DOI：10. 16853/j. cnki. 1009-3575. 2026. 06. 001

关键生育期施用液体有机肥对滴灌马铃薯产量及土壤碳氮特性的影响

石晓华[1]，刘 坤[1]，梁俊梅[2]，乌 兰[1]，赵国鼎[1]，贾立国[1]，樊明寿[1,*]
（1. 内蒙古农业大学农学院，呼和浩特 010019；2. 内蒙古自治区农牧业科学院资源与环境研究所，呼和浩特 010031）

摘要：为解决马铃薯生产中化肥不合理施用引发的环境问题，优化液体有机肥施用策略。本研究在内蒙古阴山北麓地区开展田间试验。结果表明，与传统固体羊粪基施相比，液体有机肥施用显著提高了马铃薯产量、植株干物质累积量、叶面积指数及氮素累积量，显著提升了土壤有机碳、硝态氮含量及过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶活性。在块茎膨大期施用16 $m^3 \cdot hm^{-2}$液体有机肥效果最佳，可使马铃薯产量较单施化肥增产34. 9%，显著改善了植株干物质累积量、叶面积指数及氮素累积量。本研究首次明确了阴山北麓地区马铃薯块茎膨大期液体有机肥的最佳施用量，并揭示了液体有机肥追施的马铃薯生长发育及土壤碳氮特征的协同调控机制，为该地区液体有机肥的合理利用提供了技术支撑。

关键词：马铃薯；液体有机肥；关键生育期；施肥策略；增产效应
中图分类号：S532 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-3575(2026)06-0001-07

Effects of Applying Liquid Organic Fertilizer on the Yield of Drip-irrigated Potatoes, Soil Carbon and Nitrogen Characteristics during the Growth Period

SHI Xiaohua[1], LIU Kun[1], LIANG Junmei[2], Wulan[1], ZHAO Guoding[1], JIA Liguo[1], FAN Mingshou[1,*]
(1. *College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010019, *China*;
2. *Inner Mongolia Autonomous Region Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot* 010031, *China*)

Abstract: To address environmental problems from irrational chemical fertilizer use in the potato production, and to optimize organic liquid fertilizer application strategies, this study conducted a field experiment at the northern foot of the Yinshan Mountains in Inner Mongolia. Compared with traditional basal application of solid sheep manure, the application of organic liquid fertilizers significantly increased the potato yield, plant dry matter accumulation, leaf area index, and nitrogen accumulation, and significantly enhanced the soil organic carbon, nitrate nitrogen contents as well as catalase, sucrase, and urease activities. Applying 16 $m^3 \cdot hm^{-2}$ of organic liquid fertilizer during the tuber expansion period produced the best results, increasing the potato yield by 34. 9% compared with that of the sole chemical fertilizer application, markedly improving plant dry matter accumulation, leaf area index, and nitrogen accumulation. This study determined the optimal application rate of organic liquid fertilizer during the tuber expansion period for potatoes at the northern foot of the Yinshan Mountains, and revealed the synergistic regulatory mechanism by which top-dressed organic liquid fertilizer affecting the potato growth, development, and soil carbon-nitrogen characteristics, thereby providing technical support for the rational use of organic liquid fertilizers in this region.

Key words: Potato; Liquid organic fertilizer; Key growth stages; Fertilization strategy; Yield-increasing effect

中国作为农业大国，化肥的投入为粮食增产提供了关键支撑，但化肥长期过量且不合理的施用已引发土壤退化、面源污染等一系列生态环境问题[1-2]。与此同时，规模化养殖业的快速发展产生了大量的畜禽粪污，其不当处置产生新的环境风险[3-5]。将粪污资源化制备为有机肥料，是实现农业废弃物循环利用、替代部分化肥、推动农业可持续发展的重要途径[6-7]。其中，液体有机肥因其养分高效、便于与水肥一体化技术结合等优势，展现出良好的应用前景，为优化施肥方式提供了新的解决方案。

尽管已有研究证实液体有机肥在改善土壤肥力、促进作物生长方面具有潜力，但其施用效果受土壤类型、肥料种类及农艺措施等多种因素影响，规律尚不明确[8-10]。在马铃薯（*Solanum tuberosum* L.）主产区之一的阴山北麓地区，种养分离问题突出，

收稿日期：2025-12-21
基金项目：内蒙古自治区自然科学基金项目（2023QN03050，2025QN03182）；内蒙古农业大学高层次人才引进科研启动项目（NDYB2020-13，NDYB2022-11）；内蒙古农业大学本科教育教学改革研究项目（YB2024202014）；内蒙古自治区“英才兴蒙”项目（2025TEL13）
作者简介：石晓华（1986—），男，博士，讲师，主要从事马铃薯营养生理与农田生态方面的研究，E-mail：nmndsxh@imau. edu. cn；*为通信作者，樊明寿（1965—），男，博士，教授，主要从事马铃薯营养生理方面的研究，E-mail：fmswh@126. com

传统有机肥施用率低[11],而马铃薯生产又普遍存在化肥依赖度高、利用率低的问题[12-13]。目前,如何根据马铃薯根系浅、对速效养分敏感的特性,在其关键生育期通过滴灌系统精准追施液体有机肥,以协同提升土壤质量和作物产量,尚缺乏系统的研究方案和理论依据。

因此,本研究拟在马铃薯关键生育期,通过滴灌系统追施不同量的液体有机肥,系统探讨液体有机物对土壤碳、氮养分特征及马铃薯生长发育的影响,明确该地区滴灌马铃薯生产中液体有机肥的适宜施用时期与施用量,以期为化肥减量替代以及马铃薯产业的绿色可持续发展提供可靠的技术支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2022年4月—9月在内蒙古乌兰察布市察右中旗进行,该地区年平均气温1.3 ℃,海拔1 780 m,无霜期约100 d,土壤为栗钙土。试验地土壤基本理化性质见表1。

表1 试验地土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in the test site

土层/cm	有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})	容重/(g·cm^{-3})	pH
0~20	23.63	1.58	20.59	100.89	1.53	8.00
20~40	22.89	1.53	14.16	87.22	1.59	8.03
40~60	18.42	1.23	8.38	73.56	1.61	8.15

1.2 试验设计

供试马铃薯品种为'克新1号',供试肥料包括尿素、重过磷酸钙、硫酸钾及由当地双丰农业合作社提供的风干羊粪(有机质34.7%、全氮1.93%)和河南农富康生物科技有限公司提供的复合发酵菌剂制备的液体有机肥。试验采用垄作栽培模式、滴灌方式,随机区组设计,重复3次,小区面积60 m^2。试验共设8个处理,其中CK为不施有机肥的常规施肥处理,X代表块茎形成期施用液体有机肥,P代表块茎膨大期施用液体有机肥,具体施肥量见表2。各处理均施用相同量的化肥,N、P_2O_5、K_2O的施用量分别为240 kg/hm^2、168 kg/hm^2、252 kg/hm^2,化肥及羊粪作为基肥一次性施入。液体有机肥在出苗后25 d(块茎形成期)和40 d(块茎膨大期)追施,具体养分含量见表3。

表2 试验处理及施肥量

Table 2 Test treatment and fertilization amount

处理	羊粪基肥施量/(t·hm^{-2})	液体有机肥追施量/(m^3·hm^{-2})	
		出苗后25 d	出苗后40 d
CK			
X_0P_0M	4		
X_8P_0		8	
$X_{16}P_0$		16	
X_0P_8			8
X_0P_{16}			16
X_4P_4		4	4
X_8P_8		8	8

注:字母右下角数字代表液体有机肥施用量。

表3 液体有机肥养分含量

Table 3 Nutrient contents of liquid organic fertilizer

发酵时期	pH	有机质/(g·L^{-1})	TN/(mg·L^{-1})	NH_4^+-N/(mg·L^{-1})	水溶性磷/(mg·L^{-1})	速效钾/(mg·L^{-1})
块茎形成期	7.70	2.09	799.3	71.85	66.01	191.55
块茎膨大期	7.68	2.13	831.5	76.67	72.59	201.72

1.3 样品采集与指标测定

分别于出苗后15 d、30 d、45 d、60 d及每次追肥后1 d、5 d、10 d、20 d采集各小区0~20 cm、20~40 cm土层土样,播种前、出苗后75 d采集各小区0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土层土样。植株样品分别在马铃薯苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期和收获期采集。测定指标包括土壤pH、全氮、有机碳、有效磷、速效钾、硝态氮、铵态氮、微生物量碳氮、可溶性有机碳氮及脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性等。

土壤pH值:采用酸度计法测定。

土壤全氮:采用凯氏定氮法测定。

土壤有机碳:采用重铬酸钾容量法(外加热法)测定。

土壤有效磷:采用0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法测定。

土壤速效钾:采用NH_4OAc浸提-火焰光度法

测定。

土壤硝态氮、铵态氮:水土比为5∶1的2 mol·L^{-1} KCl溶液浸提,浸提液使用流动注射分析仪测定。

土壤微生物量碳和微生物量氮:采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定。

土壤可溶性有机碳:称取20 g鲜土置于盛有100 mL蒸馏水的三角瓶中,按照1∶2土水比[鲜土重量(g):液体体积(mL)]在恒温暖床震荡浸提30 min(25 ℃,100 r·min^{-1})后离心10 min(5 500 r·min^{-1}),过0.45 μm微孔滤膜,滤液采用总碳分析仪测定。

土壤可溶性有机氮:取过2 mm筛的20 g新鲜土壤样品,用2 mol·L^{-1}氯化钾浸提后(水土比5∶1),取部分滤液用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定土壤可溶性全氮;土壤可溶性全氮含量-(铵态氮+硝态氮)=可溶性有机氮含量。

土壤脲酶、土壤蔗糖酶以及土壤过氧化氢酶活性均采用试剂盒进行测定。

1.4　数据统计与分析

利用Excel 2021和R语言进行数据统计及作图,采用SPSS 25软件进行方差分析。

2　结果与分析

2.1　液体有机肥施用策略对马铃薯生长发育的影响

2.1.1　对产量构成因子的影响

表4表明,不同有机肥施用策略显著影响马铃薯产量及其构成因子(P<0.05)。与不施液体有机肥处理X_0P_0M相比,各使用液体有机肥处理在单株薯数、单株薯重、商品薯率及产量上均表现出不同程度的提升。其中,X_0P_{16}处理较X_0P_0M处理单株薯数显著提高64.4%、单株薯重提高61.0%、商品薯率提升至76.5%,产量最高达到40 041 kg·hm^{-2},较X_0P_0M显著提高37.0%。X_8P_8处理同样表现出较好的增产效果,其单株薯数、单株薯重分别较X_0P_0M提高48.9%、45.8%,产量提高25.2%。此外,X_0P_8和$X_{16}P_0$处理在单株薯数和产量方面亦显著高于X_0P_0M,表明适量增加液体有机肥投入有助于改善马铃薯产量构成因子,从而显著提升最终产量水平。

表4　液体有机肥施用策略对马铃薯产量构成因子的影响

Table 4　Effect of organic liquid fertilizer application strategy on potato yield components

处理	单株薯数/个	单株薯重/kg	商品薯率/%	产量/(kg·hm^{-2})
CK	4.7±0.4 c	0.60±0.02 c	55.0±3.3 d	29 685±1 219 d
X_0P_0M	4.5±0.3 c	0.59±0.02 c	53.0±1.7 d	29 221±1 199 d
X_8P_0	5.2±0.7 bc	0.66±0.03 c	58.2±1.8 cd	30 444±1 018 d
$X_{16}P_0$	6.4±0.4 ab	0.85±0.03 ab	67.0±1.2 b	35 168±1 272 bc
X_0P_8	6.6±0.6 ab	0.84±0.04 ab	63.9±0.9 bc	34 695±1 056 bc
X_0P_{16}	7.4±0.2 a	0.95±0.06 a	76.5±2.0 a	40 041±1 015 a
X_4P_4	5.6±0.5 abc	0.74±0.06 bc	59.5±2.2 cd	31 667±1 242 cd
X_8P_8	6.7±0.2 ab	0.86±0.06 ab	69.0±2.0 b	36 576±1 028 b

注:同列数据不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

2.1.2　对氮素累积量的影响

通过马铃薯出苗后氮素累积量的动态变化表征不同液体有机肥施用策略对马铃薯植株氮素累积量的影响(表5)。整体上,各处理氮素累积量均随生育期推进呈先升高后趋于稳定或略有降低的趋势,在60 d时多数处理达到峰值。在整个观测期内,处理X_0P_{16}表现最优,其氮素累积量在45 d、60 d和75 d时均显著高于同期其他处理,尤其在60 d时达到最高,较同期CK提高38.7%,较X_0P_0M处理提高32.0%。从生育期看,在15 d时所有处理间差异不显著,从30 d开始,各处理间差异逐渐显现,$X_{16}P_0$在30 d天时累积量显著高于CK和X_8P_8处理,在45~

表5　液体有机肥施用策略对马铃薯植株氮素累积量的影响

Table 5　Effect of organic liquid fertilizer application strategy on nitrogen accumulation in potato plants

单位:kg·hm^{-2}

处理	出苗后天数				
	15 d	30 d	45 d	60 d	75 d
CK	28.53±1.23 a	46.71±3.10 bc	81.81±2.93 d	171.74±8.35 d	158.47±4.33 b
X_0P_0M	30.02±1.48 a	43.46±3.24 c	82.78±4.24 d	180.46±7.34 d	151.63±4.32 b
X_8P_0	29.68±3.21 a	51.69±3.58 bc	92.68±5.94 cd	175.98±6.11 d	163.53±7.30 ab
$X_{16}P_0$	30.46±1.19 a	62.62±3.48 a	103.40±6.17 bc	193.26±6.38 cd	165.67±2.59 ab
X_0P_8	30.75±0.84 a	46.17±1.57 bc	107.41±7.65 bc	204.99±6.96 bc	168.30±4.63 ab
X_0P_{16}	29.87±2.29 a	45.15±2.24 bc	132.11±4.72 a	238.26±6.74 a	181.25±6.12 a
X_4P_4	28.43±1.37 a	50.36±1.50 bc	98.14±4.93 cd	190.27±5.05 cd	169.59±8.06 ab
X_8P_8	29.09±1.62 a	53.31±1.77 b	118.27±5.98 ab	219.56±5.66 ab	168.63±5.78 ab

注:同列数据不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

75 d的生长中后期，X_0P_{16}与X_8P_8处理的累积量持续保持较高水平。综合来看，液体有机肥优化施用策略，特别是X_0P_{16}处理，可能通过改善根际养分供应与微环境条件、促进氮素吸收与利用效率提升，从而增强马铃薯植株氮素累积。

2.2 液体有机肥施用策略对土壤碳氮含量的影响

2.2.1 对土壤全氮的影响

表6显示了不同液体有机肥施用策略对马铃薯田0~20 cm与20~40 cm土层在30 d和45 d时土壤全氮含量的影响。整体而言，各施肥处理在不同土层和时期土壤全氮含量较CK均呈现一定增加趋势，其中在45 d时0~20 cm土层提升较为明显，X_0P_{16}处理的全氮含量最高，较CK显著提高3.8%，而X_8P_0、X_0P_8、X_4P_4、X_8P_8处理较CK也均有显著提高，但与X_0P_0M处理的差异不显著；在30 d和45 d时20~40 cm土层各处理间全氮含量均无显著差异。总体而言，液体有机肥合理配施有利于提高表层土壤全氮含量，其效果可能与有机养分输入促进氮素积累、改善土壤微环境并提高氮素保持能力有关。

表6 液体有机肥施用策略对马铃薯田土壤全氮含量的影响

Table 6 Effects of liquid organic fertilizer application strategies on the total nitrogen contents in potato field soils

单位：g·kg^{-1}

处理	0~20 cm		20~40 cm	
	30 d	45 d	30 d	45 d
CK	1.59±0.01 b	1.58±0.01 b	1.58±0.02 a	1.54±0.02 a
X_0P_0M	1.61±0.01 ab	1.61±0.01 a	1.59±0.01 a	1.55±0.01 a
X_8P_0	1.61±0.01 ab	1.59±0.01 b	1.60±0.03 a	1.56±0.04 a
$X_{16}P_0$	1.63±0.02 a	1.62±0.01 a	1.61±0.01 a	1.59±0.02 a
X_0P_8	1.59±0.01 b	1.62±0.01 a	1.58±0.02 a	1.59±0.02 a
X_0P_{16}	1.59±0.01 b	1.64±0.01 a	1.59±0.01 a	1.60±0.01 a
X_4P_4	1.60±0.01 ab	1.61±0.01 a	1.59±0.01 a	1.56±0.03 a
X_8P_8	1.61±0.01 ab	1.63±0.01 a	1.60±0.01 a	1.59±0.02 a

注：同列数据不同字母表示不同水平下差异显著（$P<0.05$）。

2.2.2 对土壤有机碳的影响

表7显示了不同液体有机肥施用策略对马铃薯田土壤有机碳含量的影响。在15 d时，所有处理间差异不显著。在30 d时，$X_{16}P_0$处理和X_8P_0处理的有机碳含量显著高于X_0P_0M处理，分别提高18.5%和12.1%。在45 d时，处理X_0P_{16}的有机碳含量最高，显著高于X_0P_0M处理，提高26.6%。在60 d时，X_0P_{16}处理仅显著高于CK，提高20.6%。至75 d时，各处理间差异不显著。这一趋势可能源于合理配比的液体有机肥通过增加碳输入，同时增强微生物活动，进而促进了土壤有机碳的积累与稳定性。

表7 液体有机肥施用策略对马铃薯田0~20 cm土层土壤有机碳含量的影响

Table 7 Effects of organic liquid fertilizer application strategy on the soil organic carbon contents in 0-20 cm soil layer of the potato field

单位：g·kg^{-1}

处理	出苗后天数				
	15 d	30 d	45 d	60 d	75 d
CK	12.4±0.8 a	12.0±0.2 c	12.5±0.4 c	12.6±0.6 b	12.3±0.3 a
X_0P_0M	12.2±0.6 a	12.4±0.5 bc	12.4±0.2 c	12.9±0.2 ab	12.4±0.8 a
X_8P_0	12.1±0.9 a	13.9±0.4 a	13.3±0.4 bc	13.2±0.8 ab	13.0±0.5 a
$X_{16}P_0$	12.0±0.7 a	14.7±0.4 a	14.1±0.4 b	14.0±0.2 ab	13.7±0.4 a
X_0P_8	12.0±0.6 a	12.1±0.3 c	14.2±0.1 b	14.1±0.3 ab	13.9±0.5 a
X_0P_{16}	12.3±0.8 a	12.1±0.3 c	15.7±0.5 a	15.2±0.5 a	14.1±0.5 a
X_4P_4	12.0±0.7 a	13.5±0.6 ab	13.7±0.4 bc	13.5±0.6 ab	13.2±0.2 a
X_8P_8	12.1±0.9 a	13.9±0.4 a	14.7±0.2 ab	14.6±0.3 ab	14.0±0.2 a

注：同列数据不同字母表示不同水平下差异显著（$P<0.05$）。

2.2.3 对土壤硝态氮和铵态氮含量的影响

表8显示了不同液体有机肥施用策略下马铃薯块茎形成期和块茎膨大期耕层土壤硝态氮含量的动态变化。整体上，各施肥处理在不同时期的硝态氮含量多数显著高于CK，且含量随生育进程呈下降趋势。在块茎形成期，处理$X_{16}P_0$在1 d时的硝态氮含量最高，较X_0P_0M处理显著提高43.5%，而在10 d时各处理间差异不显著；至20 d时，X_0P_{16}处理硝态氮含量最高，较X_0P_0M处理提高50.4%。在块茎膨大期，X_0P_{16}处理在1 d、5 d和10 d时的硝态氮含量均最高，较X_0P_0M处理分别显著提高85.1%、50.4%和22.0%；到20 d时，各处理间差异不显著。综合分析表明，合理的液体有机肥施用量可能通过提高氮素供应强度，改善根际氮素供应与利用效率，从而在关键生育阶段维持较高的土壤速效氮水平。

2.3 液体有机肥施用策略对土壤酶活性的影响

表9显示了不同液体有机肥施用策略对马铃薯田土壤过氧化氢酶、蔗糖酶及脲酶活性的影响。总体来看，随液体有机肥施用量增加，各酶活性整体呈升高趋势，且45 d时普遍高于30 d时。30 d时，

表 8　液体有机肥施用策略下耕层土壤硝态氮含量变化

Table 8　Changes in nitrate nitrogen content in the plow layer under liquid organic fertilizer application strategies

单位:mg·kg^{-1}

处理	块茎形成期				块茎膨大期			
	1 d	5 d	10 d	20 d	1 d	5 d	10 d	20 d
CK	19. 4±0. 9 c	18. 8±0. 7 b	15. 5±1. 1 a	12. 7±1. 0 d	13. 8±0. 5 c	12. 7±1. 0 d	11. 4±1. 0 b	9. 6±0. 7 a
X_0P_0M	19. 3±1. 3 c	18. 7±0. 9 b	15. 6±1. 3 a	13. 1±0. 4 d	13. 4±1. 3 c	13. 1±0. 4 d	11. 8±0. 5 b	9. 3±0. 6 a
X_8P_0	24. 1±0. 8 b	21. 8±1. 5 ab	16. 9±2. 0 a	14. 2±0. 3 cd	15. 3±0. 6 bc	14. 2±0. 3 cd	12. 0±0. 7 b	10. 6±0. 8 a
$X_{16}P_0$	27. 7±1. 6 a	23. 2±1. 4 a	17. 0±1. 1 a	15. 2±0. 5 bcd	17. 4±0. 9 bc	15. 2±0. 5 bcd	13. 1±0. 8 ab	10. 3±0. 7 a
X_0P_8	19. 1±1. 2 c	18. 5±1. 0 b	15. 3±1. 1 a	16. 5±0. 5 bc	18. 8±0. 8 b	16. 5±0. 5 bc	13. 3±0. 8 ab	10. 5±0. 6 a
X_0P_{16}	19. 3±0. 9 c	18. 4±0. 8 b	15. 2±1. 0 a	19. 7±0. 7 a	24. 8±2. 6 a	19. 7±0. 7 a	14. 4±0. 8 a	11. 8±0. 6 a
X_4P_4	21. 8±1. 5 bc	19. 7±0. 8 b	15. 8±1. 5 a	14. 7±0. 5 bcd	16. 2±0. 9 bc	14. 7±0. 5 bcd	12. 6±0. 6 ab	9. 8±0. 2 a
X_8P_8	23. 7±0. 9 b	21. 5±1. 1 ab	16. 6±1. 2 a	16. 8±0. 2 b	19. 5±1. 7 b	16. 8±0. 2 b	13. 7±0. 5 ab	10. 8±0. 6 a

注:同列数据不同字母表示不同水平下差异显著(P<0. 05)。

表 9　出苗后 30 d、45 d 液体有机肥施用策略对马铃薯田土壤酶活性的影响

Table 9　Effects of liquid organic fertilizer application strategy on soil enzyme activity in potato field at 30 and 45 days after emergence

处理	30 d			45 d		
	过氧化氢酶/(mmol·d^{-1}·g^{-1})	蔗糖酶/(mg·d^{-1}·g^{-1})	脲酶/(μg·d^{-1}·g^{-1})	过氧化氢酶/(mmol·d^{-1}·g^{-1})	蔗糖酶/(mg·d^{-1}·g^{-1})	脲酶/(μg·d^{-1}·g^{-1})
CK	35. 4±1. 5 b	208. 2±6. 2 b	265. 5±8. 6 bc	45. 3±1. 4 b	256. 1±7. 4 c	352. 4±11. 2 d
X_0P_0M	37. 0±1. 5 ab	209. 4±8. 2 b	251. 3±7. 7 c	46. 0±1. 3 b	252. 6±5. 9 c	360. 0±9. 0 d
X_8P_0	38. 7±0. 8 ab	220. 5±5. 5 ab	287. 7±8. 4 ab	46. 2±1. 5 b	265. 9±4. 6 bc	365. 1±10. 1 d
$X_{16}P_0$	39. 9±1. 4 a	232. 0±4. 7 a	301. 6±6. 2 a	49. 1±0. 8 ab	285. 5±8. 1 ab	384. 6±9. 6 bcd
X_0P_8	35. 1±0. 9 b	206. 9±6. 8 b	264. 1±10. 0 bc	49. 8±1. 5 ab	286. 0±5. 7 ab	399. 3±9. 9 abc
X_0P_{16}	35. 4±0. 6 b	206. 4±8. 3 b	269. 4±5. 8 bc	52. 9±1. 3 a	304. 7±8. 7 a	430. 8±11. 0 a
X_4P_4	37. 3±1. 2 ab	215. 2±5. 4 ab	278. 3±7. 2 ab	47. 8±1. 4 ab	274. 2±2. 8 bc	375. 4±11. 2 cd
X_8P_8	38. 8±1. 9 ab	221. 0±4. 8 ab	288. 3±7. 6 ab	50. 3±0. 8 ab	291. 1±9. 1 ab	416. 1±10. 0 ab

注:同列数据不同字母表示不同水平下差异显著(P<0. 05)。

$X_{16}P_0$处理的氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶活性最高,较 CK 分别提高约 12. 7%、11. 4% 和 13. 6%。45 d 时,各处理酶活性进一步增强,其中 X_0P_{16}处理的 3 种酶活性均表现最优,过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶活性较 CK 分别提高 16. 8%、19. 0% 和 22. 2%,而 CK 和 X_0P_0M 处理整体处于较低水平。这种趋势可能与液体有机肥的施用促进了土壤微生物活动及有机质转化,从而提升了土壤酶活性有关。

2. 4　液体有机肥施用策略下土壤碳氮与土壤酶活性的相关分析

分析表 10 发现,整体上,全氮与有机碳、脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、硝态氮、铵态氮存在显著(P<0. 05)或极显著(P<0. 01)正相关;有机碳与脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、硝态氮、铵态氮呈显著(P<0. 05)或极显著(P<0. 01)正相关。分项分析表明,全氮、有机碳与 3 种酶之间分别呈显著或极显著正相关,

表 10　土壤各指标相关性分析

Table 10　Correlation analysis of soil indicators

指标	相关系数						
	全氮	有机碳	脲酶	蔗糖酶	过氧化氢酶	硝态氮	铵态氮
全氮	1						
有机碳	0. 511**	1					
脲酶	0. 528**	0. 671**	1				
蔗糖酶	0. 379*	0. 476**	0. 911**	1			
过氧化氢酶	0. 505**	0. 650**	0. 940**	0. 886**	1		
硝态氮	0. 486**	0. 736**	0. 725**	0. 553**	0. 685**	1	
铵态氮	0. 353*	0. 323*	0. 375*	0. 141	0. 278	0. 492**	1

注:*、**分别表示在 5%、1% 水平上显著相关。

其中,与脲酶的相关性最高;有机碳与硝态氮、脲酶及过氧化氢酶之间均呈极显著正相关;硝态氮与各酶活性之间的相关性整体强于铵态氮。上述结果表明,土壤有机碳与氮素供应改善微生物活性和养分转化过程,可能是驱动土壤酶活性提升的主要驱动因素。

3 讨论

本研究表明,在马铃薯块茎膨大期追施16 $m^3 \cdot hm^{-2}$液体有机肥是实现增产增效的最佳策略,使马铃薯产量较单施化肥显著提高34.9%,增产机制可归结为"养分同步供给—根系高效吸收—光合持续增强"的协同效应。块茎膨大期是马铃薯需肥高峰期,液体有机肥通过水肥一体化系统快速提供了速效氮(铵态氮与硝态氮)和可溶性有机碳,直接满足了库器官(块茎)快速膨大对养分的暴发性需求。这与邓长芳等[14]、王研等[15]、Shao等[16]的研究结果一致,即适宜液体有机肥可显著提高作物生育后期氮素含量与干物质量。同时,速效养分的充足供应保障了叶片光合功能的维持,延缓了衰老,从而积累了更多的生物量,并最终转化为更高的经济产量[17]。相比之下,固体羊粪基肥施用因养分释放缓慢,且可能存在与作物争氮、引发病害的风险[18],在本研究中导致了减产,这凸显了有机养分形态与施用时机满足作物关键需肥期的重要性。

在土壤效应方面,块茎膨大期施用液体有机肥变化显著且快速地提升了耕层土壤的矿质氮含量与酶活性。这一结果与Li等[19]、Naresh等[20]关于有机无机配施提升酶活性的发现相吻合。其内在机制可能是:液体有机肥的输入一方面直接添加了易降解的碳氮底物与活性酶类;另一方面,其为土壤微生物提供了优质的"碳源"与"营养",迅速激发了微生物的活性。活化的微生物群落加速了有机质的矿化与养分转化,从而在施肥后短期内形成了一个养分供应强度高、生物化学循环活跃的根区微环境。耕层酶活性较高的结果也进一步证实了液体有机肥通过滴灌主要富集于根系密集区,其激发效应存在明显的空间层次性。

基于上述结果,本研究提出一个综合作用机制假设:在块茎膨大期通过滴灌追施适宜量液体有机肥的核心作用在于实现了活性碳氮的精准同步输入。这不仅直接快速地补充了土壤速效养分库,更重要的是通过"碳激效应"激活了土壤微生物网络与酶系统,从而强化了土壤氮素的矿化与供应能力,改善了根际微生态,促进了根系养分吸收,最终通过保障作物生育后期的碳氮同化与转运效率,驱动了产量的形成。这很好地解释了为何该处理在增产的同时,也协同提升了土壤的生物活性与肥力潜力。

然而,本研究也存在一定的局限性。首先,液体有机肥施用量仅设置了2个梯度,其最佳经济与环境效益施用量有待通过更精细的梯度试验进一步明确。其次,本研究结论基于单季、单点试验,液体有机肥的长期施用对土壤碳氮库的固持潜力、微生物群落结构的演替规律以及在不同气候年份下的稳定性的影响,仍需通过长期定位观测予以验证。未来研究可着眼于:1)探究不同原料制备的液体有机肥的养分释放规律与效应差异;2)结合现代分子生物学技术,深入解析液体有机肥施用下根际微生物功能群落的演变及其与碳氮循环关键过程的耦合机制;3)开展全生命周期评价,系统评估该技术的经济效益与环境成本,以推动其标准化与规模化应用。

4 结论

本研究证实,在马铃薯块茎膨大期滴施液体有机肥16 m^3/hm^2是实现产量与土壤地力协同提升的关键农艺措施。相较于传统固体羊粪基施,该策略能更有效地提高关键生育期土壤速效氮和有机碳含量,并显著增强土壤过氧化氢酶、蔗糖酶及脲酶活性,从而促进土壤氮素供应及植株氮素累积与吸收。该施肥策略为阴山北麓地区粪污资源的高效利用、化肥减量以及马铃薯绿色增产提供了明确的技术途径和理论依据。

参考文献:

[1] 冯淑怡,李 芳. 耕地质量如何影响粮食供给保障能力[J]. 南京农业大学学报(社会科学版),2025,25(4):70-80.

[2] ZHANG G C,LIU Q B,ZHANG Z M,et al. Effect of reducing nitrogen fertilization and adding organic fertilizer on net photosynthetic rate,root nodules and yield in peanut[J]. Plants,2023,12(16):2902.

[3] 郭函彤,于 豹,郑国砥,等. 基于系统动力学模型的猪场粪污管理氮足迹及减排措施分析[J]. 植物营养与肥料学报,2025,31(11):2229-2240.

[4] 刘振涛,林英明,周勋章,等. 中国畜禽粪污资源化利用政策演进历程、内在逻辑与发展趋势[J]. 中国农业

大学学报,2025,30(6):137-151.

[5] CAO H,YANG Y P,GAO Y,et al. Organic amendments combined with moderate nitrogen rate significantly enhance soil fertility and crop productivity[J]. Journal of Agriculture and Food Research,2025,23:102211.

[6] LI Y,LI J,CHANG Y,et al. Comparing bacterial dynamics for the conversion of organics and humus components during manure composting from different sources[J]. Frontiers in Microbiology,2023,14:1281633.

[7] ZHOU L Y,LU H,WU B Y. Identifying the effects of the stability of farmland transfer management rights on the use of organic fertilizer with different farmland scales and crop types[J]. Frontiers in Environmental Science,2022,10:1006405.

[8] 王小武,王志方,周留艳,等. 化肥配施有机液体肥对香梨产量、品质及土壤理化性质和细菌群落结构的影响[J]. 西北农业学报,2024,33(10):1883-1895.

[9] HUA W,LUO P Y,AN N,et al. Manure application increased crop yields by promoting nitrogen use efficiency in the soils of 40-year soybean-maize rotation[J]. Scientific Reports,2020,10:14882.

[10] NING Y,LI S L,NING C C,et al. Effects of exogenous nitrogen addition on soil organic nitrogen fractions in different fertility soils: Result from a 15N cross-labeling experiment[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2025,379:109366.

[11] 郭雪娇,张婷婷,梁俊梅,等. 不同有机肥替代比例对内蒙古阴山北麓地区马铃薯产量的影响[J]. 北方农业学报,2024,52(1):26-35.

[12] 杨　子,于　静,孙晶洁,等. 施氮对马铃薯发育及碳氮代谢的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2025,46(3):14-19+61.

[13] ZHENG S,YIN K Q,YU L H. Factors influencing the farmer's chemical fertilizer reduction behavior from the perspective of farmer differentiation[J]. Heliyon,2022,8(12):e11918.

[14] 邓长芳,郑太波,高　瑞,等. 陕北地区有机肥配施与钾肥运筹对马铃薯产量的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2024,45(1):21-26.

[15] 王　研,罗　彤,闵　涛,等. 不同液体有机肥对新疆棉花生长及土壤养分的影响[J]. 土壤,2023,55(4):739-748.

[16] SHAO Z Q,MWAKIDOSHI E R,MUINDI E M,et al. Synthetic fertilizer application coupled with bioslurry optimizes potato (*Solanum tuberosum*) growth and yield[J]. Agronomy,2023,13(8):2162.

[17] 李嘉欣,武雪萍,李晓秀,等. 纳米碳添加对土壤速效养分和小油菜产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2023(6):108-114.

[18] ZHAO T C,HE A B,KHAN M N,et al. Coupling of reduced inorganic fertilizer with plant-based organic fertilizer as a promising fertilizer management strategy for colored rice in tropical regions[J]. Journal of Integrative Agriculture,2024,23(1):93-107.

[19] LI Y,WEI J L,MA L,et al. Enhancing wheat yield through microbial organic fertilizer substitution for partial chemical fertilization: regulation of nitrogen conversion and utilization[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2024,24(1):935-943.

[20] NARESH R K,SINGH P K,BHATT R,et al. Long-term application of agronomic management strategies effects on soil organic carbon, energy budgeting, and carbon footprint under rice-wheat cropping system[J]. Scientific Reports,2024,14:337.