

环保酵素对盐碱土关键化学性质的影响

韩剑宏¹, 刘泽霞¹, 张连科^{1,2}, 李玉梅¹, 姜庆宏¹, 王维大¹

(1. 内蒙古科技大学 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: [目的] 探讨利用果蔬垃圾制备的环保酵素不同施加比例对改良盐碱土的可行性影响, 为内蒙古地区农业可持续发展研究提供理论和实践依据。[方法] 环保酵素和水按体积比 1 : 200 (GE₁), 1 : 500 (GE₂) 和 1 : 800 (GE₃) 进行稀释处理, 通过室内土培试验研究其对土壤关键化学性质 (pH 值、电导率 EC 和碱化度 ESP) 以及土壤养分状况 (有机质、水解性氮、有效磷、速效钾和 DOC) 的影响。[结果] 施加合适环保酵素比例可以降低土壤盐碱性, 提高土壤部分养分含量。环保酵素施用为 GE₃ 时, 土壤 pH 值和碱化度 (ESP) 分别降低 17.51% 和 38.42%; EC 值显著降低 42.50%; 土壤有机质、速效钾含量分别显著提高 56.54%, 79.76%, 而土壤水解性氮和有效磷含量分别降低 6.52%, 8.48%; 土壤 DOC 增加达 34.28%。[结论] 在试验条件下采用 1 : 800 为改良盐碱土的环保酵素施用比例, 同时对环保酵素的改良进行主成分分析发现 pH 值、EC 和速效钾是环保酵素对盐碱土改良的特征指标。

关键词: 环保酵素; 盐碱土; 化学性质; 养分状况; 土壤改良

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)03-0126-06

中图分类号: X53, S156

文献参数: 韩剑宏, 刘泽霞, 张连科, 等. 环保酵素对盐碱土关键化学性质的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 126-132. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.021; Han Jianhong, Liu Zexia, Zhang Lianke, et al. Effects of garbage enzymes on key chemical properties of saline-alkali soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 126-132.

Effects of Garbage Enzymes on Key Chemical Properties of Saline-alkali Soil

Han Jianhong¹, Liu Zexia¹, Zhang Lianke^{1,2}, Li Yumei¹, Jiang Qinghong¹, Wang Weida¹

(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and

Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China; 2. School of Environment and Municipal

Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: [Objective] The feasibility of improving saline-alkali soil with different additive proportion of garbage enzymes fermentation product of fruit and vegetable waste was explored in order to provide theoretical and practical basis for the sustainable development of agriculture in Inner Mongolia. [Methods] The garbage enzymes and water were diluted by volume ratios of 1 : 200 (GE₁), 1 : 500 (GE₂) and 1 : 800 (GE₃). The effects on key soil chemical properties (pH value, EC and ESP) and soil nutrient status (organic matter, hydrolytic nitrogen, available P, available K and DOC) were studied by soil culture experiments. [Results] The application of appropriate garbage enzymes dilution ratio could reduce soil salinity and increase soil nutrient content. When the garbage enzymes dilution ratio was GE₃, the soil pH and alkalinity (ESP) were reduced by 17.51% and 38.42%, respectively; the electric conductivity (EC) value was significantly reduced by 42.50%, the soil organic matter and available K content increased significantly by 56.54% and 79.76%, respectively, and the soil available N and available P content decreased by 6.52% and 8.48%, soil DOC increased by 34.28%. [Conclusion] In this experiment, with the GE₃ ratio of garbage enzymes for improving saline-alkali soil, and according PCA analysis, we found that pH value, EC and available K were the characteristic

收稿日期: 2018-11-05

修回日期: 2018-11-21

资助项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目“秸秆污泥生物炭对内蒙古沿黄滩地盐碱地土壤肥力的影响”(2016MS0405); 包头市科技局项目“生物炭对盐碱地改良效果试验研究”(2016X1021)

第一作者: 韩剑宏(1966—), 女(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 博士, 教授, 主要从事水资源管理与水污染控制技术研究。E-mail: hjhlpm@163.com.

通讯作者: 张连科(1980—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士研究生, 副教授, 主要从事土壤化学与污染修复研究。E-mail: lkzhang@126.com.

indicators of garbage enzymes for the improvement of saline-alkaline soil.

Keywords: garbage enzymes; saline-alkaline soil; chemical properties; nutrient status; soil improvement

中国是盐碱地大国,近 6.60×10^6 hm^2 的耕地发生了盐碱化,土壤盐碱化问题已经严重制约中国农业可持续发展^[1]。内蒙古地区耕地的盐碱土面积占总面积的 16.4%,是当地非常重要的耕地后备资源^[2]。而盐碱化土壤导致土壤板结,容重降低,土地质量低下,不适合耕作,成为制约内蒙古地区耕地利用的主要因素之一,表现出环境和经济两方面的危害。因此,有效利用盐碱土增加当地的耕地面积,提高粮食产量,对农业可持续发展具有重要意义。

近年来,人们开始重视利用各行业的废弃物进行盐碱土的改良,以减少经济成本,降低污染,如用食用菌后的废弃物培养菌糠^[3]、脱硫石膏^[4]和腐殖酸^[5]、鸡粪与木醋液^[6]、秸秆与污泥^[7]等改良盐碱土,在降低土壤含盐量、pH 值、碱化度,改变土壤性状,降低容重,增加孔隙度以及增加土壤养分方面分别取得了不同程度的效果。在 2006 年,来自泰国的一位名叫 Rosukun 的研究人员利用食物废物特殊的理化性质和丰富的营养成分开发了一种使用废弃蔬菜,水果或其果皮,糖和水等有机固体废物发酵的溶液形式产品,并将其命名为环保酵素^[8]。这种环保酵素是一种复合有机物质,由有机酸,蛋白质链(酶)和矿物盐组成,其有降解,转化和催化作用^[9]。在国外关于这种溶液的应用主要集中于水处理、污泥处理方面^[10],降低氨氮、磷酸盐等,但将其应用于盐碱土降低土壤盐碱化程度,提高土壤氮磷钾等养分含量的研究甚少。

本文利用环保酵素(GE)进行试验,对内蒙古地区盐碱土关键化学性质及养分含量进行改良,探讨不同环保酵素稀释比例对盐碱土的改良效果的最优稀

释比例,分析确定环保酵素对盐碱土改良的特征指标,为盐碱土改良找到低成本环保材料于实际应用中提供充分的科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤于 2017 年 11 月份采用五点交叉取样法取内蒙古地区盐碱地表层土壤(0—10 cm),该地区属北半干旱中温大陆性季风气候,季节分明,年降水量 421.8 mm(多为 6 月至 8 月)。当地多年平均气温为 6~8 °C,供试土壤基本性质见表 1。

供试环保酵素(表 2):根据 Rosukon Poompanvong 的研究^[10]采用 1 份红糖、3 份丢弃腐烂的水果皮、菜叶等鲜厨余、10 份水为比例,发酵 3 个月制成。

1.2 试验设计

试验采用室内土壤培养法,共设 4 个处理:未施肥(CK)、环保酵素(ml):水(ml)($GE_1 = 1 : 200$)、环保酵素($GE_2 = 1 : 500$)、环保酵素($GE_3 = 1 : 800$),其施用量见表 3。每个处理 3 次重复,随机排列。于 2018 年 3 月 10 日将环保酵素液按照 50 ml 的用量灌施到装有 300 g 盐碱土底部直径为 10 cm,上口直径 18 cm,高 12 cm 的塑料盆钵中。试验用土经自然风干后,除去碎石,土层厚度约为 10 cm,盆钵底部均有排水孔,铺有双层尼龙网以防土壤流失和保持水分的流通,并有托盘,在不施环保酵素液期间不进行灌水,试验持续 3 个月,将盆钵中盐碱土混合均匀,并分别在土壤培养时间间隔 3,5,10,15,20 d 采集土壤样品,用于土壤化学性质和养分指标的分析。

表 1 原土壤基本理化性质

土壤	pH 值	电导率 EC/ ($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	碱化度 ESP/%	有机质含量/ %	P 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	K 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	N 含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
盐碱土	8.26	1184	16.11	0.105	24.09	290.15	1.8

表 2 环保酵素基本理化性质

样本	pH 值	电导率 EC/ ($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	有机质含量/ %	K 含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Ca 含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Mg 含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水溶性有机碳 DOC/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
环保酵素	3.18	172.95	7.32	3.23	50.64	2.64	3245

表 3 试验设计

序号	样本	施加量/ml
I	CK	0
II	1 : 200 环保酵素液 GE_1	50
III	1 : 500 环保酵素液 GE_2	50
IV	1 : 800 环保酵素液 GE_3	50

1.3 测定项目与方法

各指标的测定参考《土壤农化分析》^[11]。pH 值的测定采用 1 : 2.5 浸提法(pH 计);EC 的测定采用 1 : 5 浸提法(电导率仪);阳离子交换量 CEC 的测定采用 $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{NH}_4\text{OAc}$ 交换法;交换性钠离子的测定采用 1N NH_4OAc 交换—火焰光度法;有机质的测定

采用重铬酸钾氧化法;有效磷的测定采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗分光光度法;速效钾(醋酸铵浸提);水解性氮的测定采用碱解扩散法;DOC 的测定采用针筒过膜抽取法^[12]。

1.4 数据统计

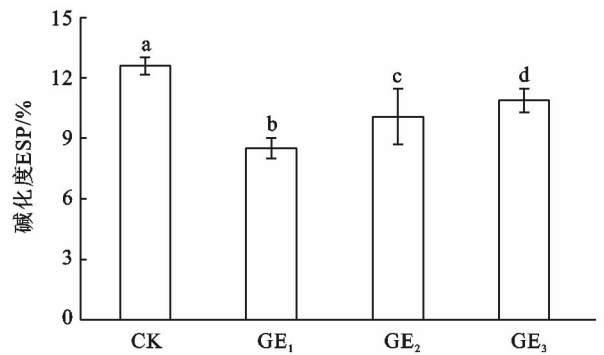
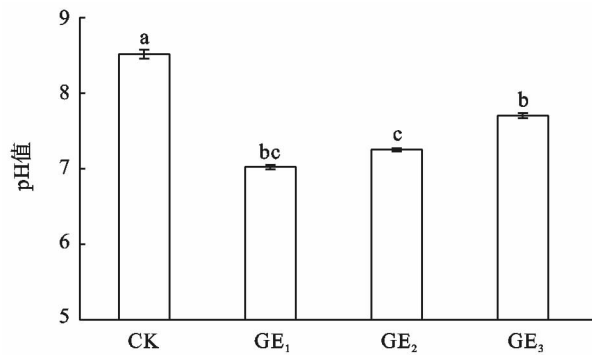
试验获得的数据采用 Origin8 进行绘图。研究数据和各处理之间的统计差异和相关性通过使用 SPSS 软件 21.0 版的方差分析和相关性分析来确定。不同处理间各类指标的差异采用最小显著差数法(LSD)进行差异显著性检验($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 环保酵素对盐碱土壤化学性质的影响

2.1.1 土壤 pH 值和碱化度(ESP)的变化 pH 值 8.5, ESP15 被作为是引起土壤结构恶化的关键值^[13],也是碱化指标。图 1 各环保酵素稀释比例处

理的土壤 pH 值均显著低于对照处理($p < 0.05$),且都有:1:200 < 1:500 < 1:800 < CK,降幅范围为 9.52%~17.51%,并且各处理的 pH 值都降到 8.0 以下,适宜大部分植物的生长要求^[14]。同时,与对照相比,环保酵素处理的土壤 ESP 值显著降低,其中 1:200 环保酵素处理的土壤 ESP 降低幅度最大,降幅为 38.42%。其主要原因是环保酵素在微生物的腐解作用过程中产生了羟基羧酸类有机酸如乙酸、柠檬酸等,其 H^+ 与土壤中 OH^- 结合,使土壤具有缓和其酸碱反应变化的性能,从而降低土壤 pH 值,同时环保酵素液中含有的矿物盐成分离子置换出了钠离子从而使土壤中代换性 Na^+ 含量有所降低^[15]。环保酵素对碱起到缓冲作用,而不同稀释比例的环保酵素,其酸性强弱不一,缓冲效应也不同。因此在本试验条件下,1:200 的稀释比例更有效地降低了土壤的碱化程度,达到非碱土水平($5 < ESP < 10$)。



注:图中 GE₁, GE₂, GE₃ 表示 3 种不同的环保酵素,分别为环保酵素原液与水的比例为:1:200, 1:500, 1:800;图中不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同环保酵素处理下的土壤 pH 值和 ESP 的变化

2.1.2 土壤 EC 值的变化 土壤 EC 值能够反映土壤盐含量的变化^[16],因此,描述土壤盐分状况,通常采用电导率 EC 值作为衡量指标。环保酵素会引起土壤 EC 值发生显著变化(图 2),与 CK 处理相比,各环保酵素稀释比例显著降低了土壤 EC 值,且下降的幅度为:CK < 1:200 < 1:500 < 1:800,由此可见当发酵条件为 1:800 时,土壤的 EC 值相较于其他条件而言降低的最多,降幅达 42.50%。分析其原因,环保酵素发酵 3 个月后,环保酵素液中含有多种无机阳离子和阴离子未被充分利用,从而影响土壤中各离子的含量,其乙酸与碳酸钠盐反应,降低盐分含量^[17],同时环保酵素 DOC 含量高,能够吸附无机盐离子如钾离子、硝酸根离子、镁离子等^[18]。为了更好地控制土壤中的盐分离子,应选择合适的环境酵素发酵配比,从而使土壤的盐化程度都能得到有效地控制。

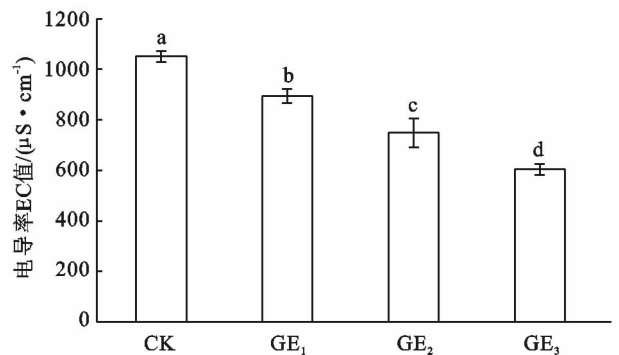


图 2 不同环保酵素处理下的土壤电导率 EC 值的变化

2.2 土壤水溶性有机碳(DOC)的变化

土壤水溶性有机碳是土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解矿化、对植物养分供应最直接作用的有机碳^[19]。如图 3 所示,各环保酵素处理的土壤 DOC 均显著高于对照处理($p < 0.05$),增幅范围为 13.86%

~34.28%。其中 1:800 环保酵素处理的土壤 DOC 增加幅度最大,增加了 34.28%。这是由于环保酵素为土壤加入了碳基质,一方面提供了养分,提高了土壤有机碳含量;另一方面 DOC 和无机盐离子如钾离子、硝酸根离子、镁离子等都存在于土壤溶液中,DOC 吸附这些离子,随着 DOC 在土壤中的周转进行运移,减弱盐分的副作用,促进有机碳的积累,提高微生物生物量,进而增加水溶性有机碳的含量^[20]。高浓度环保酵素反而不利于土壤 DOC 持续快速增加^[21],主要原因是环保酵素会导致土壤水解性氮的降低,而微生物的生长最终会因土壤中 N 的缺乏受到影响,导致微生物数量的降低,使土壤中的碳的输入减少。

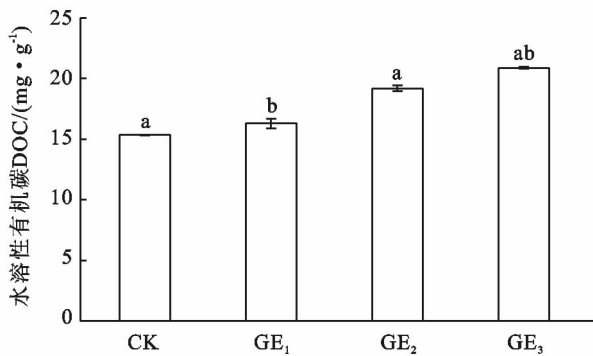


图 3 不同环保酵素处理下的土壤 DOC 的变化

通过盐碱指标(pH 值、EC)和 DOC 之间的相关性分析,评估盐碱性土壤水溶性有机碳的变化,揭示水溶性有机碳对盐碱化土壤中生物环境的影响。因此,选择不同比例处理土壤 DOC,pH 值,EC 这 3 个指标进行相关性分析,结果见表 4。

由表 4 可知,在各稀释比例下,DOC 均与盐碱化指标具有良好的相关性,其中与 pH 值呈显著负相关($p < 0.05$),与电导率 EC 值呈极显著负相关($p < 0.01$),这表明土壤盐碱化作用减弱,水溶性有机碳含量也相对会增加。在各环保酵素稀释比例的施用下,削减了土壤盐碱障碍,增加了土壤环境中的微生物数量,降低了土壤中有机碳的氧化和分解水平,导致其分解有机碳的基质增多,从而促进了有机碳的积累,提供了良好的土壤生物环境。

2.3 土壤养分的变化

2.3.1 土壤养分含量的变化

各环保酵素稀释比例处理的土壤有机质、速效钾含量均显著高于 CK 处理组($p < 0.05$),分别升高 16.82%~79.40%,51.00%~56.54%,而水解性氮、有效磷含量均低于 CK 处理组(表 5),降幅达 6.52%~8.48%。这是由于环保酵素系 GE 中本身含有矿物盐成分和多种低分子量的有机酸

如乙酸等,适当的环保酵素施用量,会使试验土壤变得疏松多孔^[22],增加土壤中矿物钾的含量,有利于土壤中矿物钾的有效化,促进有机质转化,所以适当的环保酵素施用比例能更好的增加土壤中养分的含量。同时环保酵素液在 3 个月的发酵条件下是不太稳定的^[23],液体中细菌的营养需要氮的有机化合物,而磷酸盐作为土壤中养分磷的主要存在形式,环保酵素液含有的乙酸根会与磷酸盐发生反应,转化为含碳产物,提供能量^[24],进而导致土壤中氮、磷含量降低,这与陶津等^[22]的研究结果相悖,这可能是由于试验条件以及改良对象的差异所导致的。

表 4 不同比例处理土壤水溶性有机碳(DOC)与盐碱指标(pH 值、电导率 EC)的相关性

项目	pH 值	EC	DOC
GE ₁ (1:200)	pH 值	1.000	0.049
	EC		1.000
	DOC		1.000
GE ₂ (1:500)	pH 值	1.000	0.177
	EC		1.000
	DOC		1.000
GE ₃ (1:800)	pH 值	1.000	-0.372
	EC		1.000
	DOC		1.000

注:*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关;**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 5 不同比例环保酵素处理下的盐碱化土壤肥力指标的影响

环保酵素/ ml	有机质/ %	水解性氮/ (g·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)
CK	0.107 ^b	189.70 ^c	245.40 ^{bc}	25.35 ^{ac}
GE ₁ (1:200)	0.192 ^a	155.42 ^a	521.56 ^b	24.65 ^b
GE ₂ (1:500)	0.125 ^b	157.52 ^{ac}	500.86 ^b	24.53 ^{ac}
GE ₃ (1:800)	0.245 ^{ab}	177.33 ^{bc}	564.66 ^a	23.20 ^d

注:表中列不同小写字母代表差异显著($p < 0.05$)

2.3.2 多变量分析

文中使用多变量统计分析技术 SPSS(主成分分析,PCA)基于特征值 >1.0 选择主成分(PC)对改良后土壤 pH 值,EC,有机质,水解性氮,有效磷,速效钾和 DOC 进行主成分分析,主成分的特征值,累计贡献率见表 6。由表 6 可知,第一成分、第二成分和第三成分的累计贡献率高达 90.833%,原始信息仅损失 9.16%,因此,可选用前 3 个主成分作为数据分析的有效成分。

各项指标的成分得分系数如表 7 所示。由表 7 可知 3 个指标是被区分的,即 EC(成分 1)、速效钾(成分 2)和 pH 值(成分 3)。根据 PCA 结果,pH 值、EC 和速效钾的因子得分系数高,因此可作为环保酵素对盐碱土改良的特征指标。

表 7 PCA 提取统计的土壤指标的成分得分系数

矩阵系数	主分量	pH 值	EC	CEC	SOM	水解性氮	有效磷	速效钾	DOC
	I	-0.135	-0.442	-0.088	0.040	0.022	0.260	0.494	-0.049
因子得分系数	II	-0.024	0.096	-0.051	0.179	0.172	0.019	0.051	-0.217
	III	0.558	-0.023	0.093	0.156	0.052	0.026	0.206	-0.011

注:SOM 为土壤有机质。下同。

表 8 第一、二和三主成分对各指标的因子负荷量

矩阵系数	主分量	pH 值	EC	CEC	SOM	水解性氮	有效磷	速效钾	DOC
	I	-0.636	-0.828	0.185	0.442	-0.610	-0.587	0.419	0.794
因子负荷量	II	0.188	0.407	0.572	0.138	0.628	0.519	0.836	0.477
	III	-0.880	-0.126	0.756	0.024	0.262	0.267	0.143	0.153

由表 8 可知,第一主成分与盐分指标 EC 呈较强的逆向负荷,与水解性氮、有效磷呈弱逆向负荷,而与 pH 值,CEC,SOM,速效钾,DOC 呈正向负荷,表明第一主成分是反映土壤盐分状况的综合指标。另外第一主成分越大,电导率 EC 越小,表明环保酵素对盐碱土盐分的改良效果越明显。第二主成分与速效钾呈较强的正向负荷,与其他成分成弱正向负荷,表明第二主成分是反映土壤养分含量的综合指标。另外第二成分越大,有效钾含量越多,表明环保酵素对盐碱土有效钾的作用效果明显。第三主成分与 pH 值呈较强的逆向负荷,与电导率 EC 呈弱逆向负荷,而其他成分成正向负荷,表明第三主成分是反映土壤碱化程度的综合指标。且第三成分越大,pH 值越小,故环保酵素对盐碱土碱化程度的改良效果明显。

综合以上分析可知,环保酵素主要对盐碱土的主要影响因子为 pH 值,电导率 EC 和速效钾。

3 结论

(1) 试验结果证明,环保酵素对盐碱化土壤的改良具有一定的可行性。不同稀释比例的环保酵素均能短期内(60 d)显著降低盐碱土的 pH 值,电导率 EC,碱化度 ESP 值,同时增加土壤有机质、速效钾和水溶性有机碳含量,但土壤水解性氮和有效磷含量降低 6.52%、8.48%。

(2) 试验结果分析发现盐碱化土壤盐碱指标与水溶性有机碳 DOC 彼此相关,同时 PCA 统计提取的 pH 值,电导率 EC 和速效钾是环保酵素对盐碱土改

表 6 主成分分析特征值及贡献率

主成分	特征值	累计贡献率
1	2.842	30.130
2	2.138	54.008
3	1.233	90.833

良的特征指标,主要改良了盐碱土的盐碱状况和提高了土壤中速效钾的含量。

[参 考 文 献]

- [1] 程镜润,陈小华,刘振鸿,等. 脱硫石膏改良滨海盐碱土的脱盐过程与效果实验研究[J]. 中国环境科学,2014,34(6):1505-1513.
- [2] 王晓峰. 内蒙古盐碱地改良措施方法[J]. 现代农业,2012(3):77-77.
- [3] 王帅,王楠,陈殿元,等. 茵糠搭载硫酸铝对盐碱地稻田养分状况的影响研究[J]. 土壤通报,2017,48(2):460-466.
- [4] 张辉,陈小华,付融冰,等. 脱硫石膏对不同质地滨海盐碱土性质的改良效果[J]. 环境工程学报,2017,11(7):4397-4403.
- [5] 周红娟,耿玉清,丛日春,等. 鸡粪与木醋液配施对滨海盐碱土化学性质和酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2017(3):157-162.
- [6] 范富,张庆国,邵继承,等. 玉米秸秆夹层改善盐碱地土壤生物性状[J]. 农业工程学报,2015,31(8):133-139.
- [7] Arun C, Sivashanmugam P. Identification and optimization of parameters for the semi-continuous production of garbage enzyme from pre-consumer organic waste by green RP-HPLC method[J]. Waste Management, 2015, 44(1):28-33.
- [8] Arun C, Sivashanmugam P. Investigation of biocatalytic potential of garbage enzyme and its influence on stabilization of industrial waste activated sludge[J]. Process Safety & Environmental Protection, 2015,94:471-478.
- [9] Nazim F, Meera V. Treatment of synthetic greywater

- using 5% and 10% garbage enzyme solution[J]. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering & Management Science*, 2013,3(4):111-117.
- [10] Tang F E, Tong C W. A study of the garbage enzyme's effects in domestic wastewater[J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011,60:1143-1148.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版,北京:中国农业出版社,2000.
- [12] 柳敏,宇万太,姜子绍,等. 土壤溶解性有机碳(DOC)的影响因子及生态效应[J]. *土壤通报*,2007,38(4):758-764.
- [13] 韩剑宏,李艳伟,姚卫华,等. 玉米秸秆和污泥共热解制备的生物质炭及其对盐碱土壤理化性质的影响[J]. *水土保持通报*,2017,37(4):92-98.
- [14] Allison L E, Brown J W, Hayward H E, et al. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils[J]. *Aibs Bulletin*, 1968, 120(3):290.
- [15] Liu Liping, Long Xiaohua, Shao Hongbo, et al. Ameliorants improve saline-alkaline soils on a large scale in northern Jiangsu Province, China[J]. *Ecological Engineering*, 2015,81:328-334.
- [16] 毛玉梅,李小平. 烟气脱硫石膏对滨海滩涂盐碱地的改良效果研究[J]. *中国环境科学*,2016,36(1):225-231.
- [17] Nazim F, Meera V. Comparison of treatment of greywater using garbage and citrus enzymes[J]. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2017,6(4):49-54.
- [18] Lee J J, Park R D, Kim Y W, et al. Effect of food waste compost on microbial population, soil enzyme activity and lettuce growth[J]. *Bioresour Technol*, 2004, 93(1):21-28.
- [19] 李梦寻,王冬梅,任远,等. 不同干湿交替频率对土壤速效养分、水溶性有机碳的影响[J]. *生态学报*,2018,38(5):1542-1549.
- [20] 米迎宾,杨劲松,姚荣江,等. 不同措施对滨海盐渍土壤呼吸、电导率和有机碳的影响[J]. *土壤学报*,2016,53(3):612-620.
- [21] 朱孟龙,赵兰坡,赵兴敏,等. 稻草和硫酸铝添加对苏打盐碱土活性有机碳及有机无机复合体的影响[J]. *水土保持学报*,2015,29(4):284-288.
- [22] 陶津,李云龙,周根国,等. 环保酵素对土壤理化性质及辣椒生长的影响[J]. *玉溪师范学院学报*,2017,33(4):35-40.
- [23] 蔡毅飞,唐敏. 环保酵素的发酵过程研究[J]. *科技资讯*,2017(14):230-230.
- [24] Leal L H, Temmink H, Zeeman G, et al. Comparison of three systems for biological greywater treatment [J]. *Water*, 2010(2):155-169.
- ~~~~~
- (上接第125页)
- [22] Scanlon B R, Longuevergne L, Long D. Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA[J]. *Water Resources Research*, 2012,48(4):4520-4528.
- [23] Wada Y, van Beek L P H, van Kempen C M, et al. Global depletion of groundwater resources[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010,37(20):114-122.
- [24] Swenson S, Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006,33(8):1-4.
- [25] Moiwo J P, Lu Wenxin, Tao Fulu. GRACE, GLDAS and measured groundwater data products show water storage loss in Western Jilin, China[J]. *Water Science & Technology*, 2012,65(9):1606-1614.
- [26] Gao Hui, Yang Song. A severe drought event in northern China in winter 2008—2009 and the possible influences of La Nina and Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009,114(24):144-159.
- [27] 张铜会,赵哈林,赵学勇,等. 科尔沁沙地玉米耗水规律初探[J]. *中国沙漠*,1999,19(S1):138-140.
- [28] 周磊,刘景辉,郝国成,等. 沙质土壤改良剂对科尔沁地区风沙土物理性质及玉米产量的影响[J]. *水土保持通报*,2014,34(5):44-48.
- [29] 黄志刚,肖焯,张国,等. 气候变化背景下松嫩平原玉米灌溉需水量估算及预测[J]. *生态学报*,2017,37(7):2368-2381.