

引用格式:

刘惠东, 李汉常, 姚邦松, 谭歆, 张文萍. 不同氧磷管理对水稻根系活力和产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(2): 130–137.

LIU H D, LI H C, YAO B S, TAN X, ZHANG W P. Effects of different management of oxygen and phosphorus on root activity and yield of rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2020, 46(2): 130–137.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



不同氧磷管理对水稻根系活力和产量的影响

刘惠东¹, 李汉常¹, 姚邦松¹, 谭歆¹, 张文萍^{1,2,3*}

(1.湖南农业大学水利与土木工程学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南农业大学资源环境学院, 湖南 长沙 410128; 3.湖南农业大学作物种质创新与资源利用重点实验室, 湖南 长沙 410128)

摘 要:以杂交稻 C 两优 608 为材料, 设置增氧(OI)、不增氧(NI)2 种灌溉方式和磷肥运筹(施磷 0.18、0.36、0.54 g/kg, 以不施磷为对照), 研究氧磷互作对水稻根系活力和产量的影响及水稻根系活力与产量的关系。结果表明: 磷肥运筹造成水稻不同处理间根系活力和千粒质量差异显著, 理论产量与分蘖期根系活力呈显著正相关; 增氧造成不同处理间的理论产量、有效穗数、每穗粒数差异显著, 当施磷量 0.36 g/kg 时, 增氧条件下的理论产量、有效穗数分别比不增氧条件下的增加 1.04%~23.69%、21.29%~50.03%, 每穗粒数比不增氧条件下的降低 11.49%~25.61%; 不施磷时, 增氧处理的水稻理论产量、有效穗数和千粒质量均最大; 氧磷互作造成不同处理的理论产量、千粒质量差异显著, 千粒质量与幼苗期、分蘖期根系活力呈显著负相关。可见, 合理施磷或增氧能通过影响水稻各生育期的根系活力来提高产量, 而氧磷互作有导致产量比单独施磷或增氧处理降低的趋势。

关 键 词: 水稻; 施磷量; 增氧灌溉; 根系活力; 产量指标

中图分类号: S511.061 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2020)02-0130-08

Effects of different management of oxygen and phosphorus on root activity and yield of rice

LIU Huidong¹, LI Hanchang¹, YAO Bangsong¹, TAN Xin¹, ZHANG Wenping^{1,2,3*}

(1.College of Hydraulic and Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Key Laboratory for Crop Germplasm Innovation and Resources Using, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: To investigate the effects of oxygen-phosphorus(P) management on root activity, yield of rice and their relationships, we adopted two irrigation regimes and three P management on the hybrid rice C Liangyou 608. The experimental groups were the two water regimes, non-oxygation(oxygen irrigation)(NI), oxygation(OI), three P managements, P₁(0.18 g/kg), P₂(0.36 g/kg), P₃(0.54 g/kg), and the control without P application(P₀). The results showed that, P fertilizer operation had a significant difference on 1 000-grain weight and root activity, and theoretical yield was significantly positive to root activity at tillage stage with P application. The oxygation had a significant difference on theoretical yield, effective grain number, and grain number per panicle. When the P application was less than 0.36 g/kg and oxygation, theoretical yield and effective grain number increased by 1.04%-23.69% and 21.29%-50.03%, respectively, grain number per panicle decreased by 11.49%-25.61%. The theoretical yield, effective grain number and 1 000-grain

收稿日期: 2019-08-08

修回日期: 2019-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909088); 湖南省科技计划项目(2018JJ3243); 湖南省教育厅重点项目(19A213、17A094); 作物种质创新与资源利用重点实验室科学基金开放项目(15KFXM04)

作者简介: 刘惠东(1991—), 男, 湖南娄底人, 硕士研究生, 主要从事农业水土工程研究, 479128819@qq.com; *通信作者, 张文萍, 博士研究生, 副教授, 主要从事农业水土工程研究, 48175413@qq.com

weight were maximum without P application but oxygation. The interaction between oxygation and P had a significant interaction difference on theoretical yield and 1 000-grain weight, 1 000-grain weight was significantly negative to root activity at seedling and tilling stage. Phosphorus application or oxygation can increase the yield by affecting the root activity at growth stage, compared with the treatment of phosphorus application or oxygation, the interaction of oxygen and phosphorus had the tendency to reduce the yield.

Keywords: rice; phosphorus application; oxygation; root activity; yield indicators

水稻产量取决于有效穗数、千粒质量、结实率、每穗粒数^[1]。土壤水分、根际增氧方式和养分是影响水稻产量指标的重要因素^[2]。水分能促进根系对土壤养分的吸收与转化,低氧胁迫抑制水稻的根系活力^[3]。

根部适当增氧可改善稻田土壤水溶解氧含量^[4],影响水稻根系形态和结构、根系分泌物及土壤肥力^[4-7],提高 SOD 活性^[8],显著增加水稻干物质积累^[8-9],但增氧过多会导致减产^[1]。前期研究表明,白天机械加氧(1 次通气 4 min)、夜间机械加氧(1 次通气 4 min)、化学加氧(1 次添加 0.03%的双氧水)的水稻单株理论产量分别比不加氧处理的高 18.90%、20.66%、16.98%^[10-11],每日 2 次机械增氧的方式对水稻产量及生理代谢影响最大。合理施磷能提高土壤磷的有效性,促进作物根系生长^[12],并通过参与水稻光合磷酸化产生大量 ATP,增强水稻碳水化合物的合成运转,进而提高水稻籽粒产量^[13-14]。缺磷或过度施磷将导致水稻生育后期根系活性降低,加速根系衰老,严重抑制水稻生长,低磷胁迫下水稻较高的磷吸收能力与其较强的根系氧化能力有关^[15]。湖南省水稻种植区的水稻土多处于高供磷水平^[16],虽然干湿交替灌溉可增加根际溶氧量^[4],但稻田淹水会降低土壤磷的有效性^[17],进而影响水稻各生育期的根系活力及产量。

根系活力作为根系的生理特征指标,与水稻生长发育及产量关系密切,主要受土壤水分、氧含量和养分影响。研究表明:当土壤水分为田间持水率的 80%~90%时,超级稻的根系生长最佳^[11];当灌水深度为根系分布深度的 60%和 75%时,根系活力值较大^[18];在水稻生长发育后期,提高土壤含水量及增施氮肥可保持根系活性,延缓水稻根系衰老,其中轻度水分胁迫藕合中氮处理的根系活力最大^[7,19];低氧胁迫抑制水稻根系活力,且根系活力随胁迫时间延长而逐渐减弱^[20]。合理的水、肥、气调控技术能延缓水稻根系衰老,提高结实率、千粒质量和产

量,而不同氧磷管理对水稻根系活力及产量的影响少见报道。本研究中,以杂交稻 C 两优 608 为研究对象,研究水稻根系活力对不同氧磷管理的响应特征,分析不同处理间水稻的根系活力和产量的差异显著性及两者间的相关性,旨在为水稻的高效栽培及农业减排调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻品种为杂交水稻 C 两优 608,全生育期 150 d,耐肥性中等。供试土壤取自湖南农业大学耘园基地水稻试验田,经风干、打碎、过孔径 3 mm 筛后,备用。供试土壤为第四纪发育的红黄泥,土壤肥力中等,全氮、全磷、全钾含量为分别 1.86、8.04、12.73 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 165.24、30.68、125.73 mg/kg。

1.2 试验设计

试验在湖南农业大学土壤与肥料实验站玻璃温室内进行。

采用两因素试验设计。灌溉方式设不增氧(NI)和增氧(OI)2 种处理。磷肥运筹(P)设 3 个土壤磷肥(P_2O_5)施用水平,分别为 0.18 g/kg(P_1)、0.36 g/kg(P_2)、0.54 g/kg(P_3),以不施磷肥(P_0)为对照。共 8 个处理(NIP₀、NIP₁、NIP₂、NIP₃、OIP₀、OIP₁、OIP₂、OIP₃),每个处理重复 3 次。

试验用塑料桶底部直径 18 cm,上部直径 25 cm,盆深 30 cm。每桶装干土 7.5 kg,施 2.29 g 尿素和 1.56 g 钾肥(K_2O)。装土过程中,采用螺旋方式预埋自制增氧灌溉管路系统。氮肥分基肥、分蘖肥、穗肥施用,质量比为 3 3 4,基肥于移栽前 1 d 施用,分蘖肥于移栽后 7 d 施用,穗肥于倒 4 叶和倒 2 叶分 2 次等量施用。钾肥于分蘖期和拔节孕穗初期分 2 次等量施用。于 2015 年 5 月 8 日育秧;7 月 2 日移栽;7 月 16 日进入分蘖期;8 月 17 日转

入拔节孕穗期;9月1日进入灌浆期;10月1日进入黄熟期;10月18日收获水稻。移栽及分蘖期保持1~3 cm水层;分蘖期群体苗数达到计划穗数的85%时,排水搁田5 d;孕穗后土壤含水量为饱和含水量的70%~100%,灌浆期土表保持1~3 cm水层;黄熟期水分自然落干。增氧灌溉处理每日8:00、18:00用加气泵增氧通气3 min,向根部土壤输送氧。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤水的溶解氧含量测定

于7月14日7:50、8:10、10:50、12:40、14:26、16:50、17:30、18:00,参照文献[21]的方法,利用ST300便携式溶解氧仪测量稻田土壤水溶解氧含量。

1.3.2 根系活力测定

分别于幼苗期、分蘖期、拔节孕穗期、灌浆期各取长势较为一致的代表性植株3盆,小心挖取植株,并尽量保持根部完整。水稻挖出后,立即放入低温保温箱中带回实验室,将根系从根部剪断,用水冲洗并用滤纸吸干,采用TTC还原法测定根系活力。

1.3.3 考种与计产

水稻收获后,每个处理选取3盆用于考种,计数每株有效穗数。稻穗烘干后将稻谷手工脱粒,烘干颗粒,称质量,计算理论产量及结实率。将烘干实粒任选1 000粒,称质量,重复3次,其平均值即为千粒质量。通过换算获得总实粒数和每穗粒数,分析理论产量及构成。

1.4 数据处理

采用Excel 2017和SPSS 22.0进行数据整理、分

析与绘图;运用Duncan's新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 稻田土壤水的溶解氧含量

如表1所示,不增氧处理下,8:10和18:00测得的稻田表层土壤水溶解氧含量分别为上午和下午的最低值;8:00和18:00机械增氧通气3 min处理后,稻田表层土壤水溶解氧含量明显增加,10:50出现最大值。

表1 稻田表层土壤水的溶解氧含量

测定时间	溶解氧含量/(mg·L ⁻¹)	
	增氧	不增氧
6:50	5.81	5.27
7:50	7.31	5.65
8:10	7.51	5.21
10:50	10.03	6.76
12:40	9.47	6.81
14:26	9.64	6.39
16:50	8.19	5.62
17:30	6.47	4.72
18:00	6.32	4.32

2.2 氧磷管理下水稻根系活力差异性

由表2可知,水稻各生育期根系活力随施磷量增加表现不同。无论增氧或不增氧,幼苗期与拔节孕穗期的根系活力随施磷量增加均呈先增加后降低的趋势,NIP₂、OIP₂分别出现最大值;不增氧处理下,分蘖期、灌浆期的根系活力随施磷量增加分别呈逐渐增加、逐渐降低的趋势;增氧处理下,灌浆期根系活力随施磷量增加呈先降低后增加趋势。

表2 氧磷管理下水稻的根系活力及其方差分析

处理	根系活力/(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)			
	幼苗期	分蘖期	拔节孕穗期	灌浆期
NIP ₀	(579.17±37.07)a	(442.42±36.07)bc	(348.94±49.06)cd	(365.23±102.35)cd
NIP ₁	(777.15±22.73)a	(482.98±17.83)b	(384.19±53.09)bc	(359.17±115.57)bc
NIP ₂	(827.40±129.30)a	(577.85±47.44)b	(532.03±144.31)b	(224.05±38.19)c
NIP ₃	(781.09±96.45)a	(725.98±115.52)ab	(307.21±37.60)c	(155.94±13.42)cd
OIP ₀	(496.72±20.35)ab	(449.66±27.95)bc	(307.31±60.24)d	(353.63±101.98)cd
OIP ₁	(757.54±1.00)a	(666.46±159.94)a	(346.55±11.64)bc	(260.24±73.87)c
OIP ₂	(852.31±112.97)a	(615.67±38.30)b	(499.02±172.28)b	(143.63±34.82)c
OIP ₃	(787.25±50.77)a	(618.62±45.92)b	(322.53±54.76)c	(227.20±64.10)cd
OI				
P	**	**	**	**
OI×P				

同行不同字母示不同生育期间差异显著($P < 0.05$);“***”示在0.01水平差异显著。

磷肥运筹是造成水稻各生育期不同处理间根系活力差异极显著的重要因素($P < 0.01$)。磷肥运筹使幼苗期、分蘖期根系活力增加,灌浆期根系活力降低。与 NIP_0 相比,不增氧施磷处理幼苗期、分蘖期的根系活力增幅分别为 34.18%~42.86%、9.17%~64.09%;拔节孕穗期 NIP_1 、 NIP_2 的根系活力分别增加 10.10%、52.47%, NIP_3 的根系活力降低 11.96%;灌浆期不增氧施磷处理的降幅为 1.66%~57.30%。

增氧不是造成水稻各生育期不同处理间根系活力差异显著的重要因素($P > 0.05$)。与不增氧处理相比,施磷量 0.36 g/kg 时,分蘖期根系活力增加,拔节孕穗期、灌浆期根系活力降低。幼苗期 OIP_0 、 OIP_1 的根系活力分别比对应的 NIP_0 、 NIP_1 的降低 14.24%、2.52%, OIP_2 、 OIP_3 的根系活力分别比 NIP_2 、 NIP_3 的增加 3.01%、0.79%;分蘖期 OIP_0 、 OIP_1 和 OIP_2 的根系活力分别比对应的 NIP_0 、 NIP_1 、 NIP_2 的增加 1.64%、37.99%、6.54%, OIP_3 的根系活力比 NIP_3 的降低 14.79%;拔节孕穗期 OIP_0 、 OIP_1 、 OIP_2 的根系活力分别比对应的 NIP_0 、 NIP_1 、 NIP_2 的降低 11.93%、9.80%、6.20%, OIP_3 的根系活力比 NIP_3 的增加 4.99%;灌浆期 OIP_0 、 OIP_1 、 OIP_2 的根系活力分别比对应的 NIP_0 、 NIP_1 、 NIP_2 的降低 3.18%、27.54%、35.89%, OIP_3 的根系活力比 NIP_3 的增加 45.70%。

氧磷互作不是造成水稻各生育期不同处理间根系活力差异显著的重要因素。水稻生育前期根系活力增加,灌浆期根系活力降低。与 OIP_0 相比,增氧施磷处理幼苗期、分蘖期、拔节孕穗期的根系活力的增幅分别为 52.51%~71.59%、36.92%~48.21%、4.95%~62.38%,增氧施磷处理灌浆期根系活力的降

幅为 26.41%~59.38%。

不施磷时,无论增氧与否,水稻根系活力随生育进程推进先降低后增加,于拔节孕穗期出现最小值;施磷时,无论增氧与否,水稻根系活力均随生育进程推进呈逐渐降低趋势。与幼苗期根系活力相比, NIP_0 、 NIP_1 、 NIP_2 、 OIP_2 、 OIP_3 分蘖期、拔节孕穗期、灌浆期的根系活力均显著降低($P < 0.05$); NIP_3 、 OIP_0 、 OIP_1 拔节孕穗期、灌浆期的根系活力显著降低($P < 0.05$)。由表 3 可知,不增氧时,分蘖期的水稻根系活力与灌浆期的根系活力呈显著负相关;增氧时,幼苗期的水稻根系活力与分蘖期的根系活力呈显著正相关,与灌浆期的根系活力呈极显著负相关。

表 3 水稻各生育期根系活力的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between root activity at different stages

生育期	处理	相关系数		
		幼苗期	分蘖期	拔节孕穗期
分蘖期	NI	0.548		
	OI	0.597*		
拔节孕穗期	NI	0.565	-0.089	
	OI	0.536	0.168	
灌浆期	NI	-0.453	-0.632*	-0.063
	OI	-0.760**	-0.265	-0.410

“**”示极显著相关性($P < 0.01$); “*”示显著相关性($P < 0.05$)。

2.3 氧磷管理下水稻的产量及构成因素

由表 4 可知,施磷造成水稻千粒质量差异显著($P < 0.05$)。不增氧时,水稻的理论产量和有效穗数随施磷量的增加而逐增加,结实率呈先增加后降低趋势。与 NIP_0 相比,不增氧施磷处理水稻的理论产量、千粒质量、有效穗数、结实率增幅分别为

表 4 水稻的产量指标及其方差分析

Table 4 Yield indicators of rice and analysis of variance

处理	有效穗数	结实率/%	千粒质量/g	每穗粒数	理论产量/(kg·hm ⁻²)
NIP_0	19.33±1.15	65.78±12.46	24.81±0.13	236.86±14.63	5 786.16±444.32
NIP_1	20.33±4.04	69.05±2.44	25.18±0.54	235.88±36.13	6 012.23±465.50
NIP_2	20.34±3.06	74.80±7.42	24.89±0.40	248.40±38.46	6 309.13±239.45
NIP_3	22.67±1.53	73.88±1.04	25.43±0.02	231.24±11.47	6 776.90±141.41
OIP_0	29.00±2.00	75.28±1.46	27.57±0.05	176.21±12.65	7 156.69±221.83
OIP_1	25.67±2.08	78.83±4.61	24.22±1.40	208.77±13.10	6 601.44±608.37
OIP_2	24.67±2.52	68.29±5.86	23.68±1.86	215.50±10.97	6 374.52±178.73
OIP_3	25.00±2.65	70.95±1.55	26.93±0.14	189.50±22.33	6 472.70±695.08
OI	*			*	*
P			*		
OI*P			*		*

“*”示在 0.05 水平差异显著。

3.91%~17.12%、0.32%~2.50%、5.17%~17.28%、4.97%~13.71%；NIP₁、NIP₃的每穗粒数分别降低0.41%、2.37%，NIP₂的每穗粒数增加4.87%。

增氧是造成水稻理论产量、有效穗数、每穗粒数差异显著的重要因素。与不增氧处理相比，OIP₀、OIP₁、OIP₂的理论产量分别比对应的NIP₀、NIP₁、NIP₂的增加23.69%、9.80%、1.04%，OIP₃的理论产量比NIP₃的降低4.49%；OIP₀、OIP₁、OIP₂、OIP₃的有效穗数分别比对应的NIP₀、NIP₁、NIP₂、NIP₃的增加50.03%、26.27%、21.29%、10.28%；OIP₀、OIP₁、OIP₂、OIP₃的每穗粒数分别比对应的NIP₀、NIP₁、NIP₂、NIP₃的降低25.61%、11.49%、13.25%、18.05%；OIP₀、OIP₃的千粒质量分别比对应的NIP₀、NIP₃的增加11.13%、5.90%，OIP₁、OIP₂的千粒质量分别比对应NIP₁、NIP₂的降低3.81%、4.86%；OIP₀、OIP₁的结实率分别比对应NIP₀、NIP₁的增加14.44%、14.16%，OIP₂、OIP₃的结实率分别比对应的NIP₂、NIP₃的降低8.70%、3.97%。

氧磷互作是造成理论产量和千粒质量差异显著的重要因素。增氧时，水稻的理论产量随施磷量

增加呈逐渐降低趋势，千粒质量和有效穗数均呈先降低后增加趋势，每穗粒数则呈先增加后降低趋势。与OIP₀相比，增氧施磷处理的理论产量、千粒质量、有效穗数降幅分别为7.76%~10.93%、2.32%~14.11%、11.48%~14.93%，每穗粒数增幅为7.54%~22.30%，OIP₁的结实率增加4.72%，OIP₂、OIP₃的结实率降低9.28%、5.75%。

2.4 氧磷管理下水稻根系活力与产量及构成因素的相关性

由表5可知，不增氧处理下，理论产量与分蘖期水稻的根系活力呈显著正相关，其一元线性回归方程为 $y=2.718x+4\ 706.6$ ， $R=0.705$ ，其中 y 为理论产量， x 为分蘖期根系活力；增氧处理下，千粒质量分别与幼苗期、分蘖期的根系活力呈显著负相关，其一元线性回归方程分别为 $y=-0.008\ 4x_1+31.683$ ， $R=-0.632$ 和 $y=-0.01x_2+32.78$ ， $R=-0.687$ 。其中： y 为水稻千粒质量； x_1 为幼苗期的根系活力； x_2 为分蘖期的根系活力。二元线性回归方程为 $y=-0.005x_1-0.009x_2+33.944$ ， $R=0.740$ 。

表5 水稻的产量指标与各生育期根系活力的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between yield indicators and root activity under different treatments

指标	处理	生育期	相关系数				
			有效穗数	结实率	千粒质量	每穗粒数	理论产量
根系活力	NI	幼苗期	0.033	0.262	0.400	0.125	0.248
		分蘖期	0.330	0.413	0.448	0.049	0.705*
		拔节孕穗期	-0.487	0.094	-0.231	0.429	-0.348
		灌浆期	-0.233	-0.235	-0.178	-0.105	-0.567
	OI	幼苗期	-0.448	-0.325	-0.632*	0.527	-0.485
		分蘖期	-0.306	-0.266	-0.687*	0.430	-0.502
		拔节孕穗期	-0.291	-0.033	-0.345	0.334	-0.265
		灌浆期	0.333	0.490	0.487	-0.461	0.312

“*”示显著相关性($P<0.05$)。

3 结论与讨论

水稻的产量和品质与土壤养分、灌溉方式关系密切^[22-23]。施磷98.2~120 kg/hm²，可提高水稻产量、籽粒微量元素含量^[24-25]；施磷量超过120 kg/hm²，可降低产量及籽粒品质^[26]；增氧灌溉可显著增加水稻根际氧含量，提高有效穗数、产量及其营养品质^[27-29]。本研究结果显示，施磷是造成水稻千粒质量差异显著的主要因素，不增氧施磷处理的水稻理论产量、千粒质量、有效穗数、结实率分别比不施磷处理的

高；NIP₁、NIP₃的每穗粒数比不施磷处理的低。施磷能提高土壤磷的有效性^[30]，这可能是水稻产量提高的主要原因。根部增氧能增强根系活力、促进根系生长和对养分的吸收，进而提高水稻的产量^[31-32]。本研究中，增氧灌溉显著增加水稻的理论产量和有效穗数，显著降低每穗粒数，这与肖卫华等^[26]、胡志华等^[31]的研究结果一致。施磷量0.36 g/kg时，增氧条件下的理论产量比不增氧条件下的增加1.04%~23.69%，有效穗数比不增氧条件下的增加21.29%~50.03%，每穗粒数比不增氧条件下的降低

11.49%~25.61%。施磷量为 0.36 g/kg 时,水稻的有效穗数、千粒质量、每穗粒数均对应阈值。氧磷互作能显著影响水稻的理论产量、千粒质量,增氧施磷处理的理论产量、千粒质量、有效穗数分别比增氧不施磷处理的低;增氧施磷处理的每穗粒数比增氧不施磷处理的高;OIP₁的结实率比增氧不施磷处理的高,OIP₂、OIP₃的结实率比增氧不施磷处理的低。合理氧磷管理可提高水稻产量。不施磷肥,增氧可显著增加水稻的理论产量、有效穗数和千粒质量,降低每穗粒数,而施磷量的增加在一定程度上抑制水稻产量的提高。本试验中,水分管理模式为水稻分蘖期、灌浆期保持 1~3 cm 水层,拔节孕穗期土壤含水量 70%~100%,拔节孕穗期适当水分胁迫,灌浆期复水出现补偿效应^[33]是影响水稻生长发育的重要原因。

移栽前一次性施加磷肥,能促进根系生长和提高生育早期根系活力,及早形成壮苗,提高作物吸收养分能力^[30],是影响水稻生长发育的主要原因。本研究结果显示,磷肥运筹造成水稻各生育期不同处理间的根系活力差异显著,分蘖期的根系活力与灌浆期的根系活力呈显著负相关。根际增氧对水稻生育后期的根系活力有明显促进作用,对提高水稻氮肥利用率及产量尤为重要^[18]。本研究结果表明,增氧不是造成水稻各生育期根系活力差异显著的重要因素。一次性施磷能显著增强根系活力,改善水稻根系生理功能^[34],本研究为增氧、施磷双因素交互试验,与增氧因素比较,施磷更能造成水稻根系活力差异显著。本研究结果显示,无论增氧或不增氧,不外施磷肥情况下,水稻根系活力随着水稻生育期延长而先降低后增加,拔节孕穗期的根系活力最小;外施磷肥的水稻根系活力随着水稻生育期延长而逐渐降低。拔节孕穗期 70%~100%土壤含水量可能是造成根系活力差异的主要原因^[2]。

磷肥运筹使水稻幼苗期、分蘖期的根系发达,更多营养元素向籽粒转运,进而提高理论产量^[32]。各生育期的根系活力与产量间的相关分析显示,不增氧灌溉,理论产量与分蘖期的根系活力呈显著正相关。合理施磷能通过影响水稻生育期的根系活力来提高产量;而氧磷互作下,千粒质量与幼苗期、分蘖期的根系活力呈显著负相关,氧磷互作有导致产量比单独施磷或增氧处理降低的趋势。

参考文献:

- [1] 胡继杰,朱练峰,胡志华,等.土壤增氧方式对其氮素转化和水稻氮素利用及产量的影响[J].农业工程学报,2017,33(1):167-174.
HU J J, ZHU L F, HU Z H, et al. Effects of soil aeration methods on soil nitrogen transformation, rice nitrogen utilization and yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 167-174.
- [2] 张自常,李永丰,杨霞,等.干湿交替灌溉条件下不同种稗草对水稻光合特性和产量的影响[J].作物学报,2015,41(11):1748-1757.
ZHANG Z C, LI Y F, YANG X, et al. Effects of different species in *Echinochloa* on photosynthetic characteristics and grain yield in rice under alternate wetting and moderate drying condition[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(11): 1748-1757.
- [3] 徐春梅,陈丽萍,王丹英,等.低氧胁迫对水稻幼苗根系功能和氮代谢相关酶活性的影响[J].中国农业科学,2016,49(8):1625-1634.
XU C M, CHEN L P, WANG D Y, et al. Effects of low oxygen stress on the root function and enzyme activities related to nitrogen metabolism in roots of rice seedlings[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(8): 1625-1634.
- [4] 刘锦涛,黄万勇,杨士红,等.加气灌溉模式下稻田土壤水溶解氧的变化规律[J].江苏农业科学,2015,43(2):389-392.
LIU J T, HUANG W Y, YANG S H, et al. Changes of dissolved oxygen in soil water under aerated irrigation[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2015, 43(2): 389-392.
- [5] 刘学.不同氧供给处理对水稻生育特性与产量形成的影响[D].北京:中国农业科学院,2009.
LIU X. Effects of different oxygen supply on growth characteristics and yield formation of rice(*Oryza sativa* L.)[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [6] 张文萍,肖卫华,姚邦松,等.增氧灌溉条件下不同施磷量对水稻分蘖期根系的影响研究[J].节水灌溉,2016(8):27-29.
ZHANG W P, XIAO W H, YAO B S, et al. Effects of different phosphoric fertilizer application on rice root system in tillering stage under oxygation[J]. Water Saving Irrigation, 2016(8): 27-29.
- [7] 徐国伟,孙会忠,陆大克,等.不同水氮条件下水稻根系超微结构及根系活力差异[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):811-820.
XU G W, SUN H Z, LU D K, et al. Differences in ultrastructure and activity of rice roots under different

- irrigation and nitrogen supply levels[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(3): 811–820.
- [8] 周晚来, 易永健, 屠乃美, 等. 根际增氧对水稻根系形态和生理影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 367–376.
- ZHOU W L, YI Y J, TU N M, et al. Research progresses in the effects of rhizosphere oxygen-increasing on rice root morphology and physiology[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(3): 367–376.
- [9] 胡继杰, 朱练峰, 钟楚, 等. 增氧模式对水稻光合特性及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(3): 278–287.
- HU J J, ZHU L F, ZHONG C, et al. Effects of aeration methods on photosynthetic characteristics and yield of rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2017, 31(3): 278–287.
- [10] 宋双, 付立东, 詹贵生. 磷肥不同施入量对水稻产量的影响[J]. 北方水稻, 2013, 43(6): 20–22.
- SOING S, FU L D, ZHAN G S. Effect of phosphorus fertilizer amounts on yield of rice[J]. North Rice, 2013, 43(6): 20–22.
- [11] 张立成, 谢立钧, 胡德勇, 等. 土壤水分调控对超级稻根系特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(4): 34–38.
- ZHANG L C, XIE L J, HU D Y, et al. Response of root traits of super-rice to soil moisture regulation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(4): 34–38.
- [12] 杨荣. 水-磷互作调节棉花根系形态和磷效率的机制研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017.
- YANG R. Study on the mechanism of the interaction between water and phosphorus on the root morphology and phosphorus efficiency of cotton[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017.
- [13] 冯媛媛, 申艳, 徐明岗, 等. 施磷量与小麦产量的关系及其对土壤、气候因素的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 683–691.
- FENG Y Y, SHEN Y, XU M G, et al. Relationship between phosphorus application amount and grain yield of wheat and its response to soil and climate factors[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(4): 683–691.
- [14] 李跃娜, 侯立刚, 齐春艳, 等. 不同磷素营养水平对水稻剑叶光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18035–18037.
- LI Y N, HOU L G, QI C Y, et al. Effects of different levels of phosphorus nutrient on the photosynthesis characteristic of rice flag[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(32): 18035–18037.
- [15] 徐惠龙. 磷高效水稻根系响应低磷胁迫的生理特性与相关蛋白研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2007.
- XU H L. Study on the physiological response and related proteins in root of rice (*Oryza sativa* L.) with high P efficiency to low phosphate stress[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007.
- [16] 郑圣先, 廖育林, 杨曾平, 等. 湖南双季稻种植区不同生产力水稻土肥力特征的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1108–1121.
- ZHENG S X, LIAO Y L, YANG Z P, et al. Studies on fertility characteristics of different productive paddy soils in double-rice cropping regions of Hunan province[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(5): 1108–1121.
- [17] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 施磷对稻田土壤及田面水磷浓度影响的模拟[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1845–1848.
- ZHOU Q L, ZHAO M Q, LU C Y, et al. Effects of P application on P concentrations in paddy soil and its surface water: a simulation test[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(10): 1845–1848.
- [18] 王兵. 水分调控对冬小麦根系生长及吸水特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- WANG B. The influence of different water supplied on root morphology and water uptake ability in winter wheat[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [19] 胡香玉. 氮肥优化管理提高水稻氮素利用效率的生理机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- HU X Y. Studies on physiological mechanisms of optimized nitrogen managements increasing nutrient use efficiency in rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [20] 陈梦云. 不同土壤类型下灌溉方式对水稻产量形成、根系形态和品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- CHEN M Y. Effect of different irrigation methods on yield and quality of rice under different soil types[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [21] 王佳佳, 彭廷, 张静, 等. 不同根际溶解氧质量浓度对生育中后期水稻根系和抗氧化酶活性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2016, 50(6): 720–725.
- WANG J J, PENG T, ZHANG J, et al. Effects of different rhizosphere dissolved oxygen mass concentration on rice root growth and antioxidant enzyme activities at middle and late growth stage[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2016, 50(6): 720–725.
- [22] 刘宝玉, 徐家宽, 王余龙, 等. 不同生育时期氮素供应水平对杂交水稻根系生长及其活力的影响[J]. 作物学报, 1997, 23(6): 699–706.
- LIU B Y, XU J K, WANG Y L, et al. Effect of nitrogen supplying levels and timings on the development of roots in hybrid indica rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 1997,

- 23(6): 699–706 .
- [23] 庞欣, 张福锁, 李春俭. 部分根系供磷对黄瓜根系和幼苗生长及根系酸性磷酸酶活性影响[J]. 植物生理学报, 2000, 26(2): 153–158 .
- PANG X, ZHANG F S, LI C J. Effects of the part of P-supply roots on cucumber seedling growth, P concentration in shoot and root and secreted acid phosphatase activity by root[J]. Acta Photophysiological Sinica, 2000, 26(2): 153–158 .
- [24] 朱强根, 金爱武, 姜艳华, 等. 施肥对毛竹根系酸性磷酸酶及氮代谢的影响[J]. 福建林业科技, 2016, 43(1): 30–34 .
- ZHU Q G, JIN A W, LOU Y H, et al. Effect of fertilization on root acid phosphatase and nitrogen metabolism of *Phyllostachys heterocycla* cv. Pubescens[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2016, 43(1): 30–34 .
- [25] 张绍文, 何巧林, 王海月, 等. 控制灌溉条件下施氮量对杂交籼稻 F 优 498 氮素利用效率及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 82–94 .
- ZHANG S W, HE Q L, WANG H Y, et al. Effects of nitrogen application rates on nitrogen use efficiency and grain yield of indica hybrid rice F You498 under controlled intermittent irrigation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 82–94 .
- [26] 肖卫华, 姚帮松, 张文萍, 等. 根区通气增氧对杂交水稻根系及根际土壤微生物的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(8): 41–43 .
- XIAO W H, YAO B S, ZHANG W P, et al. Effect of hybrid rice root and rhizosphere microbes by aeration in root zone[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(8): 41–43 .
- [27] 王伟伟, 齐冰洁, 赵攀衡, 等. 低磷胁迫下不同磷效率燕麦品种酸性磷酸酶活性差异[J]. 北方农业学报, 2017, 45(5): 55–58 .
- WANG W W, QI B J, ZHAO P H, et al. The acid phosphatase activities of different phosphorus efficiency of oat varieties under low phosphorus stress[J]. Journal of Northern Agriculture, 2017, 45(5): 55–58 .
- [28] 王伟伟. 低磷胁迫下不同磷效率燕麦品种根系分泌物的差异[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017 .
- WANG W. Differences in root exudates of oat cultivars with different P efficiency under low phosphorus stress[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017 .
- [29] 张丽梅, 郭再华, 张琳, 等. 缺磷对不同耐低磷玉米基因型酸性磷酸酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 898–910 .
- ZHANG L M, GUO Z H, ZHANG L, et al. Effects of phosphate deficiency on acid phosphatase activities of different maize genotypes tolerant to low-P stress[J]. Journal of Plant Nutrition & Fertilizer, 2015, 21(4): 898–910 .
- [30] 帕尔哈提·克依木, 张少民, 孙良斌, 等. 磷肥做种肥条施对棉花根系活力及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(9): 158–161 .
- PAERHATI K, ZHANG S M, SUN L B, et al. Banding phosphorus as seed manure enhances root activity and seed yield of cotton[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(9): 158–161 .
- [31] 胡志华, 朱练峰, 林育炯, 等. 根部增氧模式对水稻产量与氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1503–1512 .
- HU Z H, ZHU L F, LIN Y J, et al. Effect of root aeration methods on rice yield and nitrogen utilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(6): 1503–1512 .
- [32] 余华清, 丁峰, 殷尧翥, 等. 不同水氮管理下麦茬杂交稻氮磷钾吸收和转运及其与产量的关系[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(4): 337–343 .
- YU H Q, DING F, YIN Y Z, et al. The uptake and transfer of nitrogen, phosphorus, potassium and their relationship with the yield in wheat stubble hybrid rice under different management of water and nitrogen[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2019, 45(4): 337–343 .
- [33] 张烈君. 水稻水分胁迫补偿效应研究[D]. 南京: 河海大学, 2006 .
- ZHANG L J. Research on compensation effect of rice under water stress[D]. Nanjing: Hohai University, 2006 .
- [34] 唐拴虎, 徐培智, 陈建生, 等. 一次性施用控释肥对水稻根系活力及养分吸收特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 591–596 .
- TANG S H, XU P Z, CHEN J S, et al. Effects of single basal application of controlled-release fertilizer on root activity and nutrient absorption of rice(*Oryza sativa* L.)[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(4): 591–596 .

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正