

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2024)04-0304-09
DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2024.04.003

栽培生理

水-磷互作对干旱区马铃薯水肥利用率、农艺性状、产量及品质的影响

罗添铭¹, 康益晨¹, 张卫娜¹, 刘玉汇², 秦舒浩^{1*}

(1. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 陇中半干旱区马铃薯生产中存在栽培管理技术欠精细、肥水利用率不高的现状。探究水-磷互作对干旱区马铃薯农艺性状、水分及磷肥利用率、产量及品质影响, 以期筛选出适宜的水肥管理模式, 为培育优质商品薯提供理论依据和技术支撑。试验采用裂区设计, 分析不同灌水量(0、10.00、15.00 m³/667m²)和施磷量(0、10.00、20.00、30.00 kg/667m²)互作下马铃薯土壤贮水量及水分利用率、农艺性状、产量、磷肥利用率及品质变化。随着灌水量和施磷量增加, 土壤贮水量、株高、茎粗、水分和磷肥利用率、维生素C和可溶性蛋白含量、产量均有显著升高, 且均先升高后降低; 有机酸含量较对照(灌水量0和施磷量0)显著下降(灌水量15.00 m³/667m²除外)。当灌水量为10.00 m³/667m², 施磷量为20.00 kg/667m²时, 马铃薯土壤贮水量、农艺性状、水肥利用率、产量和品质最佳, 为最优水-磷互作模式。

关键词: 马铃薯; 灌水; 施磷; 水-磷互作; 产量

Effects of Water-phosphorus Interaction on Water and Fertilizer Utilization, Agronomic Traits, Yield and Quality of Potato in Arid Region

LUO Tianming¹, KANG Yichen¹, ZHANG Weina¹, LIU Yuhui², QIN Shuhao^{1*}

(1. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Crop Genetic Improvement and Germplasm Innovation, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Potato production in the semi-arid region of central Gansu Province is facing many challenges, including inadequate cultivation management techniques and low rates of fertilizer and water utilization. This study was to investigate the effects of water-phosphorus interaction on agronomic traits, water and phosphorus fertilizer utilization, yield, and quality of potatoes in arid areas so as to identify an effective water and fertilizer management model that can provide a theoretical foundation and technical support for the cultivation of high-quality commercial potatoes. Split-plot design was used in the experiment. Various irrigation rates (0, 10.00 and 15.00 m³/667m²) and phosphorus application rates (0, 10.00, 20.00 and 30.00 kg/667m²) were analyzed for their effects on soil water storage, water utilization, agronomic traits, yield, phosphorus fertilizer efficiency, and quality. With the increase of irrigation rate and phosphorus application rate, soil water storage, plant height, stem diameter, water and phosphorus fertilizer utilization rate, vitamin C and soluble protein content, and yield all increased significantly, showing the trend of increasing first and then decreasing.

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(32260455; 32060441; 32201810; 32360465); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-09-P14); 甘肃省教育厅: 青年博士支持项目(2024QB-074)。

作者简介: 罗添铭(2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事蔬菜逆境生理方面研究。

*通信作者(Corresponding author): 秦舒浩, 博士, 教授, 主要从事蔬菜栽培及逆境生物学方面研究, E-mail: qinsh@gsau.edu.cn。

Organic acid content decreased significantly compared with the control (irrigation rate 0 and phosphorus application rate 0) except for the irrigation treatment of 15.00 m³/667m². When the irrigation rate was 10.00 m³/667m² and the phosphorus application rate was 20.00 kg/667m², the potato soil water storage, agronomic traits, water and fertilizer utilization rate, yield and quality were the best, which may be the optimal water-phosphorus interaction model.

Key Words: potato; irrigation; phosphorus fertilization; water-phosphorus Interaction; yield

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)为陇中半干旱区的特色优势作物,因其富含蛋白质、维生素、矿物质等营养,深受中国消费者喜爱^[1,2]。近年来,马铃薯在该区种植面积不断扩大,但在生产中存在栽培管理技术欠精细及肥水利用率不高等问题^[3]。因此,探索适宜水肥管理模式,从而提高马铃薯水分及肥料利用率,对实现马铃薯“优粮优产”具有现实指导意义。

中国北方土壤中氮、钾含量较为充足,磷素相对匮乏,因此磷为影响农业生产首要因素之一^[4]。单独灌水或施磷难以实现作物对水养分资源的高效协同利用,而构建水-磷耦合管理模式可显著增强作物水分利用效率和磷素有效性。有研究发现,适当灌水与施磷会提高小麦籽粒氮素积累量和水分利用率,使小麦增产^[5]。磷素高效利用与土壤含水量紧密相关,土壤水分过高或过低均不利于磷素在土壤中的移动^[6]。目前关于水-磷耦合在马铃薯领域研究主要集中于磷素吸收与分配^[7]、

耗水特性^[8]等方面,而有关不同灌水量、施磷量下马铃薯水肥利用率、农艺性状、产量、品质等方面研究较少。本研究旨在通过大田试验,探索不同灌水量和施磷量对马铃薯土壤贮水量、农艺性状、水肥利用率、产量及品质的影响,进而筛选出适宜水-磷互作模式,以提高陇中半干旱区马铃薯栽培管理中水分、肥料利用率。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2023年4—11月在定西市农业科学研究院试验基地(N35°33', E 104°35')进行。试验区为典型半干旱雨养农业区,海拔1 920 m,年均气温6.4℃,年均降水量415.2 mm,年蒸发量1 531 mm,干燥度2.53。土壤类型为黄绵土,土壤容重1.6 g/cm³,土层深厚,肥力均匀。马铃薯生育期内有效降水量为292.75 mm,试验地土壤基础养分见表1。

表1 试验区土壤基础养分

Table 1 Basic nutrient of soil in experimental site

土层(cm)	pH	土壤有机质(g/kg)	速效氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
Soil depth		Soil organic matter	Available nitrogen	Available phosphorus	Available potassium
0~20	8.13	20.93	18.00	15.95	114.33
20~40	8.04	22.85	13.00	10.40	101.75

1.2 供试材料

供试品种为‘甘农薯5号’,中晚熟品种,生育期83~118 d,块茎整齐,结薯集中,单株结薯5~7个,大、中薯率72%~94%,适宜在甘肃省干旱、半干旱区种植,由甘肃农业大学提供;供试肥料为尿素(含N 46%)、硫酸钾(含K₂O 52%)、磷酸二氢铵(含P₂O₅ 16%),均由定西市农业科学研究院提供。

1.3 试验设计

采用水肥双因子试验,主因子为灌水量,设3个灌水梯度:W1、W2和W3;副因子为磷素,包括4个施磷梯度:P1、P2、P3和P4(表2);采用裂区设计,3次重复,每个主区内设4个副区,主副区均随机排列;主区面积为12 m×8 m,副区面积为8 m×3 m,主区间相隔1.5 m。采用覆膜垄播方

式种植, 垄高 15 cm, 垄宽 70 cm, 采用点播机每垄播种 2 行, 垄上行距 40 cm, 垄间行距 60 cm, 株距 35 cm, 种植密度约为 3 750 株/667m²。于块茎形

成期根据试验设计和水表流量读数, 采用喷灌方式对植株进行灌水。覆膜前基施所有肥料, 生育期内不再追肥, 其余管理措施同大田。

表 2 试验设计
Table 2 Experimental design

灌水处理 Irrigation treatment	磷素处理 Phosphorus treatment	灌水梯度(m ³ /667m ²) Irrigation level	施磷(P ₂ O ₅)梯度(kg/667m ²) Phosphorus (P ₂ O ₅) level
W1	P1	0	0
	P2		10.00
	P3		20.00
	P4		30.00
W2	P1	10.00	0
	P2		10.00
	P3		20.00
	P4		30.00
W3	P1	15.00	0
	P2		10.00
	P3		20.00
	P4		30.00

1.4 测定指标及方法

1.4.1 土壤水分测定

土壤含水量: 分别于马铃薯播种前、苗期、块茎形成期和成熟期用 5 点采样法采集 0~40 cm 土层土壤, 剔除植物残体、石子等杂物, 装入自封袋存置, 带回实验室烘干后测定含水量^[9]。

土壤贮水量和水分利用率根据以下公式进行计算^[10]:

$$W = D \times H \times w \times 10$$

$$ET = \Delta W + P$$

$$WUE = Y / ET$$

式中: W 为土壤贮水量(mm); D 为土壤容重(g/cm³); H 为土层厚度(cm); w 为土壤重量含水量(%); 10 为转换系数; ET 为作物生育期蒸散量(mm); ΔW 为播种前与成熟期土壤贮水量的差值; P 为生育期降水量(mm); WUE 为作物水分利用效率(kg/hm²·mm); Y 为马铃薯产量(kg/hm²)。

1.4.2 农艺性状测定

分别于马铃薯苗期、块茎形成期和块茎膨大

期, 在每小区选择长势一致的 3 株植株测定其株高、茎粗。

株高: 用卷尺测量植株基部至最高点垂直高度(cm), 计算平均值;

茎粗: 用游标卡尺测量植株与地表面交界处地上茎直径(mm), 计算平均值^[11]。

1.4.3 品质测定

收获时于每小区随机采集马铃薯块茎 3 个, 采用近红外品质分析仪(NIRS DS2500, FOSS)测定块茎内维生素 C、可溶性蛋白和有机酸含量^[12]。

1.4.4 产量及磷肥利用率测定

产量: 于马铃薯收获时按小区单收计产, 并折合成公顷产量^[13]。

磷肥利用率计算公式为:

磷肥肥料利用率=(施磷处理吸磷量-未施磷处理吸磷量)/施磷量×100%^[14]。

1.5 数据分析方法

使用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 27.0 软件分析数据, 使用 OriginPro 2022 软件绘制图形。

2 结果与分析

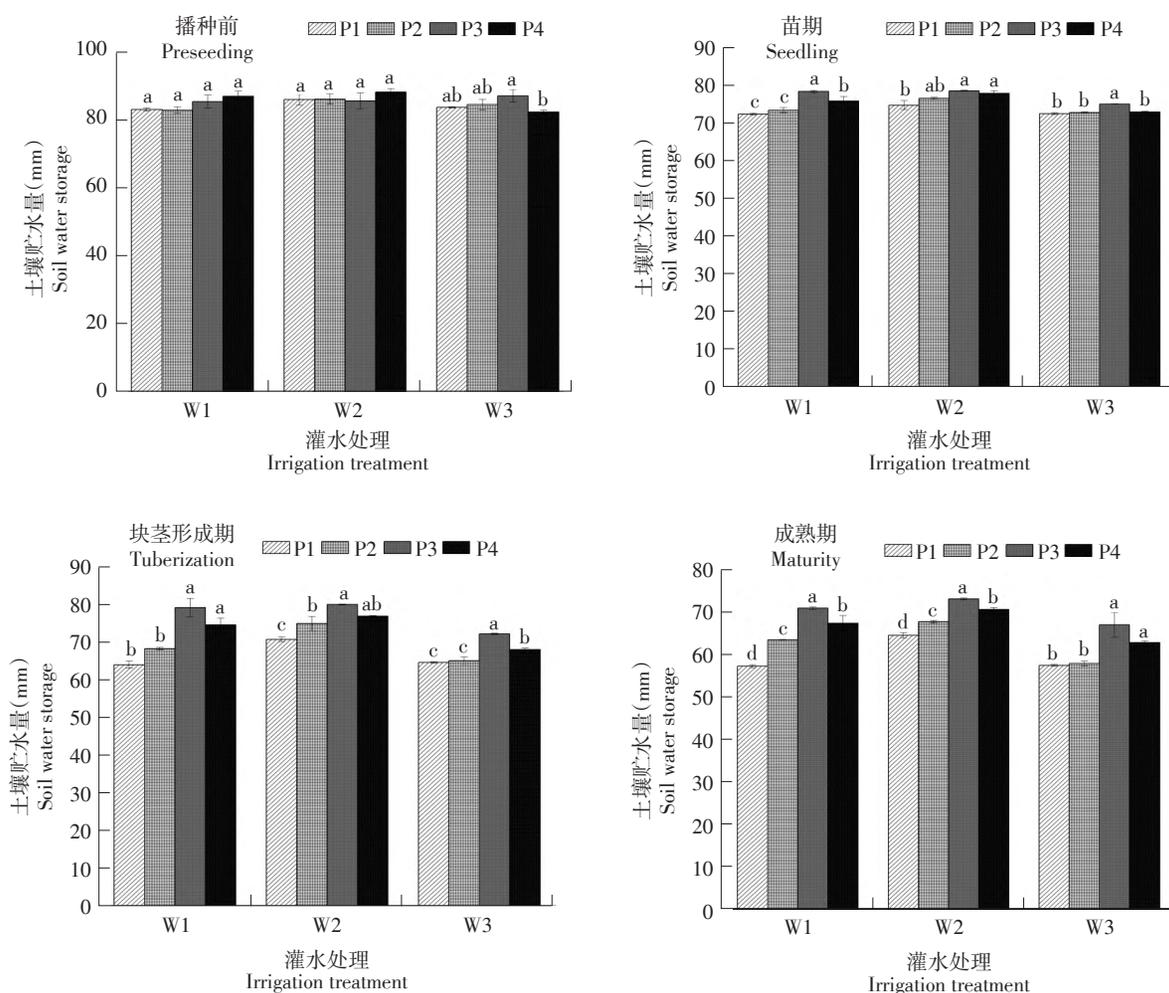
2.1 水-磷互作对土壤贮水量的影响

水-磷互作对土壤贮水量影响显著性检验表明(表3), 灌水、施磷及二者的交互作用对苗期和块茎形成期土壤贮水量影响显著($P < 0.05$)。测量各生育期0~40 cm土壤贮水量变化发现, 各生育期灌水处理间高低顺序为: $W2 > W1 > W3$, 其中W2灌水处理的土壤贮水量最高。块茎形成期和成熟期, W2灌水处理下, P3处理的土壤贮水量较P1显著提

高13.11%~13.30%(图1)。

2.2 水-磷互作对马铃薯水分利用率的影响

水-磷互作对水分利用率影响表明, 水-磷互作对水分利用率影响极显著($P < 0.01$)(表4), 且随着灌水量与施磷量增加, 各处理下水分蒸散量与水分利用率均不同程度增强, 其中W2处理下水分利用率增强效果最优, 且随施磷量增加呈先升后降趋势。不同施磷处理对水分利用率影响较大, 在W2灌水处理下, P3及P4处理的水分利用率较P1显著增强, 分别较P1显著增加44.07%和33.77%($P < 0.05$)。



不同小写字母表示相同灌水梯度下不同磷素处理间差异显著($P < 0.05$), 采用最小显著差数(LSD)法。下同。

Different lowercase letters indicate that under the same irrigation gradient, significant difference is detected among different phosphate fertilizer treatments ($P < 0.05$), as tested using least significant difference (LSD) method. The same below.

图1 各生育期0~40 cm土层贮水量变化

Figure 1 Changes of water storage in 0-40 cm soil layer at different growth stages

表3 水-磷互作对土壤贮水量影响的显著性检验
Table 3 Significance test of water-phosphorus interaction effect on soil water storage capacity

处理 Treatment	0~40 cm 土层 0-40 cm soil layer		
	苗期 Seedling	块茎形成期 Tuberization	成熟期 Maturity
W	39.659**	51.62**	54.681**
P	28.628**	49.85**	58.778**
W×P	2.794*	3.125*	NS

注: *, **分别表示影响显著($P<0.05$), 极显著($P<0.01$); NS表示影响不显著。下同。

Note: * and ** indicate significant effect ($P<0.05$) and highly significant effect ($P<0.01$), respectively; NS indicates no significant effect. The same below.

表4 水-磷互作对水分利用率的影响
Table 4 Effects of water-phosphorus interaction on water use efficiency

灌水处理 Irrigation treatment	磷素处理 Phosphorus treatment	蒸散量(mm) Evapotranspiration	水分利用率($\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$) Water use efficiency
W1	P1	318.66a	7.61d
	P2	312.25b	9.85c
	P3	307.29c	14.04a
	P4	312.38b	12.20b
W2	P1	314.28a	9.88d
	P2	311.23a	12.88c
	P3	305.29b	14.23a
	P4	310.38ab	13.61b
W3	P1	319.06a	8.39c
	P2	319.48a	9.09bc
	P3	312.88a	10.31a
	P4	312.35a	9.63ab
F值 F value	W	8.90**	301.516**
	P	11.77**	274.871**
	W×P	NS	31.823**

注: 不同小写字母表示相同灌水梯度下不同磷素处理间差异显著($P<0.05$), 采用LSD法。下同。

Note: Different lowercase letters indicate that under the same irrigation gradient, significant difference is detected among different phosphate fertilizer treatments ($P<0.05$), as tested using least significant difference (LSD) method. The same below.

2.3 水-磷互作对马铃薯农艺性状的影响

水-磷互作对马铃薯株高、茎粗影响表明, 灌水、施磷及水-磷互作对块茎形成期至膨大期马铃薯株高、茎粗具有极显著影响($P<0.01$)(表5)。块茎形成期, 各灌水处理的马铃薯株高及茎粗均呈先升后降趋势, 其中W2灌水处理的株高、茎粗最大。W2灌水处理下, 各施磷处理的株高、茎粗呈

先增后减趋势, 其中P3处理的株高、茎粗表现最佳, 较P1分别显著增加17.27%、33.68%。块茎膨大期, 马铃薯株高、茎粗随灌水量与施磷量增加均先增加后降低, 且仍以W2处理的株高和茎粗最大。W2灌水处理下, 各磷素处理间高低顺序为: $P3 > P4 > P2 > P1$, 其中P3处理的株高、茎粗较P1分别显著增加13.32%、27.80%。

表5 水-磷互作对马铃薯株高、茎粗的影响

Table 5 Effects of water-phosphorus interaction on plant height and stem diameter of potato

灌水处理 Irrigation treatment	磷素处理 Phosphorus treatment	株高(cm) Plant height			茎粗(mm) Stem diameter		
		苗期 Seedling	块茎形成期 Tuberization	块茎膨大期 Tuber bulking	苗期 Seedling	块茎形成期 Tuberization	块茎膨大期 Tuber bulking
		W1	P1	9.6c	18.1d	37.8d	9.17b
	P2	11.3b	21.9c	42.3c	9.71b	17.21b	18.84c
	P3	13.9a	25.6a	47.7a	11.41a	20.92a	25.46a
	P4	12.4ab	23.8b	43.8b	10.32ab	19.68a	22.64b
W2	P1	11.8c	22.0c	42.8c	10.02a	17.22c	20.18c
	P2	12.5bc	24.2b	45.4b	10.46a	19.98b	23.56b
	P3	14.2a	25.8a	48.5a	11.78a	23.02a	25.79a
	P4	13.2ab	24.3b	45.7b	11.19a	20.32b	23.84b
W3	P1	9.6b	19.4b	39.8c	9.22a	15.28b	16.58b
	P2	10.2b	20.0ab	40.6bc	9.41a	16.02b	17.06b
	P3	11.7a	22.3a	43.6a	10.12a	18.44a	20.2a
	P4	10.4ab	20.3ab	41.8ab	9.57a	16.42b	18.18b
F值 F value	W	34.21**	51.37**	71.13**	8.57*	77.71**	81.69**
	P	25.83**	46.38**	85.87**	7.73**	77.83**	61.52**
	W×P	NS	5.62**	6.98**	NS	4.64**	6.78**

2.4 水-磷互作对马铃薯品质的影响

水-磷互作对马铃薯品质影响的显著性检验表明, 灌水量与施磷量的交互作用对块茎内有机酸和可溶性蛋白含量影响极显著($P<0.01$), 对维生素C含量影响显著($P<0.05$) (表6)。测量马铃薯维生素C、有机酸及可溶性蛋白含量发现, W2灌水处理下, P3处理的维生素C及可溶性蛋白含量最高, 分别较P1显著提高7.04%、11.62%; 有机酸含量最低, 较P1显著降低18.39%。相同灌水水平下, 块茎内维生素C及可溶性蛋白含量均随施磷量增加呈先升后降趋势; 有机酸含量先减少后增加, 且

W1、W3处理下P3处理有机酸含量与其他处理间差异显著(图2)。

2.5 水-磷互作对马铃薯产量及磷肥利用率的影响

灌水量、施磷量对产量及磷肥利用率影响极显著, 水-磷互作仅对产量影响极显著($P<0.01$, 表7)。各灌水处理产量及磷肥利用率随施磷量增加均表现先增后减趋势, 其中W2灌水处理下, P3处理的产量及磷肥利用率最高, 分别为4 346 kg/hm²和24.4%; P4处理的产量和磷肥利用率仅次于P3, 分别为4 225 kg/hm²和19.5%, 且产量与P3差异不显著, 磷肥利用率差异显著。

表6 水-磷互作对马铃薯品质影响的显著性检验

Table 6 Significance test of water-phosphorus interaction effect on potato quality

处理 Treatment	维生素C含量(mg/100 g) Vitamin C content	可溶性蛋白含量(%) Soluble protein content	有机酸含量(%) Organic acid content
W	45.03**	44.83**	115.43**
P	32.17**	37.11**	84.95**
W×P	2.69*	3.98**	10.86**

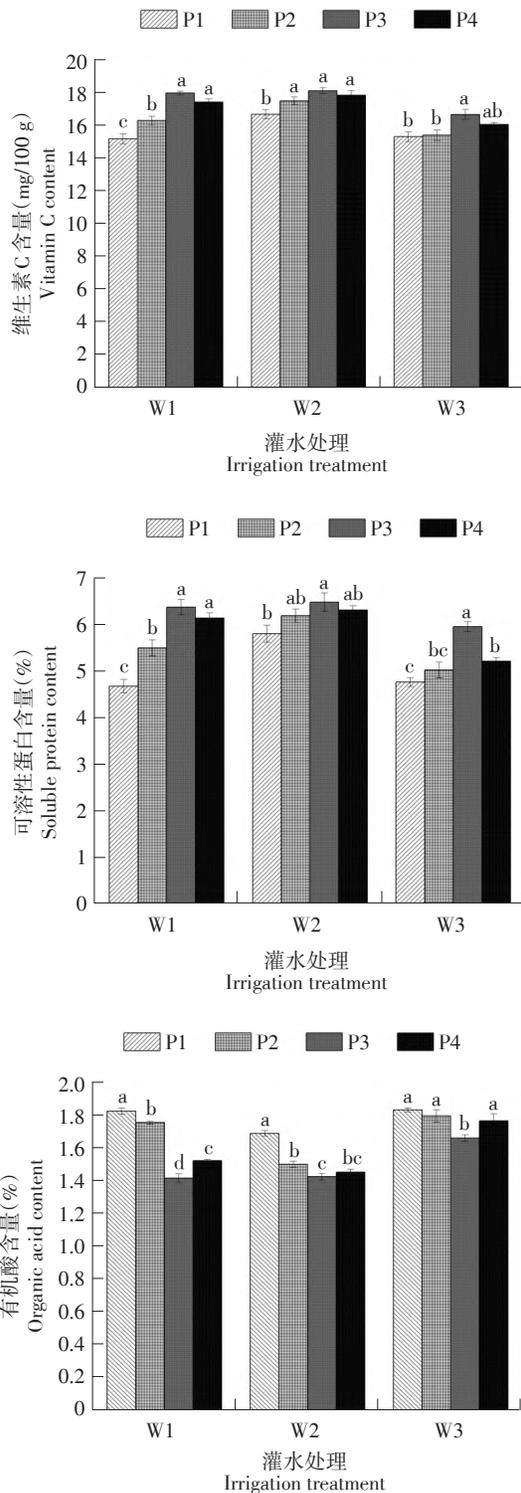


图2 维生素C、可溶性蛋白及有机酸含量变化
Figure 2 Changes of vitamin C, soluble protein and organic acid contents

表7 水-磷互作对马铃薯产量及磷肥利用率的影响
Table 7 Effects of water-phosphorus interaction on potato yield and phosphorus fertilizer utilization

灌溉处理 Irrigation treatment	磷素处理 Phosphorus treatment	产量(kg/hm ²) Yield	磷肥利用率(%) Phosphorus fertilizer utilization rate
W1	P1	2 426d	/
	P2	3 077c	15.6c
	P3	4 315a	21.7a
	P4	3 810b	18.3b
W2	P1	3 104c	/
	P2	4 008b	18.9b
	P3	4 346a	24.4a
	P4	4 225a	19.5b
W3	P1	2 678c	/
	P2	2 905b	10.3c
	P3	3 225a	17.7a
	P4	3 008ab	14.2b
F值 F value	W	254.19**	96.625**
	P	227.40**	81.348**
	W×P	29.36**	NS

注：“/”表示该处理施磷肥量为0。

Note: "/" indicates that the phosphate fertilizer application in this treatment is 0.

3 讨论

磷元素以多种途径广泛参与植株体内各种生化反应, 促进植株生长和果实成熟^[15]。在土壤中, 磷素主要以有机磷和无机磷的形式存在, 其中无机磷为植物吸收利用的主要养分^[16]。无机磷易被土壤胶体吸附, 在土壤中扩散能力弱, 且分布不均。土壤中水分含量适宜可削减土壤胶体对磷素的固定, 促进磷在土壤中迁移扩散, 从而达到“以水调磷”效果^[17]。因此, 在农业生产中常采用“灌水+施磷”的管理模式, 共同影响植株生长环境、农艺性状、产量及品质。

灌水是通过增加土壤孔隙度及水分含量、降低土壤容重来改善植株生长环境, 从而促进植株吸收、转化土壤中的养分^[18]。李越鹏等^[19]研究发现, 对南疆棉花设置不同水平下灌水量和施肥量可促进棉花株高、茎粗和产量增加。毕丽霏等^[20]研

究表明,在相同施肥梯度下,马铃薯生长、产量及品质均随灌水量增加而先上升后降低。本研究发现,随着灌水量增加,马铃薯各生育期土壤贮水量、水分利用率、株高、茎粗、品质、产量及磷肥利用率均表现为先升高后降低,这与前人研究结果相似。其原因可能为,灌水可改变马铃薯根系形态,从而提高水肥利用率,促进株高和茎粗增大^[21]。茎为植株运输水分和养分主要通道,茎粗越大,马铃薯可运输、吸收营养物质越多,最终影响产量及品质优劣^[22]。然而马铃薯是浅根系作物,灌水过多易导致根区水分和磷素养分流失,产生土壤环境污染、植株生长发育受阻等问题^[23]。因此,灌水量适宜才是马铃薯茁壮生长、品质优异的关键保证。本研究发现,W2灌水处理度下,马铃薯各生育阶段水分、磷肥利用率最高,株高和茎粗最大,产量及品质最优,为最佳灌水量。

施肥可明显改善土壤理化性质,提升土壤肥力,改变土壤细菌群落结构,为作物生长创造适宜环境条件,而磷肥供应量适宜是保证马铃薯优质高产主要因素之一^[24]。研究表明,施用适宜量磷肥可促进马铃薯生长、显著提高其块茎品质和产量^[25]。本研究证明,相同灌水水平下,P1~P4处理下土壤贮水量、水分和磷肥利用率、农艺性状、产量及品质均随施磷量增加而表现为先增加后减少,这与前人研究相似。其原因可能为,施磷能改变土壤团粒结构,增强水分在土壤中入渗程度,最终提高土壤贮水量^[26]。土壤贮水量升高有利于磷素扩散,不仅便于根系吸收,还可保证磷素养分充足,起到促进植株发育、叶片扩展、增强光合作用、提高产量及品质等积极作用^[27]。有机酸是马铃薯块茎中的重要营养成分,其含量高低与块茎生长、贮藏密切相关,有机酸含量过高会降低马铃薯加工品质,影响其商品价值^[28]。本研究中,P2~P4处理下有机酸含量较P1均有不同程度降低,说明施磷可促使块茎内有机酸含量下降,提高贮藏品质,这与前人研究相似。

综上,适宜的水分和磷肥供应为高产优产关键要素。本研究发现,水-磷互作可促进马铃薯土壤贮水量,提高水分及磷肥利用率,改善农艺性状和

块茎品质,实现增产;随着灌水量和施磷量增加,马铃薯土壤贮水量、水分及磷肥利用率、株高及茎粗均先升高后降低,块茎有机酸含量下降、可溶性蛋白、维生素C含量及产量均表现为先增大后减小;灌水量为10.00 m³/667m²,施磷量为20.00 kg/667m²(W2P3)改善效果最佳,为最优水-磷互作模式。在生产上,选择最佳的水-磷互作模式可实现马铃薯高产,节约水分、磷肥资源,减少成本 and 环境污染。

[参 考 文 献]

- [1] Wang X, Guo T, Wang Y, *et al.* Exploring the optimization of water and fertilizer management practices for potato production in the sandy loam soils of Northwest China based on PCA [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 237: 106180.
- [2] 秦舒浩,曹莉,张俊莲,等. 轮作豆科植物对马铃薯连作田土壤速效养分及理化性质的影响 [J]. *作物学报*, 2014, 40(8): 1452-1458.
- [3] 马菁菁. 定西市马铃薯产业现状调查与发展建议 [J]. *中国马铃薯*, 2016, 30(5): 312-315.
- [4] 孙洪仁,王显国,张运龙,等. 我国荞麦土壤钾素丰缺指标和适宜施钾量研究 [J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(11): 170-178.
- [5] 陈雨露,康娟,王家瑞,等. 灌水与施磷对小麦氮素积累运转及水分利用效率的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(9): 1095-1104.
- [6] Mai W, Xue X, Feng G, *et al.* Can optimization of phosphorus input lead to high productivity and high phosphorus use efficiency of cotton through maximization of root/mycorrhizal efficiency in phosphorus acquisition? [J]. *Field Crops Research*, 2018, 216: 100-108.
- [7] Soratto R, Pilon C, Fernandes A, *et al.* Phosphorus uptake, use efficiency, and response of potato cultivars to phosphorus levels [J]. *Potato Research*, 2015, 58(2): 121-134.
- [8] Sun Y, Cui X, Liu F. Effect of irrigation regimes and phosphorus rates on water and phosphorus use efficiencies in potato [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 190: 64-69.
- [9] 张小红,曾芳荣,孙叶,等. 不同密度和垄沟比对全膜覆盖垄上微沟马铃薯水分利用和产量的影响 [J]. *中国马铃薯*, 2022, 36

- (5): 413-422.
- [10] 於凝, 王林林, 李玲玲, 等. 水肥一体化减氮对陇中地区马铃薯产量和水分利用效率的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 70-78.
- [11] 杨宏伟, 柴强, 李朝周, 等. 稀土微肥氯化镧调控马铃薯生长发育及抗旱的生理机制 [J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 123-129.
- [12] 焦淑娟, 董强, 卢婷婷, 等. 叶面喷施 $MnSO_4$ 对马铃薯植株叶片生理特性和块茎品质的影响 [J]. 分子植物育种, 2021, 19(4): 1304-1311.
- [13] 孙得翔, 石铭福, 王勇, 等. 有机肥部分替代化肥对马铃薯农艺性状、产量和品质的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(6): 43-51.
- [14] 张丽微, 董清山, 解国庆, 等. “水肥一体化”下马铃薯磷肥的合理施用 [J]. 中国马铃薯, 2023, 37(3): 236-244.
- [15] 邢海峰, 石晓华, 杨海鹰, 等. 磷肥分次滴灌施用提高马铃薯群体磷素吸收及磷利用率的作用 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 987-992.
- [16] 杨叶钰萍, 郑洁, 靳乐乐, 等. 有机培肥对根际解磷细菌群落及玉米生产力的影响 [J/OL]. 土壤学报, 1-12[2024-06-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20240604.1627.004.html>.
- [17] 杨荣. 水-磷互作调节棉花根系形态和磷效率的机制研究 [D]. 新疆: 新疆农业大学, 2017.
- [18] 武文莉, 王薇, 李艺妆. 交替灌溉下水磷耦合对紫花苜蓿植株性状的影响 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48(3): 155-157.
- [19] 李越鹏, 张富仓, 侯翔皓, 等. 种植密度和水氮互作对南疆棉花生长和水氮利用的影响 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2021, 49(9): 45-56, 66.
- [20] 毕丽霏, 张富仓, 王海东, 等. 水肥调控对滴灌马铃薯生长、品质及水肥利用的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 155-165.
- [21] 樊吴静, 杨鑫, 李丽淑, 等. 不同灌溉方式对冬种马铃薯土壤理化性状、水分利用效率及块茎产量的影响 [J]. 西南农业学报, 2023, 36(11): 2374-2381.
- [22] 卢建武, 邱慧珍, 张文明, 等. 半干旱雨养农业区马铃薯干物质和钾素积累与分配特性 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 423-430.
- [23] Shahnazari A, Ahmadi S, Laerke P, *et al.* Nitrogen dynamics in the soil-plant system under deficit and partial root-zone drying irrigation strategies in potatoes [J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(2): 190: 65-73.
- [24] 程瑶, 孙磊, 原琳, 等. 磷肥用量对马铃薯淀粉理化性质及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(9): 1603-1613.
- [25] Israel Z, Ali M, Solomon-Tulu T. Potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and tuber quality, soil nitrogen and phosphorus content as affected by different rates of nitrogen and phosphorus at Masha District in Southwestern Ethiopia [J]. *Science Alert*, 2016, 11(3): 95-104.
- [26] Chtouki M, Laaziz F, Naciri R, *et al.* Interactive effect of soil moisture content and phosphorus fertilizer form on chickpea growth, photosynthesis, and nutrient uptake [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 6671.
- [27] 曹靖, 张福锁. 低磷条件下不同基因型小麦幼苗对磷的吸收和利用效率及水分的影响 [J]. 植物生态学报, 2000(6): 731-735.
- [28] 赵敏, 秦舒浩, 张俊莲, 等. 贮藏温度对连作马铃薯品质的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 49-54, 160.