

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21233

不同施磷量对盐渍化土壤玉米磷素吸收及产量的影响

习娟¹, 杨修一^{2*}, 耿计彪^{2*}, 郎莹²

(1. 陕西省渭南市澄城县农业广播电视学校, 陕西 渭南 715200;

2. 临沂大学农林科学学院, 山东 临沂 276005)

摘要: 为探究不同施磷量对盐渍土中玉米磷素吸收及产量的影响, 本研究通过两年田间试验, 研究苏打碱土中不同磷水平 (0、75、150、225、300 kg·hm⁻²) 对玉米磷素吸收转运及生理活性的影响。结果表明, 同一施磷水平下, 2018年各处理产量、生物量、磷积累量及叶片磷素含量较2017年均显著提升。与不施用磷肥处理相比, 2018年各增施磷肥处理显著提高了玉米地上部的磷积累量、叶片磷素的转运量和转运率, 降低了盐渍土中玉米叶片的Na⁺/K⁺值, 磷脂酶D ζ 1活性增加了30.7%~73.7%, 焦磷酸化酶活性增加了71.0%~235.5%, 超氧化物歧化酶活性提高了65.4%~144.5%, 显著提高了玉米不同生长期地上部生物量。2017年各增施磷肥处理较不施用磷肥处理的玉米产量提高了42.5%~85.9%, 2018年各增施磷肥处理较不施用磷肥处理的玉米产量提高了30.6%~79.7%。为缓解松嫩平原苏打碱土盐胁迫、提高玉米生物量和产量, 该区域磷肥施用量建议为225~300 kg·hm⁻²为宜。

关键词: 施磷量; 盐渍土; 磷素吸收; 生长; 产量

我国约有十分之一的土地遭受不同程度的盐渍化, 严重制约作物的生长, 威胁作物产量的稳定^[1]。松嫩平原是世界第三大苏打型碱土集中分布区, 而盐胁迫成为制约该地区作物产量提升的主要因素^[2]。盐胁迫对作物生长产生诸多负面效应^[3]。从生理途径上看, 主要包括质膜透性增大引起的离子外渗、酶活性降低或钝化、代谢受阻等原生盐害效应, 以及因渗透胁迫导致的生长抑制等次生盐害效应^[4]。从植物整个生育期来看, 盐胁迫会在幼苗期内产生紊乱正常渗透性的短期效应, 在快速生长期及收获期内产生离子毒害的长期效应^[5]。面临严峻的土壤盐渍化形势, 如何提升作物抗盐性, 保证作物稳产、高产是松嫩平原农业生产亟待解决的问题。

土壤盐碱化已成为世界上重要的环境问题之

一, 松嫩平原的苏打型碱土中主要的阴离子是CO₃²⁻和HCO₃⁻, 该缓冲体系导致土壤呈现高碱性^[6]。在土壤体系中, 高碱性会使土壤中的磷素更容易固定, 进而造成土壤有效磷含量降低, 磷素利用低下^[7]。磷作为作物生长必需的大量元素之一, 参与作物生长中的细胞代谢、光合磷酸化和三羧酸循环等生理过程^[8]。低磷胁迫对作物生长影响已有广泛的报道, 如限制作物各器官的生物量积累、降低植物叶片的净光合速率、抑制植物同化物的运输、加重叶片膜脂过氧化程度等^[9]。研究表明, 磷肥施用可提高土壤有效磷含量, 促进作物对磷素的吸收, 进而提升作物的抗逆性, 增加作物产量^[10]。但也有研究发现, 磷肥过量施用不仅会降低磷肥当季利用率^[11]、增加面源污染环境负荷等问题^[12], 还影响作物产量和品质, 甚至导致作物减产^[13-14]。因此, 在松嫩平原农业生产中实际面临高盐-低磷复合非生物胁迫, 但目前关于在松嫩平原盐渍化土壤中如何进行合理磷肥运筹的研究报道还相对较少。

本研究连续两年在盐渍化土壤中开展磷肥施用量田间试验, 从磷素吸收、生物量积累、酶活性等角度探究磷肥施用量对盐渍化土壤玉米生长的调控效应, 以期对松嫩平原的玉米高产稳产提供理论依据。

收稿日期: 2021-04-14; 录用日期: 2021-07-07

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2020QC163); 国家自然科学基金(42007091); 山东省高等学校青创人才引育计划(水土流失过程与生态调控)。

作者简介: 习娟(1978-), 农艺师, 大专, 从事植物营养与生理调控方面的研究。E-mail: 444280283@qq.com。

通讯作者: 杨修一, E-mail: woshiyangxiuyi@163.com; 耿计彪, E-mail: gengjibiao@126.com。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于吉林省通榆县八面乡八面村 (123°29' N, 45°06' E), 该地区为温带大陆性季风气候, 年均日照时数 2600 ~ 3000 h, 年均气温 4.9℃。玉米生长期, 自然降水量约为 450 mm, 整个生长季灌溉水量约 1400 m³ · hm⁻²。供试土壤属典型的苏打型碱土, 0 ~ 20 cm 土层的基本理化性质如下: 全盐含量 3.81 g · kg⁻¹, pH 9.11, 有机质 5.28 g · kg⁻¹, 碱解氮 22.82 mg · kg⁻¹, 全氮 0.75 g · kg⁻¹, 有效磷 6.55 mg · kg⁻¹, 速效钾 83.26 · mg kg⁻¹。

1.2 试验设计

本试验采取单因素完全随机区组设计, 设 5 个磷水平 (用量以 P₂O₅ 计, 肥料类型为过磷酸钙): 0、75、150、225、300 kg · hm⁻², 分别用 P₀、P₇₅、P₁₅₀、P₂₂₅、P₃₀₀ 表示。每个处理 3 次重复, 每个小区 40 m²。氮肥 (用量以 N 计, 肥料类型为尿素) 和钾肥 (用量以 K₂O 计, 肥料类型为硫酸钾) 的施用总量分别为 225 和 150 kg · hm⁻²。氮、磷、钾分别于玉米种植前、拔节期和吐丝期按照 1:1:1 比例分 3 次施用。供试玉米品种为华农 101, 种植密度为 60000 株 · hm⁻², 分别于 2017 年 5 月 10 日和 2018 年 5 月 14 日种植, 整个玉米生长期采用常规管理。

1.3 采样及测试方法

分别于玉米拔节期、吐丝期和收获期进行采样, 每小区选取长势均匀一致的植株 8 株, 将每株玉米分为叶、茎、穗 3 个部分, 带回实验室后 105℃ 杀青 20 min, 75℃ 烘干至恒重, 称取生物量。烘干后的各部位经过磨碎、过筛, 用硫酸消煮 - 钒钼黄比色法测定各部位磷含量。叶干样高温灰化后用浓硝酸溶解, 原子火焰分光光度计测定 Na⁺ 和 K⁺ 的浓度。

于吐丝期各处理分别选取长势均匀一致的植株 3 株, 取相同部位叶片, 用液氮冷冻后带回, 保存于 -40℃ 超低温冰箱中, 用苏州科铭生物技术有限公司生产的试剂盒测定磷脂酶 D ζ 1 (PLD ζ 1)、焦磷酸化酶 (AGPase) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性。

于收获期各处理选取 10 m² 进行测产, 折标准水 (14%) 计算最终产量。

1.4 数据分析及计算公式

各部位磷素累积量 (kg · hm⁻²) = 各部位生物量 × 各部位磷浓度;

地上部磷累积量 (kg · hm⁻²) = 叶磷累积量 + 茎磷累积量 + 穗磷累积量;

叶片磷素转运量 (LpTA, mg) = 吐丝期叶片磷素累积量 - 收获期叶片磷素累积量;

叶片磷素转运效率 (LpTE, %) = 叶片磷素转运量 / 吐丝期营养器官磷素累积量 × 100;

磷素转运对穗部的贡献率 (CFE, %) = 叶片磷素转运量 / 收获穗部磷素累积量 × 100。

采用 Excel 2007 进行数据处理并绘图, 所有数据分析一式 3 份。方差分析 (ANOVAs) 和均值分离检验 (Duncan 多重区间, P < 0.05) 使用 SAS 9.2 (SAS Institute, Cary, NC 2010) 进行。

2 结果与分析

2.1 不同施磷量对玉米产量的影响

施磷量与年份对不同处理产量影响差异显著, 在盐渍化土壤中施用磷肥可显著提高玉米产量 (表 1)。在 2017 年, 与 P₀ 处理相比, P₇₅、P₁₅₀、P₂₂₅ 和 P₃₀₀ 处理分别增产 42.5%、70.2%、81.0% 和 85.9%。在 2018 年, 与 P₀ 处理相比, 各施磷处理分别增产 30.6%、57.7%、74.7% 和 79.6%。P₃₀₀ 与 P₂₂₅ 差异不显著, 但显著高于其他施磷处理。

表 1 不同施磷量对玉米产量的影响

处理	(kg · hm ⁻²)	
	2017 年	2018 年
P ₀	4045	4533
P ₇₅	5766	5922
P ₁₅₀	6888	7152
P ₂₂₅	7322	7922
P ₃₀₀	7521	8144
	差异性	
年份 (Y)	<0.0001**	
处理 (T)	<0.0001**	
Y × T	<0.0001**	

注: 同列数值不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

** 表示年份与处理间差异极显著。下同。

2.2 不同施磷量对玉米地上部生物量的影响

在盐渍化土壤中增施磷肥可显著提高玉米不同生长期地上部生物量, 且随施磷量的增加, 地上部生物量呈逐渐上升的趋势 (表 2)。在 2017 年, 与 P₀ 处理相比, 增施磷肥处理生物量在拔节期提高了 41.2% ~ 93.4%, 在吐丝期提高了 29.5% ~ 75.1%,

在收获期提高了31.3% ~ 62.6%。在2018年,与P₀处理相比,增施磷肥处理生物量在拔节期提高了41.4% ~ 101.6%,在吐丝期提高了28.8% ~ 78.5%,在收获期提高了29.9% ~ 61.9%。此外,施磷处理与年份对玉米地上部生物量的影响差异显著。

表2 不同施磷量对玉米地上部生物量的影响 (g)

年份	处理	拔节期	吐丝期	收获期
2017	P ₀	152.6 ± 8.6d	214.3 ± 13.6d	524.3 ± 35.6d
	P ₇₅	215.2 ± 16.3c	277.6 ± 20.1c	688.6 ± 33.2c
	P ₁₅₀	255.4 ± 18.6b	315.5 ± 18.6b	711.9 ± 42.6c
	P ₂₂₅	278.3 ± 10.5ab	355.2 ± 10.2a	789.2 ± 19.3b
	P ₃₀₀	295.2 ± 12.3a	375.2 ± 18.7a	852.3 ± 32.5a
2018	P ₀	166.3 ± 10.1c	221.4 ± 20.1d	556.3 ± 25.1d
	P ₇₅	235.3 ± 19.6b	285.2 ± 15.2c	722.6 ± 26.3c
	P ₁₅₀	308.3 ± 20.1a	333.5 ± 13.3b	813.2 ± 29.3b
	P ₂₂₅	326.8 ± 10.3a	358.6 ± 18.5b	845.6 ± 35.6ab
	P ₃₀₀	335.3 ± 18.5a	395.2 ± 16.3a	900.6 ± 42.6a
差异性				
年份 (Y)		<0.0087**	<0.0032**	<0.0014**
处理 (T)		<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**
Y × T		<0.0045**	<0.0027**	<0.0033**

2.3 不同施磷量对玉米地上部磷积累量的影响

增施磷肥显著提升了盐渍土中玉米地上部的磷积累量。如表3所示,与不施用磷肥处理相比,2017和2018年增施磷肥处理的磷积累量在拔节期提高了26.2% ~ 70.1%,吐丝期提高了32.3% ~ 75.1%,收获期提升效果最大,其提升幅度为42.5% ~ 118.5%。在收获期,P₃₀₀和P₂₂₅地上部磷积累量显著高于其他施磷处理。此外,施磷处理、年份对玉米地上部磷积累量的影响差异显著,但年份与处理之间无显著交互作用。

2.4 不同施磷量对玉米磷素转运的影响

叶片中磷转运量可间接表征作物对磷的利用状况。如表4所示,P₀处理每植株叶片的转运量为53.4 ~ 63.7 mg,在2017和2018年增施磷肥处理随着施磷量的增加叶片磷转运量呈升高的趋势,P₃₀₀处理约为P₀处理的3倍。从叶片磷素的转运率来看,施磷量的增加显著提高了叶片中磷的转运效率,相较于P₀处理,P₃₀₀处理提升了24.9% ~ 23.4%。同时,增施磷肥显著提高了叶

片磷素转运对穗部的贡献率,提升了穗中磷的积累。此外,施磷处理、年份对玉米地上部磷积累量的影响差异显著,但年份与处理之间无显著交互作用。

表3 不同施磷量对玉米地上部磷积累量的影响

		(kg · hm ⁻²)		
年份	处理	拔节期	吐丝期	收获期
2017	P ₀	1.22 ± 0.08d	6.52 ± 0.25d	9.56 ± 0.75c
	P ₇₅	1.55 ± 0.11c	8.63 ± 0.36c	13.22 ± 0.89b
	P ₁₅₀	1.65 ± 0.10bc	9.55 ± 0.56b	15.65 ± 0.82b
	P ₂₂₅	1.79 ± 0.12ab	11.23 ± 0.85a	18.66 ± 1.15a
	P ₃₀₀	1.88 ± 0.13a	12.89 ± 0.26a	20.89 ± 1.26a
2018	P ₀	1.37 ± 0.09c	7.11 ± 0.36c	10.22 ± 0.88c
	P ₇₅	1.73 ± 0.12b	9.65 ± 0.45b	14.56 ± 0.90b
	P ₁₅₀	1.96 ± 0.15b	10.33 ± 0.77b	16.56 ± 0.72b
	P ₂₂₅	2.02 ± 0.18b	13.45 ± 0.74a	19.54 ± 1.14a
	P ₃₀₀	2.33 ± 0.09a	14.09 ± 0.82a	21.33 ± 1.26a
差异性				
年份 (Y)		<0.0342*	<0.0126*	<0.0354*
处理 (T)		<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**
Y × T		0.5634	0.7632	0.6741

注: *表示年份与处理间差异显著。下同。

表4 不同施磷量对玉米叶片磷转运量的影响

年份	处理	叶片磷素 转运量 (mg)	叶片磷素 转运率 (%)	磷素转运 对穗部的贡献率 (%)
2017	P ₀	53.4 ± 7.5e	43.2d	38.4d
	P ₇₅	85.5 ± 5.6d	52.2c	41.2c
	P ₁₅₀	107.3 ± 8.6c	59.4b	44.3c
	P ₂₂₅	141.2 ± 10.2b	66.2a	50.8b
	P ₃₀₀	166.9 ± 15.4a	68.1a	60.2a
2018	P ₀	63.5 ± 4.3d	46.9d	36.8e
	P ₇₅	98.3 ± 8.3c	53.5c	45.3d
	P ₁₅₀	115.2 ± 9.6b	58.4c	52.3c
	P ₂₂₅	165.3 ± 12.3a	64.5b	59.6b
	P ₃₀₀	188.6 ± 18.6a	70.3a	65.3a
差异性				
年份 (Y)		<0.0038**	<0.0432*	<0.0370*
处理 (T)		<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**
Y × T		0.1269	0.3703	0.4284

2.5 不同施磷量对玉米叶片中 Na⁺ 和 K⁺ 含量的影响

叶片中 Na⁺ 和 K⁺ 的含量可以间接表征植株内离子运输动态平衡状况。如表 5 所示, 与 P₀ 处理相比, 2017 和 2018 年增施磷肥处理均降低了玉米叶片中 Na⁺ 的含量, P₁₅₀、P₂₂₅ 和 P₃₀₀ 3 个处理的降幅达显著水平。同时, 各磷肥处理均显著增加了玉米叶片中 K⁺ 的含量。从 Na⁺/K⁺ 值的角度来看, 增施磷肥显著降低了盐渍土中玉米叶片的 Na⁺/K⁺ 值。此外, 施磷处理、年份对玉米地上部磷积累量的影响差异显著, 但年份与处理之间无显著交互作用。

表 5 不同施磷量对玉米叶片 Na⁺ 和 K⁺ 含量的影响

年份	处理	Na ⁺ 含量 (mmol · g ⁻¹)	K ⁺ 含量 (mmol · g ⁻¹)	Na ⁺ /K ⁺ 值
2017	P ₀	1.35 ± 0.09a	0.79 ± 0.03c	1.71a
	P ₇₅	1.26 ± 0.05ab	0.84 ± 0.02b	1.50b
	P ₁₅₀	1.22 ± 0.08b	0.86 ± 0.02b	1.42c
	P ₂₂₅	1.13 ± 0.10bc	0.92 ± 0.04ab	1.23d
	P ₃₀₀	1.08 ± 0.04c	0.95 ± 0.04a	1.14e
2018	P ₀	1.45 ± 0.08a	0.80 ± 0.03c	1.79a
	P ₇₅	1.36 ± 0.11ab	0.87 ± 0.03b	1.60b
	P ₁₅₀	1.28 ± 0.05b	0.88 ± 0.02b	1.45c
	P ₂₂₅	1.24 ± 0.06bc	0.93 ± 0.03ab	1.33d
	P ₃₀₀	1.18 ± 0.07c	0.98 ± 0.05a	1.20e
差异性				
年份 (Y)		<0.0418*	<0.0464*	<0.0495*
处理 (T)		<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**
Y × T		0.7883	0.9033	0.6326

2.6 不同施磷量对玉米叶片酶活性的影响

磷脂酶 Dζ1 (PLDζ1) 和焦磷酸化酶 (AGPase) 是磷代谢的关键限速酶, 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性间接表征玉米受胁迫的程度。如表 6 所示 (2018 年), 与 P₀ 处理相比, 增施磷肥处理的 PLDζ1 活性增加 30.7% ~ 73.7%, AGPase 活性增加了 71.0% ~ 235.5%, SOD 活性提高了 65.4% ~ 144.5%。

表 6 不同施磷量对玉米叶片酶活性的影响 (2018 年)

处理	磷脂酶 Dζ1 (U · mg ⁻¹)	焦磷酸化酶 (U · mg ⁻¹)	超氧化物歧化酶 (U · mg ⁻¹)
P ₀	434.1 ± 24.6d	3.1 ± 0.2d	140.3 ± 16.7e
P ₇₅	567.4 ± 36.8c	5.3 ± 0.6c	232.1 ± 25.9d
P ₁₅₀	601.3 ± 58.1c	8.1 ± 0.5b	274.1 ± 30.1c
P ₂₂₅	678.7 ± 67.2b	9.2 ± 0.6b	300.5 ± 32.5b
P ₃₀₀	754.2 ± 88.6a	10.4 ± 0.5a	343.1 ± 35.3a

3 讨论

3.1 施磷提升盐渍土壤中玉米磷素的吸收和转运能力

盐渍化土壤的磷素含量较低, 土壤内部的沉淀固持效应影响有效磷的含量, 显著降低了土壤磷素的有效性^[15]。高浓度的盐胁迫阻碍了作物根系的发育进而导致磷吸收受限, 降低了磷的生物有效性^[16]。补充外源磷素供给, 是提升作物磷素吸收的重要手段之一^[17]。本研究发现, 与 P₀ 处理相比, 在盐渍土中施用磷肥处理显著提升了玉米地上部的磷积累量, 尤其是收获期, 幅度为 42.5% ~ 118.5%。其原因可能有 3 个方面。第一, 磷肥施用可提升土壤中可利用的磷素含量, 进而保障作物对磷素的吸收^[18]; 其次, 低磷条件下增加磷素的供应会促进作物根系的生长, 进而提升磷的吸收量^[19]; 再次, 增施磷肥处理显著提升了 PLDζ1 和 AGPase 磷代谢关键酶活性, 促进了磷在植株内的同化积累, 进而对磷素的吸收起到拉动效应^[20]。本研究还发现, 增施磷肥增加了玉米叶片转运量和转运率。这可能与增施磷肥提高 PLDζ1 和 AGPase 等磷代谢关键酶活性, 进而提升磷的利用效率有关^[21]。更进一步的生理机制需配合代谢组学等技术手段进一步探究。

3.2 施磷提高盐渍土壤中玉米的抗逆能力

供试土壤的全盐含量为 3.81 g · kg⁻¹, 盐胁迫是作物生长所面临的另一限制因子。本研究发现, 不施用磷肥处理玉米叶片中 Na⁺/K⁺ 值在较高的水平, 这严重影响了作物正常的离子平衡。增施磷肥后, 显著降低了 Na⁺/K⁺ 值, 这可能有以下几方面的原因。其一, 增施磷肥显著提高了 PLDζ1 活性, 进一步抑制 HKT1 的表达, 从而阻止细胞外 Na⁺ 的进入, 进而降低了 Na⁺ 的含量^[21]; 其二, 磷肥施用

在促进作物磷素吸收的同时, 由于磷、钾可协同互作吸收, 从而提升作物对于钾素的吸收^[22], 故增施磷肥可降低玉米叶片中的 Na^+/K^+ 值; 另外, 高盐胁迫会增加氧自由基和丙二醛 (MDA) 的含量, 进而破坏玉米正常的膜透性^[23]。本研究还发现, 增施磷肥显著提高了 SOD 活性, 这也是增施磷肥缓解作物盐胁迫的生理机制之一^[24]。

3.3 施磷增加盐渍土壤中玉米生物量及产量

研究表明, 磷肥施用有利于增加普通非盐碱耕作土壤中的有效磷含量, 促进玉米磷素吸收, 进而提高磷肥利用效率, 对于玉米优质高产意义重大^[25-26], 而松嫩平原苏打碱土中玉米施磷效果的报道相对较少。本研究供试土壤为苏打碱土, 玉米生长面临低磷和高盐的交互胁迫, 不施用磷肥处理玉米地上部生物量和产量均在较低水平。本研究还发现, 增施磷肥提高了盐渍土不同生长期地上部生物量。磷肥施用可提高玉米磷素的积累量和转运能力^[27], 降低盐胁迫^[28], 同时增加 AGPase 活性, 提高光合产物的同化效率, 进而提高整体的生物量的积累^[29]。同时, 盐渍土中增施磷肥提高了磷素转运对穗部的贡献率, 玉米产量提升了 30.6% ~ 85.9%。综合分析施磷量和增产效果, 在苏打碱土中磷肥的施用量可考虑在 225 ~ 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围为宜。

4 结论

在松嫩平原苏打碱土中增施磷肥可显著提高玉米磷的吸收和转运能力, 缓解整体盐胁迫, 增加玉米生物量和产量。建议该区域磷肥的施用量以 225 ~ 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为宜。

参考文献:

- [1] Zhang B, Song X, Zhang Y, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in songnen plain, Northeast China [J]. *Water Research*, 2012, 46 (8): 2737-2748.
- [2] 宋丽茹. 松嫩盐碱化草地土壤功能性纤维素降解菌特性的研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [3] Chen L, Wang R Z. Anatomical and physiological divergences and compensatory effects in two *Leymus chinensis* (Poaceae) ecotypes in Northeast China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 134 (1/2): 46-52.
- [4] 王佳珍, 刘倩, 高妮妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展 [J]. *生态学报*, 2017, 37 (16): 5565-5577.
- [5] 齐琪, 马书荣, 徐维东. 盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展 [J]. *分子植物育种*, 2020, 18 (8): 333-338.
- [6] 殷厚民, 胡建, 王青青, 等. 松嫩平原西部盐碱土旱作改良研究进展与展望 [J]. *土壤通报*, 2017, 48 (1): 236-242.
- [7] 祁彧, 张艳荣, 张弛, 等. 腐殖土与解磷微生物协同改良碱性土壤有效磷的研究 [J]. *太原理工大学学报*, 2020, 51 (5): 90-94.
- [8] Vance C P, Claudia Uhde-Stone, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource [J]. *New Phytologist*, 2010, 157 (3): 423-447.
- [9] 许仙菊, 张永春. 植物耐低磷胁迫的根系适应性机制研究进展 [J]. *江苏农业学报*, 2018, 34 (6): 1425-1429.
- [10] 马清霞, 王朝辉, 惠晓丽, 等. 基于产量和养分含量的旱地小麦施磷量和土壤有效磷优化 [J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (1): 78-90.
- [11] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 915-924.
- [12] Li H, Huang G, Meng Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for corn and environment in China [J]. *A review. Plant and Soil*, 2011, 349: 157-167.
- [13] He P, Li S, Jin J, et al. Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-Central China [J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101: 1489-1496.
- [14] 马琴, 刘小雨, 冉瑾怡, 等. 磷肥减量结合硫酸铵配施提高西北地区旱地春玉米磷素利用效率 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (6): 1047-1058.
- [15] 刘盛林, 孙泽强, 董晓霞, 等. 黄河三角洲盐渍化农田不同轮作方式对土壤理化性质和小麦产量的影响 [J]. *山东农业科学*, 2020, 52 (11): 65-69.
- [16] 王敏强, 吴沛鸿, 沈益康, 等. 盐胁迫下接种丛枝菌根真菌对甜菊生长和氮磷吸收的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24 (5): 960-966.
- [17] 江尚焘, 王火焰, 周健民, 等. 磷肥施用方式及类型对冬小麦产量和磷素吸收的影响 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27 (5): 1503-1510.
- [18] 刘津, 李春越, 邢亚薇, 等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤有机磷组分及小麦产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (1): 161-168.
- [19] 张瑞富, 张玉芹, 杨恒山. 深松措施下磷肥施用深度对春玉米根系特性的影响 [J]. *华北农学报*, 2019, 34 (1): 204-212.
- [20] 樊卫国, 王立新. 供磷水平对组荷尔脐橙幼树磷酸酶活性和磷素吸收利用效率的影响 [J]. *西南农业学报*, 2013, 26 (1): 217-222.
- [21] 吕玮鑫, 周一梦, 雷宵, 等. 水稻磷脂酶 D ζ 1 在盐胁迫反应中的作用 [J]. *植物生理学报*, 2019, 380 (10): 101-107.
- [22] 路慧英, 周怀平, 杨振兴, 等. 长期氮磷化肥和有机肥配施对

- 褐土钾素平衡及不同形态的影响 [J]. 山西农业科学, 2013, 41 (1): 60-65.
- [23] Hossain M D, Inafuku M, Iwasaki H, et al. Differential enzymatic defense mechanisms in leaves and roots of two true mangrove species under long-term salt stress [J]. Aquatic Botany, 2017, 142: 32-40.
- [24] Du C, Zhao P, Zhang H, et al. The Reaumuria trigyna transcription factor RtWRKY1 confers tolerance to salt stress in transgenic Arabidopsis [J]. Journal of Plant Physiology, 2017, 215: 48-58.
- [25] 蔺飞阳, 杜艾芳, 许秀春, 等. 华北地区夏玉米生产中磷素利用特征研究 [J]. 中国农学通报, 2020, 36 (7): 17-21.
- [26] Wu L, Cui Z, Chen X, et al. Change in phosphorus requirement with increasing grain yield for Chinese maize production [J]. Field Crops Research, 2015, 180: 216-220.
- [27] 张连娅, 王瑞雪, 郑毅, 等. 不同形态磷肥对红壤玉米磷素吸收利用效率的影响 [J]. 玉米科学, 2019, 27 (5): 162-167.
- [28] 呼红梅, 王莉. 氮、磷、钾对盐胁迫谷子幼苗形态和生理指标的影响 [J]. 江苏农业科学, 2016, 2 (2): 117-122.
- [29] 王珍, 李久生, 栗岩峰, 等. 磷肥施入方式对土壤速效磷含量及玉米生长的影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36 (10): 1023-1028.

Effects of phosphorus application on phosphorus uptake and yield of maize on saline soil

XI Juan¹; YANG Xiu-yi^{2*}, GENG Ji-biao^{2*}, LANG Ying² (1. Chengcheng Agricultural Radio and Television School, Weinan Shaanxi 715200; 2. College of Agriculture and Forestry Science, Linyi University, Linyi Shandong 276005)

Abstract: In order to explore the effect of phosphorus application rate on phosphorus uptake and yield of maize in saline soil, a 2-year field experiment was conducted to study the effects of different phosphorus levels (0, 75, 150, 225, 300 kg · hm⁻²) on phosphorus absorption, transport and physiological activity of maize in saline soil. Under the same phosphorus application level, the yield, biomass, phosphorus accumulation and leaf phosphorus content of each treatment in 2018 were significantly higher than those in 2017. The results showed that compared with the treatment without phosphorus application in 2018, the application of phosphate fertilizer treatment significantly increased the phosphorus accumulation in maize shoots, increased the phosphorus transport and transport rate in leaves, decreased the Na⁺/K⁺ ratio of maize leaves, meanwhile phospholipase D ζ 1 activity increased by 30.7% ~ 73.7% and pyrophosphorylase activity increased by 71.0% ~ 235.5%, and the activity of superoxide dismutase increased by 65.4% ~ 144.5%, significantly increased the aboveground biomass of maize in different growth periods. In 2017, the maize yield of all phosphorus fertilizer treatments increased by 42.5% ~ 85.9% compared with no phosphorus fertilizer treatment, and in 2018, the maize yield of all phosphorus fertilizer treatments increased by 30.6% ~ 79.7%, compared with no phosphorus fertilizer treatment. In order to alleviate the salt stress of soda alkaline soil in Songnen Plain and improve the biomass and yield of maize, the application rate of phosphate fertilizer in this area can be considered at 225 ~ 300 kg · hm⁻².

Key words: phosphorus application rate; saline soil; phosphorus absorption; growth; yield