

炭基肥对马铃薯田土壤容重、孔隙度和养分的影响

焦瑞枣^{1,3},任少勇¹,王 姣¹,魏翠果¹,蒙美莲¹,陈有君²

(1. 内蒙古农业大学 农学院,内蒙古 呼和浩特 010019;2. 内蒙古农业大学 生命科学学院,
内蒙古 呼和浩特 010019;3. 内蒙古广播电视大学,内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:为明确炭基肥在马铃薯生产上的应用效果,以克新 1 号品种为材料,采用随机区组设计,研究了大田条件下 0(CK),300(M₁),600(M₂),900(M₃),1 200(M₄) kg/hm² 炭基肥及等量 N、P、K 化肥(H₁、H₂、H₃、H₄)对马铃薯田 0~40 cm 土层土壤容重、孔隙度和养分的影响。结果表明,随着土壤深度的增加,土壤容重逐渐增大,土壤孔隙度逐渐降低,养分含量降低;各施肥处理均有利于改善土壤结构和养分含量,与 CK 相比,随着施肥量的增加各层土壤容重降低,总孔隙度、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的含量增加。等量氮磷钾条件下,施炭基肥的土壤容重的降低幅度和孔隙度增加幅度明显高于化肥处理;施炭基肥处理的养分含量随生育期的推进呈低—高一低的变化,而施化肥处理却逐渐降低,苗期施化肥处理的土壤养分含量高于施炭基肥的处理,块茎增长期和成熟收获期则是施炭基肥处理的土壤养分含量均高于施化肥的处理。在该试验条件下,炭基肥施用量为 1 200 kg/hm² 时马铃薯田土壤理化性质最优,可作为阴山北麓地区马铃薯种植的推荐施肥量。

关键词:炭基肥;马铃薯;容重;孔隙度;土壤养分

中图分类号:S532 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2015)04-0231-08

doi:10.7668/hbxb.2015.04.039

The Effects of Carbon Based Fertilizer on Soil Bulk Density and Porosity and Nutrient of Potato

JIAO Rui-zao^{1,3}, REN Shao-yong¹, WANG Jiao¹, WEI Cui-guo¹, MENG Mei-lian¹, CHEN You-jun²

(1. Agricultural College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China;

2. College of Life Sciences, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China;

3. Inner Mongolia Radio & TV University, Huhhot 010010, China)

Abstract: In order to understand application effect of carbon based fertilizer in potato production, random block design was adopted to study the effects of the carbon based fertilizer on soil bulk density and porosity and nutrient of Kexin 1 by applying 0, 300, 600, 900, 1 200 kg/ha of this fertilizer and the same amount of N, P, K fertilizer. The results showed that: With the increment of soil depth, soil bulk density increased, soil porosity and the contents of soil nutrient gradually decreased. With the increment of fertilizer, soil bulk density decreased, soil porosity and nutrient increased than that of CK. At the same amount of N, P, K, reduce the rate of soil bulk density and increase the rate of soil porosity of treatments with carbon based fertilizer were obviously higher than chemical fertilizer. Treatments with carbon based fertilizer showed a trend of lower-high-lower, but treatments with chemical fertilizer decreased. Soil nutrients of the treatments with chemical fertilizer were higher than that of treatments with carbon based fertilizer of the same amount of N, P, K in seedling stage of potato. Soil nutrients of the treatments with carbon based fertilizer were higher than that of treatments with chemical fertilizer of the same amount of N, P, K at the inflated period of tuber and harvest time. In the experiment, the soil physicochemical properties of potato of 1 200 kg/ha treatment were better, and it was the suitable match for Wuchuan areas in Inner Mongolia.

Key words: Carbon based fertilizer; Potato; Soil bulk density; Soil porosity; Soil nutrient

收稿日期:2015-04-16

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-10-P17)

作者简介:焦瑞枣(1978-),女,内蒙古武川人,博士,主要从事马铃薯栽培生理研究。

通讯作者:蒙美莲(1960-),女,内蒙古清水河人,教授,硕士,博士生导师,主要从事马铃薯栽培生理研究。

陈有君(1961-),男,内蒙古赤峰人,教授,博士,主要从事土壤水分和植物生理研究。

在目前的农业生产中,我国单位面积化肥使用量是世界平均水平的 1.6 倍,全年总用量高达 1 亿多吨。近十年,我国化肥总用量增加了 90% 以上,而粮食总产量仅增加 9% 左右,其中氮、磷和钾肥的利用率分别为 30%~45%,10%~25% 和 35%~50%,这就意味着我国每年将有近 1 000 亿元以上的经济损失和大量的资源浪费,同时造成生态环境严重污染和土壤理化性状严重恶化。因此,科学合理的施用肥料,改善土壤的理化性质,提高土壤肥力,坚持土壤的可持续开发和利用是我们将面临的一个重要课题^[1]。内蒙古阴山以北是内蒙古自治区马铃薯主要产区之一,但是由于当地土壤瘠薄、土质较差,保水保肥性差,水肥利用率低,严重影响了马铃薯产量和品质的提高。炭基肥是利用生物炭与化肥进行混合加工制成的复合肥料,具有改良土壤、增加地温、保水、保肥和延长肥效的功能,其主要成分是生物质炭。生物炭是由植物秸秆、玉米芯、花生壳、木屑、动物粪便等,在完全或部分缺氧条件下,在低于 500 ℃ 的温度下经热解炭化产生的一种含碳量极其丰富、性质稳定的木炭^[2]。生物质炭具有良好的理化特性,能降低土壤容重^[3],提高土壤孔隙度^[4],提高微生物活性^[5],同时生物炭可作为肥料缓释载体^[6],延缓肥料养分在土壤中的释放,降低肥料养分的淋失和固定等损失,提高肥料养分利用率^[7-8]。因此,合理开发与研究利用炭基肥料是发展可持续农业和绿色农业的一个重要途径。

本试验通过比较炭基肥和等含量氮、磷、钾化肥对马铃薯田土壤容重、孔隙度和养分含量的影响,以为内蒙古阴山北麓地区马铃薯生产中合理施用炭基肥提供一定的理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

试验于 2012 年和 2013 年 5-9 月在内蒙古武川县大豆铺村试验基地进行。试验地位于北纬 41°10′,东经 111°36′,海拔 1 555 m,年均气温 2.6 ℃,年均日照时数 2 787.9 h,无霜期 110 d 左右,属中温带大陆性季风气候,试验地土壤为栗钙土。2012,2013 年试验地 0~20 cm 耕层有机质含量分别为 10.06,10.89 g/kg,碱解氮含量为 45.88,42.23 mg/kg,有效磷含量 10.21,11.41 mg/kg,速效钾含量 104.59,91.39 mg/kg。供试马铃薯为克新 1 号品种的脱毒原种,试验肥料为尿素(含氮 46.3%),过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%),硫酸钾(含 K₂O 52%),辽宁金和福农业开发有限公司生产的炭基马铃薯专用肥

(10-8-18)。

1.2 试验设计

试验共设 9 个处理,包括 4 个炭基肥水平,4 个化肥水平和 1 个对照,随机区组设计。4 个炭基肥水平分别是 300,600,900,1 200 kg/hm²,4 个化肥水平分别与等量纯氮、P₂O₅、K₂O 的炭基肥对应,以不施任何肥的处理为对照,9 个处理分别用 M₁、M₂、M₃、M₄、H₁、H₂、H₃、H₄、CK 表示,各处理施肥量见表 1。小区面积 5.0 m×6.0 m=30 m²,行距 60 cm,株距 31.3 cm,10 行区,4 次重复,播种密度为 52 500 株/hm²,各处理肥料在播种时作为基肥一次性全部施入。2012 年 5 月 19 日人工播种,9 月 19 日收获测产,2013 年 5 月 15 日人工播种,9 月 22 日收获测产,均采用滴灌方式进行灌溉,其他管理同一般生产田。

表 1 各处理田间施肥量

Tab. 1 Fertilization amounts of all treatments kg/hm ²				
处理 Treatment	施肥量 Fertilization amounts			
	炭基马铃 薯专用肥 Carbon based fertilizer	尿素 Urea	过磷酸钙 Calcium superphosphate	硫酸钾 Potassium sulfate
CK	0	0	0	0
H ₁	0	64.8	150	103.80
H ₂	0	129.6	300	207.60
H ₃	0	194.4	450	311.55
H ₄	0	259.2	600	415.50
M ₁	300	0	0	0
M ₂	600	0	0	0
M ₃	900	0	0	0
M ₄	1 200	0	0	0

1.3 测定项目与方法

试验样品采集于 2012 年和 2013 年 5-9 月,于马铃薯播种前和收获前(出苗后 90 d)分别测定 0~10,10~20,20~40 cm 土壤容重和总孔隙度;于马铃薯苗期(出苗后 15 d)、块茎增长期(出苗后 60 d)和成熟收获期(出苗后 90 d)分别取 0~20,20~40 cm 土壤,测定土壤养分含量。每个小区对角线取 3 个点,剔除石块和植物残根等杂物,混合制样,装袋后带回实验室,样品经风干后过 1 mm 筛,测定各项指标。

土壤容重采用环刀法^[9];总孔隙度采用公式法^[9];有机质采用重铬酸钾容量—外加热法^[9];碱解氮含量采用碱解扩散法^[9];有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法^[9];速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法^[9];采用 Excel 2003、SAS 9.1 软件、SPSS 13.0 统计分析软件进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 炭基肥对土壤容重的影响

容重是土壤物理特性的一个重要指标,一般来说,土壤容重越小,说明土壤比较疏松,孔隙较多;容重越大,说明土壤紧实度大,结构差。由表 2 可见,各处理的土壤容重随土层的加深而增加;与播种前相比,收获前各土层土壤容重的变化与施肥的种类和施肥量有关。0~10,10~20,20~40 cm 各土层,施化肥处理 H₁、H₂ 土壤容重收获前大于播种前;施炭基肥处理 M₄ 土壤容重收获前小于播种前。

与 CK 相比,各施肥处理均可降低各土层的土壤容重,且随施肥量的增加降低幅度增加,其中,M₄ 处理降低幅度最大。等量氮磷钾施用量下,施炭基肥处理降低幅度高于施化肥处理。0~10 cm 土层,

2012 年除 H₁、H₂ 和 M₁ 外其他处理与 CK 均达到差异显著水平,2013 年各处理与 CK 间差异不显著;10~20 cm 土层,M₃、M₄ 与 CK 差异显著,H₁、H₂、M₁ 与 CK 差异不显著;20~40 cm 土层,M₂、M₃ 和 M₄ 与 CK 差异显著,H₁ 与 CK 差异不显著。收获前 0~10,10~20,20~40 cm 土层施炭基肥各处理土壤容重 2 年的平均值较 CK 分别降低了 4.62%~8.41%,3.63%~8.29%,5.90%~10.80%;施化肥处理较 CK 降低了 1.14%~6.49%,0.35%~3.20%,2.61%~7.17%;等量氮磷钾条件下,各层土壤容重施炭基肥处理较施化肥处理 2 年平均值分别降低了 1.99%~3.52%,3.28%~5.21%,3.38%~4.83%。

结果表明,等量氮磷钾条件下,施炭基肥降低马铃薯田土壤容重的幅度明显高于施化肥处理,且随着炭基肥施用量的增加,土壤容重降低幅度逐渐增大。

表 2 炭基肥对土壤容重和孔隙度的影响

Tab.2 Effects of carbon based fertilize on bulk density and porosity of soil												
年份 Years	指标 Index	土层/cm Soil layers	播种前 Before sowing	收获前(出苗后 90 d) Before harvest								
				CK	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
2012	容重/(g/cm ³)	0~10	1.29	1.34a	1.32ab	1.29abc	1.27bcd	1.24cd	1.29abc	1.27bcd	1.25cd	1.22d
		10~20	1.37	1.42a	1.41ab	1.39abc	1.36bc	1.35cd	1.39abc	1.36bcd	1.34cd	1.31d
		20~40	1.39	1.56a	1.51ab	1.48bc	1.46bc	1.42cd	1.47bc	1.44bcd	1.40cd	1.38d
	总孔隙度/%	0~10	49.57	48.68b	49.55ab	49.71ab	50.20ab	51.09ab	50.36ab	50.63ab	50.82ab	51.87a
		10~20	47.13	46.54b	46.74b	47.30ab	48.08ab	48.22ab	47.40ab	48.42ab	48.47ab	49.35a
		20~40	46.61	44.04a	44.82a	45.26a	45.59a	46.50a	45.73a	46.38a	46.88a	47.16a
2013	容重/(g/cm ³)	0~10	1.21	1.27a	1.26a	1.23a	1.22a	1.20a	1.20a	1.20a	1.19a	1.17a
		10~20	1.32	1.36a	1.36a	1.35ab	1.35ab	1.34ab	1.29abc	1.29abc	1.27bc	1.24c
		20~40	1.44	1.49a	1.46ab	1.45ab	1.44ab	1.41abc	1.40abc	1.37bc	1.36bc	1.34c
	总孔隙度/%	0~10	53.10	50.55b	51.88ab	52.14ab	53.10ab	53.95ab	53.85ab	54.19ab	54.51ab	55.30a
		10~20	49.23	47.87c	47.93c	48.27c	48.49c	48.99bc	51.03abc	51.49abc	52.17ab	52.71a
		20~40	44.82	43.92b	44.48ab	45.07ab	45.45ab	47.07ab	48.52ab	48.82ab	49.75a	49.82a

注:不同小写字母表示差异显著(P<0.05);不同大写字母表示差异极显著(P<0.01)。表 3~6 同。
Note:Different small letters mean significant different at P<0.05 level;Different capital letters mean significant difference at P<0.01 level. The same as Tab.3-6.

2.2 炭基肥对土壤总孔隙度的影响

由表 2 可知,各处理土壤总孔隙度随土层的加深而降低;与播种前相比,收获前各土层土壤总孔隙度的变化与施肥的种类和施肥量有关。0~10,10~20,20~40 cm 各土层,施化肥处理 H₁ 土壤总孔隙度收获前小于播种前,施炭基肥处理 M₃、M₄ 土壤总孔隙度收获前大于播种前。

与 CK 相比,各施肥处理均可增加 0~40 cm 各土层的土壤总孔隙度,且随施肥量的增加而增大。等量氮磷钾施用量下,土壤总孔隙度施炭基肥的处理增加幅度高于施化肥的处理;其中,各土层总孔隙度均以 M₄ 处理增加幅度最大。0~10,10~20 cm 土层 M₄ 处理土壤总孔隙度与 CK 间均达到了差异

显著水平。收获前 0~10,10~20,20~40 cm 土层施炭基肥各处理土壤总孔隙度的平均值较 CK 分别增加了 4.99~7.98,4.22~8.07,7.15~10.26 个百分点;施化肥处理较 CK 分别增加了 2.21~5.84,0.28~2.97,1.52~6.38 个百分点;等量氮磷钾条件下,施炭基肥较化肥增加了 1.95~2.89,3.94~4.97,3.63~6.15 个百分点。

结果表明,施炭基肥能降低土壤容重,提高土壤的总孔隙度。且随着炭基肥施肥量的增加,改良土壤的效果呈递增趋势,其中以 M₄ 效果最佳。等量氮磷钾条件下,炭基肥的改良土壤效果较化肥更优。

2.3 炭基肥对土壤有机质含量的影响

由表 3 可见,随着马铃薯生育期的推进,0~

40 cm土层施化肥处理土壤有机质含量逐渐降低,2年平均值由出苗后 15 d 的 13.57~15.72 g/kg 降到出苗后 60 d 的 12.75~14.76 g/kg,出苗后 90 d 降到 9.17~10.57 g/kg;施炭基肥处理土壤有机质含量则呈先增高后降低的趋势,2年平均值由出苗后 15 d 的 13.11~14.88 g/kg 增加到出苗后 60 d 的 13.64~16.13 g/kg,出苗后 90 d 降到 9.34~11.49 g/kg。同一生育时期,0~20,20~40 cm 土层各施肥处理的土壤有机质含量随着施肥量的增加而增加,且均大于 CK。

等量氮磷钾施用量下,在出苗后 15 d(苗期),0~20,20~40 cm 土层,H₄ 处理的有机质含量与 CK 2 年均达到了显著或极显著差异水平;0~40 cm 土层土壤有机质含量平均值施化肥的处理高于施炭基

肥的处理,2012,2013 年施化肥处理土壤有机质含量较等含量炭基肥处理分别提高了 2.23%~4.89% 和 3.53%~6.39%。随着生育期的推进,施炭基肥的土壤有机质含量高于施化肥的处理,出苗后 60 d(块茎增长期),0~20,20~40 cm 土层,M₂、M₃、M₄ 和 H₄ 处理的有机质含量与 CK 2 年均达到了显著或极显著差异水平;0~40 cm 土层土壤有机质含量施炭基肥处理较等含量化肥处理 2 年分别增加了 10.53%~14.57% 和 3.79%~5.54%。出苗后 90 d(成熟收获期),0~20,20~40 cm 土层,M₄ 处理的有机质含量与 CK 2 年均达到了显著或极显著差异水平,0~40 cm 土层土壤有机质含量施炭基肥处理较等含量化肥处理 2 年分别增加了 2.72%~10.49% 和 1.19%~9.38%。

表 3 炭基肥对土壤有机质含量的影响

Tab.3 Effects of carbon based fertilize on the content of organic matter		g/kg					
土层 深度/cm Soil layers	处理 Treatment	2012 年出苗后天数/d After emergence days in 2012			2013 年出苗后天数/d After emergence days in 2013		
		15	60	90	15	60	90
0~20	CK	12.73dC	11.77eD	8.66cB	13.09fD	12.82eD	10.03eE
	H ₁	14.55abcABC	12.70deCD	9.19bcAB	14.85cdeBC	14.20dCD	10.33eDE
	H ₂	14.94abcABC	13.33cdeCD	9.29bcAB	15.09bcdeBC	14.83cdBC	10.79cdeCDE
	H ₃	15.44abAB	13.67cdeBCD	9.59bcAB	15.85bcB	15.77bcAB	11.49bcBCD
	H ₄	16.00aA	14.70bcdABC	10.75abAB	17.50aA	16.20abAB	11.98bABC
	M ₁	13.46cdBC	13.76cdeBCD	9.54bcAB	13.87efCD	14.74cdBC	10.44deDE
	M ₂	13.65cdBC	15.26abcABC	10.31abAB	14.47deBCD	15.61bcABC	11.36bcdBCDE
	M ₃	14.18bcdABC	16.22abAB	10.90abAB	15.29bcdBC	16.67abA	12.15bAB
	M ₄	15.31abAB	16.77aA	11.37aA	16.17bAB	17.02aA	13.12aA
20~40	CK	11.84bA	10.59dC	7.78bA	12.24eC	11.34dD	8.68dD
	H ₁	12.02bA	11.42cdBC	8.08bA	12.86cdeBC	12.67cCD	9.08cdCD
	H ₂	12.14bA	11.82bcdBC	8.30abA	13.38bcdeABC	13.17bcBC	9.30cdBCD
	H ₃	12.99abA	12.64bcBC	8.71abA	14.33abcAB	14.14abABC	9.71bcBCD
	H ₄	14.26aA	13.57bAB	9.02abA	15.11aA	14.56aAB	10.52bAB
	M ₁	12.44abA	12.90bcABC	8.20bA	12.66deBC	13.15bcBC	9.20cdCD
	M ₂	12.84abA	13.19bcABC	8.77abA	13.03bcdeBC	13.94abcABC	9.77bcBCD
	M ₃	13.02abA	13.62bAB	9.32abA	13.79abcdABC	14.37abABC	10.32bABC
	M ₄	13.54abA	15.62aA	9.99aA	14.48abAB	15.12aA	11.49aA

2.4 炭基肥对土壤碱解氮含量的影响

由表 4 可见,碱解氮含量与有机质含量变化规律相同,2012,2013 年表现基本一致。随着生育期的推进,0~40 cm 土层施化肥处理土壤碱解氮含量呈逐渐降低趋势,2 年平均值由出苗后 15 d 的 43.50~67.25 mg/kg 降到出苗后 60 d 的 38.35~55.42 mg/kg,出苗后 90 d 降到 35.38~48.79 mg/kg;施炭基肥处理土壤碱解氮含量则表现为先增高后降低的趋势,2 年平均值由出苗后 15 d 的 37.80~

56.07 mg/kg 增加到出苗后 60 d 的 44.70~64.44 mg/kg,出苗后 90 d 降到 39.61~55.39 mg/kg。

同一生育时期,0~20,20~40 cm 土层各施肥处理的土壤碱解氮含量均大于 CK,且随着施肥量的增加而增加。出苗后 15 d,0~20 cm 土层 H₂、H₃、H₄ 处理的碱解氮含量与 CK 均达到了差异显著或极显著水平,M₁ 处理的碱解氮含量与 CK 差异不显著;20~40 cm 土层 H₂、H₃、H₄、M₃ 和 M₄ 处理的碱解氮含量与 CK 均达到了差异极显著水平,M₁ 处理的碱

解氮含量与 CK 差异不显著。出苗后 60 d,0~20, 20~40 cm 土层除 H₁ 处理外其他施肥处理 2 年与 CK 均达到了差异极显著水平,M₄ 处理与其他施肥处理间达到了显著或极显著差异水平;出苗后 90 d, 0~20,20~40 cm 土层除 H₁、H₂ 处理外,其他施肥处理与 CK 2 年均达到了差异极显著水平。等量氮磷钾施用量下,0~20,20~40 cm 土层,土壤碱解氮含量在出苗后 15 d,施化肥的处理高于施炭基肥的处理,2 年平均值分别提高了 16.31%~22.58% 和 12.62%~21.09%,随着生育期的推进,施炭基肥的

土壤碱解氮含量高于施化肥的处理;出苗后 60 d, 0~20,20~40 cm 土层施炭基肥处理较化肥 2 年平均值分别增加了 16.53%~18.59% 和 9.94%~17.33%;出苗后 90 d,2 年平均值分别增加了 8.82%~23.89% 和 11.90%~15.88%。各处理对 0~40 cm 土层土壤碱解氮含量影响大小表现为 M₄>H₄>M₃>H₃>M₂>H₂>M₁>H₁>CK,由此可见,施炭基肥有利于提高土壤碱解氮的供应能力,且供应能力显著高于施用等量氮磷钾的化肥。

表 4 炭基肥对土壤碱解氮含量的影响
Tab.4 Effects of carbon based fertilize on the content of available N mg/kg

土层 深度/cm Soil layers	处理 Treatment	2012 年出苗后天数/d After emergence days in 2012			2013 年出苗后天数/d After emergence days in 2013		
		15	60	90	15	60	90
0~20	CK	34.69dC	32.46fE	29.68fD	37.29fG	36.36fE	32.28fE
	H ₁	40.63cdBC	36.17efDE	38.21deBCD	50.83eEF	42.67eE	36.54efDE
	H ₂	52.31bcBC	41.92deCD	38.58efCD	64.18cdCD	53.05dD	40.07deCD
	H ₃	58.80bB	44.15cdBCD	40.44cdeBC	76.06bB	63.26cC	46.19cC
	H ₄	66.61aA	49.71bcBC	45.82abcAB	79.16aA	69.75bB	57.69bAB
	M ₁	35.80dC	41.92deCD	39.51cdeBC	42.67fFG	51.75dD	41.74cdCD
	M ₂	41.74cdBC	48.60bcBC	44.71bcdAB	58.99dDE	62.51cC	45.82cC
	M ₃	47.30bcdBC	53.05bAB	50.83abA	67.34cdBCD	71.42bB	56.39bB
	M ₄	48.97bcdBC	60.84aA	52.68aA	72.53bcBC	78.10aA	62.70aA
20~40	CK	32.46eE	30.98fE	28.20gE	36.17fE	34.13gE	30.98dF
	H ₁	39.51deCDE	35.43eDE	32.28fgDE	43.04eCD	39.14fE	34.50dEF
	H ₂	48.42bcBC	38.96deCD	36.73efCD	48.23cdC	45.63eD	39.51cCDE
	H ₃	53.42bB	41.55bcdBCD	38.77edeBCD	50.09bB	50.46dCD	44.33bBCD
	H ₄	64.39aA	44.33bcBC	43.78bcABC	58.82aA	57.88bAB	47.86abAB
	M ₁	33.21eE	40.25cdBCD	38.03deBCD	39.51efDE	44.89eD	39.14cDE
	M ₂	38.21deDE	43.96bcBC	43.04bcdABC	44.33deCD	51.75cdC	45.08bBC
	M ₃	43.04cdCD	46.00bAB	45.08abAB	49.53eBC	55.09bcBC	47.67abAB
	M ₄	47.30bcdBCD	55.57aA	50.97aA	55.46bB	63.26aA	55.20aA

2.5 炭基肥对土壤有效磷含量的影响

由表 5 可见,随着马铃薯生育期的推进,0~40 cm 土层施化肥处理的有效磷含量逐渐降低,2 年平均值由出苗后 15 d 的 13.84~21.35 mg/kg 降到出苗后 60 d 的 11.96~19.31 mg/kg,出苗后 90 d 降到 11.12~17.64 mg/kg;施炭基肥的处理则表现为先增高后降低的趋势,2 年平均值由出苗后 15 d 的 11.59~18.19 mg/kg 增加到出苗后 60 d 的 14.39~22.36 mg/kg,出苗后 90 d 降到 12.80~19.80 mg/kg。同一时期同一施肥处理有效磷含量也随着土层的加深而变小,各时期各处理 0~20 cm 土层有效磷含量 2 年平均值较 20~40 cm 增加了 41.11%~95.61%。

同一时期,各土层各施肥处理的土壤有效磷含量均大于 CK,且随着施肥量的增加而增加。出苗后 15 d 时,0~20 cm 土层,除 M₁ 和 M₂ 处理之外,其他

施肥处理的有效磷含量与 CK 均达到了显著或极显著差异水平;20~40 cm 土层,H₂、H₃、H₄ 和 M₄ 处理与 CK 均达到了显著或极显著差异水平。出苗后 60,90 d 时,0~20,20~40 cm 土层,除 H₁ 处理外,其他施肥处理与 CK 间均达到了差异显著或极显著水平。

等量氮磷钾施用量下,在出苗后 15 d,施化肥处理的土壤有效磷含量高于施炭基肥的,0~40 cm 土层,土壤有效磷含量施化肥处理较炭基肥处理两年分别提高了 23.32%~37.56% 和 6.06%~14.56%;苗期以后则是施炭基肥处理高于施化肥的处理,出苗后 60 d,施炭基肥处理较化肥处理两年分别增加了 12.74%~19.31% 和 15.09%~21.37%;出苗后 90 d,土壤有效磷含量分别较化肥处理增加了 6.76%~13.98% 和 8.26%~17.79%。

表 5 炭基肥对土壤有效磷含量的影响

		Tab.5 Effects of carbon based fertilize on the content of available P						mg/kg
土层 深度/cm Soil layers	处理 Treatment	2012 年出苗后天数/d After emergence days in 2012			2013 年出苗后天数/d After emergence days in 2013			
		15	60	90	15	60	90	
0 ~ 20	CK	11.29fD	9.84fE	8.03eD	12.39fE	10.64gE	9.34eE	
	H ₁	17.86cdeBCD	14.50eDE	13.15deCD	16.86deCD	13.70fD	13.30dDE	
	H ₂	20.32bcdBC	17.76deCD	15.55cdBCD	18.37cdBCD	17.26deC	15.06cBCD	
	H ₃	24.63abAB	18.86cdeBCD	17.16bcdABC	22.12bAB	19.46cC	18.91bcBC	
	H ₄	26.74aA	24.92abAB	21.92abAB	25.13aA	23.42bAB	21.02abAB	
	M ₁	14.85efCD	17.96deCD	14.95cdBCD	15.45eDE	17.01eC	16.10cdCD	
	M ₂	15.15defCD	19.91cdBCD	16.36bcdABC	17.51deCD	19.16cdC	18.61bcBC	
	M ₃	18.31cdeBCD	23.02bcABC	19.56abcABC	19.11bcBC	22.52bB	20.32abABC	
	M ₄	22.07bcABC	28.54aA	23.83aA	22.57abAB	26.03aA	23.32aA	
	CK	8.53cdDE	8.13eD	7.50fF	9.39cB	8.53dE	7.88gG	
20 ~ 40	H ₁	10.49cCD	9.89deCD	8.83efEF	10.14bcB	9.74dDE	9.19fFG	
	H ₂	12.55bBC	10.89bcdBCD	10.49deCDE	11.54bB	11.24cCD	11.24deDE	
	H ₃	14.85abAB	12.49bcdBC	11.09cdBCDE	12.65aA	12.49cBC	12.19cdCD	
	H ₄	17.31aA	14.70abAB	13.15bB	16.20aA	14.20bB	14.45bB	
	M ₁	6.43dE	11.14cdBCD	9.74deDEF	9.64bcB	11.44cCD	10.39efEF	
	M ₂	8.78dDE	12.39bcdBC	11.44bcdBCD	10.69bcB	13.64cBC	12.24cdCD	
	M ₃	10.39cCD	14.20bcABC	12.64bcBC	11.24bcB	15.45bB	13.35bcBC	
	M ₄	13.65bBC	16.96aA	15.60aA	14.45aA	17.91aA	16.45aA	

2.6 炭基肥对马铃薯土壤速效钾含量的影响

由表 6 可知,速效钾含量与有效磷含量的变化规律相同。施化肥处理速效钾含量随生育期的推进逐渐降低,0~40 cm 土层 2 年平均值由出苗后 15 d 的 146.72 ~ 209.27 mg/kg 降到出苗后 60 d 的

126.57 ~ 175.34 mg/kg,出苗后 90 d 降到 112.79 ~ 147.24 mg/kg;炭基肥处理则表现为先增高后降低的趋势,2 年平均值由出苗后 15 d 的 126.95 ~ 172.16 mg/kg 增加到出苗后 60 d 的 140.89 ~ 202.38 mg/kg,出苗后 90 d 降到 122.86 ~ 166.86 mg/kg。各时期各

表 6 炭基肥对土壤速效钾含量的影响

		Tab.6 Effects of carbon based fertilize on the content of available K						mg/kg
土层 深度/cm Soil layers	处理 Treatment	2012 年出苗后天数/d After emergence days in 2012			2013 年出苗后天数/d After emergence days in 2013			
		15	60	90	15	60	90	
0 ~ 20	CK	128.16eD	109.07dC	85.75dD	140.88fE	126.04fG	104.83eE	
	H ₁	166.33cdeBCD	143.00cdBC	126.04cBC	168.45cdeCDE	147.24eFG	130.28dD	
	H ₂	181.17bcdABCD	159.97bcABC	121.80eC	185.41cdBCD	174.81cdDE	149.36bcCD	
	H ₃	208.74abAB	170.57bcABC	130.28cBC	212.98bAB	193.89bcBCD	155.73bBC	
	H ₄	225.70aA	185.41abcAB	145.12bcABC	238.43aA	212.98bAB	174.81aAB	
	M ₁	143.00deCD	166.33bcABC	132.40cBC	151.48efDE	162.09deEF	138.76cdCD	
	M ₂	155.73cdeBCD	179.05abcAB	143.00bcBC	164.21defCDE	185.41cCDE	157.85bBC	
	M ₃	176.93bcdABCD	193.89abAB	162.09abAB	181.17cdBCD	208.74bABC	172.69aAB	
	M ₄	187.53abcABC	219.34aA	179.05aA	193.89bcBC	234.18aA	187.53aA	
	CK	89.99dC	81.51dC	75.15eD	104.83dF	96.35dE	92.11eE	
20 ~ 40	H ₁	126.04bcBC	104.83cdBC	89.99deCD	126.04cDEF	111.20cdE	104.83deDE	
	H ₂	132.40bcABC	117.56bcdABC	94.23dCD	147.24bcBCD	123.92cCDE	123.92bcdBCD	
	H ₃	155.73abAB	128.16bcABC	109.08bcdBCD	166.33bAB	151.48bBC	130.28bcABCD	
	H ₄	174.81aA	134.52abcAB	123.92abcABC	198.14aA	168.45bAB	145.12abABC	
	M ₁	102.11dC	115.44bcdABC	104.83cdBCD	111.20dEF	119.68cDE	115.44cdBCD	
	M ₂	115.44cdBC	130.28abcABC	126.04abcABC	128.16cdCDEF	147.24bBCD	132.40bcABCD	
	M ₃	130.28bcABC	149.36abAB	134.52abAB	143.00bcBCDE	164.21bAB	140.88abABC	
	M ₄	145.12abcAB	166.33aA	147.24aA	162.09bBC	189.65aA	153.61aA	

处理土壤速效钾含量 20 ~ 40 cm 土层较 0 ~ 20 cm 2 年平均降低了 13.99% ~ 28.38%。

同一时期, 0 ~ 20, 20 ~ 40 cm 土层各施肥处理的土壤速效钾含量均大于 CK, 且随着施肥量的增加而增加。出苗后 15 d 时, 0 ~ 20, 20 ~ 40 cm 土层除 M_1 、 M_2 和 H_1 之外, 其他施肥处理的速效钾含量与 CK 均达到了显著或极显著差异水平; 出苗后 60 d 时, 0 ~ 20 cm 土层除 H_1 之外, 20 ~ 40 cm 土层除 H_1 、 H_2 和 M_1 之外, 其他施肥处理与 CK 均达到了差异显著或极显著水平; 在出苗后 90 d 时, 0 ~ 20 cm 土层所有施肥处理与 CK 均达到了极显著差异水平, 20 ~ 40 cm 土层除 H_1 外, 其他施肥处理与 CK 均达到了差异显著或极显著水平。

等量氮磷钾施用量下, 出苗后 15 d, 土壤速效钾含量施化肥的处理高于施炭基肥的处理, 0 ~ 40 cm 土层施化肥处理较施炭基肥处理 2 年分别提高了 15.64% ~ 20.40% 和 12.11% ~ 22.64%; 出苗后 60 d, 施炭基肥处理较化肥 2 年分别增加了 11.46% ~ 20.55% 和 7.99% ~ 11.36%; 出苗后 90 d, 2 年分别增加了 9.81% ~ 24.54% 和 6.21% ~ 9.64%。

结果表明, 等量氮磷钾条件下, 在苗期(出苗后 15 d), 土壤中有有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量施化肥处理高于施炭基肥的处理, 块茎生长期(出苗后 60 d) 和成熟收获期(出苗后 90 d), 则是施炭基肥处理高于施化肥的处理。

3 讨论与结论

Keiluweit 等^[10]研究表明: 施用生物炭能改变土壤容重, 同时伴随着土壤水分关系、植物根系格局、土壤动物群落等的变化。引起这些变化有两方面原因, 一为生物炭的容重本来就小于土壤的容重, 另外就是生物炭具有多孔结构, 这些大小孔隙能够储存空气和水分等^[11]。生物炭施入土壤后, 其总表面积与孔隙体积也会发生变化, 如生物炭对土壤有机质及矿物的吸附, 从而减小生物炭的表面积与总孔隙, 但是当生物炭中的易分解物质矿化后, 也可能增加其总表面积和总孔隙^[12]。本试验条件下, 2012, 2013 年施肥处理的土壤容重和孔隙度变化趋势一致, 但在数值上年份间存在差异。无论施炭基肥还是化肥均可降低土壤容重, 增加土壤孔隙度。等量氮磷钾条件下, 施炭基肥的土壤容重的降低幅度和孔隙度增加幅度明显高于化肥处理, 且随着施肥量的增加降低幅度逐渐增大, 这与卢广远等^[13]和陈红霞等^[14]的研究结果相似。施炭基肥能降低土壤容重, 提高土壤的总孔隙度, 且随着炭基肥施肥量的增

加, 改良土壤的效果呈递增趋势。施用炭基肥料后, 虽然土壤容重和孔隙度状况有所改变, 但改变土壤物理性状是一个长期的过程, 如果连续使用炭基肥料多年, 土壤物理性状又将如何变化, 还有待进一步研究。

Laird 等^[15]研究表明: 生物质炭能延缓肥料养分在土壤中的释放, 降低土壤养分淋洗损失, 提高肥料利用效率。Glaser 等^[16]试验结果表明, 生物质炭对土壤水分没有显著影响, 但随着施入量的增加, 土壤养分吸收和淋失比逐渐增加, 说明生物质炭主要是产生交换性复合物来吸附养分, 而不是靠吸水来保持土壤水中溶解的养分。张晗芝等^[17]采用田间盆栽试验表明, 施入 12, 48 t/hm² 生物质炭, 土壤的有机碳和全氮与对照相比, 分别提高了 49.44% 和 214.79%, 8.24% 和 23.53%, 但对土壤全磷、速效磷、pH 值没有显著影响。黄超等^[18]在生物质炭对黑麦草的应用效果研究中指出, 生物质炭施用量为 10, 50 g/kg 时, 经一年的培养试验后, 土壤的有机碳、速效磷、速效钾和盐基饱和度分别比对照增加 31% ~ 744%, 14% ~ 215%, 6% ~ 110% 和 17% ~ 82%。钟雪梅等^[19]利用竹炭和尿素制得的包膜尿素肥料能显著降低尿素在土壤中的淋洗量, 使氮素利用率较对照提高 10% ~ 25%。本研究结果表明, 施肥均能显著提高土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量, 2012, 2013 年各施肥处理的养分含量变化规律相同。施化肥的处理各土层有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量均随生育时期的推进逐渐降低, 而施炭基肥的处理表现为先增高后降低的趋势。等量氮磷钾条件下, 0 ~ 20, 20 ~ 40 cm 土层施炭基肥处理的有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量, 在出苗后 15 d, 施化肥的处理高于施炭基肥的处理; 出苗后 60, 90 d, 施炭基肥的处理高于施化肥的处理, M_4 处理的养分含量最高。这与 Steiner^[20] 和傅秋华^[21] 等的研究结果相似。说明炭基肥能延缓肥料养分在土壤中的释放, 降低肥料养分的淋失和固定等损失, 提高肥料养分利用率。

综合比较各施肥处理对马铃薯田土壤容重、孔隙度和养分含量的影响结果, 在本试验条件下, 炭基肥施用量为 1 200 kg/hm² 最好。

参考文献:

- [1] 曲贵伟. 生物有机肥料对土壤物理性质及玉米产量影响的试验初报[J]. 丹东纺专学报, 2004(2): 45 - 47.
- [2] 刘玉学, 刘 微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977 - 982.

- [3] Chen Y, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48: 526 – 530.
- [4] Steiner C, Blum W E H, Zech W, *et al.* Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil [J]. *Plant and Soil*, 2007, 291 (1/2): 275 – 290.
- [5] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short term laboratory experiments [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53 (2): 181 – 188.
- [6] 何绪生, 张树清, 余 雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27 (15): 16 – 25.
- [7] 钟雪梅, 朱义年, 刘 杰, 等. 竹炭包膜对肥料氮淋溶和有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25 (增刊): 154 – 157.
- [8] Magrini-Bair K A, Czernik S, Pilath H M, *et al.* Biomass derived, carbon sequestering, designed fertilizers [J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, 3 (12): 217 – 225.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 127 – 154.
- [10] Keiluweit M, Nico P S, Johnson M G, *et al.* Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44 (4): 1247 – 1253.
- [11] Joseph S, Camps-Arbestain M, Lin Y, *et al.* An investigation into the reactions of biochar in soil [J]. *Soil Research*, 2010, 48 (7): 501 – 515.
- [12] Liang B, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. *Soil Science Society America Journal*, 2006, 70: 1719 – 1730.
- [13] 卢广远, 张 艳, 王祥福, 等. 炭基肥料种类对土壤物理性质及玉米产量的影响 [J]. *河北农业科学*, 2011 (5): 50 – 53.
- [14] 陈红霞, 杜章留, 郭 伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011 (11): 2930 – 2934.
- [15] Laird D, Fleming P, Baiqun Wang, *et al.* Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158 (3 – 4): 436 – 442.
- [16] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, *et al.* Black carbon in soils: the use of benzene carboxylic acids as specific markers [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29 (4): 811 – 819.
- [17] 张晗芝, 黄 云, 刘 钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响 [J]. *生态环境学报*, 2010 (11): 2713 – 2717.
- [18] 黄 超, 刘丽君, 章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响 [J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2011 (4): 439 – 445.
- [19] 钟雪梅, 朱义年, 刘 杰, 等. 竹炭包膜氮肥的利用率比较 [J]. *桂林工学院学报*, 2006, 26 (3): 404 – 407.
- [20] Steiner C, Garcia M, Zech W. Effects of charcoal as slow release nutrient carrier on N-P-K dynamics and soil microbial population: Pot experiments with ferralsol substrate [M] // Woods W I, Teixeira W G, Lehmann J, (eds). *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision*. Netherlands: Springer, 2009: 325 – 338.
- [21] 傅秋华, 张文标, 钟泰林, 等. 竹炭对土壤性质和高羊茅生长的影响 [J]. *浙江林学院学报*, 2004 (2): 43 – 47.