

制种玉米多功能复混肥对土壤理化性质的影响及最佳施肥量的研究

师伟杰^{1,2}, 裴晖平^{1,3}, 秦嘉海^{1,4}, 闫治斌⁵, 王爱勤⁶,
肖占文^{1,4}, 赵芸晨^{1,4}, 程红玉^{1,4}

(1. 河西学院农业与生物技术学院, 甘肃 张掖 734000; 2. 张掖市甘州区农业技术推广中心, 甘肃 张掖 734000;
3. 北京德农种业张掖分公司, 甘肃 张掖 734000; 4. 甘肃高校河西走廊特色资源利用省级重点实验室, 甘肃 张掖 734000;
5. 甘肃敦煌种业股份有限公司, 甘肃 酒泉 735000; 6. 中国科学院兰州化学物理研究所, 甘肃 兰州 731000)

摘 要: 采用盆栽和田间试验方法, 研究多功能复混肥对甘肃河西内陆灌区制种玉米田土壤理化性质的影响并确定最佳施肥量。结果表明: 随着多功能复混肥施肥量的增加, 土壤总孔隙度、团聚体、EC(电导率)、有机质、碱解 N、速效 P、速效 K 含量随之增大, 而容重和 pH 在降低。多功能复混肥施肥量与玉米植物学性状、经济性状、产量呈正相关, 与单位肥料增产量呈负相关。随着施肥量增加, 玉米边际产量、边际利润呈递减趋势, 施肥量在 1875 kg·hm⁻² 的基础上, 再增加施肥量, 收益出现负值。多功能复混肥与玉米产量间肥料效应回归方程是: $y = 3043 + 1.0109x - 0.0002088x^2$, 经济效益最佳施肥量(x_0)为 1875 kg·hm⁻², 玉米预测产量(y)为 5672 kg·hm⁻²。在风沙土上施用多功能复混肥, 有效地改善了土壤的理化性质和生物学性质, 提高了制种玉米的施肥利润和产量。

关键词: 制种玉米; 多功能复混肥; 理化性质; 最佳施肥量

中图分类号: S143.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)02-0066-07

Effects of multi-functional compound fertilizer for corn seed production on soil physical and chemical properties and study on its optimal fertilization rate

SHI Wei-jie^{1,2}, PEI Hui-ping^{1,3}, QIN Jia-hai^{1,4}, YAN Zhi-bin⁵, WANG Ai-pin⁶,
XIAO Zhao-wen^{1,4}, ZHAO Yun-chen^{1,4}, CHENG Hhong-yu^{1,4}

(1. College of Agriculture and Biology Technology, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China;
2. Zhangye Ganzhou District Agricultural Technology Promotion Center, Zhangye, Gansu 734000, China;
3. Beijing Agricultural Seed Industry in Zhangye Branch, Zhangye, Gansu 734000, China;
4. Characteristics of the Hexi Corridor Resources Utilization of Provincial Key Laboratory, Zhangye, Gansu 734000, China;
5. Gansu Dunhuang Seed Seed Company, Jiuquan, Gansu 735000, China;
6. Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 731000, China)

Abstract: The pot and field experiments were conducted to investigate the effects of multi-functional compound fertilizer for corn seed production on soil physical and chemical properties and to determine its optimal fertilization rate in Hexi irrigation area. The results showed that, with the increase of the multi-functional fertilizer rate, the total soil porosity, aggregate structure, EC (conductivity), organic matter, alkaline hydrolysis N, available P and available K increased, whereas the bulk density and pH decreased. The rate of multi-functional fertilizer was positively correlated with the botany traits, economic traits and yield of corn, but was negatively correlated with the yield increase per unit fertilizer input. The marginal yield and marginal profit of corn seeds declined with the increase of fertilizer rate. When the fertilizer rate continued to increase on the basis of 1875 kg·hm⁻², the benefit became a negative value. The regression equation between yield and multi-functional fertilizer rate was: $y = 3043.18 + 1.0109x - 0.0002088x^2$, and the fertilizer rate

收稿日期: 2012-07-05
基金项目: 科技部国家星火项目“甘肃河西走廊百万亩现代化制种及加工装备技术示范推广”(S2011G100031); 甘肃省高等学校 2010 年研究生导师科研项目(1009B-05); 甘肃省高校河西走廊特色资源利用省级重点实验室项目(XZ1002)。
作者简介: 师伟杰(1977—), 男, 甘肃张掖人, 农艺师, 主要从事新型肥料研发。E-mail: peihui ping96@sohu.com。
通信作者: 秦嘉海(1954—), 男, 甘肃张掖人, 教授, 主要从事新型肥料研发。E-mail: qinjahai123@163.com。

with best economic benefit (x_0) was $1874.81\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, at which the predicted production of corn was $5672.34\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. It was concluded that, in the sand soil, the multi-functional compound fertilizer could improve effectively the soil physical, chemical and biological properties, and raise the output and profit in corn seed production.

Keywords: corn seed production; multi-functional compound fertilizer; physical and chemical property; optimal fertilization rate

甘肃河西内陆灌区近 10 年来建立了玉米制种生产基地 10 万 hm^2 , 产种量达 $6.5\text{ 亿 kg}^{[1]}$, 玉米制种产业在增加农民收入方面起到了积极作用。目前存在的主要问题是:制种玉米种植面积大,连作年限长;化学肥料投入量较大,有机肥料投入量严重不足;市场上流通的复合肥有效成分和比例不符合本区风沙土养分现状和玉米对养分的吸收比例,导致土壤养分比例失衡,制种玉米品质和产量下降,影响了本区制种玉米产业的可持续发展^[2]。因此,研究和开发制种玉米多功能复混肥成为复合肥研发的关键所在。近年来,有关复合肥研究受到了广泛关注,但制种玉米多功能复混肥对土壤理化性质的影响及最佳施肥量的研究未见文献报道。针对上述存在的问题,应用作物营养平衡施肥理论和改土培肥理论,

选择土壤结构改良剂——聚乙烯醇^[3-8]、5406 菌剂^[9-10]、 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 、 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、糠醛渣^[11-12]6 种原料,将糠醛渣的长效、生物菌肥的增效、保水剂的保水、聚乙烯醇的改土作用融为一体,合成制种玉米多功能复混肥,在甘肃河西内陆灌区的风沙土上进行验证试验,现将研究结果分述如下。

1 材料与方法

1.1 盆栽试验

1.1.1 试验处理 以聚乙烯醇、5406 菌剂、 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 、 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、糠醛渣为 6 个试验研究因素,选择正交表 $L_9(3^6)$ 设计试验,则每个因素有 3 个水平,共 9 个处理(表 1)。按表中的用量制成 9 种复混肥。

表 1 $L_9(3^6)$ 正交试验设计表
Table 1 The $L_9(3^6)$ orthogonal experiment design

试验处理 Treatments	A (聚乙烯醇) (PVA)	B (5406 菌剂) (5406 bacterium agent)	C ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$)	D ($\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	E ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)	F (糠醛渣) (Furfural slag)
1 = $\text{A}_1\text{B}_3\text{C}_2\text{D}_3\text{E}_1\text{F}_1$	1 (66)	3 (300)	2 (1666)	3 (300)	1 (1635)	1 (6666)
2 = $\text{A}_2\text{B}_1\text{C}_1\text{D}_2\text{E}_3\text{F}_1$	2 (132)	1 (100)	1 (833)	2 (200)	3 (4905)	1 (6666)
3 = $\text{A}_3\text{B}_2\text{C}_3\text{D}_1\text{E}_2\text{F}_1$	3 (198)	2 (200)	3 (2499)	1 (100)	2 (3270)	1 (6666)
4 = $\text{A}_1\text{B}_2\text{C}_1\text{D}_3\text{E}_2\text{F}_2$	1 (66)	2 (200)	1 (833)	3 (300)	2 (3274)	2 (13332)
5 = $\text{A}_2\text{B}_3\text{C}_3\text{D}_2\text{E}_3\text{F}_2$	2 (132)	3 (300)	3 (2499)	2 (200)	3 (4905)	2 (13332)
6 = $\text{A}_3\text{B}_1\text{C}_2\text{D}_1\text{E}_1\text{F}_2$	3 (198)	1 (100)	2 (1666)	1 (100)	1 (1635)	2 (13332)
7 = $\text{A}_1\text{B}_1\text{C}_3\text{D}_3\text{E}_3\text{F}_3$	1 (66)	1 (100)	3 (2499)	3 (300)	3 (4905)	3 (19998)
8 = $\text{A}_2\text{B}_2\text{C}_2\text{D}_2\text{E}_1\text{F}_3$	2 (132)	2 (200)	2 (1666)	2 (200)	1 (1635)	3 (19998)
9 = $\text{A}_3\text{B}_3\text{C}_1\text{D}_1\text{E}_2\text{F}_3$	3 (198)	3 (300)	1 (833)	1 (100)	2 (3270)	3 (19998)

注:括号内数据为试验数据($\text{mg}\cdot 10\text{kg}^{-1}\text{土}$)。
Note: The data in brackets mean test levels ($\text{mg}\cdot 10\text{kg}^{-1}\text{ soil}$).

1.1.2 试验材料及过程 供试土壤类型为耕种风沙土^[13],采自连续种植 8 年的甘肃省张掖市甘州区沙井镇坝庙村一社的制种玉米田 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层。土壤基本化学性状为:有机质 $13.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解 N $34.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效 P $6.14\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效 K $126.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 值 8.43。

张掖地区的甘肃共享化工有限公司、张掖市玉鑫化工有限公司、临泽县汇隆化工有限责任公司、甘州区东北郊糠醛厂用玉米芯生产糠醛后每年产生的糠醛渣约 10 万吨,本试验所用糠醛渣采集自

临泽县汇隆化工有限责任公司,经室内化验分析,供试糠醛渣含有有机质 76%,全 N 0.61%,全 P 0.36%,全 K 1.18%,pH 值为 2.1,粒径 $0.5\sim 1.00\text{ mm}$;聚乙烯醇,分子质量 $5500\sim 7500$,pH $6.0\sim 8.0$,粘度 $12\sim 16$,粒径 0.05 mm ,系甘肃兰维新材料有限公司产品;5406 菌剂,有效活菌数 $\geq 2.0\text{ 亿}\cdot\text{g}^{-1}$,为北京颐生堂生物工程有限公司产品; $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$,含 N 46%; $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$,含 N 18%, P_2O_5 46%; $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$,含 Zn 23%;供试玉米品种是郑单 958(郑 58 $\times$ 昌 7-2);采用盆钵口径 30 cm ,底径 28 cm ,高 35 cm 。

试验于 2009 年在河西学院生命科学实验楼顶层阳台上进行,试验前称取 10 kg 过 10 mm 筛的风干土加入盆钵内,按表 1 用量分别称取 9 种复混肥,每个处理的 1/3 肥料做底肥,2009 年 4 月 20 日播种,深度 5 cm,每盆播种 5 株,每隔 5 d 定量浇水 3000 ml,使土壤自然含水量达到 30%,出苗后间苗,每盆留 3 株,2/3 肥料在玉米拔节期结合灌水追施。

玉米收获时测定穗粒数、穗粒重,每个盆钵单独收获,将盆钵产量折合成公顷产量进行统计分析。

采用正交试验直观分析法,分别计算原料间的 T 值和 R 值,确定原料间最佳组合,组成配制种玉米多功能复混肥配方。

1.2 田间试验

1.2.1 试验材料及设计 试验于 2010—2011 年在甘肃省张掖市甘州区沙井镇坝田村一社进行,供试土壤类型与盆栽试验相同。根据盆栽试验筛选的配方,将聚乙烯醇、5406 菌剂、 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、糠醛渣按照重量比 47:107:891:71:1750:7134 混合,经室内化验分析,含有机质 54.21%,N 9.65%, P_2O_5 4.10%,Zn 0.16%,有效活菌数 ≥ 500 万 $\cdot \text{g}^{-1}$ 。

多功能复混肥施肥量试验设计为 0(CK),375,750,1125,1500,1875,2250 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 7 个处理,每个处理重复 3 次,随机区组排列。

1.2.2 试验过程 试验小区面积为 32 m^2 (8 m $\times$ 4 m),每个小区四周筑埂,埂宽 40 cm,埂高 30 cm,多功能复混肥 1/3 在玉米播种前做底肥施入 0~20 cm 土层,2/3 在玉米拔节期结合灌水追施。供试玉米品种与盆栽试验相同。播种时间为 2010 年 4 月 22 日和 2011 年 4 月 18 日,母本定植株距 25 cm,行距 50 cm,父本满天星配置,株距 50 cm。分别在玉米拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期、乳熟期各灌水 1 次,每个小区灌水量相等。

玉米收获时分别在试验小区内随机采集 30 株植株,测定植物学性状和经济性状,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。定点试验 2 年后,于 2011 年 9 月 26 日玉米收获后,在试验小区内按 S 形布点,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。

测定方法:土壤容重采用环刀法;孔隙度采用计

算法;团聚体采用湿筛法;自然含水量采用烘干法;有机质采用重铬酸钾法;碱解 N 采用碱解扩散法;速效 P 采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;速效 K 采用火焰光度计法;pH 采用 5:1 水土比浸提,pH—2F 数字 pH 计测定;EC(电导率)采用电导法,DDS—11 型电导仪测定^[14-15];土壤微生物数量采用平板稀释法;玉米植株茎粗采用游标卡尺法;地上部分干重,105℃烘箱杀青 30 min,80℃烘干至恒重。

1.2.3 数据统计方法 土壤理化性质、有机质和速效养分、玉米植物学性状采用直线回归统计法;处理间的差异显著性采用多重比较,LSR 检验法。依据经济效益最佳施肥量计算公式 $x_0 = [(p_x/p_y) - b]/2c$ 求得多功能复混肥最佳施肥量(x_0)^[16],依据肥料效应回归方程式 $y = a + bx + cx^2$,求得多功能复混肥最佳施肥量时的玉米理论产量(y)^[17]。

2 结果与分析

2.1 不同因素及不同处理对玉米经济性状和产量的影响

据 2009 年 9 月 28 日玉米收获后测定结果可以看出,因素间的效应(R)是 $C > E > F > A > D > B$,说明影响玉米经济性状和产量因素依次是 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 > \text{CO}(\text{NH}_2)_2 > \text{糠醛渣} > \text{聚乙烯醇} \cdot \text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} > 5406$ 菌剂。比较各因素不同水平的 T 值,可以看出, $T_{A2} > T_{A3} > T_{A1}$,说明玉米经济性状和产量随聚乙烯醇用量的增大而增加,但聚乙烯醇用量超过 132 $\text{mg} \cdot 10\text{kg}^{-1}$ 土后,玉米经济性状和产量又随聚乙烯醇用量的增大而降低。 $T_{B3} > T_{B1} > T_{B2}$, $T_{C3} > T_{C1} > T_{C2}$,说明 5406 菌剂和 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 的适宜用量分别为 300 $\text{mg} \cdot 10\text{kg}^{-1}$ 土和 2499 $\text{mg} \cdot 10\text{kg}^{-1}$ 土。 $T_{D2} > T_{D1}$, $T_{D3} < T_{D1}$,说明玉米经济性状和产量随 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 用量的增大而增加,但 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 用量超过 200 $\text{mg} \cdot 10\text{kg}^{-1}$ 土后,玉米经济性状和产量又随 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 用量的增大而降低。 $T_{E3} > T_{E2} > T_{E1}$, $T_{F3} > T_{F2} > T_{F1}$,说明玉米经济性状和产量随着 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 和糠醛渣用量的增大而增加。从各因素的 T 值可以看出,因素间最佳组合是: $A_2B_3C_3D_2E_3F_3$ (聚乙烯醇 132 mg,5406 菌剂 300 mg, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 2499 mg, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 200 mg, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 4905 mg,糠醛渣 19998 mg。即聚乙烯醇、5406 菌剂、 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、糠醛渣组合比例分别为 47:107:891:71:1750:7134(表 2)。

表 2 L₉(3⁶)正交试验分析

Table 2 The L₉(3⁶) orthogonal analysis

试验处理 Treatments	A	B	C	D	E	F	穗粒重 Grain weight per ear/g	穗粒数 Grain number per ear	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)
1 = A ₁ B ₃ C ₂ D ₃ E ₁ F ₁	1	3	2	3	1	1	21.4	102	1712
2 = A ₂ B ₁ C ₁ D ₂ E ₃ F ₁	2	1	1	2	3	1	35.4	169	2832
3 = A ₃ B ₂ C ₃ D ₁ E ₂ F ₁	3	2	3	1	2	1	39.3	188	3147
4 = A ₁ B ₂ C ₁ D ₃ E ₂ F ₂	1	2	1	3	2	2	36.5	175	2917
5 = A ₂ B ₃ C ₃ D ₂ E ₃ F ₂	2	3	3	2	3	2	62.5	299	4996
6 = A ₃ B ₁ C ₂ D ₁ E ₁ F ₂	3	1	2	1	1	2	29.2	140	2333
7 = A ₁ B ₁ C ₃ D ₃ E ₃ F ₃	1	1	3	3	3	3	47.1	225	3770
8 = A ₂ B ₂ C ₂ D ₂ E ₁ F ₃	2	2	2	2	1	3	32.6	156	2609
9 = A ₃ B ₃ C ₁ D ₁ E ₂ F ₃	3	3	1	1	2	3	49.8	238	3986
穗粒重									
Grain weight per ear									
T ₁	104.9	111.6	124.5	118.3	83.2	96.1	353.8		
T ₂	130.5	108.4	83.2	130.5	125.6	128.0			
T ₃	118.3	133.6	148.9	104.9	144.9	129.5			
R	25.6	25.2	65.7	25.6	61.7	33.4	—		
穗粒数									
Grain number per ear									
T ₁	502	534	595	566	398	459		1692	
T ₂	624	519	398	624	601	614			
T ₃	566	639	712	502	693	619			
R	122	120	314	122	295	160		—	
产量 Output									
T ₁	8399	8935	9964	9465	6654	7690			28300.3
T ₂	10437	8673	6654	10437	10048	10246			
T ₃	9465	10694	11913	8399	11598	10364			
R	2038	2021	5259	2038	4944	2674			—

注: A. 聚乙烯醇, B. 5406 菌剂, C. (NH₄)₂HPO₄, D. ZnSO₄·7H₂O, E. CO(NH₂)₂, F. 糠醛渣。

Note: A. PVA; B. 5406 bacterium agent; C. (NH₄)₂HPO₄; D. ZnSO₄·7H₂O; E. CO(NH₂)₂; F. Furfural slag.

从表 3 可以看出,多功能复混肥施肥量与玉米株高、茎粗、生长速度、地上部鲜重、地上部分干重呈正相关,相关系数(*r*)分别为 0.9374、0.9881、0.7671、0.9520、0.9503。多功能复混肥施肥量 2250 kg·hm⁻²时,与对照(CK)比较,株高、茎粗、生长速度、地上部分鲜重、干重分别增加 0.26 m、4.48 mm、2.61 mm·d⁻¹、174.41 g·株⁻¹、55.01 g·株⁻¹。

表 3 多功能复混肥对玉米植物学性状的影响

Table 3 Effects of multi-functional compound fertilizer on botany characters of corn

施肥量 Fertilizer rate /(kg·hm ⁻²)	株高 Plant height /m	茎粗 Stem diameter /mm	生长速度 Growth speed /(mm·d ⁻¹)	地上部鲜重/(g·株 ⁻¹) Above-ground fresh weight/(g·plant ⁻¹)	地上部干重/(g·株 ⁻¹) Aboveground dry weight/(g·plant ⁻¹)
0	1.48g	33.11g	7.89h	662.33g	216.04g
375	1.59f	33.70f	9.89g	742.72f	241.61f
750	1.63de	35.11de	10.08ef	759.02e	246.91e
1125	1.65d	35.82cd	10.21cd	775.65d	252.08d
1500	1.69c	36.16bc	10.28bc	801.38c	260.37c
1875	1.72ab	36.92ab	10.36ab	818.88b	265.97b
2250	1.74a	37.59a	10.50a	836.74a	271.05a

从表 4 可以看出,多功能复混肥施肥量与玉米穗粒数、穗粒重、百粒重、产量呈正相关,相关系数(r)分别为 0.8956、0.9002、0.8717、0.9293。多功能复混肥施肥量 2250 kg·hm⁻²时,与对照(CK)比较,穗粒数、穗粒重、百粒重、产量分别增加 50.50 粒、

24.64 g、5.67 g、2700.83 kg·hm⁻²。但单位(1 kg)多功能复混肥的增产量则随着多功能复混肥施肥量的增加而递减,出现报酬递减律。处理间的差异显著性,经 LSR 检验达到显著和极显著水平。

表 4 多功能复混肥对玉米经济性状和产量的影响

Table 4 Effects of multi-functional compound fertilizer on economic characters and output of corn

施肥量 Fertilizer rate /(kg·hm ⁻²)	穗粒数 Grain number per ear	穗粒重 Grain weight per ear/g	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	增产量 Yield increase /(kg·hm ⁻²)	公斤肥料增产量 Yield increase rate of fertilizer/(kg·kg ⁻¹)
0	204.62g	41.18g	20.12g	3043.18g	—	—
375	233.58f	53.86f	23.06f	4090.70f	1047.52	2.79
750	238.66e	58.54e	24.53f	4817.38e	1774.20	2.37
1125	243.73d	60.97d	25.02ed	5254.13d	2250.95	1.96
1500	248.94c	62.86c	25.25bc	5515.88c	2472.70	1.65
1875	252.30b	64.35ab	25.51ab	5672.94ab	2629.76	1.40
2250	255.12a	65.82a	25.79a	5744.01a	2700.83	1.20

2.2 多功能复混肥对土壤物理和化学性质的影响

从表 5 可以看出,定位试验进行 2 年后,随着多功能复混肥施肥量的增加,土壤含水量、孔隙度在增大,容重在降低。施肥量为 2250 kg·hm⁻²时,与对照(CK)比较,自然含水量、总孔隙度分别增加 5.23%、7.17%,容重降低 0.19 g·cm⁻³。分析这一结果产生的原因是多功能复混肥中的糠醛渣使土壤疏松,增大了土壤孔隙度,降低了土壤容重。随着多功能复混肥施肥量的增加,土壤团聚体逐渐增多,其中,多功能复混肥用量为 2250 kg·hm⁻²时,与对照(CK)比

较,团聚体增加 10.97%。分析这一结果产生的原因,一是多功能复混肥中的聚乙烯醇是一种胶结物质,可以把小土粒粘在一起,形成较稳定的团聚体。二是多功能复混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、醌基等功能团解离后带负电荷^[18],吸附了河西走廊石灰性土壤中的 Ca²⁺,Ca²⁺是一种胶结物质,有利于土壤团聚体的形成。处理间的差异显著性,经 LSR 检验达到显著和极显著水平。

表 5 多功能复混肥对土壤物理性质的影响

Table 5 Effects of multi-functional compound fertilizer on soil physical properties

施肥量 Fertilizer rate /(kg·hm ⁻²)	自然含水量 Natural moisture content/%	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity /%	> 0.25 mm 团聚体 > 0.25 mm aggregates /%
0	11.67g	1.56a	41.13fg	21.91g
375	12.63f	1.53ab	42.36ef	25.78f
750	13.32de	1.51bc	43.39de	27.05de
1125	13.62d	1.49ce	43.77d	28.18cd
1500	14.80c	1.44f	45.66c	29.98bc
1875	16.34ab	1.39g	47.55ab	31.23ab
2250	16.90a	1.37gh	48.30a	32.88a

从表 6 可见,多功能复混肥施肥量与土壤 EC、有机质、碱解 N、速效 P 和速效 K 呈显著正相关,相关系数(r)分别为 0.9795、0.9560、0.9940、0.9981、0.9718。多功能复混肥用量为 2250 kg·hm⁻²时,与对照比较,土壤 EC、有机质、碱解 N、速效 P、速效 K 分别增加 0.99 mS·cm⁻¹、1.48 g·kg⁻¹、10.00 mg·kg⁻¹、1.47 mg·kg⁻¹和 16.01 mg·kg⁻¹。原因是多功能复混肥含有丰富的有机质和氮磷钾,因而提高了土壤有机质和速效养分的含量。多功能复混肥施肥量与 pH 呈负相关,相关系数(r)为 -0.9966,当施肥量为 2250 kg·hm⁻²时,土壤 pH 比对照降低了 0.12 个单位,原因可能是多功能复混肥中的糠醛渣是一

种极强酸性物质,能显著降低土壤的酸碱度。

表 6 多功能复混肥对土壤化学性质及有机质和速效养分的影响
Table 6 Effects of multi-functional compound fertilizer on soil chemical properties

施肥量 Fertilizer rate /(kg·hm ⁻²)	pH	EC /(mS·cm ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	碱解 N Alkali-soluble N /(mg·kg ⁻¹)	速效 P Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效 K Available K /(mg·kg ⁻¹)
0	8.43a	2.86g	13.45g	34.27g	6.14g	126.57g
375	8.40b	3.15f	14.03f	36.85f	6.45ef	132.21ef
750	8.39bc	3.25e	14.29e	38.39de	6.67de	133.56e
1125	8.37c	3.34d	14.44d	39.58cd	6.95d	136.29d
1500	8.35d	3.45c	14.73bc	40.79c	7.19c	139.07c
1875	8.33e	3.55b	14.75b	42.49b	7.38b	140.48b
2250	8.31f	3.67a	14.93a	44.27a	7.61a	142.58a

2.3 多功能复混肥对土壤微生物数量的影响

从表 7 可以看出,多功能复混肥施肥量与土壤真菌、细菌、放线菌、菌体总量呈正相关,相关系数(r)分别为 0.9387、0.9935、0.9909、0.9959。施肥量为 2250 kg·hm⁻²时,与对照比较,土壤中真菌、细菌、放线菌、菌体总量分别增加 159.5%、51.5%、43.8%、48.3%。分析这一结果产生的原因一是多功能复混肥中的菌肥增加了土壤微生物的数量^[19],二是多功能复混肥中的糠醛渣含有丰富的有机质,为土壤微生物生长发育提供了碳源,因而增加了微生物的数量。

表 7 多功能复混肥对土壤微生物数量的影响
Table 7 Effects of multi-functional compound fertilizer on soil microorganism quantity

施肥量 Fertilizer rate /(kg·hm ⁻²)	真菌 Fungi /(×10 ⁴ ·g ⁻¹)	细菌 Bacteria /(×10 ⁷ ·g ⁻¹)	放线菌 Actinomyces /(×10 ⁷ ·g ⁻¹)	总量 Total /(×10 ⁷ ·g ⁻¹)
0	1.48g	1.36g	0.98g	2.34g
375	1.72f	1.51ef	1.09f	2.60f
750	1.86e	1.58e	1.18e	2.76e
1125	2.76d	1.69d	1.23d	2.92d
1500	2.91c	1.86c	1.29c	3.15c
1875	3.80ab	2.01ab	1.35ab	3.38b
2250	3.84a	2.06a	1.41a	3.47a

2.4 多功能复混肥对玉米的增产效应及最佳施肥量确定

采用经济学原理进行分析可以看出,随着多功能复混肥施肥量的增加,玉米边际产量由最初的 1047.52 kg·hm⁻²,递减到 71.07 kg·hm⁻²,符合报酬递减律。从经济效益变化来看,边际利润由 4810.10 元·hm⁻²,递减到 -72.15 元·hm⁻²,多功能复混肥施肥量在 1875 kg·hm⁻²的基础上,再增加 375 kg·hm⁻²,收益出现负值,由此可见,多功能复混肥施肥

量 1875 kg·hm⁻²时,玉米增产效应和经济效益较好(表 8)。

将多功能复混肥不同施肥量与玉米产量间的关系应用肥料效应回归方程 $y = a + bx - cx^2$ 拟合,得到的回归方程是 $y = 3043.18 + 1.0109x - 0.0002088x^2$,对回归方程进行显著性测验, $F = 19.34^{**}$, $> F_{0.01} = 16.45$, $r = 0.9865^{**}$,说明回归方程拟合良好。多功能复混肥价格(P_x)为 1.14 元·kg⁻¹,玉米价格(P_y)为 5.00 元·kg⁻¹,将(P_x)、(P_y)、回归方程的 b 和 c ,代入经济效益最佳施肥量计算公式 $x_0 = [(P_x/P_y) - b]/2c$,求得多功能复混肥经济效益最佳施肥量(x_0)为 1874.81 kg·hm⁻²,将 x_0 代入回归方程 $y = 3043.18 + 1.0109x - 0.0002088x^2$,求得玉米的预测产量(y)为 5672.34 kg·hm⁻²,计算结果与田间试验处理 6 相吻合(表 8)。

3 讨论与结论

多功能复混肥施肥量与土壤真菌、细菌、放线菌、菌体总量呈正相关,原因一是多功能复混肥中的 5406 菌肥增加了土壤微生物的数量;二是多功能复混肥中的糠醛渣含有丰富的有机质,为土壤微生物生长发育提供了碳源。随着多功能复混肥施肥量的增加,土壤总孔隙度团聚体、EC、有机质、碱解 N、速效 P、速效 K 在增大,而容重和 pH 在降低;多功能复混肥施肥量与玉米植物学性状、经济性状、产量呈正相关,与单位(1 公斤)肥料增产量呈负相关;随着多功能复混肥施肥量的增加,玉米边际产量、边际利润在递减,多功能复混肥施肥量在 1875.00 kg·hm⁻²的基础上,再增加 375.00 kg·hm⁻²,收益出现负值;多功能复混肥与玉米产量间的肥料效应回归方程是: $y = 3043.18 + 1.0109x - 0.0002088x^2$,多功能复混肥经济效益最佳施肥量(x_0)为 1874.81 kg·hm⁻²,玉米预测产量(y)为 5672.34 kg·hm⁻²。

表 8 多功能复混肥对玉米增产效应和经济效益的影响

Table 8 Effects of multi-functional compound fertilizer on maize yield increase and economic benefit

施肥量 Fertilizer rate /(kg·hm ⁻²)	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	增产量 Yield increase /(kg·hm ⁻²)	边际产量 Marginal yield /(kg·hm ⁻²)	边际产值 Marginal output value /(元·hm ⁻²)	边际成本 Marginal cost /(元·hm ⁻²)	边际利润 Marginal profit /(元·hm ⁻²)
0	3043.18gG	—	—	—	—	—
375	4090.70fF	1047.52	1047.52	5237.60	427.50	4810.10
750	4817.38eE	1774.20	726.68	3633.40	427.50	3205.90
1125	5254.13dD	2250.95	436.75	2183.75	427.50	1756.25
1500	5515.88cBC	2472.70	261.75	1308.75	427.50	881.25
1875	5672.94abAB	2629.76	157.06	785.30	427.50	357.80
2250	5744.01aA	2700.83	71.07	355.35	427.50	-72.15

注:价格(元·t⁻¹):CO(NH₂)₂ 2000;(NH₄)₂HPO₄ 4000;ZnSO₄·7H₂O 4000;5406 菌剂 20000;糠醛渣 100;聚乙烯醇 26000;制种玉米 5000。聚乙烯醇、5406 菌剂、(NH₄)₂HPO₄、ZnSO₄·7H₂O、CO(NH₂)₂、糠醛渣重量组合比例分别为 0.0048:0.0106:0.0892:0.0071:0.1750:0.7133,配制的多功能复混肥价格为 1143.33。

Note: Price (yuan·t⁻¹): CO(NH₂)₂: 2000; (NH₄)₂HPO₄: 4000; ZnSO₄·7H₂O: 4000; 5406 bacterium agent: 20000; furfural slag: 100; PVA: 26000; seed corn: 5000. The price of multi-functional compound fertilizer, in which the composition ratio of PVA, 5406 bacterium agent, (NH₄)₂HPO₄, ZnSO₄·7H₂O, CO(NH₂)₂ and furfural slag is 0.0048:0.0106:0.0892:0.0071:0.1750:0.7133, is 1143.33 yuan·t⁻¹.

参 考 文 献:

[1] 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.

[2] 张秀兰,张建中,汤晓燕.甘州区玉米制种存在的问题及对策[J].种子世界,2010,(9):12-13.

[3] 龙明杰,曾繁森.高聚合物土壤改良剂研究进展[J].土壤通报,2000,31(5):199-202.

[4] 巫东堂,王久志.土壤结构改良剂及其应用[J].土壤通报,1990,21(3):140-143.

[5] 吴增芳.土壤结构改良剂[M].北京:科学出版社,1976:24-36.

[6] W apace A, N elson S D. 日前土壤结构改良剂研究的一些动向[J].土壤学进展,1987,15(5):63-64.

[7] 孙云秀.土壤结构改良剂的改土效果及其使用的研究[J].干旱区研究,1988,(3):51-52.

[8] 徐金印.几种土壤结构改良剂的制备及其效用[J].土壤学报,1984,21(3):320-322.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[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] 栗 丽,洪坚平,谢英荷,等.生物菌肥对采煤塌陷复垦土壤生物活性及盆栽油菜产量和品质的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(5):939-944.

(上接第 37 页)

[4] 李本贵,阎 俊,何中虎,等.用 AMMI 模型分析作物区域试验中的地点鉴别力[J].作物学报,2004,30(6):593-596.

[5] 程昕昕,李晶晶,王 俊,等.不同玉米穗部性状的配合力分析[J].中国农学通报,2009,25(15):64-67.

[6] 梁文科,张世煌,戚延香,等.应用混合线性模型(AD)分析热带温带玉米群体间的遗传关系[J].作物学报,2006,32(7):1018-1023.

[7] 陈振林,张建平,王春乙,等.应用 WOFOST 模型模拟低温与干旱对玉米产量的综合影响[J].中国农业气象,2007,28(4):440-442.

[8] 段民孝,范弘伟,赵久然,等.应用混合线性模型鉴定双单倍体玉米测交组合[J].玉米科学,2010,18(3):74-77.

[9] 胡希远.田间灌溉试验资料广义混合线性模型分析[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):241-244.

[10] 余松林.混合线性模型的应用[J].中国医院统计,2006,13(1):70-75.

[11] Stroup W W. Power analysis based on spatial effects mixed models: a tool for comparing design and analysis strategies in the presence of spatial variability[J]. J Agric Biol Environ Stat, 2002,7:491-511.