

磷硅肥配施对盐渍土壤水稻生长及养分吸收的影响

娄金华¹, 陈猛猛², 张士荣², 吴立鹏², 魏立兴¹, 丁效东²

(1.山东省东营市农业科学研究院, 山东 东营 257091; 2.青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109)

摘要: 针对滨海盐渍化稻田土壤根系易受盐碱胁迫、磷素养分含量及有效性低的问题, 采用田间微区试验研究磷肥与硅肥配施对滨海盐渍化稻田土壤水稻根系生长、土壤磷素含量、水稻磷营养、产量及经济效益的作用。试验采用双因素设计, 磷肥设2个水平: P1, P_2O_5 64 kg/hm²; P2, P_2O_5 128 kg/hm²; 硅肥分土施和喷施, 土施设3个水平: Si1, SiO_2 0 kg/hm²; Si2, SiO_2 60 kg/hm²; Si3, SiO_2 120 kg/hm²; Si4 为叶面喷施 SiO_2 15 kg/hm²。结果表明, 喷施硅肥与低量磷肥配施的 P1Si4 处理在各生育时期的水稻总根长、总表面积和总根体积均为最高, 与 P2Si4 处理无显著性差异。同时, 磷肥配施硅肥可有效提高滨海盐渍化水稻土壤磷素有效性, 其中 P2Si4 处理速效磷含量显著高于 P1Si3、P2Si1, 分别高出 35.16%, 27.47%; 高磷处理的土壤全磷含量高于低磷处理。且施用硅肥的 P1Si3、P1Si4 处理的水稻产量显著高于不施硅肥和少量施硅的 P1Si1、P1Si2 处理, 其中 P2Si3 水稻产量达 9 547.5 kg/hm²; 各处理的有效穗数无显著性差异, 每穗实粒数 P2Si3 处理最高, 达 162.47 个/穗。P2Si3 处理水稻籽粒中磷积累量最高, 且显著高于其他处理, 比 P1Si3、P2Si1 处理分别高出 8.46%, 9.68%。在低磷或高磷施用条件下, 叶面喷施硅肥 (P1Si4、P2Si4) 处理收入分别达到 14 953.6, 14 323.2 元/hm²。综上所述, 与不施硅肥的处理相比, 磷肥配施硅肥可显著促进滨海盐渍化土壤水稻根系生长, 提高磷素有效性、水稻产量及经济效益, 其中以 P1Si4 处理 (叶面喷硅, P_2O_5 64 kg/hm²) 处理最佳。

关键词: 盐渍化土壤; 磷肥; 叶面喷硅; 根系生长; 产量

中图分类号: S158.3; S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0263-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.039

Effects of Phosphate and Silicon Fertilizer on Rice Growth and Nutrient Absorption in Saline Soil

LOU Jinhua¹, CHEN Mengmeng², ZHANG Shirong², WU Lipeng², WEI Lixing¹, DING Xiaodong²

(1. Dongying Academy of Agricultural Science, Dongying, Shandong 257091;

2. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109)

Abstract: Aiming at the problems of coastal saline soil paddy soil root growth under saline-alkali stress, low nutrient content and low availability. In this research, field experiment was conducted to study the effects of combined application of phosphate fertilizer and silicon fertilizer on rice root growth, soil phosphorus content, the rice absorbs phosphorus, rice yield, and economic benefits of rice in coastal saline soil. The experiment has two factors, including two phosphorus levels: P1: 64 kg/hm²; P2: 128 kg/hm²; silicon fertilizer is divided into soil application and spray application, three levels of soil application: Si1, SiO_2 0 kg/hm², Si2, SiO_2 60 kg/hm²; Si3, SiO_2 120 kg/hm²; Spray is SiO_2 15 kg/hm², and applied with water-soluble multi-effect silicon fertilizer (containing water-soluble $SiO_2 \geq 30\%$), which was diluted 500 times per 100 mL and sprayed with 50 L per hectare. The results indicate that the P2Si3 treatment's total root length, total surface area and total root volume of rice were significantly higher than each other period and it was no significant difference with P2Si4 treatment. Meanwhile, phosphate fertilizer combined with silicon fertilizer can effectively improve the availability of phosphorus in coastal salinized rice soil, the content of available phosphorus in P2Si3 treatment was significantly higher than that in P1Si3 and P2Si1, respectively higher 35.16% and 27.47%; the total phosphorus content of soil treated with high phosphorus fertilizer was higher

收稿日期: 2019-12-28

资助项目: 山东省重大科技创新工程项目“盐碱地障碍消减及高效利用技术研究”(2017CXGC0301); 山东省现代农业产业体系水稻创新团队建设 (栽培与土壤岗位, SDAIT-17-05); 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2017MC015)

第一作者: 娄金华 (1962—), 男, 山东东营人, 硕士, 副研究员, 主要从事盐碱地改良及高效利用技术研究。E-mail: ljh6258@sohu.com

通信作者: 丁效东 (1978—), 男, 山东寿光人, 博士, 教授, 主要从事土壤磷素高效循环利用研究。E-mail: xiaodongding2004@163.com

than that treated with low phosphorus fertilizer. Moreover, rice yield with P1Si3 and P2Si4 treatment was significantly higher than that P1Si1 and P1Si2 treatment, the yield of P2Si3 treatment was 9 547.5 kg/hm² there was no significant difference in the effective spike number of each treatment, P2Si3 treatment was the highest with 162.47 grains per panicle. P2Si3 treatment's accumulation of p in rice grains and was significantly higher than other treatments, compared with P1Si3 and P2Si1, it was 8.46% and 9.68% higher respectively. Under low or high phosphorus level, P1Si4, P2Si4 treatment's income reached 14 953.6 CNY/hm² and 14 323.2 CNY/hm². In conclusion, compared to the treatment without silicon fertilizer, the application of silicon fertilizer can significantly promote the root growth of rice, phosphorus availability, rice yield and economic benefit in coastal salinized soil, among them, P2Si3 treatment (silicon sprayed on the blade, P₂O₅ 64 kg/hm²) is the best treatment.

Keywords: salinized soil; phosphate fertilizer; foliar silicon spraying; root growth; yield

磷素作为水稻生长发育所必需的营养元素之一,是构成水稻大分子物质和多种重要化合物的主要成分,同时参与水稻体内的新陈代谢^[1]。有研究^[2]表明,当水稻植株缺磷时极易导致水稻生理紊乱,分蘖数少等症状,影响其产量。黄河三角洲地区,由于其成土特性、土壤剖面结构单一,导致当地磷素有效性低及较大磷素淋失风险^[3]。因此,采取适当的方式提高盐碱地稻田土壤磷素有效性,提高水稻对磷素吸收能力,进而增加其产量,是实施当地水稻种植高产稳产的重要举措。

水稻作为一种典型的喜硅作物,施用硅肥后对水稻高产、稳产具有重要意义^[4]。有研究^[5]表明,硅肥施用对水稻生长发育及养分吸收影响较大,土壤施硅能够促进土壤磷素转化、提高有效磷含量,同时提高水稻对磷素吸收与利用,促进水稻生长和籽粒产量增加。水稻叶面喷施硅肥,可弥补由于水稻根系衰老,养分吸收能力减弱的问题,进而提高水稻产量^[6]。根际土壤界面是根系与土壤接触的范围,是作物吸收养分和水分的主要来源^[7]。由于盐渍土壤中含盐量较高,极易导致水稻根系生长受到抑制,施用硅肥能够提高水稻根系活力及抗性^[8],使水稻体内通气性增强,预防根系腐烂和早衰。黄河三角洲稻田土壤含盐量较大、pH 较高等特点^[9],导致水稻根系生长所需生长环境较差,水稻生长受到抑制。因此,探究不同硅肥施用方式(叶面喷施硅肥与土壤施硅)对盐碱地种植水稻过程中增加土壤磷素有效性、促进根系生长及提高产量具有重大意义。

目前,在黄河三角洲盐渍化稻田土壤,探究不同硅肥施用方式结合磷肥施用水平对稻田土壤磷素有效性、水稻根系发育及磷吸收利用的影响鲜有报道。针对上述问题,本研究通过大田试验(2017 年),明确不同磷肥施用条件下,土施和叶面喷施硅肥对滨海盐渍化土壤水稻根系生长、磷素含量、水稻磷素吸收及水稻产量的影响,以期在滨海盐渍化土壤水稻高效种植过程中提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于山东省东营市垦利县李王村(37°31'16.17"N, 118°32'28.96"E),属温带大陆性季风气候,年平均气温 12.8℃,年平均降水量 55.9 mm,土壤为轻度盐渍化滨海盐化潮土,根据卡庆斯基制中物理性黏粒(<0.25 mm),土壤质地为砂质壤土,0—20 cm 土层土壤基本理化性质:有机质含量 8.40 g/kg,全氮含量 1.12 g/kg,全磷含量 0.34 g/kg,全钾含量 1.10 g/kg,速效磷含量 17.0 mg/kg,速效钾含量 229 mg/kg,含盐量 0.3%,pH 8.1。

1.2 试验设计

本试验设磷肥和硅肥 2 个因素,磷肥设 2 个水平: P1, P₂O₅ 64 kg/hm²; P2, P₂O₅ 128 kg/hm²; 硅肥分土施和喷施,包括 3 个土壤施硅处理和 1 个叶面施硅处理: Si1, SiO₂ 0 kg/hm²; Si2, SiO₂ 60 kg/hm²; Si3, SiO₂ 120 kg/hm²; Si4 为喷施 SiO₂ 15 kg/hm²,采用水溶性多效硅肥(其含水溶性 SiO₂ ≥ 30%),每 100 mL 稀释 500 倍后叶面喷施,喷施浓度为 50 L/hm²。具体处理为 P1Si1、P1Si2、P1Si3、P1Si4、P2Si1、P2Si2、P2Si3、P2Si4 共 8 个处理,每个处理 3 次重复,随机排列,共 24 个小区,小区面积 15 m²(3 m × 5 m)。土施硅肥以硅酸钠(Na₂SiO₃ · 9H₂O)形式施入,在整地耘田时施用,而叶面喷施硅肥采用在分蘖期、孕穗期、抽穗期、灌浆期各 1 次;磷肥全部作基肥。氮素(N) 255 kg/hm²,钾素(K₂O) 229 kg/hm²,氮肥做基肥(插秧后返青肥面施)、分蘖肥(分蘖初期面施)、穗肥(幼穗分化期面施)和粒肥(抽穗期面施)施用,施用量分别为 20%, 20%, 40% 和 20%;钾肥分 2 次施用,分蘖肥和穗肥各 50%;基肥施用硫酸锌 7.5 kg/hm²。

本试验于 2017 年 6、7、8、10 月取水稻植株及土壤样品,并于 2017 年 11 月在青岛农业大学生物楼进行样品指标的测定。水稻种植制度为单季稻,供试水稻品种为“津粳 253”,进行插秧栽培方式,每穴插秧 5 株,行距 13 cm,株距 25 cm。供试肥料为常规化肥:

尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)、硫酸钾(含 K₂O 50%)。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系形态指标的测定 分别于水稻分蘖期、孕穗期、抽穗期、成熟期时取水稻植株,用缓慢的水流将根系洗净,将每株水稻秧苗根系不定根剪下,于盛有去离子水的无色透明水槽中,用镊子调整根的位置避免交叉重叠。使用根系扫描仪(日本 EPSON1680)扫描水稻根系,利用 WinRHIZO 根系分析系统(Regent Instruments Inc, Canada)分析扫描的根系图片,获得根系形态指标数据。水稻秧苗根系形态性状包括根长度、根表面积和根体积。每小区 3 株水稻秧苗根系各项指标平均值,为该小区水稻秧苗根系形态指标数据。

1.3.2 稻田土壤中速效磷、全磷含量的测定 参考鲍士旦^[10]《土壤农化分析》。

1.3.3 水稻产量及其构成因素的测定 水稻成熟时,每个小区分别选取有代表性的植株 6 穴和有代表性的 1 m² 水稻植株,带回室内考察农艺性状和产量性状。其中有代表性的 6 穴植株测定指标主要有穗数、穗长、一次枝梗数、二次枝梗数、实粒数,计算结实率、千粒质量;取回 1 m² 水稻植株晾干后称取每平方米水稻籽粒质量,计算出产量。

1.3.4 水稻成熟期籽粒中养分含量的测定 将水稻籽粒在 105 ℃ 杀青 30 min,65 ℃ 烘干至恒重,计算其

生物量;然后将籽粒研磨粉碎,用于全磷的测定^[10],计算出籽粒中磷积累量。

1.4 数据统计方法

所有数据采用 Office 2010 和 SPSS(IBM SPSS Statistics 22)软件进行数据处理及双因素显著性检验。不同处理采用多重比较 LSD 法在 0.05 水平进行差异显著性检验,多重比较采用 Duncan 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻各生育期根系总根长的影响

从表 1 可以看出,各时期不同磷水平下水稻根系总根长平均值无显著性差异。与土壤施硅相比,喷施硅肥水稻生育期根系的总根长最长,且与 Si3 处理相比差异性显著。以孕穗期、抽穗期为例,孕穗期时,P1 水平,Si4 处理水稻根系总根长显著高于 Si2、Si3 处理 17.37% 和 17.71%。在 P2 水平下,Si4 处理水稻根系总根长显著高于 Si2、Si3 处理;方差分析可知,磷与硅对水稻根系总根长影响差异极其显著,磷与硅的交互作用对水稻根系的总根长无显著性影响。抽穗期时,在 P1 水平下,Si4 处理的根系总根长达各生育期最高值 69.44 m,显著高于 Si2、Si3 处理 16.02%,20.37%;在 P2 水平下,Si4 处理的根系总根长显著高于 Si1、Si2、Si3 处理;方差分析可知,磷与硅对水稻根系总根长影响差异显著,磷与硅的交互作用对水稻根系的总根长无显著性影响。

表 1 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻各生育期根系总根长的影响 单位:m

时期	P1				平均	P2				平均	方差分析 F		
	Si0	Si1	Si2	Si3		Si0	Si1	Si2	Si3		P	Si	P×Si
分蘖期	40.99±1.02c	48.43±2.14ab	42.91±4.45bc	54.25±4.99a	46.65±0.99A	41.95±4.07b	47.83±6.17ab	41.23±1.34b	52.93±6.03a	45.99±3.38A	NS	***	NS
孕穗期	41.86±2.21c	51.82±4.68b	51.67±5.02b	60.82±4.04a	51.54±1.73A	42.79±3.01c	50.44±3.61b	50.50±3.50b	59.17±4.66a	50.72±1.34A	***	***	NS
抽穗期	56.13±6.35b	59.85±3.78ab	57.69±6.14b	69.44±5.12a	60.78±1.93A	54.81±4.69b	58.43±3.67b	56.18±5.50b	67.16±4.20a	59.14±2.38A	*	*	NS
成熟期	43.80±2.31c	55.96±5.94b	50.73±5.16bc	68.66±9.06a	54.79±4.46A	42.38±5.01c	54.65±4.64b	49.04±4.65bc	65.75±4.86a	52.95±3.20A	***	***	NS

注:不同小写字母表示在给定磷肥水平下配施硅肥的所有处理差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示在每个磷肥水平下的平均值差异显著($p<0.05$);***、**、* 和 NS 分别代表达到 0.1%、1%、5% 显著水平与不显著。下同。

2.2 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻各生育期根系总表面积的影响

从表 2 可以看出,各时期不同磷水平下水稻根系总表面积平均值无显著性差异。分蘖期时,2 个磷水平下,Si4 处理的根系总表面积均显著高于 Si2、Si3 处理,而 Si2、Si3 处理间无显著性差异,二者根系总表面积均显著高于不施用硅肥处理。孕穗期时,P1 水平下,Si4 处理的水稻根系总表面积最大,高出 Si2、Si3 处理 11.73%,16.83%。抽穗期时,在 P1 水平下,Si4 处理水稻根系总表面积显著高出 Si2、Si3 处理 18.69% 和 23.31%,Si2、Si3 处理无显著性差异;在 P2 水平下,Si4 处理水稻根系总表面积显著高出

Si2、Si3 处理 17.79% 和 23.54%;施用硅肥处理根系总表面积均显著高于不施用硅肥各处理。成熟期时,Si4 处理的根系总表面积均显著高于 Si2、Si3 处理,各处理的总表面积均有所减小,可能是根系活力降低、衰老所致。方差分析可知,硅对水稻根系总表面积的影响极其显著。

2.3 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻各生育期根系总体积的影响

从表 3 可以看出,分蘖期时,P1 水平下,Si2、Si4 处理间无显著性差异,Si4 处理显著提高于 Si3 处理;在 P2 水平下,Si4 处理水稻根系总表面积显著高出 Si2、Si3 处理 28.90% 和 34.22%。孕穗期与抽穗期

时,2 个磷水平下,Si4 处理水稻根系总表面积均显著高于 Si2、Si3 处理,Si2、Si3 处理无显著性差异。成熟期时,在 P1 水平下,Si4 处理水稻根系总表面积均显著高于 Si2、Si3 处理,分别高出 14.05% 和 22.27%;在 P2 水平下,Si4 处理显著高于 Si3 处理,高出 17.29%,

Si2、Si3 处理无显著性差异。

由方差分析可知,磷对各生育期水稻根系总体积均无显著性影响,硅对各生育期水稻根系总体积影响达到极其显著水平,磷与硅的交互作用对土壤全磷含量无显著性影响。

表 2 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻各生育期根系总表面积的影响

单位:cm²

时期	P1				平均	P2				平均	方差分析 F		
	Si0	Si1	Si2	Si3		Si0	Si1	Si2	Si3		P	Si	P×Si
分蘖期	7.23±1.37c	12.47±0.50b	11.10±1.02b	15.88±1.82a	11.67±0.77A	7.84±2.37b	11.74±1.10b	10.34±2.52b	15.89±1.84a	11.45±1.56A	NS	***	NS
孕穗期	9.06±1.01b	16.28±1.11a	15.57±1.40a	18.19±1.92a	14.78±1.32A	8.60±1.45c	16.63±1.48ab	13.26±2.18b	17.75±2.63a	14.06±1.84A	NS	***	NS
抽穗期	15.73±1.61c	22.42±1.41b	21.58±2.73b	26.61±2.44a	21.59±1.51A	13.49±1.31c	21.92±1.89b	20.90±2.53b	25.82±1.42a	20.53±1.69A	NS	***	NS
成熟期	12.62±1.47c	20.45±1.27b	19.49±2.17b	23.86±1.80a	19.11±1.63A	11.71±1.58c	19.13±2.51b	17.72±1.11b	23.28±2.43a	17.96±1.30A	NS	***	NS

表 3 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻各生育期根系总体积的影响

单位:cm³

时期	P1				平均	P2				平均	方差分析 F		
	Si0	Si1	Si2	Si3		Si0	Si1	Si2	Si3		P	Si	P×Si
分蘖期	20.71±1.46b	23.66±1.16ab	20.90±4.53b	27.73±1.26a	23.25±1.32A	20.04±1.66b	21.21±4.00b	20.37±2.02b	27.34±1.54a	22.24±1.54A	NS	***	NS
孕穗期	28.66±2.51c	42.53±2.25b	41.66±2.09b	47.96±1.94a	40.20±0.64A	27.96±1.00c	42.14±2.41b	40.81±2.87b	46.82±1.42a	39.43±0.99A	NS	***	NS
抽穗期	33.37±2.58c	62.35±6.45b	60.33±6.10b	76.86±6.08a	58.23±4.60A	31.04±2.71c	61.36±7.62b	59.89±8.00b	74.19±3.70a	56.62±4.77A	NS	***	NS
成熟期	46.9±1.85d	95.51±5.28bc	89.09±3.14c	108.93±10.70a	85.11±5.00A	46.39±4.60d	94.76±4.64bc	86.56±2.98c	101.53±8.84ab	82.31±3.79A	NS	***	NS

2.4 磷肥配施硅肥对盐渍土壤速效磷含量的影响

从表 4 可以看出,与未施用硅肥相比,硅肥的施用可提高土壤速效磷含量,且不同施硅方式对土壤中速效磷含量影响不同。各生育期不同磷水平下土壤速效磷含量平均值无显著性差异,且低磷(P1)水平时叶面喷硅(Si4)与土壤施硅(Si2、Si3)处理相比能显著提高水稻分蘖期、孕穗期和抽穗期时土壤中速效磷含量。以分蘖期为例,在 P1 水平下,Si4 处理速效磷含量显著高于 Si2、Si3 处理,分别高出 35.16%,

27.47%。P2 水平时,叶面喷施硅肥显著提高了分蘖期土壤速效磷含量,而不同施硅方式对水稻孕穗期、成熟期土壤速效磷则差异性不显著。由方差分析可知,水稻 4 个生育期中,磷对水稻土壤中速效磷含量无显著性影响,而硅对土壤速效磷含量影响极其显著,孕穗期磷与硅的交互作用对土壤中速效磷含量有显著性影响,其他时期无显著性影响。综上,土壤施硅可提高土壤中速效磷含量,且喷施硅肥对提高稻田土壤速效磷含量效果更佳。

表 4 磷肥配施硅肥对盐渍土壤速效磷含量的影响

单位:mg/kg

时期	P1				平均	P2				平均	方差分析 F		
	Si0	Si1	Si2	Si3		Si0	Si1	Si2	Si3		P	Si	P×Si
分蘖期	6.03±0.05c	10.61±0.54b	11.25±2.22b	14.34±1.16a	10.56±0.60A	8.42±0.52c	11.54±0.80b	12.12±0.83bc	13.36±0.62a	11.36±0.35A	NS	***	NS
孕穗期	5.82±0.75c	10.02±1.03b	11.01±1.02b	13.53±1.85a	10.10±1.06A	7.94±0.91b	11.04±1.06a	11.06±0.91a	12.14±1.22a	10.55±0.57aA	NS	***	*
抽穗期	5.21±0.71c	9.54±0.50b	10.42±0.52b	12.06±1.09a	9.31±0.27A	6.46±0.50c	10.54±0.94ab	10.41±0.52b	11.96±1.00a	9.84±0.53A	NS	***	NS
成熟期	5.03±0.96c	8.89±1.02b	9.85±0.79ab	11.16±0.77a	8.73±0.67A	5.46±0.50b	9.39±0.54a	9.86±1.22a	10.06±1.91a	8.69±0.76A	NS	***	NS

2.5 磷肥配施硅肥对盐渍土壤全磷含量的影响

从表 5 可以看出,土壤中土施和喷施硅肥,均可提高土壤磷含量。各生育期不同磷水平下土壤全磷含量平均值无显著性差异。分蘖期与孕穗期时,不同磷水平下施用硅肥处理土壤全磷含量显著高于不施用硅肥处理,且施用不同施硅处理间无显著性差异。抽穗期时,在 P1 水平下,施用硅肥的 Si2、Si3、Si4 处理土壤全磷含量相比于 Si1 处理提高 19.93%~33.89%;在 P2 水平下,施用硅肥的 Si2、Si3、Si4 处理土壤全磷含量相比于 Si1 处理提高 35.49%~46.54%,且达到显著性水平。成熟期时,在 P1 水平下,土壤施用硅肥处理的含量显著高于不施用硅肥的处理,且各时期土壤全磷含量均低于其他 3 个时期。由方差分析可得,磷与硅对土壤全磷含

量影响均达到极其显著水平,磷与硅的交互作用对土壤全磷含量无显著性影响。综上,不同磷水平下土施和喷施硅肥,可显著提高土壤全磷含量,硅肥施用提高水稻土中磷素含量。

2.6 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻产量及籽粒磷累积量的影响

土壤施硅肥可以显著提高水稻产量,不同的施硅方式对水稻产量影响具有差异性。由图 1a 可知,在 P1 水平下,Si2、Si3 和 Si4 处理间无显著性差异,且理均显著高于 Si1 处理,分别高出 21.12%,15.45%和 16.75%。在 P2 水平下,Si2、Si3 和 Si2 处理间无显著性差异,3 个处理均显著高于 Si1 处理,分别高出 22.48%,15.85%和 17.49%。各相同硅肥处理下,

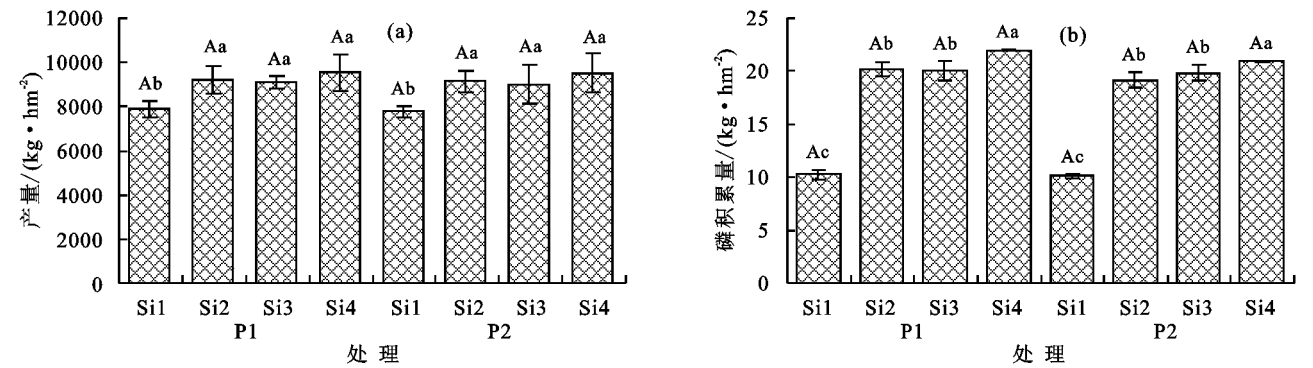
不同磷肥处理间均无显著性差异,表明土壤施硅肥可显著提高水稻产量,相较于土施硅肥,喷施硅肥的处理产量提高效果更佳。

喷施或土施硅后可提高籽粒中磷含量,由图 1b 可知,不同磷水平下,施用硅肥处理磷积累量均显著高于不施用硅肥处理。在 P1 水平下,Si2、Si3 处理间无

显著性差异,Si4 处理速效磷含量比 Si2、Si3 处理显著高出 8.46%和 9.68%;在 P2 水平下,Si2、Si3 处理间无显著性差异,Si4 处理速效磷含量比 Si2、Si3 处理显著高出 9.23%,5.70%。综上所述,水稻施用硅肥,可显著提高籽粒中磷含量,其中喷硅肥对提高水稻籽粒中磷含量最有效。

表 5 磷肥配施硅肥对盐渍土壤全磷含量的影响 单位:g/kg

时期	P1					P2					方差分析 F		
	Si0	Si1	Si2	Si3	平均	Si0	Si1	Si2	Si3	平均	P	Si	P×Si
分蘖期	0.62±0.03b	0.79±0.08a	0.83±0.07a	0.86±0.04a	0.77±0.03A	0.62±0.04b	0.94±0.05a	0.96±0.05a	0.97±0.03a	0.87±0.03A	***	***	NS
孕穗期	0.61±0.09b	0.77±0.06a	0.78±0.07a	0.81±0.08a	0.74±0.06A	0.60±0.04b	0.89±0.08a	0.90±0.04a	0.96±0.05a	0.84±0.04A	***	***	NS
抽穗期	0.60±0.05c	0.72±0.04b	0.76±0.04ab	0.81±0.02a	0.72±0.03A	0.62±0.07b	0.85±0.05a	0.86±0.05a	0.91±0.01a	0.81±0.03A	***	***	NS
成熟期	0.53±0.03b	0.70±0.05a	0.71±0.04a	0.75±0.05a	0.67±0.02A	0.59±0.03c	0.81±0.04b	0.85±0.05ab	0.90±0.06a	0.79±0.02A	***	***	NS



注:不同小写字母表示在给定磷肥水平下配施硅肥的所有处理差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示在给定硅水平下配施磷肥的所有处理差异显著($p<0.05$)。

图 1 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻产量及籽粒磷积累量的影响

2.7 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻产量构成因素的影响

由表 6 可知,各生育期不同磷水平下水稻有效穗数和穗长平均值间无显著性差异。不同磷水平下,各处理水稻有效穗数和穗长间均无显著性差异。从千粒重看,在 P1 水平下,千粒重为 Si4>Si2>Si3>Si1,且均达显著性水平,其中 Si4 比 Si2 增加 12.13%;在 P2 水平下,Si4 处理水稻结实率显著高于 Si2、Si3 处理 9.31%和 14.59%,Si2、Si3 处理间无显著性差异。二

次枝梗数在 P2 水平下,Si2、Si3 和 Si4 处理间无显著性差异,三者均显著高于 Si2。在 P1 水平下,Si4 处理穗实数粒数最高,显著高于 Si1、Si2 和 Si3 处理;在 P2 水平下,施用硅肥处理,显著高于不施用硅肥处理。不同磷水平下均为 Si4 处理结实率最高,其中 P1 水平下达到显著水平。由方差分析可知,磷对水稻千粒重无显著性影响,硅对水稻千粒重、穗实粒数及结实率有极其显著性影响。

表 6 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻产量构成因素的影响

时期	P1					P2					方差分析 F		
	Si0	Si1	Si2	Si3	平均	Si0	Si1	Si2	Si3	平均	P	Si	P×Si
有效穗数	12.00±2.00b	12.60±0.36ab	12.30±0.52ab	14.20±0.35a	12.78±0.66A	12.25±1.64a	12.56±1.15a	12.80±2.71a	13.30±1.21a	12.73±0.55A	NS	NS	NS
穗长	13.03±1.78b	14.63±1.09ab	14.07±0.90ab	15.87±1.51a	14.40±0.92A	13.27±1.42a	14.86±0.80a	14.16±0.77a	15.36±2.56a	14.41±0.94A	NS	*	NS
千粒重	18.86±0.80d	22.84±0.77b	21.34±0.59c	25.61±0.54a	22.16±0.62A	18.03±1.05c	22.56±0.51b	21.52±0.50b	24.66±0.57a	21.69±0.42A	NS	***	NS
一次枝梗数	10.02±1.75a	11.08±1.67a	11.08±1.01a	12.74±2.21a	11.23±1.28A	10.43±1.25a	11.86±2.41a	10.86±1.03a	10.18±1.74a	10.83±0.72A	NS	NS	NS
二次枝梗数	13.72±1.44c	19.65±1.51ab	17.07±1.67bc	21.75±3.93a	18.05±0.96A	13.21±1.54b	19.08±1.88a	19.04±2.60a	20.52±2.82a	17.96±1.16A	NS	***	NS
穗实粒数	142.20±2.03c	154.83±2.50b	152.55±5.49b	162.47±2.73a	153.01±0.82A	139.67±6.51b	152.33±2.61a	151.98±2.52a	156.43±1.40a	150.10±0.97A	NS	***	NS
结实率	79.71±2.15c	88.05±2.68b	88.55±2.59b	94.93±2.90a	87.81±2.27A	79.45±3.35b	87.08±4.71ab	86.07±5.17ab	92.03±2.05a	86.16±1.42A	NS	***	NS

2.8 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻经济效益的影响

从经济效益角度(表 7)来看,水稻种植过程中机械化、肥料投入支出比重较大。本试验条件下,土施硅肥处理纯收入高于不施用硅肥处理时,表明滨海盐碱地稻田土壤增施硅肥,尽管由于硅肥投入增加成本,但经济

效益显著提高。而在低磷或高磷施用条件下,叶面喷施硅肥(P1Si4、P2Si4)处理收入分别达到 14 953.6,14 323.2 元/hm²,由于水稻叶面喷施硅肥支出较低,同时水稻产量增加,经济效益最佳;由于低磷条件下,磷肥投入低,同时叶面喷施硅肥(P1Si4 处理)时水稻经济效益最高。

表 7 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻经济效益的影响

处理	肥料投入/(元·hm ⁻²)				其他投入/ (元·hm ⁻²)	总投入/ (元·hm ⁻²)	总收入/ (元·hm ⁻²)	纯收入/ (元·hm ⁻²)
	氮肥	磷肥	钾肥	硅肥				
P1	Si1	1385.0	500.0	2015.4	0	4000.0	7900.4	18918.0
	Si2	1385.0	500.0	2015.4	750	4000.0	8650.4	18651.6
	Si3	1385.0	500.0	2015.4	1500	4000.0	9400.4	22086.0
	Si4	1385.0	500.0	2015.4	60	4000.0	7960.4	21913.2
P2	Si1	1385.0	1000.0	2015.4	0	4000.0	7900.4	21841.2
	Si2	1385.0	1000.0	2015.4	750	4000.0	8650.4	21607.2
	Si3	1385.0	1000.0	2015.4	1500	4000.0	9400.4	22914.0
	Si4	1385.0	1000.0	2015.4	60	4000.0	7960.4	22843.5

注:肥料价格为当地肥料平均售价,水稻价格为收获当年本地水稻平均价格。

3 讨论

3.1 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻土壤磷有效性的影响

磷是作物生长发育所必需的营养元素,在土壤中移动性较差,易被土壤固定,进而影响土壤中磷的有效性^[11]。土壤中有效磷的含量影响着作物的生长发育,而硅肥可显著提高土壤中磷素的有效性,不同的施硅方式对土壤中磷素的有效性影响不同^[12]。有研究^[13]表明,施硅可显著提高土壤中速效磷含量。相比于土施硅肥,喷施硅肥对水稻土壤中磷素有效性提升较显著^[14]。本研究表明,施用相同磷肥的处理,配合施用硅肥的土壤中有有效磷含量显著高于不配施硅肥处理,这与人^[15]研究结果相似。分蘖期、孕穗期和成熟期,P1Si4 处理的有效磷含量均显著高于 P1Si2、P1Si3 处理,可见低磷条件下,喷施硅肥对水稻的土壤中磷有效性提高效果最佳,较优于土施硅肥处理。1991 年 Jianfeng 等^[16]发现,在低磷水平时,施用硅肥减少铁、锰等金属离子对植物毒害,提高缺磷植株体内磷酸的移动性和利用率;屠雯雯等^[17]研究表明,土壤中施用硅肥降低土壤有机结合态磷含量,促使磷转化为有效磷,提高有效磷含量,使作物吸收的磷含量增加。本研究发现,稻田土壤喷硅后,土壤中磷有效性含量高于土施硅肥的处理,其原因可能是水稻喷硅后,影响水稻养分的纵向运输,进而影响水稻根系分泌物,使盐碱土壤中 pH 降低,使得土壤中磷酸盐活性增加,这有待进一步研究。在相同的硅肥处理下,施用不同量的磷肥,在水稻籽粒中养分的积累量不同,这与前人^[18]研究结果相似。本试验中,施用 128 kg/hm²磷肥的处理,籽粒中磷的积累量要低于施用 64 kg/hm²磷肥的处理,其原因可能是磷肥的过量施用影响了水稻的生理作用,促使养分向籽粒中运移数量减少。由土壤全磷数据可知,施用 128 kg/hm²磷的 P1Si4、P2Si2 及 P2Si4 处理的全磷含量较高

于施用 64 kg/hm²磷的 P1Si2、P1Si3 及 P1Si4 处理的全磷含量,可见过多磷肥的施用会提高土壤中全磷含量,但对土壤中速效磷含量提高效果不佳,其原因可能是过多磷肥的施用,土壤被固定的磷也有所增加,并不会使得土壤中有效态磷含量增加。

3.2 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻根系生长的影响

根系是水稻吸收养分的主要器官,根长、根表面积和根体积在水稻吸收养分方面起着举足轻重的作用^[19]。在土壤中施用硅肥,可提高土壤中有有效磷的含量,进而促进水稻根系的生长。有研究^[20]表明,稻田中施用硅肥,可促进作物根系的生长,提高根系活力。本研究表明,施用硅肥的各处理,水稻根系的总根长、总体积和总表面积均高于不施用硅肥的各处理,且 P1Si4 处理的总根长、总体积和总表面积均高于其他处理,与 P2Si4 处理无显著性差异,这与人^[21]研究结果相似。试验处理 P1Si4、P2Si4 的根系总根长、总体积和总表面积在生育后期,减小趋势较小,其原因可能是:(1)喷施硅肥后,硅元素参与植物体养分的代谢,调节抗氧化酶活性,可增强水稻的抗逆境能力,从而延缓了根系的衰老^[22]。(2)施用硅肥可使水稻体内的通气性增强,增强根系的氧化能力,进而促进根系的生长,延缓根系衰老^[23]。根系的生长优劣影响着水稻产量,本试验中,在盐碱地中施用硅肥可显著促进水稻根系的生长,提高水稻根系吸收养分的面积,从而提高养分利用,提高水稻产量。

3.3 磷肥配施硅肥对盐渍土壤水稻产量及其构成因素的影响

水稻作为一种典型的喜硅作物,在稻田中施用硅肥可提高水稻产量^[24]。有研究^[25]表明,水稻土壤中施用硅肥可显著提高水稻产量,且随施用量变化而变化。本研究表明,土壤中施用硅肥的水稻产量显著高于不施用硅肥的 P1Si1、P2Si1 处理,P1Si2~P2Si4 处理的水稻产量无显著性差异,这与人^[26]研究结果相似。水稻产量提升的原因可能是施用硅肥后提高

了水稻的有效穗数、实粒数及结实率,进而提高水稻产量^[27]。本研究中,喷施硅肥的 P1Si4 处理水稻的有效穗数最高,P1Si4、P2Si4 处理的千粒重显著高于其他处理,P1Si4 处理的每穗实粒数最高,显著高于其他处理。土施硅肥及喷施硅肥的处理,土壤中磷素含量均高于不施用硅肥的处理。有研究^[28]表明,水稻产量与土壤有效磷含量呈正相关关系。本研究中,施用硅肥的处理在养分的有效性 & 根系的生长方面均呈现出较佳状态,养分有效性高的土壤会促进水稻根系的生长,而根系生长好得水稻对提高水稻产量提升有促进作用^[29],这可能是本试验中施用硅肥水稻产量高的原因。

4 结论

(1)滨海盐渍化稻田土壤中不同磷水平配施硅肥可增加水稻根系的总根长、总根表面积、总根体积。本试验条件下,以 P1Si4 处理(叶面喷硅,磷 64 kg/hm²)效果最佳,P1Si4 与 P2Si4 处理间无显著性差异。

(2)滨海盐渍化稻田土壤中不同磷水平配施硅肥可显著提高土壤磷含量及籽粒磷积累量,且喷施效果更佳。本试验条件下,以 P1Si4 处理(叶面喷硅,磷 64 kg/hm²)效果最佳。

(3)滨海盐渍化稻田土壤中不同磷水平配施硅肥可提高水稻产量、有效穗数及实粒数。本试验条件下,使用硅肥的各处理水稻产量均显著高于不施用硅肥处理,施用硅肥处理间无显著性差异。

(4)滨海盐渍化稻田土壤中不同磷水平配施硅肥可提高水稻经济效益,喷施硅肥的经济效益最佳,P1Si4 处理带来的经济效益最高。

综上,在滨海盐渍化稻田土壤中,不同磷水平配施硅肥可显著提高土壤有效磷含量,促进根系生长,提高水稻产量,提高水稻经济效益,且喷施硅肥效果总体上优于土施处理。在本试验条件下,P1Si4 处理,喷施硅肥与磷 64 kg/hm² 效果最佳。

参考文献:

[1] Nishigaki T, Tsujimoto Y, Rinasoa S, et al. Phosphorus uptake of rice plants is affected by phosphorus forms and physicochemical properties of tropical weathered soils[J]. Plant and Soil, 2018, 435(1/2): 27-38.

[2] Wu L P, Zhang S R, Wang J, et al. Phosphorus retention using iron (II/III) modified biochar in saline-alkaline soils: Adsorption, column and field tests[J]. Environmental Pollution, 2020, 261: 1-9.

[3] 丁效东, 张士荣, 娄金华, 等. 有机肥与磷肥配施对滨海盐渍化土壤磷素淋洗风险的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(7): 1169-1173.

[4] Greger M, Landberg T, Vaculik M. Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species[J]. Plants, 2018, 7(2): 41-56.

[5] 杨丹, 田甜, 闫颖, 等. 外源硅对碱性土壤磷位及磷有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2052-2056.

[6] 陈涛. 水溶性硅肥喷施对水稻产量及经济性状的影响[J]. 湖南农业科学, 2018, 398(11): 61-63.

[7] 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): 1653-1663.

[8] 瞿廷广, 施正连, 丁江妹. 硅肥对直播水稻的抗逆性和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2003(5): 26-28.

[9] 张梦璇, 董智, 李红丽, 等. 不同白榆品系对滨海盐碱地的改良效果及盐分离子的分布与吸收[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 342-347.

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[11] 李仁英, 沈孝辉, 谢晓金, 等. 施硅对土壤—水稻系统中磷迁移的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 423-428.

[12] 彭华, 田发祥, 魏维, 等. 不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉硅的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1027-1033.

[13] 余喜初, 李大明, 黄庆海, 等. 过氧化钙及硅钙肥改良潜育化稻田土壤的效果研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 138-146.

[14] 兰倩. 低温胁迫下硅对土壤养分有效性和水稻养分吸收的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.

[15] 朱从桦, 张嘉莉, 郭翔, 等. 硅磷肥配施提高四川春玉米的氮磷钾吸收和产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1603-1611.

[16] Jianfeng M A, Takahashi E. Effect of silicate on phosphate availability for rice in a P-deficient soil[J]. Plant and Soil, 1991, 133(2): 151-155.

[17] 屠雯雯, 宋照亮, 王旭东, 等. 硅磷配施对水稻土中不同磷组分含量及有效性的影响[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(6): 1596-1601.

[18] 朱从桦, 谢孟林, 郭萍, 等. 硅、磷配施对玉米氮钾养分吸收利用的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1489-1496.

[19] 陈晨, 龚海青, 张敬智, 等. 水稻根系形态与氮素吸收累积的相关性分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 333-341.

[20] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 不同调理剂对酸性土壤降酸效果及大麦幼苗生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3): 118-124.

[21] 朱瑾, 许金凤, 任昀霏, 等. 叶面喷施有机硅对草地早熟禾幼苗生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 110-116.

[22] 刘红芳. 硅对水稻倒伏和白叶枯病抗性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.

提取施加熟污泥后黄土中 Cd 的对比研究[J].环境工程,2019,37(5):34-38.

[12] 李晓洁.试论土壤中的重金属检测样品前处理技术[J].世界有色金属,2019(7):222-223.

[13] 胡秉芬,黄华梨,季元祖,等.分光光度法测定叶绿素含量的提取液的适宜浓度[J].草业科学,2018,35(8):1965-1974.

[14] 侯建伟,邢存芳,邓晓梅,等.花椒林下土壤微生物数量和酶活性对生物质炭的响应[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(4):89-96.

[15] 信艳杰,胡晓娟,曹煜成,等.光合细菌菌剂和沼泽红假单胞菌对实验水体氮磷营养盐和微生物群落的影响[J].南方水产科学,2019,15(1):31-41.

[16] 肖根林,白红娟,贾万利.光合细菌对土壤中 Cd 形态分布的影响[J].化工技术与开发,2011,40(3):43-45.

[17] 白红娟,肖根林,贾万利.光合细菌减少蔬菜中 Pb、Cd 及呋喃丹污染的研究[J].中国土壤与肥料,2013(2):94-99.

[18] 白红娟.光合细菌改善 Cd、Pb 及呋喃丹污染土壤的微生物群落 DNA 序列多样性的研究[J].环境污染与防治,2011,33(11):24-28.

[19] 李晓晴.枯草芽孢杆菌对花生镉积累的影响机制研究[D].济南:山东师范大学(山东省农业科学院试验场),2013.

[20] 王丽丽,杨谦.接种枯草芽孢杆菌和丛枝菌根真菌促进红三叶修复石油污染土壤[J].江苏农业科学,2016,44(5):526-529.

[21] Dixit R, Wasiullah, Malaviya D, et al. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes[J].Sustainability,2015,7(2):2189-2212.

[22] Paz-Ferreiro J, Lu H, Fu S, et al. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: A review[J].Solid Earth,2014,5(1):65-75.

[23] 唐文忠,孙柳,单保庆.土壤/沉积物中重金属生物有效性和生物可利用性的研究进展[J].环境工程学报,2019,13(8):1775-1790.

[24] 陈海涛.利用微生物肥料进行土壤生态修复治理的研究[J].化工管理,2019(3):192-193.

[25] 黄成涛,黄位权,史鼎鼎,等.一株耐铅镉真菌 Q7 对香根草吸收累积重金属的效应[J].应用与环境生物学报,2018,24(4):901-907.

[26] Jiang Q Y, Zhuo F, Long S H, et al. Can arbuscular mycorrhizal fungi reduce Cd uptake and alleviate Cd toxicity of *Lonicera japonica* grown in Cd-added soils? [J].Scientific Reports,2016,6(1):21805.

[27] Chai L Y, Huang S H, Yang Z H, et al. Cr (VI) remediation by indigenous bacteria in soils contaminated by chromium-containing slag[J].Journal of Hazardous Materials,2009,167(1/3):516-522.

[28] Xu J B, Feng Y Z, Wang Y L, et al. Effect of *Rhizobacterium Rhodopseudomonas palustris* inoculation on stevia rebaudiana plant growth and soil microbial community[J].Pedosphere,2018,28(5):793-803.

[29] Cao S M, Wang W K, Wang F, et al. Drought-tolerant *Streptomyces pactum* Act12 assist phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Amaranthus hypochondriacus*: Great potential application in arid/semi-arid areas [J]. Environmental Science and Pollution Research,2016,23(15):14898-14907.

(上接第 269 页)

[23] Geng A, Wang X, Wu L, et al. Silicon improves growth and alleviates oxidative stress in rice seedlings (*Oryza sativa* L.) by strengthening antioxidant defense and enhancing protein metabolism under arsenic acid exposure[J].Ecotoxicology and Environmental Safety,2018,158:266-273.

[24] 韦还和,孟天瑶,李超,等.施硅量对甬优系列籼粳交超级稻产量及相关形态生理性状的影响[J].作物学报,2016,42(3):437-445.

[25] 由高峰,张广龙,韩东来.水稻施硅肥试验总结[J].北方水稻,2006(6):106-106.

[26] 周青,潘国庆,施作家,等.不同时期施用硅肥对水稻群体质量及产量的影响[J].耕作与栽培,2001(3):25-27.

[27] 王艳红,邓国季,戴鹏,等.喷施叶面硅肥对 Y 两优 143 产量的影响[J].杂交水稻,2017,32(4):51-53.

[28] Kekulandara D S, Sirisena D N, Bandaranayake P C G, et al. Variation in grain yield, and nitrogen, phosphorus and potassium nutrition of irrigated rice cultivars grown at fertile and low-fertile soils[J].Plant and Soil,2019,434:107-123.

[29] 朱从桦,孙永健,杨志远,等.晒田强度和穗期氮素运筹对不同氮效率水稻根系、叶片生长及产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):199-206,259.