

施磷量对增氧条件下水稻根系酸性磷酸酶活性及产量的影响

刘崇现², 张文萍^{1,2,3*}, 周卫军², 张文俊¹, 闫丽君⁴

(1. 湖南农业大学 工学院, 长沙 410128; 2. 湖南农业大学 资源环境学院, 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, 长沙 410128; 4. 山西省文水县自然资源局, 山西 文水 032100)

摘要:【目的】探讨水稻根系酸性磷酸酶活性对增氧条件下施磷量的响应机制,明确水稻产量与根系酸性磷酸酶活性的相关性。【方法】以杂交水稻C两优608为材料进行盆栽试验,设置4个磷肥(P_2O_5)施用水平, $P_1(0\text{ g/株})$ 、 $P_2(3.23\text{ g/株})$ 、 $P_3(6.46\text{ g/株})$ 、 $P_4(9.70\text{ g/株})$,分蘖期至灌浆期设置2种灌溉方式,即NO(不增氧灌溉)和O(增氧灌溉),测定了水稻根系酸性磷酸酶活性和产量指标,分析了根系酸性磷酸酶活性与产量的响应关系。【结果】随着施磷量的增加,增氧条件下理论产量、有效穗数与千粒质量均先降低后升高,而每穗粒数呈现先升高后降低趋势;分蘖期与拔节孕穗期根系酸性磷酸酶活性随施磷量的增加而降低,灌浆期根系酸性磷酸酶活性呈现先升高后降低;增氧条件下千粒质量与灌浆期根系酸性磷酸酶活性显著负相关,结实率与拔节孕穗期根系酸性磷酸酶活性显著正相关。【结论】不外加磷肥情况下,增氧方式可显著增加水稻理论产量、有效穗数及千粒质量,施磷量的增加反而抑制水稻产量形成,6.46 g/株(90 kg/hm^2)为增氧条件下理论产量、有效穗数、千粒质量、每穗粒数阈值,根系酸性磷酸酶活性是增氧条件下水稻响应根际增氧及磷素吸收的重要指标。

关键词:施磷量;根系酸性磷酸酶活性;产量指标;超级稻;增氧灌溉

中图分类号:S152.7

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2018347

刘崇现,张文萍,唐卫军,等. 施磷量对增氧条件下水稻根系酸性磷酸酶活性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019,38(7):32-37.

0 引言

有效穗数、千粒质量、结实率、每穗粒数等共同决定水稻产量潜力,土壤水分、根际氧和养分是影响水稻产量的重要因素。土壤水分能促进根系生长^[1-4]及其对土壤养分的吸收与转化^[5,8],根际增氧措施可影响水稻根系形态和结构、根系分泌物及土壤肥力^[9],显著增加水稻干物质积累,但增氧过多会导致减产^[1]。前期研究表明,白天机械加氧、夜间机械加氧、化学加氧方式的单株理论产量分别比不加氧处理高18.90%、20.66%、16.98%^[10],白天1日2次机械增氧方式对水稻产量及生理代谢影响最大。

土壤有效磷量是制约水稻生长发育及产量的关键因素,适宜施磷量可增加土壤有效磷量,提高水稻成熟期籽粒氮、磷钾积累量^[11]和蛋白质质量^[12],使水稻早熟、籽粒饱满^[13],过量施磷反而严重影响氮、钾的吸收效应,抑制水稻生长^[11]。干湿交替灌溉虽然可增加根际溶氧量,但稻田淹水会降低土壤磷有效性,根系酸性磷酸酶活性作为磷胁迫的适应性机制^[14-15],能显著提高土壤磷的生物有效性,实现为植物提供速效养分(Olsen-P)的作用^[16-18],低磷可诱导根系酸性磷酸酶活性显著提高^[19],高磷则抑制根系酸性磷酸酶活性,降低磷的吸收利用^[20]。因此,施磷量提高或降低根系酸性磷酸酶活性,可能是影响水稻产量的关键因素,水稻对根际增氧及

收稿日期:2018-06-22

基金项目:作物种质创新与资源利用重点实验室自然科学基金开放项目(15KFXM04);湖南省教育厅重点项目(77A094);湖南省科技计划项目(2018JJ3243);国家国际科技合作专项项目(2013DFG91190);国家自然科学基金项目(31272248,31401951);国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2014ZX07602-004)

作者简介:刘崇现(1986-),男。硕士研究生,主要从事土地资源学研究。E-mail: 260279660@qq.com

通信作者:张文萍(1977-),女。副教授,主要从事农业水土工程与土壤学研究。E-mail: renbosheng@163.com

磷素吸收的响应复杂^[6]。湖南省水稻种植区水稻土多属于高供磷水平^[7],合理投入水、肥、气量是作物高产的关键。兹以水稻为研究对象,采用增氧方式并对水稻进行施磷水平调控,分析不同处理下水稻根系酸性磷酸酶活性与产量的差异显著性及相关性,明确水稻根系酸性磷酸酶活性对增氧条件下施磷水平的响应机制,对进一步完善水稻育秧理论、改进水稻育秧技术具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

2015年5—10月在湖南省长沙市湖南农业大学校内土壤与肥料实验站玻璃温室内进行试验。试验区位于长江下游,属于亚热带季风性气候,四季分明,年平均气温为17.60℃,年平均无霜期为280.5 d,年平均降雨量为1 403.53 mm,年总降雨时间158.9 d,月平均降雨量为116.96 mm,月总降雨时间13.24 d,平均气压101.22 kPa,相对湿度80%。试验土壤取自水稻试验田,为第四纪红黄泥土,肥力中等,经风干、打碎、过0.5 mm筛后备用。

1.2 试验设计

本试验共设8个处理,考虑2个因素,①灌溉方式:不增氧(NO)和增氧(O)(每日08:00、18:00准时通气3 min的机械增氧方式),②以单株水稻为单位,计算其肥料用量,设4个磷肥(P_2O_5)施用水平: $P_1(0\text{ g/株})$ 、 $P_2(3.23\text{ g/株})$ 、 $P_3(6.46\text{ g/株})$ 、 $P_4(9.70\text{ g/株})$ 。

水分管理模式:根据已有的试验结果,移栽至返青、分蘖期及灌浆期均保持1~3 cm浅水层,拔节孕穗期土壤含水率保持田间持水率的70%~100%;且分蘖期群体苗数达到计划穗数的85%时,排水搁田5 d;黄熟期水分自然落干。装土过程中采用螺旋方式预埋自制增氧灌溉管路系统,采用加气泵通过预埋的增氧灌溉管路系统向根际土壤输送。由于是破坏性试验,每处理设12个重复,总共96盆。

1.3 盆栽试验

试验用塑料桶底部直径18 cm,上部25 cm,盆深30 cm,每盆装干土7.5 kg,主要土壤理化性质为:全氮、全磷、全钾量分别为1.86、8.04、12.73 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾量分别为165.24、30.68、125.73 mg/kg。每盆施肥量为尿素($CO(NH_2)_2$)2.29 g、钾肥(K_2O)1.56 g,氮肥基肥、分蘖肥与穗肥比例为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和倒2叶分2次等量施用,钾肥分2次等量施用。磷肥采用过磷酸钙(P_2O_5)一次性施用。将土与肥料搅拌均匀,一次性装土,轻微震荡,不压实。水稻供试品种为当地常用高产品种“杂交水稻C两优608”。

试验于2015年5月8日育秧,7月2日移栽,每盆栽1穴,每穴1根籽苗,7月16日开始进入分蘖期,历时26 d;8月11日转入排水搁田,历时5 d;8月17日转入拔节孕穗期,历时15 d;9月1日转入灌浆期,历时30 d;10月1日进入黄熟期,水分自然落干,历时17 d;10月18日水稻收获。

1.4 测试指标及方法

1.4.1 根系酸性磷酸酶活性测定

分别于抽穗期,拔节孕穗期、灌浆期各个处理选取3盆,在根部处剪断并用水冲洗,再用滤纸吸干,采用硝基酚磷酸钠法测定根系酸性磷酸酶活性。

1.4.2 产量及其构成指标测定

在水稻收获期收割稻谷计算每株稻有效穗数,稻穗自然风干后将稻谷手工脱粒,将晒干的实粒任意选取1 000粒称质量,重复3次,即为千粒质量。再将全部实粒质量除以千粒质量,乘1 000换算成总实粒数,除以有效穗数,算得每穗粒数,再将颗粒烘干称质量,并计算理论产量。采用Microsoft Excel 和SPSS21.0进行分析与作图,采用Duncan's新复极差法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 施磷量对增氧条件下水稻根系酸性磷酸酶活性的影响

图1是水稻各生育期根系酸性磷酸酶活性情况。由图1可知,施磷量对水稻不同生育期根系酸性磷酸酶活性的作用表现不同,NOP处理总体表现为随施磷量的增加分蘖期根系酸性磷酸酶活性逐步降低,而拔节孕穗期根系酸性磷酸酶活性逐步增加的趋势,灌浆期根系酸性磷酸酶活性呈现先降低后升高的变化趋

势。与NOP₁处理相比,分蘖期NOP₃、NOP₄根系酸性磷酸酶活性差异显著,NOP₂—NOP₄处理的降幅为4.49%~29.98%($P<0.05$);拔节孕穗期NOP₄根系酸性磷酸酶活性差异显著,NOP₂—NOP₄处理增幅为7.20%~54.11%($P<0.05$);灌浆期NOP₂、NOP₃、NOP₄差异显著,NOP₂—NOP₄处理降幅为32.36%~75.04%($P<0.05$)。

OP处理前2个生育期总体表现为随着施磷量的增加根系酸性磷酸酶活性逐步降低的趋势;灌浆期根系酸性磷酸酶活性呈现先升高后降低的变化趋势,OP₃处理出现最大值;但分蘖期OP处理根系酸性磷酸酶活性明显低于对应NOP处理。与OP₁处理相比,分蘖期、拔节孕穗期OP₃、OP₄根系酸性磷酸酶活性均差异显著($P<0.05$),分蘖期OP₂—OP₄处理降幅为2.34%~40.05%;拔节孕穗期OP处理降幅为17.35%~36.16%;灌浆期OP₂、OP₃、OP₄差异显著,OP₂—OP₄处理增幅为127.10%~286.69%($P<0.05$)。与相应NOP处理相比,拔节孕穗期OP₁、OP₄处理差异显著,灌浆期OP₁、OP₂、OP₃处理差异显著($P<0.05$),分蘖期OP₂—OP₄处理降幅为1.66%~17.66%;拔节孕穗期表现为OP₁、OP₂处理分别比对应NOP₁、NOP₂增加56.30%、20.51%,OP₃、OP₄处理分别比对应NOP₃、NOP₄降低10.81%、35.25%;灌浆期表现为OP₂、OP₃处理分别比对应NOP₂、NOP₃增加167.03%、42.09%,OP₁、OP₄处理分别比对应NOP₁、NOP₄降低77.79%、25.45%。

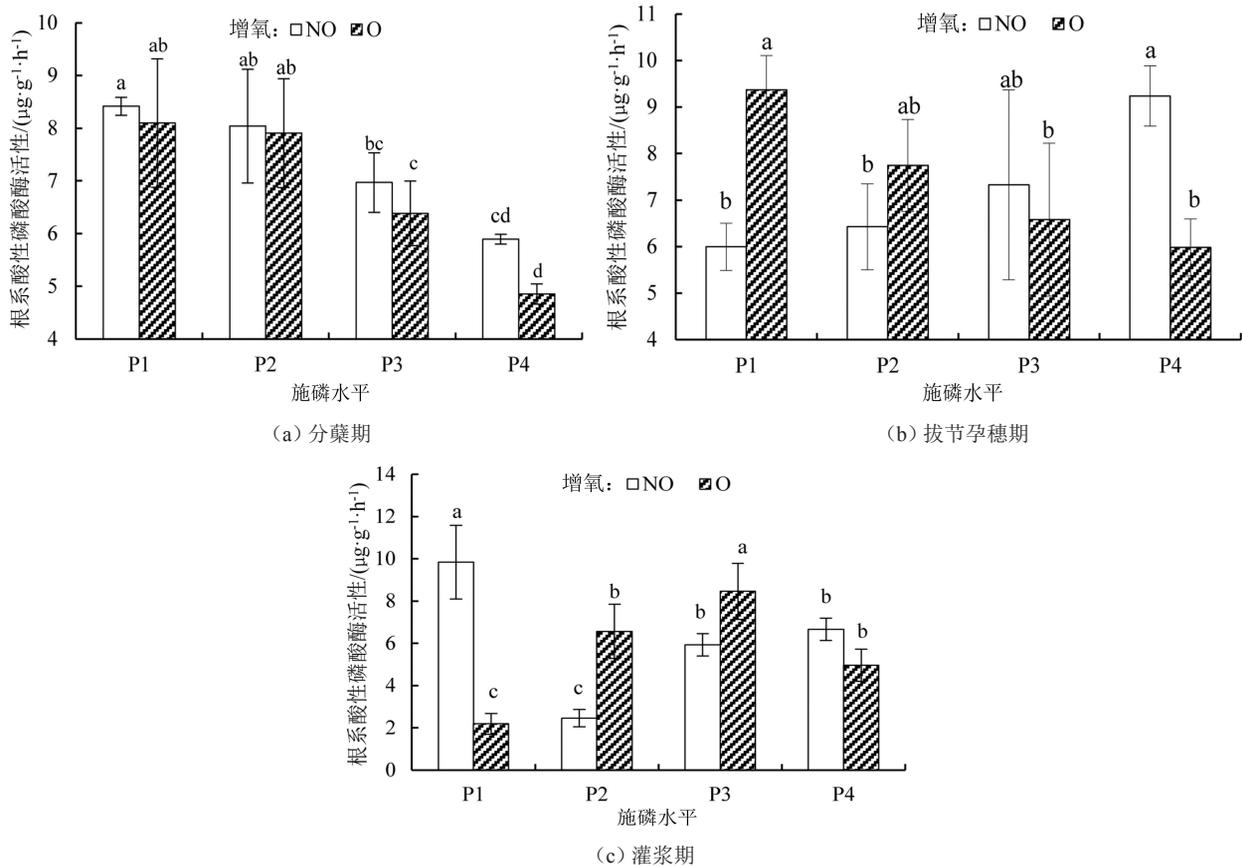


图1 水稻根系酸性磷酸酶活性的变化

2.2 施磷量对增氧条件下水稻产量及构成因素的影响

表1显示了水稻产量情况。由表1可知,NOP处理理论产量与有效穗数均表现为随施磷量的增加而逐步增加,结实率呈先升高后降低的变化趋势,与NOP₁处理相比,NOP₄处理理论产量差异显著,NOP₂—NOP₄处理增幅为3.91%~17.12%($P<0.05$);有效穗数、结实率、千粒质量增幅分别为5.17%~17.24%、4.92%~18.27%、0.30%~2.49%,差异不显著($P<0.05$);NOP₂、NOP₄处理每穗粒数分别比NOP₁处理降低0.41%、2.37%,NOP₃处理比NOP₁处理增加4.87%,差异不显著($P<0.05$)。OP处理理论产量、有效穗数与千粒质量均呈先降低后升高的变化趋势;每穗粒数均呈先升高后降低的变化趋势。与OP₁处理相比,OP₂—OP₄处理理论产量、有效穗数、结实率、每穗粒数差异不显著,理论产量、有效穗数降幅分别为7.76%~10.93%、11.49%~14.94%,每穗粒数增幅为7.54%~22.30%,OP₂处理结实率比OP₁处理增加4.72%,OP₃、OP₄处理分别比OP₁处理降低9.28%、5.75%($P<0.05$);OP₂、OP₃处理千粒质量差异显著,OP处理千粒质量降幅为2.33%~14.10%($P<0.05$)。

表1 水稻产量指标

| 处理 | 产量指标 | | | | |
|------------------|---------------------------|--------------|--------------|---------------------------|-----------------------------|
| | 有效穗数/(个·株 ⁻¹) | 结实率/% | 千粒质量/g | 每穗粒数/(粒·穗 ⁻¹) | 理论产量/(kg·hm ⁻²) |
| NOP ₁ | 19.33±1.15d | 65.78±12.46b | 24.81±0.13bc | 236.86±14.63a | 5 786.16±444.32c |
| OP ₁ | 29.00±2.00a | 75.28±1.46ab | 27.57±0.05a | 176.21±12.65c | 7 156.69±221.83a |
| NOP ₂ | 20.33±4.04cd | 69.05±2.44ab | 25.18±0.54bc | 235.88±36.13a | 6 012.23±465.50bc |
| OP ₂ | 25.67±2.08ab | 78.83±4.61a | 24.22±1.40bc | 208.77±13.10abc | 6 601.44±608.37ab |
| NOP ₃ | 20.34±3.06cd | 74.80±7.42ab | 24.89±0.40bc | 248.40±38.46a | 6 309.13±239.45bc |
| OP ₃ | 24.67±2.52abc | 68.29±5.86ab | 23.68±1.86c | 215.50±10.97abc | 6 374.52±178.73abc |
| NOP ₄ | 22.67±1.53bcd | 73.88±1.04ab | 25.43±0.02b | 231.24±11.47ab | 6 776.90±141.41ab |
| OP ₄ | 25.00±2.65abc | 70.95±1.55ab | 26.93±0.14a | 189.50±22.33bc | 6 472.70±695.08abc |

与相应NOP处理相比,理论产量与每穗粒数表现为OP₁差异显著,有效穗数表现为OP₁、OP₂差异显著,千粒质量表现为OP₁、OP₄差异显著($P<0.05$)。与NOP₁、NOP₂、NOP₃处理相比,OP₁、OP₂、OP₃处理理论产量增幅为1.04%~23.69%,OP₄处理比对应NOP₄处理降低4.49%;每穗粒数、有效穗数的增幅分别为11.49%~25.60%、10.30%~50.00%;千粒质量OP₁、OP₄处理分别比对应NOP₁、NOP₄处理增加11.11%、5.88%,OP₂、OP₃处理分别比对应NOP₂、NOP₃处理降低3.82%、4.84%;OP₁、OP₂处理结实率增加14.44%、14.23%,OP₃和OP₄处理结实率降低8.70%、3.96%。

2.3 施磷量对增氧条件下超级稻根系酸性磷酸酶活性与产量相关性分析

表2是水稻根系酸性磷酸酶活性与产量指标的相关系数。由表2可知,NOP处理理论产量与分蘖期根系酸性磷酸酶活性显著负相关($P<0.05$);OP处理千粒质量与灌浆期根系酸性磷酸酶活性显著负相关,结实率与拔节孕穗期根系酸性磷酸酶活性显著正相关($P<0.05$)。无论增氧或不增氧,施磷量都会对根系酸性磷酸酶活性及水稻产量产生影响,但不增氧条件下根系酸性磷酸酶活性不是对水稻产量及其构成产生影响的重要指标,而增氧条件下拔节孕穗期、灌浆期根系酸性磷酸酶活性对结实率、千粒质量产生重要影响,即根系酸性磷酸酶活性是增氧条件下水稻响应根际增氧及磷素吸收的重要指标。

表2 超级稻产量指标与各生育期根系酸性磷酸酶活性的相关系数

| 处理 | 产量指标 | 理论产量/(kg·hm ⁻²) | 有效穗数/(个·株 ⁻¹) | 结实率/% | 千粒质量/g | 每穗粒数/(粒·穗 ⁻¹) |
|-----|---|-----------------------------|---------------------------|--------|--------|---------------------------|
| NOP | 根系酸性磷酸酶活性/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) | 分蘖期 | -0.602* | -0.239 | -0.363 | -0.403 |
| | | 拔节孕穗期 | 0.437 | 0.205 | 0.203 | 0.556 |
| | | 灌浆期 | -0.195 | -0.063 | -0.056 | -0.199 |
| OP | 根系酸性磷酸酶活性/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) | 分蘖期 | 0.459 | 0.495 | 0.561 | -0.088 |
| | | 拔节孕穗期 | 0.424 | 0.452 | 0.648* | 0.334 |
| | | 灌浆期 | -0.335 | -0.234 | -0.215 | -0.624* |

3 讨论

多数研究表明灌溉方式、养分和水稻产量品质存在着密切关系^[21-22],增氧灌溉可显著提高水稻根系氧浓度、有效穗、结实率及其营养品质^[23-25],磷肥施用适当(98.2~120 kg/hm²),产量品质、籽粒微量元素量提高^[26],磷肥施用过量(120~160 kg/hm²),产量及籽粒品质降低^[11]。本研究发现,不增氧条件下理论产量、有效穗数随施磷量的增加而增加,而结实率、每穗粒数呈先升高后降低的趋势,千粒质量呈先降低后升高的趋势,适宜施磷量6.46 g/株(90 kg/hm²)下,千粒质量低于98.2 kg/hm²,这与侯云鹏等^[11]研究结果不相一致,主要因为高供磷水平稻田土壤(速效磷量30.68 mg/kg)。而增氧条件下理论产量、有效穗数和千粒质量呈先降低后升高的趋势,每穗粒数呈先升高后降低的趋势,说明不施磷肥情况下,增氧方式显著增加理论产量、有效穗数、千粒质量,减少每穗粒数;当施磷量为3.23 g/株时,理论产量、有效穗数、结实率增加;当施磷量为6.46 g/株(90 kg/hm²)和9.7 g/株,理论产量、有效穗数、千粒质量增加。

水稻不同生育期根系酸性磷酸酶活性表现不同,分蘖期NOP处理和OP处理水稻根系酸性磷酸酶活性都随施磷量的增加而降低,这与低磷胁迫能显著提高根系酸性磷酸酶活性^[27-28]结论一致;拔节孕穗期NOP处理根系酸性磷酸酶活性随施磷量的增加而增加,OP处理根系酸性磷酸酶活性随施磷量的增加而降低。土壤持水率保持在70%~100%,有充足气体进入根系周围,根系吸收土壤有效磷,但土壤磷量随水稻生长而降低,可能是NOP处理根系酸性磷酸酶活性增加的主要原因,而增氧方式下水稻根系发达是OP处理根系

酸性磷酸酶活性随施磷量的增加而降低的重要原因^[14-15];灌浆期NOP处理根系酸性磷酸酶活性随施磷量的增加呈先降低后升高的趋势,而OP处理随施磷量的增加呈先升高后降低趋势,这与灌浆期水稻根系老化有关。

NOP处理理论产量与分蘖期根系酸性磷酸酶活性显著负相关,OP处理千粒质量与灌浆期根系酸性磷酸酶活性显著负相关;说明增氧条件下施磷量(≤ 6.46 g/株)越低,灌浆期根系酸性磷酸酶活性越高,理论产量、有效穗数、千粒质量增加;结实率与拔节孕穗期根系酸性磷酸酶活性显著正相关,表明拔节孕穗期土壤有效磷量降低,提高拔节孕穗期根系酸性磷酸酶活性可影响结实率。

本研究为盆栽试验,虽然可在施肥和控气处理上进行精确控制,但实际生长状况仍与大田不同(例如光照,土壤水肥的保持力等),部分结果仍需大田试验进行验证。

4 结论

1)不施加磷肥情况下,增氧方式显著增加水稻理论产量及有效穗数、千粒质量,但每穗粒数降低,施磷量的增加在一定程度上抑制水稻产量形成,6.46 g/株(90 kg/hm^2)为增氧条件下理论产量、有效穗数、千粒质量及每穗粒数对应阈值。

2)根系酸性磷酸酶活性不仅是反映水稻磷代谢过程的重要指标,同时也可作为水稻响应根际增氧的重要指标,增氧条件水稻千粒质量随灌浆期根系酸性磷酸酶活性的增加而降低,结实率随拔节孕穗期根系酸性磷酸酶活性的增加而增加。

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.
- [2] LI Yuan, NIU Wenquan, XU Jian, et al. Review on advances of airjection irrigation[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2016, 9(2): 1-10.
- [3] LI Y, NIU W, WANG J, et al. Effects of Artificial Soil Aeration Volume and Frequency on Soil Enzyme Activity and Microbial Abundance when Cultivating Greenhouse Tomato[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(5): 1 208.
- [4] 雷宏军,王露阳,潘红卫,等.紫茄生长及养分利用对增氧地下滴灌的响应研究[J].灌溉排水学报,2019, 38(3):8-14.
- [5] 沈维,胡德勇,姚帮松,等.土壤耕作层含氧量对黄瓜叶片生长特性的影响[J].灌溉排水学报,2017, 36(4):47-52.
- [6] 雷宏军,杨宏光,冯凯,等.循环曝气灌溉条件下小白菜生长及水分与养分利用[J].灌溉排水学报,2017, 36(11):15-20.
- [7] 丁汉卿,赖聪玲,沈宏.干湿交替和过氧化物对水稻根表铁膜及养分吸收的影响[J].生态环境学报,2015,24(12):1 983-1 988.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 张立成,姚帮松,肖卫华,等.不同加氧处理方式对超级稻产量的影响[J].水资源与水工程学报,2016(3):213-216.
- [11] 侯云鹏,孔丽丽,李前,等.不同施磷水平下水稻产量、养分吸收及土壤磷素平衡研究[J].东北农业科学,2016(6):63-68.
- [12] 朱宽宇,展明飞,陈静,等.不同氮肥水平下结实期灌溉方式对水稻弱势粒灌浆及产量的影响[J].中国水稻科学,2018,32(2):155-168.
- [13] 李前,侯云鹏,高军,等.不同供磷水平对水稻干物质累积、磷素吸收分配及产量的影响[J].东北农业科学,2015,40(3):37-41.
- [14] 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(5):55-58.
- [15] 徐静,张锡洲,李廷轩,等.野生大麦对土壤磷吸收及其酸性磷酸酶活性的基因型差异[J].草业学报,2015(1):88-98.
- [16] 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.
- [17] 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(5):1 108-1 121.
- [18] 刘玉槐,魏晓梦,魏亮,等.水稻根际和非根际土磷酸酶活性对碳、磷添加的响应[J].中国农业科学,2018,51(9):42-52.
- [19] 张焯.低磷胁迫诱导植物酸性磷酸酶的分子调控机制[D].北京:清华大学,2014.
- [20] 何园球.水稻旱作下土壤水分状况和施用磷肥对红壤有效磷含量的影响[J].土壤学报,2011,48(6):1 196-1 202.
- [21] 陈小龙,陈灿,周莉.水稻不同生育期叶绿素含量的测定及其相关性分析[J].现代农业科技,2010(17):42-44, 52.
- [22] 李勇.氮素营养对水稻光合作用与光合氮素利用率的影响机制研究[D].南京:南京农业大学,2011.
- [23] 严林,常庆瑞,刘梦云,等.引黄灌区水稻不同生育期叶绿素含量估测[J].干旱地区农业研究,2018,36(2):43-49.
- [24] CHENG H, CHEN D T, TAM N F, et al. Interactions among Fe^{2+} , S^{2-} , and Zn^{2+} tolerance, root anatomy, and radial oxygen loss in mangrove plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(7):2 619-2 630.
- [25] 肖卫华,刘强,姚帮松,等.增氧灌溉对杂交水稻根系生长及产量的响应研究[J].灌溉排水学报,2016, 35(6):68-71.
- [26] 张文萍,肖卫华,姚帮松,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.
- [27] SU D, ZHOU L, ZHAO Q, et al. Different Phosphorus Supplies Altered the Accumulations and Quantitative Distributions of Phytic Acid, Zinc and Iron in Rice (*Oryza sativa* L.) Grains[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(7):1 601-1 611.
- [28] 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].植物生理与分子生物学学报,2000,26(2):153-158.

Effect of Phosphorus Application on Activity of Root Acid Phosphatase and Yield of Rice under Oxygenation

LIU Chongxian², ZHANG Wenping^{1,2*}, ZHOU Weijun², ZHANG Wenjun¹, YAN Lijun⁴

(1.College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3.Key Laboratory for Crop Germplasm Innovation and Resources Using, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 4. Wenshui Natural Resources Bureau, Wenshui 032100, China)

Abstract: **【Objective】** The redox in soil controls plant growth and soil nutrient dynamics. The objective of this paper is to experimentally study the effect of phosphorous application and oxygenation on activity of root acid phosphatase and rice yield. **【Method】** The experiment was conducted in pots. We used the hybrid variety of C Liangyou 608 as model plant and P_2O_5 as the P fertilizer. We examined four P application levels: 0 g/plant (P1), 3.23 g/plant (P2), 6.46 g/plant (P3) and 9.70 g/plant (P4), and two irrigation methods: conventional irrigation without adding oxygen (NO) and with oxygenation(O). For each treatment, we measured the root acid phosphatase activity and the rice yield. **【Result】** With P application increasing, both effective panicle number and 1 000-grain weight decreased first followed by a rise, while the grain number per panicle changed in opposite direction. Increasing P application suppressed root acid phosphatase activity at both tillering and jointing stage. At filling stage, increasing P application first promoted enzymatic activity and then suppress it if too much P was applied into the soil. Overall, seed setting was correlated with root acid phosphatase activity at jointing stage at significant level, while the 1 000-grain weight rate was correlated with root acid phosphatase activity at filling stage at significant level under oxygenation. **【Conclusion】** Oxygenation alone can significantly increase the yield, effective spike number and 1 000-grain weight at the price of reducing grain number per panicle. On the contrary, increasing P application inhibited formation of yield. The theoretical yield of the rice was 6.46 g/plant (equivalent to 90 kg/hm²) under oxygenation. Our results suggested that the effective panicle number, 1 000-grain weight and grain number per panicle can be used as indicators to assess the efficacy of oxygenation. The root acid phosphatase activity under oxygenation is an important indicator for response of rhizosphere activity to oxygenation and phosphorus application.

Key words: phosphorus application content; root acid phosphatase activity; yield indicators; rice; oxygenation

责任编辑:赵宇龙