排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 9 月 Sept. 2018 | 第 36 卷 第 9 期 Vol. 36 No. 9

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.18.1075

控制灌溉条件下增氧对超级稻根系生长及水分利用效率的影响


廖健程

廖健程，胡德勇*，裴毅，陈哲，丁鑫，罗东城
（湖南农业大学工学院，湖南 长沙 410128）

摘要：以超级稻“陵两优268”为试验材料，采用控制灌溉与增氧灌溉技术相结合，设置4组处理，分别为机械控制灌溉增氧（JX）、超微泡控制灌溉增氧（WP）、控制灌溉（CK）、淹水灌溉（YS），研究控制灌溉条件下增氧对水稻根系生长特征及水分利用效率的影响. 结果表明：控制灌溉条件下增氧与淹水灌溉条件相比，有效节约用水最大达15.3%，有利于促进根系生长，增大了水稻的根部干物质质量，降低了水稻的茎叶干物质质量；提高了水稻根体积、根粗及干物质的质量，能显著增强水稻的根系活力，延缓水稻根系的衰老；产量上，控制灌溉增氧处理基本与淹灌处理接近，但结实率、千粒重、水分利用效率都优于淹灌处理.

关键词：控制灌溉；增氧灌溉；根系；产量；水分利用效率
中图分类号：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2018)09-0920-05

廖健程，胡德勇，裴毅，等. 控制灌溉条件下增氧对超级稻根系生长及水分利用效率的影响[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(9)：920-924.

LIAO Jiancheng，HU Deyong，PEI Yi，et al. Effects of aeration on root growth and water use efficiency of super rice under controlled irrigation conditions[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2018，36(9)：920-924.(in Chinese)

Effects of aeration on root growth and water use efficiency of super rice under controlled irrigation conditions

LIAO Jiancheng，*HU Deyong**，*PEI Yi*，*CHEN Zhe*，*DING Xing*，*LUO Dongcheng*
(Engineering College，Hunan Agricultural University，Changsha，Hunan 410128，China)

Abstract：Super rice—Lingliangyou 268 was used as test materials，by combing controlled irrigation and aeration technology. Four treatments were set up，namely mechanically controlled irrigation aeration(JX)，super-micro-bubble controlled irrigation aeration(WP)，controlled irrigation(CK) and flood irrigation(YS)，to identify effects of aeration on root growth characteristics and water use efficiency of super rice under controlled irrigation conditions. The results show that the effective water saving is up to 15.3% in maximum due to aeration under the controlled irrigation compared with food irrigation condition. Additionally，the root growth is promoted and the dry matter weight of rice roots is increased and the dry matter weight of both stem and leaf are reduced. So the root volume and thickness as well as dry matter weight have been improved significantly，and the root activity is enhanced，the aging of rice roots is delayed. In terms of yield，the controlled irrigation aeration is similar to the flood irrigation，but the seed setting rate，1000-grain weight，and water use efficiency are better than the latter.

Key words：controlled irrigation；aerobic irrigation；root system；yield；water use efficiency

收稿日期：2018-04-28；**修回日期**：2018-05-23；**网络出版时间**：2018-07-13
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180713.1338.048.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(31401951)
第一作者简介：廖健程(1993—)，男，湖南邵阳人，硕士研究生(404427206@qq.com)，主要从事节水灌溉新技术研究.
通信作者简介：胡德勇(1980—)，男，湖南常德人，副教授(hdy9609@hunau.net)主要从事节水灌溉新技术研究.

良好的根系生态环境是作物健康生长的关键因素之一[1-2]. 作物的根系需要在氧气充足的环境下才能够满足植物养分和水分的获取[3-4]. 对于淹灌模式下的浸水田,由于水分占据了大部分土壤孔隙而降低了耕作层土壤含氧量,控制灌溉增氧则是在控制灌溉下对土壤耕作层再进行增氧处理,改变了淹水灌溉条件下的根层土壤环境,具有更新土壤生态环境、防止烂根、有利于根系发育等特点[5-6]. 增氧的主要作用就是解决土壤透气性较差、氧气含量不足的问题,通过研究发现增氧灌溉对作物生长有益,能够促进根系生长,提高根系活力进而提高作物对水分、养分的吸收[7-8].

文中将控制灌溉技术和增氧灌溉技术相结合,从而提高土壤水肥利用效率,以达到节水、减排、高产的目的.

1　材料与方法

1.1　试验概况

盆栽试验在湖南农业大学土肥资源高效利用国家实验室中心试验站玻璃大棚中进行,玻璃大棚四面通风,温度与大气温度相同. 供试水稻品种为“陵两优 268”,早稻于 2017 年 3 月 20 号开始育苗,4 月 20 号移栽至试验盆中,早稻于 7 月 14 号收割,全生育期 116 d. 2017 年 6 月 18 日育苗,7 月 15 日移栽,10 月 15 日收割,全生育期 121 d. 供试土壤为湖南农业大学耘园试验基地属第四纪发育的红壤,每盆装土 10 kg. 土壤基本理化性质如表 1 所示,晚稻所用土壤为之前种植早稻土壤,土壤基本理化性质结果为 4 种处理后的平均值.

表 1　土壤基本理化性质

Tab. 1　Basic physicochemical properties of soil

时期	ω/(mg·kg⁻¹)							pH
	速效磷	全磷	速效钾	全钾	碱解氮	全氮	有机质	
早稻	60.7	3 900.0	51.7	31 900.0	105.0	1 760.0	21 000.0	6.5
晚稻	51.2	3 600.0	75.6	32 900.0	113.8	1 900.0	21 000.0	6.2

施肥方案分别为 N 用尿素($\omega(N)=46\%$)、P_2O_5 用过磷酸钙($\omega(P_2O_5)=12\%$)和 K_2O 用氯化钾($\omega(K_2O)=60\%$),其中 N,P_2O_5,K_2O 的用量分别为 135,75 和 90 kg/hm^2.

磷肥在移栽前作基肥一次性施用,钾肥用量按基肥∶分蘖肥∶穗肥质量比 3∶3∶4 施用,尿素用量按基肥∶返青肥∶分蘖肥∶穗肥质量比 5∶3∶2∶1 施用,且各处理施肥量一致. 盆栽塑料盆尺寸为下表面直径 25 cm,上表面直径 30 cm,高 30 cm.

1.2　试验设计

试验共设置 4 个处理,分别为机械控制灌溉增氧(JX)、超微泡控制灌溉增氧(WP)、控制灌溉(CK)、淹水灌溉(YS),每个处理设置 12 个重复,根据分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期依次破坏 3 盆进行根系活力等指标检测,最后留 3 盆测其产量及产量相关特性指标. 其中 JX,WP,CK 处理采取土壤饱和含水率 70% 为下限,上限为土壤饱和含水率,YS 处理建立 2 cm 的水层. 其中灌溉水量计量分别通过 1 000,500,200 mL 烧杯在浇灌前读取记录灌水量,水稻稻田耗水量等于浇灌记录的灌水量. 采用水分利用效率 = 水稻产量/稻田耗水量进行计算. 机械增氧灌溉模式采用排气量 20 L/min 空气泵进行通气,早 10 点、晚 17 点各进行通气,每次通气 5 min. 超微泡增氧模式采用含氧量 7.5 ~ 9.0 mg/L 的富氧水进行灌溉.

1.3　测定项目及方法

土壤含水率观测根据天气情况每 1 ~ 3 d 观测 1 次,采用美国 SPectrum TDR300 便携式土壤水分测定仪测量土壤的体积含水率,当接近饱和含水率的 70% 时,开始灌水使其达到饱和. 各个处理随机选取 3 盆水稻,利用氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法测定根系活力,利用 WinRhizo 软件分析根系生长特性指标. 将取回样品放入烤箱中烘干称重,然后用电子天平称测量根与冠的干重. 风干后测量有效穗数、穗实粒数、千粒重和产量.

数据采用 SPSS 22 和 EXCEL 2013 进行分析与绘图,处理间差异性采用 LSD 法进行分析.

2　结果与分析

2.1　控制灌溉条件下增氧对超级稻根系农艺指标的影响

2.1.1　对超级稻根系生长特性的影响

表 2 为不同时期各处理根系特性指标,其中 l 为根系总长,A 为根系总表面积,w 为平均根宽,V 为根系总体积,n 为根尖数.

表2 不同时期各处理根系特性指标

Tab. 2 Root characteristics of various treatments in different stages

生育期	处理	l/cm		A/cm^2		w/mm		V/cm^3		n/个	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
分蘖初期	WP	—	4 486.68	—	1 277.35	—	0.57	—	56.09	—	365
	JX	—	4 245.15	—	1 275.82	—	0.58	—	37.06	—	319
	CK	—	3 855.12	—	1 117.43	—	0.49	—	30.79	—	288
	YS	—	4 878.34	—	1 309.62	—	0.52	—	47.56	—	236
拔节孕穗期	WP	9 752.33	8 385.02	2 786.38	2 502.99	0.69	0.67	108.68	144.26	378	415
	JX	8 561.28	8 261.92	2 339.15	2 311.03	0.78	0.63	116.25	110.15	407	403
	CK	8 684.67	8 137.59	2 285.43	2 170.02	0.76	0.59	109.37	120.63	368	314
	YS	10 027.35	8 492.17	2 514.70	2 136.39	0.61	0.57	103.86	112.98	392	354
抽穗开花期	WP	13 052.67	12 105.14	3 729.33	3 293.92	0.74	0.69	145.38	169.77	537	500
	JX	11 268.44	12 636.69	3 174.21	3 082.12	0.88	0.65	135.93	120.27	522	436
	CK	12 689.85	11 518.53	3 554.96	2 997.70	0.83	0.71	128.28	144.26	503	400
	YS	13 680.56	13 646.37	3 530.47	3 308.21	0.71	0.63	138.64	157.64	481	409

由表2可以看出:3个时期(WP,JX,CK)的根系总长度均低于YS,同时在根粗、根尖数上均有所增强,但WP,JX均好于CK,表明增氧也能一定程度提高水稻根系的生长;控制灌溉条件下增氧相比淹水灌溉,由于存在着水分的亏欠,水稻的根系相对集中生长在一起,而淹水灌溉状况下,由于土壤中水分含量充足,根系的生长则相对分散,导致淹水灌溉下根系总长度要大,形成控制灌溉增氧条件下的根系少而粗,淹水灌溉下多而细.

2.1.2 对超级稻根冠比的影响

不同时期以及不同处理的根冠比R如表3所示,其中m(根)、m(冠)分别为根系干物质质量、冠系干物质质量.

表3 不同时期不同处理的根冠比

Tab. 3 Root to crown ratios of various treatments in different stages

生育期	处理	m(根)/g		m(冠)/g		R	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
分蘖初期	WP	—	0.88	—	6.52	—	0.135
	JX	—	1.053	—	6.63	—	0.159
	CK	—	1.083	—	6.27	—	0.173
	YS	—	0.976	—	5.79	—	0.169
拔节孕穗期	WP	8.17	9.71	39.37	38.31	0.207	0.253
	JX	7.26	7.97	35.39	31.83	0.205	0.250
	CK	7.86	7.08	33.95	28.93	0.231	0.245
	YS	7.26	6.31	43.38	42.55	0.167	0.149
抽穗开花期	WP	12.83	11.37	65.23	63.86	0.197	0.178
	JX	11.68	9.61	59.54	51.23	0.196	0.188
	CK	10.51	8.53	55.79	49.54	0.188	0.172
	YS	10.17	7.94	62.33	55.67	0.163	0.143

由表3可以看出:不同处理根系干物质均随水稻的生长发育不断增强,通过控制灌溉增氧处理的根系干物质质量相对于淹水灌溉处理都具有一定的优势;根冠比整体呈现出先升后降的趋势,因为在拔节孕穗期水分亏欠,水稻根系最为敏感,能提高根冠比,水分的亏欠让根系向土层生长,从而扩大与土壤的接触面来获取水分;同样由于存在着水分亏欠的影响,导致在生长发育阶段没有充足的水来满足植株茎上部分的生长,使得控制灌溉增氧组的根干重在生长中受到抑制.

控制灌溉增氧组的根冠比相比单一控制灌溉的相比要低,这可能是因为在土壤耕作层增氧后,进一步增强了根系对水分养分的吸收,加大了水分胁迫使水稻地上部分的营养生长受到进一步抑制.

2.2 控制灌溉条件下增氧对超级稻根系活力的影响

不同时期以及不同处理的根系活力ξ如图1所示,可以看出:不同处理根系活力随着水稻的生长发育均逐渐减弱;在全生育期内,控制灌溉增氧组根系活力都强于同时期淹灌组,且控灌增氧的要强于单一控灌组,其中在拔节孕穗期最为明显;晚稻下WP处理分别高于CK,YS处理11.5%,44.6%,JX处理分别高于CK,YS处理8.7%,41.0%,反映了控制灌溉增氧协同调控进一步改善了超级稻耕作层的气体环境,从而显著提高超级稻的根系活力,延缓了超级稻根系的衰老.

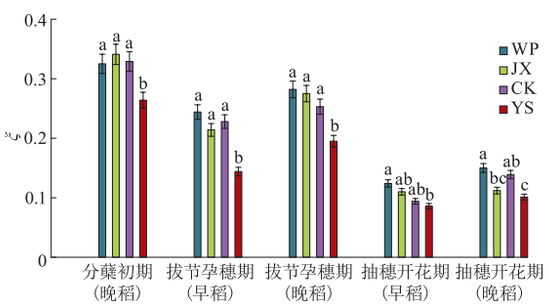


图1 不同时期各处理根系活力

Fig. 1 Treatment of root vigor at different times

2.3 控制灌溉条件下增氧对超级稻的产量的影响

表4为不同处理的产量及产量构成因素.其中

x 为穗数,y 为总穗粒数,η 为结实率,m_{1000} 为千粒质量,θ 为产率. 由表 4 可以看出:不同处理中,水稻总产量 YS 最高,但总体基本相差不大,而控制灌溉更符合节能、环保和经济效益;虽然淹水灌溉总产量多,但是其主要使由于其穗数多于控制灌溉处理,而在水稻的千粒重、结实率上,控制灌溉增氧处理要高于淹水处理,说明该条件下,形成的稻谷更为饱满.

表 4　不同处理的产量及产量构成因素

Tab. 4　Yield and yield components of various treatments

处理	x/(穗·盆$^{-1}$)		y/粒		η/%		m_{1000}/g		θ/(g·盆$^{-1}$)	
	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
WP	20. 30ab	19. 67a	2 232. 70ab	2 274. 00a	73. 00	76. 00	21. 47a	22. 64a	46. 70ab	46. 02a
JX	16. 70b	18. 33ab	2 083. 00b	2 134. 67ab	75. 00	74. 00	21. 21a	22. 28a	44. 97ab	44. 61a
CK	18. 30b	17. 67ab	2 079. 00b	2 033. 33b	70. 00	71. 00	21. 74a	21. 23ab	43. 12b	43. 87a
YS	23. 30a	20. 00a	2 471. 30a	2 309. 14a	68. 00	71. 00	19. 80b	20. 07b	50. 23a	47. 20a

注:表中不同字母表示处理组之间的差异具有统计学意义($P<0.05$)

2.4　控制灌溉条件下增氧对超级稻水分利用效率的影响

表 5 为不同处理的水分利用效率对比,表中 Y 为超级稻理论总产量,M 为总耗水量,WUE 为水分利用效率,各数值后不同字母表示处理组之间的差异具有统计学意义($P<0.05$). 由表 5 可以看出:由于超级稻品种、气候等因素综合影响,早稻的水分利用效率都要高于晚稻;早稻 4 种处理下的水分利用效率从大到小依次为 WP,JX,CK,YS,但没有明显差异;对于晚稻而言,WP,CK 处理与 YS 处理之间存在显著差异,WP,JX,CK 之间虽无显著差异,但水分利用效率从大到小依次为 JX,WP,CK,说明增氧处理对水分利用效率具有一定促进作用;采取控制灌溉增氧处理的 WP 水分利用效率最大能达到 1. 10,且略高于 JX 处理.

表 5　不同处理的水分利用效率对比

Tab. 5　Comparison of water use efficiency among different treatments

处理	Y/(kg·hm^{-2})		M/mm		WUE/(kg·m^{-3})	
	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
WP	6 607ab	6 511a	601	692	1. 10a	0. 94a
JX	6 362ab	6 362ab	611	666	1. 04a	0. 95a
CK	6 100b	6 206b	592	713	1. 03a	0. 87ab
YS	7 106a	6 678a	704	817	1. 01a	0. 82b

通过水分利用效率对比可知,在 4 种灌溉方式中,WP 处理为最佳方式,更有利于节约水资源,使水资源的利用效率达到最大化. 其次为 JX 处理,就整体而言,JX 处理的水分利用效率略低于 WP 处理,但由于是采用的价格经济的空气泵增氧,且每天只需要定时早晚各通气 5 min,成本十分低廉. 而 WP 处理下的超微泡富氧水仪器价格高达数万元,且每次灌溉时都需要手动把灌溉水通过机器处理得到富氧水,较为繁琐. 所以从经济和效率的角度来说,JX 处理也是一种十分可行的灌溉方式.

3　讨论与结论

在控制灌溉条件下增氧处理为基础,通过早晚两季水稻的研究分析表明,控制灌溉条件下增氧可以提高水分利用效率,对根系活力有显著的提升作用. 控制灌溉改变了传统的淹灌模式,有效节约了用水量,提升了用水效率,在此基础下进行增氧,进一步提升了超级稻水稻的根系环境,提高根系活力,延缓根系衰老. 同时通过早晚两季水稻对比,可以得出该超级稻品种相对适宜于作为早稻种植.

由于存在着水分的调控以及增氧措施,导致不同处理下超级水稻的生长发育和产量发生了一定的改变. 与淹水灌溉相比,控制灌溉增氧条件下,可以促进根系生长发育、提高根系干物质的积累、提高根系活力、延缓根系的衰老. 在根冠比方面,采用控制灌溉增氧处理组高于淹灌处理组,这是由于水分调控以及增氧处理,诱导根系产生了更多的侧根来吸收水分. 并且同时由于水分亏欠,使土壤水分含量变低,并在此基础上增氧,提高了根系中的氧含量,也有利于其根系的生长,同样也因为水分胁迫,抑制了营养吸收,使冠干重明显降低,导致能其根冠比提高. 由于控制灌溉的无水层状态,更新了大气与土壤的交互环境,又在增氧条件下进一步提升根层氧含量,使得根系在生长根变得更粗、根系活力得以增强以及更加持久. 也正是控制灌溉增氧下为超级稻根系提供了诸多有利条件,使超级稻根系对土壤水分、养分有着更强的吸收力,因此也为超级稻高产提供了理论基础. 由于本试验中水分控制的强度过大,最终产量与淹水处理下相接近,因此,控制灌溉增氧过程中控水阈值、作物各生育期水分亏欠程度都还有待进一步研究.

参考文献(References)

[1] 张福锁,申建波,冯固,等. 根际生态学——过程与调控[M]. 北京:中国农业大学出版社,2009.

[2] 梁永书,周军杰,南文斌,等. 水稻根系研究进展[J]. 植物学报,2016,51(1):98-106.
LIANG Yongshu, ZHOU Junjie, NAN Wenbin, et al. Research progress of rice roots[J]. Acta botanica sinica,2016,51(1):98-106. (in Chinese)

[3] 蔡昆争. 作物根系生理生态学[M]. 北京:北京工业出版社,2011.

[4] LARSEN Morten. O_2 dynamics in the rhizosphere of young rice plants (oryza sativa L.) as studied by planar optodes[J]. Plant soil, 2015, 390:279-292.

[5] 肖卫华,张文萍,李子豪,等. 不同增氧灌溉对水稻根系生长的影响研究[J]. 湖南农业科学,2016(2):19-21.
XIAO Weihua, ZHANG Wenping, LI Zihao, et al. Effects of different aerated oxygen irrigation on root growth of rice[J]. Hunan agricultural sciences, 2016(2):19-21. (in Chinese)

[6] 陈涛,姚帮松,肖卫华,等. 增氧灌溉对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农村水利水电,2013(8):70-72.
CHEN Tao, YAO Bangsong, XIAO Weihua, et al. Effects of aerobic irrigation on potato yield and water use efficiency[J]. China rural water and hydropower, 2013(8):70-72. (in Chinese)

[7] 才硕. 微纳米气泡增氧灌溉技术在水稻灌区节水减排中的应用研究[J]. 节水灌溉,2016(9):117-120.
CAI Shuo. Application of micro-nano-bubble aerobic irrigation technology in water saving and emission reduction in rice irrigation district[J]. Water saving irrigation,2016(9):117-120. (in Chinese)

[8] 彭世彰,和玉璞,杨士红,等. 控制灌溉稻田的甲烷减排效果[J]. 农业工程学报,2013,29(8):100-107.
PENG Shizhang, HE Yupu, YANG Shihong, et al. Controlling the effect of methane emission reduction in irrigated paddy fields[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8):100-107. (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)

(上接第919页)

HU Jiashuai, WANG Zhenhua, ZHENG Xurong. Effects of different irrigation treatments on drip irrigation red jujube's yield, quality and water use efficiency[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016, 34(12):1086-1092. (in Chinese)

[6] 刘英杰,郑增方,王齐,等. 施肥对川滇楹木幼苗叶绿素含量及光合生理的影响[J]. 林业调查规划,2014,39(4):135-138.
LIU Yingjie, ZHENG Zengfang, WANG Qi, et al. Effects of fertilization on chlorophyll content and photosynthetic physiology of alnus cremastogyne[J]. Forest inventory and planning, 2014,39(4):135-138. (in Chinese)

[7] 柴仲平,王雪梅,孙霞,等. 红枣光合特性与水分利用效率日变化研究[J]. 西南农业学报,2010,23(1):168-172.
CHAI Zhongping, WANG Xuemei, SUN Xia, et al. Research on diurnal of photosynthetic characteristics and water use efficiency of zizyphus jujube[J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2010, 23(1):168-172. (in Chinese)

[8] 周罕觅,张富仓,ROGER Kjelgren,等. 苹果幼树生理特性和水分生产率对水肥的响应研究[J]. 农业机械学报,2015,46(4):77-87.
ZHOU Hanmi, ZHANG Fucang, ROGER Kjelgren, et al. Response of physiological properties and crop water productivity of young apple tree to water and fertilizer[J]. Transactions of the CSAM,2015,46(4): 77-87. (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)