

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.02.015

王雨, 刘传洲, 陈金林, 等. 磷肥配施生物质改良剂对盐渍土改良与玉米增产的效应. 土壤, 2023, 55(2): 348–355.

磷肥配施生物质改良剂对盐渍土改良与玉米增产的效应^①

王雨^{1,2}, 刘传洲³, 陈金林^{1*}, 刘广明^{2*}, 王秀萍⁴, 姚荣江²

(1 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3 江苏沿海生态科技发展有限公司, 南京 210000; 4 河北省农林科学院滨海农业研究所, 河北唐山 063299)

摘要: 以玉米为供试作物, 通过田间试验设置无磷肥和生物质改良剂对照、单施不同量磷肥和磷肥配施生物质改良剂(微生物菌肥、生物质炭、腐殖酸和黄腐酸)处理, 研究了磷肥配施生物质改良剂对盐渍化土壤的改良效应及对玉米的增产作用。结果表明: 与对照处理相比, 各处理的土壤容重和 pH 分别降低 1.96%~14.38% 和 0.11%~1.98%, 土壤有效磷含量增加 33.71%~182.39%; 施磷 75 kg/hm² 处理下的籽粒磷素积累量最高, 施磷 150 kg/hm² 处理下的茎秆、叶片和植株的磷素积累量最显著; 磷肥利用率、磷肥农学效率和磷肥偏生产力随施磷量增加呈下降趋势。与对照处理相比, 各处理的玉米单株鲜重和干重分别增加 6.52%~34.78% 和 11.54%~42.31%, 百粒重和产量分别增加 31.15%~40.52% 和 21.81%~60.02%。主成分分析表明, 150 kg/hm² 磷肥配施 7 500 kg/hm² 生物质炭处理的综合得分最高(分值为 1.255 1), 该处理在土壤改良、磷肥利用与玉米增产等方面的综合效果最优。

关键词: 磷肥; 生物质改良剂; 盐渍化土壤; 改良效应; 玉米产量

中图分类号: S156.4 文献标志码: A

Effects of Phosphate Fertilizer Combined with Biological Materials on Saline Soil Improvement and Maize Yield

WANG Yu^{1,2}, LIU Chuanzhou³, CHEN Jinlin^{1*}, LIU Guangming^{2*}, WANG Xiuping⁴, YAO Rongjiang²

(1 Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 Jiangsu Coastal Ecological Technology Development Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 4 Institutes of Coastal Agriculture, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Tangshan, Hebei 063299, China)

Abstract: An experiment was conducted to study the effects of phosphorus fertilizer combined with four kinds of biological materials (microbial fertilizer, W; biochar, S; humic acid, F; and fulvic acid, H) on salinized soil improvement and maize yield. A total of 16 treatments including no phosphate fertilizer and no biological material treatment (CK), conventional phosphorus fertilizer (P₅, 75 kg/hm²; P₁₀, 150 kg/hm²; P₁₅, 225 kg/hm²), and phosphorus fertilizer combined with materials (P₅W, P₅S, P₅F, P₅H, P₁₀W, P₁₀S, P₁₀F, P₁₀H, P₁₅W, P₁₅S, P₁₅F, P₁₅H, P₁₅H) were set up in this experiment. Results show that compared with CK, soil bulk density and pH are decreased by 1.96%–14.38% and 0.11%–1.98% respectively, soil available P content are increased by 33.71%–182.39%. P accumulation in grain is the highest under 75 kg/hm² P fertilizer application and P accumulation in stem, leaf and plant are the most significant under 150 kg/hm² P fertilizer application. The utilization rate, agricultural efficiency and partial productivity of P fertilizer are decreased as P fertilizer amount is increased. Maize fresh weight and dry weight per plant are increased by 6.52%–34.78% and 11.54%–42.31% respectively. The 100-grain weight and yield are increased by 31.15%–40.52% and 21.81%–60.02% respectively. Principal component analysis shows that the highest comprehensive score of 150 kg/hm² P fertilizer combined with 7 500 kg/hm² biochar treatment is 1.255 1, and this treatment has the best comprehensive effect on soil improvement, phosphorus fertilizer utilization and maize yield increase. This study provides important theoretical and technical support for salinized soil improvement and efficient phosphate fertilizer utilization.

Key words: Phosphate fertilizer; Biological materials; Salinized soil; Improvement effect; Maize yield

①基金项目: 国家自然科学基金委员会-山东联合基金重点项目(U1806215), 农业农村部重点项目(NK20221804)和国家重点研发计划项目(2022YFD1900104)资助。

* 通讯作者(gmliu@issas.ac.cn; jlchen@njfu.edu.cn)

作者简介: 王雨(1995—), 女, 新疆昌吉人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良与高效利用方面的研究。E-mail: 643959267@qq.com

黄河三角洲滨海盐碱土地处海陆之交,面积大且增速快,极具农业开发利用潜力,合理有效地改良盐碱地对粮食增产意义重大^[1]。缺磷是黄河三角洲盐渍化土壤最基本的属性之一,而磷素是玉米生长必需的养分要素。磷素在土壤中移动性差,容易在土壤中大量累积,且极易被固定,当季利用率仅为 10%~20%^[2-5]。21 世纪以来我国磷肥使用量呈逐年增长趋势,过量使用可能造成土壤生态环境污染^[6-8]。合理施磷并结合盐渍土壤改良措施提高磷素利用效率以实现作物增产并防止产生污染,是农业高效利用黄河三角洲盐碱地大力发展玉米产业,从而充分发挥黄河三角洲土壤资源潜力的必要途径。

目前,国内外学者通过物理、化学和生物措施在改良盐渍化土壤和提高作物磷素利用方面开展了大量研究,除秸秆还田^[9-10]及有机无机配施^[11-12]等方法外,还施用聚丙烯酰胺^[13]、生物质炭^[14-15]、腐殖酸类^[16]和黄腐酸钾^[17]等调理剂来改善农田土壤理化性质,提高土壤磷素有效性,获得作物高产。众多学者已经围绕磷肥施用量、单一秸秆还田、有机无机配施等在不同区域进行了大量试验,关注点围绕在磷肥利用率和作物产量等方面,而针对磷肥配施生物质改良剂协同改良盐碱土、提升磷素利用率及玉米产量的研究相对较少。因此,本研究选用微生物菌肥、生物质炭、腐殖酸和黄腐酸 4 种生物质改良剂,探讨了 3 个水平施磷配施生物质改良剂对黄河三角洲盐渍土理化性状、磷素利用特征及玉米产量的影响,以明确合理的施磷水平和不同生物质改良剂对盐碱地的改良潜力,筛选最佳配施方案,为黄河三角洲盐碱地改良利用和玉米减磷增效提供技术支撑和理论参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验地位于山东省农业科学院黄河三角洲现代农业试验示范基地(37°18'N, 118°36'E),为典型盐渍化土壤,前茬作物为小麦。试验区属华北湿润大陆性

季风气候,年均气温 12℃,年降水量约 600 mm,年蒸发量约 1 800 mm,全年无霜期 202~210 d。该区土壤为来自于冲积性黄土母质的粉砂壤土,属中度盐化土壤。供试土壤性状均一,肥力均匀,播前 0~20 cm 土层土壤容重为 1.24 g/cm³,pH 为 8.60,电导率为 1.50 dS/m,全盐含量为 2.67 g/kg,有机质含量为 8.90 g/kg,碱解氮含量为 57.75 mg/kg,全磷含量为 0.70 g/kg,有效磷含量为 8.61 mg/kg。

供试玉米品种为登海 652。供试磷肥为磷酸二铵(含 N 150 g/kg, P₂O₅ 420 g/kg),氮肥为尿素(含 N 464 g/kg)。供试微生物菌肥(主要成分:中药材、菜籽饼和菌种)购自南京宁粮生物有限公司,生物质炭(主要成分:秸秆稻壳)购自镇江泽地农业生物科技有限公司,腐殖酸(有效含量 400 g/kg)购自萍乡市博新实业有限公司,黄腐酸(有效含量 500 g/kg)购自诸城绿陇电子商务有限公司。供试生物质改良剂的基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

试验设置 3 个磷肥水平 (P₅: 75 kg/hm²; P₁₀: 150 kg/hm²; P₁₅: 225 kg/hm²)、4 种生物质改良剂(微生物菌肥: W; 生物质炭: S; 腐殖酸: F; 黄腐酸: H),处理包括无磷肥和生物质改良剂的对照处理(CK)、3 个磷肥单施处理 (P₅、P₁₀ 和 P₁₅)、磷肥与生物质改良剂配施处理(P₅W、P₅S、P₅F、P₅H、P₁₀W、P₁₀S、P₁₀F、P₁₀H、P₁₅W、P₁₅S、P₁₅F、P₁₅H)共 16 个。采用完全随机区组试验设计,每个处理重复 3 次(共 48 个小区),小区面积为 3 m×4 m。玉米全生育期尿素施用量为 240 kg/hm²,氮肥基追比为 4:6(基施 96 kg/hm²,拔节至穗分化期追施 144 kg/hm²);磷酸二铵作磷素基肥一次性施入;4 种生物质改良剂随同基肥一次性施入,施用量分别为微生物菌肥 1 500 kg/hm²、生物质炭 7 500 kg/hm²、腐殖酸 375 kg/hm²、黄腐酸 150 kg/hm²。在所有肥料与生物质改良剂均匀撒施后对土壤表层进行翻耙,翻耙深度为 0~20 cm。2020 年 6 月 21 日播种玉米,2020 年 10 月 8 日收获,

表 1 供试生物质改良剂的基本理化性质
Table 1 Basic physiochemical properties of tested biological materials

生物质改良剂	pH	电导率(dS/m)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	速效磷(mg/kg)
微生物菌肥	6.62	0.04	56.12	7.80	11.81
生物质炭	8.01	0.02	8.52	2.95	17.76
腐殖酸	10.27	5.99	6.74	—	—
黄腐酸	9.81	4.88	9.46	—	—

玉米种植密度为 63 000 株/hm²。试验期间其余田间管理措施与当地管理措施一致。

1.3 样品采集与测定

2020 年 10 月 8 日对成熟期玉米每个小区单打单收进行测产, 计算百粒重。10 月 10 日对 48 个小区进行土壤样品与植物样品的采集。在每个小区中间采集 0~20 cm 土层的环刀样品, 测定土壤容重、土壤孔隙度及土壤饱和导水率。在各小区随机选 3 个点, 按 0~20、20~40 cm 深度采样, 3 个采样点的同土层土壤混匀作为该小区的土壤样品。土壤样品带回实验室自然风干后, 磨碎、过筛, 测定土壤电导率、pH 和有效磷含量。采用土水质量比为 1:5 浸提土壤并用电导率仪和 pH 计分别测定土壤电导率和 pH, 采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量, 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-钼锑抗比色法测定玉米茎秆、叶片和籽粒磷素含量并计算磷素积累量。

1.4 数据处理

本文按照以下公式计算磷肥利用效率。磷肥利用率(%) = (施磷区作物累积吸磷量-未施磷区作物累积吸磷量)/施磷区磷肥用量×100; 磷肥农学效率(kg/kg) = (施磷区玉米的产量-未施磷区玉米产量)/施磷区磷肥用量; 磷肥偏生产力(kg/kg) = 施磷区玉米产量/施磷区磷肥用量; 磷素收获指数(%) = (成熟期玉米籽粒磷积累量/玉米植株磷素积累总量)×100。

采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行处理; 采用 SPSS Statistics 25.0 软件进行方差分析和主成分分析, Duncan's 法进行多重比较检验, 表中数据为“平均值 ± 标准差”; 采用 GraphPad Prism 7.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

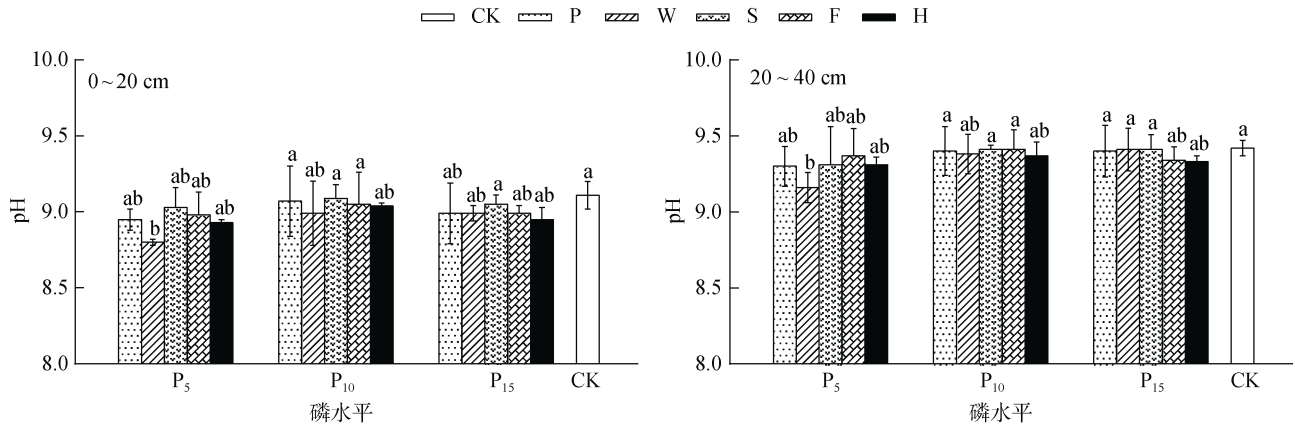
2.1 不同处理土壤主要理化性质

磷肥配施生物质改良剂不同程度改变了土壤理化性质(表 2、图 1)。磷肥配施生物质改良剂显著降低了土壤容重, 较 CK 处理下降 1.96%~14.38%, P₁₀ 水平下 P₁₀W 处理显著高于 P₁₀H 处理 8.00%, P₁₅ 水平下 P₁₅S 处理显著低于 P₁₅、P₁₅F 和 P₁₅H 处理。不同处理的饱和导水率在 0.011 1~0.033 6 mm/min, P₅S、P₁₀S 和 P₁₅S 处理分别显著高于 CK 处理 48.28%、33.00%、66.01%; P₅ 水平下 P₅W、P₅S 和 P₅F 处理显著高于 CK 处理; P₁₀ 水平下 P₁₀S 和 P₁₀H 处理显著高于 CK 处理; P₁₅ 水平下 P₁₅S 处理显著高于 CK 处理。不同处理的毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度分别在 37.56%~43.01%、1.27%~2.20% 和 39.04%~44.76%, P₁₅S 处理的毛管孔隙度与 CK 处理差异显著; P₁₅H 处理的非毛管孔隙度与 CK 处理差异显著; P₅S 和 P₁₅S 处理的总孔隙度与 CK 处理差异显著。

表 2 不同处理盐渍土壤物理性质
Table 2 Saline soil physicochemical properties under different treatments

处理	容重 (g/cm ³)	饱和导水率 (mm/min)	孔隙度(%)		
			毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度
P ₅	1.42 ± 0.06 bc	0.0246 ± 0.0108 bc	40.07 ± 2.27 bc	1.70 ± 0.40 ab	41.77 ± 2.56 ab
P ₅ W	1.43 ± 0.03 bc	0.0289 ± 0.0086 ab	40.37 ± 0.49 bc	1.27 ± 0.21 b	41.64 ± 0.34 ab
P ₅ S	1.36 ± 0.03 cd	0.0301 ± 0.0147 ab	41.81 ± 2.47 ab	1.39 ± 0.06 b	43.20 ± 2.52 a
P ₅ F	1.48 ± 0.04 bc	0.0255 ± 0.0002 ab	38.24 ± 1.02 bc	1.33 ± 0.40 b	39.57 ± 1.41 c
P ₅ H	1.47 ± 0.03 bc	0.0192 ± 0.0068 cd	37.61 ± 0.77 c	1.43 ± 0.15 b	39.04 ± 0.74 c
P ₁₀	1.46 ± 0.08 bc	0.0191 ± 0.0020 cd	37.85 ± 2.11 c	1.44 ± 0.17 b	39.29 ± 2.09 c
P ₁₀ W	1.50 ± 0.09 ab	0.0201 ± 0.0039 cd	38.16 ± 2.42 bc	1.45 ± 0.07 b	39.61 ± 2.44 c
P ₁₀ S	1.45 ± 0.05 bc	0.0336 ± 0.0090 a	39.42 ± 2.03 bc	1.51 ± 0.36 ab	40.93 ± 1.68 bc
P ₁₀ F	1.45 ± 0.05 bc	0.0111 ± 0.0017 d	38.39 ± 0.78 bc	1.41 ± 0.28 b	39.80 ± 0.51 c
P ₁₀ H	1.38 ± 0.05 cd	0.0270 ± 0.0102 ab	41.35 ± 2.32 ab	1.53 ± 0.13 ab	42.88 ± 2.45 ab
P ₁₅	1.45 ± 0.04 bc	0.0153 ± 0.0016 cd	38.61 ± 4.51 bc	1.53 ± 0.25 ab	40.14 ± 1.38 bc
P ₁₅ W	1.41 ± 0.06 cd	0.0164 ± 0.0014 cd	39.75 ± 0.97 bc	1.55 ± 0.38 ab	41.30 ± 1.34 ab
P ₁₅ S	1.31 ± 0.01 d	0.0377 ± 0.0062 a	43.01 ± 0.84 a	1.75 ± 0.56 ab	44.76 ± 0.60 a
P ₁₅ F	1.44 ± 0.10 bc	0.0247 ± 0.0055 bc	38.67 ± 2.18 bc	1.49 ± 0.42 ab	40.16 ± 2.54 bc
P ₁₅ H	1.47 ± 0.07 bc	0.0113 ± 0.0032 d	37.56 ± 1.07 c	2.20 ± 1.30 a	39.76 ± 2.28 c
CK	1.53 ± 0.01 a	0.0203 ± 0.0031 cd	38.97 ± 2.51 bc	1.44 ± 0.24 b	40.41 ± 2.75 bc

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异在 P<0.05 水平显著, 下同。



(图中不同小写字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著，下同)

图 1 不同处理盐渍土 pH

Fig. 1 Saline soil pH values under different treatments

各处理 0 ~ 20 cm 土壤 pH 为 8.80 ~ 9.11, P₅W 处理显著低于 CK 处理 3.40%, 其他处理较 CK 处理下降 0.22% ~ 1.98%; 各处理 20 ~ 40 cm 土壤 pH 为 9.16 ~ 9.42, P₅W 处理显著低于 CK 处理 2.76%, 其他处理较 CK 处理下降 0.11% ~ 1.27%; 土壤 pH 表现为随深度增加而增加。各处理 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土壤的电导率和 CK 处理相比, 差异均不显著。

2.2 不同处理土壤有效磷含量

由表 3 可知, 施磷量和生物质改良剂两者交互作用对土壤有效磷含量产生影响。各处理 0 ~ 20 cm 的土壤有效磷含量在 5.28 ~ 14.91 mg/kg, 显著高于 CK 处理, 较 CK 处理增加 33.71% ~ 182.39%; 各处理 20 ~ 40 cm 的土壤有效磷含量在 1.43 ~ 2.88 mg/kg, 较 CK 处理增加 39.86% ~ 101.40%; 土壤有效磷含量随土壤深度增加而减少。

2.3 不同处理作物磷素积累量、磷肥利用效率和收获期玉米主要农艺性状及产量

由表 4 可知, 施磷量和生物质改良剂两者交互作用对磷素利用产生促进作用。不同处理玉米茎秆磷素积累量为 2.61 ~ 5.97 kg/hm², P₁₀S 处理较 CK 处理显著增加 128.74%, 其他处理较 CK 处理增加 17.24% ~ 80.08%, 不同磷水平总体表现为 P₁₀>P₅>P₁₅。叶片磷素积累量为 1.86 ~ 3.29 kg/hm², P₁₀S 处理较 CK 处理显著增加 76.88%, 其他处理较 CK 处理增加 31.18% ~ 73.12%, 不同磷水平总体表现为 P₁₀>P₁₅>P₅。籽粒磷素积累量为 8.06 ~ 15.16 kg/hm², P₅H 处理较 CK 处理增加 88.09%, 其他处理较 CK 处理增加 53.85% ~ 86.97%, 不同磷水平总体表现为 P₅>P₁₀>P₁₅。植株磷素积累量为 12.52 ~ 22.29 kg/hm², P₁₀F 处理较 CK 处理增加 78.04%, 其他处理较 CK 处理增加 50.80% ~

74.84%, 不同磷水平总体表现为 P₁₀>P₅>P₁₅。

各处理的磷肥利用率在 2.83% ~ 11.98%, P₅、P₁₀ 和 P₁₅ 水平下磷肥利用率分别为 10.16%、5.90% 和 3.34%, 整体处于偏低水平。磷肥农学效率在 0.79 ~ 19.12 kg/kg, P₅、P₁₀ 和 P₁₅ 水平下磷肥农学效率分别为 10.17、10.32 和 5.13 kg/kg, 其中, P₅ 水平下 P₅S 处理最高, P₁₀ 水平下 P₁₀H 处理最高, P₁₅ 水平下 P₁₅H 处理最高。磷肥偏生产力在 28.49 ~ 102.23 kg/kg, P₅、P₁₀ 和 P₁₅ 水平下磷肥偏生产力分别为 93.28、51.88 和 32.83 kg/kg, 其中, P₅ 水平下以 P₅S 处理最高,

表 3 不同处理下土壤有效磷含量
Table 3 Soil available phosphorous contents under different treatments

处理	土壤有效磷含量(mg/kg)	
	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm
P ₅	7.06 ± 1.58 ab	2.77 ± 1.40 a
P ₅ W	7.11 ± 0.75 ab	2.23 ± 0.52 a
P ₅ S	8.89 ± 2.93 ab	2.72 ± 0.60 a
P ₅ F	7.54 ± 0.83 ab	2.00 ± 0.90 a
P ₅ H	7.52 ± 1.46 ab	2.77 ± 0.62 a
P ₁₀	11.90 ± 4.11 ab	2.77 ± 0.52 a
P ₁₀ W	9.51 ± 0.33 ab	2.86 ± 1.40 a
P ₁₀ S	10.85 ± 0.93 ab	2.13 ± 0.36 a
P ₁₀ F	8.79 ± 1.11 ab	2.68 ± 0.21 a
P ₁₀ H	8.57 ± 2.02 ab	2.32 ± 0.32 a
P ₁₅	14.91 ± 6.13 a	2.88 ± 0.49 a
P ₁₅ W	12.72 ± 2.06 ab	2.36 ± 1.34 a
P ₁₅ S	14.27 ± 5.77 a	2.41 ± 1.78 a
P ₁₅ F	11.62 ± 5.83 ab	2.54 ± 0.21 a
P ₁₅ H	13.40 ± 4.50 a	2.45 ± 0.14 a
CK	5.28 ± 0.47 c	1.43 ± 0.52 b

表 4 不同处理玉米的磷素利用
Table 4 Maize phosphorus utilization under different treatments

处理	植株磷素积累量(kg/hm ²)				磷肥利用效率			
	茎秆	叶片	籽粒	植株	磷肥利用率 (%)	磷肥农学效率 (kg/kg)	磷肥偏生产力 (kg/kg)	磷素收获指数 (%)
P ₅	3.50 ± 1.13 ab	3.09 ± 0.73 a	14.11 ± 3.38 ab	20.70 ± 5.23 a	10.91 ± 6.97 a	5.44 ± 4.84 de	88.55 ± 4.84 bc	68.31 ± 0.92 a
P ₅ W	3.50 ± 0.26 ab	2.57 ± 0.40 ab	13.69 ± 0.38 ab	19.76 ± 0.12 ab	9.64 ± 0.16 ab	8.13 ± 2.40 bc	91.24 ± 2.40 b	69.32 ± 2.28 a
P ₅ S	3.46 ± 0.74 ab	2.44 ± 0.10 ab	12.98 ± 2.16 ab	18.88 ± 2.52 ab	8.47 ± 3.35 ab	19.12 ± 4.24 a	102.23 ± 4.24 a	70.22 ± 17.85 a
P ₅ F	4.11 ± 0.83 ab	2.81 ± 0.43 ab	12.95 ± 4.05 ab	19.87 ± 5.20 ab	9.79 ± 6.94 ab	16.28 ± 7.97 ab	99.39 ± 7.97 a	69.23 ± 28.07 a
P ₅ H	3.71 ± 0.90 ab	2.63 ± 0.30 ab	15.16 ± 1.37 a	21.51 ± 0.40 a	11.98 ± 0.54 a	1.89 ± 1.84 ef	85.00 ± 1.84 c	70.44 ± 5.33 a
P ₁₀	4.70 ± 1.20 ab	3.22 ± 0.47 a	13.97 ± 1.63 ab	21.89 ± 2.53 a	6.24 ± 1.69 bc	7.26 ± 3.19 bc	48.81 ± 3.19 e	63.92 ± 4.29 a
P ₁₀ W	3.82 ± 0.86 ab	3.15 ± 0.45 a	13.75 ± 0.58 ab	20.71 ± 0.28 a	5.46 ± 0.19 bc	9.40 ± 5.29 bc	50.95 ± 5.29 de	66.40 ± 3.62 a
P ₁₀ S	5.97 ± 2.86 a	3.29 ± 0.36 a	11.87 ± 1.47 ab	21.13 ± 3.98 a	5.74 ± 2.65 bc	10.25 ± 1.22 ab	51.81 ± 1.22 de	56.82 ± 6.55 b
P ₁₀ F	4.61 ± 1.82 ab	3.17 ± 0.45 a	14.52 ± 1.44 ab	22.29 ± 2.40 a	6.51 ± 1.60 bc	10.42 ± 1.50 ab	51.98 ± 1.50 de	65.23 ± 4.16 a
P ₁₀ H	3.41 ± 1.39 ab	2.87 ± 0.49 ab	14.58 ± 5.04 ab	20.86 ± 6.39 a	5.56 ± 4.26 bc	14.27 ± 1.06 ab	55.83 ± 1.06 d	75.48 ± 40.39 a
P ₁₅	3.54 ± 1.08 ab	3.02 ± 0.24 a	12.40 ± 3.52 ab	18.96 ± 2.69 ab	2.86 ± 1.20 d	4.70 ± 1.19 de	32.40 ± 1.19 fg	68.08 ± 29.06 a
P ₁₅ W	3.37 ± 0.11 b	2.99 ± 0.08 a	12.52 ± 2.26 ab	18.88 ± 2.31 ab	2.83 ± 1.03 d	0.79 ± 0.55 f	28.49 ± 0.55 g	66.67 ± 12.73 a
P ₁₅ S	4.18 ± 1.53 ab	2.75 ± 0.78 ab	13.90 ± 1.56 ab	20.84 ± 2.43 a	3.70 ± 1.08 cd	6.07 ± 1.39 cd	33.77 ± 1.39 fg	66.80 ± 3.34 a
P ₁₅ F	3.13 ± 0.40 b	2.71 ± 0.51 ab	15.07 ± 1.79 a	20.91 ± 1.83 a	3.73 ± 0.81 cd	7.00 ± 1.91 cd	34.71 ± 1.91 f	72.77 ± 13.93 a
P ₁₅ H	3.06 ± 1.17 b	2.87 ± 0.16 ab	14.62 ± 1.65 ab	20.55 ± 0.70 ab	3.57 ± 0.31 cd	7.08 ± 2.47 cd	34.79 ± 2.47 f	71.06 ± 6.18 a
CK	2.61 ± 1.28 b	1.86 ± 0.07 b	8.06 ± 0.54 b	12.52 ± 1.16 b	—	—	—	57.26 ± 9.95 b

P₁₀水平下以P₁₀H处理最高, P₁₅水平下以P₁₅H处理最高。磷素收获指数在57.26%~75.48%, P₅、P₁₀和P₁₅水平下磷素收获指数分别为69.50%、65.57%和69.07%, 其中, 不同磷水平下P₅H、P₁₀H和P₁₅F处

理最高。

磷肥和生物质改良剂配施不同程度上促进玉米干物质积累, 增加籽粒饱满度及玉米产量(图2)。不同磷肥水平和生物质改良剂处理均增加玉米单株鲜

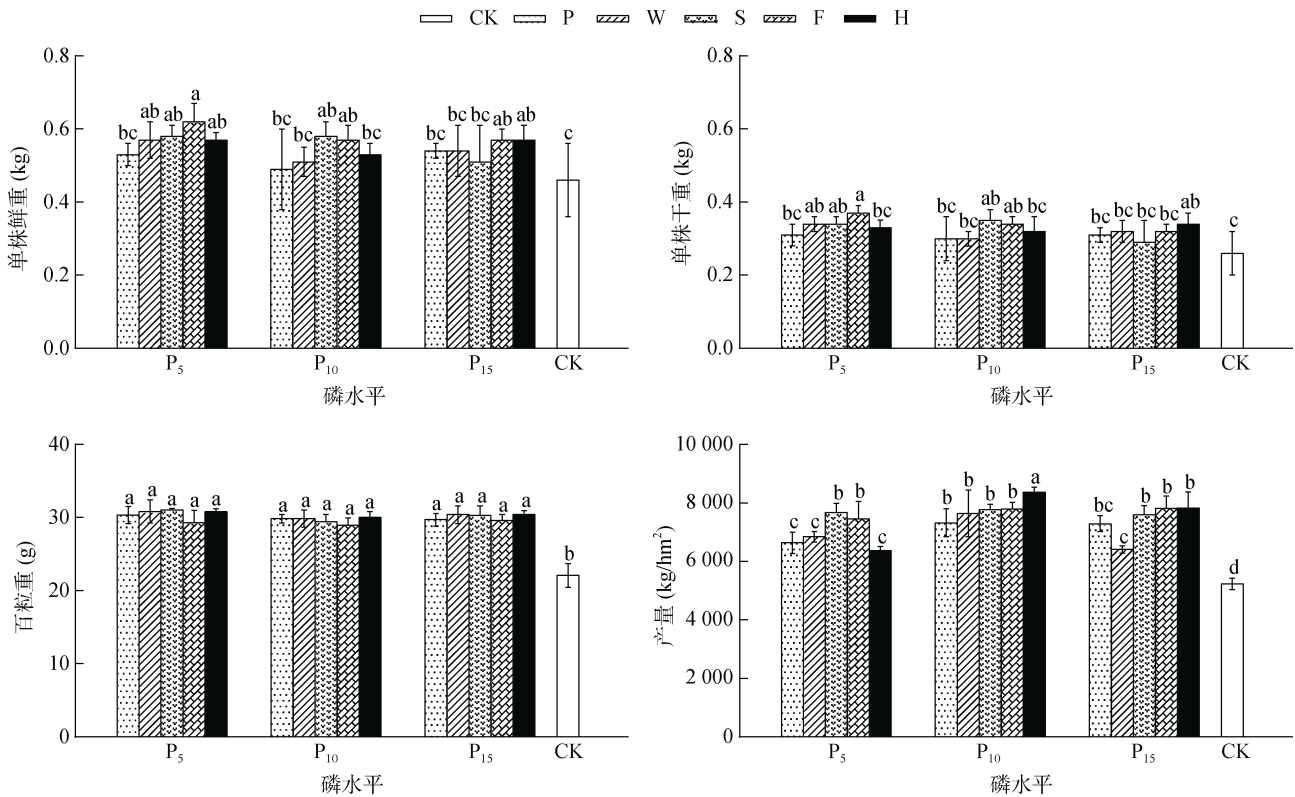


图 2 不同处理收获期玉米农艺性状及产量

Fig. 2 Maize agronomic characters at harvest stage and yields under different treatments

重和干重，分别较 CK 处理增加 6.52%~34.78% 和 11.54%~42.31%。磷肥和生物质改良剂能显著增加玉米百粒重和产量，较 CK 处理分别增加 31.15%~40.52% 和 21.81%~60.02%。施磷量对百粒重有极显著影响，对产量表现为先增大后减小的趋势。CK 处理百粒重最低为 22.09 g，各磷肥配施生物质改良剂处理百粒重较 CK 处理增加 31.15%~40.52%。CK 处理产量最低，为 5 233.25 kg/hm²，各磷肥配施生物质改良剂处理产量较 CK 处理增产 21.81%~60.02%。

2.4 不同处理土壤改良与玉米增产效应综合评价

对 16 个处理的土壤理化指标、磷素利用特征和玉米收获指标进行主成分分析，得到主成分特征值(表 5)。由表 5 可知，第 1~第 6 主成分的特征值分别为 6.992、3.298、2.854、2.607、1.648 和 1.254，贡献率分别为 32.963%、15.707%、13.591%、12.413%、7.847% 和 5.971%，累积贡献率为 88.491%，已经能够反映大部分信息，故本研究中提取前 6 个主成分作效应综合评价。

表 5 不同指标主成分分析
Table 5 Principal component analysis of different indicators

主成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差百分比 (%)	累积 (%)	总计	方差百分比 (%)	累积 (%)
1	6.922	32.963	32.963	6.922	32.963	32.963
2	3.298	15.707	48.670	3.298	15.707	48.670
3	2.854	13.591	62.261	2.854	13.591	62.261
4	2.607	12.413	74.673	2.607	12.413	74.673
5	1.648	7.847	82.520	1.648	7.847	82.520
6	1.254	5.971	88.491	1.254	5.971	88.491

16 个处理的主成分综合得分见图 3。统计结果显

示，各处理主成分综合得分排序依次为 P₁₀S>P₅S>P₅F>P₁₀H>P₁₀F>P₅W>P₁₅S>P₁₅H>P₁₅F>P₁₀>P₅>P₁₀W>P₃H>P₁₅>P₁₅W>CK，其中 P₁₀S 处理综合得分最高为 1.255 1，CK 处理综合得分最低为-3.470 2。

3 讨论

3.1 磷肥配施生物质改良剂对盐渍土主要理化特性的影响

土壤饱和和导水率是决定土壤入渗和渗漏性能的主要因素，土壤容重和孔隙度可以调节土壤的紧实状况，影响养分转化，适宜的土壤容重和孔隙度有利于作物根系的生长发育^[18-19]。李金彪等^[11]、张雪辰等^[13]研究发现，通过不同物料掺拌、添加化学改良剂等方法，可以增加盐渍土毛管孔隙度与总孔隙度，降低土壤容重，提升土壤饱和和导水率。本试验中，磷肥配施生物质炭处理的饱和和导水率均显著高于 CK 处理，土壤总孔隙度增加 1.29%~10.76%，这与前人研究结果相一致。这可能是由于体积质量较低的生物质炭施入后对土壤容重起到了稀释作用使土壤容重降低，进而使土壤疏松性和孔隙度增加，从而改变土壤饱和和导水率。因此，生物质炭对降低土壤容重、增加土壤饱和和导水率及孔隙度具有一定效果，可以用于改良黄河三角洲盐渍化土壤。

土壤 pH 作为土壤酸碱度的强度指标，是衡量土壤肥力和基本性质的重要因素之一。其可以改变土壤中营养元素的化合形态和时效性，同时影响土壤容重和渗透性等理化性质^[20-21]。本试验结果发现，施磷和生物质改良剂处理土壤 pH 较 CK 处理分别下降 0.22%~1.98% 和 0.11%~1.27%。土壤 pH 降低，可以减少有机物矿化，一定程度上减少了土壤磷的固定。

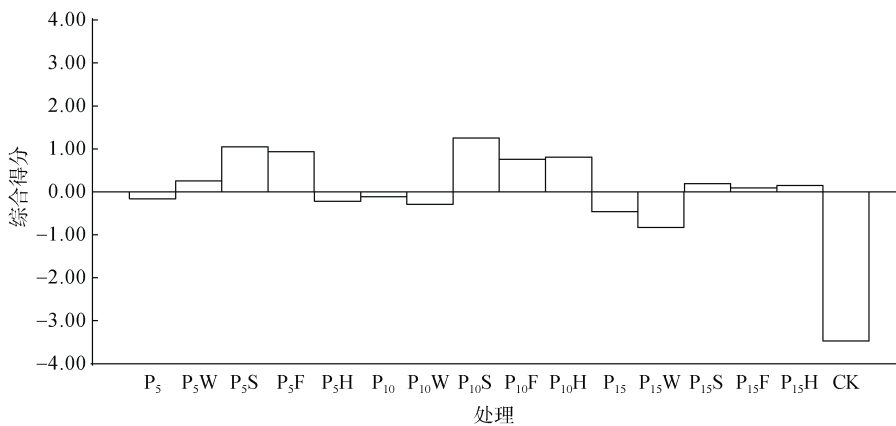


图 3 主成分综合得分

Fig. 3 Composite scores of principal components

3.2 磷肥配施生物质改良剂对盐渍土有效磷含量和磷肥利用率的影响

土壤有效磷含量是土壤磷素供应水平高低的重要指标,磷肥利用率是衡量磷肥合理使用的重要指标,二者从不同方面描述了作物对磷肥的利用情况。本试验结果显示,磷肥配施生物质改良剂各处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤有效磷含量较 CK 处理显著增加;与单施磷肥相比,4 种生物质改良剂能不同程度提高植物磷素积累量,说明生物质改良剂可以促进玉米对磷的吸收,减少磷的固定或活化土壤中的磷,从而提高磷肥在土壤中的有效性。本试验发现,磷肥利用率、磷肥农学效率、磷肥偏生产力随施磷量增加呈下降趋势,磷素收获指数随施磷量增加变化不明显。说明磷肥过量会降低玉米对磷肥的利用效率,造成土壤中磷素盈余;不同生物质改良剂对磷素利用效率影响不同,但可以提高土壤磷素的同化力形成与运输。该结果与张福锁等^[2]和李军等^[22]的研究结果类似。

3.3 磷肥配施生物质改良剂对玉米收获期干物质积累及产量的影响

磷肥的合理施用可以有效地提高作物产量。本研究发现,不同磷肥水平下配施生物质改良剂处理后玉米干鲜重、百粒重和产量较 CK 处理均有不同程度增加, P₅、P₁₀ 和 P₁₅ 水平下玉米平均产量分别为 6 996.00、7 781.31 和 7 387.09 kg/hm²,较 CK 处理显著增产 33.68%、48.96% 和 41.16%,说明施磷和生物质改良剂可以促进玉米生长发育和干物质积累,对百粒重有极显著影响;当施磷量为 P₁₅ 水平时,玉米产量略有下降,这与杨丽等^[23]研究结果一致,原因可能是磷肥施用过量抑制了玉米干物质的有效转移,使得籽粒产量的增加与生物产量不同步,导致产量下降。因此,只有适当的减少磷肥用量配施生物质改良剂来维持土壤适宜的有效磷含量和供磷水平,才能保证磷肥的高效利用,促进玉米植株生长发育和物质积累,从而获得与常规施磷量相当或更高的产量。

在观测指标较多的研究中,由于变量个数太多且彼此间存在一定相关性,使所观测的指标数值有一定的重叠,不能准确解释试验结果。而主成分分析是将原来数量较多的单项指标转换成新的彼此独立且个数较少的综合指标,来解释原指标里所包含的信息,其评价更全面客观,结果更可靠^[20]。已有研究证明,利用主成分分析可以评价盐渍土质量和筛选盐渍土改良物料等^[24]。本研究利用主成分分析法对 16 个处理的测定指标进行主成分分析,得到主成分特征值,

提取前 6 个主成分作综合评价,结果显示, P₁₀S 处理的综合得分最高,为 1.255 1;CK 处理综合得分最低,为 -3.470 2。此外,通过计算发现, P₁₀ 水平是磷肥最佳施用水平,生物质炭是效果最好的生物质改良剂,即 P₁₀ 水平下配施生物炭在盐渍化土壤改良、磷素利用与增产方面综合效应最好。

4 结论

磷肥配施生物质改良剂通过降低土壤容重和 pH、增大土壤饱和导水率和孔隙度来实现盐渍土壤改良;同时通过提高土壤有效磷含量和作物磷素积累量来提高磷肥利用率,进而促进玉米生长发育和产量提升。150 kg/hm² 磷肥配施 7 500 kg/hm² 生物质炭处理的综合效应最优,其使得土壤容重降低 5.22%, 0~20、20~40 cm 土壤有效磷含量分别提高 105.49% 和 48.95%,玉米磷素积累量和产量分别提高 68.77% 和 48.50%。该配施措施适宜在黄河三角洲盐渍化土壤区推广应用。

参考文献:

- [1] 唐雪, 尚辉, 刘广明, 等. 复合改良剂对盐碱土改良及植物生长的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 1033-1039.
- [2] 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.
- [3] Zhan X Y, Zhang L, Zhou B K, et al. Changes in Olsen phosphorus concentration and its response to phosphorus balance in black soils under different long-term fertilization patterns[J]. PLoS One, 2015, 10(7): e0131713.
- [4] Zhu Q C, de Vries W, Liu X J, et al. Enhanced acidification in Chinese croplands as derived from element budgets in the period 1980-2010[J]. Science of the Total Environment, 2018, 618: 1497-1505.
- [5] King K W, Williams M R, MacRae M L, et al. Phosphorus transport in agricultural subsurface drainage: A review[J]. Journal of Environmental Quality, 2015, 44(2): 467-485.
- [6] Malik M A, Marschner P, Khan K S. Addition of organic and inorganic P sources to soil - Effects on P pools and microorganisms[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 49: 106-113.
- [7] Wang R, Yao Z J, Lei Y P. Modeling of soil available phosphorus surplus in an intensive wheat-maize rotation production area of the North China Plain[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 269: 22-29.
- [8] 张泽兴, 柳小琪, 别婧雅, 等. 陕西关中冬小麦-夏玉米种植区壤土无机磷形态及其有效性[J]. 西北农业学报, 2021, 30(7): 1010-1017.
- [9] Li Q Q, Yang A L, Wang Z H, et al. Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization

- in wheat in north and northwest China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 175: 96–105.
- [10] 钱锐, 刘洋, 郭茹, 等. 覆膜秸秆还田对旱作农田土壤水温及春玉米产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2021, 30(4): 532–544.
- [11] 李金彪, 刘广明, 陈金林, 等. 不同物料掺拌对滨海重度盐土的改良效果研究[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1481–1485.
- [12] 张晓东, 鲁雪林, 吴哲, 等. 生态有机肥配施对滨海盐渍化土壤性质和玉米产量的影响[J]. *河北农业科学*, 2021, 25(2): 53–60.
- [13] 张雪辰, 陈诚, 苏里坦, 等. 聚丙烯酰胺改良盐渍土壤的适宜用量研究[J]. *土壤*, 2017, 49(6): 1216–1220.
- [14] 唐行灿, 陈金林. 生物炭对土壤理化和微生物性质影响研究进展[J]. *生态科学*, 2018, 37(1): 192–199.
- [15] 俞若涵, 姚奇, 杨明晓, 等. 生物炭对夏玉米农田土壤有效养分垂直分布及作物利用的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(1): 137–142.
- [16] 张晓东, 李兵, 刘广明, 等. 复合改良物料对滨海盐土的改土降盐效果与综合评价[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(11): 1744–1754.
- [17] 刘小媛, 杨劲松, 姚荣江. 化肥减量配施黄腐酸降低盐渍农田 NaCl 含量提高氮磷养分有效性的协同效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1339–1350.
- [18] 刘萌, 付威, 樊军, 等. 耕作与覆盖措施对黄土塬区春玉米田土壤水气传输的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(5): 814–825.
- [19] 刘继龙, 张振华, 谢恒星, 等. 烟台棕壤土饱和导水率的初步研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 129–132.
- [20] 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.
- [21] 于菲, 赵硕, 赵影, 等. 长期施用有机肥对松嫩平原西部盐碱土肥力和玉米产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(2): 172–180.
- [22] 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.
- [23] 杨丽, 刘元生, 卜通达, 等. 不同类型生物质炭基肥对玉米增产效应研究[J]. *山地农业生物学报*, 2021, 40(2): 9–15.
- [24] 吕真真, 刘广明, 杨劲松, 等. 黄河三角洲滨海盐渍土区土壤质量综合评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(6): 93–97.