

不同滴灌施肥模式对油菜生长 和水肥利用的影响

王浩翔¹ 张新燕¹ 牛文全^{1,2} 田 佟¹

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持研究所 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 通过旱作大棚试验,研究不同滴灌系统布置、水肥供应模式对冬油菜生长、产量、土壤水分及理化性质的影响。采用三因素三水平正交试验设计,设置 3 种滴灌毛管布置方式: G1(一管一行)、G2(一管两行)和 G3(一管三行),3 个灌水水平: W1(50% ET_0)、W2(75% ET_0)和 W3(100% ET_0),以及 3 个施肥水平: F1(N : P_2O_5 : K_2O : H_3BO_3 为 300 : 190 : 110 : 8 $kg \cdot hm^{-2}$)、F2(N : P_2O_5 : K_2O : H_3BO_3 为 450 : 280 : 160 : 12 $kg \cdot hm^{-2}$)和 F3(N : P_2O_5 : K_2O : H_3BO_3 为 600 : 380 : 220 : 15 $kg \cdot hm^{-2}$)。研究油菜生长发育、生理指标、干物质质量、产量及水肥利用对不同滴灌施肥模式的响应。结果表明:相比滴灌毛管布置方式,灌水量和施肥量对油菜生理生长、产量有显著影响,油菜生长量、产量随灌水量增加而增加,高水(W3)处理更有利于油菜生长但其水分利用效率明显低于中水和低水处理,W1 处理平均水分利用效率较 W2 和 W3 高 37.73%和 76.36%。生长量和产量与施肥量呈正相关,高水高肥 G1W3F3 处理产量最高,为 5 430 $kg \cdot hm^{-2}$;G2W2F3 处理产量为 5 400 $kg \cdot hm^{-2}$,较 G1W3F3 处理产量虽低 0.5%却节水 25%,有较高的水分利用效率和肥料偏生产力。综合分析可知,从节水高产经济的角度考虑,G2W2F3 的滴灌施肥模式可作为本试验条件下较合适的滴灌施肥模式。

关键词: 滴灌施肥; 油菜; 水肥利用; 生长; 产量
中图分类号: S565.4; S275.6 文献标志码: A

Effects of different drip irrigation fertilization patterns on growth and water and fertilizer utilization of rape

WANG Haoxiang¹ ZHANG Xinyan¹ NIU Wenquan^{1,2} TIAN Tong¹

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Institute of Soil and Water Conservancy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The effects of different drip irrigation system layout and water and fertilizer supply patterns on winter rape growth, yield, soil moisture, and physical and chemical properties were studied by dry-crop greenhouse experiment. A 3×3 orthogonal experimental design was adopted including three kinds of drip irrigation pipeline layouts of G1 (one tube and one row), G2 (one tube and two rows), and G3 (one tube and three rows), three irrigation levels of W1 (50% ET_0), W2 (75% ET_0) and W3 (100% ET_0), and 3 fertilization levels (N : P_2O_5 : K_2O : H_3BO_3) of F1 (300 : 190 : 110 : 8 $kg \cdot hm^{-2}$), F2 (450 : 280 : 160 : 12 $kg \cdot hm^{-2}$), and F3 (600 : 380 : 220 : 15 $kg \cdot hm^{-2}$). We studied the rape growth and development, physiological indicators, dry matter quality, yield, water and fertilizer use response to different drip fertigation modes. The results showed that, irrigation and fertilization had significant effects on rape physiological growth, and yield compared to capillary layout. Rape growth and yield increased with increasing irrigation. High water (W3) treatment was more conducive to rape growth. The efficiency was obviously lower than that of the middle and low water treatments. The average water use efficiency of W1 treatment was 37.73% and 76.36% higher than that of W2 and W3. The growth and yield were positively correlated with the fertilization amount. The maximum yield was 5 430 $kg \cdot hm^{-2}$ in G1W3F3 treatment. G2W2F3 treat-

收稿日期: 2019-04-19

修回日期: 2020-01-31

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0400202)

作者简介: 王浩翔(1995-),男,浙江义乌人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉技术研究。E-mail: wanghaoxiang702@163.com

通信作者: 张新燕(1972-),女,河南开封人,副教授,博士,主要从事节水灌溉技术与设备研究。E-mail: 4747168@qq.com

ment had a yield of $5\,400\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was 0.5% lower than G1W3F3 treatment did but saved 25% of water, and had higher water use efficiency and fertilizer partial productivity. According to the comprehensive analysis, from the perspective of high water-saving economy, the combination of G2W2F3 can be used as a suitable drip fertigation mode under the experimental conditions.

Keywords: drip fertigation; rape; water and fertilizer utilization; growth physiology; yield

滴灌施肥通过滴灌系统供水供肥,均匀准确地输送至作物根部区域,大大提高了水、肥利用率,满足作物在关键生育期的水肥需要,是一项农业新技术^[1-4]。研究滴灌施肥对大棚油菜生长的影响对制定和完善大棚油菜灌溉施肥制度及节水节肥的水肥管理模式有重要意义。Coston 等^[5]通过对盆栽桃树采用不同方法施氮的试验发现,滴灌施肥量仅仅达到土壤施肥量的 25%~50% 时,桃树叶片含氮量和茎粗即可表现出土壤施肥增加的效果,试验说明滴灌施肥可节约氮肥 25%~50%。陈静等^[6]在黄淮海平原地区免耕冬小麦采用滴灌施肥方法的试验中发现:滴灌可以将水分直接输入作物根区内,大大减少了灌溉水深层渗漏存在的风险,并且促进了作物对水肥的吸收,合理的滴灌施肥相较于常规施肥可节约氮肥 23.47%、磷肥 28.33% 和钾肥 47.89%。邢英英等^[7]基于番茄产量和品质对适宜的滴灌灌水施肥量进行了研究,结果表明番茄生长、产量和品质受水肥交互作用影响极显著。不同毛管布置和灌水量对温室番茄有显著影响,一管一行有利于番茄株高的增长,一管两行有利于增产^[8]。对于油菜来说,水分是影响油菜产量最重要的因素,灌水量、氮肥和磷肥对油菜产量的影响存在交互作用^[9-10],且合理的水肥组合能显著促进作物生长,提高光合速率,提高产量^[11-12]。以往研究主要集中在滴灌施肥对作物生长和产量的宏观效应及定性分析引起此效应的生理机制方面,由于控制方式和试验材料不同,得出的结论往往不同。在少数研究中滴灌毛管布置为一管一行或一管两行,同一研究中同时采用不同毛管布置和水肥调控的研究相对较少。

本研究通过大棚油菜滴灌条件下不同毛管布置方式和水肥耦合试验,探索油菜生长和水肥利用状况对试验因素的响应情况,寻找较优的滴灌毛管布置方式、灌水量和施肥量的组合模式,为确定合理的滴灌毛管布置方式和科学的灌溉施肥制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于西北农林科技大学标本区旱作实验大

棚内进行。旱棚长 24.5 m、宽 6 m、高 2.5 m,内分为 36 个测坑。测坑长 2 m、宽 1.5 m,深度最大 2 m,最小 0.5 m。坑内土壤为杨凌壤土,土壤基本理化性质为: pH 8.40,有机质含量 0.885%,全氮 0.078%,全磷 0.053%,全钾 1.890%;测坑四周砖墙,水泥抹面,不透水。供试冬油菜品种为“陕油 16”。滴灌施肥设备主要由水源、水表、比例施肥泵(进出水口径 25 mm,流量 20~2 500 L·h⁻¹,水压 0.02~0.3 MPa)和输配水管道系统等组成,采用液压比例施肥泵装置控制。采用内镶式滴灌管,管径 16 mm,壁厚 0.20 mm,工作压力 50~100 kPa,滴头间距 0.30 m,额定流量 2.0 L·h⁻¹。

1.2 试验设计

试验设置 3 种滴灌毛管布置方式: G1(一管一行)、G2(一管两行)、G3(一管三行); 3 个灌水水平: 低水 W1(50%ET₀)、中水 W2(75%ET₀)、高水 W3(100%ET₀); 当地推荐油菜氮、磷、钾、硼施肥量为 600:380:220:15 kg·hm⁻², 试验设 3 个施肥水平: 低肥 F1(N:P₂O₅:K₂O:H₃BO₃ 为 300:190:110:8 kg·hm⁻²)、中肥 F2(N:P₂O₅:K₂O:H₃BO₃ 为 450:280:160:12 kg·hm⁻²)、高肥 F3(N:P₂O₅:K₂O:H₃BO₃ 为 600:380:220:15 kg·hm⁻²); 采用三因素三水平正交试验设计,共 9 个处理,每个处理设 3 个重复。温室 ET₀ 计算由温室安装的全自动气象站观测数据获得,并根据日光温室 Penman-Monteith 修正公式^[13]计算,公式如下

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{1713(e_a - e_d)}{T + 273}}{\Delta + 1.64\gamma} \quad (1)$$

式中,ET₀ 为参考作物蒸发蒸腾量(mm·d⁻¹);R_n 和 G 分别为地表净辐射和土壤热通量(MJ·m⁻²·d⁻¹);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·°C⁻¹);γ 为干湿表常数(kPa·°C⁻¹);T 为 2 m 高度处平均气温(°C)。

在试验前对棚室测坑土地进行了整治,首先按每 666.7 m² 施肥量 225 kg 施入有机底肥,深翻,之后灌播前水,灌水量控制为 30 mm 水层深度。油菜按行距 50 cm、株距 15 cm 进行点播,每穴 4~5 粒

种。于 2017 年 10 月 26 日播种, 2017 年 11 月 3 日出苗, 2018 年 5 月 13 日收获, 整个油菜生育期历时 187 d。W1、W2、W3 灌水总量分别为 153.83、220.07 mm 和 284.48 mm, 灌水时间及灌水量如图 1 所示。根据当地油菜生长发育阶段需求, 氮肥分别在播种期、苗期、薹期按比例 1 : 0.6 : 0.4 施用, 其他肥料随播前水施入, 配施处理如表 1 所示。

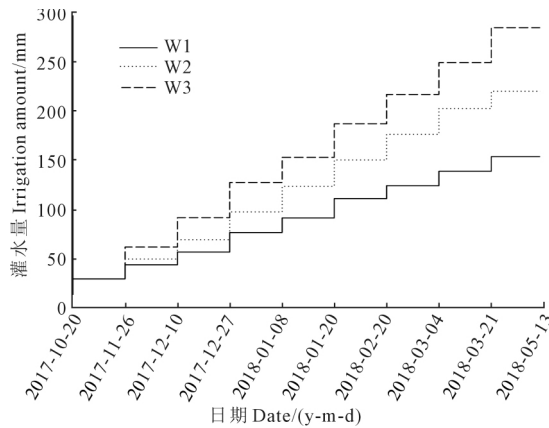


图 1 油菜生育期内各处理灌水过程

Fig.1 Irrigation process of each treatment in rapeseed growth period

表 1 油菜肥料配施处理

Table 1 Treatment of rapeseed fertilizer

施肥时间 Fertilization date /(y-m-d)	施肥量(N : P ₂ O ₅ : K ₂ O : H ₃ BO ₃) Fertilization rate/(kg · hm ⁻²)		
	F1	F2	F3
2017-10-20 基施 Kish	150 : 190 : 110 : 8	220 : 280 : 160 : 12	300 : 380 : 220 : 15
2018-02-20 滴灌 Drip irrigation	90 : 0 : 0 : 0	130 : 0 : 0 : 0	180 : 0 : 0 : 0
2018-03-21 滴灌 Drip irrigation	60 : 0 : 0 : 0	100 : 0 : 0 : 0	120 : 0 : 0 : 0

1.3 测定内容及方法

株高的测定: 苗期株高用直尺测量根部到冬油菜心叶处, 薹期及以后的株高用卷尺直接测量根部到冬油菜顶端。株高在油菜苗期测 1 次, 薹期每周测 1 次。定选每个测坑中长势较有代表性的植株共 27 株。

叶面积的测定: 用刻度尺测量叶片的长和宽, 其乘积与校正系数的乘积作为叶片的叶面积^[14]。校正系数由方格纸法获得, 为 0.74。

光合作用的测定: 于油菜花期和成熟期晴朗天气各测定 1 次, 测定时间为 9 : 00 ~ 11 : 00, 测定仪器使用光合测定仪(北京力高泰科技有限公司 LI-6400×T)。每个测坑取 3 片生长状况相近的叶片夹在光合测定仪的透明叶室中 1 ~ 3 min 即可测得叶片

的光合速率。

叶绿素的测定: 于油菜薹期和花期晴朗天气各测定 1 次, 测定时间为 9 : 00 ~ 11 : 00, 每个测坑选 5 片生长状况接近的叶片用手持式叶绿素仪测定。

干物质测定: 收获期不同处理随机选取植株取样, 将地上部分茎、叶分开, 于 105℃ 杀青 30 min, 然后于 75℃ 烘至恒重, 冷却后用电子天平称重。

产量测定: 每个处理取 3 个重复, 每个重复随机标记 1 株植株, 收获时每个处理分别称重计算产量。

土壤含水量的测定: 采用 TRIME-PICO TDR 便携式土壤水分测量仪测定。在试验前、收获后、每次灌水前后 2 d 内, 用 TDR 水分测定仪每隔 20 cm 土层深度测定土壤体积含水量, 测至深度 80 cm。

采用水量平衡法^[13, 7]计算油菜植株不同时间段内耗水量 ET (mm), 由于温室没有降雨, 滴灌单次灌水量较小且测坑不透水, 公式为:

$$ET = I - \Delta W$$

式中 ET 为作物耗水量 (mm); I 为灌水量 (mm); ΔW 为灌水前后 0 ~ 100 cm 土壤水分变化量 (mm)。

水分利用效率 (WUE) 计算公式为^[15]:

$$WUE = Y/ET$$

式中 Y 为油菜产量 ($kg \cdot hm^{-2}$); ET 为作物耗水量 (mm)。

肥料偏生产力 (PFP) 计算公式为^[12]:

$$PFP = Y/T$$

式中 Y 为油菜产量 ($kg \cdot hm^{-2}$); T 为作物全生育期投入 N 、 P_2O_5 、 K_2O 和 H_3BO_3 的总量 ($kg \cdot hm^{-2}$)。

1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2007 进行数据计算; 使用 SPSS 18.0 统计软件进行方差分析, 如果差异显著 ($P < 0.05$) 则进行 LSD 比较; 用 Sigmaplot 12.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同滴灌施肥模式对油菜生长发育的影响

株高和叶面积是体现油菜生长状态非常重要的指标, 可以判断不同处理条件下油菜生长状况的优劣, 合理的滴灌施肥模式在一定种植密度下可以促进油菜株高、叶面积生长, 促进叶绿素的合成, 提高光合速率。表 2、表 3 所示为不同滴灌施肥模式对油菜株高和叶面积的影响。

由表 2 可知, 各处理的株高在生育期内总体呈现薹期增速较大, 花期增速平缓, 最后趋于稳定的特点。不同滴灌施肥模式下, 水肥交互作用对油菜各生育期内株高影响均达极显著水平 ($P < 0.01$)。

在成熟期, G1W3F3 处理株高达最大为 199 cm, G1W1F1 处理最低仅为 136 cm, G2W2F3 株高为 188 cm 较 G1W3F3 处理降低 5.5%。株高随灌水量的增加而增大, 与 W1 相比, W2 和 W3 株高分别增加 22.1% 和 28.2%, W2 与 W3 之间差异不显著, 与 W1 处理差异极显著; 施肥量对油菜株高影响达显著水平 ($P < 0.05$), 与低肥 (F1) 相比, 中肥 (F2) 和高肥 (F3) 株高分别增加 5.5% 和 12.8%。毛管布置方式对油菜株高的影响不显著。

由表 3 可知, 各处理的叶面积大小在生育期内呈现先增大后减小的趋势, 不同滴灌施肥模式下, 水肥交互效应对油菜叶面积有极显著影响 ($P <$

0.01), G1W3F3 处理叶面积增长速率最快, 于蕾薹期末达到峰值 ($5\ 908\ \text{cm}^2$) 较峰值叶面积最低的 G1W1F1 处理高 235.5%, 且叶面积下降速率也最快, 其余处理叶面积增长速率无显著差异, 叶面积下降较平稳。与 W1 相比, W2 和 W3 叶面积峰值分别增加 45.8% 和 124.2%, 灌水量各水平间差异极显著。与低肥 (F1) 相比, 中肥 (F2) 和高肥 (F3) 叶面积峰值分别增加 49.7% 和 50.2%, 说明 F2 与 F3 之间差异不显著, 与 F1 处理差异显著。毛管布置对油菜叶面积的影响不显著。

由此可见, 灌水量、施肥量与油菜生长指标呈正相关, 合理的水肥模式可以有效促进油菜的生长发育。

表 2 滴灌施肥模式对油菜株高的影响/cm
Table 2 Effect of drip fertigation mode on plant height of rape

生育期 Growth period	处理编号 Treatment								
	G1W1F1	G1W2F2	G1W3F3	G2W3F1	G2W1F2	G2W2F3	G3W2F1	G3W3F2	G3W1F3
苗期 Seedlingstage	34e	54b	57a	56a	38d	39d	48c	49c	36de
蕾薹期 Lace period	64f	94b	100a	92c	75e	92c	85d	94b	85d
花期 Flowering	90f	135bc	140a	137b	105e	137b	120d	140a	125c
成熟期 Maturity	125h	187c	196a	183d	137g	186cd	175e	191b	170f
	135h	185cd	199a	180d	142g	188c	175e	191b	168f
	136h	183d	199a	181de	142g	188c	174e	193b	169f
方差来源 Source of variance	P 值 P value								
毛管布置 GL	0.453	<0.001**	0.618	0.048*	0.038*	<0.001**	0.453	<0.001**	0.618
灌溉水平 IL	0.944	0.004**	0.116	0.222	0.784	0.016*	0.944	0.004**	0.116
施肥水平 FL	0.623	<0.001**	0.012*	0.011*	0.218	<0.001**	0.623	<0.001**	0.012*
毛管布置×灌溉水平 GL×IL	0.360	<0.001**	0.026*	0.042*	0.289	<0.001**	0.360	<0.001**	0.026*
毛管布置×施肥水平 GL×FL	0.604	<0.001**	0.043*	0.152	0.786	0.001**	0.604	<0.001**	0.043*
灌溉水平×施肥水平 IL×FL	0.534	<0.001**	0.036*	0.134	0.745	0.001**	0.534	<0.001**	0.036*

注: 同列数字不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$), 下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$); * indicates significant difference ($P < 0.05$), ** indicates significant difference ($P < 0.01$), the same below.

表 3 滴灌施肥模式对油菜叶面积的影响/cm²
Table 3 Effect of drip fertigation mode on leaf area of rape

生育期 Growth period	处理编号 Treatment								
	G1W1F1	G1W2F2	G1W3F3	G2W3F1	G2W1F2	G2W2F3	G3W2F1	G3W3F2	G3W1F3
苗期 Seedlingstage	1 047f	2 049c	2 697a	1 828d	1 257e	2 256b	1 058f	1 803d	1 761d
蕾薹期 Lace period	1 560g	2 681d	3 465bc	3 949a	1 872f	3 123c	2 110ef	3 641b	2 322e
花期 Flowering	1 761g	2 955d	5 908a	3 302c	2 095f	3 559bc	2 306ef	3 867b	2 454e
成熟期 Maturity	1 310g	2 998d	4 703a	3 422c	1 611f	3 897b	2 194ef	4 564ab	2 392e
	1 431f	3 210c	4 280b	3 057cd	1 755e	3 978bc	2 196d	4 818a	1 973d
	1 136f	2 421c	2 783b	2 559b	1 406e	2 639b	1 888d	4 081a	1 239e
方差来源 Source of variance	P 值 P value								
毛管布置 GL	0.816	0.098	0.095	0.048*	0.324	0.070	0.816	0.098	0.095
灌溉水平 IL	0.641	0.002**	0.046*	0.699	0.752	<0.001**	0.641	0.002**	0.046*
施肥水平 FL	0.356	0.001**	0.043*	0.044*	0.148	0.001**	0.356	0.001**	0.043*
毛管布置×灌溉水平 GL×IL	0.946	<0.001**	0.029*	0.091	0.837	0.001**	0.946	<0.001**	0.029*
毛管布置×施肥水平 GL×FL	0.797	0.001**	0.043*	0.143	0.855	0.005**	0.797	0.001**	0.043*
灌溉水平×施肥水平 IL×FL	0.429	0.001**	0.215	0.447	0.662	0.011*	0.429	0.001**	0.215

2.2 不同滴灌施肥模式对油菜生理指标的影响

叶绿素含量和净光合速率是反映油菜生理状况的重要指标。叶绿素含量的高低能直接反映油菜的生长速率且影响作物光合速率的快慢,光合作用是累积有机物的过程,而净光合速率越快表示吸收的 CO_2 越多,能产生越多的碳水化合物从而可以提高油菜的产量;合理的滴灌施肥模式可以提高叶绿素含量,提高净光合速率,进而提高产量。不同处理对油菜不同生育期内生理指标影响的显著性分析见表 4。

不同滴灌施肥模式下,蕾薹期水与肥及其交互作用对油菜叶绿素含量影响达极显著水平 ($P < 0.01$)。随灌水量、施肥量的增加,叶绿素含量显著增加,W3 处理平均叶绿素含量较 W2 和 W1 高 3.52% 和 14.82%,F3 处理平均叶绿素含量较 F2 和 F1 高 5.50% 和 10.8%,灌水量、施肥量各水平间差异显著;G1W3F3 处理的叶绿素含量 SPAD 达最大值 62.11,G1W1F1 处理的叶绿素含量最低,为 48.75,G2W2F3 处理较 G1W3F3 处理叶绿素含量降幅为 3.0%。花期水肥交互效应对油菜叶绿素含量影响达显著水平 ($P < 0.05$),但各处理叶绿素含量在花期较蕾薹期有所下降。毛管布置方式对叶绿素含量

影响不显著。

不同滴灌施肥模式下,蕾薹期水与肥及其交互作用对油菜净光合速率影响达极显著水平 ($P < 0.01$)。随灌水量、施肥量的增加,净光合速率显著增加,W3 处理平均净光合速率较 W2 和 W1 高 3.06% 和 64.4%,F3 处理平均净光合速率较 F2 和 F1 高 3.79% 和 51.85%,W2 与 W3 之间差异不显著,与 W1 处理差异极显著,F2 与 F3 之间差异不显著,与 F1 处理差异极显著;G1W3F3 处理的净光合速率达最大值 $23.68 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,G1W1F1 处理的净光合速率最低,为 $8.78 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,G2W2F3 处理较 G1W3F3 处理净光合速率降幅 3.46%。花期各处理净光合速率较花期有所提高,但各处理间差异不显著。

总的来说,灌水量、施肥量与油菜生理指标呈正相关,合理的水肥模式可以有效提高叶绿素含量,促进光合作用。

2.3 不同滴灌施肥模式对油菜干物质质量的影响

为探究不同滴灌施肥模式对油菜地上部干物质质量的影响,各处理地上部干物质质量如图 2 所示。不同滴灌模式对油菜地上部干物质质量影响顺序从大到小依次为灌水量、施肥量、毛管布置方式。灌水量对干物质质量影响表现为 $W3 > W2 > W1$,W3 处理

表 4 滴灌施肥模式对油菜叶绿素含量、净光合速率的影响

Table 4 Effect of drip fertigation mode on chlorophyll content and net photosynthetic rate of rape

处理编号 Treatment	蕾薹期 Lacey period		花期 Flowering	
	叶绿素 Chlorophyll SPAD	净光合速率/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ Net photosynthetic rate	叶绿素 Chlorophyll SPAD	净光合速率/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ Net photosynthetic rate
G1W1F1	48.75h	8.78f	41.02e	34.27d
G1W2F2	57.27d	22.26b	49.44b	33.69e
G1W3F3	62.11a	23.68a	51.83a	36.29b
G2W3F1	56.88e	16.12c	40.87f	31.19f
G2W1F2	51.32g	14.26e	42.86d	35.12e
G2W2F3	60.24b	22.86a	49.71b	36.90b
G3W2F1	53.62fg	15.67c	46.21c	37.35a
G3W3F2	58.76c	22.83a	51.32ab	35.31c
G3W1F3	54.21f	15.06d	45.39cd	35.84c

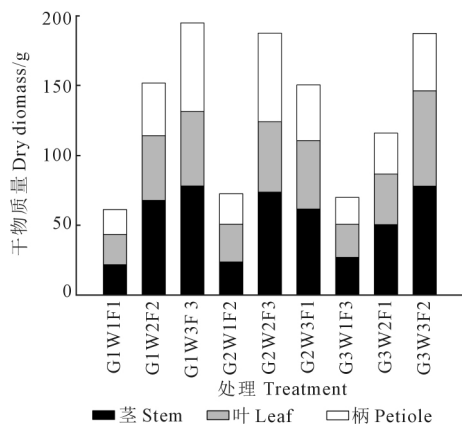


图 2 不同滴灌施肥模式对油菜地上部干物质积累的影响
Fig.2 Effects of different drip irrigation fertilization modes on dry matter above ground accumulation of rape

平均产量较 W2 和 W1 高 9.89% 和 38.06%,说明增加灌水量能显著提高油菜干物质积累;施肥量与毛管布置方式对油菜干物质积累影响不显著。各处理中 G1W3F3 干物质质量最大,为 $195.02 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$,其次 G2W2F3 为 $187.65 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$,较 G1W3F3 相比降幅仅为 3.78%,G1W1F1 干物质质量最小,仅为 $61.20 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。由此可见,虽然 G1W3F3 干物质质量最大,但 G2W2F3 降幅并不明显却节水 25%,且能有效促进油菜干物质质量的积累,节水效果明显。

2.4 不同滴灌施肥模式对油菜产量、水肥利用的影响

油菜的产量、水分利用效率 (WUE) 和肥料偏生产力 ($PFPP$) 是反映油菜生长情况好坏和经济效益

的重要指标,滴灌施肥模式对油菜产量、水肥利用效率的影响见表 5。

不同滴灌模式对油菜产量影响从大到小顺序为灌水量、施肥量、毛管布置方式。G1W3F3 处理的产量最高,为 5 430 kg·hm⁻²,其次为 G2W2F3 处理 5 400 kg·hm⁻²,比 G1W3F3 处理产量仅降低 30 kg·hm⁻²,降幅 0.5%,G1W1F1 处理的产量最低,为 4 810 kg·hm⁻²。灌水量 W 对油菜产量影响表现为 W3>W2>W1,W3 处理平均产量较 W2 和 W1 高 0.13%和 6.49%,W2 与 W3 之间差异不显著;施肥量 F 对油菜产量影响表现为 F3>F2>F1,F3 处理平均产量较 F2 和 F1 高 4.82%和 6.10%,F1 与 F2 之间差异不显著;产量与灌水量、施肥量呈正相关。

比较 WUE 可以发现,最大值出现在 W1 处理,而最小值出现在 W3 处理,说明 WUE 与灌水量呈负相关;低水处理的 WUE 更高,W1 处理平均较 W2 和

W3 高 37.73%和 76.36%;施肥量与毛管布置方式对 WUE 影响不显著。各处理中产量最高的 G1W3F3 WUE 为 19.64 kg·hm⁻²·mm⁻¹,G2W2F3 处理为 24.89 kg·hm⁻²·mm⁻¹ 较 G1W3F3 处理高 26.73%。

从 PFP 可以看出,F1 处理获得最大的肥料偏生产力,其次为 F2,F3 肥料偏生产力最低,而灌水量与毛管布置方式对 PFP 影响不显著。F1 处理平均肥料偏生产力较 F2 和 F3 高 46.37%和 88.34%,说明施肥量越低肥料偏生产力越高。各处理中产量最高的 G1W3F3 处理 PFP 为 4.47,而 G2W2F3 肥料偏生产力仅低 0.03,差距并不明显。

综上所述,虽然 G1W3F3 产量最高,但 G2W2F3 产量降幅并不大;且较 G1W3F3 相比,G2W2F3 灌水量低 25%,水分利用效率高 26.73%,肥料偏生产力仅低 0.67%,说明 G2W2F3 的滴灌施肥模式能有效提高水分利用效率,节水增产。

表 5 滴灌施肥模式对油菜产量、水肥利用的影响

Table 5 Effect of drip fertigation mode on rapeseed yield, WUE and PFP

处理 Treatment	毛管布置方式 Pipeline layouts G	灌水 Irrigation W	施肥 Fertilization F	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	耗水量 Water Consumption/mm	WUE /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	PFP
G1W1F1	1	1	1	4 810	145.81	32.99	7.91
G1W2F2	1	2	2	5 040	221.34	22.77	5.59
G1W3F3	1	3	3	5 430	276.41	19.64	4.47
G2W1F2	2	1	2	4 860	148.72	32.68	5.39
G2W2F3	2	2	3	5 400	216.97	24.89	4.44
G2W3F1	2	3	1	4 970	279.63	17.77	8.17
G3W1F3	3	1	3	4 820	153.12	31.48	3.97
G3W2F1	3	2	1	4 970	217.36	22.87	8.17
G3W3F2	3	3	2	5 030	284.58	17.68	5.58

3 讨 论

水肥是影响油菜生长的两个重要因素,最优的滴灌施肥模式可以实现油菜节水高产、经济高效的目标。本文通过三因素三水平正交试验,研究不同灌水量、施肥量和毛管布置方式下油菜生理、生长、产量、水分利用效率、土壤含水量及土壤理化性质的变化情况。结果表明,灌水量和施肥量对油菜生理生长、产量较毛管布置方式有显著影响,油菜生长、生理指标、产量与灌水量、施肥量在一定范围内呈正相关,这与前人的研究结果一致:吴国军^[9]研究表明,随着灌水量的增加,油菜的株高、茎粗、叶绿素含量及净光合速率有一定程度的提高;胡敏等^[16]发现在一定范围内通过增加施肥量可以明显

提高油菜生物量及养分累积量,且随施肥量的增加,油菜地上部生物量及养分累积量呈增加趋势。本研究发现毛管布置方式对油菜生理生长指标的影响并不显著,与郭莉杰^[8]研究发现一管一行有利于番茄株高的增长、一管两行有利于增产的结论不同,这可能是由于试验材料、生育期内的灌溉次数不同导致的,本实验的灌溉方式较其他研究灌水量次数较少而单次灌水量较多,有待进一步研究完善。

结合油菜干物质质量、产量和水肥利用发现,G1W2F2、G1W3F3、G3W3F2、G2W2F3 处理的产量均超过 5 000 kg·hm⁻²,G1W3F3 产量最高为 5 430 kg·hm⁻²,其次为 G2W2F3;与 G1W3F3、G3W3F2 相比,G2W2F3 产量可观且节水 25%;与 G1W2F2 相比,G2W2F3 具有更高产量且在毛管布置方面 G2 布

置所需滴灌带材料仅为 G1 的一半,更为经济;同时 G2W2F3 也有利于干物质积累,在各处理中表现优异。适宜的水分条件有利于提高气孔导度,在此条件下适量施肥有利于促进根系发育及对水分的吸收,提高净光合速率,从而促进光合作用,进而提高产量,提高水肥利用效率^[17-20],有利于油菜干物质积累,这在节水高产的 G2W2F3 处理上表现尤为明显。

4 结 论

通过对不同毛管布置和水肥处理对油菜生理生长、干物质量、产量及水肥利用的影响分析,得出以下结论:

1) 滴灌施肥条件下油菜生理生长指标与灌水量、施肥量呈正相关,G1W3F3 处理获得最大株高、峰值叶面积、叶绿素含量及净光合速率,表明水肥及其交互作用是影响油菜生长生理指标的主要原因,毛管布置并不是产生影响的主要因素。

2) 滴灌施肥条件下产量与灌水量、施肥量呈正相关;灌水量越高,WUE 越低、干物质量越高,施肥量越高 PFP 越低;合理的水肥模式能促进干物质积累,有效提高水肥利用,提高产量。G1W3F3 处理获得最大产量,G2W2F3 处理较 G1W3F3 产量降幅不大,节水增产效果明显且水肥利用较高,且实际中 G2 布置所需滴灌带材料仅为 G1 的一半,较为经济合理。

全面综合考虑田间毛管布置及水肥协同效应,毛管布置为 G2(一管两行),灌水量为 W2(75% ET₀),施肥量为 F3(N:P₂O₅:K₂O:H₃BO₃为 600:380:220:15 kg·hm⁻²)即 G2W2F3 的组合方式最为经济适宜,节水增产效果明显。

参 考 文 献:

[1] 李传哲,许仙菊,马洪波,等.水肥一体化技术提高水肥利用效率研究进展[J].江苏农业学报,2017,33(2):469-475.
[2] Zotarelli L, Dukes M D, Scholberg J M S, et al. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling[J]. Agricultural Water Manage-

ment, 2009, 96(8):1247-1258.

- [3] Singandhupe R B, Rao G G S N, Patil N G, et al. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.) [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2):327-340.
[4] 张燕,张富仓,袁宇霞,等.灌水和施肥对温室滴灌施肥番茄生长和品质的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):206-212.
[5] Coston D C, Ponder H G, Kenworthy A L. Fertilizing peach trees through a trickle irrigation system [J]. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 1978, 9(3):187-191.
[6] 陈静,王迎春,李虎,等.滴灌施肥对免耕冬小麦水分利用及产量的影响[J].中国农业科学,2014,47(10):1966-1975.
[7] 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.
[8] 郭莉杰.日光温室番茄对滴灌毛管布置方式和灌水量的响应研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2017.
[9] 吴国军.不同水分处理对覆膜冬油菜产量、品质及水分利用的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2016.
[10] 谷晓博.不同水分处理对覆膜冬油菜前期生理生长及水分消耗的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2014.
[11] 方栋平,吴立峰,张富仓,等.灌水量和滴灌施肥方式对温室黄瓜产量和养分吸收的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(11):34-41.
[12] 张富仓,高月,焦婉如,等.水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响[J].农业机械学报,2017,48(3):270-278.
[13] 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,(6):11-14.
[14] 郁进元,何岩,赵忠福,等.长宽法测定作物叶面积的校正系数研究[J].江苏农业科学,2007,(2):37-39.
[15] 邢英英,张富仓,吴立峰,等.基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J].农业工程学报,2015,31(S1):110-121.
[16] 胡敏,周江霞,李小坤,等.施肥量对油菜绿肥生物量及养分累积的影响[J].湖北农业科学,2017,56(11):2028-2030.
[17] 李生秀,李世清,高亚军,等.施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果[J].干旱地区农业研究,1994,12(1):38-46.
[18] 高静,梁银丽,贺丽娜,等.水肥交互作用对黄土高原南瓜光合特性及其产量的影响[J].中国农学通报,2008,24(5):250-255.
[19] 袁宇霞,张富仓,张燕,等.滴灌施肥灌水下限和施肥量对温室番茄生长、产量和生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):76-83.
[20] 杨丹.生物降解膜覆盖及垄沟覆盖对冬油菜生理生长、产量及水分利用率的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2016.