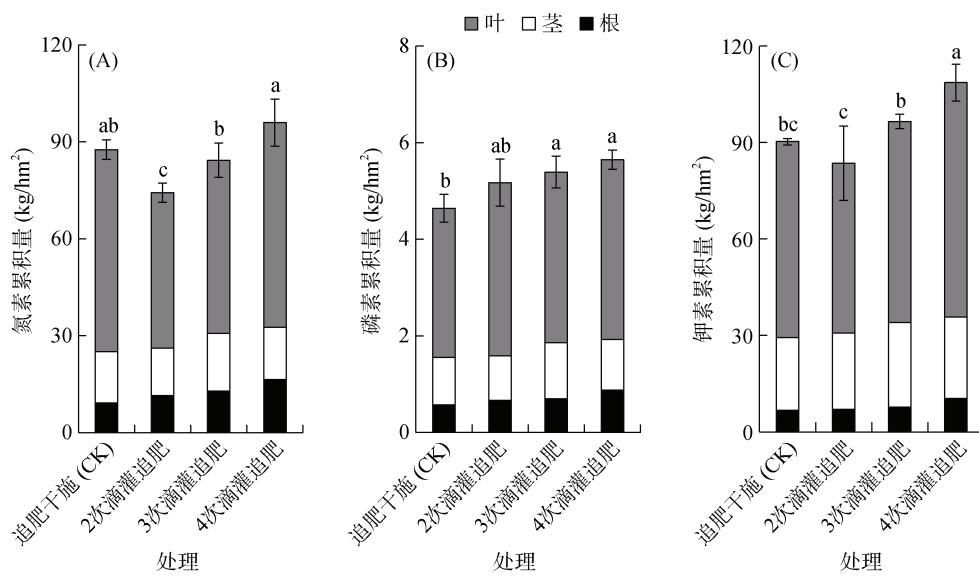


图 4 不同处理烟株氮、磷、钾累积量

Fig. 4 Accumulations and distributions of N, P and K in tobacco plants under different treatments

表 3 烟株氮素含量和累积量与土壤矿质氮平均含量间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between N concentration and accumulation in tobacco plant with average content of soil mineral N

	烟株部位	团棵期	旺长期	团棵-旺长期	成熟期	全生育期
烟株氮素含量	根	-0.946**	-0.944**	-0.950**	-0.863**	-0.992**
	茎	0.967**	0.940**	0.953**	0.517**	0.900**
	叶	0.360*	0.534**	0.489**	-0.245	0.323*
烟株氮素累积量	根	-0.631**	-0.465**	-0.514**	-0.889**	-0.652**
	茎	0.188	0.148	0.160	-0.495**	-0.007
	叶	0.662**	0.816**	0.778**	0.191	0.672**
	全株	0.344*	0.526**	0.479**	-0.241	0.315*

注: *、**分别表示相关性达 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 显著水平。

2.6 滴灌追肥统筹方式对肥料利用率和烟叶产量的影响

随着滴灌追肥次数的增加, 氮肥、磷肥和钾肥利用率均表现出提高的趋势(表 4), 其中氮肥和钾肥差异达显著水平($P<0.05$)。与 CK 相比, 2 次和 3 次滴

灌追肥处理氮肥和钾肥利用率均无显著差异, 磷肥利用率分别显著下降 50.0% 和 42.9%($P<0.05$); 4 次滴灌追肥处理氮肥和钾肥利用率分别显著提高 57.7% 和 58.5%, 磷肥利用率显著下降 35.7%($P<0.05$)。各处理间烟叶产量无显著差异。

表 4 不同处理氮、磷、钾肥料利用率和烟叶产量

Table 4 Use efficiencies of N, P and K fertilizers and tobacco leaf yields under different treatments

处理	肥料利用率(%)			烟叶产量(kg/hm ²)
	氮(N)	磷(P ₂ O ₅)	钾(K ₂ O)	
追肥干施(CK)	38.8 ± 3.7 bc	2.8 ± 0.7 a	25.3 ± 0.8 bc	2 299.5 ± 120.5 a
2 次滴灌追肥	28.3 ± 4.5 c	1.4 ± 0.4 b	19.9 ± 9.4 c	2 182.6 ± 136.1 a
3 次滴灌追肥	43.5 ± 8.0 b	1.6 ± 0.3 b	30.4 ± 1.8 b	2 286.0 ± 113.5 a
4 次滴灌追肥	61.2 ± 11.0 a	1.8 ± 0.2 b	40.2 ± 4.6 a	2 431.5 ± 94.5 a

3 讨论

在一定的施肥周期内增加滴灌施肥次数可有效提高氮肥利用效率^[20]。葡萄^[21]和西红柿^[22]等水肥一

体化栽培过程中, 通过增加滴灌施肥次数(提高滴灌施肥频率)均实现了氮肥利用率的显著提升。以往研究认为, 增加滴灌施肥次数对氮肥利用促进效应的作用机制在于: 总施氮量一定的情况下, 滴灌施肥次数

的增加有利于作物根区养分离子含量水平的维持和稳定^[23], 从而促进了作物植株的生长发育及其对氮肥的吸收和累积, 最终提高了氮肥的利用效率^[24]。本研究中, 随着滴灌追肥次数的增加, 氮肥、磷肥和钾肥利用率均表现出随之提高的趋势, 尤其是氮肥和钾肥利用率得到了显著提升(表 4), 这与以往研究结论一致。分析表明, 成熟期叶片氮素含量/累积量以及全株氮素累积量均与烟株旺长阶段(移栽后 32~64 d)土壤矿质氮平均含量有着显著的正相关关系(表 3), 而滴灌追肥次数的增加对于旺长期土壤矿质氮含量水平有明显的维持效应(图 2)。由此可见, 多次滴灌追肥保障了旺长期氮素营养的高水平供应, 从而满足了烟株关键生育阶段的养分需求, 促进了烟株的生长发育(表 2), 进而促进了烟株对氮素的吸收和累积利用(图 4)。另外, 滴灌施肥次数的增加对于钾肥的吸收和利用有着同样的促进效应。本研究中, 钾肥(硝酸钾)和氮肥(硝酸铵钙)均采用水溶性肥料溶水后滴灌施入。由于钾离子在土壤中同样具有较强的迁移性^[25], 可以推测, 多次滴灌追肥对于土壤钾离子含量水平势必有着类似的维持效应, 从而也有利于烟株对钾素的吸收和利用。与氮肥和钾肥的施用不同的是, 由于所有滴灌追肥处理的磷肥施用方式均为采用普钙作为基肥在烟株移栽当天一次性施用, 因此增加滴灌次数并未对磷肥的吸收和累积利用有显著影响(图 3、图 4、表 4)。

增加滴灌施肥次数(高频滴灌施肥)除了对氮肥利用效率有提升作用外, 同时还有利于作物的生长发育和产量的增加^[26-27]。研究表明, 两周一次滴灌施肥下的西红柿产量仅为 54.32 t/hm², 而每天 1 次、3 天 1 次和 7 天 1 次滴灌施肥下的西红柿产量分别可达 67.75、65.13 和 63.29 t/hm²^[28]。在相同的施氮水平下, 与 7 天 1 次滴灌施肥相比, 2 天 1 次滴灌施肥更有利于北疆西葫芦生长发育和产量水平的提高^[29]。本研究中, 随着滴灌追肥次数的增加, 烟株根部、叶片及全株生物量均表现出随之增加的趋势, 且 4 次滴灌追肥烟株根、叶和全株生物量得到显著提升(表 2)。烤烟对氮的吸收高峰出现在移栽后的 30~45 d, 对钾的吸收高峰出现在 30~75 d^[15]。本研究中, 增加滴灌追肥次数(尤其是 4 次滴灌追肥)显著提高并维持了旺长期土壤矿质氮含量水平(图 2), 从而满足烟株对氮素养分的需求, 促进了烟株根系的生长发育和对肥料养分的吸收利用, 进而加速了地上部分的生长及其生物量的形成。随着滴灌追肥次数的增加, 烟叶产量有随之提高的趋势, 但处理间并无显著差异(表 4)。其原因可能是, 滴灌追肥次数的增加可能会对烟叶的某

些烘烤素质特征造成一定影响, 从而在一定程度上抑制了其对初烤烟叶产量的提升效应。

一般认为, 与常规施肥方式相比, 滴灌水肥一体化可根据作物养分需求规律, 使肥料在时间和数量上与作物需肥相吻合, 从而提高肥料养分的利用效率^[30-31]。本研究中, 虽然与追肥干施处理相比, 不同滴灌追肥次数处理氮肥施用量均减少了近 20%, 但仅 4 次滴灌追肥处理下氮肥和钾肥利用率得到显著提升。有研究指出, 在同一施肥量下, 随着滴灌施肥次数的增加, 棉花氮肥利用率也相应地提高^[32], 随着滴灌施肥次数的减少, 氮、钾、镁等养分淋失程度随之减小, 养分利用效率得到显著提高^[33]。本研究中, 2 次和 3 次滴灌追肥处理下, 单次滴灌肥液用量最高达 1.9~2.8 L/株, 是 4 次滴灌追肥(1.4 L/株)的 1.4 倍~2.0 倍。高量的氮/钾肥液滴灌施用后, 可能会导致部分肥液扩散至烤烟根系以外造成养分的淋溶损失, 从而降低养分的利用效率。近年来, 通过增加滴灌施肥次数(提高滴灌施肥频率)降低氮肥淋失风险和提高氮肥利用效率得到了广泛共识^[34-35]。与常规追肥干施处理相比, 滴灌追肥处理磷肥利用率显著降低。有研究指出, 氮、磷、钾 3 种元素配比率对各自养分的吸收利用也有影响^[36], 这与肥料营养间的交互作用有关^[37]。本研究中, 与滴灌追肥处理氮、磷、钾配比(N:P₂O₅:K₂O=1:0.8:2.5)相比, 追肥干施处理养分配比(N:P₂O₅:K₂O=1:0.5:2.5)更为适宜烤烟养分需求^[15], 进而促进了烟株对磷素的吸收利用。

虽然滴灌施肥次数的增加在目前传统人工作业模式下势必会导致一定的用工成本增加, 但随着基于物联网的智慧灌溉系统的普及与应用, 多次滴灌施肥(高频滴灌施肥)必将更便捷和简单。需要注意的是, 滴灌施肥次数/频率对作物生长和养分利用的影响还极大地受土壤、气候和作物种类的影响^[12, 38], 有关多次/高频滴灌施肥率对养分利用提升效应的显著性和普适性仍需进一步探索。

4 结论

与追肥干施相比, 2 次和 3 次滴灌追肥处理氮肥和钾肥利用率均无显著差异, 4 次滴灌追肥处理氮肥和钾肥利用率显著提高, 各滴灌追肥次数磷肥利用率均显著下降。滴灌追肥次数的增加有利于旺长期土壤矿质氮含量的维持与稳定, 保障烟株关键生育期的养分需求, 促进烟株的生长发育及对养分的吸收和累积利用。

参考文献:

- [1] 白由路. 高效施肥技术研究的现状与展望[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2116–2125.
- [2] Luo Z, Liu H, Li W P, et al. Effects of reduced nitrogen rate on cotton yield and nitrogen use efficiency as mediated by application mode or plant density[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 150–157.
- [3] Wang D, Li G Y, Mo Y, et al. Evaluation of optimal nitrogen rate for corn production under mulched drip fertigation and economic benefits[J]. Field Crops Research, 2018, 216: 225–233.
- [4] 杜飞乐, 任天宝, 林二阁, 等. 滴灌减氮对植烟土壤无机氮变化及烟株氮积累的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2): 298–304.
- [5] 郭丽, 王丽英, 张彦才, 等. 滴灌水肥一体化下施氮量对小麦氮素吸收及土壤硝态氮含量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(3): 207–213.
- [6] 戚迎龙, 史海滨, 李瑞平, 等. 滴灌水肥一体化条件下覆膜对玉米生长及土壤水肥热的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 99–110.
- [7] 刘富强, 窦超银, 杨磊, 等. 风沙土大豆膜下滴灌水肥一体化适宜灌水量的研究[J]. 节水灌溉, 2023(9): 8–15.
- [8] 王浩翔, 张新燕, 牛文全, 等. 不同滴灌施肥模式对油菜生长和水肥利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 30–36.
- [9] 王晓颖, 周宇浩, 邹晓霞, 等. 膜下滴灌分次施肥对花生衰老特性和产量的影响[J]. 花生学报, 2022, 51(1): 59–65.
- [10] Greenwood D J, Kubo K I, Burns I G, et al. Apparent recovery of fertilizer n by vegetable crops[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1989, 35(3): 367–381.
- [11] Bhat R, Sujatha S, Balasimha D. Impact of drip fertigation on productivity of arecanut (*Areca catechu* L.)[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(1/2): 101–111.
- [12] Farneselli M, Benincasa P, Tosti G, et al. High fertigation frequency improves nitrogen uptake and crop performance in processing tomato grown with high nitrogen and water supply[J]. Agricultural Water Management, 2015, 154: 52–58.
- [13] Abalos D, Sanchez-Martin L, Garcia-Torres L, et al. Management of irrigation frequency and nitrogen fertilization to mitigate GHG and NO emissions from drip-fertigated crops[J]. Science of The Total Environment, 2014, 490: 880–888.
- [14] Kumar M, Rajput T B S, Kumar R, et al. Water and nitrate dynamics in baby corn (*Zea mays* L.) under different fertigation frequencies and operating pressures in semi-arid region of India[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 263–274.
- [15] 云南省烟草科学研究所, 中国烟草育种研究(南方)中心. 云南烟草栽培学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [16] 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.
- [17] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 总氮的测定 连续流动法: YC/T 161—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [18] 中华人民共和国农业部. 植株全磷含量测定 铬锑抗比色法: NY-T 2421—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [19] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 钾的测定 连续流动法: YC/T 217—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [20] Wolff M W, Hopmans J W, Stockert C M, et al. Effects of drip fertigation frequency and N-source on soil N₂O production in almonds[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 238: 67–77.
- [21] Howell C L, Myburgh P A, Conradie W J. Comparison of three different fertigation strategies for drip irrigated table grapes—part III. growth, yield and quality[J]. South African Journal of Enology and Viticulture, 2016, 34(1): 21–29.
- [22] Patel N, Rajput T, Kumar M. Fertigation scheduling in tomato based on the hydraulics and nutrients under point source of water application[J]. Asian Journal of Technology Innovation, 2015, 6: 1141–1145.
- [23] Silber A, Xu G, Levkovich I, et al. High fertigation frequency: The effects on uptake of nutrients, water and plant growth[J]. Plant and Soil, 2003, 253(2): 467–477.
- [24] Alva A K, Mattos D Jr, Quaggio J A. Advances in nitrogen fertigation of *Citrus*[J]. Journal of Crop Improvement, 2008, 22(1): 121–146.
- [25] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 548–553.
- [26] Sezen S M, Yazari A, Eker S. Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper[J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1/2): 115–131.
- [27] Sensoy S, Ertek A, Gedik I, et al. Irrigation frequency and amount affect yield and quality of field-grown melon (*Cucumis melo* L.)[J]. Agricultural Water Management, 2007, 88(1/2/3): 269–274.
- [28] Badr M A, El-Yazied A. Effect of fertigation frequency from subsurface drip irrigation on tomato yield grown on sandy soil[J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2007, 1(3): 279–285.
- [29] 郭鹏飞, 张筱茜, 韩文, 等. 滴灌频率和施氮量对温室西葫芦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 109–114, 121.
- [30] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 713–726.
- [31] 程艳莉, 张芬, 刘发波, 等. 滴灌施肥对不同类型蔬菜和果树产量、水氮利用效率和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(9): 1677–1688.
- [32] 索岩松. 滴灌施肥量和施肥次数对大田棉花生长和养分利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [33] 邓兰生, 陈卓森, 郭彦彪, 等. 滴灌施肥次数对甜玉米生长及养分淋洗损失的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(5): 2142–2147.
- [34] Ayars J E, Phene C J, Hutmacher R B, et al. Subsurface

- drip irrigation of row crops: A review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory[J]. Agricultural Water Management, 1999, 42(1): 1–27.
- [35] Syvertsen J P, Sax S M. Fertigation frequency, wetting patterns and nitrate leaching from lysimeter-grown citrus trees[J]. Proceedings of the Florida State Horticulture Society, 1999, 112: 9–14.
- [36] 金继运, 何萍. 氮钾营养对春玉米后期碳氮代谢与粒重形成的影响[J]. 中国农业科学, 1999, 32(4): 55–62.
- [37] 祖艳群, 林克惠. 氮钾营养的交互作用及其对作物产量和品质的影响[J]. 土壤肥料, 2000(2): 3–7.
- [38] Glab T, Szewczyk W, Gondek K, et al. Optimization of turfgrass fertigation rate and frequency[J]. Agricultural Water Management, 2020, 234: 106–107.