

膜下滴灌水稻优化毛管配置模式及适宜灌溉强度的研究

何海兵^{1,2} 杨茹² 武立权¹ 马富裕^{2, *}

(¹安徽农业大学 农学院, 合肥 230036; ²石河子大学 农学院, 新疆 石河子 832003; ³安徽省农业科学院 作物研究所, 合肥 230031; * 通讯联系人, E-mail: mfy_agr@shzu.edu.cn)

Optimal Capillary Configuration Modes and Irrigation Intensities for Drip Irrigation with Plastic Film Mulching in Rice

HE Hai-bing^{1,2}, YANG Ru², WU Li-quan¹, MA Fu-yu^{2, *}

(¹College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; ²College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi 832003, China; ³Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; * Corresponding author, E-mail: mfy_agr@shzu.edu.cn)

HE Haibing, YANG Ru, WU Liquan, et al. Optimal capillary configuration modes and irrigation intensities for drip irrigation with plastic film mulching in rice. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30(1): 75–84.

Abstract: Rice under drip irrigation with plastic film mulching performances a potential and high productivity in arid and semiarid regions. Capillary configuration mode and irrigation intensity are key factors for high grain yield. To determine optimum capillary configuration mode and irrigation intensity in key growth stages, plot experiments were conducted with two cultivars in 2011 in Shihezi City of northern Xinjiang under various capillary configuration modes and irrigation intensities. The population showed the most uniform growth under one sheet of plastic film mulching (1.6 m wide) with four drip tapes and eight rows of rice (R_1), followed by one sheet of plastic film mulching with two drip tapes and eight rows of rice (R_2) and one sheet of plastic film mulching with one drip tape and eight rows rice (R_3). In the R_2 treatment, the rapid growth of rice plants in the row near to the drip tape made up for the slower growth of rice plants in the second row from the drip tape. There were no significant differences in grain yield, water use efficiency, and economic return between the R_1 and R_2 treatments. However, in the R_3 treatment, rice growth and development was seriously reduced throughout the growing season in the two rows farthest from the drip tape (i.e., the third and fourth rows). As a result, grain yield, water use efficiency, and economic return were significantly lower in the R_3 treatment than the R_1 and R_2 treatments across two cultivars and four irrigation intensities. Generally speaking, rice growth and development were significantly improved as irrigation intensity increased under drip irrigation with plastic film mulching. In conclusion, the distance between drip tapes should be in the range of 40–80 cm to obtain high grain yield under drip irrigation in silty loam soil. In addition, the irrigation regime of 11 mm/d was beneficial to growth and development of rice plants before heading, and 20–25 mm/d after heading.

Key words: rice; capillary configuration mode; drip irrigation with plastic film mulching; growth and development

何海兵, 杨茹, 武立权, 等. 膜下滴灌水稻优化毛管配置模式及适宜灌溉强度的研究. *中国水稻科学*, 2016, 30(1): 75–84.

摘要: 膜下滴灌水稻在干旱/半旱区(新疆、宁夏)表现出较高的生产潜力, 而优化毛管配置模式和灌溉强度是其实现高产的前提。为此, 本研究于石河子地区通过设置毛管配置模式和灌溉强度双因素多水平处理, 开展为期一年的小区试验, 旨在为膜下滴灌水稻获得高产高效的毛管配置模式和灌溉强度提供理论依据。研究表明, 综合品种和灌溉强度因素, 群体整齐度以 1 膜 4 管 8 行配置(R_1)最优, 其次是 1 膜 2 管 8 行配置(R_2), 1 膜 1 管 8 行配置(R_3)最差。 R_2 模式通过促进近滴灌带行位株穴的生长发育来弥补远滴灌带行位株穴生长发育, 最终 R_2 模式的产量、水分利用效率及经济效益与 R_1 差异不显著; 由于 R_3 模式下距滴灌带第 3 行位和第 4 行位的株穴生长严重受限, 进而导致 R_3 模式的产量、水分利用效率及经济效益显著低于 R_1 和 R_2 模式; 总体而言, 增加灌溉强度有利于膜下滴灌水稻生长发育。在砂壤土质条件下, 膜下滴灌水稻为获得较高的谷物产量, 毛管间距以 40~80 cm 为宜。关键生育期灌溉强度为抽穗前 11 mm/d, 抽穗后需维持更高的灌量, 可以考虑维持在 20~25 mm/d。

关键词: 水稻; 毛管配置; 膜下滴灌; 生长发育

中图分类号: S511.071

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2016)01-0075-10

收稿日期: 2015-04-02; 修改稿收到日期: 2015-07-02。

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2011AA100508); 安徽省科技计划资助项目(1501031088); 安徽农业大学引进与稳定人才项目科研资助项目(yj2015-03)。

淡水资源亏缺将威胁水稻安全生产,但随着人们对稻米需求量的不断增加,水稻产出需保持逐年增长趋势,由此不难看出,水资源不足和人们消费需求增加成为当今水稻生产的主要矛盾之一。人们对稻米需求量的不断增加成为当今水稻生产的主要矛盾^[1]。在湿润半湿润区,水稻节水栽培技术如干湿交替灌溉、水稻强化栽培体系、旱作、覆盖栽培体系^[2-6]在节水及高产两方面发挥重要作用,对缓解当前水稻生产矛盾具有极其重大的意义。而对于干旱半干旱区,水稻节水栽培技术鲜有报道,该区域水稻仍以传统淹灌种植为主。近年来,新疆天业集团在新疆石河子市(干旱半干旱区)初步探索出一种新型的水稻旱作节水栽培技术。水稻全生育期内无水层栽培并应用膜下滴灌技术,生育期内采取高频高灌制度^[7]。其节水空间高达50%~60%,且能维持较高的谷物产量^[8-9]。

滴灌较传统漫灌或喷灌能大幅有效地降低土壤深层渗漏量,且表现出更高的水分利用效率^[10-11],在经济作物如棉花^[12-14]、加工番茄^[15-16]、红枣^[17-18]、粮食作物如玉米^[19-20]、小麦^[21-23]、大麦^[24-25]等多种作物中得到广泛应用。在滴灌条件下,灌水以点源或者线源的形式进入土层并在根区重新分配^[26-27],土壤水分含量在水平/垂直方向随距滴头位点的增加而降低^[28]。在这一分配过程中,毛管配置(或毛管间距)和灌量对其起着重要的调控作用。增加滴灌带之间的距离或降低灌溉量将加剧土壤水分在水平和垂直方向分配量的差异性^[29]。研究表明,在膜下滴灌棉花栽培中,当滴灌带间的距离大于140 cm时,即使在充分的水分供给条件下,距滴灌带远行棉花位点(距滴灌带70 cm)的根区所分配的水分含量仍不能满足棉株的正常生长发育,最终导致株高等农艺性状及产量显著降低^[29]。廖江^[30]和杨茹^[31]分别于2010—2011年对滴灌春小麦大田调查及小区试验研究表明,当滴灌带之间距离为90 cm时,位于距滴灌带第三行位点(距滴灌带45 cm)根域的土壤含水量显著降低,进而导致该行小麦生长速率显著低于第一行和第二行位点,最终不利于产量的形成。当增加灌溉量时,第三行位点的土壤含水量明显增加,其与第一行(第二行)之间的生长速率差显著缩小^[22,30-31]。由此可见,滴灌作物实现高产高效的前提即需要建立合适的毛管配置和灌溉强度,以此提高群体整齐度或促进行位间的同步生长速率。对水稻而言,由于水稻对土壤水分较其他作物敏感,且耐

旱性较弱。毛管配置模式和灌溉强度对行位间个体及群体生长发育的调控效果可能会更加剧烈。为减小行位间的异速生长速率差,滴灌水稻的毛管配置间距可能较其他作物更小且维持较高的灌量。

基于已有的研究进展及研究假设,本研究设计3个毛管配置和4个灌溉强度双因素多水平处理,旨在探明:1)膜下滴灌水稻高产高效的毛管配置模式;2)膜下滴灌水稻获得高产的水分需求规律。明确上述问题,可为后续开展膜下滴灌水稻的科学研究或大面积生产有关毛管配置模式和关键生育期的灌溉密度提供理论依据。

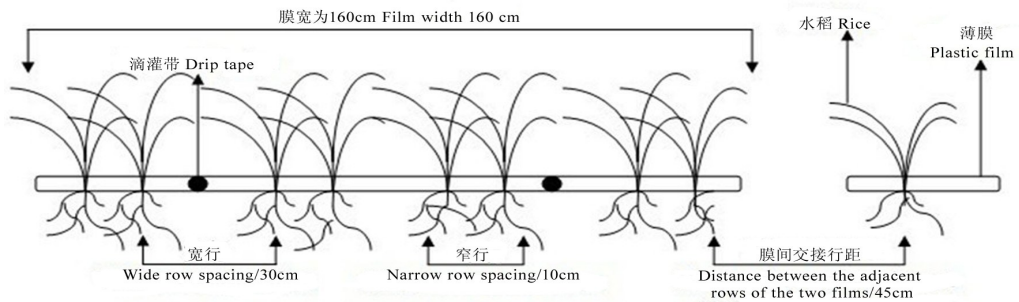
1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在新疆石河子市新疆天业集团农业干旱研究中心进行(北纬44°26',东经86°01',海拔高度429 m)。该区属大陆干旱性气候,平均年降雨量为223 mm,年蒸发量为1040 mm,年无霜期为168~171 d,昼夜温差大,近5年(2006—2010年)日平均气温为8.9℃,最高月平均气温在7月份,为25.6℃,4月—10月水稻生长季节内,平均温度、降雨量和蒸发量分别为20.2℃、130 mm和825 mm。试验地在1 m深土层内土壤质地为砂壤土;0~60 cm土层土壤有机质含量为25.46 mg/kg,碱解氮、速效磷及速效钾含量分别为60.83 mg/kg、25.46 mg/kg和342.54 mg/kg,土壤呈弱碱性(pH值8.1),土壤饱和体积含水率为30.11%。

1.2 试验材料与设计

于2011年4—10月开展田间小区试验。供试水稻材料为宁粳28和月光,在小区内采用膜下滴灌膜面开穴方式种植管理。铺膜铺管后以宽窄行方式在薄面上开穴播种,行距配置10-30-10-30-10-30-10-45 cm(图1),株距10 cm,4.5×10⁵穴/hm²,种子发芽率95%,每穴下种7~9粒。当3叶期时,移除弱苗和病苗,每穴保留6株。膜下滴灌水稻采用干播湿出方法,于4月中下旬当0~20 cm土层温度维持在12℃以上时播种。于4月28日人工点播,播深3 cm,播种后(4月29日)按375~450 m³/hm²滴出苗水。生育期内田间精细管理,及时控制病虫害。尿素750 kg/hm²(纯N为345 kg/hm²),其中10%于播前作为基肥施入,15%于3叶1心期、30%于分蘖中期、35%于拔节孕穗期、10%于开花期施入。过磷酸钙、氯化钾和硫酸锌用量分别为

图 1 1膜2管8行(R₂)栽培模式示意图Fig. 1. Schematic diagram of planting mode of the R₂ mode.

750 kg/hm²、150 kg/hm² 及 30 kg/hm²，作为基肥一次性施入。

试验设置3种毛管配置模式，分别为1膜4管8行(R₁，滴灌带位于窄行间，一条膜上铺设4条滴灌带，滴灌带间距为40cm)；1膜2管8行(R₂，图1，每条膜上铺设2条滴灌带，滴灌带间距为80cm)；1膜1管8行(R₃，滴灌带位于第4行和第5行间，每条膜铺设一条滴灌带，滴灌带间距为170cm)。滴灌带的滴头间距为30cm，滴头流量为3.2L/h。为探明毛管配置模式和灌溉强度对滴灌水稻生长发育的影响，设4个水分处理(W₁、W₂、W₃、W₄)，分别表示从3叶1心起(5月24日)按5mm/d、8mm/d、11mm/d和14mm/d灌溉强度进行补充灌溉(据膜下滴灌水稻整个生育期内平均耗水强度为11mm/d的初步试验结果设定)，灌频2d，直到成熟前15d停止灌溉，任其自然落干。W₄、W₃、W₂和W₁在整个生育期耗水量分别为1.50×10⁴ m³/hm²、1.20×10⁴ m³/hm²、0.85×10⁴ m³/hm²和0.55×10⁴ m³/hm²。试验采用裂区设计，主区为品种，水分处理与毛管配置模式双因素多水平组合完全随机排列于主区下，每处理重复3次。小区规格为6.00m×5.25m。灌量用水表控制，雨量器收集降雨量并计算有效降雨量(本试验中的有效降雨量可忽略不计)。为防止水分在小区间侧移，各小区间埋设60cm深的防渗膜。

1.3 测量指标及方法

1.3.1 干物质量的测定

自3叶1心至成熟期，每隔14~16d进行破坏性取样。每个重复内取样面积为0.3m²。取回样品分别按茎、叶、穗(花后)分开装袋并置于烘箱内105℃下杀青30min，然后烘箱温度调至70℃烘至恒重，称量获得地上部生物量。生育期内干物质动

态变化特征用Logistic生长发育模型拟合，Logistic模型表达式为 $Y = a / (1 + b \times \exp^{-kx})$ ，其中 x 表示播种后天数， Y 表示干物质质量， a 表示生育期内最大干物质累积量拟合值， b 、 k 为模型形状参数。绿叶面积用Li-3100(LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA)仪器扫描，测定叶面积指数(LAI)，并进行分析。

1.3.2 水分利用效率

水分利用效率(WUE)即为水稻消耗1m³水量的谷物产量(kg/m³)。

1.3.3 经济效益

经济效益的评估主要包括产量、耗水量、播种量、肥料用量、薄膜用量、滴灌带用量及滴灌设备7种因素。经济效益(元/hm²) = 产量(kg/hm²) × 3.6元/kg - 耗水量(m³/hm²) × 0.5元/m³ - 播种量(kg/hm²) × 10元/kg - 1500元/hm²(肥料费用) - 840元/hm²(每1hm²薄膜费用) - 滴灌带用量(m/hm²) × 0.18元/m - 1000元/hm²(每1hm²滴灌设备如主管道、控水阀门及灌水电费等费用)。各因子单价均参照当年(2011年)市场价。

1.3.4 考种测产

成熟期每小区选取8m²的样株用于计算最终产量。并于成熟期在各处理中选择长势基本一致，按距滴灌带不同行位分别随机选取9穴稻株进行考种。对于R₁栽培模式下的4个水分处理，取样数为9穴(理论上各行位土壤剖面分配的水量基本一致，不会产生行位差异效应)；对于R₂毛管配置模式下的4个水分处理，在距离滴灌带的第一行和第二行分别取9穴；对于R₃毛管配置下的4个水分处理，在距离滴灌带的第一行、第二行、第三行和第四行分别取9穴(取样标准：当第一行某一穴位选定后，其所对应的第二行、第三行、第四行的株穴也被选取)。

R_2 取样标准也按照这一要求。当对 R_1 、 R_2 及 R_3 整体统计分析比较时(非行位间比较), R_2 和 R_3 近行植株及其相对应的远行植株的各参数先平均(最终 $n=9$), 然后再与 R_1 的 9 穴植株的参数比较)。考种指标包括株高(茎基部到穗顶部间的距离)、每穗粒数、结实率[用比重为 1.08 的波尔溶液筛选, 沉入溶液底部的籽粒为实粒, 漂浮在溶液上层的为空秕粒、结实率(%)=实粒数 \times 100/(实粒数+空秕粒数)]、单位面积有效穗数(每穗实粒数大于 5 粒的主茎及分蘖定义为有效穗)、千粒重、一次枝梗数、二次枝梗数以及无效穗长(穗颈处至穗底部一次枝梗着生位置)。

1.4 数据分析

本研究数据均采用一般线性模型(GLM)(SPSS 17.0 软件)进行统计分析; 处理间在 5% 水平上的差异用最小极差法(LSD)比较。采用 Origin-Pro 8.5 软件作图。

2 结果与分析

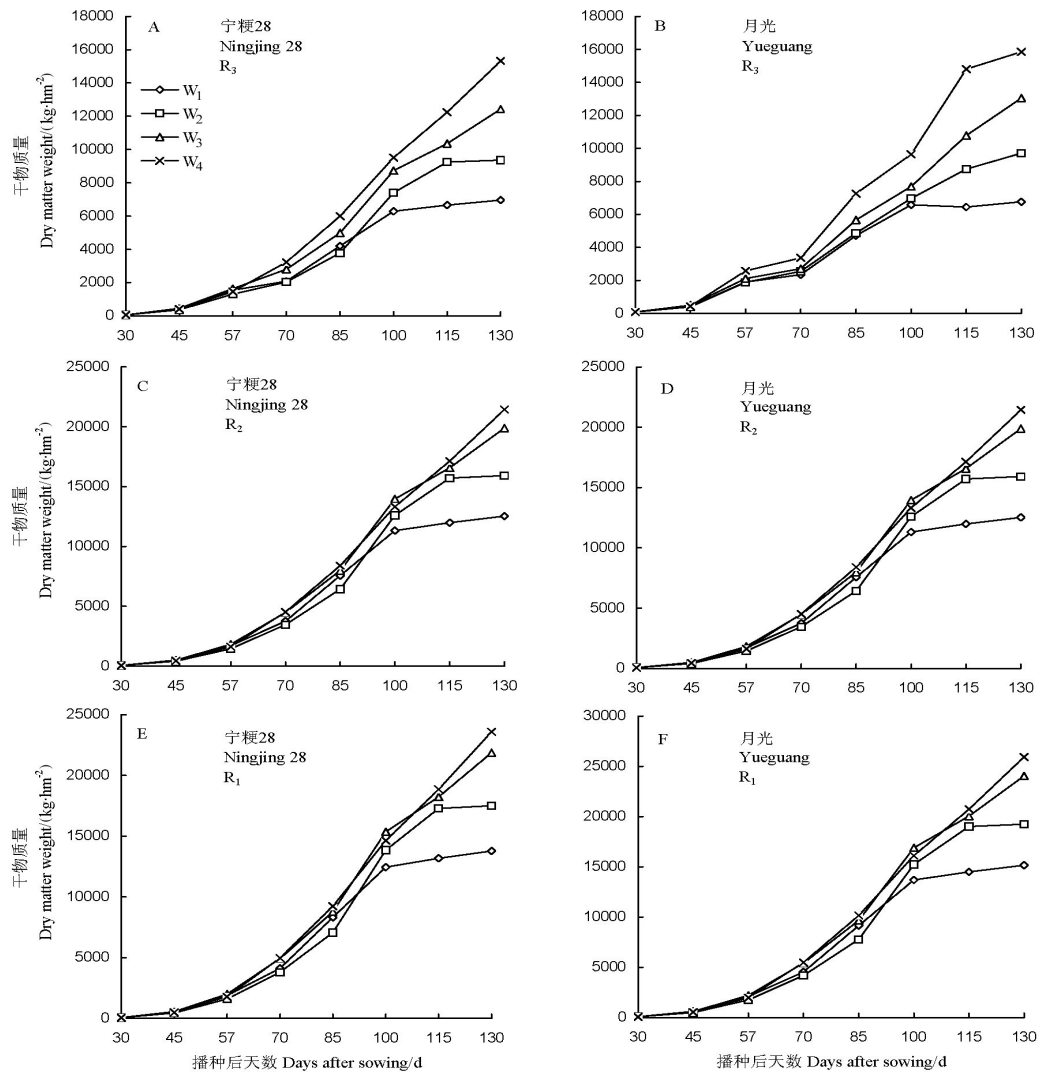
2.1 不同毛管配置与灌溉强度对干物质动态累积的影响

在开花期(月光播种后 80 d 左右, 宁粳 28 播种后 100 d 左右)前, 干物质质量在 3 种毛管配置模式下的各水分处理间存在不同程度的差异, 低灌量处理(W_1 和 W_2)累积干物质质量低于高灌量处理(W_3 和 W_4)。而开花后, 干物质随着灌量的增加而明显增加(图 2), 最终干物质质量以 W_4 处理最大, 为 1731.09~28882.86 kg/hm², 分别较 W_3 、 W_2 和 W_1 处理高 12.18%~22.52%、29.34%~42.59% 和 46.84%~60.45%(表 1); 不同毛管配置模式下, 两品种的最终干物质质量在不同水分处理间均表现为 $R_1 > R_2 > R_3$ (表 1); 在 R_3 毛管配置模式下, 干物质质量在水分处理间存在明显差异时的日期较其他两个毛管配置模式提前(图 2)。

表 1 不同毛管配置模式和灌溉强度下地上部干物质 Logistic 模型拟合参数

Table 1. Logistic parameters of dry matter weight of aboveground part in rice under different drip-tape configuration modes and irrigation quotas.

品种 Variety	处理 Treatment	模型参数 Logistic parameter			R^2
		a	b	k	
宁粳 28 Ninjing 28	$R_1 W_1$	13959.62	1260.31	0.09	0.997
	$R_1 W_2$	18552.18	1750.93	0.08	0.993
	$R_1 W_3$	23059.99	439.07	0.07	0.994
	$R_1 W_4$	26257.15	304.18	0.06	0.994
	$R_2 W_1$	12690.57	1260.31	0.09	0.997
	$R_2 W_2$	16865.62	1750.73	0.08	0.993
	$R_2 W_3$	20963.23	439.06	0.07	0.995
	$R_2 W_4$	24870.13	304.18	0.06	0.994
	$R_3 W_1$	7183.76	450.71	0.08	0.989
	$R_3 W_2$	10071.74	979.18	0.08	0.988
	$R_3 W_3$	13414.73	296.69	0.06	0.994
	$R_3 W_4$	17313.09	257.91	0.07	0.996
月光 Yueguang	$R_1 W_1$	15355.59	1260.31	0.09	0.997
	$R_1 W_2$	20407.41	1750.93	0.08	0.993
	$R_1 W_3$	25365.51	439.07	0.07	0.994
	$R_1 W_4$	28882.86	304.18	0.06	0.994
	$R_2 W_1$	12275.23	1602.29	0.10	0.994
	$R_2 W_2$	17252.87	339.77	0.07	0.997
	$R_2 W_3$	24052.43	212.06	0.06	0.993
	$R_2 W_4$	27433.39	250.51	0.06	0.995
	$R_3 W_1$	6932.29	419.22	0.08	0.978
	$R_3 W_2$	10446.03	191.79	0.06	0.994
	$R_3 W_3$	15671.68	148.88	0.05	0.992
	$R_3 W_4$	18198.03	230.44	0.06	0.985



R₁—1膜4管8行；R₂—1膜2管8行；R₃—1膜1管8行；W₁—灌溉强度为 $0.55 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ；W₂— $0.85 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ；W₃— $1.20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ；W₄— $1.50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。n=3。下同。

R₁, One sheet of plastic film mulching with four drip tapes and eight rows of rice; R₂, One sheet of plastic film mulching with two drip tapes and eight rows of rice; R₃, One sheet of plastic film mulching with one drip tapes and eight rows of rice; W₁, Water irrigation amount of $0.55 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; W₂, $0.85 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; W₃, $1.20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; W₄, $1.50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. n=3. The same as below.

图2 不同毛管配置模式和灌溉强度下水稻地上部干物质质量

Fig. 2. Dry matter weight accumulated in aboveground part in rice under different drip-tape configuration modes and irrigation intensities.

2.2 不同毛管配置模式与灌溉强度对叶面积指数的影响

在不同毛管配置模式下,生育期内的叶面积指数均以W₄处理最大,其次分别是W₃、W₂、W₁处理。到开花期,各处理叶面积指数达最大值(图3)。随后叶面积指数明显下降,总体而言,低灌量处理(W₁和W₂)较高灌量处理下降速度快(图3)。表明随着灌量的降低,衰老进程加剧。在R₁毛管配置模式下,最大叶面积指数为4.15~5.63,较R₂和

R₃处理分别高出4.42%~9.05%和21.95%~36.14%(图3)。对宁梗28而言,灌浆中后期LAI始终高于月光(图3),可能主要与月光较短的生育期有关。两品种叶面积指数在不同水分处理间下始终以R₁最大,其次为R₂和R₃。

2.3 不同毛管配置模式与灌溉强度对产量和水分利用效率及经济效益的影响

在不同毛管配置模式下,单位面积穗数、每穗粒数、结实率、千粒重、产量及水分利用效率皆以R₁

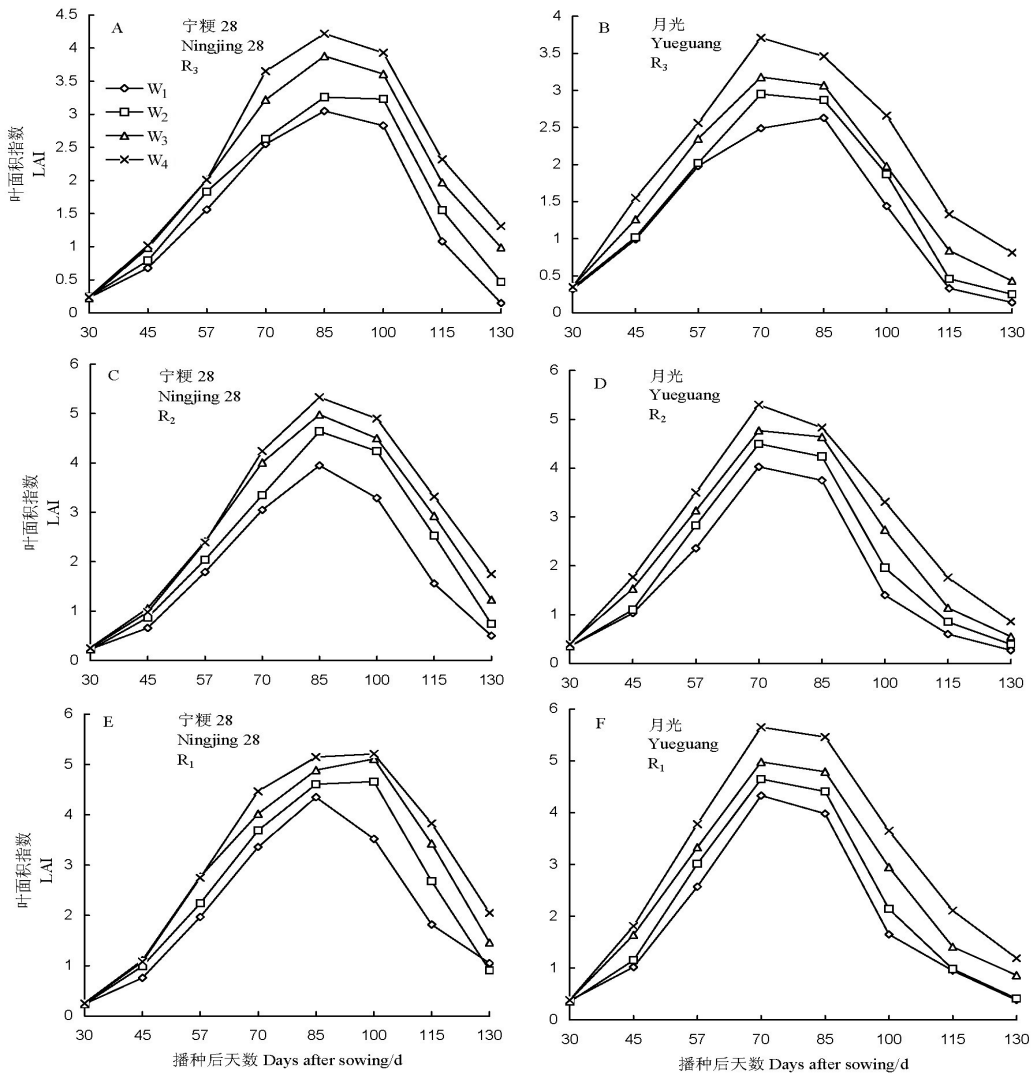


图3 不同毛管配置模式与灌溉强度下水稻叶面积指数

Fig. 3. Leaf area index (LAI) of rice under different drip-tape configuration modes and irrigation quotas.

模式最大,其次是R₂和R₃模式。R₁毛管配置模式与R₂毛管配置模式在各参数间差异不显著($P > 0.05$),但R₁和R₂毛管配置模式下的各参数均显著高于R₃($P < 0.05$)。总体来说,产量及其构成因子均随灌溉强度的增加而显著增加($P < 0.05$,表2),W₄和W₃处理均显著高于W₂和W₁处理($P < 0.05$),其中,W₃处理较W₄处理表现出略高的单位面积穗数和每穗粒数;水分利用效率对灌溉强度的响应与产量因子相反,即增加灌溉强度导致水分利用效率降低。对于经济效益而言,R₂模式下经济效益最大,而R₃模式下经济效益是负值,为最小;灌溉强度越大,经济效益越好。两品种在产量、产量构成因子及经济效益等指标间表现出相同的趋势。此

外,毛管配置模式与水分处理在各参数间存在显著或极显著的互作效应($P < 0.05$,表2)。

2.4 不同毛管配置模式下各行位水稻农艺特性

在不同毛管配置模式下,两品种各农艺参数在行位间的变化趋势基本一致(表3)。对R₁毛管配置模式而言,由于滴灌带均匀分布在水稻行间,1条滴灌带给2行水稻供水(图1),各行土壤剖面内理论上所分配的水量基本一致,且默认各行株穴地上部个体及群体生长发育也基本一致。对于R₂毛管配置模式,距毛管不同行位间存在明显的差异,第一行各农艺参数较第二行高3.61%~11.45%。在R₃毛管配置模式下,农艺参数在行间的大小分布趋势具体表现为第一行>第二行>第三行>第四行,各

表 2 不同毛管配置模式及灌溉强度下水稻产量、产量构成因子、水分利用效率及经济效益

Table 2. Grain yield, yield components, water use efficiency and economic benefit of rice under different drip-tape configuration modes and irrigation quotas.

品种与处理 Variety and treatment	每 1m ² 穗数 Panicle number per square metre	每穗粒数 Spikelet number per panicle	结实率 Seed-setting percentage /%	千粒重 1000-grain weight /g	产量 Yield /(×10 ³ kg · hm ⁻²)	水分利用效率 Water use efficiency	经济效益 Economic benefit /(Yuan · hm ⁻²)
宁粳 28 Ningjing 28							
R ₁ W ₁	440.56	105.67	47.14	22.01	5.89	0.39	5604
R ₁ W ₃	453.24	108.99	45.3	21.39	5.27	0.44	4872
R ₁ W ₂	386.58	98.42	37.74	21.17	4.13	0.49	2518
R ₁ W ₁	328.78	89.77	31.35	20.22	3.54	0.64	1894
R ₂ W ₁	423.24	101.98	46.13	22.03	5.97	0.40	7872
R ₂ W ₃	435.76	108.52	42.83	21.36	5.11	0.41	6276
R ₂ W ₂	354.14	94.52	37.63	21.05	3.98	0.49	3958
R ₂ W ₁	311.58	86.43	30.83	19.84	3.35	0.61	3190
R ₃ W ₁	357.52	88.07	41.33	21.98	3.27	0.22	-858
R ₃ W ₃	359.58	87.53	38.27	21.01	2.89	0.25	-744
R ₃ W ₂	264.32	75.68	27.35	19.37	2.17	0.26	-1568
R ₃ W ₁	229.64	67.89	23.67	18.09	1.88	0.34	-1112
毛管配置(R)	* *	* *	* *	*	* *	* *	
灌溉强度(W)	* *	*	* *	*	* *	* *	
R×W	* *	* *	* *	*	* *	* *	
月光 Yueguang							
R ₁ W ₁	444.46	109.42	74.38	22.87	6.23	0.42	6828
R ₁ W ₃	459.87	112.35	70.88	22.43	5.44	0.45	5484
R ₁ W ₂	383.45	100.78	63.88	21.96	4.37	0.51	3382
R ₁ W ₁	335.31	95.35	57.94	21.45	3.79	0.69	2794
R ₂ W ₁	456.47	105.34	70.43	22.52	6.17	0.41	8592
R ₂ W ₃	451.42	113.52	65.78	22.03	5.32	0.44	7032
R ₂ W ₂	368.79	97.56	63.24	21.67	4.29	0.51	5074
R ₂ W ₁	342.15	89.88	59.77	20.51	3.49	0.64	3694
R ₃ W ₁	362.24	75.33	58.34	21.36	2.64	0.18	-3126
R ₃ W ₃	361.43	72.18	55.16	21.27	2.26	0.19	-2994
R ₃ W ₂	273.15	61.88	41.59	20.55	1.69	0.21	-3296
R ₃ W ₁	252.29	53.35	40.38	19.64	1.48	0.27	-2552
毛管配置(R)	* *	* *	* *	*	* *	* *	
灌溉强度(W)	* *	*	* *	*	* *	* *	
R×W	* *	* *	* *	*	* *	* *	

*, ** 分别表示处理间或交互效应的方差分析结果达 5% 和 1% 显著水平。

*, ** represent significance in the results of variance analysis among treatments or interaction effects at 0.05 and 0.01 levels.

行位间的差异达 68.29%~96.71%。与 R₁ 模式相比, R₂ 模式近行株穴各农艺参数值明显增大, 而远行则表现出一定幅度的下降。在 R₃ 毛管配置模式下, 第一行与第二行各参数无论较 R₁ 或是 R₂ 所对应的行位都略有增加, 但第三行和第四行位稻株的生长发育受到明显的抑制。

3 讨论

就本研究而言, R₁ 毛管配置模式所形成的群体

结构和产量水平优于其他 2 个毛管配置模式。但综合行位间的干物质量(图 2)、叶面积指数(图 3)、产量及产量构成因子等参数来看(表 2), R₂ 模式的各参数均能与 R₁ 模式持平, 同时还能减少滴灌耗材的使用量, 最终经济效益增加 1.25~1.68 倍(表 2), 因此, R₂ 模式(滴灌带间隔 80 cm, 或每个滴灌带的湿润距离为 40 cm)是膜下滴灌水稻实现高产高效栽培的重要参考模式。虽然 R₂ 模式下稻株生长发育速度在远近行间存在行位差异(表 3), 但其可通

表3 不同毛管配置模式下距滴灌带不同行位的水稻主要农艺特性

Table 3. Agronomic traits of rice at different rows under various drip-tape configuration modes.

品种、处理和行位 Variety, treatment and row	株高 Plant height /cm	每 1m ² 穗数 Panicle number per square metre	每穗粒数 Spikelet number per panicle	结实率 Seed-setting percentage /%	一次枝梗数 Primary rachis branch number /(No. m ⁻²)	二次枝梗数 Secondary rachis branch number /(No. m ⁻²)	无效穗长 Length of invalid panicle /cm
宁粳 28 Ningjing 28							
R ₁	82.11	405.26	91.23	40.15	10.58	14.65	1.05
R ₂							
第一行 First row	82.83	411.24	95.07	40.90	10.67	14.67	1.16
第二行 Second row	80.07	371.10	86.93	38.60	10.23	13.33	1.31
差值 Difference/%	3.6	9.7	8.6	5.6	4.1	9.1	11.5
R ₃							
第一行 First row	82.53	417.15	99.14	38.37	11.13	13.89	0.89
第二行 Second row	81.47	422.12	107.67	40.15	12.25	14.35	0.56
第三行 Third row	50.13	168.67	59.41	2.13	6.60	5.14	4.34
第四行 Fourth row	32.15	92.33	34.14	1.32	2.30	3.22	8.79
差值 Difference/%	0.8~60.5	1.0~78.6	7.9~68.3	4.4~96.7	9.1~81.2	3.2~77.6	50.6~93.6
月光 Yueguang							
R ₁	73.51	412.13	104.55	66.51	8.12	10.35	0.28
R ₂							
第一行 First row	75.74	421.62	109.34	69.33	7.92	9.98	0.31
第二行 Second row	71.93	381.63	99.02	63.37	7.34	9.24	0.42
差值 Difference/%	3.9	9.5	5.1	8.6	7.3	7.4	26.2
R ₃							
第一行 First row	73.26	424.56	106.68	67.33	7.53	10.01	0.25
第二行 Second row	74.31	436.69	108.47	65.41	8.21	10.68	0.19
第三行 Third row	41.14	229.87	41.59	35.21	3.25	4.11	3.88
第四行 Fourth row	30.57	134.89	23.74	23.55	1.67	2.05	9.17
差值 Difference/%	4.1~58.9	6.6~68.8	8.1~78.1	3.2~64.0	8.3~79.7	6.3~80.8	57.7~97.9

过促进近行个体及群体生长发育来弥补远行个体及群体生长发育(表3)。2010年在滴灌春小麦的高产田中也发现类似的高低行位现象。说明滴灌条件下,小麦和水稻在作物群体间适当的高低位利于产量形成。高低行位现象有利于光、温、气在冠层内分布,对改善群体内部微生态系统具有积极作用,进而易于建成高产群体。关于这一假说机制需后续试验验证。

在本研究中,滴灌水稻产量降低主要归因于较低的结实率(表2~3)。究其原因,可能与关键生育期(开花期)低土壤水势有关。从我们对R₂模式土壤水势的监测结果来看,即使是灌溉强度最大的W₄处理,孕穗期到开花期间的平均土壤水势为-25 kPa^[32]。低土壤水势不能有效保障颖花正常开放并完成授粉^[33-34]。此外,2010-2011年滴灌水稻高产示范田灌溉记录显示:当宁粳28抽穗后每天的灌溉强度维持在20~25 mm,结实率可达80%。这

一结果进一步证实本研究较低的结实率与关键生育期灌溉强度不足有关。结合干物质累积、单位面积穗数及每穗粒数等指标来看(图1,表2),抽穗前维持11 mm/d的灌溉强度并不会显著抑制滴灌水稻的生长,抽穗后需维持更高灌溉定额。

除灌量外,土质、滴头流量等因素对土壤水分在土层中的二次分配结果也起着重要的调控作用。从砂土质地渐变到黏土质地过程中,水分的二次分布特性从趋于以垂直分布为主渐变到以水平分布为主。即在砂土质地下,水分二次分配主要趋于垂直方向,在水平方向分配的量及距离皆受限;而在黏土中,水分主要朝水平方向分配^[35];此外,随着滴头流量的增加,更有利于水分在水平方向的分布^[36-37]。关于膜下滴灌水稻在不同土壤质地和不同滴头流量条件下实现高产高效的毛管配置模式还需进一步研究。

参考文献:

- [1] Yang J C, Zhang J H, Wang Z Q, et al. Hormonal changes in the grains of rice subjected to water stress during grain filling. *Plant Physiol*, 2001, 127(1): 315-323.
- [2] Bouman B A M, Tuong T P. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agric Water Manag*, 2001, 49(1): 11-30.
- [3] Bouman B A M, Peng S B, Castaneda A R, et al. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. *Agric Water Manag*, 2005, 74(2): 87-105.
- [4] Bouman B A M, Yang X G, Wang H Q, et al. Aerobic rice (Han Dao): A new way of growing rice in water-short areas// Proceedings of the 12th international soil conservation organization conference, China: Beijing, 2002.
- [5] Tao H B, Brueck H, Dittert K, et al. Growth and yield formation of rice (*Oryza sativa* L.) in the water-saving ground cover rice production system (GCRPS). *Field Crops Res*, 2006, 95(1): 1-12.
- [6] Zhang L M, Lin S, Bouman B A M, et al. Response of aerobic rice growth and grain yield to N fertilizer at two contrasting sites near Beijing, China. *Field Crops Res*, 2009, 114: 45-53.
- [7] Peng S B, Bouman B A M, Visperas R M, et al. Comparison between aerobic and flooded rice in the tropics: Agronomic performance in an eight-season experiment. *Field Crops Res*, 2006, 96(2): 252-259.
- [8] 陈林, 郭庆人. 膜下滴灌水稻栽培技术的形成与发展. 作物研究, 2012, 26(5): 587-588.
Chen L, Guo Q R. The formation and development of rice cultivation technology in plastic mulch with drip irrigation. *Crop Res*, 2012, 26(5): 587-588. (in Chinese with English abstract)
- [9] 郭庆人, 陈林. 水稻膜下滴灌栽培技术在我国发展的优势及前景分析. 中国稻米, 2012, 18(4): 36-39.
Guo Q R, Chen L. The advantages and prospects of development of rice planted under plastic mulch with drip irrigation in China. *China Rice*, 2012, 18(4): 36-39. (in Chinese with English abstract)
- [10] Peacock W L, Rolston D E, Aljibury F K, et al. Evaluating drip, flood, and sprinkler irrigation of wine grapes. *Amer J E-nol Viticul*, 1977, 28(4): 193-195.
- [11] Hodgson A S, Constable G A, Duddy G R, et al. A comparison of drip and furrow irrigated cotton on a cracking clay soil. *Irrig Sci*, 1990, 11(3), 143-148.
- [12] Auja M S, Thind H S, Buttar G S. Cotton yield and water use efficiency at various levels of water and N through drip irrigation under two methods of planting. *Agric Water Manag*, 2005, 71(2): 167-179.
- [13] Dağdelen N, Başal H, Yılmaz E, et al. Different drip irrigation regimes affect cotton yield, water use efficiency and fiber quality in western Turkey. *Agric Water Manag*, 2009, 96(1): 111-120.
- [14] Wanjura D F, Upchurch D R, Mahan J R, et al. Cotton yield and applied water relationships under drip irrigation. *Agric Water Manag*, 2002, 55(3): 217-237.
- [15] Hanson B, May D. Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. *Agric Water Manag*, 2004, 68(1): 1-17.
- [16] Vázquez N, Pardo A, Suso M L, et al. Drainage and nitrate leaching under processing tomato growth with drip irrigation and plastic mulching. *Agric Ecosy Environ*, 2006, 112(4): 313-323.
- [17] 胡安焱, 董新光, 魏光辉, 等. 滴灌条件下水肥耦合对干旱区红枣产量的影响. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 60-63.
Hu A Y, Dong X G, Wei G H, et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield of Chinese jujube under drip irrigation in the arid area. *J Irrig Drain*, 2010, 29(6): 60-63. (in Chinese with English abstract)
- [18] 姚宝林, 孙三民, 孙建, 等. 节水控盐滴灌对土壤盐分、红枣光合及产量的影响. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 148-152.
Yao B L, Sun S M, Sun J, et al. Influence of water-saving and salt-controlling drip irrigation on soil salt content, photosynthesis rate and red jujube yield. *Agric Res Arid Areas*, 2011, 29(4): 148-152 (in Chinese with English abstract).
- [19] Phene C J, Davis K R, Hutmacher R B, et al. Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn. *Irrig Sci*, 1991, 12(3): 135-140.
- [20] Oktem A, Simsek M, Oktem A G. Deficit irrigation effects on sweet corn (*Zea mays saccharata* Sturt) with drip irrigation system in a semi-arid region: I. Water-yield relationship. *Agric Water Manag*, 2003, 61(1): 63-74.
- [21] Liao L J, Zhang L, Bengtsson L. Soil moisture variation and water consumption of spring wheat and their effects on crop yield under drip irrigation. *Irrig Drain Sys*, 2008, 22(3/4), 253-270.
- [22] 杨茹, 何海兵, 廖江, 等. 滴灌春小麦的籽粒灌浆特性. 麦类作物学报, 2012, 32(4): 743-746.
Yang Y, He H B, Liao J, et al. Study on grain-filling properties of spring wheat under drip irrigation. *J Triti Crops*, 2012, 32(4): 743-746. (in Chinese with English abstract)
- [23] 程裕伟, 冯治磊, 王谊, 等. 滴灌条件下春小麦耗水规律研究. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 112-117.
Chen Y W, Feng Z L, Wang Y, et al. Study on water consumption rules in spring wheat under drip irrigation. *Agric Res Arid Areas*, 2012, 30(2): 112-117. (in Chinese with English abstract)
- [24] 何庆祥, 张想平, 钱永康, 等. 甘肃河西灌区啤酒大麦滴灌栽培技术. 大麦与谷类科学, 2010, (3): 26-27.
He Q X, Zhang X P, Qian Y K, et al. Cultivation techniques of malting barley under drip irrigation in Hexi corridor oasis irrigation area of Gansu Province. *Barl Cereal Sci*, 2010, 3: 26-

27. (in Chinese with English abstract)
- [25] Isla R, Royo A, Aragón R. Field screening of barley cultivars to soil salinity using a sprinkler and a drip irrigation system. *Plant Soil*, 1997, 197(1): 105-117.
- [26] Li Y, Wallach R, Cohen Y. The role of soil hydraulic conductivity on the spatial and temporal variation of root water uptake in drip-irrigated corn. *Plant Soil*, 2002, 243(2): 131-142.
- [27] Du T S, Kang S Z, Zhang J H. Water use and yield responses of cotton to alternate partial root-zone drip irrigation in the arid area of north-west China. *Irrig Sci*, 2008, 26: 147-159.
- [28] Patel N, Rajput T B S. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agric Water Manag*, 2008, 95(12): 1335-1349.
- [29] 蔡焕杰, 邵光成, 张振华. 棉花膜下滴灌毛管布置方式的试验研究. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 45-49.
Cai H J, Shao G C, Zhang Z H. The study of capillary configuration modes of cotton in drip irrigation with plastic mulching. *Trans CSAE*, 2002, 18(1): 45-49. (in Chinese with English abstract)
- [30] 廖江. 毛管配置模式与灌溉定额对滴灌春小麦土壤水分分布及产量的影响. 石河子: 石河子大学, 2012.
Liao J. Effects of different lateral placements and irrigation quotas on soil moisture distribution and grain yield of drip irrigated spring wheat. Shihezi: Shihezi university, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [31] 杨茹. 水分调控下滴灌春小麦穗发育特性及其空间分异性研究. 石河子: 石河子大学, 2012.
Yang Y. Study on the characteristics of spikelet differentiation and the differentiation in the space of spring wheat of drip irrigation under water regulation. Shihezi: Shihezi university, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [32] He H B, Yang R, Ma F Y. Rice root system spatial distribution characteristics at flowering stage and grain yield under plastic mulching drip irrigation (PMDI). *J Anim Plant Sci*, 2014, 24(1): 290-301.
- [33] O'Toole J C, Garrity D P. Upland rice soil-plant-water relationships. An overview of upland rice research. Los Baños, the Philippines: IRRI, 1984: 394-411.
- [34] Ekanayake I J, de Datta S K, Steponkus P L. Spikelet sterility and flowering response of rice to water stress at anthesis. *Ann Bot*, 1989, 63(2): 257-264.
- [35] Bresler E. Trickle-drip irrigation: Principles and application to soil-Water Management. *Adv Agron*, 1977, 29(3): 343-393.
- [36] Ben-Asher J, Yano T, Shainberg I. Dripper discharge rates and the hydraulic properties of the soil. *Irrig Drain Sys*, 2003, 17(4): 325-340.
- [37] Badr M A, Taalab A S. Effect of drip irrigation and discharge rate on water and solute dynamics in sandy soil and tomato yield. *Austr J Bas Appl Sci*, 2007, 1(4): 545-552.