

秸秆和菌渣改良剂对高寒沙地土壤有机碳库的影响

孔凡磊¹, 刘晓林^{1,2}, 陈伟¹, 陈祥¹, 陈昌华², 袁继超¹, 李玉义³

(1.四川农业大学农学院, 成都 611130; 2.巴中市农业技术推广中心,
四川 巴中 636000; 3.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 采用田间定位试验研究了秸秆颗粒(JG)和菌渣颗粒(JZ)改良剂(施用量分别为 6, 12, 18, 24 t/hm²)对川西北高寒沙地土壤碳库的影响。结果表明:施用 JG 和 JZ 改良剂可显著提高沙化土壤有机碳含量、有机碳储量、活性碳、土壤微生物量碳、微生物熵和碳库管理指数,其中对土壤微生物量碳和微生物熵的提升效果最为显著。与 CK 相比,施用第 2 年 JG 处理土壤有机碳含量、有机碳储量、活性有机碳、碳库管理指数平均增加 96.2%, 100.0%, 157.1%, 169.4%, JZ 处理平均增加 69.2%, 66.3%, 85.7%, 81.7%;而 JG 处理土壤微生物量碳、微生物熵分别较 CK 平均增加 934.0%, 433.0%, JZ 处理平均增加 956.2%, 546.4%。JG 改良剂对土壤有机碳库组分和碳库管理指数的提升效果优于 JZ, 而 JZ 改良剂更有利于提升土壤微生物量碳含量和土壤有机碳的周转速率。秸秆和菌渣改良剂均可增加沙化土壤有机碳库各组分含量,提高土壤有机碳周转速率和碳库管理指数,具有快速培肥沙化土壤的效果。

关键词: 改良剂; 高寒沙地; 有机碳库; 碳库管理指数

中图分类号: S156.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)04-0288-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.042

Effects of Granulated Straw and Fungus Residue Amendments on Soil Organic Carbon Pool in Alpine Sandy Land

KONG Fanlei¹, LIU Xiaolin^{1,2}, CHEN Wei¹, CHEN Xiang¹,

CHEN Changhua², YUAN Jichao¹, LI Yuyi³

(1.College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130;

2.Bazhong Agricultural Technology Extension Center, Bazhong, Sichuan 636000;

3.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: In order to study the effects of granulated straw (JG) and fungus residue (JZ) amendments (6, 12, 18, 24 t/hm², respectively) on soil carbon pool of alpine sandy land in northwest Sichuan, a field location experiment was conducted. The results showed that the application of JG and JZ amendments could significantly improve the organic carbon, organic carbon storage, activated carbon, soil microbial biomass carbon, microbial entropy and carbon pool management index of desertification soil, and the enhancement effect on soil microbial biomass carbon and microbial entropy was the most significant. Compared with CK, the soil organic carbon, organic carbon storage, active organic carbon, and carbon storage management index of JG increased by 96.2%, 100.0%, 157.1%, 169.4% on average, while those of JZ treatment increased by 69.2%, 66.3%, 85.7% and 81.7% in the second year after application amendments. Compared with CK, the microbial biomass carbon and microbial entropy of JG increased by 934.0%, 433.0% respectively, while the microbial biomass carbon and microbial entropy of JZ increased by 956.2% and 546.4% on average. JG amendment had a better effect on the improvement of soil organic carbon storage components and carbon pool management index than JZ, while JZ amendment was beneficial to the improvement of soil microbial biomass carbon content and soil organic carbon turnover rate. Both granulated straw and fungus residues could increase the component content of soil organic carbon pool and improved the turnover rate of soil organic carbon and carbon pool management index, which also could fertilize the sandy soil rapidly.

收稿日期: 2019-12-04

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAC05B05)

第一作者: 孔凡磊(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事农作制度与作物生理生态研究。E-mail: kflstar@163.com

通信作者: 袁继超(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事作物生理生态与高产栽培技术研究。E-mail: yuanjichao5@163.com

Keywords: amendment; alpine sandy land; organic carbon pool; carbon pool management index

土壤有机碳是土壤微生物生命活动和植物生长所需养分的能量来源,可有效改善土壤物理、化学和生物学性状,是评价土壤质量的重要指标^[1]。土壤碳库管理指数综合考虑了土壤总有机碳和活性有机碳,可以更加灵敏地反映出各种土壤利用或管理措施引起的土壤质量下降或更新的程度^[2],比土壤有机碳更能客观反映土壤质量的变化情况^[3-4]。川西北高寒草原位于青藏高原东部边缘半湿润地区,是我国五大牧区之一,也是世界上最大的高原泥炭沼泽湿地,该区域土壤有机碳变化对全球碳循环和全球变暖有着重要影响^[5]。近年来,受长期风蚀气候、过度放牧以及人类活动强度加大等因素的影响,川西北高寒草地退化严重,土壤有机碳含量显著降低,形成了典型的高寒沙地^[6-7]。土壤沙化不仅降低了植被生产力和土壤有机碳的输入量,还使土壤有机质分解速率加快,碳元素以 CO₂ 的形式大量释放到大气中,进而影响陆地生态系统的碳平衡^[8]。因此,加强高寒沙地土壤治理,快速增加土壤有机碳,实现土壤培肥和植被恢复迫在眉睫。土壤碳库管理指数可以作为沙化土壤治理过程中评价土壤改良效果的有效指标^[7]。其中改变耕作方式^[9]、优化施肥模式^[10]、施用外源有机碳或土壤改良剂^[1,11]、围封禁牧^[12]、植树造林^[2]等均可有效增加土壤有机碳、活性有机碳及碳库管理指数,达

到有效提升土壤质量的效果。秸秆和菌渣作为农业废弃资源,含有丰富的有机碳和氮磷钾养分,将其作为外源有机碳或土壤改良剂施入土壤,既可有效增加土壤有机碳含量,培肥地力,又可降低农业废弃物对环境的污染,促进农业的可持续发展^[1,13-14]。目前,对川西北高寒沙地土壤有机碳库的研究,主要是关注不同沙化程度^[5]、不同生态修复模式^[2]或不同生态修复年限下^[15]土壤有机碳和碳库管理指数的变化,秸秆和菌渣对川西北高寒沙地土壤有机碳库和碳库指数影响的研究尚未见报道。因此,本文以川西北高寒沙地为研究对象,通过田间试验,研究以秸秆、菌渣为原料的改良剂对土壤有机碳、活性有机碳及碳库管理指数的影响,以期对秸秆、菌渣等农业废弃物改良沙化土壤提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川阿坝藏族羌族自治州红原县瓦切镇境内(31°50′—33°22′N,101°51′—103°23′E),全镇平均海拔 3 500 m 以上,气候属大陆性高原寒温带季风气候,年平均气温 1.4 ℃,多年平均降水量 749.1 mm,80%集中在 5—9 月。研究区以草地为主,也有较大面积的沼泽地和沙化地分布,供试土壤为风沙土,0—30 cm 土壤基本理化特性见表 1。

表 1 供试土壤基本理化特性

土层 深度/cm	全氮含量/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮含量/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷含量/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾含量/ (mg·kg ⁻¹)	有机碳含量/ (g·kg ⁻¹)
0—10	0.13	4.24	7.30	35.47	1.23
10—20	0.11	3.39	5.27	48.43	1.21
20—30	0.10	2.58	4.17	39.34	0.99

1.2 供试材料

供试改良剂分别以秸秆和菌渣为主要原料,添加枯草芽孢杆菌(0.1%)和侧孢芽孢杆菌(0.1%)、聚丙烯酰胺(0.3%)、尿素(1.3%)、过磷酸钙(5.0%)和硫酸钾(2.4%),通过造粒机加工成颗粒化土壤改良剂(粒径 5 mm,长度 2~3 cm)。供试秸秆为玉米秸秆,取自四川农业大学农场;供试菌渣、生物菌、尿素(含氮量 46%)、硫酸钾(K₂O 含量 50%)、过磷酸钙(P₂O₅ 含量 12%)由成都盖尔盖司生物科技有限公司提供;聚丙烯酰胺(阴离子型,分子量>700 万)由山东宝莫生物化工股份有限公司提供。秸秆和菌渣风干后粉碎至长度/粒径<2 mm,再与辅料混合后,通过造粒机加工造粒,秸秆和菌渣改良剂的养分含量见表 2。

1.3 试验设计

采用两因素随机区组试验设计,改良剂为秸秆改

良剂(JG)和菌渣改良剂(JZ),施用量分别为 6,12,18,24 t/hm²,以不施改良剂为对照(CK),共 9 个处理(CK、JG6、JG12、JG18、JG24、JZ6、JZ12、JZ18、JZ24),重复 3 次,27 个小区。小区间用 PVC 板隔断,隔断深度 50 cm,小区面积 6 m²(长 3 m、宽 2 m),小区内条播种植黑麦草,行距 20 cm,用种量 75 kg/hm²。改良剂于 2017 年 5 月全部一次基施,与 0—10 cm 土层混合均匀,其他田间管理措施一致,2018 年 5 月只播种黑麦草,不再施用改良剂。

表 2 改良剂养分含量 单位:%

改良剂	全氮	全磷	全钾	有机碳	碳氮比
秸秆(JG)	1.69	0.54	1.08	26.30	15.56
菌渣(JZ)	1.39	0.59	1.19	16.81	12.09

1.4 测定项目与方法

于 2017 年 9 月、2018 年 5 月和 2018 年 9 月用土

钻分层采集(0—10,10—20,20—30 cm)土样,小区内按“S”形曲线 5~6 点采集,去除肉眼可见的植物根系、有机物质、石块后,将土壤分为 2 份:一份过 2 mm 筛后置于 4 ℃ 冰箱保存,用以测定微生物量碳(0—10,10—20 cm);另一份自然风干后过 0.25 mm 筛,用于测定土壤有机碳和活性有机碳(0—10,10—20,20—30 cm)。土壤容重采用环刀法测定;土壤总有机碳(TOC)含量采用重铬酸钾容量法测定;活性有机碳(LOC)含量采用 333 mmol/L KMnO₄ 氧化—比色法^[3]测定;微生物量碳(MBC)含量采用氯仿熏蒸 K₂SO₄ 浸提法^[16]测定。以不施改良剂处理(CK)为对照,有机碳储量^[17]和碳库管理指数^[3]计算方法为:

$$\text{有机碳储量}(\text{kg}/\text{m}^2)=\frac{\text{土壤容重}(\text{g}/\text{cm}^3)\times\text{土层厚度}(\text{cm})\times\text{有机碳含量}(\text{g}/\text{kg})}{100}$$
$$\text{碳库活度}(\text{L})=\text{土壤活性有机碳}/(\text{土壤总有机碳}-\text{活性有机碳})$$
$$\text{碳库活度指数}(\text{LI})=\text{处理土壤碳库活度}/\text{对照土壤碳库活度}$$
$$\text{碳库指数}(\text{CPI})=\text{处理土壤总有机碳}/\text{对照土壤总有机碳}$$

表 3 各处理土壤总有机碳含量变化 单位:g/kg

处理	2017 年			2018 年		
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm
CK	0.97±0.01g	0.71±0.01f	0.53±0.01f	1.08±0.01h	0.72±0.01g	0.54±0.02e
JG6	1.50±0.02e	1.02±0.01d	0.72±0.02e	1.75±0.01f	1.29±0.03cd	0.78±0.00d
JG12	1.66±0.00d	1.12±0.01bc	0.79±0.03de	2.18±0.01c	1.31±0.00bc	0.82±0.03d
JG18	1.73±0.00c	1.15±0.02b	0.82±0.01cd	2.65±0.01b	1.34±0.01ab	0.91±0.01c
JG24	1.86±0.01a	1.19±0.02a	0.86±0.05bc	2.99±0.04a	1.36±0.02a	1.01±0.02a
均值	1.54a	1.04a	0.74b	2.13a	1.20a	0.81b
CK	0.97±0.01g	0.71±0.01f	0.53±0.01f	1.08±0.01h	0.72±0.01g	0.54±0.02e
JZ6	1.37±0.01f	0.92±0.01e	0.80±0.01cd	1.59±0.03g	1.18±0.01f	0.82±0.03d
JZ12	1.52±0.01e	0.95±0.01e	0.81±0.01cd	1.79±0.01f	1.22±0.01ef	0.91±0.01c
JZ18	1.65±0.01d	0.99±0.01d	0.89±0.01ab	1.88±0.01e	1.24±0.01e	0.96±0.01bc
JZ24	1.76±0.01b	1.08±0.01c	0.92±0.02a	2.05±0.02d	1.26±0.01de	0.98±0.02ab
均值	1.45b	0.93b	0.79a	1.68b	1.12b	0.84a
AD	168.8**	177.3**	11.7**	1840.6**	72.6**	6.5*
F 值 AR	1818.2**	348.9**	79.4**	2275.1**	592.8**	233.8**
AD×AR	12.9**	14.3**	1.1ns	284.7**	4.72**	3.8*

注:表中数据为平均值±标准误;AD为改良剂,AR为施用量;不同小写字母表示同列处理间在 5%水平差异显著;ns 表示在 5%水平下差异不显著;* 和 ** 分别表示在 5%和 1%水平差异显著。下同。

2.2 改良剂对土壤有机碳储量的影响

由图 1 可知,施用 JG、JZ 改良剂显著增加了土壤有机碳储量,增施改良剂土壤有机碳储量显著增加,其中 0—10 cm 土壤的增幅最大。施用第 1 年,JG 改良剂处理 0—10,10—20 cm 土壤有机碳储量较 CK 平均增加 73.2%,55.7%,增幅分别为 55.1%~90.5%,42.2%~65.5%;JZ 改良剂处理 0—10,10—20 cm 土壤有机碳储量平均较 CK 增加 62.1%,37.8%,增幅分别为 42.1%~

碳库管理指数(CPMI)=CPI×LI×100

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据整理与绘图,SPSS 19.0 软件进行数据统计与分析。

2 结果与分析

2.1 改良剂对土壤有机碳含量的影响

施用 JG 和 JZ 改良剂显著提高了各土层土壤有机碳含量,且土壤有机碳含量随改良剂施用量呈增加趋势(表 3)。与 CK 相比,施用第 1 年 JG 处理 0—10,10—20,20—30 cm 土壤有机碳含量分别平均增加 74.0%,57.8%,50.5%,JZ 处理 0—10,10—20,20—30 cm 土壤有机碳含量分别平均增加 62.4%,38.7%,61.3%。从改良剂种类来看,0—10,10—20 cm 土壤有机碳含量 JG 处理显著高于 JZ 处理,而 20—30 cm 则表现为 JZ 处理显著高于 JG 处理。与施用第 1 年相比,第 2 年 JG 处理 0—10,10—20,20—30 cm 土壤有机碳含量分别平均增加 41.8%,18.3%,10.3%,JZ 改良剂处理 0—10,10—20,20—30 cm 土壤分别平均增加 16.0%,24.4%,7.3%。可见,JG、JZ 改良均有利于提升土壤有机碳含量,JG 改良剂优于 JZ 改良剂。

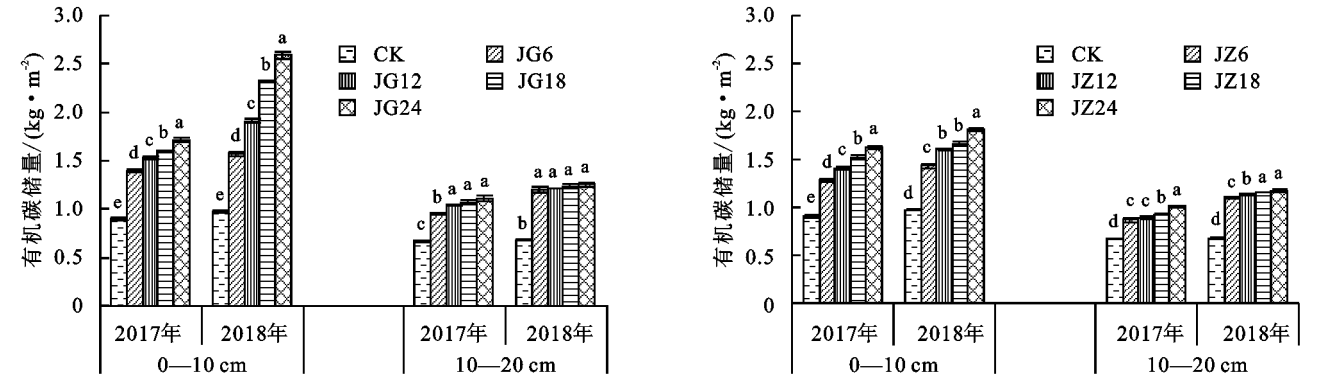
80.5%,29.7%~50.8%。与施用第 1 年相比,第 2 年 JG 改良剂处理 0—10,10—20 cm 土壤有机碳储量平均增加 34.5%,17.2%,JZ 改良剂平处理均增加 11.4%,23.4%。

2.3 改良剂对土壤活性有机碳含量的影响

由表 4 可知,施用 JG、JZ 改良剂均显著增加了沙化土壤活性有机碳含量($p<0.05$),且随改良剂施用量增加而增加。施用第 1 年,JG6 处理 0—10,10—20,20—30 cm 土壤活性有机碳含量分别较 CK 增加

87.0%, 52.9%, 100.0%, JZ6 处理 0—10, 10—20, 20—30 cm 土壤活性有机碳含量分别较 CK 增加 30.4%, 52.9%, 120.0%。与第 1 年相比,施用后第 2 年 JG 改良剂在低施用量下土壤活性有机碳降低,在中高施用量下增加,JZ 改良剂则整体呈降低趋势。施用

第 2 年,JG 改良剂处理 0—10,10—20,20—30 cm 土壤活性有机碳较 CK 增加 22.5%,135.9%,90.0%,JZ 改良剂处理 0—10,10—20,20—30 cm 土壤活性有机碳分别增加 115.6%,65.6%,57.5%。可见,JG、JZ 改良剂均有利于提升土壤活性有机碳含量。



注:不同小写字母表示同时期处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 各处理土壤有机碳储量变化

表 4 各处理土壤活性有机碳含量变化

单位:g/kg

处理	2017 年			2018 年		
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm
CK	0.23±0.01f	0.17±0e	0.10±0f	0.16±0g	0.16±0g	0.10±0e
JG6	0.43±0c	0.26±0.01d	0.20±0e	0.30±0e	0.24±0ef	0.14±0cd
JG12	0.46±0.01b	0.29±0.01c	0.21±0bc	0.43±0.01c	0.31±0.01c	0.14±0d
JG18	0.54±0.01a	0.35±0.01b	0.20±0de	0.55±0.01b	0.47±0.01b	0.24±0.01a
JG24	0.57±0.01a	0.40±0.01a	0.22±0a	0.80±0.03a	0.49±0.01a	0.24±0.01a
均值	0.44a	0.29a	0.18b	0.45a	0.33a	0.17a
CK	0.23±0.01f	0.17±0e	0.10±0f	0.16±0g	0.16±0g	0.10±0e
JZ6	0.30±0.01e	0.26±0.01d	0.22±0ab	0.23±0.01f	0.23±0f	0.16±0c
JZ12	0.39±0.01d	0.26±0.01d	0.23±0a	0.32±0e	0.24±0e	0.15±0cd
JZ18	0.44±0bc	0.29±0.01c	0.22±0ab	0.37±0d	0.28±0d	0.14±0cd
JZ24	0.44±0.01bc	0.29±0.01c	0.20±0cd	0.46±0.01c	0.31±0c	0.18±0b
均值	0.36b	0.25b	0.19a	0.31b	0.25b	0.15b
AD	207.5**	105.0**	22.7**	396.9**	603.6**	56.9**
F 值 AR	297.7**	232.4**	693.7**	518.5**	605.5**	167.6**
AD×AR	16.4**	26.9**	19.2**	68.3**	123.5**	43.4**

2.4 改良剂对土壤微生物量碳的影响

从图 2 可以看出,JG、JZ 改良剂均显著增加了沙化土壤 0—10,10—20 cm 土壤微生物量碳含量,且随改良剂施用量显著增加。施用第 1 年,JG6 处理 0—10,10—20 cm 土壤微生物量碳含量较 CK 增加 79.1%,157.7%,增施 JG 改良剂的增幅分别为 110.2%~189.9%,41.5%~171.5%;JZ6 处理 0—10,10—20 cm 土壤微生物量碳含量较 CK 增加 152.6%,214.9%,增施 JZ 改良剂的增幅分别为 57.4%~120.7%,41.8%~135.6%。施用第 2 年,JG 和 JZ 改良剂 0—10,10—20 cm 土壤微生物量碳含量较第 1 年平均增加 538.3%,490.3%和 432.6%,521.0%。从改良剂种类看,JG 改良剂对土壤微生物量碳的提升效果优于 JZ 改良剂。

2.5 改良剂对土壤微生物熵的影响

微生物量碳占总有机碳比率称微生物熵,可反映输入土壤中的有机碳向活性有机碳转化效率,值越大,土壤微生物对总有机碳的利用率越高^[18-20]。由图 3 可知,JG、JZ 改良剂均显著增加了沙化土壤 0—10,10—20 cm 土壤微生物熵。施用第 1 年,JG 和 JZ 改良剂 0—10,10—20 cm 土壤微生物熵分别较 CK 平均增加 113.0%,202.6%和 156.6%,271.3%。施用第 2 年,JG 处理 0—10 cm 土壤微生物熵随施用量增加而降低,10—20 cm 土壤微生物熵随施用量增加呈增加趋势;而 JZ 处理 0—20 cm 土壤则整体呈增加趋势。从改良剂种类看,JZ 改良剂对土壤微生物熵的提升效果优于 JG 改良剂。施用第 2 年,JG 和 JZ 改良剂 0—10,10—20 cm 土壤微生物熵分别较 CK 平均增加 368.6%,408.3%和 366.4%,407.1%。

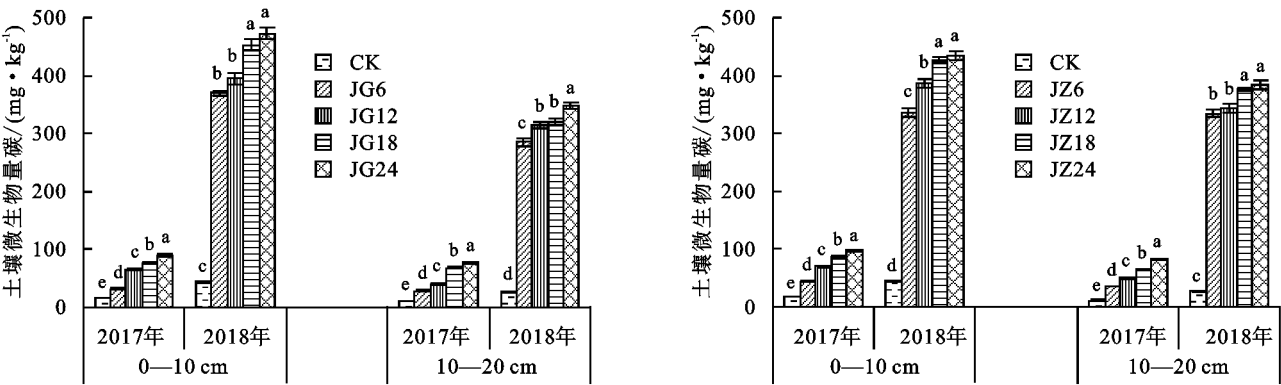


图 2 各处理土壤微生物量碳变化

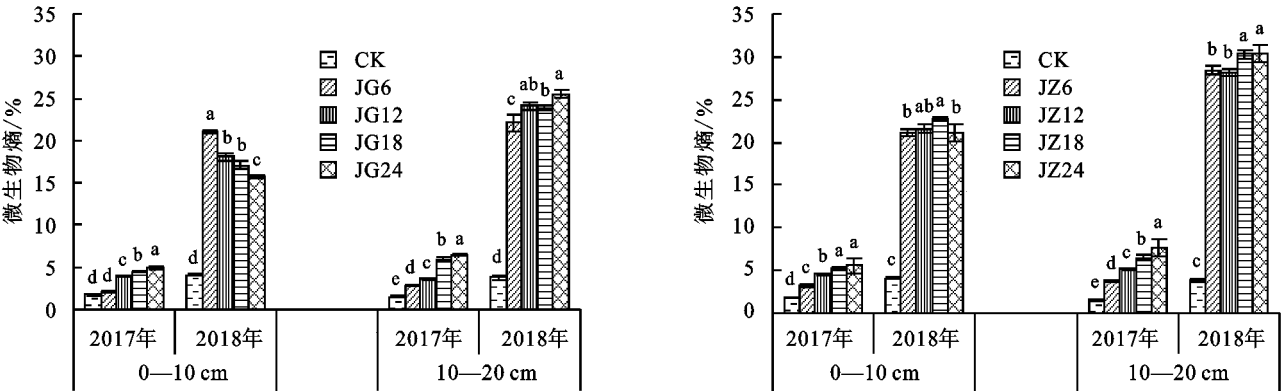


图 3 微生物量碳含量占总有机碳比率

2.6 改良剂对土壤碳库管理指数的影响

从表 5 可以看出,施用 JG、JZ 改良剂显著增加了各土层土壤碳库管理指数(CPMI),增施改良剂各土层 CPMI 显著增加。施用第 1 年,JG 和 JZ 处理 0—10、10—20、20—30 cm 土壤 CPMI 分别较 CK 平均增加 94.9%,55.5%,105.9%和 27.0%,61.1%,101.8%。施用后第 2 年,JG 改良剂处理 0—30 cm 土壤 CPMI 在低施用量降低,在中高施用量下增加;而 JZ 改良

剂各施用量处理 0—10 cm 土壤 CPMI 均表现为增加趋势,10—30 cm 土壤 CPMI 则表现降低趋势。施用第 2 年,JG、JZ 处理 0—10、10—20、20—30 cm 土壤 CPMI 分别较 CK 平均增加 246.1%,156.7%,105.5%和 120.6%,60.4%,64.1%。

可见,JG 和 JZ 改良剂均能有效增加沙化土 0—30 cm 土壤 CPMI,JG 改良剂对 CPMI 的提升效果优于 JZ 改良剂。

表 5 各处理土壤碳库管理指数的变化

处理	2017 年			2018 年		
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm
CK	100.0±4.8e	100.0±1.7f	100.0±1.1f	100.0±2.4h	100.0±2.1f	100.0±5.1e
JG6	194.9±2.9b	155.5±5.1e	205.9±2.8de	186.2±3.2f	137.0±2.3e	136.0±0.8d
JG12	206.2±5.1b	176.0±4.4cd	213.7±1.5d	274.8±6.5d	194.3±5.6c	142.2±0.8d
JG18	259.4±6.2a	226.1±3.9b	224.3±2.0c	358.9±9.2b	336.9±8.1b	272.1±3.9a
JG24	267.1±8.8a	270.7±9.0a	241.5±6.8a	564.6±8.6a	358.5±13.2a	271.6±3.5a
均值	205.5a	185.7a	197.1a	296.9a	225.3a	184.3a
CK	100.0±4.8e	100.0±1.7f	100.0±1.1f	100.0±2.4h	100.0±2.1f	100.0±5.1e
JZ6	127.0±5.1d	161.1±6.1de	201.8±2.9e	141.6±8.5g	133.4±2.2e	144.7±3.3d
JZ12	172.7±7.3c	157.7±5.8e	210.5±1.9de	199.5±1.9f	143.9±2.5e	156.4±2.0c
JZ18	194.4±3.0b	180.4±6.8c	228.8±2.0bc	237.3±0.5e	168.0±3.1d	163.9±1.5c
JZ24	193.2±4.0b	182.1±6.1c	235.0±3.2ab	304.1±8.2c	196.4±3.7c	191.5±3.8b
均值	157.4b	156.2b	195.2a	196.5b	148.3b	151.2b
AD	178.6**	72.2**	1.0ns	675.0**	497.2**	237.2**
F 值 AR	178.4**	155.6**	676.4**	888.2**	386.2**	535.6**
AD×AR	15.0**	25.0**	1.0ns	133.6**	116.2**	140.1**

3 讨论

3.1 施用秸秆和菌渣外源改良剂可显著提高沙化土壤有机碳含量

土壤有机碳是土壤养分的重要来源,也是评价土壤质量的重要指标,施用外源有机碳或土壤改良剂可有效增加土壤有机碳含量,提升土壤质量^[1,11]。秸秆和菌渣作为农业生产的废弃物,含有丰富的有机碳,是天然的土壤改良剂^[13]。对黄潮土和砂姜黑土^[21]、宅基地复垦土壤^[22]、黄色黏土质水稻土^[1]等研究发现,秸秆、菌渣等有机改良剂均显著增加了土壤有机碳含量,有效提升了土壤质量。本研究在高寒沙地土壤施用秸秆和菌渣改良剂也得到了相同的结论,秸秆、菌渣改良剂均显著增加 0—30 cm 土壤有机碳含量和有机碳储量,且随改良剂施用量增加而增加。秸秆、菌渣直接施用下,土壤对秸秆和菌渣的消纳能力较小,且可能造成土壤碳氮比失调,对土壤的改良效果不佳^[23-24]。在高寒沙地上应用时,风蚀气候还易造成环境污染。以秸秆和菌渣为主要原料复合 PAM、微生物菌剂和氮磷钾肥,并加工成颗粒化改良剂,不仅融合了秸秆和菌渣的优良特性,还有效调节了土壤碳氮比^[23],增加了土壤对秸秆和菌渣的消纳能力^[24],提升了秸秆和菌渣的还田效果,增加了秸秆和菌渣对土壤的改良能力^[25]。秸秆改良剂对高寒沙地土壤有机碳的提升效果优于菌渣改良剂,这与改良剂自身携带的有机碳含量有关,秸秆、菌渣改良剂的碳氮比均在土壤微生物所适宜碳氮比(25:1)的范围内^[26],相同施用量下秸秆改良剂的有机碳含量较菌渣改良剂提高 56.45%,在有机碳含量的提升上具有绝对的数量优势。

3.2 施用秸秆和菌渣外源改良剂提高了沙化土壤活性有机碳、微生物量碳和微生物熵

土壤活性有机碳和微生物量碳是土壤中有效性最高、最活跃也最易变化的有机碳组分,可直接参与植物养分供应和土壤碳素转化,是土壤肥力的驱动力^[27]。添加秸秆、菌渣等外源有机改良剂可显著增加土壤活性有机碳和微生物量碳含量,有效改善土壤质量,提升土壤肥力^[22]。夏海勇等^[21]研究发现,土壤活性有机碳含量与外源有机碳用量呈线性正相关关系。本研究结果与前人^[21]研究结果一致,秸秆、菌渣改良剂均显著增加了高寒沙地土壤活性有机碳和微生物量碳含量,且随改良剂施用量增加而增加,随时间也呈逐渐增加的趋势。这主要是由于外源有机改良剂充当了微生物生命活动的基质,促进了微生物对外源有机碳的分解利用,有效增加土壤中的活性有机碳和微生物量碳含量^[1,17]。微生物熵反映了土壤微生物对输入土壤有机物的转化效率,其值越大,土

壤微生物对总有机碳的利用率越高^[2]。秸秆、菌渣改良剂均有效提升了沙化土壤微生物熵,提高了土壤微生物对外源有机碳的利用率,增加了碳素有效性。土壤活性有机碳和微生物量碳是土壤碳库早期变化的敏感性指标,比土壤总有机碳更能客观反映土壤质量的变化情况^[4,27]。在高寒沙地施用秸秆、菌渣改良剂对土壤活性有机碳和微生物量碳的提升效果显著优于土壤总有机碳,活性有机碳和微生物量碳较总有机碳更为敏感。秸秆改良剂处理的活性有机碳含量高于菌渣改良剂,且施用第 2 年秸秆改良剂处理的活性有机碳含量降幅小于菌渣改良剂,这可能是因为改良剂在增加土壤总有机碳的同时有效增加了土壤活性有机碳含量^[21],相同施用量下秸秆改良剂处理所含的有机碳含量高于菌渣改良剂。菌渣改良剂处理土壤微生物量碳和微生物熵的增幅大于秸秆改良剂,这主要是由于菌渣改良剂的碳氮比小于秸秆改良剂,更有利于土壤微生物生长^[22,28],且菌渣本身拥有丰富的微生物^[21],更有利于土壤微生物量碳和微生物熵的提升。

3.3 施用秸秆和菌渣外源改良剂可增加沙化土壤碳库管理指数

与土壤总有机碳相比,碳库管理指数与土壤速效养分、理化性状及耕作措施等的关系更加密切,可以更加灵敏地反映出土壤质量的变化情况,是评价土壤管理措施改善土壤质量的重要参数^[2-4]。井大炜等^[27]、Li 等^[17]、李传章等^[29]研究发现,添加外源有机碳显著增加了土壤碳库管理指数,有效提升了土壤质量。本研究表明,秸秆和菌渣改良剂均显著增加了 0—30 cm 土壤碳库管理指数,且随改良剂施用量增加而增加,0—20 cm 土壤碳库管理指数随时间呈增加趋势,整体表现为秸秆改良剂优于菌渣。秸秆改良剂对 0—30 cm 土壤碳库管理指数的提升效果优于菌渣改良剂,与李传章等^[29]的研究结果不一致,这主要是由于李传章等^[29]研究的是不同有机物料与鸡粪配施后对土壤碳库管理指数的影响,在等有机碳输入的条件下,菌渣的碳氮比小于秸秆,更有利于有机物料分解和土壤有机碳、活性有机碳的积累,进而对土壤的培肥效果更佳。本研究在相同施用量条件下,秸秆改良剂所携带的有机碳含量更高,且秸秆、菌渣改良剂的碳氮比均在土壤微生物生长所适宜碳氮比范围之内^[26],秸秆改良剂处理的土壤碳库管理指数随时间增幅最大,故而在有机碳含量匮乏的高寒沙地上应用更具优势。

4 结论

秸秆、菌渣等富含有机碳的农业废弃资源可以加工成土壤改良剂用于高寒沙地土壤治理,施用秸秆和

菌渣改良剂均显著增加了土壤有机碳、有机碳储量、活性有机碳、微生物量碳、微生物熵和碳库管理指数,且随施用量增加呈逐渐增加的趋势。秸秆和菌渣改良剂均有助于增加土壤有机碳库组分含量,提高土壤有机碳周转速率和碳库管理指数,具有快速培肥沙化土壤的效果。

参考文献:

- [1] Mi W H, Wu L H, Brookes P C, et al. Changes in soil organic carbon fractions under integrated management systems in a low-productivity paddy soil given different organic amendments and chemical fertilizers[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 64-70.
- [2] 蒲玉琳,叶春,张世熔,等.若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 367-377.
- [3] 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): 393-406.
- [4] 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.
- [5] 舒向阳,胡玉福,蒋双龙,等.川西北沙化草地植被群落、土壤有机碳及微生物特征[J]. *草业学报*, 2016, 25(4): 45-54.
- [6] 蒋双龙,胡玉福,蒲琴,等.川西北高寒草地沙化过程中土壤氮素变化特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4644-4653.
- [7] 蔡晓布,于宝政,彭岳林,等.高寒草原土壤有机碳及土壤碳库管理指数的变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7748-7755.
- [8] 曾永年,冯兆东.黄河源区土地沙漠化及其对土壤碳库的影响研究[J]. *中国沙漠*, 2008(2): 208-211.
- [9] 孔凡磊,张海林,孙国峰,等.轮耕措施对小麦玉米两熟制农田土壤碳库特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 150-154.
- [10] 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.
- [11] 王月玲,耿增超,尚杰,等.施用生物炭后壤土土壤有机碳、氮及碳库管理指数的变化[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(3): 532-539.
- [12] 管光玉,范燕敏,武红旗,等.封育对山地草甸草原土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *草业科学*, 2014, 31(9): 1618-1622.
- [13] Paula F S, Tatti E, Abram F, et al. Stabilisation of spent mushroom substrate for application as a plant growth-promoting organic amendment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196: 476-486.
- [14] Zhang P, Chen X L, Wei T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 65-72.
- [15] 江仁涛,李富程,沈淞涛.不同年限红柳恢复川西北高寒沙地对土壤团聚体和有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 197-203.
- [16] 林先贵.土壤微生物研究原理与方法[M].北京:高等教育出版社,2010.
- [17] Li J, Wen Y C, Li X H, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 281-290.
- [18] 王岩,沈其荣,史瑞和,等.土壤微生物量及其生态效应[J]. *南京农业大学学报*, 1996, 19(4): 48-54.
- [19] 何振立.土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义[J]. *土壤*, 1997(2): 61-69.
- [20] 徐一兰,唐海明,肖小平,等.长期施肥对双季稻田土壤微生物学特性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(18): 5847-5855.
- [21] 夏海勇,王凯荣,赵庆雷,等.秸秆添加对土壤有机碳库分解转化和组成的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(4): 386-393.
- [22] 闫锐,李彦霖,邓良基,等.3种有机物料对宅基地复垦土壤易变有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 233-241.
- [23] 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, 50(5): 915-921.
- [24] 王婧,张莉,逢焕成,等.秸秆颗粒化还田加速腐解速率提高培肥效果[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 177-183.
- [25] 李元元,王占礼.聚丙烯酰胺(PAM)防治土壤风蚀的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 1002-1008.
- [26] 李涛,何春娥,葛晓颖,等.秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(12): 1633-1642.
- [27] 井大炜,邢尚军,刘方春,等.配施味精废浆促进杨树生长提高土壤活性有机碳及碳库管理指数[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊1): 124-131.
- [28] 胡玮,李桂花,任意,等.不同碳氮比有机肥组合对低肥力土壤小麦生物量和部分土壤肥力因素的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2011(2): 22-27.
- [29] 李传章,高利娟,李吉进,等.不同有机肥对新建蔬菜大棚土壤的不同形态有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. *浙江农业学报*, 2013, 25(5): 1079-1085.