

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.021

李传福, 徐家林, 明玉飞, 等. 菇渣有机肥配施脱硫石膏对黄河三角洲盐碱土活性有机碳及其敏感性的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 387-397.

LI Chuanfu, XU Jialin, MING Yufei, et al. Effects of mushroom residue organic fertilizer combined with desulfurized gypsum on active organic carbon and its sensitivity in saline-alkali soil of the Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 387-397.

菇渣有机肥配施脱硫石膏对黄河三角洲盐碱土 活性有机碳及其敏感性的影响

李传福¹, 徐家林², 明玉飞¹, 高舒¹, 吕欣¹, 杨宇轩¹, 李永强¹, 焦树英¹

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 土肥高效利用国家工程研究中心, 山东 泰安 271018;

2. 德州市园林绿化服务中心, 山东 德州 253000)

摘要: [目的] 为探讨菇渣有机肥与脱硫石膏对盐碱土有机碳组分及碳库管理指数的影响。[方法] 以黄河三角洲新垦殖小麦—玉米轮作地为研究对象, 采用随机区组试验方法, 设置不施肥(CK)、农民常用施肥(CN)、菇渣有机肥(MCOF)、菇渣有机肥+脱硫石膏(MCOG)4个处理, 通过3年田间施肥处理。[结果] 菇渣有机肥与脱硫石膏配施显著降低0—20 cm土壤盐碱度, 提高土壤氮磷钾养分含量和阳离子交换量($p < 0.05$); 各处理0—20 cm土层总有机碳(TOC)、易氧化有机碳(EOC)、微生物量碳(MBC)含量高于20—40 cm土层, 而水溶性有机碳(WSOC)含量则相反; 与CN处理相比, MCOG处理0—20 cm土层TOC、EOC、WSOC、MBC分别显著提高15.48%, 23.50%, 18.98%, 51.40%, EOC和MBC有效率分别提高13.94%, 30.49%, 且MCOG处理较CN和CK处理的土壤碳库管理指数(CPMI)显著提高15.38%和20.00%; MBC的敏感性指数均高于其他有机碳组分, MCOG处理MBC值最高。相关性分析表明, 土壤TOC含量取决于其活性组分, 而影响盐碱土有机碳活性组分含量及其有效率、碳库管理指数的主要因素为pH、CEC和EC。[结论] 菇渣有机肥与脱硫石膏配施能显著降低土壤盐碱含量, 提高土壤肥力并增强固碳效率, 研究结果为拓展盐碱地土壤有机改良方法提供理论依据和数据支撑。

关键词: 盐碱地; 菇渣有机肥; 脱硫石膏; 活性有机碳; 碳库管理指数

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0387-11

Effects of Mushroom Residue Organic Fertilizer Combined with Desulfurized Gypsum on Active Organic Carbon and Its Sensitivity in Saline-Alkali Soil of the Yellow River Delta

LI Chuanfu¹, XU Jialin², MING Yufei¹, GAO Shu¹, LÜ Xin¹,

YANG Yuxuan¹, LI Yongqiang¹, JIAO Shuying¹

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an, Shandong 271018, China;

2. Dezhou Landscaping Service Center, Dezhou, Shandong 253000, China)

Abstract: [Objective] In order to investigate the effects of mushroom residue organic fertilizer and desulfurized gypsum on organic carbon components and carbon pool management index (CPMI) of saline-alkali soil. [Methods] The newly reclaimed wheat-maize rotation land in the Yellow River Delta was used as the research subject, and the randomized block experiment method was conducted to set up four treatments: no fertilization (CK), conventional farming fertilization (CN), mushroom residue organic fertilizer (MCOF), mushroom residue organic fertilizer and desulfurized gypsum (MCOG), which were treated by field fertilization for 3 years. [Results] The combined application of mushroom residue organic fertilizer and

收稿日期: 2023-09-01

修回日期: 2023-10-07

录用日期: 2023-11-20

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-02-01

资助项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020MC173); 国家重点研发计划项目(2017YFD0800602, 2018YFD0800403)

第一作者: 李传福(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事盐碱地改良与土壤养分管理研究。E-mail: lichuanfu1995@126.com

通信作者: 李永强(1976—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事盐碱地改良与农业废弃物资源化利用研究。E-mail: lyqlinda@163.com

焦树英(1978—), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事草地生态与退化土壤生态修复研究。E-mail: jshysd@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

desulfurized gypsum significantly reduced the salinity of 0—20 cm soil layer, and increased the soil nitrogen, phosphorus and potassium nutrition content and cation exchange capacity ($p < 0.05$). The contents of total organic carbon (TOC), easily oxidized organic carbon (EOC) and microbial biomass carbon (MBC) in 0—20 cm soil layer were higher than those in 20—40 cm soil layer, while the water-soluble organic carbon (WSOC) was lower than that in 20—40 cm soil layer. In the 0—20 cm soil layer, compared with the CN treatment, the MCOG treatment significantly increased soil TOC, EOC, WSOC, and MBC by 15.48%, 23.50%, 18.98%, and 51.40%, respectively. The effective rates of EOC and MBC increased by 13.94% and 30.49%, respectively. There was no significant effect on the effective rate of WSOC. The combined application of organic fertilizer and desulfurized gypsum significantly increased the soil CPMI, which increased by 15.38% and 20.00% compared with the CN and the CK treatments, respectively. The sensitivity index of MBC was higher than that of other organic carbon components, and the MBC value of MCOG treatment was the highest. Correlation analysis showed that soil TOC content depended on its active components, while the main factors affecting the content and effective efficiency of organic carbon active components, as well as the CPMI, are pH, CEC, and EC. [Conclusion] Therefore, the combined application of mushroom residue organic fertilizer and desulfurized gypsum can significantly decrease soil alkalinity, improve soil fertility and enhance carbon sequestration efficiency of saline-alkali soil. This research provides a theoretical basis and data support for expanding organic improvement methods in saline-alkali soil of the Yellow River Delta.

Keywords: saline-alkali land; mushroom residue organic fertilizer; desulfurization gypsum; activated organic carbon; carbon pool management index

Received: 2023-09-01

Revised: 2023-10-07

Accepted: 2023-11-20

Online(www.cnki.net): 2024-02-01

土壤盐碱化问题受到世界各国人们广泛关注。根据联合国粮农组织 2021 年发布的世界盐碱土壤分布图,全球盐碱土壤面积超 $8.33 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 约占地球陆地面积的 8.70%。我国目前各类可利用盐碱地面积约 $3.67 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 未利用盐碱地面积为 $7.67 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[1]。黄河三角洲滨海盐碱地作为我国重要的土地后备资源,拥有盐碱地面积 2 263.33 km^2 ,是具有耕作价值的土地资源,但由于盐分高、熟化程度低,严重制约黄河流域的生态保护和农业高质量发展。因此,提升新垦殖农田盐碱土质量、提高土壤有机碳库容量及其稳定性迫在眉睫。

土壤有机碳(SOC)作为土壤质量的重要指标,对改善土壤结构和提高土壤肥力起着重要作用,根据有机碳周转性和稳定性的不同,可分为活性、慢性和惰性有机碳^[2],其中活性有机碳转化周期短、易被微生物分解利用,常作为早期土壤碳循环和养分周转的敏感指标^[3]。施肥作为改善土壤质量的关键生产措施,影响营养物质的转移及土壤固碳效果,土壤活性有机碳对施肥措施的变化响应敏感,可作为预警或反映土壤碳库变化的指示指标^[4]。研究 SOC 及其活性组分在施肥环境下的动态机制对土壤碳库正向培育具有重要意义。

脱硫石膏主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,是燃煤电厂的脱硫副产品,产量大、价格低廉。将脱硫石膏用于改良盐碱土,可以降低土壤 pH 和碱化度,改善盐碱土结构^[5-6],但过量施入也对土壤健康造成负面影

响,如土壤总盐量增加。脱硫石膏虽然可以改善盐碱土盐碱性质,改良土壤结构,但盐碱土有机质含量低,土壤肥力低下仍是影响土壤质量和作物生长的重要因素,而相关研究^[7]表明,有机肥施入可有效提高土壤有机质含量,提高微生物和酶活性,改善土壤理化性质,促进植物的生长。MOHARANA 等^[8]研究发现,施用有机肥显著提高土壤中活性有机碳含量;郭亚军等^[9]研究发现,有机无机肥配施处理下 SOC 及其活性组分含量明显增加;陈鸽等^[10]研究发现,施肥处理下 SOC、EOC、WSOC 和 MBC 含量显著高于对照土壤。因此,将脱硫石膏与有机肥联合施用或可为盐碱地改良提供一条有效途径,在黄河三角洲地区关于有机肥与脱硫石膏联合施用改良盐碱土的研究仍比较缺乏。所以研究有机肥配施脱硫石膏对土壤有机碳活性组分及其碳库变化特征的影响,可为盐碱地土壤改良、提高土壤固碳能力等措施的制定提供参考,对农业的可持续发展具有重要意义。

关注有机物料培肥及脱硫石膏降盐的交互作用,是改善盐碱土结构、持续提升土壤产能和资源高效利用的关键。本研究基于 2018 年建立的黄河三角洲盐碱地农艺综合改良示范基地,经过连续 3 年的田间有机肥和脱硫石膏配施处理,分析小麦—玉米轮作模式下土壤有机碳及其活性组分含量、碳库有效率、碳库敏感性及其碳库管理指数的变化特征,为改善盐碱地垦殖区土壤质量和农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于山东省东营市垦利区苍洲村(37°15′40″N, 118°36′02″E), 地处温带大陆性季风气候区, 年平均气温 12.1 ℃, 年平均降水量 690 mm, 年平均蒸发量 1 900~2 400 mm, 土壤盐度为 4.17‰, 土壤砂粒、黏粒、粉粒占比分别为 72.56%, 25.77%, 1.67%, 根据美国农业部制分级标准, 属于壤砂土。试验开始前土壤基本理化性质为 pH 8.32, EC 1.07 mS/cm, 土壤容重 1.41 g/cm³, 有机碳含量 3.22 g/kg, 全氮含量 0.21 g/kg, 有效磷含量 7.64 mg/kg, 速效钾含量 26.41 mg/kg。

1.2 试验设计

试验地为 2018 年 6 月建立的黄河三角洲盐碱地农艺综合改良示范基地, 采用随机区组试验方法, 选用当地主要种植模式: 冬小麦(山农 28 号)—夏玉米(德利农 988)轮作。试验共设置 4 个处理: 不施肥(CK)、农民常用施肥(CN)、菇渣有机肥(MCOF)、菇渣有机肥+脱硫石膏(MCOG), 每个处理重复 3 次, 共 12 个小区, 每个小区面积 4 m×10 m(40 m²), 小区间隔 0.5 m, 灌溉主渠 1 m, 支渠 0.8 m。除 CK 处

理外, 各施肥处理均施加氮、磷、钾肥作为基肥, 其中氮肥基施 50%, 追施 50%, 有机肥、脱硫石膏和化肥均在当季作物播前整地时施入。基肥为每季作物播种前进行撒施于地表, 随农机翻地翻入 0—20 cm 土壤中。在玉米季大喇叭口期和小麦返青期进行沟施追肥。具体施肥方案见表 1。

供试肥料包括尿素($w_{(N)}=46\%$)、重过磷酸钙($w_{(P_2O_5)}=44\%$)、硫酸钾($w_{(K_2O)}=50\%$)、有机肥(倍力宝 1 号)和脱硫石膏(主要成分为 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$), 菇渣有机肥由东营市河口区力大王肥业提供(养分含量为有机质 554.29 g/kg, 全氮 11.97 g/kg, 全磷 25.18 g/kg, 全钾 88.21 g/kg), 除施肥外的其他农事操作均按照当地农民习惯进行管理。

1.3 土壤样品采集与测定方法

(1) 样品采集

有机肥与脱硫石膏连续处理 3 年, 于 2021 年 5 月 29 日进行土样采集, 在每个小区内按照 5 点取样法分层(0—20, 20—40 cm)进行采集, 混匀后剔除杂物过筛。每份样品分成 2 份: 一份风干进行土壤理化性质的测定; 另一份在 -20 ℃ 冷冻进行土壤可溶性有机碳、微生物量碳测定。

表 1 施肥方案

处理	Table 1 Fertilization scheme								kg/hm ²	
	施肥量									
	小麦季				玉米季				小麦季、玉米季	
	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (16:8:6)	尿素	重过磷酸钙	硫酸钾	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (15:5:6)	尿素	重过磷酸钙	硫酸钾	菇渣 有机肥	脱硫石膏 CaSO ₄ ·2H ₂ O
CK	0-0-0	0	0	0	0-0-0	0	0	0	0	0
CN	240-120-90	521.74	272.73	180.00	225-75-90	489.00	170.40	180.00	0	0
MCOF	240-120-90	521.74	272.73	180.00	225-75-90	489.00	170.40	180.00	4 500	0
MCOG	240-120-90	521.74	272.73	180.00	225-75-90	489.00	170.40	180.00	4 500	600

注: CK 为不施肥; CN 为农民常用施肥; MCOF 为菇渣有机肥; MCOG 为菇渣有机肥+脱硫石膏。

(2) 土壤指标测试方法

土壤 pH 采用去离子水浸提 pH 计法(PHSJ-3F)测定(水土质量比 2.5:1); 土壤电导率(EC)采用电导率仪(DDS-307A)测定(水土质量比 5:1); 土壤总有机碳(TOC)含量采用重铬酸钾容量法—外加热法测定; 土壤全氮(TN)含量采用凯氏定氮法测定; 有效磷(AP)含量采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定; 速效钾(AK)含量采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度法测定; 乙酸钠采用火焰光度法测定阳离子交换量(CEC), 醋酸铵—氨水火焰光度法测定交换性钠。测定指标根据《土壤农化分析》第 3 版相关方法测定^[11]。

有机碳组分: 易氧化有机碳(EOC)采用高锰酸钾氧化法测定^[12]; 水溶性有机碳(WSOC)按照水土质量比 5:1 浸提, 采用总有机碳分析仪 TOC(vario

TOC cube)测定^[13]; 微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸—硫酸钾浸提法测定^[14]。

碳库管理指数的计算^[15]: 以 CK 作为参考土壤, CPI 计算方法为:

碳库指数(CPI) = 样品土壤 TOC 含量(g/kg) / 参考土壤 TOC 含量(g/kg)

碳库活度(A) = 土壤中活性有机碳(ROC) / 非活性有机碳(NROC)

碳库活度指数(AI) = 样品碳库活度(A) / 参考土壤碳库活度(A0)

碳库管理指数(CPMI) = CPI × AI × 10

活性碳的敏感性指数计算公式^[16]:

$$I_s = (w_{(SOC)} - w_{(SOC-CK)}) / w_{(SOC-CK)} \times 100\%$$

式中: I_s 为某类活性有机碳的敏感性指数(%);

$w_{(SOC)}$ 为处理组某类活性有机碳含量 (g/kg);
 $w_{(SOC-CK)}$ 为对照组某类活性有机碳含量 (g/kg)。

碳库有效率计算方法公式^[17]:

易氧化有机碳有效率 = 易氧化有机碳含量
(EOC)/总有机碳含量(TOC)×100%

水溶性有机碳有效率 = 水溶性有机碳含量
(WSOC)/总有机碳含量(TOC)×100%

微生物量碳有效率 = 微生物量碳有效率
(MBC)/总有机碳含量(TOC)×100%

1.4 数据分析

采用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析,分别运用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 LSD 进行差异显著性检验,采用 Pearson 进行相关性分析,显著性水平为 $p<0.05$ 。CANOCO 软件 5.0(Biometrics, Netherlands) 进行冗余分析,Origin 2023、CANOCO 5.0 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 有机肥与脱硫石膏对盐碱土基础理化性质的影响

不同处理 0—20 cm 土层土壤 pH 低于 20—40

cm 土层,电导率高于 20—40 cm 土层(表 2)。有机肥处理(MCOF)与有机肥配施脱硫石膏处理(MCOG)均显著降低 0—20 cm 土层 pH 和 0—20, 20—40 cm 土层电导率($p<0.05$);MCOF、MCOG 处理显著增加土壤阳离子交换量,且 MCOG 在 0—20 cm 土层显著高于 MCOF;MCOF、MCOG 处理显著降低土壤交换性钠含量和土壤碱化度($p<0.05$), 0—20 cm 土层 CN、MCOF、MCOG 处理土壤碱化度较 CK 处理分别显著降低 40.44%,32.07%,41.04%。

不同处理养分含量均表现为 0—20 cm 土层高于 20—40 cm 土层(表 3)。有机肥与脱硫石膏处理对 0—20 cm 土层土壤全氮含量影响不显著($p>0.05$), 20—40 cm 土层不施肥处理土壤全氮含量显著低于其他 3 个施肥处理($p<0.05$);有效磷含量均为有机肥处理 MCOF 最高,而速效钾和有机质含量均为 MCOG 处理最高,0—20, 20—40 cm 土层速效钾和有机质含量均表现为 MCOG>MCOF>CN>CK, 且 20—40 cm 土层 MCOG 处理显著高于其余 2 个处理($p<0.05$)。

表 2 不同施肥处理的土壤盐度指标

Table 2 Soil nutrients under different fertilization treatments

土层深度/cm	处理	pH	电导率/ (mS · cm ⁻¹)	交换性钠/ (cmol · kg ⁻¹)	阳离子交换/ (cmol · kg ⁻¹)	碱化度/%
0—20	CK	8.22±0.02a	6.41±0.12a	1.82±0.32a	6.83±0.11c	26.66±4.47a
	CN	8.07±0.03b	5.17±0.46b	1.08±0.05b	6.78±0.21c	15.88±0.42b
	MCOF	7.80±0.06c	3.84±0.24c	1.29±0.15b	7.11±0.04b	18.11±2.23b
	MCOG	7.76±0.09c	3.99±0.47c	1.17±0.05b	7.43±0.14a	15.72±0.93b
20—40	CK	8.32±0.06a	4.59±0.23a	1.08±0.05a	6.21±0.08c	17.35±0.75a
	CN	8.31±0.11a	4.34±0.04a	0.75±0.15b	6.14±0.26bc	12.15±1.96b
	MCOF	8.33±0.07a	2.89±0.16b	0.90±0.14ab	6.53±0.14ab	13.73±1.80b
	MCOG	8.21±0.05a	3.32±0.72b	0.72±0.05b	6.81±0.16a	10.57±0.68c

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示相同土层各处理间差异显著($p<0.05$), $n=3$ 。下同。

表 3 不同施肥处理的土壤养分

Table 3 Soil nutrients in different fertilization treatments

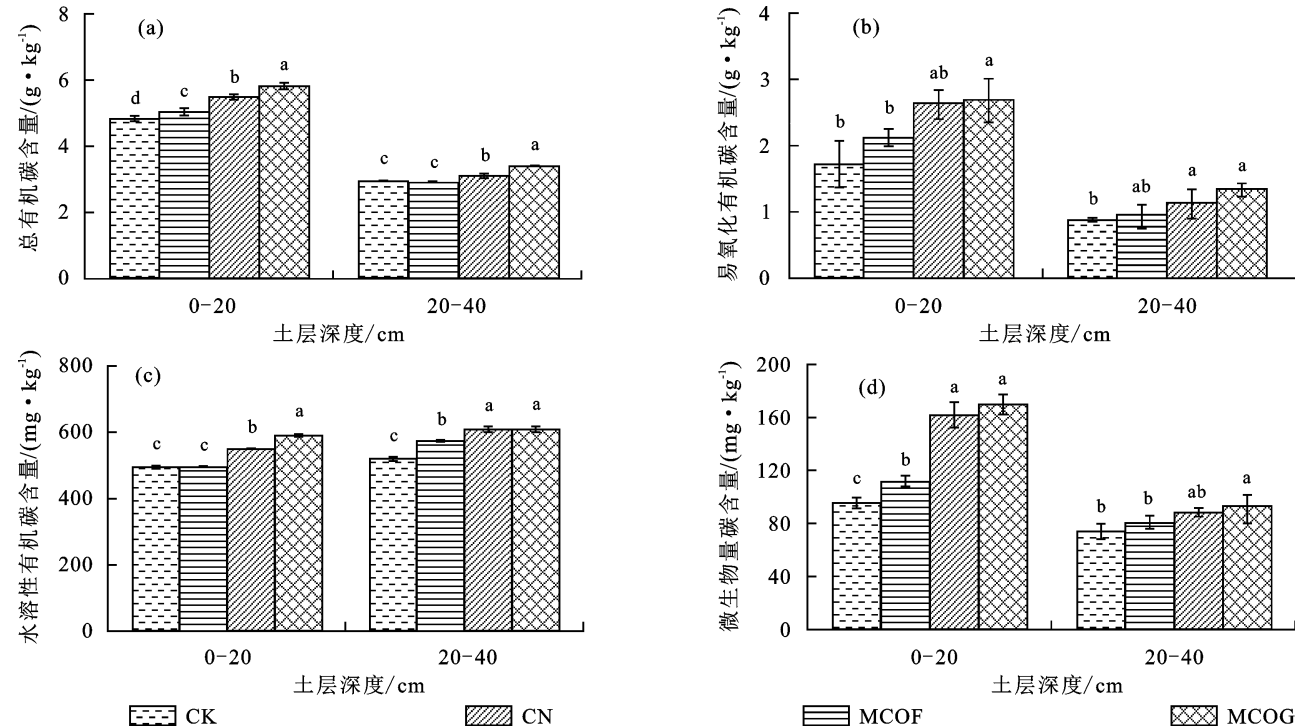
土层深度/cm	处理	全氮/ (g · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	有机质/ (g · kg ⁻¹)
0—20	CK	0.56±0.03a	10.30±2.93d	87.94±8.10c	8.34±0.55b
	CN	0.60±0.08a	14.91±0.99c	135.14±11.60b	8.68±0.74b
	MCOF	0.66±0.05a	27.23±0.65a	146.94±1.86ab	9.42±0.56ab
	MCOG	0.66±0.05a	19.96±2.58b	167.32±20.10a	10.04±0.66a
20—40	CK	0.27±0.06b	5.62±2.83b	47.18±10.34c	5.04±0.02b
	CN	0.41±0.05a	11.81±3.62ab	83.65±11.15b	5.11±0.10b
	MCOF	0.40±0.06a	14.26±5.80a	98.67±13.01ab	5.32±0.45b
	MCOG	0.43±0.08a	9.94±2.190ab	115.83±3.22a	5.81±0a

2.2 有机肥与脱硫石膏对盐碱土总有机碳和活性碳组分的影响

0—20 cm 土层土壤 TOC 含量高于 20—40 cm 土

层(图 1),与 CN、CK 相比,MCOF、MCOG 处理显著增加不同土层 TOC 含量,且 MCOG 显著高于 MCOF ($p<0.05$);0—20 cm 土层 TOC 含量 MCOG 处理较

CN、CK 显著增加15.48%，20.25%，20—40 cm 土层较 CN、CK 分别显著增加13.85%，15.41%。



注:图中不同小写字母表示相同土层处理间差异显著($p<0.05$), $n=3$ 。下同。

图 1 不同施肥处理土壤总有机碳及活性碳库各组分含量

Fig. 1 Contents of soil total organic carbon and active carbon pool under different fertilization treatments

MCOF、MCOG 均能显著增加活性碳组分 EOC、WSOC 和 MBC 的含量(图 1),但各土层 MCOF 和 MCOG 处理之间差异不显著,EOC 和 MBC 表现为 0—20 cm 土层含量高于 20—40 cm 土层,而 WSOC 含量随土层深度的增加而增加(图 2)。与 CN、CK 处理相比较,0—20 cm 土层 MCOG 处理 EOC、WSOC、MBC 含量分别提高 23.50% 和 55.81%,18.98% 和 19.50%,51.40% 和 77.82%,20—40 cm 土层 EOC、WSOC、MBC 含量分别提高 43.01% 和 51.14%,5.89% 和 17.28%,12.20% 和 22.76%。

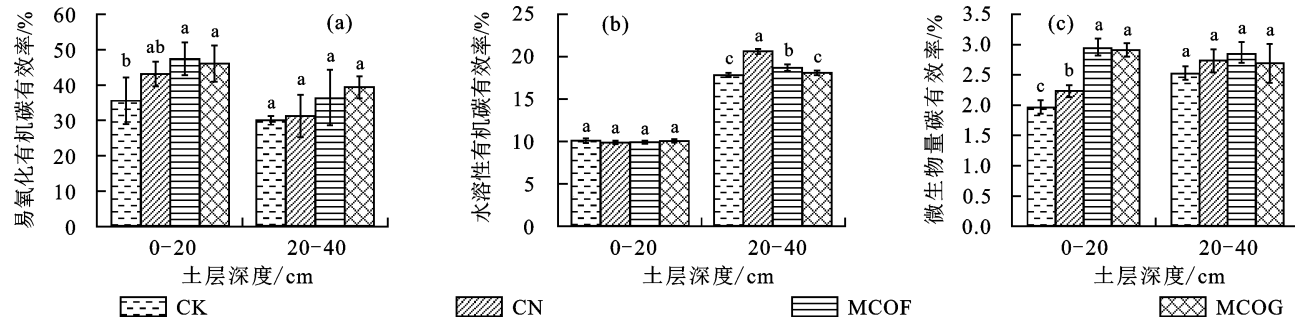


图 2 不同施肥处理土壤活性碳组分碳素有效率

Fig. 2 Carbon efficiency of soil active carbon fractions under different fertilization treatments

2.3 有机肥与脱硫石膏对盐碱土活性碳库各组分碳素有效率的影响

由于背景值较高和自然土壤分异性较大,土壤有机碳变化很难在短时间内表现出来,因此探求土壤有效碳库很必要。有机肥与脱硫石膏处理显著提高 0—20 cm 土层易氧化有机碳有效率和微生物量碳有效率,与 CK 处理相比,MCOF、MCOG 处理易氧化有机碳有效率分别显著增加 35.02%,29.56%,微生物量碳有效率分别显著增加 50.01%,47.75% ($p<$

0.05),20—40 cm 土层处理间差异不显著(图 2)。水溶性有机碳有效率 0—20 cm 土层处理差异不显著,但 20—40 cm 土层 CN 处理水溶性有机碳有效率显著高于有机肥和脱硫石膏处理及空白对照。

2.4 有机肥与脱硫石膏对土壤活性碳库敏感性指数的影响

敏感性指数是用来比较不同活性土壤有机碳组分相对于参比土壤的变化幅度,本研究以 CK 处理的土壤作为参考土壤。

土壤 TOC、WSOC、ROC、MBC 的敏感性指数范围分别为 1.50%~20.29%, 5.69%~55.68%, 0.43%~19.50%, 9.42%~77.83%(表 4)。0—20, 20—40 cm 土层不同处理中 TOC 和各活性有机碳组分均以 MCOG 处理最高,表明有机肥配施脱硫石膏

能提高土壤活性有机碳组分的灵敏性。0—20 cm 土层 MCOF、MCOG 处理 MBC 的敏感性指数均高于其他指标,表明土壤活性碳组分 MBC 对施肥措施反应更为灵敏,在该地区可将 MBC 作为土壤表层早期有机碳库变化的指示物。

表 4 不同施肥处理土壤总有机碳活性碳库各组分敏感性指数

Table 4 Sensitivity index of active carbon pool component of soil total organic carbon under different fertilization treatments					
土层深度/cm	处理	总有机碳活性碳库各组分敏感性指数/%			
		TOC	WSOC	ROC	MBC
0—20	CN	4.07±2.21c	25.87±7.59b	0.43±0.29c	17.45±4.30b
	MCOF	12.94±1.69b	52.06±12.50ab	11.45±0.08b	69.57±10.07a
	MCOG	20.29±1.99a	55.68±19.01a	19.50±0.80a	77.83±7.95a
20—40	CN	1.50±0.48c	5.69±4.75a	10.76±0.62b	9.42±7.86a
	MCOF	5.65±2.25b	28.19±24.90ab	16.99±1.76a	19.51±6.75a
	MCOG	15.36±0.02a	51.37±11.84b	17.28±1.69a	22.76±14.59a

2.5 有机肥与脱硫石膏对盐碱土碳库管理指数影响

土壤碳库管理指数是表征土壤碳库变化的量化指标。与 CN、CK 处理相比,有机碳与脱硫石膏显著提高 0—20, 20—40 cm 土层土壤碳库活度指数,而且

MCOG 处理显著高于 MCOF($p<0.05$);3 种施肥处理 MCOF、MCOG、CN 相比 CK,分别显著提高 0—20 cm 土层土壤碳库管理指数 27.46%, 33.70%, 11.15%, 20—40 cm 土层差异不显著(表 5)。

表 5 不同施肥处理土壤碳库管理指数

Table 5 Soil carbon pool management index under different fertilization treatments					
土层深度/cm	处理	碳库活度	碳库活度指数	碳库指数	碳库管理指数/%
0—20	CK	0.98±0.08a	1.00±0d	1.00±0a	100.00±0b
	CN	1.05±0.02a	1.04±0.01c	1.07±0.08a	111.15±9.22b
	MCOF	1.11±0.13a	1.13±0b	1.13±0.17a	127.46±19.37a
	MCOG	1.09±0.11a	1.20±0.03a	1.11±0.11a	133.70±10.23a
20—40	CK	0.89±0.19a	1.00±0c	1.00±0a	100.00±0a
	CN	0.90±0.10a	1.01±0c	1.05±0.25a	106.30±24.72a
	MCOF	0.88±0.11a	1.06±0.02b	1.01±0.18a	106.56±20.91a
	MCOG	1.06±0.39a	1.15±0a	1.16±0.21a	134.22±23.94a

2.6 有机碳及其组分碳素有效率、碳库管理指数影响因子分析

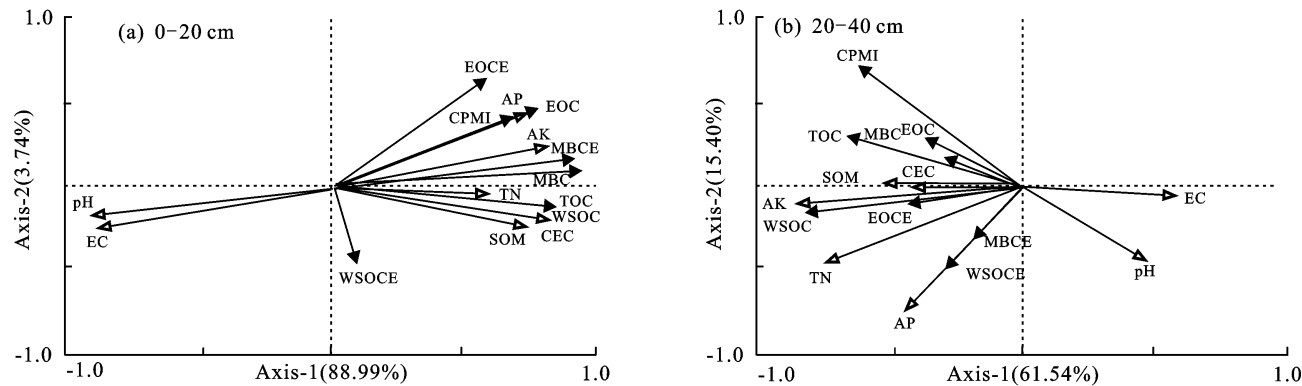
运用冗余分析方法,以数量生态学排序理论为依据,研究土壤环境因子与土壤碳库指标的内在联系。以不同施肥处理下土壤 pH、EC、SOM、TN、AP、AK、CEC 等环境因子为解释变量,土壤 TOC、EOC、WSOC、MBC、EOCE、WSOCE、MBCE、CPMI 为响应变量,进行冗余分析。冗余分析结果(RDA)表明,0—20 cm 土层第 1、第 2 主轴对土壤总有机碳及其组分、有机碳组分碳素有效率、CPMI 和土壤环境因子之间关系的累积解释量为 92.73%,第 1 轴和所有轴的 p 值分别为 0.016 和 0.002,均小于 0.05,说明 RDA 排序结果可靠(图 3)。pH、CEC、EC 对响应变量解释度分别为 81.8% ($p=0.002$), 4.4% ($p=0.007$), 4.3% ($p=0.032$),均达到显著水平,是影响 0—20 cm 土层土壤总有机碳及其组分、碳库管理指

数的主要环境因子。20—40 cm 土层 RDA 第 1 轴的累计解释变量为 61.54%,第 2 轴的累计解释变量为 15.40%。AK 对总有机碳及其组分、有机碳组分碳素有效率及 CPMI 的解释度为 49.8% ($p=0.002$)是影响 20—40 cm 土层响应变量的主要环境因子。

土壤总有机碳及其组分、碳素有效率、碳库管理指数与环境因子的相关性热图(图 4)分析表明,0—20 cm 土层, TOC、EOC、WSOC、MBC、EOCE、MBCE 之间均存在极显著或显著相关关系,总有机碳及其组分分别与 TN、AP、AK、CEC 具有极显著或显著相关关系,但与 pH、EC 均存在极显著负相关关系。AP、AK、SOM、CEC 与 MBCE 呈极显著或显著相关,相关性高于 EOCE 和 WSOCE,碳素有效率均与 pH、EC、ESP 呈极显著或显著相关。CPMI 与总有机碳及其组分、MBCE 均呈极显著正相关关系,可见其与土壤总有机碳及其组分关系密切。20—40

cm 土层, TOC、EOC、WSOC、MBC、EOCE、WSOCE 均与 AP 表现出显著或极显著正相关关系, 与 EC 表现出显著或极显著负相关关系; TOC、EOC、WSOC、

EOCE、WSOCE 分别与 SOM、CEC 也表现出较强的相关性; CPMI 与 TOC 之间呈显著正相关关系, 与 pH 呈极显著负相关关系。



注: pH 为酸碱度; EC 为电导率; CEC 为阳离子交换量; AK 为速效钾; AP 为有效磷; TN 为全氮; SOM 为土壤有机质; TOC 为总有机碳; EOC 为易氧化有机碳; WSOC 为水溶性有机碳; MBC 为微生物量碳; EOCE 为易氧化有机碳有效率; WSOCE 为水溶性有机碳有效率; MBCE 为微生物量碳有效率; CPMI 为碳库管理指数。

图 3 土壤理化性质与碳库指标的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of soil physicochemical properties and carbon pool index

3 讨论

3.1 有机肥与脱硫石膏对盐碱土理化性质的影响

通过 3 年的有机培肥定位试验研究发现, 施用有机肥和脱硫石膏后, 有效提高 0—20 cm 土层土壤养分和有机质含量, 因为有机肥中富含植物生长所必需的氮、磷、钾和丰富的有机质, 以及数量丰富的氨基酸、核酸、糖、维生素等有机营养成分^[18], 施入土壤后使土壤养分得到不同程度的改善, 将土壤内部的潜在养分活化, 有效增加土壤中可利用的有机质含量, 增强土壤微生物活性, 从而改善作物的生长环境, 增加作物的生物量。研究中有有机肥与脱硫石膏配施后提高 0—20 cm 土层的养分含量, 与肖扬等^[19]的研究结论一致, 但增加幅度不同, 是受研究区的气候条件、土壤类型、施肥种类等因素影响所致。有研究^[20]发现, 有机肥可减少土壤氮磷钾养分的淋失, 这也是土壤养分含量增加、肥力提升的主要原因。

有机肥与脱硫石膏的施入可以增加土壤养分的积累, 也可以改善盐碱土的盐碱性质, 有机肥可以显著降低盐碱土 pH 和电导率, 且对 0—20 cm 土层效果显著, 是由于脱硫石膏和有机改良剂的施入, 在土壤中生成酸性较强的硫酸并残留下来, 使土壤 pH 降低^[21]。本研究中与 CK 处理相比, 有机肥与脱硫石膏配施处理显著降低 0—40 cm 土层交换性 Na⁺ 含量和碱化度, 这与南江宽等^[22]的研究结果相似, 是因为脱硫石膏中的 Ca²⁺ 将盐碱土中交换性 Na⁺ 置换出来, 经过淋洗作用, 使钠离子含量降低, 从而降低土壤碱化

度, 改善土壤中盐基离子组成, 降低单盐毒害作用。

3.2 有机肥与脱硫石膏对盐碱土总有机碳及其组分、碳素有效率的影响

土壤有机碳库作为陆地生态系统碳库的重要组成部分, 是有机物质输入和矿化分解动态平衡的结果^[23]。研究中农民常用施肥处理土壤总有机碳及其组分含量高于不施肥处理, 因为施肥能够提高作物产量, 从而增加作物根系归还的比例, 改变土壤中残留组分积累程度, 有利于有机碳的积累。施用有机肥可以为微生物提供足够的底物, 加快土壤有机碳的矿化及有机物料的腐解, 释放出更多活性碳组分。脱硫石膏的加入使盐碱土中游离态钙离子增加, Ca²⁺ 直接参与盐碱土中有机无机复合体的形成^[24], 进而促进 Ca—SOC 复合物的形成, 而且脱硫石膏还可增强黏土与有机物的结合, 进而改善盐碱土的结构, 增强对 SOC 的物理保护, 促进土壤团聚体固碳。因此, 本研究中有有机肥和脱硫石膏施入显著提高盐碱土总有机碳及其组分含量。

土壤 EOC、WSOC 和 MBC 与 TOC 能更客观地反映土壤质量及肥力状况。土壤 EOC 是土壤有机碳中最先被氧化、周转最快的组分。WSOC 是土壤有机碳中最活跃、可溶解性且转移速度较快的部分, 是土壤微生物可直接利用的有机碳源, 土壤 MBC 可以反映土壤微生物量的多少, 对农田生态系统中碳循环极其重要^[25]。土壤中活性有机碳含量在很大程度上由土壤总有机碳含量决定, 不同施肥处理下有机质的输入量不同, 土壤微生物群落组成和多样性存在差

异,有机碳的矿化和固定过程不同,进而决定活性有机碳的含量^[26]。研究中 0—20 cm 土层 EOC、MBC 含量高于 20—40 cm 土层,与总有机碳的趋势基本相似,但 0—20 cm 土层 WSOC 含量低于 20—40 cm 土层,可能是由于分子量较小的水溶性有机碳受降雨、淋溶等因素向下移动,并在深层累积,使得深层土壤中 WSOC 含量高于表层。有机肥处理、有机肥与脱硫石膏处理土壤 EOC、WSOC、MBC 含量均高于不施肥、单施化肥处理,这表明有机肥与脱硫石膏的添加不同程度地增加土壤中总有机碳及其组分的含量,因为有机肥与脱硫石膏施入条件下土壤结构、通气状况、养分含量等优于不施肥和施化肥处理,有机肥将外源有机碳带入土壤,促进土壤有机碳各组分的提高,同时提高土壤微生物数量和活力,也可能是因为有机肥被分解,惰性碳被分解成活性碳,所以有机碳活性组分增加,相关研究也均得出类似的结论^[27]。有研究^[28]表明,增施外源有机物(秸秆和有机肥)可增加可溶性有机碳和易氧化有机碳等,且有机物是土壤活性有机碳增加的主要贡献者,与本研究结果一致。

土壤活性碳库组分与总有机碳的比例能够反映土壤有机碳的有效性,更能体现土壤碳库的变化^[29]。研究中各活性有机碳有效率表现为 $EOC > WSOC > MBC$,易氧化有机碳有效率最高,可能是因为有机肥的施入改变土壤中微生物数量和结构,有机肥施入后土壤细菌群落更占优势,增加微生物数量,加快有机物质的周转速度,最终释放出更多的 EOC。有研究^[30]发现,有机肥与无机肥配施显著提高土壤有机碳的有效性,且随着有机肥用量的增加呈增加趋势。研究中有有机肥处理、有机肥与脱硫石膏处理 0—20 cm 土层土壤 EOC、MBC 有效率均高于 CN、CK 处理,但 0—20 cm 土层各处理土壤 WSOC 有效率无显著差异,20—40 cm 土层 WSOC 有效率施化肥处理高于其他处理,说明表层 DOC 含量随 TOC 的增加而增加,其转化率高于 EOC、MBC,有利于增加土壤稳定性碳库的库容^[31]。

3.3 有机肥与脱硫石膏对土壤有机碳敏感性指数和碳库管理的影响

有研究^[32]发现,盐碱土总有机碳及其组分对不同施肥措施十分敏感,利用敏感性指数可以确定土壤有机碳中对农田管理措施反映最灵敏的碳组分。水溶性碳和微生物生物量碳对不同的养管理高度敏

感,0—20,20—40 cm 土层 MCOG 处理的微生物量碳含量和敏感性指数最高,而 0—20 cm 土层 MCOF、MCOG 处理微生物量碳敏感性指数均高于总有机碳及其组分敏感性指数。因此,土壤微生物量碳可作为反映该地区表层土壤碳库存变化的最佳指标。

土壤 CPMI 作为反映和评估土壤碳素动态变化的重要指标,可以灵敏地反映土壤肥力及碳库变化,被广泛认为是评价土壤质量的有效性指标^[33]。有研究^[31]表明,有机改良剂能显著提高土壤碳库管理指数,这与本研究结果一致,研究中有有机肥与脱硫石膏处理提高土壤碳库活度和碳库管理指数,这与有机肥提高土壤活性碳库有关。相关性分析(图 4)表明,土壤碳库指数和土壤总有机碳及其组分均具有极显著正相关关系,说明土壤碳库管理指数能较好地反映土壤活性碳库组分的变化。

3.4 土壤有机碳组分与理化因子的关系

有机物料的施入可以改变土壤有机碳的输入和输出过程,影响土壤有机碳的生物化学稳定性。而土壤养分状况、盐碱性质和植被生长情况等诸多因素也直接或间接影响有机质的分解和转化过程。研究中 0—20 cm 土壤总有机碳及其组分均与氮磷钾、CEC 表现出较强的正相关关系,因为有机肥与脱硫石膏施入后土壤氮磷钾含量增加,而氮素增加抑制土壤呼吸,减少土壤释放 CO_2 ^[34],AK、AP 含量在植物生长过程中起着至关重要的作用,易于被植物吸收,影响植物生长,从而影响植物的凋落物输入,所以有机碳及其组分和 TN、AP、AK 表现为极显著正相关;同时阳离子交换量高的土壤通过阳离子键桥的相互作用促进土壤形成团聚体,使土壤有机质被包裹在团聚体内部,从而增加土壤中总有机碳及其组分含量。本研究表明,pH、EC 与总有机碳及其组分、CPMI 有较强的负相关关系,土壤 pH 通过影响植物根系的成长发育及土壤微生物活性间接影响土壤中有机碳组分的积累,有机碳的周转受到土壤 pH 的影响,并且有机碳组分与土壤 pH 呈负相关关系。冗余分析结果也表明,土壤 pH、EC 是影响土壤总有机碳及其组分、碳库管理指数的主要环境因子(图 4)。有机物料添加可以扩大土壤活性有机碳库库容,从而促进碳的转化和固存,同时,ESP 和 EC 等盐碱指标是限制碱化土壤 SOC 固存和提升的主要因素^[35]。因此,提高盐碱土养分含量,降低土壤盐碱度,有利于土壤增碳保肥。

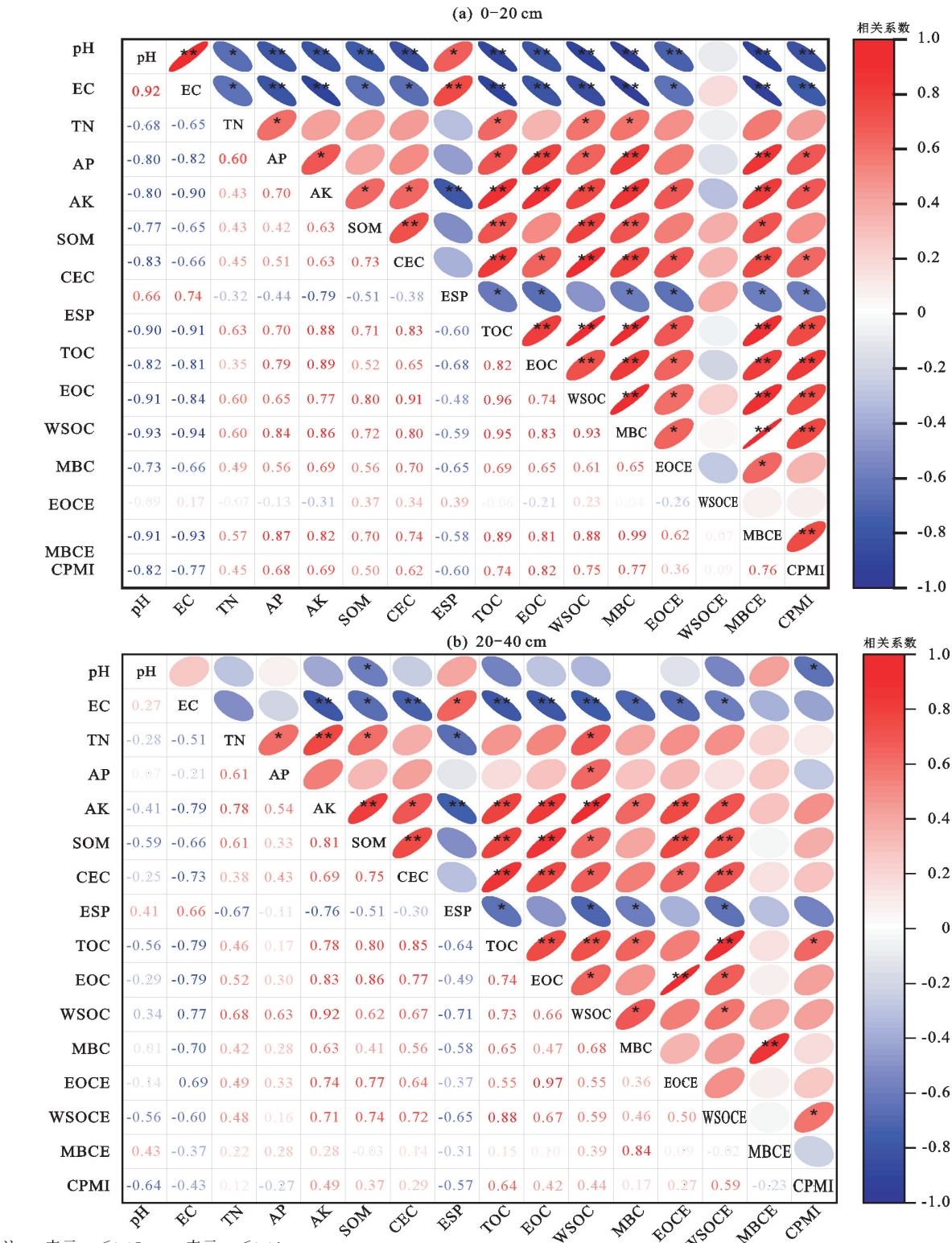


图 4 土壤理化性质、碳库指标之间的相关性

Fig. 4 Correlation between soil physicochemical properties and carbon pool indicators

4 结论

(1) 有机肥与脱硫石膏能改良盐碱土壤, 其中 MCOG 处理相对较好, 0—20 cm 土层, 与 CN、CK 处理相比, 显著降低土壤 pH 和电导率, 显著增加土壤有效磷、速效钾和有机质含量。

(2) 有机肥与脱硫石膏处理显著提高 0—20, 20—40 cm 土层总有机碳及其活性组分含量以及易

氧化有机碳、微生物量碳有效率, 从而提高土壤碳库管理指数。

(3) 0—20, 20—40 cm 土层土壤微生物量碳的敏感性指数均高于总有机碳及其组分敏感性指数, 可作为反映该地区土壤碳库存的最佳指标。

(4) 冗余分析结果表明, pH、CEC、EC (0—20 cm 土层) 和 AK (20—40 cm 土层) 影响土壤总有机碳及

其组分、碳库管理指数的主要环境因子。因此,增施有机肥和脱硫石膏是有效提高黄河三角洲盐碱地土壤质量,增强土壤碳“汇”功能的农田施肥措施。

参考文献:

- [1] 张凤荣.科学评价盐碱地开垦为耕地的潜力[N].中国自然资源报,2022-02-18(8版).
ZHANG F R. Scientific evaluation of the potential of reclamation of alkali soil into cultivated land[N].China Natural Resources News,2022-02-18 (8th Edition).
- [2] QU Y K, TANG J, ZHOU Z H, et al. The development and utilization of saline-alkali land in western Jilin Province promoted the sequestration of organic carbon fractions in soil aggregates[J]. Agronomy, 2021,11(12):e2563.
- [3] 周仕轩,夏彬,郝旺林,等.黄土高原坝地深层土壤有机碳稳定性研究[J].水土保持学报,2022,36(4):284-289,298.
ZHOU S X, XIA B, HAO W L, et al. Stability of deep soil organic carbon of dam land on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36 (4): 284-289,298.
- [4] 谢钧宇,孟会生,焦欢,等.施肥对复垦土壤中活性和难降解碳氮组分的影响[J].应用与环境生物学报,2019,25(5):1113-1121.
XIE J Y, MENG H S, JIAO H, et al. Effects of fertilization regimes on organic carbon and total nitrogen in labile and recalcitrant fractions of reclaimed soils[J].Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019,25(5):1113-1121.
- [5] LÓPEZ-VALDEZ F, FERNÁNDEZ-LUQUEÑO F, LUNA-GUIDO M L, et al. Microorganisms in sewage sludge added to an extreme alkaline saline soil affect carbon and nitrogen dynamics[J]. Applied Soil Ecology, 2010,45(3):225-231.
- [6] 韩剑宏,李艳伟,张连科,等.生物炭和脱硫石膏对盐碱土壤基本理化性质及玉米生长的影响[J].环境工程学报,2017,11(9):5291-5297.
HAN J H, LI Y W, ZHANG L K, et al. Effect of biochar and FGD-gypsum application on soil basic physical and chemical properties and maize growth of saline soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017,11(9):5291-5297.
- [7] 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 Z Y, ZHOU J X, ZHANG H, 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.
- [8] MOHARANA P C, SHARMA B M, BISWAS D R, et al. Long-term effect of nutrient management on soil fertility and soil organic carbon pools under a 6-year-old pearl millet-wheat cropping system in an Inceptisol of subtropical India [J]. Field Crops Research, 2012, 136: 32-41.
- [9] 郭亚军,邱慧珍,张玉娇,等.不同施肥方式对马铃薯农
田土壤有机碳组分和碳库管理指数的影响[J].土壤通报,2021,52(4):912-919.
GUO Y J, QIU H Z, ZHANG Y J, et al. Effects of four fertilization regimes on soil organic carbon fractions and carbon pool management index of potato farmland [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52 (4): 912-919.
- [10] 陈鸽,汤春纯,李祖胜,等.不同施肥措施对洞庭湖区旱地肥力及作物产量的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(5):689-697.
CHEN G, TANG C C, LI Z S, et al. Influence of different fertilization modes on soil fertility and crop yield in Dongting Lake upland areas[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2017,25(5):689-697.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
BAO S D. Soil agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing:China Agriculture Press,2007.
- [12] 张晓丽,孔凡磊,刘晓林,等.生物质改良剂对川西北地区高寒草地沙化土壤有机碳特征的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(11):1732-1743.
ZHANG X L, KONG F L, LIU X L, et al. Effects of different biomass amendments on soil organic carbon characteristics in alpine desertification grassland of Northwest Sichuan[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2019,27(11):1732-1743.
- [13] 白义鑫,盛茂银,肖海龙,等.典型石漠化治理措施对土壤有机碳、氮及组分的影响[J].水土保持学报,2020,34(1):170-177,185.
BAI Y X, SHENG M Y, XIAO H L, et al. Effects of typical rocky desertification control measures on soil organic carbon, nitrogen, and components[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(1):170-177,185.
- [14] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J].Soil Biology and Biochemistry,1987,19(6):703-707.
- [15] BLAIR G J, LEFROY R, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Australian Journal of Agricultural Research,1995,46(7):e1459.
- [16] TRIPATHI R, NAYAK A K, BHATTACHARYA P, et al. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions after 41 years long-term fertilizer experiment in tropical rice-rice system [J]. Geoderma,2014,213:280-286.
- [17] 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 X, HUANG L, GUO K L, 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.
- [18] 孙桂阳,张国言,董元杰.不同来源农业废弃物堆肥进程与产品肥效研究[J].水土保持学报,2021,35(4):

- 349-360.
- SUN G Y, ZHANG G Y, DONG Y J. Composting process of agricultural wastes from different sources and fertilizer efficiency of their products[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 349-360.
- [19] 肖扬, 黄立华, 杨易, 等. 长期不同培肥对苏打盐碱地稻田土壤盐碱指标和养分含量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(1): 126-134.
- XIAO Y, HUANG L H, YANG Y, et al. Effects of different long-term fertilization on soil salinity indices and nutrient contents in saline-sodic paddy fields[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 126-134.
- [20] BEI S K, ZHANG Y L, LI T T, et al. Response of the soil microbial community to different fertilizer inputs in a wheat-maize rotation on a calcareous soil[J]. *Agriculture*, 2018, 260: 58-69.
- [21] QASWAR M, HUANG J, AHMED W, et al. Yield sustainability, soil organic carbon sequestration and nutrients balance under long-term combined application of manure and inorganic fertilizers in acidic paddy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: e104569.
- [22] 南江宽, 陈效民, 王晓洋, 等. 石膏与肥料配施对滨海盐土降盐抑碱的效果研究[J]. *南京农业大学学报*, 2014, 37(4): 103-108.
- NAN J K, CHEN X M, WANG X Y, et al. Effects of gypsum and fertilizers amendment on reducing salinity and preventing alkalization of coastal saline soil[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2014, 37(4): 103-108.
- [23] BAI Z G, CASPARI T, GONZALEZ M R, et al. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China[J]. *Agriculture*, 2018, 265: 1-7.
- [24] ANTONANGELO J A, FERRARI NETO J, CRUSCIOL C A C, et al. Lime and calcium-magnesium silicate in the ionic speciation of an Oxisol[J]. *Scientia Agricola*, 2017, 74(4): 317-333.
- [25] WANG M H, WAN X H, YU Z P, et al. Effects of tree species transition on soil microbial biomass and community structure in subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(6): 417-423.
- [26] 单会茹, 张璐, 高强, 等. 红壤有机碳组分中微生物群落构成及均匀度决定其矿化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(1): 109-119.
- SHAN H R, ZHANG L, GAO Q, et al. Microbial community composition and species uniformity regulate the mineralization characteristics of organic carbon fractions in red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(1): 109-119.
- [27] 农传江, 汤利, 徐智, 等. 有机肥部分替代化肥对土壤有机碳库和烤烟经济性状的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(4): 70-75.
- NONG C J, TANG L, XU Z, et al. Effects of organic fertilizer partial substituted for chemical fertilizer on soil organic carbon pool and economic characters of flue-cured tobacco[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(4): 70-75.
- [28] 张志毅, 熊桂云, 吴茂前, 等. 有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响? [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(3): 405-412.
- ZHANG Z Y, XIONG G Y, WU M Q, et al. Effects of organic fertilization and tillage method on soil aggregates and organic carbon fractions in a wheat-rice system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3): 405-412.
- [29] 宋瑞朋, 杨起帆, 郑智恒, 等. 3种林下植被类型对杉木人工林土壤有机碳及其组分特征的影响[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(12): 2283-2291.
- SONG R P, YANG Q F, ZHENG Z H, et al. Effects of three understory vegetation types on soil organic carbon and its components in *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(12): 2283-2291.
- [30] 廖敏, 彭英, 陈义, 等. 长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 129-133, 138.
- LIAO M, PENG Y, CHEN Y, et al. Effect of long-term different fertilizer management on soil carbon stock characteristics in paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 129-133, 138.
- [31] 周吉祥, 张贺, 杨静, 等. 连续施用土壤改良剂对沙质潮土肥力及活性有机碳组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(16): 3307-3318.
- ZHOU J X, ZHANG H, YANG J, et al. Effects of continuous application of soil amendments on FluvoAque soil fertility and active organic carbon components[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(16): 3307-3318.
- [32] DUTTA D, MEENA A L, KUMAR A, et al. Influence of different nutrient management practices and cropping systems on organic carbon pools in typic ustochrept soil of indo-gangetic Plains in India[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(2): 1403-1421.
- [33] PANG D B, CUI M, LIU Y G, et al. Responses of soil labile organic carbon fractions and stocks to different vegetation restoration strategies in degraded Karst ecosystems of southwest China [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 138: 391-402.
- [34] NOTTINGHAM A T, TURNER B L, STOTT A W, et al. Nitrogen and phosphorus constrain labile and stable carbon turnover in lowland tropical forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 26-33.
- [35] 张月鲜, 红梅, 温馨, 等. 不同有机物料对苏打碱化土有机碳库和化学性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 311-318.
- ZHANG Y X, HONG M, WEN X, et al. Effect of different organic amendments on soil organic carbon pool and chemical properties in soda alkaline soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 311-318.