

磷肥施用方式对夏玉米根系形态、 磷素吸收及产量的影响

阮毅好¹, 窦航宇², 杜明雪¹, 孙 为¹, 张颖蕾¹, 朱一鸣¹,
王淑兰¹, 王 浩¹, 杨青华¹

(1. 河南农业大学, 郑州 450046; 2. 河南省黄泛区实业集团有限公司, 河南 周口 466000)

摘 要: 为研究磷肥施用方式对夏玉米根系形态、磷素吸收及产量的影响, 在河南原阳和许昌开展田间试验, 以郑单 958 为试验材料, 在施磷量 75 kg/hm² 下设置撒施(SP)、分层施(LP)、条施(BP)和穴施(HP) 4 个处理。结果表明, 不同磷肥施用方式下, 相较 SP 处理, 两个试验点 LP、HP 处理显著提高根系干重、根长、根表面积和根体积。磷素吸收量 LP、HP 处理较 SP 处理在各个生育时期均有所提高, 磷素转运量表现为 HP>LP>BP>SP, 磷素吸收效率在两个试验点 LP、HP 处理较 SP 处理分别提高 14.3% ~ 23.2% 和 25.0% ~ 26.0%。与 SP 处理相比, 夏玉米产量在原阳试验点 HP 处理提高 22.3%, 在许昌试验点 LP 和 HP 处理分别提高 18.5% 和 34.7%。综上所述, 分层施和穴施可以优化根系与磷素的空间匹配, 提高磷素吸收量和磷素利用效率, 获得较高子粒产量, 是夏玉米适宜施磷方式。

关键词: 玉米; 磷肥; 施用方式; 根系; 植株全磷; 产量

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effects of Phosphorus Fertilizer Application on Root Morphology, Phosphorus Absorption, and Yield of Summer Maize

RUAN Yi-hao¹, DOU Hang-yu², DU Ming-xue¹, SUN Wei¹, ZHANG Ying-lei¹, ZHU Yi-ming¹,
WANG Shu-lan¹, WANG Hao¹, YANG Qing-hua¹

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046;

2. Henan Huangfan District Industrial Group Co., Ltd., Zhoukou 466000, China)

Abstract: In order to investigate the effects of different phosphorus fertilizer application methods on root morphology, phosphorus absorption, and yield of summer maize, field experiments were conducted in Yuanyang and Xuchang, Henan. The experimental material used was Zhengdan958, and four treatments were applied at a rate of 75 kg/ha: broadcast application(SP), layered application(LP), strip application(BP), and hole application(HP). The results showed that, under different phosphorus fertilizer application methods, compared with SP, LP and HP significantly increased root dry weight, root length, root surface area and root volume. The phosphorus absorption amount of LP and HP was higher than that of SP in each growth period, and the phosphorus transport amount was HP>LP>BP>SP. The phosphorus absorption efficiency of LP and HP was 14.3%–23.2% and 25.0%–26.0% higher than that of SP in the two test points, respectively. Compared with SP the yield of summer maize increased by 22.3% in HP at Yuanyang test site, 18.5% and 34.7% in LP and HP at Xuchang test site, respectively. In conclusion, the application of layered and hole application techniques can optimize the spatial matching of roots and phosphorus, leading to increased phosphorus absorption and utilization efficiency, and obtain higher grain yield, which is a suitable phosphorus application method for summer maize.

Key words: Maize; Phosphorus fertilizer; Application method; Root system; Plant total phosphorus; Yield

录用日期: 2024-03-03

基金项目: 河南省自然科学基金项目(212300410157)、河南农业大学科技创新基金项目(2023CXZX001)、河南农业大学青年英才项目(30500952)、国家重点研发计划项目(2021YFD1901002-8)

作者简介: 阮毅好(2000-), 男, 河南洛阳人, 硕士, 研究方向为作物栽培与耕作学。E-mail: r2531564130@163.com

王淑兰为本文通信作者。E-mail: slwang@henau.edu.cn

磷肥是粮食生产中主要肥料之一^[1],其在土壤中的低运动性^[2-4],导致目前我国粮食生产中磷肥当季利用率仅为10%~20%^[5]。在玉米生产中,磷元素是玉米生产提质增效的关键元素^[6]。近年来,由于追求玉米产量,农田中磷肥大量施用,磷素利用效率低下,造成了严重的资源浪费^[7-8]。

合理设计根系与磷肥之间的位置是提高磷素利用率的有效途径^[9]。关于磷肥位置,基于“根与磷肥相互作用”的研究一直是业界关注的问题^[10]。其要求在时间和空间上同步作物磷需求和土壤磷供给,从而提高根系捕获磷素的能力。研究表明,在根系分布活动区域施用磷肥,不仅可实现磷素的高效利用,而且减少了肥料的损失^[11]。对玉米来说,土壤有效磷的位置分布对玉米生长至关重要,尤其是在根系较短、根系较少的玉米生长早期^[12]。由于磷的扩散速度极慢,玉米行带附近的磷比土壤表面的磷更容易被玉米植株吸收,促进根毛伸长和增殖,同时作物也会通过改变根系结构进行适应性改变,以最大限度提高磷的获取效率^[13]。根系与施磷位置的相互作用研究表明,合理的磷肥施用位置可通过降低较高的根皮质通气组织数量和较大的皮质细胞大小的代谢成本促进根系生长,提高根系对氮、磷的吸收和利用,协同提高子粒产量和全株养分利用效率^[14]。

磷肥施用方式是影响磷肥与玉米根系相对位置的措施之一,可以调控玉米根系分布及磷素吸收利用而促进增产增效。撒施使磷肥分布在土壤表层^[15]。在条施下,磷肥在土壤中呈条带状分布,通过调节条带与玉米根系距离,可以进一步实现磷肥的高产高效。吕小凡^[16]等研究表明,条施可促进玉米根系生长,提高玉米侧根数、平均直径、总表面积及总体积,且有显著的增产效应。由于深层土壤磷素

含量较低,玉米生长后期往往表现为磷素胁迫,磷肥分层施可兼顾玉米对浅层和深层土壤磷素的需求。有研究表明,磷肥分层施较表面撒施能有效提高作物产量及其对磷肥的吸收^[17]。近年来,有学者研究根旁穴施,表明玉米穴施施磷方式较条施植株增产3.70%,磷养分积累显著增加19.44%^[18]。

目前,以磷肥施用方式为主要处理的研究仍不足,对现有生产中涉及的施磷方式如撒施、分层施、条施和穴施下产量和磷素吸收利用等的综合比较研究缺乏,限制了对优势施磷方式的认知。在不同磷肥施用方式下,夏玉米根系形态、磷素吸收及产量的综合研究是了解磷肥施用方式增产增效的关键。本研究以夏玉米为研究对象,比较4种磷肥施用方式(撒施、分层施、条施、穴施)对夏玉米根系形态、磷素吸收与产量影响,在玉米生育期内重点研究玉米不同器官磷素吸收及转运效率,分析其与根系和玉米产量的关系,为玉米高产高效生产提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验地概况

试验于2022年分别在河南农业大学原阳现代农业科教园区(34°51' N, 113°36' E)和河南农业大学许昌现代农业试验站(34°08' N, 113°47' E)开展。原阳试验站位于河南省中部,属典型的温带季风气候,年平均气温16.8℃,2022年全年降雨量535.9 mm,夏季高温多雨,集中在6-7月。试验前茬作物为冬小麦,小麦收获后直接灭茬处理进行玉米季试验。试验地土壤为沙壤土,播种前土壤有机质含量10.57 g/kg,全氮含量1.08 g/kg,速效磷含量8.3 mg/kg,速效钾含量115.5 mg/kg。许昌试验站属北暖温带季风气候

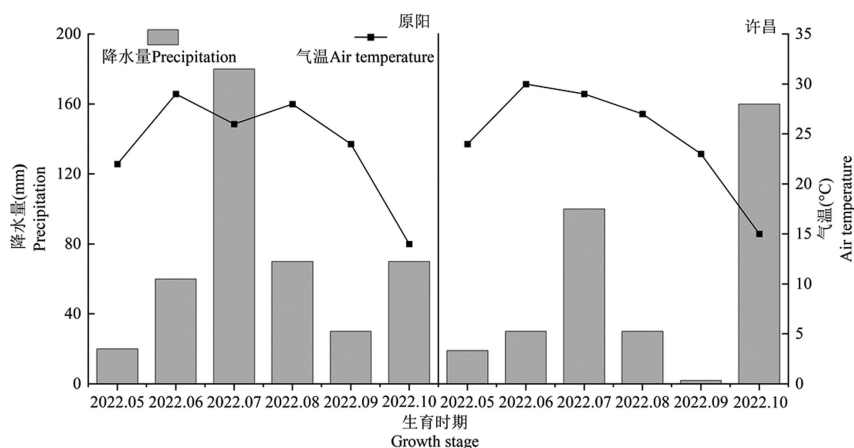


图1 试验田气温、降水量

Fig.1 Temperature and rainfall in the experimental field

候,2022年全年降雨量为579 mm,试验地土壤为壤土。最热月在6月,平均气温为30.0℃。耕层土壤养分含量有机质14.5 g/kg、全氮1.25 g/kg、速效磷14.4 mg/kg、速效钾122.5 mg/kg(图1)。

1.1.2 供试玉米与肥料

供试玉米为河南省当前生产主要种植玉米品种郑单958(ZD 958)。种子购买于河南省秋乐种业公司。供试肥料为尿素(N 46.0%)、过磷酸钙(P_2O_5 12.0%)、硫酸钾(K_2O 52.0%)。

1.2 试验设计

试验设4个处理,磷肥分别为撒施(SP)、分层施(LP)、条施(BP)、穴施(HP),采用随机区组设计,3次重复。供试肥料为尿素、磷酸二铵和硫酸钾,肥料施用量为N:180 kg/hm²、 P_2O_5 :75 kg/hm²、 K_2O :75 kg/hm²,氮、钾肥种肥同播随种子一并施入,磷肥于播种期人工施入。玉米播种密度为67 500株/hm²,播种时间为2022年6月12日,株距22 cm,行距60 cm,小区面积为50 m²。两块试验田农田管理措施与区域管理方式一致,原阳和许昌试验点玉米分别于9月23日、24日收获。撒施:将磷肥均匀撒在试验小区表面;分层施:在距离玉米种植行5 cm处用铁锹挖种子深度+10 cm左右的沟,将三分之二的磷肥均匀撒入沟内后填埋,将沟填埋至种子深度+5 cm处,再均匀施入剩余的三分之一的磷肥,之后完全填埋;条施:在距离玉米种植行5 cm处挖深5 cm左右的沟,将磷肥均匀撒入沟内后填埋;穴施:在种子行偏5 cm处用铁锹挖直径5 cm左右的小洞,深度为种子深度+5 cm,然后将磷肥倒入洞中后填埋。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 地上部干物质质量及产量

分别于玉米生长的拔节期、吐丝期、成熟期,在各小区选择5株长势一致且具有代表性的植株取样,拔节期将植株分为茎、叶两部分,吐丝期将植株分为茎(包括叶鞘)、叶、穗3部分,成熟期分为茎(包括叶鞘)、叶、穗轴、子粒4部分。将分好的器官在烘箱中105℃杀青30 min,然后80℃烘干至恒重,最后用天平称(精确度0.01)称重测定干物质质量。在玉米成熟期,每个小区选取2行5 m长的植株进行田间取样,调查样方内有效穗数,测定子粒产量,并用谷物水分测定仪PM-8188-A测定子粒含水率,折算出对应含水率下的产量。

1.3.2 根系形态

玉米成熟期对根系取样:选生长均匀一致的连续植株5株,以植株的基部为中心,在半径20 cm的水平区域内进行地下垂向0~40 cm的土壤根系挖

掘,分别取0~<10 cm、10~<20 cm、20~40 cm的根装入网袋之中^[19],在低水压下冲洗干净并挑出全部根系,放入密封袋中1℃下保存。

采用Epson Perfection V700 Photo扫描仪扫描根系样品,然后使用WinRHIZO 2016根系分析软件测定根长、根体积和根表面积,将扫描完成的根系放在烘箱烘干称重。

1.3.3 植株全磷含量

将称重后的各植株器官(茎、叶、穗、子粒)干样粉碎,过100目筛子,不同器官分装标记,使用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,钒钼黄比色法测定植株全磷含量^[20]。

1.3.4 相关参数计算公式

干物质积累速率=两次地上部干物质取样差值/两次取样时间间隔;

磷素吸收量=某生育时期植株地上部干物质质量×该生育时期植株地上部磷素含量^[21];

磷肥收获指数=成熟期子粒磷素吸收量/成熟期地上部植株磷素吸收量×100%;

磷素偏生产力=施磷处理子粒产量/施磷量;

营养器官磷素转运量=吐丝期营养器官磷素积累量-成熟期营养器官磷素积累量^[22];

磷素转运效率=营养器官磷素转运量/吐丝期营养器官磷素积累量×100%;

磷素转运对子粒的贡献率=营养器官磷素转运量/成熟期子粒磷素积累量×100%;

磷素吸收效率=植株地上部磷素积累量/施磷量×100%^[23]。

1.4 数据处理与分析

首先进行数据的正态性和同质性测验,然后利用two-way ANOVA检验磷肥施用方式与地点及交互作用对夏玉米地上部干重、产量、根系干重和植株含磷量的影响,同时利用LSD法进行方差同质性检验。所有数据使用SPSS 22.0软件进行方差分析和相关性分析,表格制作使用Excel 2019,图形绘制使用Origin 2021。

2 结果与分析

2.1 不同施磷方式对夏玉米地上部干物质积累量及产量的影响

2.1.1 夏玉米地上部干物质积累量和积累速率

从表1可知,施磷方式和试验地点显著影响地上部干物质积累量($P<0.05$)。在成熟期,原阳试验点地上部干物质积累量表现为HP>LP>BP>SP,许昌试验点地上部干物质积累量表现为LP>HP>LP>SP。

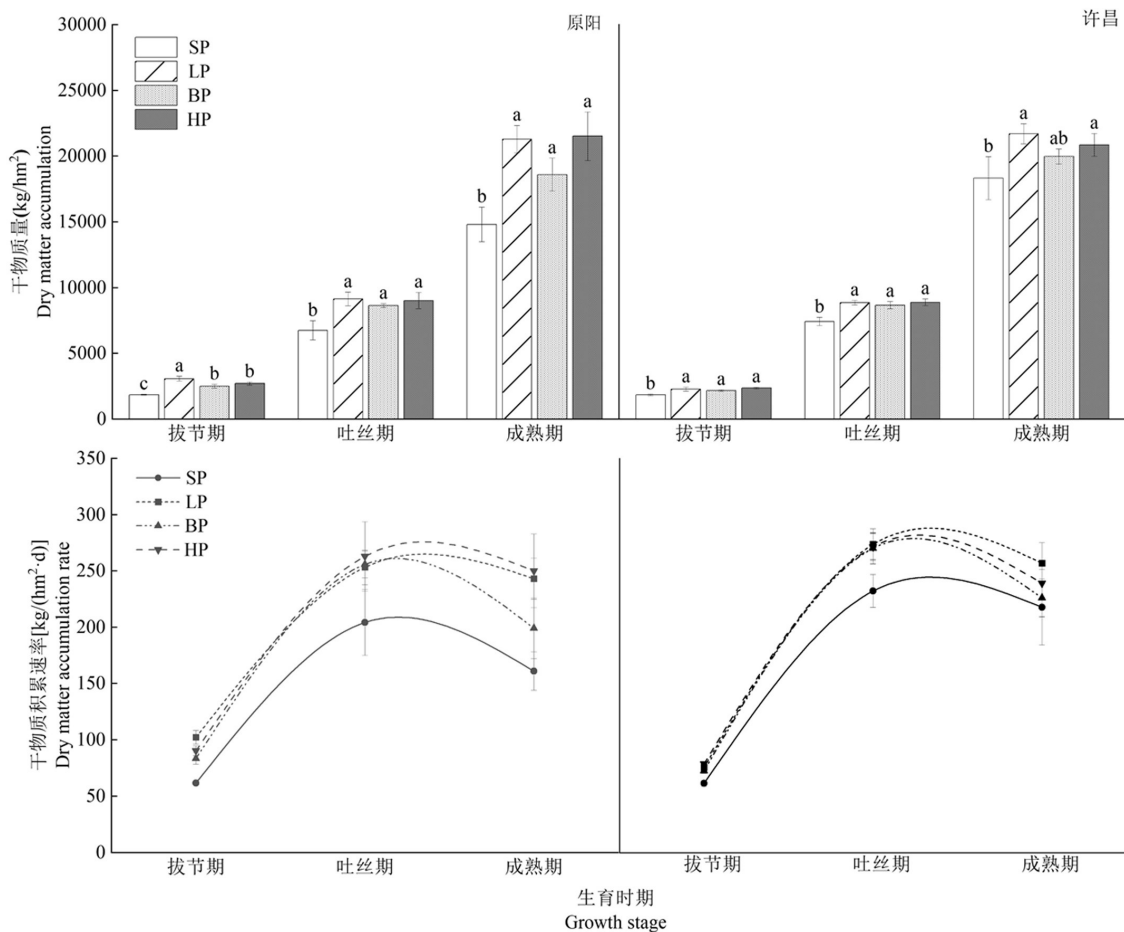
在两个试验点,LP和HP处理相较SP处理显著提高夏玉米地上部干物质积累量43.8%、18.4%和45.3%、13.7%,BP处理在许昌试验点较SP处理有所提高但无显著差异。在拔节和吐丝期,夏玉米地上部干物质积累量与成熟期表现一致,两个试验点LP、BP和HP处理相比SP处理均显著提高。进一步对夏玉米地上部干物质积累速率分析表明,在拔节至吐丝期,

干物质积累速率逐步提高,在吐丝期前后达到最大值;吐丝之后,干物质积累速率逐渐下降直至成熟。其中,地上部干物质积累速率在3个生育时期LP和HP处理相较SP处理均有所增加;在吐丝期,地上部干物质积累速率LP和HP处理在两个试验点较SP处理分别显著增加24.0%、17.7%和28.9%、16.8%(图2)。

表1 磷肥施用方式与地点对各因子影响的二因素方差分析

Table 1 Two-factor variance analysis of the effects of phosphate fertilizer application mode and land plot on each factor

变异来源 Source of variation	处 理 Treatment		地 点 Location		处理×地点 Treatment×Location	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
地上部干重	6.212	0.005	7.444	0.015	2.340	0.112
产 量	4.059	0.025	0.039	0.846	0.877	0.474
根系干重	14.366	<0.000 1	12.015	0.003	2.069	0.145
植株含磷量	12.729	<0.000 1	19.062	<0.000 1	1.180	0.349



注:不同小写字母代表各处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。下图、下表同。
Note: Different lowercase letters represent significant differences between treatments at $P<0.05$ level. The same below.

图2 施磷方式对夏玉米地上部干物质积累量和积累速率的影响

Fig.2 Effect of phosphorus application method on dry matter accumulation and accumulation rate in the upper part of summer maize field

2.1.2 夏玉米子粒产量

施磷方式显著影响夏玉米子粒产量($P<0.05$)。由图3可知,在两个试验点,夏玉米产量高低排序均为 $HP>LP>BP>SP$ 。在原阳试验点 HP 处理相比 SP 处理显著提高夏玉米产量 22.3%, SP、LP 处理和 BP

处理之间无显著差异;在许昌试验点,LP、HP 处理产量无显著差异,HP 处理相比 BP 和 SP 处理显著提高夏玉米产量 16.8%和 34.7%,LP 处理较 SP 处理显著提高夏玉米产量 18.5%。

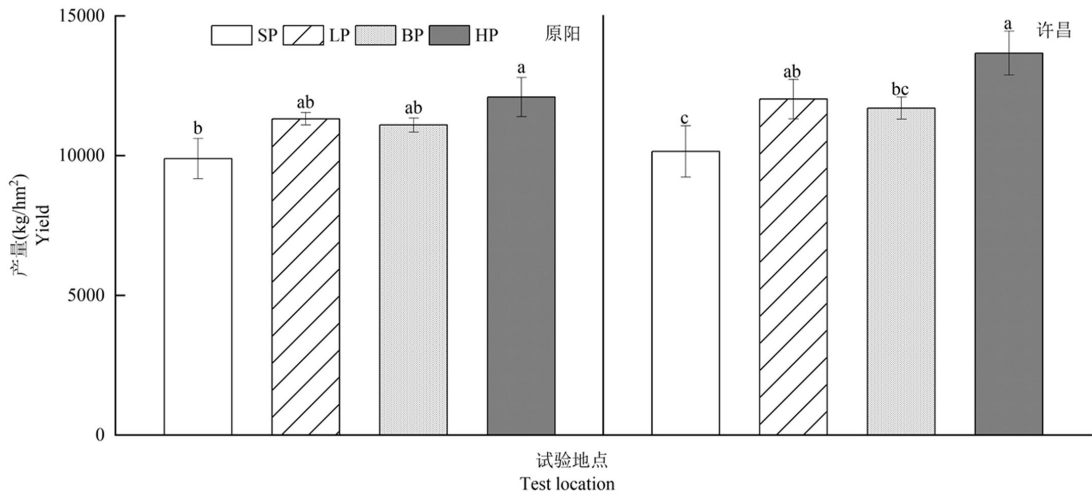


图3 施磷方式对夏玉米产量的影响

Fig.3 Effect of phosphorus application mode on summer maize yield

2.2 不同施磷方式对夏玉米根系的影响

2.2.1 成熟期根系干重

磷肥施入方式和试验地点对成熟期根系干重影响显著($P<0.01$)。由表2可知,不同施磷方式下,根系干重在原阳试验点表现为 $HP>LP>BP>SP$,在许昌试验点表现为 $LP>HP>BP>SP$,两个试验点3个处理相比SP处理根系干重均显著提高($P<0.05$)。随着土层下降,夏玉米根系干重呈减少趋势。在 $0\sim<10\text{ cm}$ 土层,原阳试验点根系干重 HP 和 LP 处理较 BP、SP 处理显著提高 16.9%、28.2%和 14.7%、25.3%;在许昌试验点,根系干重 HP 和 LP 处理较 BP、SP 处理显著提高 18.6%、25.8%和 21.6%、29.1%。在 $10\sim<20\text{ cm}$

土层,两个试验点根系干重 LP 和 HP 处理较 SP 处理显著提高 19.2%、25.8%和 30.8%、31.5%,BP 处理与 SP 处理无显著差异。在 $20\sim40\text{ cm}$ 土层,两个试验点根系干重 LP 和 HP 处理较 SP 处理显著提高 35.3%、48.8%和 32.4%、43.9%。

2.2.2 成熟期根系形态

对夏玉米成熟期(表3、表4)不同土层的根系进行扫描分析发现,随着土层深度的下降,根长、根表面积和根体积逐渐减小。相比SP处理,在 $0\sim<10\text{ cm}$ 土层,两个试验点 LP、HP 处理根长和根表面积显著提高;在 $10\sim<20\text{ cm}$ 土层,两个试验点 LP、HP 处理根长和根体积显著提高,而根表面积无显著变化;在

表2 不同施磷方式对成熟期根系干重的影响

Table 2 Effects of different phosphorus application methods on root dry matter quality at maturity stage g

试验地点 Test location	处 理 Treatment	土层深度 Soil depth			总 和 Total
		0 ~ <10 cm	10 ~ <20 cm	20 ~ 40 cm	
原 阳	SP	6.95 b	2.66 b	0.34 b	9.54 c
	LP	8.74 a	3.17 a	0.46 a	12.27 ab
	BP	7.62 b	3.05 ab	0.41 ab	11.08 b
	HP	8.91 a	3.48 a	0.45 a	12.84 a
许 昌	SP	7.36 b	2.79 b	0.41 b	10.56 b
	LP	9.50 a	3.51 a	0.61 a	13.62 a
	BP	7.81 b	3.08 ab	0.43 b	13.02 a
	HP	9.26 a	3.67 a	0.59 a	13.52 a

20 ~ 40 cm 土层,两个试验点 HP 处理提高根长 53.8% ~ 69.6%,提高根体积 77.9% ~ 92.5%,许昌试

验点 LP 处理提高根长和根表面积 76.8%和 53.1%。

表 3 不同施磷方式对夏玉米成熟期根系形态分布的影响(原阳)

Table 3 Effects of different phosphorus application methods on root morphological distribution in mature stage of summer maize(Yuanyang)

土层深度(cm) Soil depth	处 理 Treatment	根长(cm) Root length	表面积(cm ²) Root surface	根体积(cm ³) Root volume
0 ~ <10	SP	1 839.03 b	954.82 b	37.19 b
	LP	2 674.51 a	1102.06 a	54.31 a
	BP	2 545.71 a	1072.48 a	45.74 ab
	HP	2 627.88 a	1092.16 a	41.40 ab
10 ~ <20	SP	1 756.04 b	531.27 b	13.56 b
	LP	2 477.23 a	824.41 ab	18.69 a
	BP	2 289.11 ab	711.03 ab	14.39 b
	HP	2 476.34 a	882.12 a	25.78 a
20 ~ 40	SP	634.16 b	161.11 a	3.61 b
	LP	722.80 b	194.94 a	5.26 a
	BP	651.94 b	178.59 a	4.18 ab
	HP	975.28 a	231.24 a	6.95 a

表 4 不同施磷方式对夏玉米成熟期根系形态分布的影响(许昌)

Table 4 Effects of different phosphorus application methods on root morphological distribution in mature stage of summer maize(Xuchang)

土层深度(cm) Soil depth	处 理 Treatment	根长(cm) Root length	根表面积(cm ²) Root surface	根体积(cm ³) Root volume
0 ~ <10	SP	959.19 c	443.29 b	7.73 b
	LP	1 868.29 ab	468.75 a	19.46 a
	BP	1 326.77 bc	473.82 a	16.83 ab
	HP	2 103.66 a	486.03 a	17.85 a
10 ~ <20	SP	1 039.16 c	309.22 a	2.46 b
	LP	1 745.53 ab	318.71 a	3.37 a
	BP	1 296.55 bc	277.28 a	2.38 b
	HP	1 783.06 a	319.88 a	4.66 a
20 ~ 40	SP	681.98 b	194.06 a	1.45 b
	LP	1 205.63 a	231.33 a	2.22 a
	BP	1 131.63 ab	198.49 a	1.71 ab
	HP	1 156.57 a	237.50 a	2.58 a

2.3 不同施磷方式对夏玉米器官磷素吸收的影响

2.3.1 器官磷素吸收

磷肥施入方式和试验地点对植株含磷量影响显著($P<0.000\ 1$)。由表 5 可知,随着生育时期的进行,从拔节到吐丝期夏玉米茎部和叶片中的磷含量呈上升趋势(表 4),从吐丝到成熟期,穗、茎、叶部位中磷含量呈下降趋势。在拔节期,原阳试验点茎秆含磷量表现为 HP>LP>BP>SP,叶片含磷量表现为 HP>BP>LP>SP;许昌试验点茎秆含磷量表现为 LP>BP>

HP>SP,叶片含磷量表现为 HP>LP>BP>SP。在原阳试验点茎秆和叶片含磷量 LP、HP 处理较 SP 处理显著提高 19.8%、30.2%和 3.7%、22.9%;在许昌试验点茎秆含磷量 LP 较 SP 处理显著提高 12.8%,叶片含磷量 LP、HP 较 SP 处理分别显著提高 5.8%和 19.7%。在吐丝期,两个试验点穗部含磷量均表现为 LP>BP>HP>SP,LP 和 HP 处理穗部含磷量在两个试验点较 SP 处理显著提高 28.5%、14.0%和 18.8%、5.5%;茎部含磷量两个试验点均为 LP、BP 处理显著高于 SP、

HP 处理,SP 和 HP 处理无显著差异;叶片中的磷含量,LP、HP 处理显著高于 SP、BP 处理,SP、BP 处理间不存在显著差异。在成熟期,茎、叶和穗部磷含量均有所下降,磷素从营养器官逐渐向子粒中转运,子粒

中含磷量逐渐升高,在两个试验点子粒含磷量 LP 和 HP 处理比 SP 处理显著提高 31.3%、27.2%和 29.7%、19.2%。

表 5 不同施磷方式对夏玉米器官磷含量的影响

Table 5 Effects of different phosphorus application methods on phosphorus content in maize organs

g/kg

试验地点 Test location	处 理 Treatment	拔节期 Jointing stage			吐丝期 Silking stage			成熟期 Maturity stage		
		茎	叶	穗	茎	叶	穗	茎	叶	子粒
		Stalk	Leaf	Spike	Stalk	Leaf	Spike	Stalk	Leaf	Grain
原 阳	SP	2.12 b	2.18 b	1.86 b	2.45 b	2.53 b	1.72 b	1.97 b	2.12 a	2.56 b
	LP	2.54 a	2.26 a	2.39 a	3.07 a	3.14 a	1.94 a	2.32 a	2.23 a	3.36 a
	BP	2.18 b	2.37 a	2.30 a	2.79 a	2.73 b	1.83 ab	2.35 a	2.08 a	2.99 a
	HP	2.76 a	2.68 a	2.21 a	2.27 b	3.65 a	1.77 b	2.14 a	2.14 a	3.32 a
许 昌	SP	2.27 b	2.59 b	2.35 b	2.60 b	2.67 b	1.97 b	2.05 c	2.19 a	2.50 b
	LP	2.56 a	2.74 a	2.68 a	3.02 a	3.09 a	2.49 a	2.24 b	2.17 a	3.18 a
	BP	2.46 ab	2.65 b	2.54 a	2.85 a	2.75 b	2.19 b	2.67 a	2.14 a	2.68 a
	HP	2.36 ab	3.10 a	2.48 a	2.67 b	3.53 a	2.28 ab	2.25 b	1.86 b	2.98 a

2.3.2 不同施磷方式对夏玉米不同生育时期磷素吸收量的影响

由表 6 可知,夏玉米的磷素吸收量随着生育时期的变化而不断增加。在拔节期,两个试验点磷素吸收量表现为 HP>LP>BP>SP,LP、HP 处理比 SP 处理显著提高,SP 和 BP 处理间无显著差异($P<0.05$)。吐丝期,磷素吸收量原阳试验点表现为 LP>HP>BP>SP,许昌试验点表现为 HP>LP>BP>SP,在两个试验点 LP 和 HP 处理磷素吸收量比 SP 处理显著提高 33.7%、18.9%和 28.8%、19.8%。成熟期,两个试验点

磷素吸收量与吐丝期表现一致,LP、BP 处理和 HP 处理磷素吸收量显著高于 SP 处理。吐丝期,原阳试验点磷素吸收量 LP 和 HP 处理较 SP、BP 处理分别增加 19.48、17.50 和 16.69、14.71 kg/hm²;许昌试验点磷素吸收量 LP 和 HP 处理较 SP、BP 处理分别增加 11.90、5.08 kg/hm²和 12.47、5.65 kg/hm²。

2.3.3 磷素转运

LP、BP 和 HP 处理磷素转运量、对子粒贡献率、磷转运率均高于 SP 处理(表 7)。两个试验点磷素转运量表现为 LP>HP>BP>SP,LP 和 HP 处理磷素转运

表 6 不同施磷方式对夏玉米不同生育时期磷素吸收量的影响

Table 6 Effects of different phosphorus application methods on phosphorus uptake of summer maize at different growth stages

kg/hm²

试验地点 Test location	处 理 Treatment	磷素吸收量 Phosphorus uptake		
		拔节期 Jointing stage	吐丝期 Silking stage	成熟期 Maturity stage
原 阳	SP	9.66 b	57.88 b	94.74 b
	LP	16.03 a	77.36 a	117.71 a
	BP	12.85 ab	69.86 b	104.98 a
	HP	17.95 a	74.57 a	108.98 a
许 昌	SP	8.99 b	62.91 b	99.84 c
	LP	12.37 a	74.81 a	116.56 b
	BP	11.05 a	69.73 b	111.82 b
	HP	12.95 a	75.38 a	119.12 a

量比 SP 处理显著提高 69.0%、20.4% 和 56.9%、13.9%。磷转运率和对子粒贡献率变化规律同磷转运量一致,两个试验点 3 个处理磷转运率比 SP 处理均显著提高,LP 和 HP 处理磷转运率比 SP 处理显著提高 19.3%、8.9%和 30.9%、4.2%。原阳试验点 LP 处理对子粒贡献率比 SP 处理显著提高 10.0%;许昌试验点 HP 处理对子粒贡献率比 SP 处理显著提高 7.3%。

表 7 不同施磷方式对夏玉米磷素转运和子粒贡献率的影响

Table 7 Effects of different phosphorus application methods on phosphorus transport and grain contribution rate of summer maize

试验地点	处 理	磷转运量(kg/hm ²)	磷转运率(%)	对子粒贡献率(%)
Test location	Treatment	PTA	PTR	PCR
原 阳	SP	13.76 b	28.02 c	32.51 b
	LP	23.26 a	33.42 b	35.76 a
	BP	21.36 a	35.57 a	34.02 b
	HP	21.59 a	36.67 a	33.92 b
许 昌	SP	17.58 b	30.83 b	31.13 b
	LP	21.16 a	33.58 a	32.01 b
	BP	19.05 b	32.26 a	31.68 b
	HP	20.03 a	32.13 a	33.39 a

2.3.4 磷素利用效率

由表 8 可知,LP、BP 和 HP 处理的磷肥收获指数、偏生产力、磷吸收效率均高于 SP 处理。磷肥收获指数总体来看 HP 处理最大,LP、BP 处理次之,SP 处理最低。原阳试验点磷肥收获指数 HP 处理较 SP 处理显著提高,LP 和 BP 处理较 SP 处理有所提高,但未达到显著水平;许昌试验点 BP 处理和 HP 处理磷肥收获指数较 SP 处理显著提高。磷肥偏生产力原

阳试验点表现为 LP>HP>BP>SP,许昌试验点表现为 HP>LP>BP>SP,与 SP 处理相比,在两个试验点磷肥偏生产力 LP 和 HP 处理显著提高 23.6%、18.4%和 15.7%、24.9%。磷素吸收效率在原阳试验点表现为 HP>BP>LP>SP,LP、BP 处理和 HP 处理较 SP 处理分别显著提高 14.3%、21.3%和 25.0%;许昌试验点磷素吸收效率表现为 HP>LP>BP>SP,LP、BP 处理和 HP 较 SP 处理分别显著提高 23.2%、19.8%和 26.0%。

表 8 不同施磷方式对夏玉米磷肥偏生产力、磷肥收获指数、磷素吸收效率的影响

Table 8 Effects of different phosphorus application methods on partial factor productivity, phosphorus harvest index and phosphorus absorption efficiency of summer maize

试验地点	处 理	磷肥收获指数	偏生产力(kg/kg)	磷素吸收效率(%)
Test location	Treatment	PHI	PFP	PAE
原 阳	SP	62.83 b	88.62 b	42.56 b
	LP	68.24 ab	109.51 a	48.64 a
	BP	67.28 ab	94.23 ab	51.63 a
	HP	71.87 a	102.56 a	53.22 a
许 昌	SP	66.72 b	92.46 b	43.52 b
	LP	69.56 ab	109.43 a	53.61 a
	BP	72.26 a	102.64 ab	52.13 a
	HP	73.63 a	115.50 a	54.85 a

3 结论与讨论

分层施和穴施可改善夏玉米根系构型,提高深层土壤根长、根表面积、根体积和根系干重,增大根系与磷素的接触面积,减小根系与磷素之间的距离,优化根系与养分的空间匹配,玉米根系可从上下土

层对磷素吸收利用。分层施和穴施增加植株体内磷素含量,促进营养器官中磷向子粒的转运,同时提高磷素对子粒贡献率和吸收效率,最终增加夏玉米干物质积累和产量形成,是黄淮海地区优势施磷方式。

3.1 不同施磷方式对夏玉米根系形态的影响
根系是玉米吸收磷素的主要器官,良好的根系

形态有助于玉米对磷素的高效吸收。本研究中两个试验点夏玉米根系干重在各土层LP和HP处理相较SP处理均显著提高,可能是由于LP和HP处理施肥位置处于根系密集区域,与根系不仅有较近的距离,而且与根系接触面积也较大,玉米能吸收利用更多磷素,促进根系更好发育^[24]。在0~<10、10~<20、20~40 cm 3个土层中,两个试验点LP、HP处理相较SP处理均增加了根长、根表面积和根体积,可能是因为LP、HP处理在空间上优化了玉米根系对磷素的吸收,有利于根系深扎伸长。陈晓影^[25]等研究表明,磷肥施用位置适当能促进夏玉米根系生长,根干重、根长密度、根系表面积和根体积显著增加。LP和HP处理磷肥施用位置较深,可增加上下土壤对磷素的吸收,增大根系与磷素接触面积,增强根系从土壤中摄取养分的能力。

3.2 不同施磷方式对夏玉米磷素吸收转运的影响

作物对磷素的吸收效率与施肥技术密切相关。磷在土壤中移动性差且易被固定^[26],而根系与肥料的接触面积和肥料施用方式与植株根系所在位置是影响肥料吸收利用的两个重要因素。本研究发现,在夏玉米各个生育时期,不同施磷方式对各个部位的磷含量有不同程度的影响,且在吐丝期和完熟期影响较大。相比SP处理,LP和HP处理在拔节期显著提高了夏玉米茎部和叶片的磷含量,吐丝期显著提高穗部和叶片的磷含量,成熟期显著提高子粒中的磷含量,两个试验点夏玉米各时期磷素吸收量相较SP处理均显著提高。赵亚丽^[27]等研究发现,合理的磷肥施用方式可以促进夏玉米植株对磷素养分的吸收。在本研究中,相较SP处理,两个试验点LP和HP处理均显著提高磷肥偏生产力和磷素吸收效率。Nuttal^[28]等研究发现,将磷肥在适当的施用方式下深施,磷肥吸收效率显著高于磷肥撒施。LP处理和HP处理优化磷素供需的空间性,促进根系发育,增强根系对磷素的吸收和转化。

3.3 不同施磷方式对夏玉米产量的影响

充足的土壤养分供应是保证作物生长发育和产量的基础^[29]。本研究中,在磷肥施用量相同的情况下,研究不同施磷方式对夏玉米生长发育及产量的影响。结果表明,在原阳和许昌两个试验点,LP处理和HP处理均提高了夏玉米子粒产量。Schwab^[30]等研究发现,磷肥施于适当的位置相比撒施可显著提高玉米子粒产量。范秀艳^[31]等研究发现,分层施磷能促进春玉米成熟期子粒中磷的分配比例,磷肥的吸收效率和子粒产量都高于撒施。合理的施肥方式增大养分与根系的接触面积,促进玉米植株对磷

素的吸收及向子粒中的转运,最终提高夏玉米子粒产量。

参考文献:

- [1] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
ZHU Z L, JIN J Y. The problem of fertilizers to ensure the food security of our country[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese)
- [2] MESSIGA A J, ZIADI N, MOREL C, et al. Long term impact of tillage practices and biennial P and N fertilization on maize and soybean yields and soil P status[J]. Field Crops Research, 2012, 133: 10-22.
- [3] 王敏,刘石磊,张帅,等. 腐植酸钾与磷肥施用方式对土壤磷素移动性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 209-215.
WANG M, LIU S L, ZHANG S, et al. Effects of potassium humate and phosphate fertilizer application soil phosphorus mobility[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(2): 209-215. (in Chinese)
- [4] 张钟先. 磷素在土壤中的扩散规律[J]. 水土保持研究, 1987, 3(2): 27-34.
ZHANG Z X. The diffusion law of phosphorus in soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1987, 3(2): 27-34. (in Chinese)
- [5] 程明芳,何萍,金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J]. 作物杂志, 2010, 26(1): 12-14.
CHENG M F, HE P, JIN J Y. Research progress on utilization rate of phosphorus fertilizer in main crops[J]. Crop Journal, 2010, 26(1): 12-14. (in Chinese)
- [6] 王寅,郭聘,高强,等. 吉林省不同生态区玉米施磷的增产效应差异[J]. 中国农业科学, 2017, 50(9): 1635-1645.
WANG Y, GUO D, GAO Q, et al. Differences in yield increase effect of phosphorus application in maize in different ecological regions of Jilin province[J]. China Agriculture Science, 2017, 50(9): 1635-1645. (in Chinese)
- [7] LI H, HUANG G, MENG Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China[J]. Plant and Soil, 2011, 349: 157-167.
- [8] 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.
MA Q, LIU X Y, RAN J Y, et al. Phosphate fertilizer reduction combined with ammonium sulfate combined application improved phosphorus use efficiency of spring maize in dryland northwest China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2020, 26(6): 1047-1058. (in Chinese)
- [9] 冯国瑞,张新疆,王祥斌,等. 滴灌玉米苗期根系形态对启动磷肥施用位置的响应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 337-343, 350.
FENG G R, ZHANG X J, WANG X B, et al. Response of root morphology at seedling stage of drip irrigated maize to initiation of phosphate fertilizer application location[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 337-343, 350. (in Chinese)
- [10] NADEEM M, MOLLIER A, VIVES A, et al. Effect of phosphorus nutrition and grain position within maize cob on grain phosphorus accumulation[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014,

- 12(2): 486–491.
- [11] 冯国瑞, 刘小龙, 王祥斌, 等. 启动磷肥不同施用方式对玉米养分吸收及生长和产量的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(5): 1052–1060.
- FENG G R, LIU X L, WANG X B, et al. Effects of different application methods of phosphorus fertilizer on nutrient uptake, growth and yield of maize[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(5): 1052–1060. (in Chinese)
- [12] 刘小龙, 张新疆, 危常州, 等. 不同磷水平土壤上磷启动肥对玉米生长效应的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, 59(10): 156–162.
- LIU X L, ZHANG X J, WEI C Z, et al. Study on the effect of phosphorus start-up fertilizer on maize growth in soils with different phosphorus levels[J]. Soil and Fertilizer in China, 2022, 59(10): 156–162. (in Chinese)
- [13] FREILING M, VON TUCHER S, SCHMIDHALTER U. Factors influencing phosphorus placement and effects on yield and yield parameters: A meta-analysis[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 216, 105257.
- [14] CHEN X Y, LIU P, ZHAO B, et al. Root physiological adaptations that enhance the grain yield and nutrient use efficiency of maize (*Zea mays* L) and their dependency on phosphorus placement depth [J]. Field Crops Research, 2022, 276, 108378.
- [15] 江尚焘, 王火焰, 周健民, 等. 磷肥施用对水稻生长和磷素吸收的影响[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1085–1091.
- JIANG S T, WANG H, Y, ZHOU J M, et al. Effects of phosphate fertilizer application on rice growth and phosphorus uptake[J]. Soil, 2016, 48(6): 1085–1091. (in Chinese)
- [16] 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, 58(1): 240–246.
- LÜ X F, ZHAO H B, BAI R X, et al. Effects of priming fertilizer application on soil characteristics, maize growth and yield[J]. Soil and Fertilizer of China, 2021, 58(1): 240–246. (in Chinese)
- [17] LIU C H, YAN H H, WANG W Y, et al. Layered application of phosphate fertilizer increased winter wheat yield by promoting root proliferation and phosphorus accumulation[J]. Soil & Tillage Research, 2023, 225, 105546.
- [18] 郭 娅, 尹焕丽, 常 凤, 等. 株间穴施对夏玉米产量和养分吸收的影响[J]. 农学学报, 2020, 10(3): 43–48.
- [19] GUO Y, YIN H L, CHANG F, et al. Effects of interplant hole application on yield and nutrient uptake of summer maize[J]. Journal of Agronomy, 2020, 10(3): 43–48. (in Chinese)
- [20] 房孟颖, 卢 霖, 王庆燕, 等. 乙矮合剂对不同施氮量夏玉米根系形态构建和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(24): 4808–4822.
- FANG M Y, LU L, WANG Q Y, et al. Effects of Yiai mixture on root morphology and yield of summer maize under different nitrogen application rates[J]. China Agriculture Science, 2022, 55(24): 4808–4822. (in Chinese)
- [21] 鲍士旦. 土壤化学分析(3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 韦还和, 孟天瑶, 李 超, 等. 水稻甬优12产量13.5 t/hm²以上超高产群体的磷素积累、分配与利用特征[J]. 作物学报, 2016, 42(6): 886–897.
- WEI H H, MENG T Y, LI C, et al. Characteristics of phosphorus accumulation, distribution and utilization in super-high-yielding populations with yields above 13.5 t/ha of rice Yongyou 12[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(6): 886–897. (in Chinese)
- [23] 陈晓影, 刘 鹏, 程 乙, 等. 土壤深松下磷肥施用深度对夏玉米根系分布及磷素吸收利用效率的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(10): 1565–1575.
- CHEN X Y, LIU P, CHENG Y, et al. Effects of depth of application of phosphorus fertilizer in deep soil on root distribution and phosphorus uptake and utilization efficiency of summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(10): 1565–1575. (in Chinese)
- [24] 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.
- ZHANG R F, YANG H S, FAN X Y, et al. Effect of phosphorus application depth and subsoiling on phosphorus uptake and utilization of spring maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2018, 24(4): 880–887. (in Chinese)
- [25] CAMPOS H, COOPER M, HABBEN J E, et al. Improving drought tolerance in maize: a view from industry[J]. Field Crops Research, 2004, 90(1): 19–34.
- [26] 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.
- CHEN X Y, LIU P, CHENG Y, et al. Control of summer maize root layer based on P fertilizer application depth to improve soil nitrogen uptake and utilization[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(2): 238–248. (in Chinese)
- [27] PASSIOURA J B. Soil conditions and plant growth[J]. Plant, Cell and Environment, 2002, 25(2): 311–38.
- [28] 赵亚丽, 杨春收, 王 群, 等. 磷肥施用深度对夏玉米产量和养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4805–4813.
- ZHAO Y L, YANG C S, WANG Q, et al. Effects of phosphorus fertilizer depth on yield and nutrient uptake of summer maize[J]. China Agriculture Science, 2010, 43(23): 4805–4813. (in Chinese)
- [29] NUTTAL W F, BUTTON R G. The effect of deep banding N and P fertilizer on the yield of canola (*Brassica napus* L.) and spring wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1990, 70: 629–639.
- [30] 胡 颖. 农业可持续发展中的施肥问题与解决对策[J]. 世界热带农业信息, 2021, 59(6): 19–20.
- HU Y. Fertilization problems and solutions in sustainable agricultural development[J]. World Tropical Agricultural Information, 2021, 59(6): 19–20. (in Chinese)
- [31] SCHWAB G J, WHITNEY D A, KILGORE G L, et al. Tillage and phosphorus management effects on crop production in soils with phosphorus stratification[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(3): 430–435.
- [32] 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.
- FAN X Y, YANG H S, GAO J L, et al. Effects of phosphorus fertilization on root characteristics of spring maize under ultra-high yield cultivation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2012, 18(3): 562–570. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)