

玉米秸秆与污泥的腐解物对盐碱地化学指标的影响

韩剑宏¹, 王旭平¹, 张连科¹, 余维佳², 焦丽燕³, 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. 包头市辐射环境管理处,
内蒙古 包头 014010; 3. 晖泽水务(青州)有限公司 山东 青州 262500)

摘要:为探索发酵后的玉米秸秆对内蒙古地区盐碱化土壤化学性质(有机质、ESP、pH值、EC、土壤代换性Na⁺)的影响,在实验室条件下以污泥作为接种物,将玉米秸秆在不同发酵的条件下以不同梯度的秸秆还田量施加到盐碱化土壤中,以施加未发酵的玉米秸秆为对照。结果显示:(1)施加玉米秸秆对土壤的部分化学性质有着一定的改善,且发酵后的玉米秸秆比未发酵的玉米秸秆效果要好;(2)当玉米秸秆与污泥的配比为2:1且秸秆还田量为75%时,土壤的有机质含量上升幅度最大,土壤的ESP、pH值、土壤代换性Na⁺降低幅度最大;(3)施加玉米秸秆对土壤的EC作用不明显,反而使EC的含量有所上升,施用发酵后的玉米秸秆尤为明显。综合考虑,在本试验条件下针对该土壤最佳参数为:玉米秸秆与污泥配比为2:1,发酵后的玉米秸秆还田量为75%。

关键词:盐碱土;化学性质;玉米秸秆发酵;污泥

中图分类号:S156.4;S153.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)03-0103-05

Effects of Corn Straw and Sewage Sludge on Chemical Indicators of Saline Alkali Land

HAN Jianhong¹, WANG Xuping¹, ZHANG Lianke¹, YU Weijia², JIAO Liyan³, WANG Weida¹

(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China; 2. Baotou Radiation Environment Management, Baotou, Inner Mongolia 014010, China; 3. Huize Water (Qingzhou) Co. Ltd., Qingzhou, Shandong 262500, China)

Abstract: In order to explore the effect of fermented corn straw on the chemical properties (organic matter, ESP, pH value, EC, soil exchangeable Na⁺) of saline alkali soil in Inner Mongolia area, sludge was used as inoculum under laboratory conditions, the corn straw was applied to the saline alkali soil under different fermentation conditions, with no-fermented corn straw as the control. The results showed that: (1) corn straw was applied to improve the partial chemical properties of soil, and the effect of fermented corn straw was better than that of no-fermented corn; (2) the soil organic matter content increased greatly, the ESP, pH value and exchangeable Na⁺ significantly reduced when the ratio of corn straw and sludge was 2:1 and the amount of straw returning was 75%; (3) the effect of corn straw on EC was not obvious, but the EC increased especially after the fermentation. Therefore, under the experimental conditions, the optimal parameters were that the ratio of corn straw and sludge was 2:1, the fermented mass ratio of corn straw and saline alkali soil was 75%.

Keywords: saline alkali soil; chemical property; corn straw fermentation; sewage sludge

盐碱地是中国主要的耕地后备资源,盐碱化土壤面积约 $2.66 \times 10^7 \text{ hm}^2$,其中耕地面积约 $6.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$,且有逐年增长的趋势^[1]。截至目前内蒙古土地盐渍化面积已达 $3.16 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中耕地的盐渍化面积已达 $4.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占可灌面积的40%,且耕地次生盐渍化面积每年仍然以 $1.0 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的速度递增^[2],它不仅直接危害了生长在其上的作物,使农业减产,并且会导致土壤的肥力下降,

大大降低土壤的利用率^[3]。因此土壤盐碱化已成为影响区域经济发展以及生态环境的重要因素,并且寻求合适的盐碱土改良技术,对内蒙古地区生态环境的改善与土地资源的开发利用具有重要意义。

秸秆是农田土壤有机质的一项主要来源,秸秆还田有利于保持土壤肥力、改善土壤理化性状、减少土壤侵蚀,是国内外都提倡的保护性耕作措施之一,越来越受到人们的重视^[4]。秸秆还田能显著增加土壤

有机物的积累,提高土壤养分以及氮肥利用率,增强土壤蓄水能力和田间水利用率,从而达到改良土壤结构的目的,获得高农业生产能力^[5-7]。而且秸秆发酵后能有效降低其自身的 pH 值^[8],施加到盐碱土中能在一定程度上降低土壤的 pH 值。关于秸秆的循环利用,国内外已开展了大量的研究,使其利用更具合理性、科学性。王丙文等^[9]研究了不同玉米秸秆还田方式对土壤呼吸的影响,周怀平等^[10]研究了秸秆还田对旱地玉米产量、效益及水分利用的影响,但前人是针对玉米秸秆直接还田等进行了一些研究,而对于将污泥作为接种物以促进玉米秸秆高效快速的发酵,并将发酵后的玉米秸秆施加到盐碱化土壤中从而得出对盐碱化土壤影响的研究偏少。因此本文旨在通过将玉米秸秆在室内进行恒温发酵,并通过研究施用发酵后的玉米秸秆对盐碱化土壤的化学性质(有机质、代换性 Na^+ 、ESP、pH 值、EC)的影响,为盐碱化土壤的改良提供理论依据和指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

(1) 发酵容器:发酵容器为体积 2 L 的容量瓶,容量瓶口用橡皮塞塞住,使发酵在密闭的厌氧条件下进行,并将其置于恒温水浴锅内,恒温容器为双列六孔的恒温水浴锅,型号:PK-98-II。

(2) 供试玉米秸秆:在内蒙古西北部农区收集玉米秸秆,将其洗净、自然风干、切碎至 2~3 cm 后于密封袋中备用;

(3) 供试土壤:取自内蒙古包头市某盐碱地表层土壤(0—20 cm),当地多年平均气温为 6~8℃,多年平均降水量为 400 mm,采集后除去石块和植物残体,自然条件下风干过 2 mm 筛备用,土壤的 pH 值、ESP、EC、代换性 Na^+ 、有机质、全氮、全磷、速效钾、速效磷、碱解氮、总盐分别为 8.56, 17.13%, 2.86 mS/cm, 1.37 cmol/kg, 10.48 g/kg, 0.821 g/kg, 0.590 g/kg, 139.3 mg/kg, 23.14 mg/kg, 65.75 mg/kg, 0.421 mg/kg。无机离子含量 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} 分别为 0.20, 0.18, 0.08, 1.12, 0.95, 0.41, 0.32, 0.84 g/kg。

(4) 供试污泥:取自内蒙古包头市南郊污水处理厂,将取回的污泥于实验室内自然风干、磨细过 2 mm 筛后置于密封袋中备用,其基本理化性质:土壤的 pH 值、EC、含水率、有机质、全氮、全磷、全钾、Ni、Pb、Cu、Zn、Cd、Ca、Mg 分别为 7.26, 5.0mS/cm, 5.0%, 204.43 g/kg, 34.46 g/kg, 7.31 g/kg, 1.38 g/kg, 56.15 mg/kg, 62.60 mg/kg, 210.54 mg/kg。

1.2 试验设计

采用室内培养法研究玉米秸秆与污泥不同比例发酵对盐碱化土壤化学性质的影响。玉米秸秆发酵时,将切碎后的玉米秸秆和污泥按照 4 个配比,即 1:1, 2:1, 3:1, 6:1(下文中用 SM_1 , SM_2 , SM_3 , SM_6 代替),分别装入体积为 2 L 的发酵容器内,容器内加入适量的去离子水,使容器内物质的总体积达 1 L 左右,容器瓶口经橡皮塞密封后置于恒温水浴锅内,温度设置为 35℃,每个配比的发酵时间均为 40 d;在发酵完成后,将发酵好的玉米秸秆以 25%, 50%, 75%, 100% 的还田量为梯度(玉米秸秆全量还田量为 9 800 kg/hm²)与盐碱土混匀,放于塑料盆中,以未发酵的秸秆为对照 CK,按田间持水率的 60% 添加水分,于 25℃ 恒温培养,待 60 d 后取出土样再对其化学性质进行测定,目的是使发酵后的秸秆能与盐碱土完全混合,为保证试验数据的准确性,每组试验做 3 个平行样。

1.3 数据分析

试验结果统计与相关性分析分别采用 Origin 9.0 和 SPSS 19.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 施用发酵后的玉米秸秆对土壤有机质变化的影响

由图 1 可以看出,施加发酵后玉米秸秆土壤的有机质含量较施加未发酵的玉米秸秆均有所增加,根据总体的趋势而言土壤中有有机质的含量为 $\text{SM}_2 > \text{SM}_1 > \text{SM}_3 > \text{SM}_6 > \text{CK}$,其主要原因是秸秆在微生物作用下产生腐殖质,秸秆中的纤维素、半纤维素、木质素在发酵过程中产量增加,施加到土壤中增加了土壤的含碳有机化合物,提高了土壤有机质含量。当发酵时玉米秸秆与污泥的配比为 2:1 时,相较于其他配比土壤有机质的增幅最大,较施加未发酵的玉米秸秆的土壤增加了 2.47%~2.66%,较原土增加了 2.77%~6.97%;另外,对应于不同的玉米秸秆与污泥发酵时的配比,当发酵后的玉米秸秆还田量为 75% 时,相较于其他的还田量土壤的有机质增幅最大,CK 增加了 0.83%~3.90%, SM_1 增加了 1.83%~4.30%, SM_2 增加了 1.08%~4.09%, SM_3 增加了 1.65%~3.94%, SM_6 增加了 1.20%~4.27%。因此在本试验中针对该盐碱化土壤,当发酵条件为 SM_2 且发酵后的玉米秸秆还田量为 75% 时,土壤有机质含量增幅最大,相较于施加未发酵的玉米秸秆的土壤增加了 2.66%,相较于原土增加了 6.97%,徐蒋来等^[11]在研究稻麦轮作条件下不同周年秸秆还田对土壤养分的影响时,最佳还田量条件下土壤有机质比对照提高了 2.61%。因此在本

本试验中,施加发酵后的玉米秸秆土壤有机质的增幅更加明显,说明发酵后的玉米秸秆能在短期更加快速有效地增加土壤有机质的含量,从而在一定程度上改善了盐碱化土壤。

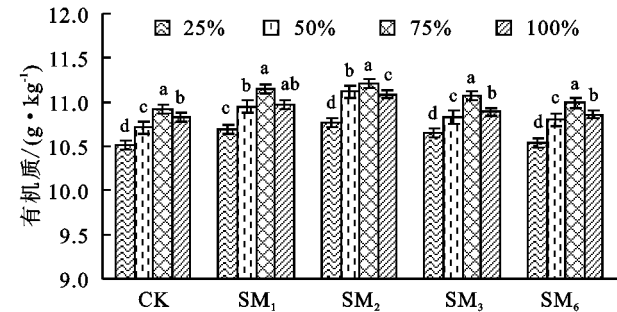
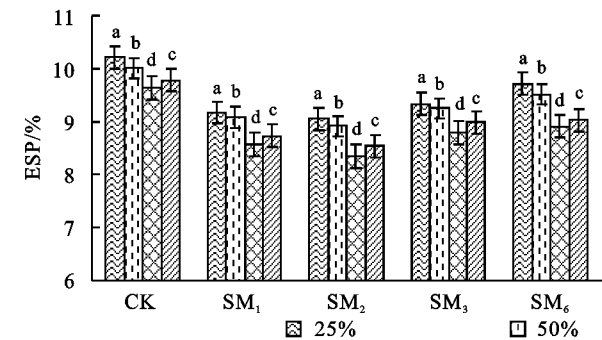


图 1 不同处理的玉米秸秆对盐碱化土壤中有机质含量的影响

2.2 施用发酵后的玉米秸秆对土壤 ESP(碱化度)和 pH 值变化的影响

ESP(碱化度)15 和 pH8.5 被作为是引起土壤结构恶化和影响作物生长的关键值^[12],也是盐碱化指标,土壤的 ESP 和 pH 值对植物的生长、土壤营养元素的转化与释放及有机质的分解有很大的影响。由图 2 可以看出,施用发酵后的玉米秸秆,土壤 pH 值和 ESP 相对于施加不发酵的玉米秸秆的土壤都有一定程度的降低,从整体趋势上看,对于土壤的 ESP 和 pH 值都有:SM₂<SM₁<SM₃<SM₆<CK。由此可见当发酵条件为 SM₂ 时,土壤的 ESP 相较于其他条件而言降低的最多,较施加未发酵的玉米秸秆的土壤降低了 11.36%~13.38%,



较原土降低了 47.16%~51.26%;与此同时,土壤的 pH 值较施加不发酵的玉米秸秆的土壤降低了 1.91%~2.54%,较原土降低了 3.86%~5.72%。对应于不同发酵条件下的玉米秸秆,从图 2 中可以看出,当发酵后玉米秸秆的还田量为 75%时,较其他还田量而言土壤的 ESP 与 pH 值降低的幅度最大,对土壤 ESP 而言,CK 降低了 1.43%~3.58%,SM₁ 降低了 1.95%~6.65%,SM₂ 降低了 2.22%~7.73%,SM₃ 降低了 2.23%~5.79%,SM₆ 降低了 1.33%~8.24%;对土壤 pH 值而言,CK 降低了 0.24%~1.31%,SM₁ 降低了 0.85%~1.57%,SM₂ 降低了 0.62%~1.94%,SM₃ 降低了 0.97%~1.68%,SM₆ 降低了 0.85%~1.69%。因此可以得出发酵后的玉米秸秆比未发酵的玉米秸秆施加到盐碱化土壤中的效果要好,且随着秸秆还田量的增加,土壤 pH 值虽有波动,但整体趋势明显下降,其主要原因是秸秆的铵态氮的消化作用以及秸秆在微生物的腐解作用过程中产生了有机酸,对碱性土壤起到中和作用,从而降低了土壤 pH 值,此外植物秸秆中的有机阳离子和阴离子、可溶性物质等均对土壤 pH 值产生影响,对于盐碱类型的土壤,土壤 pH 值变化主要是因为土壤中碳酸根和碳酸氢根的含量发生变化引起的碱度变化^[13]。因此在本试验条件下,选择适当的发酵方案能有效地降低土壤的 ESP 以及 pH 值。

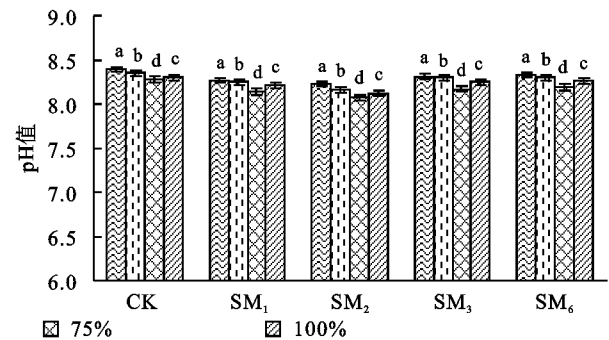


图 2 不同处理的玉米秸秆对盐碱化土壤中 ESP,pH 值的影响

2.3 施用发酵后的玉米秸秆对土壤 EC 值变化的影响

土壤 EC 值能够反映土壤全盐量的变化^[14],因此,描述土壤盐分状况,通常采用 EC 值作为衡量指标。由图 3 可以看出,土壤的 EC 值相较于原土的值都有一定程度的升高,从整体趋势上看,土壤的 EC 值上升的幅度为:CK<SM₆<SM₃<SM₂<SM₁,施加未发酵的玉米秸秆土壤 EC 值无明显变化,分析其原因时,秸秆中游离的营养离子含量较少,对土壤的 EC 值影响不大;而发酵后的玉米秸秆由于其腐殖过程中加入了营养液,营养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。且随着接种污泥量的增加,盐分含量上升的越

多;对应于不同的秸秆与污泥发酵时的配比,随着秸秆还田量的增加,土壤盐分含量也随之增加。有研究表明秸秆施入土壤能有效地改善土壤结构,增加其通透性^[15],并且秸秆的施入可以减小土壤容重,提高导水率^[16],因而增加了盐分渗漏。因此在实际的应用过程中,为了能有效地降低发酵后的玉米秸秆施加到土壤中所增加的土壤盐分,应定期对土壤进行灌溉浇水,使土壤中的盐分能通过土壤渗漏而减少。另外,为了更好地控制土壤中的盐分离子,应选择合适的玉米秸秆与污泥发酵时的配比,且应控制好发酵后的玉米秸秆的还田量,从而使土壤的盐和碱都能得到有效地控制。

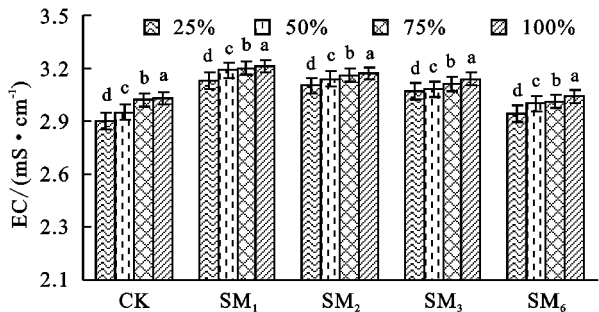


图3 不同处理的玉米秸秆对盐碱化土壤中 EC 的影响

2.4 施用发酵后的玉米秸秆对土壤代换性 Na⁺ 的影响

阳离子代换性能是土壤的重要特性,通常是评价土壤保水保肥能力的指标,尤其对碱性土壤来说,则是更为重要的土壤改良指标,碱性土壤的许多不良性质是与其代换性 Na⁺ 的数量密切相关的^[17]。大量的代换性 Na⁺ 导致土壤的性质不断恶化。供试土壤施加玉米秸秆后,从整体趋势可以得出 SM₂ < SM₁ < SM₃ < SM₆ < CK,较原土而言,并无明显变化,但略有减少,可能原因是玉米秸秆发酵时以污泥为接种物,污泥中的部分金属离子置换出了钠离子,从而使土壤中代换性 Na⁺ 含量略有降低,具体原因还有待进一步研究验证。由图 4 看出,当发酵条件为 SM₂ 时,土壤中代换性 Na⁺ 相较于其他的配比而言降低的幅度略大,可见适当的污泥接种量能在一定程度上降低土壤的代换性 Na⁺。王金满等^[1]利用脱硫石膏改良盐碱地有效地降低了土壤的代换性 Na⁺;周学武等^[18]将污泥与粉煤灰配施也在一定程度上有效地降低了土壤的代换性 Na⁺。因此为了能大幅度降低土壤中代换性 Na⁺ 的含量,可以在秸秆还田的同时配施一些脱硫石膏或者粉煤灰等,从而达到改善土壤结构,增加土壤渗透性的效果。

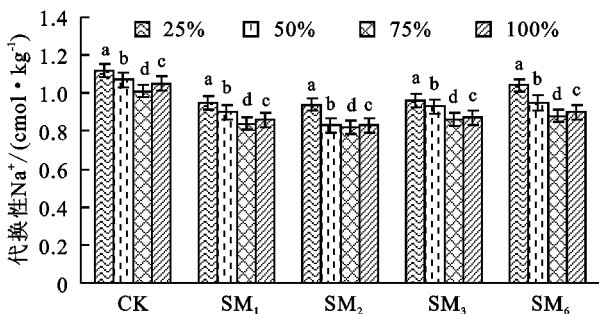


图4 不同处理的玉米秸秆对盐碱化土壤中代换性 Na⁺ 的影响

2.5 施用发酵后的玉米秸秆对盐碱化土壤有机质与化学指标相关性的影响

由表 1 可以看出,施加发酵后玉米秸秆,盐碱化土壤的化学指标(有机质、ESP、pH 值、EC、代换性 Na⁺)均显著相关,其中有机质与其他各项指标呈负相关,其他各项指标间均呈正相关。

表 1 盐碱化土壤的肥力指标以及盐碱化指标的相关性分析

项目	有机质	ESP	pH	EC	代换性 Na ⁺
有机质	1				
ESP	-0.872 *	1			
pH	-0.909 *	0.860 *	1		
EC	-0.947 *	0.903 *	0.867 *	1	
代换性 Na ⁺	-0.956 *	0.936 *	0.925 *	0.937 *	1

注: * 表示在 0.01 水平上相关性显著(n=12)。

3 讨论

3.1 施用发酵后的玉米秸秆对盐碱化土壤的影响

有试验研究表明,在盐碱土中直接加入秸秆粉,并没有起到改良土壤的作用,反而抑制了作物的生长,添加发酵后的秸秆粉能很快增加土壤养分含量,明显改善土壤的理化性质^[8]。另外,随着经济的发展,城市污水处理厂中污泥的产量日益增多,但是污泥中含有大量植物所需养分,将污泥直接与盐碱土混合后能明显改善土壤肥力,促进作物对养分的吸收和利用,使土壤的 pH 值降低^[19]。前人大部分都是分别单独利用玉米秸秆和污泥去对盐碱地的改良进行研究,因此在本试验中,将污泥作为接种物,促使玉米秸秆能高效快速的发酵,玉米秸秆发酵是在密闭的厌氧条件下进行的,由于秸秆发酵微生物菌群可以秸秆中的纤维素为底物,将其酶解为木聚糖,进而降解成木聚寡糖、木三糖和木二糖等,最后降解成木糖,然后再经无氧发酵,将其转化成有机酸,随着有机酸含氮增加,封闭的秸秆发酵容器内氢离子浓度越高,从而导致秸秆的 pH 值逐步下降^[20],因此污泥接种发酵后的玉米秸秆能更加有效地降低土壤的 ESP, pH 值、代换性 Na⁺,同时提高了土壤有机质的含量,因而对盐碱化土壤的改良起到了一定的作用。

3.2 施用发酵后的玉米秸秆对盐碱化土壤的肥力指标、酶活性的影响

玉米秸秆中含有大量碳、氮、磷、钾及各种微量元素,秸秆也是农作物生产最主要的副产品^[21],目前,利用秸秆还田对土壤肥力指标以及酶活性的研究很多。马超等^[22]研究了秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响,王小波等^[23]利用秸秆还田探究其对沙姜黑土养分的影响,以上研究表明,秸秆还田能够显著改善土壤肥力状况,为作物根系创造良好的土壤环境。土壤酶活性是表征土壤微生物活性和土壤营养状况的重要指标,大量研究表明,添加作物秸秆可增加土壤脲酶、转化酶、过氧化氢酶的活性。例如 Martens 等^[24]的试验结果表明,添加秸秆的土壤脲酶的活性要比不添加的高 2 倍以上,徐伟国等^[25]发现,秸秆还田对土壤脲酶、过氧化氢酶活性均有促进作用。但利用

发酵后的玉米秸秆对盐碱化土壤的肥力指标尤其是酶活性的研究偏少,本文通过室内短期发酵试验,对盐碱化土壤的化学指标进行了试验分析,并证实了发酵后的玉米秸秆对盐碱化土壤的化学指标都起到了一定的作用,因此在接下来在对盐碱化土壤的肥力指标以及酶活性这两方面还有待进一步的试验研究。

4 结论

(1) 发酵后的玉米秸秆有降低土壤 ESP, pH 值、代换性 Na^+ , 提高土壤有机质的作用, 本试验将污泥作为玉米秸秆发酵的接种物促使玉米秸秆能快速有效的发酵, 试验结果证明, 发酵后的玉米秸秆对盐碱化土壤的改良具有一定的可行性。

(2) 施加不同处理的玉米秸秆时土壤的 EC 值均有所上升, 且发酵后的玉米秸秆比未发酵的玉米秸秆上升的幅度要大, 因此在降低土壤碱性的同时, 控制好土壤的盐分极为重要, 具体的方案还有待进一步研究。

(3) 试验结果表明发酵后玉米秸秆对土壤的化学性质有着一定的影响, 从整体上而言, 当发酵条件为 SM_2 , 发酵后的秸秆还田量为 75% 时, 土壤的土壤 ESP, pH 值以及代换性 Na^+ 相对于其他方案而言降低到了最低值, 土壤的有机质增加到最大值, 因此发酵条件为 SM_2 , 发酵后的秸秆还田量为 75% 可推荐为改良盐碱地的可行方案。

参考文献:

- [1] 王金满, 白中科, 叶驰驱, 等. 脱硫石膏与微生物菌剂联合施用对盐碱化土壤特性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6): 1080-1087.
- [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] 李素艳, 翟鹏辉, 孙向阳, 等. 滨海土壤盐渍化特征及土壤改良研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(6): 1069-1078.
- [4] 张电学, 韩志卿, 刘微, 等. 不同促腐条件下玉米秸秆直接还田的生物学效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 742-749.
- [5] Kasperbauer M J. Cotton seedling root growth responses to light reflected to the shoots from straw-covered versus bare soil[J]. Crop Science, 1999, 39(1): 164-167.
- [6] 苏德纯. 粉煤灰钝化污泥对土壤理化性质及玉米重金属累积的影响[J]. 中国环境科学, 1997, 17(4): 321-325.
- [7] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535.
- [8] 徐娜娜, 解玉红, 冯妍. 添加秸秆粉对盐碱地土壤微生物生物量及呼吸强度的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 185-188.
- [9] 王丙文, 迟淑筠, 田慎重, 等. 不同玉米秸秆还田方式对冬小麦田土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1374-1380.
- [10] 周怀平, 解文艳, 关春林, 等. 长期秸秆还田对旱地玉米产量, 效益及水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 19(2): 321-330.
- [11] 徐蒋来, 胡乃娟, 张政文, 等. 连续秸秆还田对稻麦轮作农田土壤养分及碳库的影响[J]. 土壤, 2016, 48(1): 1100-1105.
- [12] 李焕珍, 徐玉佩, 杨伟奇, 等. 脱硫石膏改良强度苏打盐渍土效果的研究[J]. 生态学杂志, 1999(1): 25-29.
- [13] 冯妍, 袁静, 解玉红. 玉米秸秆不同还田方式对土壤肥力及小麦生长的影响[J]. 天津理工大学学报, 2016, 32(1): 53-57.
- [14] 张建旗, 张继娜, 杨虎德, 等. 兰州地区土壤电导率与盐分含量关系研究[J]. 甘肃林业科技, 2009, 34(2): 21-24.
- [15] Thomas G W, Haszler G R, Blevins R L. The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using the proctor test1[J]. Soil Science, 1996, 161(8): 502-508.
- [16] Soane B D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects[J]. Soil and Tillage Research, 1990, 16(1): 179-201.
- [17] 徐胜光, 李淑仪, 廖新荣, 等. 花生施用燃煤烟气脱硫副产物研究初报[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 23-26.
- [18] 周学武. 粉煤灰与污泥配施改良山东郑路, 华丰盐碱地的实验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- [19] 朱琳莹, 许修宏, 姜虎, 等. 污泥堆肥对盐碱土壤环境和作物生长的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 135-138.
- [20] 谢永生. 玉米秸秆发酵原理及其特点[J]. 畜牧兽医科技信息, 2012(3): 117-117.
- [21] 姜洁, 陈宏, 赵秀兰. 农作物秸秆改良土壤的方式与应用现状[J]. 中国农学通报, 2008, 24(8): 420-423.
- [22] 马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2013(5): 915-921.
- [23] 王晓波, 车威, 纪荣婷, 等. 秸秆还田和保护性耕作对砂姜黑土有机质和氮素养分的影响[J]. 土壤, 2015, 47(3): 483-489.
- [24] Martens D A, Johanson J B, Frankenberger Jr W T. Production and persistence of soil enzymes with repeated addition of organic residues[J]. Soil Science, 1992, 153(1): 53-61.
- [25] 李腊梅, 陆琴, 严蔚东, 等. 太湖地区稻麦二熟制下长期秸秆还田对土壤酶活性的影响[J]. 土壤, 2006, 38(4): 422-428.