

冀拯宇, 周吉祥, 张贺, 等. 不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1759–1767.

Ji Zheng-yu, ZHOU Ji-xiang, ZHANG He, et al. Effect of soil conditioners on the soil chemical properties and organic carbon pool of saline-sodic soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(8): 1759–1767.

不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响

冀拯宇, 周吉祥, 张贺, 郭康莉, 刘晓, 姜慧敏, 杨俊诚, 李桂花*, 张建峰*

(耕地培育技术国家工程实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:为研究施用不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响, 2016—2017年在内蒙古河套灌区盐碱土壤进行田间定位试验, 设置4个实验处理: 习惯处理(CK)、CK+有机土壤改良剂(M)、CK+复合土壤改良剂(G)、CK+有机土壤改良剂+复合土壤改良剂(M+G)。收集2017年收获季耕层0~20 cm土壤, 测定各小区土壤中的水溶性离子含量、全盐量(TS)、钠吸附比(SAR)、pH、土壤有机碳(SOC)、活性有机碳(LOC)、微生物量碳(MBC)以及土壤碳库管理指数(CPMI), 并分析各指标间的关系。结果表明: 与CK相比, 施用土壤改良剂各处理土壤 Ca^{2+} 含量提高了13.07%~33.33%, 土壤 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量分别降低了29.83%~46.19%、12.06%~33.19%和19.90%~34.59%, 土壤全盐量、钠吸附比和pH分别降低了12.67%~26.91%、33.02%~47.06%和2.21%~4.56%。其中M+G处理改良效果最好, 土壤全盐量、钠吸附比和pH分别显著降低了26.91%、47.06%和4.56% ($P < 0.05$); 施用土壤改良剂各处理SOC、LOC和MBC含量分别较CK提高了18.90%~43.87%、54.55%~82.33%和64.04%~86.85%。其中M+G处理提升效果最明显, 且均达到显著水平 ($P < 0.05$)。同时, 施用改良剂各处理CPMI提升了95.44%~135.83%, 其中M+G处理提升效果最明显, 且达到显著水平 ($P < 0.05$); 相关性分析表明, 试验土壤LOC、MBC和CPMI均与TS和SAR呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 说明土壤LOC、MBC以及CPMI对盐碱土壤化学性质的变化较敏感。研究表明, 施用有机土壤改良剂和复合土壤改良剂均降低了土壤含盐量、钠吸附比和pH, 提升了土壤有机碳及其组分含量和土壤碳库管理指数, 其中有机土壤改良剂和复合土壤改良剂配施对盐碱土壤质量的提升效果最明显。

关键词: 盐碱土壤; 土壤改良剂; 土壤化学性质; 有机碳库; 碳库管理指数

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2019)08-1759-09 doi:10.11654/jaes.2019-0426

Effect of soil conditioners on the soil chemical properties and organic carbon pool of saline-sodic soil

Ji Zheng-yu, ZHOU Ji-xiang, ZHANG He, GUO Kang-li, LIU Xiao, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, LI Gui-hua*, ZHANG Jian-feng*
(National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to provide a theoretical basis and technical support for the utilization of soil conditioners on saline-sodic soils, this study focused on the effects of different soil conditioners on soil chemical properties and the soil organic carbon (SOC) pool. A field experiment was conducted on a saline-sodic soil in Hetao Irrigated Area of Inner Mongolia. Four treatments were designed as follows: chemical fertilizer only (CK), CK + organic soil conditioner (M), CK + composite soil conditioner (G), and CK + a combination of organic soil conditioner and composite soil conditioner (M+G). After maize was harvested in 2017, soil samples were collected from depths of between 0 and 20 cm. The water-soluble salt ions content, total salt content (TS), sodium adsorption ratio (SAR), pH, SOC, labile organic carbon (LOC), microbial biomass carbon (MBC), and carbon pool management index (CPMI) were measured and analyzed using related software. The following results were obtained. Application of the conditioners increased Ca^{2+} concentration by 13.07%~33.33%, and decreased soil Na^+ , Cl^- ,

收稿日期: 2019-04-18 录用日期: 2019-06-11

作者简介: 冀拯宇(1993—), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 从事土壤污染与防治研究。E-mail: 1009450562@qq.com

*通信作者: 李桂花 E-mail: liguihua@caas.cn; 张建峰 E-mail: zhangjianfeng@caas.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800402); 国家自然科学基金项目(21577172); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132018027)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2018YFD0800402); The National Natural Science Foundation of China(21577172); Fundamental Research Funds for Central Non-profit Scientific Institution(1610132018027)

and SO_4^{2-} concentrations by 29.83%~46.19%, 12.06%~33.19%, and 19.90%~34.59%, respectively. Compared with the CK treatment, total salt content, SAR, and pH decreased by 12.67%~26.91%, 33.02%~47.06%, and 2.21%~4.56%, respectively, under conditioner treatments. The combined application of two conditioners (M+G), which had the most pronounced effect, significantly ($P<0.05$) reduced total salt content, SAR, and pH by 26.91%, 47.06%, and 4.56%, respectively, compared with the CK treatment. Compared with the CK treatment, SOC, LOC, and MBC increased by 18.90%~43.87%, 54.55%~82.33%, and 64.04%~86.85%, respectively, under the conditioner treatments. The M+G treatment had the most significant effect on SOC, LOC, and MBC, in each case reaching a significance level of $P<0.05$. Furthermore, compared with the CK treatment, soil amended conditioners enhanced the CPMI by 95.44%~135.83%, with the M+G treatment having the most pronounced effect ($P<0.05$). Correlation analysis revealed that soil LOC, MBC, and CPMI were negatively correlated with TS and SAR, indicating that LOC, MBC, and CPMI are sensitive to changes in the chemical properties of saline-sodic soil. Application of organic and composite soil conditioners was found to be an effective measure, not only with regard to reducing soil total salt content, SAR, and pH but also for increasing SOC, soil organic carbon fractions, and the CPMI. Notably, combining the application of an organic soil conditioner and a composite soil conditioner was found to be the most effective approach under the examined experimental conditions.

Keywords: saline-sodic soil; soil conditioner; soil chemical properties; soil organic carbon pool; carbon pool management index

土壤盐渍化和碱化导致的土壤质量退化是一个全球性问题,盐碱土壤通常发生在干旱和半干旱地区,具有较高pH、电导率和钠吸附比值及较低有机质含量的特征^[1-2],受盐碱影响的土壤约占世界地理区域总量的3%,其中盐土和碱土分别为4.02亿 hm^2 和4.34亿 hm^2 。此外,不良灌溉和排水条件等农业措施也可能会加剧土壤盐碱化,从而严重影响作物生长^[3]。

土壤盐渍化是我国内蒙古河套灌区农业可持续发展的主要障碍,全灌区盐碱土壤面积为39.4万 hm^2 ,占该地区耕地面积的68.65%^[4]。该区域作物生长期间,蒸发和蒸腾作用强烈,作为细泥沙沉积土,其土壤持水能力弱,底层土壤中溶解的盐通过毛细作用转移到表层土壤积盐^[5]。引流黄河水灌溉是当地降低土壤含盐量的主要措施,但对于土壤结构较差的重度盐碱地,漫灌并不能有效降低土壤含盐量^[6]。土壤改良剂被广泛用于盐碱土壤改良,通过施用土壤改良剂,可以促进土壤絮凝作用、提高团聚体稳定性和入渗速率,改善土壤结构^[7-8]。因此,施用土壤改良剂对于当地农业生产和可持续发展具有重要作用。在盐碱土壤改良机理方面,目前对于含钙物质改良盐碱土壤的机理比较明确,其原理为利用 Ca^{2+} 置换土壤胶体上吸附的交换性 Na^+ 。石膏、磷石膏和脱硫石膏等均作为 Ca^{2+} 来源被用于改良盐碱土壤^[9]。但目前的研究较多集中在土壤改良剂对盐碱指标等化学性质的影响,关于施用土壤改良剂后土壤化学性质和土壤有机碳库变化的综合研究较少。因此,本试验研究了施用复合土壤改良剂和有机土壤改良剂对盐碱土壤化

学性质和有机碳库的影响,旨在研究土壤改良剂对河套灌区盐碱土壤质量的改良效果及改良机制,为该区域制定科学有效的盐碱土壤改良措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤改良剂

有机土壤改良剂为虾头蟹壳提取甲壳素后的废弃物,粉碎后按质量2:3混合加入草炭、秸秆和花生壳等,接入复合微生物菌剂(地衣芽孢杆菌、干酪乳杆菌、黑曲霉和枯草芽孢杆菌),通过好氧发酵、高温堆肥等工艺处理后制成的商业化产品。复合土壤改良剂由伊利石黏土矿物加入25%碳酸钙,经过水泥回转窑800℃以上高温煅烧以及硫酸和盐酸混合酸洗池酸洗,过湿磨机湿磨,添加腐植酸后,进入烘干滚筒烘干、造粒、筛分制成。两种土壤改良剂的主要理化性质如表1所示,水溶性盐离子含量见表2,重金属含量及其限量标准见表3。目前,土壤改良剂产品尚未出台重金属元素限量标准,因此,参照有机肥料标准(NY 525—2012)和农用A级污泥污染物控制标准(GB 4284—2018)规定的限量值^[10],供试改良剂重金属含量均低于以上标准限量。

1.2 试验基地概况

试验基地位于内蒙古巴彦淖尔盟临河市电力公司试验基地(41°43'N, 107°41'E),属于中纬度内陆干旱气候区,2016年全年日照时数4 448.1 h,年均气温8.6℃,全年降雨量145.8 mm;2017年全年日照时数3 389.3 h,年均气温9.0℃,全年降雨量99.6 mm。该地年蒸发量较大,蒸降比较高,冬春季土壤盐分表

表1 供试改良剂主要理化性质

Table 1 Main physicochemical properties of tested soil conditioners

项目 Items	pH	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	全磷 Total phosphorus/ g·kg ⁻¹	全钾 Total potassium/ g·kg ⁻¹	活性有机碳 Labile organic carbon/g·kg ⁻¹	电导率 Electronic conductivity/ dS·m ⁻¹
有机改良剂	7.75	127.12	14.65	21.05	22.88	11.24	14.94
复合改良剂	5.5	106.61	1.70	0.11	0.46	3.68	4.47

表2 供试土壤改良剂水溶性盐离子含量(cmol·kg⁻¹)Table 2 Content of water-soluble salt ions in tested soil conditioners(cmol·kg⁻¹)

项目 Items	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻ +HCO ₃ ⁻
有机改良剂	7.15	4.01	9.67	23.86	13.38	19.95	0.58
复合改良剂	10.12	12.90	1.36	0.03	2.125	21.61	0.15

表3 供试改良剂中重金属含量及参考限量(mg·kg⁻¹)Table 3 Content of heavy metals in tested soil conditioners and the reference limits(mg·kg⁻¹)

项目 Items	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As
有机改良剂	20.36	15.23	25.95	126.18	0.57	14.07	7.65
复合改良剂	14.09	4.47	2.88	13.41	0.06	9.94	3.37
GB 4284—2018	500	100	500	1200	3	300	30
NY 525—2012	150	—	—	—	3	50	15

注:—表示无相关标准。

Note:— means no relevant criteria found.

聚现象严重。试验地属黄河灌溉区的边缘,地下水埋深2.0 m,主要受渠灌入渗补给和降雨补给。试验前耕层土壤(0~20 cm)的基本肥力指标为:含水率11.05%,pH 8.33,土壤有机质(SOM)6.93 g·kg⁻¹,全氮(TN)0.78 g·kg⁻¹,速效磷(AP)16.89 mg·kg⁻¹,速效钾(AK)238.51 mg·kg⁻¹。耕层土壤化学性质见表4。

1.3 田间试验设计

试验区种植制度为玉米单作,供试作物为当地主栽品种“西蒙6号”,试验从2016年4月开始,到2017年9月连续两年种植玉米。试验设4个处理:(1)习惯处理(CK);(2)CK+有机土壤改良剂 10 t·hm⁻²(M);(3)CK+复合土壤改良剂 16.7 t·hm⁻²(G);(4)CK+有机土壤改良剂 10 t·hm⁻²+复合土壤改良剂 16.7 t·hm⁻²(M+G);每个处理重复3次,区组随机排列。小区面积为60 m²,不同处理小区间起垄隔开。播种前分别施尿素(N 180 kg·hm⁻²)、磷酸二铵(P₂O₅ 138 kg·hm⁻²)和氯化钾(K₂O 75 kg·hm⁻²)作为基肥。种植玉米前一

次性将土壤改良剂均匀撒施于土壤耕层,并通过多次翻耕与耕层土壤混匀。其他大田管理措施与当地农民习惯保持一致。

1.4 样品采集、测定项目与方法

1.4.1 土壤样品采集

于2017年9月玉米收获后在各试验小区内采用“Z”字式采集0~20 cm的耕层土壤样品5个,充分混匀后,通过“四分法”取两份,一份带回实验室,自然风干,除去作物根系、侵入体,过2 mm和0.149 mm筛;另一份放入4℃冰箱保存,用于测定土壤微生物生物量碳。

1.4.2 测定项目与方法

土壤有机碳(SOC)用重铬酸钾外加热容量法;全氮(TN)用半微量凯氏定氮法;pH用水土比5:1梅特勒pH计(FE20)测定^[11]。离子组成的具体测定方法为:CO₃²⁻和HCO₃⁻用双指示剂盐酸滴定法;Cl⁻用AgNO₃滴定法;SO₄²⁻用EDTA间接滴定法;Ca²⁺、Mg²⁺用EDTA

表4 供试耕层土壤化学性质

Table 4 Chemical properties of tested soil

pH	钠吸附比 Sodium adsorption ratio	全盐量 Total salt content/g·kg ⁻¹	CO ₃ ²⁻ / cmol·kg ⁻¹	HCO ₃ ⁻ / cmol·kg ⁻¹	Cl ⁻ / cmol·kg ⁻¹	SO ₄ ²⁻ / cmol·kg ⁻¹	Ca ²⁺ / cmol·kg ⁻¹	Mg ²⁺ / cmol·kg ⁻¹	Na ⁺ / cmol·kg ⁻¹	K ⁺ / cmol·kg ⁻¹
8.33	18.55	20.03	0	0.24	30.37	6.21	3.03	5.35	12.01	0.12

滴定法; K^+ 、 Na^+ 用火焰光度法。全盐量(TS)采用加和法,即为8种盐分离子之和;土壤活性有机碳用 $KMnO_4$ 氧化法;土壤微生物生物量碳(MBC)用氯仿熏蒸培养法^[12]。有机土壤改良剂和复合土壤改良剂中重金属元素 Cu、Zn、Cd、Ni、Pb 和 Cr 采用硝酸-高氯酸消解,ICP-MS测定。

1.5 数据计算

(1) 钠吸附比(Sodium absorption ration, SAR)是衡量土壤盐碱化的重要指标,是指土壤溶液中 Na^+ 浓度与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度平均值的平方根之比^[13],计算公式为:

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

(2) 土壤碳库管理指数以及碳库有效率计算方法^[14]。

土壤碳库相对稳定,对短期管理措施不敏感。因此,本文选择对短期管理措施敏感的土壤碳库管理指数作为碳库变化的指标。具体计算方法为:以试验周围撂荒地土壤为参考土壤(CK_0),不耕作不施肥,与样品土壤类型相同、位置相近、受人为干扰和影响最小。其总有机碳含量为 $5.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,活性有机碳含量为 $2.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。活性碳库组分碳素有效率和碳库管理指数计算方法如下:

碳库指数(CPI)=样本中的总有机碳含量(SOC)/参考土壤总有机碳含量(SOC_0)

碳库活度(L)=样本中的活性有机碳含量(LOC)/样本中的非活性有机碳含量($N-LOC$ 为总有机碳和活性有机碳之差)

碳库活度指数(LI)=样本碳库活度(L)/参考土壤碳库活度(L_0)

基于以上参数可以得到碳库管理指数(Carbon pool management index, CPMI):

$$CPMI = CPI \times LI \times 100$$

1.6 数据统计分析

用 Excel 软件进行数据相关计算,试验结果采用 SAS 9.1 统计分析软件进行方差分析和相关性分析,不同处理间采用最小显著差数法(Duncan 法)进行差异显著性检验,用 Originpro 9.1 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同土壤改良剂对土壤化学性质的影响

2.1.1 土壤水溶性盐离子组成

如图1所示,与 CK 相比,施用改良剂各处理土壤

水溶性阴阳离子(Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})浓度均发生了不同程度的变化:土壤 Ca^{2+} 浓度呈不同程度增加,其中 M 和 M+G 处理达到显著水平($P < 0.05$),分别提高了 33.14% 和 31.91%;土壤 Na^+ 浓度均下降,其中 M+G 处理达到显著水平,浓度降低了 46.18%;施用两种改良剂均提高了土壤 Ca^{2+} 浓度并降低了 Na^+ 浓度,说明有机土壤改良剂和复合土壤改良剂中的 Ca^{2+} 进入土壤溶液,并置换出土壤中的 Na^+ 。土壤 Cl^- 浓度均有所降低,其中 G 和 M+G 处理达到显著水平,分别降低了 33.22% 和 22.12%;土壤 SO_4^{2-} 浓度降低了 25.09%~34.69%,但未达到显著水平。另外,各处理土壤 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 浓度变化较小,平均值为 $5.09 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.23 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,数据未在图表中列出;土壤 CO_3^{2-} 未检出。

2.1.2 土壤 TS、SAR 和 pH

施用改良剂对土壤 TS、SAR 和 pH 的影响如图2所示。土壤 TS 和 SAR 在施用改良剂后均降低,说明改良剂同时降低了土壤的盐度和碱度。与 CK 相比, M+G 处理土壤 TS 和 SAR 的降低均达到显著水平,分别降低 24.65% 和 47.08% ($P < 0.05$)。施用改良剂各处理土壤 pH 也呈降低趋势,对比 CK (pH 8.12), G 和 M+G 处理 pH 值显著降低到 7.88 和 7.75 ($P < 0.05$)。

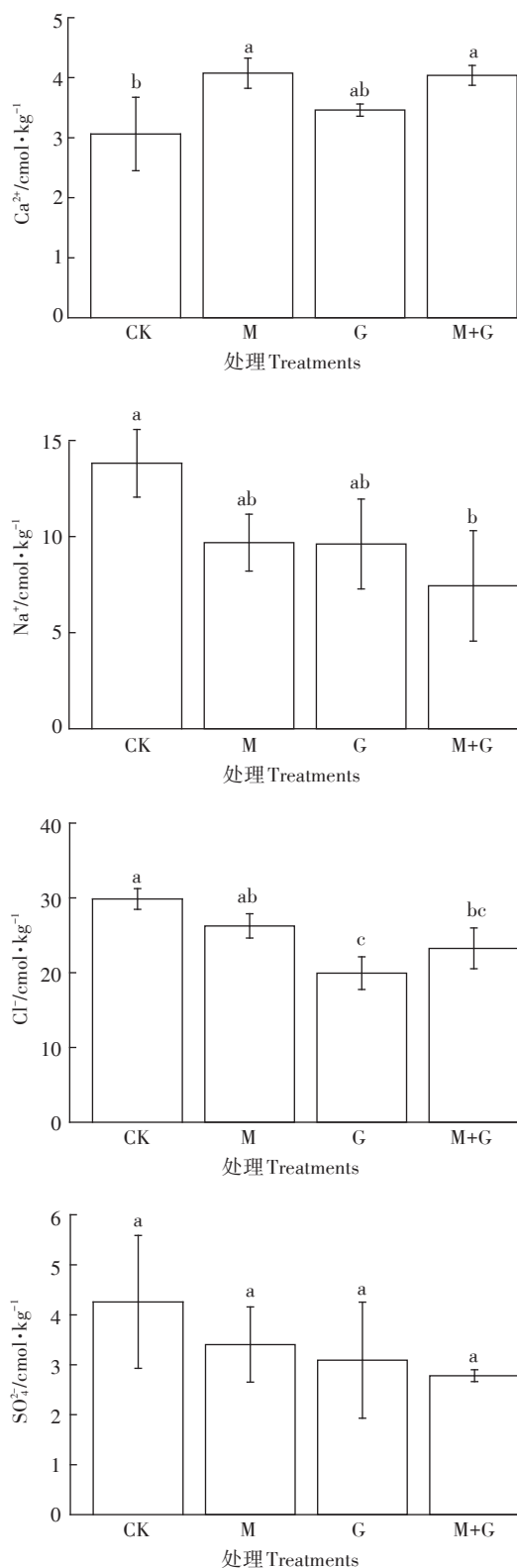
2.2 不同土壤改良剂对土壤有机碳库的影响

2.2.1 SOC 及其组分含量

试验地 SOC ($4.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、LOC ($0.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 MBC ($37.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 均较低,施用改良剂后均有不同程度提升(图3)。M+G 处理的 SOC 比 CK 显著提升了 43.87% ($P < 0.05$), M 和 G 处理与 CK 相比无显著差异;土壤 LOC 和 MBC 提升幅度较大, M、G 和 M+G 处理的 LOC 比 CK 分别提升了 54.55%、79.35% 和 82.33%,其中 G 和 M+G 处理达到显著水平($P < 0.05$); M、G 和 M+G 处理的 MBC 比 CK 显著提升了 64.04%、76.46% 和 86.85% ($P < 0.05$)。SOC 及其组分含量随土壤改良剂施入而提高,两种土壤改良剂配施的 M+G 处理提升幅度最大。

2.2.2 土壤 CPMI

综合而言,碳库指数、碳库活度、活度指数以及 CPMI 是一组相互关联的指标,与土壤生产潜力密切相关。以 CK_0 为参考,由表5可知, CK 处理 CPMI 低于 CK_0 ,表明单施化肥影响了土壤有机质质量,使土壤活性有机质相对含量减少,导致 CPMI 降低,不利于当地盐碱土壤 LOC 的提高和 CPMI 的增加。而施用改良剂各处理 CPMI 相比 CK_0 均有提升,与 CK 相比, M+G 处理 CPMI 显著提升了 135.83% ($P < 0.05$), M 和 G 处



柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different letters above the bars indicate significant differences among the treatments at 0.05 level. The same below

图1 不同处理土壤水溶性盐离子含量

Figure 1 Content of water-soluble salt ions in soil of different treatments

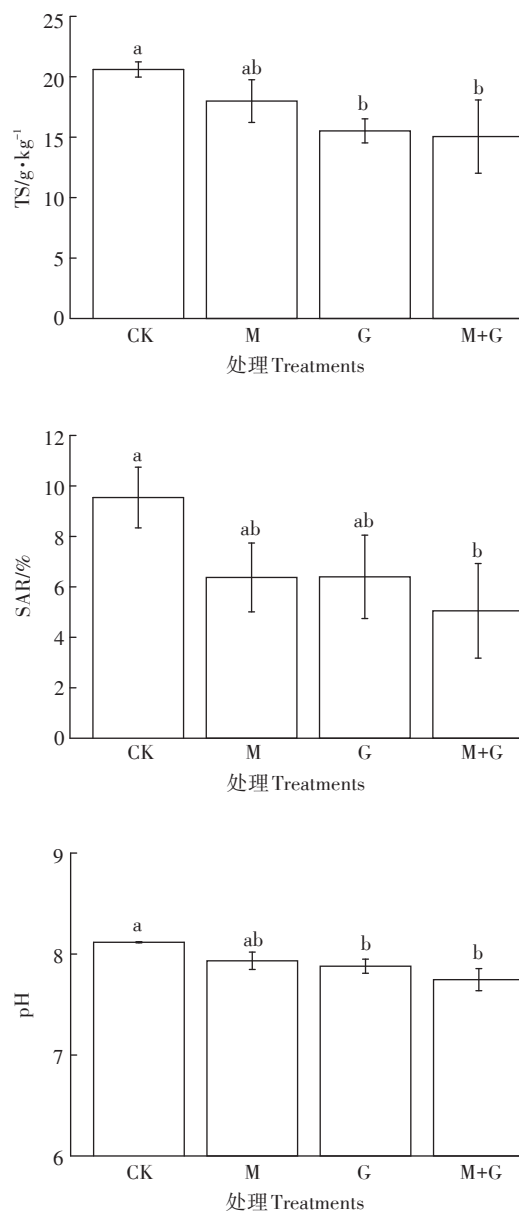


图2 不同处理土壤TS、SAR和pH

Figure 2 Total salt content, sodium adsorption ratio and pH in soil of different treatments

理提升效果不显著,表明在有机质含量低的盐碱土上施用土壤改良剂有利于提高耕作层 CMPI,其中两种改良剂配施处理提升效果显著。

2.3 土壤有机碳库与土壤化学性质间的相关性

SOC 及其组分、CMPI 和土壤化学性质之间的相关关系如表 6 所示。土壤 TS、SAR 和 pH 互为显著或极显著正相关关系,说明在土壤盐碱化发生的过程中,土壤化学性质是相互影响的;土壤 LOC 与 MBC 呈极显著正相关关系;土壤 SOC 与 SAR 和 pH 呈显著或极显著负相关关系,土壤 LOC 和 MBC 分别与 TS 和

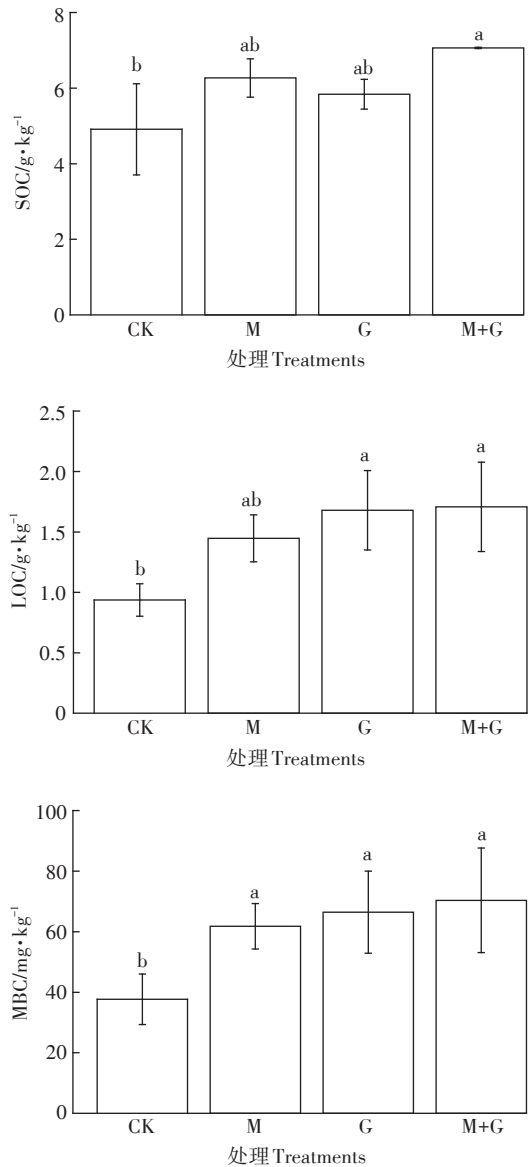


图3 不同处理土壤有机碳及其组分含量

Figure 3 Content of organic carbon and organic carbon fractions in soil of different treatments

表5 不同处理土壤碳库管理指数

Table 5 CPMI of different treatments after application of soil conditioner

处理 Treatments	碳库指数 CPI	碳库活度 L	碳库活度指数 LI	碳库管理指数 CPMI
CK ₀	1	0.32	1	100
CK	1.00±0.25a	0.23±0.05a	0.73±0.17a	73.97±29.32b
M	1.28±0.30a	0.39±0.15a	1.20±0.46a	144.57±32.72ab
G	1.19±0.08a	0.40±0.07a	1.25±0.23a	150.66±36.48ab
M+G	1.44±0.20a	0.40±0.14a	1.25±0.44a	174.44±40.08a

注:同列数值后不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Values followed by different small letters in the same column indicate significant differences among the treatments at 0.05 level.

SAR呈极显著负相关关系,CMPI与土壤TS、SAR和pH呈显著或极显著负相关关系,说明SOC及其各组分含量的增加和CMPI的提升有利于土壤盐碱程度的降低。

2.4 土壤MBC与环境因子的回归分析

基于上述土壤MBC与环境因子的相关性分析,运用多元线性回归法,将不同处理土壤MBC(Y)与TS(X₁)、SAR(X₂)和LOC(X₃)进行回归分析,得出回归方程,见表7。多元线性回归方程显示,与土壤MBC相关系数最高的LOC所构建的一元线性方程能解释72.8%的相关数据,土壤LOC与TS建立的二元线性方程较单因子方程能更好地解释土壤MBC的变化(R²=0.765)。在构建方程中加入SAR后,其回归方程解释能力降低,说明TS和LOC是试验土壤MBC的主要影响因子。

3 讨论

3.1 土壤改良剂对土壤化学性质的影响

盐碱土壤的改良通常是通过增加土壤交换体系

表6 土壤有机碳各组分、碳库管理指数及土壤化学性质之间的相关系数

Table 6 Correlation coefficients(r) between different organic carbon fractions, CPMI and soil chemical properties

	TS	SAR	pH	CPMI	SOC	LOC	MBC
TS	1	0.827**	0.600*	-0.779**	-0.434	-0.777**	-0.822**
SAR		1	0.588*	-0.707*	-0.687*	-0.730**	-0.711**
pH			1	-0.634*	-0.778**	-0.554	-0.525
CPMI				1	0.525	0.889**	0.898**
SOC					1	0.518	0.496
LOC						1	0.868**
MBC							1

注:*显著(P<0.05);**极显著(P<0.01)。

Note:* Significant P<0.05;** Highly significant P<0.01.

表7 土壤微生物量碳(Y)与全盐量(X_1)、钠吸附比(X_2)、活性有机碳(X_3)的多元回归方程

Table 7 Regression equations between soil microbial biomass carbon(Y) and total salt content(X_1), sodium adsorption ratio (X_2), labile organic carbon(X_3)

方程 Equation	<i>n</i>	<i>F</i> value	<i>R</i> ²	<i>P</i>
$Y=43.03X_3-3.01$	12	30.508	0.728	<0.01
$Y=28.67X_3-2.66X_1+63.72$	12	18.936	0.765	<0.01
$Y=29.39X_3-2.97X_1+0.54X_2+45.55$	12	11.315	0.738	<0.01

中的 Ca^{2+} 浓度来置换黏土表面交换位点上的 Na^+ ,从而促进土壤的团聚作用,置换出的 Na^+ 随降水和灌溉排出耕层^[15]。目前,石膏、磷石膏、腐植酸和堆肥等有机物料作为有效的 Ca^{2+} 和有机质来源均被用于改良盐碱土壤^[16]。本试验也发现,施用含钙和有机物改良剂的各处理均提高了土壤中 Ca^{2+} 浓度,降低了土壤中 Na^+ 浓度。这是由于改良剂提供的 Ca^{2+} 进入土壤溶液并与交换性 Na^+ 发生置换反应,因此土壤中 Ca^{2+} 浓度上升而 Na^+ 浓度下降^[17]。两种改良剂配施提供了更多的 Ca^{2+} ,所以M+G处理土壤 Na^+ 浓度最低,比CK显著降低了46.19%。 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度的降低是因为被置换出的 Na^+ 与 Cl^- 和 SO_4^{2-} 生成可溶性氯化盐和硫酸盐,随土壤水分滤出耕层土壤^[18]。两种土壤改良剂性质的差异会导致不同处理间土壤水溶性离子浓度的差异,有机土壤改良剂中含有较高浓度的 Cl^- ,导致M处理土壤 Cl^- 浓度高于G处理。

改良盐碱土壤的主要目的之一是降低土壤含盐量,尤其是有害离子即 Na^+ 含量。本研究发现施用改良剂土壤TS和SAR均降低,说明改良后土壤的盐度和碱度均下降。土壤TS下降是由于土壤结构改善后(试验土壤>0.25 mm团聚体质量百分比增加1.47%~1.75%),土壤中 Na^+ 和可溶性盐随降水和灌溉排出^[19]。TS处理间的差异主要是由于改良剂的性质不同,有机土壤改良剂的电导率高于复合土壤改良剂,所以M处理TS高于G和M+G处理,但处理间差异未达到显著水平。土壤的SAR值过高会导致土壤团聚结构破坏,土壤黏粒分散,导水率降低^[20]。已有研究表明,在盐碱土壤上施用脱硫石膏和有机添加物,由于有机物分解产生的大量有机酸促进了 Ca^{2+} 的释放,进一步取代土壤交换位点上的 Na^+ ,因此有效降低了土壤SAR^[20-21]。本研究也表明,土壤改良剂施入降低了土壤SAR,且两种土壤改良剂配施处理土壤SAR降低达显著水平。

已有研究表明,盐碱土壤较高的pH主要由 CO_3^{2-} +

HCO_3^- 和交换性 Na^+ 导致。施入改良剂为土壤提供了大量 Ca^{2+} ,土壤中 Ca^{2+} 一方面可以置换交换性 Na^+ ,另一方面可以与 CO_3^{2-} + HCO_3^- 形成 CaCO_3 沉淀,从而使土壤pH降低^[19,22]。Kim等^[23]研究表明,相较单施石膏和稻秆堆肥处理,石膏与稻秆堆肥配施对盐碱地pH的降低作用更为显著。而在本研究中,施用两种土壤改良剂均降低了土壤pH,但只有施用复合土壤改良剂处理达到显著水平,这是由两种改良剂性质的差异导致的^[24],复合土壤改良剂pH(5.5)较有机土壤改良剂pH(7.75)更低。

3.2 土壤改良剂对土壤有机碳库的影响

盐碱土不能维持大量的植被覆盖,造成土壤有机质投入减少,土壤有机质含量较低^[25]。供试土壤初始有机质含量仅为 $6.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且土壤物理结构较差(>0.25 mm团聚体质量百分比为3.89%),土壤较为贫瘠。本研究表明,施用两种改良剂均提升了试验土壤SOC、LOC和MBC含量,且两种改良剂配施效果最为显著,这与朱孟龙等^[26]在苏打盐碱地施用稻草对土壤碳库各组分的影响结果一致。原因可能有3个:一是施用改良剂直接将大量有机质(M处理 $0.74 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$, G处理 $1.03 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$, M+G处理 $1.77 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$)带入低碳土壤中,使土壤SOC和LOC增加;二是改良剂中 Ca^{2+} 对土壤的团聚作用使更多改良剂中的有机质和土壤原本的有机质得到团聚结构的物理保护,有利于有机质累积;三是施用改良剂对试验土壤改良后,地上和地下生物量增加,植物根茬和凋落物进一步促进了土壤有机碳含量的提升^[25]。同时,由于大量活性有机质的分解给微生物生长活动提供能源,促进了土壤中土著微生物的生长,加上土壤结构的改善和土壤盐碱程度的降低,进一步促进了土壤中微生物量的增加^[27]。

土壤CPMI可灵敏地反映农业生产措施对土壤肥力、土壤碳库动态变化的影响^[27-28]。本研究以CK₀为参考土壤研究CPMI(CK₀的CPMI为100),发现施用改良剂处理CPMI均大于100,而CK处理CPMI小于100,说明CK处理单施无机化肥对土壤培肥效果不佳,其原因是施用化学肥料后土壤LOC组分消耗过快,而LOC投入量小于其消耗量导致^[29]。而施用土壤改良剂可以增大土壤碳库活度,提高土壤CPMI,这与刘晓等^[30]和何翠翠等^[31]的研究结果一致。

3.3 土壤有机碳库与土壤化学性质的相关性分析

相关性分析表明,试验土壤LOC、MBC和CPMI均与TS和SAR呈极显著负相关,比SOC与土壤化学

性质的相关性强,可以在一定程度上反映土壤的盐碱程度。Huo等^[32]和元炳成等^[33]在盐碱土壤上研究发现土壤MBC随含盐量或电导率的升高而降低,这是因为盐渍环境中的渗透干燥可导致微生物细胞裂解,从而抑制微生物活性和生长^[25]。Deb等^[34]研究发现,随着土壤含盐量的升高,SOC中LOC所占百分比下降,且导致MBC降低。而土壤碱化主要破坏土壤物理结构,并增加SOC矿化损失。有研究表明,土壤有机质与 Ca^{2+} 通过阳离子键桥与黏土矿物形成有机无机复合体,而有机质与 Na^{+} 结合则会使黏土分散^[35]。施用改良剂后,土壤SAR降低, Ca^{2+} 浓度增加,土壤有机无机复合体的形成促进了土壤团聚作用。土壤团聚体可以在物理结构上保护有机质,从而增加盐碱土壤碳固存。因此,施用改良剂后土壤盐碱程度的降低促进了土壤有机碳库各组分的累积。另外,研究表明土壤MBC与LOC呈极显著正相关关系,说明土壤LOC为微生物生长繁殖提供了有效碳源^[27]。Wong等^[36]认为在盐碱土壤中的微生物经过长期的适应环境后,存在休眠的耐盐碱微生物种群。在添加有机物料后,由于可利用碳源的增加,微生物大量繁殖。

4 结论

(1)施用土壤改良剂降低了土壤TS、SAR和pH,改善了土壤化学性质,两种土壤改良剂配施效果最明显。

(2)施用土壤改良剂增加了SOC及其组分含量,并提高了土壤CPMI,两种土壤改良剂配施效果最为显著。

参考文献:

- [1] Son J K, Shin W T, Lee S H, et al. Reclamation of a coastal reclaimed tidal land soil by gypsum and rice straw[J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2016, 63(6):761-770.
- [2] Ferreira A C C, Leite L F C, Araújo A S F, et al. Land-use type effects on soil organic carbon and microbial properties in a semi-arid region of northeast Brazil[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(2):171-178.
- [3] Lambers H. Introduction, dryland salinity: A key environmental issue in southern Australia[J]. *Plant & Soil*, 2003, 257(2):5-7.
- [4] 雷廷武, Issac S, 袁普金, 等. 内蒙古河套灌区有效灌溉及盐碱控制的战略思考(英文)[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(1):48-52.
LEI Ting-wu, Issac S, YUAN Pu-jin, et al. Strategic considerations of efficient irrigation and salinity control on Hetao Plain in Inner Mongolia [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(1):48-52.
- [5] Zhao Y, Pang H, Wang J, et al. Depth of stover layer for salt management influences sunflower production in saline soils[J]. *Crop Science*, 2016, 56(4):1-14.
- [6] Zhao Y, Li Y, Wang J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 155:363-370.
- [7] Wang S J, Chen Q, Li Y, et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2017, 121:82-92.
- [8] Yazdanpanah N, Mahmoodabadi M, Cerdà A. The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands[J]. *Geoderma*, 2016, 266:58-65.
- [9] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠, 等. 不同改良措施对银川平原盐碱地土壤性质及酶活性的影响[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(6):13-18.
LI Feng-xia, WANG Xue-qin, GUO Yong-zhong, et al. Effect of soil properties and soil enzyme activity in different improvement measures of saline-alkali soil in Yinchuan Plain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(6):13-18.
- [10] 孙鹤峰, 王旭, 刘红芳, 等. 我国土壤调理剂中重金属元素及其相关原料农业资源化利用现状[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(6):149-154.
SUN Ji-feng, WANG Xu, LIU Hong-fang, et al. Study on current situation of harmful elements in soil conditioners of China and the agricultural resource utilization of relevant raw materials[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(6):149-154.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999.
LU Ru-kun. Analytical methods for soil and agricultural chemistry [M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [12] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京:气象出版社, 2006.
WU Jin-shui. Soil microbial biomass: Methods and application[M]. Beijing:China Meteorological Press, 2006.
- [13] 王莉峰, 熊黑钢, 靳彦华, 等. 干旱区施不同浓度硝酸钾对后备耕地土壤水盐的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4):191-195.
WANG Li-feng, XIONG Hei-gang, JIN Yan-hua, et al. Effect of different concentrations of potassium nitrate on water and salt of reserved land in arid area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4):191-195.
- [14] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5):723-729.
XU Ming-gang, YU Rong, WANG Bo-ren. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):723-729.
- [15] Yazdanpanah N, Mahmoodabadi M. Reclamation of calcareous saline-sodic soil using different amendments: Time changes of soluble cations in leachate[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(7):2519-2528.
- [16] 王斌, 马兴旺, 单娜娜, 等. 新疆盐碱地土壤改良剂的选择与应用[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(7):111-115.
WANG Bin, MA Xing-wang, SHAN Na-na, et al. The selection and application of saline alkali soil amendment in Xinjiang[J]. *Journal of*

- Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(7):111-115.
- [17] Mao Y, Li X, Dick W A, et al. Remediation of saline-sodic soil with flue gas desulfurization gypsum in a reclaimed tidal flat of southeast China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 45(7):224-232.
- [18] Wang J, Bai Z, Yang P. Effect of byproducts of flue gas desulfurization on the soluble salts composition and chemical properties of sodic soils[J]. *PLoS One*, 2013, 8(8):e71011.
- [19] Luo J Q, Wang L L, Li Q S, et al. Improvement of hard saline-sodic soils using polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS)[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 149:12-20.
- [20] Makoi J H J R, Verplancke H. Effect of gypsum placement on the physical chemical properties of a saline sandy loam soil[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2010, 4(7):556-563.
- [21] Chaganti V N, Crohn D M. Evaluating the relative contribution of physiochemical and biological factors in ameliorating a saline-sodic soil amended with composts and biochar and leached with reclaimed water[J]. *Geoderma*, 2015, 259/260:45-55.
- [22] Sakai Y, Matsumoto S, Sadakata M. Alkali soil reclamation with flue gas desulfurization gypsum in China and assessment of metal content in corn grains[J]. *Journal of Soil Contamination*, 2004, 13(1):65-80.
- [23] Kim Y J, Choo B K, Cho J Y. Effect of gypsum and rice straw compost application on improvements of soil quality during desalination of reclaimed coastal tideland soils: Ten years of long-term experiments[J]. *CATENA*, 2017, 156:131-138.
- [24] Oo A N, Iwai C B, Saenjan P. Soil properties and maize growth in saline and non-saline soils using cassava-industrial waste compost and vermicompost with or without earthworms[J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(3):300-310.
- [25] Wong V N L, Greene R S B, Dalal R C, et al. Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: A review[J]. *Soil Use and Management*, 2009, 26(1):2-11.
- [26] 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.
- ZHU Meng-long, ZHAO Lan-po, ZHAO Xing-min, et al. Effects of rice straw and aluminum sulfate on labile organic carbon and organo-mineral complexes in soda saline-alkaline soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4):284-288.
- [27] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 等. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2):359-365.
- ZHANG Gui-long, ZHAO Jian-ning, SONG Xiao-long, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon and carbon pool management index[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2):359-365.
- [28] 李 硕, 李有兵, 王淑娟, 等. 关中平原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4):1215-1222.
- LI Shuo, LI You-bing, WANG Shu-juan, et al. Effects of different straw-returning regimes on soil organic carbon and carbon pool management index in Guanzhong Plain, northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4):1215-1222.
- [29] 刘 骅, 佟小刚, 马兴旺, 等. 长期施肥下灰漠土矿物颗粒结合有机碳的含量及其演变特征[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1):84-90.
- LIU Hua, TONG Xiao-gang, MA Xing-wang, et al. Content and evolution characteristics of organic carbon associated with particle-size fractions of grey desert soil under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1):84-90.
- [30] 刘 晓, 黄 林, 郭康莉, 等. 施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变[J]. *环境科学*, 2017, 38(3):1218-1226.
- LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, et al. Influence of the application of non-hazardous sewage sludge on the evolution of soil carbon pool and carbon pool management index[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(3):1218-1226.
- [31] 何翠翠, 王立刚, 王迎春, 等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1):194-202.
- HE Cui-cui, WANG Li-gang, WANG Ying-chun, et al. Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1):194-202.
- [32] Huo L, Pang H, Zhao Y, et al. Buried straw layer plus plastic mulching improves soil organic carbon fractions in an arid saline soil from northwest China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 165:286-293.
- [33] 元炳成, 刘 权, 黄 伟, 等. 镁碱化盐土微生物生物量和土壤基础呼吸[J]. *土壤*, 2011, 43(1):67-71.
- YUAN Bing-cheng, LIU Quan, HUANG Wei, et al. Microbial biomass and basal soil respiration in alkalized magnesian soils[J]. *Soils*, 2011, 43(1):67-71.
- [34] Deb S, Mandal B, Bhadoria P B S, et al. Microbial biomass and activity in relation to accessibility of organic carbon in saline soils of coastal agro-ecosystem[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences India*, 2016, 88(2):1-11.
- [35] Rengasamy P, Olsson K A. Sodicty and soil structure[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1991, 29(6):935-952.
- [36] Wong V N L, Dalal R C, Greene R S B. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: A laboratory incubation[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(1):29-40.