

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.036

水磷运筹对水稻产量和磷素吸收与利用的影响

张忠学^{1,2} 姜丽莉^{1,2} 陈鹏^{1,2} 聂堂哲^{1,2} 陈帅宏^{1,2} 赵健^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为研究寒地黑土区不同水磷管理模式对水稻成熟期干物质积累、磷素吸收利用和产量的影响,探讨水稻抽穗期根系性状与磷肥吸收效率的关系,通过田间小区试验,设置2种灌溉模式(F:淹灌,C:控灌)和6种施磷量(P0:0 kg/hm²,P1:15 kg/hm²,P2:30 kg/hm²,P3:45 kg/hm²,P4:60 kg/hm²,P5:75 kg/hm²),研究了不同水磷管理模式对水稻成熟期地上部分干物质质量、产量及其构成因素、籽粒和植株磷素积累量、磷素利用效率、磷肥吸收效率和磷肥偏生产力的影响。研究表明,两种灌溉模式下,随着施磷量的增加,水稻地上部分干物质质量、产量、有效穗数、结实率、籽粒磷素积累量和植株磷素积累量呈先增加、后减小的趋势;收获指数、磷素收获指数、磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率呈先减小、后增加的趋势;磷肥吸收效率和磷肥偏生产力则呈降低的趋势。CP2和FP3处理的水稻地上部分干物质质量、产量、有效穗数、结实率、籽粒磷素积累量和植株磷素积累量分别达到两种灌溉模式下不同施磷水平的最大值,CP2和FP3处理水稻产量差异不显著($P>0.05$),CP2处理的水稻磷肥偏生产力显著高于FP3处理($P<0.05$),因此,CP2处理为本试验中最优的水磷运筹模式。相关性分析表明,产量与水稻地上部分干物质质量呈极显著正相关($P<0.01$),与收获指数呈显著负相关($P<0.05$);磷素积累量与地上部分干物质质量和产量均呈极显著正相关($P<0.01$);植株磷素积累量与根干质量和根长密度呈显著正相关($P<0.05$)。这说明通过适宜的水磷运筹模式,可以创造良好的根系形态,提高水稻地上部分干物质积累量和磷素积累量,有利于提高产量及磷肥利用效率。

关键词: 水稻;水磷运筹;产量;磷素利用效率;磷肥吸收效率;磷肥偏生产力

中图分类号: S511; S143.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)09-0310-10

Effects of Water and Phosphorus Operation on Rice Yield and Phosphorus Absorption and Utilization

ZHANG Zhongxue^{1,2} JIANG Lili^{1,2} CHEN Peng^{1,2} NIE Tangzhe^{1,2} CHEN Shuaihong^{1,2} ZHAO Jian^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: A field experiment was carried out to study the effects of different water and phosphorus managements on dry matter accumulation, phosphorus uptake and utilization, yield of rice at the maturity stage in cold black soil region, the relationship between root traits and phosphorus uptake efficiency at heading stage was discussed. Two irrigation modes (F: flood irrigation, C: controlled irrigation) and six phosphorus application levels (P0: 0 kg/hm², P1: 15 kg/hm², P2: 30 kg/hm², P3: 45 kg/hm², P4: 60 kg/hm², P5: 75 kg/hm²) were set, the effect of different water and phosphorus managements on above-ground dry matter, yield and its components, phosphorus accumulation in grains and plants, phosphorus use efficiency, phosphorus uptake efficiency and phosphorus fertilizer partial productivity were studied. The results showed that under two irrigation modes, with the increase of phosphorus application rates, the above-ground dry matter, yield, effective panicle number, seed setting percentage, phosphorus accumulation in grains and plants were increased firstly and then decreased, and harvest index, phosphorus harvest index, phosphorus use efficiency of grain and dry matter were decreased firstly and then increased, however, the phosphorus uptake efficiency and phosphorus fertilizer partial productivity

收稿日期: 2019-01-23 修回日期: 2019-02-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779046)和国家重点研发计划项目(2016YFC0400108)

作者简介: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangzhongxue@163.com

were decreased. The above-ground dry matter, yield, effective panicle number, seed setting percentage, phosphorus accumulation in grains and plants of CP2 and FP3 reached the maximum, respectively, among the different water and phosphorus treatments. There was no significant difference in yield between CP2 and FP3 ($P > 0.05$), however, the phosphorus fertilizer partial productivity of CP2 was significantly higher than that of FP3 ($P < 0.05$). Therefore, CP2 treatment was the best water and phosphorus management in this experiment. The correlation analysis showed that there was a positive correlation between yield and above-ground dry matter ($P < 0.01$) and a significant negative correlation between yield and harvest index ($P < 0.05$). Plant phosphorus accumulation was positively correlated with above-ground dry matter ($P < 0.01$). Plant phosphorus accumulation was positively correlated with root dry weight and root length density ($P < 0.05$). The results indicated that suitable water and phosphorus management could create good root morphology, increase dry matter accumulation, which was more conducive to improving yield and phosphorus use efficiency. The research results provided theoretical basis for understanding the difference of rice root morphology and phosphorus fertilizer utilization under different water and phosphorus managements and guiding the practice of high yield and high efficiency cultivation of rice in cold black soil region.

Key words: rice; water and phosphorus operation; yield; phosphorus use efficiency; phosphorus uptake efficiency; phosphate fertilizer partial productivity

0 引言

水稻是我国65%以上人口的主要粮食,在我国有着广阔的种植面积^[1]。面对我国农业用水占全国总用水量60%以上、且水资源匮乏的基本国情,我国通过大面积推广水稻节水灌溉技术来缓解水资源危机^[2-3]。除水分外,肥料也是影响作物生长的重要可控因素。磷在植物的许多生理过程中扮演着重要角色。土壤的高固磷能力导致作物对土壤中磷素的吸收利用能力较差,因此,世界各国均施用大量磷肥,以满足作物生长发育过程中对磷素的需求^[4-5],但磷肥施用不合理会导致土壤酸化板结、土壤结构破坏、肥料利用率下降及水体富营养化等问题。水稻对土壤中磷养分的吸收主要与根系性状有关,如根干质量、根长密度和比根长^[6],发育较好的水稻根系可以增大根系与土壤的接触面积,从而增加水稻对土壤中磷素的吸收。由于根系单位面积的土壤体积较大,认为比根长较高的作物对于土壤中磷素的吸收能力更强^[7],但是,目前作物根系直径与磷素吸收的关系仍不明确。张瑜等^[8]研究发现,虽然蚕豆的比根长较玉米大,但是单位根长吸磷量明显低于玉米,玉米较大的单位根长吸磷量可以弥补根长较短的缺点。目前关于不同水磷条件下水稻磷素吸收与根系性状关系和不同水分条件下适宜施磷量的研究较少,不利于进一步分析水稻在控灌、淹灌两种灌溉模式下养分吸收的差异,并制定符合寒地黑土区水稻生产要求的田间管理模式。

本文通过设置不同灌溉模式和施磷量,对比分析水磷运筹对水稻地上部分干物质质量、产量及其构成因素、收获指数、磷素吸收和利用、根系性状及单

位根长吸磷量的影响,得到在两种灌溉模式下水稻吸收磷素的不同策略及适宜施磷量,以期满足水稻高产潜力的同时节约水资源,减少环境污染。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于2018年5—10月在黑龙江省水稻灌溉试验中心站进行,该站(东经127°40'45",北纬46°57'28")位于庆安县和平镇,地处低山丘陵平原区,是典型的寒地黑土分布区。多年平均气温2.5℃,多年平均降水量550 mm,多年平均水面蒸发量750 mm,水稻全生育期内的日气温和降雨量变化如图1所示。作物水热生长期为156~171 d,全年无霜期128 d。气候特征属寒温带大陆性季风气候。土壤类型为白浆土型水稻土,容重1.01 g/cm³,孔隙度61.8%。土壤基本理化性质为:有机质质量比41.4 g/kg、pH值6.40、全氮质量比15.06 g/kg、全磷质量比15.23 g/kg、全钾质量比20.11 g/kg、碱解氮质量比154.36 mg/kg、有效磷质量比25.33 mg/kg和速效钾质量比157.25 mg/kg。

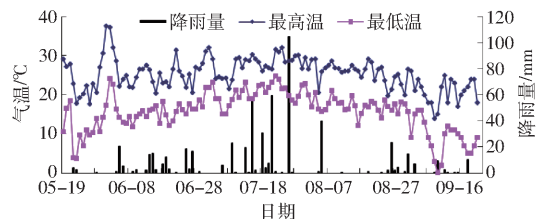


图1 2018年水稻生育期内气温和降雨量的日变化
Fig. 1 Daily variation of air temperature and rainfall during rice growth period in 2018

1.2 试验设计

试验设置灌溉模式和施磷量2个因素,灌溉模

式分别为长期淹灌(F,简称淹灌)、控制灌溉(C,简称控灌),不同灌溉模式的水分管理如表1所示。施磷量分别为0、15、30、45、60、75 kg/hm²(P0、P1、P2、P3、P4、P5处理),均为元素量。共12个处理,每个处理重复3次,共计36个小区。每个小区面积为100 m²(10 m×10 m)。为降低各小区间水磷的侧向渗透对试验的影响,四周设置田埂和水泥梗作为隔断,埋深至地表以下40 cm。在水稻的各生育阶段严格按照高产田要求精细管理,防治病虫害。供

试水稻品种为当地品种“绥粳18”,种植密度为30 cm×10 cm,每穴3株。移栽日期为2018年5月18日,收获日期为2018年9月17日。供试的化肥分别为尿素(含N质量分数46%)、过磷酸钙(含P质量分数12%)、氧化钾(含K质量分数50%),各处理施用氮肥110 kg/hm²(基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥比例为4.5:2:1.5:2),钾肥80 kg/hm²(基肥、8.5叶龄比例为1:1),磷肥作为基肥一次性施入。

表1 不同灌溉模式水分管理

Tab.1 Water management of different irrigation modes

灌溉模式	返青期	分蘖初期	分蘖盛期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
控灌	0~30 mm	0~0.7 θ_s	0~0.7 θ_s	晒田	0~0.8 θ_s	0~0.8 θ_s	0~0.7 θ_s	落干
淹灌	0~30 mm	0~50 mm	0~50 mm	晒田	0~50 mm	0~50 mm	0~50 mm	落干

注: θ_s 为根层土壤饱和含水率。“~”前数据为水分控制下限,“~”后数据为水分控制上限。

1.3 观测内容与与方法

1.3.1 干物质量

于成熟期,在每个小区随机选择长势均匀有代表性的水稻各3穴,冲洗干净后,装入自封袋,将植株地上部分分为穗部和秸秆两部分,分别放入干燥箱于105℃杀青30 min,然后80℃干燥至质量恒定,称量地上部分的干物质量并记录(精确至0.01 g)。

1.3.2 根系形态和根干质量

于抽穗开花期,在每个小区选取长势均匀有代表性的水稻各3穴,用铁板取根器以每穴水稻根为中心挖取长、宽、高均为20 cm的土柱,将挖取的原状土柱装于70目网袋中,用水缓慢冲洗,剪下完整水稻根系,使用根系扫描仪(Epson Expression 10000XL型,日本)进行根系扫描,并采用WinRHIZO Pro软件进行根系分析,获取根系形态参数。然后放入80℃干燥箱中干燥至质量恒定,称量根干质量并记录(精确至0.01 g)。

1.3.3 植株磷含量

将干燥的干物质样品利用粉碎机粉碎并过0.18 mm筛,浓H₂SO₄-H₂O₂法消解^[9],再采用AA3型连续流动分析仪测定植株全磷含量。

1.3.4 产量及其构成

于成熟期,在每个小区选取长势均匀有代表性的水稻各10穴,考察有效穗数、结实率、每穗粒数和千粒质量,依据水稻群体密度计算水稻理论产量。

1.3.5 相关指标计算公式

相关指标计算公式^[10-13]分别为

$$A_{\text{GDM}} = Y + S_{\text{DM}} \quad (1)$$

式中 A_{GDM} ——地上部分干物质量,kg/hm²

Y ——水稻产量,kg/hm²

S_{DM} ——秸秆干质量,kg/hm²

$$H_1 = Y/A_{\text{GDM}} \quad (2)$$

式中 H_1 ——收获指数

$$P_{\text{AG}} = YP_{\text{CG}} \quad (3)$$

式中 P_{AG} ——籽粒磷素积累量,kg/hm²

P_{CG} ——籽粒磷含量,%

$$P_{\text{AP}} = YP_{\text{CG}}S_{\text{DM}}P_{\text{CS}} \quad (4)$$

式中 P_{AP} ——植株磷素积累量,kg/hm²

P_{CS} ——秸秆磷含量,%

$$P_{\text{HI}} = P_{\text{AG}}/P_{\text{AP}} \quad (5)$$

式中 P_{HI} ——磷素收获指数

$$P_{\text{GUE}} = Y/P_{\text{AP}} \quad (6)$$

式中 P_{GUE} ——磷素籽粒利用效率,kg/kg

$$P_{\text{DMUE}} = A_{\text{GDM}}/P_{\text{AP}} \quad (7)$$

式中 P_{DMUE} ——磷素干物质利用效率,kg/kg

$$P_{\text{FPP}} = P_{\text{AY}}/P_{\text{AA}} \quad (8)$$

式中 P_{FPP} ——磷肥偏生产力,kg/kg

P_{AY} ——施磷产量,kg/hm²

P_{AA} ——施磷量,kg/hm²

$$P_{\text{UE}} = P_{\text{AP}}/P_{\text{AA}} \quad (9)$$

式中 P_{UE} ——磷肥吸收效率,kg/kg

$$R_{\text{LD}} = T_{\text{RL}}/S_{\text{V}} \quad (10)$$

式中 R_{LD} ——根长密度,cm/cm³

T_{RL} ——总根长,cm

S_{V} ——土壤体积,cm³

$$S_{\text{RL}} = T_{\text{RL}}/R_{\text{DM}} \quad (11)$$

式中 S_{RL} ——比根长,cm/g

R_{DM} ——根干质量,g

$$P_{\text{UPRL}} = P_{\text{AP}}/T_{\text{RL}} \quad (12)$$

式中 P_{UPRL} ——单位根长吸磷量,mg/m

1.4 数据处理和统计分析

采用 Excel 2007 及 SPSS 20.0 软件对数据进行整理画图 and 统计分析,采用 Duncan 多重比较法进行处理间的差异显著性分析及两指标间的相关分析。

2 结果与分析

2.1 水磷运筹对地上部分干物质质量、收获指数、产量及其构成因素的影响

由表 2 可知,在两种灌溉模式下,随着施磷量的

增加,地上部分干物质质量、产量、有效穗数和结实率均呈先增加后降低的趋势。CP2 处理和 FP3 处理的地上部分干物质质量、产量、有效穗数及结实率分别达到控灌和淹灌模式下的最大值,后者分别比前者高出 2.72%、2.27%、10.61%、1.06%。在两种灌溉模式下,收获指数与地上部分干物质质量和产量的变化趋势相反,其随着施磷量增加呈现先降低后增加的趋势,是因为生产单位面积干物质所消耗的氮素随着植株磷素含量的提高呈增加趋势,并且氮素在水稻分蘖期起到主导作用^[14]。

表 2 水磷耦合对地上部分干物质质量、收获指数、产量及产量构成的影响

Tab.2 Effects of water and phosphorus on above-ground dry matter, harvest index, yield and its components

灌溉模式	施磷处理	地上部分干物质质量/ (kg·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	收获指数	有效穗数/ (个·hm ⁻²)	结实率/ %	千粒质量/ g	每穗粒数/ 粒
C	P0	12 062.90 ^b	7 020.35 ^a	0.58 ^a	4.587 9 × 10 ⁶ ^a	80.21 ^a	19.88 ^{ab}	81.01 ^a
	P1	12 970.47 ^{ab}	7 057.05 ^a	0.58 ^a	4.838 2 × 10 ⁶ ^a	80.47 ^a	19.43 ^{ab}	75.94 ^a
	P2	16 670.84 ^a	9 386.88 ^a	0.56 ^a	5.505 5 × 10 ⁶ ^a	85.50 ^a	18.93 ^{ab}	86.09 ^a
	P3	15 160.99 ^{ab}	8 749.58 ^a	0.57 ^a	4.921 6 × 10 ⁶ ^a	80.91 ^a	20.81 ^a	94.29 ^a
	P4	13 410.08 ^{ab}	7 898.73 ^a	0.58 ^a	4.671 3 × 10 ⁶ ^a	79.79 ^a	19.90 ^{ab}	92.65 ^a
	P5	12 275.61 ^b	7 577.57 ^a	0.59 ^a	4.671 3 × 10 ⁶ ^a	77.62 ^a	18.38 ^b	91.23 ^a
F	P0	12 007.84 ^{bc}	6 655.82 ^b	0.57 ^a	4.337 7 × 10 ⁶ ^a	82.90 ^a	19.94 ^{ab}	83.41 ^a
	P1	12 427.43 ^{bc}	7 183.85 ^{ab}	0.57 ^a	4.671 3 × 10 ⁶ ^a	83.20 ^a	20.18 ^a	71.57 ^b
	P2	15 113.45 ^{ab}	8 520.18 ^{ab}	0.56 ^a	5.839 2 × 10 ⁶ ^a	83.72 ^a	19.96 ^{ab}	74.99 ^{ab}
	P3	17 124.62 ^a	9 599.59 ^a	0.56 ^a	6.089 4 × 10 ⁶ ^a	86.41 ^a	20.29 ^a	79.74 ^{ab}
	P4	13 368.37 ^{bc}	7 464.13 ^{ab}	0.56 ^a	5.088 4 × 10 ⁶ ^a	83.30 ^a	18.56 ^b	81.65 ^{ab}
	P5	11 476.48 ^c	6 973.13 ^b	0.57 ^a	4.337 7 × 10 ⁶ ^a	79.52 ^a	20.58 ^a	74.93 ^{ab}
F	施磷处理	5.62 ^{**}	0.86	0.21	1.48	0.72	1.37	1.18
	灌溉模式	0.07	0.33	0.73	0.32	1.46	1.21	6.05 [*]
	施磷处理 × 灌溉模式	0.55	0.21	0.06	0.46	0.24	2.40	0.59

注:同列数据后不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)。*、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。下同。

由表 2 可知,与对照 P0 处理相比,施用磷肥极显著提高了水稻地上部分干物质质量($P < 0.01$),提高幅度达 1.76% ~ 42.61%。灌溉模式对地上部分干物质质量和收获指数的影响未达到显著水平($P > 0.05$)。在 P0、P1、P2、P4、P5 处理下,与淹灌模式相比,控灌增加了地上部分干物质质量和收获指数,增幅分别为 0.31% ~ 10.30% 和 1.06% ~ 3.75%,这是由于控灌抑制了水稻的无效分蘖,促进有效分蘖且提高根系活力,进而提高了水稻的成穗率^[15-16]。说明在相同施磷处理下,控灌较淹灌更有利于水稻地上部分干物质和籽粒干物质质量的积累。施磷与灌溉模式的交互作用分析结果表明,互作水稻对地上部分干物质质量和收获指数的影响均未达到显著水平($P > 0.05$)。

从产量构成因素可看出(表 2),在相同灌溉模式下,施用磷肥增加了有效穗数和结实率,从而提高了水稻产量。与对照处理相比,施用磷肥促进了水

稻的增产,增幅达 0.52% ~ 44.23%。在相同施磷水平下,控灌较淹灌显著增加了每穗粒数($P < 0.05$),进而促进了水稻产量的提高。在 P0、P2、P4、P5 处理下,控灌模式的产量与淹灌相比分别增加 5.48%、10.17%、5.82%、4.19%,说明在相同施磷处理下,控灌较淹灌更有利于产量的形成。施磷处理与灌溉模式的交互作用分析结果表明,互作对水稻产量及其构成因素的影响均未达到显著水平($P > 0.05$)。

图 2 表明,地上部分干物质质量与产量呈极显著正相关($R^2 \geq 0.907 5, P < 0.01$),收获指数与产量呈显著负相关($R^2 \geq 0.721 3, P < 0.05$)。

2.2 水磷运筹对籽粒磷素积累量、植株磷素积累量和磷素收获指数的影响

由表 3 可知,施磷处理对籽粒磷素积累量、植株磷素积累量和磷素收获指数的影响均达到极显著水平($P < 0.01$)。在两种灌溉模式下,随着施磷量的

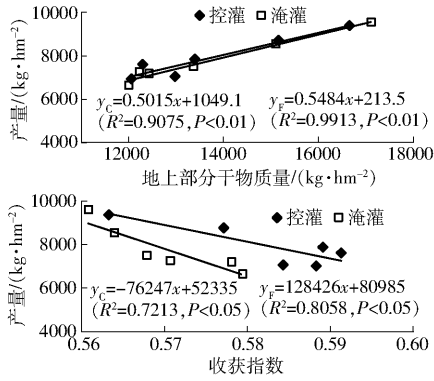


图2 地上部分干物质质量和收获指数与产量的关系
Fig.2 Relationship between above-ground dry matter, harvest index and yield

表3 水磷运筹对籽粒磷素积累量、植株磷素积累量和磷素收获指数的影响

Tab.3 Effects of water and phosphorus management on grain phosphorus accumulation, plant phosphorus accumulation and phosphorus harvest index

灌溉模式	施磷处理	籽粒磷素积累量/ (kg·hm ⁻²)	植株磷素积累量/ (kg·hm ⁻²)	磷素收获指数
C	P0	7.63 ^d	12.50 ^d	0.61 ^{ab}
	P1	8.82 ^c	14.20 ^c	0.62 ^a
	P2	10.24 ^a	21.23 ^a	0.48 ^d
	P3	9.93 ^b	18.43 ^b	0.54 ^{bcd}
	P4	7.70 ^d	14.91 ^c	0.52 ^{cd}
	P5	7.46 ^d	12.71 ^d	0.59 ^{abc}
F	P0	6.36 ^e	12.04 ^{de}	0.53 ^b
	P1	7.32 ^c	12.73 ^d	0.57 ^a
	P2	7.78 ^b	16.25 ^b	0.48 ^{cd}
	P3	9.15 ^a	19.50 ^a	0.47 ^d
	P4	6.77 ^d	13.78 ^c	0.49 ^c
	P5	7.02 ^{cd}	11.48 ^e	0.58 ^a
F	施磷处理	276.37 ^{**}	228.18 ^{**}	15.52 ^{**}
	灌溉模式	560.16 ^{**}	65.89 ^{**}	15.20 ^{**}
	施磷处理 × 灌溉模式	31.02 ^{**}	23.48 [*]	1.60

增加,籽粒磷素积累量和植株磷素积累量均呈先增加后降低的趋势,磷素收获指数则呈先降低后增加的趋势。CP2处理和FP3处理的籽粒磷素积累量和植株磷素积累量分别达到控灌和淹灌模式下的最大值,磷素收获指数达到最小值,且CP2处理分别较FP3处理高出11.85%、8.83%、2.77%。与对照处理相比,施磷增加了植株磷素积累量和籽粒磷素积累量,增幅为1.42%~69.76%和0.96%~43.93%,但过量施加磷肥时,控灌模式下的籽粒磷素积累量下降,说明在两种灌溉模式下,施加磷肥对水稻籽粒和地上部分磷素的积累起到促进作用,但过量施磷会对水稻籽粒磷素积累量起到抑制作用^[17]。

灌溉方式对籽粒磷素积累量、植株磷素积累量和磷素收获指数的影响达到极显著水平($P < 0.01$)。在相同的施磷水平下,控灌较淹灌增加了籽粒磷素积累量和磷素收获指数,增幅分别为6.21%~31.62%和0.78%~15.41%。在P0、P1、P2、P4、P5处理下,控灌模式下植株磷素积累量较淹灌高出3.89%~30.60%,这是因为适当的水分胁迫可以增加植株对养分的吸收利用^[18]。

施磷处理与灌溉模式的交互作用分析结果表明,互作对籽粒磷素积累量的影响达到极显著水平($P < 0.01$),对植株磷素积累量的影响达到显著水平($P < 0.05$),对磷素收获指数无显著影响($P > 0.05$)。

2.3 水磷运筹对磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率的影响

由图3可知,磷素积累量与地上部分干物质质量和产量均呈极显著正相关($R^2 \geq 0.8907, P < 0.01$),回归曲线的斜率分别表示控灌和淹灌模式下最大的磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率。当水稻的磷素积累量相同时,淹灌的产量、地上部分干物质质量、磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率较控灌高,可能是因为适当的水分胁迫促进了作物根系的发育,导致更多的光合物质分配给根系^[19],说明淹灌较控灌更有利于水稻将吸收到体内的磷素转化成产量和地上部分干物质质量。

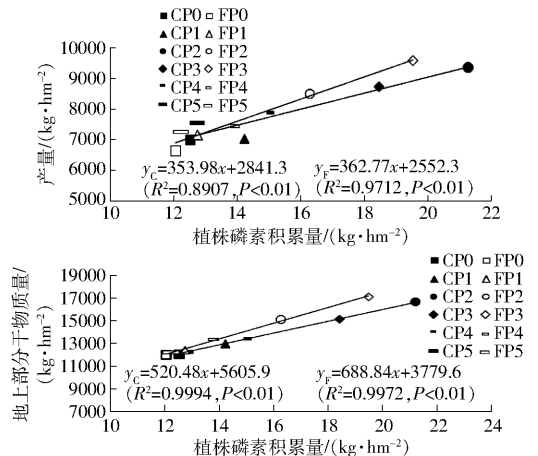


图3 植株磷素积累量与地上部分干物质和产量的关系

Fig.3 Relationship between plant phosphorus accumulation, above-ground dry matter and yield

由表4可知,施磷处理对磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率的影响达到极显著水平($P < 0.01$)。两种灌溉模式下,磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率均随施磷量的增加呈先降低后增加的趋势。CP2处理和FP3处理的磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率均达到控灌和淹灌模式下的最

小值,且后者分别较前者高出 11.30% 和 11.80%。

灌溉模式对磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。在 P1、P2、P3、P4 处理下,淹灌的磷素籽粒利用效率较控灌的高出 2.23% ~ 18.54%。在相同施磷水平下,淹

灌较控灌增加了水稻的磷素干物质利用效率,增幅为 3.42% ~ 18.40%。

施磷处理与灌溉模式的交互作用分析结果表明,互作对磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

表 4 水磷运筹对磷素籽粒利用效率、磷素干物质利用效率、磷肥吸收效率和磷肥偏生产力的影响

Tab.4 Effects of water and phosphorus management on phosphorus grain use efficiency, phosphorus dry matter use efficiency, phosphorus uptake efficiency and phosphorus fertilizer partial productivity kg/kg

灌溉模式	施磷处理	磷素籽粒利用效率	磷素干物质利用效率	磷肥吸收效率	磷肥偏生产力
C	P0	561.43 ^b	964.68 ^a		
	P1	543.43 ^c	913.24 ^b	0.95 ^a	506.03 ^a
	P2	442.21 ^e	785.35 ^e	0.71 ^b	312.90 ^b
	P3	474.78 ^d	822.69 ^d	0.41 ^c	194.44 ^c
	P4	529.84 ^c	899.54 ^c	0.25 ^d	131.65 ^d
	P5	596.15 ^a	965.76 ^a	0.17 ^e	101.03 ^e
F	P0	553.02 ^a	997.72 ^a		
	P1	564.29 ^a	976.18 ^b	0.85 ^a	478.92 ^a
	P2	524.21 ^b	929.86 ^c	0.54 ^b	284.01 ^b
	P3	492.19 ^c	878.02 ^d	0.43 ^c	213.32 ^c
	P4	541.67 ^{ab}	970.13 ^b	0.23 ^d	124.40 ^d
	P5	607.20 ^a	1 001.72 ^a	0.16 ^e	96.98 ^e
F	施磷处理	104.58 ^{**}	396.42 ^{**}	18 564.89 ^{**}	44 377.75 ^{**}
	灌溉模式	39.16 ^{**}	777.07 ^{**}	506.15 ^{**}	143.89 ^{**}
	施磷处理 × 灌溉模式	13.96 ^{**}	47.75 ^{**}	226.8 ^{**}	118.23 ^{**}

2.4 水磷运筹对磷肥吸收效率和磷肥偏生产力的影响

由表 4 可知,施磷处理对磷肥吸收效率和磷肥偏生产力的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。在两种灌溉模式下,磷肥吸收效率和磷肥偏生产力随着施磷量的增加呈降低的趋势,其降幅为 33.82% ~ 458.68% 和 61.72% ~ 400.85%。

灌溉模式对磷肥吸收效率和磷肥偏生产力的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。在 P1、P2、P4、P5 处理下,与淹灌相比,控灌提高了水稻的磷肥吸收效率和磷肥偏生产力,提高幅度为 4.13% ~ 30.60% 和 4.19% ~ 10.17%。尽管水稻在两种灌溉模式下磷肥吸收效率相差不大,但是其展现出了不同的应对策略来满足水稻生长发育过程中对磷素的需求。由图 4 可知,在两种灌溉方式下,植株磷素积累量与根干质量和根长密度呈显著正相关 ($R^2 \geq 0.7487, P < 0.05$)。然而,在两种灌溉模式下,当水稻有相同的植株磷素积累量时,控灌的根干质量较低,根长密度较高,此外,植株磷素积累量与比根长无关,但是控灌的比根长较淹灌的高,由此可推断出,淹灌的单位根长吸磷量较控灌高(图 5),在两种灌溉模式下,单位根长吸磷量则随着施磷量的增加,大致呈先降低后升高的趋势。施磷量与灌溉方式的交互作用分析

结果表明,水磷互作对磷肥吸收效率和磷肥偏生产力的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

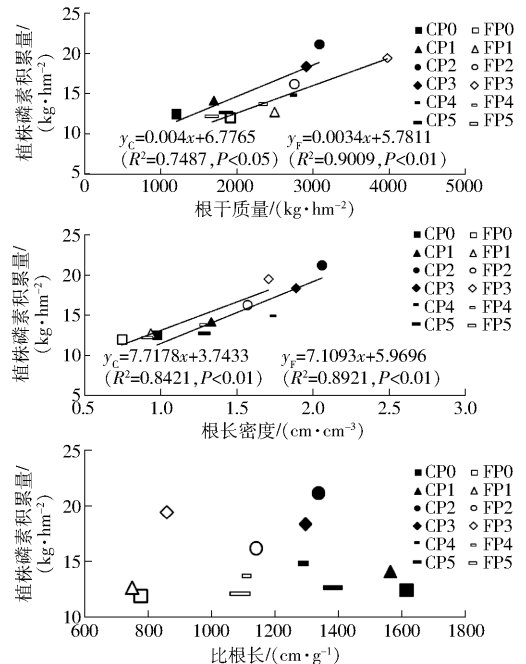


图 4 根干质量、根长密度和比根长与植株磷素积累量的关系

Fig.4 Relationship between root dry weight, root length density and specific root length and plant phosphorus accumulation

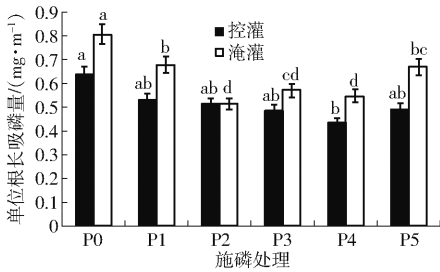


图5 水磷运筹对单位根长吸磷量的影响

Fig. 5 Effect of water and phosphorus management on phosphorus uptake per unit root length

3 讨论

近年来,关于水磷运筹对水稻产量、养分吸收与利用及肥料利用率影响的相关研究已有很多^[20-21]。施加磷肥和适当的水分胁迫均能促进水稻根系的发育,有助于水稻对磷肥的吸收和利用,进而增加了水稻的地上部分干物质质量的积累和产量的形成,但过量施磷会抑制水稻对磷素的吸收^[22-26]。本研究也得到了相同的结论,在两种灌溉模式下,CP2处理和FP3处理的地上部分干物质质量、产量、籽粒磷素积累量和植株磷素积累量均达到最大,收获指数、磷素收获指数、磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率均最小,FP3处理分别比CP2处理高出2.72%、2.27%、-11.91%、-8.87%、0、-2.13%、11.30%、11.80%。

本研究表明,产量与地上部分干物质质量呈极显著正相关($P < 0.01$),与收获指数和磷收获指数呈负相关,这与瞿媛等^[27]和SINGH等^[28]的研究结果一致,但与李仁英等^[29]通过分析不同品种水稻的产量对氮磷吸收的差异,发现产量与氮磷收获指数呈正相关的结果相反。这说明在不同生长环境下,不同品种水稻的产量与收获指数和磷收获指数的关系仍不明确。在两种灌溉模式下,收获指数随着施磷量增加呈先降低后增加的趋势。其原因可能是适量施磷时,施加氮肥所提供氮素能满足干物质生产中对氮素的需要,且施加磷肥促进水稻的分蘖,在增加有效穗数的同时降低成穗率,从而减小了收获指数^[30]。过量施磷则会由于干物质生产中对氮素的需求量增大,但施加的氮肥不能满足其需要,且磷素过量会抑制水稻分蘖,在减少有效穗数的同时增加成穗率,因而增加了收获指数^[31]。

水稻的磷效率是指水分或养分胁迫下水稻所能生成的地上部分干物质或产量,其很大程度上决定了水稻地上部分干物质积累量,而磷效率的高低由磷吸收效率(植株磷素积累量)、磷利用效率(磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率)和磷转运

效率(磷素收获指数)三者的协同作用决定^[32-33]。本研究发现,在P0、P2、P4、P5处理下,控灌模式下植株磷素积累量和磷素收获指数均高于淹灌,而淹灌的磷利用效率较控灌的高,且在P0、P2、P4、P5处理下,控灌的产量高于淹灌,其原因可能是在大田试验中,不同磷效率对产量的影响程度由大到小依次为磷吸收效率、磷利用效率、磷转运效率^[34-35]。

由于磷在土壤中的移动性较差,根系的生长对于水稻获取土壤中磷素非常重要^[4,6],这与明凤等^[36]的研究结果类似,在磷胁迫条件下,水稻根系发育相对较差,但单位根长吸磷量较高。本研究首次尝试在大田试验中评价不同水分和施磷条件下根系性状与磷吸收之间关系,研究发现,两种灌溉模式下,随着施磷量的增加,水稻的单位根长吸磷量变化趋势与根长和根干质量的变化趋势相反,研究还发现由于两种灌溉模式下磷肥吸收效率相差不大,在两种灌溉模式下,水稻展示了不同的磷肥获取策略。由于在相同施磷水平下,水稻在控灌模式下的根长较长,扩大了对土壤中磷素的吸收范围,因此其获取土壤中磷素的能力较强。但是,水稻在淹灌模式下的单位根长吸磷量较高,可以弥补根系较小的缺点^[37]。

大量研究表明,施用磷肥可以显著提高水稻产量,但磷肥吸收效率和磷肥偏生产力随着施磷量的增加呈降低趋势^[38]。过多的磷肥施入土壤中,会造成肥料资源的浪费以及水土环境的污染,因此,在保证产量的前提下,提高磷肥吸收效率和磷肥偏生产力至关重要。本研究表明,在两种灌溉模式下,施磷量为30 kg/hm²时,有利于提高水稻的磷肥吸收效率和磷肥偏生产力;但在淹灌模式下,施磷量45 kg/hm²处理的水稻产量最高;在控灌模式下,施磷量为30 kg/hm²处理的水稻产量最高,说明与淹灌相比,控灌在减少施磷量的同时能够增加水稻产量并提高磷肥利用率,这与姜小凤等^[39]对小麦的研究结果基本一致。其原因可能是,与淹灌相比,控灌有利于促进水稻对养分的吸收和利用,生产单位质量地上部分干物质所消耗的氮素随着水稻植株磷含量的提高而增加,而施入土壤中的氮肥不能满足控灌条件下施磷量超过30 kg/hm²时水稻对氮素的需求^[14],综合考虑产量和磷肥利用效率,得到符合研究区水稻节水、高产要求的水磷运筹方案为控灌模式下施磷量30 kg/hm²。

4 结论

(1)在淹灌、控灌两种灌溉模式下,随着施磷量的增加,水稻地上部分干物质质量、产量、有效穗数、结

实率、籽粒磷素积累量和植株磷素积累量呈先增加、后减小的趋势;收获指数、磷素收获指数、磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率呈先减小、后增加的趋势;磷肥吸收效率和磷肥偏生产力则呈降低的趋势。水稻在控灌条件下的根长较长,在淹灌条件下的单位根长吸磷量较高,从而达到两种灌溉模式下的磷肥吸收效率范围相似。

(2)控灌模式下施磷量为 30 kg/hm²时和淹灌模式下施磷量为 45 kg/hm²时的水稻地上部分干物质质量、产量、有效穗数、结实率、籽粒磷素积累量和植株磷素积累量分别达到最大值,收获指数、磷素收获指数、磷素籽粒利用效率和磷素干物质利用效率分

别达最小值。

(3)相关性分析表明,产量与水稻地上部分干物质质量呈极显著正相关,与收获指数呈显著负相关;磷素积累量与水稻地上部分干物质质量和产量均呈极显著正相关;磷素积累量与根干质量和根长密度呈显著正相关。

(4)与控灌模式下施磷量为 30 kg/hm²的处理相比,淹灌模式下施磷量为 45 kg/hm²时的产量仅高出 2.27%,且磷肥偏生产力较低。因此,为满足增产的同时达到节约资源和保护水土环境的目的,应选择控灌模式下施磷量为 30 kg/hm²作为合理的水肥处理模式。

参 考 文 献

- [1] HORIE T, SHIRAIWA T, HOMMA K, et al. Can yields of lowland rice resume the increases that they showed in the 1980s [J]. *Plant Production Science*, 2005, 8(3): 259 – 274.
- [2] 张忠学, 陈帅宏, 陈鹏, 等. 基于¹⁵N 示踪技术的不同灌水方案玉米追肥氮素去向研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 262 – 272.
ZHANG Zhongxue, CHEN Shuaihong, CHEN Peng, et al. Fate of maize topdressing nitrogen under different irrigation schemes based on ¹⁵N tracer technology[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 262 – 272. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181232&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.032. (in Chinese)
- [3] 张忠学, 陈鹏, 陈帅宏, 等. 黑土区节水灌溉对各期肥料氮素在土壤中残留的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 240 – 250.
ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, CHEN Shuaihong, et al. Effects of water-saving irrigation on residues of different periods fertilizer nitrogen in black soils[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 240 – 250. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181128&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.028. (in Chinese)
- [4] BALEMI T, NEGISHO K. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 12(3): 547 – 562.
- [5] TILMAN D, FARGIONE J, WOLFF B G, et al. Forecasting agriculturally driven global environmental change[J]. *Science*, 2001, 292(5515): 281 – 284.
- [6] LYNCH J P. Roots of the second green revolution[J]. *Australian Journal of Botany*, 2007, 55(5): 493 – 512.
- [7] SANDANA P, PINOCHET D. Grain yield and phosphorus use efficiency of wheat and pea in a high yielding environment[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 14(4): 973 – 986.
- [8] 张瑜, 刘海涛, 周亚平, 等. 田间玉米和蚕豆对低磷胁迫响应的差异比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 911 – 919.
ZHANG Yu, LIU Haitao, ZHOU Yaping, et al. Comparison of the responses between maize and faba bean to low phosphorus stress in the field[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(4): 911 – 919. (in Chinese)
- [9] 咎亚玲, 王朝辉, 周玲, 等. 不同养分投入的各品种小麦产量及养分效率差异研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(9): 91 – 98.
ZAN Yaling, WANG Chaohui, ZHOU Ling, et al. Use efficiency of different winter wheat cultivars response to different nutrient inputs[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(9): 91 – 98. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120918&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.018. (in Chinese)
- [10] 李莉, 张锡洲, 李廷轩, 等. 高产磷高效水稻磷素吸收利用特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 1963 – 1970.
LI Li, ZHANG Xizhou, LI Tingxuan, et al. Characteristics of phosphorus uptake and use efficiency of rice with high yield and high phosphorus[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(7): 1963 – 1970. (in Chinese)
- [11] 刘威, 熊又升, 徐祥玉, 等. 减量施肥模式对稻麦轮作体系作物产量和养分利用效率的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(5): 91 – 99.
LIU Wei, XIONG Yousheng, XU Xiangyu, et al. Effect of reducing fertilizer application models on crop yield and nutrient use efficiencies in rice-wheat cropping system[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(5): 91 – 99. (in Chinese)
- [12] 孙永健, 孙园园, 徐徽, 等. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(9): 1639 – 1649.

- SUN Yongjian, SUN Yuanyuan, XU Hui, et al. Effects of water-nitrogen management patterns on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(9): 1639 – 1649. (in Chinese)
- [13] 马忠明, 陈娟, 刘婷婷, 等. 水氮耦合对固定道垄作栽培春小麦根长密度和产量的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(11): 1705 – 1714.
MA Zhongming, CHEN Juan, LIU Tingting, et al. Effects of water and nitrogen coupling on root length density and yield of spring wheat in permanent raised-bed cropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(11): 1705 – 1714. (in Chinese)
- [14] 郭鑫年, 孙娇, 梁锦绣, 等. 栽培方式与施磷量对水稻养分累积、分配及磷素平衡的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(4): 104 – 111.
GUO Xinnian, SUN Jiao, LIANG Jinxiu, et al. Cultivation way and phosphorus fertilizer on rice nutrient accumulation, distribution and soil phosphorous balance[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(4): 104 – 111. (in Chinese)
- [15] 屈成, 吴旺斌, 杨漫, 等. ABA 对不同灌溉方式下水稻分蘖期生理特性的影响[J]. *分子植物育种*, 2018, 16(20): 6840 – 6846.
QU Cheng, WU Wangpin, YANG Man, et al. Effects of ABA on physiological characteristics of rice at tillering stage under different irrigation methods[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(20): 6840 – 6846. (in Chinese)
- [16] 刘江彪, 潘国君, 郑桂萍, 等. 节水灌溉与常规灌溉对水稻生育动态及产量的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2018(9): 18 – 22.
LIU Jiangbiao, PAN Guojun, ZHENG Guiping, et al. Effects of conventional irrigation and water-saving irrigation on growth dynamics and yield of rice[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2018(9): 18 – 22. (in Chinese)
- [17] 张亚洁, 华晶晶, 李亚超, 等. 种植方式和磷素水平互作对陆稻和水稻产量及磷素利用的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(8): 1423 – 1431.
ZHANG Yajie, HUA Jingjing, LI Yachao, et al. Effects of interaction between phosphorus nutrition and cultivation methods on grain yield and phosphorus utilization of upland rice and paddy rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(8): 1423 – 1431. (in Chinese)
- [18] 张忠学, 陈鹏, 陈帅宏, 等. ^{15}N 示踪分析节水灌溉下水稻对不同时期氮肥的吸收分配[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(6): 309 – 317, 346.
ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, CHEN Shuaihong, et al. ^{15}N tracer-based analysis of water and nitrogen management differences in uptake and partitioning of N applied at different growth stages in transplanted rice[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(6): 309 – 317, 346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180636&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.036. (in Chinese)
- [19] 张凤翔, 周明耀, 周春林, 等. 水肥耦合对水稻根系形态与活力的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 197 – 200.
ZHANG Fengxiang, ZHOU Mingyao, ZHOU Chunlin, et al. Effects of water and fertilizer coupling on root morphological characteristics and activities of rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(5): 197 – 200. (in Chinese)
- [20] 魏永霞, 何双红, 魏永华. 控制灌溉条件下水肥耦合对水稻产量及其构成因子的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(5): 98 – 102.
WEI Yongxia, HE Shuanghong, WEI Yonghua. Influence of water fertilizer coupling on rice yield and compensation under the condition of water control irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(5): 98 – 102. (in Chinese)
- [21] 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.
LI Qian, HOU Yunpeng, GAO Jun, et al. Effect of different phosphorus application on dry matter accumulation, phosphorus uptake and distribution and yield of rice[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2015, 40(3): 37 – 41. (in Chinese)
- [22] 朱荣松, 沈家禾, 吕连庆, 等. 不同施磷量对水稻产量及肥料利用率的影响[J]. *现代农业科技*, 2017(7): 8 – 9.
ZHU Rongsong, SHEN Jiahe, LÜ Lianqing, et al. Effects of different phosphorus application on rice yield and fertilizer utilization rate[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(7): 8 – 9. (in Chinese)
- [23] 江尚焘, 王火焰, 周健民, 等. 磷肥施用对水稻生长和磷素吸收的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(6): 1085 – 1091.
JIANG Shangtao, WANG Huoyan, ZHOU Jianmin, et al. Effects of application methods of phosphorus fertilizers on the growth and phosphorus absorption of rice in Jiangyan and Guangde regions[J]. *Soils*, 2016, 48(6): 1085 – 1091. (in Chinese)
- [24] 向镜, 徐旱增, 陈惠哲, 等. 磷肥用量对超级早稻生长、产量及磷吸收利用的影响[J]. *中国稻米*, 2016, 22(1): 35 – 38.
XIANG Jing, XU Hanzeng, CHEN Huizhe, et al. Effects of phosphorus levels on growth, grain yield and phosphorus use efficiency of super rice in early season[J]. *China Rice*, 2016, 22(1): 35 – 38. (in Chinese)
- [25] 孟兆江, 段爱旺, 高阳, 等. 调亏灌溉对冬小麦氮、磷、钾养分吸收与利用的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 203 – 212.
MENG Zhaojiang, DUAN Aiwang, GAO Yang, et al. Effect of regulated deficit irrigation on uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium for winter wheat[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 203 – 212. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161225&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.025. (in Chinese)
- [26] 罗小仁, 王学华, 徐优, 等. 水肥耦合对双季杂交晚稻丰源优 227 物质生产的影响[J]. *杂交水稻*, 2018, 33(3): 64 – 69.

- LUO Xiaoren, WANG Xuehua, XU You, et al. Effects of water and fertilizer coupling on plant production of double-cropping late hybrid rice Fenyuanyou227[J]. *Hybrid Rice*, 2018, 33(3):64-69. (in Chinese)
- [27] 瞿媛, 姚威, 袁祥瑞, 等. 两系杂交早稻氮肥利用效率的比较研究[J]. *湖南农业科学*, 2018(10):52-55.
QU Yuan, YAO Wei, YUAN Xiangrui, et al. Study on nitrogen use efficiency for early two-line hybrid rice varieties[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2018(10):52-55. (in Chinese)
- [28] SINGH U, LADHA J K, CASTILLO E G, et al. Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium- and long-duration rice[J]. *Field Crops Research*, 1998, 58(1):35-53.
- [29] 李仁英, 李霖, 黄利东, 等. 不同品种水稻的产量构成因素及其对氮磷吸收的差异研究[J]. *土壤通报*, 2016, 47(6):1418-1424.
LI Renying, LI Lin, HUANG Lidong, et al. Yield components and uptake of nitrogen and phosphorus in different rice cultivars[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(6):1418-1424. (in Chinese)
- [30] 吴立鹏, 张士荣, 娄金华, 等. 有机无机配施对滨海盐渍化土壤磷含量及水稻生长、产量的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(1):203-210.
WU Lipeng, ZHANG Shirong, LOU Jinhua, et al. Effects of organic-inorganic fertilizer on soil P, the yield and growth of rice in coastal saline soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(1):203-210. (in Chinese)
- [31] 孙祥武, 于福庆, 张家成. 氮磷钾养分对水稻分蘖的影响[J]. *农业与技术*, 2006, 26(6):62-63.
SUN Xiangwu, YU Fuqing, ZHANG Jiacheng. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients on tillering of rice[J]. *Agriculture and Technology*, 2006, 26(6):62-63. (in Chinese)
- [32] VANCE C P, UHDESTONE C, ALLAN D L, et al. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. *New Phytologist*, 2003, 157(3):423-447.
- [33] 乔振江, 蔡昆争, 骆世明. 低磷和干旱胁迫对大豆植株干物质积累及磷效率的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(19):5578-5587.
QIAO Zhenjiang, CAI Kunzheng, LUO Shiming. Interactive effects of low phosphorus and drought stress on dry matter accumulation and phosphorus efficiency of soybean plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19):5578-5587. (in Chinese)
- [34] YANLI Z. Analysis of phosphorus nutrition efficiency of soybean genotypes with different phosphorus efficiency at blooming stage under low phosphorus stress[J]. *Agricultural Science and Technology*, 2012, 13(12):2544-2548.
- [35] YUYING M. Characteristics of phosphorus nutrition of different rice genotypes under low-P stress at different growth stages[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008, 22(1):71-76.
- [36] 明凤, 娄玉霞, 梁斌, 等. 低磷胁迫下不同水稻品种根系吸收能力差异的生理与遗传本质[J]. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(5):473-477.
MING Feng, LOU Yuxia, LIANG Bin, et al. Genetic and physiological mechanism of P-uptake ability difference between different rice (*Oryza sativa* L.) genotypes under low-P stress[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002, 8(5):473-477. (in Chinese)
- [37] WATT M, EVANS J R. Phosphorus acquisition from soil by white lupin (*Lupinus albus* L.) and soybean (*Glycine max* L.), species with contrasting root development[J]. *Plant and Soil*, 2003, 248:271-283.
- [38] 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, 41(6):61-66.
HOU Yunpeng, KONG Lili, LI Qian, et al. Studies on effect of different phosphorus levels on yield, nutrient absorption of rice and soil phosphorus balance[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2016, 41(6):61-66. (in Chinese)
- [39] 姜小凤, 郭建国, 董博, 等. 水氮互动对旱地春小麦氮肥利用效率和经济产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(9):1105-1111.
JIANG Xiaofeng, GUO Jianguo, DONG Bo, et al. Effect of interaction between water and nitrogen on nitrogen utilization efficiency and economic yield of spring wheat in dryland region[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(9):1105-1111. (in Chinese)