

马铃薯多功能专用肥配方筛选及其 对土壤理化性质的影响

刘玉环¹, 张春梅¹, 秦嘉海^{1*}, 王爱勤², 肖占文¹, 赵芸晨¹, 李芳霞¹
(1. 河西学院农业与生物技术学院, 甘肃 张掖 734000; 2. 中国科学院兰州化学物理研究所, 甘肃 兰州 731000)

摘 要: 在甘肃省河西内陆灌区的耕种栗钙土上, 采用田间试验方法, 研究了多功能专用肥配方筛选及与土壤理化性质和马铃薯经济效益间的关系。结果表明: 影响马铃薯产量因素由大到小的顺序依次是: 多元复混肥 > 保水剂 > 聚乙烯醇 > 5406 菌剂 > 糠醛渣; 因素间最佳组合是: 5406 菌剂 101.25 kg·hm⁻²、多元复混肥 1 500 kg·hm⁻²、保水剂 22.50 kg·hm⁻²、聚乙烯醇 67.50 kg·hm⁻²、糠醛渣 11.25 kg·hm⁻²。多功能专用肥施肥量与土壤孔隙度、团聚体、蓄水量、碱解氮、速效磷、速效钾、微生物数量、马铃薯植物学性状、经济性状和产量呈正相关关系, 与土壤容重、pH 呈负相关关系。随着多功能专用肥施肥量的增加, 马铃薯产量、肥料贡献率在增加, 但边际产量、边际利润在递减, 多功能专用肥施肥量在 1.40 t·hm⁻² 的基础上, 再继续增加施肥量, 边际利润出现负值。经回归统计分析, 多功能专用肥施肥量与马铃薯产量间的肥料效应回归方程是: $y = 24.79 + 6.5408x - 0.9251x^2$, 经济效益最佳施肥量为 1.3999 t·hm⁻², 马铃薯理论产量为 35.7602 t·hm⁻²。在耕种栗钙土上施用多功能专用肥, 有效改善了土壤的理化性质和生物学性质, 提高了马铃薯的施肥利润和产量。

关键词: 多功能专用肥; 马铃薯; 配方筛选; 土壤性质; 经济效益
中图分类号: S143.58; S532 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)03-0127-07

Formula screening of multi-functional fertilizer for potato and effects on soil physical & chemical properties

LIU Yu-huan¹, ZHANG Chun-mei¹, QIN Jia-hai^{1*}, WANG Ai-qin²,
XIAO Zhan-wen¹, ZHAO Yun-chen¹, LI Fang-xia¹

(1. College of Agriculture and Biology Technology, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China;
2. Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 731000, China)

Abstract: We studied the formula screening of multi-functional fertilizer and relationship between soil physical & chemical properties and economic benefits of potato by using the field experiment method in the Hexi Corridor cultivated chestnut soil of Gansu Province. The results showed that: The sequences affected potato yield factors from large to small were compound fertilizer > water retaining agent > polyvinyl alcohol > 5046 inocula > furfural residue. The best combination between factors was: 5046 inocula as 101.25 kg·hm⁻²; compound fertilizer as 1500 kg·hm⁻²; water retaining agent as 22.50 k·hm⁻²; polyvinyl alcohol as 67.5 kg·hm⁻²; furfural residue as 11.25 kg·hm⁻². There was a positive correlation between the quantity of multi-functional fertilization and soil porosity, aggregate structure, water content, available N, available P, available K, micro organism number, botanical traits of potato, economic characters and yield, and a negative correlation with bulk density and pH value. With the increase of multi-functional fertilizer, the potato yield and contribution rate of fertilizer were added, but the marginal output and marginal profit were decreased. On the basis of 1.40 t·hm⁻² quantity of multi-functional fertilizer, if increasing the fertilizer again, the marginal profits will be emerged a negative value. According to the regression statistical analysis, the regression equation between potato yield and quantity of multi-function fertilizer was: $y = 24.79 + 6.5408x - 0.9251x^2$. The optimal economical benefit of application fertilizer was 1.3999 t·hm⁻², in this case the theoretical yield of potato was 35.7602 t·hm⁻². Application the

收稿日期: 2013-10-29
基金项目: 科技部国家星火项目“张掖市加工型马铃薯多功能复混肥产品开发与示范”(2011GA860023)
作者简介: 刘玉环(1965—), 男, 甘肃武威市人, 硕士, 副教授, 研究方向为新型肥料开发。
* 通信作者: 秦嘉海(1954—), 男, 甘肃张掖人, 教授, 研究方向为新型肥料研发。E-mail: qinjianghai123@163.com。

multi-functional fertilizer in the cultivated chestnut soil, it can effectively improve the physical and chemical characters and biological properties of soil. In addition, the fertilizer profit and potato yield also will be increased.

Keywords: multi-functional fertilizer; formula screening; potato; soil properties; economic benefit

甘肃省张掖市海拔 1 650 ~ 2 800 m 的冷凉灌区,光照时间长,昼夜温差大,是加工型马铃薯种植和贮藏的理想场所,近年来,从国外引进了大西洋、夏波蒂、费乌瑞它等马铃薯新品种,建成了加工型马铃薯生产基地 3 万 hm^2 ,年产加工型马铃薯 112.5 万 t,建成了有年金龙 6 000 t 雪花全粉生产线,荷兰爱味客 10 万 t 马铃薯全粉生产线,20 万 t 法式薯条生产线,西域恒昌 3 万 t 精淀粉生产线,丰源薯业 1 万 t 精淀粉生产线,瑞达公司 5 000 t 全粉生产线,马铃薯产业已发展成为本区农民增收,企业增效的重要支柱产业之一。目前日益凸显的主要问题是:种植面积大,连作年限长,土壤养分比例失衡,缺素的生理性病害经常发生;有机肥料投入量严重不足,化肥超量施用,不但增加了施肥成本,而且导致土壤板结,贮水功能削弱;市场上销售的复混肥有效成分和比例不符合本区冷凉灌区土壤养分现状和马铃薯对养分的吸收比例,且不具备保水、改土功效,影响了本区马铃薯产业的可持续发展^[1-2]。因此,研究和开发多功能专用肥成为复混肥研发的关键所在。近年来,有关复混肥研究受到了广泛关注^[3],但多功能专用肥对土壤理化性质和马铃薯经济效益的影响鲜见文献报道。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,选择多元复混肥、5406 菌剂^[4]、土壤结构改良剂聚乙烯醇^[5-7]、保水剂^[8-10]、糠醛渣等 5 种原料,采用正交试验方法,筛选出了配方,合成了马铃薯多功能专用肥^[11-15],在甘肃省张掖市的冷凉灌区进行了验证试验,以便对多功能专用肥的肥效做出确切的评价。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验地概况 试验于 2009—2012 年在甘肃省张掖市民乐县南古镇岔家堡村二社进行,试验地海拔高度 2 410 m,日照时数 3 200 h,太阳辐射量 $606.89 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$, $> 0^\circ\text{C}$ 以上的积温 $2\,450^\circ\text{C}$,年均温度 4.5°C ,年均降水量 350 mm,年均蒸发量 1 800 mm,无霜期 140 d,土壤类型是耕种栗钙土^[16],0 ~ 20 cm 土层农业化学性质是:有机质含量为 $26.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $61.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $11.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $141.614 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值 8.33。

1.1.2 试验材料 5406 菌剂,有效活菌数 ≥ 0.2 亿/ g ,北京金肥王股份有限公司产品;多元复混肥,自己配制, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 风干重量比按 569:391:30:10g 混合,含 N 33%, P_2O_5 18%, Zn 0.69%, Mo 0.50%;聚乙烯醇,粒径 0.05 ~ 2 mm,甘肃兰维新材料有限公司产品;糠醛渣,含有机质 76.36%,全氮 0.55%。全磷 0.23%,全钾 1.18%,pH 值为 3.20,粒径 0.5 ~ 3 mm,临泽县汇隆化工有限责任公司提供;保水剂:吸水倍率 $645 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$,粒径 1 ~ 2 mm,甘肃民乐福民精细化工有限公司产品;多功能专用肥,根据试验一(见下文)筛选的配方自己配制,将 5406 菌剂、多元复混肥、保水剂、聚乙烯醇、糠醛渣风干重量比按 0.059:0.881:0.013:0.040:0.007 混合,含 N 29.14%, P_2O_5 15.84%, Zn 0.61%, Mo 0.44%,价格 4 740.73 元 $\cdot \text{t}^{-1}$;参试作物是马铃薯,品种是大西洋,甘肃万向德农马铃薯种业公司提供。

1.2 试验方法

1.2.1 试验一,多功能专用肥配方筛选

(1) 试验设计:2009 年 4 月 30 日,选择 5406 菌剂、多元复混肥、保水剂、聚乙烯醇、糠醛渣为 5 个因素,每个因素设计 3 个水平,按正交表 $\text{L}_9(3^5)$ 设计 9 个试验处理(表 1)。按表 1 因子与水平编码括号中的数量称取各种原料混合均匀后组成 9 个试验处理。

(2) 种植方法:田间试验小区面积为 28.80 m^2 ($6 \text{ m} \times 4.8 \text{ m}$),每个小区四周筑埂,埂宽 40 cm,埂高 30 cm,播种时间 2009 年 4 月 28 日,选择 90 cm 地膜,25 g 左右的薯块,采用高垄覆膜双行种植,每个小区种植 4 垄,垄距 120 cm,垄宽 40 cm,垄高 40 cm,行距 50 cm,播种深度 15 cm,每垄两行,株距 25 cm,两行穴眼错开呈三角形,在播种垄中间开一条深 20 cm 的沟,将肥料撒施在沟内,覆土起垄。

(3) 灌水方法: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 $4.65 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,每个支管单元压力控制在 4 903 MPa 水头,分别在马铃薯拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期、乳熟期各滴灌 1 次,每个小区灌水量相等,每次灌水 2.16 m^3 。

表 1 $L_9(3^5)$ 正交试验设计表

Table 1 Orthogonal experimental design table at levels $L_9(3^5)$

试验处理 Treatments	A 5406 菌剂 5406 Bacteria	B 多元复混肥 Compound fertilizer	C 保水剂 Water retention agent	D 聚乙烯醇 PVA	E 糠醛渣 Furfural residue
1 = $A_3B_2C_3D_2E_1$	3(101.25)	2(1500)	3(67.50)	2(67.50)	1(11.25)
2 = $A_2B_1C_1D_3E_1$	2(67.50)	1(750)	1(22.50)	3(101.25)	1(11.25)
3 = $A_1B_3C_2D_1E_1$	1(33.75)	3(2250)	2(45.00)	1(33.75)	1(11.25)
4 = $A_3B_1C_2D_2E_2$	3(101.25)	1(750)	2(45.00)	2(67.50)	2(22.50)
5 = $A_2B_3C_3D_3E_2$	2(67.50)	3(2250)	3(67.50)	3(101.25)	2(22.50)
6 = $A_1B_2C_1D_1E_2$	1(33.75)	2(1500)	1(22.50)	1(33.75)	2(22.50)
7 = $A_3B_3C_1D_2E_3$	3(101.25)	3(2250)	1(22.50)	2(67.90)	3(33.75)
8 = $A_2B_2C_2D_3E_3$	2(67.50)	2(1500)	2(45.00)	3(101.25)	3(33.75)
9 = $A_1B_1C_3D_1E_3$	1(33.75)	1(750)	3(67.50)	1(33.75)	3(33.75)

注:括号内数据为试验数据(单位: $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

Note: The data in bracket was the test data (Unit: $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

1.2.2 试验二,多功能专用肥经济效益最佳施用量确定

(1) 多功能专用肥合成:根据试验一筛选的配方,将 5406 菌剂、多元复混肥、保水剂、聚乙烯醇、糠醛渣重量比按 0.059:0.881:0.013:0.040:0.007 混合,搅拌均匀过 5 mm 筛备用。

(2) 试验处理:多功能专用肥施用量设计为 0、0.35、0.70、1.05、1.40、1.75 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,共 6 个处理,以处理 1 为 CK(对照)。每个试验重复 3 次,随机区组排列。

(3) 种植方法:播种时间分别在 2010—2012 年 4 月 28 日,小区面积、马铃薯品种、施肥方法、株行距、灌水方法、灌水量与试验一相同。

1.2.3 测定项目与方法 连续 3 年定点试验后,于 2012 年 9 月 26 日马铃薯收获后分别在试验小区内按 S 形路线布点,采集耕层 0~20 cm 土样 4 kg,用四分法带回 1 kg 混合土样室内风干化验分析(土壤容重、团聚体用环刀取原状土)。自然含水量测定采用烘干法;容重采用环刀法;孔隙度采用计算法;团聚体采用干筛法;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 采用 5:1 水土比浸提,用 pH—2F 数字 pH 计测定^[17-18];土壤微生物数量采用平板稀释法;饱和蓄水量=(面积×总孔隙度×土层深度);毛管蓄水量=(面积×毛管孔隙度×土层深度);非毛管蓄水量=(面积×非毛管孔隙度×土层深度)。边际产量=(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);边际施肥量=(后一个处理施肥量-前一个处理施肥量);边际成本=(边际施肥量×肥料价格);边际利润=(边际产值-边际

成本);肥料贡献率=[(施肥区产量-无肥区产量)/施肥区产量×100%]^[19]。马铃薯收获时每个试验小区随机采集 30 株,测定植物学性状和经济性状,茎粗采用游标卡尺法测定,地上部分干重采用 105℃烘箱杀青 30 min,80℃烘干至恒重。

1.3 数据统计方法

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。多功能专用肥配方筛选采用方差分析,结果用±标准误表示,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。土壤物理化学性质、蓄水量、微生物数量、马铃薯植物学性状、经济性状等数据采用 DPSS 10.0 统计软件分析,差异显著性采用多重比较,LSR 检验。多功能专用肥最佳施肥量按公式 $x_0 = [(P_x/P_y) - b]/2c$ 求得^[20];马铃薯理论产量按肥料效应回归方程式 $y = a + bx - cx^2$ 求得^[21]。

2 结果分析

2.1 多功能专用肥配方筛选

将表 2 数据进行方差分析可以看出,处理 7 与处理 1、2 差异不显著($P > 0.05$),但极显著高于处理 3、4、5、8、9($P < 0.01$);处理 1 与处理 6 差异不显著($P > 0.05$),但极显著高于处理 2、3、4、5、8、9($P < 0.01$);处理 5 显著高于处理 2、3、4、8、9($P < 0.05$);处理 3 与处理 8 差异不显著($P > 0.05$),但显著高于 2、4、9($P < 0.05$);处理 2 极显著高于处理 4、9($P < 0.01$);处理 9 极显著高于处理 4($P < 0.01$)。将表 2 数据采用正交试验直观分析方法可以看出,5 个因素间的效应(R)由大到小的变化顺序依次为:多元复混肥(32.40) > 保水剂(19.80) > 聚乙烯醇(4.95)

和 5406 菌剂(4.95) > 糠醛渣(4.40)。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 5406 菌剂用量的增加,马铃薯产量在增加。 $T_{B2} > T_{B3} > T_{B1}$,说明多元复混肥适宜用量为 1 500 kg·hm⁻²。 $T_{C1} > T_{C3} > T_{C2}$,说明保水剂最大用量不要超过 22.50 kg·hm⁻²。 $T_{D2} > T_{D3} > T_{D1}$,说明聚乙烯醇的施用量一般为 67.50 kg·hm⁻²。 $T_{E1} > T_{E2} > T_{E3}$,说明随着糠醛渣施用量的增加,马铃薯产量在递减,

糠醛渣最大用量不要超过 11.25 kg·hm⁻²。从各因素的 T 值可以看出,因素间 T 值最大的是: A₃B₂C₁D₂E₁,由此可见,多功能专用肥配方组合为: 5406 菌剂 101.25 kg·hm⁻²、多元复混肥 1 500 kg·hm⁻²、保水剂 22.50 kg·hm⁻²、聚乙烯醇 67.50 kg·hm⁻²、糠醛渣 11.25 kg·hm⁻²,即 5406 菌剂、多元复混肥、保水剂、聚乙烯醇、糠醛渣重量组合比例分别为 0.059:0.881:0.013:0.040:0.007(表 2)。

表 2 L₉(3⁵)正交试验分析

Table 2 Orthogonal test analysis at level L₉(3⁵)

试验处理 Treatments	A 5406 菌剂 5406 Bacteria	B 多元复混肥 Compound fertilizer	C 保水剂 Water retention agent	D 聚乙烯醇 PVA	E 糠醛渣 Furfural residue	产量 Yield /(t·hm ⁻²)
1. A ₃ B ₂ C ₃ D ₂ E ₁	3	2	3	2	1	41.25 ± 2.31aA
2. A ₂ B ₁ C ₁ D ₃ E ₁	2	1	1	3	1	31.80 ± 3.06dD
3. A ₁ B ₃ C ₂ D ₁ E ₁	1	3	2	1	1	34.95 ± 2.82cC
4. A ₃ B ₁ C ₂ D ₂ E ₂	3	1	2	2	2	25.05 ± 0.69fF
5. A ₂ B ₃ C ₃ D ₃ E ₂	2	3	3	3	2	38.10 ± 0.15bB
6. A ₁ B ₂ C ₁ D ₁ E ₂	1	2	1	1	2	40.80 ± 0.34aA
7. A ₃ B ₃ C ₁ D ₂ E ₃	3	3	1	2	3	41.70 ± 2.14aA
8. A ₂ B ₂ C ₂ D ₃ E ₃	2	2	2	3	3	34.50 ± 1.56cC
9. A ₁ B ₁ C ₃ D ₁ E ₃	1	1	3	1	3	27.30 ± 1.82eE
T_1	103.05	84.15	114.75	103.05	108.00	
T_2	104.40	116.55	94.50	108.00	103.95	315.45(T)
T_3	108.00	114.30	106.60	104.40	103.60	
R	4.95	32.40	19.80	4.95	4.40	

2.2 施用多功能专用肥对土壤物理性质的影响

定点试验 3 年后,于 2012 年 9 月 26 日马铃薯收获后分别在试验小区内采集耕层 0~20 cm 土样测定结果可以看出,多功能专用肥施用量与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、团聚体呈显著的正相关关系,与容重呈显著的负相关关系,相关系数(r)分别为 0.9880、0.9790、0.9486、0.9774 和 -0.9978。多功能专用肥施用量为 1.75 t·hm⁻²时,

与对照比较,总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、团聚体分别增加了 3.90、1.97、1.93、11.67 个百分点,而容重降低了 0.13 g·cm⁻³。究其原因多功能专用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,具有团聚体的土壤比较疏松,因而增大了孔隙度,降低了容重^[22]。处理间的差异显著性,经 LSR 检验达到显著和极显著水平(表 3)。

表 3 多功能专用肥对土壤物理性质的影响

Table 3 Multi-function ecological effects on soil physical properties

施肥量 Fertilizer /(t·hm ⁻²)	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity /%	毛管孔隙度 Capillary porosity /%	非毛管孔隙度 Non Capillary porosity /%	>0.25mm 团聚体 >0.25mm Aggregate /%
0(CK)	1.27aA	52.08dA	18.36cC	33.72cC	28.54fE
0.35	1.25bB	52.83dA	18.93cC	33.90cC	33.23eD
0.70	1.22cC	53.96cA	19.34bB	34.62bB	34.84dD
1.05	1.20dD	54.72bA	19.87bB	34.85bB	36.31cC
1.40	1.17eE	55.85aA	19.87bB	35.98aA	38.60bB
1.75	1.14fF	55.98aA	20.33aA	35.65aA	40.21aA

注:同列数据大写字母不同表示 LSR_{0.01},小写字母不同表示 LSR_{0.05}差异显著水平,下同。
Note: The different capital letters within the same column indicate LSR_{0.01}, the different lowercase letters indicate LSR_{0.05} differences significant level, the same as below.

2.3 施用多功能专用肥对土壤蓄水量的影响

据表 4 可以看出,多功能专用肥施用量与土壤自然含水量、饱和蓄水量、毛管蓄水量、非毛管蓄水量呈显著的正相关关系,相关系数(r)分别为 0.9980、0.9880、0.9789、0.9486。多功能专用肥施用量为 $1.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,与对照比较,自然含水量、饱和蓄水量、毛管蓄水量、非毛管蓄水量分别增加了 $33.69\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $78.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $39.40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 38.60

$\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。分析这一结果产生的原因是多功能专用肥中的保水剂是一类高分子聚合物,分子结构交联成网络,本身不溶于水,却能在 10 min 内吸附超过自身重量 100~1 400 倍的水分,体积大幅度膨胀后形成饱和吸附水球,吸水倍率很大,在提高土壤持水性方面具有重要的作用^[23]。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)。

表 4 多功能专用肥对土壤蓄水量的影响

Table 4 The influence of multi-functional fertilizer to the soil storage capacity

施肥量 Fertilizer rate /($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	自然含水量 Natural moisture content/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	饱和蓄水量 Saturated storage /($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	毛管蓄水量 Capillary water content/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	非毛管蓄水量 Non capillary water content/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)
0(CK)	144.63fA	1041.60dA	367.20cD	674.40cC
0.35	151.36eA	1056.60dA	378.60cC	678.00cC
0.70	158.45dA	1079.20cA	386.80bC	692.40bB
1.05	165.58cA	1094.40bA	397.40bB	697.00bB
1.40	169.91bA	1117.00aA	397.40bB	719.60aA
1.75	178.32aA	1119.60aA	406.60aA	713.00aA

2.4 施用多功能专用肥对土壤速效养分和 pH 的影响

据表 5 可以看出,多功能专用肥施用量与土壤碱解氮、速效磷、速效钾呈显著的正相关关系,相关系数(r)分别为 0.9905、0.9823、0.9864。多功能专用肥施用量为 $1.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,与对照比较,碱解氮、速效磷、速效钾分别增加了 $14.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $3.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $11.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。产生的原因是多功能专用肥含有氮磷钾,施用多功能专用肥可以增加土壤速效养分的含量。多功能专用肥施用量与土壤 pH 呈显著的负相关关系,相关系数(r)为 -0.9829 。多功能专用肥施用量 $1.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,与对照比较,土壤 pH 降低了 0.14 个单位。其原因是多功能专用肥中的糠醛渣是一种极强酸性废弃物,因而降低了土壤的酸碱度。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)。

2.5 施用多功能专用肥对土壤微生物数量的影响

从表 6 可以看出,多功能专用肥施肥量与土壤真菌、细菌、放线菌、菌体总量呈显著的正相关关系,相关系数(r)分别为 0.9532、0.9927、0.9915、0.9974。多功能专用肥施肥量为 $1.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,与对照比较,真菌、细菌、放线菌、菌体总量分别增加了 2.57、1.49、1.38、1.44 倍。分析这一结果产生的原因是多功能专用肥中的 5406 菌剂增加了土壤微生物的数量^[24]。处理间的差异显著性,经 LSR 检验达到显著和极显著水平(表 6)。

表 5 多功能专用肥对土壤 pH 和速效养分的影响

Table 5 Effects of multi-function fertilizer to the soil pH and available nutrients

施肥量 Fertilizer rate /($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	pH	碱解氮 Available N /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0(CK)	8.33aA	61.83eD	11.75cC	141.61bB
0.35	8.31aA	65.75dC	12.54bB	143.99bB
0.70	8.30aA	68.50cB	12.80bB	145.75bB
1.05	8.26bB	72.09bA	14.14aA	147.24bB
1.40	8.22cC	74.34aA	14.66aA	151.85aA
1.75	8.19dC	75.85aA	14.97aA	153.46aA

表 6 多功能专用肥对土壤微生物数量的影响

Table 6 Effects of multi-function fertilizer to the soil microbial quantity

施肥量 Fertilizer rate /($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	真菌 Fungi ($10^4\cdot\text{g}^{-1}$)	细菌 Bacteria ($10^7\cdot\text{g}^{-1}$)	放线菌 Actinomyces ($10^7\cdot\text{g}^{-1}$)	总量 Total ($10^7\cdot\text{g}^{-1}$)
0(CK)	1.46cC	1.34fE	0.97dD	2.31fC
0.35	1.70dC	1.49eD	1.08cC	2.57eB
0.70	1.84dC	1.56dC	1.16cC	2.73dB
1.05	2.40cB	1.67cB	1.22bB	2.89cB
1.40	2.72bB	1.83bA	1.28bB	3.11bA
1.75	3.76aA	1.99aA	1.34aA	3.33aA

2.6 施用多功能专用肥对马铃薯植物学性状的影响

从表 7 可以看出,多功能专用肥施肥量与马铃薯

薯株高、茎粗、生长速度、地上部分鲜重、地上部分干重呈显著的正相关关系,相关系数(r)分别为 0.9969、0.9707、0.9696、0.9967、0.9966。多功能专用肥施肥量为 $1.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,与对照比较,马铃薯

株高、茎粗、生长速度、地上部分鲜重、地上部分干重分别增加了 28.40 cm 、 2.21 mm 、 $1.59\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $48.54\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $30.58\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 。处理间的差异显著性,经 LSR 检验达到显著和极显著水平(表 7)。

表 7 多功能专用肥对马铃薯植物学性状的影响
Table 7 Effect of multi-functional fertilizer to the potato botany properties

施肥量 Fertilizer rate /($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	株高 Plant height /cm	茎粗 Stem diameter /mm	生长速度 Growth speed /($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)	地上部分鲜重 Aboveground Fresh weight/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	地上部分干重 Aboveground dry weight/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)
0(CK)	54.30fF	8.16fA	3.05fA	92.80fF	58.46fC
0.35	59.00eE	8.34eA	3.31eA	100.51eE	63.32eC
0.70	65.30dD	8.46dA	3.66bA	111.59dD	70.30dB
1.05	71.10cC	9.33cA	3.99cA	121.51cC	76.55cB
1.40	79.00bB	9.91bA	4.43bA	135.02bB	85.06bA
1.75	82.70aA	10.37aA	4.64aA	141.34aA	89.04aA

2.7 施用多功能专用肥对马铃薯经济性状和产量的影响

从表 8 可以看出,多功能专用肥施肥量与马铃薯块茎重、单株块茎重、产量呈显著的正相关关系,相关系数(r)分别为 0.9954、0.9988、0.9730。随着

多功能专用肥施肥量的增加,增产率和肥料贡献率在增加,但单位(1 kg)多功能专用肥的增产量则随着多功能专用肥施肥量的增加而递减。处理间的差异显著性,经 LSR 检验达到显著和极显著水平(表 8)。

表 8 多功能专用肥对马铃薯经济性状和产量的影响
Table 8 Effect of multi-function fertilizer to the economic natures and yield of potato

施肥量 Fertilizer rate /($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	块茎重 Tuber weight /g	单株块茎重 Tuber weight per plant /($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	产量 Yield /($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	增产量 Yield increase /($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	增产率 To increase production rate /%	肥料贡献率 Fertilizer contribution /%	kg 肥料增产量 Kg increase fertilizer production /kg
0(CK)	141.44eF	393.05fF	24.79fE	—	—	—	—
0.35	148.89dE	422.64eE	28.51eD	3.72	15.00	13.04	10.62
0.70	153.50dD	454.45dD	31.48dC	6.69	26.98	21.25	9.55
1.05	161.57cC	478.36cC	33.85cB	9.06	36.54	26.76	8.62
1.40	169.76bB	503.55bB	35.76bA	10.97	44.25	30.59	7.83
1.75	179.03aA	530.05aA	36.17aA	11.38	45.90	31.46	6.50

2.8 施用多功能专用肥对马铃薯增产效应和经济效益的影响

采用经济学原理进行分析可以看出^[25],随着多功能专用肥施用量的增加,边际产量由最初的 $3.38\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,递减到 $0.38\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从经济效益变化来看,边际利润由最初的 $2\,396.75\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$,递减到 $-1\,203.25\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$,多功能专用肥施肥量在 $1.40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的基础上,再增加 $0.35\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,边际利润出现负值。由此可见,多功能专用肥施肥量 $1.40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,马铃薯增产效应和经济效益较好(表 9)。

2.9 多功能专用肥经济效益最佳施用量的确定
将多功能专用肥不同施肥量与马铃薯产量间的

关系,应用肥料效应回归方程 $y = a + bx - cx^2$ 拟合,得到的回归方程为:

$$y = 24.79 + 6.5408x - 0.9251x^2$$

(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。多功能专用肥价格(P_x)为 $4\,740.73\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$,马铃薯价格(P_y)为 $1\,200\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$,将(P_x)、(P_y)、回归方程的参数 b 和 c ,代入最佳施肥量计算公式 $x_0 = [(P_x/P_y) - b]/2c$,求得多功能专用肥最佳施用量(x_0)为 $1.3999\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,将 x_0 代入(1)式,可求得马铃薯理论产量(y)为 $35.7602\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,统计分析结果与田间小区试验处理 5 相吻合(表 9)。

表 9 不同剂量多功能专用肥对马铃薯增产效应和经济效益的影响

Table 9 Effects of different quantity of multi-function fertilizer to the potato added yield and economic benefit

施肥量 Fertilizer rate /(t·hm ⁻²)	产量 Yield /(t·hm ⁻²)	增产量 Added yield /(t·hm ⁻²)	边际产量 Marginal yield /(t·hm ⁻²)	边际产值 Marginal Output /(元·hm ⁻²)	边际成本 Marginal cost /(元·hm ⁻²)	边际利润 Marginal profit /(元·hm ⁻²)
0(CK)	24.79fE	—	—	—	—	—
0.35	28.51eD	3.72	3.72	4464.00	1659.25	2804.75
0.70	31.48dC	6.69	2.97	3564.00	1659.25	1904.75
1.05	33.85cB	9.06	2.37	2844.00	659.25	1184.75
1.40	35.76bA	10.97	1.91	2280.00	1659.25	620.75
1.75	36.17aA	11.38	0.41	492.00	1659.25	- 1167.25

3 结 论

甘肃省张掖市冷凉灌区海拔 1 650~2 800 m 的热量条件非常适应马铃薯的生长发育。目前,影响马铃薯产业可持续发展的环境条件一是种植面积大,马铃薯在块茎膨大期,灌水矛盾比较突出;二是有机肥料投入量严重不足,尿素化肥超量施用,土壤胶体上的吸附的 Ca²⁺ 被 NH₄⁺ 代换,土壤团粒结构遭到破坏,土壤板结,不利于马铃薯块茎的膨大;三是具有自主知识产权的功能性肥料研发薄弱,市场上流通的复混肥有效成分和养分比例不符合冷凉灌区土壤养分现状和马铃薯对养分的吸收比例,且不具备保水、改土的功效。针对上述存在的问题,本文将多元复混肥的速效、5406 菌剂的增效、保水剂的保水、聚乙烯醇的改土作用融为一体,合成多功能专用肥,有效地解决了上述存在的问题。研究结果表明,多功能专用肥施用量与土壤孔隙度、团聚体、蓄水量、碱解氮、速效磷、速效钾、微生物数量、马铃薯植物学性状、经济性状和产量呈显著的正相关关系,与土壤容重、pH 呈显著的负相关关系。经回归统计分析,多功能专用肥经济效益最佳施用量为 1.39 t·hm⁻²时,马铃薯的理论产量为 32.42 t·hm⁻²。

参 考 文 献:

[1] 华 军,贾改秀,韩顺斌.关于张掖市马铃薯产业发展的思考[J].甘肃农业,2011,(2):59-60.

[2] 陈其泰,贾改秀,李鸿宾.张掖市马铃薯产业发展现状及对策建议[J].中国马铃薯,2009,23(6):375-377.

[3] 赵秉强,张福锁,廖宗文.我国新型肥料发展战略研究[J].植物营养与肥料学报,2004,10(5):536-545.

[4] 李 智.5406 抗生素肥特性及使用方法[J].生物加工过程,2003,1(2):50-52.

[5] 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.

[6] 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

地区农业研究,1988,(3):51-52.

[7] 汪德水.土壤结构改良剂的改土、保水、增产效果研究[J].土壤肥料,1990,(5):9-13.

[8] 张富仓,康绍忠.BP 保水剂及其对土壤与作物的效用[J].农业工程学报,1999,15(2):74-78.

[9] 黄凤球.化学节水技术在农业上的应用效果研究[J].水土保持研究,1996,3(3):118-124.

[10] 刘春生.抗旱保水剂在果园中的应用效应研究[J].水土保持学报,2003,17(2):134-136.

[11] 闫四群.功能性肥料的发展前景和存在问题[J].农家参谋种业大观,2011,(11):24-25.

[12] 刘秀梅,刘光荣,冯兆滨,等.新型肥料研制技术与产业化开发[J].江西农业学报,2006,18(2):87-92.

[13] 陆建刚,周 莺.国内外新型肥料的开发[J].化肥工业,1994,21(3):8-11.

[14] 赵秉强,张福锁,廖宗文.我国新型肥料发展战略研究[J].植物营养与肥料学报,2004,10(5):536-545.

[15] 刘 果,李绍才,杨志荣.我国多功能肥料的发展概况[J].中国土壤与肥料,2006,(5):7-9.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 陕西省农林学校.土壤肥料学[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] 龙明杰,张宏伟,曾繁森.高聚物土壤结构改良剂的研究[J].土壤学报,2001,38(4):584-589.

[23] 谢伯承,薛绪掌,王纪华,等.保水剂对土壤持水性状的影响[J].水土保持通报,2003,23(6):44-46.

[24] 栗 丽,洪坚平,谢英荷,等.5406 菌剂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.

[25] 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.