植物营养与肥料学报 2017, 23(3): 704–711
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.16415
http://www.plantnutrifert.org

不同改良剂对滨海盐渍土土壤理化性质和小麦生长的影响

张济世[1]，于波涛[2]，张金凤[2]，刘玉明[2]，蒋曦龙[1]，崔振岭[1*]
（1 中国农业大学资源与环境学院，北京 100193；2 东营市垦利区农业局，山东东营 257500）

摘要:【目的】盐分胁迫是滨海盐渍土上粮食产量提高的主要障碍因子之一。研究不同功能性改良物料对消除和减轻这一障碍因子的作用，为改良盐渍化土壤和提高作物产量提供理论依据。【方法】以小麦品种‘青麦 6 号’为供试材料，在滨海盐渍土上进行田间试验，设置 7 个处理为空白对照（CK）、含钙物料的磷石膏（PG）和脱硫石膏（FGD）、调酸物料的硫酸亚铁（FS）、含碳材料的牛粪（M）以及含碳和调酸物料的腐植酸（HA）和糠醛渣（FRs），分析比较不同改良剂对滨海盐渍化土壤理化性质以及对小麦生长发育的影响。【结果】施加改良剂降低了土壤表层 (0—20 cm) 的 pH 值，作为酸性材料的腐植酸、糠醛渣和硫酸亚铁效果明显，土壤的 pH 值较对照分别降低了 0.10、0.11 和 0.11；施改良剂降低了土壤的交换性钠离子含量和钠的吸附比 (sodium adsorption ratio, 简称 SAR)，磷石膏和脱硫石膏提供充足的钙离子用于置换土壤中交换性钠离子，明显降低了不同土层中的交换性钠离子含量和 SAR 值，0—20 cm、20—40 cm 和 40—60 cm 土层中，磷石膏和脱硫石膏对土壤交换性钠离子含量和 SAR 值的降低效果明显，其中施加磷石膏分别较对照降低了 15.5% 和 18.3% (0—20 cm)、28.2% 和 28.6% (20—40 cm)、36.5% 和 36.5% (40—60 cm)，施加脱硫石膏分别较对照降低了 24.9% 和 27.9% (0—20 cm)、27.6% 和 26.3% (20—40 cm)、24.5% 和 25.0% (40—60 cm)；施加改良剂增加了小麦成熟期的穗数，其中磷石膏、脱硫石膏和糠醛渣改良效果显著，分别较对照增加 27.6%、24.5% 和 18.6%，并分别提高小麦的产量 26.7%、17.8% 和 17.8%。【结论】酸性物料的糠醛渣、腐植酸和硫酸亚铁，可以明显降低土壤 pH 值和增加小麦苗期的茎蘖数量，综合考虑改良剂对土壤 pH、Na^+ 含量、SAR 值和小麦群体数量的影响，含碳的调酸物料的糠醛渣效果较好；含钙物料的磷石膏和脱硫石膏，可以显著降低土壤 Na^+ 含量以及 SAR 值，增加小麦成熟期穗数，提高小麦产量均具有显著的效果，磷石膏效果最佳。

关键词: 滨海盐渍土；改良剂；土壤理化性质；小麦；生长发育

Effects of different amendments on soil physical and chemical properties and wheat growth in a coastal saline soil

ZHANG Ji-shi[1], YU Bo-tao[2], ZHANG Jin-feng[2], LIU Yu-ming[2], JIANG Xi-long[1], CUI Zhen-ling[1*]
(*1 College of Resource and Environment Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2 Agricultural Bureau of Kenli County, Dongying, Shangdong 257500, China*)

Abstract:【**Objectives**】Salt stress is one of the main limiting factors to improve grain yield in the coastal saline soil. Studying the effects of different functional modified materials on the elimination and mitigation of this limiting factor can provide theoretical basis for the amendment of saline soil and the improvement of crop yield.【**Methods**】Wheat cultivar ‘Qingmai 6’ was used as tested materials in coastal saline soil. The study included 7 experiments, blank control (CK), phosphogypsum (PG), flue gas desulfurization gypsum (FGD) containing calcium materials, ferrous sulfate (FS) of acidic material, cattle manure (M) containing carbon materials, humic acid (HA) and furfural residue (FRs) of acidic material containing carbon. We analyzed and compared the impacts of different amendments on the coastal saline soil physicochemical properties and growth of wheat.

收稿日期：2016–11–05　　**接受日期：**2017–02–06
基金项目：国家自然科学基金优秀青年科学基金项目（31522050）资助。
作者简介：张济世（1991—），男，河南襄城人，硕士研究生，主要从事滨海盐渍土改良研究。E-mail：zhangjsxxx@163.com
* 通信作者 Tel：010-62733454，E-mail：zhenlingcui@163.com

【**Results**】The amendments could reduce the pH values of surface soil (0–20 cm), especially the acid materials (HA, FRs and FS) significantly lowered the pH of the soil by 0.10, 0.11 and 0.11 compared with the control. The exchangeable sodium ion contents and the sodium adsorption ratio (SAR) values were significantly decreased by applying the PG and FGD in the 0–20 cm, 20–40 cm and 40–60 cm soil layers, due to a large amount of calcium ion to replace the exchangeable sodium in soil. Compared with control, PG significantly decreased the exchangeable Na^+ contents and the SAR values by 15.5% and 18.3% (0–20 cm), 28.2% and 28.6% (20–40 cm), 36.5% and 36.5% (40–60 cm), and the FGD decreased the exchangeable Na^+ contents and the SAR values by 24.9% and 27.9% (0–20 cm), 27.6% and 26.3% (20–40 cm), 24.5% and 25.0% (40–60 cm) respectively; the PG, FGD and FRs significantly increased the grain yields by 26.7%, 17.8% and 17.8% and increased the spike numbers by 27.6%, 24.5% and 18.6%, respectively.【**Conclusions**】The HA, FRs and FS of acidic materials can obviously reduce soil pH value and increase the number of tillers at the seedling stage of wheat. Considering the effects of amendments on soil pH, Na^+ content, SAR value and spike number of wheat, the furfural residue of acidic materials containing carbon was better. The PG and FGD containing calcium materials can significantly reduce soil Na^+ content and SAR value, increase spike number of wheat at maturity stage and improve wheat yield, and the PG treatment have the best effect .

Key words: coastal saline soil; amendment; soil physical and chemical properties; wheat; growth and development

随着人口的逐渐增加，全球主要粮食作物 (小麦、玉米和水稻) 实现产量潜力的 70%～80%，才能满足未来 30 年人类对粮食的需求[1]。小麦是我国三大粮食作物之一，产量约占世界小麦总产量的 19%，占我国粮食总产的 25%[2–3]，提高我国小麦产量至关重要。

盐渍土含有大量的盐分，可以导致土壤物理性状的恶化，严重影响土壤微生物的代谢，降低土壤中各种酶的活性，致使养分释放慢，有机质含量低，土壤肥力下降。还可以增加土壤溶液浓度，进而提高土壤溶液渗透压，造成植物根系吸水困难，致使植物生理干旱，甚至会导致植物死亡[4]。过多的盐分积累，一方面导致气孔导度降低，作物的光合作用减少；另一方面迫使作物吸收过多的盐基离子，如钠离子、氯离子等，造成离子毒害，导致叶片过早脱落[5]，还会导致严重的营养元素失衡，致使作物不能正常吸收其它的营养元素[6–8]。小麦主要生长在旱季，降雨少，受盐分危害大，因此改良利用盐渍土，实现小麦产量的提高，是一个非常重要的课题。

改良盐碱土主要是调控水盐运动，调控 pH。选用合适的化学药剂或者环境材料可以加快盐分淋洗，在微域范围内调控 pH，改善土壤理化性质。有研究表明，应用牛粪可以减少土壤盐分，改善土壤肥力，提高微生物的活动，促进作物生长[9–10]；无论是粗颗粒石膏还是细颗粒石膏都可以降低土壤的 SAR 值，且用量越高，SAR 值降低的越多[11]；七水合硫酸亚铁能够水解出 H^+，快速降低土壤 pH 值，还可以提高土壤中的钙镁离子，与吸附在土壤胶体表面的钠离子发生置换反应，降低土壤中的钠离子含量[12]。不同改良剂的改良机理不同, 其改良效果也不同。

滨海盐渍土作为一种特殊的区域性的盐渍化土壤，不仅具备盐、碱、板、瘦的特点，还具有地下水位浅、矿化度高的特点，又由于该区域为滨海地区，土壤中盐分的组成钠离子含量相对较高，加之其复杂的成土母质，都给滨海盐渍土的改良带来了很多不便[13–14]。前人多研究改良剂对盐渍化土壤理化性质的影响，很少涉及到滨海盐渍土的改良以及小麦的生长发育情况，综合分析不同功能性的改良剂物料对滨海盐渍土壤理化性质的改良机理以及对小麦生长发育的影响的研究，更是鲜有报道。因此本研究针对滨海盐渍土的特点，选择不同特性的改良材料，比较其对滨海盐渍土性能的改良效果，包括土壤盐分的变化和土壤理化性质的改变；比较分析不同改良材料对小麦生长发育的影响，包括对群体动态发育、干物质累积以及产量的影响，探究不同改良材料的改良机理，为滨海盐渍土的改良找到合适的改良材料提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况及试验设计

本试验于 2014～2015 在山东省东营市垦利县黄河口镇中国农业大学资源与环境学院试验田进行 (118.74° E，37.56° N)，属于大陆性季风气候区，年平均气温多在 11.3℃～12.4℃ 之间，年均无霜期 196

天，年均降雨量约 535 mm，多集中在夏季。当季小麦整个生育期降雨量 241.1 mm，其中 2015 年 4～6 月降雨量达 114.8 mm。供试土壤为粉砂土，容重 (0—20 cm) 为 1.57 g/cm^3, 地下水埋藏深度约 2.7 m 和矿化度约 5 g/L，供试土壤基础理化指标见表 1；供试小麦品种为青麦 6 号，播量为 225 kg/hm^2，2014 年 10 月 10 日播种，2015 年 6 月 10 日收获。本试验布置在轻度盐碱条件下 (EC 在 1500 μS/cm)，采用随机区组试验设计，设 7 个处理 (表 2)，每个处理 4 次重复，小区面积为 144 m^2 (9 m × 16 m)。整个生育期施 N 225 kg/hm^2、P_2O_5 90 kg/hm^2、K_2O 30 kg/hm^2；磷钾全部基施，氮肥基追结合，基肥氮 90 kg/hm^2，返青期追施氮 135 kg/hm^2。整个生育期灌水两次，分别在 2014 年 12 月 10 日和 2015 年 4 月 12 日。

供试的 6 种改良剂材料的理化性质如表 3 所示。改良材料施用方式：将改良剂撒施于土壤表面，经旋耕机将其与 0—20 cm 土层的土壤混合。

1.2 样品采集与测定

1.2.1 土壤样品的采集 前茬作物为玉米，收获后采集土壤为小麦季播前土壤，小麦生育期土样采集主要包括拔节期、开花期和成熟期，土样进行分层采集，包括 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土层，然后风干，带回实验室测定土壤理化性质指标。

土壤颗粒组成采用激光可吸入尘分析仪进行分级；土壤电导率 (EC 值) 采用水土比 5∶1 浸提，电导率仪测定；土壤 pH 值采用 pH 计测定 (水土比为 2.5∶1；浸提剂为 0.01 mol/L $CaCl_2$ 溶液)；土壤交换性盐基离子 (钙、镁、钾、钠) 采用中性乙酸铵浸提—ICP-AES 法；钠吸附比 (SAR) 是衡量土壤盐碱化程度的重要指标。计算公式：

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}}$$

1.2.2 分蘖数量的动态监测 在苗期 (播种后 32 天)、拔节期 (播种后 180 天)、开花期 (播种后 200 天) 和成熟期 (播种后 240 天) 进行动态监测，每个小区选取 4 行 (平均行距 15.4 cm) 小麦长势均匀样段，每个小区选取 3 个样方进行茎蘖数的测定，最后平均值作为小区的茎蘖数。

1.2.3 干物质累积及产量构成 于拔节期、开花期和成熟期收割 0.616 m^2 (平均行距 15.4 cm，一米四行)，装于信封中，先于 105℃ 烘箱中杀青 30 min，然后烘箱温度调至 70℃ 烘 48 h，烘干后称干重。

每个小区收割 6 m^2 的冬小麦地上部，进行脱粒烘干，计算小麦籽粒产量；每小区随机收割 30 株穗头，测出成熟期小麦穗粒数；通过称量每小区收获的 3 组 500 粒烘干的小麦籽粒，确定成熟期千粒重。收获指数 (HI) 为籽粒产量和收获期生物量的比值。

1.3 数据处理与分析

所有试验数据采用 Microsoft Excel 进行处理，采用 SAS 软件进行单因素方差分析法分析，5% 水

表 1 田间试验土壤基本理化性质

Table 1 Soil physic-chemical characteristics in the field experiment

土壤深度 Soil depth (cm)	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	粘粒 Clay (%)	pH	EC (μS/cm)	有机碳 Org. C (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	交换钾 Exch. K (mg/kg)	交换钙 Exch. Ca (mg/kg)	交换钠 Exch. Na (mg/kg)	交换镁 Exch. Mg (mg/kg)
0—20	69.13	28.01	2.86	8.09	1453	2.34	0.47	7.38	76.8	3365.8	777.9	454.1
20—40	89.36	9.21	1.43	8.18	1112	0.72	0.28	1.07	37.2	3230.6	559.6	335.1
40—60	80.96	18.24	0.80	8.32	1095	0.99	0.28	1.95	42.5	3207.3	574.4	344.4

表 2 各处理材料名称和用量 (t/hm^2)

Table 2 Names and amounts of material in each treatment

改良剂 Ameliorant	类型 Type	代码 Code	用量 Rate
空白 Blank		CK	0
磷石膏 Phosphogypsum	加钙材料 Ca containing	PG	30
脱硫石膏 Flue gas desulfurization gypsum	加钙材料 Ca containing	FGD	30
腐植酸 Humic acid	调酸 + 含碳材料 pH adjustment + C containing	HA	15
糠醛渣 Furfural residue	调酸 + 含碳材料 pH adjustment + C containing	FRs	15
硫酸亚铁 Ferrous sulfate	调酸材料 pH adjustment	FS	7.5
牛粪 Cattle manure	含碳材料 C containing	M	30

表 3　改良剂理化性质

Table 3　Physic-chemical characteristics of the amendment materials

改良剂 Ameliorant	有机碳 (g/kg) Organic C	全氮 (g/kg) Total N	速效磷 (g/kg) Olsen-P	交换性钾 (mg/kg) Exch. K	交换性钙 (mg/kg) Exch. Ca	交换性钠 (mg/kg) Exch. Na	交换性镁 (mg/kg) Exch. Mg
PG			3.3	184.5	40336.4	610.4	409.7
FGD					49526.6	443.7	571.5
HA	513.3	7.5		443.1	41.0	3359.7	57.3
FRs	325.4	7.5	0.2	727.1	175.6	244.2	72.9
FS				1.8			90.3
M	30.7	2.3	2.2	236.1	278.0	41.0	68.6

注（Note）：PG—磷石膏 Phosphogypsum；FGD—脱硫石膏 Flue gas desulfurization gypsum；HA—腐植酸 Humic acid；FRs—糠醛渣 Furfural residue；FS—七水合硫酸亚铁 Ferrous sulfate；M—牛粪 Cattle manure.

平的 LSD 检验法，SigmaPlot 12.5 软件作图。

2　结果与分析

2.1　不同改良剂对冬小麦产量及其构成的影响

由表 4 可知，和空白处理相比，除了腐植酸处理外，其他改良剂处理均显著提高小麦产量，其中，磷石膏处理的小麦产量最高，较对照提高了 26.7%。通过对小麦产量构成分析发现处理间冬小麦穗粒数无差异，但是却低于正常小麦的穗粒数 (35 粒/穗) [15]；不同处理的穗数差异显著，磷石膏、脱硫石膏和牛粪处理的穗数较对照分别提高了 27.6%、24.5% 和 20.3%；不同改良剂处理均增加了小麦的千粒重，其中脱硫石膏处理的小麦千粒重最高，比对照增加了 12.8%，糠醛渣和腐植酸次之，分别比对照增加了 12.5% 和 11.0%。

2.2　不同改良剂对冬小麦群体动态发育和干物质累积的影响

群体数量是提高小麦产量的基础[15]，本试验结果表明这 6 种改良剂对于提高群体数量和小麦群体的发育影响显著 (图 1)。对于腐植酸和糠醛渣处理小麦分蘖前的群体数量较其他处理差异显著，分别较对照增加了 24.0% 和 19.8%，这说明腐植酸、糠醛渣可以提高小麦出苗率，可能是因为腐植酸、糠醛渣改良剂为酸性改良材料，施加到土壤中可以快速降低土壤 pH 值和 EC 值，改善了小麦生长初期的土壤微域环境，提高了小麦的出苗率；拔节期之后，磷石膏和脱硫石膏对群体的发育作用开始突显，和空白处理相比差异性显著，群体数量分别较对照增加了 31.8% 和 28.3%，可能是因为经过冬季雨水和灌溉，石膏类改良剂置换土壤中钠离子的作用突显，降低了土壤表层有害盐分的含量，削减了盐分对小麦分蘖能力的限制，最终成熟期的茎蘖数表现为磷石膏和脱硫石膏处理较高。

不同改良剂处理下，各生育时期的干物质累积变化趋势基本一致。拔节期，腐植酸和硫酸亚铁处理的干物质累积量显著高于空白处理，糠醛渣和牛粪处理次之。开花期干物质急剧累积，磷石膏和脱硫石膏处理的生物量较高，并且磷石膏处理的生物

表 4　不同改良剂对冬小麦产量和产量构成的影响

Table 4　Effect of different amendments on the yield and yield components of winter wheat

处理 Treatment	产量 (t/hm^2) Yield	穗数 (× 10^4/hm^2) Spike number	穗粒数 Grains per spike	千粒重 (g) 1000-kernel weight	收获指数 Harvest index
CK	4.5 ± 0.37 c	641 ± 35 b	23.5 ± 0.9 a	34.5 ± 1.0 d	0.42 ± 0.02 b
PG	5.7 ± 0.32 a	818 ± 36 a	23.8 ± 1.0 a	36.0 ± 1.2 cd	0.42 ± 0.03 b
FGD	5.3 ± 0.40 ab	798 ± 84 a	23.9 ± 1.0 a	38.9 ± 1.3 a	0.46 ± 0.05 ab
HA	5.0 ± 0.34 bc	734 ± 63 ab	23.5 ± 0.5 a	38.3 ± 1.3 ab	0.42 ± 0.01 b
FRs	5.2 ± 0.27 ab	760 ± 67 a	24.1 ± 0.9 a	38.8 ± 1.5 a	0.48 ± 0.04 a
FS	5.1 ± 0.13 ab	727 ± 89 ab	23.3 ± 0.9 a	36.3 ± 1.1 cd	0.42 ± 0.02 b
M	5.3 ± 0.52 ab	771 ± 78 a	23.9 ± 0.7 a	36.9 ± 1.6 abc	0.45 ± 0.02 ab

注（Note）：数值为平均值 ± 标准误 Data were average ± SE；同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters are significantly different among treatments ($P < 0.05$).

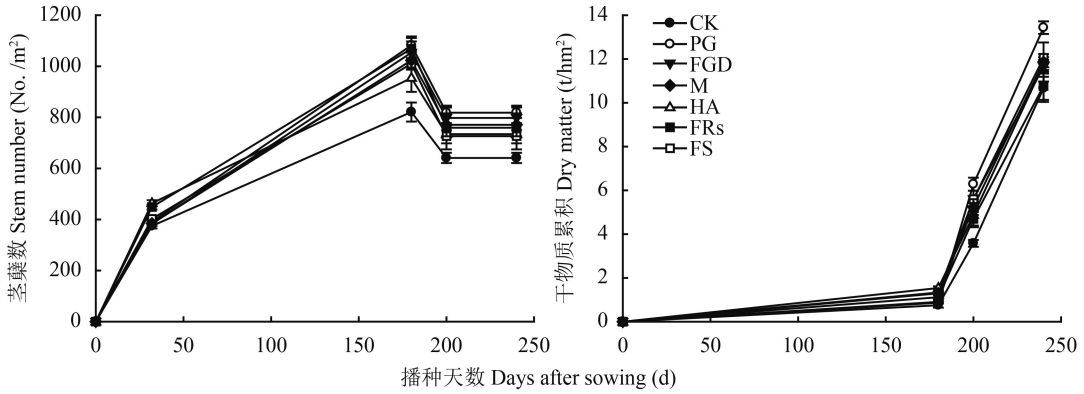

图 1 不同改良剂对冬小麦群体动态发育和干物质累积的影响

Fig. 1 Effect of different amendments on the stem number and dry matter accumulation of winter wheat

量较腐植酸、硫酸亚铁和牛粪处理存在显著性差异；成熟期，只有磷石膏处理的生物量较空白对照处理存在显著性差异，这说明高的群体数量对开花期和成熟期的生物量累积具有重要作用。

有研究发现花前累积的生物量大约占小麦总生物量的 80%[16]，本试验结果表明，滨海盐渍化土壤上，小麦花前累积的生物量占总生物量 50% 以下，不施加改良剂处理的花前累积的生物量占总生物量的 34%，这说明盐分胁迫影响了小麦花前干物质的累积。

2.3 不同改良剂对土壤 pH 的影响

图 2 表明，各处理的土壤 pH 值随着土壤深度的增加呈现增加趋势。在 0—20 cm 土层，腐植酸、糠醛渣和硫酸亚铁处理的土壤 pH 值分别降低了 0.10、0.11 和 0.11，且与对照相比有显著性差异，20—40 cm 土层，糠醛渣和腐植酸处理的土壤 pH 值与对照相比

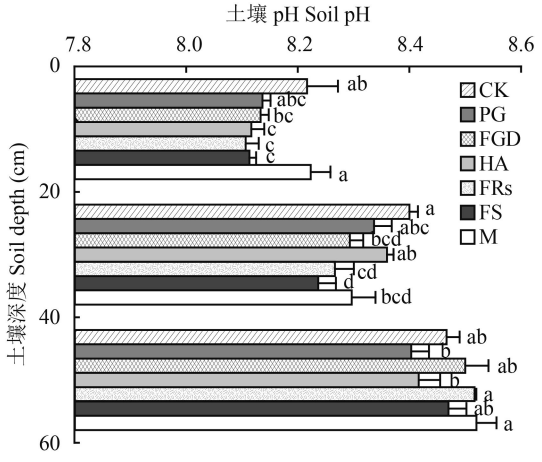

图 2 不同改良剂对土壤 pH 的影响

Fig. 2 Effect of different amendments on soil pH

[注（Note）：不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters indicate significantly difference among treatments at $P < 0.05$ level.]

有显著性差异；40—60 cm 土层，各改良剂处理与对照处理相比，均无显著性差异。因此，糠醛渣、腐植酸和硫酸亚铁处理对土壤 pH 值的降低效果明显，这可能是因为糠醛渣和腐植酸为酸性物料的改良剂，硫酸亚铁能够水解出 H^+，进而快速降低土壤 pH 值。

2.4 不同改良剂对土壤 EC 值的影响

土壤 EC 值是反映土壤中可溶性盐总量的重要指标，如图 3 所示，是监测的不同改良剂处理对冬小麦不同生育时期、不同土层的 EC 值的变化，用来反映土壤中盐分含量变化。

通过对小麦不同生育时期和不同土层的土壤 EC 值的分析发现，随着小麦的生长，土壤中盐分呈现向下层土壤的淋洗和积聚于土壤表层的特点；腐植酸和糠醛渣对于降低土壤的 EC 值有很好的效果，可能是因为腐植酸和糠醛渣是有机酸性物料，不仅降低土壤 pH 值，还改善了土壤结构，促进了土壤盐分的淋洗；由于磷石膏和脱硫石膏本身含有大量的钙离子，致使土壤的 EC 值增加。

2.5 不同改良剂对土壤交换性盐基离子以及 SAR 的影响

土壤交换性盐基离子是指吸附的碱金属和碱土金属离子 (Ca^{2+}、K^+、Mg^{2+}、Na^+)。图 4 表明，不同改良剂处理间差异主要表现在 0—20 cm 土层中，其中磷石膏和脱硫石膏处理的 Ca^{2+} 含量最高，且与空白处理呈显著性差异，这是因为磷石膏和脱硫石膏本身含有大量的 Ca^{2+}。对比不同改良剂对土壤 K^+ 含量的影响 (图 4)，牛粪处理显著增加了土壤 K^+ 含量，这可能是因为牛粪活化了土壤或者作物残渣中的钾，进而提高土壤中钾离子含量。对于 Mg^{2+} 含量 (图 4) 来说，只有腐植酸处理与对照处理相比是显著的降低。不同改良剂处理在 0—20 cm 土层和 20—40

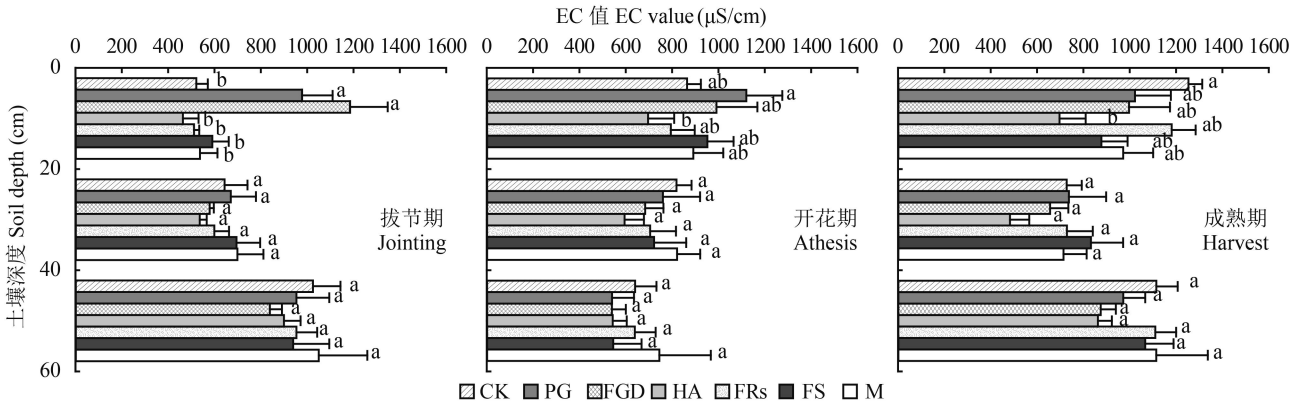

图 3　不同改良剂对不同生育时期土壤 EC 值的影响

Fig. 3　Effect of different amendments on soil EC at different growth and development stage

[注（Note）：不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different small letters indicate significantly difference among treatments at $P < 0.05$ level.]

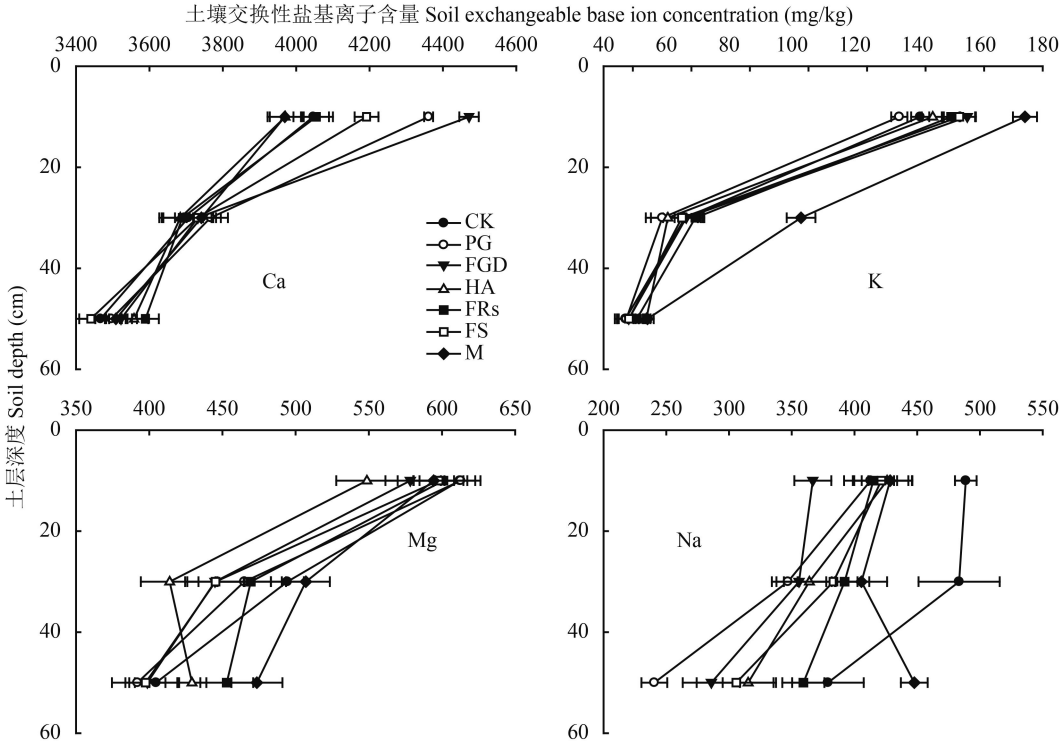

图 4　不同改良剂对土壤交换性盐基离子的影响

Fig. 4　Effect of different amendments on soil exchangeable base ion concentrations

cm 土层中都明显降低了 Na^+ 含量 (图 4)，在 0—20 cm 土层中，Na^+ 含量大小顺序为 CK > 牛粪 > 腐植酸 > 硫酸亚铁 > 糠醛渣 > 磷石膏 > 脱硫石膏，其中 6 个改良剂处理与对照相比均存在显著性差异；在 20—40 cm 土层中，Na^+ 含量大小顺序为 CK > 牛粪 > 糠醛渣 > 硫酸亚铁 > 腐植酸 > 脱硫石膏 > 磷石膏，6 个改良剂处理与对照相比均存在显著性差异。这是因为磷石膏和脱硫石膏提供的钙离子置换了吸附在土壤胶体的钠离子，导致土壤中钠离子含量的降低。

钠的吸附比 (SAR) 是衡量土壤质量的重要指标，其含量的高低可以预测盐碱化土壤理化性质的变化动向。图 5 所示，与对照处理相比，在 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层中，施加改良剂都显著降低了 SAR 值，而在 40—60 cm 土层中，除了牛粪处理的 SAR 值高于对照处理之外，其他改良剂处理的 SAR 值较对照处理均显著降低。

在 0—20 cm 土层中，SAR 值的大小顺序为 CK > 牛粪 > 腐植酸 > 硫酸亚铁 > 糠醛渣 > 磷石膏 > 脱硫

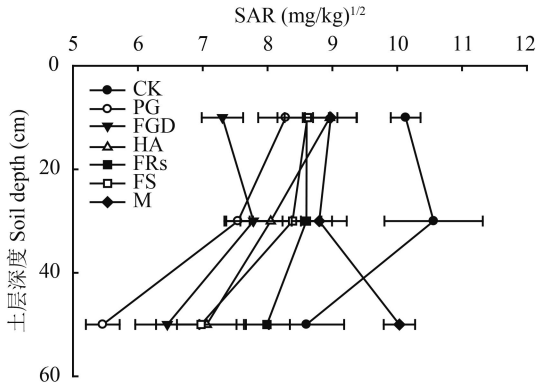

图 5 不同改良剂对土壤 SAR 的影响

Fig. 5 Effect of different amendments on soil SAR

石膏，其中 6 个改良剂处理与对照相比均存在显著性差异，脱硫石膏和磷石膏分别较对照降低了 27.9% 和 18.3%；在 20—40 cm 土层中，SAR 值的大小顺序为 CK > 牛粪 > 糠醛渣 > 硫酸亚铁 > 腐植酸 > 脱硫石膏 > 磷石膏，6 个改良剂处理与对照相比均存在显著性差异，脱硫石膏和磷石膏分别较对照降低了 26.3% 和 28.6%；在 40—60 cm 土层中，土壤 SAR 值的大小顺序为牛粪 > CK > 糠醛渣 > 腐植酸 > 硫酸亚铁 > 脱硫石膏 > 磷石膏，除了糠醛渣处理外，其它处理均与对照处理存在显著性差异，脱硫石膏和磷石膏分别较对照降低了 25.0% 和 36.5%。

3 讨论

土壤 pH 值是反映土壤酸碱状况的重要土壤指标，直接影响土壤养分的存在形态、转化和有效性，进而直接影响作物的生长发育。不同改良剂对土壤 pH 的影响是不同的，本研究中 6 种改良剂 (磷石膏、脱硫石膏、腐植酸、糠醛渣、硫酸亚铁和牛粪) 对土壤不同深度的 pH 的影响结果证明，6 种改良剂都降低了土壤 0—20 cm 土层的 pH，糠醛渣、腐植酸和硫酸亚铁作为酸性材料对土壤 pH 的下降效果最好，较对照分别降低了 0.10、0.11 和 0.11 (图 2)。Chun 等[17]也报道过类似的研究，发现盐渍化土壤上施加脱硫石膏可以降低土壤 pH 值，且随着土壤深度的增加，石膏降低土壤 pH 的效果越来越不明显。也有研究发现硫酸亚铁可以水解出 H^+，降低土壤 pH；腐植酸和糠醛渣作为酸性材料也可以降低土壤 pH[18–19]，相比于硫酸亚铁，糠醛渣和腐植酸可以有效提高小麦苗期茎蘖数 (图 1)；腐植酸作为酸性材料，可以降低土壤 pH (图 2)，但腐植酸本身含有过多的 Na^+ (表 3)，导致腐植酸对降低土壤含量和 SAR 值的效果不好 (图 4 和图 5)。综合比较糠醛渣、腐植酸和硫酸亚铁，糠醛渣的改良效果最佳。

随着小麦生育期的变化，不同土层的 EC 值变化呈现盐分淋洗和盐分表层积累的现象，这和李颖等[13]总结的我国盐渍土的水盐运动规律相同；随着改良剂施入土壤，土壤 EC 值发生变化，磷石膏和脱硫石膏本身盐分含量就很高，尤其是钙离子，本试验结果也表明，这两种改良材料的施用，极大地增加了土壤表层钙离子的含量，增加了土壤 EC 值，与 Rasouli 等[11]有相似的结论；综合不同时期和不同土层的 EC 值含量的变化发现腐植酸明显降低了土壤的 EC 值 (图 3)；施加这 6 种改良剂明显降低了土壤交换性钠离子含量和 SAR 值，以磷石膏和脱硫石膏的效果最好，糠醛渣次之，这是因为它们可以直接或者间接提供钙离子这与孙在金[4]，李茜等[18]和蔡阿兴等[19]研究结果一致。这些钙离子置换土壤胶体表面的钠离子[20]，进而降低土壤中交换性钠离子含量和 SAR 值；而改良剂对小麦产量的影响同样表现为磷石膏、脱硫石膏和糠醛渣较好，综合考虑不同时期不同土层的 EC 值变化，发现虽然磷石膏和脱硫石膏增加了 EC 值，但是却明显降低了土壤中交换性钠含量和 SAR 值，进而增加小麦产量，而腐植酸虽然降低了 EC 值，但是腐植酸本身还有较高的钠离子含量，并且降低土壤中交换性钠含量和 SAR 值的效果最差，最终影响小麦产量的提高。因此，在滨海盐渍化土壤上，EC 值并不能完全衡量土壤的改良效果，还要综合分析土壤交换性钠含量和 SAR 值等指标。

通过研究滨海盐渍化土壤上小麦的生长发现，虽然糠醛渣、腐植酸和硫酸亚铁可以降低土壤 pH 值 (图 2) 和盐分含量，改善了小麦生长初期的土壤环境，提高了小麦的苗期茎蘖数 (图 1)，但是随着小麦的生长发育，相比于其他处理，磷石膏和脱硫石膏的成熟期穗数较对照显著增加了 27.6% 和 24.5%，这主要是因为磷石膏和脱硫石膏提供了足够的钙离子，置换了吸附在土壤胶体表面的钠离子[20]，降低了土壤钠离子的含量和 SAR 值，减少了盐分对小麦群体发育的影响。对于产量来说，施加磷石膏、脱硫石膏、腐植酸、糠醛渣、硫酸亚铁和牛粪均可以提高小麦产量，其中磷石膏的增产效果最好，脱硫石膏和糠醛渣次之，分别提高小麦的产量 26.7%、17.8% 和 17.8%，这可能是因为它们降低了土壤中交换性钠含量和 SAR 值，改善了土壤环境，提高了小麦成熟期穗数，进而提高小麦产量。蔡阿兴等[19]的研究表明糠醛渣和磷石膏可以提高作物产量，孙在金[4]也报道过类似的研究，发现脱硫石膏和腐植酸均可以促进棉花的生长，提高产量，以磷石膏效果最

佳。综合考虑，以含钙的石膏材料作为改良滨海盐渍土的改良剂，效果较好，不仅可以解决工业废弃物的处理问题，使其资源化利用，还可以提高小麦产量，但是与华北小麦平均产量水平相比，滨海盐渍土的小麦产量水平依然偏低，另外，作为工业废弃物，磷石膏含有一定量的重金属，长期施用于土壤中，是否会引起一些环境问题，还不清楚，因此，如何在改良的基础上实现小麦产量的进一步提高，同时不会造成环境问题是我们今后继续关注和研究的问题。

4　结论

施加不同的改良材料均有效地降低了山东滨海盐渍土区的 pH 值、土壤钠离子含量以及 SAR 值，改变小麦产量构成因素，实现小麦产量的提高，但不同功能特性的改良物料对土壤理化性质和小麦生长的影响有所差异。酸性物料的糠醛渣、腐植酸和硫酸亚铁，对于降低土壤 pH 值和增加小麦苗期的茎蘖数效果最佳，综合考虑改良剂对土壤 pH、Na^+ 含量、SAR 值和小麦群体数量的影响，含碳和调酸物料的糠醛渣效果较好；含钙物料的磷石膏和脱硫石膏，对于降低盐分含量，尤其是土壤钠离子含量以及 SAR 值，增加小麦成熟期穗数，提高小麦产量均具有显著的效果，磷石膏效果最佳。

参 考 文 献：

[1] Cassman K G. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999, 96(11): 5952–5959.

[2] 郭天财. 我国小麦生产发展的对策与建议[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(4): 27–31.
Guo T C. Countermeasures and suggestions for the development of wheat production in China[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2001, 3(4): 27–31.

[3] 崔桂霞, 甄润英. 国内外小麦生产现状及发展趋势[J]. 食品研究与开发, 2005, 26(2): 13–17.
Cui G X, Zhen R Y. Status and development trend of domestic and foreign wheat production[J]. Food Research and Development, 2005, 26(2): 13–17.

[4] 孙在金. 脱硫石膏与腐植酸改良滨海盐碱土的效应及机理研究[M]. 北京: 中国矿业大学硕士学位论文, 2013.
Sun Z J. Research on effects and the mechanism of desulfurization gypsum and humic acid on coastal saline-alkali soil improvement [M]. Beijing: MS Thesis of China University of Mining and Technology, 2013.

[5] Farooq M, Hussain M, Wakeel A, *et al*. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(2): 461–481.

[6] Hasegawa P M, Bressan R A, Zhu J K, *et al*. Plant cellular and molecular response to high salinity[J]. Annual Review of Plant Physiology Plant Molecular Biology, 2000, 51: 463–499.

[7] Karimi G, Ghorbanli M, Heidari H, *et al*. The effects of NaCl on growth, water relations, osmolytes and ion content in *Kochia prostrate*[J]. Biologia Plantarum, 2005, 49(2): 301–304.

[8] Turan M A, Elkarim A H A, Taban N, *et al*. Effect of salt stress on growth and ion distribution and accumulation in shoot and root of maize plant[J]. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(7): 584–588.

[9] Lovell R D, Jarvis S C. Effect of cattle dung on soil microbial biomass C and N in a permanent pasture soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(3): 291–299.

[10] Njoku K L, Akinola M O, Oboh B O. Growth and performance of *Glycine max* L. (Merrill) grown in crude oil contaminated soil augmented with cow dung[J]. Life Science Journal, 2008, 5(3): 89–93.

[11] Rasouli F, Pouya A K, Karimian N. Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid area of Iran as affected by applied gypsum[J]. Geoderma, 2013, 193: 246–255.

[12] 罗进群. 绿矾对苏打盐碱土的改良研究 [M]. 广东: 暨南大学硕士学位论文, 2014.
Luo J Q. Improvement of soda saline-sodic soils using copperas [M]. Guangdong: MS Thesis of Jinan University, 2014.

[13] 李颖, 陶军, 钞锦龙, 等. 滨海盐碱地 “台田-浅池” 改良措施的研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 154–160.
Li Y, Tao J, Chao J L, *et al*. Research progress of improving measures of “field-shallow pool” for coastal saline-alkaline land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(5): 154–160.

[14] 李志杰, 孙文彦, 等. 盐碱土农业生态工程[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 5–15.
Li Z J, Sun W Y, *et al*. Saline-alkali soil agro-ecological engineering [M]. Beijing: Science Press, 2015: 5–15.

[15] 卢殿君. 华北平原冬小麦高产高效群体动态特征与氮营养调控[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2015.
Lu D J. Dynamics of population trait for high yielding and high efficiency winter wheat and N nutrient regulation in the North China Plain[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2015.

[16] Papakosta D K, Gagianas A A. Nitrogen and dry-matter accumulation, remobilization, and losses for Mediterranean wheat during grain filling[J]. Agronomy Journal, 1991, 83(5): 864–870.

[17] Chun S, Nishiyama M, Mastumoto S. Sodic soils reclaimed with by-product from flue gas desulfurization: corn production and soil quality[J]. Environmental Pollution, 2001, 114(3): 453–459.

[18] 李茜, 孙兆军, 秦萍, 等. 燃煤烟气脱硫废弃物和糠醛渣对盐碱土的改良效应[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 70–73.
Li Q, Sun Z J, Qin P, *et al*. Amelioration of saline-sodic soil with the by-product of flue gas desulfurization and furfural residue[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(4): 70–73.

[19] 蔡阿兴, 宋荣华, 常运诚, 等. 糠醛渣防治碱土及增产效果的初步研究[J]. 农业现代化研究, 1997, 18(4): 240–243.
Cai A X, Song R H, Chang Y C, *et al*. Preliminary study of furfural residue prevention alkali earth and yield effects[J]. Research of Agricultural Modernization, 1997, 18(4): 240–243.

[20] Qadir M, Schubert S, Ghafoor A, *et al*. Amelioration strategies for sodic soils: a review[J]. Land Degradation & Development, 2001, 12(4): 357–386.