

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.037

不同灌溉方式下旱直播水稻光合特性与干物质积累动态

魏永霞^{1,2} 曹晓强¹ 冀俊超¹ 张学文¹ 刘慧³ 吴昱⁴

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;

3. 东北农业大学文理学院, 哈尔滨 150030; 4. 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150080)

摘要: 为探究东北黑土区不同灌溉方式对旱直播水稻生长生理特征的影响,按照不同的灌溉方式设置了滴灌旱直播(DH)、漫灌旱直播(MH)和淹灌旱直播(HS)3个试验处理,以当地常规的插秧淹灌(CK)为对照。通过拟合曲线定量分析了不同处理的干物质积累过程动态变化特征以及水稻各生育阶段光合特性指标的变化。结果表明,不同处理水稻干物质积累量均随着生育时间推进呈现慢-快-慢的“S”形曲线变化规律,但干物质积累量、快速增长起止时间、生长速率以及生长周期则表现出随灌溉方式的不同而不同,干物质积累量由大到小依次为HS、MH、DH、CK,其中CK处理干物质理论最大积累量为3 190.65 g/m²,而DH、MH和HS处理干物质理论最大积累量较CK增加17.74%~52.57%,为3 756.81~4 867.88 g/m²;CK处理水稻快速积累期开始于分蘖中期,其他处理水稻快速积累期开始于分蘖中期向分蘖末期过渡阶段,不同处理的水稻干物质快速积累期均结束于乳熟期。不同灌溉方式的光合特性指标也有所不同,抽穗开花期后,旱直播处理叶绿素SPAD较CK处理下降快;除分蘖末期外,旱直播处理净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)均低于CK处理,气孔限制值(L_s)均高于CK处理。相关分析表明,旱直播水稻干物质积累量与叶绿素SPAD、 P_n 、 T_r 、 G_s 呈极显著正相关($P < 0.01$)。通过对光合特性参数和干物质积累量分析表明,旱直播DH、MH和HS处理光合特性劣于CK处理,而干物质积累量优于CK处理;HS处理光合特性及干物质积累量优于DH与MH处理。研究结果可为东北黑土区水稻种植模式选取提供理论依据。

关键词: 东北黑土区; 旱直播水稻; 灌溉方式; 干物质积累; 光合特性

中图分类号: S274.3; S511

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)10-0358-11

OSID:



Effects of Different Irrigation Methods on Photosynthetic Characteristics and Dry Matter Accumulation Dynamics of Dry Direct Seeding Rice

WEI Yongxia^{1,2} CAO Xiaoqiang¹ JI Junchao¹ ZHANG Xuewen¹ LIU Hui³ WU Yu⁴

(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 and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. College of Arts and Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

4. Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to explore the influence of different irrigation methods on growth and physiological characteristics of dry direct seeding rice in the black soil region of Northeast China, according to different irrigation methods, three test treatments were set: drip irrigation dry direct seeding (DH), flood irrigation dry direct seeding (MH) and basin irrigation dry direct seeding (HS), with conventional basin irrigation (CK) as control. The dynamic changes of dry matter accumulation process and photosynthetic characteristics of rice at different growth stages were quantitatively analyzed by fitting curves. Results showed that dry matter accumulation of rice under different treatments presented a slow - fast - slow S-curve change rule along with growth time, but dry matter accumulation, start-stop time of rapid growth, growth rate and growth period varied with irrigation methods. The dry matter accumulation of rice in descending order was HS, MH, DH and CK. The rapid growth period of rice treated with CK started in

收稿日期: 2020-11-20 修回日期: 2021-01-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC040010101)

作者简介: 魏永霞(1961—),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: 吴昱(1985—),女,高级工程师,博士,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: 55206522@qq.com

the middle tillering stage, and the rapid growth period of rice in other treatments started at the transitional stage from the middle tillering stage to the end tillering stage. The rapid dry matter growth period of the different treatments all ended in the milk maturity stage. After heading and flowering period, chlorophyll SPAD value in dry direct seeding treatment was decreased faster than that in CK; except late tillering stage, net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (G_s) in dry direct seeding treatment were lower than that in CK, and stomatal limit value (L_s) was higher than that in CK. The correlation analysis showed that the dry matter accumulation of dry direct seeding rice was positively correlated with chlorophyll SPAD value, P_n , T_r and G_s ($P < 0.01$). The analysis of photosynthetic characteristics parameters and dry matter accumulation showed that dry direct seeding DH, MH and HS had lower photosynthetic characteristics than that in CK, while dry matter accumulation was better than that in CK; HS had better photosynthetic characteristics and dry matter accumulation than DH and MH. The research results can provide theoretical basis for selecting rice planting mode in black soil region of Northeast China.

Key words: black soil region of Northeast China; dry direct seeding rice; irrigation method; dry matter accumulation; photosynthetic characteristics

0 引言

东北黑土区作为世界三大黑土区之一,是我国重要的商品粮生产基地。水稻是我国主要的粮食作物之一,2018 年仅黑龙江省水稻种植面积高达 378.4 万 hm^2 ,水稻产量为 2 685.5 万 t,占全国水稻产量的 12.7%^[1]。相比传统插秧淹灌种植模式,旱直播种植模式具有高效节水特征^[2],可缓解我国水资源紧缺状况,提高水稻生产效率。因此,研究节水增效的旱直播种植模式对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。

水稻直播种植模式逐渐被接受,但直播水稻产量相对移栽水稻稳定性较差,在直播水稻生产过程中面临减产风险^[3]。水稻产量的形成是其生长发育干物质不断积累的过程,实质是光合作用的物质积累^[4]。近年来,许多学者研究表明 Logistic 生长曲线能够定量描述作物干物质积累量的变化过程^[5-7]。赵姣等^[8]运用 Logistic 生长曲线较好地描述了小麦冬后干物质积累过程,通过曲线特征参数分析了干物质积累规律。林瑞余等^[9]运用 Logistic 生长曲线对干物质积累随时间变化为“S”形的 3 个品种水稻进行拟合分析。傅迎军^[10]运用 Logistic 生长曲线对玉米杂交种干物质积累动态过程进行模拟,为玉米高产优化栽培提供理论依据。以上研究表明 Logistic 生长曲线能很好地拟合作物干物质积累变化过程。不同灌溉方式对水稻干物质积累、生理特性产生不同程度的影响^[11]。邓飞等^[12]研究表明适宜的灌溉模式可以直接有效地调节干物质生产,进而提高产量。李树杏等^[13]研究表明,水稻幼穗形成期经过轻度干旱复水后,有利于激发光合速率达到更高水平,从而提高干物质积累量。李向春等^[14]研究表明,膜下滴灌水稻叶片叶绿素含量均高

于淹灌处理,但净光合速率和气孔导度均低于插秧淹灌水稻。张亚洁等^[15]通过对比旱作与水作水稻表明旱种水稻抽穗开花期后叶绿素相对含量 (SPAD) 下降较水作水稻快。徐俊增等^[16]研究气孔限制值和光合特性参数表明,较低的土壤水分会导致较高气孔限制值,而适度水分条件下气孔限制值升高会增强净光合速率及蒸腾速率。

目前,运用生长曲线拟合干物质积累分析干物质积累过程动态参数主要以传统插秧淹灌水稻为主^[9,17],对于光合特性研究主要以控制灌溉和调亏灌溉^[18-20]及膜下滴灌^[14]为主,而对不同灌溉方式下旱直播水稻干物质积累动态拟合分析研究鲜有报道。因此,本文以东北黑土区旱直播水稻为研究对象,以生长发育时间作为描述水稻生长发育进程的标尺,通过特征曲线模拟不同处理水稻干物质积累过程,分析各处理水稻干物质积累特征参数与光合特性参数变化及其关系,以期为东北黑土区水稻高产优化栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年 5—9 月在黑龙江省庆安国家灌溉试验重点站 (46°52'41"N, 127°30'4"E) 进行。该地多年平均气温 2.5℃, 年降雨量 500 ~ 600 mm, 作物水热生长期 156 ~ 171 d, 平均无霜期 128 d, 属于寒温带大陆性季风气候。试验地区属典型寒地黑土分布区, 土壤类型为典型黑壤土, 土壤孔隙度 61.8%, 饱和含水率 50%, 容重 1.01 g/cm^3 , 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”水稻为供试作物,在移动式遮雨测坑(2 m × 2 m)中进行。试验共设4个处理,分别为滴灌旱直播(DH)、漫灌旱直播(MH)、淹灌旱直播(HS)及对照组常规插秧淹灌(CK),每个处理3次重复,共12个测坑。DH、MH和HS处理均采用人工播种,每穴10~12粒,穴距10 cm,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,毛管布置于宽行)。DH处理通过未覆膜的滴灌带进行水分管理,每个测坑内铺设3条贴片式滴灌带,滴头间距设置30 cm,滴头流量1.2 L/h、工作压力0.1 MPa,滴灌量通过水表进

行控制。HS处理是待种子发芽前保持土壤湿润,除分蘖末期进行晒田外,其他生育阶段田面保持3~5 cm水层。CK处理采用人工插秧种植方式,密度参照当地标准(行距30 cm,穴距13 cm),每穴5株。各处理肥料施用量为氮肥110 kg/hm²、P₂O₅ 45 kg/hm²、K₂O 80 kg/hm²,氮肥按照基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥比例为4.5:2:1.5:2分施,磷肥作为基肥一次性施入,钾肥按照基肥、促花肥比例为1:1分施2次,DH处理随水滴施,其余处理均为撒施。CK处理于5月17日插秧,其余旱直播处理于5月1日播种,所有处理均于9月22日收获,不同处理水稻各生育阶段水分管理方案见表1。

表1 不同处理水稻各生育阶段水分管理方案

Tab.1 Water management scheme of rice with different treatments

处理	苗期	返青期	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
CK		30~40 mm	20~45 mm	20~45 mm	晒田	20~45 mm	45~85 mm	15~45 mm
DH (80%~100%) θ_s			(85%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(60%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(70%~100%) θ_s
MH (80%~100%) θ_s			(85%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(60%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(85%~100%) θ_s	(70%~100%) θ_s
HS (80%~100%) θ_s		30~50 mm	30~50 mm		晒田	30~50 mm	30~50 mm	20~50 mm

注:mm为水层深度单位, θ_s 为饱和含水率。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 水稻干物质积累量测定

测定各处理水稻在分蘖前期(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)、黄熟期(R)的干物质质量。每个测坑选取3穴,每穴选取整株水稻,以选定植株为中心的35 cm × 35 cm × 85 cm范围内取得整株水稻样,将水稻根部放在尼龙网袋中冲洗干净,断根同样回收,将整株水稻装入样品袋并放入电热鼓风干燥箱中,在105℃下杀青30 min,然后80℃下干燥至质量恒定,取出后用电子天平(精度0.01 g)称取不同生育期整株水稻的干物质质量。

1.3.2 光合特性参数动态观测

采用LI-6400XT型便携式光合作用测量系统(Li-Cor Inc,美国)测定各处理水稻光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂与大气CO₂浓度比(C_i/C_a)等光合特性参数。测定时间选择全生育期内09:30—12:30的晴天,每个测坑选取长势一致,生长发育状况良好的5穴,每穴选取1株水稻,每株水稻上选取生长状况良好、无病虫害的功能叶片测定,功能叶片做好标记,便于下次测量。

1.3.3 叶绿素 SPAD 测定

采用SPAD-520型叶绿素仪测定不同处理各生育阶段水稻叶片叶绿素SPAD,数据由仪器自动读出。测定时间为全生育期内09:30—12:30的

晴天。

1.4 指标计算

1.4.1 干物质积累生长曲线方程

采用Logistic生长曲线方程对干物质积累进行拟合,方程为

$$Y = \frac{K}{1 + e^{a+bx}} \quad (1)$$

式中 Y ——水稻植株干物质质量, g/m²

x ——播种后时间, d

K ——理论干物质最大积累量, g/m²

a 、 b ——待定参数,且 $b < 0$

对式(1)求一阶导数可得干物质积累速率(G_R , g/(d·m²))为

$$G_R = \frac{-Kbe^{a+bx}}{(1 + e^{a+bx})^2} \quad (2)$$

通过对式(2)计算一阶和二阶导数可以得到干物质快速积累起始时间(X_1 , d)、快速积累结束时间(X_2 , d)、达到最大积累速率的时间(X_0 , d)以及最大积累速率(V_{max} , g/(d·m²)),各参数的计算公式分别为

$$X_0 = -\frac{a}{b} \quad (3)$$

$$X_1 = -\frac{a - \ln(2 + \sqrt{3})}{b} \quad (4)$$

$$X_2 = -\frac{a + \ln(2 + \sqrt{3})}{b} \quad (5)$$

$$V_{\max} = -\frac{bK}{4} \quad (6)$$

DARROCH 等^[21]指出当干物质质量达到最大生物量的 95%, 即 0.95K 时认为作物生长停止, 据此得到作物生长周期 (X_{\max} , d) 为

$$X_{\max} = \frac{\ln \frac{1}{19} - a}{b} \quad (7)$$

1.4.2 气孔限制值

目前最常用的计算气孔限制值 L_s 的方法为 BERRY 等^[22]提出的公式

$$L_s = \frac{C_a - C_i}{C_a - \Gamma} \quad (8)$$

式中 Γ — CO_2 补偿点, $\mu\text{mol}/\text{mol}$

Γ 常被忽略, 式(8)可改写为

$$L_s = 1 - \frac{C_i}{C_a} \quad (9)$$

1.5 数据处理方法

采用 Microsoft Excel 2013 对试验数据进行初步处理, 用 Origin 9.0 进行绘图拟合 Logistic 生长方程, 并运用 Mathematica 8.0 计算水稻干物质积累主要特征参数。用 SPSS 22.0 进行显著性分析 (LSD 法), 显著性水平 $P < 0.05$ 。方程拟合效果采用决定系数 R^2 、留一法交叉验证实测值与模拟值相关系数 R_1 及均方根误差 (RMSE) 描述。

2 结果与分析

2.1 不同处理水稻干物质积累动态

2.1.1 不同处理水稻干物质积累随时间的变化

图 1 为不同处理干物质积累量随生长发育时间的变化曲线。可见, 不同处理水稻干物质积累量随时间变化趋势相同, 均呈现出“慢-快-慢”的 S 形增长趋势, 符合 Logistic 生长曲线特征, 表明不同灌溉

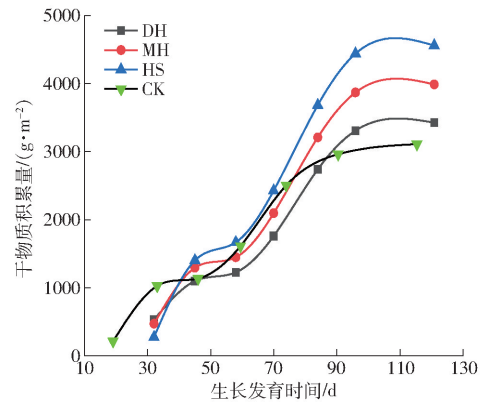


图 1 干物质积累量随生长发育时间的变化曲线
Fig. 1 Change curves of dry matter accumulation with growth time

方式在一定程度上影响水稻的生长发育, 但未改变水稻整体的生长发育趋势。采用 Logistic 曲线对不同处理水稻干物质积累变化过程进行拟合, 拟合曲线参数与决定系数见表 2。各处理曲线决定系数 R^2 均在 0.95 以上, 表明曲线拟合结果理想, 说明此生长曲线方程可以准确地描述水稻干物质质量随生育时间的变化过程; 各处理模拟值与实测值线性相关系数 R_1 均接近于 1, 吻合度较高, 验证了试验结果的可靠性; 留一法交叉验证实测值与模拟值 RMSE 均相对较低, 表明曲线精确度较高及较可靠, 且传统插秧淹灌 RMSE 小于旱直播种植, 说明传统插秧淹灌模式拟合曲线精度优于旱直播种植模式。由 Logistic 拟合方程得, 当水稻播种后时间 x 趋于无穷大时, 干物质积累量接近于干物质理论最大积累量。由表 2 可知, CK 处理干物质理论最大积累量 K 为 $3\,190.65 \text{ g}/\text{m}^2$, 而不同灌溉方式下的旱直播水稻由于种植密度大, 其干物质理论最大积累量较 CK 增加 $17.74\% \sim 52.57\%$, 为 $3\,756.81 \sim 4\,867.88 \text{ g}/\text{m}^2$ 。HS 处理由于分蘖期至乳熟期 (除分蘖末期外) 土壤水分供应充足, 其干物质理论最大积累量较 DH、MH 处理分别增加 29.57% 和 12.59% 。

表 2 不同处理 Logistic 方程参数及干物质积累特征参数

Tab. 2 Logistic model parameters and dry matter accumulation characteristic parameters of different treatments

处理	曲线参数及模型有效性					主要特征参数					
	$K/$ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	a	b	R^2	R_1	RMSE/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	X_0/d	X_1/d	X_2/d	X_{\max}/d	$V_{\max}/$ ($\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)
CK	3 190.65	3.12	-0.057 9	0.975 5	0.965 8	227.36	53.81	31.06	76.55	104.66	46.18
DH	3 756.81	3.79	-0.052 9	0.959 7	0.966 5	239.29	71.73	46.82	96.65	127.44	49.65
MH	4 323.58	4.00	-0.056 2	0.961 1	0.959 7	269.81	71.17	47.74	94.61	123.56	60.75
HS	4 867.88	4.33	-0.061 2	0.956 9	0.965 5	308.92	70.81	49.27	92.35	118.96	74.42
变异系数/%							13.04	19.44	10.17	8.39	20.14

2.1.2 干物质积累主要特征参数及其变化规律

由式(3)~(7)计算各处理干物质积累过程的主要特征参数, 结果如表 2 所示, 不同灌溉方式下各

处理进入干物质快速积累的起止时间 (X_1 、 X_2)、达到干物质最大积累速率时间 (X_0)、最大积累速率 (V_{\max}) 和作物生长发育周期 (X_{\max}) 不同。CK 处理

由分蘖中期进入干物质快速积累期,其他处理由于苗期土壤含水率低抑制了根系表层发育,影响了水稻营养器官生长,均于分蘖中期到分蘖末期的过渡阶段进入水稻干物质快速积累期。各处理干物质最大积累速率均出现于拔节孕穗期至抽穗开花期过渡阶段,早直播水稻干物质最大积累速率均高于 CK 处理,其中 DH 和 MH 处理的最大积累速率较 HS 处理分别降低了 33.28% 和 18.37%,表明不同灌溉方式会对各处理的最大积累速率产生影响。CK、DH、MH 和 HS 处理达到干物质最大积累速率时的干物质积累量为 1 595.32、1 878.41、2 161.79、2 433.94 g/m²,约为其最大干物质积累量的 50%。各处理干物质快速积累期均于乳熟期结束,但 DH 处理分别较 MH 和 HS 处理晚 2.04 d 和 4.30 d。不同处理水稻生长发育周期为 104.66 ~ 127.44 d,且生长发育周期由大到小依次为 DH、MH、HS、CK,变异系数为 8.39%。以上表明建立水层的淹灌早直播水稻相对滴灌与漫灌早直播水稻缩短了生长发育周期且利于干物质积累。

2.1.3 不同处理干物质积累分期平均积累速率、分期时长和分期积累量

各处理水稻干物质积累量呈现“慢-快-慢”的变化趋势,将干物质积累过程分为渐增期、快速积累期和缓增期,采用高斯积分法对干物质积累速率方程(式(2))进行分段积分,结果见表 3。从干物质积累量分期占比来看,各处理水稻渐增期干物质积累占比为 18.54% ~ 21.20%,变异系数为 5.78%;快速积累期干物质积累量最高,占总积累量的 61.63% ~ 63.62%,变异系数为 1.40%;缓增期干物质积累占比 17.16% ~ 17.84%,变异系数为 1.71%。渐增期 CK 处理的积累速率高于 DH 处理,由于其分期时长远小于 DH 处理,导致其渐增期结束干物质积累量低于 DH 处理,减少了 24.73%;而 MH 处理和 HS 处理的分期时长远大于 CK 处理,平均速率也略大于 CK 处理,故 MH 和 HS 处理干物质积累量较 CK 处理增加了 55.70% ~ 80.18%。MH 和 HS 处理在快速积累期和缓增期的平均积累速率明显高于 CK 处理,而分期积累时长与 CK 处理差异不明显,使得这两个阶段 MH 和 HS 处理的干物质积累量远高于 CK 处理;DH 处理在快速积累期和缓增期的分期时长与平均积累速率均高于 CK 处理,故积累量也高于 CK 处理。以上研究表明,干物质积累量不仅与积累速率有关,也与分期时长有关,故在田间生产上应采取合理的管培技术措施,增加快速增长期时长及延缓快速积累期向缓增期过渡期间积累速率的下降,从而增加干物质积累总量。

表 3 干物质积累分期时长、积累量和平均积累速率

Tab.3 Dry matter accumulation stage length, accumulation amount and average accumulation rate

参数	处理	渐增期	快速积累期	缓增期
		(0 ~ X ₁)	(X ₁ ~ X ₂)	(X ₂ ~ X _{max})
分期时长/d	CK	31.06	45.49	28.11
	DH	46.82	49.83	30.79
	MH	47.74	46.87	28.96
	HS	49.27	43.07	26.61
	变异系数/%	19.44	6.09	6.09
分期积累量/(g·m ⁻²)	CK	536.85	1 842.09	516.58
	DH	713.24	2 170.30	603.69
	MH	835.88	2 496.35	697.45
	HS	967.29	2 812.06	783.09
	变异系数/%	5.78	1.40	1.71
分期平均积累速率/(g·d ⁻¹ ·m ⁻²)	CK	17.28	40.49	18.38
	DH	15.23	43.56	19.61
	MH	17.51	53.26	24.08
	HS	19.63	65.29	29.42
	变异系数/%	10.33	22.06	21.89

2.2 不同处理光合特性参数变化

2.2.1 不同处理水稻叶绿素 SPAD

表 4 为不同处理水稻各生育期叶绿素 SPAD,由表 4 可知,在分蘖前期至分蘖末期 DH、MH 和 HS 处理叶绿素 SPAD 显著高于 CK 处理,这表明早直播种植模式有利于水稻分蘖期叶绿素的形成。分蘖中期 HS 和 DH 处理相对于 MH 处理叶绿素 SPAD 增加显著,可能是由于 HS 处理土壤含水率较高及 DH 处理土壤含水均匀度高于 MH 处理。拔节孕穗期至乳熟期,CK 处理叶绿素 SPAD 最高,拔节孕穗期各处理叶绿素 SPAD 由大到小表现为 CK、HS、DH、MH,至抽穗开花期各处理叶绿素 SPAD 均达到最大值,DH、MH 和 HS 处理叶绿素 SPAD 分别较 CK 处理显著减少 4.53%、5.19% 和 4.38% ($P < 0.05$),而不同灌溉方式的早直播处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。乳熟期各处理叶绿素 SPAD 由大到小依次为 CK、HS、DH、MH,较抽穗开花期叶绿素 SPAD 下降幅度为 13.42% ~ 17.09%,可能是由于各处理水稻趋于完熟,水稻器官渐渐衰老所致,DH 和 HS 处理与 CK 处理差异不显著 ($P > 0.05$),MH 处理与 DH、HS 和 CK 处理差异显著 ($P < 0.05$),可能是由于漫灌早直播稻田土壤水分供应不充足,土壤含水均匀度较低。

2.2.2 不同处理净光合速率、蒸腾速率和气孔导度

图 2(图中不同小写字母表示处理间差异性显著 ($P < 0.05$),下同)为不同处理水稻净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 和气孔导度 (G_s) 的动态变化。由图 2 可知,不同处理水稻 P_n 、 T_r 和 G_s 总体变化趋

表 4 不同处理水稻各生育期叶绿素 SPAD

Tab. 4 Chlorophyll SPAD in different growth stages of rice under different treatments

处理	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)
CK	(25.15 ± 0.10) ^d	(38.83 ± 0.17) ^b	(33.85 ± 0.09) ^d	(43.15 ± 0.12) ^a	(45.65 ± 0.32) ^a	(37.85 ± 0.17) ^a
DH	(32.80 ± 0.34) ^a	(40.10 ± 0.19) ^a	(35.15 ± 0.19) ^b	(42.05 ± 0.34) ^b	(43.58 ± 0.13) ^b	(37.63 ± 0.24) ^a
MH	(31.58 ± 0.11) ^c	(39.18 ± 0.12) ^b	(34.63 ± 0.35) ^c	(42.03 ± 0.17) ^b	(43.28 ± 0.16) ^b	(37.20 ± 0.14) ^b
HS	(32.13 ± 0.26) ^b	(40.07 ± 0.27) ^a	(35.80 ± 0.22) ^a	(42.58 ± 0.55) ^b	(43.65 ± 0.19) ^b	(37.79 ± 0.20) ^a

注:同一列数字后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

势趋于一致,除分蘖末期外,其余各生育阶段不同灌溉方式旱直播处理的 P_n 、 T_r 和 G_s 均小于常规插秧淹灌 CK 处理,可能是由于 CK 处理土壤供水充足、气孔开度大,利于 CO_2 的导入,从而提高 P_n 和 T_r ,而旱直播水稻不利于各生育期 P_n 和 T_r 的提高。旱直播水稻全生育期内 P_n 、 T_r 和 G_s 变化趋势为先升高后降低的单峰曲线, P_n 、 T_r 和 G_s 均表现为 HS 处理大于 DH 和 MH 处理。分蘖初期 P_n 、 T_r 和 G_s 处于最低,HS 处理分别较 DH 和 MH 处理的 P_n 增加 6.83% 和 0.84% ($P < 0.05$), T_r 增加 6.88% 和 0.39% ($P > 0.05$), G_s 增加 17.14% ($P < 0.05$) 和 4.59% ($P >$

0.05)。在抽穗开花期 P_n 、 T_r 和 G_s 达到最大,HS 处理的 P_n 、 T_r 和 G_s 分别较 DH 处理增加 4.09%、7.13% 和 13.48%,较 MH 处理分别增加 3.28%、3.28% 和 7.62%,旱直播 DH 和 MH 处理的 P_n 和 G_s 差异不显著 ($P > 0.05$),而 HS 处理与 DH 和 MH 处理的 P_n 和 G_s 差异显著 ($P < 0.05$),HS、DH 和 MH 处理间 T_r 均差异显著 ($P < 0.05$),可能是由于 DH 和 MH 处理较低的土壤水分降低了水稻根系活力和养分吸收能力,进而影响水稻的生理活动。以上表明,建立水层充分供水的旱直播水稻有利于增大气孔开度,增加对 CO_2 的吸收,增强 P_n 和 T_r 。

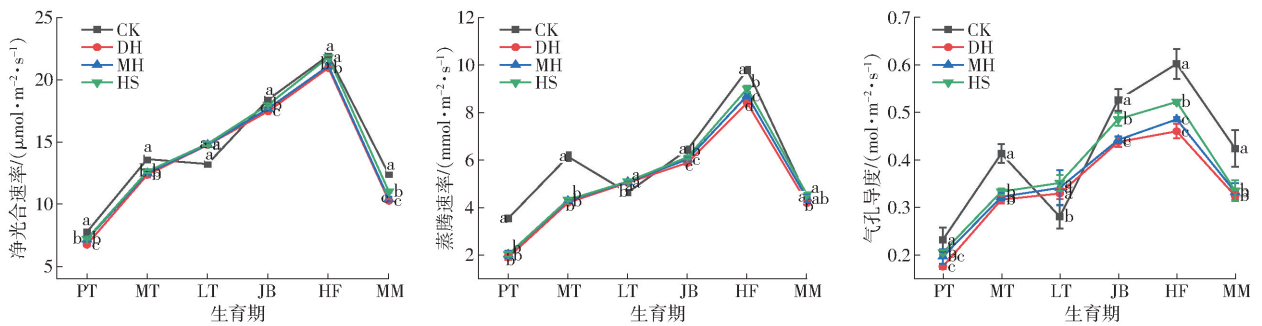


图 2 不同处理水稻净光合速率、蒸腾速率和气孔导度动态变化曲线

Fig. 2 Change curves of P_n and T_r and G_s of rice under different treatments

2.2.3 不同处理水稻气孔限制值

不同处理水稻气孔限制值 L_s 在不同生育期的变化如图 3 所示。不同处理各生育阶段的气孔限制程度不同,旱直播水稻 L_s 全生育期内呈增减交替变化,CK 处理水稻 L_s 大致呈现先升后降的倒“V”形变化。除分蘖末期外,旱直播处理下水稻各生育期 L_s 均高于 CK 处理,DH、MH 和 HS 处理的 L_s 较 CK 处理分别增加 32.86% ~ 48.01%、24.75% ~ 44.90% 和 20.73% ~ 25.64%,说明不同灌溉方式能够影响水稻叶片的气孔开度,调控水稻叶片的光合作用。分蘖末期 CK 处理的 L_s 达到峰值,显著高于旱直播处理,可能是由于在该生育阶段经过晒田处理使 CK 处理生长环境干湿交替变化剧烈,致使其对水分亏缺更加敏感,从而为防止叶片蒸腾速率过快进一步导致水分供应不足,加大了气孔闭合程度。对于同样晒田的 HS 处理的 L_s 与 CK 处理变化不同,可能由于其根系发达、吸水储水能力强、抗逆性能好、自我

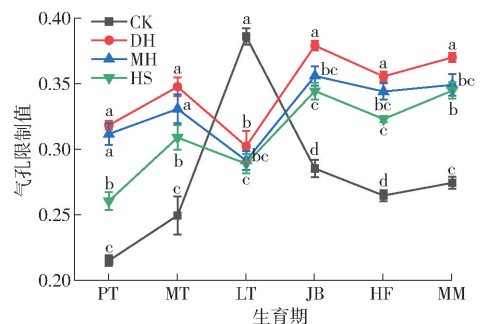


图 3 不同处理水稻气孔限制值的变化曲线

Fig. 3 Change curves of L_s of rice under different treatments

调节力强。DH、MH 和 HS 处理的 L_s 于分蘖中期达到第 1 个峰值,分别较 CK 处理增加 39.32%、32.56% 和 23.79%,DH 和 MH 处理间差异不显著 ($P > 0.05$),而 HS 处理与 DH 和 MH 处理差异显著 ($P < 0.05$),可能是由于建有水层的 HS 处理相较于 DH 和 MH 处理土壤水分供应充足,受到气孔限制调节作用较小;于拔节孕穗期达到第 2 个峰值,分别

较 CK 处理增加 32.86%、24.75% 和 20.73%，处理间差异显著 ($P < 0.05$)。早直播处理水稻全生育期内 L_s 由大到小表现为 DH、MH、HS，较低的土壤含水率会导致较高的 L_s 。

2.3 干物质积累量与光合特性参数的相关分析

水稻常规插秧淹灌种植与早直播分属两种不同的种植模式，本文将当地常规插秧淹灌水稻种植模式作为对照，来研究不同灌溉方式条件下的水稻早直播种植模式效应。因 2 种植模式的水稻种植密度不同，使得水稻干物质积累量的形成条件不一致，势必会对其与光合特性参数之间的相关关系产生影响。下面按照 2 种植模式进行干物质积累量与光合特性参数的相关性分析进行对比。

2.3.1 不同种植模式水稻干物质积累量与光合特性参数相关性分析

由表 5 可知，分蘖前期至抽穗开花期常规插秧淹灌水稻干物质积累量与 P_n 呈极显著正相关，与叶绿素 SPAD 和 T_r 呈显著正相关，与 G_s 呈不显著正相关；早直播种植模式水稻干物质积累量与叶绿素 SPAD、 P_n 、 T_r 和 G_s 均呈极显著正相关，常规插秧淹灌种植模式水稻相关系数均高于早直播种植模式水稻。常规插秧淹灌种植模式水稻叶绿素 SPAD 与 P_n 呈极显著正相关，与 T_r 和 G_s 呈显著正相关；早直播种植模式水稻叶绿素 SPAD 与 P_n 、 T_r 及 G_s 均呈极显著正相关。2 种植模式下水稻 P_n 分别与 T_r 和 G_s 呈

极显著正相关，表明随着气孔开度增大会增强光合作用，较强的 P_n 伴随较强的太阳辐射会导致较高的 T_r 。

表 5 不同种植模式水稻光合指标与干物质积累量的相关系数

Tab.5 Correlation coefficient among photosynthetic indexes and dry matter accumulation under different planting modes

种植模式	参数	干物质积累量	叶绿素 SPAD	P_n	T_r
常规插秧淹灌	叶绿素 SPAD	0.930 *			
	P_n	0.992 **	0.962 **		
	T_r	0.941 *	0.893 *	0.932 *	
	G_s	0.858	0.927 *	0.904 *	0.893 *
早直播	叶绿素 SPAD	0.850 **			
	P_n	0.953 **	0.864 **		
	T_r	0.974 **	0.849 **	0.986 **	
	G_s	0.945 **	0.909 **	0.978 **	0.948 **

注：* 表示在显著水平 0.05 下显著相关，** 表示在显著水平 0.01 下极显著相关。

2.3.2 不同种植模式水稻干物质积累量和叶绿素 SPAD 与净光合速率的拟合分析

图 4(图中 S_{PAD} 为叶绿素 SPAD) 分别为分蘖前期至抽穗开花期常规插秧淹灌和早直播两种种植模式干物质积累量、叶绿素 SPAD 和净光合速率拟合曲线，由图可知两种种植模式水稻干物质积累量与 P_n 均呈二次函数抛物线关系，2 种植模式 P_n 和叶

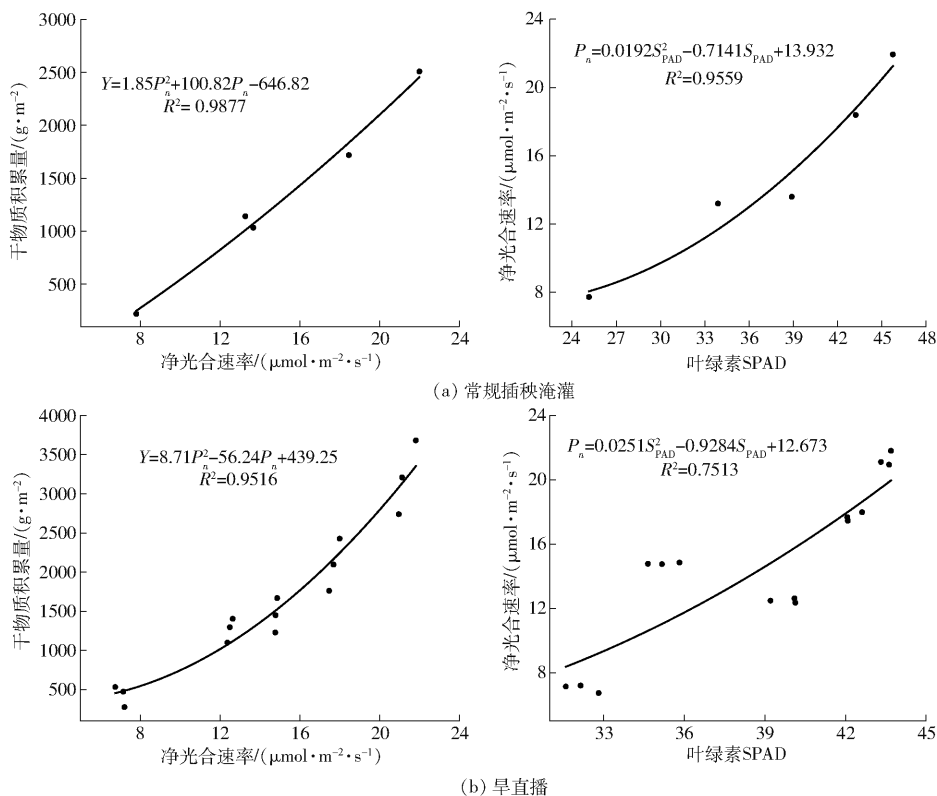


图 4 不同种植模式水稻干物质积累量与叶绿素 SPAD 和净光合速率的拟合效果

Fig. 4 Fitting effect of dry matter accumulation with chlorophyll SPAD and P_n under different planting patterns

绿素 SPAD 也均呈二次函数抛物线关系, 而常规插秧淹灌水稻决定系数均高于旱直播水稻, 表明常规插秧淹灌水稻光合速率对干物质积累量及叶绿素 SPAD 对光合速率的影响均高于旱直播水稻。

3 讨论

干物质积累是作物生长过程中产量形成的物质基础, 不同灌溉方式下水稻的干物质积累量不同, 定量分析作物生长过程中干物质积累动态变化对揭示作物产量形成有重要意义^[23]。本研究通过 Logistic 生长曲线对不同水分管理条件下水稻干物质积累过程进行拟合, 并计算拟合方程中的相关特征参数, 定量分析了干物质积累过程的动态特征。研究表明, 常规插秧淹灌水稻与旱直播水稻干物质最大积累速率均出现在拔节孕穗期至抽穗开花期, 这可能是由于水稻在拔节孕穗期至抽穗开花期为营养生长与生殖生长并进时期, 通过提高干物质积累速率快速积累干物质, 这与李艳大等^[17]动态模拟出的水稻干物质最大积累速率出现在拔节孕穗期一致, 也与魏永霞等^[4]研究结果一致。各处理在达到干物质最大积累速率时, 水稻干物质积累量约为其干物质最大积累量的 50%, 这与邹应斌等^[24]研究结果相符。本研究中各处理进入快速积累期的时间不尽相同, 常规插秧淹灌处理于分蘖中期进入快增期, 旱直播处理水稻可能由于生育前期土壤含水率低, 影响其基本生长发育以至于在分蘖中期至分蘖末期过渡阶段进入快增期, 这与刘慧等^[25]水稻生育前期低土壤含水率会对进入快速增长阶段的时间产生影响的研究结果一致。各处理均于乳熟期结束干物质快速积累期并进入缓增期, 这与叶廷红等^[26]早稻、中稻、晚稻快速积累期结束于乳熟期结论一致。旱直播处理的生长发育周期均长于常规插秧淹灌, 且滴灌旱直播与漫灌旱直播水稻生长发育周期也略长于淹灌旱直播水稻, 一方面因为旱直播水稻从苗期进入分蘖期时间较长, 另一方面可能是由于旱直播水稻苗期土壤含水率低, 改善了根系生长发育环境, 提高了土壤通透性, 促进了根系生长以及增强水稻后期抗衰老能力。这与陶敏之等^[27]研究水稻受旱后能增强根系活力, 延缓根系衰老结果相符。对于旱直播水稻, 研究表明淹灌旱直播分期干物质平均积累速率高于漫灌旱直播和滴灌旱直播, 表明旱直播处理水稻出苗后补充土壤供水有助于提升干物质积累速率和增加干物质积累量, 这与 VILLEGAS 等^[28]研究表明灌水可以显著影响干物质积累平均速率相符。

光合作用是形成干物质的主要途径, 不同处理水稻光合作用直接影响着干物质的积累速率及积累

量。叶绿素是水稻进行光合作用的主要场所, SHIRATSUCHI 等^[29]研究表明水稻叶片叶绿素含量与其光合生产能力密切相关。张亚洁等^[15]研究表明旱种水稻在抽穗开花期后叶绿素 SPAD 下降较水种水稻快, 邹君等^[30]通过对不同灌溉方式下光合特性分析认为旱作水稻开花期后叶绿素分解加速。本试验通过对比不同灌溉方式对水稻叶绿素 SPAD 的影响表明, 在抽穗开花期后旱直播水稻叶绿素 SPAD 较常规插秧淹灌水稻下降变快, 而淹灌旱直播水稻生育后期的叶绿素 SPAD 高于滴灌和漫灌旱直播水稻, 可能是由于土壤水分较低会不利于叶绿素的合成。郭慧等^[31]研究表明覆膜直播处理水稻光合势在各生育期均高于常规插秧淹灌水稻。王志军等^[32]研究表明膜下滴灌水稻净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均低于常规插秧淹灌水稻。本试验研究表明, 除分蘖末期外旱直播水稻净光合速率、蒸腾速率和气孔导度低于常规插秧淹灌水稻, 而分蘖末期旱直播水稻高于常规插秧淹灌水稻, 可能是由于分蘖后期经历晒田的常规插秧淹灌水稻外界生育环境剧烈改变所致, 这与魏永霞等^[4]研究结果相吻合。

气孔限制值是判定一定程度下植物光合作用的主要限制因子^[30], 在植物的不同生长阶段, 叶片光合作用的气孔与非气孔限制也具有差异性^[33]。本试验研究表明, 不同灌溉方式会对气孔限制值产生影响, 旱直播处理水稻气孔限制值于拔节孕穗期达到最大值, 这与韩羽等^[34]研究一致。气孔限制值的变化会影响蒸腾速率和光合速率^[35]。本试验研究发现, 除分蘖末期外, 其他生育阶段旱直播水稻气孔限制值均大于常规插秧淹灌水稻, 而光合速率、蒸腾速率和气孔导度均小于常规插秧淹灌水稻。在分蘖前期至分蘖中期和分蘖末期至拔节孕穗期 2 个生长阶段, 旱直播处理水稻气孔限制值增大, 净光合速率和蒸腾速率却增强, 说明此时气孔限制因子对光合作用限制不占主导地位, 这可能是由于较高气孔限制值伴随着较高的太阳光辐射, 光合动力以及与光合有关的酶的活性较强, 从而叶片的净光合效率较高, 进而随着气孔限制值的增加光合速率反而有所增加, 这与徐俊增等^[16]研究结果一致; 蒸腾速率也略有增加, 表明较高气孔限制值所对应的外部环境对作物的蒸腾能力影响较强, 这与高冠龙等^[35]研究结果一致。拔节孕穗期至乳熟期旱直播处理水稻气孔限制值先减小后增大, 净光合速率和蒸腾速率先增强后减弱, 这可能由于此时期气孔限制为调控光合主导因子, 表明抽穗开花期和乳熟期水稻受到光合气孔限制作用明显, 这与杨泽粟等^[36]研究表明春

小麦抽穗期和灌浆期都具有明显的光合气孔限制结论一致。以上研究表明,随着生长发育环境的变化水稻会进行生理特性的自我调控。

相关性分析表明,早直播处理水稻叶绿素 SPAD 越高,越有利于增强光合作用,增加干物质积累。淹灌早直播较滴灌早直播和漫灌早直播各生育期叶绿素 SPAD 有所增加,光合作用有所增强,使干物质积累增加较多。研究表明可通过对早直播水稻生育期内补充土壤供水来增强光合能力,改善其干物质积累,达到提高水稻产量的目的。

4 结论

(1)不同处理水稻干物质最大积累量由大到小表现为 HS、MH、DH、CK,其中 CK 处理干物质理论最大积累量为 $3\ 190.65\ \text{g}/\text{m}^2$,而 DH、MH 和 HS 处理干物质理论最大积累量较 CK 增加 $17.74\% \sim 52.57\%$,为 $3\ 756.81 \sim 4\ 867.88\ \text{g}/\text{m}^2$;CK 处理水稻快速积累期始于分蘖中期,早直播处理水稻快速积累期始于分蘖中期向分蘖末期过渡阶段,不同处理的水稻干物质快速积累期均结束于乳熟期。早直播水稻生育周期为 $119 \sim 128\ \text{d}$,且由大到小依次为

DH、MH、HS,但 HS 处理的最快积累速率、各分期平均积累速率及分期干物质积累量均高于 DH 和 MH 处理。

(2)抽穗开花期后,早直播水稻叶绿素 SPAD 较常规插秧淹灌水稻下降快。除分蘖末期外,其余各生育阶段不同灌溉方式早直播处理的 P_n 、 T_r 和 G_s 均小于常规插秧淹灌处理, L_s 均高于常规插秧淹灌处理。早直播处理 P_n 、 T_r 和 G_s 全生育期呈先增后减的倒“V”形变化,表现为 HS 处理大于 MH 和 DH 处理; L_s 呈增减交替变化,表现为 DH 和 MH 处理大于 HS 处理。

(3)分蘖前期至抽穗开花期早直播水稻干物质积累量和 P_n 呈二次函数抛物线关系,且随着 P_n 增强干物质积累量增加; P_n 和叶绿素 SPAD 也呈二次函数抛物线关系,且随着叶绿素 SPAD 增大 P_n 增强;早直播水稻干物质积累量与叶绿素 SPAD、 P_n 、 T_r 和 G_s 呈极显著正相关 ($P < 0.01$),叶绿素 SPAD 与 P_n 、 T_r 及 G_s 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

(4)早直播 DH、MH 和 HS 处理光合特性劣于 CK 处理,而干物质积累量优于 CK 处理;HS 处理光合特性及干物质积累量优于 DH 与 MH 处理。

参 考 文 献

- [1] 代滢芸. 2018 年黑龙江省水稻市场分析报告[J]. 黑龙江粮食, 2019(5): 16-21.
- [2] 轧宗杰, 卢树昌, 侯琨. 水稻早直播栽培发展现状、问题及应用前景[J]. 作物杂志, 2020(2): 9-15.
YA Zongjie, LU Shuchang, HOU Kun. Development status, problems and application prospects of dry direct seeding rice[J]. Crops, 2020(2): 9-15. (in Chinese)
- [3] 孔飞扬. 直播水稻生长特性与产量构成关系研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
KONG Feiyang. The relationship between growth characteristics and yield of direct seeded rice[D]. Nanning: Guangxi University, 2018. (in Chinese)
- [4] 魏永霞, 侯景翔, 吴昱, 等. 不同水分管理早直播水稻生长生理与节水效应[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 253-264.
WEI Yongxia, HOU Jingxiang, WU Yu, et al. Effects of different water management on growth physiology and water-saving of dry direct seeding rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 253-264. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180830&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.030. (in Chinese)
- [5] 侯玉虹, 陈传永, 郭志强, 等. 作物高产群体干物质积累动态模型的构建及生长特性分析[J]. 玉米科学, 2008, 16(6): 90-95.
HOU Yuhong, CHEN Chuanyong, GUO Zhiqiang, et al. Establishment of dry matter accumulation dynamic simulation model and analysis of growth characteristic for high-yielding population of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(6): 90-95. (in Chinese)
- [6] 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程[J]. 农业气象, 1986(1): 14-19.
- [7] 潘玉娇. 不同水分条件下辣椒生长发育与干物质积累模拟模型的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2007.
PAN Yujiao. Study on the simulation model of growth and dry matter accumulation of pepper under different irrigation quantity [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [8] 赵皎, 郑志芳, 方艳茹, 等. 基于动态模拟模型分析冬小麦干物质积累特征对产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 300-308.
ZHAO Jiao, ZHENG Zhifang, FANG Yanru, et al. Effect of dry matter accumulation characteristics on yield of winter wheat analyzed by dynamic simulation model[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 300-308. (in Chinese)
- [9] 林瑞余, 梁义元, 蔡碧琼, 等. 不同水稻产量形成过程的干物质积累与分配特征[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 185-190.
LIN Ruiyu, LIANG Yiyuan, CAI Biqiong, et al. Characteristics of dry matter accumulation and partitioning in the process of yield formation in different rice cultivars[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(2): 185-190. (in Chinese)
- [10] 傅迎军. 玉米单 10 干物质积累与分配规律的研究[J]. 玉米科学, 2001, 9(2): 68-69.
FU Yingjun. Study on dry products accumulation and distribution of Mudan 10 maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2001, 9(2): 68-69. (in Chinese)
- [11] 傅志强, 黄璜, 朱华武, 等. 不同灌溉方式对水稻生长及产量的影响[J]. 作物研究, 2011, 25(4): 299-303.

- FU Zhiqiang, HUANG Huang, ZHU Huawu, et al. Effects of different irrigation methods on paddy rice growth and yields[J]. *Crop Research*, 2011, 25(4):299-303. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 李向春, 李丽, 王圣毅, 等. 不同灌溉方式对水稻叶片生理特性的影响[J]. *大麦与谷类科学*, 2015(1):11-15.
- [15] 张亚洁, 周晓然, 杜斌, 等. 不同种植方式下氮素营养对陆稻和水稻产量的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(6):1005-1013.
- ZHANG Yajie, ZHOU Yuran, DU Bin, et al. Effects of nitrogen nutrition on grain yield of upland rice and paddy rice under different cultivation methods[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6):1005-1013. (in Chinese)
- [16] 徐俊增, 彭世彰, 丁加丽, 等. 控制灌溉的水稻气孔限制值变化规律试验研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(4):486-491.
- XU Junzeng, PENG Shizhang, DING Jiali, et al. Stomata limitation of rice under control irrigation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(4):486-491. (in Chinese)
- [17] 李艳大, 汤亮, 陈青春, 等. 水稻地上部干物质积累动态的定量模拟[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(6):1504-1510.
- LI Yanda, TANG Liang, CHEN Qingchun, et al. Dry matter accumulation in rice above ground part: quantitative simulation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(6):1504-1510. (in Chinese)
- [18] 俞双恩, 刘子鑫, 高世凯, 等. 旱涝交替胁迫对水稻荧光参数与光合特性的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(12):304-312.
- YU Shuang'en, LIU Zixin, GAO Shikai, et al. Effects of waterlogging and drought alternative stress patterns on fluorescence parameters and photosynthetic characteristics of rice[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12):304-312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191235&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.035. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 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.
- 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170430&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.030. (in Chinese)
- [21] DARROCH B A, BAKER R J. Grain filling in three spring wheat genotypes: statistical analysis[J]. *Crop Science*, 1990, 30(3):525-529.
- [22] BERRY J A. Environmental regulation of photosynthesis[J]. *Photosynthesis*, 1982, 2:263-343.
- [23] YAN D C, ZHU Y, WANG S H, et al. A quantitative knowledge-based model for designing suitable growth dynamics in rice[J]. *Plant Production Science*, 2006, 9(2):93-105.
- [24] 邹应斌, 黄见良, 屠乃美, 等. “旺壮重”栽培对双季杂交稻产量形成及生理特性的影响[J]. *作物学报*, 2001, 27(3):343-350.
- ZOU Yingbin, HUANG Jianliang, TU Naimei, et al. Effects of the VSW cultural method on yield formation and physiological characteristics in double cropping hybrid rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(3):343-350. (in Chinese)
- [25] 刘慧, 魏永霞, 汝晨. 寒地黑土区水稻植株干物质积累对耗水过程的响应[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(7):195-204.
- LIU Hui, WEI Yongxia, RU Chen. Response of rice dry matter accumulation to water consumption process in cold black soil region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7):195-204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180724&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.024. (in Chinese)
- [26] 叶廷红, 李鹏飞, 侯文峰, 等. 早稻、晚稻和中稻干物质积累及氮素吸收利用的差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(2):212-222.
- YE Tinghong, LI Pengfei, HOU Wenfeng, et al. Differences in dry matter accumulation and nitrogen absorption and utilization among early, late and middle rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(2):212-222. (in Chinese)
- [27] 陶敏之, 俞双恩, 叶兴成. 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, 83.
- TAO Minzhi, YU Shuang'en, YE Xingcheng. The effect of controlled water level on root activity and yield of rice[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(10):73-75, 83. (in Chinese)
- [28] VILLEGAS D, APARICIO N, BLANCO R, et al. Biomass accumulation and main stem elongation of durum wheat grown under Mediterranean conditions[J]. *Annals of Botany*, 2001, 88(4):617-627.
- [29] SHIRATSUCHI H, YAMAGISHI T, ISHII R. Leaf nitrogen distribution to maximize the canopy photosynthesis in rice[J]. *Field Crops Research*, 2006, 95(2-3):291-304.
- [30] 邹君, 谢小立, 王凯荣. 不同水分灌溉下水稻光合特征分析[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(1):23-25.
- ZOU Jun, XIE Xiaoli, WANG Kairong. Analysis on photosynthesis characteristics in rice under different irrigations[J].

- Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(1): 23–25. (in Chinese)
- [31] 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)
- [32] 王志军, 谢宗铭, 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)
- [33] 符玉英. 水分胁迫下植物叶片光合的气孔和非气孔限制[J]. 科技与创新, 2018(8): 57–58.
- [34] 韩羽, 张忠学, 杨桦, 等. 水分胁迫对寒地水稻光合速率、气孔限制值及 WUE 的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(增刊1): 13–18.
HAN Yu, ZHANG Zhongxue, YANG Hua, et al. Effects of water stress on photosynthetic rate and stomatal restriction value of rice in cold region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(Supp. 1): 13–18. (in Chinese)
- [35] 高冠龙, 冯起, 张小由, 等. 植物叶片光合作用的气孔与非气孔限制研究综述[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 929–937.
GAO Guanlong, FENG Qi, ZHANG Xiaoyou, et al. An overview of stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis of plants[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 929–937. (in Chinese)
- [36] 杨泽粟, 张强, 郝小翠. 自然条件下半干旱雨养春小麦生育后期旗叶光合的气孔与非气孔限制[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 174–182.
YANG Zesu, ZHANG Qiang, HAO Xiaocui, et al. Stomatal or non-stomatal limitation of photosynthesis of spring wheat flag leaf at late growth stages under natural conditions in semiarid rainfed regions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(2): 174–182. (in Chinese)

(上接第 336 页)

- [27] NIELSEN D C, VIGIL M F, ANDERSON R L, et al. Cropping system influence on planting water content and yield of winter wheat[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(5): 962–967.
- [28] 王全九, 柴晶, 王翔翔. 夏闲期降水对黄土旱塬冬小麦水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 82–88.
WANG Quanjiu, CHAI Jing, WANG Xiangxiang. Influence of rainfall in summer fallow period on water and nitrogen use efficiency of winter wheat on Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 82–88. (in Chinese)
- [29] 冯伟, 丁军, 郭天财, 等. 水氮运筹对两种穗型小麦品种产量的效益分析[J]. 西北农业学报, 2009, 18(2): 64–69.
FENG Wei, DING Jun, GUO Tiancai, et al. Effects of irrigation and nitrogen on yield and model analysis in winter wheat with two spike-types[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 18(2): 64–69. (in Chinese)
- [30] HUANG M B, DANG T H, GALLICHAND J, et al. Effect of increased fertilizer applications to wheat crop on soil water depletion in the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2003, 58(3): 267–278.
- [31] 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.
LI Shengxiu, LI Shiqing, GAO Yajun, et al. The mechanism and effects of N fertilization in increasing water use efficiency [J]. Agricultural Research in Arid Areas, 1994, 12(1): 38–46. (in Chinese)
- [32] BANDYOPADHYAY K K, MISRA A K, GHOSH P K, et al. Effect of irrigation and nitrogen application methods on input use efficiency of wheat under limited water supply in a Vertisol of Central India[J]. Irrigation Science, 2010, 28(4): 285–299.
- [33] FERNANDES-SILVA A A, FERREIRA T C, CORREIA C M, et al. Influence of different irrigation regimes on crop yield and water use efficiency of olive[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1–2): 35–47.
- [34] 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): 211–218.
- [35] LI W L, LI W D, LI Z Z. Irrigation and fertilizer effects on water use and yield of spring wheat in semi-arid regions[J]. Agricultural Water Management, 2004, 67(1): 35–46.
- [36] 尹光华, 刘作新, 李桂芳, 等. 辽西半干旱区春小麦氮磷水耦合产量效应研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 41–45.
YIN Guanghua, LIU Zuoxin, LI Guifang, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and water coupling on spring wheat yield in semi-arid areas of Western Liaoning Province[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 41–45. (in Chinese)
- [37] CARINA M, SENTHOLD A, JENS B, et al. Plant available soil water at sowing in Mediterranean environments—is it a useful criterion to aid nitrogen fertilizer and sowing decisions? [J]. Field Crops Research, 2009, 114(1): 127–136.
- [38] LEGGETT G E, REISENAUER H M, NELSON W L. Fertilization of dry land wheat in Eastern Washington[J]. Washington Agricultural Experimental Station Bull, 1959, 602(1): 1–16.
- [39] 党建忠, 杨步余, 高世平, 等. 渭北旱原小麦量水配方施肥技术研究[J]. 干旱地区农业研究, 1991, 9(1): 9–16.
DANG Jianzhong, YANG Buyu, GAO Shiping, et al. Techniques of formula fertilizer application to winter wheat based on soil moisture measured on Weibei rainfed highland[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 1991, 9(1): 9–16. (in Chinese)