◆健康保育与环境修复◆

灌溉方式与磷肥互作对制种玉米根际磷素有效性及磷酸酶活性的影响

杨宸巍[1]，王　强[2,3,4]，李　浩[2,3,4]，张立存[2,3,4]，张定国[1]，梁　飞[2,3,4]

（1. 伊犁师范大学 生物科学与技术学院，新疆 伊宁　835000；2. 伊犁师范大学 资源与环境学院，新疆 伊宁　835000；3. 伊犁师范大学 资源与环境生态研究所，新疆 伊宁　835000；4. 伊犁师范大学 伊犁河谷农业资源与环境实验室，新疆 伊宁　835000）

［摘　要］为探究灌溉方式与磷肥互作对新疆制种玉米根际土壤磷酸酶特性及磷素有效性的影响，采用双因素裂区设计，研究吐丝期和灌浆期根区土壤pH、电导率、速效磷含量及磷酸酶活性在滴灌与漫灌条件下不同磷肥用量的动态变化规律。结果表明，高磷条件下，3种磷酸酶活性均受抑制，且抑制效应随生育期增强，灌浆期DP_{150}处理根际碱性磷酸酶活性仅为DP_{100}的63.72%；无磷或低磷处理下磷酸酶活性较高或达到峰值，DP_0处理灌浆期根际酸性、中性和碱性磷酸酶活性较DP_{150}处理分别提高31.86%、7.08%和37.97%。滴灌显著降低土壤盐分并稳定pH，吐丝期DP_{150}处理根际EC较MP_{150}处理降低53.28%。滴灌通过精准水肥协同显著优化磷素有效性，最终实现玉米高产。

［关键词］滴灌；漫灌；磷酸酶；磷素有效性；制种玉米

［中图分类号］S143.22；S156.4　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）01-0102-07

Effects of interaction between irrigation method and phosphorus fertilization on phosphorus availability and phosphatase activity in rhizosphere of seed maize

YANG Chenwei[1], WANG Qiang[2,3,4], LI Hao[2,3,4], ZHANG Licun[2,3,4], ZHANG Dingguo[1], LIANG Fei[2,3,4]

(1. *School of Biological Sciences and Technology, Yili Normal University, Yining* 835000, *China*; 2. *School of Resources and Environment, Yili Normal University, Yining* 835000, *China*; 3. *Institute of Resources and Ecology, Yili Normal University, Yining* 835000, *China*; 4. *Yili River Valley Agricultural Resources and Environment Laboratory, Yili Normal University, Yining* 835000, *China*)

Abstract: To investigate the effects of interaction between irrigation methods and phosphorus fertilization on phosphorus availability and phosphatase activity in rhizosphere of Xinjiang seed maize, the dynamic changes of soil pH, electrical conductivity, available phosphorus content, and phosphatase activity in root zone soil collected during the silking stage and filling stage under drip irrigation and flood irrigation are studied with two-factor split-plot design. The results show that under high phosphorus, the activities of three phosphatases are suppressed, with the inhibition intensifying as the growth period progressed. The rhizosphere alkaline phosphatase activity of DP_{150} treatment during the filling stage is only 63.72% of that in DP_{100} treatment. In contrast, no-phosphorus (P_0 treatment) or low-phosphorus treatments exhibit higher or peak phosphatase activities, during the filling stage, the activities of acid, neutral, and alkaline phosphatases in rhizosphere of DP_0 treatment is increased by 31.86%, 7.08%, and 37.97% respectively compared to DP_{150} treatment. Drip irrigation can significantly reduce soil salinity and stabilize pH. During the silking stage, the rhizosphere EC of DP_{150} treatment is decreased by 53.28% compared to MP_{150} treatment. Drip irrigation can significantly optimize phosphorus availability through precision water-fertilizer synergy to achieve high yield of maize.

Key words: drip irrigation; flood irrigation; phosphatase; phosphorus availability; seed maize

收稿日期：2025-04-10

作者简介：杨宸巍（2005—　），男，河北邯郸人，研究方向为资源与环境方面。

通信作者：张定国（1988—　），男，农业推广研究员，研究方向为新技术引进示范与推广；
梁　飞（1984—　），男，研究员，研究方向为滴灌玉米水肥一体化与土壤改良。

基金项目：新疆维吾尔自治区《天池英才》青年博士人才项目（2025QNBS012）；伊犁师范大学创新创业训练计划（202410764014）；伊犁州重点研究与技术开发专项（YZD2024A02）；国家自然科学基金资助项目（32360444）

磷作为植物生长发育不可或缺的营养元素，参与能量代谢、核酸合成及信号转导等关键的生理生化过程[1-2]。然而，在土壤中95%以上的磷以难溶性无机态或有机态存在，需要通过土壤微生物和酶的作用转化为有效态磷才能被植物吸收[3]。土壤磷酸酶受土壤水分、pH、温度、质地、有机质含量以及微生物群落结构等多种因素的协同调控，而灌溉施肥通过改变土壤水分分布和养分迁移路径，深刻影响根际微域磷素转化效率。

近年来，滴灌因其节水节肥、水肥高效的优势，在农业生产中得到广泛应用。制种玉米膜下滴灌是将覆膜种植技术与滴灌技术相结合的一种新的灌水技术[4]。研究表明，滴灌能打破传统漫灌条件下的水肥平衡，提高磷酸酶活性[5-9]。制种玉米种子质量不仅受遗传因素的影响，其活力还受环境因素影响[10-11]，磷素能改善种子质量，还能提高植物的抗逆性。合理的肥料用量有利于提高磷酸酶活性[12]，从而提高磷素转化效率。关于灌溉方式与磷肥互作对土壤磷酸酶活性动态及磷素活化机制的研究多集中于普通玉米或其他作物上，对于制种玉米这一特定作物类型的研究相对较少[13-15]，且大多为单因素试验，并未设置灌溉方式或磷肥梯度试验。为此，本研究以新疆制种玉米为研究对象，设置两种灌溉模式（滴灌与漫灌）与4个施磷水平，通过测定制种玉米根际/非根际土壤的pH、电导率、速效磷含量及磷酸酶活性等，揭示磷酸酶在磷转化过程中的作用机制，为新疆地区制种玉米水肥精准管理及磷素循环调控提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于2024年4月至9月在新疆生产建设兵团第四师69团创锦农业制种玉米地进行。试验土壤类型为灌溉栗灰土，土壤电导率为249.83 μS/cm，pH 8.6，w（碱解氮）81.50 mg/kg，w（速效磷）14.96 mg/kg，w（速效钾）96.42 mg/kg。

1.2　试验设计

本试验采用双因素裂区设计：主因素为灌溉方式（滴灌D和漫灌M），副因素为磷肥（P_2O_5）用量梯度（0、111、222、333 kg/hm^2，分别记为P_0、P_{50}、P_{100}、P_{150}），共8个处理，依次标记为DP_0、MP_0、DP_{50}、MP_{50}、DP_{100}、MP_{100}、DP_{150}、MP_{150}（见表1）。每个处理重复3次，24个小区随机排列

表1　施肥试验设计

Table 1　Fertilization experimental design

kg/hm^2

处理	肥料	出苗期	拔节期	小喇叭期	大喇叭期	抽雄期	开花-吐丝期	籽粒建成-乳熟期	蜡熟期	总计
DP0	尿素	32.6	65.2	97.8	97.8	130.4	97.8	65.2	65.2	652.0
	磷酸一铵	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	硫酸钾	15.0	30.0	30.0	60.0	60.0	60.0	30.0	30.0	315.0
DP50	尿素	30.3	60.3	88.4	88.0	123.4	93.3	60.5	60.5	604.7
	磷酸一铵	9.0	18.8	36.0	37.8	27.0	17.4	18.0	18.0	182.0
	硫酸钾	15.0	30.0	30.0	60.0	60.0	60.0	30.0	30.0	315.0
DP100	尿素	27.9	55.8	78.8	78.4	116.1	88.7	55.8	55.7	557.2
	磷酸一铵	18.0	36.1	73.0	74.5	55.0	34.8	36.0	36.5	363.9
	硫酸钾	15.0	30.0	30.0	60.0	60.0	60.0	30.0	30.0	315.0
DP150	尿素	25.6	51.1	69.1	69.2	108.9	83.6	50.9	51.3	509.7
	磷酸一铵	27.0	54.1	110.0	109.7	82.4	54.5	55.0	53.2	545.9
	硫酸钾	15.0	30.0	30.0	60.0	60.0	60.0	30.0	30.0	315.0
MP0	尿素	97.8		195.7		228.3		130.4		652.2
	磷酸一铵	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0
	硫酸钾	45.0		90.0		120.0		60.0		315.0
MP50	尿素	90.6		176.4		216.7		121.0		604.7
	磷酸一铵	27.8		73.8		44.4		36.0		182.0
	硫酸钾	45.0		90.0		120.0		60.0		315.0
MP100	尿素	83.7		157.2		204.8		111.5		557.2
	磷酸一铵	54.1		147.5		89.8		72.5		363.9
	硫酸钾	45.0		90.0		120.0		60.0		315.0
MP150	尿素	76.7		138.3		192.6		102.2		509.8
	磷酸一铵	81.1		219.7		136.9		108.2		545.9
	硫酸钾	45.0		90.0		120.0		60.0		315.0

设计，各小区面积均为126 m²。玉米全生育期滴灌8次或漫灌4次，总灌溉量相同，均为4 800 m³/hm²，除磷肥用量不同，各处理的氮肥和钾肥用量保持一致，分别为300.0、157.5 kg/hm²，具体肥料用量、灌水施肥时间和肥料施用次数，依据玉米不同生育期进行分配。8次滴灌用水量分别为总量的5.0%、10.0%、15.0%、15.0%、20.0%、15.0%、10.0%和10.0%。4次漫灌用水量分别为总用水量的15.0%、30.0%、35.0%、20.0%。

播种采用40 cm+60 cm不等行距，1膜1管2行种植模式，父母本种植行比为1∶6，即1行父本，6行母本，株距13.5 cm；父本种植密度2.12 × 10⁴株/hm²，母本种植密度12.7 × 10⁴株/hm²。供试制种玉米：雷丹1号，母本SS1819，父本P1023。氮、磷、钾肥分别为尿素（w(N) 46%）、磷酸一铵（w(N) 12%，w(P_2O_5) 61%）、硫酸钾（w(K_2O) 50%）。

1.3　测定项目及其方法

土壤理化指标[16]：在玉米吐丝期和灌浆期灌溉后的第3天进行采样，分别位于非根际（滴灌带下）、根际（根系行）两个位点（两点距离15 cm，见图1）进行采样，取土时用土钻在取样点取土，深度为10 cm，采用三点混合土样，置土样于无菌自封袋中，带回实验室以备分析。鲜样4 ℃冷藏用于磷酸酶活性测定（7 d内完成）；风干样过2 mm筛用于理化分析；土壤pH采用酸度计测量（土水质量比1∶5），土壤电导率参照鲍士旦主编的《土壤农化分析》进行测定；速效磷采用钼锑抗比色法测定。

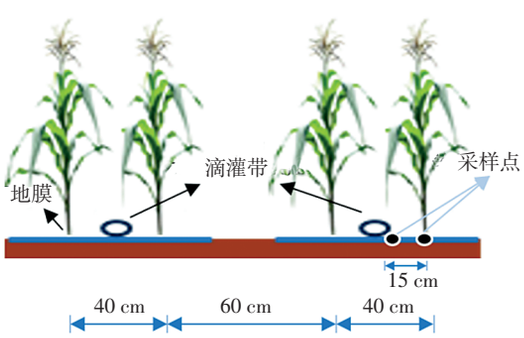


图1　采样点示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the sampling points

土壤磷酸酶活性测定[17]：酸性、碱性和中性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定。

1.4　数据处理与分析

数据均采用SPSS 27与Excel 2021进行整理与统计分析，用最小显著差异法（LSD）进行多重比较确定差异的显著性，用Origin进行绘图，字母标记法标注差异显著性。

2　结果与分析

2.1　灌溉方式与磷肥互作对根际土壤速效磷的影响

灌溉方式与磷肥用量对土壤速效磷含量具有显著调控作用（见表2），且滴灌与漫灌条件下磷素转化规律存在差异。在吐丝期，滴灌条件下根际速效磷含量随磷肥用量增加总体基本呈下降趋势，DP_{150}较DP_0降幅13.30%；但非根际区域DP_{100}处理速效磷含量较DP_0增加303.99%。MP_{100}处理根际速效磷含量较MP_0增加106.49%。P_{100}和P_{150} 2个处理滴灌根际速效磷含量低于漫灌；而非根际区域DP_{100}较MP_{100}高118.20%。在灌浆期，滴灌条件下DP_0根际速效磷含量激增；DP_{100}处理非根际速效磷含量较DP_0增加1倍。漫灌则呈现矛盾现象：MP_0处理根际速效磷含量高于MP_{150}；MP_{50}根际速效磷含量较MP_0处理低13.68%；DP_0根际速效磷含量较MP_0高394.7%。对比灌溉方式，滴灌通过精准水肥协同提升非根际磷素有效性，吐丝期DP_{100}处理非根际速效磷含量较漫灌MP_{100}提高118.20%；而漫灌处理根际速效磷波动剧烈，MP_{150}处理灌浆期速效磷含量较吐丝期下降10.47%。

表2　不同施磷水平对玉米土壤速效磷含量的影响

Table 2　The impact of different phosphorus application levels on soil available phosphorus content

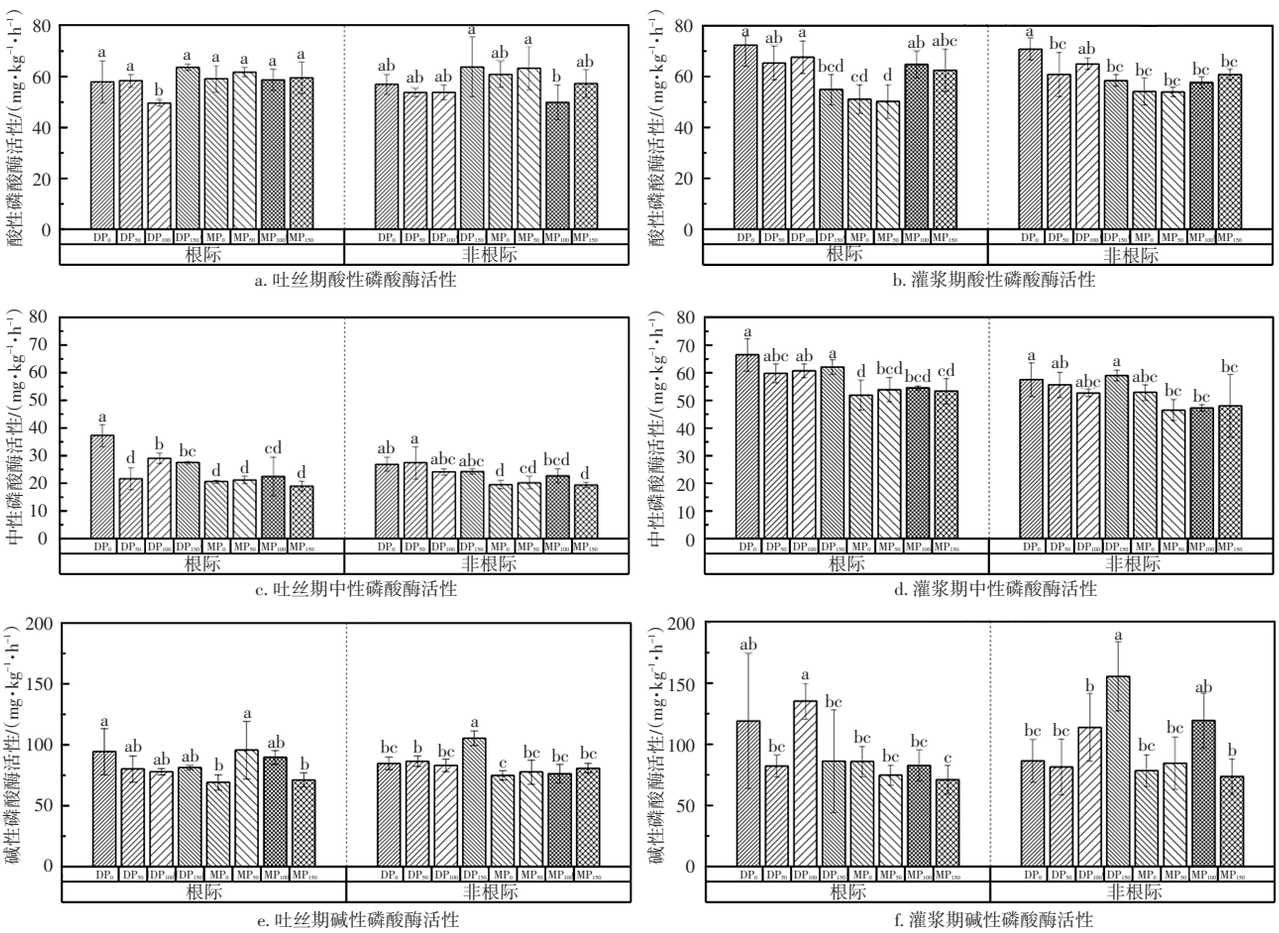
灌溉方式	处理	土壤w(速效磷)/(mg·kg⁻¹)			
		吐丝期		灌浆期	
		根际	非根际	根际	非根际
滴灌	DP_0	7.52	20.80	51.35	8.35
	DP_{50}	6.93	9.85	11.45	13.36
	DP_{100}	7.02	84.03	10.56	16.70
	DP_{150}	6.52	23.21	10.83	6.18
漫灌	MP_0	6.93	10.56	10.38	6.02
	MP_{50}	6.18	53.04	8.96	9.27
	MP_{100}	14.28	38.51	6.40	15.79
	MP_{150}	7.64	53.26	6.84	9.27

综合分析表明，滴灌的优势随着玉米的生长显现，在灌浆期各个处理的根际速效磷含量均高于漫灌模处理，且DP_0处理下的根际速效磷含量为最高；漫灌须严格控磷并优化灌溉频次，以实现磷素高效利用。

2.2　灌溉方式与磷肥互作对根际土壤磷酸酶活性的影响

土壤磷酸酶活性是磷素有效性的关键调控因子。本研究表明，灌溉方式与施磷量对酸性、中性及碱性磷酸酶活性均具有显著影响，但响应规律因酶类型和生育期而异（见图2）。酸性磷酸酶在吐

丝期，根际与非根际的P_{150}处理活性均比P_{100}高；而在灌浆期则滴灌下低磷或无磷条件下活性较高，漫灌则相反。中性磷酸酶活性普遍较低，滴灌显著提升其稳定性，而漫灌高磷进一步抑制磷酸酶活性。相比之下，碱性磷酸酶活性高，且对水磷互作响应最为敏感。



a. 吐丝期酸性磷酸酶活性　b. 灌浆期酸性磷酸酶活性
c. 吐丝期中性磷酸酶活性　d. 灌浆期中性磷酸酶活性
e. 吐丝期碱性磷酸酶活性　f. 灌浆期碱性磷酸酶活性

图2　不同生育期下3种土壤磷酸酶活性

Fig. 2　Activities of three soil phosphatases during different growth stages

碱性磷酸酶活性普遍高于酸性和中性磷酸酶；在滴灌与漫灌条件下均呈现显著时空差异。吐丝期，随着施磷量增加滴灌根际的碱性磷酸酶活性呈现先降低后增加的趋势，而漫灌呈现先升后降趋势，DP_0处理显著高于MP_0处理，其他处理之间差异不显著；非根际滴灌和漫灌随着施磷量增加均呈现先增后减再增的趋势，DP_{150}处理显著高于其他处理，较DP_{100}增加26.94%，其他处理之间差异不显著。灌浆期，滴灌条件下碱性磷酸酶的活性较吐丝期增加；漫灌条件下变化较小。灌浆期滴灌根际碱性磷酸酶活性高于漫灌，其中DP_{100}处理活性最高，较MP_{100}处理高63.85%，与其他处理（DP_0除外）差异显著。在非根际区域，滴灌条件下碱性磷酸酶的活性随着施磷量增加呈现先减后增的趋势；DP_{150}处理活性显著高于其他处理；在漫灌条件下碱性磷酸酶活性呈现先增后减的趋势，但各处理之间无显著差异。综上所述，滴灌通过精准水肥协同显著提升碱性磷酸酶活性稳定性；根际高磷抑制磷酸酶效应随玉米生长凸显；漫灌高磷处理抑制根际磷酸酶活性，低磷处理短期刺激效应有限。

2.3　灌溉方式与磷肥互作对根际土壤pH和EC的影响

不同灌溉方式与施磷水平对玉米根际与非根际土壤pH及电导率（EC）的影响存在差异（见表3）。吐丝期滴灌处理根际pH高于漫灌；根际pH随磷肥量增加呈现先降后升趋势，DP_0处理pH最高，DP_{100}下降至最低，而DP_{150}回升；漫灌条件下，吐丝期根际pH随施磷量增加同样呈现先减后增的趋势。灌浆期，滴灌根际pH随磷肥用量增加从8.42降至8.27，降幅1.78%；而漫灌根际pH则从8.63升至8.70，增幅0.81%。灌浆期滴灌根际pH降幅可控，而漫灌MP_{150}根际pH升至8.70，与滴灌差异扩

表3　灌溉方式与施磷量对土壤不同位点pH和EC的影响

Table 3　Effects of different fertigation method and phosphorus application rate on pH and EC at different soil sites

灌溉方式	处理	土壤pH				电导率/(μS·cm^{-1})			
		吐丝期根际	吐丝期非根际	灌浆期根际	灌浆期非根际	吐丝期根际	吐丝期非根际	灌浆期根际	灌浆期非根际
滴灌	DP_0	8.65	8.58	8.42	8.66	281	269	239	187
	DP_{50}	8.49	8.48	8.41	8.44	277	320	330	248
	DP_{100}	8.41	8.54	8.30	8.40	372	316	329	210
	DP_{150}	8.55	8.45	8.27	8.48	251	295	318	201
漫灌	MP_0	8.55	8.50	8.63	8.72	362	260	267	197
	MP_{50}	8.45	8.47	8.58	8.57	318	272	280	272
	MP_{100}	8.40	8.27	8.62	8.58	231	513	208	236
	MP_{150}	8.47	8.46	8.70	8.76	580	433	186	270

大至0.43个单位，说明漫灌后期局部碱化风险更高。整体趋势下，滴灌抑制盐分积累，吐丝期滴灌根际EC（251～372 μS/cm）低于漫灌（231～580 μS/cm）。其中，DP_{150}根际EC值较MP_{150}降低53.28%；且滴灌处理非根际EC值波动幅度小于漫灌。灌浆期，滴灌根际EC增幅平缓；漫灌MP_{150}根际EC较吐丝期下降67.93%。

综合分析表明，滴灌精准调控水分分布，能够降低土壤EC并减缓碱化进程，高磷（P_{150}）条件下效果较好；高磷结合滴灌可缓解盐分累积，而漫灌高磷虽降低根际EC，但非根际EC仍较高。

2.4　*两种灌溉方式下施磷量与速效磷、磷酸酶、pH、EC的相关关系*

相关性分析表明，在滴灌与漫灌条件下，土壤环境因子与磷酸酶活性的关联存在时空差异（见表4和表5）。滴灌条件下，吐丝期根际电导率（EC）与酸性磷酸酶（ACP）活性呈显著负相关（r = –0.980，P<0.05）；根际pH与碱性磷酸酶（ALP）活性正相关（r = 0.915），暗示弱碱性环境可增强ALP对有机磷的矿化能力；灌浆期非根际速效磷与中性磷酸酶（SN–P）活性显著负相关（r = –0.983，P<0.05）。漫灌条件下，吐丝期根际EC与中性磷酸酶活性呈极显著负相关（r = –0.983，P<0.05），显示盐分胁迫对SN–P的抑制作用更强；而灌浆期根际速效磷与ACP活性负相关（r = –0.935），可能与水分分布不均导致磷素淋失、根际磷匮乏有关。整体而言，滴灌通过稳定根际盐分（EC）与pH，强化了磷酸酶活性与磷素有效性的协同作用，而漫灌

表4　滴灌下吐丝期和灌浆期的土壤指标与磷酸酶活性之间的相关性

Table 4　Correlation between soil indicators and phosphatases activity during silking and grain-filling stages under drip irrigation

项目	吐丝期						灌浆期					
	根际ACP	根际ALP	根际SN–P	非根际ACP	非根际ALP	非根际SN–P	根际ACP	根际ALP	根际SN–P	非根际ACP	非根际ALP	非根际SN–P
根际pH	0.618	0.915	0.642	0.450	0.201	0.435	0.721	–0.069	0.721	0.553	–0.928	0.025
根际EC	–0.980*	–0.360	0.079	–0.646	–0.647	–0.376	–0.567	–0.299	–0.567	–0.814	0.342	–0.419
根际速效磷	–0.407	0.748	0.697	–0.535	–0.783	0.545	0.663	0.331	0.663	0.863	–0.459	0.327
非根际pH	–0.587	0.635	0.787	–0.492	–0.763	0.236	0.435	0.109	0.435	0.690	–0.288	0.578
非根际EC	–0.375	–0.924	–0.876	–0.449	–0.128	–0.158	–0.116	–0.508	–0.116	–0.529	–0.357	–0.355
非根际速效磷	–0.841	–0.426	0.129	–0.321	–0.338	–0.687	0.423	0.467	0.423	0.091	–0.416	–0.983*

表5　漫灌下吐丝期和灌浆期的土壤指标与磷酸酶活性之间的相关性

Table 5　Correlation between soil indicators and phosphatases activity during silking and grain-filling stages under flood irrigation

项目	吐丝期						灌浆期					
	根际ACP	根际ALP	根际SN–P	非根际ACP	非根际ALP	非根际SN–P	根际ACP	根际ALP	根际SN–P	非根际ACP	非根际ALP	非根际SN–P
根际pH	–0.051	–0.745	–0.515	0.630	–0.290	–0.790	0.570	–0.363	0.570	0.847	–0.371	0.185
根际EC	–0.008	–0.669	–0.983*	0.259	0.763	–0.744	–0.946	0.341	–0.946	–0.976*	–0.216	0.263
根际速效磷	–0.635	0.291	0.646	–0.961*	–0.204	0.929	–0.935	0.415	–0.935	–0.829	–0.521	0.672
非根际pH	0.471	–0.463	–0.695	0.917	0.131	–0.968*	0.085	–0.146	0.085	0.442	–0.697	0.595
非根际EC	–0.590	0.101	0.190	–0.939	0.331	0.675	0.212	–0.936	0.212	0.416	–0.122	–0.871
非根际速效磷	0.512	0.499	–0.178	–0.039	0.828	0.076	0.746	0.033	0.746	0.378	0.912	–0.637

因盐分波动导致根际与非根际内部指标关系复杂化。非根际区域中，低磷激活酶活性的现象在滴灌中更明显，而漫灌则因水分分布不均削弱酶活性响应。

3　讨论

3.1　施磷水平与灌溉方式对土壤pH、EC及速效磷含量的影响

土壤作为植物的主要生长环境，适宜的pH、水含量、有效养分是促进植物生长的基本条件。近年来，由于过量或单一施肥造成的土壤酸化及盐渍化问题严重，已成为制约农林业生产的重要原因之一[18]。BHAT等[19]研究提出，与传统漫灌施肥处理相比，采用滴灌施肥显著提高了槟榔地土壤的pH。这说明传统漫灌施肥中，长期的表层施肥会导致土壤酸化和盐渍化，而合理滴灌施肥方式能使肥料溶解后随灌水在土层中运移，减少土壤表层剖面的残留和累积，降低土壤EC值，提高土壤pH，从而达到减缓土壤酸化及盐渍化的目的。这与前人研究滴灌施肥有效缓解土壤水分蒸发及土壤表面积盐，淡化作物主根区盐分的研究结果相吻合[20]。本试验研究显示，与传统漫灌施肥相比，滴灌施肥处理增加了土壤pH，降低了土壤EC值。

3.2　施磷水平与灌溉方式对土壤速效磷及磷酸酶活性的影响

滴灌与漫灌条件下施磷量对土壤速效磷及磷酸酶活性的调控效应差异显著。在吐丝期，两种灌溉方式的根际速效磷含量与3种磷酸酶活性相关性方向一致，而非根际的相关性方向则表现为滴灌下均为负相关，而漫灌下酸性磷酸酶为负相关，其余两种则为正相关；而到了灌浆期，这一差异模式更为复杂，根际与非根际之间的相关性呈现明显异质性，且灌溉方式之间的调控特征也进一步分化；且滴灌条件下精准的水供应减少了盐分表聚风险，而漫灌条件下磷素有效性波动较大反映水分分布不均导致磷素淋溶或固定[21]。土壤磷酸酶是由微生物细胞和植物根系分泌产生的，其活性对植物磷的有效性、有机磷肥料的有效性和土壤磷循环具有重要的影响[22]。从吐丝期开始，漫灌条件下根际3种磷酸酶活性低于滴灌条件下，到了灌浆期，活性差距拉大且漫灌不同施磷量之间无显著差异。酸性磷酸酶，滴灌通过水肥协同显著提升酸性磷酸酶活性稳定性，吐丝期高磷处理促进根际活化，灌浆期则需降低磷量以规避抑制风险；漫灌条件下低磷虽短期刺激活性，但水肥分布不均导致生育后期活性波动显著，整体效率低于滴灌。中性磷酸酶，滴灌通过精准水肥分布维持酶活性稳定性，吐丝期低磷处理更利于根际活化，而高磷抑制效应明显；漫灌因水分分布不均导致酶活性普遍偏低，高磷进一步加剧抑制[23-24]。建议滴灌生育期内控制磷肥用量，避免高磷对中性磷酸酶的负向调控；漫灌需优化水分管理并限制磷肥用量，以缓解酶活性抑制及盐分累积风险。碱性磷酸酶，滴灌通过精准的水肥协同作用显著提升了碱性磷酸酶活性的稳定性。在吐丝期，高磷处理在非根际区域强化活性，而在灌浆期则需降低至常规磷量以维持根际的高效转化；高磷在非根际区域的持续激活效应表明，适量的磷肥调控能够优化作物的磷素利用效率。

4　结论

研究结果表明，滴灌通过精准水分管理能够降低土壤盐分并稳定pH，缓解盐碱化对磷酸酶活性的抑制；碱性磷酸酶是磷素活化的关键酶类，其活性显著高于酸性与中性磷酸酶，并且3种磷酸酶活性均表现出高磷对磷酸酶活性的抑制效应随生育期推进而增强；低磷环境可能通过激活3种磷酸酶活性提高磷素转化效率，为后续在低磷条件下探究打下基础；综合分析可得，吐丝期滴灌结合高磷处理可显著提升碱性磷酸酶活性，提高磷素转化。在灌浆期时调整为常规磷量避免高磷抑制效应，维持酶活性稳定与磷素供需平衡。这一结果对滴灌与漫灌制种玉米上研究磷肥对玉米生长、磷酸酶活性以及速效磷影响的研究提供理论基础。

［参考文献］

［1］ COCKEFAIR E A. The role of phosphorus in the metabolism of plants[J]. American Journal of Botany, 1931,18(7):582-597.

［2］ RYCHTER A M, RAO I M. Role of phosphorus in photosynthetic carbon metabolism[J]. Handbook of Photosynthesis, 2005, 2: 123-148.

［3］ 冶赓康,俄胜哲,陈政宇,等.土壤中磷的存在形态及分级方法研究进展[J].中国农学通报,2023,39(1):96-102.
YE G K, E S Z, CHEN Z Y, et al. The Forms and Classification Methods of Phosphorus in Soil: Research Progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023,39(1):96-102.

［4］ 李遂琴.不同灌溉方式对玉米生长及土壤质量的影响[J].热带农业工程,2024,48(5):77-79.
LI S Q. The Effects of Different Irrigation Methods on Corn Growth and Soil Quality[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2024, 48(5):77-79.

［5］ 王红军,郭书亚,张艳,等.水肥管理对夏玉米田土壤酶活性的影响[J].江苏农业科学,2017,45(18):64-66.

［6］ 焦亚鹏,齐鹏,王晓娇,等.施氮量对农田土壤有机氮组分及酶活性的影响[J].中国农业科学,2020,53(12):2423-2434.

JIAO Y P, QI P, WANG X J, et al. Effects of Different Nitrogen Application Rates on Soil Organic Nitrogen Components and Enzyme Activities in Farmland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020,53(12):2423-2434.

[7] 李明,徐涛,俞湾青,等.不同灌溉模式和施肥处理对受涝稻田土壤酶活性的影响[J].节水灌溉,2022(9):24-29.
LI M, XU T, YU W Q, et al. Effects of Different Irrigation Modes and Fertilization Treatments on Soil Enzyme Activities in Waterlogging Paddy Fields[J]. Water Saving Irrigation, 2022(9): 24-29.

[8] 梁欣冉,曹国军,耿玉辉,等.不同滴灌方式下玉米秸秆还田土壤酶活性变化特征[J].吉林农业大学学报,2024,46(5):819-827
LIANG X R, CAO G J, GENG Y H, et al. Characteristics of Soil Enzyme Activity Changes in Maize Straw Return under Different Drip Irrigation Methods [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2024,46(5):819-827.

[9] 刘丹,安雨丽,陶笑笑,等.西北地区制种玉米产量及氮素吸收对供氮水平的响应[J].中国农业科学,2023,56(3):441-452.
LIU D, AN Y L, TAO X X, et al. Effects of Different Nitrogen Gradients on Yield and Nitrogen Uptake of Hybrid Seed Maize in Northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(3): 441-452.

[10] 陈路路,孙爱清,李美玲,等.不同发育时期小麦种子活力的变化及其对环境温度的响应[J].应用生态学报,2017,28(11):3610-3618.
CHEN L L, SUN A Q, LI M L, et al. Changes of wheat seed vigor at different development stages and their response to environmental temperature [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(11):3610-3618.

[11] NIU L, LI J, CHEN M S, et al. Determination of oil contents in Sacha inchi (Plukenetia volubilis) seeds at different developmental stages by two methods: Soxhlet extraction and time-domain nuclear magnetic resonance [J]. Industrial Crops and Products, 2014,56:187-190.

[12] 李明静,罗蕊,梁啸天,等.蓖麻饼粕有机肥不同施肥量对花生田土壤养分及酶活性的影响[J].花生学报,2023,52(3):73-83.
LI M J, LUO R, LIANG X T, et al. Effects of Different Application Rates of Castor Meal Organic Fertilizer on Soil Nutrient and Enzyme Activities in Peanut Field[J]. Journal of Peanut Science,2023,52(3):73-83.

[13] 刘兴斌,马宗海,闫治斌,等.不同秸秆发酵还田对制种玉米田土壤肥力质量和玉米品质的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(5):230-241.
LIU X B, MA Z H, YAN Z B, et al. Effects of different fermented straws returning on soil fertility and maize quality in seed maize field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022,40(5):230-241.

[14] 潘艳花,曹立国,薛治军,等.连续施用农业废弃物组合肥制种玉米田理化性质及酶活性和重金属变化特征[J].干旱地区农业研究,2022,40(6):132-146,184.
PAN Y H, CAO L G, XUE Z J, et al. Characteristics of physicochemical properties, enzyme activities and heavy metal changes of seed maize field under continuous application of agricultural waste compost[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022,40(6):132-146,184.

[15] 赵芸晨,秦嘉海,肖占文,等.糠醛渣、沼渣与化肥配施对制种玉米田理化性质和酶活性的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):102-105,111.
ZHAO Y C, QIN J H, XIAO Z W, et al. Effect of Furfural Residue and Biogas Residue with Chemical Fertilizers on Soil Properties and Enzyme Activities[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(3):102-105,111.

[16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.

[17] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[18] 杨少辉,季静,王罡,等.盐胁迫对植物影响的研究进展[J].分子植物育种,2006,4(3):139-142.
YANG S H, JI J, WANG G, et al. Effects of Salt Stress on Plants [J]. Molecular Plant Breeding, 2006,4(3):139-142.

[19] BHAT R, SUJATHA S. Soil fertility and nutrient uptake by arecanut (Areca catechu L.) as affected by level and frequency of fertigation in a laterite soil[J]. Agricultural Water Management, 2009,96(3):445-456.

[20] 李明思,刘洪光,郑旭荣.长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化[J].农业工程学报,2012,28(22):82-87.
LI M S, LIU H G, ZHENG X R. Spatiotemporal variation for soil salinity of field land under long-term mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012,28(22):82-87.

[21] 郭春霞,沈根祥,黄丽华,等.精确滴灌施肥技术对大棚土壤盐渍化和氮磷流失控制的研究[J].农业环境科学学报,2009,28(2):287-291.
GUO C X, SHEN G X, HUANG L H, et al. Control of Soil Salinization and Reduction of N & P Loss with Drip Fertigation in Greenhouse[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009,28(2):287-291.

[22] WANG J W, NIU W Q, GUO L L, et al. Drip irrigation with film mulch improves soil alkaline phosphatase and phosphorus uptake [J]. Agricultural Water Management, 2018,201:258-267.

[23] 张建喜,李广,王钰焕,等.水氮协同对河西走廊青贮玉米土壤氮含量及酶活性的影响[J].中国土壤与肥料,2024(10):16-25.
ZHANG J X, LI G, WANG Y Y, et al. Effects of water and nitrogen synergies on soil nitrogen content and enzyme activity of maize silage in Hexi Corridor[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(10):16-25.

[24] 卢九斤,刘鑫慧,杨林意,等.施磷量对柴达木枸杞产量与品质及土壤酶活性的影响[J].西北农业学报,2020,29(12):1867-1874.
LU J J, LIU X H, YANG L Y, et al. Effect of Phosphorus Application Rate on Yield and Quality of Wolfberry and Soil Enzyme Activity [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020,29(12):1867-1874.