有机营养功能型土壤改良剂对灰棕荒漠土的改良效果

朱晓涛[1,2]，蔺正河[1,2]，闫治斌[3]，
王 学[3]，马世军[3]，闫富海[3]，秦嘉海[1]
(1.河西学院 农业与生物技术学院，甘肃 张掖 734000；2.金塔县农业技术推广中心，
甘肃 酒泉 7350002；3.甘肃省敦煌种业股份有限公司，甘肃 酒泉 735000)

摘 要：[目的]进行有机营养功能型土壤改良剂配方筛选，研究灰棕荒漠土改良效果和杂交饲用甜高粱经济效益，解决灰棕荒漠土保水、保肥能力弱，有机质含量低，作物产量低而不稳的瓶颈问题。[方法]选择甘肃省酒泉市肃州区的灰棕荒漠土，采用田间试验的方法进行研究。[结果]不同梯度有机营养功能型土壤改良剂施用量与灰棕荒漠土孔隙度、团聚体、持水量、有机质、速效氮磷钾、杂交饲用甜高粱经济性状和产量呈正相关关系，与灰棕荒漠土容重和 pH 值呈负相关关系。施用有机营养功能型土壤改良剂与施用传统化肥比较，灰棕荒漠土容重和 pH 值分别降低 4.10%和 8.27%；总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总持水量、毛管持水量和非毛管持水量分别增加 3.63%，3.60%，3.67%，3.63%，3.60%和 3.67%；有机质、碱解氮、速效磷和速效钾分别增加 7.03%，0.37%，0.33%和 0.29%；真菌、细菌、放线菌、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶分别增加 121.42%，34.69%，20.00%，61.79%，45.37%，36.00%和 63.23%；杂交饲用甜高粱穗粒数、穗粒重、百粒重、产量、施肥利润和投资效率分别增加 6.38%，4.17%，4.42%和 4.04%，2 390元/hm^2 和 0.40 元/元。[结论]施用有机营养功能型土壤改良剂，有效地改善了甘肃省河西走廊灰棕荒漠土理化性质，提高了持水量和杂交饲用甜高粱产量。

关键词：有机营养功能型土壤改良剂；灰棕荒漠土；改良效果
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2017)05-0276-08 **中图分类号**：S156.2

文献参数：朱晓涛，蔺正河，闫治斌，等.有机营养功能型土壤改良剂对灰棕荒漠土的改良效果[J].水土保持通报，2017，37(5)：276-283. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.047；Zhu Xiaotao，Lin Zhenghe，Yan Zhibin，et al. Improvement effects of organic nutrition-functional soil conditioners on grey brown desert soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2017，37(5)：276-283. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.047

Improvement Effects of Organic Nutrition-Functional Soil Conditioners on Grey Brown Desert Soil

ZHU Xiaotao[1,2], LIN Zhenghe[1,2], YAN Zhibin[3],
WANG Xue[3], MA Shijun[3], YAN Fuhai[2], QIN Jiahai[1]
(1. *College of Agriculture and Biology Technology, Hexi University, Zhangye, Gansu* 734000, *China*; 2. *Extension Centre of Agricultural Technology in Jinta County, Jiuquan, Gansu* 735000, *China*; 3. *Gansu Dunhuang Seed Industry Co. Ltd, Jiuquan, Gansu* 735000, *China*)

Abstract: [Objective] The study was conducted on the selection of organic nutrition-functional soil conditioners and the economic benefit of hybrid feeding sweet sorghum from application of it, in order to solve the bottleneck problem of grey brown desert soil that is characterized by weak water and fertilizer retention, low organic content and the successive low and unsustainable crop yield. [Methods] The ash brown desert soil in Suzhou District, Jiuquan City, Gansu Province was selected as experimental materials and field experiment was conducted. [Results] The amount of organic nutrition-functional soil conditioner was positively correlated with indices of porosity, aggregate, water holding, organic matter, available nitrogen, phosphorus and potassium, economic benefits and yield of hybrid feeding sweet sorghum, while was negatively correlated

收稿日期：2017-03-25 **修回日期**：2017-04-08
资助项目：甘肃省科技重大专项项目“高粱高效制种及加工生产技术研究”(2015GS05915)
第一作者：朱晓涛(1966—)，男(汉族)，甘肃省金塔县人，学士，农艺师，主要从事土壤改良与培肥研究。E-mail：qinjiahai123@163.com。
通讯作者：闫治斌(1968—)，男(汉族)，甘肃省酒泉市人，硕士，研究员，主要从事土壤改良与培肥研究。E-mail：qinjiahai123@163.com。

with soil bulk density and pH value. Soil bulk density and pH value decreased 4.10% and 8.27% as compared with that of conventional fertilizer. Total porosity, capillary porosity, non-capillary porosity, total water holding, capillary porosity water holding capacity and non-capillary porosity water holding capacity increased by 3.63%, 3.60%, 3.67%, 3.63%, 3.60% and 3.67%, respectively; organic matter, available nitrogen, phosphorus and potassium increased by 7.03%, 0.37%, 0.33% and 0.29%; fungi, bacteria, actinomyces, sucrose, phosphatase and polyphenol oxidase increased by 121.42%, 34.69%, 20.00%, 61.79%, 45.37%, 36.00% and 63.23%, respectively. The grains per spike, grains weight, hundred-grain weight, yield, fertilizer profits and investment efficiency increased by 6.38%, 4.17%, 4.42%, 4.04%, 2 390 yuan/hm^2 and 0.40 yuan/yuan, respectively. [Conclusion] The grey brown soil physical and chemical properties can be effectively improved by the application of organic nutrition-functional soil conditioners in the Hexi Corridor of Gansu Province, and the water holding capacity, hybrid feeding sweet sorghum yield increased as well.

Keywords: organic nutrition functional soil conditioners; grey brown desert soil; improved effects.

随着种植面积的不断扩大,分布在甘肃河西走廊的 2.36×10^7 hm^2 的灰棕荒漠土被农户开垦后种植各种农作物,存在的主要问题是:土层薄,黏粒少,沙粒多,保水能力弱,有机质、速效氮磷钾和微量元素锌钼含量低,缺素的生理性病害经常发生,作物产量低而不稳。近年来,有关土壤改良剂的研究受到了广泛关注,吴淑芳等[1]使用聚丙烯酸、脲醛树脂和聚乙烯醇 3 种改良剂后,土壤容重均有下降。汪德水等[2]在土壤中施用沥青乳剂和 PAM 后,减少了土面水分蒸发,提高了水分利用效率。郭和蓉等[3-4]在土壤中施用营养型土壤改良剂后,活化了酸性土壤中的磷和钾,提高了养分利用率。周恩湘等[5]在滨海盐化潮土上施用沸石后,提高了土壤的盐基交换能力,使土壤中可溶性盐分减少,土壤的阳离子交换量增大。王志玉等[6]施用土壤改良剂(MDM)后,水稻单株鲜重和干重分别高于对照 120.30%和 112.38%。秦嘉海等[7]施用土壤改良剂(PAM)后,玉米鲜物质质量比对照提高了 24%。经调查河西走廊家畜粪便等改性糠醛渣总量为 6.0×10^5 t,经室内化验分析,改性糠醛渣含有机质 36%,全氮 0.61%,全磷 0.36%,全钾 1.18%,重金属元素 Hg, Cd, Cr, Pb 含量均小于 GB8172-87 规定的农用有机废弃物控制含量标准[8]。目前改性糠醛渣用于家庭燃料、直接还田的占总资源量的 30%,剩余的 4.00×10^5 t 的改性糠醛渣对环境造成了污染。为了促进糠醛渣资源的循环和增值,本文拟以改性糠醛渣[9-10]、高粱专用肥、生物菌肥[11-12]为原料,合成有机营养功能型土壤改良剂,进行田间验证试验,以便对有机营养功能型土壤改良剂的改良效果做出确切的评价。

1　材料与方法

1.1　试验材料

1.1.1　试验地概况　试验于 2011—2016 年在甘肃省酒泉市肃州区上坝乡光辉村进行,试验地海拔高度 1 455 m,经度 98°40′169″,北纬 39°34′590″,年均温 7.50 ℃,年均降水量 82 mm,年均蒸发量 2 500 mm,无霜期 150 d;土壤类型是灰棕荒漠土,0—20 cm 土层含有机质 18.36 g/kg,碱解氮 55.34 mg/kg,速效磷 6.71 mg/kg,速效钾 140.36 mg/kg,有效硼 0.43 mg/kg,有效锰 6.71 mg/kg,有效铜 1.43 mg/kg,有效锌 0.46 mg/kg,有效铁 4.50 mg/kg,有效钼 0.11 mg/kg,可溶性盐 1.79 mg/kg,pH 值 8.24,容重 1.42 g/cm^3,总孔隙度 46.42%,土壤质地为沙壤质土,前茬作物是制种玉米。

1.1.2　参试材料　改性糠醛渣,在糠醛渣中加入 4%的碳酸氢铵,将 pH 值调整到 6.00～6.50,经室内化验分析,含有机质 74%,腐殖酸 11.63%,全氮 0.61%,全磷 0.36%,全钾 1.18%,pH 值为 6.04～6.50,粒径 0.05～1 mm,甘肃共享化工有限公司产品[13];尿素,粒径 2～3 mm,含 N 46%,甘肃刘家峡化工厂产品;磷酸二铵,粒径 2～5 mm,含 N 18%,P_2O_5 46%,云南云天化国际化工股份有限公司产品;硫酸钾,含 K_2O 50%,粒径为 2～3 mm,湖北兴银河化工有限公司产品;硫酸锌,含 Zn 23%,粒径 1～2 mm,甘肃刘家峡化工厂产品;生物菌肥,有效活菌数≥20 亿个/g,山东大地生物科技有限公司产品;高粱专用肥(自主研发),将尿素、磷酸二铵、硫酸钾、硫酸锌重量比按 0.41∶0.10∶0.47∶0.02 混合,含 N 20.66%;含 P_2O_5 4.60%,K_2O 23.50%,Zn 0.46%;杂交饲用甜高粱品系为 LZ-1A×140263-3,由甘肃省农科院选育。

1.2　试验方法

1.2.1　试验处理

(1) 有机营养功能型土壤改良剂配方筛选。2011—2012 年 4 月 24 日选择改性糠醛渣、高粱专用

肥和生物菌肥为3个因素，每个因素设计3个水平，按正交表$L_9(3^4)$设计9个处理[14]（表1）。杂交饲用甜高粱收获后计算出因素间效应值（R）和各因素不同水平的T值，确定因素间最佳组合，组成有机营养功能型土壤改良剂配方。

表1 $L_9(3^3)$正交试验设计与分析

试验处理	A(改性糠醛渣)	B(高粱专用肥)	C(生物菌肥)	杂交饲用甜高粱产量/(t·hm^{-2})
1=$A_3B_1C_1$	(1 350)3	(675)1	(150)1	1.13^{eE}
2=$A_1B_3C_1$	(450)1	(2025)3	(150)1	2.21^{bB}
3=$A_2B_2C_1$	(900)2	(1350)2	(150)1	2.30^{bB}
4=$A_2B_2C_2$	(900)2	(1350)2	(300)2	2.22^{bB}
5=$A_3B_3C_2$	(1 350)3	(2025)3	(300)2	2.24^{bB}
6=$A_1B_1C_2$	(450)1	(675)1	(300)2	1.65^{dD}
7=$A_1B_3C_3$	(450)1	(2025)3	(450)3	0.96^{fF}
8=$A_2B_1C_3$	(900)2	(675)1	(450)3	1.77^{cC}
9=$_A3B_2C_3$	(1 350)3	(1350)2	(450)3	3.01^{aA}
T_1	4.82	4.55	5.64	17.49(T)
T_2	6.29	7.53	6.11	—
T_3	6.38	5.41	5.74	—
R(极差)	1.56	2.98	0.47	—

注：括号内数据为试验施用量(kg/hm^2)；括号外数据为正交试验编码值。

(2) 有机营养功能型土壤改良剂改良效果研究。

①有机营养功能型土壤改良剂最佳施用量研究。2013—2014年4月24日根据试验一筛选的配方，将改性糠醛渣、高粱专用肥、生物菌肥风干重量比按0.4478∶0.4478∶0.1044合成有机营养功能型土壤改良剂，经室内测定，含有机质34.03%，N 8.53%，P_2O_5 2.22%，K_2O11.04 %，Zn0.21%。将合成的有机营养功能型土壤改良剂施用量梯度设计为0.00(CK)0.75，1.50，2.25，3.00，3.75，4.50 t/hm^2 这7个处理，以处理1为对照(CK，每个处理重复3次，随机区组排列。

②有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥对比试验。2015—2016年4月24日，在纯N，P_2O_5，K_2O投入量相等的条件下(纯N 0.26 t/hm^2+P_2O_5 0.07 t/hm^2+K_2O 0.33 t/hm^2)，试验共设计3个处理：处理1，对照(不施任何肥料)；处理2，施用传统化肥(尿素0.51t/hm^2+磷酸二铵0.15t/hm^2+硫酸钾0.66 t/hm^2)；处理3，施用有机营养功能型土壤改良剂(3.00 t/hm^2)。每个处理重复3次，随机区组排列。

1.2.2 *田间种植方法* 田间试验小区面积为32 m^2(8 m×4 m)，小区四周筑埂，埂宽30 cm，高35 cm，有机营养功能型土壤改良剂、磷酸二铵、硫酸钾在播种前施入20 cm土层做底肥，尿素分别在高粱拔节期和抽穗期结合灌水追施，追肥方法为条施。2011—2016每年的4月24日播种，播种深度2～3 cm，父母本行比为2∶8，株距15 cm，行距45 cm，先播不育系，不育系发芽后播种第1期保持系，第1期保持系发芽后播种第2期保持系，分别在高粱拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期各灌水1次，每个试验小区灌水量相等。

1.2.3 *测定项目与方法* 高粱收获时测定农艺性状和经济性状，每个试验小区单独收获，将小区产量折合成公顷产量进行统计分析。高粱收获后分别在试验小区内按对角线布置5个样品采集点，采集0—20 cm耕作层土样5 kg，用四分法带回1 kg混合土样室内风干化验分析(容重、团聚体用环刀取原状土)。土壤容重采用环刀法测定；孔隙度采用计算法求得；>0.25 mm团聚体测定采用干筛法(具体方法是：采集长10 cm，宽10 cm，厚度20 cm的土柱，剥离受采样刀具影响的土柱边面，放在饭盒内运回室内，沿土壤的自然结构将原状土剥成小土块，并剔去粗根和小石块，土样摊平风干15 d，称取100g风干土5份，放置在孔径0.25 mm的土筛中，人工筛1 min后，采用天平称取>0.25 mm团聚体质量，每个样品重复6次，取平均数)；碱解氮采用扩散法；速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法；速效钾采用火焰光度计法；pH值采用5∶1水土比浸提，用pH-2F数字pH计测定；微生物数量采用稀释平板法[15]；脲酶测定采用靛酚比色法；蔗糖酶测定采用3，5-二硝基水杨酸比色法；磷酸酶测定采用磷酸苯二钠比色法；过氧化氢酶测定采用滴定法；多酚氧化酶测定采用碘量滴定法[16]总持水量=(面积×总孔隙度×土层深度)；毛管持水量=(面积×毛管孔隙度×土层深度)；非毛管持水量=(面积×非毛管孔隙度×土层深度)[17]；际产量=(后一个处理产量－前一个处理产量)；边际产值=(边际产量×产品价格)；边际施用量=(后一个处理施用量－前一个处理施用量)；边际成本=(边际施用量×肥料价格)；边际利润=(边际产值－边际成本)[18]。

1.2.4 *数据处理方法* 差异显著性采用DPS 10.0统计软件分析，多重比较，LSR检验法。依据经济效益最佳施用量计算公式$x_0=[(P_x/P_y)-b]/2c$求得有机营养功能型土壤改良剂经济效益最佳施用量(x_0)[19-20]；依据肥料效应回归方程式$y=a+bx-cx^2$，求得杂交饲用甜高粱理论产量(y)[21]。

2 结果与分析

2.1 有机营养功能型土壤改良剂配方筛选

连续定点试验2 a后，于2012年9月28日高粱

收获后测定数据经统计分析可以看出,不同因素间的效应(R)是 $B>A>C$,说明影响杂交饲用甜高粱产量的因素依次是:高粱专用肥(2.98)>改性糠醛渣(1.56)>生物菌肥(0.47)(表 1)。比较各因素不同水平的 T 值,可以看出,$T_{A3}>T_{A2}>T_{A1}$,说明随着改性糠醛渣施用量梯度的增加,杂交饲用甜高粱产量在增加;$T_{B2}>T_{B3}>T_{B1}$,说明杂交饲用甜高粱产量随高粱专用肥施用量梯度的增大而增加,但高粱专用肥施用量超过 1 350 kg/hm^2 后,杂交饲用甜高粱产量又随高粱专用肥施用量的梯度的增大而降低。$T_{C2}>T_{C3}>T_{C1}$,说明杂交饲用甜高粱产量随生物菌肥施用量梯度的增大而增加,但生物菌肥施用量超过 300 kg/hm^2 后,杂交饲用甜高粱产量又随生物菌肥施用量梯度的增大而降低。从各因素的 T 值可以看出,因素间最佳组合是:$A_3B_2C_2$,(即改性糠醛渣 1 350 kg/hm^2,高粱专用肥 1 350 kg/hm^2,生物菌肥 300 kg/hm^2,将改性糠醛渣、高粱专用肥、生物菌肥重量比按 0.450 0∶0.450 0∶0.100 0 混合得到有机营养功能型土壤改良剂)。

2.2　有机营养功能型土壤改良剂对灰棕荒漠土改良效果和杂交饲用甜高粱经济效益的影响

连续定点试验 2 a 后,于 2014 年 9 月 28 日高粱收获后采集耕作层 0—20 cm 土样测定结果可以看出,随着有机营养功能型土壤改良剂施用量梯度的增加,灰棕荒漠土容重在递减,孔隙度在递增(表 2)。有机营养功能型土壤改良剂施用量 4.50 t/hm^2,与对照比较,容重降低了 13.38%,总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度分别增加了 15.42%,15.43%,和 14.89%,差异达极显著水平($p<0.01$)。经相关性分析,有机营养功能型土壤改良剂施用量与灰棕荒漠土容重之间呈显著的负相关关系,与总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度之间呈显著的正相关关系,相关系数(R)分别为 −0.980 9,0.980 5,0.980 3 和 0.975 3。

随着有机营养功能型土壤改良剂施用量梯度的增加,灰棕荒漠土 pH 值在递减,团聚体和 CEC 在递增(表 2)。有机营养功能型土壤改良剂施用量 4.50 t/hm^2,与对照比较,pH 值降低了 5.46%,差异达显著水平($p<0.05$),团聚体和 CEC 分别增加了 42.83%,和 29.39%,差异达极显著水平($p<0.01$)。经相关性分析,有机营养功能型土壤改良剂施用量与灰棕荒漠土 pH 值之间呈显著的负相关关系,与团聚体和 CEC 之间呈显著的正相关关系,相关系数(R)分别为 −0.980 9,0.982 7 和 0.913 7。

表 2　有机营养功能型土壤改良剂对灰棕荒漠土理化性质的影响

改良剂施用量/(t·hm^{-2})	容重/(g·cm^{-3})	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	>0.25 mm 团聚体/%	pH 值	CEC/(cmol·kg^{-1})
0	1.42^{aA}	46.42^{eB}	25.53^{eB}	20.89^{eB}	28.23^{gC}	8.24^{aA}	17.25^{eB}
0.75	1.41^{aA}	46.79^{eB}	25.73^{eB}	21.06^{dB}	31.75^{fB}	8.22^{aA}	19.36^{dA}
1.50	1.36^{bA}	48.68^{dB}	26.77^{dB}	21.90^{dB}	32.92^{eB}	8.19^{aA}	20.16^{cA}
2.25	1.32^{bB}	50.19^{cA}	27.60^{cA}	22.59^{cA}	34.98^{dB}	8.07^{aA}	20.78^{cA}
3.00	1.29^{cB}	51.32^{bA}	28.23^{bA}	23.09^{bA}	36.24^{cB}	8.02^{aA}	21.21^{bA}
3.75	1.24^{dB}	53.21^{aA}	29.27^{aA}	23.94^{bA}	38.02^{bA}	7.98^{bA}	21.87^{aA}
4.50	1.23^{eB}	53.58^{aA}	29.47^{aA}	24.00^{aA}	40.32^{aA}	7.79^{bA}	22.32^{aA}

注:同列数据大写字母不同表示 $LSR_{0.01}$ 水平差异显著;小写字母不同表示 $LSR_{0.05}$ 水平差异显著。下同。

经相关性分析,有机营养功能型土壤改良剂施用量与总持水量、毛管持水量、非毛管持水量、有机质、碱解氮、速效磷和速效钾之间呈显著的正相关关系(表 3),相关系数(R)分别为 0.980 5,0.980 3,0.975 3,0.925 0,0.813 5,0.719 0 和 0.884 6。有机营养功能型土壤改良剂施用量 4.50 t/hm^2,与对照比较,总持水量、毛管持水量、非毛管持水量、有机质、碱解氮、速效磷和速效钾分别增加了 15.42%,15.43%,14.89%,20.13%,75.71%,83.91% 和 27.44%,差异达极显著水平($p<0.01$)。

2016 年 9 月 28 日高粱收获后测定数据进行相关分析可知,有机营养功能型土壤改良剂施用量与杂交饲用甜高粱株高、茎粗、地上部分干重、根系干重、穗粒数、穗粒重和百粒重之间呈显著的正相关关系(表 4),相关系数(R)分别为 0.905 0,0.795 0,0.856 2,0.817 9,0.991 3,0.976 1 和 0.849 7。有机营养功能型土壤改良剂施用量 4.50 t/hm^2,与 CK 比较,株高、茎粗、地上部分干重、根系干重、穗粒数、穗粒重和百粒重分别增加了 15.12%,43.63%,24.68%,34.17%,14.63%,26.91% 和 10.73%,差异达极显著水平($p<0.01$)。

表 3 有机营养功能型土壤改良剂对灰棕荒漠土持水量及有机质和速效养分的影响

改良剂施用量/(t·hm^{-2})	总持水量/(t·hm^{-2})	毛管持水量/(t·hm^{-2})	非毛管持水量/(t·hm^{-2})	有机质/(g·kg^{-1})	碱解氮/(mg·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})
0.00(CK)	928.40^{fC}	510.60^{eB}	417.80^{fB}	18.36^{gB}	55.34^{fD}	6.71^{dB}	140.36^{eC}
0.75	935.80^{eB}	514.60^{eB}	421.20^{eB}	21.71^{fA}	79.27^{eC}	10.63^{cA}	150.23^{dB}
1.50	973.60^{dB}	535.40^{dB}	438.00^{dB}	22.38^{eA}	82.54^{dB}	10.47^{cA}	154.17^{dB}
2.25	1003.80^{cA}	552.00^{cA}	451.80^{cA}	23.55^{dA}	87.84^{cB}	11.14^{bA}	164.01^{cB}
3.00	1026.40^{bA}	564.60^{bA}	461.80^{bA}	24.54^{cA}	92.43^{bA}	11.73^{bA}	172.65^{bA}
3.75	1064.20^{aA}	585.40^{aA}	478.80^{aA}	25.55^{bA}	95.29^{aA}	11.96^{bA}	178.88^{bA}
4.50	1071.60^{aA}	589.40^{aA}	480.00^{aA}	26.08^{aA}	97.24^{aA}	12.34^{aA}	186.34^{aA}

表 4 有机营养功能型土壤改良剂对杂交饲用甜高粱农艺性状和经济性状的影响

改良剂施用量/(t·hm^{-2})	株高/cm	茎粗/cm	地上部分干重/(g/株)	根系干重/(g/株)	穗粒数/(粒/穗)	穗粒重/(g/穗)	百粒重/g
0.00(CK)	126.15^{cB}	1.10^{cB}	157.77^{cB}	22.65^{dB}	771.26^{fA}	16.47^{fB}	3.17^{dB}
0.75	132.42^{bA}	1.46^{bA}	183.40^{bA}	28.04^{cA}	787.24^{eA}	17.21^{eA}	3.40^{cbA}
1.50	135.52^{bA}	1.48^{bA}	185.15^{bA}	28.89^{cA}	813.07^{dA}	17.89^{dA}	3.42^{cA}
2.25	137.10^{bA}	1.51^{aA}	189.00^{bA}	29.19^{bA}	837.45^{cA}	18.36^{cA}	3.43^{cA}
3.00	140.31^{aA}	1.54^{aA}	190.75^{aA}	29.79^{bA}	854.22^{bA}	18.77^{bA}	3.47^{bA}
3.75	143.57^{aA}	1.56^{aA}	194.60^{aA}	30.08^{aA}	881.34^{aA}	19.10^{aA}	3.50^{aA}
4.50	145.23^{aA}	1.58^{aA}	196.70^{aA}	30.39^{aA}	884.12^{aA}	19.31^{aA}	3.51^{aA}

随着有机营养功能型土壤改良剂施用量梯度的增加，杂交饲用甜高粱边际产量由最初的 110.00 kg/hm^2，递减到 30.00 kg/hm^2。从经济效益变化来看，随着有机营养功能型土壤改良剂施用量梯度的增加，边际利润由最初的 1 595 元/hm^2，递减到 −405 元/hm^2。有机营养功能型土壤改良剂施用量在 3.00 t/hm^2 的基础上，再继续增加施用量，边际利润出现负值(表 5)。由此可见，有机营养功能型土壤改良剂适宜施用量为 3.00 t/hm^2。

将表 5 不同剂量有机营养功能型土壤改良剂施用量与杂交饲用甜高粱产量间的关系采用回归方程 $y=a+bx+cx^2$ 拟合，得到下列方程：

$$y=2.440+0.188\,1x-0.020\,8\,x^2 \quad (1)$$

对回归方程进行显著性测验的结果表明回归方程拟合良好。有机营养功能型土壤改良剂价格(P_x)为 1 540 元/t，2013—2014 年杂交饲用甜高粱种子市场平均售价(P_y)为 25 000 元/t，将(P_x)，(P_y)，回归方程的系数 b 和 c，代入经济效益最佳施用量计算公式 $x_0=[(P_x/P_y)-b]/2c$，求得有机营养功能型土壤改良剂经济效益最佳施用量(x_0)为 3.04 t/hm^2，将 x_0 代入(1)式，求得杂交饲用甜高粱理论产量(y)为 2.82 t/hm^2(表 5)。

表 5 有机营养功能型土壤改良剂对杂交饲用甜高粱经济效益的影响

改良剂施用量/(t·hm^{-2})	产量/(t·hm^{-2})	边际产量/(t·hm^{-2})	边际产值/(元·hm^{-2})	边际成本/(元·hm^{-2})	边际利润/(元·hm^{-2})
0.00(CK)	2.44^{gB}	—	—	—	—
0.75	2.55^{fA}	110.00	2 750.00	1 155.00	1 595.00
1.50	2.65^{eA}	100.00	2 500.00	1 155.00	1 345.00
2.25	2.72^{dA}	68.00	1 700.00	1 155.00	545.00
3.00	2.78^{cA}	65.00	1 625.00	1 155.00	470.00
3.75	2.83^{bA}	43.00	1 075.00	1 155.00	−80.00
4.50	2.86^{aA}	30.00	750.00	1 155.00	−405.00

注：价格(元/t)：尿素 2 000；磷二 4 000；硫酸钾 2 200；硫酸锌 4 000；改性糠醛渣 120；生物菌肥 4 000；高粱专用肥 2 334(尿素、磷酸二铵、硫酸钾、硫酸锌重量比按 0.410 0∶0.100 0∶0.470 0∶0.020 0 混合)；有机营养功能型土壤改良剂 1 540(将改性糠醛渣、高粱专用肥、生物菌肥重量比按0.450 0∶0.450 0∶0.100 0 混合)；2013—2014 年杂交饲用甜高粱种子市场平均售价 25 000；杂交饲用甜高粱种植株数 148 148 株/hm^2(行距 0.45 m×0.15 m)。

2.3 施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥对灰棕荒漠土改良效果和杂交饲用甜高粱效益的影响对比

连续定点试验 2 a 后,于 2016 年 9 月 28 日高粱收获时测定结果可知,不同处理灰棕荒漠土容重和 pH 值由小到大的变化顺序依次为:有机营养功能型土壤改良剂<传统化肥<对照(表 6)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥和对照比较,容重分别降低 4.10%和 4.92%,差异达显著水平($p<0.05$);施用传统化肥与对照比较,容重降低 0.79%,差异不显著($p>0.05$)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥和对照比较,pH 值分别降低 8.27%和 8.49%,差异达极显著水平($p<0.01$);施用传统化肥与对照比较,pH 值降低 0.23%,差异不显著($p>0.05$)。

不同处理灰棕荒漠土总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和团聚体由大到小的变化顺序依次为:有机营养功能型土壤改良剂>传统化肥>对照(表 6)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥比较,总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度分别增加 3.63%,3.60%和 3.67%,与对照比较,分别增加 4.39%,4.38%和 4.40%,差异达显著水平($p<0.05$)。施用传统化肥与对照比较,总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度分别增加 0.74%,0.76%和 0.70%,差异不显著($p>0.05$)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥和对照比较,>0.25 mm 团聚体分别增加 17.66%和 18.64%,差异达极显著水平($p<0.01$),施用传统化肥与对照比较,>0.25 mm 团聚体增加 0.83%,差异不显著($p>0.05$)。

不同处理灰棕荒漠土总持水量、毛管持水量和非毛管持水量由大到小的变化顺序依次为:有机营养功能型土壤改良剂>传统化肥>对照(表 6)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥比较,总持水量、毛管持水量和非毛管持水量分别增加 3.63%,3.60%和 3.67%,与对照比较,分别增加 4.39%,4.39%和 4.40%,差异达显著水平($p<0.05$),施用传统化肥与对照比较,总持水量、毛管持水量和非毛管持水量分别增加 0.74%,0.76%和 0.70%,差异不显著($p>0.05$)。

有机营养功能型土壤改良剂和传统化肥对灰棕荒漠土有机质和速效氮磷钾由大到小的变化顺序依次为:有机营养功能型土壤改良剂>传统化肥>对照(表 6)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥和对照比较,有机质分别增加 7.03%和 7.2%,差异达极显著水平($p<0.01$);施用传统化肥与对照比较,有机质增加 0.16%,差异不显著($p>0.05$)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥比较,碱解氮和速效磷分别增加 0.37%和 0.33%,差异不显著($p>0.05$);与对照比较,分别增加 66.23%和 87.42%,差异达极显著水平($p<0.01$),施用传统化肥与对照比较,碱解氮和速效磷分别增加 65.61%和 86.81%,差异达极显著水平($p<0.01$)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥和对照比较,速效钾分别增加0.29%和 0.34%,差异不显著($p>0.05$),施用传统化肥与对照比较,速效钾增加 0.05%,差异不显著($p>0.05$)。

表 6　有机营养功能型土壤改良剂和传统化肥对灰棕荒漠土理化性质及有机质和速效养分的影响

试验处理	容重/($g\cdot cm^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	>0.25mm团聚体/%	pH 值	总持水量/($t\cdot hm^{-2}$)	毛管持水量/($t\cdot hm^{-2}$)	非毛管持水量/($t\cdot hm^{-2}$)	有机质/($g\cdot kg^{-1}$)	碱解氮/($mg\cdot kg^{-1}$)	速效磷/($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾/($mg\cdot kg^{-1}$)
对照(CK)	1.28^{aA}	51.69^{bA}	28.94^{bA}	22.75^{bA}	28.76^{bB}	8.36^{aA}	$1\,033.80^{bA}$	578.80^{cA}	455.00^{cA}	12.35^{bB}	66.43^{bB}	6.52^{bB}	145.54^{aA}
传统化肥	1.27^{aA}	52.07^{bA}	29.16^{bA}	22.91^{bA}	29.00^{bB}	8.34^{aA}	$1\,041.40^{bA}$	583.20^{bA}	458.20^{bA}	12.37^{bB}	110.02^{aA}	12.18^{aA}	145.62^{aA}
改良剂	1.22^{bA}	53.96^{aA}	30.21^{aA}	23.75^{aA}	34.12^{aA}	7.65^{bB}	$1\,079.20^{aA}$	604.20^{aA}	475.00^{aA}	13.24^{aA}	110.43^{aA}	12.22^{aA}	146.04^{aA}

不同处理灰棕荒漠土微生物和酶活性由大到小的变化顺序依次为:有机营养功能型土壤改良剂>传统化肥>对照(表 7)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥比较,真菌、细菌和放线菌分别增加 121.42%,34.69%和 20.00%,与对照比较,分别增加 125.45%,36.08%和 23.29%,差异达极显著水平($p<0.01$)。施用传统化肥与对照比较,真菌、细菌和放线菌分别增加 1.82%,1.03%和 2.74%,差异不显著($p>0.05$)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥比较,蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶分别增加 61.79%,45.37%,36.00%和 63.23%,差异达极显著水平($p<0.01$);施用有机营养功能型土壤改良剂与对照比较,蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶分别增加 63.02%,70.65%,70.00%和 65.67%,差异达极显著水平($p<0.01$)。施用传统化肥与对照比较,脲酶和磷酸酶分别增加 17.39%和 25.00%,差异达极显著水平($p<0.01$);蔗糖酶和多酚氧化酶分别增加 0.75%和 1.49%,差异不显著($p>0.05$)。

表7 有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥对灰棕荒漠土微生物和酶活性的影响

试验处理	真菌/10^4 g	细菌/10^7 g	放线菌/10^7 g	蔗糖酶/(mg·g^{-1}·d^{-1})	脲酶/(mg·kg^{-1}·h^{-1})	磷酸酶/(g·kg^{-1}·d^{-1})	多酚氧化酶/(ml·g^{-1})
对照(CK)	1.10^{bB}	0.97^{bB}	0.73^{bB}	2.65^{bB}	0.92^{cC}	0.20^{cC}	0.67^{bB}
传统化肥	1.12^{bB}	0.98^{bB}	0.75^{bB}	2.67^{bB}	1.08^{bB}	0.25^{bB}	0.78^{bB}
改良剂	2.48^{aA}	1.32^{aA}	0.90^{aA}	4.32^{aA}	1.57^{aA}	0.34^{aA}	1.11^{aA}

2016年9月28日杂交饲用高粱收获时测定结果可知,不同处理杂交饲用甜高粱农艺性状和经济性状由大到小的变化顺序依次为:有机营养功能型土壤改良剂>传统化肥>对照(表8)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥比较,株高、茎粗、地上部分干重和根系干重分别增加6.39%,5.87%,5.26%和4.19%,差异达显著水平($p<0.05$);与对照比较,分别增加20.59%,40.18%,41.23%和31.56%,差异达极显著水平($p<0.01$)。施用传统化肥与对照比较,株高、茎粗、地上部分干重和根系干重分别增加13.36%,33.04%,14.86%和26.28%,差异达极显著水平($p<0.01$)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥比较,穗粒数、穗粒重、百粒重和产量分别增加6.38%,4.17%,4.42%和4.04%,差异达显著($p<0.05$);与对照比较,分别增加26.88%,21.21%,16.83%和23.58%,差异达极显著水平($p<0.01$)。施用传统化肥与对照比较,穗粒数、穗粒重、百粒重和产量分别增加19.27%,16.40%,11.88%和18.77%,差异达极显著水平($p<0.01$)(表8)。

不同处理杂交饲用甜高粱增产值、施肥利润由大到小的变化顺序依次为:有机营养功能型土壤改良剂>传统化肥(表8)。施用有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥比较,增产值、施肥利润和投资效率分别增加2 750元/hm^2,2 390元/hm^{2}和0.40元/元。

表8 有机营养功能型土壤改良剂与传统化肥对饲用高粱农艺性状及经济性状和经济效益的影响

试验处理	株高/cm	茎粗/cm	地上部分干重/(g/株)	根系干重/(g/株)	穗粒数/(粒/穗)	穗粒重/(g/穗)	百粒重/g	产量/(t·hm^{-2})	增产值/(元·hm^{-2})	投入成本/(元·hm^{-2})	施肥利润/(元·hm^{-2})	投资效率(元/元)
对照(CK)	118.67^{cB}	1.12^{cB}	160.93^{cB}	23.10^{cB}	686.69^{cB}	15.45^{cB}	3.03^{cB}	2.29^{cB}	—	—	—	—
传统化肥	134.52^{bA}	1.49^{bA}	184.84^{bA}	29.17^{bA}	819.02^{bA}	18.36^{bA}	3.39^{bA}	2.72^{bA}	10 750.00	4 260.00	6 490.00	1.52
改良剂	143.11^{aA}	1.57^{aA}	194.57^{aA}	30.39^{aA}	871.30^{aA}	19.10^{aA}	3.54^{aA}	2.83^{aA}	13 500.00	4 620.00	8 880.00	1.92

3 讨论与结论

随着有机营养功能型土壤改良剂施用量梯度的增加,灰棕荒漠土容重降低,总孔隙度增大,究其原因是有机营养功能型土壤改良剂中的糠醛渣含有丰富的有机质,施用有机营养功能型土壤改良剂后使板结的灰棕荒漠土疏松了,因而增大了孔隙度,降低了容重。施用有机营养功能型土壤改良剂后团聚体在增加,究其原因是有机营养功能型土壤改良剂中的糠醛渣在土壤微生物的作用下合成了腐殖质,腐殖质中的功能团解离后带负电荷[22],吸附了河西灰棕荒漠土中的Ca^{2+},Ca^{2+}是一种胶结物质,促进了灰棕荒漠土团聚体的形成。随着有机营养功能型土壤改良剂施用量梯度的增加,灰棕荒漠土持水量在增加,分析这一结果产生的原因是是糠醛渣在灰棕荒漠土中合成腐殖质,腐殖质的最大吸水量可以超过500%,对保持灰棕荒漠土水分具有重要的意义[23]。随着有机营养功能型土壤改良剂施用量梯度的增加,灰棕荒漠土有机质在梯增,究其原因是有机营养功能型土壤改良剂含有丰富的有机质,因而提升了灰棕荒漠土有机质含量。随着有机营养功能型土壤改良剂施用量梯度的增加,灰棕荒漠土碱解氮、速效磷、速效钾在增加,究其原因是有机营养功能型土壤改良剂含有氮磷钾,因而提高了灰棕荒漠土速效养分含量。随着有机营养功能型土壤改良剂施用量梯度的增加,灰棕荒漠土pH值在下降,其原因是有机营养功能型土壤改良剂中的糠醛渣是一种酸性废弃物,因而降低了灰棕荒漠土酸碱度。

研究结果表明,影响杂交饲用甜高粱产量的因素由大到小的顺序依次为:高粱专用肥>改性糠醛渣>生物菌肥。因素间最佳组合是:改性糠醛渣(0.450 0):高粱专用肥(0.450 0):生物菌肥(0.100 0)。有机营养功能型土壤改良剂不同梯度施用量与灰棕荒漠土孔隙度、团聚体、持水量、有机质、速效氮磷钾、杂交饲用甜高粱经济性状和产量呈显著的正相关关系,与灰棕荒漠土容重和pH值呈显著的负相关关系。有机营养功能型土壤改良剂施用量与杂交饲用甜高粱产量间的肥料效应回归方程式为$y=2.4400+0.1881x-0.0208x^2$。不同处理灰棕荒漠土容重和pH值由小到大的变化顺序依次为:有机营养功能型土壤改良剂

＜传统化肥＜对照;孔隙度、团聚体、持水量、有机质、速效氮磷钾、微生物、酶活性、杂交饲用甜高粱农艺性状、经济性状和产量由大到小的变化顺序依次为:有机营养功能型土壤改良剂＞传统化肥＞对照。在甘肃河西走廊的灰棕荒漠土上施用有机营养功能型土壤改良剂,有效的改善了土壤理化性质,提高了土壤持水量和杂交饲用甜高粱产量,促进了糠醛渣废弃物资源的循环利用和增值。

[参 考 文 献]

[1] 吴淑芳,吴普特,冯浩.高分子聚合物对土壤物理性质的影响研究[J].水土保持通报,2003,23(1):42-45.

[2] 汪德水,张美荣,典雄.乳化沥青作为土壤结构改良剂改土保水增产的研究[J].石油沥青,1990(3):21-24.

[3] 郭和蓉,陈琼贤,郑少玲,等.营养型土壤改良剂对酸性土壤中磷的活化及玉米吸磷的影响[J].华南农业大学学报,2004,25(1):29-32.

[4] 郭和蓉,陈琼贤,郑少玲,等.营养型土壤改良剂对酸性土壤中钾的调节及玉米吸钾量的影响[J].土壤肥料,2004(2):20-22.

[5] 周恩湘,姜淳,霍习良,等.沸石改良滨海盐化潮土的研究[J].河北农业大学学报,1991(1):14-18.

[6] 王志玉,刘作新.土壤改良剂 MDM 对草甸碱土和水稻生长的影响[J].干旱地区农业研究,2004,22(2):31-34.

[7] 秦嘉海,陈广全.改性糠醛渣混合基质在番茄无土栽培中的应用[J].中国蔬菜 1997(4):13-15.

[8] 陈世和.城市垃圾堆肥原理与工艺[M].上海:复旦大学出版社,1990:52-68.

[9] 秦嘉海,张春年.改性糠醛渣的改土增产效应[J].土壤通报,1994,25(5):237-238.

[10] 廖宗文.工业废物的农用资源化:理论、技术和实践[M].北京:中国环境科学出版社,1996:26-28.

[11] 葛均青,于贤昌,王竹红.微生物肥料效应及其应用展望[J].中国生态农业学报,2003,11(3):87-88.

[12] 高树清,王炳华,徐静,等.有机营养功能型土壤改良剂生产中发酵菌剂的选择研究[J].安徽农业科学,2010,38(14):7251-7253.

[13] 秦嘉海,金自学,刘金荣.含钾有机废弃物改性糠醛渣改良效果研究[J].土壤通报,2007,38(4):705-708.

[14] 明道绪.田间试验与统计分析[M].北京:科学出版社,2014:185-188.

[15] 中国科学院南京土壤研究所.灰棕荒漠土理化分析[M].上海:科学技术出版社,1978:110-218.

[16] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:61-66.

[17] 中国土壤学会农业化学专业委员会.灰棕荒漠土农业化学常规分析法[M].北京:科学出版社,1983:106-208.

[18] 浙江农业大学.植物营养与肥料[M].北京:中国农业出版社,1988:268-269.

[19] 陈伦寿,李仁岗.农田施肥原理与实践[M]北京:中国农业出版社,1983:185-186.

[20] 陕西省农林学校.灰棕荒漠土肥料学[M]北京:中国农业出版社,1987:227-228.

[21] 于秀林,任雪松.多元统计分析[M].北京:中国统计出版社,1999:166-170.

[22] 陕西省农林学校.灰棕荒漠土肥料学[M].北京:中国农业出版社,1987:26-27.

[23] 陆欣.灰棕荒漠土肥料学[M].北京:中国农业大学出版社,2004:50-52.

(上接第 249 页)

[12] 霍艾迪.基于 MODIS 数据的沙漠化遥感监测技术研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.

[13] Huo Aidi, Chen Xunhong, Li Hua, et al. Development and testing of a remote sensing-based model for estimating groundwater levels in aeolian desert areas of China[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011,91(1):29-37.

[14] Komarov S A, Mironov V L, Romanov A N, et al. Remote sensing of the water table: Measurement and a data processing algorithm[J]. Mapping Sciences and Remote Sensing, 1999,36(1):1-10.

[15] 刘培君,李良序.卫星遥感估测土壤水分的一种方法[J].遥感学报,1997,1(2):135-138.

[16] Lumetta R S, Knight J F, Ediriwickrema J, et al. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data[J]. Remote Sensing of Environment, 2006,105(2):142-154.

[17] 阿布都沙勒克·努尔巴衣,马木提·库尔班.策勒县绿洲—荒漠交错带生态环境特点及其保护措施[J].新疆大学学报:自然科学版,2001,21(1):45-47.

[18] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):153-159.

[19] Huo Aidi, Zhang Jia, Cheng Yuxiang, et al. Assessing the effect of scaling methods onretrieval of soil moisture based on MODIS images in arid regions[J]. Toxicological and Environmental Chemistry, 2016,98(3/4):410-418.