

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.006

高珊, 杨劲松, 姚荣江, 等. 调控措施对滨海盐渍土磷素形态及作物磷素吸收的影响. 土壤, 2020, 52(4): 691–698.

调控措施对滨海盐渍土磷素形态及作物磷素吸收的影响^①

高珊^{1,2}, 杨劲松^{1*}, 姚荣江¹, 曹逸凡¹, 朱海¹, 孙运朋¹, 王相平¹, 谢文萍¹

(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)

摘要: 滨海盐渍化土壤存在磷素有效性低的问题。本试验采用根袋法盆栽试验, 共设不施磷肥、常规磷肥、磷肥+生物质炭、磷肥+腐殖酸、磷肥+商品有机肥 5 个处理, 分析不同调控措施对非盐渍土、轻度盐渍土和重度盐渍土有效磷含量、磷素形态以及大麦磷素吸收利用的影响。结果表明: ①盐碱障碍降低根区内外土壤有效磷含量, 表现为非盐渍土>轻度盐渍土>中度盐渍土。添加生物质炭能显著提高轻度、中度盐渍土根区内外土壤有效磷含量, 较常规磷肥对照处理分别提高 40.72%、84.80%。②盐碱障碍降低大麦产量, 抑制地上部对磷素的吸收, 不同调控措施均能促进盐渍土上大麦对磷素的吸收, 提高磷肥利用率。轻度盐渍土上不同调控措施的增产效果不显著, 中度盐渍土上添加生物质炭处理显著提高大麦产量, 较常规磷肥对照处理提高 63.20%。③盐碱障碍降低土壤活性无机磷、NaOH-P_i、NaHCO₃-P_o、NaOH-P_o 比例, 增加 HCl-P_i 比例。添加生物质炭处理能显著提高盐渍土活性无机磷比例, 提高土壤磷的有效性。添加生物质炭和商品有机肥处理对中度盐渍土上 HCl-P_i 比例的降低效果优于轻度盐渍土。

关键词: 盐渍土; 磷素分级; 磷利用率; 调控措施

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A

Effects of Different Management on Phosphorus Fractions in Coastal Saline Soil and Phosphorus Absorption and Utilization by Crops

GAO Shan^{1,2}, YANG Jinsong^{1*}, YAO Rongjiang¹, CAO Yifan¹, ZHU Hai¹, SUN Yunpeng¹, WANG Xiangping¹, XIE Wenping¹
(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)

Abstract: Low availability of phosphorus (P) universally occurs in coastal saline soil. A root-bag pot experiment was conducted, 5 treatments were designed: 1) CK₀, no application of P; 2) CK, conventional P fertilizer; 3) FC, application of biochar; 4) FH, application of humic acid; 5) FM, application of organic and inorganic P. The effects of different treatments on the content of available P, P fractions and P absorption were investigated for non, light and moderate saline soils, respectively. The results showed that: 1) Available P contents in rhizosphere and non-rhizosphere soils decreased with the increase of soil salinity. The addition of biochar significantly increased available P in light and moderate saline soils, which were 40.72% and 84.80% higher than those of CK, respectively. 2) The salinization obstruction decreased barley yield and P absorption by barley aboveground. All treatments promoted P uptake by barley in saline soil and improved the utilization rate of P fertilizer. The yield-increasing effect was not significant in light saline soil for all treatments, while FC treatment significantly increased barley yield by 63.20% in moderate saline soil than CK. 3) Salinization obstruction reduced the proportion of soil active inorganic P, NaOH-P_i, NaHCO₃-P_o and NaOH-P_o, but increased the proportion of HCl-P_i. In conclusion, FC treatment significantly increased the proportion of active inorganic P in saline soil, which improved the availability of soil phosphorus, and FC and FM treatments reduced HCl-P_i ratio more in moderate saline soil than in light saline soil.

Key words: Saline soil; Phosphorus fraction; Phosphorus use efficiency; Management measures

磷是作物生长发育不可缺少的营养元素, 作物生长所需的磷主要源于土壤, 土壤中磷的形态直接影响

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200303)、中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-112-03-02)、国家科技支撑计划项目(2015BAD01B03-4)和江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2015337-2、BE2017337-3)资助。

* 通讯作者(jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 高珊(1994—), 女, 辽宁大连人, 硕士研究生, 主要从事盐渍土改良与养分高效利用方面研究。E-mail: gaoshan@issas.ac.cn

着土壤供磷状况和植物对磷的吸收利用^[1]。但磷在土壤中移动性较差,易被转化为作物难以利用的磷酸盐形态积累在土壤中,造成磷肥的当季利用率仅为 10%~25%^[2]。因此,土壤中磷的形态及其有效化问题一直被国内外学者关注^[3-4]。根际是植物吸收磷的主要区域,根际过程决定了土壤磷的转化及有效性^[5]。因此,研究根际土壤磷素形态有效化以及作物对磷素的吸收利用,对于明确土壤磷库状况、提高磷利用效率有重要意义。

滨海盐渍土改良利用过程中存在磷素有效性低这一突出问题。在盐渍土中,由于土壤盐度或碱度的影响,施入土壤的磷以有效性低的难溶性磷酸盐形态存在^[6]。电导率增高不仅影响土壤结构、容重、渗透性等土壤理化性质^[7],同时降低土壤微生物生物量碳及碱性磷酸酶等多种酶活性^[8-9],影响土壤中磷素的转化,阻碍作物对磷的吸收,从而导致磷素的化学有效性和生物有效性降低。

长期以来,国内外学者为改良盐渍土、提高磷素有效性进行了大量研究^[10-24]。施用生物质炭、腐殖酸和有机肥对改良盐渍土、提高磷素有效性均有一定的效果^[10-12]。夏阳等^[13]研究表明,盐碱土中添加少量生物炭能降低土壤 pH 和盐分,提高植物根际土壤有效磷含量。此外,生物质炭本身含有一定量的磷,施入土壤后能提高 Olsen-P 含量,促进磷素的形态转化,有助于提高土壤中磷的有效性^[14]。腐殖酸具有良好的吸收、交换、络合等功能,能够改善土壤盐碱指标、提高土壤保水能力^[15]。杨凯等^[16]研究添加外源腐殖酸对石灰性土壤无机磷组分的影响结果表明,施入腐殖酸能减少闭蓄态磷,活化无机磷组分。化肥与有机肥配施作为传统农艺调控措施,被广泛应用到盐渍土的改良和培肥方面,大部分研究集中在对土壤培肥功

能方面,如有机肥提高土壤有机质含量及维持养分平衡,进而促进作物生长^[17];也有研究报道了有机肥改善盐渍土壤结构,促进盐渍土壤洗盐、脱盐效果及土壤难溶性磷向其他形态磷素转化^[18-19]。

虽然上述研究分别报道了生物质炭、腐殖酸和有机肥作为盐渍土改良剂对盐渍土性质的改善功能及对磷养分的提升效果,但目前的研究多侧重于对盐渍土壤本身改良效果、作物产量以及土壤有效磷的测定,且研究方法较为单一。Hedley 磷素分级法是一种能兼顾有机磷和无机磷的较为合理的磷素分级方法,受到国外学者广泛认可^[20]。目前国内对土壤磷素的分级研究仍多采用传统的分级方法,部分学者采用 Hedley 磷素分级法在复垦土^[21]、林地^[22]、农田^[23]等土壤上进行了初步研究,而盐渍化农田土壤上的 Hedley 磷素分级研究还不是很充分,而且从根际微域的角度探究盐碱障碍下不同调控措施对根际磷形态转化与有效性影响的研究比较有限。本研究以苏北滨海滩涂农田轻度 and 中度盐渍土为研究对象,采用根袋法盆栽试验研究不同调控措施对盐渍土根际磷素形态转化及作物磷素吸收利用的影响,对于揭示滨海盐渍化农田土壤磷库状况及高效利用磷素具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽用土采自江苏省东台市弶港镇条子泥垦区(32°39' N, 120°56' E),属于滨海新围垦滩涂土壤(围垦时间 2016 年),土壤类型为冲积盐土类,潮盐土亚类,是典型的淤泥质海岸带盐渍土。供试土壤为粉砂质土壤,其中砂粒(2~0.22 mm)、粉砂(0.22~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)的质量分数分别为 3.48%、75.76%、20.76%^[24],土壤的其他基本性质见表 1。

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of tested soils

土壤类型	pH	含盐量 (g/kg)	全磷 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	H ₂ O-P _i (mg/kg)	NaHCO ₃ -P _i (mg/kg)	NaHCO ₃ -P _o (mg/kg)	NaOH-P _i (mg/kg)	NaOH-P _o (mg/kg)	HCl-P _i (mg/kg)
非盐渍土	8.77	0.51	812.45	44.41	12.55	80.86	6.79	35.23	13.89	496.58
轻度盐渍土	9.00	1.55	709.95	21.04	4.77	41.52	4.25	22.44	9.58	483.66
中度盐渍土	9.30	2.53	651.20	11.05	2.15	15.06	4.91	11.42	4.91	485.1

注:表中 H₂O-P_i 和 NaHCO₃-P_i 是土壤活性磷库的主要组分; NaOH-P_i 为中等活性无机磷; NaHCO₃-P_o 为可溶性有机磷; NaOH-P_o 腐殖酸类物质结合的有机磷; HCl-P_i 为稳定性磷^[25]

试验大麦为扬啤 5 号,由上海黄海种业有限公司提供。试验用氮肥为尿素(含 N 466 g/kg),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 140 g/kg)。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,有效磷含量为 29.5 mg/kg),腐殖酸由大连九成物产有限公司提供,商品有机肥由东台新宏阳有机肥有限公司提供(有机质 460 g/kg, N 12 g/kg, P₂O₅ 31 g/kg, K₂O 10 g/kg)。

1.2 试验设计

试验于2017—2018年在中国科学院南京土壤研究所网室进行。试验分别在非盐渍土(S)、轻度盐渍土(D)和中度盐渍土(Z)上设不施磷肥(CK₀)、常规磷肥(CK)、磷肥+生物炭(FC)、磷肥+腐殖酸(FH)、磷肥+商品有机肥(FM)共5个处理,每个处理重复3次。试验采用根袋法,将风干土壤磨细过10目筛后混匀,每个塑料桶(直径25 cm,高26 cm)装土11 kg。利用300目尼龙网(25 cm×35 cm)将土壤划分成2个区域,其中根袋内装土3 kg,埋入装有8 kg土壤的塑料桶中央。塑料桶底开有排水孔,灌溉中若有盐分的淋洗则承接在托盘中再倒回土壤,保证无盐分的淋失。N和P₂O₅施用量分别为100 mg/kg和67 mg/kg。其中氮肥为尿素,基追比为6:2:2,磷肥为过磷酸钙,作基肥一次性施入,其中添加生物质炭和商品有机肥处理的磷肥施用量按等磷原则予以减少。在播种之前将肥料、改良剂(生物质炭、腐殖酸和商品有机肥)与土壤混匀(根袋内与根袋外均施肥料与改良剂),按照容重1.3 g/cm³分层装土。采用称重法监测土壤含水量,定期补水,使土壤保持田间持水量的60%~90%。大麦种子经拌种后播入根袋内(播种时间2017年11月30日),每盆保留8株(按大田播种密度计)。大麦收获后(2018年5月16日)分别采集根袋内土壤(根区土)和桶内距根袋2 cm外的土壤(非根区土)以及植株样用于分析测定。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品采集 在大麦收获后,用土钻分别采集根袋内外0~20 cm土样,每盆3个点,混合均匀后经风干、过筛后用于全磷、有效磷的测定。采集植株样本,剪去根部,在105℃杀青30 min,70℃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。

1.3.2 样品测定方法 土壤有效磷用0.5 mol/L NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定,全磷用H₂SO₄-HClO₄消煮-钼锑抗比色法测定。土壤磷素分级采用Tissen^[26]修正的Hedley磷素分级方法,依次采用去离子水、0.5 mol/L NaHCO₃(pH 8.5)、0.1 mol/L NaOH和1 mol/L HCl浸提土壤,钼锑抗比色法测定上述浸提液中的无机磷(P_i)含量(H₂O-P_i、NaHCO₃-P_i、NaOH-P_i和HCl-P_i),后将NaHCO₃和NaOH浸提液经硫酸-过硫酸铵消煮后,测定全磷(P₀)含量后计算有机磷(P_o)含量(P₀和P_i的差值)(H₂O-P_o、NaHCO₃-P_o和NaOH-P_o)。最后将土壤残渣采用H₂SO₄-HClO₄消煮-钼锑抗比色法测定残留态磷含量(R-P)。植株样品全

磷采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,钼锑抗比色法测定。

1.3.3 计算公式 $TS = 2.47 \times EC_{1.5} + 0.26$,式中:TS为土壤全盐含量(g/kg),EC_{1.5}为土水质量比1:5时的土壤电导率(dS/m);作物吸磷量(kg/hm²)=籽粒产量(kg/hm²)×籽粒含磷量(%) + 秸秆产量(kg/hm²)×秸秆含磷量(%);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×100。

1.4 数据统计与分析

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,不同处理间的差异显著性水平运用Duncan法进行多重比较,采用SigmaPlot 13.0软件进行作图。

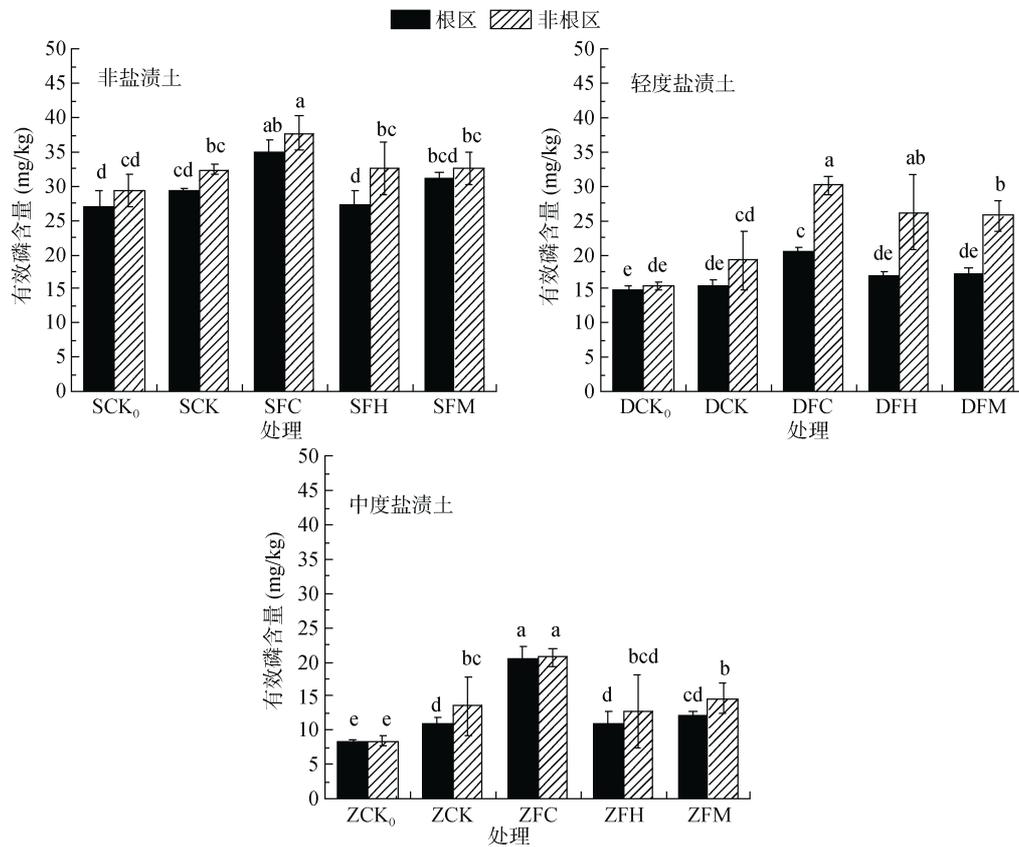
2 结果与分析

2.1 调控措施对根区内外土壤有效磷含量的影响

由图1所示,与SCK₀处理(表示非盐渍土上的不施磷处理,以下表示方法类同)相比,DCK₀、ZCK₀处理根区土壤有效磷含量分别降低45.17%、69.15%,表现为有效磷含量随盐分的升高而降低,说明盐碱障碍降低土壤有效磷含量。在轻度盐渍土上,调控措施均能不同程度提高根区内外有效磷含量,其中DFC处理根区土壤有效磷含量较DCK处理提高40.72%,差异显著,DFH、DFM处理较DCK处理分别提高10.48%、6.65%。在中度盐渍土上,除ZFH处理略有降低外,其他不同调控措施下根区内外土壤有效磷含量均有所提高。其中ZFC处理显著增加根区有效磷含量,比ZCK处理提高84.80%,ZFM处理较ZCK处理提高9.67%。由于作物对土壤磷素的吸收,不同处理下根区土壤有效磷含量均低于非根区。轻度、中度盐渍土不同调控措施下根区土壤有效磷含量显著低于非根区,表现出明显的根际效应。

2.2 调控措施对大麦产量及磷素利用率的影响

2.2.1 大麦产量及磷素吸收量 由表2可知,与非盐渍土相比,盐碱障碍降低大麦产量,常规施磷处理下轻度、中度盐渍土大麦产量较DCK₀、ZCK₀分别提高了10.36%、64.71%;添加生物质炭能提高盐渍土大麦生物量,其中在中度盐渍土上生物质炭的增产效果显著,较ZCK处理提高了63.20%;在轻度盐渍土上,DFH和DFM处理大麦的产量较DCK处理略有降低,而在中度盐渍土上,ZFH、ZFM处理能提高大麦产量,说明中度盐渍土上腐殖酸、商品有机肥处理的改良效果优于轻度盐渍土。在轻度盐渍土上,DFC、DFH、DFM处理均能显著提高大麦地上部吸



(柱状图上不同小写字母表示不同处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著)

图 1 不同调控措施下根区内外土壤有效磷含量

Fig. 1 Contents of available P in rhizosphere and non-rhizosphere soils under different treatments

表 2 不同调控措施对大麦产量、磷素吸收利用的影响

Table 2 Grain yields and P uptake of barleys under different measures

土壤类型	处理	产量(kg/hm ²)			磷素吸收量(kg/hm ²)			磷肥利用率 (%)
		籽粒	秸秆	总量	籽粒	秸秆	总量	
非盐渍土	SCK ₀	5 153 b	4 113 b	9 079 b	20.92 b	2.92 c	23.85 b	—
	SCK	5 833 a	4 384 ab	10 217 a	22.19 ab	4.26 b	26.44 b	2.92 b
	SFC	5 785 a	4 928 a	10 713 a	25.14 a	5.82 a	30.95 a	5.93 a
	SFH	5 939 a	4 342 ab	10 281 a	22.76 ab	3.38 bc	26.14 b	2.72 b
	SFM	5 758 a	4 270 ab	10 028 a	22.93 ab	4.58 b	27.51 b	3.64 b
轻度盐渍土	DCK ₀	4 663 a	3 475 c	8 138 b	18.54 c	2.93 b	21.47 c	—
	DCK	4 735 a	4 356 ab	9 091 ab	21.91 b	4.09 b	26.00 b	2.25 b
	DFC	5 032 a	4 550 a	9 583 a	23.38 ab	6.97 a	30.35 a	5.92 a
	DFH	4 838 a	3 906 abc	8 743 ab	23.13 ab	7.49 a	30.62 a	6.49 a
	DFM	5 057 a	3 737 bc	8 793 ab	24.44 a	4.89 b	29.33 a	5.24 a
中度盐渍土	ZCK ₀	1 627 b	1 577 b	3 204 b	5.96 d	1.27 c	7.24 d	—
	ZCK	1 790 b	1 599 b	3 389 b	6.79 cd	1.67 bc	8.46 cd	0.75 c
	ZFC	2 705 a	2 826 a	5 531 a	10.83 a	3.37 a	14.19 a	4.33 a
	ZFH	1 817 b	1 663 b	3 480 b	7.79 bc	1.79 bc	9.59 bc	1.26 bc
	ZFM	1 829 b	1 706 b	3 535 b	8.84 b	2.33 b	11.17 b	2.31 b

注：同列不同小写字母表示同一土壤上不同处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著，下同。

磷量，较 DCK 处理分别提高 16.73%、17.77% 和 12.81%；而在中度盐渍土上，ZFC、ZFM 处理显著

促进大麦对磷素的吸收，较 ZCK 处理分别提高 67.73%、32.03%，而 ZFH 处理在中度盐渍土上对作

物吸磷量的促进效果不明显。

2.2.2 大麦磷素利用率 在非盐渍土上, 除 SFC 处理能显著提高磷肥利用率外, 其他处理下磷肥利用率较 SCK 处理差异不大。施磷处理下磷肥利用率表现为 $SCK > DCK > ZCK$, 说明盐碱障碍降低磷肥利用效率。在轻度盐渍土上, DFC、DFH、DFM 处理显著提高磷肥利用率, 较 DCK 处理分别提高了 4.24%、3.67%、2.99%。而在中度盐渍土上, 仅 ZFC、ZFM 处理显著提高磷肥利用率, ZFH 处理的效果不明显。

2.3 调控措施对根区土壤磷素形态的影响

在 Hedley 磷素分级方法中, H_2O-P_i 和 $NaHCO_3-P_i$ 是植物主要吸收利用的磷组分, 为土壤活性磷库的主要组成部分^[27]。由表 3 所示, 与 SCK_0 处理相比, DCK_0 与 ZCK_0 处理活性无机磷的比例分别降低 3.58%、6.69%。非盐渍土不同调控措施下活性无机磷占比约为 8.20%~10.13%, 除 SFH 处理较 SCK 处理显著降低土壤活性无机磷占比外, 其余处理与 SCK 处理无显著差异。在轻度、中度盐渍土上, 添加生物质炭均能显著提高土壤活性无机磷比例, 较 DCK 和 ZCK 处理分别提高了 1.8%、3.42%。添加腐殖酸能显著增加轻度盐渍土活性无机磷的比例, 较 DCK 处理提高了 0.58%, 而在中度盐渍土上略有降低。ZFM 处理较 ZCK 处理也能提高轻度、中度盐渍土活性无机磷的比例。

$NaOH-P_i$ 对植物的有效性低, 可作为潜在磷源缓慢矿化补充土壤中的有效磷, 属于中等活性无机磷^[28]。与非盐渍土相比, 盐碱障碍降低土壤 $NaOH-P_i$ 的比

例。添加生物质炭能不同程度提高轻度、中度盐渍土 $NaOH-P_i$ 比例, 其中 ZFC 处理较 ZCK 处理提高了 0.29%, 具有显著差异。其他措施下 $NaOH-P_i$ 比例与常规磷肥对照处理差异不大。

$NaHCO_3-P_o$ 主要是可溶性有机磷, 可向土壤溶液中补充有效磷素。而 $NaOH-P_o$ 主要是土壤中腐殖酸类物质结合的有机磷^[29]。由表 3 可知, 滨海盐渍土土壤磷库中有机磷的比例很少, 仅占 1.49%~2.48%。添加生物质炭、腐殖酸和商品有机肥处理较 SCK 处理能一定程度上提高非盐渍土中 $NaHCO_3-P_o$ 的比例; 而在盐渍土上 $NaHCO_3-P_o$ 比例与单施磷肥相比均降低, 说明在盐碱障碍下调控措施能促进土壤有机磷的矿化, 其中 DFM 和 ZFM 处理均显著降低了土壤 $NaHCO_3-P_o$ 比例。而各处理下 $NaOH-P_o$ 所占比例与常规磷肥对照处理无显著差异, 盐碱障碍下不同调控措施对土壤 $NaOH-P_o$ 的活化能力有限。

$HCl-P_i$ 很难转化成有效磷被植物利用, 被认为是稳定性磷^[30]。由表 3 可知, 滨海盐渍土土壤磷库中的磷主要以 $HCl-P_i$ 形态存在, 占可提取磷素含量的 68.10%~78.06%。各土壤中 $HCl-P_i$ 比例的变化与 H_2O-P_i 、 $NaHCO_3-P_i$ 和 $NaOH-P_i$ 相反。与非盐渍土相比, 盐碱障碍提高了土壤中 $HCl-P_i$ 的比例, 降低土壤磷的有效性。非盐渍土上不同调控措施均能显著降低土壤 $HCl-P_i$ 比例, 促进磷的有效化。在中度盐渍土上, ZFC 和 ZFM 处理均能显著降低土壤 $HCl-P_i$ 比例, 较 ZCK 处理分别降低 5.21%、3.69%, ZFH 处理下土壤 $HCl-P_i$ 比例变化不大。而在轻度盐渍土上各调控措施对土壤 $HCl-P_i$ 比例的降低效果不显著。

表 3 不同调控措施下土壤各形态磷的比例
Table 3 Proportion of soil P fractions under different treatments

土壤类型	处理	Hedley 各形态磷及占全磷比例(%)							活性无机磷占比(%)
		H_2O-P_i	$NaHCO_3-P_i$	$NaOH-P_i$	$HCl-P_i$	$NaHCO_3-P_o$	$NaOH-P_o$	R-P	
非盐渍土	SCK_0	1.12 b	7.77ab	3.80 a	62.71 ab	0.49 a	1.61 a	22.46 bc	8.89 bc
	SCK	1.23 b	8.43 a	4.00 a	63.64 a	0.41 a	1.38 b	20.82 c	9.66 ab
	SFC	1.67 a	8.46 a	3.82 a	58.69 bc	0.66 a	1.36 b	25.15 ab	10.13 a
	SFH	1.06 b	7.13 b	3.60 a	58.92 c	0.56 a	1.31 b	27.44 a	8.20 c
	SFM	1.10 b	8.15 a	3.84 a	58.23 c	0.55 a	1.51 ab	26.58 a	9.25 abc
轻度盐渍土	DCK_0	0.62 d	4.69 c	2.79 b	68.54 a	0.84 a	1.33 a	21.18 a	5.31 d
	DCK	0.72 cd	5.02 bc	2.89 ab	69.56 a	1.04 a	1.44 a	19.34 ab	5.73 cd
	DFC	1.47 a	6.06 a	3.04 a	68.10 a	0.92 a	1.29 a	19.12 b	7.53 a
	DFH	0.88 b	5.43 b	2.96 ab	68.79 a	0.75 ab	1.42 a	19.77 ab	6.31 b
	DFM	0.74 c	5.35 b	2.82 b	68.76 a	0.53 b	1.35 a	20.45 ab	6.09 bc
中度盐渍土	ZCK_0	0.32 c	1.88 d	1.66 c	78.06 a	0.65 ab	1.09 a	16.34 c	2.20 d
	ZCK	0.67 b	2.84 c	2.11 b	76.33 b	0.79 a	0.89 b	16.38 c	3.51 bc
	ZFC	2.25 a	4.68 a	2.40 a	71.12 c	0.61 ab	0.90 b	18.04 b	6.93 a
	ZFH	0.51 bc	2.85 c	2.00 b	75.92 b	0.67 ab	0.88 b	17.18 bc	3.35 c
	ZFM	0.71 b	3.30 b	2.05 b	72.64 c	0.59 b	0.90 b	19.80 a	4.02 b

3 讨论

3.1 调控措施对盐渍土有效磷及作物磷素吸收利用的影响

土壤有效磷能够直接被作物吸收利用,一直是判断土壤磷素丰缺的重要指标。由于盐渍土中土壤磷素易被固定,提高根际土壤磷的有效性是提高磷素利用效率的关键^[31]。研究表明,由于作物的生长吸收及对土壤难溶性磷素的活化,根际土壤中有效磷含量通常会呈现亏缺,表现出明显的根际效应^[32-34],这与本试验所得的结果一致。在轻度盐渍土上,大麦收获后根区土壤有效磷含量显著低于非根区土壤,表现出明显的根区有效磷亏缺现象。而中度盐渍土不同调控措施下根区有效磷含量与非根区差异较小,这可能是由于在盐分胁迫较强的情况下抑制了大麦对土壤磷素的吸收,从而使根际效应不明显^[35]。本研究表明,在轻度和中度盐渍土除 ZFH 处理外,其他调控措施均能不同程度提高根区和非根区土壤有效磷含量。其中 DFC 和 ZFC 处理下根区土壤有效磷含量较单施磷肥处理显著提高,表明施用生物质炭能提高盐渍土有效磷含量,这与苏倩等^[36]的结果一致。生物质炭促进土壤磷素含量增加的原因在于生物质炭本身富含丰富的矿质养分;生物质炭具有巨大的比表面积,可对土壤溶液中的离子起到吸附、缓释的作用。此外,生物质炭还可通过改善盐渍土的土壤环境进而影响微生物的活性,使得土壤对磷的吸附、释放过程产生间接影响^[37-38]。已有研究表明,盐分作为土壤的障碍因子能影响磷素转化,进而降低作物对养分的吸收和肥料利用效率^[39]。在本试验中,与非盐渍土相比,盐碱障碍降低作物产量,抑制作物对磷素的吸收,其原因是盐渍土中存在大量 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子与磷元素产生竞争,使得植株吸磷量减少^[40]。在盐碱障碍下,与单施磷肥相比,不同调控措施能不同程度促进轻度、中度盐渍土上大麦对磷素的吸收,提高磷肥利用率。李军等^[41]的研究表明,磷肥中添加 10~200 g/kg 腐殖酸可提高玉米磷素吸收量及土壤中有效磷的含量。康日峰等^[42]研究发现,添加生物质炭肥料能提高小麦植株生物量,促进磷养分的吸收。陈贵等^[43]研究发现,连续 7 a 有机肥与化肥配施能显著促进水稻对氮、磷养分的吸收,提高养分利用率。这与本试验结果相似。与常规施磷肥相比,不同调控措施在提高大麦对土壤磷素吸收的同时还能不同程度提高土壤有效磷含量,说明不同调控措施能减少磷的固定,活化土壤难溶性磷,提高磷肥在土壤中的有效性。

3.2 调控措施对盐渍土磷组分含量的影响

在 Hedley 磷素分级中, $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 NaOH-P_i 被认为是相当有效的无机磷源,而 HCl-P_i 难以转化成有效磷被植物利用,被认为是低活性磷^[44-45]。本研究表明,添加生物质炭能提高轻度、中度盐渍土活性无机磷、 NaOH-P_i 占比,降低土壤中 HCl-P_i 的比例,且在中度盐渍土上 HCl-P_i 的比例显著降低,这与王宁^[46]的研究结果一致。生物质炭具有多孔性、比表面积大等特点,施入土壤中会干扰土壤铁铝氧化物对磷的吸附,从而减少土壤对磷酸根离子的吸附^[47]。腐殖酸施入土壤后可通过解离羟基、酚基等官能团与磷酸根竞争土壤胶体表面的吸附位点,同时还可与钙离子等络合形成 HA-M-磷酸盐络合物,减少土壤对磷的吸附,提高土壤磷素有效性^[48]。Alvarez 等^[49]研究表明,在 pH 7.5 条件下腐殖酸可有效减缓有效磷向难溶性磷的转化。本研究中,轻度盐渍土添加腐殖酸能一定程度提高土壤中活性无机磷、 NaOH-P_i 比例,降低 HCl-P_i 比例,而中度盐渍土效果不明显。这可能是由于中度盐渍土 pH 较高,影响了腐殖酸对土壤磷素的转化作用。有机肥可以减少土壤对化肥磷的固定,促进磷的形态转化,为作物提供有效磷源^[50]。本研究中,轻度、中度盐渍土不同调控措施土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 和 NaOH-P_o 含量较常规磷肥对照处理有所下降,但差异不显著,说明虽然土壤中潜在可以转化的有机磷数量减少,但由于盐碱障碍土壤的有机质含量较低,不同调控措施对土壤中 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 和 NaOH-P_o 的活化作用有限。

4 结论

1) 盐碱障碍降低根区内外土壤有效磷含量,表现为非盐渍土>轻度盐渍土>中度盐渍土。调控措施均能不同程度提高根区土壤有效磷含量,其中添加生物质炭能显著提高轻度、中度盐渍土根区土壤有效磷,较常规施磷处理分别提高 40.72%、84.80%。

2) 与非盐渍土相比,盐碱障碍降低大麦产量,抑制大麦地上部对磷素的吸收。不同调控措施能不同程度促进盐渍土上大麦对磷素的吸收,提高磷肥利用率。轻度盐渍土上不同调控措施的增产效果不显著,但中度盐渍土上添加生物质炭能显著提高大麦产量,较常规施磷处理提高 63.20%。

3) 滨海盐渍土土壤磷库中磷主要以 HCl-P_i 形态存在。盐碱障碍降低土壤活性无机磷、中等活性无机磷和有机磷的比例,提高 HCl-P_i 比例。添加生物质炭处理能显著提高盐渍土活性无机磷比例,从而提高

土壤磷的有效性。各调控措施对中度盐渍土 HCl-Pi 比例的降低效果优于轻度盐渍土。盐渍土中有机质含量低, 不同调控措施对土壤有机磷的活化作用有限。

参考文献:

- [1] 鲁如坤. 我国的磷矿资源和磷肥生产消费 II. 磷肥消费和需求[J]. 土壤, 2004, 36(2): 113-116.
- [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] 李新乐, 侯向阳, 穆怀彬, 等. 连续6年施磷肥对土壤磷素积累、形态转化及有效性的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(8): 218-224.
- [4] Zhang T, MacKenzie A F, Liang B, et al. Soil test phosphorus and phosphorus fractions with long-term phosphorus addition and depletion[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(2): 519-528.
- [5] 王丹, 赵学强, 郑春丽, 等. 两种根际促生菌在不同氮磷条件下对油菜生长和养分吸收的影响[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1078-1083.
- [6] 柴立涛, 耿玉辉, 宋引弟, 等. 施磷对吉林省西部盐碱土水田土壤无机磷组分的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 197-201.
- [7] 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 & Biochemistry, 2006, 38(6): 1413-1421.
- [8] Rietz D N, Haynes R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(6): 845-854.
- [9] Garc{\I}a C, Hern{\A}ndez T. Influence of salinity on the biological and biochemical activity of a calciorthid soil[J]. Plant and Soil, 1996, 178(2): 255-263.
- [10] 武玉. 生物炭对土壤中磷的形态转化以及有效性的影响[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2015.
- [11] 章智明, 黄占斌, 单瑞娟. 腐植酸对土壤改良作用探讨[J]. 环境与可持续发展, 2013, 38(3): 109-111.
- [12] Xu M G, Li D C, Li J M, et al. Effects of organic manure application with chemical fertilizers on nutrient absorption and yield of rice in Hunan of Southern China[J]. Agricultural Sciences in China, 2008, 7(10): 1245-1252.
- [13] 夏阳. 生物炭对滨海盐碱植物生长及根际土壤环境的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [14] 张朴, 李仁英, 吴洪生, 等. 水稻秸秆生物质炭对土壤磷吸附影响的研究[J]. 土壤, 2018, 50(2): 264-269.
- [15] 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.
- [16] 杨凯, 关连珠, 朱教君, 等. 外源腐植酸对三种土壤无机磷组分的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1172-1175.
- [17] 罗佳, 盛建东, 王永旭, 等. 不同有机肥对盐渍化耕地土壤盐分、养分及棉花产量的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 48-53.
- [18] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 不同用量有机肥对陇东旱塬黑垆土磷素形态转化及有效性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(2): 32-38.
- [19] 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.
- [20] 张林, 吴宁, 吴彦, 等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1775-1782.
- [21] 樊彦波, 李晓秀, 龚艳伟. 不同复垦模式下改进后的 Hedley 磷分级的研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 50-56.
- [22] 余定坤. 基于 Hedley 分级技术的毛竹林磷素利用特征研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013.
- [23] 吴启华. 长期不同施肥下三种土壤磷素有效性和磷肥利用率的差异机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [24] 张建兵, 杨劲松, 姚荣江, 等. 有机肥与覆盖方式对滩涂围垦农田水盐与作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 116-125.
- [25] Maranguit D, Guillaume T, Kuzyakov Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils[J]. Catena, 2017, 149: 385-393.
- [26] Tiessen H. Characterization of available P by sequential extraction[J]. Soil Sampling & Methods of Analysis, 1993, 824: 75-87.
- [27] 戴佩彬. 模拟条件下磷肥配施有机肥对土壤磷素转化迁移及水稻吸收利用的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [28] Rose T J, Hardiputra B, Rengel Z. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics[J]. Plant and Soil, 2010, 326(1): 159-170.
- [29] 吴文丽. 施用三种肥料对不同复垦年限土壤 Hedley 磷形态及玉米产量的影响[D]. 山西太谷: 山西农业大学, 2015.
- [30] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations I[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(5): 970-976.
- [31] 张立花, 张辉, 黄玉芳, 等. 施磷对玉米吸磷量、产量和土壤磷含量的影响及其相关性[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 801-809.
- [32] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review[J]. Plant and Soil, 2001, 237(2): 173-195.
- [33] 冯固. 根际生物互作影响土壤磷活化和利用的机制研究新进展[C]//第七次全国土壤生物与生物化学学术研讨会暨第二次全国土壤健康学术研讨会论文集. 武汉, 2014: 11.
- [34] 李耀燕, 曾志军, 黎晓峰, 等. 黑麦对难溶性磷酸盐的吸收及活化机制研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(4): 4724-4729.
- [35] 张锡洲, 阳显斌, 李廷轩, 等. 不同磷效率小麦对磷的吸收及根际土壤磷组分特征差异[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3083-3092.

- [36] 苏倩, 侯振安, 赵靛, 等. 生物碳对土壤磷素和棉花养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 642-650.
- [37] 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.
- [38] 周丽丽, 李婧楠, 米彩红, 等. 秸秆生物炭输入对冻融期棕壤磷有效性的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 171-179.
- [39] 单晶晶. 肥盐交互作用对滨海盐渍土与冬小麦生长的影响及肥料效应研究[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2017.
- [40] 田志杰. 盐碱胁迫下水稻磷素吸收利用转运特征的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 张鑫, 谷会岩, 陈祥伟. 择伐干扰对小兴安岭阔叶红松林土壤磷形态及有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 441-448.
- [45] 许艳, 张仁陟. 陇中黄土高原不同耕作措施下土壤磷动态研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 670-681.
- [46] 王宁. 生物炭对土壤磷吸附解吸及磷形态转化的影响[D]. 太原: 山西大学, 2017.
- [47] 关连珠, 禅忠祥, 张金海, 等. 炭化玉米秸秆对棕壤磷素组分及有效性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(10): 2050-2057.
- [48] 张玉兰, 王俊宇, 马星竹, 等. 提高磷肥有效性的活化技术研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(1): 194-202.
- [49] Alvarez R, Evans L, Milham P J, et al. Effects of humic material on the precipitation of calcium phosphate[J]. Geoderma, 2004, 118(3): 245-260.
- [50] Yan Z J, Chen S, Dari B, et al. Phosphorus transformation response to soil properties changes induced by manure application in a calcareous soil[J]. Geoderma, 2018, 322: 163-171.