

沸石矿物在东北地区黑土地盐碱化土壤改良中的应用

陈 江^{1,2}, 陈霄燕³, 戴慧敏^{1,2}, 刘国栋^{1,2}, 刘 凯^{1,2}, 房娜娜^{1,2}, 毛朝霞¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 中国地质调查局 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034; 3. 吉林大学, 吉林 长春 130026

摘 要: 东北黑土地特别是松嫩平原的土地盐碱化趋势正在加剧, 对黑土地粮食安全提出了很大的挑战, 因此, 改良盐碱地土壤成为重要的工作。半干旱气候、地质条件、低洼地形及地下水位等都是引起东北黑土地盐碱化的因素, 松嫩平原苏打盐碱地尤为突出, 其土壤盐分中主要阳离子为 Na^+ , 阴离子为 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- , 具有高碱化特点。沸石作为离子交换剂和吸附剂, 能吸附盐碱土中的钠离子和硫酸根离子等, 降低土壤 pH 值和碱化度, 同时可增加土壤对铵根离子、磷酸根离子和钾离子的保持能力, 提高养分有效性, 对于土壤改良效果显著。但由于沸石改性、用量及时效等各方面的不确定性, 因此在今后研究中更应注重因地制宜地利用沸石矿物开展盐碱地土壤改良、加强沸石矿物改性再生的研究, 使其在盐碱地脱盐降碱等方面发挥更大的作用。

关键词: 沸石; 土壤改良; 盐碱地; 黑土地; 松嫩平原

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.06.019

APPLICATION OF ZEOLITE IN IMPROVEMENT OF SALINE-ALKALI SOIL IN NORTHEAST CHINA

CHEN Jiang^{1,2}, CHEN Xiao-yan³, DAI Hui-min^{1,2}, LIU Guo-dong^{1,2}, LIU Kai^{1,2}, FANG Na-na^{1,2}, MAO Zhao-xia¹

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Key Laboratory of Black Land Evolution and Ecological Effects, CGS, Shenyang 110034, China; 3. Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: The salinization of black land in Northeast China, especially Songnen Plain, is accelerating, greatly challenging the food security in black land. Therefore, the improvement of saline-alkali soil becomes important. The main influencing factors include semi-arid climate, geological conditions, low-lying terrain and groundwater level. The soda saline-alkali lands are well developed in Songnen Plain, with Na^+ as the major positive ion, CO_3^{2-} and HCO_3^- negative ions in soil salt, characterized by high alkalization. As both the exchanger and adsorbent of ions, zeolite can absorb Na^+ and SO_4^{2-} in saline-alkali soil, reducing soil pH and alkalinity. Moreover, it can increase the capacity of soil to retain NH_4^+ , PO_4^{3-} and K^+ , and improve nutrient availability, which is significantly effective in soil improvement. However, due to the uncertainty of zeolite modification, dosage and aging, the future study should pay more attention to the soil improvement in saline-alkali land by zeolite according to local conditions and strengthen the research on zeolite modification and regeneration, so that zeolite can play a greater role in desalination and alkali reduction.

Key words: zeolite; soil improvement; saline-alkali land; black land; Songnen Plain

收稿日期:2020-08-29;修回日期:2020-09-14. 编辑:李兰英.

基金项目:中国地质调查局项目“中国矿产地质志”(编号 DD20160346、DD20190379).

作者简介:陈江(1971—),男,博士,研究员,现从事地质矿产研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail//422656805@qq.com

0 引言

近年来,由于长期高强度、超负荷地利用黑土地,造成了黑土流失、土壤贫瘠化、酸化、盐碱化和污染,特别是松嫩平原西部,盐碱化土地面积已逾 $300\times 10^4\text{ hm}^2$,是世界上三大片苏打盐渍土集中分布区之一^[1-3],并且重度盐碱化土地面积仍以每年 1.4%的速度扩展,盐碱化程度不断加剧^[3-5].

土壤盐碱化是全世界面临的一个难题.对盐碱地改良的方法主要集中于耐盐性植物、废弃水资源灌溉、覆盖改良和化学添加剂等方面^[6].应用土壤改良剂是修复退化土壤的重要措施(表 1)^[7],可吸附盐碱地土壤中含有较高的盐分,进而有效地改善土壤理化性状和土壤养分状况,从而提高退化土壤的生产力.作为吸附盐分的物质,如活性炭^[8]、粉煤灰^[9]、黏土^[10]和天然沸石^[11]已被广泛应用于吸附体系中.

表 1 常用天然矿物的土壤改良作用

Table 1 Soil improvement effects of common natural minerals

天然矿物	改善土壤 结构	调节 酸碱度	保水	保肥	增肥 作用	吸附 重金属	改良 盐碱土
石灰石		√	√	√			
膨润土	√	√	√	√	√	√	√
沸石	√	√	√	√	√	√	√
石膏	√	√			√		√
蛭石	√	√	√	√	√	√	√
珍珠岩	√		√	√			

√表示具有改良作用;空白表示没有改良作用.据文献[7].

天然沸石被认为是低成本、具有丰富可用性的吸附材料^[12],它能够进行离子交换^[13],对无机和有机离子具有高吸附性,易于活化和再生^[14].这些说明沸石具有应用于盐碱地土壤改良的重要性能.自 1976 年 6 月在美国召开首届天然沸石的产状、性质和应用的国际会议以来,日本、美国、意大利、俄罗斯和东欧国家对天然沸石在农业上的应用进行了大量的研究工作,并取得了一系列研究成果^[15].天然沸石在农业上应用于以下几个方面:1)改良土壤;2)制做长效磷肥等长效肥料,提高磷的利用率;3)处理粪便和污水,减轻对周围环境的污染,便于循环利用;4)作为饲料添加剂,改善动物的健康状况^[15].

本文从研究东北地区黑土地盐碱化特征入手,介绍沸石矿物改良土壤的原理,对应用沸石矿物开展盐

碱地改良的效果、存在问题及应用前景进行初步评价.

1 东北盐碱地特征

松嫩平原是一个闭流区,同时受中、小、微地形的变化及特殊成土条件的影响,有独特的现代积盐过程,地下水的矿化度较高,因而盐碱土得到充分的发育,特别是 $\text{pH}>9$ 的重度盐碱地具有代表性和典型性,是我国盐碱土集中分布的地区之一^[6].

松嫩平原西部平原盐碱土的形成有以下 4 个特点:1)半干旱的气候,年蒸发量比年降雨量要大的多;2)地质条件有利于可溶性盐类的补给;3)地形低洼平坦,闭流区面积分布广,排水有困难;4)地下水位高,经常会沿着毛细管上升到地面而由地面蒸发.在大多数情况下,含有盐分的地下水是引起土壤盐碱化的最广泛的原因.含有盐分的地下水沿着土壤毛细管孔隙上升到地表,然后由于水分的蒸发,土壤的表层就积聚了盐分.

盐碱土中的水溶性盐类绝大多数是钠盐.钠盐在水中离解而生成钠离子(Na^+).碱化了的土壤中钠离子更多.从前郭县的一个浅位柱状碱土的盐分剖面图(图 1)中,可以看出钠离子比其他任何离子都多^[16].

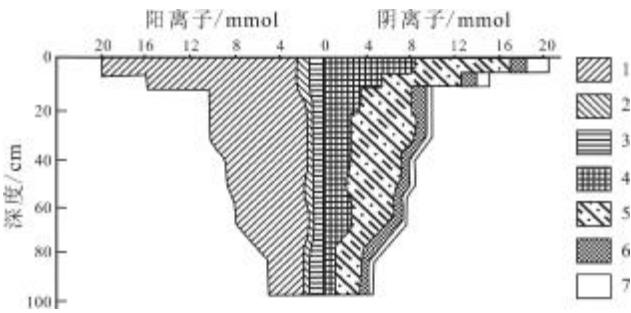


图 1 前郭县碱土(苏打盐土)盐分剖面图
(据文献[16])

Fig. 1 Salt profile of alkaline soil (soda-saline soil) in Qianguo County
(From Reference [16])

1— Na^+ ; 2— Mg^{2+} ; 3— Ca^{2+} ; 4— CO_3^{2-} ; 5— HCO_3^- ; 6— Cl^- ; 7— SO_4^{2-}

2 沸石矿物改良土壤原理

沸石是一种结晶的水合铝硅酸盐,由碱土和碱土阳离子组成,具有开放的三维结构.沸石的经验公式为 $M_{(2/n)}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot x\text{SiO}_2\cdot y\text{H}_2\text{O}$ 类型.其中 M 是任何碱土原子, n 是该原子上的电荷, x 是 2~10 的数字, y 是 2~7

的数字. 用铝(Al)(或其他金属)代替硅酸盐框架中的一些硅(Si)会导致骨架上带负电荷, 从而使其能够吸引阳离子(主要是钠、钾和钙, 较少出现锂、镁、锶和钡). 沸石具有四面体格架, 中心是硅(或铝)原子, 每个硅(或铝)原子的周围有4个氧原子, 各个硅氧四面体通过处于四面体顶点的氧原子互相连接起来, 形成许多宽阔的孔穴和孔道. 沸石这种格架结构决定了它具有较高的吸附交换性能. 沸石的孔穴和孔道大小均匀, 直径在0.3~1 nm之间, 小于这个直径的物质能被吸附, 而大于这个直径的物质则被排除在外不被吸附. 沸石具有选择吸附的特性, 其吸附盐中阳离子机理如图2^[17].

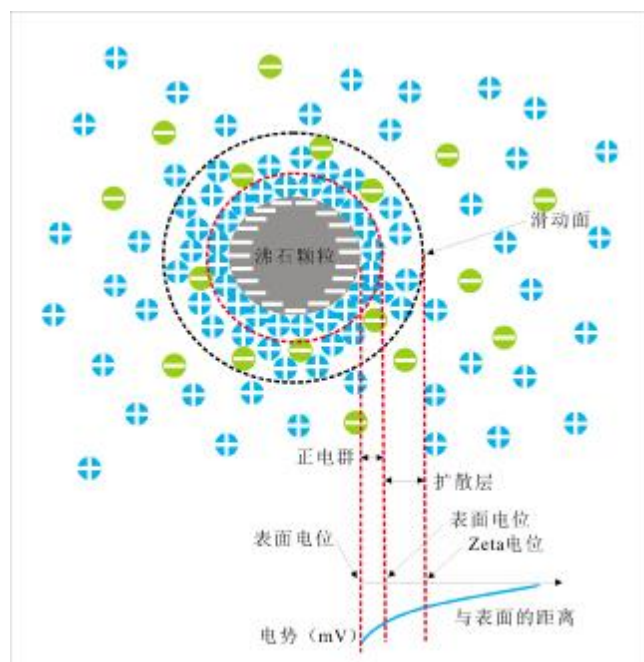


图2 沸石矿物吸附盐中阳离子至表面机理示意图
(据文献[17])

Fig. 2 Schematic diagram for zeolite adsorbing positive ions in salt
(From Reference [17])

弱束缚的骨架外阳离子可以很容易地被另一个阳离子的强溶液洗去或交换. 这一特性使沸石成为阳离子交换应用的优良材料.

3 沸石矿物改良土壤效果

天然沸石应用最早的国家是日本, 主要用于改良土壤, 效果显著. 诸多研究^[18-19]表明, 天然沸石是很好的土壤改良剂. 沸石加入到土壤后, 可以增加土壤对铵根离子、磷酸根离子和钾离子的保持能力, 提高养分

有效性^[18-19]. 施用沸石可使土壤中的盐分趋于减少, 碱化度降低, 并对土壤的 pH 值起到缓冲作用^[20]. 有研究表明, 在实验室模拟条件下, 沸石能够改良植物生长状态, 提高土壤养分有效性, 在一定程度上缓解 Na^+ 产生的盐胁迫, 减轻了 Na^+ 在植株体内的积累, 消除了离子毒害, 使 K、Ga、Mg 等离子在植株体内恢复平衡, 使植株生长恢复正常^[21]. 将沸石与化肥混合施入土壤后, 可增加玉米的生物量, 提高玉米对 N、P、K 吸收量, 并显著提高氮肥的利用率^[22]. 土壤中施用沸石能改善土壤供钾状况^[23], 降低碱化水稻土中土壤淋溶水中氯离子、钠离子和碳酸氢根离子的含量, 有利于水稻生长^[24].

在东北黑土区, 仲秀珍^[25]利用吉林省九台市出产的沸石矿物对农安县前岗乡耿家村轻盐化草甸土、良种场白盖碱土(碱斑土)和通榆县四井子乡苏打硫酸盐盐土进行了改良试验, 试验证明: 沸石能吸附盐碱土中的 Na^+ 、 SO_4^{2-} 等离子, 施用沸石可以降低土壤 pH 值和碱化度, 改善土壤结构状况, 并能提高土壤交换量, 使土壤向有利于作物生长的方向发展. 左莎等^[26]采用义县大定卜斜发沸石对义县农科所试验田碱性砂壤土和红墙子乡碱化土进行试验, 盐碱地施用沸石后, 土壤的物理化学性能得到改善, 使土壤的总盐含量下降, 特别是 Na^+ 由于被沸石吸附含量大大降低, 提高了土壤的交换量, 降低了 pH 值和碱化度, 可促进农作物的生长. 仲秀珍等^[27]采用斜发沸石为主的大顶山沸石矿物, 对 NaCl 、 NaHCO_3 、 Na_2CO_3 、 Na_2SO_4 这 4 种钠盐设计 46 种不同浓度的条件下其被天然沸石的吸附程度试验, 发现沸石对 4 种钠盐中 Na^+ 和阴离子都有较好的吸附作用, 随着盐溶液浓度的增加吸附时间延长, 吸附量也随之增加. 最后得出利用沸石改良苏打盐碱土是完全可行的结论.

耿辉等^[28]以黑龙江省大庆市林甸县长青林场 3 个不同小区为实验地, 分别采用酸雨石、活性炭、沸石、稻壳、腐熟牛粪等 5 种吸盐材料对不同小区盐碱土壤进行改良, 根据改良后土壤 pH 值、导电率变化, 对不同材料的盐碱土壤改良效果进行比较(图 3), 证明酸雨石在 5 种盐碱土改良剂中具有最强吸盐解碱能力.

4 存在的问题

对于沸石矿物应用于盐碱地土壤改良, 过去的试

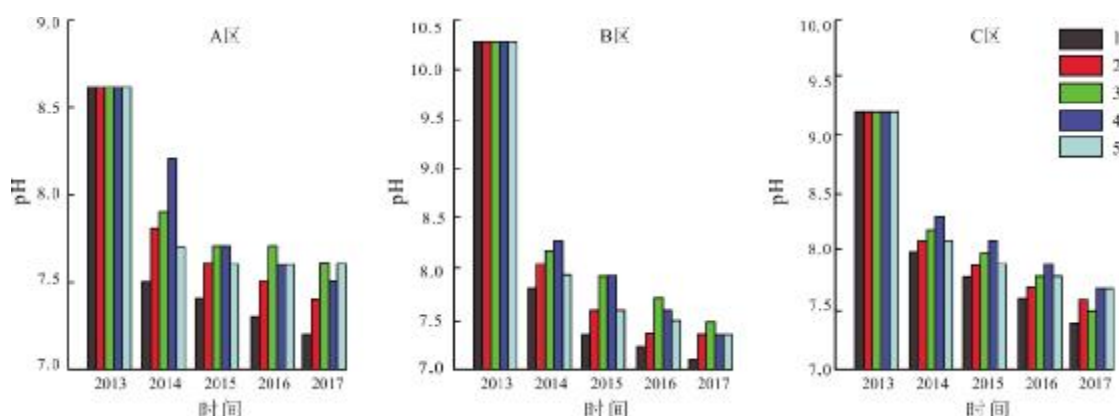


图3 施加不同改良剂后不同区域土壤 pH 变化

(据文献[28])

Fig. 3 Variation diagrams for soil pH in three areas after applying different amendments

(From Reference [28])

1—酸雨石(acid rain stone); 2—活性炭(activated carbon); 3—沸石(zeolite); 4—稻壳(rice husk); 5—牛粪(composted cow manure)

验大多数是实验室尺度,尚未有大规模应用于田间的试验结果,实际应用中尚存在一些理论和技术问题,如施用量、施用方式和施用时间,以及天然矿物的储量对其大面积推广应用的限制等^[7],其主要原因如下。

4.1 沸石改性问题

天然沸石虽然具有较大的表面积,但是孔道内如果在盐碱地内吸附盐离子后,往往被水分子和其他离子半径大小不同的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子占据,容易造成沸石孔道堵塞^[29],进而使得孔道不畅通,进一步影响沸石的离子交换能力和表面吸附能力。

为提高天然沸石的孔隙率与表面活性,提高其吸附离子交换等性能,可以对沸石进行改性或改型处理^[30],一般要经过粉碎、酸处理、中和、干燥焙烧等步骤,有时为使沸石性能更为突出,还可对其改型处理制成钠型沸石、钙型沸石等^[31-32]。

在对大庆市林甸县长青林场地区进行盐碱土壤改良中使用的改良剂之一酸雨石,是以沸石为载体,分别添加硫酸和植物生长调节剂等复配而成^[33],酸雨石在5种材料中对该地区盐碱土壤具有最强吸盐解碱能力,具有推广使用意义^[28],但是这些需要对特定的盐碱地进行更多的试验,另外改性的成本增加也要考虑在内。

4.2 沸石用量问题

过去的研究表明,土壤中施加的沸石粉用量、沸石的粒度、施用方法不同,对土壤的成分也有不同影响。

用量不足时,效果微小;施入过多,可能对土壤中有效养分吸收过大,也有不良影响^[34]。左莎等^[26]对碱盐砂土施沸石的用量是亩施 100 kg (1 500 kg/hm²)沸石粉,玉米产量比对照平均增加 27%。左建等^[35]在轻盐化草甸土每亩施用 100 kg (1 500 kg/hm²)沸石粉,在施氮、磷、钾肥的基础上,棉花产量比对照增产 26.6%。李焕珍等^[36]在碱化水稻土上试验研究结果表明,随着沸石用量的增加,水稻增产幅度随着增大,在等量 N、P 条件下,亩施沸石 250~500 kg (3 750~7 500 kg/hm²)(同时施肥 N 11 kg, P 5.5 kg),水稻平均增产率为 6.5~24.7%。翟鹏辉等^[37]以天津市大港区的盐渍土为研究对象,通过大田试验分别在栽植穴底部和侧壁铺设 10 cm 厚的陶粒、蛭石和沸石作为隔盐层,3种隔盐材料都能够降低该地区土壤中的主要盐离子和全盐量,其中以沸石作为隔盐层处理的降盐效果最佳。对于不同的土地类型,施用量的多少、施用时间长短均需要根据经验和资金状况,进行试验才能大面积的推广。

4.3 土壤改良剂时效问题

盐碱地土壤中的盐分具有典型的“盐随水来,盐随水去”的特点。只要土壤中有盐源,就会有返盐现象的发生,土壤就会发生盐碱化^[38]。国内外学者^[5, 39-41]在内陆干旱地区就盐渍化土壤盐分特征、水盐运移机制和水盐动态方面作过一些研究,根据盐碱地土壤中的盐分运动规律,阻断盐碱来源才能从根本上达到盐碱地改良的目的^[38]。使用沸石作为土壤改良剂的效果持续

期,以及是否潜在环境二次污染风险,这些也需要进行较长期的对比试验研究才能更广泛的得以应用.另外沸石土壤改良剂对土壤物理、化学、生物学特性的改良机理方面也要进一步加强研究^[7].

5 结论与展望

东北黑土地是中国的粮仓,但是存在着土壤肥力退化、土壤盐渍化、水土流失等一系列影响黑土区土壤质量、土地生产力发挥和黑土资源持续利用等方面的问题,土壤盐碱地改造和治理已经成为日益关注的焦点.天然沸石或其改性沸石具有较强的阳离子交换性、吸附选择性和自身含有作物所需的养分,将沸石直接施用于盐碱地土壤上,可提高土壤盐基交换量,起到降盐和降碱的作用.另外,施用沸石后结合耕作,沸石可以把细土和黏粒吸附到它的周围,使土壤的孔隙度增大,容重降低,从而提高土壤通透性与保水性,改善了土壤的质地.沸石作为一种环境友好型改良剂,在大量的科学研究和生产实践中显示了较好的土壤改良效果,具有很广泛的应用前景,预期在黑土地土壤改良方面将会发挥重大的作用.然而,关于对沸石的研究无论是基础理论方面,还是实际运用方面仍存在许多问题,需要进一步明确和探索^[30].因此,未来还需要开展如下工作.

1)因地制宜的利用沸石矿物开展盐碱地土壤改良.要改良盐碱地,就得先对盐碱地的土壤有认识,知道土壤为什么会盐碱化,摸清盐碱地土壤中盐碱的运动规律,才能更好改良盐碱地.

2)通过开展区域地球化学调查,精确地划分盐碱地的分布与盐碱化强度,结合以往研究结果,对沸石矿物进行严格的筛选,了解土壤的性质,掌握好用量,发挥其改良土壤的功效.

3)加强沸石矿物改性与再生的研究.现在人们在天然沸石的改型改性研究方面取得了一些成绩,如热处理、酸处理、盐处理、直接氧化改性以及机械加工等,提高了天然沸石的吸附能力,但是这些还不够,还需要通过各种活化工艺处理天然沸石,扩大其孔径和增强其吸附能力,使其在盐碱地脱盐降碱等方面发挥更大作用.

4)采用综合技术方法开展黑土地保护工作.将利用沸石矿物为主的化学改良与工程改土、生物利用相

结合,采用以土壤改良为主、耐盐植物种植为主的改良模式,实施保护性耕作和平衡施肥,降低成本,加快效果转化周期,力图取得治理效果的最优化.

参考文献:

- [1]王遵亲.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993:208-210.
- [2]张建锋,宋玉民,邢尚军,等.盐碱地改良利用与造林技术[J].东北林业大学学报,2002,30(6):124-129.
- [3]孙广友,王海霞.松嫩平原盐碱地大规模开发的前期研究、灌区格局与风险控制[J].资源科学,2016,38(3):407-413.
- [4]李秀军.松嫩平原西部土地盐碱化与农业可持续发展[J].地理科学,2000,20(1):51-55.
- [5]牛东玲,王启基.柴达木盆地弃耕地水盐动态分析[J].草业学报,2002,11(4):35-38.
- [6]于兴洋.松嫩平原盐碱地改良后土壤特性及生物学评价[D].哈尔滨:东北林业大学,2010.
- [7]陈义群,董元华.土壤改良剂的研究与应用进展[J].生态环境,2008,17(3):1282-1289.
- [8]Kumar P S, Ramalingam S, Senthamarai C, et al. Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut shell: Studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions[J]. Desalination, 2010,261(1/2):52-60.
- [9]Bayat B. Comparative study of adsorption properties of Turkish fly ashes: I. The case of nickel (II), copper (II) and zinc (II) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2002,95(3):251-273.
- [10]Bleiman N, Mishael Y G. Selenium removal from drinking water by adsorption to chitosan-clay composites and oxides: Batch and columns tests[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,183(1/3):590-595.
- [11]Kučić D, Markić M, Briški F. Ammonium adsorption on naturalized olite (clinoptilolite): Adsorption isotherms and kinetics modeling[J]. The Holistic Approach to Environment, 2012,2(4):145-158.
- [12]Wibowo E, Rokhmah M, Sutisna, et al. Thermally activated clay to compete zeolite for seawater desalination [J]. Advanced Materials Research, 2015,1112:154-157.
- [13]Inglezakis V J, Stylianou M A, Loizidou M, et al. Experimental studies and modeling of clinoptilolite and vermiculite fixed beds for Mn^{2+} , Zn^{2+} , and Cr^{3+} removal[J]. Desalination and Water Treatment, 2016,57(25):11610-11622.
- [14]Kyzioł-Komosiońska J, Rosik-Dulewska C, Franus M, et al. Sorption capacities of natural and synthetic zeolites for Cu (II) ions[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2015,24(3):1111-1123.
- [15]张贯生,许新辉.天然沸石在农业上的应用及研究概况[J].河北农业科学,1990(2):17-18,27.
- [16]姜岩.盐碱地土壤改良[M].长春:吉林人民出版社,1978:12-15.
- [17]Wibowo E, Sutisna, Rokhmah M, et al. Utilization of natural zeolite as sorbent material for seawater desalination [J]. Procedia Engineering

- 2017, 170: 8-13.
- [18] Barbarick K A, Lai T M, Eberl D D. Exchange fertilizer (phosphate rock plus ammonium-zeolite) effects on sorghum-sudangrass[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(3): 911-916.
- [19] Ferguson G A, Pepper I L. Ammonium retention in sand amended with clinoptilolite[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(1): 231-234.
- [20] 姜淳, 周恩湘, 霍习良, 等. 沸石改土保肥及增产效果的研究[J]. 河北农业大学学报, 1993, 16(4): 48-52.
- [21] 宋秀华, 王秀峰, 魏珉, 等. 沸石添加对 NaCl 胁迫下黄瓜幼苗生长及离子含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 259-263.
- [22] 周宝库. 天然沸石农业利用研究 II 天然沸石对提高化肥利用率的影响[J]. 黑龙江农业科学, 1998(2): 5-7.
- [23] 关连珠, 梁成华, 金耀青, 等. 天然沸石保氮供氮能力及其机制的研究[J]. 土壤通报, 1990(2): 71-75.
- [24] 张继宏, 颜丽, 关连珠, 等. 沸石的增产效果及对土壤淋溶水离子的影响[J]. 土壤通报, 1994, 25(3): 123-125.
- [25] 仲秀珍. 应用天然沸石矿粉改良盐碱土的研究[J]. 吉林农业大学学报, 1985, 7(2): 85-91.
- [26] 左莎, 左建, 孔庆瑞. 沸石对盐碱地玉米、高粱的增产效果及机理的研究[J]. 垦殖与稻作, 1997(3): 24-26.
- [27] 仲秀珍, 吴江. 天然沸石改良苏打盐碱土吸附机理的探讨——I. 天然沸石对苏打盐碱土中主要盐分吸附规律的研究[J]. 吉林农业大学学报, 1990, 12(1): 40-45, 55-117.
- [28] 耿辉, 朱彧, 王志强, 等. 酸雨石等 5 种常用吸盐材料的盐碱土壤改良效果研究[J]. 世界地质, 2018, 37(3): 967-975.
- [29] Smith J V. Zeolites and clay minerals as sorbents and molecular sieves[J]. Mineralogical Magazine, 1980, 330: 829-830.
- [30] 张莉, 赵保卫, 李瑞瑞. 沸石改良土壤的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(1): 39-43.
- [31] 李增新, 张启军, 邵敏. 天然沸石的开发与应用[J]. 现代化工, 1997, 17(6): 42-43.
- [32] 张冬梅, 王承智, 黄相国. 天然沸石及其应用进展研究[J]. 环境保护科学, 2008, 34(1): 30-32, 41.
- [33] 王参, 关志秀, 王志强. 酸雨石硅肥对汉麻产量和纤维品质的影响[J]. 吉林农业, 2016, 23(17): 98.
- [34] 吴立全. 盐碱地改良模式现状与探索[J]. 吉林省教育学院学报(下旬), 2008, 24(2): 51-52.
- [35] 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.
- [36] 李焕珍, 张忠源, 谢桂兰, 等. 天然沸石的增产效果及提高肥料利用率的研究[J]. 盐碱地利用, 1994(3): 20-24.
- [37] 翟鹏辉, 李素艳, 孙向阳, 等. 隔盐层对滨海地区盐分动态及国槐生长的影响[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(4): 80-83.
- [38] 段登选, 杨立邦, 刘树云, 等. 低洼盐碱地薄膜隔盐碱效果的研究[J]. 土壤, 2000, 32(5): 274-277.
- [39] 王启基, 王文颖, 王发刚, 等. 柴达木盆地弃耕地成因及其土壤盐渍地球化学特征[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 44-49.
- [40] 许迪, 程先军. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移数学模型的应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 27-30.
- [41] 牛东玲, 王启基. 盐碱地治理研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 449-455.

(上接第 640 页/Continued from Page 640)

- [14] 贾国相, 姚锦琪. 油气田上方的某些化探新指标与油气埋深的关系之研究[J]. 矿产与地质, 2001, 15(2): 124-132.
- [15] 侯启军, 冯志强, 冯子辉. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 23.
- [16] Xie X J. Local and regional surface geochemical exploration for oil and gas[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1992, 43(1): 25-42.
- [17] 吴传芝, 李沙园, 程同锦, 等. 油气化探中土壤碘测量技术应用研究[J]. 安徽地质, 2009, 19(2): 124-128.