

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.030

不同水分管理旱直播水稻生长生理与节水效应

魏永霞^{1,2} 侯景翔¹ 吴昱^{3,4} 刘慧⁵ 汝晨¹ 杨军明¹

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;
3. 黑龙江农垦勘测设计研究院, 哈尔滨 150090; 4. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040;
5. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了探讨东北黑土区水稻高效节水种植模式,于2017年在黑龙江省庆安县采用测坑微区试验,研究了旱直播对水稻光合特性、各器官生物产量、干物质累积速率、根冠比、伤流强度、产量水分利用效率(WUE_y)、叶片水分利用效率(WUE_l)和产量因子等的影响。试验设置了3个处理:滴灌旱直播(DH)、漫灌旱直播(MH)和常规插秧淹灌(CK),并以CK处理作为对照。结果表明:DH与MH处理的净光合速率 P_n (分蘖末期除外)、蒸腾速率 T_r 、气孔导度 G_s 以及叶、鞘、茎、穗等冠部干物质累积量、冠部干物质累积速率(分蘖中期至末期除外)、冠部最大累积速率在整个生育期均低于CK,但WUE_l、根部干物质累积量(分蘖前期和中期除外)、根部干物质累积速率、根系活力(分蘖中期与拔节孕穗期除外)均高于CK。3个处理的胞间CO₂浓度 C_i 整个生育期波动幅度不大。根部和总干物质最大累积速率及各生育期根冠比以DH最大,CK最小。DH与MH处理的千粒质量和结实率较CK下降不显著($P > 0.05$),穗长和穗粒数下降显著($P < 0.05$),有效穗数上升显著($P < 0.05$)。DH较CK、MH分别节省灌溉用水量63.88%和39.52%,WUE_y分别提高2.66倍和1.64倍。滴灌旱直播种植不仅大幅度减少了灌溉用水量,显著提高了水稻的WUE_y,而且具有较为可观的经济效益和显著的社会效益。研究结果可为东北黑土区水稻种植模式的选取提供技术支撑,对保障黑土区农业水土资源可持续利用具有重要意义。

关键词: 旱直播水稻; 光合特性; 生物量; 干物质累积; 伤流强度; 水分利用效率

中图分类号: S274.1; S511 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)08-0253-12

Effects of Different Water Management on Growth Physiology and Water-saving of Dry Direct Seeding Rice

WEI Yongxia^{1,2} HOU Jingxiang¹ WU Yu^{3,4} LIU Hui⁵ RU Chen¹ YANG Junming¹

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China
3. Heilongjiang Agricultural Reclamation Survey and Research Institute, Harbin 150090, China
4. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China
5. College of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to explore a water-saving planting model with high efficient of rice in the northeast black soil area, the test pit micro area experiment was set up in Qing'an County, Heilongjiang Province in 2017. The effects of photosynthetic characteristics, biomass yield, dry matter accumulation rate, root shoot ratio, intensity of injury flow, yield water use efficiency (WUE_y), leaf water use efficiency (WUE_l) and yield factors on dry direct seeding rice were analyzed. Three treatments were set; drip irrigation dry direct seeding (DH), flood irrigation in dry land (MH) and conventional basin irrigation (CK). Results showed that the net photosynthetic rate (P_n , except late tillering), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s), the accumulation of dry matter in different organs, the cumulative rate of dry matter in the crown (except for mid to late tillering) and crown maximum cumulative rate were less than those of CK during the whole growth period, but WUE_l, root dry matter accumulation (except the early and mid tillering), the root of the accumulation rate of dry matter and root activity (except mid tillering and jointing booting stage) were higher than those of CK. The intercellular CO₂ concentration (C_i) of the three treatments had little change during the whole growth period. The maximum cumulative rate of root, maximum cumulative rate of total dry matter, the root and crown ratio of each growth period

收稿日期: 2018-01-04 修回日期: 2018-03-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC040010101)

作者简介: 魏永霞(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究,E-mail: wyx0915@163.com

通信作者: 刘慧(1981—),女,副教授,博士,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: xiaolaida@163.com

were the largest in DH, and the lowest in CK. The decreasing of 1 000 grain weight and seed setting rate of DH and MH treatments were not significant compared with CK ($P > 0.05$). The spike length and grain number per spike were decreased significantly ($P < 0.05$), the number of effective spikes was increased significantly ($P < 0.05$). Compared with CK and MH, DH reduced irrigation water consumption by 63.88% and 39.52%, and WUE_y was increased by 2.66 and 1.64 times, respectively. Drip irrigation and dry direct seeding not only significantly reduced irrigation water consumption, but also significantly increased the WUE_y of rice, and it had considerable economic benefits and significant social benefits. The study results can provide technical support for the planting mode of rice in the black soil region of northeast, which had a great significance for the sustainable utilization of agricultural soil and water resources in the black soil region.

Key words: direct seeding in dry land of rice; photosynthetic characteristics; biomass; dry matter accumulation; intensity of injury flow; water use efficiency

0 引言

水稻作为我国的主要粮食作物之一,其种植面积占全国粮食种植面积的28%,灌溉用水占全国农业用水的70%^[1],用水量且利用效率低,造成水资源的严重浪费^[2]。东北黑土区作为我国重要的水稻生产基地,由于种种原因,仍然存在着水分利用效率低等问题。因此,寻求高效节水的水稻种植模式对于促进黑土区农业可持续发展,保障国家粮食安全具有重要意义。

水稻产量的形成是水稻生长发育、各器官建成、干物质不断积累等的结果,其实质是光合产物的积累,因此研究水稻的光合特性和干物质累积情况对于分析产量的形成具有重要作用。早直播种植较常规插秧种植不仅省去了苗床育秧过程,简化了工序,而且可以有效减少深层渗漏、棵间蒸发^[3]、土壤有机质周转期和温室气体排放^[4],提高灌溉水利用效率。同时,早直播种植模式无需泡田,除了操作简便外,可节省大量的泡田用水。邓飞等^[5]研究表明,适宜的栽培模式可以有效地调控水稻的干物质生产,提高产量。何军等^[6]研究表明,黄熟期不同水肥处理水稻干物质在各器官的分配比例不同,但趋势相同。李树杏等^[7]研究表明,幼穗形成期经过短期轻度干旱复水后,水稻光合速率迅速恢复甚至可以激发到更高水平,后期干物质积累也有所提高,可以达到节水的效果。郭慧等^[8]研究表明,覆膜直播水稻单株茎干物质质量和光合势在各主要生育期均高于常规水栽水稻。王志军等^[9]研究了膜下滴灌和淹灌水稻在乳熟期的光合生理特性,表明膜下滴灌较淹灌水稻净光合速率、蒸腾速率、气孔导度均下降,水分利用效率明显上升。覆膜滴灌水稻虽然有利于保温、保墒,但是膜的后期回收不便,且成本加大。目前,对于水稻光合特性和干物质积累的研究主要以调亏灌溉和控制灌溉^[10-11]为主,而且对膜下滴灌水稻光合特性的研究也有报道,但是未覆膜滴

灌旱直播种植模式下的各生育期水稻光合特性和各器官干物质累积分布情况未见报道。

因此,本试验以黑土区水稻为研究对象,研究滴灌和漫灌旱直播种植模式较传统插秧种植模式在光合特性、生物产量、干物质累积速率、根系活力、水分利用效率和产量因子等方面的差异,以期为东北黑土区水稻高效节水的种植模式提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017年5—10月在黑龙江省庆安县和平灌区水稻灌溉试验中心(127°40'45"E,46°57'28"N)进行。试验地全年平均气温2.6℃,年降雨量500~600 mm,降雨多集中在7—8月,无霜期120~130 d,属寒温带大陆性季风气候。土壤为典型黑壤土,容重1.01 g/cm³,孔隙度61.8%,饱和含水率50%,pH值6.35。土壤基础肥力(均为质量比)为:有机质41.8 g/kg、有效磷36.22 mg/kg、速效钾112.06 mg/kg、全氮15.06 g/kg、全磷15.23 g/kg、全钾20.11 g/kg和碱解氮198.29 mg/kg。

1.2 试验设计

试验以龙庆稻3号水稻品种为供试对象,在移动式遮雨测坑中进行。共设3个处理:滴灌旱直播处理(DH)、漫灌旱直播处理(MH)、常规插秧淹灌处理(CK),每处理设3次重复,共9个测坑,测坑面积2 m×2 m。DH处理每个测坑铺设3条毛管,滴灌带为贴片式,滴头间距30 cm,工作压力0.1 MPa,滴头流量1.2 L/h。灌水量用精确水表控制,当土壤含水率达到设定的土壤含水率下限时,灌水至上限。各处理不同生育期水分处理见表1。DH和MH处理的行间距采用与铺设滴灌带的穴播机相同的间距(行距10 cm+26 cm+10 cm、穴距10 cm,毛管布置于宽行)。DH和MH处理采用人工播种,每穴10~12粒。CK处理采用人工插秧,密度参照当地(行距

30 cm、穴距 13 cm) 进行,每穴 5 株。各处理均按照氮肥 110 kg/hm²、磷肥 45 kg/hm²、钾肥 80 kg/hm² 的施肥量均施。其中氮肥按照基肥:分蘖肥:促花肥:

保花肥为 4.5:2:1.5:2 比例分施,钾肥按基肥:促花肥为 1:1 比例 2 次分施,磷肥作基肥一次性施入。DH 处理随水滴施,MH 和 CK 处理为撒施。

表 1 不同处理水稻各生育期水分处理方案

Tab. 1 Different treatments for water treatment at different growth stages of rice

处理	各生育期水分处理									
	返青期	播种	苗期	分蘖前期	分蘖中期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
CK	30~40			20~45	20~45	晒田	20~45	45~85	15~45	
DH		80~100	80~100	85~100	85~100	60~100	85~100	85~100	70~100	
MH		80~100	80~100	85~100	85~100	60~100	85~100	85~100	70~100	

注:CK 处理各生育期水分处理以“mm”计,DH 和 MH 处理各生育期水分处理为占田间持水量的百分比,以“%”计。

1.3 测定项目与方法

土壤含水率:采用干燥法分层测定,DH 处理取样点位于滴灌带滴头下方、距滴灌带 13 cm 位置和距滴灌带 36 cm 位置处。计划湿润层深度为 60 cm,分别取 10、20、40、60 cm 深度土壤测定土壤含水率,以 3 个取样点处的平均值作为含水率值,每天观测。MH 处理取样点相对位置和含水率计算方法与 DH 处理保持一致。将采集的土样放入铝盒,在 105℃ 干燥箱中干燥至恒质量,计算土壤含水率。CK 处理采用水尺测定水层深度变化。

光合速率和蒸腾速率:采用 LI-6400XT 型(美国 LI-COR 公司)便携式光合作用测量系统测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO₂ 浓度(C_i)等光合参数,在 09:00—11:00 的晴天,每个测坑选取生长状况良好、长势基本一致的 5 穴、每穴选取 1 株水稻,于功能叶上进行测定,并做好标记,便于下次再测。

水稻各器官生物量:分别于分蘖前期(PT)、分蘖中期(MT)、分蘖末期(LT)、拔节孕穗期(JB)、抽穗开花期(HF)、乳熟期(MM)和黄熟期(R)测定各处理水稻各器官干物质量。每个测坑选取 5 穴,每穴选取 1 株,在植株周围 30 cm × 30 cm × 80 cm 取得整株植株样,并将水稻根部置于尼龙网袋中冲洗干净,断根同样回收,将各器官分离后分别装入信封,放入已升温至 105℃ 的干燥箱中,杀青 30 min,然后于 80℃ 下干燥至恒质量,用精度 0.01 g 的电子天平称取植株各器官干物质量。

伤流强度:分别于分蘖中期、分蘖末期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期和黄熟期(分蘖前期伤流液极少),每个测坑取样 5 穴,于 18:00 在距地面 10 cm 处将稻株剪断,在地面残留稻茎处套上已称量(W_1)的一端开口一端封闭的装有脱脂棉的薄塑料套管,并用塑料薄膜包好,皮筋扎紧。于次日 08:00 回收称量(W_2)。伤流强度(I)为

$$I = (W_1 - W_2) / t$$

以此值代表水稻根系活力。

产量及产量构成因子:成熟期,每个测坑分别割取 10 穴植株,风干晾晒后测定产量构成因子,包括穗长、有效穗数、穗粒质量、结实率和千粒质量,并计算理论产量(产量计算公式为有效穗数、穗粒质量、结实率和千粒质量的乘积除以 1 000)。

1.4 有关指标计算方法

1.4.1 干物质累积速率

干物质累积速率为单株水稻各部位各生育期干物质累积量与该生育期历时的比值,单位为 mg/d。

1.4.2 阶段耗水量

利用水量平衡方程计算水稻阶段耗水量,由于试验在移动式遮雨棚有底测坑中进行,且通过试验发现,计划湿润层深度以下土壤含水率基本保持不变,所以水量平衡方程可以简化为

$$ET_i = I + \Delta W \quad (1)$$

式中 ET_i ——阶段耗水量,mm

I ——计算时段内单位面积上的灌水量,mm

ΔW ——计算时段内单位面积计划湿润层内的土体储水量变化量,mm

1.4.3 叶片水平水分利用效率

叶片水平上的水分利用效率(Leaf water use efficiency, WUE_l) (单位: $\mu\text{mol}/\text{mmol}$),反映了植物生长与自身蒸腾耗水之间的关系^[12],定义为单位水量通过叶片蒸腾散失时光合作用所形成的有机物质。测完水稻各生育期光合参数后,计算各生育期叶片水平上的水分利用效率,简称叶片水分利用效率,计算式为

$$WUE_l = P_n / T_r \quad (2)$$

式中 P_n ——叶片净光合作用速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

T_r ——叶片蒸腾速率, $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

1.4.4 产量水平水分利用效率

产量水平上的植物水分利用效率(Yield water use efficiency, WUE_y) (单位: kg/m^3),定义为单位耗水量的籽粒产量,计算式为

$$WUE_y = Y/ET \quad (3)$$

式中 Y ——水稻产量, kg/hm^2

ET ——水稻全生育期需水量, m^3/hm^2

1.5 数据处理方法

所得数据用 Microsoft Excel 初步处理,用 SPSS 22.0 进行显著性分析,Origin 9.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理水稻光合指标及 WUE_1 的动态变化

不同处理水稻光合特性及 WUE_1 如图 1 所示。整体来看,不同处理下水稻 P_n 、 T_r 和 G_s 大致呈现先升高后下降的变化趋势。 P_n 和 T_r 均在抽穗开花期达到峰值,在分蘖前期最小; G_s 整体波动幅度不大; WUE_1 大致呈不断减小趋势,分蘖前期最大。早直播各生育期(分蘖末期除外) P_n 均小于 CK 处理,且 DH 处理最低,DH 和 MH 处理较 CK 分别降低了 4.14% ~ 13.69% 和 0.85% ~ 11.16%,且只在 MT 和 R 期差异显著($P < 0.05$),其他 5 个生育期 3 个处理 P_n 均无显著差异,表明早直播处理引起的土壤水分胁迫使各个生育期(分蘖末期除外) P_n 较常规插秧淹灌均有所下降,这与王志军等^[13]、卢从明等^[14] 研究结果一致。从分蘖中期到分蘖末期,CK 处理 P_n 出现下降,但是 DH 和 MH 处理均有略微上升,分别高于 CK 处理 0.32% 和 0.20%,但是差异不显著($P > 0.05$),这可能是由于分蘖末期 CK 处理的晒田导致外界环境条件的剧烈改变对其影响较大,但对早直播的影响并不大。整个生育期,DH 与 MH 处理的

T_r 均低于 CK 处理 5.79% ~ 31.64% 和 4.67% ~ 24.40%,且 DH 处理在各生育期与 CK 的差异均显著($P < 0.05$),MH 处理只在分蘖中期到抽穗开花期与 CK 差异显著。 G_s 各生育期的变化规律与 T_r 相似,DH 与 MH 处理分别较 CK 处理降低 3.41% ~ 39.70% 和 2.27% ~ 27.85%,说明早直播水稻为了保持体内水分,防止蒸腾过快,会减小气孔导度,降低蒸腾速率。3 个处理 C_i 整个生育期均维持在 260 ~ 305 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,波动幅度不大。从分蘖前期到黄熟期,除了分蘖中期和乳熟期早直播 C_i 大于常规插秧淹灌外,其他生育期均降低,其中 DH 和 MH 处理分别比 CK 降低 0.06% ~ 11.55% 和 0.33% ~ 7.73%,呈现出 HF 期(JB 期除外)之前早直播与常规插秧淹灌差异显著($P < 0.05$),HF 期之后无显著差异的趋势。比较各生育期 WUE_1 可知,除了拔节孕穗期 DH 处理比 MH 处理下降 11.48% 外,其他 6 个生育期,DH 处理较 MH 处理升高 0.46% ~ 13.44%,但是差异并不显著($P > 0.05$)。这可能是由于拔节孕穗期作物耗水量较大,而 DH 处理较 MH 处理的灌水量少,这对 P_n 有一定抑制作用,使得 DH 处理 WUE_1 较 MH 有所降低。早直播处理的 WUE_1 均高于常规插秧淹灌,增幅在 1.10% ~ 31.45%,而早直播处理中又以 DH 处理为最高(拔节孕穗期除外),说明滴灌早直播处理使得无效水分消耗减少,叶片水分利用效率升高,在消耗单位水量的情况下,容易积累更多的有机物^[9]。

2.2 不同处理水稻伤流强度动态变化

根系活力是衡量根系主动吸收能力的重要指标

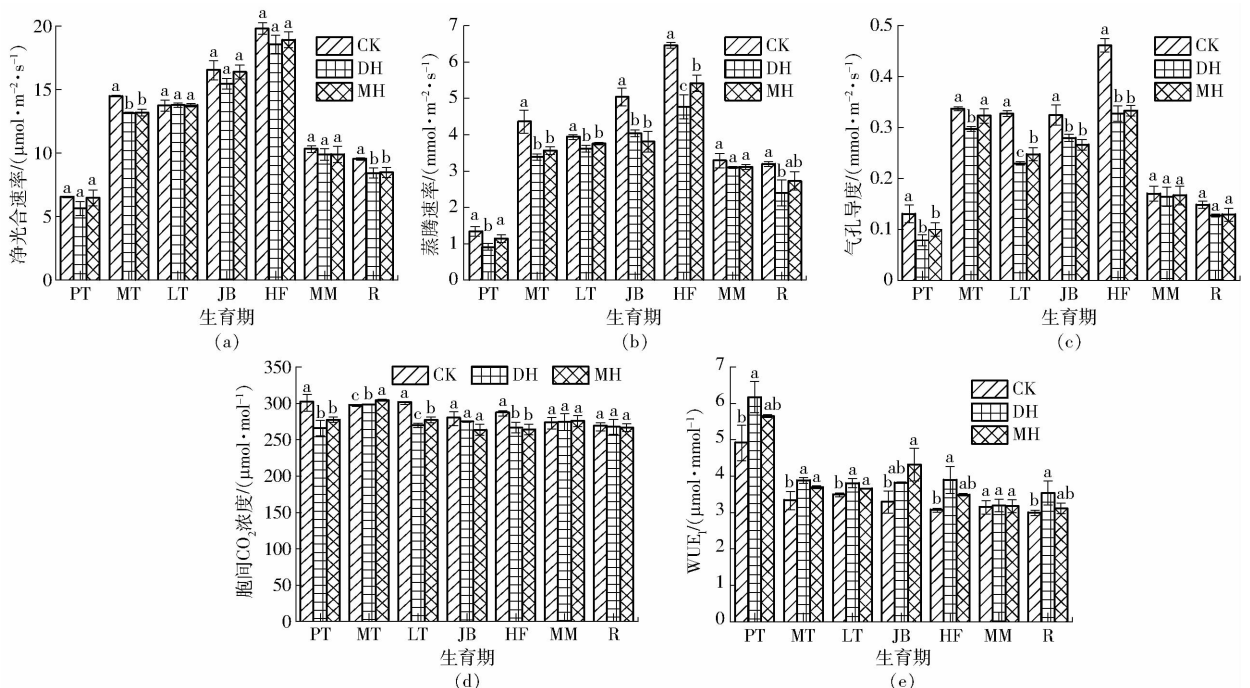


图 1 不同处理水稻光合特性及 WUE_1 变化

Fig. 1 Changes of photosynthetic characteristics and WUE_1 under different treatments of rice

之一,根系活力的大小直接影响根系对水分、养分的吸收以及地上部生理活性,而伤流强度作为衡量根系机能的综合指标,可以比较准确地反映根系活力变化^[15]。对各处理除分蘖前期外的各生育期水稻基部伤流强度进行分析可知(图2),整个生育期伤流强度呈现倒“V”型变化趋势,在抽穗开花期达到峰值,这与何春林等^[16]的研究结果一致。分蘖中期,DH和MH处理分别较CK降低18.09%和14.43%,可见生育前期早直播处理根系活力较低,这主要是由于土壤水分胁迫使根尖较早木栓化,根系活力下降;到分蘖末期,DH和MH处理却较CK处理显著升高了4.68%和2.88% ($P < 0.05$),其原因可能是由于CK处理晒田导致的外部环境条件剧烈改变,分蘖数减少,蒸腾速率减弱,蒸腾拉力降低,根系活力下降,而水分的减少并没有减弱早直播的光合作用,根系活力所受影响不大。而且CK处理中较多的无效分蘖恶化了群体中下部的光照条件,对有效分蘖根量和总根活量有抑制作用^[17]。从抽穗开花期开始,早直播处理伤流强度已逐步高于CK处理;抽穗开花期,DH和MH较CK处理升高1.50%和0.75%;乳熟期升高5.83%和3.89%,差异达显著水平 ($P < 0.05$);黄熟期升高17.35%和15.31%,三者差异显著 ($P < 0.05$),且DH处理最大。这表明早直播有利于延缓水稻根系衰老,原因可能是由于早直播较插秧淹灌使土壤中的水、肥、气、热等状况有所改善,利于后期新根不断生长,根系衰老速率减缓,根系活力较高^[18],这与陶敏之等^[19]认为水稻受旱能增强根系活力,延缓根系衰老的结论相吻合。

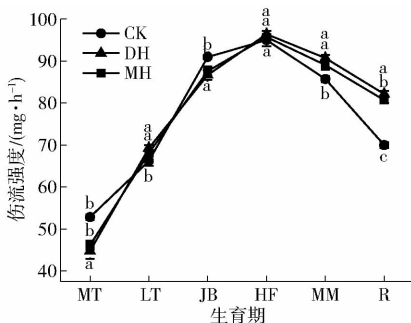


图2 不同处理水稻各生育期伤流强度变化

Fig. 2 Changes of intensity of injury flow at different growth stages of rice

2.3 不同处理水稻各器官干物质累积动态

2.3.1 干物质累积曲线

不同处理水稻各生育期不同器官干物质累积曲线如图3所示。早直播并没有改变水稻冠部和根部的整体变化趋势。叶和鞘变化趋势基本一致。整个生育期,早直播的冠部各器官的干物质累积量均小

于CK处理,DH处理叶、鞘、茎、穗干物质累积量分别较CK降低3.70%~9.09%、2.22%~7.14%、1.79%~4.35%、3.77%~12.50%,MH处理分别降低2.22%~7.83%、0.98%~4.84%、2.17%~4.65%、3.09%~12.04%。分蘖中期以前,早直播与CK处理叶、鞘干物质累积量差异显著 ($P < 0.05$),但到分蘖末期3个处理间差异并不显著 ($P > 0.05$),可能是由于分蘖前期和中期早直播处理 P_n 低于CK,引起了干物质累积量的减少,而到分蘖末期,CK处理晒田引起 P_n 下降,干物质累积速率减小。之后,水稻均进入了营养生长旺盛期,到抽穗开花期,3个处理叶、鞘干物质累积量均达到最大值,DH和MH处理叶、鞘干物质累积量分别较CK降低6.40%、4.35%和5.81%、2.17%,差异显著 ($P < 0.05$),这与郭相等^[20]研究结果一致。黄熟期,DH和MH处理叶干物质累积量分别比CK显著降低8.43%和7.83%,鞘干物质累积量降低2.64%和1.89%,差异不显著 ($P > 0.05$),表明早直播较插秧淹灌水稻叶片衰老更快,可能是由于早直播水稻叶片中叶绿素、超氧化物歧化酶和过氧化氢酶含量的降低引起了水稻叶片早衰^[21]。从抽穗开花到乳熟期,叶、鞘干物质累积量逐渐减少,但茎干物质累积量仍缓慢上升,到乳熟期,达到峰值,此时DH和MH处理较CK分别下降了2.62%和2.25%,差异显著 ($P < 0.05$)。分析穗干物质累积量:拔节孕穗期,3个处理间并无显著差异,然而从抽穗开花期开始,DH和MH处理穗干物质累积量分别较CK显著降低,到黄熟期,DH、MH处理分别较CK显著降低12.42%和12.04% ($P < 0.05$)。这表明从抽穗开花期开始,早直播处理较低 P_n 导致的冠部营养器官干物质累积量的下降似乎造成了“源”的供应不足,导致籽粒“库”的形成受到一定限制。分蘖前期和中期,DH和MH根干物质累积量低于CK处理,但差异并不显著 ($P > 0.05$),从分蘖末期开始,DH和MH的根部干物质累积量逐渐高于CK,并且差距越来越大,DH升高1.18%~16.93%,MH升高0.80%~16.72%,到抽穗开花期,早直播和插秧淹灌的根干物质累积量均达到最大值,DH和MH分别比CK高4.24%和3.83%,差异显著 ($P < 0.05$),原因可能是早直播引起的土壤水分胁迫前期虽然抑制了根系的表层发育,但是后期却促进了根系的下扎,提高了深层土壤中的根系比列^[22],从而导致从分蘖末期开始DH和MH处理水稻的根干物质累积量逐渐高于CK。黄熟期,DH和MH处理分别显著高于CK处理16.93%和16.72% ($P < 0.05$),说明早直播较常规插秧淹灌水稻根系衰老缓慢,这与蔡

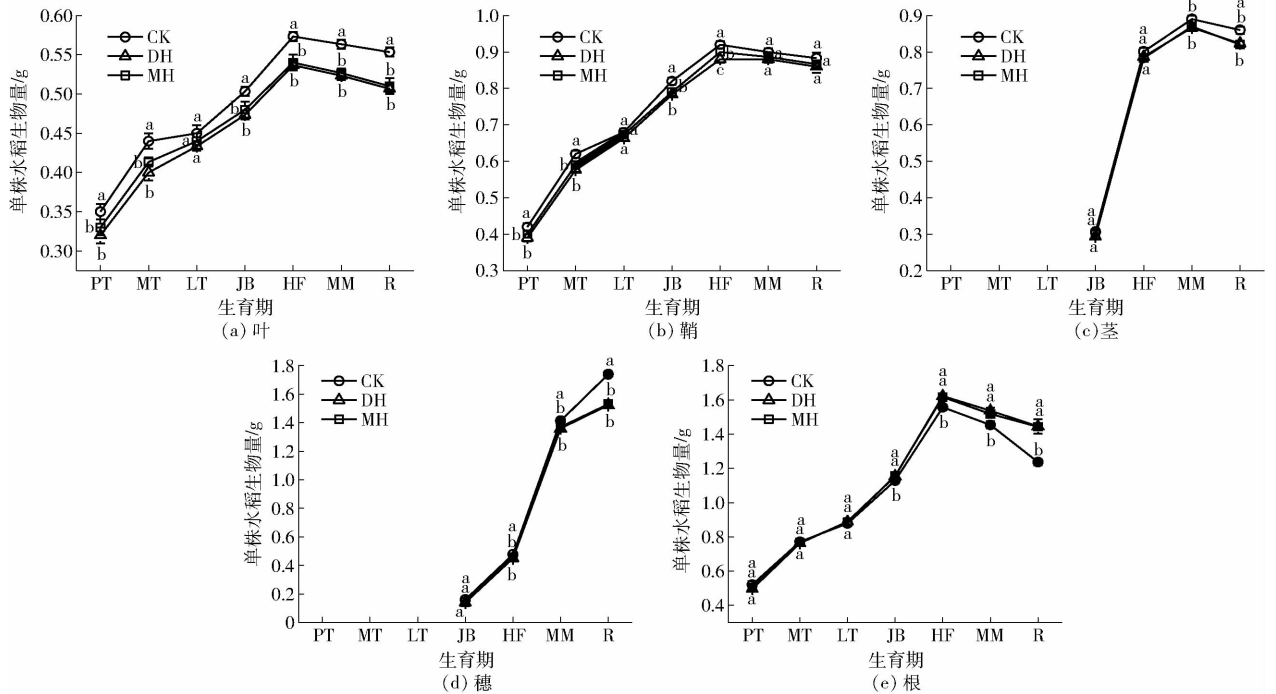


图3 不同处理水稻各生育期不同器官干物质累积曲线

Fig.3 Dry matter accumulation curves of different organs at different growth stages of rice

永萍等^[21]研究结果相吻合。

2.3.2 干物质累积速率

水稻干物质累积速率与种植模式有关,不同处理水稻干物质累积速率见表2。可以看出,DH、MH和CK处理的冠部和总干物质累积速率具有相似的变化趋势,早直播的冠部干物质累积速率在各生育期(除分蘖中期到末期外)均低于插秧淹灌,但是根部干物质累积速率均高于插秧淹灌。3个处理的冠部、根部和总干物质最大累积速率均出现在拔节孕穗到抽穗开花期,CK处理冠部干物质最大累积速率最高,DH处理根部和总干物质最大累积速率最高。相比CK处理,DH和MH处理的冠部干物质最大累积速率分别降低1.80%和1.46%,根部干物质最大累积速率分别升高9.35%和7.48%,总干物质最大累积速率分别升高1.58%和1.25%,差异不显著($P>0.05$),可见滴灌早直播种植并没有改变水稻生长的基本规律,而且相比插秧淹灌种植干物质最大累积速率更大,累积时间更短,这与朱齐超等^[23]的研究结果相吻合。具体分析3个处理各部位干物质累积速率可以发现,叶最大累积速率出现在分蘖前期到中期和拔节孕穗到抽穗开花期,鞘干物质最大累积速率出现在分蘖前期到中期,茎、根干物质最大累积速率均出现在拔节孕穗到抽穗开花期,而穗干物质最大累积速率出现在抽穗开花到乳熟期,此时,叶、鞘、茎、根干物质累积速率均表现出下降趋势,穗部干物质累积速率却出现上升趋势,这种各器官干物质累积速率此消彼长的过程,也是水稻库源

关系相互协调的结果^[17]。分蘖中期到末期相比分蘖前期到中期CK处理冠部和根部干物质累积速率下降幅度较大,分别下降51.72%和14.25%,但是DH和MH处理下降幅度较小,只下降了10.00%、5.50%和19.51%、9.32%,表明对CK处理干物质累积影响较大的分蘖末期,对早直播而言,影响并不大。比较不同部位干物质累积速率可知,拔节孕穗到抽穗开花期3个处理由大到小均表现为:茎、根、穗、鞘、叶,虽然DH和MH处理茎干物质累积速率较CK分别降低0.21%和2.23%,但根干物质累积速率却分别升高了9.35%和7.48%,这说明不同处理相同时期相同部位的干物质累积速率有所差异,早直播种植在插秧淹灌种植水稻根系干物质累积速率降低的时期仍可保持较高值,从而有效延缓了水稻后期根系的衰老,提高了根系的吸收能力,这也是早直播水稻为了适应水分亏缺环境而采取的一种方法。乳熟到黄熟期,DH和MH冠部干物质累积速率较CK显著下降69.06%和72.65%($P<0.05$),但根部干物质累积速率却显著升高58.13%和65.49%($P<0.05$),表明生育后期早直播水稻冠部营养器官衰老较快,但是根部器官衰老更慢,使得总干物质累积速率放缓。

2.4 不同处理水稻根冠比动态变化

根冠比可以反映植株地下部与地上部之间干物质累积的分配比例。对图4所示不同处理水稻各生育期根冠比变化进行分析可知,整个生育期不同处理间均以DH处理最大,CK处理最小,DH、MH分别

表 2 不同处理水稻不同生育期各器官干物质累积速率

Tab. 2 Cumulative rate of dry matter accumulation at different growth stages of rice

mg/d

生育期	处理	叶	鞘	茎	穗	根	冠部	总干物质
PT - MT	CK	5.63 ^a	12.50 ^a			15.65 ^a	18.13 ^a	33.77 ^a
	DH	5.00 ^a	11.67 ^a			16.67 ^a	16.67 ^a	33.33 ^a
	MH	5.21 ^a	11.88 ^a			16.31 ^a	17.08 ^a	33.40 ^a
MT - LT	CK	1.25 ^a	7.50 ^a			13.42 ^a	8.75 ^b	22.17 ^b
	DH	4.17 ^a	10.83 ^a			15.75 ^a	15.00 ^a	30.75 ^a
	MH	3.33 ^a	10.42 ^a			14.79 ^a	13.75 ^a	28.54 ^a
LT - JB	CK	2.96 ^a	7.78 ^a	17.04 ^a	8.89 ^a	13.87 ^a	36.67 ^a	50.54 ^a
	DH	2.22 ^b	6.67 ^a	16.30 ^a	7.78 ^a	14.74 ^a	32.96 ^b	47.70 ^b
	MH	2.22 ^b	6.48 ^a	16.67 ^a	7.96 ^a	15.02 ^a	33.33 ^b	48.35 ^b
JB - HF	CK	5.83 ^a	8.33 ^a	41.20 ^a	26.39 ^a	35.67 ^a	81.75 ^a	117.42 ^a
	DH	5.28 ^a	8.06 ^a	41.11 ^a	25.83 ^a	39.00 ^a	80.28 ^a	119.28 ^a
	MH	5.00 ^a	9.17 ^a	40.28 ^a	26.11 ^a	38.33 ^a	80.56 ^a	118.89 ^a
HF - MM	CK	-0.45 ^a	-0.91 ^a	4.04 ^a	42.58 ^a	-4.68 ^a	45.26 ^a	40.57 ^a
	DH	-0.61 ^a	0.00 ^a	3.64 ^a	41.36 ^a	-3.91 ^a	44.39 ^a	40.48 ^a
	MH	-0.61 ^a	-0.61 ^a	3.94 ^a	41.50 ^a	-4.47 ^a	44.23 ^a	39.76 ^a
MM - R	CK	-0.36 ^a	-0.60 ^a	-1.07 ^a	11.64 ^a	-7.76 ^b	9.62 ^a	1.86 ^a
	DH	-0.60 ^a	-0.71 ^a	-1.55 ^a	5.83 ^b	-3.25 ^a	2.98 ^b	-0.27 ^a
	MH	-0.60 ^a	-0.71 ^a	-1.79 ^a	5.73 ^b	-2.68 ^a	2.63 ^b	-0.05 ^a

注: 每列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著, 下同。

较 CK 增大 3.36% ~ 27.10% 和 2.29% ~ 26.41%。随着生育进程, 3 个处理根冠比先增高后降低, 趋势保持一致, 且均在分蘖末期达最大值, 但差异未达显著性水平 ($P > 0.05$)。从拔节孕穗期开始, DH 与 MH 处理的根冠比分别较 CK 增大 8.34% ~ 27.10% 和 7.03% ~ 26.41%, 且差异达到显著性水平 ($P < 0.05$), DH 较 MH 增大 0.55% ~ 1.88%, 差异不显著 ($P > 0.05$)。至黄熟期, 早直播与 CK 处理水稻根冠比的差距达到整个生育期差距中的最大值。可见从拔节孕穗期开始, 早直播水稻为了适应干旱环境, 增加光合产物向根系分配, 使根系向深层土壤扩展, 以提高根系与地上部分的比列^[24]。这表明, 早直播可以减缓生育后期水稻根系的衰退, 使根系在生殖生长期保持较高的吸水能力, 提高对深层土壤储水的吸收能力, 进而提高水稻产量和灌溉水利用效率^[12]。

2.5 不同处理水稻各生育期耗水量与总灌水量

分析表 3 不同处理水稻各生育期耗水量可知, 早直播处理各生育期耗水量均低于常规插秧淹灌处理, 差异显著 ($P < 0.05$), 且 DH 处理最低。3 个处理各生育期耗水量表现出一致性, 以拔节孕穗期为最大, 分蘖前期或乳熟期最小, DH 与 MH 处理在拔节孕穗期分别较 CK 处理降低 75.60% 和 56.03%, 差异显著 ($P < 0.05$), 其他生育期 DH 与 MH 处理分别较 CK 降低 19.66% ~ 71.74% 和 3.25% ~ 42.98%, 差异显著 ($P < 0.05$)。全生育期耗水量由

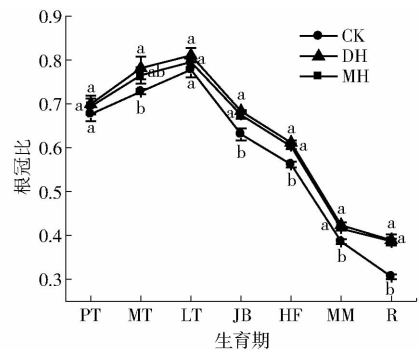


图 4 不同处理水稻各生育期根冠比变化

Fig. 4 Changes of root and crown ratio at different growth stages of rice

大到小表现为: CK、MH、DH, DH 处理仅为 172.67 mm, 较 CK 处理节省耗水 64.42%, 较 MH 处理节省 39.67%, 3 者差异显著 ($P < 0.05$), MH 处理较 CK 处理节省 41.03%, 差异显著 ($P < 0.05$)。这表明水稻早直播种植模式相比常规插秧淹灌种植模式全生育期耗水量显著降低 ($P < 0.05$), 且滴灌早直播耗水量最少。DH 处理总灌水量较 CK 显著减少 63.88% ($P < 0.05$), 较 MH 处理节约灌水 39.52%, 可见滴灌早直播种植可显著降低灌溉用水量, 对区域农业水资源可持续利用具有十分重要的意义, 社会效益显著。

2.6 不同处理水稻产量构成因子与 WUE_y

不同处理水稻产量及其构成因子与 WUE_y 见表 4。DH 和 MH 处理产量分别为 7.27×10^3 kg/hm² 和 7.34×10^3 kg/hm², 分别较 CK 处理降低 5.17%

表3 不同处理水稻各生育期耗水量与总灌水量

Tab.3 Water consumption and total irrigation water amount in different growth stages of rice

处理	各生育期耗水量							全生育期耗水量	总灌水量
	PT	MT	LT	JB	HF	MM	R		
CK	35.90 ^a	97.81 ^a	22.58 ^a	170.60 ^a	56.68 ^a	69.26 ^a	32.49 ^a	485.32 ^a	455.26 ^a
DH	10.14 ^c	33.42 ^c	17.21 ^c	41.62 ^c	21.80 ^c	22.38 ^c	26.10 ^b	172.67 ^c	164.44 ^c
MH	24.49 ^b	55.78 ^b	21.84 ^b	75.01 ^b	38.02 ^b	44.52 ^b	26.53 ^b	286.19 ^b	271.91 ^b

表4 不同处理水稻产量及其构成因子与 WUE_yTab.4 Rice yield and its components and WUE_y under different treatments

处理	穗长/cm	有效穗数/ (个·m ⁻²)	穗粒数/个	结实率/%	千粒质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)	WUE _y / (kg·m ⁻³)
CK	(17.38 ± 0.09) ^a	(420.00 ± 12.00) ^b	(68.30 ± 1.08) ^a	(95.45 ± 0.39) ^a	(27.95 ± 0.15) ^a	(7.65 ± 0.11) × 10 ³ ^a	1.58 ^c
DH	(16.76 ± 0.14) ^b	(476.00 ± 5.29) ^a	(59.50 ± 1.79) ^b	(94.84 ± 0.63) ^a	(27.10 ± 0.98) ^a	(7.27 ± 0.24) × 10 ³ ^a	4.21 ^a
MH	(16.80 ± 0.04) ^b	(474.67 ± 10.02) ^a	(59.78 ± 1.03) ^b	(95.17 ± 0.61) ^a	(27.15 ± 0.44) ^a	(7.34 ± 0.32) × 10 ³ ^a	2.56 ^b

和 4.31%，但差异并不显著 ($P > 0.05$)。可见与常规插秧处理相比，早直播处理在节水同时并没有造成产量上显著下降；DH 和 MH 处理穗长分别较 CK 处理显著降低 3.70% 和 3.41% ($P < 0.05$)，穗粒数分别较 CK 处理显著下降 14.79% 和 14.25% ($P < 0.05$)，但有效穗数较 CK 处理显著上升 ($P < 0.05$)，上升幅度分别为 13.33% 和 13.02%。可见与插秧淹灌处理相比，早直播处理单位面积上有效穗数的增加弥补了穗长和穗粒数的降低所引起产量上的下降，使得 3 个处理最终产量上差异并不显著 ($P > 0.05$)。对于结实率、千粒质量等产量因子，3 个处理间均无显著性差异。这与王志军等^[13]的膜下滴灌水稻种植较淹灌种植的单位面积有效穗数、结实率、千粒质量均显著下降的结果不太一致，也与何春林等^[25]的沟灌渗透直播水稻的有效穗数、穗长、穗粒数、千粒质量等产量因子均显著高于常规淹水处理的结果不完全相同。WUE_y 与全生育期耗水量表现出负相关关系，CK 处理最低，DH 处理最高，为 4.21，较 CK 提高 2.66 倍，较 MH 提高 1.64 倍，差异显著 ($P < 0.05$)，MH 较 CK 提高 1.62 倍，差异显著 ($P < 0.05$)。这表明水稻早直播种植模式相比常规插秧淹灌种植模式在没有造成产量显著下降的

情况下，产量水平上的水分利用效率显著提高，而且滴灌早直播种植模式 WUE_y 相比漫灌早直播种植模式升高更显著 ($P < 0.05$)，这与王志军等^[13]的研究结果一致。

2.7 不同处理水稻成本比较分析

不同处理的水稻生产成本比较分析见表 5。可以看出，早直播相比常规插秧种植省去了泡田、打浆、育苗和插秧等过程，节省成本 3 700 元/hm²。而且相比常规插秧和漫灌早直播种植的人工施肥方式，由于滴灌早直播种植采用水肥一体化技术，使得施肥的人工费用成本降低 760 元/hm²。滴灌早直播较常规插秧种植节省水费 757 元/hm²，较漫灌早直播节省 280 元/hm²。虽然 DH 与 MH 处理的除草费用较 CK 分别增加 230 元/hm² 和 840 元/hm²，但病虫害防治成本却分别降低 380 元/hm² 和 70 元/hm²，这是由于早直播种植改变了传统插秧种植的土体通透性，减少了传统水田种植水稻植株郁闭造成的高温高湿，有效防止了植株病虫害的发生，降低了农药成本的投入。

2.8 不同处理水稻经济效益比较分析

不同处理的水稻经济效益比较分析见表 6。常规插秧种植总成本最大，这主要是由于整地、育苗和

表5 不同处理水稻生产成本对比

Tab.5 Comparison of cost of rice production under different treatments

处理	旋耕		打浆		育苗	插秧	播种	种子	施肥		除草		病虫害防治		滴灌	收割		合计		
	机械	人工	机械	人工					化肥	人工	除草	人工	农药	人工		水费	带等		机械	人工
CK	400	300	400	300	1 850	1 150	0	430	1 947	870	310	300	420	380	1 184	0	650	400	11 291	
DH	400	300	0	0	0	0	669	750	1 947	110	410	430	220	200	427	1 750	550	350	8 513	
MH	400	300	0	0	0	0	669	750	1 947	870	665	785	350	380	707	0	550	350	8 723	

注：表中 DH 处理的滴灌带等器材成本折合为每年的投入成本，滴灌带等器材的一次性投入成本为 3 500 元，正常情况下，滴灌带的使用寿命一般为 2~4 a，若按照滴灌带最低使用年限 2 a 计算，则 DH 处理每年的滴灌管带器材投入相当于 1 750 元。因此表中数据均为每年成本投入。

表 6 不同处理水稻经济效益分析

Tab. 6 Analysis on economic benefit of different treatments of rice

处理	整地成本/ (元·hm ⁻²)	育苗、插秧 及播种成本/ (元·hm ⁻²)	种子、施肥 成本/ (元·hm ⁻²)	除草及病虫 害防治成本/ (元·hm ⁻²)	水费、器材 及收割成本/ (元·hm ⁻²)	总成本/ (元·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	产值/ (元·hm ⁻²)	经济效益/ (元·hm ⁻²)
CK	1 400	3 000	3 247	1 410	2 234	11 291	7 650	19 890	8 599
DH	700	669	2 807	1 260	3 077	8 513	7 270	18 902	10 389
MH	700	669	3 567	2 180	1 607	8 723	7 340	19 084	10 361

插秧成本的增加引起总成本升高。滴灌早直播经济效益较常规插秧种植增加 1 790 元/hm², 较漫灌早直播种植增加 28 元/hm²。虽然滴灌带等器材的一次性成本投入较大, 但正常情况下, 滴灌带的使用寿命一般为 2~4 a, 因此对于实际生产而言, 滴灌带等器材成本并非每年都有投入。因此, 滴灌早直播种植不仅大幅度减少了灌溉用水量, 显著提高了水稻的 WUE_y, 而且具有较为可观的经济效益。

3 讨论

光合作用的强弱直接影响着作物的干物质累积速率和产量形成, 不同种植模式水稻光合作用大小不同。有研究指出水稻控灌和旱作净光合速率较淹灌均有所降低^[26], 王志军等^[27]也得出水稻膜下滴灌栽培模式在乳熟期较淹灌栽培叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 和产量均下降的结论。但也有学者提出水稻湿润灌较淹灌在齐穗和齐穗后净光合速率显著提高^[28]。本试验结果表明, 早直播模式下水稻的 P_n (分蘖末期除外)、 T_r 、 G_s 在各生育期较常规插秧淹灌均有所下降, 其中滴灌早直播下降幅度最大。利用 FARQUHAR 等^[29]提出的方法进一步分析滴灌与漫灌早直播水稻 P_n 下降的原因可知, 在抽穗开花期之前由于 G_s 和 C_i 的变化具有一致性, 可以判断此时为气孔因素引起 P_n 的下降, 这种下降具有可逆性。而从抽穗开花期开始 G_s 和 C_i 的变化趋势相反, 从拔节孕穗至乳熟期, 在 G_s 降低的情况下, C_i 却出现升高, 说明此时早直播水稻叶肉细胞的光合能力降低, 此为非气孔因素导致 P_n 不可逆性的降低, 后期即使提高土壤含水率, P_n 也难以得到提高。因此对于早直播水稻而言, 增大抽穗开花期的灌水频率, 提高抽穗开花期的土壤含水率, 对于增大净光合速率、提高冠部干物质累积速率和产量具有重要意义。

研究作物的干物质累积动态变化和累积速率对于揭示产量形成具有重要作用。本试验研究表明, 早直播和常规插秧淹灌种植水稻的干物质最大累积速率均出现在拔节孕穗至抽穗开花期, 这一点与纪洪亭等^[30]的超级杂交稻干物质最大累积速率出现在拔节孕穗到抽穗开花期的研究结果一致, 杨惠杰

等^[31]也得出类似结论。但是早直播处理的各生育期(分蘖中期至末期除外)冠部干物质累积速率、穗长以及穗粒数均低于常规插秧淹灌, 根部干物质累积速率在各生育期却较高, 这也导致了早直播水稻在各个生育期均具有较高的根冠比, 而且即使在生育后期, 根系的伤流强度仍然较高, 以上所有因素可能正是造成早直播水稻穗长和穗粒数均下降的原因, 早直播水稻较高的根部干物质累积速率和根系活力虽然有利于根系下扎、提高水分利用效率以及延缓根系衰老, 但是这也造成了抽穗后期较大的“源”与籽粒“库”争夺光合产物, 阻止了籽粒充实, 造成穗长和穗粒数下降显著。可见, 早直播水稻抽穗开花期之后较高的根系干物质累积速率和根系活力对穗部籽粒的生长可能是一种负向优势^[32], 这与蔡永萍等^[21]的研究结果相吻合。因此, 如何降低早直播水稻抽穗开花期之后较高的根系干物质累积速率和根系活力, 或者提高对较高根系活力的利用率, 增大冠部营养器官的干物质累积量和累积速率, 促进光合产物更多的流向籽粒“库”, 提高穗长和穗粒数, 仍有待进一步研究。

根系是作物吸收养分和水分的重要器官, 根系活力直接影响着冠部的生长发育和产量的形成。陶敏之等^[19]的研究结果表明, 水稻受旱能增强根系活力, 延缓根系衰老, 而且在抽穗开花期受旱之后根系活力提升更显著。蔡永萍等^[21]研究也指出, 旱作水稻根系伤流强度在抽穗开花后期较水作水稻有所提高, 根系活力和代谢能力增强。张凤翔等^[33]也得出类似的结论。本试验研究发现, 早直播水稻在分蘖末期和抽穗开花期之后的各生育期的根系活力均高于常规插秧淹灌水稻, 且滴灌早直播最高, 分析其原因可能是由于早直播种植改善了常规插秧淹灌种植土壤长期淹水情况下的土体通透性, 提高了土壤的氧化还原电位^[34]、土壤酶活性、微生物量碳氮^[35], 使得水稻根际环境改变, 促进根系泌氧, 对水稻根系生长更为有利^[36], 这与李丽等^[18]的研究结果一致。作物根系发达, 活力大, 则作物吸收养分和水分的空间大, 有利于吸收土壤中的水分和养分, 提高氮素利用率^[37]。因此早直播水稻较大的根系活力有助于促进生长后期对氮素的吸收。另一方面, 对于

旱直播水稻而言,水稻从出苗期到分蘖期时间较长,此时田间施用了大量的基肥,容易产生径流、淋溶等氮素损失,因此朱齐超等^[38]提出可以根据水稻苗期养分吸收量少、中后期吸收量大的特点,适当降低基肥的比例,增加追肥的比例,以提高肥料利用率。相比常规插秧淹灌种植和漫灌旱直播种植,滴灌旱直播通过水肥一体化技术将肥料滴灌于水稻根部,提高了肥料的利用效率^[9]。已有研究表明,水田的氮肥和磷肥的径流损失是旱田的4倍多^[39-40],节水灌溉模式可以有效降低稻田氮素淋失风险^[41-42]。李荣刚等^[43]研究表明,节水灌溉可以有效降低氮素的淋溶损失,提高作物对氮素的利用率。尹海峰等^[44]研究表明,硝态氮是稻田中氮素渗漏淋溶的主要形式,而控制灌溉使得稻田中硝态氮淋溶量较常规灌溉降低16%~49%。石敏等^[45]也得出控制灌溉较常规灌溉氮素淋失总量减小的结论。因此通过改变种植模式,采用节水灌溉方式以及合理施肥对于提高水分和肥料的利用效率具有重要作用。

滴灌旱直播种植不仅提高了水分、肥料利用效率,减少了温室气体排放,有利于构建环境友好型社会^[46],而且其产量和经济效益明显。已有研究报道指出,由新疆天业集团研发的膜下滴灌水稻栽培技术在产量和经济效益上均取得了巨大的成功^[46],膜下滴灌栽培不仅节约了水费和肥料用量,而且节省劳动力投入,增加了经济效益,在我国很多地区具有广阔的应用前景^[47-48]。本试验研究表明,在省去覆膜等原材料工序之后,采用滴灌水稻旱直播种植依

然可以取得较为可观的经济效益。

4 结论

(1)旱直播水稻的光合作用较插秧淹灌处理有所降低,但是 WUE_i 上升较大。滴灌与漫灌旱直播处理 P_n (分蘖末期除外)、 T_i 和 G_i 在整个生育期内均低于插秧淹灌, WUE_i 均高于插秧淹灌。3个处理的 C_i 在整个生育期波动幅度不大。

(2)3个处理的水稻根冠及干物质积累情况明显不同,旱直播种植水稻冠部衰老较快,但是根部器官衰老缓慢。滴灌与漫灌旱直播处理的叶、鞘、茎、穗等冠部干物质积累量、冠部干物质积累速率(分蘖中期至末期除外)、冠部最大累积速率整个生育期均低于插秧淹灌,但是根部干物质积累量(分蘖前期与中期除外)、根部干物质积累速率、根系活力(分蘖中期与拔节孕穗期除外)、根冠比均高于插秧淹灌,且根部和总干物质最大累积速率及根冠比均以滴灌旱直播最高。

(3)滴灌旱直播种植全生育期耗水量最少, WUE_y 最高,插秧淹灌处理耗水量最多, WUE_y 最低。滴灌与漫灌旱直播处理的千粒质量和结实率较插秧淹灌下降不显著($P > 0.05$),穗长和穗粒数下降显著($P < 0.05$),有效穗数上升显著($P < 0.05$)。3个处理产量差异不显著($P > 0.05$)。

(4)滴灌旱直播种植相比常规插秧淹灌种植除具有较好的经济效益外(经济效益增加1790元/hm²),可节约灌溉用水63.88%,社会效益显著。

参 考 文 献

- 程建平,曹湊贵,蔡明历,等.不同灌溉方式对水稻产量和水分生产率的影响[J].农业工程学报,2006,22(12):28-33. CHENG Jianping, CAO Cougui, CAI Mingli, et al. Effects of different irrigation modes on the yield and water productivity of rice [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 28-33. (in Chinese)
- 张忠学,郑恩楠,王长明,等.不同水氮处理对水稻荧光参数和光合特性的影响[J/OL].农业机械学报,2017,48(6):176-183. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170623&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.023. ZHANG Zhongxue, ZHENG Ennan, WANG Changming, et al. Effect of different water and nitrogen levels on chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic characteristics of rice [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 176-183. (in Chinese)
- 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):145-155. ZOU Haiyang, ZHANG Fucang, ZHANG Yuxin, et al. Optimal drip irrigation and fertilization amount enhancing root growth and yield of spring maize in Hexi region of China [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 145-155. (in Chinese)
- FAROOQ M, SIDDIQUE KADAMBOT H M, REHMANN H, et al. Rice direct seeding: experiences, challenges and opportunities [J]. Soil & Tillage Research, 2011, 111(2): 87-98.
- 邓飞,王丽,刘利,等.不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响[J].作物学报,2012,38(10):1930-1942. DENG Fei, WANG Li, LIU Li, et al. Effects of cultivation methods on dry matter production and yield of rice under different ecological conditions [J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(10): 1930-1942. (in Chinese)
- 何军,崔远来,张大鹏,等.不同水肥耦合条件下水稻干物质积累与分配特征[J].灌溉排水学报,2010,29(5):1-5. HE Jun, CUI Yuanlai, ZHANG Dapeng, et al. Characteristics of rice dry matter accumulation and distribution under different water and fertilizer treatment [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(5): 1-5. (in Chinese)
- 李树杏,郭慧,李敏,等.幼穗形成期水分胁迫后复水对水稻叶片光合特性及物质生产的影响[J].华北农学报,2013, 28(5):133-137. LI Shuxing, GUO Hui, LI Min, et al. Young panicle formation stage after water stress on the production and transport of photosynthate in rice [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, 28(5): 133-137. (in Chinese)
- 郭慧,李树杏,杨占烈,等.覆膜直播与常规手栽种植方式对水稻光合物质生产特征的影响[J].华北农学报,2016,

- 31(4):146-152.
GUO Hui, LI Shuxing, YANG Zhanlie, et al. Effect of characteristics of photosynthesis and matter production of rice under two different planting methods with film mulching way of direct seeding and traditional manual transplanting[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016,31(4):146-152. (in Chinese)
- 9 王志军, 谢宗明, 田又升, 等. 膜下滴灌和淹灌两种栽培模式下水稻光合生理特性的研究[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(2):150-158.
WANG Zhijun, XIE Zongming, TIAN Yousheng, et al. Photosynthetic characteristics of rice under drip irrigation with plastic film mulching and continuous flooding[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015,29(2):150-158. (in Chinese)
- 10 徐俊增, 彭世彰, 魏征, 等. 不同供氮水平及水分调控条件下水稻光合作用光响应特征[J]. *农业工程学报*, 2012,28(2):72-76.
XU Junzeng, PENG Shizhang, WEI Zheng, et al. Characteristics of rice leaf photosynthetic light response curve with different water and nitrogen regulation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012,28(2):72-76. (in Chinese)
- 11 庞桂斌, 徐征和, 杨士红, 等. 控制灌溉水稻叶片水分利用效率影响因素分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2017,48(4):233-241. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170430&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.030.
PANG Guibin, XU Zhenghe, YANG Shihong, et al. Influence factors analysis of rice leaf water use efficiency under controlled irrigation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017,48(4):233-241. (in Chinese)
- 12 张岁岐, 徐炳成. 根系与植物高效用水[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- 13 王志军, 叶春秀, 李有忠, 等. 不同栽培模式下水稻各生育期光合生理指标的比较研究[J]. *华北农学报*, 2017,32(1):125-134.
WANG Zhijun, YE Chunxiu, LI Youzhong, et al. Study on photosynthetic physiological indexes at different periods of rice under different cultivation patterns[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017,32(1):125-134. (in Chinese)
- 14 卢从明, 张其德, 匡廷云, 等. 水分胁迫抑制水稻光合作用的机理[J]. *作物学报*, 1994,20(5):601-606.
LU Congming, ZHANG Qide, KUANG Tingyun, et al. The mechanism for the inhibition of photosynthesis in rice by water stress[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1994,20(5):601-606. (in Chinese)
- 15 赵全志, 黄丕生, 凌启鸿, 等. 水稻颖花伤流量与群体质量的关系[J]. *南京农业大学学报*, 2000,23(3):9-12.
ZHAO Quanzhi, HUANG Pisheng, LING Qihong, et al. The relationship between spikelet-bleeding-intensity and population quality of rice[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2000,23(3):9-12. (in Chinese)
- 16 何春林, 陈彪, 郭荣发. 沟灌渗透对直播水稻生长发育及产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2004(5):10-13.
HE Chunlin, CHEN Biao, GUO Rongfa. Influence of penetration through ditch irrigation on the growth and yield of direct-seeding paddy[J]. *Water Saving Irrigation*, 2004(5):10-13. (in Chinese)
- 17 官春云. 现代作物栽培学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- 18 李丽, 陈林, 张婷婷, 等. 膜下滴灌对水稻根系形态及生理性状的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2015,33(6):536-540.
LI Li, CHEN Lin, ZHANG Tingting, et al. Effects of mulch drip irrigation on the form of rice root and physiological characteristics[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015,33(6):536-540. (in Chinese)
- 19 陶敏之, 俞双恩, 叶兴成, 等. 农田水位调控对水稻根系活力和产量的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2014(10):73-75.
TAO Minzhi, YU Shuang'en, YE Xingcheng, et al. The effect of controlled water level on root activity and yield of rice[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(10):73-75. (in Chinese)
- 20 郭相平, 李小朴, 陆红飞, 等. 水稻分蘖期旱涝交替胁迫对干物质累积及氮素吸收的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(2):20-24.
GUO Xiangping, LI Xiaopu, LU Hongfei, et al. Study on dry matter accumulation and nitrogen uptake under alternating drought and flooding stress in rice tillering stage[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015,34(2):20-24. (in Chinese)
- 21 蔡永萍, 杨其光, 黄义德. 水稻水作与旱作对抽穗后剑叶光合特性、衰老及根系活性的影响[J]. *中国水稻科学*, 2000, 14(4):219-224.
CAI Yongping, YANG Qiguang, HUANG Yide. Effect of rice cultivated under paddy and upland condition on photosynthesis and senescence of flag leaf and activity of root system after heading[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2000,14(4):219-224. (in Chinese)
- 22 PASTERNAK T, RUDAS V, POTTERS G, et al. Morphogenic effects of abiotic stress: reorientation of growth in seedlings[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005,53(3):299-314.
- 23 朱齐超, 朱金龙, 危常州, 等. 不同施氮水平对膜下滴灌水稻干物质积累和养分吸收规律的影响[J]. *新疆农业科学*, 2013,50(3):433-439.
ZHU Qichao, ZHU Jinlong, WEI Changzhou, et al. Effects of nitrogen rates on dry matter accumulation and nutrient absorption of rice under film mulch with drip irrigation[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2013,50(3):433-439. (in Chinese)
- 24 许大全. 光合作用学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- 25 何春林, 陈彪, 郭荣发, 等. 沟灌渗透对直播水稻干物质积累和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2005,23(1):65-69.
HE Chunlin, CHEN Biao, GUO Rongfa, et al. Effects of water penetration in furrow irrigation on the dry matter accumulation and yield of directly sown rice[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005,23(1):65-69. (in Chinese)
- 26 何海兵, 武立权, 杨茹, 等. 干旱区控制灌溉下水稻光合特性与蒸腾效率研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016,47(9):186-193. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160927&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.027.
HE Haibing, WU Liqun, YANG Ru, et al. Photosynthesis characteristics and transpiration efficiency of rice plants under controlled irrigation technology in arid region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9):186-193. (in Chinese)
- 27 王志军, 叶春秀, 董永梅, 等. 滴灌和淹灌栽培模式下水稻光合生理、荧光参数及产量构成因素分析[J]. *植物生理学报*, 2016,52(5):723-735.
WANG Zhijun, YE Chunxiu, DONG Yongmei, et al. Photosynthetic physiology, chlorophyll fluorescence parameters and yield components of rice under drip irrigation with plastic film mulching and continuous flooding[J]. *Plant Physiology Journal*, 2016, 52(5):723-735. (in Chinese)

- 28 曾翔, 李阳生, 谢小立, 等. 不同灌溉模式对杂交水稻生育后期根系生理特性和剑叶光合特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2003,17(4):355-359.
ZENG Xiang, LI Yangsheng, XIE Xiaoli, et al. Effects of different irrigation patterns on physiological characteristics of root and photosynthetic traits of flag leaf after flowering stage in hybrid rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003,17(4):355-359. (in Chinese)
- 29 FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant physiology, 1982, 33(3):317-345.
- 30 纪洪亭, 冯跃华, 何腾兵, 等. 超级杂交稻群体干物质和养分积累动态模型与特征分析[J]. 中国农业科学, 2012,45(18):3709-3720.
JI Hongting, FENG Yuehua, HE Tengbing, et al. A dynamic model of dry matter and nutrient accumulation in super hybrid rice and analysis of its characteristics[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012,45(18):3709-3720. (in Chinese)
- 31 杨惠杰, 李义珍, 杨仁崔, 等. 超高产水稻的干物质生产特性研究[J]. 中国水稻科学, 2001,15(4):265-270.
YANG Huijie, LI Yizhen, YANG Rencui, et al. Dry matter production characteristics of super high yielding rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2001,15(4):265-270. (in Chinese)
- 32 吴岳轩, 吴振球. 播期对亚种间杂交稻根系形态发育和生理活性的影响[J]. 作物学报, 1996,22(2):178-183.
WU Yuexuan, WU Zhenqiu. Effect of sowing date on the morphological development and physiological activities of the root system of intersubspecific hybrid rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 1996,22(2):178-183. (in Chinese)
- 33 张凤翔, 周明耀, 周春林, 等. 水肥耦合对水稻根系形态与活力的影响[J]. 农业工程学报, 2006,22(5):197-200.
ZHANG Fengxiang, ZHOU Mingyao, ZHOU Chunlin, et al. Effects of water and fertilizer coupling on root morphological characteristics and activities of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(5):197-200. (in Chinese)
- 34 郭庆人. 膜下滴灌水稻栽培技术对降低甲烷气体排放以及化肥、农药施用污染的探讨[J]. 作物研究, 2012,26(3):278-281.
GUO Qingren. Discussion on reducing pollution induced by methane, fertilizer and pesticide in rice with drip irrigation under mulch film [J]. Crop Research, 2012,26(3):278-281. (in Chinese)
- 35 肖新, 朱伟, 肖靛, 等. 适宜的水氮处理提高稻基农田土壤酶活性和土壤微生物量碳氮[J]. 农业工程学报, 2013,29(21):91-98.
XIAO Xin, ZHU Wei, XIAO Liang, et al. Suitable water and nitrogen treatment improves soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities of paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(21):91-98. (in Chinese)
- 36 赵锋, 徐春梅, 张卫建, 等. 根际溶氧量与氮素形态对水稻根系特征及氮素积累的影响[J]. 中国水稻科学, 2011,25(2):195-200.
ZHAO Feng, XU Chunmei, ZHANG Weijian, et al. Effects of rhizosphere dissolved oxygen and nitrogen form on root characteristics and nitrogen accumulation of rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011,25(2):195-200. (in Chinese)
- 37 STRUIK G T, BRAY J R. Root-shoot ratios of native forest herbs and zea mays at different moisture level[J]. Ecology, 1970, 51(5):892-893.
- 38 朱齐超, 危常州, 李美宁, 等. 氮肥运筹对膜下滴灌水稻生长和产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2013,27(4):440-446.
ZHU Qichao, WEI Changzhou, LI Meining, et al. Effects of nitrogen management on growth and grain yield of rice under drip irrigation with plastic film mulching[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2013,27(4):440-446. (in Chinese)
- 39 樊庆铨, 孟婷婷, 李金梦, 等. 江川灌区旱田改水田加剧水体氮磷污染[J]. 农业工程学报, 2014,30(12):79-86.
FAN Qingxin, MENG Tingting, LI Jinmeng, et al. Changing from dry field to paddy field intensifying water pollution by nitrogen and phosphorus loads in Jiangchuan irrigation area[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(12):79-86. (in Chinese)
- 40 夏小江, 胡清宇, 朱利群, 等. 太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J]. 水土保持学报, 2011,25(4):21-25.
XIA Xiaojiang, HU Qingyu, ZHU Liqun, et al. Study on dynamic changes of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field and runoff loss in Taihu region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,25(4):21-25. (in Chinese)
- 41 PENG Shizhang, YANG Shihong, XU Junzeng, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. Paddy and Water Environment, 2011,9(3):333-342.
- 42 崔远来, 李远华, 吕国安, 等. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J]. 水科学进展, 2004,15(3):280-285.
CUI Yuanlai, LI Yuanhua, LÜ Guoan, et al. Nitrogen movement and transformation with different water supply for paddy rice [J]. Advances in Water Science, 2004,15(3):280-285. (in Chinese)
- 43 李荣刚, 夏源陵, 吴安之, 等. 太湖地区水稻节水灌溉与氮素淋失[J]. 河海大学学报, 2001,29(2):21-25.
LI Ronggang, XIA Yuanling, WU Anzhi, et al. Water saving irrigation and control of nitrogen leaching in Taihu lake region[J]. Journal of Hohai University, 2001,29(2):21-25. (in Chinese)
- 44 尹海峰, 焦加国, 孙震, 等. 不同水肥管理模式对太湖地区稻田土壤氮素渗漏淋溶的影响[J]. 土壤, 2013,45(2):199-206.
YIN Haifeng, JIAO Jiaguo, SUN Zhen, et al. Nitrogen leaching losses from paddy fields under different water and fertilizer managements in Taihu lake area[J]. Soils, 2013,45(2):199-206. (in Chinese)
- 45 石敏, 肖伟华, 王春梅, 等. 施肥与灌溉对黑土区稻田氮素渗漏淋溶的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2016,14(1):42-49.
SHI Min, XIAO Weihua, WANG Chunmei, et al. Influence of fertilizer and irrigation on nitrogen percolation leaching in black soil region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016,14(1):42-49. (in Chinese)
- 46 银永安, 陈林, 汤博, 等. 膜下滴灌水稻在中国灌溉排水发展中心试验应用[J]. 北方水稻, 2015,45(6):49-50.
YIN Yongan, CHEN Lin, TANG Bo, et al. Application research of mulched drip irrigation on rice in Chinese Irrigation Drainage Development Center[J]. North Rice, 2015,45(6):49-50. (in Chinese)
- 47 银永安, 陈林, 王永强, 等. 膜下滴灌水稻技术优势及在宁夏推广前景分析[J]. 北方水稻, 2013,43(5):34-36.
YIN Yongan, CHEN Lin, WANG Yongqiang, et al. Extending prospect analysis of mulched drip irrigation on rice in Ningxia[J]. North Rice, 2013,43(5):34-36. (in Chinese)
- 48 胡成成, 陈林, 银永安, 等. 膜下滴灌水稻栽培技术在江苏南通地区推广前景分析[J]. 北方水稻, 2014,44(5):76-78.
HU Chengcheng, CHEN Lin, YIN Yongan, et al. Analysis of extending and applying on drip irrigation under plastic mulch in Nantong area[J]. North Rice, 2014,44(5):76-78. (in Chinese)