doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.026

旱直播种植对水稻植株水分分布与抗倒伏特性的影响

魏永霞[1,2]　侯景翔[1,2]　吴　昱[3,4]　刘　慧[2,5]　汝　晨[1,2]　王　柏[6]

(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.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;6.黑龙江省水利科学研究院,哈尔滨 150080)

摘要:为探讨节水灌溉种植模式对水稻体内的水分分布特征和抗倒伏特性的影响,于 2017 年 5—10 月在黑龙江省庆安县采用测坑微区进行试验。试验设置 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 处理的叶、鞘、茎和冠部湿基含水率在全生育期均低于 CK 处理,但根部湿基含水率从分蘖末期开始均高于 CK 处理。乳熟期和黄熟期茎部不同节间湿基含水率(W)、节间长度(L)、株高均以 DH 处理最低、CK 处理最高,而茎部单位长度节间质量(U_w)均以 DH 处理最大、CK 处理最小。相比 CK 处理,DH 处理显著提高了水稻茎部的抗折力(F)、折断弯矩(B_m)和弯曲应力(B_s),降低了弯曲力矩(W_p)、断面模数(Z)和倒伏指数(L_i),这表明滴灌旱直播种植模式显著提高了水稻的抗倒伏能力。不同参数间的相关关系表明,L、W、W_p、Z 与 L_i 之间均表现为极显著正相关($P<0.01$),而 U_w、F、B_m、B_s 与 L_i 呈显著负相关($P<0.05$),且水稻茎部湿基含水率与倒伏指数呈极显著正相关($P<0.01$),这说明利用茎部湿基含水率能够表征和预测水稻的倒伏指数。本研究可为解决东北黑土区水稻倒伏、用水效率低下等问题提供新的方法和途径。

关键词:旱直播水稻;湿基含水率;节间长度;单位长度节间质量;抗倒力学参数;倒伏指数

中图分类号:S275;S511　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)02-0227-15

Effects of Dry Direct Seeding on Water Distribution and Lodging Resistance of Rice Plants

WEI Yongxia[1,2]　HOU Jingxiang[1,2]　WU Yu[3,4]　LIU Hui[2,5]　RU Chen[1,2]　WANG Bai[6]

(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. *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*
6. *Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute*, *Harbin* 150080, *China*)

Abstract: In order to explore the effect of water saving irrigation pattern on water distribution and lodging resistance of rice plants, a test was carried out in Qing'an County, Heilongjiang Province from May to October 2017. Three treatments were set: drip irrigation dry direct seeding (DH), flood irrigation in dry land (MH) and conventional basin irrigation (CK). The results showed that the moisture content of the total wet base of crown and leaf, sheath and stem treated by DH and MH was lower than that of CK at full growth stage, but the moisture content of root wet base was higher than that of CK at the end of tillering stage. The moisture content of different internodes (W), internode length (L) and plant height in the stems of milk ripening and yellow ripening stage were the lowest in DH, and the CK treatment was the highest, but the unit internode weight (U_w) of stem was the largest in DH, and the CK treatment was the

收稿日期:2018-07-23　修回日期:2018-09-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC040010101)、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开放项目(2017009)和黑龙江省博士后科学基金项目(LBH-Z17017)

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: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

smallest. Compared with CK, DH significantly improved the flexural force (F), broken bending moment (B_m) and bending stress (B_s) of rice stem, and reduced the bending moment (W_p), cross-section modulus (Z) and lodging index (L_i), indicating that the drought resistance of rice was significantly improved by drip irrigation and dry direct seeding. The correlation between different parameters showed that L, W, W_p, Z and L_i showed significant positive correlation ($P<0.01$), while U_w, F, B_m, B_s and L_i showed significant negative correlation ($P<0.05$), and the moisture content of the wet base of rice stems had significantly positive correlation, indicating that the water content of stems could be used to characterize and predict the lodging index of rice. The research results can provide new methods and ways to solve the problems of rice lodging and low water efficiency in the black soil area of Northeast China. It was of great significance to ensure the grain yield and the sustainable utilization of agricultural water resources in the black soil area of Northeast China.

Key words: dry direct seeding rice; wet base moisture content; internode length; unit internode weight; lodging resistance parameters; lodging index

0 引言

水分是限制作物生长发育和产量形成的主要因子之一。作物体内的水分随生长发育不断发生变化,并对外界环境作出实时响应[1]。长期监测作物体内的水分分布状况,不仅可以揭示作物生长发育的内在规律,构建作物水分实时调控模型,实现精确的水分管理,制定科学合理的灌溉制度[2],而且对于充实土壤-植物-大气连续体(Soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)的理论体系具有重要意义[3]。田永超等[4]研究表明,水稻植株上部叶片含水率更易受土壤水分和环境的影响,当土壤水分供应不足时,上部叶片含水率迅速下降。柴金伶[5]研究了基于植气温差的小麦水分状况,建立了小麦植株水分监测模型。要世瑾等[6]利用核磁共振技术监测小麦植株水分分布,揭示了冬小麦植株体内的水分变化规律和植株衰老过程。

倒伏是水稻优质高产主要限制因子,KONA[7]指出,水稻发生倒伏后,叶片不能有效进行光合作用,而且茎部输导组织受伤,营养物质供应不畅,从而严重阻碍了光合产物的贮藏和运输,导致产量下降并且影响稻米品质。王燚等[8]研究表明,水稻倒伏与节间性状、节间维管束及茎部化学成分有关。李荣田等[9]研究表明,水稻倒伏使得茎秆机械组织受伤,进而使得地上部与地下部营养物质交换受阻,从而加速叶片和根系衰老。王在满等[10]研究了不同播种方式对直播水稻倒伏指数和根系生长的影响,表明开沟起垄方式下穴播较条播有利于提高水稻的抗倒伏能力。关于常规插秧种植水稻的倒伏特性,前人已有较多的研究[11],且关于小麦体内水分监测的研究也有报道[12-13],而关于旱直播种植模式下的水稻倒伏问题和水稻植株体内水分分布状况的研究未见报道。

水稻作为我国主要的粮食作物之一,其常规插秧种植方式存在用水效率低下[14]、易倒伏以及倒伏引起减产、收割难度加大、影响稻米品质等问题[15]。因此研究高效、节水的种植模式对于保障水稻优质高产和缓解我国水资源压力具有重要意义。

本试验以黑土区水稻为对象,研究节水灌溉种植模式对水稻植株体内的水分分布特征和抗倒伏特性的影响,并探索水稻茎部各参数之间的相关关系,以期为解决水稻倒伏、用水效率低下以及倒伏减产损质等问题提供新的方法和途径。

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。试区多年平均气温 2.6℃,年降雨量 500 ~ 600 mm,且降雨多集中在 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/cm^3,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 号水稻品种为供试作物,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)和常规插秧淹灌处理(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。不同生育期水分处理方案见表 1。DH 和 MH 处理的行间距采用行距 10 cm + 26 cm + 10 cm,穴距 10 cm,其中毛管布置于宽行。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/hm^2、磷肥 45 kg/hm^2、钾肥 80 kg/hm^2 的施肥量均施。其中氮肥按照基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥施用量为 4.5∶2∶1.5∶2 比例分施，钾肥按基肥、促花肥施用量为 1∶1 比例两次分施，磷肥作基肥一次性施入。DH 处理随水滴施，MH 和 CK 处理撒施。

本试验旱直播水稻播种时间为 5 月 1 日，常规插秧水稻插秧时间为 5 月 16 日。

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/mm	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：DH 和 MH 处理各生育期水分处理为占土壤饱和含水率的百分比。

1.3　测定项目及计算方法

本试验测定项目主要包括：水稻各器官含水率、株高、茎部各节间长、各节间湿基含水率、单位长度节间质量及抗倒力学参数等指标，且各处理的取样时间均在各生育期末进行。

（1）水稻各器官含水率

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）从每个测坑选取 5 穴植株，在植株周围 30 cm×30 cm×80 cm 取得完整植株样，并将水稻根部置于尼龙网袋中冲洗干净，断根同样回收，将植株按照叶、鞘、茎、穗和根分离后，分别称量植株各器官鲜质量并记录，之后将分离后的各器官放置于 105℃ 干燥箱中杀青 30 min，于 80℃ 下干燥至恒质量，并用精度 0.01 g 的电子天平称取植株各器官干质量。植株各器官含水率计算公式为

$$M_c = (F_w - D_w)/F_w \times 100\% \tag{1}$$

式中　M_c——植株各器官湿基含水率，%

F_w——植株各器官鲜质量，g

D_w——植株各器官干质量，g

（2）株高、各节间长度和各节间湿基含水率

分别于乳熟期和黄熟期在测定水稻各器官湿基含水率的同时，用直尺测定各处理水稻的株高和茎部各节间长度，将茎部各节间分离，称量各节间鲜质量并记录，之后同样放置于 105℃ 干燥箱中，杀青 30 min后于 80℃ 下干燥至恒质量，用精度 0.01 g 的电子天平称取茎部各节间干质量。各节间湿基含水率（W）仍按照式（1）计算。

（3）单位节间质量

分别于乳熟期和黄熟期在测定各处理茎部各节间干质量和各节间长度后，按照公式

$$U_w = G_d/L \tag{2}$$

式中　U_w——植株茎部各节间的单位长度节间质量，mg/cm

G_d——植株茎部各节间干质量，mg

L——植株茎部各节间长度，cm

计算乳熟期和黄熟期不同处理茎部各节间的单位长度节间质量。

（4）抗倒力学参数

对水稻易发生倒伏的两个生育期乳熟期和黄熟期，分别测定各处理易发生倒伏的茎部第 3、4、5 节间的抗倒力学参数。主要包括：抗折力、弯曲力矩、折断弯矩、断面模数、弯曲应力、倒伏指数。其中抗折力采用自行设计的支架，利用砝码重力下压茎秆，茎秆折断时测定出砝码质量即为抗折力（单位：g）。各节间茎壁的内、外径长度采用数显游标卡尺测量。抗倒力学参数计算方法参照 OOKAWA 等[16-17]的方法，计算公式为

$$W_p = S_l S_w \tag{3}$$

式中　W_p——弯曲力矩，g·cm

S_l——各节间基部至穗顶的长度，cm

S_w——各节间基部至穗顶的鲜质量，g

$$B_m = LF/4 \tag{4}$$

式中　B_m——折断弯矩，g·cm

F——各节间抗折力，g

$$Z = \frac{\pi(a_1^3 b_1 - a_2^3 b_2)}{32 a_1} \tag{5}$$

式中　Z——断面模数，mm^3

a_1——短轴外径，mm

a_2——短轴内径，mm

b_1——长轴外径，mm

b_2——长轴内径，mm

$$B_s = B_m/Z \tag{6}$$

式中　B_s——弯曲应力，g/mm^2

$$L_i = W_p/B_m \times 100\% \tag{7}$$

式中 L_i——倒伏指数,%

1.4 数据处理方法

所得数据用 Microsoft Excel 初步处理,用 SPSS 22.0 进行显著性和相关性分析,OriginPro 9.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻冠部水分变化规律的影响

水分是植物体的主要组成成分,水分亏缺直接影响着作物的生长生理和形态结构,研究水稻地上部植株含水率,可以直观方便地反映作物水分和生长状况[18]。对全生育期不同处理水稻冠部湿基含水率变化曲线(图 1,图中同一生育期不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著,下同)分析可知,不同种植模式下的水稻冠部湿基含水率均呈现出先增大后减小的变化趋势,在分蘖中期达到峰值。全生育期的冠部湿基含水率均以 CK 处理最大,DH 处理最小。分蘖前期至中期冠部湿基含水率逐渐上升,这主要是由于分蘖前期水稻植株较小,根系活力较低,吸水能力较弱[19],从根部运送至冠部的水分较少,使得分蘖前期较中期小。随着植株生长,到分蘖中期,DH、MH 和 CK 处理冠部湿基含水率已较分蘖前期分别升高 2.37%、2.61% 和 6.27%,此时期 3 个处理的冠部湿基含水率分别为 75.40%、76.89% 和 80.34%,三者差异达显著性水平($P<0.05$)。分蘖中期之后,3 个处理的冠部湿基含水率不断下降,至拔节孕穗期,3 个处理之间的冠部湿基含水率已不存在显著性差异($P>0.05$)。黄熟期,DH 和 MH 处理的冠部湿基含水率较 CK 处理分别显著下降 6.14% 和 4.83%($P<0.05$),表明旱直播种植水稻相比常规插秧种植冠部器官衰老较快,这可能是由于旱直播种植造成的水分胁迫使得后期水稻体内产生的脱落酸较多,后期衰老更快[20]。说明通过分析植株体内冠部各器官湿基含水率变化特征对于了解植株体兴衰过程具有重要意义。

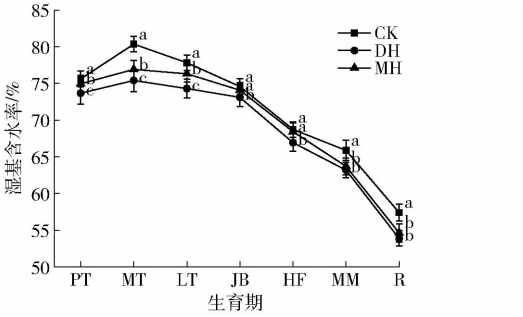

图 1 不同处理水稻冠部湿基含水率变化曲线

Fig. 1 Changing curves of wet base moisture content of rice under different treatments

2.2 不同处理对水稻冠部各器官水分分布的影响

随着生长发育进程,作物体内的水分会发生明显的变化,并对环境作出实时响应。分析水分在水稻植株体内的分布和变化规律,对于了解水稻对水分的利用机理和对环境的适应机制具有重要意义。将水稻冠部分为叶、鞘、茎和穗 4 部分,并绘制不同处理水稻冠部各器官湿基含水率变化曲线(图 2)。分析可知,3 个处理水稻冠部各器官湿基含水率均

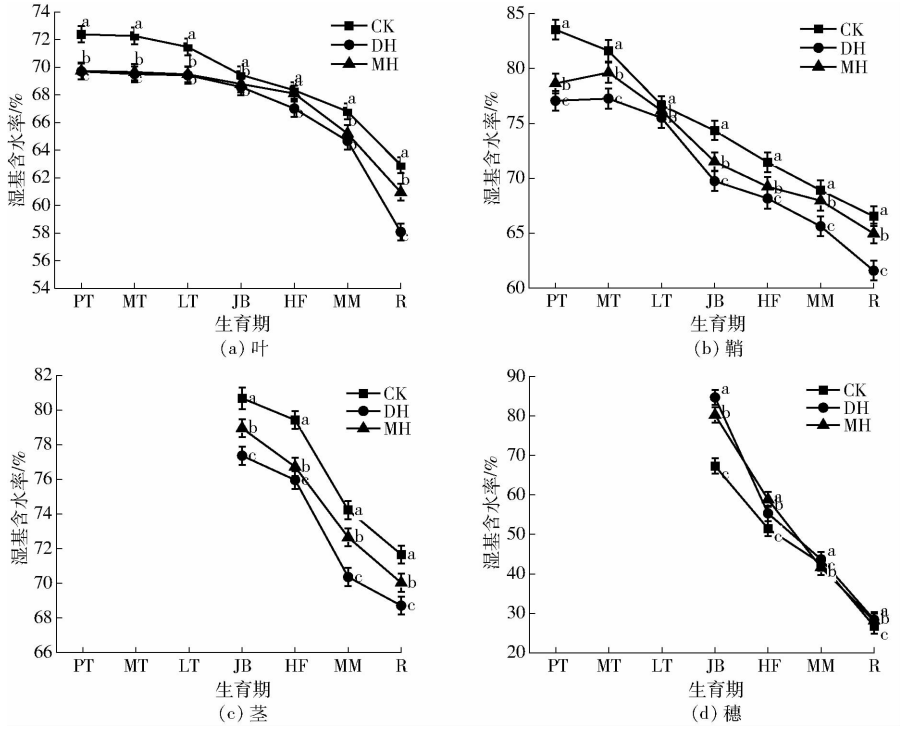

图 2 不同处理水稻冠部各器官湿基含水率变化曲线

Fig. 2 Variation curves of wet base water content in different crown organs of riceunder different treatments

随生育期的推进逐渐下降。分析叶部湿基含水率可知，DH、MH 和 CK 处理水稻叶片湿基含水率均在分蘖前期最大，分别为 69.70%、69.74% 和 72.38%，至黄熟期降至最低，分别为 58.09%、60.96% 和 62.92%，全生育期叶片湿基含水率均以 CK 处理最大，DH 处理最小，DH 和 MH 处理分别较 CK 处理显著降低 1.27% ~ 7.68% 和 0.35% ~ 3.65%（$P < 0.05$）。鞘部湿基含水率与叶片湿基含水率变化趋势基本一致。均以 CK 处理最大，DH 处理最小，DH 和 MH 处理分别较 CK 处理显著降低 1.52% ~ 7.76% 和 0.66% ~ 5.86%（$P < 0.05$）。全生育期不同处理的茎部湿基含水率由大到小排序为 CK、MH、DH。拔节孕穗期至黄熟期，DH 和 MH 处理分别较 CK 处理显著降低 4.11% ~ 5.20% 和 2.11% ~ 3.40%（$P < 0.05$）。表明不同的种植模式使得水稻植株的茎部湿基含水率有较大差异，旱直播种植水稻茎部较低湿基含水率的特性，可能是水稻在生长过程中对水分亏缺的环境条件作出的响应。对于穗部湿基含水率而言，3 个处理均在拔节孕穗期最大。且旱直播处理的穗部湿基含水率从拔节孕穗开始均高于常规插秧淹灌溉处理（乳熟期 MH 处理除外），拔节孕穗期至黄熟期，DH 处理穗部湿基含水率高于 CK 处理 2.37% ~ 25.79%，差异达显著性水平（$P < 0.05$）。除乳熟期 MH 处理穗部湿基含水率低于 CK 处理外，其他 3 个生育期 MH 处理均显著高于 CK 处理 5.09% ~ 19.15%（$P < 0.05$），黄熟期，DH、MH 和 CK 处理的穗部湿基含水率均降至最低，分别为 28.37%、28.08% 和 26.72%，水稻植株这种拔节孕穗期穗部湿基含水率较大，黄熟期较小的特性，可能是由于随着生育进程穗部器官淀粉不断合成消耗水分，使得穗部湿基含水率不断降低[21]。

2.3　不同处理对水稻根部器官水分分布的影响

全生育期内不同处理水稻根部湿基含水率变化曲线如图 3 所示。可见旱直播种植的水稻根部湿基含水率变化曲线的变化趋势与常规插秧种植模式并不相同。对于 CK 处理，全生育期根部湿基含水率均大致呈现出逐渐减小的趋势，而 DH 和 MH 处理，均呈现出先增大后减小的趋势。特别是从分蘖前期至末期，CK 处理与 DH 和 MH 处理的变化趋势相反。CK 处理的根部湿基含水率在分蘖前期最大，而 DH 和 MH 处理均在分蘖末期达到最大。分蘖前期，DH 和 MH 处理根部湿基含水率分别较 CK 处理显著下降 8.67%（$P < 0.05$）和 6.99%（$P < 0.05$），分蘖中期，DH 和 MH 处理分别较 CK 处理下降 3.01% 和 2.36%，差异显著（$P < 0.05$）。至分蘖末期，DH 和 MH 处理已分别较 CK 处理上升 0.42% 和 1.08%，差异显著（$P < 0.05$），这可能是由于 CK 处理分蘖末期的晒田导致了水稻根部活力减小，吸水性能下降，使得根部湿基含水率较旱直播处理显著下降，而对于旱直播水稻而言，由于长期处于无水层状态，因此分蘖末期的水分亏缺对旱直播水稻的根部湿基含水率影响并不大。拔节孕穗期 DH 和 MH 处理的根部湿基含水率出现下降，较分蘖末期下降 0.23%，这可能是由于拔节孕穗期的茎秆生长致使水分向茎部转运较多，从而使得根部湿基含水率出现轻微下降。抽穗开花期，DH 和 MH 处理分别较 CK 处理上升 1.23% 和 0.31%，差异达显著性水平（$P < 0.05$）。乳熟期和黄熟期，DH、MH 处理分别较 CK 处理升高 0.90%、0.78% 和 4.57%、3.42%，差异显著（$P < 0.05$）。而且从拔节孕穗到黄熟期，旱直播处理的根部湿基含水率下降速率明显缓于 CK 处理，具体表现为 DH 处理下降速率较 CK 处理减小 43.30%，MH 处理较 CK 处理减小 41.12%，表明旱直播处理有效延缓了水稻生育后期根系的衰老。

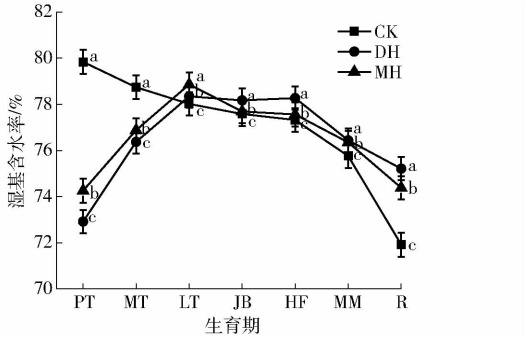

图 3　不同处理水稻根部湿基含水率变化曲线

Fig. 3　Variation curves of moisture content of rice roots under different treatments

2.4　不同处理的水稻茎部特性

2.4.1　水稻节间长度和株高变化特征

分析不同处理水稻乳熟期和黄熟期的节间长度与株高（图 4，图中 S1 表示节间 1，S2 表示节间 2，S3 表示节间 3，S4 表示节间 4，S5 表示节间 5。下同）可以发现，在乳熟期和黄熟期，不同处理的株高由高到低排序为 CK、MH、DH。乳熟期，DH 和 MH 处理株高分别较 CK 处理降低 9.58% 和 8.61%，差异显著（$P < 0.05$），黄熟期，DH 和 MH 处理株高分别较 CK 处理显著降低 8.94% 和 8.27%（$P < 0.05$），说明水稻旱直播种植较常规插秧种植可以显著降低植株的株高，有利于培育水稻矮秆性状，提高水稻的抗倒伏能力[16,22-25]。分析乳熟期和黄熟期 3 个处理间各节间长度差异可知，不同生育期不同处理间水稻节间长度由大到小均表现为 S1、S2、S3、S4、S5，且旱直播处理的穗长与各节间长度均较常规插秧处理显著降低（$P < 0.05$）。乳熟期，DH 和 MH 处理的穗

长度分别较 CK 处理显著下降 5.40% 和 5.12%($P<0.05$),DH 处理 S1 ~ S5 节间长度分别较 CK 处理降低 5.52%、4.35%、23.43%、15.10% 和 30.00%,差异显著($P<0.05$)。MH 处理 S1 ~ S5 节间长度分别较 CK 处理显著降低 5.17%、3.80%、20.81%、12.50% 和 28.33%($P<0.05$)。黄熟期,DH 和 MH 处理的穗长度分别较 CK 处理显著下降 3.57% 和 3.34%($P<0.05$),DH 处理 S1 ~ S5 节间长分别较 CK 处理显著降低 5.01%、4.37%、23.01%、15.18% 和 25.88%($P<0.05$),MH 处理 S1 ~ S5 节间长度分别较 CK 处理显著降低 4.89%、3.64%、20.98%、14.66% 和 25.00%($P<0.05$)。说明旱直播处理植株基部节间长度变短,株高变矮,这与顾掌根等[26]的直播稻植株变矮,基部节间变短,茎秆长度配置合理的研究结果一致。

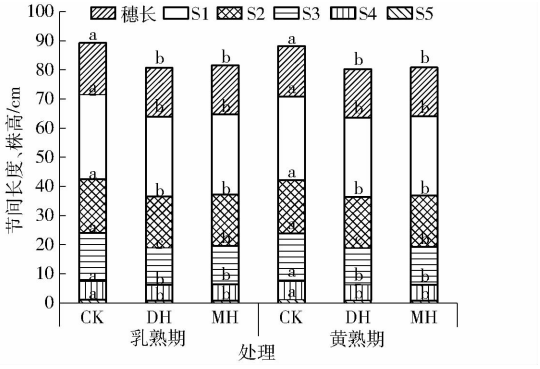

图 4 乳熟期和黄熟期不同处理水稻节间长度和株高变化

Fig. 4 Changes of internode length and plant height at milky and yellow maturity stages under different treatments

2.4.2 水稻茎部节间湿基含水率变化特征

进一步分析乳熟期和黄熟期不同处理水稻植株茎部各节间湿基含水率变化(图 5)可知,乳熟期和黄熟期各处理水稻茎部节间湿基含水率变化趋势基本一致,但不同处理间变化幅度存在明显差异,乳熟期各节间湿基含水率变化范围较小,黄熟期较大,但两个时期水稻各节间湿基含水率均以 CK 处理最大,DH 处理最小。具体分析各节间湿基含水率可知,两个时期不同处理各节间湿基含水率均表现为 S4 节间处最大(乳熟期 DH、MH 和 CK 处理分别为 73.50%、77.53% 和 82.12%,黄熟期分别为 72.40%、76.16% 和 81.11%),S2 或 S5 节间处最小,造成这种茎部节间湿基含水率差异性的原因可能是由于水稻植株叶片的蒸腾作用引起的水分在植株体内运输和在节间分布的差异所引起。乳熟期,DH 和 MH 处理节间湿基含水率较 CK 处理下降 6.99% ~ 16.21% 和 5.07% ~ 8.10%,差异显著($P<0.05$),DH 较 MH 处理下降 2.16% ~ 11.73%,且在 S1、S4、S5 节间处差异达显著性水平($P<0.05$)。对于易发生倒伏的 S3、S4、S5 节间处的湿基含水率,DH 和 MH 处理较 CK 处理分别下降 10.36%、10.50%、16.21% 和 8.10%、5.59%、5.07%,DH 较 MH 处理分别下降 2.46%、5.20%、11.73%,差异显著($P<0.05$)。至黄熟期,同一处理各节间湿基含水率波动幅度增大,DH 和 MH 处理节间湿基含水率较 CK 处理下降 5.92% ~ 13.56% 和 1.84% ~ 9.49%,差异显著($P<0.05$)(MH 处理 S1 节间除外),DH 较 MH 处理下降 0.84% ~ 7.12%,且在 S1、S4、S5 节间处差异达显著性水平($P<0.05$)。对于 S3、S4、S5 节间处的湿基含水率,DH 和 MH 处理较 CK 处理分别下降 10.25%、10.74%、13.56% 和 9.49%、6.10%、6.94%,DH 较 MH 处理分别下降 0.84%、4.94%、7.12%,差异显著($P<0.05$,S3 节间除外)。表明黄熟期 DH 与 MH 处理间 S3 ~ S5 节间的湿基含水率差距较乳熟期有所减小,这可能是由于漫灌旱直播水稻生育后期细胞的保水性不如滴灌旱直播水稻,使得漫灌旱直播较滴灌旱直播水稻黄熟期细胞衰老更快。

2.4.3 水稻茎部单位长度节间质量变化特征

分析乳熟期和黄熟期不同处理水稻单位长度节间质量变化(图 6)可知,乳熟期和黄熟期水稻茎部单位长度节间质量均以 DH 处理最大,CK 处理最小。3 个处理的茎部不同节位的单位长度节间质量

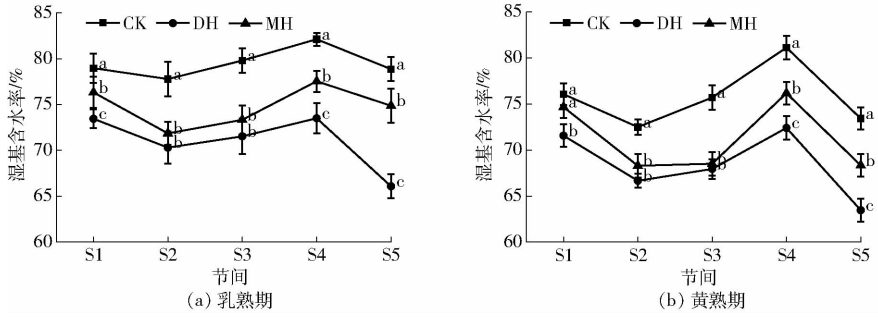

图 5 乳熟期和黄熟期不同处理水稻节间湿基含水率变化曲线

Fig. 5 Variation curves of moisture content of stem segments of rice at milky and yellow maturity stages under different treatments

变化趋势保持一致，随着水稻植株高度的升高，茎部不同节位的单位长度节间质量呈下降趋势，且均表现为 S5 节间到 S4 节间下降幅度最大。乳熟期，DH 和 MH 处理的 S1 ~ S3 单位长度节间质量较 CK 处理上升 54.73% ~ 158.35% 和 44.04% ~ 148.32%，差异显著（$P < 0.05$）。相比乳熟期，DH、MH 和 CK 处理 S4 和 S5 处单位长度节间质量在黄熟期有所下降，分别降低 25.84%、37.01%、17.87% 和 39.89%、60.84%、11.03%，表明旱直播种植水稻基部单位长度节间质量较常规插秧淹灌溉下降较快。对于乳熟期 S4 和 S5 单位长度节间质量，DH、MH 和 CK 处理分别为 47.61、37.29、24.89 mg/cm 和 236.04、176.07、66.02 mg/cm，且三者之间差异均达显著性水平（$P < 0.05$）。乳熟期和黄熟期的 DH、MH 和 CK 处理 S4 单位长度节间质量分别较 S5 下降 79.83%、78.82%、62.30% 和 75.12%、65.93%、65.20%。这种基部单位长度节间质量较大的特点使得水稻在基部倒伏的概率大大降低[27]。

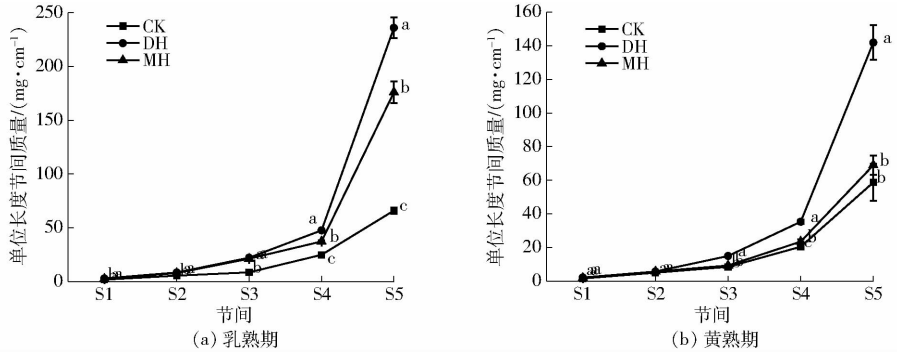

图 6　乳熟期和黄熟期不同处理水稻单位长度节间质量变化曲线

Fig. 6　Changing curves of internode weight per unit length of rice at milky and yellow maturity stages under different treatments

2.5　不同处理水稻茎秆抗倒伏能力

分析不同处理对乳熟期和黄熟期水稻茎秆抗倒力学参数的影响（图 7）可知，乳熟期和黄熟期 3 个处理不同节间的抗折力 F 变化由大到小均表现为 S5、S4、S3，且不同节间 F 均以 DH 处理最高，CK 处理最低，乳熟期和黄熟期 DH 处理 F 较 CK 显著升高 21.95% ~ 43.58% 和 23.02% ~ 46.15%（$P < 0.05$），MH 处理 F 较 CK 显著升高 18.08% ~ 33.85% 和 19.17% ~ 36.47%（$P < 0.05$），表明随植株高度的上升，不同处理水稻茎部节间的抗折力逐渐下降，同时滴灌旱直播种植更有利于提高水稻基部节间的抗折力。不同处理间的不同节间的折断弯矩变化趋势同 F 变化趋势，由大到小排序为 DH、MH、CK，但同一处理不同节间 B_m 变化幅度相较 F 有所下降，具体表现为 DH 处理 3 个节间的 B_m 相比 CK 处理上升 3.53% ~ 7.76% 和 4.34% ~ 10.33%，差异显著（$P < 0.05$），MH 处理相比 CK 处理显著上升 3.33% ~ 6.30% 和 1.70% ~ 8.54%（$P < 0.05$）。同时滴灌旱直播种植显著提高了各节间的弯曲应力 B_s，且越靠近基部 B_s 越小，乳熟期 S3、S4、S5 节间 B_s 较 CK 处理显著升高 107.85%、88.78%、51.23%（$P < 0.05$），黄熟期分别显著升高 117.29%、93.73%、54.49%（$P < 0.05$）。乳熟期和黄熟期弯曲力矩 W_p 和断面模数 Z 均随植株高度上升而下降，且 DH 处理最小，CK 处理最大。具体分析可知，DH 和 MH 处理的 Z 较 CK 处理分别显著降低 29.97% ~ 49.22% 和 23.14% ~ 40.50%（$P < 0.05$），W_p 分别下降 26.89% ~ 30.81% 和 25.68% ~ 28.97%（$P < 0.05$）。不同处理的倒伏指数 L_i 虽有明显差异，但是均以 S4 节间处最大，S3 节间最小。乳熟期，DH、MH 和 CK 处理 S4 节间的 L_i 分别为 75.40%、77.53% 和 112.78%，DH 和 MH 处理分别较 CK 显著降低 33.15% 和 31.26%（$P < 0.05$），黄熟期 L_i 分别为 75.50%、79.22% 和 113.17%，DH 和 MH 处理分别较 CK 显著降低 33.29% 和 30.00%（$P < 0.05$），表明黄熟期相比乳熟期更易倒伏，倒伏风险升高。相比 S4 节间倒伏指数，S5 节间 L_i 显著下降，乳熟期 DH、MH 和 CK 处理 S5 节间 L_i 较 S4 节间 L_i 分别下降 21.88%、22.25% 和 23.12%，黄熟期分别下降 20.86%、22.53% 和 24.84%，这与杨世民等[28]研究结果一致。表明旱直播处理在提高茎部抗折力的同时节间长度减小，茎壁厚度和茎秆充实度增加，茎部形态结构得以优化和改善，使得倒伏指数显著下降，且以滴灌旱直播种植模式为最佳。

2.6　不同处理水稻茎秆各参数之间的相关关系

2.6.1　乳熟期和黄熟期水稻茎秆节间各参数之间的相关性

为研究乳熟期和黄熟期水稻节间长度 L、节间湿基含水率 W、单位长度节间质量 U_w 与水稻茎秆抗倒力学参数之间的相关关系，对 L、W、U_w 与 W_p、F、B_m、Z、B_s、L_i 之间分别进行相关分析，相关系数如表 2 和表 3 所示。乳熟期和黄熟期不同节间的各相

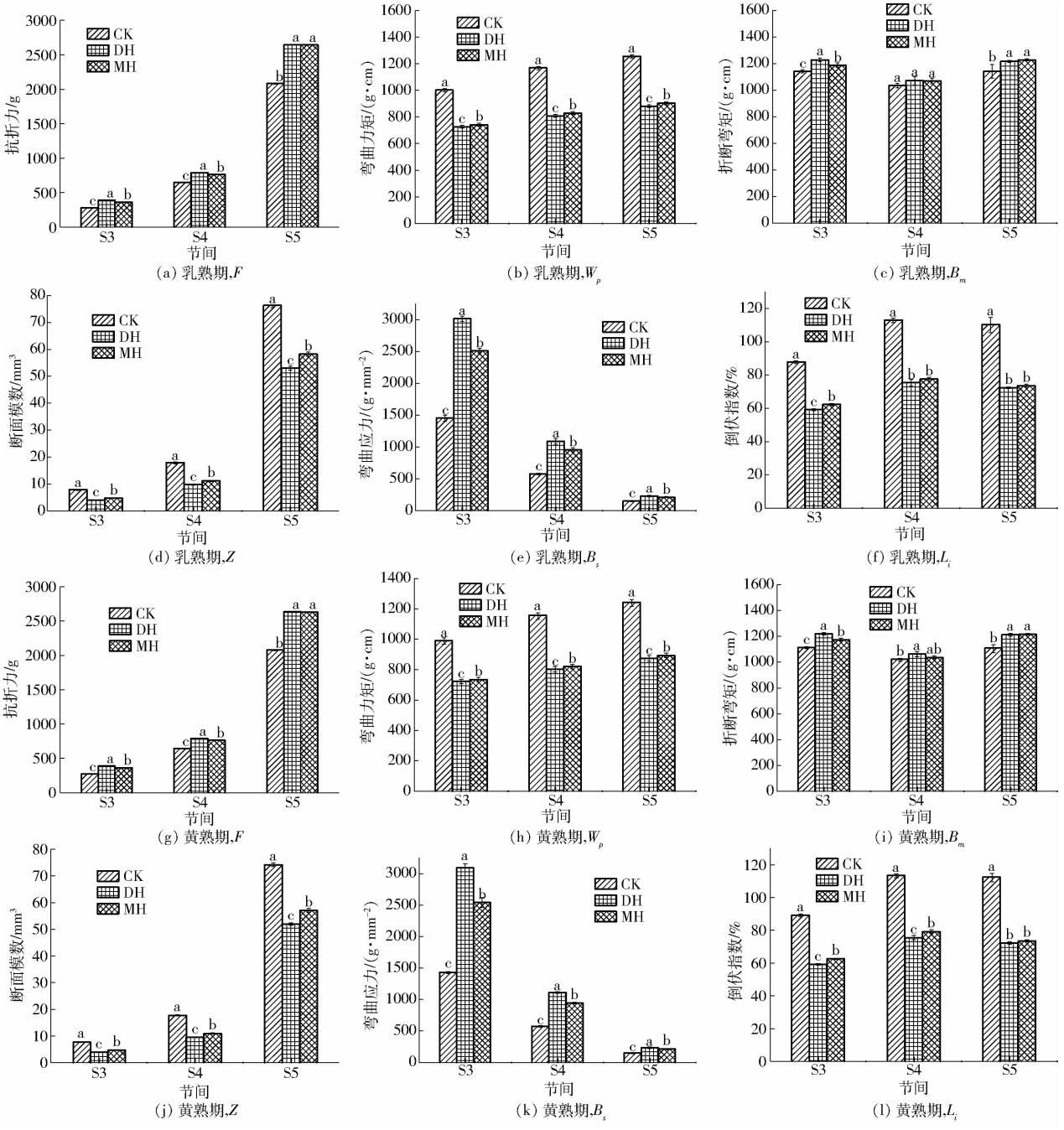

图 7 不同处理对乳熟期和黄熟期水稻茎秆抗倒力学参数的影响

Fig. 7 Effects of different treatments on lodging resistance parameters of rice stem at milky and yellow maturity stages

关系数变化趋势基本一致,可以看出,乳熟期和黄熟期的 L、W、W_p、Z 与 L_i 之间均表现为极显著正相关($P<0.01$)(乳熟期 S5 节间的 W 与 L_i 呈显著正相关($P<0.05$)),而 U_w、F、B_m、B_s 与 L_i 呈显著负相关($P<0.05$),表明降低水稻节间长度、节间湿基含水率、弯曲力矩和断面模数,同时提高单位长度节间质量、抗折力、折断弯矩和弯曲应力对于降低倒伏指数具有重要意义,这与张明聪等[29]的研究结果一致。乳熟期各节间的 L、U_w 与 F 之间分别呈极显著负相关和极显著正相关($P<0.01$),黄熟期的 L、U_w 与 F 之间分别呈极显著负相关($P<0.01$)和显著正相关($P<0.05$,除 S5 节间的 U_w 与 F 外),说明乳熟期各节间的 L、U_w 与 F 的相关性优于黄熟期的相关性。这与莫永生等[30]的水稻茎秆的节间长度与抗折力呈负相关,节间粗度、厚度和干物质量与抗折力呈正相关的结论相吻合。

对比乳熟期和黄熟期不同节间的 L、W、U_w、W_p、F、B_m、Z 和 B_s 等参数与 L_i 之间的相关系数可知,S3 和 S4 节间与 L_i 的相关性均优于 S5 节间的相关性,这可能是由于水稻茎秆的倒伏发生在基部第 1 节间的概率小于发生在基部第 2、3 节间的概率,使得各个参数对 S5 节间倒伏指数的指示作用小于对 S3 和 S4 节间的指示作用,这与马均等[31]的重穗型水稻的第 3、4 节间倒伏指数大于第 5 节间倒伏指数的研

表 2　乳熟期水稻节间长度、节间湿基含水率、单位长度节间质量与抗倒力学参数的相关系数

Tab. 2　Correlation coefficients of internode length, internode wet base moisture content, internode weight per unit length and lodging resistance mechanics parameters of rice at milky stage

节间		L	W	U_w	W_p	F	B_m	Z	B_s
S3	W	0.973**							
	U_w	−0.999**	−0.969**						
	W_p	0.996**	0.949**	−0.997**					
	F	−0.992**	−0.966**	0.985**	−0.985**				
	B_m	−0.900**	−0.963**	0.885**	−0.857**	0.917**			
	Z	0.992**	0.958**	−0.989**	0.991**	−0.996**	−0.893**		
	B_s	−0.972**	−0.955**	0.961**	−0.961**	0.993**	0.931**	−0.987**	
	L_i	1.000**	0.970**	−0.999**	0.997**	−0.993**	−0.895**	0.995**	−0.974**
S4	W	0.949**							
	U_w	−0.940**	−0.981**						
	W_p	0.964**	0.871**	−0.909**					
	F	−0.976**	−0.917**	0.951**	−0.993**				
	B_m	−0.800**	−0.769*	0.652	−0.646	0.661			
	Z	0.967**	0.904**	−0.943**	0.993**	−0.998**	−0.635		
	B_s	−0.980**	−0.950**	0.972**	−0.974**	0.992**	0.689*	−0.991**	
	L_i	0.981**	0.891**	−0.912**	0.996**	−0.991**	−0.710*	0.988**	−0.976**
S5	W	0.761*							
	U_w	−0.920**	−0.926**						
	W_p	0.957**	0.767*	−0.951**					
	F	−0.960**	−0.736*	0.935**	−0.999**				
	B_m	−0.928**	−0.576	0.732*	−0.789*	0.803**			
	Z	0.942**	0.856**	−0.984**	0.985**	−0.976**	−0.752*		
	B_s	−0.963**	−0.870**	0.986**	−0.978**	0.969**	0.802**	−0.995**	
	L_i	0.986**	0.758*	−0.941**	0.991**	−0.993**	−0.862**	0.973**	−0.978**

注：* 表示变量之间在 $P<0.05$ 水平差异显著，** 表示变量之间在 $P<0.01$ 水平差异显著，下同。

表 3　黄熟期水稻节间长度、节间湿基含水率、单位长度节间质量与抗倒力学参数的相关系数

Tab. 3　Correlation coefficients of internode length, internode wet base moisture content, internode weight per unit length and lodging resistance mechanics parameters of rice at yellow maturity stage

节间		L	W	U_w	W_p	F	B_m	Z	B_s
S3	W	0.983**							
	U_w	−0.656	−0.653						
	W_p	0.997**	0.975**	−0.618					
	F	−0.991**	−0.967**	0.732*	−0.987**				
	B_m	−0.931**	−0.928**	0.880**	−0.908**	0.957**			
	Z	0.995**	0.970**	−0.713*	0.991**	−0.998**	−0.951**		
	B_s	−0.967**	−0.946**	0.822**	−0.954**	0.988**	0.987**	−0.985**	
	L_i	0.999**	0.981**	−0.672*	0.997**	−0.995**	−0.937**	0.997**	−0.973**
S4	W	0.930**							
	U_w	−0.724*	−0.917**						
	W_p	0.987**	0.887**	−0.681*					
	F	−0.986**	−0.925**	0.756*	−0.994**				
	B_m	−0.768*	−0.915**	0.886**	−0.678*	0.734*			
	Z	0.982**	0.921**	−0.756*	0.992**	−0.999**	−0.723*		
	B_s	−0.964**	−0.957**	0.844**	−0.964**	0.988**	0.791*	−0.988**	
	L_i	0.995**	0.916**	−0.720*	0.997**	−0.997**	−0.730*	0.994**	−0.975**
S5	W	0.874**							
	U_w	−0.624	−0.902**						
	W_p	0.982**	0.862**	−0.616					
	F	−0.984**	−0.848**	0.590	−0.999**				
	B_m	−0.972**	−0.858**	0.576	−0.944**	0.952**			
	Z	0.962**	0.914**	−0.736*	0.984**	−0.976**	−0.909**		
	B_s	−0.966**	−0.934**	0.757*	−0.979**	0.973**	0.927**	−0.997**	
	L_i	0.990**	0.871**	−0.614	0.997**	−0.998**	−0.967**	0.977**	−0.977**

究结果一致。

2.6.2 乳熟期和黄熟期水稻茎秆湿基含水率与倒伏指数的相关性

如图 8 所示,通过分析可以得出,乳熟期和黄熟期水稻茎秆湿基含水率均与倒伏指数呈极显著正相关($P < 0.01$),回归方程分别为 $y = 3.145\ 3x - 157.728$($R = 0.719$, $P < 0.01$)和 $y = 3.076\ 4x - 141.452$($R = 0.798$, $P < 0.01$)。结果表明,乳熟期和黄熟期水稻茎秆的湿基含水率能够作为水稻茎秆倒伏指数的评价指标,可以较好地反映出茎秆湿基含水率对水稻倒伏指数的影响,能够为预测水稻倒伏指数提供参考依据。

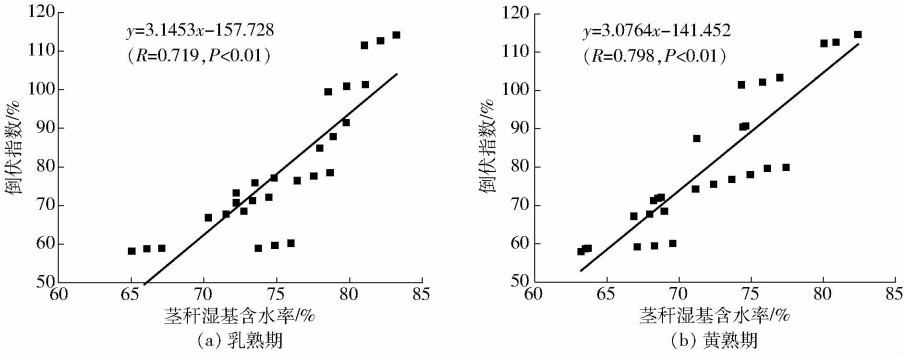

图 8 乳熟期和黄熟期水稻茎秆湿基含水率与倒伏指数的相关性

Fig. 8 Correlation between moisture content and lodging index of stem at milky and yellow maturity stages

3 讨论

水分作为植物体的主要组成成分,对植物的生理生化过程和形态结构具有重要作用,同时作物体内的水分状况将进一步影响作物的生长、产量和品质。因此,准确监测出作物各器官的水分分布状况,对于提高作物的水分管理水平和水分利用效率进而促进节水高产农业发展具有重要的理论指导意义。KRAMER[32]较早地认识到植物冠层湿基含水率的重要性,并且表明湿基含水率可以在很大程度上反映出作物生长发育的实际水分状况。赵春江等[33]也研究了小麦冠部湿基含水率与温度的关系,刘良云等[34]研究了叶片水分对叶片反射率光谱的影响,同样也是以湿基含水率作为研究指标。要世瑾等[6]利用核磁共振技术检测植株体内的湿基含水率,以此来反映小麦植株体内的水分分布状况。本试验亦通过研究水稻各器官的湿基含水率来反映作物体内各器官的水分分布状况。研究发现,不同种植模式处理下水稻冠部含水率变化趋势较为一致,从分蘖前期至中期出现短暂上升后开始不断下降,且全生育期冠部湿基含水率均以滴灌旱直播水稻最低,常规插秧水稻最高,这可能是由于旱直播种植造成的水分胁迫引起了水稻植株体内束缚水与自由水比值的增大[35],使得旱直播种植水稻冠部含水率低于常规插秧种植。本文进一步研究不同种植模式下水稻冠部各器官湿基含水率发现,水稻冠部的叶、鞘、茎和穗器官的湿基含水率均随生育期推进不断下降,这与魏永霞等[36]的水分亏缺均使得玉米的叶片、茎秆、果穗等冠部器官湿基含水率下降的研究结果一致。而且旱直播种植水稻的叶、鞘和茎部湿基含水率均低于常规插秧种植,但穗部湿基含水率却高于常规插秧种植,这可能是由于旱直播水稻的光合速率较常规插秧水稻低,叶片利用水分合成淀粉等有机物的速率较常规插秧水稻也有所下降,从而使得穗部水分出现升高[19]。对比冠部湿基含水率和叶片湿基含水率(图 1 和图 2a)可以发现,随生育进程推进,不同处理的叶片湿基含水率较冠部湿基含水率下降更为缓慢,这与王娟等[37]的研究结果相吻合,刘小军[38]也得出类似的结论。本文具体分析叶片湿基含水率下降的原因后发现,抽穗开花期之前叶片湿基含水率不断下降可能是由于分蘖前期至抽穗开花期叶片的不断生长导致光合速率增加[19],气孔开度增大,蒸腾速率加大,进而导致水分散失量上升,湿基含水率不断下降[6]。而抽穗开花期之后叶片湿基含水率仍不断下降主要是由于叶片衰老所致,叶片衰老的同时使得叶片中的叶绿体等细胞器和生物大分子降解,而降解物又作为营养物质被转运至籽粒和其他器官,这个转运过程同时也使得叶片的湿基含水率下降[39]。至于旱直播种植的湿基含水率下降速率明显高于常规插秧种植的原因可能是由于水稻长期在干旱胁迫下叶片生长受限,后期衰老较快[40]。对比穗部湿基含水率与叶、鞘、茎部的湿基含水率可以发现,整个生育期,不同种植模式下水稻由分蘖至成熟的过程中,叶部湿基含水率由 70.61% 左右下降至 60.66% 左右,鞘部由 79.75% 左右下降至 64.37% 左右,茎部由 79.00% 左右下降至 70.13% 左右,而穗部由 77.44% 左右下降至 27.72% 左右,表明穗部湿基含水率整个生育期变化

幅度最大，这与柴金伶[5]对小麦水分状况的研究结果一致，要世瑾等[6]也得出类似结论。

根系作为植物吸收水分和感知土壤干旱程度的重要器官，研究根系的含水率特征对于了解作物的生长生理状况具有重要作用。已有学者[41]研究发现，常规插秧种植水稻根系由于长期处于淹水状态，使得后期根系活力下降，光合速率和蒸腾速率下降，同时营养物质的吸收和运输受到影响。本试验研究发现，不同种植模式生育前期根部湿基含水率差距较大，但从分蘖末期之后变化趋势较为一致，且均以滴灌旱直播最高，常规插秧最低，这表明滴灌旱直播种植显著提高了水稻生育后期的根系活力，使得根系吸水能力大大提高，湿基含水率增大，这与胡继超等[42]的研究结果吻合。

茎部作为传递与运输地上与地下水分和养分的重要通道，其含水率变化和形态特征对作物生长和产量的形成具有重要作用。茎部整体的湿基含水率随生育进程推进呈下降趋势，这也与前人研究结果吻合[6,19]。但本文进一步研究乳熟期和黄熟期水稻各节间的湿基含水率变化特征发现，水稻茎部各节间湿基含水率随植株高度的上升均呈“S”形曲线变化，穗下部 S1 节间的湿基含水率大于 S2 节间，这与要世瑾等[6]的研究结果一致。S2 ~ S4 节间湿基含水率不断增加，这可能与水分由下向上传输，上部节间水分补给存在相应的滞后和延迟有关。而且由于植物体内水分的长距离传递和运输的动力主要来自于叶片的蒸腾拉力，水分总是由高水势传向低水势区域[43]，这就形成了上部基本较低下部较高的含水率特征。S5 节间的含水率下降幅度较大，主要是由于节间长度对其含水率影响较大。以上分析表明，水分在作物体内不同部位具有不同的分布特征，这种水分的重新分配是作物对外界条件作出的具体调整与适应[44]。

倒伏一直是影响作物产量的主要限制因子，而茎秆形态及其结构是关系水稻倒伏的重要因素[45]。有研究[15]表明，充足的水分容易诱发水稻倒伏，充足的硅、钾可以提高抗倒伏能力[46]。本试验通过研究比较不同种植模式下水稻的抗倒伏特性，表明滴灌旱直播种植较常规插秧种植显著提高了茎部的抗折力，降低了水稻成熟期的倒伏指数，这与刘立军等[47]的旱种水稻相比常规水种水稻更易倒伏的研究结果不同，究其原因可能是刘立军等的研究是在旱种旱管条件下进行，即除在分蘖期、孕穗期、开花期和灌浆期分别灌水一次外，其他生育期均不灌水，这种全生育期的干旱胁迫严重限制了水稻的生长发育，阻碍了茎秆的充实，使得抗倒伏能力减弱。而本试验的旱直播种植全生育期均以土壤含水率作为灌水指标，并未对水稻造成持续性的严重干旱胁迫。关于引起倒伏的原因，前人已做过较多研究[48]，但是关于旱直播水稻倒伏原因鲜见报道。刘立军等[49]的研究表明，旱种旱管水稻易发生倒伏可能的生理机制是旱种水稻植株的早衰影响了茎秆物质的充实，引起了杆壁厚度和单位长度节间质量降低，进而使得茎秆强度降低，引起倒伏。本试验研究表明，相比常规插秧水稻，旱直播种植水稻茎部单位长度节间质量较大，茎壁较厚，节间长度较短。这可能是由于旱直播种植水稻较大的根系活力使得根系向地上部运输水分的能力较强[19]，从而使得茎部维管束增多[50]，而较多的维管束对于提高茎部的抗到性具有一定作用。同时旱直播种植水稻较为发达的根系有效防止了根倒现象的发生，这就使得旱直播种植水稻倒伏指数较常规插秧种植显著降低。

已有研究表明，水稻节间干物质减少和茎秆抗折力降低存在显著的线性相关[51]。杨惠杰等[52]研究表明茎秆的抗折力强弱与茎秆贮藏的干物质量和秆壁厚度呈显著正相关。华泽田等[45]研究表明，抗倒力矩与茎秆形态、生理指标的关联最密切，而与其他器官的生理指标关联度不大，表明叶鞘对水稻抗倒伏所起作用不大。闵东红等[53]也得出单位长度节间质量与抗折力之间存在显著正相关关系的结论。这表明节间干物质积累量越多，其茎秆机械强度就越大，抗倒伏能力越强。本试验研究也发现，水稻单位长度节间质量与节间折断力呈极显著正相关（$P < 0.01$），这与前人研究结果一致。

作物茎秆的物理性状是影响作物倒伏的重要因素。作物茎秆湿基含水率对其力学特性的影响已有较多报道[54-55]。陈超科等[56]对高粱秸秆力学特性的研究表明，茎秆含水率与茎秆抗弯强度密切相关。张彦河[57]的研究结果表明，秸秆含水率是影响秸秆径向剪切的主要因素。秦翠兰[58]对棉秆的力学性能进行了研究，并建立了棉秆剪切强度、弯曲强度与茎秆含水率的回归模型。于勇等[59]研究了玉米茎秆湿基含水率对茎秆拉伸特性的影响，结果表明，玉米茎秆基部的抗拉强度随湿基含水率的增加而降低，这主要是由于茎秆内部组织结构的塑性随湿基含水率的增加逐渐降低所导致[60]。张慧[61]从玉米抗倒伏因素出发，研究了茎秆的弹性模量与茎秆含水率之间的关系，研究结果表明，玉米茎秆的弹性模量与茎秆含水率之间呈显著的正相关，同时弹性模量与茎秆刚度呈正相关，而与玉米茎秆的最大弯折力呈负相关，这表明了茎秆含水率与茎秆最大弯折力呈负相关，而弯折力与倒伏指数呈负相关。本试

验研究表明,水稻茎秆的湿基含水率与倒伏指数存在极显著的正相关关系($P<0.01$),这与张慧[61]的研究结果相吻合。同时,本试验研究表明,茎秆的弯曲应力与湿基含水率呈显著负相关关系,这与 TAVAKOLI 等[62]的小麦茎秆的弯曲应力随湿基含水率的增大而降低的研究结果一致,这也从另一方面证明了茎秆湿基含水率与倒伏指数具有正相关关系,利用茎秆湿基含水率来表征倒伏指数具有一定的可行性。

4 结论

(1)滴灌旱直播、漫灌旱直播和常规插秧淹灌 3 个处理的叶、鞘、茎、穗和冠部湿基含水率均随生育期的推进不断下降,其中叶、鞘和茎部湿基含水率均以滴灌旱直播种植模式最低,常规插秧种植模式最高。旱直播种植水稻穗部湿基含水率全生育期均高于常规插秧种植模式(乳熟期漫灌旱直播处理除外),根部湿基含水率从分蘖末期开始高于常规插秧种植模式,且滴灌旱直播处理最高。

(2)乳熟期和黄熟期 3 个处理水稻茎部节间湿基含水率随高度的升高呈现“S”形曲线趋势变化,且均以常规插秧种植模式最大,滴灌旱直播种植模式最小。3 个处理均以 S4 节间最大,S2 或 S5 节间最小。

(3)旱直播种植水稻株高和节间长度较常规插秧种植下降显著($P<0.05$)。滴灌旱直播种植水稻的 S3、S4 和 S5 节间的单位长度节间质量较常规插秧处理显著升高($P<0.05$),茎秆充实度显著提高。

(4)乳熟期和黄熟期滴灌旱直播种植较常规插秧显著提高了水稻茎部的抗折力、折断弯矩和弯曲应力,降低了弯曲力矩、断面模数和倒伏指数,倒伏指数均以 S3 节间最低。滴灌旱直播种植水稻的抗倒伏能力显著提高。

(5)乳熟期和黄熟期 3 个处理不同节间的节间长度、节间湿基含水率、弯曲力矩、断面模数与倒伏指数之间均表现为极显著正相关($P<0.01$),而单位长度节间质量、抗折力、折断弯矩、弯曲应力与倒伏指数呈显著负相关($P<0.05$),且水稻茎部湿基含水率与倒伏指数呈极显著正相关($P<0.01$),利用茎秆湿基含水率能够表征和预测水稻倒伏指数。

参 考 文 献

[1] 刘培,蔡焕杰,王健. 土壤水分胁迫对冬小麦生长发育、物质分配及产量构成的影响[J]. 农业现代化研究,2010,31(3):330 – 333.
LIU Pei, CAI Huanjie, WANG Jian. Effects of soil water stress on growth development, dry-matter partition and yield constitution of winter wheat[J]. Research of Agricultural Modernization, 2010,31(3):330 – 333. (in Chinese)

[2] 刘小军,邱小雷,孙传范,等. 基于知识模型和 PDA 的精确农作系统设计及应用[J]. 农业工程学报,2010,26(1):210 – 215.
LIU Xiaojun, QIU Xiaolei, SUN Chuanfan, et al. Design and application of knowledge model and PDA-based precision farming system[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(1):210 – 215. (in Chinese)

[3] 杨启良,张富仓,刘小刚,等. 植物水分传输过程中的调控机制研究进展[J]. 生态学报,2011,31(15):4427 – 4436.
YANG Qiliang, ZHANG Fucang, LIU Xiaogang, et al. Search progress on regulation mechanism for the process of water transport in plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(15):4427 – 4436. (in Chinese)

[4] 田永超,曹卫星,王绍华,等. 不同水、氮条件下水稻不同叶位水、氮含量及光合速率的变化特征[J]. 作物学报,2004,30(11):1129 – 1134.
TIAN Yongchao, CAO Weixing, WANG Shaohua, et al. Variation of water and nitrogen contents & photosynthesis at different position leaves of rice under different soil water and nitrogen conditions[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004,30(11):1129 – 1134. (in Chinese)

[5] 柴金伶. 基于植气温差的小麦水分状况监测研究[D]. 南京:南京农业大学,2011.
CHAI Jinling. Monitoring of water status with plant-air temperature difference in wheat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2011. (in Chinese)

[6] 要世瑾,杜光源,牟红梅,等. 基于核磁共振技术检测小麦植株水分分布和变化规律[J]. 农业工程学报,2014,30(24):177 – 186.
YAO Shijin, DU Guangyuan, MOU Hongmei, et al. Detection of water distribution and dynamics in body of winter wheat based on nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(24):177 – 186. (in Chinese)

[7] KONA M. Physiological aspects of lodging[C]// Food and Agriculture Policy Research Center, Tokyo,1995:971 – 982.

[8] 王燚,魏中伟,邵平,等. 水稻茎秆特性与抗倒伏关系的研究现状[J]. 湖北农业科学,2015,54(9):2054 – 2057.
WANG Yi, WEI Zhongwei, SHAO Ping, et al. Research status on relationship between culm characteristics and lodging resistance of rice[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015,54(9):2054 – 2057. (in Chinese)

[9] 李荣田,姜廷波,秋太权,等. 水稻倒伏对产量影响及倒伏和株高关系的研究[J]. 黑龙江农业科学,1996(1):13 – 17.
LI Rongtian, JIANG Tingbo, QIU Taiquan, et al. Study on effect of lodging to yield and relationship between lodging and plant height in rice[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 1996(1):13 – 17. (in Chinese)

[10] 王在满,郑乐,张明华,等. 不同播种方式对直播水稻倒伏指数和根系生长的影响[J]. 江苏农业学报,2016,32(4):725 – 728.

WANG Zaiman, ZHENG Le, ZHANG Minghua, et al. Effects of seeding manners on lodging index and root growth of direct-seeded rice[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2016,32(4):725 – 728. (in Chinese)

[11] 邓文,青先国,马国辉,等. 水稻抗倒伏研究进展[J]. 杂交水稻,2006,21(6):6 – 10.
DENG Wen, QING Xianguo, MA Guohui, et al. Progress of research on lodging resistance in rice[J]. Hybrid Rice, 2006, 21(6):6 – 10. (in Chinese)

[12] 郭子卿. 基于植气温度指标的小麦水分无损监测研究[D]. 南京:南京农业大学,2014.
GUO Ziqing. Mornitoring the water status on the temperature of plant and atmosphere in wheat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2014. (in Chinese)

[13] 杜光源,唐燕,张嵩午,等. 小麦叶片衰老态势核磁共振分析[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(4):264 – 270.
DU Guangyuan, TANG Yan, ZHANG Songwu, et al. Investigating senescence status of wheat leaves by nuclear magnetic resonance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):264 – 270. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140442&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.042. (in Chinese)

[14] 茆智. 水稻节水灌溉及其对环境的影响[J]. 中国工程科学,2002,4(7):8 – 16.
MAO Zhi. Water saving irrigation for rice and its effect on environment[J]. Engineering Science, 2002,4(7):8 – 16. (in Chinese)

[15] 邓文,青先国,蒲熙,等. 施钙对超级杂交稻抗倒性的影响[J]. 生态学杂志,2009,28(4):632 – 637.
DENG Wen, QING Xianguo, PU Xi, et al. Effects of calcium application on super hybrid rice lodging resistance[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009,28(4):632 – 637. (in Chinese)

[16] OOKAWA T, HOBO T, YANO M, et al. New approach for rice improvement using a pleiotropic QTL gene for lodging resistance and yield[J]. Nature Communications,2010(1):1 – 11.

[17] OOKAWA T, ISHIHARA K. Varietal difference of the cell-wall components affecting the bending stress of the culm in relation to the lodging resistance in paddy rice[J]. Japan Journal of Crop Science,1993(62):378 – 384.

[18] 田永超,曹卫星,姜东,等. 不同水氮条件下水稻冠层反射光谱与植株含水率的定量关系[J]. 植物生态学报,2005, 29(2):318 – 323.
TIAN Yongchao, CAO Weixing, JIANG Dong, et al. Relationship between canopy reflectance and plant water content in rice under different soil water and nitrogen conditions[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2005,29(2):318 – 323. (in Chinese)

[19] 魏永霞,侯景翔,吴昱,等. 不同水分管理旱直播水稻生长生理及节水效应[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)

[20] 张岁岐,徐炳成. 根系与植物高效用水[M]. 北京: 科学出版社,2010.

[21] 陈洁,汤亮,刘小军,等. 基于植株碳流的水稻籽粒淀粉积累模拟模型[J]. 植物生态学报,2011,35(4):431 – 440.
CHEN Jie, TANG Liang, LIU Xiaojun, et al. Modeling rice grain starch accumulation based on plant carbon flow[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011,35(4):431 – 440. (in Chinese)

[22] YOSHIDA S. Physiological aspect of grain yield[J]. Annual Review of Plant Physiology,1972,23:437 – 464.

[23] 邹德堂,秋太权,赵宏伟,等. 水稻倒伏指数与其它性状的相关和通径分析[J]. 东北农业大学学报,1997,28(2):8 – 14.
ZOU Detang, QIU Taiquan, ZHAO Hongwei, et al. Correlation and path analysis on the lodging index and other characters in rice[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 1997,28(2):8 – 14. (in Chinese)

[24] ZHANG Wujun, LI Ganghua, YANG Yiming, et al. Effects of nitrogen application rate and ratio on lodging resistance of super rice with different genotypes[J]. Journal of Integrative Agriculture,2014,13(1):63 – 72.

[25] DONALD C M, HAMBLIN J. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria[J]. Advances in Agronomy,1976(28):361 – 405.

[26] 顾掌根,王岳均. 水稻直播栽培高产机理研究初报[J]. 作物研究,2001(2):5 – 12.
GU Zhanggen, WANG Yuejun. Preliminary studies on mechanism of high yield of direct seeding rice[J]. Crop Research, 2001 (2):5 – 12. (in Chinese)

[27] 张忠旭,陈温福,杨振玉,等. 水稻抗倒伏能力与茎秆物理性状的关系及其对产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报,1999, 30(2):81 – 85.
ZHANG Zhongxu, CHEN Wenfu, YANG Zhenyu, et al. Effect of lodging resistance on yield and its relationship with stalk physical characteristics[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1999,30(2):81 – 85. (in Chinese)

[28] 杨世民,谢力,郑顺林,等. 氮肥水平和栽插密度对杂交稻茎秆理化特性与抗倒伏性的影响[J]. 作物学报,2009, 35(1):93 – 103.
YANG Shimin, XIE Li, ZHENG Shunlin, et al. Effects of nitrogen rate and transplanting density on physical and chemical characteristics and lodging resistance of culms in hybrid rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009,35(1):93 – 103. (in Chinese)

[29] 张明聪,刘元英,罗盛国,等. 养分综合管理对寒地水稻抗倒伏性能的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(21):4536 - 4542.
ZHANG Mingcong, LIU Yuanying, LUO Shengguo, et al. Effects of integrated nutrient management on lodging resistance of rice in cold area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010,43(21):4536 - 4542. (in Chinese)

[30] 莫永生,蔡中全,杨亲琼,等. 高大韧稻茎秆的抗折力研究[J]. 中国农学通报,2008,24(2):193 - 198.
MO Yongsheng, CAI Zhongquan, YANG Qinqiong, et al. The breaking resistance of higher, thicker, and tougher rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008,24(2):193 - 198. (in Chinese)

[31] 马均,马文波,田彦华,等. 重穗型水稻植株抗倒伏能力的研究[J]. 作物学报,2004,30(2):143 - 148.
MA Jun, MA Wenbo, TIAN Yanhua, et al. The culm lodging resistance of heavy panicle type of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004,30(2):143 - 148. (in Chinese)

[32] KRAMER P J. Water relations of plant[M]. New York: New York Press, 1983.

[33] 赵春江,黄文江,王之杰,等. 不同水肥处理下冬小麦冠层含水率与温度关系的研究[J]. 农业工程学报,2002,18(2):25 - 28.
ZHAO Chunjiang, HUANG Wenjiang, WANG Zhijie, et al. Relationship between canopy water content and temperature of winter wheat under different water and nitrogen treatments[J]. Transactions of the CSAE, 2002,18(2):25 - 28. (in Chinese)

[34] 刘良云,王纪华,张永江,等. 叶片辐射等效水厚度计算与叶片水分定量反演研究[J]. 遥感学报,2007,11(3):289 - 295.
LIU Liangyun, WANG Jihua, ZHANG Yongjiang, et al. Detection of leaf EWT by calculating REWT from reflectance spectra [J]. Journal of Remote Sensing, 2007,11(3):289 - 295. (in Chinese)

[35] 孙金英,曹宏鑫,黄云. 油菜叶片气孔导度与冠层光谱植被指数的相关性[J]. 作物学报,2009,35(6):1131 - 1138.
SUN Jinying, CAO Hongxin, HUANG Yun. Correlation between canopy spectral vegetation index and leaf stomatal conductance in rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Acta Agronomica Sinica,2009,35(6):1131 - 1138. (in Chinese)

[36] 魏永霞,马瑛瑛,刘慧,等. 调亏灌溉下滴灌玉米植株与土壤水分及节水增产效应[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):252 - 260.
WEI Yongxia, MA Yingying, LIU Hui, et al. Effects of soil water, plant, water saving and yield increasing of maize under regulated deficit drip irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(3):252 - 260. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180330&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.030. (in Chinese)

[37] 王娟,郑国清. 夏玉米冠层反射光谱与植株水分状况的关系[J]. 玉米科学,2010,18(5):86 - 89.
WANG Juan, ZHENG Guoqing. Relationships between canopy reflectance and plant water status of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2010,18(5):86 - 89. (in Chinese)

[38] 刘小军. 水稻植株水分实时监测与管理决策技术研究[D]. 南京:南京农业大学,2011.
LIU Xiaojun. Study on technologies of monitoring plant water and management decision in rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2011. (in Chinese)

[39] YOSHIDA S. Molecular regulation of leaf senescence[J]. Current Opinion in Plant Biology,2003,6(1):79 - 84.

[40] GRANIER C, TARDIEU F. Water deficit and spatial pattern of leaf development. Variability in responses can be simulated using a simple model of leaf development[J]. Plant Physiology,1999,119(2):609 - 620.

[41] 刘小军,田永超,姚霞,等. 基于高光谱的水稻叶片含水量监测研究[J]. 中国农业科学,2012,45(3):435 - 442.
LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, YAO Xia, et al. Monitoring leaf water content based on hyperspectra in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012,45(3):435 - 442. (in Chinese)

[42] 胡继超,姜东,曹卫星,等. 短期干旱对水稻叶水势、光合作用及干物质分配的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(1):63 - 67.
HU Jichao, JIANG Dong, CAO Weixing, et al. Effect of short-term drought on leaf water potential, photosynthesis and dry matter partitioning in paddy rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004,15(1):63 - 67. (in Chinese)

[43] 王哲,王喜明. 活立木生理干燥过程中水分传输和散失机制探讨[J]. 林业科学,2018,54(3):123 - 133.
WANG Zhe, WANG Ximing. Discussion on mechanism of water transmission and loss for standing trees during physiological drying[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018,54(3):123 - 133. (in Chinese)

[44] 曹慧,王孝威,韩振海,等. 水分胁迫诱导平邑甜茶叶片衰老期间内肽酶与活性氧累积的关系[J]. 中国农业科学,2004,37(2):274 - 279.
CAO Hui, WANG Xiaowei, HAN Zhenhai, et al. Relationship between changes of endopeptidases activity and active oxygen in *Malus hupehensis* leaves during senescence induced by water stress[J]. Scientia Agricultura Sinica,2004,37(2):274 - 279. (in Chinese)

[45] 华泽田,郝宪彬,沈枫,等. 东北地区超级杂交粳稻倒伏性状的研究[J]. 沈阳农业大学学报,2003,34(3):161 - 164.
HUA Zetian, HAO Xianbin, SHEN Feng, et al. Lodging traits of north japonica super hybrid rice[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2003,34(3):161 - 164. (in Chinese)

[46] 潘瑞炽,董愚得. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社,1995.

[47] 刘立军,王康君,葛立立,等. 旱种水稻基部节间性状与倒伏的关系及其生理机制[J]. 作物学报,2012,38(5):848 -

856.
LIU Lijun, WANG Kangjun, GE Lili, et al. Relationship between characteristics of basal internodes and lodging and its physiological mechanism in dry-cultivated rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012,38(5):848 – 856. (in Chinese)
[48] ZHANG Jun, LI Ganghua, SONG Yunpan, et al. Lodging resistance characteristics of high-yielding rice populations[J]. Field Crops Research,2014,161:64 – 74.
[49] 刘立军,袁莉民,王志琴,等. 旱种水稻倒伏生理原因分析与对策的初步研究[J]. 中国水稻科学,2002,16(3):28 – 33.
LIU Lijun, YUAN limin, WANG Zhiqin, et al. Preliminary studies on physiological reason and countermeasure of lodging in dry- cultivated rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2002,16(3):28 – 33. (in Chinese)
[50] 申广勒. 水稻抗倒伏生理机制与评价方法研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2008.
SHEN Guangle. Study on physiological mechanisms of lodging resistance and evaluating method in rice[D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2008. (in Chinese)
[51] 孙旭初. 水稻茎秆抗倒性的研究[J]. 中国农业科学,1987,20(4):32 – 37.
SUN Xuchu. Studies on the resistance of the culm of rice to lodging[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1987,20(4):32 – 37. (in Chinese)
[52] 杨惠杰,杨仁崔,李义珍,等. 水稻茎秆性状与抗倒性的关系[J]. 福建农业学报,2000,15(2):1 – 7.
YANG Huijie, YANG Rencui, LI Yizhen, et al. Relationship between culm traits and lodging resistance of rice cultivars[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2000,15(2):1 – 7. (in Chinese)
[53] 闵东红,王辉,孟超敏,等. 不同株高小麦品种抗倒伏性与其亚性状及产量相关性研究[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(4):76 – 79.
MIN Donghong, WANG Hui, MENG Chaomin, et al. Studies on the lodging resistance with its subtraits of different height wheat varieties and correlation between plant height and yield[J]. Journal of Triticeae Crops,2001,21(4):76 – 79. (in Chinese)
[54] 侯杰. 玉米秸秆力学特性与理化指标及其关联性[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2013.
HOU Jie. Related study on mechanical characteristic and physicochemical property of corn straw[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
[55] 高梦祥,郭康权,杨中平,等. 玉米秸秆的力学特性测试研究[J]. 农业机械学报,2003,34(4):47 – 52.
GAO Mengxiang, GUO Kangquan, YANG Zhongping, et al. Study on mechanical properties of corn stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(4):47 – 52. (in Chinese)
[56] 陈超科,李法德,闫银发,等. 高粱秸秆力学特性的试验[J]. 中国农机化学报,2016,37(5):130 – 135,159.
CHEN Chaoke, LI Fade, YAN Yinfa, et al. Experimental study on sorghum stalks mechanics characteristics[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016,37(5):130 – 135,159. (in Chinese)
[57] 张彦河. 玉米秸破碎力学特性的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2003,15(4):43 – 45.
ZHANG Yanhe. A study of mechanics characteristics on breaking up corn straw[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2003,15(4):43 – 45. (in Chinese)
[58] 秦翠兰. 棉秆力学性能的研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2016.
QIN Cuilan. Study on mechanical properties of cotton stalk[D]. Alaer:Tarim University, 2016. (in Chinese)
[59] 于勇,林怡,毛明,等. 玉米秸秆拉伸特性的试验研究[J]. 农业工程学报,2012,28(6):70 – 76.
YU Yong, LIN Yi, MAO Ming, et al. Experimental study on tensile properties of corn straw[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(6):70 – 76. (in Chinese)
[60] WRIGHT C T, PRYFOGLE P A, STEVENS N A. Biomechanics of wheat/barley straw and corn stover[M]. America: Humana Press,2005:5 – 19.
[61] 张慧. 便携式农作物茎秆力学特性测试仪的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2012.
ZHANG Hui. Design and experiment of portable mechanical characteristic tester for crop stalks[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
[62] TAVAKOLI H, MOHTASEBI S S, JAFARI A. Physical and mechanical properties of wheat straw as influenced by moisture content[J]. International Agrophysics,2009,23(2):175 – 181.