

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.01.009

索炎炎, 张翔, 司贤宗, 等. 磷锌配施对花生不同生育期磷锌吸收与分配的影响. 土壤, 2020, 52(1): 61–67

## 磷锌配施对花生不同生育期磷锌吸收与分配的影响<sup>①</sup>

索炎炎<sup>1</sup>, 张翔<sup>1\*</sup>, 司贤宗<sup>1</sup>, 毛家伟<sup>1</sup>, 余琼<sup>1</sup>, 李亮<sup>1</sup>, 李国平<sup>1</sup>, 余辉<sup>2</sup>

(1 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 2 正阳县花生研究所, 河南正阳 463600)

**摘要:** 对植物体内磷-锌复杂的交互关系, 采用田间试验, 研究了磷锌配施对花生不同生育期磷锌吸收、积累、分配及花生产量的影响。结果表明: 施磷和施锌均显著提高了花生地上部干重和产量。相同锌用量下, 施磷提高了花生地上部、花生壳和花生仁的磷含量和积累量, 但降低了其锌含量、磷锌收获指数和荚果磷利用率。其中, 施磷对地上部锌含量的降低程度取决于生育期和锌施用水平。随施磷量的增加, 在花生苗期、花针前期及不施锌肥时, 花生地上部锌含量显著降低; 而在花针后期、结荚期和成熟期及施锌肥时, 花生地上部锌含量的降低程度逐渐减弱, 表明磷-锌拮抗作用在花生生育前期强于生育后期, 不施锌肥强于施锌肥。施磷对花生磷积累量的影响取决于锌供应水平和花生生长部位。不施锌肥时, 仅适量供磷促进了地上部磷积累, 而施锌肥时, 适量供磷和高量供磷均促进了地上部磷积累; 不同于地上部, 高量供磷显著降低了花生壳和花生仁磷积累量。相同磷用量下, 增施锌肥对整个生育期花生各部位磷含量和花生生育后期磷积累量无显著影响, 显著增加了花生苗期和花针前期地上部及成熟期花生壳和花生仁的磷积累量、磷收获指数和荚果磷利用率。总之, 花生体内磷-锌相互作用大小受其生育期、生长部位和锌供应水平的影响, 且施磷对磷的影响较施磷对磷的影响大。

**关键词:** 磷锌配施; 花生; 生育期; 磷-锌关系

**中图分类号:** S143.7+2; S565.2 **文献标志码:** A

## Effects of Combined Application of Phosphorus and Zinc on Phosphorus and Zinc Absorption and Distribution in Peanuts at Different Growth Stages

SUO Yanyan<sup>1</sup>, ZHANG Xiang<sup>1\*</sup>, SI Xianzong<sup>1</sup>, MAO Jiawei<sup>1</sup>, YU Qiong<sup>1</sup>, LI Liang<sup>1</sup>, LI Guoping<sup>1</sup>, YU Hui<sup>2</sup>

(1 Institute of Plant Nutrient, Resources and Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2 Zhengyang Institute of Peanut, Zhengyang, Henan 463600, China)

**Abstract:** For the complex relationship between phosphorus (P) and zinc (Zn) in plants, a field experiment was conducted to study the combined effects of phosphorus (P) and zinc (Zn) fertilizers on P, Zn absorption, accumulation, distribution at different growth stages and yield of peanut. The results showed that the shoot dry weight and peanut yield were significantly increased under both P and Zn application. Under the same amount of Zn, compared with no P application, P content and accumulation in peanut shoots, shells and kernels were increased, but Zn content, P and Zn harvest indexes and pod P utilization efficiency were decreased under P application. The reduction of Zn content in shoots depended on the growth stage and Zn application rate. With the increase of P rate, Zn content in peanuts was significantly decreased at the seedling stage, pre-flower stage and without Zn application, the reduction of Zn content in shoots was gradually weakened at the late stage of anthesis, podding stage, maturity stage and the application of Zn fertilizer, indicating that the antagonistic effect of P and Zn was stronger in the earlier growth stage than that in the latter one, no application Zn fertilizer than the application of Zn fertilizer. The effect of P application on Zn accumulation in peanuts depended on Zn rate and the growing part of peanut. Zn accumulation in shoots was promoted by the medium P rate under no Zn application, while under Zn application, Zn accumulation in shoots was promoted by the medium and high P rate. Unlike the aboveground part, Zn accumulation in shells and kernels were significantly decreased under high P rate. Under the same rate of P, Zn fertilizer had no significant effect on P content in all parts at the whole growth stage and P accumulation at the late growth stage, but P accumulation in shoots at seedling stage and pre-flower stage, P accumulation in

<sup>①</sup>基金项目: 河南省花生产业技术体系“耕作栽培岗位”项目(S2012-05-G02)和河南省科技攻关项目(172102110081, 192102110010)资助。

\* 通讯作者(zxtf203@163.com)

作者简介: 索炎炎(1985—), 女, 河南夏邑人, 博士, 助理研究员, 主要从事作物营养与施肥研究。E-mail: suoyanyan2006@163.com

shells and kernels at early maturing stage, P harvest index and pod P efficiency were significantly increased. In short, the interaction of P and Zn is affected by peanut growth stage, growing parts and Zn application rate, and the effect of P on Zn was stronger than the effect of Zn on P.

**Key words:** Combined application of phosphorus and zinc; Peanut; Growth stages; Phosphorus and zinc relationship

磷是作物生长和高产优质的必需营养元素。磷在土壤及作物体内易与多种微量元素发生作用<sup>[1]</sup>, 其中磷-锌关系问题一直是研究的热点之一。植物体内磷-锌交互作用十分复杂, 针对磷-锌交互作用, 国内外专家学者开展了广泛研究, 研究结论仍存在争议, 多数研究认为大量施用磷肥会抑制作物对锌元素的吸收, 磷-锌关系表现为拮抗作用<sup>[2-5]</sup>; 然而另一些研究认为施磷促进了作物对锌元素的吸收, 磷-锌关系表现为协同作用<sup>[6-7]</sup>。关于磷-锌关系的影响因素, 有研究者发现磷-锌关系取决于介质中磷浓度, 低磷时呈协同关系, 高磷时呈拮抗关系<sup>[3-8]</sup>。Ova 等<sup>[2]</sup>认为植物体内磷-锌关系受生长介质影响, 自然土壤中冬小麦体内磷-锌呈现拮抗作用, 高压灭菌土和营养液中磷-锌无明显相互作用。Zhang 等<sup>[3]</sup>研究表明, 小麦拔节期锌积累量随施磷量增加而增加; 而开花期和成熟期锌积累量随施磷量增加先增加后降低。武际等<sup>[9]</sup>研究认为磷-锌关系在小麦生育前期表现为协同作用, 在成熟期表现为拮抗作用。可见, 磷-锌关系因生长介质、介质中磷/锌浓度水平、作物生育期及生长部位的不同而异<sup>[1]</sup>。以上研究多采用盆栽或营养液培养的方法, 而对田间条件下作物全生育期磷-锌关系的研究还很少, 且磷-锌交互作用主要在小麦、玉米、水稻等大宗粮食作物上研究较多。花生是我国重要的油料作物和经济作物, 对磷的需求量相对其他作物较多<sup>[10]</sup>, 大量施用磷肥必然会影响到花生锌的吸收和利用。然而, 根据现有知识, 磷锌配施对花生全生育期磷-锌关系的影响还未见相关报道。鉴于此, 本文选取典型砂姜黑土为研究对象, 研究田间自然条件下不同磷锌组合对花生全生育期磷锌吸收、积累及分配的影响, 以期调控花生高产和提高花生仁中锌营养的磷锌肥合理施用技术提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2016 年 6—10 月在河南省正阳县兰青乡大余庄进行。试验田土壤类型为砂姜黑土, 质地为黏壤, 试验地地势平坦, 土壤肥力均匀, 排灌条件良好。耕层土壤基本性质为: 有机质 14.20 g/kg, 全氮 0.90 g/kg, 速效氮 102.98 mg/kg, 有效磷 17.20 mg/kg, 速效钾

125.42 mg/kg, 有效锌 1.02 mg/kg, pH 6.00。

### 1.2 试验设计

试验采用双因素随机区组设计, 包括磷肥和锌肥两个因素, 其中磷肥( $P_2O_5$ )设 3 个水平, 分别为 0(不施 P0)、90(P1)和 150 kg/hm<sup>2</sup>(P2), 锌肥( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ )设 3 个水平, 分别为 0(不施 Zn0)、30(Zn1)和 60 kg/hm<sup>2</sup>(Zn2), 共 9 个处理, 重复 3 次, 小区面积为 15 m<sup>2</sup> (3 m × 5 m)。

供试肥料品种为尿素(含 N 460 g/kg)、过磷酸钙(含  $P_2O_5$  97 g/kg)、氯化钾(含  $K_2O$  600 g/kg)和硫酸锌( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ )。肥料全部以撒施的方式作基肥施用。氮肥与钾肥的用量分别为 N 150 kg/hm<sup>2</sup> 和  $K_2O$  150 kg/hm<sup>2</sup>。供试花生品种为远杂 6, 种植方式为起垄种植, 垄宽 80 ~ 85 cm, 垄高 15 ~ 20 cm, 垄上播两行花生, 每穴播种 2 粒, 播种密度 18 万穴/hm<sup>2</sup>。于 2016 年 6 月 10 日播种, 9 月 29 日收获。试验期间其他田间管理措施按照一般丰产大田进行。

### 1.3 测定项目与方法

花生苗期(7 月 6 日)和花针前期(7 月 25 日), 每个处理选有代表性的 10 株花生, 花针后期(8 月 15 日)、结荚期(9 月 4 日)和成熟期(9 月 26 日), 每个处理采取有代表性的 5 株花生, 分根、茎、叶、花生仁和花生壳等部位, 于 105℃ 下杀青 15 min, 65℃ 下烘至恒重, 测定各部位的干物质量; 各样品粉碎后, 采用双酸( $v(HNO_3) : v(H_2O_2) = 4 : 1$ )微波消解法制备消解液, 用 ICP-MS(Agilent 7500a)测定消解液中 P、Zn 浓度。成熟期, 每个处理分别取 4 m<sup>2</sup> 进行收获、晾晒、称重计产。

### 1.4 数据处理

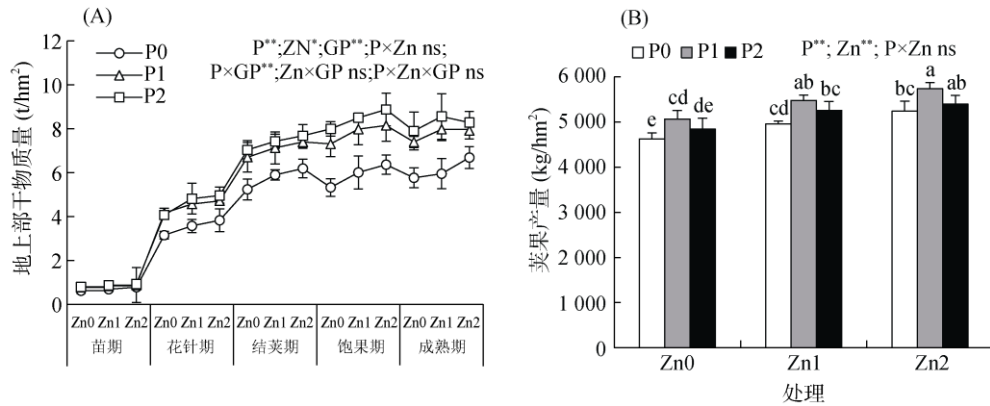
采用 SPSS16.0 软件对数据进行统计分析, 方差分析采用双因素和三因素有重复分析方法, 平均值多重比较采用 Duncan 新复极差法(显著性水平  $P < 0.05$ )。借助 Microsoft Excel 2013 进行作图。各指标的计算方法为: 植株养分积累量(mg) = 植株某部位养分含量 × 该部位干物质量; 养分收获指数(HI) = 收获期荚果中养分积累量/整株养分积累量 × 100%; 某部位养分吸收利用率(%, GRE) = (施肥区该部位某养分积累量 - 不施肥区该部位某养分积累量) / 肥料中养分量 × 100%。

## 2 结果与分析

### 2.1 磷锌配施对花生地上部生物量和荚果产量的影响

磷锌配施对花生地上部干物质质量的影响如图 1A 所示。双因素方差分析结果显示，磷肥、锌肥及磷肥×生育期互作对地上部干物质质量影响显著；磷肥×

锌肥互作、锌肥×生育期互作和磷肥×锌肥×生育期互作对地上部干物质质量影响不显著。在整个生育期，相同锌用量下，增施磷肥提高了地上部干物质质量；相同磷用量下，增施锌肥地上部干物质质量也呈增加趋势。相同磷、锌用量下，不同生育期相比，地上部干物质质量在苗期至花针后期快速增加，在结荚期至成熟期趋于稳定。



(P: 磷肥; Zn: 锌肥; GP: 生育期; ns、\*和\*\*分别表示差异不显著( $P>0.05$ )、显著( $P<0.05$ )和极显著( $P<0.01$ ), 下同; 柱状图上不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ))

图 1 磷锌配施对花生地上部干物质质量和荚果产量的影响

Fig.1 Shoot dry matter weights and peanut yields under combined application of phosphorus and zinc

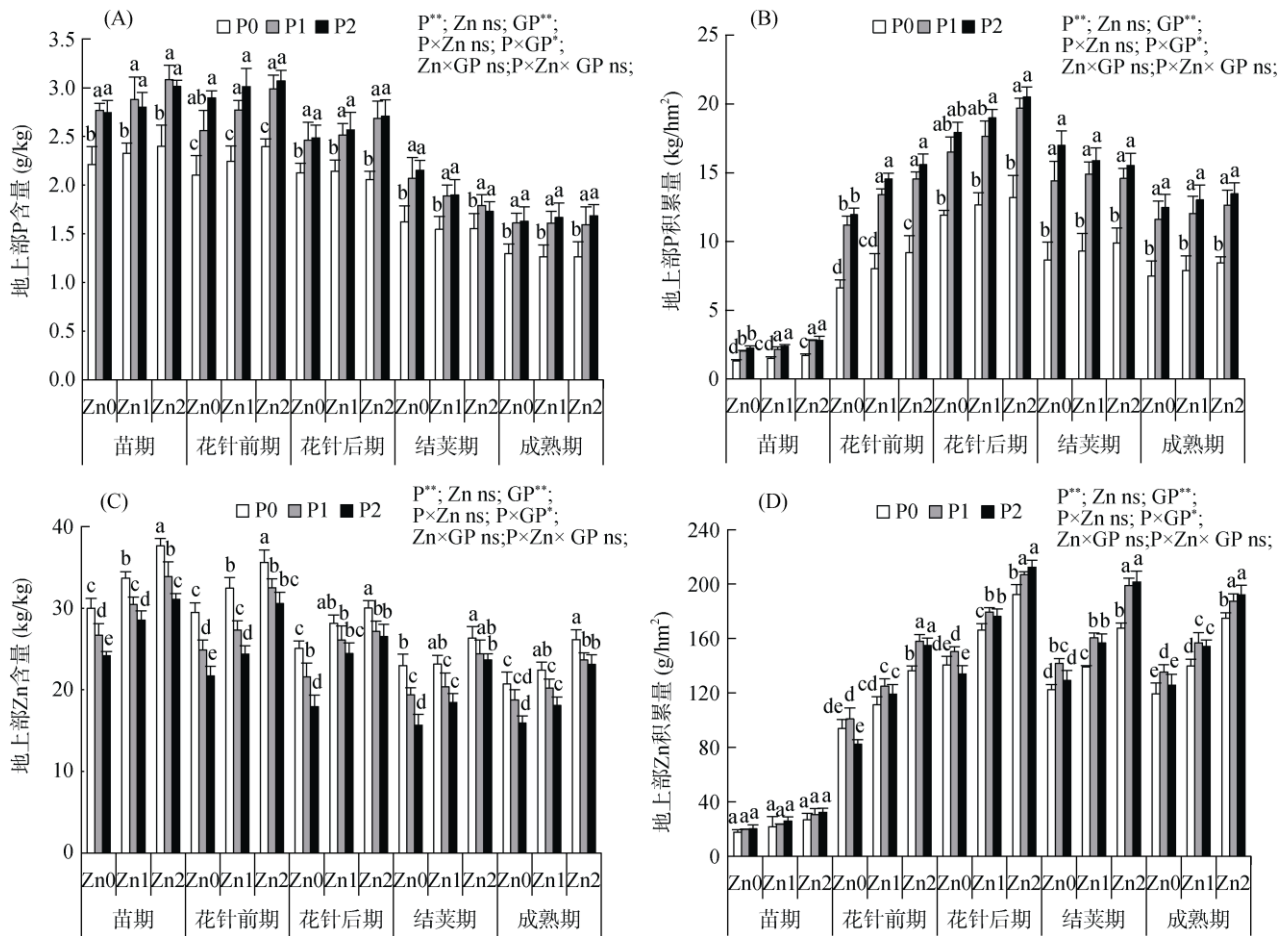
磷锌配施对花生荚果产量的影响如图 1B 所示。双因素方差分析结果显示，磷肥和锌肥对花生荚果产量影响显著；而磷肥×锌肥互作对荚果产量影响不显著。相同锌用量下，与不施磷肥相比，P1 处理显著提高了花生荚果产量，P2 处理对花生增产差异不显著。相同磷用量下，Zn1 和 Zn2 处理比 Zn0 处理显著提高了花生荚果产量，Zn1 与 Zn2 处理间差异不显著。

### 2.2 磷锌配施对花生地上部磷、锌含量和积累量的影响

花生不同生育期地上部磷含量和积累量对磷锌配施的响应如图 2A、2B。双因素方差分析结果表明，磷肥、生育期及磷肥×生育期互作对地上部磷含量和积累量影响显著；而锌肥、磷肥×锌肥互作、锌肥×生育期互作、磷肥×锌肥×生育期互作对地上部磷含量和积累量影响不显著。在整个生育期，无论是否施用磷肥地上部磷含量随生育期的推进逐渐降低。相同锌用量下，与不施磷相比，施用磷肥显著增加整个生育期地上部磷含量和积累量，但 P1 与 P2 两个施磷量处理间无显著差异。相同磷用量下，不同锌肥供应水平对整个生育期地上部磷含量和生育后期磷积累量均无显著影响，但施锌肥显著增加了花生苗期和花

针前期地上部的磷积累量。

从图 2C、2D 可以看出，磷肥、锌肥、生育期及磷肥×锌肥互作显著影响地上部锌含量和积累量；磷肥×生育期互作仅显著影响地上部锌积累量，而锌肥×生育期互作、磷肥×锌肥×生育期互作对地上部锌含量和积累量影响不显著。无论是否施用锌肥地上部锌含量随生育期的推进也逐渐降低。关于施磷肥对地上部锌含量的影响，总体上，施用磷肥显著降低整个生育期地上部锌含量，但降低程度因生育期和锌施用水平不同而异。具体表现为，相同锌用量下，Zn0 水平下，整个生育期内不同施磷水平对锌含量的影响为  $P2<P1<P0$ ；Zn1 水平下，花生生育前期(苗期和花针前期)为  $P2<P1<P0$ ，花针后期至成熟期为  $P2\approx P1<P0$ ；Zn2 水平下， $P2\approx P1<P0$ 。可见，在花生苗期、花针前期及不施锌肥时，花生地上部锌含量随施磷量的增加逐步显著降低，而在花生花针后期、结荚期和成熟期及施锌肥时，增施磷肥对其地上部锌含量的降低作用减弱。与锌含量变化不同，相同锌用量下，施磷对花生地上部锌积累量的影响，在 Zn0 水平下为  $P1>P2\approx P0$ ；Zn1 和 Zn2 水平下为  $P2\approx P1>P0$ (图 2D)。相同磷用量下，增施锌肥显著增加整个生育期地上部锌含量和积累量。



(图中图柱上放不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异达  $P < 0.05$  显著水平)

图 2 磷锌配施对花生不同生育期地上部磷、锌含量和积累量的影响

Fig. 2 Concentrations and accumulation of phosphorus and zinc in peanut shoots at different growing stages under combined application of phosphorus and zinc

### 2.3 磷锌配施对花生壳和花生仁中磷、锌含量和积累量的影响

从表 1 可以看出, 磷肥对花生壳和花生仁中磷锌含量与积累量影响均显著; 锌肥对花生壳和花生仁中磷含量影响不显著, 对磷积累量、锌含量和锌积累量影响显著; 磷肥  $\times$  锌肥互作对花生壳和花生仁中磷锌含量和积累量影响均不显著。关于磷锌配施对花生壳和花生仁中磷含量和积累量的影响, 相同锌用量下, P1 和 P2 处理比 P0 处理显著提高花生壳和花生仁中磷含量, 除 Zn0 处理外, P1 与 P2 处理间差异不显著; 与磷含量变化规律一致, 花生壳和花生仁磷积累量在磷肥施与不施之间差异显著, 两个施磷量间差异不显著。相同磷用量下, 花生壳和花生仁磷含量在 3 个锌处理水平间无显著差异; Zn1 和 Zn2 处理比 Zn0 处理显著增加花生壳和花生仁磷积累量, 且 Zn1 与 Zn2 处理间差异不显著。

关于磷锌配施对锌含量和积累量的影响, 相同锌

用量下, 施磷处理显著降低了花生壳和花生仁中锌含量, P2 与 P1 处理相比也有降低花生壳和花生仁中锌含量的作用, 但差异不显著; 不同于锌含量, 相同磷用量下, 与不施磷相比, 仅 P2 处理显著降低了花生壳和花生仁中锌积累量。

### 2.4 磷锌配施对花生荚果磷、锌利用的影响

从表 2 可以看出, 磷肥、锌肥及二者互作对磷和锌收获指数影响显著, 对锌利用率影响不显著; 磷利用率仅受施磷影响显著。相同锌用量下, 增施磷肥显著降低磷收获指数和磷利用率; 施磷条件下, Zn2 比 Zn0 处理显著提高了花生荚果磷收获指数和磷利用率, 说明高锌促进了花生体内的磷向荚果中转运。对于锌利用情况, 相同锌用量下, 施磷比不施磷显著降低锌收获指数, 对锌利用率无显著影响。相同磷用量下, Zn2 比 Zn0 处理显著降低了锌收获指数; Zn2 与 Zn1 处理相比, 锌利用率的降低程度随磷用量增加逐渐加大, 在 P2 处理下差异达显著水平。

表 1 花生壳和花生仁中磷、锌含量和积累量

Table 1 Concentrations and accumulation of phosphorus and zinc in peanut shells and kernels under combined application of phosphorus and zinc

处理	P 含量 (g/kg)		P 积累量 (kg/hm <sup>2</sup> )		Zn 含量 (mg/kg)		Zn 积累量 (g/hm <sup>2</sup> )		
	花生壳	花生仁	花生壳	花生仁	花生壳	花生仁	花生壳	花生仁	
P0	Zn0	0.42 ± 0.04 d	3.47 ± 0.09 b	0.49 ± 0.05 e	12.03 ± 0.30 e	16.47 ± 1.01 d	36.45 ± 0.92 cd	19.04 ± 1.16 e	126.45 ± 3.18 d
	Zn1	0.46 ± 0.05 cd	3.57 ± 0.20 b	0.56 ± 0.06 de	13.27 ± 0.75 d	22.05 ± 0.90 b	38.89 ± 0.66 b	25.84 ± 0.62 c	147.50 ± 2.45 b
	Zn2	0.47 ± 0.04 cd	3.34 ± 0.13 b	0.62 ± 0.06 cd	13.33 ± 0.51 d	25.99 ± 2.36 a	40.99 ± 1.05 a	34.05 ± 1.77 a	161.10 ± 4.12 a
P1	Zn0	0.50 ± 0.03 bc	4.28 ± 0.19 a	0.63 ± 0.04 cd	16.26 ± 0.74 c	14.03 ± 0.23 e	33.69 ± 0.78 e	17.77 ± 0.29 e	127.98 ± 2.96 d
	Zn1	0.54 ± 0.01 ab	4.35 ± 0.12 a	0.74 ± 0.02 ab	17.89 ± 0.51 ab	19.46 ± 0.93 c	36.05 ± 0.98 cd	26.65 ± 1.22 bc	148.11 ± 4.02 b
	Zn2	0.55 ± 0.04 ab	4.32 ± 0.20 a	0.81 ± 0.06 a	18.60 ± 0.84 a	22.98 ± 0.56 b	38.13 ± 1.03 bc	32.96 ± 0.51 a	164.10 ± 4.45 a
P2	Zn0	0.57 ± 0.01 a	4.33 ± 0.11 a	0.69 ± 0.01 bc	15.73 ± 0.42 c	13.84 ± 1.26 e	32.35 ± 1.13 e	15.57 ± 1.01 f	117.53 ± 4.12 e
	Zn1	0.58 ± 0.04 a	4.43 ± 0.09 a	0.76 ± 0.05 ab	17.48 ± 0.37 b	17.65 ± 1.14 cd	35.64 ± 1.20 d	23.20 ± 1.15 d	140.55 ± 4.73 c
	Zn2	0.58 ± 0.02 a	4.46 ± 0.04 a	0.78 ± 0.03 a	18.06 ± 0.16 ab	21.44 ± 1.48 bc	37.29 ± 0.80 c	28.93 ± 0.70 b	150.96 ± 3.24 b
P	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Zn	ns	ns	**	**	**	**	**	**	**
P×Zn	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注：表中同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异达  $P < 0.05$  显著水平，下表同。

### 3 讨论

施磷显著增加花生地上部干重和荚果产量,但花生荚果产量随施磷量的提高略有降低,与 Bai 等<sup>[12]</sup>和 Zhang 等<sup>[3]</sup>研究结果一致,表明较高的磷用量并不能一直增加花生荚果产量,生产上应控制磷用量过大。土壤有效磷含量是影响作物产量的重要因素<sup>[11]</sup>, Bai 等<sup>[12]</sup>研究表明,土壤有效磷含量在 10.9 ~ 21.4 mg/kg 范围是获得作物最佳产量的关键水平。本试验供试土壤有效磷含量背景值为 17.2 mg/kg,虽属中等磷水平,但由于花生相对于其他作物需磷量较多<sup>[10]</sup>,所

以施磷(90 kg/hm<sup>2</sup>)可显著提高花生荚果产量。当磷用量达到 150 kg/hm<sup>2</sup>时,花生产量有降低的趋势,主要原因有两点:一是施磷量为 150 kg/hm<sup>2</sup>时,土壤有效磷含量可能偏离了花生获得最佳产量的土壤有效磷水平;二是营养生长过剩在一定程度上阻碍生殖器官的生长<sup>[13]</sup>,本研究也证实这一观点,即花生地上部的干物质质量随施磷量增加而提高(图 1)。练春兰等<sup>[5]</sup>研究发现在锌有效性低的土壤上,土施锌肥对作物增产效果较好。本研究供试土壤有效锌含量为 1.02 mg/kg,属潜在缺锌土壤<sup>[14]</sup>,因此,施锌肥对花生有增产作用。

表 2 磷锌配施对花生荚果磷、锌利用的影响

Table 2 Utilization of phosphorus and zinc by peanuts under combined application of phosphorus and zinc

处理	收获指数		养分利用率		
	P	Zn	P	Zn	
P0	Zn0	62.58 ± 0.59 ab	54.91 ± 0.70 a		
	Zn1	63.68 ± 1.34 a	53.81 ± 0.21 ab		2.65 ± 0.11 ab
	Zn2	62.93 ± 0.95 ab	52.72 ± 0.72 bc		2.54 ± 0.28 ab
P1	Zn0	58.60 ± 1.02 d	52.20 ± 0.75 c	10.76 ± 1.10 a	
	Zn1	60.29 ± 0.67 c	51.26 ± 0.50 de	11.75 ± 2.19 a	2.95 ± 0.77 ab
	Zn2	60.56 ± 0.95 c	51.02 ± 0.53 de	13.93 ± 3.36 a	2.65 ± 0.38 ab
P2	Zn0	56.01 ± 0.61 e	51.62 ± 1.05 cd	5.65 ± 1.04 b	
	Zn1	57.14 ± 0.54 de	50.30 ± 1.92 de	6.43 ± 0.92 b	3.08 ± 0.69 a
	Zn2	57.89 ± 0.24 d	48.44 ± 0.47 e	7.53 ± 0.70 b	2.45 ± 0.10 b
P	**	**	**	ns	
Zn	**	**	ns	ns	
P×Zn	**	**	ns	ns	

施磷往往会诱导植物锌缺乏,但关于产生这一现象的机制说法并不一致,主要存在以下几种观点:①AM 菌根真菌可提高作物锌的吸收<sup>[15-16]</sup>,施磷抑制了菌根真菌活力;②施磷改善了作物磷营养状况,促进作物根系发育和植株生长,产生生物稀释效应<sup>[8]</sup>;③高量施磷可使作物根部非选择性吸收大量磷,从而抑制了对锌的吸收<sup>[9,17]</sup>。本研究发现施磷对花生地上部干物质质量的增幅平均为 33.6%,而对其地上部锌含量降幅平均为 15.1%,说明施磷对花生地上部锌含量的降低作用可能主要是由生物稀释效应引起的,这与刘芳等<sup>[8]</sup>在小麦上的研究结果一致。施磷显著影响花生不同生育期地上部磷锌积累量(图 2),无论何种锌供应水平下,适量施磷(P1)均显著增加地上部磷含量和积累量,继续增加磷用量并未对地上部磷含量和积累量有明显影响。与磷元素不同,地上部锌积累量对施磷量的响应取决于锌供应水平:不施锌(缺锌)条件下,适量供磷(P1)促进花生地上部锌积累,高量供磷(P2)对地上部锌积累无明显影响,主要原因可能在于缺锌时高量供磷产生的花生地上部锌含量降低效应大于生物量增加效应,适量供磷处理则相反;施锌条件下,适量和高量供磷均显著增加地上部锌积累量,但两个磷供应量间差异不显著,可能与土壤补充锌肥后,增加了土壤锌的有效性,缓解了高量供磷对锌含量的降低作用有关<sup>[18]</sup>(图 2C)。

与地上部锌含量一致,施磷显著降低了花生壳和花生仁中锌含量,本研究结果与以往多数研究结果一致<sup>[4,17-19]</sup>。关于施磷对作物磷含量和积累量的影响,刘芳等<sup>[8]</sup>采用土培试验,认为施磷对小麦籽粒磷含量的影响取决于供磷水平,在低磷(P, <21.82 mg/kg)条件下,施磷降低了小麦籽粒磷含量,抑制地上部的磷向籽粒转运,高磷(P, 174.56 mg/kg)条件下,施磷提高了小麦籽粒磷含量,促进了地上部的磷向籽粒转运。施磷对作物体内磷含量影响与生产介质及植株部位有关,水培方式下,小麦籽粒中磷含量和吸收量显著增加<sup>[17]</sup>,地上部磷含量显著降低,根中磷含量无显著变化<sup>[2]</sup>;土培方式下,小麦籽粒中磷含量显著降低,地上部磷含量无显著变化<sup>[2]</sup>;不同于水培和土培等控制试验得到的结果,田间自然条件下,小麦籽粒中磷含量无显著变化<sup>[20]</sup>。可见,作物收获器官中施磷对作物体内磷元素的影响并不一致。本研究虽发现施磷对花生生育后期地上部和花生仁的磷含量和积累量无显著影响,但却增加了花生生育前期地上部和花生仁中磷积累量,其主要原因在于施磷提高了花生仁磷利用率,增加了磷收获指数,促进了地上部磷向

花生仁转运(表 2),加之施磷增加了花生仁干重,从而提高了其积累量。

## 4 结论

本试验条件下,相同锌用量下,施磷降低了花生地上部、花生壳和花生仁的锌含量和锌收获指数,磷-锌拮抗关系随施磷量增加和生育期的推进而削弱。施磷对花生锌积累量的影响取决于锌施用水平和花生生长部位:不施锌肥时,仅适量供磷显著促进了地上部锌积累,施锌肥时,适量供磷和高量供磷均显著促进了地上部锌积累;而无论土壤是否施磷,高量施磷降低了花生壳和花生仁锌积累量。相同磷用量下,增施锌肥促进了花生苗期和花针前期地上部磷积累,提高了成熟期花生壳和花生仁的磷积累量、磷收获指数和荚果磷利用率。因此,合理施用磷锌肥是提高花生磷锌积累和利用的重要保障。

## 参考文献:

- [1] Mousavi S R, Galavi M, Rezaei M. The interaction of zinc with other elements in plants: A review[J]. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2012, 4(24): 1881-1884.
- [2] Ova E A, Kutman U B, Ozturk L, et al. High phosphorus supply reduced zinc concentration of wheat in native soil but not in autoclaved soil or nutrient solution[J]. *Plant and Soil*, 2015, 393: 147-162.
- [3] Zhang W, Liu D Y, Li C, et al. Zinc accumulation and remobilization in winter wheat as affected by phosphorus application[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 155-161.
- [4] 李惠英,朱永官. 不同磷钾施肥量对大麦产量及其吸收的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(4): 51-53.
- [5] 练春兰,鲍士旦,史瑞和. 大麦磷钾相互关系的研究[J]. *土壤学报*, 1992, 29(3): 282-289.
- [6] Huang H G, Wang K, Zhu Z Q, et al. Moderate phosphorus application enhances Zn mobility and uptake in hyperaccumulator *sedum alfredii*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(5): 2844-2853.
- [7] 孙琴,倪吾钟,杨肖娥,等. 磷对超积累植物-东南景天生长和积累锌的影响[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(6): 818-824.
- [8] 刘芳,刘忠珍,刘世亮,等. 磷钾配施对石灰性土壤磷锌有效性及小麦对其吸收分配的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43(4): 929-933.
- [9] 武际,尹恩,郭熙盛. 不同磷钾组合对小麦磷钾含量、积累与分配的影响[J]. *土壤通报*, 2010, 41(6): 1444-1448.
- [10] 黄健安,李金培. 瘦瘠赤红壤上花生对营养要素的敏感性[J]. *花生科技*, 1998, (2): 6-9.
- [11] 孙波,严浩,施建平. 基于红壤肥力和环境效应评价的油菜-花生适宜施肥量[J]. *土壤*, 2007, 39(2): 222-230.

- [12] Bai Z H, Li H G, Yang X Y, et al. The critical soil p levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372: 27–37.
- [13] 许小伟, 樊剑波, 陈晏, 等. 有机无机肥配施对红壤旱地花生生理特性、产量及品质的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 174–182.
- [14] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. *中国农业科学*, 1994, 27(1): 30–37.
- [15] Watts-Williams S J, Patti A F, Cavagnaro T R. Arbuscular mycorrhizas are beneficial under both deficient and toxic soil zinc conditions[J]. *Plant and Soil*, 2013, 371(1/2): 299–312.
- [16] 李晓林, 曹一平. VA 菌根菌丝对土壤磷锌的吸收[J]. *土壤*, 1991, 23(5): 257–262.
- [17] Yang X W, Tian X H, Lu X C, et al. Impacts of phosphorus and zinc levels on phosphorus and zinc nutrition and phytic acid concentration in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(13): 2322–2328.
- [18] 金彩霞, 韩晓增, 王守宇, 等. 碳酸盐草甸土玉米配合施用磷锌效应研究[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2003, 19(2): 138–141.
- [19] Zhang Y Q, Deng Y, Chen R Y, et al. The reduction in zinc concentration of wheat grain upon increased phosphorus-fertilization and its mitigation by foliar zinc application[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361(1/2): 143–152.
- [20] 买文选, 田霄鸿, 陆欣春, 等. 磷锌肥配施对冬小麦籽粒锌生物有效性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 19(6): 1243–1249.