

滴灌玉米苗期根系形态对启动磷肥施用位置的响应

冯国瑞, 张新疆, 王祥斌, 潘洪阳, 李元亨, 刘小龙, 危常州

(石河子大学农学院农业资源与环境系, 新疆 石河子 832000)

摘要: 通过模拟试验,研究启动磷肥施用 in 土壤中不同位置对滴灌玉米苗期生长、根系形态发育以及根系与土壤磷养分空间分布的影响,为明确启动磷肥最佳施肥位置及其对滴灌玉米苗期生长的影响提供理论依据。利用根箱设置启动磷肥:(1)模拟滴灌施肥(T1);(2)种子侧方 5 cm、下方 5 cm 穴施(T2);(3)种子侧方 5 cm、下方 12 cm 穴施(T3);(4)不施启动磷肥(CK)4 个处理,根据大田启动磷肥施用量(P_2O_5 30 kg/hm²)设置启动磷肥用量为 P_2O_5 0.2 g/kg 土。分析各处理对玉米苗期生长、根系构型、根系与土壤磷养分分布状况的影响以及评价根系与土壤磷养分空间匹配度。结果表明:在玉米出苗后 14、21 天,施用启动磷肥显著增加了玉米总根长、总表面积、一级侧根和二级侧根数量,总体表现为 T2 最高,T1 和 T3 次之,CK 最低,但玉米初生根根条数和主胚根根长在各施肥处理间无显著差异。出苗后 21 天,土壤速效磷 T1 主要分布于垂直 0—9 cm、水平 0—18 cm 范围内,T2 主要分布于垂直 3—12 cm、水平 0—11 cm 范围内,T3 分布于垂直 11—20 cm、水平 0—11 cm 范围内,根系分布 T1 主要集中于 0—9 cm 的土层中,T2 主要集中于垂直 5—15 cm、水平 0—12 cm 土层中,T3 主要集中于垂直 12—18 cm、水平 0—9 cm 土层中。各施肥处理中根系与土壤磷养分分布的空间匹配程度表现为 T2>T3>T1。玉米出苗后 7 天,各处理间玉米干重和磷养分积累无显著差异,出苗后 14、21 天,启动磷肥处理玉米干重和磷养分积累显著高于 CK,其中 T2 玉米干重和磷养分积累量最大,且显著高于 T1 和 T3,但 T1 和 T3 之间无显著差异。启动磷肥穴施于种子侧下方 5 cm 处对玉米生长表现最佳,主要原因是养分分布位置与根系分布空间最匹配,有利于根系吸收磷素,同时促进了施肥区玉米侧根增生,扩大根系与土壤的接触面积,并增加了玉米的磷吸收量以及生物量。采用滴灌施用启动肥也能起到促进根系生长的作用,但是根系分布较浅。

关键词: 启动磷肥; 施肥位置; 根系形态; 空间匹配; 玉米生长

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0337-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.041

Response of Drip-irrigated Maize Root Morphology to the Applied Position of Starter Phosphate Fertilizer at Seedling Stage

FENG Guorui, ZHANG Xinjiang, WANG Xiangbin, PAN Hongyang,

LI Yuanheng, LIU Xiaolong, WEI Changzhou

(Agricultural College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract: In this study, the effects of different application positions of starter phosphate fertilizer on seedling growth, root morphological development and the spatial matching degree of soil phosphorus nutrients and root system of drip-irrigated maize were studied through the simulation experiment. The purpose of this study was to provide a theoretical basis for clarifying the best application position of starter phosphate fertilizer and its effect on maize seedling growth. Using root box, four starter phosphate fertilizer treatments were set up, which were (1) simulated drip application (T1), (2) starter fertilizer applied at 5 cm horizontally to seed and 5 cm below the seed, by hole application (T2), (3) starter fertilizer applied at 5 cm horizontally to seed and 12 cm below the seed, by hole application (T3) and (4) no starter fertilizer (CK). According to the field starter phosphate fertilizer application amount (P_2O_5 30 kg/hm²), the amount of starter phosphate fertilizer was P_2O_5 0.2 g/kg soil. The effects of different treatments on maize seedling growth, root morphological development, spatial matching degree of soil phosphorus nutrients and root, and evaluation of spatial matching degree of phosphorus nutrients between root and soil were analyzed. The results showed that at 14

收稿日期: 2022-03-07

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201808)

第一作者: 冯国瑞(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事植物营养生理生态研究。E-mail: 1515862294@qq.com

通信作者: 危常州(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事植物营养研究。E-mail: changzhouwei@126.com

and 21 days after maize emergence, the application of starter phosphate fertilizer significantly increased the total root length, total surface area, and the number of primary and secondary lateral roots. The overall performance was the highest in T2, followed by T1 and T3, and the lowest in CK. But there was no significant difference in the number of maize primary roots and main radicle root length among the treatments. At 21 days after maize emergence, the soil available phosphorus mainly distributed in the range of 0—9 cm vertically and 0—18 cm horizontally in T1, in the range of 3—12 cm vertically and 0—11 cm horizontally in T2 treatment, and in the range of 11—20 cm vertically and 0—11 cm horizontally in T3 treatment. The root was mainly concentrated in the 0—9 cm soil layer in T1, and in the soil layer of 5—15 cm vertically and 0—12 cm horizontally in T2 treatment, and in the soil layer of 12—18 cm vertically and 0—9 cm horizontally in T3 treatment. The spatial matching degree of root and soil phosphorus nutrient distribution was $T2 > T3 > T1$. At 7 days after maize emergence, there was no significant difference in the dry weight and phosphorus nutrient accumulation of maize among the four treatments. At 14 and 21 days after maize emergence, the dry weight and phosphorus nutrient accumulation of maize in the treatments with starter phosphorous fertilizer were significantly higher than those of CK, and the dry weight and phosphorus uptake of T2 were the highest and significantly higher than those of T1 and T3, but there was no significant difference between T1 and T3. Applying starter phosphate fertilizer at 5 cm below the seed showed the best effect on maize growth. The main reason was that phosphorus nutrient distribution was best fit the root distribution pattern in soil, this was benefit for root absorption of phosphorus. At the same time, it promoted the proliferation of maize lateral roots in fertilizer application area, expanded the contact area between the root and the soil, and increased the phosphorus absorption and biomass of maize. The application of starter fertilizer by drip irrigation could also promote root growth, however, the root distribution was shallow.

Keywords: starting phosphate fertilizer; fertilization position; root morphology; spatial matching; maize growth

磷素是作物生长发育的必需营养元素之一^[1]。由于磷在土壤中的移动性差,极易被土壤固定,加之施用方式不合理,导致磷肥利用率不高^[2],提高磷肥在土壤中的生物有效性是当前农业生产面临的巨大挑战。在玉米生长过程中磷养分临界期在苗期,此阶段玉米对磷养分十分敏感。我国新疆地区早春季节温度低,土壤湿冷,玉米根系生长和磷养分吸收被抑制,使玉米在苗期更容易出现磷养分不足的情况。在国外通常利用启动肥来提高磷在土壤中的生物有效性,以满足苗期玉米对磷养分的需求。所谓启动肥是指在作物播种时集中施用种子附近的少量肥料,施用方式通常为条施,施肥位置在种子的侧面下方,距离种子水平和下部垂直距离间隔约 5 cm^[3]。大量研究^[4-6]表明,施用启动肥可以显著提高作物产量,同时也有研究^[7-8]认为,施用启动肥主要是通过促进作物苗期生长发育,使其具有发达的根系系统,起到促苗壮苗作用,增强作物后续自主吸收养分的能力,最终使产量增加。在新疆地区,启动肥通常是通过滴灌系统施入土壤,由于磷在土壤中的移动性弱,滴灌施磷通常磷肥集中在土壤表层 0—10 cm 的土层中^[9]。此外,目前玉米品种的根系为大多呈现为“横向紧缩,纵向延伸”^[10],具有高吸收活力的根系主要分布在 5—

20 cm 土层^[11-12]。这就使得滴灌施入土壤的磷养分分布位置与根系分布在空间位置不一致,这种差异可能导致启动肥达不到预想的效果。根系作为养分和水分主要的吸收器官,在发育过程中具有高度的可塑性,而磷肥施用位置对根系的生长和分布具有重要的调控作用,可以促使作物形成良好的根系构型,改变根系在土壤中的空间分布^[13],使其充分发挥生物学潜力,提高磷养分利用率。为此,本研究设计启动磷肥在土壤中不同深度的试验,探究启动磷肥施用在不同位置对玉米苗期养分吸收、根系构型以及土壤磷养分分布与根系分布空间匹配的影响,为正确施用启动肥、玉米高效施肥提供理论参考。

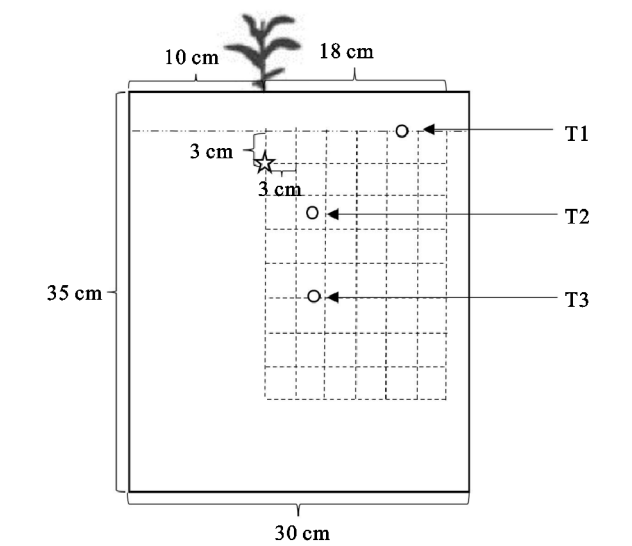
1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2021 年 5 月 2 日在石河子大学试验站日光温室(86°03'27"E,44°18'25"N)进行。供试玉米品种为“新玉 65”(Zea Mays L.),供试土壤取自石河子大学实验站耕层土,土壤类型为灌耕灰漠土。土壤基本理化性质为有机质含量为 18.0 g/kg,碱解氮含量为 57.7 mg/kg,速效磷含量为 15.3 mg/kg,速效钾含量为 186.1 mg/kg,pH 为 8.1。土壤速效磷的标准误差为 0.23 mg/kg。

1.2 试验设计

采用根箱(长、宽、高分别为 30,4,35 cm)种植玉米,设置启动磷肥 4 种施肥位置处理,分别是启动磷肥土壤表层滴施(T1)、种子侧方 5 cm、下方 5 cm 穴施(T2)、种子侧方 5 cm、下方 12 cm 穴施(T3)和不施启动磷肥(CK),每个处理预设 12 个根箱供后续指标取样,根据大田启动磷肥施用量(P_2O_5 30 kg/ hm^2)设置所有启动磷肥处理用量均为 P_2O_5 0.2 g/kg 土壤。将种子播种于距离根箱一侧 10 cm 处,播种深度为 3 cm。将供试土壤风干后过 3 mm 筛进行装盆,根箱装土重量 4.6 kg,土壤容重为 1.2 g/ cm^3 ,为保证整个根箱恒有衡定的土壤容重和均匀的孔隙度,装土时每 50 mm 土层为 1 层(基本单元),用平面锥子反复对每一土层进行压实,排除不同土层接触界面的空气。根箱装土后分 3 次灌水,待土壤自然落干至土壤含水量为田间持水量的 60%开始进行播种和施肥操作。T1 处理所有磷肥于播种后一次性用医用输液器模拟滴灌系统,将启动肥溶解于 80 mL 水中滴施到土壤表层距离玉米位置 15 cm 处,T2 和 T3 处理根据播种位置在根箱侧面打孔将肥料一次性施用到设计位置,施肥完成回填土壤,用密封胶密封,并滴灌与 CK 处理相同量的水。所有处理保持相同灌水量和灌水频率,每 3 天进行 1 次灌水。具体玉米播种和施肥位置见图 1。



注:☆种子;○施肥点,每个小方格的长宽均为 3 cm。下同。

图 1 启动磷肥施用位置和取样示意

1.3 指标测试及分析方法

根系形态与生物量的测定:分别于玉米出苗后 7,14,21 天选择长势均匀的 3 盆玉米,打开根箱一侧,用低压水枪缓慢冲洗玉米根系,洗去根系表面的土壤,将根系放置于盛有水的盘子中,把每条根系小心的均匀分散开来,再通过人工计数法测定一级侧根和二级侧根数后,将根系样品用 Epson Perfection

4870 Photo 扫描,使用 Win RHIZO 2016 根系分析系统测定玉米根系长度和表面积。最后将植株分为地上部和地下部于 105 ℃杀青 30 min 后,在 75 ℃烘干至恒重,称其干重。

植株磷养分测定:将烘干的植株样品粉碎处理后,通过浓 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,用钒钼黄比色法^[14]测定各部位磷含量。

土壤中有有效磷和根系空间分布:于玉米出苗后 21 天取 3 盆根箱分别进行土壤和根系取样分析。沿播种点垂直位置按照长×宽为 3 cm×3 cm 的微区网格进行土壤和根系分割取样,具体取样见图 1。人工挑出每个微区土块中的所有根系,利用游标卡尺人工测量每个微区土块中根系总长度并计算根长密度。挑出根系的微区土壤风干后,过 1 mm 筛,用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提测定土壤速效磷含量。将测定所得的根长密度和磷含量数据进行以 e 为底取对数进行降维处理,以利于通过图表呈现。

玉米根系与土壤磷有效性匹配关系判断:为研究启动磷肥施肥位置引起的土壤速效磷分布的差异是否对根系的分布产生影响,采用以下逻辑判断分析有效磷分布与根系分布匹配程度。具体做法是对土壤的每个微区(3 cm×3 cm)根长与有效磷含量进行逻辑判断,以 CK 为基准,各处理任一微区土壤速效磷与 CK 对应位置速效磷含量进行差减,结果为正、负 2 种,同步对该位置根长密度进行相同的操作,结果也为正、负 2 种。如土壤速效磷差值为正且根长差值为正,表明磷肥促进了根系的生长;土壤速效磷差值为正而根长为负,表明磷肥未促进根系的生长;如土壤速效磷差值为负且根长为正,表明玉米根系有补偿性生长;如土壤速效磷差值为负且根长为负,表明低磷营养限制了根系的生长,另外加 2 种无根系情况,高磷无根系和低磷无根系。将 6 种情况用不同数字记录,并采用 Origin 2019 软件进行空间分布分析。若高磷高根长微区方格数相同,则根据该区域中的根长密度进行判断。

将土壤速效磷含量大于 15.3 mg/kg(不施启动肥处理的有效磷平均含量)的土壤空间界定为肥区,其余位置土壤界定为无肥区,本文“肥区”是指磷肥施肥后通过养分扩散到达的区域,并计算肥区对应根系根长密度,用以表征根系与土壤磷养分分布的空间匹配程度。

1.4 数据分析

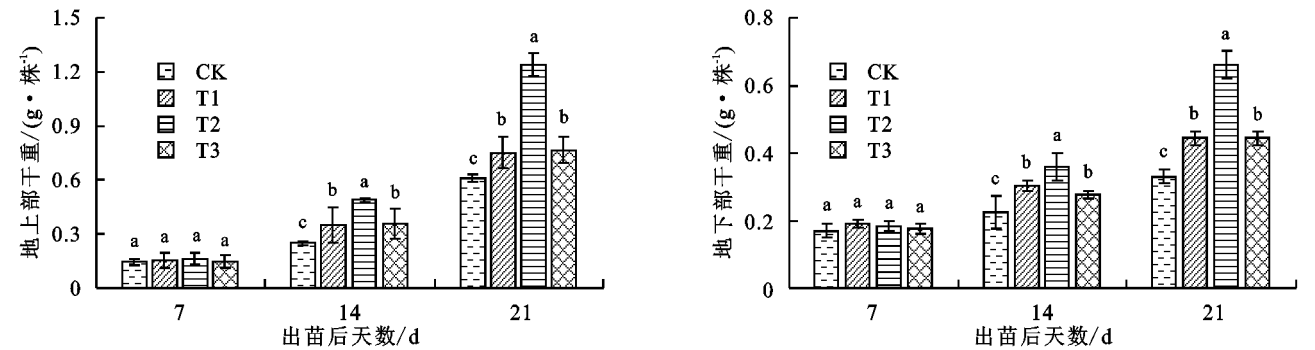
试验数据采用 Excel 2016 和 SPSS 21.0 软件对数据进行处理和分析,采用 Origin 2019 软件对土壤有效磷含量、玉米根系空间分布、玉米根系长度与土壤速效磷含量匹配程度进行空间插值分析。

2 结果与分析

2.1 启动磷肥不同施用位置对苗期玉米生长的影响

由图 2 可知,出苗后 7 天,玉米地上部和地下部干重在 4 个处理间无显著差异。出苗后 14 天,施用启动磷肥处理地上部和地下部干重显著高于 CK 处理,T2 处理地上部和地下部干重最高,T1 和 T3 处

理次之,CK 处理最低,T1 和 T3 处理之间无显著差异。出苗后 21 天,各处理间的变化趋势与出苗后 14 天的变化趋势一致,但 T2 处理的增幅明显大于其他处理,与 CK、T1 和 T3 处理相比,地上部干重增幅分别为 54.9%,37.8%,35.0%,地下部干重增幅分别为 87.5%,42.9%,20.0%。



注:图柱上方不同小写字母表示相同时期不同处理间差异达 0.05 显著水平。下同。

图 2 启动磷肥不同施用位置对苗期玉米干重的影响

2.2 启动磷肥不同施用位置对苗期玉米磷积累量的影响

由图 3 可知,启动磷肥不同施用位置对苗期玉米地上部与地下部磷养分的积累变化趋势基本一致。出苗后 7 天,玉米地上部与地下部磷养分积累量在 4 个处理之间无显著差异。出苗后 14 天,T2 处理玉米

地上部磷养分积累量最高,显著高于 T1、T3 和 CK 处理,但是 T1 和 T3 处理之间无显著差异,地下部磷养分积累量表现为施用启动磷肥处理显著高于 CK 处理,且各施肥处理之间无显著差异。出苗后 21 天,玉米地上部与地下部磷养分积累量均表现为 T2 处理最高,T1 和 T3 处理次之,CK 处理最低。

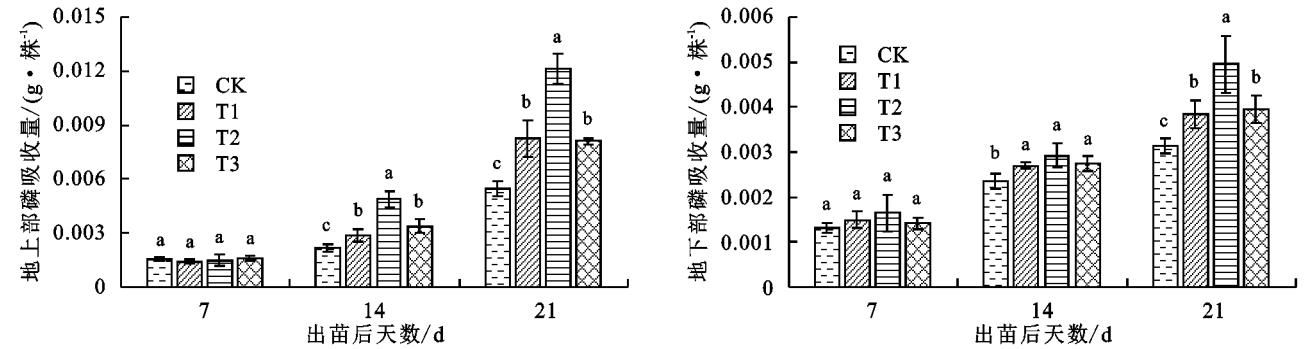


图 3 启动磷肥不同施用位置对苗期玉米地上部和地下部磷养分吸收的影响

2.3 启动磷肥不同施用位置对玉米根系形态的影响

启动磷肥不同施用位置下玉米苗期根系形态差异见表 1。出苗后 7 天,一级侧根数表现为 T1、T2 处理显著高于 CK 和 T3 处理,但其他根系指标在各处理间均未表现出显著差异。出苗后 14 天,玉米初生根根条数和主胚根根长均表现为施用启动磷肥处理显著高于 CK 处理,但各施用启动磷肥处理之间无显著差异,与 CK 处理相比,施用启动磷肥处理初生根根条数和主胚根根长分别增加 21.2%~27.3%和 14.7%~26.3%。对于根表面积、总根长、一级侧根数、二级侧根数以及侧根长均表现为 T2 处理最高,T1 和 T3 处理次之,CK 处理最低,且达到显著差异。出苗后 21 天,各处理之间的变化趋势与出苗后 14 天的变化趋势一致,但是一级侧根数几乎不在增长,而

二级侧根数在快速增加,并且 T2 处理的增加量最大,达到了 462.7 条。综上,启动磷肥不同施用位置对玉米苗期初生根根条数和主胚根根长的影响并不明显,根系表面积和总根长的增加主要是由于侧根的增生所造成的,并且 T2 处理效果最优。

2.4 启动磷肥不同施用位置对土壤速效磷分布的影响

启动磷肥不同施用位置对磷在土壤中的分布有较大影响。由图 4 可知,T1 处理速效磷主要集中在土壤表层,施肥点土壤速效磷含量最高达到 1 015.08 mg/kg,随着离施肥点的距离增加,土壤速效磷含量逐渐降低,土壤速效磷主要分布于垂直 0—9 cm、水平 0—18 cm 范围内,在垂直方向上磷肥的迁移距离约为 9 cm,在水平方向上磷肥的迁移距离约为 12 cm。

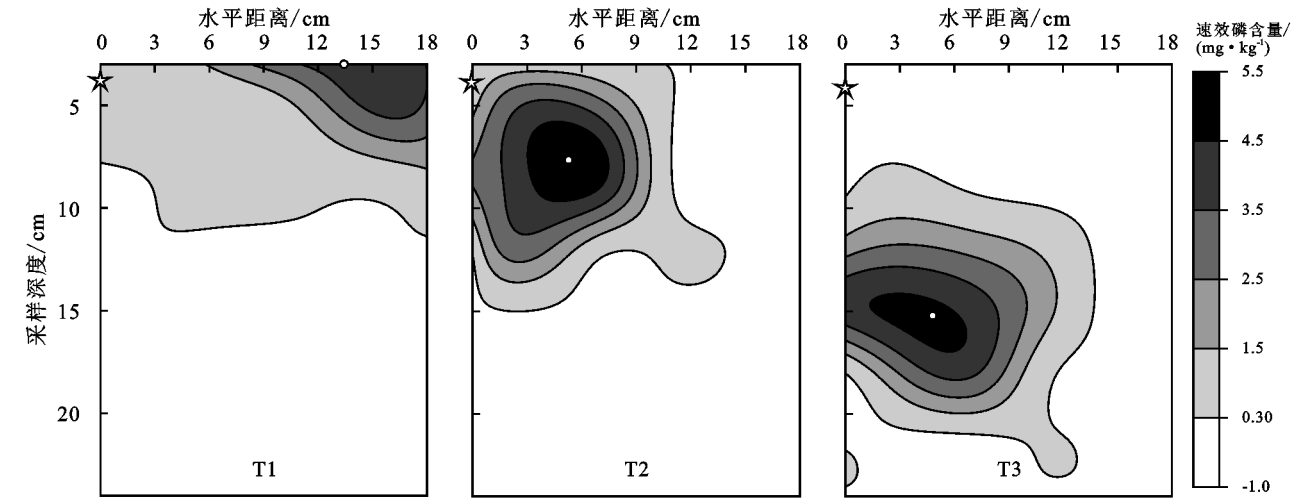
T2 处理土壤中速效磷更为集中,在施肥点处高达 1 428.23 mg/kg,施肥点处速效磷含量较 T1 处理提高 40.7%,土壤速效磷主要分布于垂直 3—12 cm、水平 0—11 cm 范围内,在垂直方向上的迁移距离约为 6 cm,在水平方向上磷肥的迁移距离约为 6 cm。T3

处理施肥点处土壤速效磷最高达到了 1 774.37 mg/kg,分布于垂直 11—20 cm、水平 0—11 cm 范围内,在水平和垂直方向上迁移距离约为 6 cm。由此可见,启动磷肥穴施使得磷素在土壤中更加集中,但迁移距离明显小于启动磷肥滴施。

表 1 启动磷肥不同施用位置对玉米苗期根系形态的影响

时间/d	处理	初生根根条数/ (条·株 ⁻¹)	主胚根 根长/cm	一级侧根数/ (条·株 ⁻¹)	二级侧根数/ (条·株 ⁻¹)	侧根长/ cm	根表 面积/cm ²	总根长/ cm
7	CK	8.6a	31.67a	401.0b	—	864.79a	147.18a	994.29a
	T1	9.3a	33.50a	688.0a	—	885.11a	155.32a	1056.05a
	T2	10.3a	33.00a	687.5a	—	867.81a	165.61a	1068.31a
	T3	8.8a	31.33a	426.0b	—	873.14a	165.63a	897.81a
14	CK	11.0b	36.67b	487.7c	546.3c	1847.80c	297.28c	2113.64c
	T1	13.7a	45.00a	769.3b	844.7b	2491.02b	349.22b	2770.02b
	T2	14.0a	46.33a	980.0a	1046.3a	2905.54a	402.51a	3225.50a
	T3	13.3a	42.07a	712.3b	748.0b	2404.58b	332.70b	2676.45b
21	CK	12.3b	40.67b	569.0c	691.0c	2016.99c	358.15c	2343.45c
	T1	15.6a	48.33a	776.3b	1103.4b	2785.18b	454.90b	3241.85b
	T2	16.3a	48.67a	1084.0a	1509.0a	3321.95a	524.06a	3865.95a
	T3	15.5a	45.67a	732.3b	1056.3b	2731.91b	434.32b	3205.11b

注:同一生育期同列不同字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。



注:图中有效磷含量为实测值的自然对数,并且数据为该处理与 CK 对应位置有效磷相减所得;☆种子;○施肥点。下同。

图 4 启动磷肥不同施用位置对土壤速效磷空间分布的影响

2.5 启动磷肥不同施用位置对根系分布的影响

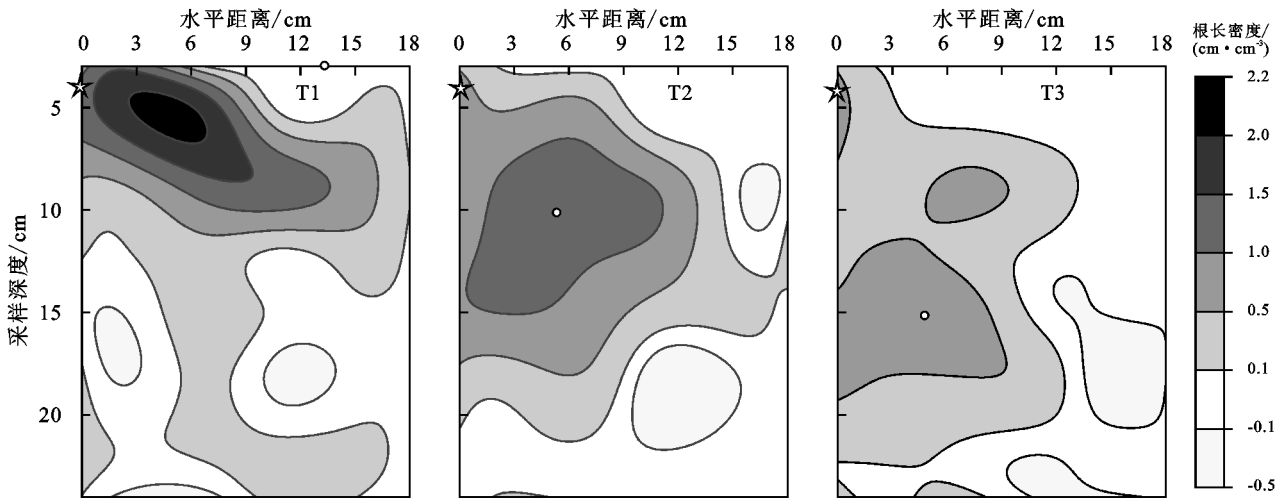
由图 5 可知,启动磷肥不同施用位置对玉米苗期根系分布有明显影响,施肥点的位置直接影响了根系在土壤中集中分布的位置,在施肥点附近根长密度显著高于其他位置,但是在一些远离施肥点的位置,根长密度小于 CK 处理。T1 处理施肥点在土壤表层,而根系主要集中在 0—9 cm 的上层土壤中。T2 处理施肥点的位置深于 T1 处理,根系分布位置较 T1 有明显的下移,主要集中在水平 0—12 cm、垂直 5—15 cm 处。T3 处理施肥点最深,根系分布位置也明显深于 T1 和 T2 处理,主要集中在水平 0—9 cm、垂直 12—18 cm 处。

2.6 土壤磷养分分布与根系分布空间匹配度

为研究启动肥施肥位置以及由此带来的土壤

速效磷分布的差异是否对根系的分布产生影响,采用逻辑判断进行分析有效磷分布与根系分布匹配程度。由图 6 和图 7 可知,玉米根系总是在施肥点附近根系大量增生。T2 处理,在施肥点附近均为高磷且高根长类型,且高磷高根长区域中的根长密度达到了 2.31 cm/cm³,经逻辑判断有 15 个微区方格属于这种类型。T3 处理同样在施肥点附近为高磷且高根长类型,微区方格数为 15 个,且该区域中的根长密度达到了 1.78 cm³。但是其分布位置较深。对于 T1 处理而言,其施肥位点距离玉米根系最远,且肥料施在土壤的表层,磷素需通过扩散作用侧向到达玉米根系分布的区域,相应的玉米根系分布较浅,在施肥点周围无根系存在,但符合高磷高根长类型的

微区方格数达到了 14 个,该区域中的根长密度达到了 1.64 cm/cm^3 。此外,所有处理中高磷低根长的分布均未出现。总体来看,土壤磷养分与根系分布空间匹配度表现为 $T2>T3>T1$ 。



注:图中的数据为该处理与 CK 对应位置根长密度相减所得。

图 5 启动磷肥不同施用位置对根系空间分布的影响

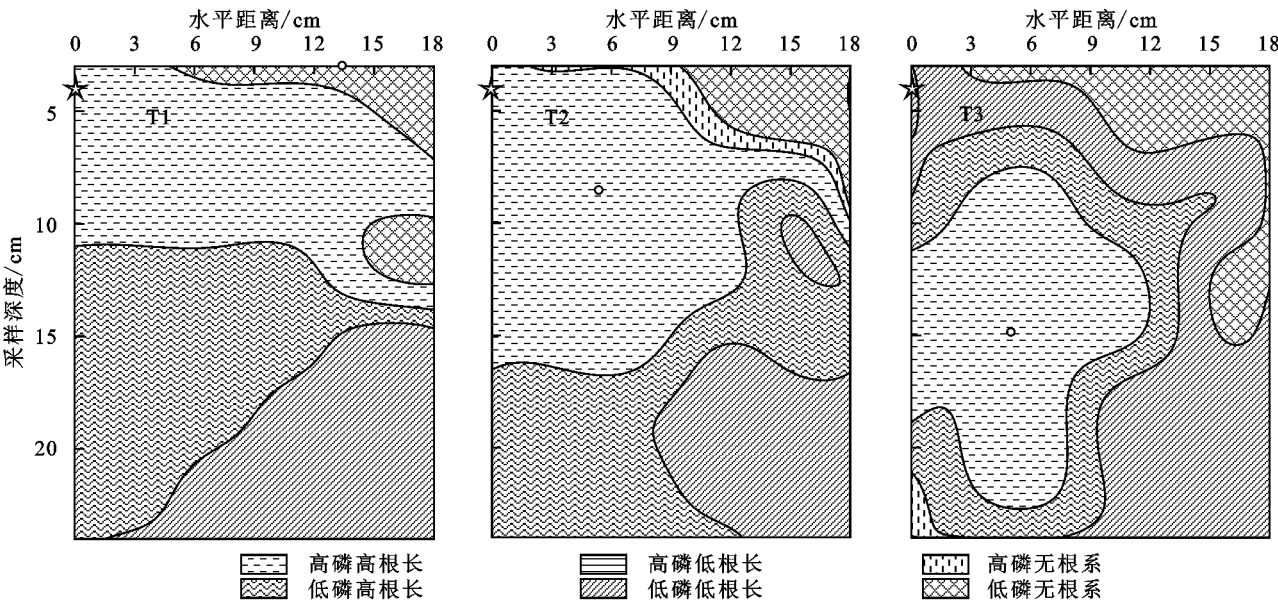
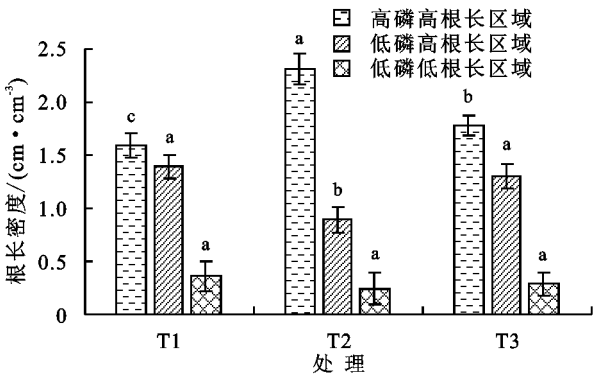


图 6 启动磷肥不同施用位置对土壤磷养分与根系空间匹配



注:柱上不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。

图 7 启动磷肥不同施用位置对各区根长密度的影响

3 讨论

磷是影响玉米生长发育的重要元素,磷肥施用位置影响着土壤磷素供应状态,对促进玉米养分吸收和苗期生长具有重要作用^[15]。根层局部养分调控可以

优化植物—土壤系统中的根区养分输入,最大限度地提高根系对养分的获取效率^[16]。本研究结果显示,施用启动磷肥显著促进了苗期玉米的生长发育,并且启动磷肥穴施于种子侧方 5 cm、下方 5 cm 处的效果最优(图 2、图 3)。其主要是通过调控玉米根系的生长发育,扩大根系与土壤的接触面积,增加根系对磷养分的吸收,以满足苗期玉米对磷养分的需求,促进玉米的生长发育。

植物根系具有可塑性^[17-18],根系与土壤的接触面积是影响磷养分吸收的主要因素^[19]。本研究中,通过调整启动磷肥施用位置使土壤不同空间位置形成局部高浓度的磷养分“斑块”诱导根系生长,促进总根长和总表面积的增加,提高根系对磷养分的吸收能力,此结果与范秀艳等^[20]的研究一致。通过对根系进一步分析发现,施用启动磷肥显著促进了根系一级

侧根、二级侧根数量以及侧根长度的增加(表 1),并且启动磷肥穴施于种子侧方 5 cm、下方 5 cm 处侧根数和侧根长都显著高于其他施肥处理,根系表面积和总根长的增加主要是启动磷肥促进了施肥点附近侧根数量和长度增加所造成的。此外,侧根作为养分和水分的主要吸收部位^[21-22],其数量和长度增加会显著提高根系对养分的吸收能力,促进玉米生长发育。

作物根系吸收的磷养分主要是通过与其根际及其周围土壤直接接触所获得^[23],所以根系吸收磷养分的能力一方面取决于根系的数量和表面积;另一方面也取决于根系向高浓度养分区域发展的能力^[24-25]。因此启动肥施肥位置与根系密集区域相匹配是启动磷肥发挥最大效用的前提。T2 处理的高磷高根长区域为 15 个方格,且肥区根长密度最大达到了 2.31 cm/cm³,土壤磷养分与根系分布的空间匹配度显著高于其他施肥处理(图 6 和图 7)。造成这一现象的主要原因是磷在土壤中的移动性差,施肥位点不同则磷素在土壤不同位置形成高磷斑块(图 4),造成磷养分“斑块”的分布位置与根系分布位置不一致。将启动磷肥施用于种子侧方 5 cm、下方 5 cm,距离种子较近,种子萌发以后新生根系可以及时感受到磷养分“斑块”的刺激,诱导根系在施肥点附近大量增生(图 5),提高根系与磷养分分布的空间匹配度,并在养分富集区根系的吸收速率会大幅增加,一般会提高 2~3 倍^[26]。本研究还发现,启动磷肥处理中还存在一些低磷但高根系密度分布的区域(图 6),可能是玉米获得充足的磷素供应促进了新根系的生长所致。

水肥一体化是目前认为提高水分和养分资源利用效率最高手段^[27]。本研究结果显示,与 CK 相比,启动磷肥滴施仍可以显著促进玉米苗期生长,主要是因为滴灌不仅使磷养分集中分布于 0—10 cm 土层,同时也诱导根系分布于土壤表层,磷养分依然可以被分布于表层的根系吸收利用,同时也缩短了根系接触到磷肥的时间,并且滴灌法施用启动磷肥其高磷高根长区域与 T2、T3 差别不大(图 6),因此滴灌法施用启动肥也是可行的。关于滴灌施肥的研究发现,将滴灌带适当埋深后可以使水分和肥料养分的位置适当下移,增加在土壤中的所处深度,提高与根系的空间匹配度^[28]。此外,通过对水磷一体化研究发现,磷肥随水施用过程中磷的扩散与土壤水移动方向一致,使施入的磷在土壤中分布较均匀,并且与条施、穴施相比有增加其移动性^[29],该结果与本研究结果相似(图 4)。因此浅埋滴灌带是解决滴灌磷肥土壤有效磷与根系分布空间不匹配的较优手段。

4 结论

滴灌条件下,玉米施用启动磷肥可以起到良好的促苗壮苗作用,且将启动磷肥穴施于种子侧方 5 cm、下方 5 cm 处可以充分发挥玉米根系生物学潜力。其主要机制是诱导玉米侧根大量增生,增加玉米细根的比例,同时增加了高磷区域中的根长密度,提高了根系与土壤磷养分的空间匹配度,进而增加玉米对磷养分的吸收,最终促进玉米苗期生长,为玉米生育后期的生长发育以及增产奠定基础。采用滴灌施用启动肥也能起到促进根系生长的作用,但是根系分布较浅,建议浅埋滴灌带后施用启动肥。

参考文献:

- [1] Wissuwa M. How do plants achieve tolerance to phosphorus deficiency? Small causes with big effects [J]. *Plant Physiology*, 2003, 133(4): 1947-1958.
- [2] 周宝元,王新兵,王志敏,等.不同耕作方式下缓释肥对夏玉米产量及氮素利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 821-829.
- [3] 米国华,伍大利,陈延玲,等.东北玉米化肥减施增效技术途径探讨[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(14): 2758-2770.
- [4] 李前,陈延玲,陈晓超,等.基肥、种肥施用技术对东北春玉米苗期生长及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(1): 147-152.
- [5] 张皓禹,孟超然,张凤麟,等.新疆北疆地区磷肥不同基追比例对滴灌玉米养分吸收和产量的影响[J]. *玉米科学*, 2021, 29(1): 138-145.
- [6] 张少民,白灯莎·买买提艾力,刘盛林,等.根际启动肥能够提高棉花磷效率和产量[J]. *棉花学报*, 2020, 32(2): 121-132.
- [7] 李青军,张炎,胡伟,等.滴灌磷钾肥基追比对滴灌玉米干物质积累、产量及养分吸收的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(6): 74-80.
- [8] 吕小凡,赵海蓓,白如霄,等.施用启动肥对土壤特性、玉米生长及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(1): 240-246.
- [9] 杨国江,彭懿,尹飞虎,等.滴灌磷肥在灰漠土中运移的研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(6): 138-146.
- [10] 张玉芹,杨恒山,高聚林,等.超高产春玉米的根系特征[J]. *作物学报*, 2011, 37(4): 735-743.
- [11] 邹海洋,张富仓,张雨新,等.适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 145-155.
- [12] 张玉芹,杨恒山,张瑞富,等.不同栽培模式下春玉米根系时空分布及生理特性研究[J]. *华北农学报*, 2014, 29(1): 122-128.
- [13] 陈晓影,刘鹏,程乙,等.基于磷肥施用深度的夏玉米根层调控提高土壤氮素吸收利用[J]. *作物学报*, 2020, 46(2): 238-248.

[21] 夏梦洁.黄土高原旱地残留肥料氮及夏季休闲期间的去向[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.

[22] 陆晓松,于东升,徐志超,等.土壤肥力质量与施氮量对小麦氮肥利用效率的综合定量关系研究[J].土壤学报,2019,56(2):487-494.

[23] 张怀志,唐继伟,袁硕,等.化肥减施对日光温室越冬长茬番茄氮肥利用率及去向的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(7):1295-1302.

[24] Zhong Y M, Wang X P, Yang J P, et al. Tracing the fate of nitrogen with ¹⁵N isotope considering suitable fertilizer rate related to yield and environment impacts in paddy field [J]. Paddy and Water Environment, 2017,15(4):943-949.

[25] 吴永成,王志敏,周顺利.¹⁵N 标记和土柱模拟的夏玉米氮肥利用特性研究[J].中国农业科学,2011,44(12):2446-2453.

[26] 戴良香,张智猛,张冠初,等.氮肥用量对花生氮素吸收与分配的影响[J].核农学报,2020,34(2):370-375.

[27] Shi Z L, Jing Q, Cai J, et al. The fates of ¹⁵N fertilizer in relation to root distributions of winter wheat under different N splits [J].European Journal of Agronomy, 2012,40:86-93.

[28] 朱宝国,韩旭东,张春峰,等.氮肥深追可提高玉米¹⁵N 的吸收、分配及利用[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1696-1700.

[29] 李鹏程,郑苍松,孙森,等.利用¹⁵N 示踪研究不同肥力土壤棉花氮肥减施的产量与环境效应[J].植物营养与肥料学报,2017,23(5):1199-1206.

(上接第 343 页)

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

[15] 杨云马,孙彦铭,贾良良,等.磷肥施用深度对夏玉米产量及根系分布的影响[J].中国农业科学,2018,51(8):1518-1526.

[16] Zhang F S, Shen J B, Jing J Y, et al. Rhizosphere processes and management for improving nutrient use efficiency and crop productivity [J]. Advances in Agronomy,2010,107:1-32.

[17] 张德闪,李洪波,申建波.集约化互作体系植物根系高效获取土壤养分的策略与机制[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1547-1555.

[18] Li H B, Ma Q H, Li H G, et al. Root morphological responses to localized nutrient supply differ among crop species with contrasting root traits [J].Plant and Soil,2014,376:151-163.

[19] Shen J B, Yuan L X, Zhang J L, et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant [J].Plant Physiology,2011,156(3):997-1005.

[20] 范秀艳,杨恒山,高聚林,等.超高产栽培下磷肥运筹对春玉米根系特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):562-570.

[21] Bardgett R D, Mommer L, Vries F. Going underground: Root traits as drivers of ecosystem processes [J].Trends in Ecology and Evolution,2014,29(12):692-699.

[22] Reich P B, Cornelissen H. The world-wide ‘fast-slow’ plant economics spectrum: A traits manifesto [J]. Journal of Ecology,2014,102(2):275-301.

[23] 杨建昌.水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系[J].中国农业科学,2011,44(1):36-46.

[24] 尹飞,王俊忠,孙笑梅,等.夏玉米根系与土壤硝态氮空间分布吻合度对水氮处理的响应[J].中国农业科学,2017,50(11):2166-2178.

[25] 张瑞富,杨恒山,范秀艳,等.施磷深度和深松对春玉米磷素吸收与利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):880-887.

[26] Einsmann J C, Jones R H, Pu M, et al. Nutrient foraging traits in 10 co-occurring plant species of contrasting life forms [J].Journal of Ecology,1999,87:609-619.

[27] 路永莉,白风华,杨宪龙,等.水肥一体化技术对不同生态区果园苹果生产的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(11):1281-1288.

[28] 杜一超,蔡耀辉,张林,等.葡萄分层地下滴灌滴头布设深度优化[J].排灌机械工程学报,2021,39(6):615-621.

[29] 王静,叶壮,褚贵新.水磷一体化对磷素有效性及磷肥利用率的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(11):1377-1383.