DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.03.017

生育中期水分亏缺复水对水稻根冠及水肥利用效率的补偿影响

魏 征^{1,2}, 彭世彰¹, 孔伟丽³, 高焕芝^{1,2}

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;

2.河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;3.衢州市水利水电勘测设计有限公司,浙江 衢州 324000)

摘要:为明确水分亏缺复水补偿效应,通过盆栽试验研究了不同施氮水平和不同生育阶段水分控制下限对水稻生长特性的影响.结果表明:不同水氮条件下,水稻根冠干物质累积、根冠异速性生长关系、产量构成因子和水肥利用效率均随胁迫阶段的推进差异显著.分蘖末期水分胁迫复水后能够产生明显的补偿效应,该阶段高氮施肥水平(300 kg/hm²)下,重度水分亏缺(40%土壤饱和体积含水率)复水后能够较少影响水稻生长,可以看做是合理的水稻调亏控制指标.

关键词:根冠关系;水分亏缺;复水;水肥利用率;补偿效应;水稻

中图分类号:S274.1 S511 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2010)03-0322-05

水、肥是农业生产及作物生长的重要影响因子,如何提高其利用效率以促进作物生长发育是目前研究的重要内容.水肥合理配合能够有效提高作物根冠干物质累积、产量及水肥利用率,且水氮配合作用对产量的影响最大,形成“以水促肥,以肥调水”的互补关系^[1-3].

要充分发挥水分和养分的增产效应,必须确定水分、养分配合的关键时期,特别是水分、养分亏缺复水后的补偿效应.本文通过盆栽试验研究不同施氮水平和不同生育阶段水分控制下限复水后对水稻根冠干物质累积、产量构成因子及水肥利用率的影响,旨在为水稻水分胁迫后复水补偿机理和后效应研究提供理论依据.

1 试验方法

试验于 2008 年 6—10 月在河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室昆山试验基地进行,基地属亚热带南部季风气候区,年平均气温 15.5℃,年降雨量 1097.1 mm,年蒸发量 1365.9 mm,日照时数 2085.9 h,平均无霜期 234 d.当地习惯稻麦轮作,土壤为潜育型水稻土,耕层土壤为重壤土,0~18 cm 土层土壤有机碳质量分数为 30.3 g/kg,全氮为 1.79 g/kg,全磷为 1.4 g/kg,全钾为 20.86 g/kg,pH 值为 7.40,0~30 cm 土壤密度为 1.3 g/cm³.供试盆钵为封底聚乙烯(PVC)管,盆钵内径 16 cm,高 45 cm,置于土槽内,缝隙间用秸秆充填以削弱热效应,供试水稻品种为粳稻(嘉 04-33),每盆定苗 3 株.四周设保护田,并设有轨道式活动防雨棚以隔绝降雨.

试验采用裂区设计,主处理以不同生育阶段按占土壤饱和体积含水率的百分比设 3 个水分水平,共有 7 个水分处理,即控制灌溉(CK)^[4]、中度水分胁迫 W1 处理(分蘖末期(S1)、拔节孕穗后期(S2)、抽穗开花期(S3)各胁迫阶段水分控制下限分别为 50%、65%和 70%)和重度水分胁迫 W2 处理(分蘖末期(S1)、拔节孕穗后期(S2)、抽穗开花期(S3)各胁迫阶段水分控制下限分别为 40%、55%和 60%).副处理为 2 种氮肥水平(300 kg/hm²、200 kg/hm²,分别记为 N1 和 N2).14 个处理分别为 S1W1N1、S1W1N2、S1W2N1、S1W2N2、S2W1N1、S2W1N2、S2W2N1、S2W2N2、S3W1N1、S3W1N2、S3W2N1、S3W2N2 及对照处理 CKN1 和 CKN2,每个处理设 6 个重复,总共 84 个小区,另外设置氮空白小区,记为 CKN0,磷钾肥作为基肥一次施入,均为 105 kg/hm².

利用隔日称重法监测土壤水分变化,电子天平感量为 2 g;于水稻分蘖末期、拔节孕穗前期、拔节孕穗后期、抽穗开花期、乳熟期和黄熟期取样,采用烘干法测定根、冠干质量,成熟期考种测产.

收稿日期:2009-04-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)(2006AA100202)、全国优秀博士学位论文作者专项基金(200546)

作者简介:魏征(1983—),男,江苏沛县人,博士研究生,主要从事节水灌溉理论及技术研究.E-mail:weiz1983@126.com

2 试验结果与分析

2.1 不同水分下限对水稻根冠干物质累积规律的影响

不同水氮处理水稻地上部干物质从抽穗开花期至黄熟期,随着生育进程的推进逐渐增加,而根冠比逐渐减小(表1)。

表1 不同水氮处理水稻干物质累积量及根冠比

Table 1 Dry matter accumulation and root/shoot ratio of rice under different nitrogen treatments

处理	抽穗开花期			乳熟期			黄熟期		
	地上部干物质/ (g·盆 ⁻¹)	根质量/ (g·盆 ⁻¹)	根冠比	地上部干物质/ (g·盆 ⁻¹)	根质量/ (g·盆 ⁻¹)	根冠比	地上部干物质/ (g·盆 ⁻¹)	根质量/ (g·盆 ⁻¹)	根冠比
CKN1	31.40	6.93	0.221	43.76	8.45	0.193	70.86	8.96	0.126
S1W1N1	30.58	6.45	0.211	42.71	8.06	0.189	69.13	8.60	0.124
S1W2N1	30.73	6.48	0.211	42.85	8.03	0.187	70.04	8.76	0.125
S2W1N1	30.78	6.42	0.209	41.41	6.76	0.163	64.49	7.39	0.115
S2W2N1	27.24	5.52	0.203	40.32	6.68	0.166	61.69	7.04	0.114
S3W1N1	31.40	6.93	0.221	35.98	6.07	0.169	58.81	6.33	0.108
S3W2N1	31.40	6.93	0.221	35.22	5.29	0.15	56.18	6.43	0.114
CKN2	27.59	5.38	0.195	38.56	6.82	0.177	54.74	7.14	0.130
S1W1N2	26.96	5.46	0.203	36.63	6.89	0.188	53.02	7.02	0.132
S1W2N2	24.36	5.16	0.212	36.01	6.32	0.176	51.94	6.91	0.133
S2W1N2	23.94	4.37	0.183	34.95	5.95	0.17	53.78	6.98	0.130
S2W2N2	22.82	4.65	0.204	34.94	5.96	0.171	50.81	6.43	0.127
S3W1N2	27.59	5.38	0.195	31.14	4.53	0.145	46.49	5.42	0.117
S3W2N2	27.59	5.38	0.195	28.16	4.44	0.158	43.61	4.98	0.114

同一水分水平下,高氮(N₁)处理的地上部干物质大于低氮(N₂)处理,且差距由抽穗开花期的5~7g/盆,加大到黄熟期的10~18g/盆,表明低施氮量阻碍水稻代谢转换和营养物质的累积和分配,抑制水稻的生长发育;CKN1处理、S1W1N1处理、S1W2N1处理和S2W2N1处理的根冠比均是在抽穗开花期和乳熟期高于N₂处理,而在黄熟期低于N₂处理,而S2W2N1以及S3N1处理根冠比高于N₂处理,表明施氮量对水稻根冠比的影响与水分胁迫阶段及胁迫程度有关。

对同一施氮水平,在N₁处理条件下,S1W1N1和S1W2N1处理地上部干物质和根冠比差异较小,且与CKN1基本一致,差异幅度仅为2.1%~4.5%,补偿效应明显,表明分蘖末期水分亏缺对水稻地上部干物质和根冠比影响较小,与已有的研究结果一致^[5];S2W1N1处理地上部干物质分别较CKN1降低1.9%、5.4%和9.0%,而S2W2N1处理则较CKN1下降13.2%、7.8%和12.9%,下降幅度较大;S3W1N1处理在乳熟期和黄熟期较CKN1下降17.8%和17%,而S3W2N1处理较CKN1下降19.5%和20.5%,下降幅度最大。而拔节后期(S₂)和抽穗开花期(S₃)胁迫阶段水分处理根冠比低于对照,降低幅度为4.0%~18.1%和0~9.1%,表明拔节后期和抽穗开花期水分胁迫致使水稻干质量降低,同时对水稻根的抑制作用大于冠,且以抽穗开花期对根、冠的影响更大,并且无法得到恢复。在N₂处理条件下,地上部干物质与根质量基本随着水分胁迫程度的加深而减小,且以S3W2N2处理在乳熟期和黄熟期降低幅度最大,为26.9%和20.3%,而S1W1N2和S1W2N2处理根冠比多高于CKN2,增大幅度为4.1%~8.7%,-0.1%~6.2%和1.5%~2.3%,表明分蘖末期低施氮量通过调整根、冠关系使得干物质分配比例更侧重根系生长,而其他胁迫阶段根冠比的变化则更多的受到水分胁迫的影响。

2.2 不同水分下限对根冠异速生长关系的影响

根冠异速生长关系是能够简单表述根冠平衡研究的经验实用性表达方式,其基本数学表达可转化为根冠的对数线性方程:lgS = a + blgR,其中S、R为冠、根干质量;Hunt等^[6]研究认为回归系数b < 1时,表明根系相对生长速度比冠层大;b > 1时,则相反。对比水稻根、冠异速生长关系(表2)可知,水肥条件显著影响根、冠生长关系,各处理b值均不为零,且统计检验(α < 0.001)差异显著。

同一水分处理下,N₁处理的b值均高于N₂处理,S₁、S₂和S₃阶段增大幅度分别为2.2%~2.6%、3.0%~3.8%和0.8%~1.6%,表明低施氮量能够加大根、冠异速性生长,且以拔节孕穗期(S₂)根、冠异速性生长

差异最大,而抽穗开花期(S3)差异最小。

对同一施氮水平,在N1处理条件下,不同水分胁迫处理**b**值均高于CKN1,S1,S2和S3阶段增大幅度分别为0.74%~0.79%,3.2%~3.5%和2.89%,且以S1阶段增大幅度最小;在N2处理条件下,S1阶段水分处理均低于对照,分别为1.2%和0.76%,而S2,S3阶段W1,W2处理均高于CKN2,增大幅度分别为0.5%~1.0%和1.9%~2.7%,表明根、冠异速性随胁迫阶段的推进而降低。

在高氮处理条件下,分蘖末期(S1)水分亏缺不仅能够降低根、冠异速性生长关系,调节根、冠生长向优化方向发展,而且**b**值降低幅度最小,即干物质累积受到影响最小。

2.3 水稻产量构成因子对水分亏缺的相对敏感性分析

由表3可知,对比水稻产量及其构成因子的相对敏感性^[7],同一水分处理,穗数、千粒质量以及产量敏感因子均随胁迫阶段的推进逐渐增大,表明随着胁迫阶段的推进,水稻产量构成因子受到的影响会加大,从而产量会降低,这与张玉屏等^[8]研究一致;而N1处理的穗数和千粒质量敏感因子较N2处理大,即低施氮量(200 kg/hm²)没有超过氮素亏缺阈值,水稻千粒质量以及有效穗数受到的影响较N1处理小;而N2处理的穗粒和产量敏感因子较N1处理大,即低施氮量主要通过减少穗粒数降低产量,实际减产幅度为9.2%~19.6%,与陈晓远等^[9]研究一致。

表3 水稻产量及其构成因子对水氮的相对敏感性

Table 3 Relative sensitivity of yield and components of rice to water nitrogen

处理	穗数	穗数敏感因子	穗粒数/(粒·穗 ⁻¹)	粒数敏感因子	千粒质量/g	粒质量敏感因子	实际产量/(g·盆 ⁻¹)	产量敏感因子
CKN1	11.75		70.45		23.77		18.09	
S1W1N1	11.63	0.010	72.83	-0.034	25.18	-0.059	18.55	-0.025
S1W2N1	11.25	0.043	70.49	-0.001	25.51	-0.073	18.30	-0.011
S2W1N1	11.00	0.064	71.64	-0.017	23.93	-0.007	18.01	0.005
S2W2N1	10.60	0.098	71.84	-0.020	23.02	0.032	17.89	0.011
S3W1N1	10.45	0.111	69.67	0.011	23.15	0.026	17.43	0.037
S3W2N1	10.25	0.128	70.12	0.005	23.44	0.014	16.72	0.076
CKN2	10.00		70.87		24.48		16.43	
S1W1N2	10.50	-0.050	68.52	0.033	25.74	-0.051	16.85	-0.025
S1W2N2	10.10	-0.010	66.93	0.056	28.58	-0.167	16.43	0.000
S2W1N2	9.60	0.040	73.80	-0.041	24.69	-0.009	16.02	0.025
S2W2N2	9.50	0.050	70.84	0.000	25.11	-0.026	15.60	0.051
S3W1N2	9.50	0.050	62.53	0.118	24.46	0.001	14.02	0.147
S3W2N2	9.00	0.100	59.89	0.155	24.08	0.016	14.06	0.144

同一施氮水平,穗数和产量敏感因子随胁迫程度的加深逐渐增大,表明随胁迫程度的加深,水稻产量及其构成因子会受到显著影响,且在胁迫解除后也无法恢复至对照水平;千粒质量敏感因子随胁迫程度的加深逐渐降低,可见水分胁迫没有超过阈值时,胁迫程度的加深使其千粒质量提高。

不同水分胁迫程度以及施氮量能够使得分蘖末期(S1)水稻产量构成因子表现为负效应,即分蘖末期水分胁迫复水后的补偿效应能够提高水稻产量构成因子,这与裴刚等^[10]研究一致。

2.4 不同水分下限对水稻水氮利用效率的影响

对比水稻产量水平水分利用效率(表4)可知,同一水分处理下,水稻水分利用效率随施氮量的增加而增大,同一施氮水平下,分蘖末期(S1)和

表2 水稻根、冠间异速生长关系

Table 2 Allometric growth relationship of rice

处理	a	b	处理	a	b
CKN1	1.966	0.902	S2W1N2	2.028	0.905
CKN2	2.021	0.897	S2W2N1	1.989	0.935
S1W1N1	1.972	0.909	S2W2N2	2.016	0.901
S1W1N2	2.008	0.886	S3W1N1	1.986	0.929
S1W2N1	1.972	0.909	S3W1N2	2.049	0.921
S1W2N2	2.006	0.890	S3W2N1	1.993	0.929
S2W1N1	1.990	0.932	S3W2N2	2.041	0.914

表4 水稻水分利用效率及氮肥利用效率

Table 4 Water and fertilizer utilization efficiency of rice

处理	水分利用效率/(kg·m ⁻³)	氮肥利用效率/(kg·kg ⁻¹)	处理	水分利用效率/(kg·m ⁻³)	氮肥利用效率/(kg·kg ⁻¹)
CKN0	0.388		S2W1N2	0.896	10.25
CKN1	0.935	8.50	S2W2N1	1.000	8.32
CKN2	0.849	10.74	S2W2N2	0.872	9.73
S1W1N1	1.125	8.86	S3W1N1	0.952	7.96
S1W1N2	1.022	11.26	S3W1N2	0.766	7.85
S1W2N1	1.128	8.68	S3W2N1	0.924	7.40
S1W2N2	1.012	10.75	S3W2N2	0.777	7.90
S2W1N1	1.007	8.43			

拔节孕穗后期(S₂)W₁,W₂处理的水分利用效率均高于对照,表明分蘖末期和拔节后不同程度的水分胁迫均会提高水稻水分利用效率,这与李德福等^[1]研究结果一致;抽穗开花期(S₃)除W₁N₁处理水分利用效率高于对照外,其他处理均低于对照,表明S₃阶段水分和施肥量的减少大多会降低水稻水分利用效率。

对比水稻氮肥利用效率(表4)可知,同一水分水平下,N₂处理的氮肥利用效率^[12]均高于N₁处理,且差异幅度以分蘖末期水分胁迫处理最大(27.1%),拔节后次之(21.6%),抽穗开花期最小(6.8%)。随着胁迫阶段的推进,N₂处理氮肥利用效率增加幅度降低,这与王秀芹等^[13]研究结果一致。同一施氮水平下,S₁阶段水分胁迫处理氮肥利用效率高于对照,而S₂和S₃阶段水分胁迫处理氮肥利用效率均低于对照,表明分蘖末期水分胁迫增强水稻植株吸氮能力,使其获得较高的氮肥利用效率。

3 结 论

a. 分蘖末期水分胁迫对水稻根、冠干物质累积影响较小,且调节根、冠生长向优化方向发展,表现出明显的补偿效应。同一施氮水平下,分蘖末期根、冠干物质累积和根冠比与对照基本一致,且根、冠异速生长关系接近或超过对照,表现出明显的生长补偿;而拔节后和抽穗开花期水分胁迫致使水稻根、冠干物质累积和回归系数 b 值变大,同时更大程度地抑制根的生长,以抽穗开花期对根、冠的影响程度最大,且无法恢复。

b. 分蘖末期水分胁迫有利于水稻获得更高的产量及其构成因子,且提高其水肥利用效率。同一水分水平下,低施氮量能够降低水稻穗数和千粒质量受到的不利影响,但主要通过穗粒数的减少降低水稻产量。拔节后和抽穗开花期水分胁迫部分提高产量构成因子,但产量明显受到影响。低施氮量降低水稻产量和水分利用效率,而增加氮肥利用效率。拔节后和抽穗开花期氮肥利用效率均低于对照,而水分利用效率前者高于对照,后者低于对照。

c. 通过对水稻根冠干物质累积规律、根冠异速生长关系、水稻产量、水分利用效率和氮肥利用效率研究可知,分蘖末期(S₁)高氮施肥水平(300 kg/hm²)下,重度水分亏缺(40%土壤饱和体积含水率)复水后能够较少影响水稻生长特性,可以看做是合理的水稻调亏控制指标。

参考文献:

- [1] 金轲,汪德水,蔡典雄,等.水肥耦合效应研究II:不同N、P、水配合对旱地冬小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,1999,5(1):8-13.(JIN Ke,WANG De-shui,CAI Dian-xiong,et al. Response and interaction for water and fertilizer II:the effect of different compositions of N,P and Water on the yield of winter wheat[J]. Plant Nutrition And Fertilizer Science,1999,5(1):8-13.(in Chinese))
- [2] 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.(ZHU Qing-sen,QIU Ze-sen,JIANG Chang-jian,et al. Effect of low soil water potential on rice yield[J]. Scientia Agricultura Sinica,1994,27(6):15-22.(in Chinese))
- [3] 苏山仑.拔节期复水对玉米苗期受旱胁迫的补偿效应[J].植物生理学通讯,1995,31(5):341-344.(SU Pei,SHAN Lun. Compensatory effects of water-recovery during jointing stage on maize threatened by water stress at seedling period[J]. Plant Physiology Communications,1995,31(5):341-344.(in Chinese))
- [4] 丁加丽,彭世彰,徐俊增,等.控制灌溉条件下水稻蒸发蒸腾量及作物系数试验研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(3):239-242.(DING Jia-li,PENG Shi-zhang,XU Jun-zeng,et al. Experimental study on evapotranspiration and crop coefficient of rice under controlled irrigation[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2006,34(3):239-242.(in Chinese))
- [5] 陈晓远,罗远培.开花期复水对受旱冬小麦的补偿效应研究[J].作物学报,2001,27(4):512-516.(CHEN Xiao-yuan,LUO Yuan-pei. Study on the compensatory effect of rewatering during the flowering stage after previous water stress in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica,2001,27(4):512-516.(in Chinese))
- [6] HUNT R. Further observations on root-shoot equilibria in perennial ryegrass[J]. Annals of Botany,1975,39:745-755.
- [7] 盛宏达,奚雷,王韶唐.小麦籽粒发育初期土壤水分亏缺对植株各部位光合作用的影响[J].植物生理学报,1986,12(2):109-115.(SHENG Hong-da,XI Lei,WANG Shao-tang. Effect of soil drought in the early stage of grain development on the photosynthesis in the various parts of wheat plant[J]. Acta Photophysiological Sinica,1986,12(2):109-115.(in Chinese))
- [8] 张玉屏,朱德峰,林贤青,等.不同时期水分胁迫对水稻生长特性和产量形成的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):48-53.(ZHANG Yu-ping,ZHU De-feng,LIN Xian-qing. Effects of water stress on rice growth and yield at different growth stages[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2005,23(2):48-53.(in Chinese))

- [9] 陈晓远,高志红,刘晓英,等.水分胁迫对冬小麦根、冠生长关系及产量的影响[J].作物学报,2004,30(7):723-728.(CHEN Xiao-yuan,GAO Zhi-hong,LIU Xiao-ying,et al. Effects of water stress on root/shoot relation and grain yield in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica,2004,30(7):723-728.(in Chinese))
- [10] 裴刚,张玉屏,朱德峰,等.不同水分处理对晚稻生长及产量的影响[J].西南农业学报,2007,20(4):573-576.(PEI Gang,ZHANG Yu-ping,ZHU De-feng,et al. Effects of different water treatment on late season rice growth and yield[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2007,20(4):573-576.(in Chinese))
- [11] 李德福,李金才,魏凤珍.拔节长穗期水分胁迫对旱作水稻若干生理特性和经济产量的影响[J].安徽农业科学,2005,33(7):1166-1167.(LI De-fu,LI Jin-cai,WEI Feng-zhen. Effects of water-stress on some physiologic characteristics and economic yield at jointing and pregnancy stage of dry cultivation rice[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2005,33(7):1166-1167.(in Chinese))
- [12] NOVOA R,LOOMIS R S. Nitrogen and plant production[J]. Plant and Soil,1981,58(1/2/3):177-204.
- [13] 王秀芹,张洪程,黄银忠,等.施氮量对不同水稻品种吸氮特性及氮肥利用率的影响[J].上海交通大学学报:农业科学版,2003,21(4):325-330.(WANG Xiu-qin,ZHANG Hong-cheng,HUANG Yin-zhong,et al. Effects of N-application rate on the characters of uptake Nitrogen and Nitrogen recovery of different rice varieties[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science,2003,21(4):325-330.(in Chinese))

Compensation effects of roots and shoots of rice and water and fertilizer utilization efficiency owing to rewatering of water deficit during intermediate period of bearing

WEI Zheng^{1,2}, PENG Shi-Zhang¹, KONG Wei-li³, GAO Huan-zhi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Quzhou Design and Research Co., Ltd. of Water Resources and Hydropower, Quzhou 324000, China)

Abstract: In order to determine the compensation effects of rewatering of the water deficit, pot experiments were carried out to study the influences of the lower limit of soil moisture of around rice with different nitrogen levels at different bearing periods on growing characteristics. The results show that, with different nitrogen levels, the dry matter production of roots and shoots, allometric growth between roots and shoots, rice yield, and water and fertilizer utilization efficiency exhibit significant differences with the water stress stage. Rewatering of the water deficit at the late tillering stage results in significant compensation effects. The rewatering of severe water deficit (saturated water content of 40%) has lesser influence on the rice growth at the late tillering stage with a high nitrogen fertilization level (300 kg/hm²), and it may be regarded as a reasonable control index for rice.

Key words: root and shoot relation; water deficit; rewatering; water and fertilizer utilization efficiency; compensation effect; rice