

不同生育期土壤水分亏缺对双季超级稻产量及其构成的影响

钱银飞, 邱才飞, 邵彩虹, 陈先茂, 关贤交, 陈 金, 谢 江, 邓国强, 彭春瑞

(江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所/农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室)

/国家红壤改良工程技术研究中心, 江西 南昌 330200)

摘 要: 通过盆栽试验研究了不同生育期土壤水分亏缺对双季稻生长发育及产量形成的影响。结果表明: 双季超级稻生育前期土壤水分亏缺对株高存在较大影响, 其中均以拔节孕穗期受土壤水分亏缺影响最重, 早稻株高下降 4.53% ~ 11.1%, 晚稻下降 3.09% ~ 10.04%, 且水分亏缺程度越重, 株高下降越多, 而生育后期影响较小。双季超级稻不同生育期土壤水分亏缺处理的叶、穗、根及总的干物质积累量均低于浅水灌溉对照, 且均表现为随土壤水分亏缺程度的加剧而积累量越少, 根冠比也表现为相同规律。但土壤水分亏缺却一定程度上促进了茎鞘的发育, 产生补偿作用, 但作用较小。双季超级稻所有土壤水分亏缺处理的产量均低于对照浅水充分灌溉, 早稻产量为对照的 58.73% ~ 99.42%, 晚稻产量为对照的 55.15% ~ 96.74%。各生育期的双季稻产量均表现为随土壤水分亏缺的加剧而下降严重。双季超级稻产量受水分亏缺影响敏感程度排序: 早稻为拔节孕穗期 > 有效分蘖期 > 抽穗开花期 > 无效分蘖期 > 乳熟期, 晚稻为拔节孕穗期 > 抽穗开花期 > 有效分蘖期 > 乳熟期 > 无效分蘖期。水分亏缺对双季超级稻有效分蘖期的穗数和拔节孕穗期的穗粒数影响程度最大, 可引起大幅减产。无效分蘖期和乳熟期受水分亏缺影响减产程度较小。

关键词: 双季超级稻; 土壤水分亏缺; 生育时期; 敏感程度; 生长发育; 产量

中图分类号: S511.4⁺2; S152.7 **文献标志码:** A

Effects of soil water deficit at growing stages on yield formation of double-cropping super indica rice

QIAN Yin-fei, QIU Cai-fei, SHAO Cai-hong, CHEN Xian-mao, GUAN Xian-jiao, CHEN Jin,

XIE Jiang, DENG Guo-qiang, PENG Chun-rui

(Soil and Fertilizer & Resources and Environmental Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture / National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang, Jiangxi 330200, China)

Abstract: We aimed to investigate the effect of soil water deficit at different growing stages on growth and yield formation of double-cropping super indica rice by pot experiments. The result indicated that soil water deficit had significant effect on plant height of double-cropping super indica rice during the early growing period in particular the jointing-booting stage, with the largest effect on plant height. Early rice decreased by 4.53% ~ 11.1% in plant height, and the late rice 3.09% ~ 10.04%. Plant height was declined with the soil water deficit degree, but that in late growing period had smaller effect. The leaf, ear, root weight and total dry matter accumulation of double-cropping super rice with soil water deficit at different growing period were lower than shallow water irrigation (CK), and the accumulation reduced with the soil water deficit, and root/shoot ratio varied similarly. On the other hand, soil water deficit promoted the growth of the stem and sheath to some extent and showed a compensatory effect. The yield of the double-cropping super indica rice under the soil water deficit was lower than the CK, and it decreased with the soil water deficit. Grain yield was significantly affected by the soil water deficit, with an order of the jointing-booting stage > effective tillering stage > heading-flores-

收稿日期: 2016-03-14

修回日期: 2017-03-14

基金项目: 国家重点研发专项 (2016YFD0801101 - 4); 国家科技支撑计划项目 (2013BAD07B12); 江西省自然科学基金青年基金 (20132BAB214012); 江西省重点研发计划项目 (20161ACF60013)

作者简介: 钱银飞 (1980—), 男, 江苏如东人, 博士, 副研究员, 从事作物栽培与耕作及农业资源利用研究。E-mail: qyftfs@163.com。

通信作者: 彭春瑞 (1964—), E-mail: pcrfts@163.com。

cence stage > invalid tillering stage > milky stage for the early rice, while that for the late rice was jointing-booting stage > heading-florescence stage > effective tillering stage > milky stage > invalid tillering stage. In addition, the effect of soil water deficit on the effective panicle number during effective tiller stage and spike number during jointing-booting stage was the greatest, mainly causing yield reduction.

Keywords: double-cropping super indica rice; soil water deficit; grain yield

中国是一个严重缺水的国家,人均水资源占有量只有 $2\ 100\ \text{m}^3$,仅为世界平均水平的 28%,是全球 13 个人均水资源最匮乏的国家之一。同时我国的水资源时空分布不均,水资源利用效率低,水污染严重等已造成水资源紧张^[1]。水稻是我国最大的用水作物,其用水量约占农业用水量的 70%,约占全国用水量的 50%^[2],因此发展水稻节水栽培,提高稻田灌溉水利用率已成当务之急^[3]。水稻节水的—个有效途径就是根据水稻不同生育期对水分需求的差异进行针对性的水分调控,从而使得水资源最大限度地有效利用^[4-5]。

江西地处亚热带季风气候区,也是我国水稻主产区之一,降雨虽丰沛但分布不均,夏秋之间高温少雨,常出现季节性干旱,造成该区出现严重伏、秋干旱灾害,且受全球气候变化影响,该区旱灾呈频繁和加剧的趋势,对江西的水稻生产造成极大危害。不少的研究表明,水稻在不同生育阶段对水的需求不一,对遭受—定程度的水分胁迫后其反应也不相同,有的阶段表现出具有较强的忍耐性,而有的阶段则反应很敏感。不同生育期遭受不同程度的土壤水分亏缺,对水稻的生长发育及产量品质等也有不同程度的影响^[4-12]。为此,本文通过盆栽试验,严格控制土壤水分,设置不同生育期土壤水分亏缺处理,系统观察了在不同生育期进行土壤水分亏缺处理对双季超级稻产量形成的影响,探讨双季超级稻不同生育期对土壤水分的敏感性差异及水分亏缺程度对双季超级稻产量形成的影响大小,旨在为双季超级稻生产上合理利用水资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及品种

试验于 2013—2014 年在江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所玻璃网室进行。大田育秧:早稻 4 月 10 日播种,4 月 30 日移栽至盆钵,晚稻 6 月 20 日播种,7 月 25 日移栽至盆钵,移栽秧苗生长基本一致。塑料盆钵规格:直径 25 cm,高 30 cm,盆钵内装过筛的耕作层土约 18 kg,土壤为红壤土,质地黏性,土壤肥力为 pH 5.32,碱解氮 $144\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $33.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $76.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,

早稻移栽前每盆施尿素 2.0 g,氯化钾 0.88 g,钙镁磷肥 3.8 g。晚稻用肥量为早稻的 1.25 倍。早稻供试品种为超级杂交稻品种金优 458,江西省农业科学院水稻研究所育成,2009 年被审定为超级稻。晚稻为淦鑫 688,江西农业大学育成,2008 年被审定为超级稻。

1.2 试验设计

水稻移栽到栽后 7 d,盆内保持浅水层活棵,水稻黄熟后盆内断水收获。在栽后 8 d 至水稻黄熟期,将水稻生育期分成 5 个阶段:有效分蘖期(S1)、无效分蘖期(S2)、拔节孕穗期(S3)、抽穗开花期(S4)、乳熟期(S5);每个生育期分别进行 3 种不同程度的土壤水分亏缺处理:轻度土壤水分亏缺(L,下限的土壤含水率为饱和含水率的 85%);中度土壤水分亏缺(M,下限的土壤含水率为饱和含水率的 70%);重度土壤水分亏缺(H,下限的土壤含水率为饱和含水率的 55%)。每个生育期处理 7 d 后复水。除水分处理时期外,各处理其余时间均采用浅水充分灌溉。全生育期以常规浅水充分灌溉作为对照(CK,饱和含水率)。每处理 5 盆,每盆 3 穴,每穴 2 苗。全程采用量筒精确计量每次加水量,利用称重法结合 WET-2 土壤三参数仪(ΔT 公司, CAMBRIDGE, UK)测定土壤含水率来监测土壤 5 cm 处土壤水分的变化。在水分处理期利用称重法进行加水操作,以控制各盆的土壤含水量在很小范围内波动。

1.3 测定内容与方法

成熟期各处理实收计产,分盆计穗数,晒干,脱粒计产,以清水漂选谷粒,分别计数实粒数与秕粒数,计称实粒千粒重。

1.4 数据分析方法

数据处理和统计分析采用 Excel 2003 和 DPS 7.05 完成。

2 结果与分析

2.1 不同生育期土壤水分亏缺对双季超级稻株高的影响

不同生育期土壤水分亏缺对双季超级稻株高的影响见图 1。双季超级稻生育前期有效分蘖期(S1)、无效分蘖期(S2)和拔节孕穗期(S3)三个时期的土

壤水分亏缺对株高存在一定影响,而生育后期的抽穗开花期(S4)和乳熟期(S5)土壤水分亏缺对水稻株高影响不大,差异不显著。双季超级稻均以拔节孕穗期(S3)受土壤水分亏缺影响最重,且水分亏缺程度越重,株高下降越多。这说明水稻拔节孕穗期是水稻株高增长的关键时期,此期水分亏缺会对稻株

节间细胞生长产生明显的抑制作用,从而减低水稻株高。此期株高受抑制很难通过后期水分补充来恢复,因此此阶段应保障水分供应。在有效分蘖期(S1)和无效分蘖期(S2)土壤水分亏缺也在一定程度影响株高,但影响程度较小,株高降幅较小。

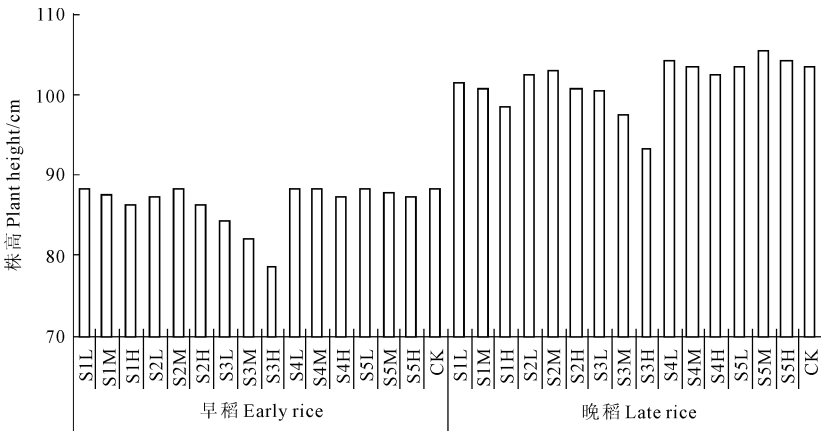


图 1 不同生育期土壤水分亏缺对双季超级稻株高的影响

Fig.1 Effect of water deficit on plant height at different growing stages

2.2 不同生育期土壤水分亏缺对双季超级稻成熟期干物质积累量的影响

由表 1 所示,不同生育期土壤水分亏缺对成熟期干物质积累量的影响表现为:双季超级稻不同生育期土壤水分亏缺处理的穗和根的干物质积累量均低于浅水灌溉对照,且均表现为随土壤水分亏缺程度的加剧其积累量越少。根冠比也表现为相同规律。土壤水分亏缺导致了叶片干物质积累量的减少却致使茎鞘干物质积累量增加。随土壤水分亏缺程度的加剧,基本呈现叶片干物质积累量的减少的趋势,但早稻无效分蘖期(S2)略有差异。早稻无效分蘖期中度水分亏缺最终的叶片干物质积累量高于轻度水分亏缺,这可能是早稻无效分蘖期中度水分亏缺比轻度水分亏缺更好地抑制了无效分蘖的发生,从而促进了有效分蘖的生长。茎鞘干物质积累量与叶片干物质积累量基本上呈负相关关系,但相关关系不显著。这表明水分亏缺处理抑制了叶片的生长发育,却一定程度上促进了茎鞘的发育,从而补偿土壤水分亏缺所带来的负效应,但这种补偿作用效果甚微。最终结果表明土壤水分亏缺所带来的负效应大于茎鞘补偿的正效应,土壤水分亏缺程度越严重,成熟期干物质总积累量越少。

2.3 不同生育期土壤水分亏缺对双季超级稻产量的影响

不同生育期土壤水分亏缺对双季超级稻产量的

影响见表 2。无论早、晚稻,所有水分亏缺处理的产量均低于对照浅水充分灌溉。各生育阶段的双季稻产量均表现为随土壤水分亏缺的加剧而下降严重。早稻有效分蘖期(S1)、无效分蘖期(S2)、拔节孕穗期(S3)、抽穗开花期(S4)和乳熟期(S5)不同水分胁迫的平均产量分别占对照产量的 86.88%、92.99%、73.57%、86.91%和 94.7%;晚稻分别占对照产量的 83.86%、96.45%、68.81%、82.27%和 89.74%,以晚稻的拔节孕穗期受水分亏缺减产最为严重,晚稻的无效分蘖期最轻。早稻受水分亏缺影响排序为 S3>S1>S4>S2>S5,晚稻受水分亏缺影响排序为 S3>S4>S1>S5>S2。

2.4 不同生育期土壤水分亏缺对双季超级稻产量构成因素的影响

不同生育期土壤水分亏缺对产量构成因素具有显著影响(表 2)。不同生育期土壤水分亏缺对穗数的影响表现为与浅水充分灌溉对照相比,早晚稻均以有效分蘖期(S1)的穗数下降最多,下降幅度也最大。其次为拔节孕穗期和无效分蘖期,抽穗开花期和乳熟期下降较少,这表明水分亏缺影响穗数形成主要在水稻生长的前期。此期为穗数形成的关键时期,有效分蘖期是水分亏缺的敏感期,此期缺水将大大减少有效分蘖的发生。不同水分亏缺处理间,基本表现为随水分亏缺程度的加剧而穗数减少程度增加。不同生育期土壤水分亏缺对穗粒数的影响表现

为早晚稻均以拔节孕穗期(S3)的穗粒数下降最多,这表明拔节孕穗期为穗粒数形成的最关键时期,水分亏缺对穗粒数影响很大。同时研究中也发现早晚稻有效分蘖期均出现穗粒数比对照增加的现象,这可能是有效分蘖期水分亏缺减小了穗数,却改善了群体通风透光条件,从而有利于穗粒数的形成。这也表明水稻自身具有补偿作用,能一定程度上恢复不利因素对自身生长的影响。在水稻拔节及其以后,不同水分亏缺处理间,基本表现为随水分亏缺程度的加剧而穗粒数减少增多。不同生育期土壤水分亏缺对总颖花数的影响表现为早稻总颖花数下降排

序为 S3 > S1 > S2 > S4 > S5,晚稻总颖花数下降排序为 S1 > S1 > S4 > S2,S5 期总颖花数增加。不同水分处理间,基本表现为随水分亏缺程度的加剧而总颖花数减少程度增加。不同生育期土壤水分亏缺对结实率的影响表现为早稻以抽穗开花期(S4)的结实率下降最多,其次为拔节孕穗期和乳熟期,有效和无效分蘖期结实率增加。晚稻以拔节孕穗期(S3)的结实率下降最多,其次为抽穗开花期,再次为乳熟期和无效分蘖期,有效分蘖期结实率增加。不同水分处理间,拔节孕穗期及以后基本表现为随水分亏缺程度的加剧而结实率下降程度增加。有效和无效分蘖期

表 1 不同生育期水分亏缺对双季超级稻成熟期干物质积累量的影响
Table 1 Effect of water deficit on dry matter accumulation at the maturity stage

稻季 Season	处理 Treatment	干物重 Dry matter accumulation/(g·pot ⁻¹)					根冠比 Root/shoot ratio
		叶 leaf	茎鞘 Stem	穗 Ear	根 Root	总计 Total	
早稻 Early rice	S1L	16.74d	23.27ij	57.37b	6.11c	103.49de	0.063c
	S1M	15.45g	27.51f	54.71e	5.71de	103.38de	0.058ef
	S1H	14.82i	26.26g	46.1i	4.94f	92.12h	0.057f
	S2L	17.4b	20.07k	56.02c	6.14c	99.63f	0.066b
	S2M	17.83a	22.52j	55.32d	6.06c	101.73e	0.063c
	S2H	16.32f	27.66f	53.58f	5.84d	103.4de	0.06de
	S3L	15.48g	28.07ef	52.89g	5.76d	102.2e	0.06de
	S3M	14.25j	24.17hi	43.06k	4.58g	86.06i	0.056f
	S3H	13.81k	24.32h	35.14l	3.61h	76.88j	0.049h
	S4L	17.2c	28.84e	57.24b	6.34b	109.62c	0.061cd
	S4M	16.54e	31.73c	50.97n	5.58e	104.82d	0.056f
	S4H	15.36gh	30.73d	44.8j	4.84f	95.73g	0.053g
晚稻 Late rice	S5L	16.55e	31.69c	58.8a	6.46b	113.5b	0.06de
	S5M	16.34f	35.81b	55.41d	6.1c	113.66b	0.057f
	S5H	15.2h	41.24a	53.5f	5.84d	115.78a	0.053g
	CK	17.43b	20.65k	58.8a	6.82a	103.7de	0.07a
	S1L	19.12c	25.12ef	62.63d	8.55c	115.42bc	0.08de
	S1M	18.43de	25.38def	57.85g	7.94e	109.6d	0.078efg
	S1H	16.34h	23.66f	48.54l	6.83g	95.37g	0.077fg
	S2L	19.43a	17.42h	64.72b	8.8b	110.37d	0.087a
	S2M	19.34ab	20.53g	64.81b	8.73b	113.41c	0.083bc
	S2H	18.54d	25.14ef	64.02c	8.74b	116.44ab	0.081cd
	S3L	17.45g	23.77ef	55.27j	7.67f	104.16f	0.079def
	S3M	16.48h	23.11f	46.45m	6.56h	92.6h	0.076gh
	S3H	15.26i	27.49cd	37.23n	5.48i	85.46i	0.069i
	S4L	18.36de	26.08cde	60.72f	8.3d	113.46c	0.079def
	S4M	18.12f	27.96c	55.67i	7.69f	109.44d	0.076gh
	S4H	17.33g	32.87a	49.32k	6.93g	106.45e	0.07i
	S5L	19.12c	25.03ef	62.72d	8.55c	115.42bc	0.08de
	S5M	18.46de	30.17b	60.98e	8.34d	117.95a	0.076gh
	S5H	18.34e	30.55b	56.89h	7.83ef	113.61c	0.074h
	CK	19.22bc	20.81g	66.63a	9.06a	115.72b	0.085ab

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同。
Note: Different small letters represent significant difference at P<0.05 levels. The same as below.

结实率变化较少,甚至有随水分亏缺程度加剧而结实率略有上升现象。不同生育期土壤水分亏缺对千粒重的影响变化均表现为拔节孕穗期(S3)的千粒重下降最多,其次为抽穗开花期,再次为乳熟期,无效分蘖期和有效分蘖期千粒重略有增加。不同水分处理间,拔节孕穗期及以后基本表现为随水分亏缺程度的加剧而千粒重下降程度增加。

表 2 不同生育期土壤水分亏缺对双季超级稻产量及其构成的影响
Table 2 Effect of water deficit on yield and its components at different growing stages

稻季 Season	处理 Treatment	每盆穗数 Panicle per pot	每穗粒数 Spike per panicle	总颖花数 Spike per pot	结实率 S – FP /%	千粒重 1000 – GW /g	产量 Yield /(g·pot ⁻¹)
早稻 Early rice	S1L	26.5f	112.4b	2983.9f	73.5b	26.3ab	53.3deCD
	S1M	24.6h	113.6ab	2790.5j	73.6b	26.4ab	50.2hF
	S1H	21.5i	114.5a	2467.2m	73.6b	26.5ab	43.9jH
	S1	24.2	113.5	2747.2	73.6	26.3	49.1
	S2L	26.7e	109de	2911.7g	75.5a	26.2bc	53.6dC
	S2M	26.5f	108.7de	2880.3h	75.6a	26.3ab	53eD
	S2H	25.6g	108.1e	2763.3k	75.6a	26.4ab	51.2eE
	S2	26.3	108.6	2851.8	75.6	26.3	52.6
	S3L	26.5f	108.3e	2865.6i	72.6d	26.3ab	50.6gF
	S3M	25.6g	102.1f	2609.2l	68.2i	25.7ef	41lJ
	S3H	24.7h	94.5g	2329.7n	64.4j	25g	33.2mK
	S3	25.6	101.6	2601.5	68.4	25.7	41.6
	S4L	27.8c	113.2b	3145.5bc	71.6f	26.2bc	55.2cB
	S4M	27.6d	109.8cd	3029.1e	68.2i	25.8de	49.1iG
	S4H	26.7e	107.7e	2869.1hi	64.3j	25.6f	43.1kI
	S4	27.3	110.2	3014.6	68	25.9	49.2
	S5L	28.5a	111.1c	3163a	72.4e	26.3ab	56.2bA
	S5M	28.4a	110.7c	3137.8c	70.4g	26.1c	53.3deCD
	S5H	28.2b	109.8cd	3099.1d	68.6h	25.9d	51.2eE
	S5	28.4	110.5	3133.3	70.5	26.1	53.6
	CK	28.5a	110.6c	3156.6ab	73.3c	26.2bc	56.6aA
晚稻 Late rice	S1L	25.1i	135.6b	3406.8i	69.3c	27.4ab	60.3cC
	S1M	23.2j	136.5b	3160.2k	71.4b	27.4ab	55.3eE
	S1H	18.3k	138.5a	2536.4m	73.5a	27.5a	46.4iI
	S1	22.2	136.8	3034.5	71.4	27.4	54.0
	S2L	27.4cd	131.9efg	3617.5de	67.4f	27.3b	62.3bB
	S2M	27.5bc	131.6fg	3614.8e	68.3e	27.3b	62.2bB
	S2H	27.3de	131.4fg	3589.4f	68.5d	27.4ab	61.9bB
	S2	27.4	131.7	3607.2	68.1	27.3	62.1
	S3L	27.1f	130.6g	3542.4g	62.4j	26.1e	53.2gG
	S3M	26.7g	126.4h	3369.1j	56.7m	25.5g	44.2jJ
	S3H	25.6h	122.3j	3129.5l	52.2n	24.4h	35.5kK
	S3	26.5	126.5	3347	57.1	25.3	44.3
	S4L	27.7a	133.3cd	3686.9a	64.4h	26.1e	58.4dD
	S4M	27.6ab	130.8g	3612.2e	61.2k	25.9f	53.4gG
	S4H	27.6ab	125i	3443.9h	58.4l	25.6g	47.2hH
	S4	27.6	129.7	3581	61.4	25.9	53
	S5L	27.5bc	133.1cde	3664.7b	65.6g	26.6c	60.3cC
	S5M	27.4cd	134.2c	3673.3b	63.9i	26.5cd	58.6dD
	S5H	27.2ef	133.3cd	3629cd	61.3k	26.4d	54.5fF
	S5	27.4	133.5	3655.7	63.6	26.5	57.8
	CK	27.5bc	132.5def	3639.7c	68.4de	27.3b	64.4aA

注:同列数据后不同大、小写字母表示处理间分别在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平差异显著。
Note: Different large and small letters represent significant difference at $P < 0.01$ and $P < 0.05$ levels.

水分亏缺处理对双季超级稻产量及其结构的影响通径及相关分析结果显示,早晚稻产量构成因子中均以总颖花数(X_3)对产量的贡献最大,其直接通径系数最大,其次为结实率(X_4),千粒重(X_5)最小(表 3)。穗数对总颖花数的贡献要大于穗粒数。早晚稻产量构成因子与产量皆成正相关,但相关程度

不同。其中早稻以总颖花数(X_3)与稻谷的产量(Y)相关性最好($r_3 = 0.862^{**}$),其次为千粒重,穗粒数和结实率。穗数与产量的相关程度最小。而晚稻产量构成因子与产量的相关性则表现为千粒重 > 结实率 > 总颖花数 > 穗粒数 > 穗数。

表 3 不同水分亏缺处理对双季超级稻产量及其结构的影响通径及相关分析
Table 3 Correlation and pathway coefficients among yield components

稻别 Rice type	产量构成 Factors	因素间相关系数 Relative coefficient among yield components					对 Y 的效应 $P_i - Y$	对 X_3 的效应 $P_i - X_3$
		X_2	X_3	X_4	X_5	Y (实产)	Effect for Y	Effect for X_3
早稻 Early rice	有效穗 Effective panicles(X_1)	0.119	0.880 ^{**}	-0.075	0.08	0.615 [*]		0.823
	穗粒数 Grains per panicle(X_2)		0.576 [*]	0.581 [*]	0.832 ^{**}	0.741 ^{**}		0.479
	总颖花数 Total amount of spike(X_3)			0.218	0.465	0.862 ^{**}	0.738	
	结实率 Seed setting(X_4)				0.901 ^{**}	0.681 ^{**}	0.486	
	千粒重 1000-grain weight(X_5)					0.818 ^{**}	0.037	
	剩余通径 Residual path coefficient(Pe^2)						0.002	0
晚稻 Late rice	有效穗 Effective panicles(X_1)	-0.464	0.946 ^{**}	-0.448	-0.298	0.362		1.116
	穗粒数 Grains per panicle(X_2)		-0.153	0.881 ^{**}	0.821 ^{**}	0.573 [*]		0.365
	总颖花数 Total amount of spike(X_3)			-0.181	-0.035	0.612 [*]	0.726	
	结实率 Seed setting(X_4)				0.963 ^{**}	0.660 ^{**}	0.588	
	千粒重 1000-grain weight(X_5)					0.752 ^{**}	0.212	
	剩余通径 Residual path coefficient(Pe^2)						0.008	0.001

注: $R_{0.05} = 0.497, R_{0.01} = 0.623$; *, ** 表示差异分别达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平。
Note: $R_{0.05} = 0.497, R_{0.01} = 0.623$; *, ** represent significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

3 小结与讨论

土壤水分状况是影响水稻生长发育的重要生态因子之一,过多过少均可对水稻的生长发育产生不利影响。掌握水稻不同生育期适宜的水分范围,是水稻合理灌溉和节水灌溉的基础。根据水稻不同生育期对水分需求的差异,在水稻关键生育期进行晒田,浅湿、干湿灌溉等不同操作方式,也已成为水稻高产的重要技术措施之一。大量研究结果表明^[4-13],水稻各个生育期对土壤水分亏缺的反应各不相同。本试验结果也证明了这一点,双季超级稻在不同生育期对土壤水分亏缺胁迫存在较大差异。早稻为拔节孕穗期 > 有效分蘖期 > 抽穗开花期 > 无效分蘖期 > 乳熟期,晚稻为拔节孕穗期 > 抽穗开花期 > 有效分蘖期 > 乳熟期 > 无效分蘖期。土壤水分亏缺对双季超级稻有效分蘖期的穗数,拔节孕穗期的穗粒数影响程度最大,可引起大幅减产。无效分蘖期和乳熟期受水分亏缺影响减产程度较小。这与赵正宜^[13]、郑家国^[14]、王成瑗^[15]等在单季稻上的研

究结果较为接近。土壤水分亏缺会减少双季超级稻叶、穗和根等的干物质量的积累,却能在一定程度上增加茎鞘物质的积累。这表明土壤水分胁迫可以改变光合产物的分配^[9]。本试验中双季超级稻在无效分蘖期一定的水分亏缺条件下,表现出较强的补偿效应,叶片的干物质积累量呈增加的现象。这表明水分胁迫并非完全是负效应,特定发育阶段、有限的水分胁迫对提高产量和品质是有益的,许多研究也证明了这一点^[8-12]。杨建昌等^[6]认为土壤水分对产量的影响在品种间差异较大,同时认为土壤水分对产量构成因素的影响表现为:颖花数 > 结实率 > 千粒重。本研究在双季超级稻上也得到了同样的结果。对不同土壤水分亏缺处理对双季超级稻产量及其结构的影响通径分析的结果表明双季超级稻产量构成因子中均以总颖花数对产量的贡献最大,其直接通径系数最大,其次为结实率,千粒重最小。

本试验采用 WET-2 型土壤三参数仪测定含水率进行土壤水分调节,这在以往的文献中尚未见报

道,得出的结果与以往研究中采用土水势^[5-7]、土壤含水量^[16]、叶水势^[17-18]等测定方法得出的结论较为接近。WET-2 型土壤三参数仪主要采用 FDR (Frequency Domain Reflectometry)频域反射原理,利用电磁脉冲原理、根据电磁波在介质中传播频率来测量土壤的表观介电常数(ϵ),从而得到土壤容积含水量(θ_v)。与传统土壤水分测定仪器采用的 TDR 时域反射系统相比,几乎具备 TDR 所有优点,而且只需更少的校正工作,同时操作更简单、更方便快捷,更重要的是精度高,稳定性好,同时还能测定土壤电导率和温度,目前已在园艺学和土壤学等领域得到广泛应用^[19-21]。它简便安全、快速准确、定点连续、自动化、宽量程、少标定等的优点,值得在今后的土壤水分等的研究中进一步应用。本试验结果是在盆栽条件下获得的,尽管在操作过程中采用了严格的控制措施,但与大田生产实际仍存在一定的差异,如缺乏土壤深层水分调节等,因而其结果难免有一定的局限性。但其在不同土壤水分亏缺程度下的水稻生长发育的变化趋势可为进一步的研究提供一定的参考。

参 考 文 献:

[1] 张利平,夏 军,胡志芳.中国水资源状况与水资源安全问题分析[J].长江流域资源与环境,2009,18(2):116-120.

[2] 罗良国,任爱胜,王瑞梅,等.我国农业可持续发展的水危机及广泛开展节水农业前景初探[J].节水灌溉,2000,(5):6-12.

[3] 姚 林,郑华斌,刘建霞,等.中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J].生态学杂志,2014,33(5):1381-1387.

[4] 余叔文,陈景治,龚燦霞.不同生长时期土壤干旱对水稻的影响[J].作物学报,1962,1(4):399-409.

[5] 邱泽森,朱庆森,刘建国,等.水稻在不同土壤水势下的生理反应[J].江苏农学院学报,1993,14(2):7-11.

[6] 杨建昌,朱庆森,王志琴.土壤水分对水稻产量与生理特性的影

响[J].作物学报,1995,21(1):110-114.

[7] 朱庆森,邱泽森,姜长鉴,等.水稻各生育期不同土壤水势对产量的影响[J].中国农业科学,1994,27(6):15-22.

[8] Boonjung H, Fukai S. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions [J]. Growth during drought[J]. Field Crop Research, 1996,48:37-45.

[9] Kumar R, Sarawgi A K, Ramos C, et al. Partition of dry matter during drought stress in rain feild lowland rice[J]. Field Crops Research, 2006,98:1-11.

[10] Kato Y, Kamoshita A, Yamagishi J, et al. Growth of rice (*Oryza-sativa* L.) cultivars under upland conditions with different levels of water supply[J]. Plant Production Science, 2007,10(1):3-13.

[11] 江学海,李刚华,王绍华,等.不同生育阶段干旱胁迫对杂交稻产量的影响[J].南京农业大学学报,2015,38(2):173-181.

[12] 严定春,朱峰峰,金千瑜,等.不同土壤水分含量下水稻、早稻品种产量和生理生态性状研究[J].江苏农业科学,2015,43(6):67-69.

[13] 赵正宜,迟道才.土壤水分胁迫对水稻生长发育的影响[J].沈阳农业大学学报,2000,31(2):214-217.

[14] 郑家国,任光俊,陆贤军,等.花后水分亏缺对水稻产量和品质的影响[J].中国水稻科学,2003,17(3):239-243.

[15] 王成媛,王伯伦,张文香,等.土壤水分胁迫对水稻产量和品质的影响[J].作物学报,2006, 32(1):131-137.

[16] 张文忠,韩亚东,杜宏绢,等.水稻开花期冠层温度与土壤水分及产量结构的关系[J].中国水稻科学,2007,21(1):90-102.

[17] 徐林娟.以叶水势为灌溉指标的水稻节水技术体系研究[D].杭州:浙江大学,2006.

[18] 张瑞美,彭世彰,徐俊增.作物水分亏缺诊断研究进展[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):205-210.

[19] Barbagallo S, Barbera A C, Cirelli G L, et al. Reuse of constructed wetland effluents for irrigation of energy crops[J]. Water Science & Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2014,70(9):1465-1472.

[20] 胡 蝶,郭 妮,沙 莎,等.基于 Radarsat-2 SAR 数据反演定西裸露地表土壤水分[J].干旱气象,2014,32(4):553-559.

[21] 仲启铨,王江涛,周剑虹,等.水位调控对崇明东滩围垦区滩涂湿地芦苇和白茅光合、形态及生长的影响[J].应用生态学报,2014,25(2):408-418.