

有机质施用量对马铃薯产量及氮、磷、钾养分吸收利用的影响

阳新月^{1,2} 向颖^{1,2} 陈子恒^{1,2} 林茜^{1,2}
邓振鹏^{1,2} 周克友³ 李明聪³ 王季春^{1,2}

(¹西南大学农学与生物科技学院, 400715, 重庆; ²薯类生物学与遗传育种重庆市重点实验室, 400715, 重庆; ³重庆市巫溪县农业技术推广中心, 405800, 重庆)

摘要 为探究有机质提升下马铃薯对土壤氮、磷、钾养分的吸收利用特点, 采用中晚熟品种青薯9号, 在2个基础肥力差异较大的试验点, 设置有机质0 (T1)、975 (T2)、1950 (T3)、2925 (T4) 和3900 kg/hm² (T5) 5个有机质用量处理, 并设不施肥处理 (T0), 研究有机质施用总量增加对土壤养分含量与微生物数量, 及对中晚熟品种青薯9号产量、干物质积累量和养分吸收利用情况的影响。结果表明, 有机质施入总量增加能有效提高土壤养分含量和土壤微生物数量; 随着有机质施入量的增加, 马铃薯产量、养分积累量以及养分利用率、肥料贡献率、肥料偏生产力与土壤细菌/真菌比率均呈现先增后减的趋势, 且基础肥力较高试验点高于基础肥力较低试验点。在基础肥力较高的歌马试验点和基础肥力较低的尖山试验点分别施入有机质975和1950 kg/hm²时其产量最佳, 较T1处理分别增产11.84%和8.22%。综上, 施入有机质对肥料利用率、偏生产力与肥料贡献率的作用更突出; 土壤肥力较高时, 马铃薯更易于达到高产目标; 施入过多或过少有机质均不利于马铃薯的营养吸收与产量形成。

关键词 马铃薯; 有机质; 氮、磷、钾养分; 养分吸收利用; 产量

马铃薯产量由多种因素共同影响, 其中土壤肥力与施肥水平对产量影响较大, 合理施肥是保证马铃薯产量和提高品质的前提条件^[1-2]。

当前, 长期施用化肥对耕地、作物的负面影响日益凸显。有机肥部分替代化肥促进中国绿色农业发展受到广泛关注^[3-4]。有机肥中富含有机质、无机养分及各种微生物和酶。土壤有机质通过维持和提高土壤质量^[5]和土壤健康指标^[6]进而影响作物产量, 即通过改变土壤结构提高土壤肥力、增加土壤的透气性和持水能力, 为土壤生物提供栖息地, 促进养分循环、保留和释放, 影响作物产量^[7]。因此, 提高土壤有机质水平被认为是一种确保作物生产力稳定和持久的方法, 可减少了对矿质肥料投入的依赖^[8-9]。魏猛等^[10]研究发现, 18 750 kg/hm²有机肥配施化肥可以显著增加土壤中有机质和氮、磷、钾含量。Mohammad等^[11]研究证实, 施用60 t/hm²农家肥、200 mL/hm²生物肥和525 kg/hm²化肥能提高马铃薯的株高、主茎数、叶面积指数以及干物质含量。李玉梅等^[12]研究发现, 6000 kg/hm²秸

秆和1500 kg/hm²有机肥配施化肥均可以促进马铃薯在块茎膨大期、淀粉积累期的生长, 使地上部生物量增加, 地下部根系更发达。陈会鲜等^[13]发现, 增施有机肥显著增加了木薯块根粗与薯数, 进而提高了木薯的块根产量。减施30%专用化肥同时增施2250 kg/hm²的生物有机肥可以显著提高马铃薯的氮、磷、钾肥料利用率^[14]。30%有机肥氮替代化肥氮可以推迟马铃薯生育期, 增加干物质积累量, 促进干物质向块茎转移^[15]。在马铃薯—小麦轮作体系中, 用有机钾代替60%无机化肥钾, 可以使马铃薯钾肥利用率增加38.2%^[16]。化肥减施20%+有机肥800 kg/hm²处理可以显著提高小麦氮肥农学利用率和氮肥偏生产力^[17]。陈猛猛等^[18]研究发现, 450 kg/hm²有机肥与64 kg/hm²磷肥配施可以提高水稻的磷肥农学效率、磷肥贡献率和肥料偏生产力。

前人关于有机肥施用的研究多集中在施用量的增加以及有机肥替代部分无机化肥对马铃薯影响等方面。有机肥增加量有较大差异, 且在增加

作者简介: 阳新月, 研究方向为马铃薯栽培生理, E-mail: hi_yangxinyue@163.com

王季春为通信作者, 研究方向为薯类作物栽培生理, E-mail: wjchun@swu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD020080802)

收稿日期: 2024-01-17; 修回日期: 2024-03-08; 网络出版日期: 2024-04-23

有机质的同时也增加了无机养分的总量，不能确定增施有机肥的影响规律，也不能区分有机质与无机养分各自作用的大小。而基于有机质总量变化对马铃薯影响的研究鲜见报道。本研究通过施用不同用量的有机肥与无机化肥，在平衡氮、磷、钾无机养分施入量基础上，探索有机质施用总量增加对马铃薯产量及吸收利用养分的影响，明确有机质对提升土壤无机氮、磷、钾养分高效利用

的机制，为有机肥合理施用以及提高土壤无机养分利用率提供理论依据和生产指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在重庆市北碚区歇马街道和巫溪县尖山镇试验基地进行。试验地地势平坦、肥力均匀。供试土壤基础养分含量见表 1。

表 1 试验地土壤基础肥力状况
Table 1 Soil basic fertility in experimental field

地点 Site	土壤类型 Soil type	碱解氮 Alkaline-hydrolytic N (mg/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	有机质 Organic matter (g/kg)	pH
歇马 Xiema	沙壤土	96.13	95.49	130.33	34.51	5.48
尖山 Jianshan	沙壤土	22.63	7.29	67.92	9.28	6.52

1.2 供试材料

供试马铃薯为晚熟品种“青薯 9 号”，生育期 115 d，由青海省农业科学院选育。供试商品有机肥含 N 0.6%、P₂O₅ 1.5%、K₂O 0.1%和有机质 52%（由四川正威实业有限公司提供）；供试单质化肥为尿素（含 N 46%）、过磷酸钙（含 P₂O₅ 12%）、硫酸钾（含 K₂O 50%）。

1.3 试验设计

采用单因素随机区组试验设计，设置不施有机质对照（T1）和施有机质 975（T2）、1950（T3）、2925（T4）和 3900 kg/hm²（T5）5 个有机质用量处理，并设不施肥对照处理（T0）。试验各处理见表 2。

试验设 3 次重复，共 18 个小区，每个小区种

表 2 试验处理及施肥量
Table 2 Experimental treatments and fertilization amount

处理 Treatment	施用量 Application amount				总有效养分折算 Total effective nutrient conversion				
	有机肥 Organic fertilizer	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机质 Organic matter	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	kg/hm ²
T0	0	0	0	0	0	0	0	0	
T1	0	225	113	300	0	225	113	300	
T2	1875	214	84	298	975	225	113	300	
T3	3750	203	56	296	1950	225	113	300	
T4	5625	191	28	294	2925	225	113	300	
T5	7500	180	0	293	3900	225	113	300	

3 垄，垄距 0.65 m，株距 0.29 m。小区面积 9.61 m²。有机肥、磷肥和钾肥全部作为基肥施入，氮肥按 6:4 的比例作为基肥与齐苗期追肥施入。施基肥后盖土起垄，田间管理按常规方法进行。歇马试验点于 2020 年 12 月 12 日播种，溪尖山试验点于 2021 年 1 月 14 日播种，收获时间均为 2021 年 6 月 24 日。

1.4 测定指标与方法

于淀粉积累期在各小区挖取长势基本一致的 3 株，分为根、茎、叶和块茎 4 个部分，于 105 ℃下杀青 30 min，80 ℃烘干至恒重，测定各部分干

物质重。收获时测定各小区取样后剩余马铃薯块茎产量，按实际面积折算单位面积产量。

1.4.1 植株各器官全氮、全磷、全钾含量 经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮，采用半微量凯氏定氮法测定 N 含量，采用钒钼黄比色法测定 P 含量，采用火焰光度法测定 K 含量^[19]。

1.4.2 微生物种类与数量 于收获期采用马丁孟加拉红培养基培养一平板表面涂布法计数土壤真菌数；采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基培养一平板表面涂布法计数土壤细菌数^[20]。

植株各器官养分积累量（kg/hm²）=每公顷该

器官干重×每千克该器官该元素含量^[21]。

施肥区养分利用率(%)=(施肥区作物吸收该元素总量-无肥区作物吸收该元素总量)/施入肥料中所含该元素总量×100^[21]。

肥料偏生产力(kg/kg)=施肥区产量/施肥量^[22]。

肥料贡献率(%)=(施肥区产量-无肥区产量)/施肥区产量×100^[22]。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 处理数据；采用 DPS 7.05 进行方差分析；采用 Duncan 新复极差法进行处理平均值多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤养分与微生物群落的影响

2.1.1 对土壤养分的影响 由表 3 可知，歇马和

尖山 2 个试验点的土壤养分随着有机质施入量的增加呈上升趋势。2 个试验点碱解氮含量均随有机质施入量的增加呈上升趋势，各处理较对照 T1 处理分别提升了 4.22%~26.02%和 1.68%~12.60%。

歇马试验点各施肥处理间的速效磷含量无显著差异，T1~T5 处理均显著高于 T0 处理。尖山试验点速效磷含量随着有机质施入量的增加呈上升趋势，较对照 T1 处理提高了 8.02%~70.73%。歇马试验点有效钾含量随有机质施入量的增加而增多，较对照 T1 处理提高 1.62%~14.53%；而尖山试验点有效钾含量呈先升后降趋势，较对照 T1 提高 12.19%~25.99%。2 个试验点有机质含量均随着有机质施入量的增加呈上升趋势，较 T1 处理分别提高 16.63%~76.16%和 3.85%~12.26%，均以 T5 处理为最大，分别为 14.41 和 38.46 g/kg。结果表

表 3 不同有机质施入量对土壤养分的影响
Table 3 Effects of different organic matter application rate on soil nutrient

地点 Site	处理 Treatment	碱解氮 Alkaline-hydrolytic N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	有效钾 Available K (mg/kg)	有机质 Organic matter (g/kg)
歇马 Xiema	T0	18.20±0.57d	10.77±0.37b	130.47±4.74c	8.36±0.46e
	T1	20.37±1.15c	12.41±0.68a	148.59±6.17b	8.18±0.05e
	T2	21.23±1.19c	12.75±0.53a	151.00±3.83b	9.54±0.12d
	T3	23.10±1.71b	13.29±0.96a	157.91±6.45ab	11.60±0.04c
	T4	25.43±1.19a	13.58±0.19a	164.11±10.80ab	13.19±0.02b
	T5	25.67±0.66a	13.76±1.18a	170.18±3.72a	14.41±0.15a
尖山 Jianshan	T0	73.53±2.10c	56.10±4.98c	65.88±1.29c	33.28±2.45f
	T1	83.30±2.62b	65.94±7.60bc	124.04±6.20b	34.26±0.02e
	T2	84.70±3.96b	60.60±5.06bc	139.16±8.10ab	35.58±0.43d
	T3	85.63±3.81ab	72.90±6.94b	156.28±13.50a	36.66±0.48c
	T4	90.07±3.72ab	88.93±7.88a	154.21±13.02a	37.29±0.02b
	T5	93.80±5.24a	95.78±5.68a	153.59±1.33a	38.46±0.40a

不同小写字母表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平，下同。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at $P < 0.05$ level, the same below.

明，施入有机质能够提高土壤养分含量。

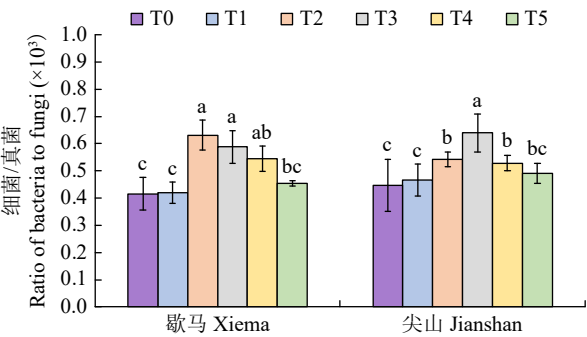
2.1.2 对微生物群落的影响 由表 4 可知，施入

表 4 不同有机质施入量对土壤微生物群落的影响
Table 4 Effects of different organic matter application rate on soil microbial community

处理 Treatment	歇马 Xiema			尖山 Jianshan		
	放线菌 Actinomycetes (×10 ⁵ /g)	细菌 Bacteria (×10 ⁶ /g)	真菌 Fungi (×10 ³ /g)	放线菌 Actinomycetes (×10 ⁵ /g)	细菌 Bacteria (×10 ⁶ /g)	真菌 Fungi (×10 ³ /g)
T0	10.33±1.53c	6.33±6.33d	15.33±1.53c	15.33±1.53c	13.33±1.53c	28.67±1.53cd
T1	11.33±1.53c	7.67±1.53cd	18.33±0.57ab	16.67±1.53bc	13.67±0.58bc	30.67±1.53ab
T2	12.00±1.00bc	9.33±1.53bc	16.67±1.53bc	18.67±1.53ab	15.67±0.58a	29.00±2.00cd
T3	13.33±0.58b	12.00±12.00a	19.33±1.53a	19.67±2.08a	16.67±1.53a	27.67±1.52d
T4	15.67±1.53a	8.67±8.67bc	17.00±1.00bc	20.00±1.00a	15.67±1.53a	29.67±0.57bc
T5	13.33±1.53b	10.00±10.00b	19.33±1.53a	21.33±2.08a	15.33±2.52ab	31.33±1.53a

有机质在一定程度上提升了土壤微生物数量。歇马、尖山 2 个试验点放线菌数量分别较对照 T1 处理提高 5.91%~38.31%和 12.00%~27.79%；细菌数量分别较对照 T1 处理提高 21.64%~56.45%和 12.14%~21.95%。歇马试验点 T2 和 T4 处理土壤真菌数量较对照 T1 处理降低,较 T3 和 T5 处理提高,但均无显著差异；尖山试验点 T2、T3 和 T4 处理较对照 T1 降低 3.26%~9.78%，较 T5 处理提高。结果表明，合理的有机质施入量可以提高土壤中放线菌与细菌数量，减少真菌数量。

由图 1 可知，2 个试验点的细菌/真菌比值随着有机质施入量的增加呈先升后降的趋势。歇马试验点细菌/真菌比值在 T2 处理达到最大 0.63×10^3 ，较 T1 对照处理提高 50.08%，但与 T3、T4 处理不存在显著差异。尖山在 T3 处理达到最大值 0.64×10^3 ，显著高于其他处理，较 T1 对照处理提高 42.96%。结果表明，歇马试验点 T2 处理与尖山 T3 处理有利于土壤细菌/真菌比值提高。



不同小写字母表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平，下同。
Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at $P < 0.05$ level, the same below.

图 1 不同有机质施入量对土壤细菌/真菌的影响
Fig.1 Effects of different organic matter application rate on ratio of soil bacteria to fungi

2.2 不同处理对马铃薯植株干物质积累与产量的影响

2.2.1 对马铃薯单株干物质积累的影响 由表 5 可知，随着有机质施入量的增加，2 个试验点单株根、茎、叶和块茎干重均呈先升后降的趋势。2 个试验点的单株根干重分别在 T2、T3 处理达到最大

Table 5 Effects of different organic matter application rate on dry matter accumulation per plant g/株 g/plant						
地点 Site	处理 Treatment	根干重 Root dry weight	茎干重 Stem dry weight	叶干重 Leaf dry weight	块茎干重 Tuber dry weight	总干物质积累 Total dry matter accumulation
歇马 Xiema	T0	0.20±0.04d	7.54±3.10c	9.33±2.95d	44.10±3.20d	61.17±6.36d
	T1	0.43±0.02c	36.98±2.20b	19.61±2.34c	71.32±5.51bc	128.34±1.12c
	T2	0.54±0.05a	44.15±7.04a	27.96±0.70a	91.93±8.18a	164.58±12.74a
	T3	0.52±0.05ab	38.82±2.36ab	26.68±0.75ab	84.68±8.72ab	150.71±10.33ab
	T4	0.45±0.04abc	42.26±6.16ab	25.35±1.23ab	74.87±2.88bc	142.93±6.10bc
	T5	0.44±0.02bc	37.38±2.43b	23.32±2.75b	67.65±7.85c	128.79±5.44c
尖山 Jianshan	T0	0.34±0.11c	6.69±2.49d	6.02±0.45c	72.60±7.90c	85.64±7.56c
	T1	0.61±0.07b	28.30±1.55b	10.48±1.22b	83.35±2.68b	122.75±1.77b
	T2	0.81±0.05a	32.65±1.95a	13.80±0.80a	91.29±4.97ab	138.54±3.34a
	T3	0.85±0.03a	32.38±1.89a	13.30±1.54a	97.50±1.35a	144.02±2.71a
	T4	0.82±0.09a	30.22±0.97ab	8.78±0.56b	98.10±8.48a	137.91±9.97a
	T5	0.53±0.11b	20.92±0.40c	9.12±1.75b	84.87±5.73b	115.44±6.35b

值，但与 T2 和 T4 处理无显著差异。2 个试验点的茎干重在 T2、T3 和 T4 处理间无显著差异，均在 T2 处理达到最大值。叶干重均在 T2 处理达到最大值，但歇马试验点 T3 和 T4 处理间无显著差异；尖山 T2 和 T3 处理间无显著差异。歇马试验点的单株块茎干重在 T2 处理达到最大值 91.93 g/株，比 T1 处理显著高出 28.90%，但与 T3 处理无显著差异；尖山试验点在 T4 处理达到最大值 98.10 g/株，但与 T2 和 T3 处理无显著差异。

2 个试验点单株总干物质积累量在各处理下的变化趋势与各器官变化趋势一致。随着有机质施入量的增加，均呈先升后降的趋势。歇马试验点以 T2 处理最大，为 164.58 g/株，显著高于其他处理，相比对照 T1 处理显著提高 28.24%。尖山试验点同样以 T3 处理最大，为 144.02 g/株，但与 T2 和 T4 处理无显著差异，较对照 T1 处理显著提高 17.33%。结果表明，歇马试验点 T2 处理与尖山试验点 T3 处理有利于马铃薯各器官的干物质积累。

2.2.2 对马铃薯产量的影响 由表 6 可知，随着有机质施入量的增加，歇马和尖山 2 个试验点的产量与淀粉产量均呈先升后降的趋势。歇马试验点产量在 T2 处理达到最大值 43 567 kg/hm²，且显著高于其他处理，较 T1 处理显著提高 11.84%。尖山试验点产量在 T3 处理达到最大 38 096 kg/hm²，较 T1 处理显著增产 8.22%。歇马的淀粉产量在 T2 处理达到最大值 10 349 kg/hm²，显著高于其他处理，较 T1 处理提高 14.28%。尖山在 T3 处理达到最大值，与 T2 处理无显著差异。结果表明，歇马 T2

表 6 不同有机质施入量对马铃薯产量的影响
Table 6 Effects of different organic matter application rate on potato yield kg/hm²

处理 Treatment	歇马 Xiema		尖山 Jianshan	
	产量 Yield	淀粉产量 Starch yield	产量 Yield	淀粉产量 Starch yield
T0	21 187±1132e	5196±340e	19 403±959e	4215±255d
T1	38 955±896c	9055±255cd	35 202±1618b	6629±373b
T2	43 567±1229a	10 349±357a	36 739±797ab	7301±194a
T3	41 655±441b	9727±126b	38 096±1263a	7502±304a
T4	40 891±896b	9415±252bc	30 675±310c	6017±74c
T5	37 139±633d	8657±180d	27 959±1306d	5673±324c

处理与尖山 T3 处理有利于马铃薯产量形成。

2.3 不同处理对马铃薯养分吸收利用的影响

2.3.1 对马铃薯植株氮、磷、钾养分积累的影响 由表 7 可知，2 个试验点马铃薯植株的氮、磷、钾养分积累量均随着有机质施入量的增加呈先升后降的趋势。歇马试验点植株氮、磷、钾养分积累量均在 T2 处理达到最大，显著高于其他处理，较 T1 处理分别显著高出 45.76%、44.92%和 36.33%。尖山试验点植株的氮素、磷素积累量均在 T3 处理达到最大，显著高于其他处理，较 T1 处理分别显著高出 23.12%和 73.62%。钾素积累量在 T2 处理达到最大，较 T1 处理显著高出 30.05%，但与 T3、T4 处理无显著差异。结果表明，歇马 T2 处理与尖山 T3 处理有利于马铃薯植株氮磷、钾、养分积累。

表 7 不同有机质施入量对马铃薯养分积累量的影响
Table 7 Effects of different organic matter application rate on nutrient accumulation of potato kg/hm²

处理 Treatment	歇马 Xiema			尖山 Jianshan		
	N	P	K	N	P	K
T0	27.40±4.61e	6.65±0.83d	55.00±9.68d	45.29±3.50e	9.61±0.91e	66.87±7.03c
T1	111.96±5.76d	15.85±0.25c	169.60±5.47c	127.25±1.19c	14.71±0.18d	150.79±2.24b
T2	163.19±6.57a	22.97±0.63a	231.21±6.95a	142.12±4.21b	20.72±0.55b	200.55±7.05a
T3	145.67±8.90b	20.07±1.31b	216.07±12.60b	156.67±2.43a	25.54±0.65a	198.58±5.08a
T4	129.42±9.09c	20.04±1.46b	210.50±9.71b	128.51±10.20c	18.94±1.56c	189.17±13.43a
T5	107.56±5.70d	17.18±0.54c	177.75±3.87c	111.37±7.80d	14.54±0.93d	149.81±7.93b

2.3.2 对马铃薯植株氮、磷、钾养分利用率的影响 由表 8 可知，2 个试验点养分利用率在不同处理之间

表 8 不同有机质施入量对马铃薯养分利用率的影响
Table 8 Effects of different organic matter application on nutrient utilization rate of potato %

处理 Treatment	歇马 Xiema			尖山 Jianshan		
	氮肥利用率 N utilizing rate	磷肥利用率 P utilizing rate	钾肥利用率 K utilizing rate	氮肥利用率 N utilizing rate	磷肥利用率 P utilizing rate	钾肥利用率 K utilizing rate
T1	37.58±1.27c	18.77±1.24b	46.02±1.69b	36.42±1.03c	10.42±1.25d	33.70±2.56b
T2	55.91±3.38a	30.59±2.11a	66.03±3.49a	43.03±2.58b	22.67±2.32b	53.69±4.59a
T3	52.57±1.94a	27.38±1.26a	62.74±4.77a	49.50±1.74a	32.52±1.42a	52.90±3.34a
T4	45.35±1.66b	27.32±1.38a	65.13±3.52a	36.98±2.82c	19.06±1.38c	49.12±2.73a
T5	35.63±1.61c	21.49±1.33b	49.30±2.49b	29.37±2.97d	10.07±1.34d	33.31±2.65b

存在显著差异，呈先升后降的趋势。歇马试验点氮肥利用率在 T2 处理达到最大 55.91%，与 T3 处理无显著差异，较 T1 处理显著高出 44.33%。T2、T3、T4 处理间植株磷、钾肥利用率均无显著差异，均在 T2 处理最大。尖山试验点植株氮、磷肥利用率均在 T3 处理达到最大，显著高于其他处理，较 T1 处理分别显著高出 35.91%和 212.09%。T3 处理钾肥利用率最大，较 T1 处理显著高出 54.00%，与 T2、T4 处理无显著差异。结果表明，歇马 T2 处理与尖山 T3 处理有利于马铃薯植株氮、磷、钾

养分利用率提高。

2.3.3 对肥料偏生产力的影响 由表 9 可知，2 个试验点肥料偏生产力随着有机质施入量的增加均表现为先增加后减少的趋势。歇马试验点氮、磷、钾肥料偏生产均以 T2 处理最大，分别为 193.63、387.26 和 145.22 kg/kg，较 T1 处理分别显著提高 11.84%、12.13%和 11.84%，并显著高于其他处理。尖山均以 T3 处理最大，分别为 169.32、338.63 和 126.99 kg/kg，较 T1 处理分别显著提高 8.23%、8.22%与 8.22%。结果表明，歇马 T2 处理

表 9 不同有机质施入量对肥料偏生产力的影响						
Table 9 Effects of different organic matter application rate on partial productivity of fertilizer						kg/kg
处理 Treatment	歇马 Xiema			尖山 Jianshan		
	氮肥偏生产力 N partial productivity	磷肥偏生产力 P partial productivity	钾肥偏生产力 K partial productivity	氮肥偏生产力 N partial productivity	磷肥偏生产力 P partial productivity	钾肥偏生产力 K partial productivity
T1	173.13±3.98c	346.26±7.97c	129.85±2.99c	156.45±7.19b	312.90±14.39b	117.34±5.40b
T2	193.63±5.47a	387.26±10.93a	145.22±4.10a	163.28±3.54ab	326.56±7.09ab	122.46±2.66ab
T3	185.13±1.96b	370.27±3.93b	138.85±1.47b	169.32±5.61a	338.63±11.23a	126.99±4.21a
T4	181.74±3.98b	363.47±7.97b	136.30±2.99b	136.33±1.38c	272.67±2.76c	102.25±1.04c
T5	165.06±2.81c	330.12±5.63c	123.80±2.11c	124.26±5.81d	248.53±11.61d	93.20±4.35d

与尖山 T3 处理有利于肥料偏生产力提高。

2.3.4 对肥料贡献率的影响 由图 2 可知，2 个试验点的肥料贡献率均随着有机质施入量的增加呈先升后降的趋势。歇马试验点在 T2 处理达到最大，为 51.35%，较 T1 处理显著提高 19.53%，与 T3 处理无显著差异，但显著高于其他处理。尖山试验点在 T3 处理达到最大，为 49.03%，较 T1 处理显著提高 61.82%，但与 T1 和 T2 处理差异不显著。结果表明，歇马 T2 处理与尖山 T3 处理有利于肥料贡献率提高。

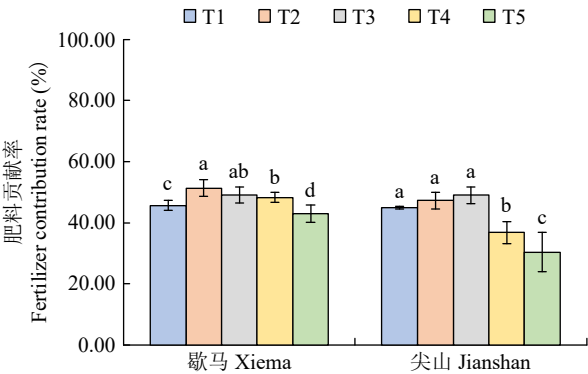


图 2 不同有机质施入量对肥料贡献率的影响
Fig.2 Effects of different organic matter application rate on the fertilizer contribution rate

3 讨论

3.1 增施有机质对土壤肥力的影响

前人^[23]研究表明，土壤有机质可以通过养分、水分供应和影响土壤其他物理性质 3 个方面影响产量。Johnston^[23]研究发现，土壤有机质含量的降低会减少植物 N、P、S 等某些必需营养物质的交换，而土壤有机质含量的增加可以为植物生长提供 N、P 和 S^[24]。合理的化肥配施有机肥方式可以显著提高土壤有机质含量以及速效养分含量^[25-27]。同时，有机质含量高的土壤通常具有更好的土壤结构和保水性能，其土壤有充足的胶体表面，可能有更多的宏观团聚体，有助于保持水分^[7]，这通常会导致作物在给定的氮输入水平下生长更快^[28]。在质地较重的土壤上，土壤有机质将黏土和粉土颗粒黏合成带有孔隙的碎屑，这些孔隙不仅包含空气和水，而且允许根系迅速渗透。在质地较轻、黏土颗粒较少的土壤上，有机质可以作为沙粒之间的缓冲物，使它们在生长根系施加的力下更自由地相对移动^[23]。在土壤微生物方面，微生物生物量会随有机质浓度的增加而增

加^[29]。陶磊等^[30]发现，有机肥配施化肥可以增加土壤中的细菌与放线菌数量，抑制真菌的数量，并提高了土壤中的细菌/真菌值^[31]，本研究结果与其相似。本研究中，土壤中的碱解氮、速效磷、有效钾和有机质含量随着有机质施入量的增加呈上升趋势，与前人^[32]研究结果相似。但并未涉及土壤供水能力与土壤理化性质，仍有待进一步研究。歇马试验点的土壤养分含量高于尖山试验点，究其原因可能是 2 个试验点环境因素以及基础肥力相差较大引起的。

3.2 增施有机质对马铃薯养分吸收利用率的影响

养分积累量是马铃薯产量形成的基础，肥料利用效率和块茎产量均会受到养分积累量的影响^[33]。在化肥的基础上增施有机肥可以显著提高马铃薯的氮、磷、钾养分积累量^[34]，但过高或过低的有机肥比例均会引起养分积累量的下降^[16]。本研究中，随着有机质施入量的增加，马铃薯对氮、磷、钾养分的积累量表现为先增后减，说明合理的有机质施入量可以使养分的释放更满足作物生长的需求。

养分利用率、肥料贡献率、肥料偏生产力等指标可以直观反映作物对养分的吸收情况和肥料的生产能力。梁玲玲等^[14]研究表明，70%的专用肥配施生物有机肥能显著提高氮、磷、钾肥料利用率。高怡安等^[35]研究表明，3000 kg/hm²普通有机肥替代 10%化肥也能显著提高肥料利用率。程谦勋等^[17]试验表明，适当施用有机肥可以提高肥料利用率、肥料偏生产力和肥料贡献率，而有机肥施用量过高或过低均会对这些指标造成影响。本试验中，马铃薯的氮、磷、钾养分利用率、肥料偏生产力和肥料贡献率均随着有机质施入量的增加先增后减，且在歇马试验点施入有机质 975 kg/hm²、尖山试验点施入有机质 1950 kg/hm²时对肥料的利用最佳。各指标均表现为歇马试验点高于尖山试验点，究其原因可能是因为歇马试验点的土壤基础肥力较高，而高肥力土壤其地力贡献率更高，两者呈正相关^[36]。

3.3 增施有机质对马铃薯生长与产量的影响

合理施肥是马铃薯获得高产的关键因素，有机肥施用量的增加可以显著提高马铃薯的产量，但过高或者过低的比例均会造成减产^[37]。张悦

等^[38]研究表明，施入生物有机肥后显著提高了马铃薯的单株结薯数和产量。徐茜等^[39]研究表明，化肥减量的基础上补充适量生物炭有机肥可以增加马铃薯的产量与单株结薯数，但降低了单薯重。增施有机肥可以显著提高马铃薯植株淀粉积累期的生物量^[12]和各器官在成熟期的干物质积累量^[40-41]。但过高含量的有机质会导致小麦产量显著下降^[42]。本研究中，随着有机质施入量的增加，马铃薯产量与干物质积累量均呈先增后减的变化趋势，这与前人^[43]的研究结果相似。且鲜薯产量在歇马试验点有机质施入量 975 kg/hm²、尖山试验点施入量 1950 kg/hm²时最高。究其原因，过高含量有机质土壤的作物生产力的下降可能是由于关键营养物质的微生物固定化所致^[43]。富含有机质的土壤中作物对养分和氧气的竞争加剧，从而会对地上生产力产生负面影响^[44]。作物产量和基础地力大小表现为一定的正相关性^[45]。歇马试验点产量高于尖山，可能是因为歇马土壤基础肥力高所致。歇马试验点有机质施入量小于尖山试验点，可能是由于作物生长在高基础地力的土壤中，更易于达到高产目标。而土壤地力较低时，对于施肥量的依赖性则较高^[46]。

4 结论

适当增施有机质可以提供植物生长发育所需养分以保证作物产量，但施入过多或过少均不利于马铃薯的营养吸收与产量形成。土壤肥力较高时，马铃薯更易于取得高产，施入有机质对肥料利用率、偏生产力与肥料贡献率的作用更突出。基础肥力较低土壤可适当多施有机质。

参考文献

- [1] 谢从华, 柳俊. 中国马铃薯从济荒作物到主粮之变迁. 华中农业大学学报, 2021, 40(4): 8-15.
- [2] 何天久, 李其义, 吴巧玉, 等. 氮磷钾对马铃薯产量和品质影响的研究进展. 黑龙江农业科学, 2014(9): 40-144.
- [3] 董文, 范祺祺, 胡新喜, 等. 马铃薯养分需求及养分管理技术研究进展. 中国蔬菜, 2017(8): 21-25.
- [4] 李百云, 李慧, 许泽华. 化肥减施结合有机肥对灵武长枣果园土壤肥力及果实品质的影响. 果树资源学报, 2022, 3(4): 7-22.
- [5] Reeves D. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. Soil and Tillage Research, 1997, 43(1/2): 131-167.
- [6] Lal R. Soil health and carbon management. Food and Energy Security, 2016, 5(4): 212-222.

- [7] Brady N C, Weil R R, Weil R R. The nature and properties of soils. Prentice Hall Upper Saddle River. Sedimentology, 2000, 47(6): 1230.
- [8] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet. Nature, 2011, 478(7369): 337-342.
- [9] Philip R G, Gross K L, Hamilton S K, et al. Farming for ecosystem services: An ecological approach to production agriculture. BioScience, 2014, 64(5): 404-415.
- [10] 魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期不同施肥对黄潮土区冬小麦产量及土壤养分的影响. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 304-312.
- [11] Mohammad A, Ali S. Influence of integrated use of chemical, biological and organic fertilizers on nitrate, lead and cadmium concentration and physiological characteristics of different cultivars of potato. Research on Crops, 2014, 15(1): 198-205.
- [12] 李玉梅, 李建兵, 胡颖慧, 等. 有机物料对马铃薯生长与土壤物理特性的影响. 中国土壤与肥料, 2021(4): 104-108.
- [13] 陈会鲜, 曹升, 严华兵, 等. 增施生物有机肥对食用木薯产量及品质的影响. 热带作物学报, 2019, 40(3): 417-424.
- [14] 梁玲玲, 周霞, 李志强, 等. 不同减肥技术对马铃薯养分高效利用的影响. 中国马铃薯, 2020, 34(3): 150-157.
- [15] 何万春, 黄凯, 令鹏, 等. 不同有机肥氮替代化肥氮比例对马铃薯根系吸收能力和形态的影响. 作物杂志, 2020(3): 132-136.
- [16] 秦永林, 石晓华, 贾立国, 等. 有机肥替代化肥对马铃薯一小麦轮作体系产量及钾肥利用率的影响. 北方农业学报, 2019, 47(4): 47-51.
- [17] 程谦勋, 武艳, 关文义, 等. 有机肥替代化肥对皖北小麦产量及养分利用率的影响. 安徽农学通报, 2021, 27(22): 118-120, 184.
- [18] 陈猛猛, 张士荣, 吴立鹏, 等. 有机-无机配施对盐渍土壤水稻生长及养分利用的影响. 水土保持学报, 2019, 33(6): 311-317, 325.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] Perez-Piqueres A, Edel-Hermann V, Alabouvette C, et al. Response of soil microbial communities to compost amendments. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(3): 460-470.
- [21] 李君, 张云贵, 刘青丽, 等. 甯宁烤烟推荐施肥关键参数试验研究. 中国土壤与肥料, 2022(2): 80-85.
- [22] 徐霞, 赵亚南, 黄玉芳, 等. 不同地力水平下的小麦施肥效应. 中国农业科学, 2018, 51(21): 4076-4086.
- [23] Johnston A E. Soil organic matter, effects on soils and crops. Soil Use and Management, 1986, 2(3): 97-105.
- [24] Johnston A E, Poulton P R, Coleman K. Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. Advances in Agronomy, 2009, 101: 1-57.
- [25] 何进勤, 雷金银, 桂林国, 等. 不同氮水平及生物有机肥对旱地土壤养分和马铃薯产量及品质的影响. 江苏农业科学, 2021, 49(10): 191-196.
- [26] 景宇鹏, 赵沛义, 康文钦, 等. 不同施肥处理对阴山北麓旱作区土壤肥力及马铃薯产量的影响. 北方农业学报, 2021, 49(2): 36-43.
- [27] 张萌, 苟久兰, 魏全全, 等. 不同生物有机肥对贵州高海拔春马铃薯生长及土壤肥力的影响. 作物杂志, 2019(3): 132-136.
- [28] Powlson D S, Whitmore A P, Goulding K W. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. European Journal of Soil Science, 2011, 62(1): 42-55.
- [29] Oldfield E E, Bradford M A, Wood S A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. Soil, 2019, 5(1): 15-32.
- [30] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响. 生态学报, 2014, 34(21): 6137-6146.
- [31] 刘星, 张书乐, 刘国锋, 等. 土壤熏蒸-微生物有机肥联用对连作马铃薯生长和土壤生化性质的影响. 草业学报, 2015, 24(3): 122-133.
- [32] 柳玲玲, 范成五, 苟久兰, 等. 土壤肥力、辣椒产量及品质对有机肥施用量的响应. 西南农业学报, 2015, 28(5): 2162-2165.
- [33] 张彬彬, 史春余, 柳洪鹏, 等. 钾肥基施利于甘薯块根产量的形成. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 208-216.
- [34] 李鸣凤, 王清林, 鲁明星, 等. 有机水溶肥料与无机肥料配施对马铃薯产量、养分吸收和品质的影响. 中国马铃薯, 2014, 28(6): 340-347.
- [35] 高怡安, 程万莉, 张文明, 等. 有机肥替代部分化肥对甘肃省中部沿黄灌区马铃薯产量、土壤矿质氮水平及氮肥效率的影响. 甘肃农业大学学报, 2016, 51(2): 54-60, 68.
- [36] 张水清, 黄绍敏, 姜翼来, 等. 华北潮土区不同肥力水平土壤基础地力研究. 中国农学通报, 2016, 32(20): 97-100.
- [37] 刘拴成. 有机肥与无机肥配施对马铃薯生长发育及产质量的影响. 河南农业科学, 2020, 49(3): 32-39.
- [38] 张悦, 马一凡. 不同生物有机复合肥施用量对半干旱区马铃薯水分利用、产量及经济收益的影响. 中国马铃薯, 2017, 31(4): 221-226.
- [39] 徐茜, 肖波, 宗洪霞, 等. 生物炭有机肥对马铃薯主要性状及生产效益的影响. 中国马铃薯, 2021, 35(6): 562-567.
- [40] 王国兴, 徐福利, 王渭玲, 等. 氮磷钾及有机肥对马铃薯生长发育和干物质积累的影响. 干旱地区农业研究, 2013, 31(3): 106-111.
- [41] 赵健宇, 王凤新, 孟潮彪, 等. 生物有机肥对马铃薯产量与土壤氮循环微生物的影响. 农业机械学报, 2022, 53(4): 343-351.
- [42] Kosina P, Reynolds M, Dixon J, et al. Stakeholder perception of wheat production constraints, capacity building needs, and research partnerships in developing countries. Euphytica, 2007, 157(3): 475-483.
- [43] Oldfield E E, Wood S A, Bradford M A. Direct evidence using a controlled greenhouse study for threshold effects of soil organic matter on crop growth. Ecological Applications, 2020, 30(4): e02073.
- [44] Sojka R, Upchurch D. Reservations regarding the soil quality concept. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1039-1054.
- [45] 夏圣益. 土壤基础地力、施肥水平与农作物产量的关系. 上海农业科技, 1998(1): 6-8.
- [46] 张君, 赵沛义, 潘志华, 等. 基于产量及环境友好的玉米氮肥投入阈值确定. 农业工程学报, 2016, 32(12): 136-143.

Effects of Organic Matter Application Rate on Yield and Nitrogen, Phosphorus and Potassium Nutrient Absorption and Utilization in Potato

Yang Xinyue^{1,2}, Xiang Ying^{1,2}, Chen Ziheng^{1,2}, Lin Qian^{1,2},
Deng Zhenpeng^{1,2}, Zhou Keyou³, Li Mingcong³, Wang Jichun^{1,2}

(¹College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

²Chongqing Key Laboratory of Biology and Genetic Breeding for Tuber and Root Crops, Chongqing 400715, China; ³Wuxi Agricultural Technology Promotion Center, Chongqing 405800, China)

Abstract To investigate the features of potato nutrient absorption and utilization (nitrogen, phosphorus, and potassium) after adding organic matter, two experimental sites with significant variations in basal fertility were selected. Five organic matter dosage levels were established: 0 (T1), 975 (T2), 1950 (T3), 2925 (T4) and 3900 kg/ha (T5), with no fertilizer application (T0) serving as the control. The medium-late ripening variety Qingshu 9 was used to examine soil nutrient content, microbial population, potato yield, dry matter accumulation and nutrient absorption and utilization. The results showed that the increase of organic matter could effectively improve the soil nutrient content and soil microbial population. With the increase of organic matter, potato yield, nutrient accumulation, nutrient utilization rate, fertilizer contribution rate, partial factor productivity and soil bacteria to fungi ratio showed increase first and then decrease, and all of them were higher in the high base fertility experimental site than those in the low base fertility. The highest potato yields were obtained when 975 and 1950 kg/ha of organic matter were applied in the experimental site of Xiema (with high base fertility) and Jianshan (with low base fertility), which increased yield by 11.84% and 8.22% compared with T1 treatment, respectively. Overall, there was a greater noticeable impact of organic matter on fertilizer utilization rate, partial factor productivity and fertilizer contribution rate. A higher yield of potato is more likely to obtain in relatively high soil fertility. Adding too much or too little organic matter is not conducive to the nutrient absorption and yield formation of potatoes.

Key words Potato; Organic matter; Nitrogen, phosphorus and potassium nutrient; Nutrient absorption and utilization; Yield