

施磷对宁夏引黄灌区水稻产量、氮磷吸收利用及氮素残留的影响

郭鑫年¹, 孙娇¹, 梁锦秀¹, 周涛¹, 李永祥², 薛彩霞³, 田旭东³

(1. 宁夏农林科学院 农业资源与环境研究所, 银川 750002;

2. 青铜峡市良种繁殖场, 宁夏 青铜峡 751600; 3. 青铜峡市农业综合开发办公室, 宁夏 青铜峡 751600)

摘要:针对宁夏引黄灌区水稻磷肥施用不合理的问题,确定宁夏引黄灌区水稻生产适宜施磷量,以“节3号”水稻为试验材料,采用单因素随机区组试验设计研究了不同施 P_2O_5 量(0, 75, 150, 225 kg/hm²)对水稻产量、土壤矿质氮累积量以及水稻氮、磷吸收与利用效率的影响。结果表明:与不施磷肥相比,施磷肥显著($p < 0.05$)提高了水稻穗数、每穗粒数和结实率,进而提高了水稻籽粒产量;以施磷 150 kg/hm² 处理下水稻籽粒产量最高,最高值为 7 593.11 kg/hm² (增产率为 36.12%)。施磷肥显著降低了水稻 0—100 cm 土层土壤硝态氮和铵态氮的累积,施磷 150 kg/hm² 显著提高了各生育期水稻氮素和磷素的吸收量。随着施磷量增加,水稻磷素生产效率和磷素吸收效率显著降低,氮素吸收效率、氮素收获指数和磷素收获指数的最大值出现在施磷 150 kg/hm² 处理,而水稻氮素生产效率受施磷量影响不显著。施磷肥显著提高了宁夏引黄灌区水稻产量及氮、磷吸收量和利用效率,施磷量 150 kg/hm² 为本地区适宜施肥量。

关键词:磷肥; 宁夏引黄灌区; 水稻产量; 氮素吸收利用; 磷素吸收利用

中图分类号: S143.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)02-0049-06

Effects of Phosphorus Fertilization on Yield and Nitrogen, Phosphorus Uptake and Use Efficiency of Rice in the Yellow River Irrigation Region of Ningxia

GUO Xinnian¹, SUN Jiao¹, LIANG Jinxiu¹, ZHOU Tao¹, LI Yongxiang², XUE Caixia³, TIAN Xudong³

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences,

Yinchuan 750002, China; 2 High Quality Seeding Breeding Farm of Qingtongxia Municipality, Qingtongxia, Ningxia 751600,

China; 3 Agricultural Comprehensive Development Office of Qingtongxia Municipality, Qingtongxia, Ningxia 751600, China)

Abstract: With respect to the unreasonable application of phosphorus fertilizer in Yellow Irrigation Area of Ningxia, we set up field trials in the irrigation area in order to determine suitable application of phosphorus in rice production in Yellow Irrigation Area of Ningxia. The rice variety ‘Jie No. 3’ was used as the test material, and a single factor random group test design experiment was conducted to examine the impact of P application rates (0, 75, 150, 225 kg/hm²) on grain yield, the accumulation of NO_3^- -N and NH_4^+ -N, as well as N and P uptake and utilization of rice. The results showed that, compared with the no application of P, all treatments with P application increased the spike number, kernels per spike and seed setting rate of rice, which significantly increased the grain yield of rice. The grain yield under treatment of 150 kg/hm² P application rate was higher than that of other P application treatments, which had the highest rice yield of 7 593.11 kg/hm², and production increase rate of 36.12%. P fertilization reduced the total accumulation of NO_3^- -N and NH_4^+ -N in 0—100 cm soil layers. In addition, P application increased N and P uptake of rice at different growth stages,

收稿日期: 2017-08-15

修回日期: 2018-05-25

资助项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目“农业面源污染减控与绿色清洁生产技术研究及示范”(2017BY085); 宁夏农林科学院全产业链示范推广项目“宁夏耕地可持续利用与农田生产力提升技术研究应用”(NKYZ-16-0904); 宁夏农业综合开发土地治理项目“银南灌区盐碱地土壤改良与农田生产力提升技术集成示范”(NTKJ2017-01-20)

第一作者: 郭鑫年(1981—), 男, 宁夏永宁人, 助理研究员, 硕士, 主要从事土壤养分循环与高效利用研究。E-mail: gxnian@163.com

通信作者: 周涛(1966—), 男, 重庆人, 研究员, 博士, 主要从事土壤肥力提升技术研究。E-mail: zhoutao6084609@163.com

especially for 150 kg/hm² P application treatment. With the P application of 150 kg/hm², the N uptake efficiencies and N harvest indices of rice were relatively higher. P application decreased the P grain production efficiencies and P uptake efficiencies, while the maximum of P harvest index was observed at the P application of 150 kg/hm². In conclusion, phosphorus fertilizer significantly improved the yield, nitrogen and phosphorus absorption and utilization efficiency of rice in the Yellow River irrigation area of Ningxia. The suitable phosphorus application was 150 kg/hm² in the region.

Keywords: phosphorus fertilization; Ningxia Yellow River irrigation region; rice yield; nitrogen uptake and utilization; phosphorus uptake and utilization

宁夏引黄灌区位于我国西北内陆,由青铜峡灌区和卫宁灌区组成,总灌溉面积为 9 697 hm²,水稻是该地区主要的粮食作物^[1]。磷素作为水稻生长发育所必须的大量营养元素之一,直接影响着植株生化代谢、养分的吸收利用及其产量^[2],磷肥的合理施用是保证水稻分蘖正常、生育良好、早熟高产的基础,而过量施用在增加了投入成本的同时养分利用率下降,土壤残留磷素随径流流失造成水体富营养化等问题^[3]。据统计,宁夏引黄灌区稻田平均施磷肥量已高于 240 kg/hm²^[4],田间试验发现水稻磷肥利用率仅为 4.2%^[5],因此,磷肥的合理施用成为该地区水稻高产、养分高效的关键。根据土壤养分含量和水稻生长发育对养分的要求,科学施用磷肥是提高水稻产量和肥料利用率的重要措施。已有研究表明,水稻植株内磷化合物的含量与磷肥施用量直接相关,合理施用磷肥可以提高水稻的产量和磷肥利用效率^[6]。另外,氮肥与磷肥的交互作用较大,N,P 肥配施提高了水稻秸秆和籽粒产量,同时促进了地上部 N 和 P 的吸收累积量,当氮肥投入量较低时,增施磷肥可提高作物产量^[7],且施用磷肥有效降低了耕层土壤硝态氮累积量,促进水稻对土壤氮素的吸收^[8]。单施氮肥土壤硝态氮累积高达 1 000 kg/hm²,而氮磷配合施肥土壤硝态氮累积量仅为 220 kg/hm²^[9]。为提高作物对氮磷养分的吸收量,提高肥料利用效率,减少养分在土壤中的残留以降低土壤氮磷养分的流失方面前人做了大量研究,许多研究报道了磷肥施用对水稻的产量、吸磷量、生理形状的影响以及残留磷素对土壤环境的影响^[7,9-10,11],同时在兼顾产量效益条件下从种植业结构进行了优化角度,提出了相应栽培模式,有效降低土壤氮磷流失量^[12]。目前,许多学者针对氮肥或者氮磷配合施用对水稻产量或氮、磷肥利用效率的影响方面进行了研究^[12],而在宁夏引黄灌区施磷对水稻植株氮素、磷素吸收利用效率的影响方面的研究相对较少,在不同施磷量影响作物磷肥效率、吸氮特性及土壤硝态氮累积规律方面也只集中在春小麦上^[9],但在不同磷肥用量对水稻 N、P 生育期吸收比例、元素利用率以及土壤剖面矿质态氮变化规律及残留累积量方面的系统报道

相对较少。本文通过对宁夏引黄灌区不同施磷水平下水稻产量、各生育期水稻氮和磷吸收与利用效率以及土壤矿质氮累积量等进行研究,旨在为宁夏引黄灌区水稻磷肥合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于宁夏青铜峡市良种繁殖场(106°16'E, 38°8'N),海拔 1 697~2 633 m,属于中温带干旱气候区。年均降水量为 180~220 mm,年均蒸发量 1 500 mm 左右,年总辐射量 512.20 kJ/cm²,日照时数 2 322.3 h,平均气温 8.3℃,无霜期 145 d。地貌类型为典型丘陵沟壑区,供试土壤为灌淤土,土壤 pH 值 8.45,全盐含量 1.14 g/kg,有机质含量 14.20 g/kg,全氮含量 0.85 g/kg,碱解氮含量 58.70 mg/kg,速效磷含量 14.70 mg/kg,速效钾含量 121.50 mg/kg。

1.2 试验设计

试验以“节 3 号”为研究材料,采用小区试验设计,在施氮(尿素,含 N46%)、钾肥(氯化钾,含 K₂O 60%)的基础上设置 4 个施磷(P₂O₅)水平,分别为:0,75,150,225 kg/hm² 共 4 个浓度梯度,用 P₀,P₇₅,P₁₅₀,P₂₂₅ 表示。每个处理重复 3 次,共计 12 个小区,各小区面积为 40 m² (10 m×4 m),采取随机区组排列。小区间用 33 cm 高的铝塑板隔开,并设独立的排灌口,铝塑板高出田面 13 cm,以防小区间跑水、蹿水、串肥,铝塑板交接处用塑料薄膜密封。水稻于 2014 年 4 月 20 日播种,9 月 30 日收获,生育期 163 d。每个小区均施钾肥 60 kg/hm²,氮肥 270 kg/hm²,其中,钾肥、磷肥和 55%的氮肥基施,28%和 17%的氮肥分别在水稻的分蘖期和孕穗期施入。基肥于水稻移栽前一天撒施后用木耙混入 5 cm 的表土中,分蘖肥和穗肥采用撒施的方式。水稻的种植方式采取人工插秧,插秧行距 30 cm,株距 10 cm,各处理田间管理均按照常规栽培技术要求进行。

1.3 样品采集

分别于 2014 年 6 月 10 日水稻分蘖期、7 月 9 日拔节期、8 月 26 日抽穗期、9 月 30 日收获期进行地上

部植物采样,每个小区设 5 个重复。在水稻收获期,按每个小区 60 穴水稻计算单位面积有效穗数,根据平均穗数取样法在每个小区取 5 穴,考查穗粒数、结实率、千粒重等产量构成因素及籽粒充实情况,最后分小区单打实收测产;同时,以 20 cm 土层为一层,采集 0—100 cm 土层土壤剖面的样品,每小区设 3 个重复。

1.4 测定方法和计算

将植物样品分为籽粒样品与茎叶样品,105℃杀青 0.5 h 之后在 80℃下烘干,测定干物质量;粉碎植物样品过 60 目筛,H₂SO₄—H₂O₂ 消煮后,用凯氏定氮法测定植物全氮含量,NaOH 碱熔—钼锑抗比色法测定全磷含量^[13]。将土壤样品置于阴凉通风处风干后过 100 目筛,利用流动分析仪对土壤中硝态氮、铵态氮含量进行测定^[14]。

测定养分利用率的相关公式^[15]如下:
磷吸收总量=成熟期干物质总量×植株磷含量/1000
元素生产效率=籽粒产量/植株元素吸收量
元素吸收效率=植株元素吸收量/施入元素量
元素收获指数=籽粒元素吸收量/植株元素吸收量×100%
磷肥偏生产力=施磷籽粒产量/施入磷肥量
磷肥利用率=(施磷处理植株总吸磷量—不施磷对照植株总吸磷量)/施入磷肥量×100%
磷肥农学利用率=(施磷处理经济产量—不施磷对照

经济产量)/施入磷肥量

1.5 数据处理

利用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 对试验数据进行统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差数法(LSD)进行差异显著性检验;通过相关性分析和回归系数来描述各测量指标的相关程度。图表的制作采用 Origin 9.0 和 Excel 2003 软件处理。

2 结果与分析

2.1 不同磷肥水平对水稻产量及磷肥利用率的影响

由表 1 可见,在施磷条件下水稻植株和籽粒产量均显著增加,增产范围分别为 5 278.0~8 362.0, 1 659.0~2 742.0 kg/hm²。与 P₀ 处理相比,在 P₇₅,P₁₅₀, P₂₂₅ 处理下水稻籽粒的增产率分别为 25.5%,36.1%, 27.7%。从产量构成上来看,P₇₅,P₁₅₀,P₂₂₅ 处理下水稻穗数、每穗粒数、千粒重、结实率均显著大于 P₀ 处理。且各施磷处理相比,水稻穗数、每穗粒数、千粒重、结实率的最大值均出现在 P₁₅₀ 处理,最小值均出现在 P₇₅ 处理。各施磷处理相比,磷肥偏生产力和磷肥利用率的变化随施磷量增加呈显著降低的趋势,最大值出现在 P₇₅ 处理,分别为 82.4 kg/kg,14.0%;磷肥农学利用率的最大值出现在 P₁₅₀ 处理,为 18.3 kg/kg,磷肥农学利用率的最小值出现在 P₂₂₅ 处理。

表 1 不同施磷水平对水稻产量及磷肥利用效率的影响

处理	植株产量/ (10 ³ kg·hm ⁻²)	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	穗数/ (万穗·hm ⁻²)	每穗粒数/ (粒/穗)	千粒重/g	结实率/ %	磷肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	磷肥农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	磷肥利用率/ (kg·kg ⁻¹)
P ₀	12.2±0.41a	4850.7±54.65a	23.2±0.42a	97.5±0.91a	24.4±0.21a	72.0±2.24a	—	—	—
P ₇₅	17.5±0.58b	6176.6±118.75b	28.8±0.40b	102.9±1.15b	24.3±0.13a	74.2±1.44ab	82.4±1.58c	17.7±2.19b	14.0±1.24b
P ₁₅₀	20.6±0.50d	7593.1±78.58c	31.2±0.44d	107.9±2.23c	25.0±0.38b	79.9±1.10c	50.6±0.52b	18.3±0.89b	13.5±1.84b
P ₂₂₅	18.7±1.07c	6711.3±120.37b	29.3±0.51c	105.4±1.16bc	24.5±0.16a	76.4±1.88b	29.5±0.53a	7.6±0.59a	5.8±0.96a

注:同列不同字母表示处理间差异显著(p<0.05)。

2.2 不同磷肥水平对水稻氮、磷吸收与利用率的影响

不同施磷水平下水稻在各生育期地上部分的氮素吸收量及其利用率见表 2。不同施磷水平下水稻地上部分氮素吸收量变化随着生育期的延长多呈增加的趋势,最大值均出现在抽穗至成熟期间,水稻地上部分氮素吸收比率可从出苗至分蘖期的 0.63% 增长到抽穗至成熟期的 72.35%。与不施磷处理相比(P₀),施磷处理 P₇₅,P₁₅₀,P₂₂₅ 下水稻在出苗至成熟期氮素吸收比率分别增加了 22.13%,28.58%, 26.73%。水稻除了在拔节至抽穗期施磷处理下氮素吸收量显著低于未施磷处理,随着施磷量的增加,其各生育期地上部分氮素吸收量变化多呈先增加后降低的趋势,最大值出现在 P₁₅₀ 处理。不同施磷水平下水稻植株氮素吸收利用效率可用氮素生产效率、

氮素吸收效率、氮素收获指数表示^[15]。水稻氮素生产效率在各施磷处理之间无显著差异,氮素吸收效率和氮素收获指数的变化从大到小顺序为 P₁₅₀>P₇₅>P₂₂₅>P₀。

如表 3 所示,不同施磷水平水稻地上部分磷素吸收量变化随着生育期的延长多呈增加的趋势,最大值均出现在抽穗至成熟期间,水稻地上部分磷素吸收比率可从出苗至分蘖期的 0.32% 增长到抽穗至成熟期的 73.61%。与不施磷处理相比,P₇₅,P₁₅₀,P₂₂₅ 处理下水稻在抽穗至成熟期磷素吸收比率分别增加了 2.57%,3.11%,3.97%。在出苗至分蘖期,水稻磷素吸收量变化随着施磷量的增加呈显著增加的趋势,最大值出现在 P₂₂₅ 处理;从分蘖至成熟期,随着施磷量的增加水稻磷素吸收量呈先增加后降低的趋势,最大

值出现在 P_{150} 处理,最小值出现在 P_0 处理。随着施磷量的增加水稻磷素生产效率和磷素吸收效率呈显著降低的趋势,而磷素收获指数随着施磷量的变化从大到小顺序为 $P_{150} > P_{75} > P_{225} > P_0$ 。

表 2 不同施磷水平对水稻氮素吸收与利用效率的影响

处理	阶段吸收量/(kg·hm ⁻²)				氮素吸收比率/%				氮素生产效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮素吸收效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮素收获 指数/%
	出苗—分蘖期	分蘖—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—成熟期	出苗—分蘖期	分蘖—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—成熟期			
P_0	0.75±0.07a	20.25±2.13a	23.83±2.84b	63.48±2.49a	0.69±0.07a	19.30±1.56b	22.04±3.28b	56.27±2.41a	44.22±1.57a	40.11±0.98a	49.67±3.31a
P_{75}	1.03±0.05b	25.63±2.32b	19.54±3.15a	103.54±2.42b	0.69±0.05a	17.38±1.66ab	13.20±1.82a	68.72±0.19b	41.27±3.92a	55.46±1.51b	52.39±3.06b
P_{150}	1.21±0.01c	27.64±2.21b	20.36±1.05ab	129.20±1.08d	0.68±0.01a	15.48±0.35a	11.49±0.67a	72.35±1.01c	42.53±1.11a	66.13±0.52d	52.50±2.33b
P_{225}	0.96±0.02b	25.56±1.31b	18.08±1.00a	111.31±0.91c	0.63±0.02a	16.43±0.86a	11.72±1.30a	71.31±0.49c	40.90±1.49a	57.76±0.26c	50.40±2.29a

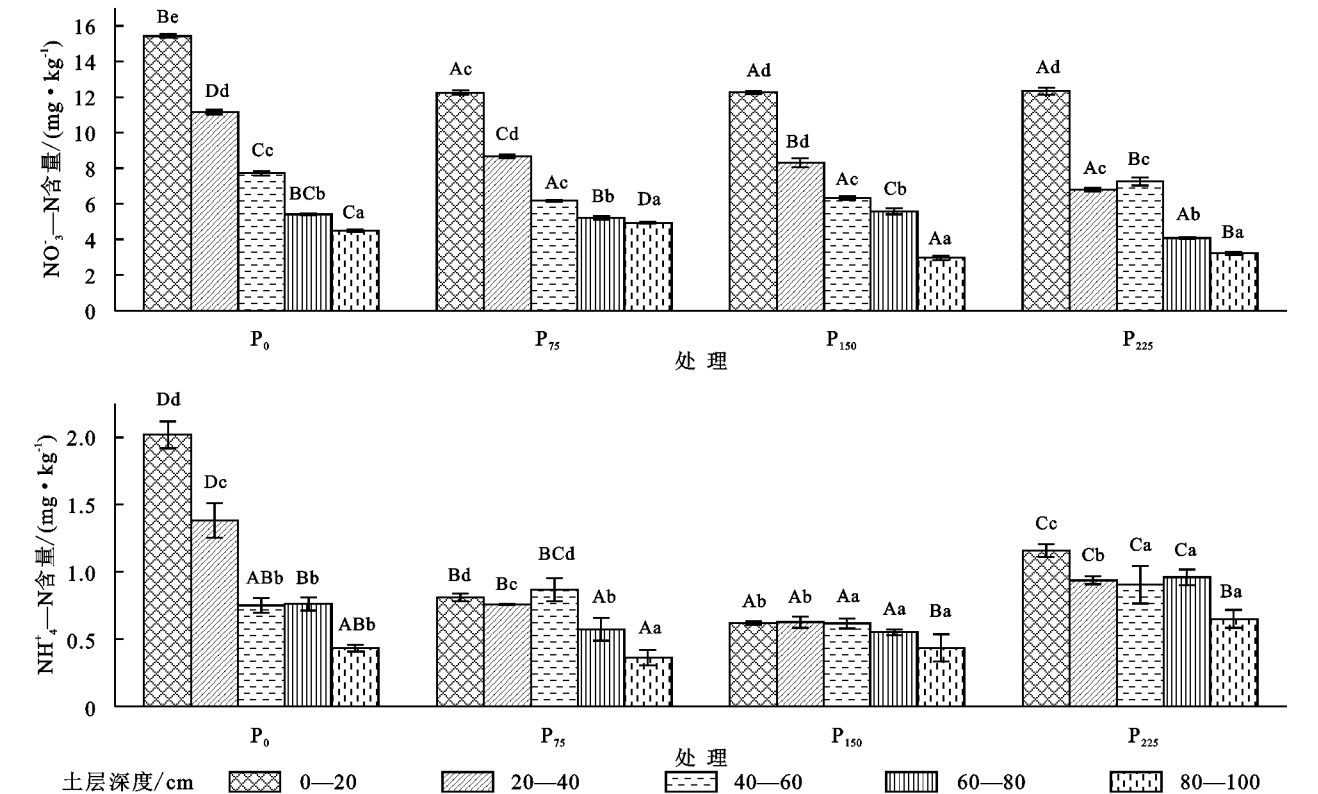
表 3 不同施磷水平对水稻磷素吸收与利用效率的影响

处理	阶段吸收量/(kg·hm ⁻²)				磷素吸收比率/%				磷素生产效率/ (kg·kg ⁻¹)	磷素吸收效率/ (kg·kg ⁻¹)	磷素收获 指数/%
	出苗—分蘖期	分蘖—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—成熟期	出苗—分蘖期	分蘖—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—成熟期			
P_0	0.09±0.01a	3.97±0.06a	3.01±0.26a	17.18±0.65a	0.39±0.02b	16.38±0.53b	12.43±0.19a	70.80±1.61a	197.22±2.55b	—	47.48±2.02a
P_{75}	0.13±0.00b	4.56±0.06b	4.81±0.21b	25.23±1.35b	0.37±0.03b	13.14±0.67a	13.86±0.80bc	72.62±1.37ab	177.65±8.97a	46.30±1.70c	50.49±0.82b
P_{150}	0.14±0.01c	5.50±0.15d	6.37±0.08c	32.49±0.41d	0.32±0.02a	12.35±0.22a	14.32±0.25c	73.00±0.22b	170.64±2.54a	29.67±0.30b	53.04±1.04c
P_{225}	0.17±0.01d	4.93±0.03c	4.75±0.04b	27.47±0.25c	0.45±0.02c	13.22±0.09a	12.72±0.08ab	73.61±0.17b	170.93±0.61a	16.58±0.13a	49.00±0.09ab

2.3 不同磷肥水平对土壤剖面矿质氮累积的影响

图 1 为不同施磷水平下水稻在 0—100 cm 土层中土壤硝态氮含量和铵态氮含量。不同施磷水平下土壤硝态氮含量和铵态氮含量的变化范围分别为 2.97~15.43,0.36~2.02 mg/kg,除了水稻土壤硝态氮含量在 P_{225} 处理下 40—60 cm 土层显著高于 20—40 cm 土层、土壤铵态氮含量在 P_{75} 处理下 40—60 cm 土层显著高于 20—40 cm 土层,土壤硝态氮含量和铵态氮含量的变化

多表现为随着土层深度增加而显著降低的趋势。在 0—40 cm 土层中,土壤硝态氮含量随着施磷量的增加而降低,最大值出现在 P_0 处理;在 40—100 cm 土层中,土壤硝态氮含量的最大值多出现在 P_0 处理,最小值多出现在 P_{150} 处理。土壤铵态氮含量的变化在 0—40 cm 土层中从大到小的顺序为 $P_0 > P_{225} > P_{75} > P_{150}$;而在 40—100 cm 土层中,土壤铵态氮含量的最大值多出现在 P_{225} 处理,最小值多出现在 P_{150} 处理。

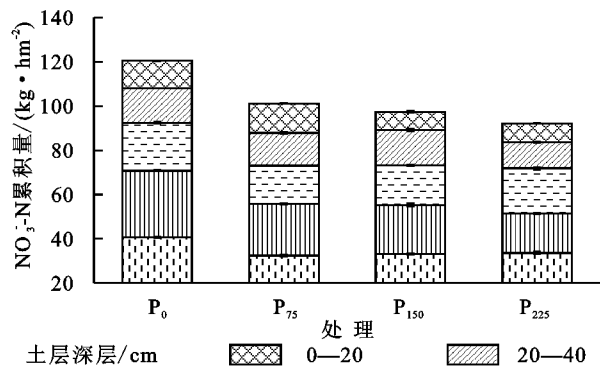


注:不同小写字母表示同处理不同土层在 $p < 0.05$ 水平上差异显著,不同大写字母表示不同处理同土层在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

图 1 不同施磷水平对水稻土壤矿质氮含量的影响

从图2可以看出,不同施磷水平土壤硝态氮累积量、铵态氮累积量的变化范围分别为92.14~120.46, 8.02~14.39 kg/hm²。

在0—100 cm土层中,土壤硝态氮累积量变化随着施磷量的增加而降低,最大值出现在P₀处理,土壤



铵态氮含量变化从大到小的顺序表现为P₀>P₂₂₅>P₇₅>P₁₅₀。随着土层深度的增加,土壤硝态氮累积量和铵态氮累积量的变化多表现为降低的趋势,除了P₂₂₅处理下土壤铵态氮累积量的最大值出现在60—80 cm土层中。

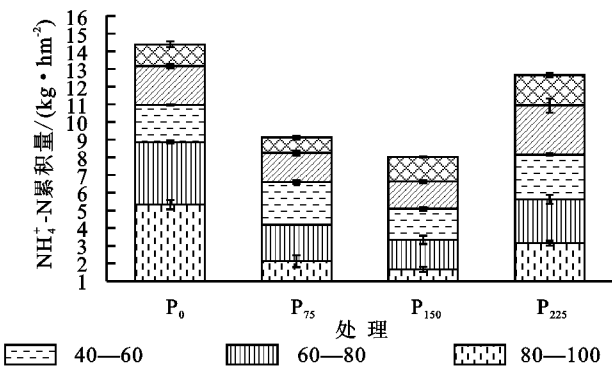


图2 不同施磷水平对水稻土壤矿质氮累积量的影响

3 讨论

本研究中,增施磷肥显著提高了水稻穗数、每穗粒数和结实率,进而提高了水稻籽粒产量。施磷可显著提高当季水稻籽粒的产量^[16],施磷150 kg/hm²处理(P₁₅₀)下水稻籽粒产量最高,过高的磷肥水平(P₂₂₅)降低了水稻籽粒产量。本研究中,增施磷肥提高了水稻的农学利用率,施磷肥可显著提高水稻经济产量,尤其以施磷150 kg/hm²处理下水稻经济产量最高。但磷肥偏生产力与磷肥利用率随着施磷量的增加呈降低趋势。这与样地土壤速效磷含量(14.70 mg/kg)较高有关^[17]。本研究中,施磷肥可显著提高水稻各生育期植株氮素吸收量,施磷150 kg/hm²处理下水稻氮素吸收量最高。适当的增施磷肥可以促进作物对土壤氮素吸收,但过高施磷水平下作物氮素吸收水平下降^[7,18]。施磷量150 kg/hm²处理可显著提高作物从出苗到拔节时期氮素吸收比率,从而显著提高各生育期氮素累积量^[19]。另外,作物氮素吸收的高峰期主要集中在中前期^[20],不施磷处理下作物氮素吸收的高峰出现在拔节期,施磷肥下作物氮素累积高峰有所后移,出现在抽穗期^[9],从而出现了施磷肥处理下水稻拔节到抽穗期氮素吸收量显著降低的现象。本研究中,随着施磷量的增加,水稻氮素生产效率在各施磷处理之间无显著差异,而氮素吸收效率和氮素收获指数的变化呈先升高后降低的趋势。施磷肥提高了水稻籽粒氮素累积量、植株氮素累积量^[19],但籽粒氮素累积量的增加幅度低于植株氮素累积量增加的幅度,导致了水稻氮素生产效率的降低。增加施磷量,可促进植株体内氮素的吸收运转,进而提高了植株氮素吸收效率和氮素收获指数^[20],

且在施磷150 kg/hm²处理下可获得较高的氮素吸收效率和氮素收获指数^[21]。

合理增施磷肥能促进作物对土壤磷素的吸收和累积^[22]。本研究中,水稻磷素吸收量随生育期延长呈增加的趋势。水稻磷素吸收量变化表现为生育后期>中期>前期,且在水稻播种30 d以后磷素吸收量开始增大^[23]。作物磷素吸收量随生育期的推进呈增加趋势,在生育前期主要在叶子中分配,生育后期主要在果实中分配^[24]。但也有研究认为在水稻生育期内会出现拔节期和成熟期两个磷素吸收高峰^[25]。这可能与水稻基因型、种植模式和生长环境等因素不同有关^[24]。施磷肥尤其是施磷150 kg/hm²处理下可显著提高水稻各生育期植株磷素吸收量。说明水稻磷素吸收量受供磷水平的调控^[26]。增施磷肥可增加土壤有效磷的浓度,进而加快土壤中磷扩散速度、增加水稻的不定根数目,水稻吸收磷素能力增强^[27]。但高量施磷导致土壤有效磷浓度过高,抑制水稻磷素的吸收能力^[5,23-24]。本研究中,随着施磷量的增加,水稻磷素生产效率和磷素吸收效率的变化呈降低的趋势。说明施用磷肥对水稻植株磷素吸收作用的影响大于生产作用的影响。增施磷肥可显著提高水稻磷素收获指数,但过高磷肥水平下水稻磷素收获指数会显著降低。磷肥投入水平显著影响土壤矿质氮(铵态氮和硝态氮)累积量^[12],而土壤铵态氮和硝态氮是植物吸收氮素的主要形态^[28]。在通气良好、pH值较高的土壤条件下,土壤铵态氮通过硝化作用快速转变为硝态氮^[29],因而水稻土壤硝态氮含量较高,变化范围为2.97~15.43 mg/kg,土壤铵态氮含量的变化范围仅为0.36~2.02 mg/kg,土壤硝态氮成为水稻吸收的主导矿质氮源。本研究中,水稻0—100 cm土层

中土壤硝态氮累积量随着施磷量增加呈显著降低的趋势。磷肥可能通过增加作物根系吸收范围从而降低土壤中硝态氮的累积^[8],因此,增施磷肥可减小向下淋溶土壤硝态氮的累积量^[30],尤其在 40 cm 以下土层土壤中硝态氮累积量显著降低^[31]。适当施用磷肥刺激了土壤硝化细菌生长,但磷肥施用过量会抑制土壤硝化细菌的数量,进而造成铵态氮累积^[14]。因此,水稻土壤 0—100 cm 土层中铵态氮累积量随着施磷量增加呈先降低后增加的趋势,施磷 150 kg/hm² 处理下水稻土壤铵态氮累积量最小。

4 结 论

与不施磷肥相比,施磷肥显著提高了水稻穗数、每穗粒数和结实率,进而提高了水稻籽粒产量,且以施磷 150 kg/hm² 处理(P₁₅₀)下水稻籽粒产量最高,最高值为 7 593.11 kg/hm² (增产率为 36.12%)。除了在施磷肥处理下拔节到抽穗期水稻氮素吸收量显著降低外,施磷肥尤其是施磷 150 kg/hm² 处理下可显著提高水稻各生育期植株氮素和磷素的吸收量。随着施磷量的增加,水稻氮素生产效率无明显变化,氮素吸收效率和氮素收获指数的变化呈先升高后降低的趋势;水稻磷素生产效率和磷素吸收效率的变化随着施磷量增加显著降低,而磷素收获指数的最大值出现在施磷 150 kg/hm² 处理。水稻 0—100 cm 土层中土壤硝态氮累积量随着施磷量增加而显著降低,土壤铵态氮累积量随着施磷量增加呈先降低后增加的趋势,施磷 150 kg/hm² 处理下水稻土壤铵态氮累积量最小。

参考文献:

- [1] 张爱平,刘汝亮,高霁,等. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015,21(5):1352-1360.
- [2] 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.
- [3] 习斌,翟丽梅,刘申,等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2):326-335.
- [4] 张晴雯,张惠,易军,等. 青铜峡灌区水稻田化肥氮去向研究[J]. 环境科学学报, 2010,30(8):1707-1714.
- [5] 赵营,同延安,张树兰,等. 氮磷钾施用量对灌淤土水稻产量及肥料利用率的影响[J]. 西北农业学报, 2010,19 (2):118-121.
- [6] 高菊生,黄晶,董春华,等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报, 2014(2):314-324.
- [7] 王伟妮,鲁剑巍,何予卿,等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011,25 (6):645-653.
- [8] 袁新民,同延安,杨学云,等. 施用磷肥对土壤 NO₂-N 累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000,6(4):397-403.
- [9] 张爱平,刘汝亮,李友宏,等. 施用磷肥对春小麦产量与吸氮特性及土体中硝态氮累积的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009,27(5):30-34.
- [10] 李鹏,张敬智,魏亚,等. 配方施肥及磷肥后移对单季稻磷素利用效率、产量和经济效益的影响[J]. 中国水稻科学, 2016,30(1):85-92.
- [11] 邢丹,李淑文,夏博,等. 磷肥施用对冬小麦产量及土壤氮素利用的影响[J]. 应用生态学报, 2015,26(2):437-442.
- [12] 刘根红,许强,乔娜,等. 宁夏自流灌区农作物氮磷低污染种植结构优化[J]. 干旱地区农业研究, 2016,34(1): 140-146.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [14] 赵浩淳,周志峰,秦子娴,等. 施磷处理对中性紫色土土壤硝化作用的影响[J]. 土壤学报, 2016,53(1):271-275.
- [15] 李廷亮,谢英荷,洪坚平,等. 施磷水平对晋南旱地冬小麦产量及磷素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013,21(6):658-665.
- [16] 区惠平,周柳强,黄美福,等. 不同施磷量下稻田土壤磷素平衡及其潜在环境风险评估[J]. 植物营养与肥料学报, 2016,22(1):40-47.
- [17] 陈波浪,吴海华,罗佳,等. 施磷对架甜瓜干物质累积及磷肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2016,27 (2):511-518.
- [18] 王兵,刘文兆,党廷辉,等. 黄土高原氮磷肥水平对旱作冬小麦产量与氮素利用的影响[J]. 农业工程学报, 2011,27(8):101-107.
- [19] 陈梦楠,高志强,孙敏,等. 休闲期耕作配施磷肥对旱地小麦氮素吸收与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(11):1569-1575.
- [20] 王帅,孙敏,高志强,等. 旱地小麦休闲期覆盖保水与磷肥对植株氮素吸收、利用的影响[J]. 水土保持学报, 2015,29(3):231-236.
- [21] 陈远学,周涛,王科,等. 施磷对麦/玉/豆套作体系氮素利用效率及土壤硝态氮含量的影响[J]. 水土保持学报, 2014,28(3):191-196.
- [22] 张立花,张辉,黄玉芳,等. 施磷对玉米吸磷量、产量和土壤磷含量的影响及其相关性[J]. 中国生态农业学报, 2013,21(7):801-809.
- [23] 何园球,李成亮,王兴祥,等. 土壤水分含量和施磷量对旱作水稻磷素吸收的影响[J]. 土壤学报, 2005,42(4): 628-634.
- [24] 李鹏,张敬智,魏亚,等. 配方施肥及磷肥后移对单季稻磷素利用效率、产量和经济效益的影响[J]. 中国水稻科学, 2016,30(1):85-92.

- 方式下的土壤可蚀性研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 19-23.
- [11] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, et al. Effects of near soil surface characteristics on the soil detachment process in a chronological series of vegetation restoration[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(4): 1213-1222.
- [12] 张科利, 蔡永明, 刘宝元, 等. 土壤可蚀性动态变化规律研究[J]. 地理学报, 2001, 56(6): 673-681.
- [13] 杨帆, 程金花, 张洪江, 等. 坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J]. 农业机械学报, 2016(5): 129-137.
- [14] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 248-257.
- [15] Zhang G H, Tang K, Ren Z, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J]. Transactions of the Asabe, 2013, 56(3): 927-934.
- [16] Baets S D, Poesen J, Gyssels G, et al. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow[J]. Geomorphology, 2006, 76(1/2): 54-67.
- [17] 葛芳红, 周正朝, 刘俊娥, 等. 黄土丘陵区 4 种典型植物根系分布特征及对土壤分离速率的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 164-169.
- [18] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [19] 唐科明. 草地土壤细沟可蚀性季节变化研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(25): 71-73.
- [20] 张光辉. 冲刷时间对土壤分离速率定量影响的试验模拟[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 1-4.
- [21] Zhang G, Liu B, Liu G, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3): 713-719.
- [22] Nearing M A. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology [J]. Trans. Asae, 1989, 32(5): 1587-1593.
- [23] 王计磊, 吴发启. 不同生长期大豆坡耕地土壤抗侵蚀能力特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1389-1398.
- [24] 刘子壮, 高照良, 杜峰, 等. 黄土高原高速公路护坡植物根系分布及力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 66-71.
- [25] 袁雪红, 高照良, 张翔, 等. 护坡植物根系分布及抗拉力学特性[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 117-123.
- [26] 沈慧, 姜凤岐, 杜晓军, 等. 水土保持林土壤抗蚀性能评价研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 345-348.
- [27] 刘月梅, 张兴昌, 王丹丹. 黄土性土壤固化对黑麦草生长和根系活力的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2604-2608.
- [28] 王润泽, 湛芸, 李铁, 等. 香根草和马唐的根系特征及对坡地紫色土抗侵蚀性的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(7): 45-54.
- [29] Bernard Barthès, Eric Roose. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels[J]. Catena, 2002, 47(2): 133-149.
- [30] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34-37.
- [31] 熊燕梅, 夏汉平, 李志安, 等. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 895-904.

(上接第 54 页)

- [25] 徐晓明, 张迎信, 王会民, 等. 水稻氮, 磷, 钾吸收利用遗传特征研究进展[J]. 核农学报, 2016, 30(4): 0685-0694.
- [26] 陈波浪, 吴海华, 罗佳, 等. 施磷对立架甜瓜干物质累积及磷肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 511-518.
- [27] 张亚洁, 杨建昌, 杜斌. 种植方式对陆稻和水稻磷素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(1): 126-132.
- [28] 隗英华, 孙文涛, 韩晓日, 等. 春玉米土壤矿质氮累积及酶活性对施氮的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1368-1377.
- [29] Smiciklas K D, Below F E. Role of nitrogen form in determining yield of field-grown maize[J]. Crop Science, 1992, 32(5): 1220-1225.
- [30] 薛晓辉, 郝明德. 小麦氮磷肥长期配施对土壤硝态氮淋溶的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 918-925.
- [31] 王婷, 李利利, 周海燕, 等. 长期不同施肥措施对雨养条件下陇东旱塬土壤氮素的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 177-188.