

沸石腐殖酸复合型土壤调理剂对黄河三角洲盐碱化农田土壤的改良效果

孟磊¹, 许义², 刘严蓬³, 李亚¹, 刘卫东¹, 安永兴³ (1. 兖煤蓝天清洁能源有限公司, 山东邹城 273516; 2. 兖矿集团有限公司洁净煤技术工程研究中心, 山东邹城 273516; 3. 国投盛世承德科技股份有限公司, 河北承德 068451)

摘要 以天然沸石为主要材料, 添加矿源腐殖酸, 形成复合型土壤调理剂, 在山东省东营黄河三角洲地区进行盐碱地玉米种植试验, 试验结果显示, 施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂能够有效降低土壤 pH 和土壤盐碱度, 优化土壤结构, 提高土壤养分和微生物含量, 还可以实现玉米增产。施用 7 500 kg/hm² 沸石腐殖酸复合型土壤调理剂, 土壤脱盐率可达 24.2%; 施用 6 000 kg/hm² 沸石腐殖酸复合型土壤调理剂, 可实现玉米增产 24.09%。
关键词 天然沸石; 矿源腐殖酸; 土壤调理剂; 盐碱地改良
中图分类号 S 156.2 **文献标识码** A
文章编号 0517-6611(2022)14-0070-03
doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.14.017



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Improvement Effect of Zeolite Humic Acid Composite Soil Conditioner on Saline-alkali Farmland Soil in Yellow River Delta
MENG Lei¹, XU Yi², LIU Yan-peng³ et al (1. Yanmei Blue-Sky Clean Energy Co., Ltd., Zoucheng, Shandong 273516; 2. Research Center for Clean Coal Technology & Engineering, Yankuang Group Co., Ltd., Zoucheng, Shandong 273516; 3. Guotoushengshi Chengde Technology Co., Ltd., Chengde, Hebei 068451)
Abstract Using natural zeolite as the main material, adding mineral humic acid to form a composite soil conditioner, corn planting experiments were conducted in saline-alkali land in the Yellow River Delta area of Dongying, Shandong Province. The test results showed that the application of zeolite humic acid composite soil conditioner could effectively reduce soil pH and soil salinity, optimize soil structure, increase soil nutrient and microbial content, and increase corn yield. Applying 7 500 kg/hm² zeolite humic acid composite soil conditioner, the soil desalination rate could reach 24.2%; applying 6 000 kg/hm² zeolite humic acid composite soil conditioner, the corn yield could be increased by 24.09%.
Key words Natural zeolite; Mineral humic acid; Soil conditioner; Saline-alkali land improvement

我国耕地资源紧缺, 而大面积土壤盐碱化进一步加剧了耕地资源的紧张局面。根据联合国教科文组织和粮农组织不完全统计, 我国约有盐碱地 9 913 万 hm²[1]。改良治理以及合理开发盐碱地资源, 是影响我国粮食安全的重要因素, 关系到我国农业的可持续发展。黄河三角洲土壤类型主要为潮土、盐化潮土和滨海潮盐土, 土壤母质为黄河冲积物, 土壤 pH 在 7.5~8.5, 有机质含量偏低, 氮磷钾严重缺乏, 总体养分含量较低。此外由于土壤质地偏轻, 土壤毛细管作用强烈, 土壤返盐现象普遍, 土壤含盐量较高, 有不同程度的土壤盐碱化现象。土壤盐碱化造成土壤肥力下降、理化性状退化、土壤结构变差, 威胁到大部分作物的生长[2]。

天然沸石是一种多孔结构的含水铝硅酸盐矿物, 因其独特的晶体结构和巨大的比表面积, 具有强吸附性、离子交换性、催化性、分子筛、酸碱高温耐受性等优良反应特性。沸石是国内外认可的优良土壤改良材料[3], 可以有效降低土壤盐分[4]; 改善土壤结构性状[5]; 改善土壤养分状况, 缓释肥效[6]; 增加土壤有机质含量, 提高土壤阳离子交换量[7]; 提高土壤微生物数量和多样性, 增强土壤抑制植物病害的能力[8-9]。沸石应用于农田土壤改良, 对农作物的生长具有明显的促进作用[10-12]。腐殖酸是由芳香族及多种官能团构成的高分子有机酸。利用腐殖酸改良盐碱土壤, 可以明显降低土壤中水溶性盐分, 改良盐碱土及防止土壤盐渍化的效果显著[13-15]。该试验以天然沸石为主要材料, 添加矿源腐殖酸材

料, 形成复合型土壤调理剂, 在山东东营黄河三角洲地区进行盐碱化农田土壤改良试验示范, 旨在为改良治理以及合理开发盐碱地资源提供技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试作物。品种为山东神华种业有限公司生产的裕华 402(国审玉 20196065)。

1.1.2 供试材料。沸石腐殖酸复合型土壤调理剂(2~5 mm 球粒, 主要成分为天然斜发沸石, 矿源腐殖酸含量 ≥ 1%)由国投盛世承德科技股份有限公司提供。磷石膏为山东省滨州市利丰达化工有限公司生产磷酸氢钙的副产品; 脱硫石膏取自山东泰山新型建材有限公司。有机无机复混肥料(有机质 20%, 13-8-9)购自寿光蔡伦中科肥料有限责任公司。

1.1.3 供试土壤。试验地位于山东省东营市广饶县“黄河三角洲农业高新技术产业示范区”内, 试验地块为盐化潮土。供试土壤理化性质分别为有机质 10.67 g/kg、碱解氮 83.17 mg/kg、有效磷 14.97 mg/kg、速效钾 428.5 mg/kg、pH 8.684、全盐 2.0 g/kg、砷 18.91 mg/kg、汞 0.131 mg/kg、铅 37.6 mg/kg、镉 0.262 mg/kg、铬 89.49 mg/kg、镍 40.17 mg/kg。

1.2 试验设计方案 试验共设 7 个处理(表 1)。其中 CK 为对照处理, 不施用任何土壤调理剂; 试验设 B、C、D、E 共 4 个不同水平施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂加 7 500 kg/hm² 工业副产石膏辅助盐碱地土壤改良材料处理。处理 A 和 F 分别为等用量的天然沸石和沸石腐殖酸复合型土壤调理剂处理。7 个处理的肥料用量相同, 基肥施用量为 600 kg/hm²。试验采用小区试验方式, 每处理设 3 次重复, 共 21 个小区。

表 1 盐碱地土壤改良材料用量

Table 1 Amount of soil improvement materials in saline-alkali land				
kg/hm ²				
处理 Treatment	天然沸石 Natural zeolite	沸石腐殖酸 复合型土 壤调理剂 Zeolite humic acid composite soil conditioner	工业副 产石膏 Industrial by-product gypsum	有机无机 复混肥料 Organic and inorganic compound fertilizer
CK	0	0	0	600
A	6 000	0	0	600
B	0	3 000	7 500	600
C	0	4 500	7 500	600
D	0	6 000	7 500	600
E	0	7 500	7 500	600
F	0	6 000	0	600

1.3 测定项目与测定方法

1.3.1 土壤指标。玉米测产后各处理小区采集 0~20 cm 土壤样品。土壤 pH 测定采用 pH 计法^[16]；质量法测定水溶性全盐^[17]，并定义：脱盐率=（对照样地可溶性盐总量-处理样地可溶性盐总量）/对照样地可溶性盐总量×100%；环刀法测土壤容重^[18]；土壤阳离子交换量采用氯化铵-乙酸铵交换法测定^[19]；采用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质^[16]；采用碱解扩散法测定土壤碱解氮^[20]；采用 NaHCO₃ 浸提-钼蓝比色法测定土壤有效磷^[21]；采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定土壤速效钾^[22]；土壤微生物数量用平板表面涂抹法计数^[23]。以上数据均取平均值。

1.3.2 测产指标。每小区选取位于小区内部的有代表性地点，5 m 双行 6 m² 面积，测出穗数及 20 株左右的穗粒数，取约 10 株样品带入室内风干。干燥脱粒后计量千粒重。玉米产量于播种后 118 d 进行测定，时间为 2020 年 10 月 14 日。

1.4 数据处理 利用 Microsoft excel 软件进行数据处理及绘图；用 SPSS 22.0 软件对试验数据进行统计分析，采用单因素方差分析法检测各数据组间的显著性。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤 pH 的影响 从表 2 可以看出，A~F 各处理与对照 CK 比较，pH 均有降低；B、C 处理与对照有显著差异，其他处理与对照无显著差异，各处理间无显著差异。施用 3 000~4 500 kg/hm² 的沸石腐殖酸复合型土壤调理剂（B、C 处理）可降低土壤 pH。

2.2 不同处理对土壤盐分的影响 从表 2 可以看出，A、D、E 处理水溶性全盐含量均低于对照 CK，施用 6 000~7 500 kg/hm² 的沸石腐殖酸复合型土壤调理剂（D、E 处理）以及施用 6 000 kg/hm² 的天然沸石（A 处理）均能降低土壤中的盐分含量，7 500 kg/hm² 的沸石腐殖酸复合型土壤调理剂（E 处理）降盐效果最好，脱盐率为 24.2%。

2.3 不同处理对土壤容重的影响 经分析，对照 CK、A~F 处理的土壤容重分别为 1.46、1.46、1.45、1.43、1.45、1.37、1.36 g/cm³，除 A 处理外，B~F 处理土壤容重均小于对照 CK；除 F 处理与对照差异显著（*P*<0.05）外，其他各处理与对照之间差异均不显著（*P*>0.05），A~F 各处理之间差异不显

著（*P*>0.05）。施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂对土壤结构有一定的良性影响，由于作用时间短，不同用量之间差异不明显，效果还未明显显现。

表 2 土壤 pH、全盐含量及脱盐率
Table 2 Soil pH, total salt content and desalination rate

处理 Treatment	pH	水溶性全盐 Water soluble total salt // g/kg	脱盐率 Desalination rate // %
CK	8.57 b	2.07	—
A	8.53 ab	1.74	15.9
B	8.30 a	1.96	5.3
C	8.30 a	2.05	1.0
D	8.35 ab	1.78	14.0
E	8.34 ab	1.57	24.2
F	8.50 ab	2.08	-0.5

注：同列不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05）
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences（*P*<0.05）

2.4 不同处理对土壤养分的影响 从表 3 可以看出，A~F 各处理土壤阳离子交换量均高于对照 CK，且与对照之间都有显著差异（*P*<0.05）；A~F 各处理土壤有机质含量均高于对照，但与对照之间均无显著差异（*P*>0.05）；A~F 各处理土壤碱解氮含量均高于对照，A 和 B 处理与对照无显著差异（*P*>0.05），其他处理与对照之间差异显著（*P*<0.05）；A~F 各处理土壤有效磷含量均高于对照，且与对照之间均无显著差异（*P*>0.05），各处理之间也无显著差异；除 E 处理外，其他处理土壤速效钾含量均小于对照，各处理与对照之间均无显著差异（*P*>0.05）。

施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂（B~F 处理）可显著提高土壤阳离子交换量；可提高土壤有机质含量，但效果尚不显著；土壤碱解氮和有效磷含量都有提高，但速效钾含量多为降低。阳离子交换量的大小可以作为评价土壤保肥能力的指标，施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂可以有效改善土样养分状况，提升土壤的保肥能力。综合几项指标，施用 7 500 kg/hm² 的沸石腐殖酸复合型土壤调理剂（E 处理）改善土壤养分状况，较其他用量效果更佳。

2.5 不同处理对土壤微生物的影响 从表 4 可以看出，A~F 处理土壤中细菌数量和真菌数量均大于对照 CK，且各处理与对照之间差异不显著（*P*>0.05）；除 B、C 处理，其他处理土壤放线菌数量均高于对照，且各处理与对照之间差异不显著（*P*>0.05）。总体来看，施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂能够提高土壤微生物数量，除 3 000 和 4 500 kg/hm² 施用量，其他施用量对土壤微生物数量都有显著增加作用。

2.6 不同处理对玉米产量的影响 各小区玉米产量为 7 200~9 000 kg/hm²，由于盐碱、播种期偏迟等影响因素，玉米籽粒千粒重未达到品种推荐的 375 g。从表 5 可以看出，除 B 处理外，其他处理千粒重和玉米产量都高于对照 CK，D、F 处理较对照有显著提高（*P*<0.05）。B 处理较对照出现减产，可能是因为土质分布不均匀造成玉米植株生长弱，穗粒数和千粒重降低，也可能由于工业副产脱硫石膏施用量过大

造成的。各小区玉米千粒重与产量之间存在一定的正向关联。施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂可提升玉米产量。以单独施用 6 000 kg/hm² 沸石腐殖酸复合型土壤调理剂(F

处理)增产效果最佳,最高增产可达 24.09%。从同等用量的处理 A 和 F 比较看,施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂较单一施用天然沸石增产幅度大。

表 3 土壤化学指标
Table 3 Soil chemical indexes

处理 Treatment	阳离子交换量 CEC//cmol/kg	有机质 OM g/kg	碱解氮 Alkeline-N//mg/kg	有效磷 Olsen-P//mg/kg	速效钾 Olsen-K//mg/kg
CK	19.51 a	15.50 a	56.18 a	10.19 a	364.50 a
A	21.95 e	16.09 a	61.65 ab	10.24 a	337.83 a
B	20.42 bc	16.53 a	62.55 ab	11.34 a	348.83 a
C	22.21 e	17.54 a	65.03 b	12.04 a	358.17 a
D	21.07 d	16.86 a	65.58 b	13.77 a	351.33 a
E	20.83 cd	16.61 a	63.10 b	12.50 a	483.33 a
F	20.28 b	16.86 a	64.62 b	11.81 a	343.00 a

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)
Note:Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$)

表 4 土壤微生物数量
Table 4 Quantity of soil microorganism CFU/g

处理 Treatment	细菌数量 Number of bacteria	真菌数量 Number of fungi	放线菌数量 Number of actinomycetes
CK	1.28E+07 a	1.04E+04 a	1.53E+06 a
A	1.53E+07 a	1.59E+04 a	2.09E+06 a
B	1.54E+07 a	2.49E+04 a	1.47E+06 a
C	1.66E+07 a	1.97E+04 a	1.29E+06 a
D	1.71E+07 a	1.31E+04 a	2.11E+06 a
E	1.42E+07 a	3.03E+04 a	2.49E+06 a
F	1.40E+07 a	1.93E+04 a	2.73E+06 a

注:同列相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$)
Note:The same lowercase letters in the same column indicate insignificant differences ($P>0.05$)

表 5 玉米测产数据
Table 5 Yield measurement data of maize

处理 Treatment	千粒重 Thousand-grain weight//g	产量 Yield kg/hm ²	增产 Yield increase %
CK	288.67 b	7 226.4 b	—
A	296.67 ab	7 764.2 ab	7.44
B	274.17 b	6 982.7 b	-3.37
C	304.83 ab	7 774.5 ab	7.58
D	318.33 a	8 921.9 a	23.46
E	301.00 ab	8 483.4 ab	17.39
F	314.50 a	8 967.2 a	24.09

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)
Note:Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$)

3 讨论

天然沸石和腐殖酸都是良好的土壤改良材料,用于盐碱地改良都有良好的效果,将天然沸石与腐殖酸复合使用改良盐碱土壤,其效果优于单独使用天然沸石或腐殖酸的改良效果^[24-26]。我国农田土壤盐碱化问题严重,只山东黄河三角洲区域就分布着大面积的盐碱地。研发环保高效的沸石腐殖酸复合型土壤调理剂,可以为提高盐碱地利用与生产效率、减少化学肥料使用量、建设绿色高效农业提供有力的技术支撑。产品技术成熟后进行大面积推广应用,可以促进盐碱地

高效低成本开发利用,获得良好的社会效益和经济效益,具有广泛的应用前景。

4 结论

(1)施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂可有效降低土壤 pH 和降低土壤中的盐分含量。以施用 7 500 kg/hm² 沸石腐殖酸复合型土壤调理剂降盐效果最好,脱盐率可达 24.2%。

(2)施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂可降低土壤容重,使土壤疏松,对土壤结构有一定的良性影响。由于作用时间短,效果还未明显显现。

(3)施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂可显著提高土壤阳离子交换量;可提高土壤有机质含量,短时间内效果尚不显著;能够提高土壤中氮和磷的有效态含量。沸石腐殖酸复合型土壤调理剂能够有效改善土样养分状况,提升土壤的保肥能力。

(4)施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂对土壤微生物数量有增加作用。

(5)施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂可提高玉米产量。以单独施用 6 000 kg/hm² 沸石腐殖酸复合型土壤调理剂增产效果最佳,最高增产可达 24.09%;施用沸石腐殖酸复合型土壤调理剂较单一施用天然沸石增产幅度大;工业副产脱硫石膏施用量过大可能会造成玉米减产。

参考文献

[1] 商振芳,谢思绮,罗旺,等.我国盐碱地现状及其改良技术研究进展[C]//2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷).北京:中国环境科学学会,2019:386-395.
[2] 肖杨.黄河三角洲人类活动及其土壤盐碱退化效应[D].泰安:山东农业大学,2018.
[3] 余振宝,宋乃忠.沸石加工与应用[M].北京:化学工业出版社,2005.
[4] 左建,孔庆瑞.沸石改良碱化土壤作用的初步研究[J].河北农业大学学报,1987,10(3):58-64.
[5] 霍习良,周恩湘,姜淳,等.沸石改良土壤结构性状的研究[J].河北农业大学学报,1991,14(2):20-24.
[6] 关连珠,张继宏,颜丽,等.天然沸石增产效果及对氮磷养分和某些肥力性质调控机制的研究[J].土壤通报,1992,23(5):205-208.
[7] 陈燕霞,唐晓东,游媛,等.石灰和沸石对酸化菜园土壤改良效应研究[J].广西农业科学,2009,40(6):700-704.
[8] 蔡燕飞,何成新,廖宗文,等.蛭石和沸石对番茄青枯病及土壤微生物的影响[J].生态环境,2003,12(2):179-181.

表 4 土壤样品中氮、磷、钾养分含量

Table 4 Nutrient contents of nitrogen, phosphorus and potassium in soil samples g/kg

样品 Sample	氮 Nitrogen	磷 Phosphorus	钾 Potassium
DHLT1	1.188	0.812	21.7
DHLT2	1.085	1.105	24.7
DHLT3	1.100	0.831	22.1
DHLT4	1.149	0.931	21.2
DHLT5	2.359	4.965	19.6
DHLT6	1.653	2.409	19.4

2.4 特色土地资源评价

2.4.1 富硒土壤。从表 5 可以看出,土壤样品中仅 DHLT5 硒含量为 0.330 mg/kg,达到中国地质调查局批准印发的《天然富硒土地划定与标识(试行)》^[9]富硒标准 0.30 mg/kg(土壤 pH>7.5);其余土壤样品均未达到富硒标准。

表 5 土壤样品中特色元素硒和锌含量及评价等级标准

Table 5 Contents and evaluation grades of characteristic elements selenium and zinc in soil samples mg/kg

样品 Sample	硒 Se	锌 Zn
DHLT1	0.210	69.0
DHLT2	0.218	78.8
DHLT3	0.178	73.9
DHLT4	0.176	68.3
DHLT5	0.330	155.0
DHLT6	0.247	103.7

2.4.2 富锌土壤。从表 5 可以看出,土壤样品 DHLT2、DHLT5 和 DHLT6 中锌元素含量达到黑龙江省地方标准《富锌土壤评价技术要求》^[11]规定的土壤富锌(二级)标准 74 mg/kg(土壤 pH>7.5);其余样品均未达到富锌标准。

3 结论与讨论

研究区土壤质量地球化学综合等级为二级以上,土壤质

量较好,为当地发展绿色农业、生态农业,开发无公害农产品、绿色食品提供了良好的土地资源条件,对推动当地传统农业转型具有重要意义。

多个土壤样品中特色硒和锌元素达到富硒和富锌标准。但由于研究区土壤样品数量较少,建议今后开展大比例尺土壤调查,进一步摸清富硒和富锌土地资源数量,划定天然富硒地和天然富锌地,为今后开发富硒和富锌特色农产品、提高当地农产品附加值奠定基础。

充分发挥特色土壤资源优势,积极探索地质文化村建设新模式。实现东胡林地质文化村建设与绿色发展、生态富民和美丽乡村建设相融合,增强当地村民的幸福感和获得感。

参考文献

[1] 自然资源部中国地质调查局,中国地质学会.地质文化村(镇)建设工作指南(试行)[S].北京:中国地质调查局,2020.

[2] 丁华,张茂省,栗晓楠,等.地质文化村:科学内涵、建设内容与实施路径[J].地质论评,2020,66(1):180-188.

[3] 中华人民共和国国土资源部.土地质量地球化学评价规范: DZ/T 0295—2016[S].北京:中国标准出版社,2016:26-27.

[4] 刘国栋,杨泽,戴慧敏,等.黑龙江省海林市长发镇土地质量地球化学评价及开发建议[J].地质与资源,2020,29(6):533-542.

[5] 中国地质调查局.多目标区域地球化学调查规范(1:250000): DD 2005—1[S].中国地质调查局,2005.

[6] 生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

[7] 张一鹤,杨泽,戴慧敏,等.穆稜河—兴凯湖平原土地质量地球化学评价[J].地质与资源,2021,30(1):62-70.

[8] 张哲寰,赵君,戴慧敏,等.黑龙江省内河市土壤—作物系统 Se 元素地球化学特征[J].地质与资源,2020,29(1):38-43.

[9] 自然资源部中国地质调查局.天然富硒土地划定与标识(试行): DD 2019—10[S].中国地质调查局,2019.

[10] 曹继琼,何长华.锌缺乏对人体健康的影响[J].现代医药卫生,2014,30(7):1016-1019.

[11] 黑龙江省市场监督管理局.富锌土壤评价技术要求: DB 23/T 2410—2019[S].黑龙江省市场监督管理局,2019.

[12] 耿玉清,余新晓,岳永杰,等.北京山地森林的土壤养分状况[J].林业科学,2010,46(5):169-175.

中国标准出版社,2006.

[18] 中华人民共和国农业部.中华人民共和国农业行业标准 土壤检测第 4 部分:土壤容重的测定: NY/T 1121.4—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.

[19] 国家林业局.中华人民共和国林业行业标准 森林土壤阳离子交换量的测定: LY/T 1243—1999[S].北京:中国标准出版社,2006.

[20] 国家林业局.中华人民共和国林业行业标准 森林土壤氮的测定: LY/T 1228—2015[S].北京:中国标准出版社,2016.

[21] 国家林业局.中华人民共和国林业行业标准 森林土壤磷的测定: LY/T 1232—2015[S].北京:中国标准出版社,2016.

[22] 国家林业局.中华人民共和国林业行业标准 森林土壤钾的测定: LY/T 1234—2015[S].北京:中国标准出版社,2016.

[23] 许光辉,郑洪元.土壤微生物分析方法手册[M].北京:农业出版社,1986.

[24] 张继舟,马献发,袁磊.不同施肥处理对设施农业土壤主要阳离子含量的影响[J].黑龙江科学,2012(10):59-63.

[25] 张继舟,马献发,袁磊.不同施肥处理对设施农业土壤主要阴离子含量的影响[J].腐殖酸,2012(1):6-11.

[26] 张继舟,周连仁,马献发.不同施肥处理对设施土壤盐分的影响[J].国土与自然资源研究,2009(3):35-36.

(上接第 72 页)

[9] LEGGO P J. An investigation of plant growth in an organo-zeolitic substrate and its ecological significance[J]. Plant and soil, 2000, 219: 135-146.

[10] 周恩湘,张桂银,魏静,等. Ca-K 型斜发沸石对盐化土壤速效钾的影响[J]. 河北农业大学学报, 1999, 22(4): 10-14.

[11] 宓永宁,左建.沸石对盐碱地玉米增产效果的研究[J].盐碱地利用, 1995, 25(1): 26-28.

[12] 孔宪清,苑静.天然沸石在温室土壤改良中的作用研究[J].中国非金属矿工业导刊, 2005(2): 31-33, 37.

[13] 黄占斌,孙在金.环境材料在农业生产及其环境治理中的应用[J].中国生态农业学报, 2013, 21(1): 88-95.

[14] 黄瑞端.腐殖酸对滨海粘质盐土脱盐效果的影响[D].泰安:山东农业大学, 2019.

[15] 王柳晴.腐殖酸对粘质盐土水分特性的影响研究[D].泰安:山东农业大学, 2020.

[16] 中华人民共和国农业部.中华人民共和国农业行业标准 土壤检测第 6 部分:土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006[S].北京:中国标准出版社, 2006.

[17] 中华人民共和国农业部.中华人民共和国农业行业标准 土壤检测第 16 部分:土壤水溶性盐总量的测定: NY/T 1121.16—2006[S].北京: