

# 有机-无机配施对盐渍土壤水稻生长及养分利用的影响

陈猛猛<sup>1</sup>, 张士荣<sup>1</sup>, 吴立鹏<sup>1</sup>, 刘盛林<sup>2</sup>, 孙泽强<sup>2</sup>, 娄金华<sup>3</sup>, 魏立兴<sup>3</sup>, 丁效东<sup>1</sup>

(1.青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 2.山东省农业科学院农业资源环境研究所, 济南 250100; 3.山东省东营市农业科学研究院, 山东 东营 257091)

**摘要:** 针对滨海盐渍化土壤水稻种植过程中根系生长受盐碱胁迫, 导致养分利用率低的问题。采用田间试验研究了有机肥与磷肥配施对滨海盐渍化土壤水稻不同生育期根系生长、水稻产量及养分利用率的影响。试验采用双因素设计, 3个碳水平: (1) C<sub>0</sub>: 无碳; (2) C<sub>1</sub>: 低碳, 450 kg/hm<sup>2</sup>; (3) C<sub>2</sub>: 高碳, 900 kg/hm<sup>2</sup>; 3个磷水平: (1) P<sub>0</sub>: 无磷; (2) P<sub>1</sub>: 低磷, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 64 kg/hm<sup>2</sup>; (3) P<sub>2</sub>: 高磷, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 128 kg/hm<sup>2</sup>。结果表明, 在水稻成熟期, 低碳低磷(T<sub>5</sub>)处理时根系总表面积显著高于高碳低磷(T<sub>7</sub>)和高碳高磷(T<sub>8</sub>)处理, 分别增加 25.2% 和 30.2%; 低碳处理(T<sub>5</sub>、T<sub>6</sub>)时根系总体积显著高于高碳处理。T<sub>5</sub> 处理时水稻产量、生物量显著高于其他处理, 分别为 10 245, 9 550 kg/hm<sup>2</sup>。结实率较高是低碳低磷(T<sub>5</sub>)处理水稻产量最高的原因。低碳低磷(T<sub>5</sub>)处理时糙米 P 积累量最高, 显著高于 T<sub>6</sub>、T<sub>7</sub>、T<sub>8</sub> 处理, 分别高出 13.9%, 27.8%, 31.2%。T<sub>5</sub> 处理的磷肥贡献率和农学效率显著高于其他施磷肥处理。磷肥偏生产力表现为低磷投入显著高于高磷投入。综上所述, 与单独施用无机肥相比, 有机肥与磷肥配施能够显著促进滨海盐渍化土壤水稻根系生长, 提高水稻产量及磷肥农学效率, 其中低碳低磷(T<sub>5</sub>, C 450 kg/hm<sup>2</sup> + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 64 kg/hm<sup>2</sup>)处理最有利于盐渍化土壤水稻根系生长。

**关键词:** 盐碱地; 磷; 养分利用率; 肥料偏生产力

中图分类号: S158.3; S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0311-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.044

## Effects of Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers on Rice Growth and Agronomic Efficiency in Saline Soil

CHEN Mengmeng<sup>1</sup>, ZHANG Shirong<sup>1</sup>, WU Lipeng<sup>1</sup>, LIU Shenglin<sup>2</sup>,  
SUN Zeqiang<sup>2</sup>, LOU Jinhua<sup>3</sup>, WEI Lixing<sup>3</sup>, DING Xiaodong<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109; 2. Agricultural Resources and Environment Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100; 3. Dongying Academy of Agricultural Science, Dongying, Shandong 257091)

**Abstract:** Aiming at the salinity stress problems in rice root growth in the paddy soil of coastal saline-alkali soil, and the consequent low nutrients use efficiency, a field experiment was conducted to study the effects of combined application of organic and phosphate fertilizers on root growth in different growth stages, yield and nutrients use efficiency of rice in coastal saline soil. The experiment had two factors, including three carbon levels: (1) C<sub>0</sub>: no carbon; (2) C<sub>1</sub>: low carbon, 450 kg/hm<sup>2</sup>; (3) C<sub>2</sub>: high carbon, 900 kg/hm<sup>2</sup>, and three phosphate fertilization (P) levels: (1) P<sub>0</sub>: no P; (2) P<sub>1</sub>: low P, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 64 kg/hm<sup>2</sup>; (3) P<sub>2</sub>: high P, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 128 kg/hm<sup>2</sup>. Results showed that the total root surface area of T<sub>5</sub> treated with low carbon and low P was significantly higher than those of high carbon and low phosphorus treatments (T<sub>7</sub>) and high carbon and high phosphorus treatments (T<sub>8</sub>), which increased by 25.2% and 30.2%, respectively. The total root volumes of low carbon treatments (T<sub>5</sub>, T<sub>6</sub>) were significantly higher than that of high carbon treatment in the harvest stage of rice. The rice yield and biomass of T<sub>5</sub> were 10 245 and 9 550 kg/hm<sup>2</sup>, respectively, and higher than others treatments. High seed setting rate was the reason for the highest yield of rice treated with low carbon and low P (T<sub>5</sub>) treatment. P accumulation of rice in low carbon and low P (T<sub>5</sub>) treatment was significantly higher than those in T<sub>6</sub>, T<sub>7</sub> and T<sub>8</sub> treatments, which were higher than 13.9%, 27.8% and 31.2%, respectively. The fertilizer contribution rate (FCR) and agronomic efficiency (AE) of P fertilizer under T<sub>5</sub>

收稿日期: 2019-04-08

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(栽培与土肥岗位, SDAIT-17-05); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2017MC015)

第一作者: 陈猛猛(1994—), 男, 山东邹城人, 本科, 主要从事土壤磷素高效循环利用研究。E-mail: mengmengchen2018@163.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

treatment were significantly higher than others treatments. The partial fertilizer productivity (PFP) P fertilizer was significantly higher at low P input than that of high P input. In conclusion, compared with only inorganic fertilizer, combined application of organic fertilizer with P fertilizer could significantly promote rice root growth, increase rice yield and agronomic efficiency of P fertilizer in coastal saline soil. Low carbon and low P ( $T_5$ ,  $C_{450}$   $kg/hm^2$  and  $P_2O_5$   $64$   $kg/hm^2$ ) treatment was the most favorable for rice root growth in coastal saline soil.

**Keywords:** saline-alkali soil; phosphorus; nutrient use efficiency; partial fertilizer productivity (PFP)

我国盐碱地面积约占全国耕地面积的 10%<sup>[1]</sup>, 其中滨海盐碱地占我国盐碱地总面积的 40%<sup>[2]</sup>。黄河三角洲滨海盐碱地作为我国重要的后备耕地资源, 其地下水位较浅, 降雨量较少, 加之水分蒸发过快且蒸发量大, 极易导致表层土壤中盐分的大量积累, 从而抑制作物生长发育, 作物产量及肥料利用率低<sup>[2]</sup>。因此, 合理开发滨海盐碱地, 促进作物良好生长, 对于保障作物稳产高产、提高肥料利用率都有重要意义, 是保障实施“渤海粮仓”战略的重要举措。

通过“以稻治盐”措施可以实现盐碱地高效利用, 作为一种重要的耐盐碱作物, 水稻种植过程中伴随长期灌水, 盐分也会随之下移, 从而降低土壤的含盐量<sup>[3]</sup>, 提高水稻成活率。然而, 单纯灌溉压盐并不能满足水稻的良好生长, 盐碱地中土壤盐分含量较高, 易使分蘖数大幅降低, 结实率下降, 导致水稻产量质量下降等一系列问题<sup>[4]</sup>。水稻根系作为其从土壤中获取水分和养分的重要门户, 当水稻遭受盐碱危害时, 直接受到抑制的部位是作物的根系。此外, 根系生长对水稻地上部的生长发育和养分利用率有重要影响, 对水稻产量的提升也起着举足轻重的作用<sup>[5]</sup>。因此, 盐碱地水稻种植应减少盐分对根系的影响, 从而保护水稻根系生长发育, 减少盐分对其胁迫。

有研究<sup>[6]</sup>报道, 有机肥能够促进水稻根系的深扎, 调节水稻根系的形态结构和生长。长期以来, 有机肥与无机肥配施备受人们关注。陈贵等<sup>[7]</sup>研究表明, 施用有机肥可以增加水稻产量。长期有机无机肥配施可以显著提高水稻籽粒和秸秆生物量, 改善土壤地力, 进而提高水稻产量<sup>[8]</sup>。当地农民传统种植习惯为追求水稻的高产而过量施用无机肥料, 造成养分利用率降低, 土壤肥力下降, 同时导致养分大量淋失<sup>[9]</sup>。据报道<sup>[10]</sup>, 我国肥料的利用率偏低, 磷肥的利用率仅 10%~25%, 当土壤受盐碱胁迫时, 肥料利用率则会更低<sup>[11]</sup>。有研究<sup>[12]</sup>表明, 由于滨海盐碱地的成土特性对养分固持能力较弱, 尤其是磷素。磷肥的大量施用, 极易导致磷素的淋失, 从而导致磷肥利用率较低, 造成水体污染。在滨海盐渍化稻田土壤中, 有机无机肥配施对水稻生育期根系生长、产量及肥料养分利用的影响鲜有报道, 本研究通过 4 年有机肥和磷肥配施对滨海盐渍化土壤水稻生育期根系形态、养分效率及水稻产量构成因素的研究, 寻求适合滨海盐渍化土壤

水稻种植的有机肥与磷肥配方, 以为滨海盐碱地水稻高产稳产的施肥提供理论依据。

## 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 ( $37^{\circ}31'16.17''N, 118^{\circ}32'28.96''E$ ), 年平均气温  $12.8$   $^{\circ}C$ , 年平均降水量  $555.9$   $mm$ 。分别于 2017 年 6, 7, 8, 10 月取水稻植株及土壤样品。供试土壤类型为轻度盐渍化滨海潮土, 试验地初始时 (2014 年) 有机质含量  $8.4$   $g/kg$ , 全氮、全磷和全钾含量分别为  $1.1, 0.34, 1.1$   $g/kg$ , 速效磷和速效钾含量分别为  $17, 229$   $mg/kg$ , 含盐量为  $0.3\%$ , 土壤 pH  $8.1$ 。

### 1.2 试验设计

本试验设置磷 ( $P_2O_5$ ) 和有机肥 (C) 二因素。其中, 磷 ( $P_2O_5$ ) 分为 3 个水平: (1)  $P_0$  (无磷), 不施磷肥; (2)  $P_1$  (低磷), 即  $P_2O_5$   $64$   $kg/hm^2$ ; (3)  $P_2$  (高磷), 即  $P_2O_5$   $128$   $kg/hm^2$ 。有机肥 (C) 分为 3 个水平: (1)  $C_0$  (无碳): 不施有机肥; (2)  $C_1$  (低碳): 低碳,  $C$   $450$   $kg/hm^2$ , 相当于施用有机肥  $1\ 000$   $kg/hm^2$ ; (3)  $C_2$  (高碳): 高碳,  $C$   $900$   $kg/hm^2$ , 相当于施用有机肥  $2\ 000$   $kg/hm^2$ 。具体处理为: (1)  $T_1$  (CK), 无肥对照; (2)  $T_2$  ( $C_0 - P_0$ ), 无磷; (3)  $T_3$  ( $C_0 - P_1$ ), 低磷; (4)  $T_4$  ( $C_0 - P_2$ ), 高磷; (5)  $T_5$  ( $C_1 - P_1$ ), 低碳低磷; (6)  $T_6$  ( $C_1 - P_2$ ), 低碳高磷; (7)  $T_7$  ( $C_2 - P_1$ ), 高碳低磷; (8)  $T_8$  ( $C_2 - P_2$ ), 高碳高磷。每个处理 3 次重复, 小区面积为  $15$   $m^2$  ( $3$   $m \times 5$   $m$ ), 采取随机排列。供试肥料为尿素 (含 N  $46\%$ )、过磷酸钙 (含  $P_2O_5$   $16\%$ )、硫酸钾 (含  $K_2O$   $50\%$ )、商品有机肥 (C  $45\%$ , N  $2.4\%$ , P  $1.6\%$ , K  $1.4\%$ )。除无肥对照外, 各处理均施用氮 (N) 肥  $255$   $kg/hm^2$ , 钾 ( $K_2O$ ) 肥  $229$   $kg/hm^2$ 。其中 N 肥  $20\%$  做基肥 (插秧前施肥)、 $40\%$  分蘖肥 (分蘖初期面施)、 $20\%$  穗肥 (幼穗分化期面施) 和  $20\%$  粒肥 (抽穗期面施); 磷肥全部作基肥施用; 钾肥分 2 次施用, 分蘖肥和穗肥各  $50\%$ ; 此外, 水稻分蘖期施用硫酸锌  $7.5$   $kg/hm^2$ 。

水稻品种为“圣稻 14”。播种方式为人工插秧栽培, 每穴插秧 5 株, 行距  $13$   $cm$ , 株距  $25$   $cm$ 。为防止串肥, 各小区之间采用  $5$   $mm$  厚的 PVC 塑料板材隔开, PVC 隔板宽度  $40$   $cm$ , 其中嵌入土层以下  $20$   $cm$ , 泥面以上保留  $20$   $cm$ 。

### 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 水稻产量及其构成因素的测定 水稻成熟期时,每个小区分别选取 6 穴和 1 m<sup>2</sup> 水稻植株,带回室内分别考察产量构成因素及水稻的产量。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,计算结实率和千粒质量;取回 1 m<sup>2</sup> 水稻植株晾干后称取每平方米水稻籽粒质量,计算出产量。

1.3.3 水稻秸秆生物量及成熟期不同器官养分含量

将水稻植株分为糙米、秸秆分别在 105 °C 杀青 30 min、65 °C 烘干计算其生物量。然后将糙米和秸秆研磨粉碎,用于全氮、全磷、全钾的测定<sup>[13]</sup>。

1.3.4 养分利用效率计算 利用参数来表征肥料的利用效率<sup>[14]</sup>:

磷肥贡献率(FCR,%)=(施磷肥区产量-不施磷肥区产量)/施磷肥区产量×100%

磷肥农学效率(AE,kg/kg)=(施磷肥区作物产量-不施磷肥区作物产量)/施磷肥量

肥料偏生产力(PFP,kg/kg)=施肥区产量/施肥量

## 2 结果与分析

### 2.1 有机无机配施对不同生育期水稻根系总根长的影响

从表 1 可以看出,有机无机肥配施的处理(T5、T6、T7、T8)总根长均高于单施无机肥的处理(T2、T3、T4)。分蘖期时,与单施无机肥处理(T2、T3、T4)相比,总根长随磷肥施用量的增加呈增加趋势。孕穗期时,有机无机肥配施处理(T5、T6、T7、T8)总根长显著高于单施无机肥处理(T2、T3、T4),且有机无机肥配施的处理间没有显著性差异;同一施磷量,T5 处理总根长显著高于 T3 处理,高出 52.7%,T7 处理总根长显著高于 T3 处理,高出 35.0%。抽穗期时,有机无机肥配施的处理间低碳处理总根长显著高于高碳处理的总根长。成熟期时,T5、T6、T7、T8 处理水稻根系显著高于 T2、T3、T4 处理,T5 和 T7 处理总

根长显著高于 T3 处理,分别高出 46.0%和 36.0%。T6 和 T8 处理总根长显著高于 T4 处理,分别高出 41.0%和 26.2%。综上,与其他处理相比,T5 处理时最有利于水稻根系的总根长生长。

表 1 有机无机配施对不同生育期水稻根系总根长的影响

单位:m				
处理	分蘖期	孕穗期	抽穗期	成熟期
T1	13.1±4.6d	28.0±2.9d	34.5±4.4d	29.4±3.4c
T2	37.3±6.1c	38.3±5.2cd	35.9±8.7cd	30.8±4.6c
T3	39.8±5.6bc	41.7±10.5bc	42.3±7.8bcd	42.2±4.4b
T4	43.5±3.8abc	40.8±5.0bc	47.7±2.1bc	43.3±6.1b
T5	49.0±7.1ab	63.7±7.3a	67.5±1.4a	61.6±5.2a
T6	48.3±3.3abc	53.9±9.0a	64.9±5.9a	61.0±9.0a
T7	52.0±8.8a	56.3±5.4a	52.9±7.8b	57.3±5.7a
T8	48.1±6.0abc	58.5±7.6a	50.6±8.9b	54.6±8.6a

注:表中数据为平均值±标准差;每列数据后不同小写字母表示各处理在 P<0.05 水平上差异显著。下同。

### 2.2 有机无机配施对不同生育期水稻根系总表面积的影响

从表 2 可以看出,分蘖期时,各处理的根系总表面积均高于空白处理(T1),且差异显著,有机无机肥配施处理间无显著性差异。孕穗期时,T5、T6 处理的总表面积高于其他各处理,且差异显著,单施无机肥处理(T2、T3、T4)无显著性差异;有机无机配施时,低量有机肥施用时的根系总体积显著高于高量有机肥施用的处理。抽穗期时,T5 处理根系总表面积大于其他处理,且差异显著;T2 处理根系总表面积显著低于 T3、T4 处理。可见,施用磷肥可促进水稻根系的总体积的增加。在低磷条件下,T5 处理根表面积显著高于 T3 和 T7 处理,分别高出 58.3%,27.7%;成熟期时,T5 处理的根系总表面积高于 T6、T7 和 T8 处理,分别高出 15.5%,25.2%和 30.2%,显著高于 T7 和 T8 处理。

表 2 有机无机配施对不同生育期水稻根系总表面积的影响

单位:cm <sup>2</sup>				
处理	分蘖期	孕穗期	抽穗期	成熟期
T1	2.2±0.8b	5.9±0.6b	6.7±0.5c	7.6±0.5c
T2	6.4±1.5a	8.2±1.4b	8.4±0.2c	10.1±1.6c
T3	7.6±1.1a	8.1±1.2b	12.5±2.1b	14.3±2.0b
T4	7.5±1.3a	6.7±0.8b	13.3±2.3b	15.6±2.0b
T5	8.5±2.0a	14.1±2.6a	19.8±2.6a	20.4±2.8a
T6	8.3±2.1a	13.8±2.2a	15.5±2.3b	17.7±2.5ab
T7	9.0±2.8a	6.4±0.5b	15.5±2.1b	16.3±1.8b
T8	9.0±2.6a	7.2±0.9b	15.3±2.4b	15.7±2.1b

### 2.3 有机无机配施对不同生育期水稻根系总体积的影响

从表 3 可以看出,分蘖期时 T7 处理根系总体积最高,其次是 T5 处理。T5、T7 处理根系总体积分别显著高于 T3 处理 38.1%和 50.6%;T5 处理的根系总体积显著高于 T6 处理,T7 处理的根系总体积也

显著高于 T8 处理。孕穗期时,总根体积趋势为 T5>T6>T4>T7>T3>T2>T8>T1,且 T5 显著高于其他处理,分别高出 45.7%,112.1%,157.7%,181.7%,205.8%,209.6%,352.0%;T5 处理的总根体积显著高于 T6 处理。在抽穗期,T5、T6 根系总体积无显著差异,T5 处理显著高于 T3 处理 60.8%。在成熟期,T5 处理的根系总体积最高,有机无机配施处理的根系总体积显著高于单施无机肥的处理;T5、T6 处理的根系总体积显著高于 T7、T8 处理。

表 3 有机无机配施对不同生育期水稻根系总根体积的影响  
单位:cm<sup>3</sup>

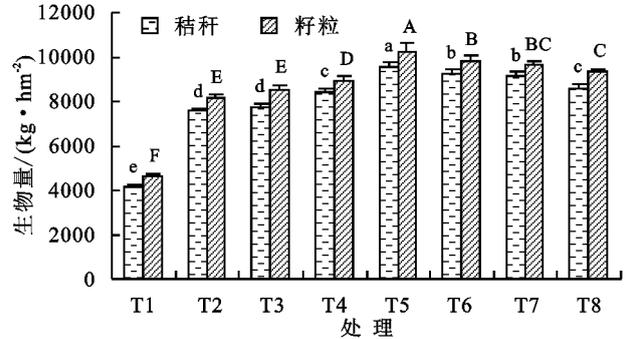
处理	分蘖期	孕穗期	抽穗期	成熟期
T1	8.4±1.1f	15.5±1.3e	25.2±2.3d	27.6±4.4e
T2	17.8±1.2e	22.9±2.0de	33.0±3.6cd	40.6±5.7d
T3	22.3±1.7d	24.8±2.9c	30.1±2.8cd	51.8±7.2cd
T4	22.6±1.7d	33.0±3.5c	50.3±7.6a	57.5±2.7c
T5	30.8±3.4ab	70.0±7.7a	73.4±9.3a	100.3±9.1a
T6	25.2±2.0cd	48.0±6.7b	53.1±7.2a	98.8±9.5a
T7	33.6±3.7a	27.2±4.3cd	38.8±4.8bc	76.6±7.0b
T8	27.9±3.1bc	22.6±1.6de	47.7±3.8ab	69.8±7.5b

#### 2.4 有机无机配施对秸秆生物量和水稻产量的影响

从图 1 可以看出,单施无机肥时,T4 处理的产量显著高于 T3 处理,高出 5.0%;T5 处理的水稻产量显著高于 T6 处理,高出 4.1%;在高碳条件下,T7 处理的水稻产量高于 T8 处理,高出 3.4%;其原因可能由于供试土壤的有效磷含量为 17 mg/kg,施用磷过多不一定能够达到预期的增产效果。T5 处理的籽粒产量最高,比 T1、T2、T3、T4、T6、T7、T8 处理分别高出 121.0%,25.6%,20.2%,14.5%,4.1%,6.2%和 9.8%,且差异显著;有机无机配施的处理(T5、T6、T7、T8)的籽粒产量显著高于单施无机肥处理(T2、T3、T4)的籽粒产量;T5 处理的籽粒产量显著高于 T6 与 T7 处理的籽粒产量,增幅分别为 4.1%与 6.2%;且低碳低磷(T5,450 kg/hm<sup>2</sup>+64 kg/hm<sup>2</sup>)处理下籽粒产量最高。可见,在有机肥与无机肥适当配比下水稻产量达到最高。

从秸秆生物量来看,T1 处理显著低于其他处理,T5 处理秸秆生物量最高,高达 9 563 kg/hm<sup>2</sup>,并且显著高于其他处理,比 T1、T2、T3、T4、T6、T7、T8 处理分别提高 129.3%,26.2%,23.2%,13.8%,3.5%,

4.4%,11.5%;与 T1 处理相比,施用无机肥的 T2、T3、T4 处理秸秆生物量分别增加 81.8%,86.1%,101.4%,且达到显著水平;T5 处理比 T3 处理的秸秆生物量增加 23.1%且达到显著水平。总体上看,秸秆生物量与水稻产量之间呈正相关,配施有机肥后,两者均显著增加,并且在低碳低磷处理下籽粒产量和秸秆生物量最高。



注:大写字母与小写字母分别表示各处理籽粒生物量与秸秆生物量在 P<0.05 差异显著。

图 1 有机无机肥配施对秸秆生物量和水稻产量的影响

#### 2.5 有机无机肥配施对水稻产量构成因素的影响

由表 4 可知,从水稻产量构成因素来看,各处理的有效穗数均高于空白处理(T1)且达到显著水平,其中 T5 处理时有效穗数最多,与 T1 处理相比增加 122.7%;有机无机肥配施的的处理之间有效穗数无显著差异。各处理间的穗长无显著差异,其中 T5 处理的穗长与其他处理相比最长,达到 16.97 cm。从一次枝梗数来看,T5 处理的一次枝梗数最高,且 T1 处理以外的各处理间的差异不显著;从二次枝梗数来看,T5 处理和 T6 处理显著高于其他处理,T7 处理和 T8 处理二次枝梗数接近。从每穗粒数来看,T5 处理的每穗粒数最高,分别显著高于 T3、T7 处理 44.3%,43.3%;T6 处理分别显著高于 T4、T8 处理 18.3%,11.8%。从千粒重来看,T5 和 T8 处理的千粒重显著高于其他处理,其中 T8 处理的千粒重最高,达到 26.92 g,比 T1、T2、T3、T4、T6、T7、T8 处理分别提高 8.96,5.37,4.75,3.67,0.40,2.06,2.34 g;从结实率来看,T5 处理的结实率最高,其次为 T6 处理。同一磷肥施用量,T5 显著高于 T7 处理的结实率,T6 与 T8 与之类似。

表 4 有机无机配施对水稻产量构成因素的影响

处理	有效穗数/个	穗长/cm	一次枝梗数/个	二次枝梗数/个	每穗实粒数/个	千粒重/g	结实率/%
T1	6.4±2.2b	11.4±2.6a	7.7±1.3b	8.1±1.0c	88.1±5.5e	18.2±0.8e	58.7±2.9d
T2	9.0±3.1ab	14.8±3.0a	10.9±2.0ab	12.6±2.5b	112.5±9.0d	21.6±0.4d	72.1±3.9c
T3	11.4±3.1ab	14.7±3.0a	12.0±2.6ab	13.2±1.9b	122.1±6.4cd	22.2±0.8cd	76.3±3.1bc
T4	11.5±3.8ab	13.9±2.9a	10.2±2.1ab	14.7±2.0b	120.0±7.2cd	23.3±0.8c	77.2±3.0bc
T5	14.1±4.0a	17.0±3.3a	12.9±3.5a	20.8±2.2a	176.2±11.8a	26.5±0.7a	89.9±2.8a
T6	13.0±3.5a	14.8±3.0a	12.7±3.3ab	21.3±2.4a	141.9±6.9b	24.9±0.6b	80.6±2.8b
T7	13.9±3.1a	15.5±3.2a	11.4±3.0ab	16.3±2.3b	123.0±4.4cd	24.6±0.4b	70.8±4.8c
T8	13.1±3.4a	14.6±3.1a	11.1±2.7ab	15.6±1.7b	126.9±6.9c	26.9±0.9a	72.1±3.1c

## 2.6 有机无机肥配施对水稻养分积累量的影响

由表 5 可知,糙米中 N 的积累量最高的为 T5 处理,达 82.16 kg/hm<sup>2</sup>,显著高于其他处理;T5 处理比 T6、T7 和 T8 处理的 N 含量分别提高 6.8%,10.3% 和 12.6%。可见,本试验有机无机肥配施中,低碳低磷配施条件下有利于 N 在糙米中积累。同样,T5 处理秸秆 N 的积累量最高,且 T2~T8 处理的无显著性差异。糙米中 P 积累量最高为 T5 处理,相比于

表 5 有机无机肥配施对水稻养分积累量的影响

单位:kg/hm<sup>2</sup>

处理	N		P		K	
	糙米	秸秆	糙米	秸秆	糙米	秸秆
T1	29.2±1.2e	25.7±2.2b	5.1±0.6f	4.1±0.4c	10.2±2.1d	82.6±2.9d
T2	55.6±0.8c	51.1±1.9a	8.2±0.7e	4.7±0.7cd	21.2±1.3ab	119.3±7.4b
T3	47.1±1.8d	54.0±2.7a	11.1±1.1d	5.2±0.3ab	20.5±0.8c	121.6±10.1b
T4	58.2±2.1c	53.8±3.3a	13.4±1.7d	5.3±0.3ab	19.7±2.1c	114.2±4.2bc
T5	82.2±2.9a	54.3±2.9a	22.6±1.1a	4.6±0.3cd	23.6±1.0a	149.1±9.1a
T6	77.0±4.3b	51.3±2.2a	19.9±2.4b	4.6±0.5cd	23.6±1.2a	103.0±5.2c
T7	74.5±2.7b	52.3±2.3a	17.7±1.6bc	6.0±1.1a	21.2±1.3ab	124.3±7.4b
T8	73.0±3.5b	51.2±1.3a	17.3±1.4c	4.9±0.3cd	20.5±1.8c	111.6±2.9bc

## 2.7 有机无机肥配施对水稻养分利用率的影响

从表 6 可以看出,T5 处理的磷肥贡献率最高,显著高于其他处理,比 T6 处理提高 19.3%,比 T7 处理提高 32.5%。从磷肥农学利用率来看,T5 的农学利用率最高,比 T6、T7、T8 处理分别显著提高 19.5, 9.4,23.5 kg/kg。各处理间 N 和 K<sub>2</sub>O 的偏生产力无显著性差异,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的偏生产力 T5、T6 最高,且显著高于其他处理,其次是 T3 处理,可见低磷投入的偏

T6 处理提高 13.9%,达到显著差异水平,比 T7 处理提高 27.8%;T7 处理时,P 在秸秆中的积累量最高。秸秆中的 K 积累量高于糙米中的,在糙米中,T6 处理的积累量最高,T5 处理的积累量与 T6 处理相近。在秸秆中,低碳低磷处理(T5)的积累量分别显著高于 T1、T2、T3、T4、T6、T7、T8 处理,高出 80.6%,25.0%,22.6%, 30.6%,44.7%,20.0%,33.6%。总体上看,配施有机肥能显著增加地上部干物质中 NPK 的积累量。

生产力显著高于高磷投入的偏生产力,且在低碳低磷配施条件下 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的偏生产力最高;在高磷条件下,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的偏生产力无显著性差异,在低磷条件下,加入有机肥(碳)使得 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 偏生产力显著升高,可见有机肥的投入,有利于提升磷肥的偏生产力。总体上看,有机无机肥配施对磷肥贡献率、磷肥农学效率和肥料偏生产力均有显著提升,其中低碳低磷处理(T5)的养分利用率与 T6、T7、T8 处理相比提升显著。

表 6 有机无机肥配施对水稻养分利用率的影响

处理	磷肥 贡献率/%	磷肥农学效率/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	偏生产力/(kg·kg <sup>-1</sup> )		
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
T1	—	—	—	—	—
T2	—	—	36.3±3.7a	—	35.6±3.5a
T3	4.2±0.7e	5.6±1.0d	37.9±3.4a	133.1±9.2b	37.2±3.8a
T4	8.8±1.2d	6.1±1.2d	39.8±3.6a	69.9±7.5c	39.1±4.1a
T5	20.4±2.7a	32.6±3.4a	45.5±5.9a	160.1±9.8a	44.7±5.2a
T6	17.1±1.7b	13.1±1.7c	43.7±5.9a	76.9±8.7c	43.0±5.2a
T7	15.4±1.2b	23.2±2.1b	42.9±5.4a	150.7±9.0a	42.1±5.2a
T8	12.5±1.2c	9.1±1.2d	41.5±5.2a	72.9±7.8c	40.7±5.2a

## 3 讨论

### 3.1 有机无机肥配施对滨海盐碱地水稻根系形态的影响

根系作为水稻吸收养分的主要器官,其根长、根表面积和根体积在水稻获取养分方面起着举足轻重的作用<sup>[15]</sup>。肥料的高效利用与根系的形态有着密切关系,良好的根系形态是水稻高产的基础。当水稻受到盐碱胁迫时,直接受到抑制的部位是根系,因此水稻的根系生长状况对盐碱地水稻高产尤为重要。有机肥中含有多种化合物,相比于无机肥,更能促进水稻在盐碱地中的生长。有研究<sup>[16]</sup>表明,单独施用

无机肥在一定程度上可促进作物根系的生长,但其效果并不显著。还有研究<sup>[17-18]</sup>表明,有机肥施用能够显著促进根系的生长发育,增加根系在土壤中的分布,使在土壤深处的根系分布增加,提高水稻根系活力。本研究表明,除分蘖期外的生育期,在低磷的条件下,配施有机肥的水稻根系总根长、总表面积、总体积显著高于不施有机肥的处理,这与伍从成等<sup>[19]</sup>的研究类似。T5、T6 处理的总表面积和总体积在生育期内呈现出增加的趋势,并且 T7、T8 处理的总根长、总表面积、总根体积在整个生育期内同样出现增加的趋势。原因可能是:(1)有机肥中含有各种有机化合物

对根系共同作用的结果<sup>[20]</sup>; (2)施用有机肥会增加土壤中激素的含量,这些激素是由土壤中微生物合成有利于促进根系的生长,延缓根系的衰老<sup>[20-21]</sup>,使得整个生育期内水稻根系呈现增加趋势。同时,有机肥中含有多种养分,能够促进水稻根系的生长<sup>[22]</sup>。在本试验中,水稻成熟期时,T5、T6、T7、T8处理的根系总根长显著高于T2、T3、T4,并且T5、T6处理的根系总体积显著高于T7、T8处理。可见,施用低量有机肥更有利于水稻根系的生长。施用有机肥能够促进水稻根系的生长,其中T5处理相对于其他各处理对水稻根系的生长最有利,且水稻根系的总根长、总表面积、总体积与产量呈极显著正相关(表7)。

### 3.2 有机无机肥配施对滨海盐碱地水稻产量及养分吸收利用的影响

前人<sup>[23-24]</sup>已对长期有机无机肥配施对水稻产量及养分利用率的影响做了大量研究,但对于不同配比的有机肥与无机肥对盐碱地水稻产量的影响鲜有报道。本研究表明,与单独施用无机肥相比,有机肥无机肥配施能够显著增加水稻产量,这与前人<sup>[25-26]</sup>研究结果一致。有机无机肥配施能够满足水稻生育前期的速效养分的需求,促进有效穗数和结实率的增加,进而使水稻产量增加。在本研究中,T5处理的有效穗数和结实率均为最高,且结实率显著高于本试验其他各处理,产量和有效穗数、结实率呈极显著正相关(表7)。与前人<sup>[27]</sup>研究结果一致。T5处理的产量最高,比T1、T2、T3、T4、T6、T7、T8处理产量分别增加121.0%,25.6%,20.2%,14.5%,4.1%,6.2%和9.8%。可见,适量有机肥与磷肥施用量增产效果显著。

有机无机肥配施增加了地上部N、P、K养分的积累量,在糙米中,N的积累量在T5处理最高,达82.16 kg/hm<sup>2</sup>,且显著高于其他处理;在配施有机肥的处理(T5、T6、T7、T8)中,T5处理比T6、T7和T8处理的N含量分别提高6.8%,10.3%和12.6%;在糙米中,磷的积累量配施有机肥后显著高于不配施有机肥的处理,T5处理的P在糙米中的积累量显著高于T7 27.8%。在水稻秸秆中,K的积累量T5为最高,达149.1 kg/hm<sup>2</sup>。适量有机肥磷肥配施能够提高水稻地上部养分积累量,主要是因为有机肥本身含

有一定数量的磷(主要为有机磷),这部分磷易于分解释放;在有机肥施入土壤后可增加有机质含量,而有机质可减少无机磷的固定,并促进无机磷的溶解<sup>[28]</sup>。此外,有机肥与无机肥配施有利于土壤氮素有效性的增加,且具有持续性<sup>[12]</sup>,同时土壤中钾与有机肥呈一定的正相关<sup>[29]</sup>,导致有机肥施入后使得土壤中养分利用率显著增加,进而地上部养分积累量增加。此外,与有机无机肥配施相比,陈贵等<sup>[7]</sup>同时研究发现,单独施用有机肥也可增加水稻地上部的干物质积累及氮、磷的累积量。这主要是因为有机肥施用后,在很大程度上提高土壤氮、磷、钾有效养分和有机质含量,尤其是在土壤生产力较差的滨海盐碱地。

本研究表明,单施化肥处理(T2、T3、T4)的磷肥贡献率、磷肥农学效率整体表现为较低,这可能是由于盐碱地对磷素的固持能力较弱,导致磷淋溶,以及土壤溶液中含有大量钙离子降低磷素有效性<sup>[25]</sup>。有机无机配施后有效提高了磷肥在盐碱地的利用率,其中低碳低磷处理(T5)对提高磷肥的贡献率和农学效率效果最佳,分别达20.4%,32.6 kg/kg。本试验中,有机无机配施可提高磷贡献率、农学效率,这与前人<sup>[30]</sup>研究结果一致。此外,各处理施入的N、K<sub>2</sub>O的量相同,N、K<sub>2</sub>O的偏生产力无显著性差异。对于P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,施用少量磷的偏生产力显著高于施用多量磷的偏生产力,表明磷肥过量施用并没有提高水稻偏生产力,反而会使偏生产力降低。在磷肥低量施用条件下,配施低量有机肥,对于增产效果最佳,磷素在地上部积累量也最高。有研究<sup>[15]</sup>表明,施肥可以通过调整N、P、K在水稻体内的吸收和分配来影响产量的形成。本研究中,与对照相比,施肥显著提高了水稻器官中氮、磷、钾的累积量。与单施无机肥相比,有机无机配施显著影响了糙米中氮、磷的累积,其中以T5处理最为显著。水稻产量与水稻器官中的氮、磷累积量呈显著正相关,与张奇春等<sup>[31]</sup>研究结果一致。研究还发现,钾元素主要分布在水稻的秸秆中,氮、磷养分则主要集中在糙米中,表明施肥可影响水稻器官对营养元素的吸收。主要与水稻吸收养分时先向糙米中转移,而施肥后各器官均有提高,但是对糙米中的含量变化较小有关<sup>[32]</sup>。

表7 水稻根系形态、产量构成因素及产量的相关性

指标	总根长	总表面积	总根体积	有效穗数	结实率	产量
总根长	1	0.805**	0.890**	0.717**	0.612**	0.801**
总表面积		1	0.817**	0.693**	0.797**	0.843**
总体积			1	0.750**	0.728**	0.813**
有效穗数				1	0.617**	0.773**
结实率					1	0.803**
产量						1

注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平上极显著相关。

## 4 结论

(1)长期有机无机配施可以增加滨海盐碱地水稻根系的总根长、总根表面积、总根体积。在本试验条件下,以碳有机肥 1 000 kg/hm<sup>2</sup>,磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)64 kg/hm<sup>2</sup>配合施用后对水稻根系的总根长、总根表面积、总根体积增加效果最佳。

(2)长期有机无机合理配施可增加滨海盐碱地水稻产量、秸秆生物量以及有效分蘖数和结实率。在本试验条件下,有机肥 1 000 kg/hm<sup>2</sup>,磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)64 kg/hm<sup>2</sup>配合施用产量高达 10 245 kg/hm<sup>2</sup>,结实率最高达 89.93%。

(3)长期有机无机合理配施可增加滨海盐碱地水稻地上部养分的积累量,提高养分利用率。在本试验设计中,施用磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)64 kg/hm<sup>2</sup>的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 偏生产力显著高于施用磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)128 kg/hm<sup>2</sup>的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 偏生产力,配施少量有机肥的处理 T5、T6 的磷肥贡献率及农学效率均显著高于其他处理,表明有机肥合理配施磷肥对提高磷肥利用率有提高的作用。

综上,滨海盐碱地水稻种植体系中,合理的磷肥使用量配合低量有机肥能够起到促进水稻根系生长、提高水稻产量及提高养分利用率的效果。在本试验条件下有机肥 1 000 kg/hm<sup>2</sup>配施磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)64 kg/hm<sup>2</sup>为最佳配比。

### 参考文献:

- [1] 王佳丽,黄贤金,钟大洋,等.盐碱地可持续利用研究综述[J].地理学报,2011,66(5):673-684.
- [2] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-845.
- [3] Chi C M, Zhao C W, Sun X J, et al. Reclamation of saline-sodic soil properties and improvement of rice (*Oryza sativa* L.) growth and yield using desulfurized gypsum in the west of Songnen Plain, northeast China[J]. Geoderma, 2012, 187: 24-30.
- [4] 荆培培,崔敏,秦涛,等.土培条件下不同盐分梯度对水稻产量及其生理特性的影响[J].中国稻米,2017,23(4):26-33.
- [5] 朱德峰,林贤青,曹卫星.水稻深层根系对生长和产量的影响[J].中国农业科学,2001,34(4):429-432.
- [6] 张义凯,向镜,朱德峰,等.盐碱地耕作及洗盐对水稻根系生长和形态特性的影响[J].中国稻米,2017,23(3):67-70.
- [7] 陈贵,赵国华,张红梅,等.长期施用有机肥对水稻产量和氮磷养分利用效率的影响[J].中国土壤与肥料,2017(1):92-97.
- [8] 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,2014,51(2):314-324.
- [9] Wang J W, Li S W, Zhang Z, et al. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization system for precision rice hill-direct-seeding machine[J].

Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(8): 43-54.

- [10] 杨青林,桑利民,孙吉茹,等.我国肥料利用现状及提高化肥利用率的方法[J].山西农业科学,2011,39(7):690-692.
- [11] 单晶晶,陈小兵,尹春艳,等.黄河三角洲盐碱土冬小麦氮磷肥料效应模型研究[J].中国生态农业学报,2017,25(7):1016-1024.
- [12] 夏瑶,娄运生,杨超光,等.几种水稻土对磷的吸附与解吸特性研究[J].中国农业科学,2002,35(11):1369-1374.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [15] 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.
- [16] 柳开楼,张会民,韩天富,等.长期化肥和有机肥施用对双季稻根茬生物量及养分积累特征的影响[J].中国农业科学,2017,50(18):3540-3548.
- [17] 魏晓兰,吴彩皎,孙玮,等.减量施肥条件下生物有机肥对土壤养分供应及小白菜吸收的影响[J].水土保持通报,2017,37(1):40-44.
- [18] 王玫,徐少卓,刘宇松,等.生物炭配施有机肥可改善土壤环境并减轻苹果连作障碍[J].植物营养与肥料学报,2018,24(1):220-227.
- [19] 伍从成,姜海波,赵静文,等.连续5年施用生物有机肥对梨树根系形态及分布的影响[J].南京农业大学学报,2017,40(3):473-480.
- [20] 李絮花,杨守祥,于振文,等.有机肥对小麦根系生长及根系衰老进程的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(4):467-472.
- [21] 赵隽,董树亭,刘鹏,等.有机无机肥长期定位配施对冬小麦群体光合特性及籽粒产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(8):2362-2370.
- [22] 宋以玲,于建,陈士更,等.化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J].水土保持学报,2018,32(1):352-360.
- [23] 高菊生,秦道珠,刘更另,等.长期施用有机肥对水稻生长发育及产量的影响[J].耕作与栽培,2002(2):31-33.
- [24] Liang B, Yang X Y, He X H, et al. Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(2): 121-128.
- [25] Zhang H M, Xu M G, Shi X J, et al. Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in southern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 88(3):341-349.

- 分流失的影响[J].广西林业科学,2016,45(4):397-403.
- [19] 袁颖红,樊后保,王强,等.模拟氮沉降对杉木人工林土壤有效养分的影响[J].浙江林学院学报,2007,24(4):437-444.
- [20] 林岩,段雷,杨永森,等.模拟氮沉降对高硫沉降地区森林土壤酸化的贡献[J].环境科学,2007,28(3):640-646.
- [21] Zhao W, Cai Z C, Xu Z H. Does ammonium-based N addition influence nitrification and acidification in humid subtropical soils of China? [J]. Plant and Soil, 2007,297(1/2):213-221.
- [22] 鲍勇,高颖,曾晓敏,等.中亚热带 3 种典型森林土壤碳氮含量和酶活性的关系[J].植物生态学报,2018,42(4):508-516.
- [23] 张宇飞,方向民,陈伏生,等.模拟酸雨对红壤区茶树器官氮磷含量及其化学计量比的影响[J].应用生态学报,2017,28(4):1309-1316.
- [24] Singh R K, Dutta R K, Agrawal M. Litter decomposition and nutrient release in relation to atmospheric deposition of S and N in a dry tropical region[J]. Pedobiologia, 2004, 48(4):305-311.
- [25] Kim H, Kang H. The impacts of excessive nitrogen additions on enzyme activities and nutrient leaching in two contrasting forest soils[J]. The Journal of Microbiology, 2011, 49(3):369-375.
- [26] 刘捷豹,陈光水,郭剑芬,等.森林土壤酶对环境变化的响应研究进展[J].生态学报,2017,37(1):110-117.
- [27] 刘红梅,周广帆,李洁,等.氮沉降对贝加尔茅草原土壤酶活性的影响[J].生态环境学报,2018,27(8):1387-1394.
- [28] 肖海兵,李忠武,聂小东,等.南方红壤丘陵区土壤侵蚀—沉积作用对土壤酶活性的影响[J].土壤学报,2016,53(4):881-890.
- [29] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. Ecology Letters, 2008, 11:1252-1264.
- (上接第 310 页)
- [15] 丁克冲,陈邦本,陈铭达.江苏滨海盐土与花碱土脱盐过程中盐碱性状变化的异同[J].南京农业大学学报,1992,15(4):61-67.
- [16] 陈邦本,丁克冲,陈效明,等.如东棉花原种场滨海盐渍土盐性状变化的特点[J].南京农业大学学报,1989,12(3):51-56.
- [17] Wang Q M, Huo Z L, Zhang L D, et al. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China [J]. Agricultural Water Management, 2016, 9(12):125-138.
- [18] 尹建道,姜志林,曹斌,等.滨海盐渍土脱盐动态规律及其效果评价:野外灌水脱盐模拟实验研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2002,26(4):15-18.
- [19] 赵可夫,李法曾,张福锁.中国盐生植物[M].北京:科学出版社,2013.
- [20] 罗雪园,周宏飞,柴晨好,等.不同淋洗模式下干旱区盐渍土改良效果分析[J].水土保持学报,2017,31(2):322-326.
- [21] 翟亚明,何德舜,季亚辉.天津滨海地区原生盐碱土盐分淋洗规律研究[J].灌溉排水学报,2012,31(5):65-68.
- (上接第 317 页)
- [26] 李忠芳,徐明岗,张会民,等.长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续特征[J].应用生态学报,2010,21(5):1264-1269.
- [27] 姜心禄,杨永波,付明全,等.不同直播方式下种子处理方式对直播稻出苗和产量的影响[J].中国稻米,2017,23(4):111-114.
- [28] 赵晓齐,鲁如坤.有机肥对土壤磷素吸附的影响[J].土壤学报,1991,28(1):7-15.
- [29] 陈贵,张红梅,沈亚强,等.猪粪与牛粪有机肥对水稻产量、养分利用和土壤肥力的影响[J].土壤,2018,50(1):59-65.
- [30] 徐一兰,唐海明,程爱武,等.长期不同施肥模式对双季稻田土壤养分及水稻产量的影响[J].华北农学报,2017,32(6):192-197.
- [31] 张奇春,王光火,方斌.不同施肥处理对水稻养分吸收和稻田土壤微生物生态特性的影响[J].土壤学报,2005,42(1):116-121.
- [32] 王伟妮,李小坤,鲁剑巍,等.氮磷钾配合施用对水稻养分吸收、积累与分配的影响[J].华中农业大学学报,2010,29(6):710-714.