

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201909099

不同滴灌定额对烤烟生长发育和 水肥利用效率的影响*

薛如君¹, 李军营², 胡志明³, 张瑞勤⁴, 查文菊⁴, 孙军伟⁵, 赵正雄¹, 马二登^{2**}

(1. 云南农业大学烟草学院, 云南昆明 650201; 2. 云南省烟草农业科学研究院, 云南昆明 650031;
3. 云南省烟草公司保山市公司, 云南保山 678000; 4. 云南省烟草公司曲靖市公司, 云南曲靖 655000;
5. 云南省烟草公司大理州公司, 云南大理 671000)

摘要:【目的】明确云南玉溪烟区烤烟大田生育期适宜滴灌定额。【方法】2017 年通过田间控水试验, 以作物蒸散量 (ET_0) 为基础, 设置 4 个参考需水量水平 (50% ET_0 、60% ET_0 、80% ET_0 和 100% ET_0) 和 3 个设计湿润比 (P , 0.4、0.5 和 0.6), 共 12 个滴灌定额处理, 考察不同滴灌定额对烤烟生长发育和水肥利用效率的影响。【结果】参考需水量水平对烤烟株高、茎干物质量以及氮肥和钾肥利用率有显著影响 ($P<0.05$), 对除株高以外的农艺性状、叶和全株干物质量以及灌溉水利用率有极显著影响 ($P<0.01$); 设计湿润比对烤烟叶干物质量、根冠比和灌溉水利用率有显著影响 ($P<0.05$), 对烤烟主要农艺性状、茎和全株干物质量有极显著影响 ($P<0.01$); 两者对烤烟叶片和全株干物质量以及灌溉水利用率的影响存在显著交互效应 ($P<0.05$), 对烤烟叶片数和株高的影响存在极显著交互效应 ($P<0.01$)。不同灌溉定额处理中, 以 80% ET_0 -0.5 P 处理烤烟成熟期生物量和农艺性状表现较优, 氮、磷和钾肥及灌溉水利用率相对较高; 与其他处理相比, 其成熟期烤烟叶片和全株干物质量分别增加了 14.6%~97.5% 和 4.3%~72.8%, 氮肥和磷肥利用率分别提高了 9.4%~84.2% 和 11.3%~178.1%。【结论】本试验条件下, 该区域较为适宜的烤烟大田生育期滴灌灌溉定额为 200 mm。

关键词: 烤烟; 滴灌定额; 干物质量; 肥料利用效率

中图分类号: S 572.071

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2021) 02-0291-08

Effects of Drip Irrigation Quota on the Growth, Water and Fertilizer Use Efficiency of Flue-cured Tobacco

XUE Rujun¹, LI Junying², HU Zhiming³, ZHANG Ruiqin⁴, ZHA Wenju⁴,
SUN Junwei⁵, ZHAO Zhengxiong¹, MA Erdeng²

(1. College of Tobacco Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Academy of Tobacco Agricultural Sciences, Kunming 650031, China; 3. Tobacco Company of Baoshan, Baoshan 678000, China;
4. Tobacco Company of Qujing, Qujing 655000, China; 5. Tobacco Company of Dali, Dali 671000, China)

Abstract: [Purpose] To determine the suitable drip irrigation quota of flue-cured tobacco in Yuxi tobacco area. [Method] A field experiment was carried out with four levels of reference irrigation quantity (50% ET_0 , 60% ET_0 , 80% ET_0 and 100% ET_0) and three levels of wetted percentage (P)(0.4,

收稿日期: 2019-09-20

修回日期: 2020-08-13

网络首发时间: 2021-03-19 15:24:08

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (41705137); 中国烟草总公司重点项目 (110201602002); 云南省烟草公司科技项目 (2016YN35); 云南省科技厅重点研发项目 (2018BB019); 云南省烟草公司重点项目 (2018530000241016, 2018530000241017)。

作者简介: 薛如君 (1993—), 女, 大理南涧人, 硕士, 主要从事烟草栽培研究。

E-mail: 472261356@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 马二登 (1983—), 男, 安徽定远人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤农化与烟草栽培研究。E-mail: erdengma@163.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20210318.0906.001.html>



0.5 and 0.6), which to study the effects of drip irrigation quota on growth and utilization efficiency of flue-cured tobacco. [**Result**] The reference irrigation quantity had a significant effect on the tobacco plant height, amount of stem dry matter, utilization rate of nitrogen and potassium fertilizer ($P<0.05$), had a very significant effect on the agronomic traits (except for plant height), amount of leaf and the whole plant dry matter, and utilization rate of irrigation water ($P<0.01$). The wetted percentage had a significant impact on the amount of leaf dry matter, root crown ratio, and irrigation water utilization rate ($P<0.05$), had a very significant impacts on the main agronomic traits, amount of stem and the whole plant dry matter ($P<0.01$). A significant interaction between the reference irrigation quantity and the wetted percentage was detected with respect to the effect on dry matter of tobacco leaves and the whole plant, and the utilization rate of irrigation water ($P<0.05$). A very significant interaction between the reference irrigation quantity and design wetting ratio was detected with respect to the effect on the number of leaves and plant height of flue-cured tobacco leaves ($P<0.01$). Among the different irrigation quota treatments, the biomass, agronomic traits of flue-cured tobacco in the mature period, and the utilization efficiency of N, P, K and irrigation water were found the highest in the treatment of 80% ET_0 -0.5P. The amount of dry biomass of tobacco leaves and the whole plant, the N and P use efficiency increased by 14.6%–97.5%, 4.3%–72.8%, 9.4%–84.2% and 11.3%–178.1%, respectively, compared with that of other treatments. [**Conclusion**] The appropriate drip irrigation quota for the tobacco growth period is 200 mm in the experiment region.

Keywords: tobacco; drip irrigation quota; amount of dry biomass; fertilizer use efficiency

水资源已成为限制云南烤烟生产的重要因素,尤其是近年来的季节性干旱,导致烤烟生育期降雨量不足和分配不均,从而严重影响烟叶的质量和可用性^[1]。滴灌是烤烟生产中常用的节水灌溉方式,其地面适应性强、节水和增产效果显著。有报道认为:与沟灌相比,滴灌灌水量可减少 60%,不影响烟叶产质量^[2]。采取科学的节水灌溉技术,完善相应的烤烟灌溉制度技术研究,对提高云南烟叶产质量具有重要意义。

在烤烟节水灌溉方面,尽管相关学者对灌溉指标^[3-4]、灌溉方式和灌溉定额^[5]等开展了研究,但由于云南烟田生态类型多样,烤烟种植环境不一,仍需从烤烟需水量和耗水量、耗水强度、土壤墒情预测预报和节水灌溉定额确定等方面进行深入研究。其中,灌溉定额的确定及其在烟株生育期的分配是烤烟灌溉制度的核心。彭曼公式(Penman-Monteith)是目前国际上通用的通过作物蒸散量计算作物各阶段需水量的方法,与其他方法相比具有较高的精度^[6-7]。滴灌仅局部湿润土壤,因而湿润比是滴灌设计中的重要参数之一^[8]。目前有关烤烟适宜滴灌定额研究亦鲜见报道,难以以为优质烟叶生产中的节水灌溉提供技术保障。对此,本研究以彭曼公式计算出的参考作物需水

量为基础,设置不同滴灌设计湿润比,从农学和资源利用的角度筛选出烤烟大田生育期的适宜滴灌定额,以期对烤烟节水灌溉提供理论指导和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验于 2017 年进行,试验地位于云南省烟草科学研究院研和镇试验基地(N24°14', E102°30', 海拔 1636 m),属中亚热带半湿润凉冬高原季风气候,年平均气温 15~16℃,年降水量 800~900 mm,日照时间 2265 h。试验在避雨旱棚中进行,其顶部为轨道式移动遮雨棚,旱棚内供试土壤为红壤, pH 6.42,有机质含量为 9.71 g/kg,全氮含量为 0.55 g/kg,全磷含量为 1.17 g/kg,全钾含量为 8.00 g/kg。供试烤烟品种为 K326,田间管理按优质烟叶生产技术进行,实行中心花开第 1 朵封顶,单株留叶数 18~20 片。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验设计作物参考需水量和设计湿润比 2 个因素。作物参考需水量以作物蒸散量(ET_0)为基础,分别设置 50% ET_0 、60% ET_0 、80% ET_0 和

100% ET_0 4 个水平; 设计湿润比 (P)3 个水平, 分别为 0.4、0.5 和 0.6。因此, 试验共计 12 个处理, 分别为: 50% ET_0 -0.4P、50% ET_0 -0.5P、50% ET_0 -0.6P、60% ET_0 -0.4P、60% ET_0 -0.5P、60% ET_0 -0.6P、80% ET_0 -0.4P、80% ET_0 -0.5P、80% ET_0 -0.6P、100% ET_0 -0.4P、100% ET_0 -0.5P 和 100% ET_0 -0.6P, 对应烤烟大田生育期灌溉定额分别为: 100、125、150、120、150、180、160、200、240、200、250 和 300 mm。处理间以混凝土浇筑隔开, 以避免水分渗透。

烟株于 2017 年 5 月 7 日移栽, 灌水时用水表精确控制每个灌水处理的水量, 各处理烤烟伸

根期每 7 d 灌水 1 次, 旺长期每 3 d 灌水 1 次, 成熟期每 5 d 灌水 1 次, 具体灌水时间和灌水量见表 1。每个处理 3 个重复, 每个重复约 20 株烟, 随机区组设计。各处理施氮量 67.5 kg/hm^2 , 肥料种类为烟草专用复混肥, 其配方为 $m(\text{N}) : m(\text{P}_2\text{O}_5) : m(\text{K}_2\text{O})=10 : 12 : 24$ 。其中, 基肥于 5 月 6 日施用, 施用方式为塘施, 用量 21 kg/hm^2 ; 追肥于 6 月 10 日施用, 施用方式为环施, 用量 46.5 kg/hm^2 。

1.2.2 测定项目与方法

参考作物蒸发蒸腾量 (ET_0) 的计算参照王健等^[9]的日光温室彭曼公式 (Penman-Monteith) 修正

表 1 各处理灌水时间和灌水定额
Tab. 1 The drip irrigation quota and date in each treatment

处理 treatment	灌水定额/mm drip irrigation quota																
	05-07	05-14	05-21	05-28	06-04	06-07	06-10	06-13	06-16	06-19	06-22	06-25	06-28	07-01	07-04	07-07	07-12
50% ET ₀ -0.4P	6.2	6.8	7.5	6.7	6.5	2.7	2.3	2.2	2.4	2.1	2.0	2.1	2.2	2.1	2.0	2.0	3.6
50% ET ₀ -0.5P	7.7	8.5	9.4	8.4	8.1	3.3	2.9	2.8	2.9	2.6	2.5	2.7	2.8	2.6	2.5	2.5	4.5
50% ET ₀ -0.6P	9.2	10.2	11.2	10.0	9.8	4.0	3.4	3.3	3.5	3.1	3.0	3.2	3.3	3.1	2.9	3.0	5.4
60% ET ₀ -0.4P	7.4	8.2	9.0	8.0	7.8	3.2	2.7	2.7	2.8	2.5	2.4	2.6	2.7	2.5	2.4	2.4	4.4
60% ET ₀ -0.5P	9.2	10.2	11.2	10.0	9.8	4.0	3.4	3.3	3.5	3.1	3.0	3.2	3.3	3.1	2.9	3.0	5.4
60% ET ₀ -0.6P	11.1	12.3	13.5	12.0	11.7	4.8	4.1	4.0	4.2	3.8	3.6	3.8	4.0	3.8	3.5	3.6	6.5
80% ET ₀ -0.4P	9.9	10.9	12.0	10.7	10.4	4.3	3.7	3.6	3.8	3.4	3.2	3.4	3.6	3.3	3.1	3.2	5.8
80% ET ₀ -0.5P	12.3	13.7	15.0	13.4	13.0	5.3	4.6	4.5	4.7	4.2	4.0	4.3	4.4	4.2	3.9	4.0	7.3
80% ET ₀ -0.6P	14.8	16.4	18.0	16.1	15.6	6.4	5.5	5.3	5.7	5.0	4.8	5.1	5.3	5.0	4.7	4.8	8.7
100% ET ₀ -0.4P	12.3	13.7	15.0	13.4	13.0	5.3	4.6	4.5	4.7	4.2	4.0	4.3	4.4	4.2	3.9	4.0	7.3
100% ET ₀ -0.5P	15.4	17.1	18.7	16.7	16.3	6.7	5.7	5.6	5.9	5.2	5.1	5.3	5.6	5.2	4.9	5.0	9.1
100% ET ₀ -0.6P	18.5	20.5	22.5	20.1	19.5	8.0	6.9	6.7	7.1	6.3	6.1	6.4	6.7	6.3	5.9	6.0	10.9

处理 treatment	灌水定额/mm drip irrigation quota															
	07-17	07-22	07-27	08-01	08-06	08-11	08-16	08-21	08-26	08-31	09-05	09-10	09-15	09-20	09-25	09-30
50% ET ₀ -0.4P	2.9	2.8	3.0	3.2	3.0	3.2	2.8	2.8	2.7	3.0	2.8	2.6	2.6	2.4	2.8	2.6
50% ET ₀ -0.5P	3.6	3.5	3.8	3.9	3.8	4.0	3.5	3.5	3.3	3.8	3.5	3.2	3.3	3.0	3.5	3.2
50% ET ₀ -0.6P	4.4	4.2	4.5	4.7	4.5	4.8	4.2	4.2	4.0	4.6	4.3	3.9	4.0	3.5	4.2	3.8
60% ET ₀ -0.4P	3.5	3.4	3.6	3.8	3.6	3.9	3.3	3.4	3.2	3.7	3.4	3.1	3.2	2.8	3.3	3.1
60% ET ₀ -0.5P	4.4	4.2	4.5	4.7	4.5	4.8	4.2	4.2	4.0	4.6	4.3	3.9	4.0	3.5	4.2	3.8
60% ET ₀ -0.6P	5.2	5.0	5.4	5.7	5.4	5.8	5.0	5.1	4.8	5.5	5.1	4.7	4.8	4.3	5.0	4.6
80% ET ₀ -0.4P	4.7	4.5	4.8	5.1	4.8	5.2	4.4	4.5	4.3	4.9	4.5	4.2	4.2	3.8	4.4	4.1
80% ET ₀ -0.5P	5.8	5.6	6.0	6.3	6.0	6.5	5.6	5.6	5.3	6.1	5.7	5.2	5.3	4.7	5.6	5.1
80% ET ₀ -0.6P	7.0	6.7	7.3	7.6	7.2	7.7	6.7	6.8	6.4	7.3	6.8	6.2	6.3	5.7	6.7	6.1
100% ET ₀ -0.4P	5.8	5.6	6.0	6.3	6.0	6.5	5.6	5.6	5.3	6.1	5.7	5.2	5.3	4.7	5.6	5.1
100% ET ₀ -0.5P	7.3	7.0	7.6	7.9	7.5	8.1	7.0	7.0	6.7	7.6	7.1	6.5	6.6	5.9	6.9	6.4
100% ET ₀ -0.6P	8.7	8.4	9.1	9.5	9.0	9.7	8.3	8.4	8.0	9.1	8.5	7.8	7.9	7.1	8.3	7.7

公式。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{1713(e_a - e_d)}{T + 273}}{\Delta + 1.64\gamma}$$

式中， ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量 (mm/d)； R_n 和 G 分别为地表净辐射和土壤热通量 (MJ/m²/d)； e_a 和 e_d 分别为饱和水汽压和实际水汽压 (kPa)； Δ 为饱和水汽压曲线斜率 (kPa/℃)； γ 为干湿表常数 (kPa/℃)； T 为 2 m 高度处平均气温 (℃)。

烟株农艺性状的测定：选择有代表性的 5 株烟株，于烟株打顶前 1 d 测量烟株叶片数、株高、茎围、叶长和叶宽。

烟株生物量及养分吸收量的测定：烤烟成熟期挖出整棵烟株，将根、茎和叶分开并置入烘箱中 105 ℃ 杀青 30 min，然后在 80 ℃ 下烘干至恒质量，测定其生物量 (干物质量)。之后测定根、茎和叶氮、磷、钾含量，以差减法计算氮、磷、钾吸收量。

养分利用率=(施氮区烟株养分吸收量-无氮区烟株养分吸收量)/养分施用量×100%；

灌溉水利用率=烟株叶片生物量/大田生育期

灌溉定额。

1.2.3 数据处理方法

采用 Excel 2007 整理数据，方差分析和相关分析采用 SPSS 13.0 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 烤烟农艺性状

由表 2 可知：同一参考需水量水平下，烟株平均叶面积随着设计湿润比的提高而增加；同一设计湿润比条件下，烟株平均叶面积总体呈现为随着参考需水量水平的提高而增加。所有滴灌定额处理中，以 100% ET_0 (0.4P、0.5P 和 0.6P) 和 80% ET_0 (0.5P 和 0.6P) 等 5 个处理烤烟平均叶面积表现较优，且相互间无显著差异 ($P>0.05$)。方差分析表明：参考需水量水平对烤烟株高有显著影响 ($P<0.05$)，对除株高以外的烤烟农艺性状参数有极显著影响 ($P<0.01$)；设计湿润比对烤烟叶片数、株高、最大叶长、最大叶面积和平均叶面积均有极显著影响 ($P<0.01$)；参考需水量水平和设计湿润比对叶片数和株高的影响存在极显著交互效应 ($P<0.01$)。

表 2 各处理烤烟农艺性状

Tab. 2 Agronomic traits of flue-cured tobacco in each treatment

处理 treatment	叶片数 leaf number	株高/cm plant height	茎围/cm stem girth	最大叶长/cm maximum leaf length	最大叶宽/cm maximum leaf width	最大叶面积/cm ² maximum leaf area	平均叶面积/cm ² the average leaf area
50% ET_0 -0.4P	11.5±0.5 e	69.5±0.5 bc	5.5±0.5 e	48.3±2.8 d	21.5±1.5 b	586.9±101.1 d	322.8±4.4 c
50% ET_0 -0.5P	14.5±0.5 cde	86.0±3.0 abc	6.3±0.3 bcde	54.5±3.5 bcd	20.5±0.0 b	644.5±18.9 cd	356.7±13.8 c
50% ET_0 -0.6P	19.7±2.1 a	90.7±5.7 ab	6.7±0.3 abcde	52.8±6.0 cd	21.7±1.5 b	703.9±106.0 cd	456.5±79.8 bc
60% ET_0 -0.4P	18.0±1.0 ab	78.3±8.0 abc	6.0±0.0 cde	48.3±3.1 d	20.3±1.8 b	580.8±16.9 d	367.5±39.0 c
60% ET_0 -0.5P	20.0±2.0 a	60.0±46.9 c	6.8±0.8 abcd	51.0±7.9 d	20.3±2.5 b	636.7±177.0 cd	404.5±113.2 c
60% ET_0 -0.6P	17.3±1.2 abc	86.7±11.5 abc	6.3±1.2 bcde	53.2±5.1 bcd	20.8±0.8 b	686.2±70.4 cd	429.2±97.0 bc
80% ET_0 -0.4P	13.7±3.5 de	77.3±12.9 abc	5.8±0.3 de	47.3±2.1 d	22.0±0.0 b	658.4±28.2 cd	435.3±26.1 bc
80% ET_0 -0.5P	15.3±3.1 bcd	99.0±5.2 a	6.7±1.2 abcde	56.0±4.6 bcd	25.0±1.0 b	842.0±155.6 bc	591.5±101.7 a
80% ET_0 -0.6P	18.0±2.0 ab	100.3±4.5 a	6.3±0.3 bcde	61.7±5.5 abc	27.3±1.3 b	996.8±80.8 b	592.5±38.4 a
100% ET_0 -0.4P	17.3±1.2 abc	84.0±5.3 abc	7.3±0.6 ab	61.7±7.6 abc	24.7±1.5 b	924.3±130.9 b	554.9±122.3 ab
100% ET_0 -0.5P	16.7±2.1 abcd	73.3±7.2 abc	7.2±0.8 abc	62.3±0.6 ab	36.3±15.3 a	1240.9±260.9 a	602.7±65.5 a
100% ET_0 -0.6P	20.0±0.0 a	100.0±5.0 a	7.7±0.6 a	65.3±1.2 a	24.8±1.2 b	992.9±34.2 b	640.7±23.5 a
显著性检验 F 值 significant level F value							
参考需水量水平 reference water demand level	7.64**	4.26*	6.37**	11.81**	6.14**	23.24**	18.25**
设计湿润比 wetted percentage	12.81**	20.17**	2.87	6.20**	1.73	6.46**	6.50**
交互作用 interaction	4.38**	4.50**	0.72	1.00	2.00	2.03	0.63

注：同列数据后不同小写字母表示差异达显著水平 ($P<0.05$)；“*”为显著影响 ($P<0.05$)，“**”为极显著影响 ($P<0.01$)；下同。
Note: Different lowercases in the same columns represented significant difference ($P<0.05$)；“*” represents significant effects ($P<0.05$)，“**” represents extremely significant effects ($P<0.01$)；the same as below.

表 3 各处理烤烟不同部位干物质量和根冠比
Tab. 3 The dry matter root-shoot ratio of flue-cured tobacco in each treatment

处理 treatment	根/g root	茎/g stem	叶/g leaf	全株/g whole plant	根冠比/% root-shoot ratio
50% ET ₀ -0.4P	28.8±2.1 b	34.2±1.0 d	63.8±8.8 d	126.8±11.6 e	29.4±1.1 ab
50% ET ₀ -0.5P	31.6±10.5 ab	42.3±8.1 bcd	83.8±10.9 bcd	157.7±16.6 cde	24.9±7.9 abc
50% ET ₀ -0.6P	37.2±1.4 ab	53.6±3.2 abc	89.1±5.1 bcd	179.9±7.8 abcd	26.1±1.8 abc
60% ET ₀ -0.4P	35.0±1.5 ab	43.6±3.6 cd	74.6±8.6 cd	153.1±11.3 cde	29.7±1.8 a
60% ET ₀ -0.5P	33.9±4.7 ab	45.5±7.7 bcd	79.2±16.8 cd	158.6±24.1 cde	27.8±6.8 abc
60% ET ₀ -0.6P	29.9±3.1 ab	45.3±9.5 bcd	70.0±1.8 d	145.2±10.8 de	26.0±2.1 abc
80% ET ₀ -0.4P	33.7±6.0 ab	45.4±8.8 bcd	70.5±10.4 d	149.5±17.4 de	29.0±3.4 ab
80% ET ₀ -0.5P	43.2±12.8 a	49.9±18.6 abcd	126.1±35.8 a	219.2±29.4 a	24.3±5.0 abc
80% ET ₀ -0.6P	38.2±2.6 ab	60.2±4.5 ab	117.0±4.7 a	215.4±9.4 a	21.5±0.8 bc
100% ET ₀ -0.4P	40.2±9.5 ab	49.0±10.0 abcd	102.1±28.3 abc	191.3±47.5 abc	26.8±1.7 abc
100% ET ₀ -0.5P	37.0±1.1 ab	48.4±3.1 abcd	88.5±11.8 bcd	173.9±15.2 bcd	27.1±2.1 abc
100% ET ₀ -0.6P	35.8±11.4 ab	64.3±7.3 a	110.0±8.4 ab	210.0±25.5 ab	20.3±5.3 c
显著性检验F值 significant level F value					
参考需水量水平 reference water demand level	1.71	3.19*	9.08**	10.61**	1.22
设计湿润比 wetted percentage	0.24	6.96**	5.68*	7.36**	4.97*
交互作用 interaction	0.97	0.80	3.52*	3.40*	0.63

2.2 烤烟干物质量

由表 3 可知: 同一参考需水量水平下, 随着设计湿润比的提高, 烤烟根、茎、叶干物质量及根冠比均无明显变化规律; 同一设计湿润比条件下, 烤烟根、茎、叶和全株干物质量随着参考需水量水平的提高无明显变化规律; 所有处理中, 以 100% ET₀ (0.4P、0.5P 和 0.6P) 和 80% ET₀ (0.5P 和 0.6P) 处理烤烟干物质量相对较大, 其中以 80% ET₀-0.5P 处理烤烟叶片和全株干物质量最大, 与其他处理相比, 分别增加了 14.6%~97.5% 和 4.3%~72.8%。方差分析表明: 参考需水量水平对烤烟茎干物质量有显著影响 ($P<0.05$), 对烤烟叶和全株干物质量有极显著影响 ($P<0.01$); 设计湿润比对烤烟叶干物质量和根冠比有显著影响 ($P<0.05$), 对烤烟茎和全株干物质量有极显著影响 ($P<0.01$); 参考需水量水平和设计湿润比对烤烟叶和全株干物质量的影响之间存在显著交互效应 ($P<0.05$)。

2.3 肥料及灌溉水利用率

由表 4 所示: 同一参考需水量水平下, 随着设计湿润比的提高, 肥料及灌溉水利用率均无明显变化规律; 同一设计湿润比条件下, 随着参考需水量水平的提高, 烤烟氮肥、磷肥、钾肥和灌溉水利用率亦无明显变化规律。所有处理中, 以 80% ET₀-0.5P 和 80% ET₀-0.6P 处理烤烟氮肥、磷

肥和钾肥利用率相对较高。与其他处理相比, 80% ET₀-0.5P 处理氮肥和磷肥利用率分别提高了 9.4%~84.2% 和 11.3%~178.1%。方差分析表明: 参考需水量水平对烤烟氮肥和钾肥利用率有显著影响 ($P<0.05$), 对灌溉水利用率有极显著影响 ($P<0.01$); 设计湿润比仅对灌溉水利用率有显著影响 ($P<0.05$), 对肥料利用率无显著影响 ($P>0.05$); 参考需水量水平和设计湿润比对灌溉水利用率的影响存在显著交互效应 ($P<0.05$)。

2.4 灌溉定额与烟株生长及水肥利用效率的相关关系

相关分析表明 (表 5): 滴灌定额与烤烟各农艺性状均存在极显著正相关关系 ($P<0.01$); 滴灌定额与烤烟根干物质量无显著相关性 ($P>0.05$), 与烤烟茎、叶及全株干物质量存在极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与根冠比存在极显著负相关关系 ($P<0.01$); 滴灌定额与烤烟磷肥利用率存在显著正相关关系 ($P<0.05$), 与氮肥和钾肥利用率存在极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与灌溉水利用率存在极显著负相关关系 ($P<0.01$)。

2.5 烤烟叶片生物量与烟株生长及水肥利用效率的相关关系

相关分析表明 (表 6): 烤烟成熟期叶片干物质量 (生物量) 与烟株最大叶长和平均叶面积间呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与最大叶面积间呈

表 4 各处理肥料和灌溉水利用率

Tab. 4 The water and fertilizer use efficiency of flue-cured tobacco in each treatment

处理 treatment	氮肥利用率/% N use efficiency	磷肥利用率/% P use efficiency	钾肥利用率/% K use efficiency	灌溉水利用率/(kg·m ⁻³) irrigation water utilization
50% ET ₀ -0.4P	29.9±3.6 bcd	3.2±2.9 a	19.9±8.5 bc	8.8±1.2 ab
50% ET ₀ -0.5P	23.4±6.3 d	3.8±1.5 a	13.6±7.2 c	9.2±1.2 a
50% ET ₀ -0.6P	29.1±9.6 bcd	5.8±3.2 a	16.5±9.0 c	8.2±0.5 abc
60% ET ₀ -0.4P	36.6±0.9 abcd	3.6±0.9 a	15.8±2.6 c	7.7±0.9 abcd
60% ET ₀ -0.5P	30.9±9.6 abcd	4.4±1.3 a	23.5±7.1 abc	6.5±1.4 cdef
60% ET ₀ -0.6P	25.9±3.9 cd	6.3±2.5 a	20.5±6.6 bc	4.8±0.1 f
80% ET ₀ -0.4P	32.5±2.3 abcd	5.4±1.8 a	21.4±9.3 abc	5.8±0.9 def
80% ET ₀ -0.5P	43.1±2.8 a	8.9±5.5 a	26.9±5.7 abc	8.3±2.4 abc
80% ET ₀ -0.6P	39.4±9.3 ab	8.0±2.9 a	34.6±2.2 a	6.4±0.3 cdef
100% ET ₀ -0.4P	30.7±10.8 abcd	5.6±3.9 a	25.9±7.7 abc	7.0±1.9 bcde
100% ET ₀ -0.5P	31.5±1.6 abcd	6.6±1.7 a	27.2±8.5 abc	4.9±0.6 ef
100% ET ₀ -0.6P	38.8±9.2 abc	4.9±2.5 a	31.6±5.9 ab	5.0±0.4 ef
显著性检验 <i>F</i> 值 significant level <i>F</i> value				
参考需水量水平 reference water demand level	4.06*	1.94	6.01*	12.06**
设计湿润比 wetted percentage	0.08	1.30	1.58	4.21*
交互作用 interaction	1.94	0.47	1.06	2.84*

表 5 灌溉定额与烟株农艺性状、干物质量及水肥利用效率间的相关系数

Tab. 5 The correlation coefficients between the agronomic traits, dry matter, water and fertilizer use efficiency with the drip irrigation quota, respectively

项目 item	滴灌定额 drip irrigation quota	项目 item	滴灌定额 drip irrigation quota	项目 item	滴灌定额 drip irrigation quota
叶片数 leaf number	0.420**	株高 plant height	0.498**	茎围 stem girth	0.560**
最大叶长 maximum leaf length	0.716**	最大叶宽 maximum leaf width	0.498**	最大叶面积 maximum leaf area	0.753**
平均叶面积 the average leaf area	0.810**	根干物质量 root dry matter	0.281	茎干物质量 stem dry matter	0.623**
叶干物质量 leaf dry matter	0.554**	全株干物质量 whole plant dry matter	0.626**	根冠比 root-shoot ratio	-0.480**
氮肥利用率 N use efficiency	0.363**	磷肥利用率 P use efficiency	0.344*	钾肥利用率 K use efficiency	0.627**
灌溉水利用率 irrigation water utilization	-0.610**				

注：“*”为显著相关 ($P<0.05$)，“**”为极显著相关 ($P<0.01$)；下同。
Note: “*” represents significant correlation ($P<0.05$), “**” represents extremely significant correlation ($P<0.01$); the same as below.

表 6 烤烟成熟期叶片干物质量与叶片农艺性状、其他部位干物质量及水肥利用效率间的相关系数

Tab. 6 The correlation coefficients between leaf agronomic traits, dry matter of the other parts, water and fertilizer use efficiency with the tobacco leaf dry matter at maturity, respectively

项目 item	叶片干物质量 leaf dry matter	项目 item	叶片干物质量 leaf dry matter	项目 item	叶片干物质量 leaf dry matter
最大叶长 maximum leaf length	0.547**	最大叶宽 maximum leaf width	0.197	最大叶面积 maximum leaf area	0.435*
平均叶面积 the average leaf area	0.629**	根干物质量 root dry matter	0.671**	茎干物质量 stem dry matter	0.405*
全株干物质量 whole plant dry matter	0.944**	氮肥利用率 N use efficiency	0.406*	磷肥利用率 P use efficiency	0.661**
钾肥利用率 K use efficiency	0.435**	灌溉水利用率 irrigation water utilization	0.287		

显著正相关关系 ($P<0.05$); 烤烟成熟期叶片干物质质量与烤烟根部和全株干物质质量均存在极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与茎干物质质量呈显著正相关关系 ($P<0.05$); 烤烟成熟期叶片干物质质量与氮肥利用率呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 与磷肥和钾肥利用率呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 滴灌定额对烤烟生长发育的影响

适宜的水分状况是烤烟正常生长发育的基本前提。本研究中, 参考需水量水平和设计湿润比均显著影响烤烟叶面积 ($P<0.01$), 且灌溉定额与烤烟成熟期各农艺性状均呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。可见, 提高滴灌定额可以在一定程度上促进烟株生长发育。然而, 最优烤烟农艺性状并未出现在最大滴灌定额处理, 而是出现在 200~240 mm 的滴灌定额处理中。一方面, 滴灌定额过大可能会导致土壤空气交换受阻, 导致根系的呼吸和吸收能力下降, 从而影响烟株的生长发育^[10-11]; 另一方面, 滴灌定额过高可能会增加肥料养分(尤其是氮素)的淋溶损失, 从而影响烟株的养分供应^[12]。以往研究^[10,13-14]也认为: 灌溉定额并非越大越好, 滴灌定额超过一定范围不但会造成水、肥的浪费, 而且不利于作物产量的形成。

对于烤烟而言, 叶片干物质积累是烟叶产量形成的基础。本研究中, 叶片干物质积累量与最大叶长、平均叶面积和根系干物质质量之间存在极显著相关关系, 这也说明了叶片干物质积累在叶片形成与发育过程中的重要作用, 同时也说明根系对叶片发育所起的重要作用。此外, 本研究中灌溉定额与根冠比之间存在极显著负相关, 表明灌溉定额过大, 并不利于烟株根系生长。张永强等^[15]研究同样认为: 一定范围内, 提高麦后复播大豆滴灌量有利于提高干物质积累量, 但灌水量过大反而不利于干物质的积累; 李发永等^[16]也认为: 棉花进入花期以后过高和过低的水分均会使干物质形成受到抑制。

3.2 滴灌定额对烤烟肥料利用的影响

一般而言, 由于施用的肥料必须经过水分(特别是颗粒肥)溶解后, 其中的养分才能被作物根系吸收。因此, 在作物田间管理过程中, 一定

范围内增加灌溉量有利于养分利用率的提高。然而, 实际生产中的灌溉量并非越高越好, 这是因为过量的滴灌定额将导致土壤含水量偏高, 一方面使得根系的呼吸和吸收能力下降, 另一方面增加肥料养分的淋失风险, 最终影响烟株生物量的形成和烟株的生长发育。

已有研究发现^[17]: 随着滴灌量增加, 氮肥利用效率、氮肥偏生产力和农学利用率呈现先增加后降低的变化趋势, 说明过度增加灌水或施氮量将不利于发挥其增产效果, 适宜的水氮在提高资源利用效率的同时增加产量。河西地区春玉米的滴灌研究表明: 滴灌灌水量过高将导致表层(0~20 cm)土层根长比重的增加, 从而不利于根系对深层土壤中养分的吸收^[18]。另有研究表明^[19]: 过高的灌溉定额会抑制作物对氮、磷、钾的吸收, 导致氮、磷、钾在春播燕麦植株体内的质量分数下降, 从而影响作物对养分的吸收利用。本研究中, 烤烟成熟期叶片生物量与其余部位生物量呈显著或极显著正相关关系, 同时与氮、磷、钾肥的利用效率也呈显著或极显著正相关关系。由此可见, 本研究中 80% $ET_0-0.5P$ 和 80% $ET_0-0.6P$ 处理下, 良好的生物量促进了烟株对养分的吸收利用是该滴灌定额下烤烟氮肥、磷肥和钾肥利用率相对较高的主要原因。

作为一种节水高效灌溉技术, 与传统的烤烟沟灌和浇灌方式相比, 烤烟滴灌投入产出比提高了 3~7 倍^[20-21]。与常规灌溉方式相比, 由于滴灌方式下仅局部湿润即可保证烟株的生长发育, 更需要注意滴灌定额的适宜性, 因为一旦水分过多则会抑制根系生长, 导致烟株干物质合成和累积偏少, 导致烟叶产量下降^[4,22]。80% $ET_0-0.5P$ 处理条件下, 烤烟大田生育期滴灌定额适中, 烟株干物质积累量相对较高, 因此该滴灌定额的灌溉水利用率也相对较高, 这与强小嫚等^[23]的研究结果类似。

4 结论

田间控水条件下, 云南玉溪烤烟以彭曼公式获得的参考作物需水量 (ET_0) 为基础, 设计不同湿润比, 采用滴灌栽培烤烟。在烤烟伸根期每 7 d 灌水 1 次, 旺长期每 3 d 灌水 1 次, 成熟期

每 5 d 灌水 1 次的条件下, 不同灌溉定额处理中, 以 80% ET₀-0.5P 处理 (滴灌定额 200 mm) 烤烟成熟期生物量和农艺性状表现较优, 氮肥、磷肥和钾肥以及灌溉水利用率相对较高。本试验条件下, 该区域较为适宜的烤烟大田生育期滴灌灌溉定额为 200 mm。

[参考文献]

- [1] 高华军, 汪耀富, 邵孝侯. 烤烟节水灌溉的研究进展[J]. 节水灌溉, 2005(5): 33. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2005.05.012.
- [2] 杨金楼, 计中孚, 奚振邦, 等. 滴灌对烤烟生育、产量及品质的影响[J]. 中国烟草科学, 2001, 22(1): 19. DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2001.01.006.
- [3] 李沛喆, 邵孝侯, 刘钰, 等. 控制灌溉条件下烟田水分分布规律及灌溉指标选择[J]. 江西农业学报, 2015(7): 31. DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2015.07.009.
- [4] 丁福章, 孔德钧, 袁有波, 等. 干旱条件下不同滴灌量对烤烟生长和产质量的影响[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(11): 71. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2012.11.021.
- [5] 史宏志, 高卫锴, 常思敏, 等. 微喷灌水定额对烟田土壤物理性状和养分运移的影响[J]. 河南农业大学学报, 2009, 43(5): 485. DOI: 10.16445/j.cnki.1000-2340.2009.05.013.
- [6] 李荣超. 水稻覆膜旱作节水高产灌溉模式研究[D]. 南京: 河海大学, 2000.
- [7] 冷俊杰. 北京房山节水灌溉区作物需水量(ET)的计算与研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2004.
- [8] 晏清洪, 王伟, 任德新, 等. 滴灌湿润比对成龄库尔勒香梨生长及耗水规律的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 7.
- [9] 王健, 蔡焕杰, 李红星, 等. 日光温室作物蒸发蒸腾量的计算方法研究及其评价[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(6): 11. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3317.2006.06.003.
- [10] 张燕, 张富仓, 强生才, 等. 水肥供应对温室滴灌施肥番茄生长及水氮利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 103. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2017.04.16.
- [11] 中国农业科学院研究所. 中国烟草栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005.
- [12] 马二登, 童文杰, 王加林, 等. 肥料施用方式对烤烟伸根期N₂O排放及氮素利用的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 85. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2017.17.022.
- [13] SUN H Y, LIU C M, ZHANG, X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 211. DOI: 10.1016/j.agwat.2006.04.008.
- [14] 薛丽华, 赵连佳, 陈兴武, 等. 不同水氮运筹对滴灌冬小麦根系生长、水分利用及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(9): 21. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2017.09.03.
- [15] 张永强, 徐文修, 李亚杰, 等. 新疆麦后复播大豆适宜滴灌量研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2016, 22(4): 1133. DOI: 10.11674/zwylf.15039.
- [16] 李发永, 王龙, 王兴鹏, 等. 适宜滴灌定额提高枣棉间作中棉花产量和土地生产效率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 105. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.14.014.
- [17] 陈慧, 黄振江, 王冀川, 等. 水氮耦合对滴灌冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(1): 44. DOI: 10.6048/j.issn.1001-4330.2018.01.006.
- [18] 邹海洋, 张富仓, 张雨新, 等. 适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 145. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.21.017.
- [19] 吴娜, 刘吉利. 不同滴灌定额对春播裸麦氮磷钾质量分数及产量性状的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(9): 44. DOI: 10.7606/j.issn.1004-1389.2014.09.008.
- [20] 金文华, 刘金海, 鲁家鑫, 等. 烤烟节水灌溉试验与示范[J]. 烟草科技, 2002(11): 39. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0861.2002.11.010.
- [21] 李波. 节水灌溉技术在潍坊地区优质烤烟生产中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [22] 邸慧慧, 史宏志, 王太运, 等. 微喷条件下灌水量对烤烟生长发育和水分利用效率的影响[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 17. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2009.06.005.
- [23] 强小嫚, 孙景生, 刘浩, 等. 滴灌定额对西瓜/棉花间作产量及水分生产效率的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 113. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.19.016.

责任编辑: 何馨成