

DOI: 10.11766/trxb201908210284

高珊, 杨劲松, 姚荣江, 曹逸凡, 唐冲. 改良措施对苏北盐渍土盐碱障碍和作物磷素吸收的调控[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1219–1229.
GAO Shan, YANG Jingsong, YAO Rongjiang, CAO Yifan, TANG Chong. Effects of Soil Amelioration Measures Mitigating Soil Salinity and Improving Crop P Uptake in Coastal Area of North Jiangsu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1219–1229.

改良措施对苏北盐渍土盐碱障碍和作物磷素吸收的调控*

高珊^{1, 2, 3}, 杨劲松^{1†}, 姚荣江¹, 曹逸凡⁴, 唐冲^{1, 2}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 天津绿茵景观生态建设股份有限公司, 天津 300110; 4. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225000)

摘要: 以苏北轻度盐渍土(D)、中度盐渍土(Z)为研究对象, 展开大麦-玉米轮作田间微区试验, 分析仅施氮肥(CK)、常规施肥(P)及常规施肥下添加生物质炭(PC)、腐植酸(PH)和石膏(PG)处理对土壤盐分含量、pH和钠吸附比(SAR)以及作物磷素吸收利用的影响。结果表明: 苏北滨海盐渍土壤盐分呈明显的季节性变化模式, 各改良措施对0~20 cm土壤盐碱的调控作用较20~40 cm明显。石膏处理对土壤盐碱障碍的消减作用显著, DPG、ZPG处理下0~20 cm土壤脱盐率分别为31.06%、40.60%, 土壤pH分别降低0.67、0.51个单位。各改良措施均能降低0~20 cm土壤SAR, 降低土壤Na⁺含量, 改善土壤结构。轻度盐渍土上土壤SAR的降幅表现为: DPG>DPH>DPC, 中度盐渍土上表现为: ZPG>ZPC>ZPH。轻度盐渍土上各改良措施均显著促进作物地上部吸磷, 提高作物产量。DPC、DPH、DPG处理的积累磷肥利用率分别为对照的4.9倍、3.5倍、1.8倍。而中度盐渍土上仅ZPC和ZPG处理的增产效果显著, 腐植酸在轻度盐渍土上的调控效果优于中度盐渍土。

关键词: 盐渍土; 盐碱障碍; 磷利用率; 生物质炭; 腐植酸; 石膏

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A

Effects of Soil Amelioration Measures Mitigating Soil Salinity and Improving Crop P Uptake in Coastal Area of North Jiangsu

GAO Shan^{1, 2, 3}, YANG Jingsong^{1†}, YAO Rongjiang¹, CAO Yifan⁴, TANG Chong^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Tianjin LVYIN Landscape and Ecology Construction Co., Ltd, Tianjin 300110, China; 4. College of Environmental Sciences and Engineering, University of Yangzhou, Yangzhou, Jiangsu 225000, China)

Abstract: 【Objective】 In the coastal areas of North Jiangsu exist enormous tracts of mudflat, which are important land reserves for exploitation in China. However, the existence of high soil salinity in the mudflat, once turned into farmland, not only reduces

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0200303)、国家自然科学基金委员会-山东联合基金重点支持项目(U1806215)和中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-112-03-02) Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0200303), the Key Support Program of National Natural Science Foundation of China-Shandong United Foundation (No. U1806215) and the Key Deployment Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KFZD-SW-112-03-02)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jsyang@issas.ac.cn

作者简介: 高珊(1994—), 女, 山东蓬莱人, 硕士研究生, 盐渍土改良与养分高效利用。E-mail: gaoshan@issas.ac.cn

收稿日期: 2019-08-21; 收到修改稿日期: 2019-12-13; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2020-01-15

soil phosphorus availability, but also seriously restrains productivity of the farmland and phosphorus utilization efficiency. Biochar, humic acid and gypsum are considered to have good effects in ameliorating and utilizing the soil. Therefore, the objective of this study is to investigate effects of the use of these soil amendments on soil salinity-alkalinity and crop uptake and utilization of phosphorous in the soil. 【Method】 For that end, a field microplot experiment was carried out in the fields of light saline soil (D) and moderate saline soil (Z), and an indoor pot experiment using the soils from the two fields. The experiments were designed to have five treatments for each of the two soils and three replicates for each treatment. The five treatments included (1) application of N only(CK) ;(2) conventional fertilizer(P) ;(3) conventional fertilizer + biochar(PC) ;(4) conventional fertilizer + humic acid(PH) ;(5)conventional fertilizer + gypsum (PG). The experiment initiated in 2017 under a crop rotation system of Barley-maize. Soil samples were collected from the 0~20 cm and 20~40 cm soil layers of each treatment once at each crop growing stage for analysis of effects of the amendments on soil salt content, soil pH and soil sodium adsorption ratio(SAR)and phosphorus absorption. 【Result】 Results show that soil salt content in the coastal area of Jiangsu varied with the season markedly, that is, salt accumulating in spring, salt leaching in summer, soil uprising in autumn and salt stabilizing in winter. The soil salt controlling effects of the management measures were more significant in the 0~20 cm soil layer than in the 20~40 cm soil layer, especially Treatment PG. Treatment PG reduced the salt content in the 0~20 cm soil layer by 31.06% and 40.60% and soil pH by 0.67 and 0.51 in the soils light and moderate in soil salinity, respectively. Compared with CK, all the amendment treatments were lower in SAR and Na^+ content in the 0~20 cm soil layer, which indicates obvious improvement in soil structure. In terms of decrease in SAR, treatments displayed an order of $\text{PG} > \text{PH} > \text{PC}$ with the soil light in salinity and an order of $\text{PG} > \text{PC} > \text{PH}$ with the soil moderate in salinity. All the amendment treatments promoted P uptake and yield of barley and maize in the soil light in salinity, while only Treatments PC and PG did in the soil moderate in salinity. After two rounds of rotation, in the soil light in salinity, Treatments PC, PH and PG were found to have increased the cumulative phosphate utilization rate by 4.9 times, 3.5 times and 1.8 times that of CK, respectively, while in the soil moderate in salinity only Treatment PC and PG showed similar effects. 【Conclusion】 The saline soil in the coastal area of North Jiangsu varied with the season in soil salt content. The amendment of biochar, humic acid or gypsum can effectively promote removal of soil salt and alkali, thus improving the soil structure. Among all the amendments tested, gypsum is the best in decreasing soil salt content, pH and sodium adsorption ratio. All the amendments significantly promote crop P uptake, and hence increase cumulative phosphorus utilization rate and crop yield in the soil light in salinity. Humic acid shows a better effect in the soil light in salinity than in the soil moderate in salinity.

Key words: Saline soil ; Salinization obstruction ; Phosphorus utilization ; Biochar ; Humic acid ; Gypsum

苏北滨海地区海岸线总长 954 km, 滩涂资源丰富, 围垦历史悠久, 是我国重要的后备土地资源^[1]。受成土过程和成土母质的影响, 苏北滨海地区土壤盐碱障碍严重。土壤中大量 Na^+ 和 Cl^- 抑制作物根系生长及对 Ca^{2+} 、 K^+ 、N 和 P 等养分的吸收, 对作物产生直接的毒害作用^[2]。此外, 土壤电导率升高破坏土壤结构, 造成土壤紧实膨胀、通气透水性差, 表层土壤易板结^[3]。土壤高盐度和高 pH 也会影响土壤微生物群落结构及活性, 降低土壤微生物生物量碳^[4]及碱性磷酸酶等多种酶活性^[5], 严重制约土壤中磷素的形态转化和有效性, 降低磷肥利用率^[6]。因此, 土壤盐碱障碍和磷素有效性低是目前苏北滨海滩涂农业生产过程中存在的重要问题。

长期以来, 世界各国学者针对如何合理地改良、

利用盐渍土进行了大量研究, 土壤调控治理主要围绕水利改良、物理改良、化学改良和生物改良这四个核心方面展开^[7-8]。其中, 化学改良操作简便、成本较低、改良效果稳定, 在盐渍土的改良利用中具有广阔的前景^[9]。众多研究结果^[10-13]表明, 生物质炭、腐植酸和石膏在消减盐碱障碍、提高土壤磷素有效性等方面有良好的效果。生物质炭疏松多孔, 阳离子交换量大, 富含有机碳, 施入土壤中能有效调节土壤结构^[10], 促进微生物的代谢和多种酶的活性^[11], 进而影响土壤中磷素的转化过程; 腐植酸分子含有多种官能团, 有较强的离子交换、吸附、络合能力, 可代换盐渍土中过量的交换性 Na^+ , 改善土壤盐碱指标^[12]; 石膏类物质的主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 其改良机制为增加土壤中 Ca^{2+} 对土壤

胶体上 Na^+ 的替换, 提高土壤阳离子交换量和盐基饱和度, 减轻单盐毒害, 改善土壤盐碱障碍^[13]。

虽然目前国内外关于生物质炭、腐植酸和石膏对盐渍土改良及对磷素有效性影响的报道较多^[14-16], 但是现有研究多侧重于对土壤理化性质的改善、作物产量以及土壤速效养分的测定。关于不同改良剂对于盐碱障碍的消减和磷素有效性提升的内在作用机制研究尚不充分。本研究以苏北滨海轻度、中度盐渍土为研究对象, 采用田间微区试验的方法, 研究不同改良调控措施对盐渍农田盐碱障碍的消减以及作物磷素吸收利用的促进作用, 对于提高苏北滨海盐渍农田磷素利用效率、加速盐碱障碍消减及地力提升具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验区位于江苏省东台市弶港镇条子泥垦区 (32°43'N, 120°50'E), 属于典型滨海新围垦滩涂土壤 (围垦时间 2016 年)。该地区气候温暖, 降雨充沛, 四季分明。年均气温 15.0℃, 年均无霜期 213 d,

年均降水量 1 059 mm, 年均蒸发量为 1 417 mm, 年均日照率 50.4%, 年均相对湿度为 81%。降水量随季节的波动较大, 雨季特征明显。该地区的土壤类型为冲积盐土类, 潮盐土亚类。根据国际制土壤粒级划分标准, 土壤中砂粒 (2~0.02 mm)、粉粒 (0.02~0.002 mm) 和黏粒 (<0.002 mm) 的含量分别为 34.8 g·kg⁻¹、75.76 g·kg⁻¹、20.76 g·kg⁻¹。根据国际制土壤质地分级标准, 该三粒级含量比例下的土壤为粉黏壤^[17-18]。由于长期受海水浸渍的影响, 研究区土壤肥力低、土壤盐渍化问题严重、地下水矿化度高, 这些均制约了滨海盐渍化农田的养分高效利用。本试验的研究对象为苏北滨海轻度、中度盐渍农田土壤。轻度盐渍土的土壤盐分离子组成为: CO_3^{2-} 0.04 cmol·kg⁻¹, HCO_3^- 0.66 cmol·kg⁻¹, Cl^- 2.36 cmol·kg⁻¹, SO_4^{2-} 2.23 cmol·kg⁻¹, Ca^{2+} 0.54 cmol·kg⁻¹, Mg^{2+} 0.42 cmol·kg⁻¹, K^+ 0.58 cmol·kg⁻¹, Na^+ 3.84 cmol·kg⁻¹; 中度盐渍土的土壤盐分离子组成为: CO_3^{2-} 0.09 cmol·kg⁻¹, HCO_3^- 0.45 cmol·kg⁻¹, Cl^- 3.73 cmol·kg⁻¹, SO_4^{2-} 2.42 cmol·kg⁻¹, Ca^{2+} 0.39 cmol·kg⁻¹, Mg^{2+} 0.41 cmol·kg⁻¹, K^+ 0.63 cmol·kg⁻¹, Na^+ 5.99 cmol·kg⁻¹。其他基本土壤性质见表 1。

表 1 不同程度盐碱障碍土壤基本性质

Table 1 Basic properties of the soil relative to sanlinization degree

| 土壤类型 Soil type | 含盐量 Salt content/ (g·kg ⁻¹) | pH | 有机质 Organic/ (g·kg ⁻¹) | 全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹) | 有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹) | 碱解氮 Alkaline N/ (mg·kg ⁻¹) | 速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹) |
|--------------------|---|------|--|---|--|--|---|
| 轻度盐渍土 ^① | 1.57 | 8.94 | 16.3 | 0.72 | 25.43 | 33.12 | 139.2 |
| 中度盐渍土 ^② | 2.63 | 9.17 | 8.8 | 0.64 | 15.63 | 21.55 | 112.5 |

①Light saline soil, ②Moderate saline soil

1.2 试验设计与田间管理

本试验中大麦的品种为扬啤 5 号, 玉米的品种为蠡玉 16 号, 均由上海黄海种业有限公司提供。生物质炭由江苏华丰农业生物工程有限公司提供 (原材料为秸秆稻壳, 炭化温度 600℃, 炭化时间 20 S); 腐植酸由大连九成物产有限公司提供; 石膏由上海宏畅新型建材有限公司提供。

田间微区试验开始于 2017 年 11 月, 为大麦-

玉米轮作两季试验。试验以滨海轻度盐渍土 (D) 和中度盐渍土 (Z) 为研究对象, 设对照处理 (CK, 仅施氮肥), 并在此基础上设施用磷肥的常规施肥 (P)、常规施肥+生物质炭 (PC)、常规施肥+腐植酸 (PH)、常规施肥+石膏 (PG) 处理。每个处理重复 3 次, 共计 30 个微区。试验处理按照完全随机的方式排列, 微区面积为 2.8 m×2.8 m=7.84 m², 微区周围设有 0.2 m 宽的排水沟。

表 2 微区试验设计

Table 2 Designing of the micro-plot field experiment

| 土壤类型 | 代码 | 试验处理 |
|-------------------------------|------|---|
| Soil type | Code | Treatment |
| 轻度盐渍土 Light saline soil | CK | 对照 (仅施氮肥) CK (Only N) |
| | P | 常规施肥 (氮肥+磷肥) Conventional fertilizer (N+P) |
| | PC | 常规施肥+生物质炭 Conventional fertilizer+biochar |
| | PH | 常规施肥+腐植酸 Conventional fertilizer+humic acid |
| | PG | 常规施肥+石膏 Conventional fertilizer+ gypsum |
| 中度盐渍土 Moderate saline soil | CK | 对照 仅施氮肥 CK Only N |
| | P | 常规施肥 (氮肥+磷肥) Conventional fertilizer (N+P) |
| | PC | 常规施肥+生物质炭 Conventional fertilizer+biochar |
| | PH | 常规施肥+腐植酸 Conventional fertilizer+humic acid |
| | PG | 常规施肥+石膏 Conventional fertilizer+ gypsum |

大麦季的生育期为 2017 年 11 月 18 日—2018 年 6 月 8 日, 玉米的生育期为 2018 年 6 月 26 日—2018 年 10 月 13 日。氮肥为尿素 (N: 46.4%), 施用量为 $485 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 每季均施。其中大麦季的基追比为 6:2:2, 玉米季的基追比为 4:3:3, 在大麦的返青期和抽穗期、玉米的拔节期和抽雄期分别追施尿素。磷肥为过磷酸钙 (P_2O_5 : 14%), 施用量为 $1\ 071 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 在大麦季作基肥一次性施入, 玉米季不再施用。考虑到供试土壤速效钾含量较高, 因此试验田不再施用钾肥。生物质炭的施用量为 $27 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 腐植酸的施用量为 $600 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 石膏的施用量为 $3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 在播种前将各改良剂施入 0~20 cm 土壤并混匀。播种密度为大麦 $187.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 玉米 $15 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其他管理措施与当地的常规管理模式相同。

1.3 样品采集与分析

在大麦和玉米不同生育期, 每个微区内随机选取三个点, 用土钻分别采集 0~20 cm、20~40 cm 土壤样品并混匀, 自然风干后磨碎过筛, 用于进一步分析测定。大麦和玉米成熟期, 收获微区内所有植株晒干测干重, 计为产量。同时保留籽粒和秸秆, 105°C 杀青 30 min, 70°C 下烘干至恒重, 秸秆和籽粒粉碎过 0.5 mm 筛, 分别测定全磷含量。

土壤电导率与 pH 测定采用 1:5 土水比电导法和电极法; 土壤离子组成测定: Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法, Na^+ 采用火焰光度法; 秸秆、籽粒全磷含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 钼锑抗比色法测定。

1.4 数据分析

土壤全盐量 (TS) / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) = $2.47 \times \text{EC}_{1:5} + 0.26$, $\text{EC}_{1:5}$ 为土水比 1:5 时的土壤电导率 ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$); 土壤脱盐率/% = (播种前土壤盐分含量 - 收获后土壤盐分含量) / 施磷量播种前土壤盐分含量 $\times 100\%$; 作物吸磷量 / ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 籽粒产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) \times 籽粒中全磷质量分数 (%) + 秸秆产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) \times 秸秆中全磷质量分数 (%); 磷肥利用率/% = (施磷区地上部吸磷量 - 不施磷区地上部吸磷量) / 施磷量 $\times 100\%$;

$$\text{钠吸附比 (SAR)} \text{ SAR} = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{\frac{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}{2}}}$$

式中, $[\text{Na}^+]$ 、 $[\text{Ca}^{2+}]$ 、 $[\text{Mg}^{2+}]$ 为土壤 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量, $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

本研究的数据处理及统计分析均采用 Microsoft Excel 2010 软件和 IBM SPSS Statistics 20.0 软件进行, 不同处理间的差异显著性水平运用邓肯 (Duncan) 法进行多重比较。采用 Origin 2016 软件进行作图。

2 结 果

2.1 不同改良措施对土壤盐分及 pH 的调控作用

由图 1 可知, 作物生长期土壤盐分表现为春季(3—5 月)土壤盐分强烈表聚, 夏季(6—8 月)土壤快速淋洗脱盐, 秋季(9—11 月)土壤缓慢积盐, 冬季(12—次年 2 月)土壤盐分稳定, 呈春积盐-夏淋盐-秋返盐-冬稳盐的季节性变化模式, 其中 0~20 cm 土壤含盐量的变化较 20~40 cm 土壤剧烈。这种土壤盐分季节性变化是由土壤水盐关系决定。基于这种土壤盐分季节性变化, 生物质炭(C)、腐植酸(H)和石膏(G)等改良措施对 0~40 cm 土壤盐分含量具有一定的调控作用。作物收获后, 轻度盐渍土对照处理(DCK)和单施磷肥(DP)处

理 0~20 cm 土壤均呈积盐状态, 积盐率分别为 16.26%、9.85%。而施用生物质炭(DPC)、腐植酸(DPH)和石膏(DPG)处理下 0~20 cm 土壤呈脱盐状态, 脱盐率分别为 17.93%、15.30%、31.06%, 20~40 cm 土壤呈积盐状态。中度盐渍土上对照处理(ZCK)和单施磷肥(ZP)处理在作物收获后 0~20 cm、20~40 cm 土壤均呈积盐状态。与对照相比, ZPC 和 ZPH 处理 0~20 cm、20~40 cm 土壤均呈脱盐状态, ZPC 处理的脱盐率分别为 33.33%、24.33%, ZPH 处理的脱盐率分别为 40.60%、20.77%。ZPG 处理下 0~20 cm 土壤呈脱盐状态, 20~40 cm 土壤呈弱积盐状态。这说明与对照相比, 不同改良措施能有效降低土壤盐分, 且在轻度盐渍土上的效果优于轻度盐渍土。

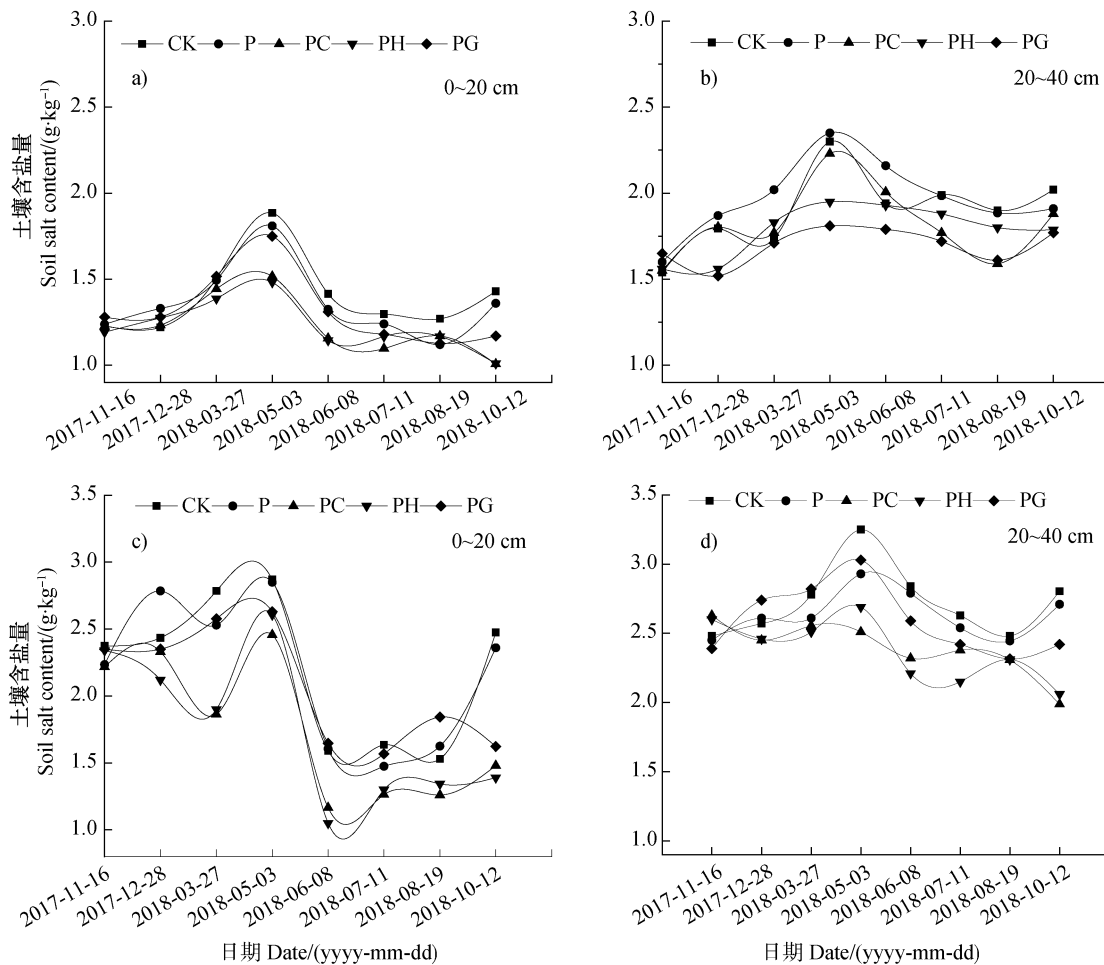


图 1 轻度盐渍土 (a, b) 和中度盐渍土 (c, d) 各处理土壤含盐量动态变化

Fig.1 Dynamics of soil salt content in the soils light (a, b) and moderate (c, d) in salinity relative to treatment

轻度、中度盐渍土不同改良措施下播种前和收获后 0~40 cm 土壤 pH 的变化情况如表 3 所示。轻度盐渍土上,不同改良措施能显著降低 0~20 cm 土壤 pH,其中,DPG 处理降低表层土壤 pH 的效果最好,较播种前降低了 0.67 个单位,DPG 和 DPH 处理较播种前分别降低 0.22、0.31 个单位。各改良措施对 20~40 cm 土壤 pH 的影响较小,仅有 DPG 处

理能显著降低 20~40 cm 土壤 pH,较播种前降低 0.25 个单位。DCK 和 DP 处理下 20~40 cm 土壤 pH 较播种前呈上升趋势。中度盐渍土上,除腐植酸处理外,其余各处理均能不同程度降低 0~20 cm 土壤 pH。其中 ZPG 处理能显著降低 0~20 cm、20~40 cm 土壤 pH,较播种前分别降低 0.51、0.35 个单位。其余各处理下 20~40 cm 土壤 pH 则呈上升趋势。

表 3 轻度 and 中度盐渍土不同改良措施下 0~40 cm 土壤 pH 变化

Table 3 Variation of soil pH in the 0~40 cm soil layer relative to soil salinization degree and treatment

| 土壤类型 Soil type | 处理 Treatment | 0~20 cm | | 20~40 cm | |
|-------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | 播种前 Before sowing | 收获后 After harvest | 播种前 Before sowing | 收获后 After harvest |
| 轻度盐渍土 Light saline soil | CK | 9.12±0.15a | 9.00±0.06ab | 9.14±0.18ab | 9.18±0.04ab |
| | P | 9.06±0.12a | 8.98±0.04b | 9.11±0.26ab | 9.30±0.05a |
| | PC | 9.24±0.12a | 9.02±0.05b | 9.14±0.11ab | 9.12±0.11ab |
| | PH | 9.28±0.07a | 8.97±0.05b | 9.15±0.24ab | 9.12±0.09ab |
| | PG | 9.25±0.17a | 8.58±0.04c | 9.16±0.35ab | 8.90±0.15b |
| 中度盐渍土 Moderate saline soil | CK | 9.08±0.31a | 8.98±0.13a | 9.09±0.28ab | 9.13±0.07ab |
| | P | 9.10±0.09a | 8.99±0.03a | 9.04±0.15ab | 9.15±0.20ab |
| | PC | 9.15±0.17a | 8.99±0.09a | 9.19±0.25ab | 9.30±0.04a |
| | PH | 8.91±0.27a | 9.07±0.10a | 8.97±0.17ab | 9.20±0.13ab |
| | PG | 9.04±0.27a | 8.53±0.06b | 9.22±0.19ab | 8.87±0.10b |

注:不同字母表示同种土壤不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。Note: Different letters indicate significant difference between treatments at 0.05 level. The same below.

2.2 不同改良措施对土壤钠吸附比的调控作用

由于各改良剂主要施入土壤表层,因此主要研究改良措施对 0~20 cm 土壤盐离子含量的影响。土壤钠吸附比(Sodium absorption ration, SAR)是盐渍土改良与利用过程中反映土壤盐碱程度的重要指标。土壤的 SAR 越大,表明土壤盐分阳离子组成中 Na⁺所占的比例越大, Ca²⁺和 Mg²⁺所占比例越小,对作物的危害也越大^[19]。不同改良措施下轻度、中度盐渍土表层土壤 SAR 值的变化如表 4 所示。由表可知,轻度盐渍土上,作物收获后不同改良措施下土壤 SAR 较本底值均降低,降幅为 2.17%~67.65%,其中 DCK 处理土壤 SAR 基本不变。三种改良调控措施中,DPG 处理能显著降低土壤 SAR,降幅为 67.65%。DPH 处理和 DPC 处理次之。中度盐渍土上,作物收获后 ZCK 处理土壤 SAR 较本底值有所升高。施磷肥处理能有效降低土壤 SAR,降幅为

15.81%。在施磷肥的基础上,三种改良调控措施均能显著降低 0~20 cm 土壤 SAR 值,效果顺序依次为 ZPG>ZPC>ZPH。

2.3 不同改良措施对作物产量及磷素吸收的调控作用

改良措施对作物产量的调控作用见表 5,轻度盐渍土上,生物质炭、腐植酸、石膏等与磷肥配施处理均能显著提高大麦季和玉米季作物产量;在大麦季,生物质炭(DPC)、腐植酸(DPH)和石膏(DPG)处理下大麦的产量较单施磷肥(DP)分别提高 13.14%、20.26%、12.56%;在玉米季,各处理下玉米的产量较 DP 分别提高 23.43%、21.11%、21.19%。中度盐渍土上,生物质炭、石膏与磷肥配施(ZPC、ZPG)处理均能提高作物产量,其中,ZPC 处理下大麦季产量显著提高,较 ZP 提高了 24.16%;玉米季,ZPC 和 ZPG 处理均显著提高了玉米产量,较

表 4 不同改良措施下土壤钠吸附比变化

Table 4 Changes in soil SAR relative to treatment

| 土壤类型 | 处理 | 本底值 | 收获后 | 降幅 |
|-------------------------------|-----------|---------------|---------------|----------------|
| Soil type | Treatment | Before sowing | After harvest | Reduce range/% |
| 轻度盐渍土 Light saline soil | CK | 5.07±0.71a | 4.96±0.77a | -2.17a |
| | P | 3.54±0.65a | 2.81±1.19b | -20.62ab |
| | PC | 4.54±1.21a | 2.77±1.69b | -38.99bc |
| | PH | 4.23±0.88a | 2.58±0.71b | -39.01bc |
| | PG | 4.05±0.60a | 1.32±0.56b | -67.65c |
| 中度盐渍土 Moderate saline soil | CK | 7.42±0.95a | 8.57±0.99a | 15.50a |
| | P | 6.64±0.42a | 5.59±0.33b | -15.81b |
| | PC | 7.63±0.52a | 4.19±0.71c | -45.09c |
| | PH | 6.58±0.61a | 3.98±0.85cd | -39.51c |
| | PG | 6.66±0.22a | 2.83±0.13d | -57.51c |

表 5 不同改良措施对作物产量、磷素吸收利用的作用

Table 5 Effect of different measures on yield and P uptake of crop

| 土壤类型 | 处理 | 大麦季 Barley growing season | | | 玉米季 Maize growing season | | | 累积磷肥 利用率 Cumulative Phosphate utilization rate/% |
|----------------------------------|----|--|--|---|--|--|---|---|
| | | 产量 Yield/ (kg·hm ⁻²) | 地上部 吸磷量 Phosphate uptake by shoot/ (kg·hm ⁻²) | 磷肥 利用率 Phosphate utilization rate/% | 产量 Yield/ (kg·hm ⁻²) | 地上部 吸磷量 Phosphate uptake by shoot/ (kg·hm ⁻²) | 磷肥 利用率 Phosphate utilization rate/% | |
| 轻度盐渍土 Light saline soil | CK | 12 989b | 19.43b | — | 18 181b | 39.37e | — | — |
| 中度盐渍土 Moderate saline soil | P | 13 611b | 20.78b | 0.90b | 18 534b | 48.27de | 5.93c | 6.83c |
| | PC | 15 310a | 31.95a | 8.35a | 22 877a | 77.51a | 25.43a | 33.77a |
| | PH | 16 369a | 31.58a | 8.10a | 22 447a | 62.89b | 15.68b | 23.78b |
| | PG | 15 321a | 22.90b | 2.31b | 22 461a | 54.16bc | 9.86c | 12.17c |
| 中度盐渍土 Moderate saline soil | CK | 9 899b | 13.12c | — | 12 081d | 33.12b | — | — |
| | P | 11 044b | 14.67bc | 1.03b | 14 446cd | 40.93b | 5.22b | 6.26c |
| | PC | 13 713a | 20.80a | 5.12a | 20 855a | 66.33a | 22.14a | 27.27a |
| | PH | 10 723b | 16.27bc | 2.10b | 16 320bc | 36.91b | 2.53b | 4.63d |
| | PG | 11 094b | 17.94ab | 3.21ab | 19 006ab | 54.91a | 14.52a | 17.74b |

ZP 提高了 44.37%、31.57%。而腐植酸与磷肥配施 (ZPH) 处理下作物产量略低于对照处理,说明添加腐植酸处理对作物的增产效果在轻度盐渍土上更好。

由表 5 可知,在轻度盐渍土上,大麦季 DPC、DPH 处理能显著促进大麦地上部吸磷,而 DPG 处理的效果不显著;玉米季,DPC、DPH 和 DPG 处理均能显著促进玉米地上部吸磷,较 DP 处理分别提

高 60.58%、30.29%、12.20%。在中度盐渍土上, ZPC、ZPG 处理能显著促进大麦季和玉米季作物地上部吸磷; 在大麦季, ZPC、ZPG 处理下大麦地上部吸磷量较 ZP 分别提高了 41.79%、22.29%; 在玉米季, ZPC、ZPG 处理下玉米地上部吸磷量较 ZP 分别提高了 62.06%、34.16%, 而 ZPH 处理对作物吸磷的促进作用不显著。经过两季轮作后, 生物质炭处理能显著提高轻度和中度盐渍土磷肥的累积利用率, 分别为 DP 处理、ZP 处理的 4.9 倍、4.4 倍。石膏处理次之, 其累积磷肥利用率分别为 DP 处理、ZP 处理的 1.8 倍、2.8 倍。腐植酸处理在轻度盐渍土上的累积磷肥利用率为 DP 处理的 3.5 倍, 对磷素吸收利用的提升作用优于中度盐渍土。

3 讨论

3.1 不同改良措施对土壤盐碱障碍的消减作用

本研究中, 添加石膏处理能显著降低表层土壤含盐量, 降低土壤 pH 和 SAR (图 1, 表 3 和表 4)。这是由于石膏中大量 Ca^{2+} 代换土壤胶体上的交换性 Na^+ , 提高土壤颗粒的凝聚性, 促进表层土壤盐分的淋洗^[20]。张辉等^[21]借助土柱淋洗试验研究了脱硫石膏对滨海盐渍土的脱盐效果, 结果表明: 添加石膏能改善土壤孔隙度, 提高土壤平均导水系数, 促进土壤快速脱盐。而本试验在田间自然淋洗条件下, 石膏处理对于 0~20 cm 土壤的降盐效果更好。石膏本身含有大量盐分离子, 在改良土壤理化性质的同时也增加了土壤的盐分压力, 在缺乏土壤淋洗的情况下对 20~40 cm 土壤的脱盐和抑盐效果有限^[22]。盐渍土脱盐的过程易发生土壤碱化现象, 因此盐渍土的改良调控过程中对土壤 pH 的调控尤为重要^[23]。添加石膏处理能显著降低土壤 pH, 这主要是因为土壤胶体上的交换性 Na^+ 被 Ca^{2+} 置换下来后, 与土壤中的 SO_4^{2-} 形成 Na_2SO_4 中性盐, 使土壤 pH 大大降低^[24]。

生物质炭材料本身呈碱性, 在红壤等酸性土壤的改良调控方面有较多应用^[25]。本试验中, 滨海不同盐碱障碍土壤上添加生物质炭对土壤盐分和 pH 亦有良好的调控效果 (图 1 和表 3)。生物质炭消减盐碱障碍的原因有多方面。一方面, 生物质炭自身的结构能增加土壤孔隙度, 降低土壤容重, 改善土

壤物理性状, 促进盐分淋洗^[26]。岳燕等^[27]通过土柱模拟试验的研究表明, 添加生物质炭处理能显著降低 0~20 cm 土层电导率, 缩短盐分淋洗时间, 提高洗盐效率。另一方面, 生物质炭中大量的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 置换土壤胶体上的 Na^+ , 促进土壤团粒结构的形成^[28]。周文志等^[29]在河北省滨海盐碱土上的研究表明, 适量添加生物质炭能显著降低土壤 SAR, 这也与本试验的研究结果一致。而本试验中生物质炭对中度盐渍土 0~20 cm 土壤 pH 的调控作用低于轻度盐渍土, 这可能由于在中度盐碱障碍条件下, 生物质炭材料本身较高的 pH 带来的影响超过了其通过调控土壤性质而对土壤 pH 的降低作用。

腐植酸具有较强的离子交换、吸附能力, 在改善土壤结构、加快表层土壤盐分的淋溶方面有良好的效果^[30]。顾鑫等^[31]的研究表明, 随着腐植酸添加量的增加, 盐碱土的电导率整体呈降低趋势, 能促进土壤脱盐, 这与本研究结果 (图 1) 一致。腐植酸呈有机弱酸性, 能有效调节土壤 pH。Tahir 等^[32]的研究表明, 腐植酸能有效缓冲土壤 pH 的变化, 降低石灰性土壤 pH。本试验中, 腐植酸在轻度盐渍土上的降碱效果优于中度盐渍土。王福友等^[33]在黄河三角洲滨海盐渍土上的研究表明, 腐植酸处理能显著降低土壤 pH。但其供试土壤的 pH 在 7.89~7.96 之间。而苏北滨海中度盐碱土 pH 均为 9 以上, 可能是由于土壤 pH 过高, 腐植酸对中度盐渍土的降碱效果有限。

3.2 不同改良措施对作物磷素吸收利用的调控机制

本试验的各改良措施均有促进作物的增产和磷素吸收利用的作用, 其中生物质炭的效果最好 (表 5)。Haefele 等^[34]对比了不同肥力基础的土壤上施加生物质炭对作物产量的影响, 发现在较肥沃的土壤上生物质炭对水稻的增产效果不明显, 甚至产量略有降低, 而在土壤肥力较差的土壤上生物质炭对水稻的增产效果能达到 16%~35%。本试验中, 苏北滨海盐渍农田地力水平较低, 在轻度和中度盐渍条件下生物质炭对作物均有显著的增产效果 (表 5)。生物质炭的这种增产作用是由于生物质炭本身良好的结构和性质, 不仅能明显改善盐渍土壤性质, 为作物生长提供良好的土壤环境^[35], 还能直接为作物提供有效磷等矿质养分, 提高土壤磷素有效性, 促

进作物的生长^[36]。斯林林^[37]研究了生物质炭配施化肥对稻田养分利用的影响, 结果表明连续两年生物质炭与磷肥配施显著提高了土壤有效磷, 促进了水稻对磷素的吸收和水稻内部磷利用率, 这也与本研究的结果一致。根际是作物吸磷的主要区域, 改良措施可通过活化根际土壤生化环境, 提高土壤多种酶活性, 调节土壤磷素的转化过程, 从而促进作物对磷的吸收利用^[38]。生物质炭处理下作物良好增产效果可能是通过影响土壤酶活性, 提升土壤磷库对作物磷的供给能力, 促进作物地上部吸磷^[39]。

本试验中, 腐植酸处理能显著促进轻度盐渍土上作物对磷素的吸收, 而在中度盐渍土上的效果有限(表 5), 这也与作者前期的盆栽试验结果一致。腐植酸处理下作物增产和磷利用率增加可能有两方面的原因, 一方面是腐植酸对土壤磷素的活化作用, 提高了盐渍土中磷素的有效性; 另一方面腐植酸作为一种营养激发性物质, 施入土壤中可提升土壤磷酸酶、过氧化氢酶等酶活性, 刺激作物根系的生长及对磷素的吸收, 促进作物增产^[40]。Alvarez 等^[41]研究表明, 在 pH7.5 的条件下腐植酸可有效减缓有效磷向难溶性磷的转化。本试验中可能由于土壤中盐碱障碍影响了腐植酸对土壤磷素的转化, 从而限制了作物对磷素的吸收利用。此外, 本试验中轻度、中度盐渍土上腐植酸采用了相同的施用量。腐植酸施用量不足也可能是限制了其中度盐渍土上促磷和增产效果的一方面因素。综合两季产量数据可以看出, 玉米季各改良措施对作物的增产效果较大麦季明显(表 5), 说明随着轮作时间的增长, 各改良剂对盐渍土的调控效果逐渐显现。本文关于改良措施对苏北盐碱障碍和磷素吸收利用调控机制的讨论以大麦-玉米两季轮作试验结果为基础。由于试验周期较短, 改良措施对作物磷素吸收、增产稳产的效果有待更长试验周期的探究。

4 结 论

苏北滨海土壤含盐量表现为春积盐-夏淋盐-秋返盐-冬稳盐的季节性变化规律。生物质炭、腐植酸、石膏等改良措施能有效促进盐渍土降盐脱碱, 改善土壤结构。其中, 石膏处理显著降低 0~20 cm 土壤盐分和 pH, 显著降低土壤钠吸附比。轻度盐渍土上, 各改良措施均能显著促进作物地上部吸磷, 提高大

麦季和玉米季的作物产量。中度盐渍土上, 生物质炭和石膏处理的增产效果显著。经过两季轮作后, 轻度盐渍土上生物质炭、腐植酸、石膏处理均能提高累积磷肥利用率, 分别为对照的 4.9 倍、3.5 倍和 1.8 倍, 中度盐渍土上生物质炭和石膏处理下累积磷肥利用率为对照的 4.4 倍、2.8 倍。腐植酸在轻度盐渍土上的调控效果优于中度盐渍土。

参考文献 (References)

- [1] Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (5): 837—845.[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.]
- [2] Yan K, Xu H L, Zhao S J, et al. Saline soil desalination by honeysuckle (*Lonicera japonica* Thunb.) depends on salt resistance mechanism[J]. Ecological Engineering, 2016, 88: 226—231.
- [3] Tejada M, Garcia C, Gonzalez J L, et al. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38 (6): 1413—1421.
- [4] Huo L, Pang H C, Zhao Y G, et al. Buried straw layer plus plastic mulching improves soil organic carbon fractions in an arid saline soil from Northwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165: 286—293.
- [5] Rietz D, Haynes R. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35 (6): 845—854.
- [6] Chai L T. Nutritious regulation of phosphorous in paddy field in the west of Jilin Province[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016.[柴立涛. 吉林省西部盐碱土水田磷素养分调控[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.]
- [7] Zhang Y F, Li W Y, Hu H, et al. Research status and prospect of saline-alkali land improvement[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45 (18): 7—10.[张翼夫, 李问盈, 胡红, 等. 盐碱地改良研究现状及展望[J]. 江苏农业科学, 2017, 45 (18): 7—10.]
- [8] Wang R T, Lu Z H, Sun J K, et al. Effect of soil ameliorants on coastal saline-alkali soil in the Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26 (4): 239—244.[王睿彤, 陆兆华, 孙景宽, 等. 土壤改良剂对黄河三角洲滨海盐碱土的改良效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26 (4): 239—244.]
- [9] Wan X, Jiang H, Wang L, et al. Progress of soil amelioration technology in coastal beach in Jiangsu Province[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2017, 44 (5): 43—47.[万欣, 江浩, 王磊, 等. 江苏沿海滩涂土壤改良技术研究进展[J]. 江苏林业科技, 2017, 44 (5): 43—47.]

- [10] Lin X W, Xie Z B, Zheng J Y, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emissions, carbon sequestration and crop growth in coastal saline soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66 (2): 329—338.
- [11] Wang L L, Sun X Y, Li S Y, et al. Application of organic amendments to a coastal saline soil in North China: Effects on soil physical and chemical properties and tree growth[J]. *PLoS One*, 2014, 9 (2): e89185.
- [12] Wang Q Z, Wang Y, Sun Z M, et al. Amelioration effect of humic acid on saline-alkali soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (4): 1227—1234.[王倩姿, 王玉, 孙志梅, 等. 腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J]. *应用生态学报*, 2019, 30 (4): 1227—1234.]
- [13] Gao Y S, Zhu Z Y, Bi Y L, et al. Researches on application of gypsum for the improvement of soda saline and alkaline soil[J]. *Jilin Agricultural Sciences*, 2003, 28 (6): 26—31.[高玉山, 朱知运, 毕业莉, 等. 石膏改良苏打盐碱土田间定位试验研究[J]. *吉林农业科学*, 2003, 28 (6): 26—31.]
- [14] Kang R F, Zhang N M, Shi J, et al. Effects of biochar-based fertilizer on soil fertility, wheat growth and nutrient absorption[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014 (6): 33—38.[康日峰, 张乃明, 史静, 等. 生物炭基肥料对小麦生长、养分吸收及土壤肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014 (6): 33—38.]
- [15] Li J, Yuan L, Zhao B Q, et al. Effect of adding humic acid to phosphorous fertilizer on maize yield and phosphorus uptake and soil available phosphorus content[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (3): 641—648.[李军, 袁亮, 赵秉强, 等. 磷肥中腐植酸添加比例对玉米产量、磷素吸收及土壤速效磷含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (3): 641—648.]
- [16] Wang X Y, Chen X M, Li X L, et al. The fertilizing effect evaluation of different fertilizers combined with gypsum application on coastal saline soil nutrients[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44 (1): 149—154.[王晓洋, 陈效民, 李孝良, 等. 不同肥料与石膏配施对滨海盐渍土养分的培肥效果评价[J]. *土壤通报*, 2013, 44 (1): 149—154.]
- [17] Wu K N, Zhao R. Soil texture classification and its application in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (1): 227—241.[吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (1): 227—241.]
- [18] Zhang J B, Yang J S, Li F R, et al. Effects of farmyard manure and mulching on soil water and salinity in severe salinized tide flat soil of north Jiangsu Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1): 184—188.[张建兵, 杨劲松, 李芙蓉, 等. 有机肥与覆盖对苏北滩涂重度盐渍土壤水盐调控效应分析[J]. *土壤学报*, 2014, 51 (1): 184—188.]
- [19] Chi C M, Wang Z C. Estimating sodium adsorption ratio (SAR) of saline-sodic soils in Songnen Plain, northeast China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31 (6): 198—202.[迟春明, 王志春. 松嫩平原苏打盐渍土钠吸附比的间接推算[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31 (6): 198—202.]
- [20] Cheng J R, Chen X H, Liu Z H, et al. The experimental study on the process and effect to the FGD-gypsum as an improvement in coastal saline-alkali soil[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34 (6): 1505—1513.[程镜润, 陈小华, 刘振鸿, 等. 脱硫石膏改良滨海盐碱土的脱盐过程与效果实验研究[J]. *中国环境科学*, 2014, 34 (6): 1505—1513.]
- [21] Zhang H, Chen X H, Fu R B, et al. Effect to FGD (flue gas desulfurization) -gypsum as an improvement to different coastal saline-alkali soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11 (7): 4397—4403.[张辉, 陈小华, 付融冰, 等. 脱硫石膏对不同质地滨海盐碱土性质的改良效果[J]. *环境工程学报*, 2017, 11 (7): 4397—4403.]
- [22] Qu C F. Study on the regulating effect of amendments on saline-alkali soil in northern Jiangsu beach and its application model[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science; Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.[曲长凤. 改良剂对苏北滩涂盐碱土壤的调理作用及其应用模式研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.]
- [23] Wang P S. The effect of different leaching way on improvement of coastal saline soil[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.[王鹏山. 不同淋洗方式下滨海盐渍土改良效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.]
- [24] Jiang Y. Research advance of agricultural resource utilization of flue gas desulfurization gypsum[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35 (28): 8950—8951, 9041.[姜瑜. 烟气脱硫石膏农业资源化利用研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35 (28): 8950—8951, 9041.]
- [25] Fan Y L, Liu X Z, Gao L, et al. Effects of fertility-building practices on soil organic carbon loss with sediment in sloping cropland of red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 638—649.[范亚琳, 刘贤赵, 高磊, 等. 不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (3): 638—649.]
- [26] Gao J, Yang J S, Yao R J, et al. Effects of different soil amendments on properties and fertilizer utilization efficiency for coastal heavily-salinized soil[J]. *Soils*, 2019, 51 (3): 524—529.[高婧, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同改良剂对滨海重度盐渍土质量和肥料利用效率的影响[J]. *土壤*, 2019, 51 (3): 524—529.]
- [27] Yue Y, Guo W N, Lin Q M, et al. Salt leaching in the

- saline soil relative to rate of biochar applied[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (4): 914—919.[岳燕, 郭维娜, 林启美, 等. 加入不同量生物质炭盐渍化土壤盐分淋洗的差异与特征[J]. *土壤学报*, 2014, 51 (4): 914—919.]
- [28] Zhao X, Wang J W, Wang S Q, et al. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: A pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil[J]. *Plant and Soil*, 2014, 378 (1/2): 279—294.
- [29] Zhou W Z, Sun X Y, Li S Y, et al. Ameliorative effect of bioorganic material on coastal saline soil[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31 (4): 607—615.[周文志, 孙向阳, 李素艳, 等. 生物有机材料对滨海盐碱土的改良效果[J]. *浙江农业学报*, 2019, 31 (4): 607—615.]
- [30] Song J, Kong L R, Yang T Y, et al. The application research progress and mechanism of humic acid on improving saline-alkali soil[J]. *Humic Acid*, 2017 (5): 5-9, 39.[宋佳, 孔令冉, 杨天一, 等. 腐植酸治理盐碱化土壤的机理与应用研究进展[J]. *腐植酸*, 2017(5): 5—9, 39.]
- [31] Gu X, Ren C M, Yang L, et al. Humic acid in natural coal affects remediation of saline-alkali soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36 (9): 57—61.[顾鑫, 任翠梅, 杨丽, 等. 天然煤炭腐植酸对盐碱土改良效果的研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36 (9): 57—61.]
- [32] Tahir M M, Khurshid M, Khan M Z, et al. Lignite-derived humic acid effect on growth of wheat plants in different soils[J]. *Pedosphere*, 2011, 21 (1): 124—131.
- [33] Wang F Y, Wang C, Liu Q Q, et al. Improved effect of humic acid, earthworm protein fertilizer and vermicompost on coastal saline soils [J]. *Humic Acid*, 2016 (1): 38.[王福友, 王冲, 刘全清, 等. 腐植酸、蚯蚓粪及蚯蚓蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J]. *腐植酸*, 2016 (1): 38.]
- [34] Haefele S M, Konboon Y, Wongboon W, et al. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems[J]. *Field Crops Research*, 2011, 121 (3): 430—440.
- [35] Kong X Q, Wei J M, Chang G W, et al. Effect of biochar on the physical and chemical properties of saline-alkali soil and soybean yield[J]. *Soybean Science*, 2018, 37 (4): 647—651.[孔祥清, 韦建明, 常国伟, 等. 生物炭对盐碱土理化性质及大豆产量的影响[J]. *大豆科学*, 2018, 37 (4): 647—651.]
- [36] Zhou G Y, Dou S, Liu S J. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30 (10): 2075—2080.[周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 2075—2080.]
- [37] Si L L. Effects of biochar combined with fertilizer on nutrient use and loss in paddy fields[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.[斯林林. 生物炭配施化肥对稻田养分利用及流失的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.]
- [38] Liu W, Xiong Y S, Xu X Y, 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.[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.]
- [39] Ge S H, Yan H T, Chen Q, et al. Effects of biochar combing with nitrogen fertilizer on functional diversity of microbial communities in tobacco-planting soil[J]. *Soils*, 2019, 51 (4): 708—714.[葛少华, 阎海涛, 陈奇, 等. 生物质炭与化肥氮配施对植烟土壤微生物功能多样性的影响[J]. *土壤*, 2019, 51 (4): 708—714.]
- [40] Zhuang Z D, Li X H. Effects of humic acid nitrogen fertilization on corn yield, nitrogen utilization and nitrogen loss[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (5): 1232—1239.[庄振东, 李絮花. 腐植酸氮肥对玉米产量、氮肥利用及氮肥损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (5): 1232—1239.]
- [41] Alvarez R, Evans L A, Milham P J, et al. Effects of humic material on the precipitation of calcium phosphate[J]. *Geoderma*, 2004, 118 (3/4): 245—260.

(责任编辑: 陈荣府)