

糠醛渣生态肥对风沙土理化性质和茄子效益的影响^①

李世风^{1,3}, 秦超², 闫刚⁴, 桑召¹, 陈修斌^{1*}

(1 河西学院农业与生物技术学院, 甘肃张掖 734000; 2 张掖市水务局, 甘肃张掖 734000;

3 甘肃省敦煌种业股份有限公司, 甘肃酒泉 735000; 4 嘉峪关市凯瑞特农业科技有限责任公司, 甘肃嘉峪关 735002)

摘要: 采用田间试验方法, 研究了糠醛渣生态肥对河西内陆灌区风沙土改土培肥效应和茄子效益的影响。结果表明: 糠醛渣生态肥原料间的效应是: 茄子专用肥>糠醛渣>5406 生物菌肥, 糠醛渣生态肥配方比例为: 5406 生物菌肥 0.0103: 茄子专用肥 0.1291: 糠醛渣 0.8606。施用糠醛渣生态肥与传统化肥比较, 风沙土体积质量、pH、EC 和可溶性盐分别降低了 13.85%、1.07%、6.22% 和 6.92%; Hg、Cd、Cr 和 Pb 离子分别降低了 21.21%、40.00%、18.70% 和 21.94%; 总孔隙度、团聚体和饱和持水量分别增加了 13.35%、16.98% 和 13.35%; CEC、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、有效锌和有效钼分别增加了 19.20%、25.93%、0.29%、1.89%、0.17%、2.08% 和 8.33%; 真菌、细菌和放线菌分别增加了 59.00%、41.94% 和 24.32%; 蔗糖酶、脲酶和磷酸酶分别增加了 57.51%、5.88% 和 10.35%; 茄子单果重、单株果重、产量和施肥利润分别增加了 5.27%、5.35%、3.01% 和 0.51×10^4 元/hm²。糠醛渣生态肥施用量与风沙土总孔隙度、团聚体、饱和持水量、有机质、速效养分和茄子产量呈显著的正相关关系; 与体积质量、pH 呈显著的负相关关系; 糠醛渣生态肥施用量与茄子产量间的线性回归方程为 $y = 51.2300 + 1.5151x - 0.0408x^2$, 经济效益最佳施用量为 17.40 t/hm², 茄子理论产量为 65.24 t/hm²。在风沙土上施用糠醛渣生态肥, 有效的改善了土壤理化性质和生物学性质, 提高了土壤有机质和番茄产量。

关键词: 糠醛渣生态肥; 风沙土; 理化性质; 茄子; 效益

中图分类号: S143.6

甘肃河西内陆灌区气候干燥, 地壳矿物岩石以物理风化为主, 形成了 8.5×10^5 hm² 的风沙土, 此类土壤有机质和速效养分含量低, 保水肥能力弱, 作物产量低而不稳。而甘肃河西内陆灌区近 10 年来建立了制种玉米基地 1×10^5 hm², 年产玉米芯和玉米秸秆 2.70×10^6 t, 为了促进资源循环利用, 甘肃共享化工有限公司等 4 个糠醛厂将玉米芯和玉米秸秆粉碎, 加入稀硫酸在高温高压下发生水解反应提取糠醛后, 每年排出的糠醛渣约 9.83×10^4 t^[1], 经室内化验分析, 糠醛渣含有丰富的有机质及大量和微量元素, 而重金属离子 Hg、Cd、Cr、Pb 含量均小于 GB8172-87 规定的标准^[2]。有关糠醛渣废弃物的开发利用前人做了大量的研究工作^[3-5], 而糠醛渣生态肥对风沙土理化性及持水量和茄子效益影响的研究, 尚未见文献报道。为了促进废弃物糠醛渣资源的循环利用和增值, 本文应用改土培肥理论, 选择糠醛渣、茄子专用肥、

5406 生物菌肥^[6-7]为原料, 采用正交试验方法筛选配方, 在室内合成糠醛渣生态肥, 进行田间验证试验, 以便对糠醛渣生态肥的改土培肥效应做出确切的评价, 为糠醛渣废弃物资源的循环利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验地概况 试验在甘肃省酒泉市肃州区西洞镇罗马村一社进行。试验地海拔高度为 1 501 m, 地理位置 99°38'36" E, 39°29'47" N, 年均温 7.50℃, 年均降水量 82 mm, 年均蒸发量 2 500 mm, 无霜期 150 天。土壤类型为耕种风沙土^[8], 0~20 cm 土层含有机质 8.04 g/kg, 碱解氮 34.32 mg/kg, 速效磷 3.54 mg/kg, 速效钾 85.08 mg/kg, 有效硼 1.04 mg/kg, 有效锰 8.72 mg/kg, 有效铜 1.51 mg/kg, 有效锌 0.46 mg/kg, 有效铁 16.70 mg/kg, 有效钼 0.11 mg/kg, CEC

基金项目: 甘肃科技支撑计划农业类项目(144NKCA241)和嘉峪关市 2015 年科技计划项目(2015001)资助。

* 通讯作者(qinjiahai123@163.com)

作者简介: 李世风(1982—), 女, 甘肃白银人, 助理研究员, 硕士研究生, 研究方向为新型肥料开发。E-mail: qinjiahai123@163.com

(阳离子交换量)6.34 cmol/kg, 可溶性盐 1.79 mg/kg, pH 8.43。

1.1.2 试验材料 糠醛渣含有机质 760 g/kg,全氮 6.1 g/kg, 全磷 3.6 g/kg, 全钾 118 g/kg, 残余硫酸 30~50 g/kg, pH 2~3, 粒径 0.05~1 mm; 尿素, 含 N 460 g/kg, 粒径为 2~3 mm; 磷酸二铵, 含 N 180 g/kg, 含 P₂O₅ 460 g/kg; 硫酸钾, 含 K₂O 500 g/kg, 粒径为 2~3 mm; 硫酸锌, 含 Zn 230 g/kg; 钼酸铵, 含 Mo 543 g/kg; 5406 生物菌肥, 有效活菌数≥20 亿个/g; 茄子专用肥(自己配制)将尿素、磷酸二铵、硫酸钾、硫酸锌、钼酸铵重量比按 0.4476 0.0780 0.4484 0.0200 0.0056 混合,经室内化验含 N 220 g/kg, P₂O₅ 36.1 g/kg, K₂O 224.2 g/kg, Zn 4.6 g/kg, Mo 3.0 g/kg; 茄子品种为京茄 1 号,由北京市农林科学院蔬菜研究中心选育。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验一:糠醛渣生态肥配方筛选。2010 年 5 月 20 日选择 5406 生物菌肥、茄子专用肥、糠醛渣 3 种原料,采用正交表 L₉(3³) 设计试验^[9],则每个因素设 3 个水平,共 9 个处理(表 1)。采用表中的用量制成 9 种糠醛渣生态肥。

表 1 L₉(3³)正交试验分析
Table 1 L₉(3³) orthogonal test analysis

试验处理	A(5406 生物菌肥)	B(茄子专用肥)	C(糠醛渣)	产量(t/hm ²)
1=A ₁ B ₁ C ₁	(0.09)1	(0.75)1	(15.00)1	57.09 cB
2=A ₁ B ₂ C ₂	(0.09)1	(1.50)2	(30.00)2	33.96 eD
3=A ₁ B ₃ C ₃	(0.09)1	(2.25)3	(45.00)3	68.88 aA
4=A ₂ B ₁ C ₂	(0.18)2	(0.75)1	(30.00)2	58.81 cB
5=A ₂ B ₂ C ₃	(0.18)2	(1.50)2	(45.00)3	56.18 cB
6=A ₂ B ₃ C ₁	(0.18)2	(2.25)3	(15.00)1	48.80 dC
7=A ₃ B ₁ C ₃	(0.27)3	(0.75)1	(45.00)3	28.69 fE
8=A ₃ B ₂ C ₁	(0.27)3	(1.50)2	(15.00)1	65.73 bA
9=A ₃ B ₃ C ₂	(0.27)3	(2.25)3	(30.00)2	64.78 bA
T ₁	159.93	144.59	171.62	482.92(T)
T ₂	163.79	155.87	157.55	
T ₃	159.20	182.46	153.75	
极差 R	4.59	37.87	17.87	
主次顺序		B>C>A		
最优水平	A ₂	B ₃	C ₁	
最优组合		A ₂ B ₃ C ₁		

注:括号内数据为单位施用量(t/hm²);括号外数据为正交试验编码值。

试验二:糠醛渣生态肥对风沙土的改土培肥效应研究。依据试验一筛选的配方,将 5406 生物菌肥、茄子专用肥、糠醛渣重量比按 0.0103 0.1291

0.8606 混合,得到糠醛渣生态肥,经室内化验分析,含有机质 654.9 g/kg, N 28.1 g/kg, P₂O₅ 4.6 g/kg, K₂O 28.7 g/kg, Zn 0.6 g/kg, Mo 0.4 g/kg。2011—2012 年 5 月 20 日在纯 N、P₂O₅、K₂O、Zn、Mo 投入量相等的条件下(纯 N 0.049 t/hm²+ P₂O₅ 0.08 t/hm²+ K₂O 0.50 t/hm²+ Zn 0.01 t/hm²+ Mo 0.007 t/hm²),设置以下 3 个处理研究糠醛渣生态肥对风沙土的改土培肥效应:处理 1,不施肥(不施肥);处理 2,传统化肥,尿素施用量 0.11 t/hm²+ 磷酸二铵施用量 0.17 t/hm²+ 硫酸钾施用量 1.00 t/hm²+ 硫酸锌施用量 0.04 t/hm²+ 钼酸铵施用量 0.01 t/hm²;处理 3,糠醛渣生态肥施用量为 17.40 t/hm²,每个试验处理重复 3 次,随机区组排列。

试验三:糠醛渣生态肥经济效益最佳施用量研究。2013—2014 年 5 月 20 日将糠醛渣生态肥施用量梯度设计为不施肥(CK)、4.35、8.70、13.05、17.40、21.75、26.10 t/hm² 共 7 个处理进行试验,每个处理重复 3 次,随机区组排列。

1.2.2 田间管理 试验小区面积为 28 m²(7 m×4 m),每个小区四周筑埂,埂宽 40 cm,埂高 30 cm,每个试验处理的肥料在茄子定植前做底肥施入 0~20 cm 土层。定植时间为 2011—2014 年每年的 5 月 10 日,每个小区定植 4 垄,株垄高 35 cm,垄宽 50 cm,每垄定植 2 行,株距 28 cm,行距 50 cm,每个小区定植 200 株。

每个试验小区为一个支管单元,在支管单元入口安装闸阀、压力表和水表,在马铃薯沟内安装 1 条薄壁滴灌带,滴头间距 25 cm,流量 4.65 L/(m·h),每个支管单元压力控制在 4 903 Mpa,分别在茄子定植后、开花期、结果期、结果盛期和结果后期各滴灌 1 次,每个小区灌水量相等,每次灌水 2.16 m³。

1.2.3 样品采集与测定 茄子收获时分别在试验小区内随机采集 30 株植株,测定农艺学性状和经济性状,每个小区单独收获,将小区产量折合成公顷产量进行统计分析。茄子收获后,在试验小区内按对角线布点,采集耕层(0~20 cm)土样 5 kg,用四分法带回 1 kg 混合土样,风干后在室内进行分析,其中土壤体积质量(容重)、土壤团聚体、土壤微生物用环刀采用原状土,未进行风干。

土壤体积质量采用环刀法测定;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法测定;碱解氮采用扩散法测定;速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾采用火焰光度计法测定;pH 采用酸度计法测定;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;CEC(阳离子交换量)采用乙酸钠-火焰光度法测定;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;EC(电导率)采用电导法测定;有效锌和有效铝离子采用原子吸收光谱法测定^[10-11],微生物数量采用稀释平板法测定;蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;脲酶采用靛酚比色法测定;磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定^[12]。茄子植株茎粗采用游标卡尺法,地上部分干重,采用 105℃烘箱杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重。

1.2.4 数据处理方法 土壤理化性质、有机质和速效养分、茄子农艺学性状采用直线回归统计法;差异显著性采用 DPSS 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 $x_0 = [(p_x/p_y) - b]/2c$ 求得糠醛渣生态肥最佳施用量(x_0)^[13-14],依据肥料效应回归方程式 $y = a + bx + cx^2$,求得糠醛渣生态肥最佳施用量时的茄子理论产量(y)^[15]。

2 结果与分析

2.1 糠醛渣生态肥配方筛选

2010 年 11 月 26 日茄子收获后测定数据可知(表 1),糠醛渣生态肥因素间的极差效应(R)是 $B > C > A$,说明影响茄子产量的因素依次是:茄子专用肥(37.87)>糠醛渣(17.87)>5406 生物菌肥(4.59)。

从糠醛渣生态肥各因素不同水平的 T 值效应可知(表 1), $T_{A2} > T_{A1}$ 和 T_{A3} ,说明茄子产量随 5406 生物菌肥施用量的增大而增加,当 5406 生物菌肥施用量超过 0.18 t/hm²后,茄子产量又随 5406 生物菌肥施用量梯度的增大而降低。 $T_{B3} > T_{B2} > T_{B1}$,说明随着茄子专用肥施用量梯度的增加,茄子产量在增加,茄子专用肥施用量一般为 2.25 t/hm²; $T_{C1} > T_{C2} > T_{C3}$,说明糠醛渣适宜施用量为 15.00 t/hm²。

从不同因素组合的 T 值效应可知,最佳组合是: $A_2B_3C_1$ (即 5406 生物菌肥 0.18 t/hm² + 茄子专用肥 2.25 t/hm² + 糠醛渣 15.00 t/hm²)。将 5406 生物菌肥、茄子专用肥、糠醛渣重量比按 0.0103 0.1291 0.8606 混合,得到糠醛渣生态肥(表 1)。

2.2 糠醛渣生态肥对风沙土理化性质的影响

2.2.1 对风沙土物理性质的影响 连续定点试验 2 年后,于 2012 年 11 月 24 日茄子收获后采集耕作层 0~20 cm 土样,由测定结果可知,不同处理风沙土体积质量由小到大的变化顺序依次为:糠醛渣生态肥<传统化肥<不施肥。施用糠醛渣生态肥与传统化肥和不施肥比较,体积质量分别降低 13.85% 和

15.15%,差异极显著($P < 0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,体积质量降低 1.52%,差异不显著($P > 0.05$)(表 2)。

表 2 糠醛渣生态肥对风沙土物理性质的影响
Table 2 Effects of the furfural residue ecological fertilizer on the physical properties of sand soils

试验处理	体积质量 (g/cm ³)	总孔隙度 (%)	饱和持水量 (t/hm ²)	>0.25 mm 团聚体(%)
不施肥 (CK)	1.32 aA	50.19 bB	1 003.80 bB	30.95 bB
传统化肥	1.30 aA	50.94 bB	1 018.80 bB	31.16 bB
糠醛渣生态肥	1.12 bB	57.74 aA	1 154.80 aA	36.45 aA

注:同列数据后不同小、大写字母分别表示处理间差异在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 水平显著和极显著,LSR 法;下同。

不同处理风沙土总孔隙度由大到小的变化顺序依次为:糠醛渣生态肥>传统化肥>不施肥。施用糠醛渣生态肥与传统化肥和不施肥比较,总孔隙度分别增加 13.35% 和 15.04%,差异极显著($P < 0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,总孔隙度增加 1.49%,差异不显著($P > 0.05$)。

不同处理风沙土团聚体含量由大到小的变化顺序与总孔隙度一致。施用糠醛渣生态肥与传统化肥和不施肥比较,团聚体分别增加 16.98% 和 17.77%,差异极显著($P < 0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,团聚体增加 0.68%,差异不显著($P > 0.05$)。

不同处理风沙土饱和持水量由大到小的变化顺序同样与总孔隙度和团聚体变化一致。施用糠醛渣生态肥与传统化肥和不施肥比较,饱和持水量分别增加 13.35% 和 15.04%,差异极显著($P < 0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,饱和持水量增加 1.49%,差异不显著($P > 0.05$)。

2.2.2 对风沙土化学性质的影响 由表 3 可知,不同处理风沙土 CEC 由大到小的变化顺序依次为:糠醛渣生态肥>传统化肥>不施肥。施用糠醛渣生态肥与传统化肥和不施肥比较,CEC 分别增加 19.20% 和 28.33%,差异极显著($P < 0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,CEC 增加 7.57%,差异显著($P < 0.05$)(表 3)。

不同处理风沙土 EC 由大到小的变化顺序依次为:传统化肥>糠醛渣生态肥>不施肥。施用传统化肥与糠醛渣生态肥比较,EC 增加 6.22%,差异显著($P < 0.05$);施用传统化肥与不施肥比较,EC 增加 72.32%,差异极显著($P < 0.01$);施用糠醛渣生态肥与不施肥比较,EC 增加 61.61%,差异极显著($P < 0.01$)。

不同处理风沙土可溶性盐由大到小的变化顺序依次与 EC 的变化一致。施用传统化肥与糠醛渣生态

肥比较,可溶性盐增加 6.92%,差异显著($P<0.05$);施用传统化肥与不施肥比较,可溶性盐增加 72.63%,差异极显著($P<0.01$);施用糠醛渣生态肥与不施肥比较,可溶性盐增加 61.45%,差异极显著($P<0.01$)。

不同处理风沙土 pH 由小到大的变化顺序依次为:糠醛渣生态肥<传统化肥<不施肥。糠醛渣生态肥与传统化肥和不施肥比较,pH 分别降低 1.07% 和 1.31%,差异显著($P<0.05$);传统化肥与不施肥比较,pH 降低 0.24%,差异不显著($P>0.05$)。

由表 3 可知,不同处理风沙土有机质由大到小的变化顺序依次为:糠醛渣生态肥>传统化肥>不施肥。施用糠醛渣生态肥与传统化肥和不施肥比较,有机质分别增加 25.93% 和 26.87%,差异极显著($P<0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,有机质增加 0.75%,差异不显著($P>0.05$)。

不同处理风沙土碱解氮、速效磷和速效钾由大到

小的变化顺序与有机质的变化一致。施用糠醛渣生态肥与传统化肥比较,碱解氮、速效磷和速效钾分别增加 0.29%、1.89% 和 0.17%,差异不显著($P>0.05$),与不施肥比较,碱解氮、速效磷和速效钾分别增加 19.41%、37.01% 和 6.59%,差异极显著($P<0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,碱解氮、速效磷和速效钾分别增加 19.06%、34.46% 和 6.42%,差异极显著($P<0.01$)。

不同处理风沙土有效锌和有效钼由大到小的变化顺序与有机质、碱解氮、速效磷和速效钾变化一致。施用糠醛渣生态肥与传统化肥比较,有效锌增加 2.08%,差异不显著($P>0.05$),有效钼增加 8.33%,差异极显著($P<0.01$),与不施肥比较,有效锌和有效钼分别增加 6.52% 和 18.18%,差异极显著($P<0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,有效锌和有效钼分别增加 4.34% 和 9.09%,差异极显著($P<0.01$)。

表 3 糠醛渣生态肥对风沙土化学性质的影响
Table 3 Effects of the furfural residue ecological fertilizer on the chemical properties of sand soils

试验处理	pH	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	有效锌 (mg/kg)	有效钼 (mg/kg)	CEC (cmol/kg)	EC (mS/cm)	可溶性盐 (mg/kg)
不施肥(CK)	8.43 aA	8.04 bB	34.32 bB	3.54 bB	85.08 bB	0.46 bB	0.11 cC	6.34 cB	2.24 cB	1.79 cB
传统化肥	8.41 aA	8.10 bB	40.86 aA	4.76 aA	90.54 aA	0.48 aA	0.12 bB	6.82 bB	3.86 aA	3.09 aA
糠醛渣生态肥	8.32 bA	10.20 aA	40.98 aA	4.85 aA	90.69 aA	0.49 aA	0.13 aA	8.13 aA	3.62 bA	2.89 bA

2.3 糠醛渣生态肥对风沙土微生物、酶活性和重金属离子的影响

由表 4 可知,不同处理风沙土真菌、细菌和放线菌由大到小的变化顺序依次为:糠醛渣生态肥>传统化肥>不施肥。施用糠醛渣生态肥与传统化肥比较,真菌、细菌和放线菌分别增加 59.00%、41.94% 和 24.32%,差异极显著($P<0.01$),与不施肥比较,真菌、细菌和放线菌分别增加 60.61%、45.05% 和 27.78%,差异极显著($P<0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,真菌、细菌和放线菌分别增加 1.01%、2.19% 和 1.78%,差异不显著($P>0.05$)。

不同处理风沙土蔗糖酶、脲酶和磷酸酶由大到小的变化顺序与微生物的变化一致。施用糠醛渣生态肥与传统化肥比较,蔗糖酶、脲酶和磷酸酶分别增加

57.51%、5.88% 和 10.35%,差异极显著($P<0.01$),与不施肥比较,蔗糖酶、脲酶和磷酸酶分别增加 61.05%、7.46% 和 18.52%,差异极显著($P<0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,蔗糖酶、脲酶和磷酸酶分别增加 2.25%、1.49% 和 1.39%,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依次为:传统化肥>糠醛渣生态肥>不施肥,施用传统化肥与糠醛渣生态肥比较,重金属离子 Hg、Cd、Cr 和 Pb 分别增加 21.21%、40.00%、18.70% 和 21.94%,差异显著($P<0.05$),与不施肥比较,Hg、Cd、Cr 和 Pb 分别增加 25.00%、43.59%、18.99% 和 22.88%,差异极显著($P<0.01$);施用糠醛渣生态肥与不施肥比较,Hg、Cd、Cr 和 Pb 分别增加 3.13%、2.56%、0.25% 和 0.77%,差异不显著($P>0.05$)。

表 4 糠醛渣生态肥对风沙土微生物及酶活性和重金属离子的影响

Table 4 Effects of the furfural residue ecological fertilizer and traditional chemical fertilizers on microbial and enzyme activities and contents of heavy metals of the sand soils

试验处理	真菌 ($\times 10^4$ /g)	细菌 ($\times 10^7$ /g)	放线菌 ($\times 10^7$ /g)	蔗糖酶 (mg/(g·d))	脲酶 (mg/(kg·h))	磷酸酶 (g/(kg·d))	Hg (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)
不施(CK)	0.99 bB	0.91 bB	0.72 bB	2.67 bB	1.34 cB	0.27 cB	0.32 dB	0.39 bB	23.95 bB	7.78 bB
传统化肥	1.00 bB	0.93 bB	0.74 bB	2.73 bB	1.36 bB	0.29 bB	0.40 aA	0.56 aA	28.50 aA	9.56 aA
糠醛渣生态肥	1.59 aA	1.32 aA	0.92 aA	4.30 aA	1.44 aA	0.32 aA	0.33 bB	0.40 bB	24.01 bB	7.84 bB

2.4 糠醛渣生态肥对茄子经济性状及产量的影响

连续定点试验 2 年后,于 2012 年 11 月 24 日茄子收获后测定结果可知,不同处理茄子经济性状由大到小的变化顺序依次为:糠醛渣生态肥>传统化肥>不施肥。施用糠醛渣生态肥与传统化肥比较,茄子单果重增加 5.27%,差异显著($P<0.05$),与不施肥比较,单果重增加 10.91%,差异极显著

($P<0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,单果重增加 5.35%,差异极显著($P<0.01$)。施用糠醛渣生态肥与传统化肥比较,茄子单株果重增加 5.36%,差异显著($P<0.05$),与不施肥比较,单株果重增加 41.60%,差异极显著($P<0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,单株果重增加 34.40%,差异极显著($P<0.01$) (表 5)。

表 5 糠醛渣生态肥对茄子经济性状及产量的影响
Table 5 Effects of the furfural residue ecological fertilizer on economic traits, yields of eggplants

试验处理	单果重 (g)	单株果重 (kg/株)	产量 (t/hm ²)	增产值 (×10 ⁴ 元/hm ²)	施肥成本 (×10 ⁴ 元/hm ²)	施肥利润 (×10 ⁴ 元/hm ²)
不施肥(CK)	141.31 cB	1.25 cB	51.43 cB	—	—	—
传统化肥	148.88 bA	1.68 bA	63.55 bA	5.45	0.39	5.06
糠醛渣生态肥	156.72 aA	1.77 aA	65.46 aA	6.31	0.75	5.57

注:(单位:元/t)尿素 2 000;磷酸二铵 4 000;硫酸锌 4 000;硫酸钾 2 500 元;硫酸锌 4 000;钼酸铵 35 000;5406 生物菌肥 4 000;糠醛渣 60;茄子专用肥 2 604.20(尿素、磷酸二铵、硫酸钾、硫酸锌、钼酸铵风干重量比按 0.4476:0.0780:0.4484:0.0200:0.0056 混合);糠醛渣生态肥 429.04(5406 生物菌肥、茄子专用肥、糠醛渣风干重量比按 0.0103:0.1291:0.8606 混合);2012—2014 年茄子市场价格平均为 4 500。

不同处理茄子产量由大到小的变化顺序与经济性状的变化一致。施用糠醛渣生态肥与传统化肥比较,茄子产量增加 3.01%,差异显著($P<0.05$),与不施肥比较,产量增加 27.28%,差异极显著($P<0.01$);施用传统化肥与不施肥比较,产量增加 23.57%,差异极显著($P<0.01$)。

不同处理茄子施肥利润由大到小的变化顺序依次为:糠醛渣生态肥>传统化肥。施用糠醛渣生态肥与传统化肥比较,施肥利润增加 0.51×10^4 元/hm²。

2.5 糠醛渣生态肥施用量对风沙土理化性质的影响

连续定点试验 2 年后,于 2014 年 11 月 20 日茄子收获后测定数据进行相关分析可知,糠醛渣生态肥施用量与风沙土总孔隙度、团聚体、饱和持水量之间呈显著的正相关关系,与体积质量呈显著的负相关关系,相关系数(r)分别为 0.990 9、0.968 4、0.987 4 和 -0.990 9。糠醛渣生态肥施用量 26.10 t/hm²,与不施肥比较,总孔隙度、团聚体、饱和持水量分别增加 17.97%, 66.57% 和 17.97%,体积质量降低 16.79,差异极显著($P<0.01$)(表 6)。

糠醛渣生态肥施用量与风沙土有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量之间呈显著的正相关关系,相关系数(r)分别为 0.999 1、0.959 3、0.936 4、和 0.997 4。糠醛渣生态肥施用量 26.10 t/hm²,与不施肥比较,有机质、碱解氮、速效磷和速效钾分别增加 26.86%、19.41%、39.83% 和 14.85%,差异极显著($P<0.01$)。糠醛渣生态肥施用量与风沙土 pH 呈显著的负相关关系,相关系数(r)为 -0.973 2,糠醛渣生态肥施用量 26.10 t/hm²,与不施肥比较,pH 降低 2.61%,差异显著($P<0.05$)(表 7)。

表 6 糠醛渣生态肥施用量对土壤物理性质的影响
Table 6 Effect of the furfural residue ecological fertilizer on soil physical properties

施肥量 (t/hm ²)	体积质量 (g/cm ³)	总孔隙度 (%)	饱和持水量 (t/hm ²)	>0.25 mm 团聚体(%)
0	1.37 aA	48.30 gC	966.00 gC	21.75 gG
4.35	1.30 bB	50.94 fB	1 018.80 fB	22.43 fF
7.70	1.28 cB	51.69 eB	1 033.80 eB	23.45 eE
13.05	1.24 dB	53.21 dB	1 064.20 dB	25.17 dD
17.40	1.21 eB	54.34 cB	1 086.80 cB	29.84 cC
21.75	1.17 fB	55.85 bA	1 117.00 bA	33.91 bB
26.10	1.14 gB	56.98 aA	1 139.60 aA	36.23 aA

表 7 糠醛渣生态肥施用量对土壤有机质和速效养分的影响
Table 7 Effects of the application dosage of the furfural residue organic fertilizer on the contents of soil organic matter and available nutrients

施肥量 (t/hm ²)	pH	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
0	8.43 aA	8.04 cC	34.32 eD	3.54 dB	105.08 aA
4.35	8.41 bA	8.35 cC	36.43 dC	3.65 cB	107.54 aA
7.70	8.38 cA	8.72 cC	37.54 cC	3.92 bB	110.57 aA
13.05	8.36 dA	9.07 bB	39.65 bB	4.13 bA	112.60 aA
17.40	8.32 eA	9.46 bB	39.76 bB	4.37 aA	115.63 aA
21.75	8.29 fA	9.83 bB	40.87 aA	4.71 aA	118.66 aA
26.10	8.21 gA	10.20 aA	40.98 aA	4.95 aA	120.69 aA

2.6 糠醛渣生态肥施用量对茄子农艺性状和经济性状的影响

由相关分析可知,糠醛渣生态肥施用量与茄子株高、茎粗、地上部分鲜重、地上部分干重之间呈显著的正相关关系,相关系数(r)分别为 0.906 1、0.810 0、

0.929 3 和 0.929 6。糠醛渣生态肥施用量 26.10 t/hm²，与不施肥比较，茄子株高、茎粗、地上部分鲜重、地上部分干重分别增加 135.70%、33.04%、46.33% 和 60.06%，差异极显著($P<0.01$)(表 8)。

糠醛渣生态肥施用量与茄子结果数、单果重和单

株果重之间呈显著的正相关关系，相关系数(r)分别为 0.965 0、0.980 6 和 0.886 3。糠醛渣生态肥施用量 26.10 t/hm²，与不施肥比较，单株果重、结果数和单果重分别增加 46.40%、7.61% 和 13.30%，差异极显著($P<0.01$)(表 8)。

表 8 糠醛渣生态肥施用量对茄子农艺性状的影响
Table 8 Effect of the application amount of the furfural residue ecological fertilizer on the agronomic characters of eggplant

施肥量 (t/hm ²)	株高 (cm)	茎粗 (cm)	地上部分鲜重 (g/株)	地上部分干重 (g/株)	结果数 (个/株)	单果重 (g)	单株果重 (kg/株)
0	54.06 fC	1.12 gB	174.46 gD	55.82 gE	10.64 bB	141.31 gB	1.25 gD
4.35	63.61 eB	1.38 fA	190.75 fC	66.76 fD	10.97 bB	147.44 fB	1.54 fC
7.70	66.96 dB	1.40 eA	218.46 eB	76.46 eC	11.01 aA	149.23 eB	1.67 eB
13.05	69.03 cB	1.44 dA	238.11 dA	83.34 dB	11.04 aA	153.59 dA	1.72 dB
17.40	69.73 cB	1.46 cA	242.67 cA	84.93 cA	11.23 aA	156.72 cA	1.77 cB
21.75	71.89 bA	1.47 bA	250.18 bA	87.50 bA	11.41 aA	158.31 bA	1.79 bA
26.10	73.36 aA	1.49 aA	255.29 aA	89.35 aA	11.45 aA	160.11 aA	1.83 aA

由表 9 可知，糠醛渣生态肥施用量与茄子产量之间呈显著的正相关关系，相关系数(r)为 0.905 2。随着糠醛渣生态肥施用量梯度的增加，施肥利润在递增，糠醛渣生态肥施用量大于 17.40 t/hm² 时，施肥利润开始下降。将糠醛渣生态肥不同梯度施用量与茄子产量间的关系，采用肥料效应回归方程 $y = a + bx + cx^2$ 拟合，得到的回归方程为： $y = 51.230 0 + 1.515 1x - 0.040 8x^2$ 。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。糠醛渣生态肥价格(P_x)为 429.04 元/t，2013—2014 年茄子平均价格为(P_y)为 4 500.00 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($x_0 = [(P_x/P_y) - b]/2c$)，求得糠醛渣生态肥经济效益最佳施用量(x_0)为 17.40 t/hm²，将 x_0 代入上述回归方程，可求得茄子理论产量(y)为 65.24 t/hm²，统计分析结果与田间试验处理 5 糠醛渣生态肥施用量 17.40 t/hm² 相吻合(表 9)。

表 9 糠醛渣生态肥施用量对茄子利润的影响
Table 9 The effect of the application amount of the furfural residue ecological fertilizer on the profit of eggplant

施肥量 (t/hm ²)	产量 (t/hm ²)	增产量 (t/hm ²)	增产率 (%)	增产值 ($\times 10^4$ 元/hm ²)	施肥成本 ($\times 10^4$ 元/hm ²)	施肥利润 ($\times 10^4$ 元/hm ²)
0	51.23 fD	—	—	—	—	—
4.35	60.28 eC	9.05	17.67	4.07	0.65	3.42
7.70	61.51 dC	10.28	20.07	4.63	1.16	3.47
13.05	63.41 cB	12.18	23.78	5.48	1.96	3.52
17.40	65.23 bA	14.00	27.33	6.30	2.62	3.68
21.75	66.25 aA	15.02	29.32	6.76	3.27	3.49
26.10	67.63 aA	16.40	32.01	7.38	3.93	3.45

3 讨论与结论

风沙土施用糠醛渣生态肥后，土壤体积质量降低，孔隙度增大，究其原因是糠醛渣生态肥中的有机质使土壤疏松，增大了总孔隙度，降低了体积质量。施用糠醛渣生态肥土壤团聚体在递增，分析这一结果产生的原因是糠醛渣生态肥中的糠醛渣在土壤微生物的作用下合成了土壤腐殖质，腐殖质中的酚羟基、羧基、甲氧基、羰基、羟基、酰基等功能团解离后带负电荷^[16-18]，吸附了河西内陆盐土中的 Ca^{2+} ， Ca^{2+}

是一种胶结物质，促进了土壤团聚体的形成。施用糠醛渣生态肥土壤饱和持水量在增加，究其原因是糠醛渣生态肥中的糠醛渣在土壤微生物的作用下合成了土壤腐殖质，腐殖质的最大吸水量可以超过 500%^[19-20]，因而提高了土壤饱和持水量。施用糠醛渣生态肥后土壤速效氮磷钾、有效锌和钼在增加，这与糠醛渣生态肥含氮磷钾锌和钼有关。施用糠醛渣生态肥后土壤 pH 有所降低，究其原因是糠醛渣生态肥中的糠醛渣，含残余硫酸 3%~5%，降低了土壤的酸碱度。施用糠醛渣生态肥后，风沙土微生物和酶活性有所增加，究

其原因是糠醛渣生态肥含有丰富的有机质及氮磷钾和微量元素,施用糠醛渣生态肥,补充了土壤有机质和速效养分,为微生物的生长发育提供了碳源,促进了微生物的繁殖和生长发育,提高了土壤酶的活性^[21]。施用传统化肥与糠醛渣生态肥比较,重金属离子 Hg、Cd、Cr 和 Pb 分别增加 21.21%、40.00%、18.70% 和 21.94%,这与长期施用化学肥料有关^[22-23],刘树堂等^[24]研究也认为,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。

不同处理风沙土体积质量和 pH 由大到小的变化顺序依次为:不施肥>传统化肥>糠醛渣生态肥;EC、可溶性盐和金属离子 Hg、Cd、Cr、Pb 由大到小变化的顺序依次为:传统化肥>糠醛渣生态肥>不施肥,团聚体、饱和持水量、CEC、有机质、速效氮磷钾、微生物数量、酶活性、茄子经济性状和产量由大到小的变化顺序依次为:糠醛渣生态肥>传统化肥>不施肥。不同剂量糠醛渣生态肥与风沙土总孔隙度、团聚体、饱和持水量、有机质、速效氮磷钾和茄子植物学、经济性状和产量呈显著的正相关关系;与体积质量、pH 呈显著的负相关关系。糠醛渣生态肥经济效益最佳施用量为 17.40 t/hm^2 ,茄子理论产量为 65.22 t/hm^2 。在风沙土上施用糠醛渣生态肥,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] 秦嘉海,陈广全.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
- [2] 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
- [3] 秦嘉海,张春年.糠醛渣的改土增产效应[J].土壤通报,1994,25(5):237-238
- [4] 秦嘉海,金自学,刘金荣.含钾有机废弃物糠醛渣改土培肥效应研究[J].土壤通报,2007,38(4):705-708
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 高树清,王炳华,徐静,等.生物有机肥生产中发酵菌剂的选择研究[J].安徽农业科学,2010,38(14):7251-7253
- [8] 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
- [9] 明道绪.田间试验与统计分析[M].北京:科学出版社,2014:185-188
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986
- [13] 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
- [14] 陕西省农林学校.土壤肥科学[M].北京:中国农业出版社,1987:227-228
- [15] 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
- [16] 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
- [17] 王荫槐.土壤肥科学[M].北京:中国农业出版社,2001:30-31
- [18] 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
- [19] 陕西省农林学校.土壤肥科学[M].北京:中国农业出版社,1987:26-27
- [20] 陆欣.土壤肥科学[M].北京:中国农业大学出版社,2004:50-52
- [21] 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
- [22] 林葆.化肥与无公害农业[M].北京:北京农业出版社,2003:13-95
- [23] 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
- [24] 刘树堂,赵永厚,孙玉林,等.25年长期定位施肥对非石灰性潮土重金属状况的影响[J].水土保持学报,2005,19(1):164-167

Effects of Ecological Fertilizer from Furfural Residue on Physical and Chemical Properties of Sand Soil and Eggplant Benefits

LI Shifeng^{1,3}, QIN Chao², YAN Gang⁴, SANG Zhao¹, CHEN Xiubin^{1*}

(1 College of Agriculture and Biology Technology, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China; 2 Zhangye Municipal Bureau, Zhangye, Gansu 734000, China; 3 Gansu Dunhuang Seed Co. LTD., Jiuquan, Gansu 735000, China; 4 Jiayuguan Karat Agricultural Science and Technology Co., LTD., Jiayuguan, Gansu 735002, China)

Abstract: Field experiments were conducted to investigate the effects of the ecological fertilizer from furfural residue on sand soil fertility and eggplant benefits in Hexi inland irrigation region. Results showed that the effects of feedstock of the ecological fertilizer followed the order: eggplant specific fertilizer > 5406 bacterial manure > furfural residue. The furfural residue ecological fertilizer was composed of 1.03% of 5406 bacterial manure, 12.91% of eggplant specific fertilizer and 86.06% of furfural residue. The bulk density, pH, EC and soluble salt of the sandy soil were reduced respectively by 13.85%, 1.07%, 6.22% and 6.92% after application of the ecological fertilizer, compared with traditional fertilizer. The contents of Hg, Cd, Cr and Pb in the soil were reduced respectively by 21.21%, 40.00%, 18.70% and 21.94%. Total porosity, aggregate content and saturated water capacity of the soil were increased respectively by 13.35%, 16.98% and 13.35%. CEC, organic matter content, alkali-hydrolyzable nitrogen, and available phosphorus, potassium, zinc and molybdenum of the soil increased respectively by 19.20%, 25.93%, 0.29%, 1.89%, 0.17%, 2.08% and 8.33%. Fungi, bacteria and actinomycetes increased respectively by 59.00%, 41.94% and 24.32%. Invertase, urease and phosphatase increased respectively by 57.51%, 5.88% and 10.35%. Fruit weight, weight per plant, and yield of eggplant increased respectively by 5.27%, 5.35% and 3.01%. The fertilizer profits increased by 0.51×10^4 yuan/hm². The application amount of furfural residue ecological fertilizer was positively correlated with total porosity, aggregate content, water holding capacity, organic matter content and available nutrients of the sand soil and eggplant yield, while it was negatively correlated with the bulk density and pH of the soil. The linear regression equation for the application amount of the ecological fertilizer (y) with eggplant yield (x) was: $y = 51.2300 + 1.5151x - 0.0408x^2$. The optimum application amount of the ecological fertilizer was 17.40 t/hm², and correspondingly, the theoretical yield of eggplant was 65.24 t/hm². Application of the ecological fertilizer from furfural residue effectively improved the physical, chemical and biological properties of the sand soil, and increased soil organic matter content and eggplant yield.

Key words: Ecological fertilizer from furfural residue; Sand soil; Physical and chemical properties; Eggplant; Benefits