

有机碳土壤改良剂对风沙土改土效应的影响

肖占文¹, 闫治斌², 王学², 马世军², 闫富海², 秦嘉海²

(1. 河西学院 农业与生物技术学院, 甘肃 张掖 734000; 2. 甘肃省敦煌种业股份有限公司, 甘肃 酒泉 735000)

摘要: [目的] 合成有机碳土壤改良剂, 为河西内陆灌区制种玉米产业可持续发展提供技术支撑。[方法] 选择甘肃省张掖市甘州区的风沙土, 采用田间试验方法, 进行有机碳土壤改良剂对风沙土改土效应研究。[结果] 有机碳土壤改良剂施用量与风沙土孔隙度、团聚体、持水量、有机质、速效养分、微生物数量、酶活性和玉米产量呈正相关关系; 与体积质量、pH 值呈负相关关系。施用有机碳土壤改良剂与传统化肥比较, 风沙土体积质量、pH 值、Hg, Cd, Cr 和 Pb 分别降低 8.46%, 4.87%, 17.95%, 27.78%, 15.75% 和 18.03%; 总孔隙度、团聚体、持水量、有机质、碱解氮、速效磷和速效钾分别增加 8.15%, 23.98%, 8.15%, 3.16%, 0.10%, 2.13% 和 1.18%; 真菌、细菌、放线菌、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和玉米施肥利润分别增加 59.18%, 41.75%, 23.28%, 57.09%, 13.54%, 10.71% 和 2 180.40 元/hm²。[结论] 施用有机碳土壤改良剂, 能有效地改善风沙土理化性质和生物学性质, 提高玉米产量。

关键词: 有机碳土壤改良剂; 风沙土; 改土效应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)03-0035-08

中图分类号: S156.2

文献参数: 肖占文, 闫治斌, 王学, 等. 有机碳土壤改良剂对风沙土改土效应的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 35-42. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.006; Xiao Zhanwen, Yan Zhibin, Wang Xue, et al. Effect of organic carbon soil amendment on sandy soil improvement[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 35-42. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.006

Effect of Organic Carbon Soil Amendment on Sandy Soil Improvement

XIAO Zhanwen¹, YAN Zhibin², WANG Xue², MA Shijun², YAN Fuhai², QIN Jiahai²

(1. College of Agriculture and Biology Technology, Hexi University, Zhangye, Gansu

734000, China; 2. Gansu Dunhuang Seed Industry Co. Ltd, Jiuquan, Gansu 735000, China)

Abstract: [Objective] Organic carbon soil amendment was compounded to provide technical support for sustainable development of maize industry in Hexi irrigation area. [Methods] The study was conducted on the effect of organic carbon soil amendment on sandy soil in Ganzhou district, Zhangye City, Gansu Province through field experiment. [Results] The amount of soil organic carbon amendment was positively correlated with indices of porosity, aggregate, water holding capacity, organic matter, available nutrients, microbial biomass, enzyme activity and maize yield, while was negatively correlated with volume weight and pH value. After organic carbon amendment was applied, soil volume weight, pH value, Hg, Cd, Cr and Pb, were all decreased by 8.46%, 4.87%, 17.95%, 27.78%, 15.75% and 18.03% as compared with the effects of conventional fertilizer; indices of total porosity, aggregate, water holding capacity, organic matter, alkali-hydro nitrogen, available phosphorus and available potassium respectively increased by 8.15%, 23.98%, 8.15%, 3.16%, 0.10%, 2.13% and 1.18%; fungi, bacteria, actinomyces, sucrase, urease, phosphatase and corn fertilizing profits increased by 59.18%, 41.75%, 23.28%, 59.18%, 13.54%, 10.71% and 2, 180.40 yuan/hm², respectively. [Conclusion] The sandy soil physical and chemical properties and biological properties can be effectively improved by the application of organic carbon soil amendment, and the maize yield

收稿日期: 2016-09-13

修回日期: 2016-10-02

资助项目: 国家星火计划项目“敦玉系列玉米新品种制种及高效生产技术示范应用(2015GA860001); 甘肃省重大科技专项“机收新品种选育及机械化生产技术研发与物联网技术应用”(1602NKDF021); 甘肃省工程技术中心建设计划项目(1306NTGF020)

第一作者: 肖占文(1966—), 男(汉族), 甘肃省金塔县人, 硕士, 教授, 主要从事作物栽培与土壤改良研究。E-mail: xzw2826@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。

increased as well.

Keywords: organic carbon soil amendment; sandy soil; soil improvement

甘肃省河西内陆灌区属于干旱半干旱荒漠气候带,矿物岩石遭到物理风化后,形成了大量的风积母质,风积母质经过漫长的成土过程发育为风沙土,经调查河西内陆灌区的风沙土公布面积为 8.50×10^5 hm^2 ,武威市主要分布在凉州区、古浪和民勤县平原地带;张掖市主要分布在甘州区的西城驿、红沙窝和九龙江,临泽县的明水河及黄水沟和平川乡、高台的黑泉南部和合黎山北部;酒泉市主要分布在金塔、嘉峪关、玉门及安西和敦煌市。

有关风沙土的改良利用,前人做了大量的研究工作,孙宁川等^[1]研究了生物炭对风沙土理化性质及玉米生长的影响,研究表明风沙土施用生物炭能够通过降低土壤体积质量,提高土壤的疏松性和保水保肥性,使玉米的产量提高;陈伏生等^[2]研究了施用泥炭对风沙土改良及蔬菜生长的影响,初步认为泥炭能提高风沙土的持水能力,增加土壤有机质、全氮、速效氮和速效磷的含量,降低土壤 pH 值;马云艳等^[3]研究了泥炭和腐泥改良风沙土前后土壤理化性质比较,结果表明在风沙土中施入 8%~12% 的泥炭明显地改善土壤容重和 pH 值,增加土壤养分含量和物理性黏粒含量;杨文等^[4]研究了风沙土麻黄基地土壤培肥措施及肥料效应,发现有机肥、无机肥配施能使风沙土有机质、全量养分和速效养分含量比单施有机肥或无机肥明显升高;宋明元等^[5]研究了土壤改良措施对科尔沁风沙土保水性及玉米生长的影响,结果表明,施用黏土 360 t/hm^2 时,可以提高沙土保水性及玉米的产量;魏自民等^[6]研究了有机物料对风沙土主要物理性质的影响,结果表明施加有机物料能明显降低风沙土中沙粒的含量,提高黏粒和物理性黏粒含量和孔隙度,可以降低土壤容重;曹丽花等^[7]研究了土壤结构改良剂对风沙土水稳性团聚体改良效果及机理,结果表明,PAM, β -环糊精,沃特保水剂,腐殖酸等 4 种土壤结构改良剂可有效地降低风沙土团聚体的分形维数,改善风沙土结构,尤其沃特保水剂改良效果最明显;齐雁冰等^[8]研究了高寒地区人工植被恢复对风沙土区土壤理化性状的影响,结果表明,人工植被恢复对荒漠化土壤具有很好的改善作用,随着流动沙丘被固定,机械组成中砂粒逐渐降低,黏粒和粉粒逐渐含量逐渐提高,土壤有机质和养分含量及 CEC 逐渐提高,土壤 pH 值变化不大;摄晓燕等^[9]研究了砒砂岩改良风沙土对磷的吸附特性影响研究,结果表明,砒砂岩可显著减小风沙土对磷的吸附固定,提高磷肥的有效性,但随着植物的生长利用,各改良

土壤中吸附磷素的释放效果以及磷肥肥效的持续性有待进一步。

在风沙土改良利用研究过程中,人们采用生物炭、泥炭、腐泥、黏土、有机物料、土壤结构改良剂、砒砂岩等改良风沙土研究较多,而有机碳土壤改良剂对风沙土改土效应未见文献报道。近年来,河西内陆灌区杂交玉米制种面积逐渐扩大,常年玉米制种面积稳定在 1.20×10^5 hm^2 ^[10],分布在河西内陆灌区平原地带的风沙土被制种农户开垦后种植制种玉米,目前存在的主要问题是:风沙土质地粗,黏粒少,沙粒多,贮水能力弱,保肥能力差,有机质和速效养分含量低,制种玉米产量低而不稳,影响了制种农户和种子公司的经济效益。目前,市场上虽然有各种各样的土壤改良剂销售,但其功能单一,改土效果不太明显。因此,研究和开发集有机、营养、保水、改土为一体的有机碳土壤改良剂迫在眉睫。本文拟针对上述存在的问题,选择以土壤营养剂、聚乙稀醇、有机废弃物组合肥、保水剂为原料,采用正交试验方法确定原料最佳配合比例,合成有机碳土壤改良剂,以期为河西内陆灌区制种玉米产业可持续发展提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

1.1.1 试验地概况 试验于 2013—2015 年在甘肃省张掖市甘州区沙井镇古城村三社耕种风沙土上进行,试验地海拔高度 1 451 m, $100^{\circ}15'56''\text{E}$, $39^{\circ}05'01''\text{N}$,年平均降水量 116 mm,年平均蒸发量 1 900 mm,年平均气温 7.50°C ,全年无霜期 160 d,土壤类型是耕种风沙土^[11],0—20 cm 耕作层含有机质 13.45 g/kg,碱解氮 34.27 mg/kg,速效磷 6.14 mg/kg,速效钾 126.57 mg/kg,pH 值 8.43,全盐 18.3 g/kg,土壤质地为沙质土,前茬作物为制种玉米。

1.1.2 试验材料 尿素,含 N 46%,甘肃省刘家峡化工总厂产品;磷酸二铵,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%,兰州刘家峡化工有限公司产品;硫酸锌,含 Zn 23%,新疆先科农资有限公司产品;糠醛渣,含有机质 650 g/kg,腐殖酸 11.63%,全氮 0.61%,全磷 0.36%,全钾 1.18%,pH 值 2.1,粒径 1~2 mm,甘肃共享化工有限公司产品;腐熟牛粪,含有机质 160 g/kg,全氮 0.32%,全磷 0.25%,全钾 0.16%,粒径 1~2 mm,张掖市甘州区长安乡前进二社奶牛养殖场

产品;生物菌肥,有效活菌数 $\geq 2.0 \times 10^9$ 个/g,山东大地生物科技有限公司产品;聚乙稀醇,粒径 0.05~2 mm,兰州新型材料有限责任公司产品;保水剂,吸水倍率 645 g/g,民乐福民化工有限公司责任公司产品;土壤营养剂,自配(将尿素、磷酸二铵、硫酸锌重量比按 0.64 : 0.32 : 0.04 混合,含 N 35.20%, P_2O_5 14.72%,Zn 0.92%);有机废弃物组合肥,自配(将糠醛渣、腐熟牛粪、生物菌肥重量比按 0.60 : 0.38 : 0.02 混合,含有机质 49.80%,N 0.46%, P_2O_5

0.29%, K_2O 0.76%);玉米品系,敦玉 328(F-SQ3 \times F-28),由甘肃省敦煌种业股份有限公司研究院选育。

1.2 试验方法

1.2.1 试验处理

(1) 有机碳土壤改良剂配方筛选。2013 年 4 月 26 日选择土壤营养剂、聚乙稀醇、有机废弃物组合肥、保水剂为 4 个因素,选择正交表 $L_9(3^4)$ 设计试验^[12],则每个因素有 3 个水平,共 9 个处理(表 1),按表中用量制成 9 种有机碳土壤改良剂。

表 1 $L_9(3^4)$ 正交试验设计与分析

试验处理	有机碳土壤改良剂成分				产量/ (t \cdot hm ⁻²)
	A	B	C	D	
1=A ₁ B ₁ C ₁ D ₃	(0.75)1	(0.05)1	(22.50)1	(0.09)3	4.55
2=A ₁ B ₂ C ₂ D ₂	(0.75)1	(0.10)2	(45.00)2	(0.06)2	5.82
3=A ₁ B ₃ C ₃ D ₁	(0.75)1	(0.15)3	(67.50)3	(0.03)1	4.93
4=A ₂ B ₁ C ₂ D ₃	(1.50)2	(0.05)1	(45.00)2	(0.09)3	5.46
5=A ₂ B ₂ C ₃ D ₂	(1.50)2	(0.10)2	(67.50)3	(0.06)2	6.72
6=A ₂ B ₃ C ₁ D ₁	(1.50)2	(0.15)3	(22.50)1	(0.03)1	6.37
7=A ₃ B ₁ C ₃ D ₃	(2.25)3	(0.05)1	(67.50)3	(0.09)3	6.51
8=A ₃ B ₂ C ₁ D ₂	(2.25)3	(0.10)2	(22.50)1	(0.06)2	6.53
9=A ₃ B ₃ C ₂ D ₁	(2.25)3	(0.15)3	(45.00)2	(0.03)1	5.87
T ₁	15.30	15.52	17.45	17.17	52.76
T ₂	18.55	19.07	17.15	19.07	
T ₃	18.92	17.17	18.16	16.52	
R	3.62	3.55	1.01	2.55	

注:A 为土壤营养剂;B 为聚乙稀醇;C 为有机废弃物组合肥;D 为保水剂;括号内数据为试验观测数据(t/hm²),括号外数字为正交试验编码值。

(2) 不同剂量有机碳土壤改良剂对风沙土理化性质和玉米效益影响的研究。有机碳土壤改良剂合成:2014 年 4 月 26 日依据试验一筛选的配方,将土壤营养剂、聚乙稀醇、有机废弃物组合肥、保水剂重量比按 32.20 : 1.40 : 965.50 : 0.90 混合,得到有机碳土壤改良剂产品,经室内测定,含有机质 48.09%,N 1.57%, P_2O_5 0.75%,Zn 0.03%。

试验处理:有机碳土壤改良剂施用量梯度设计为 0(CK),14,28,42,56,70,84 t/hm² 共 7 个处理,以处理 1 不施肥为对照(CK),每个处理重复 3 次,随机区组排列。

(3) 有机碳土壤改良剂与传统化肥比较试验。2015 年 4 月 26 日在纯 N(0.44 t/hm²)和纯 P_2O_5 (0.21 t/hm²)投入量相等的条件下,试验设 3 个处理。处理 1:对照(CK,不施氮、磷、钾肥);处理 2:传统化肥(尿素 0.78 t/hm²+磷酸二铵 0.46 t/hm²);处理 3:有机碳土壤改良剂施用量 28 t/hm²。每个处理重复 3 次,随机区组排列。

1.2.2 种植方法 试验小区面积为 40 m²(8 m \times

5 m),每个小区四周筑埂,埂宽 40 cm,埂高 30 cm,试验地 4 周种植保护行,磷酸二铵、有机碳土壤改良剂在播种前施入 0—20 cm 耕作层做肥底,尿素分别在玉米拔节期、大喇叭口期和开花期结合灌水追施,追肥方法为穴施,播种时间为 2013,2014,2015 每年的 4 月 26 日,母本株距 22 cm,父母本行距 50 cm,按照 1 行父本,6 行母本的比例方式播种。在玉米拔节期、大喇叭口期、开花期、乳熟期、灌浆期分别进行 1 次等量的灌水,施肥灌水需在同一天内进行,其他与常规制种方法相同。

1.2.3 测定指标与方法 玉米收获时在试验小区内按对角线布 5 个点,每个点按顺序采集 10 株,测定株高、茎粗、地上部分干重、根系干重、穗粒数、穗粒重和百粒重。秆茎粗用游标卡尺测量,地上部分和根系干重采用 105 ℃烘箱杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重后称重。每个试验小区单独收获,将小区产量折合成 1 hm²产量进行统计分析。玉米收获以后,分别在试验小区内按对角线布点,采集 0—20 cm 耕作层土样 5 kg,用四分法带回 1 kg 混合土样,风干 15 d,过

1 mm筛供室内化验分析,其中土壤体积质量、团聚体测定用环刀采集原状土,未进行风干。土壤体积质量采用环刀法测定;土壤孔隙度采用计算法求得; >0.25 mm 团聚体采用干筛法测定;有机质采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定;碱解氮采用扩散法测定;速效磷采用 NaHCO_3 浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾采用 NH_4OAc_3 浸提—火焰光度法测定;pH 值采用 5:1 水土比浸提,用 pH-2F 数字酸度计测定,饱和持水量按公式(饱和持水量=面积×总孔隙度×土层深度)求得;毛管持水量按公式(毛管持水量=面积×毛管孔隙度×土层深度)求得;非毛管持水量按公式(非毛管持水量=面积×非毛管孔隙度×土层深度)求得;Cd 采用石墨炉原子吸收分光光度法测定;Hg 采用冷原子—荧光光谱法测定;Pb 采用火焰原子吸收分光光度法测定;Cr 采用分光光度法测定^[13-14];微生物数量采用稀释平板法;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^[15];边际产量按公式(每增加一个单位肥料用量时所得到的产量减前一个处理的产量)求得;边际产值按公式(边际产量×产品价格)求得;边际成本按公式(边际施肥量×肥料价格)求得;边际利润按公式(边际产值减边际成本)求得;边际施肥量按公式(后一个处理施肥量减前一个处理施肥量)求得^[16]。

1.2.4 数据处理方法 有机碳土壤改良剂因素间的效应(R)和各因素的 T 值采用正交试验直观分析方法求得。土壤理化性质、微生物数量、酶活性、重金属离子、玉米农艺性状、经济性状和产量等数据采用 DPSS 10.0 统计软件分析,差异显著性采用多重比较,LSR 检验。有机碳土壤改良剂最佳施用量按公式 $x_0 = [(P_x/P_y) - b]/2c$ 求得^[17],玉米理论产量按肥料效应回归方程式 $y = a + bx + cx^2$ 求得^[18]。

2 结果分析

2.1 有机碳土壤改良剂配方确定

2013 年 9 月 26 日玉米收获后测定数据采用正交试验分析可知,不同因素间的效应(R)是 $A > B > D > C$,说明影响玉米产量的因素依次是:土壤营养剂($R = 3.62$) $>$ 聚乙稀醇($R = 3.55$) $>$ 保水剂($R = 2.55$) $>$ 有机废弃物组合肥($R = 1.01$)。比较各因素不同水平的 T 值可以看出, $T_{A_3} > T_{A_2} > T_{A_1}$,说明随着土壤营养剂施用量梯度的增加,玉米产量在增加,土壤营养剂适宜用量一般为 2.25 t/hm^2 ; $T_{B_2} > T_{B_3} > T_{B_1}$ 说明玉米产量随着聚乙稀醇施用量梯度的增大而增加,当聚乙稀醇施用量超过 0.10 t/hm^2 ,玉米产量又随聚

乙稀醇施用量的增大而降低; $T_{C_3} > T_{C_1}$ 和 T_{C_2} ,说明随着有机废弃物组合肥施用量梯度的增加,玉米产量在增加,有机废弃物组合肥适宜用量一般为 67.50 t/hm^2 ; $T_{D_2} > T_{D_1}$ 和 T_{D_3} ,说明玉米产量随保水剂施用量梯度的增大而增加,当保水剂施用量超过 0.06 t/hm^2 ,玉米产量又随保水剂施用量梯度的增大而降低。从各因素的 T 值可以看出,有机碳土壤改良剂因素间最佳组合为: A_3 (土壤营养剂 2.25 t/hm^2), B_2 (聚乙稀醇 0.10 t/hm^2), C_3 (有机废弃物组合肥 67.50 t/hm^2), D_2 (保水剂 0.06 t/hm^2),将土壤营养剂、聚乙稀醇、有机废弃物组合肥、保水剂重量比按 $0.032 2 : 0.001 4 : 0.965 5 : 0.000 9$ 混合,得到有机碳土壤改良剂产品(表 1)。

2.2 不同剂量有机碳土壤改良剂对风沙土物理性质和持水量的影响

由 2014 年 9 月 26 日玉米收获后测定数据可知,随着有机碳土壤改良剂施用量梯度的增加,风沙土体积质量下降,体积质量最小的是有机碳土壤改良剂施用量 84 t/hm^2 ,与 CK 比较,体积质量降低 5.96% ,差异极显著($p < 0.01$)。经相关分析,有机碳土壤改良剂与风沙土体积质量之间呈显著的负相关关系,相关系数(R)为 -0.988 (表 2)。

从表 2 看出,有机碳土壤改良剂施用量与风沙土总孔隙度、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 0.987 、 0.971 和 0.987 。孔隙度最大的是有机碳土壤改良剂施用量 84 t/hm^2 ,与 CK 比较,总孔隙度和毛管孔隙度分别增加 7.88% 和 10.19% ,差异极显著($p < 0.01$);非毛管孔隙度增加 5.60% ,差异显著($p < 0.05$)。

有机碳土壤改良剂施用量与团聚体之间呈显著的正相关关系,相关系数(R)为 0.933 。团聚体最大的是有机碳土壤改良剂施用量为 84 t/hm^2 ,与 CK 比较,团聚体增加 10.17% ,差异极显著($p < 0.01$)。

有机碳土壤改良剂施用量与风沙土饱和持水量、毛管持水量和非毛管持水量之间呈显著的正相关关系,相关系数(R)分别为 0.986 、 0.971 和 0.987 。持水量最大的是有机碳土壤改良剂施用量为 84 t/hm^2 ,与 CK 比较,饱和持水量和毛管持水量分别增加 7.88% 和 10.19% ,差异极显著($p < 0.01$);非毛管持水量增加 5.60% ,差异显著($p < 0.05$)。

2.3 不同剂量有机碳土壤改良剂对风沙土有机质及速效养分和 pH 值的影响

由表 2 可知,随着有机碳土壤改良剂施用量梯度的增加,风沙土有机质在增加,有机质含量最高的是有机碳土壤改良剂施用量 84 t/hm^2 ,与 CK 比较,有

机质增加 1.48 g/kg,差异极显著($p < 0.01$)。经相关分析,有机碳土壤改良剂施用量与有机质之间呈显著的正相关关系,相关系数(R)为 0.914。有机碳土壤改良剂施用量与风沙土碱解氮、速效磷和速效钾之间呈显著的正相关关系,相关系数(R)分别为 0.988, 0.996和 0.964。碱解氮、速效磷和速效钾含量最高的是有机碳土壤改良剂施用量 84 t/hm²,与 CK 比

较,碱解氮、速效磷和速效钾分别增加 29.18%, 23.94%和 12.65%,差异极显著($p < 0.01$)。随着有机碳土壤改良剂施用量梯度的增加,风沙土 pH 值在降低,pH 值最小的是有机碳土壤改良剂施用量 84 t/hm²,与 CK 比较,pH 降低 0.12,差异极显著($p < 0.01$)。经相关分析,有机碳土壤改良剂与风沙土 pH 值之间呈显著的负相关关系,相关系数为-0.993。

表 2 不同剂量有机碳土壤改良剂对风沙土理化性质及持水量和速效养分的影响

施用量/ (t·hm ⁻²)	体积质量/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度/ 度/%	毛管孔隙度/ 度/%	非毛管孔隙度/ 度/%	>0.25 mm 团聚体/%	饱和持水量/ (t·hm ⁻²)	毛管持水量/ (t·hm ⁻²)	非毛管持水量/ (t·hm ⁻²)	pH 值	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(CK)	1.51 ^{aA}	43.02 ^{FD}	21.59 ^{cC}	21.43 ^{bA}	36.29 ^{dB}	860.40 ^{FD}	431.80 ^{cC}	428.60 ^{bA}	8.43 ^{aA}	13.45 ^{dB}	34.27 ^{cC}	6.14 ^{eB}	126.57 ^{FC}
14	1.49 ^{bb}	43.78 ^{FD}	22.13 ^{bb}	21.65 ^{bA}	37.12 ^{cB}	875.60 ^{FD}	442.60 ^{bB}	433.00 ^{bA}	8.40 ^{aA}	14.03 ^{cA}	36.85 ^{dB}	6.45 ^{fB}	132.21 ^{cB}
28	1.48 ^{bb}	44.15 ^{cC}	22.35 ^{bb}	21.80 ^{bA}	38.34 ^{bb}	883.00 ^{cC}	447.00 ^{bB}	436.00 ^{bA}	8.39 ^{bA}	14.29 ^{cA}	38.39 ^{cA}	6.67 ^{eB}	133.56 ^{cB}
42	1.46 ^{cC}	44.91 ^{cC}	22.99 ^{bb}	21.92 ^{bA}	38.42 ^{bb}	898.20 ^{cC}	459.80 ^{bB}	438.40 ^{bA}	8.37 ^{cA}	14.44 ^{cA}	39.58 ^{cA}	6.95 ^{dB}	136.29 ^{dB}
56	1.44 ^{dD}	45.66 ^{bb}	23.40 ^{aA}	22.26 ^{aA}	38.49 ^{aB}	913.20 ^{bB}	468.00 ^{aA}	445.20 ^{aA}	8.35 ^{dA}	14.73 ^{bA}	40.79 ^{cA}	7.19 ^{eA}	139.07 ^{cB}
70	1.43 ^{dE}	46.04 ^{aA}	23.67 ^{aA}	22.37 ^{aA}	39.76 ^{aA}	920.80 ^{aA}	473.40 ^{aA}	447.40 ^{aA}	8.33 ^{cA}	14.75 ^{bA}	42.49 ^{bA}	7.38 ^{bA}	140.48 ^{bA}
84	1.42 ^{dE}	46.41 ^{aA}	23.79 ^{aA}	22.63 ^{aA}	39.98 ^{aA}	928.20 ^{aA}	475.80 ^{aA}	452.60 ^{aA}	8.31 ^{fA}	14.93 ^{aA}	44.27 ^{aA}	7.61 ^{aA}	142.58 ^{aA}

注:同列不同大写字母表示在 $p < 0.01$ 水平上差异显著;小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

2.4 不同剂量有机碳土壤改良剂对风沙土微生物和酶活性的影响

从表 3 看出,随着有机碳土壤改良剂施用量梯度的增加,风沙土微生物数量在递增,微生物数量最多的是有机碳土壤改良剂施用量 84 t/hm²,与 CK 比较,真菌、细菌、放线菌和菌体总量分别增加 154.17%,35.89%,90.28%和 56.61%,差异极显著($p < 0.01$)。经相关分析,有机碳土壤改良剂施用量与风沙土菌体总量、真菌、放线菌、细菌之间呈显著的

正相关关系,相关系数(R)分别为 0.996,0.966, 0.994和 0.986。

随着有机碳土壤改良剂施用量梯度的增加,风沙土酶活性在递增,酶活性最大的是有机碳土壤改良剂施用量 84 t/hm²,与 CK 比较,蔗糖酶、脲酶和磷酸酶分别增加 3.03,1.52 和 1.69 倍,差异极显著($p < 0.01$)。经相关分析,有机碳土壤改良剂施用量与蔗糖酶、脲酶和磷酸酶呈线性正相关关系,相关系数(R)分别为 0.995,0.997 和 0.996。

表 3 不同剂量有机碳土壤改良剂对风沙土土壤微生物和酶活性的影响

施用量/ (t·hm ⁻²)	真菌/ (10 ⁴ g ⁻¹)	细菌/ (10 ⁷ g ⁻¹)	放线菌/ (10 ⁷ g ⁻¹)	菌体总量/ (10 ⁷ g ⁻¹)	蔗糖酶/ (mg·g·d ⁻¹)	脲酶/ (mg·kg·h ⁻¹)	磷酸酶/ (g·kg·d ⁻¹)
0	0.96 ^{eG}	1.17 ^{gC}	0.72 ^{gG}	1.89 ^{eF}	2.63 ^{gG}	1.30 ^{eE}	0.26 ^{eF}
14	1.22 ^{fF}	1.21 ^{fc}	0.78 ^{fF}	1.99 ^{fF}	3.12 ^{fF}	1.37 ^{fE}	0.28 ^{fF}
28	1.54 ^{eE}	1.30 ^{eB}	0.89 ^{eE}	2.19 ^{eE}	4.22 ^{eE}	1.51 ^{eD}	0.31 ^{eE}
42	1.76 ^{bD}	1.38 ^{dA}	1.01 ^{dD}	2.39 ^{dD}	5.32 ^{dD}	1.64 ^{dC}	0.35 ^{dD}
56	1.99 ^{cC}	1.44 ^{cA}	1.14 ^{cC}	2.58 ^{cC}	6.18 ^{cC}	1.74 ^{cB}	0.38 ^{cC}
70	2.23 ^{bb}	1.51 ^{bA}	1.25 ^{bb}	2.76 ^{bb}	6.96 ^{bb}	1.86 ^{bA}	0.41 ^{bb}
84	2.44 ^{aA}	1.59 ^{aA}	1.37 ^{aA}	2.96 ^{aA}	7.97 ^{aA}	1.97 ^{aA}	0.44 ^{aA}

2.5 不同剂量有机碳土壤改良剂对玉米经济性状及产量和经济效益的影响

由 2014 年 9 月 26 日玉米收获后测定数据(表 4)可知,随着有机碳土壤改良剂施用量梯度的增加,玉米经济性状和产量在递增,玉米穗粒数、穗粒重、百粒重和产量最高的是有机碳土壤改良剂施用量 84 t/hm²,与 CK 比较,分别增加 31.73%,67.29%,

29.35%和 25.43%,差异极显著($p < 0.01$)。经相关分析,有机碳土壤改良剂施用量与穗粒数、穗粒重、百粒重和产量之间呈显著的正相关关系,相关系数(R)分别为 0.978,0.969,0.908 和 0.846。

从表 4 可以看出,随着有机碳土壤改良剂施用量梯度的增加,玉米边际利润由最初的 3 230.20 元/hm²,递减到-1 569.80 元/hm²。有机碳土壤改

良剂施用量大于 28 t/hm² 时, 边际利润出现负值。由此可见, 有机碳土壤改良剂适宜施用量一般为 28 t/hm² 时, 玉米经济效益较好。将表 4 有机碳土壤改良剂施用量与玉米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:

$$y = 5.78000 + 0.03516x - 0.00005x^2 \quad (1)$$

对回归方程进行显著性测验结果表明回归方程

拟合良好。有机碳土壤改良剂价格 (P_x) 为 259.23 元/t, 2014 年制种玉米市场平均价格 (P_y) 为 8 000 元/t, 将 (P_x)、(P_y)、回归方程的参数 b 和 c , 代入经济效益最佳施用量计算公式 $x_0 = [(P_x/P_y) - b]/2c$, 求得有机碳土壤改良剂经济效益最佳施肥量 (x_0) 为 27.60 t/hm², 将 x_0 代入 (1) 式, 求得玉米理论产量 (y) 为 6.71 t/hm², 回归分析结果与田间试验处理 3 基本吻合。

表 4 不同剂量有机碳土壤改良剂对玉米经济性状及产量和经济效益的影响

施用量/ (t · hm ⁻²)	穗粒数/ 粒	穗粒重/ g	百粒重/ g	产量/ (t · hm ⁻²)	增产率/ %	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	249.00 ^{gF}	69.94 ^{gE}	27.43 ^{gB}	5.78 ^{gC}					
14	272.00 ^{gE}	86.12 ^{gD}	30.98 ^{gA}	6.38 ^{gB}	10.38	0.65	5 200.00	1 969.80	3 230.20
28	282.00 ^{gD}	91.72 ^{gC}	31.85 ^{gA}	6.78 ^{gB}	17.30	0.40	3 200.00	1 969.80	1 230.20
42	290.00 ^{gC}	94.54 ^{gC}	31.94 ^{gA}	7.01 ^{gA}	21.28	0.23	1 840.00	1 969.80	-129.80
56	304.00 ^{gC}	102.44 ^{gB}	32.94 ^{gA}	7.11 ^{gA}	23.01	0.10	800.00	1 969.80	-1 169.80
70	314.00 ^{gB}	111.36 ^{gA}	34.69 ^{gA}	7.20 ^{gA}	24.56	0.09	720.00	1 969.80	-1 249.80
84	323.00 ^{gA}	117.10 ^{gA}	35.48 ^{gA}	7.25 ^{gA}	25.43	0.05	400.00	1 969.80	-1 569.80

注: 价格(元/t): 尿素 2 000; 磷酸二铵 4 000; 硫酸锌 4 000; 改性糠醛渣 60; 腐熟牛粪 65; 生物菌肥 4 000; 聚乙稀醇 23 000; 保水剂 4 000; 土壤营养剂 2 720(尿素、磷酸二铵、硫酸锌重量比按 0.640 0 : 0.320 0 : 0.040 0 混合); 有机废弃物组合肥 140.70(改性糠醛渣、腐熟牛粪、生物菌肥重量比按 0.60 : 0.38 : 0.02 混合); 有机碳土壤改良剂 259.23(土壤营养剂、聚乙稀醇、有机废弃物组合肥、保水剂重量比按 0.032 2 : 0.001 4 : 0.965 5 : 0.000 9 混合)。

2.6 有机碳土壤改良剂与传统化肥对比对风沙土物理性质和总持水量的影响

由 2015 年 9 月 26 日玉米收获后采集耕作层 0—20 cm 土样测定结果可知, 不同处理风沙土体积质量由大到小的变化顺序依次为: CK > 传统化肥 > 有机碳土壤改良剂, 施用有机碳土壤改良剂与传统化肥和 CK 比较, 体积质量分别降低 8.46% 和 9.84%, 差异显著 ($p < 0.05$); 施用传统化肥与 CK 比较, 体积质量降低 1.52%, 差异不显著 ($p > 0.05$) (表 5)。

从表 5 看出, 不同处理风沙土总孔隙度、团聚体和总持水量由大到小的变化顺序为: 有机碳土壤改良剂 > 传统化肥 > CK。施用有机碳土壤改良剂与传统化肥和 CK 比较, 总孔隙度分别增加 8.15% 和 9.76%, 团聚体分别增加 23.98% 和 25.19%, 总持水量分别增加 8.15% 和 9.76%, 差异极显著 ($p < 0.01$)。施用传统化肥与 CK 比较, 总孔隙度、团聚体和总持水量分别增加 1.49%, 0.98% 和 1.49%, 差异不显著 ($p > 0.05$)。

表 5 有机碳土壤改良剂与传统化肥对比对土壤物理性质和总持水量的影响

试验处理	体积质量/ (g · cm ⁻³)	总孔隙度/ %	>0.25 mm 团聚体/%	总持水量/ (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)	pH 值
CK(不施肥)	1.32 ^{aA}	50.19 ^{bb}	34.69 ^{bb}	1003.80 ^{bb}	11.35 ^{bA}	66.43 ^{bb}	13.65 ^{bb}	145.36 ^{bb}	8.45 ^{aA}
传统化肥	1.30 ^{aA}	50.94 ^{bb}	35.03 ^{bb}	1018.80 ^{bb}	11.38 ^{bA}	108.98 ^{aA}	15.04 ^{aA}	164.08 ^{aA}	8.42 ^{aA}
有机碳土壤改良剂	1.19 ^{bb}	55.09 ^{aA}	43.43 ^{aA}	1101.80 ^{aA}	11.74 ^{aA}	109.09 ^{aA}	15.36 ^{aA}	166.03 ^{aA}	8.01 ^{bA}

2.7 有机碳土壤改良剂与传统化肥对比对风沙土有机质及速效养分和 pH 值的影响

由表 5 可知, 不同处理风沙土有机质由大到小的变化顺序为: 有机碳土壤改良剂 > 传统化肥 > CK。施用有机碳土壤改良剂与传统化肥和 CK 比较, 有机质分别增加 3.16% 和 3.44%, 差异显著 ($p < 0.05$); 施用传统化肥与 CK 比较, 有机质增加 0.26%, 差异不显著 ($p > 0.05$)。不同处理风沙土碱解氮、速效磷和速效钾变化顺序与有机质的变化一致。施用有机

碳土壤改良剂与传统化肥比较, 碱解氮、速效磷和速效钾分别增加 0.10%, 2.13% 和 1.18%, 差异不显著 ($p > 0.05$), 与 CK 比较, 碱解氮、速效磷和速效钾分别增加 64.22%, 12.53% 和 14.22%, 差异极显著 ($p < 0.01$); 施用传统化肥与 CK 比较, 碱解氮、速效磷和速效钾分别增加 64.05%, 10.18% 和 12.88%, 差异极显著 ($p < 0.01$)。不同处理风沙土 pH 值由大到小的变化顺序为: CK > 传统化肥 > 有机碳土壤改良剂。施用有机碳土壤改良剂与传统化肥和 CK 比较,

pH 值分别降低 4.87% 和 5.21%，差异显著 ($p < 0.05$)；施用传统化肥与 CK 比较，pH 降低 0.36%，差异不显著 ($p > 0.05$)。

2.8 有机碳土壤改良剂与传统化肥对比对风沙土微生物及酶活性和重金属离子的影响

由表 6 可知，不同处理风沙土微生物数量由大到小的变化顺序为：有机碳土壤改良剂 > 传统化肥 > CK。施用有机碳土壤改良剂与传统化肥比较，真菌、细菌和放线菌分别增加 59.18%，41.75% 和 23.28%，差异极显著 ($p < 0.01$)，与 CK 比较，真菌、细菌和放线菌分别增加 60.82%，44.94% 和 28.57%，差异极显著 ($p < 0.01$)；施用传统化肥与 CK 比较，真菌、细菌和放线菌分别增加 1.03%，2.25% 和 4.28%，差异不显著 ($p > 0.05$)。不同处理风沙土酶活性由大到小的变化顺序与微生物的变化一致。施用有机碳土壤改良剂与传统化肥比较，蔗糖

酶、脲酶和磷酸酶分别增加 57.09%，13.54% 和 10.71%，差异极显著 ($p < 0.01$)，与 CK 比较，蔗糖酶、脲酶和磷酸酶分别增加 60.07%，15.27% 和 14.82%，差异极显著 ($p < 0.01$)；施用传统化肥与 CK 比较，蔗糖酶、脲酶和磷酸酶分别增加 1.90%，1.53% 和 3.70%，差异不显著 ($p > 0.05$)。

不同处理风沙土重金属离子由大到小的变化顺序为：传统化肥 > 有机碳土壤改良剂 > CK。施用传统化肥与有机碳土壤改良剂比较，重金属离子 Hg、Cd、Cr 和 Pb 分别增加了 21.88%，38.46%，18.70% 和 22.01%，差异极显著 ($p < 0.01$)，与 CK 比较，Hg、Cd、Cr 和 Pb 分别增加了 25.81%，42.11%，19.02% 和 22.97%，差异极显著 ($p < 0.01$)；施用有机碳土壤改良剂与 CK 比较，Hg、Cd、Cr 和 Pb 分别增加了 3.22%，2.63%，0.26% 和 0.79%，差异不显著 ($p > 0.05$)。

表 6 有机碳土壤改良剂与传统化肥对比对风沙土微生物及酶活性和重金属离子的影响

试验处理	真菌/ (10^4 g^{-1})	细菌/ (10^7 g^{-1})	放线菌/ (10^7 g^{-1})	蔗糖酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)	脲酶/ ($\text{mg} \cdot \text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	磷酸酶/ ($\text{g} \cdot \text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)	Hg/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Cd/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Cr/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Pb/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK (不施肥)	0.97 ^{bb}	0.89 ^{bb}	0.70 ^{bb}	2.63 ^{bb}	1.31 ^{cb}	0.27 ^{cb}	0.31 ^{db}	0.38 ^{bb}	23.47 ^{bb}	7.62 ^{bb}
传统化肥	0.98 ^{bb}	0.91 ^{bb}	0.73 ^{bb}	2.68 ^{bb}	1.33 ^{bb}	0.28 ^{bb}	0.39 ^{aa}	0.54 ^{aa}	27.93 ^{aa}	9.37 ^{aa}
有机碳土壤改良剂	1.56 ^{aa}	1.29 ^{aa}	0.90 ^{aa}	4.21 ^{aa}	1.51 ^{aa}	0.31 ^{aa}	0.32 ^{bb}	0.39 ^{bb}	23.53 ^{bb}	7.68 ^{bb}

2.9 有机碳土壤改良剂与传统化肥对比对玉米农艺性状及经济性状和效益的影响

由 2015 年 9 月 26 日玉米收获时测定结果(表 7)可知，不同处理农艺性状由大到小的变化顺序为：有机碳土壤改良剂 > 传统化肥 > CK。有机碳土壤改良剂与传统化肥比较，株高和生长速度分别增加 3.59% 和 3.60%，差异显著 ($p < 0.05$)，茎粗增加 9.65%，差异极显著 ($p < 0.01$)；与 CK 比较，株高、茎粗和生长速度分别增加 17.44%，26.39% 和 17.07%，差异极显著 ($p < 0.01$)。不同处理经济性状由大到小的变化

顺序与农艺性状的变化一致。有机碳土壤改良剂与传统化肥比较，穗粒数增加 6.25%，差异显著 ($p < 0.05$)，穗粒重增加 11.38%，差异极显著 ($p < 0.01$)，百粒重增加 4.83%，差异不显著 ($p > 0.05$)；与 CK 比较，穗粒数、穗粒重和百粒重分别增加 21.62%，35.89% 和 11.75%，差异极显著 ($p < 0.01$)。不同处理玉米产量、增产值和施肥利润由大到小的变化顺序与经济性状的变化一致。有机碳土壤改良剂与传统化肥比较，玉米产量增加 5.22%，差异显著 ($p < 0.05$)，增产值和施肥利润分别增加 2 720, 2 180.40 元/hm²。

表 7 有机碳土壤改良剂与传统化肥对比对玉米农艺性状及经济性状和效益的影响

试验处理	株高/ m	茎粗/ mm	生长速度/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	穗粒数/ 粒	穗粒重/ g	百粒重/ g	产量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	增产值/ (元 · hm ⁻²)	施肥成本/ (元 · hm ⁻²)	施肥利润/ (元 · hm ⁻²)
CK (不施肥)	1.72 ^{cb}	11.17 ^{cc}	1.23 ^{cb}	195.69 ^{cc}	55.48 ^{cc}	28.35 ^{bb}	5.04 ^{cb}			
传统化肥	1.95 ^{ba}	18.35 ^{bb}	1.39 ^{ba}	224.00 ^{bb}	67.69 ^{bb}	30.22 ^{aa}	6.51 ^{ba}	11 760.00	3 400.00	8 360.00
有机碳土壤改良剂	2.02 ^{aa}	20.12 ^{aa}	1.44 ^{aa}	238.00 ^{aa}	75.39 ^{aa}	31.68 ^{aa}	6.85 ^{aa}	14 480.00	3 939.60	10 540.40

3 讨论与结论

风沙土施用有机碳土壤改良剂后，土壤体积质量降低，孔隙度增大，究其原因有机碳土壤改良剂中的有机质使土壤疏松，增大了总孔隙度，降低了体积质量。施用有机碳土壤改良剂土壤团聚体在递增，分

析这一结果产生的原因是有机碳土壤改良剂中的糠醛渣和牛粪，在土壤微生物的作用下合成了腐殖质促进了土壤团聚体的形成^[19-23]。施用有机碳土壤改良剂土壤饱和和持水量在增加，这种变化规律与有机碳土壤改良剂中的保水剂有关。施用有机碳土壤改良剂后土壤速效氮和磷在增加，究其原因有机碳土壤改

良剂中的土壤营养剂含有丰富的氮和磷。施用有机碳土壤改良剂后土壤 pH 值有所降低,究其原因有机碳土壤改良剂中的糠醛渣含残余硫酸 3%~5%,降低了土壤的酸碱度。施用有机碳土壤改良剂后,风沙土微生物和酶活性有所增加,究其原因有机碳土壤改良剂含有有机质及氮磷钾和锌元素,促进了微生物的繁殖和生长发育,提高了土壤酶的活性^[24]。施用传统化肥与有机碳土壤改良剂比较,重金属离子 Hg, Cd, Cr 和 Pb 含量分别增加 21.88%, 38.46%, 18.70% 和 22.01%, 这与长期施用化学肥料有关^[25-26], 土壤中重金属离子富集与施用化学肥料有关,长期施用磷肥土壤 Cd 含量偏高,可能影响土壤的环境质量。

研究表明:影响玉米产量因素由大到小的顺序依次为:土壤营养剂($R=3.62$)>聚乙稀醇($R=3.55$)>保水剂($R=2.55$)>有机废弃物组合肥($R=1.01$)。有机碳土壤改良剂配方为:土壤营养剂:聚乙稀醇:有机废弃物组合肥:保水剂=0.032 2:0.001 4:0.965 5:0.000 9。不同剂量的有机碳土壤改良剂与风沙土总孔隙度、团聚体、饱和持水量、有机质、速效氮磷钾、玉米农艺性状、经济性状和产量呈正相关关系;与风沙土体积质量、pH 呈负相关关系。有机碳土壤改良剂施用量与玉米产量间的回归方程为: $y=5.780 00+0.035 16 x-0.000 05 x^2$, 最佳施用量为 27.60 t/hm², 玉米理论产量为 6.71 t/hm²。不同处理风沙土体积质量和 pH 值由大到小的变化顺序依次为:CK>传统化肥>有机碳土壤改良剂;重金属离子 Hg, Cd, Cr, Pb 含量由大到小变化的顺序依次为:传统化肥>有机碳土壤改良剂>CK;团聚体、饱和持水量、有机质、速效氮磷钾、微生物数量、酶活性、玉米农艺性状、经济性状和产量由大到小的变化顺序为:有机碳土壤改良剂>传统化肥>CK。在风沙土上施用有机碳土壤改良剂,有效地改善了土壤理化性质和生物学性质,提高了土壤持水量和有机质含量。

[参 考 文 献]

- [1] 孙宁川,唐光木,刘会芳,等.生物炭对风沙土理化性质及玉米生长的影响[J].西北农业学报,2016,25(2):209-214.
- [2] 陈伏生,王桂荣,张春兴,等.施用泥炭对风沙土改良及蔬菜生长的影响[J].生态学杂志,2003,22(4):16-19.
- [3] 马云艳,赵红艳,严啸,等.泥炭和腐泥改良风沙土前后土壤理化性质比较[J].吉林农业科学,2009,34(6):40-44.
- [4] 杨文,童云峰,马涛,等.风沙土麻黄基地土壤培肥措施及肥料效应研究[J].草业科学,2005,25(8):19-25.
- [5] 宋明元,吕貽忠.土壤改良措施对科尔沁风沙土保水性及玉米生长的影响[J].干旱区资源与环境,2016,30(1):180-184.
- [6] 魏自民,谷思玉,赵越,等.有机物料对风沙土主要物理性质的影响[J].吉林农业科学,2003,28(3):16-18.
- [7] 曹丽花,赵世伟,赵勇钢,等.土壤结构改良剂对风沙土水稳性团聚体改良效果及机理的研究[J].水土保持学报,2007,21(2):65-68.
- [8] 齐雁冰,常庆瑞,魏欣,等.高寒地区人工植被恢复对风沙土区土壤理化性状的影响[J].中国农学通报,2005,21(8):404-408.
- [9] 掇晓燕,魏孝荣,马天娥,等.砒砂岩改良风沙土对磷的吸附特性影响研究[J].植物营养与肥料学报,2015,21(5):1373-1380.
- [10] 佟屏亚.河西地区玉米制种基地考察报告[J].种子世界,2005(5):4-8.
- [11] 秦嘉海,吕彪.河西土壤与合理施肥[M].兰州:兰州大学出版社,2001:150-155.
- [12] 明道绪.田间试验与统计分析[M].北京:科学出版社,2014:185-188.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:科学技术出版社,1978:110-218.
- [14] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤农业化学常规分析法[M].北京:科学出版社,1983:106-208.
- [15] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 石辉.转移矩阵法评价土壤团聚体稳定性[J].水土保持通报,2006,26(3):91-95.
- [20] 王荫槐.土壤肥料学[M].北京:中国农业出版社,2001:30-31.
- [21] 刘玉环,赵静,秦嘉海,等.功能性生物活性肥配方筛选及对土壤理化性质和马铃薯经济效益的影响[J].土壤,2014,46(3):572-576.
- [22] 陕西省农林学校.土壤肥料学[M].北京:中国农业出版社,1987:26-27.
- [23] 陆欣.土壤肥料学[M].北京:中国农业出版社,2004:50-52.
- [24] 程红玉,肖占文,秦嘉海,等.连作对制种玉米田土壤养分和土壤酶活性的影响[J].土壤,2013,45(4):623-627.
- [25] 林葆.化肥与无公害农业[M].北京:北京农业出版社,2003:13-95.
- [26] 李生秀.植物营养与肥料学科的现状与展望[J].植物营养肥料学报,1999,5(3):193-205.