

不同施锌方式下外源磷对花生根系形态、叶绿素含量及产量的影响

索炎炎¹, 张翔^{1*}, 司贤宗¹, 李亮¹, 余琼¹, 程培军¹, 邱岭军¹, 余辉²

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州, 450002;

2. 正阳县花生研究所, 河南 正阳, 463600)

摘要: 为明确花生高产高效适宜的磷-锌配施模式及其可能机制, 通过田间试验, 研究了不同施锌方式下外源磷对花生根系形态、叶绿素含量及产量的影响。结果表明: 与对照相比, 施磷促进了花生根系和地上部生长, 提高了叶片叶绿素含量, 增加了产量及产量构成因素, P45、P90、P135和P180处理的产量分别比不施磷(P0)平均增加36.8%、60.7%、48.3%和39.2%。不同施锌方式对花生根系形态特征和地上部营养生长指标无显著影响, 但对单株饱果数、单株饱果重和叶片叶绿素含量影响显著, 叶面喷锌(Znf)和土壤施锌(Zns)处理的花生产量分别比不施锌平均增加6.4%和10.1%, 表明土壤施锌方式增产效果较好。施锌方式与施磷量交互效应对花生根系和地上部生长、产量及产量构成因素无显著影响, 各指标在ZnsP90处理达到最大。综上, 在砂姜黑土区花生生产上, 土壤施用90 kg P₂O₅/hm²配合30 kg ZnSO₄·7H₂O/hm²改善了花生根系形态特征, 提高了光合特性, 是利于花生生长发育和高产的适宜磷肥和锌肥施用方式。

关键词: 施锌方式; 磷; 花生; 根系形态; 光合特性

中图分类号: S565.2; S143.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-9084(2021)04-0664-09

Effects of exogenous phosphorus on root morphology, chlorophyll content and yield of peanut under different zinc application methods

SUO Yan-yan¹, ZHANG Xiang^{1*}, SI Xian-zong¹, LI Liang¹, YU Qiong¹, CHENG Pei-jun¹,
QIU Ling-jun¹, YU Hui²

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

Abstract: In order to clarify the suitable phosphorus-zinc combination application mode and its possible mechanism for peanut high yield and efficiency, the field experiments was conducted to study the effects of exogenous phosphorus rates on root morphology, chlorophyll content and yield of peanut under different zinc application methods. The results showed that the phosphorus application promoted the roots and shoots growth of peanut, improved the SPAD values, and increased the yield and its components. Peanut yields under P45, P90, P135, and P180 treatments averagely increased by 36.8%, 60.7%, 48.3% and 39.2% compared with non-phosphorus (P0), respectively. The zinc application method had no significant effect on root morphological characteristics and above-ground vegetative growth of peanut, but had significant effects on the number of fruit filled per plant, fruit weight per plant, and chlorophyll content of leaves. The yield averagely increased by 6.4% and 10.1% under foliar (Znf) and soil applied Zn fertilizers (Zns), respectively, suggesting having higher yield under soil zinc application. It was observed that the root and shoot growth, yield and its components of peanut was not significantly affected by the interaction between phosphorus fertilizer and Zn application methods, the study parameters were the highest under

收稿日期: 2020-03-03

基金项目: 河南省重大科技攻关项目(192102110010); 国家重点研发计划(2018YFD0201000); 河南省花生产业技术体系耕作栽培岗位(S2012-05-G02); 河南省农业科学院优青项目(2018YQ15)

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

* 通讯作者: 张翔(1966-), 男, 河南遂平人, 研究员, 主要从事植物营养与施肥技术研究, E-mail: zxtf203@163.com

ZnSP90 treatment. In summary, in lime concretion black soil area of peanut production, soil applied 90 kg P_2O_5/hm^2 combined with 30 kg $ZnSO_4 \cdot 7H_2O/hm^2$ improved the root morphological characteristics and photosynthetic characteristics of peanut, which was a suitable phosphorus and zinc fertilizer application method for peanut growth and high yield.

Key words: zinc application method; phosphorus; peanut; root morphology; photosynthetic characteristics

花生富含油脂、蛋白、膳食纤维及微量营养素,具有很高的营养价值,是我国重要的经济和油料作物之一^[1]。近年来,花生种植面积不断增加,2018年我国花生种植面积约462.0万 hm^2 ,产量高达1733万吨,成为世界上最大的花生生产国^[2]。合理施用磷肥是促进花生优质高产的重要措施之一,磷肥可通过改善花生根系形态、叶片生理特性和光合特性,进而促进花生生长,提高花生产量和品质^[3-6]。如郑亚萍等^[5]研究认为,根系长度尤其是细根随施磷量增加先增加后降低,而根系表面积和体积与施磷量关系因品种而异。路亚等^[4]研究表明,土壤充足供磷时,追施叶面磷肥虽促进了结荚期和饱果期花生根系生长,但易引起植株早衰,抑制收获期根系生长,不利于花生产量提高。有研究表明作物根系形态对施磷的响应也受土壤类型的影响^[7]。可见,花生根系形态对外源磷的响应因花生品种、土壤供磷水平及土壤类型而异。

锌(Zn)是植物体内多种酶的组成成分,参与生长素(IAA)、叶绿素合成及碳水化合物转化^[8]。缺锌显著降低花生叶片抗氧化酶活性,抑制叶片光合效能,影响植物根系和地上部生长发育及增产^[9-11]。P-Zn存在复杂的交互作用,磷锌合理配施能更好地改善作物锌营养、促进植株生长、提高产量和品质^[12,13]。笔者前期研究发现,与单独施用相比,土壤中30~60 kg $ZnSO_4 \cdot 7H_2O/hm^2$ 锌肥配施90 kg P_2O_5/hm^2 磷肥处理明显提高了花生的抗氧化能力,增加了单株饱果数和饱果重,提高了花生产量和品质^[12]。Aboyeji等^[14]认为土壤中8 kg Zn/ hm^2 配施80 kg P_2O_5/hm^2 磷肥可促进花生生长,提高花生产量,而配施120 kg P_2O_5/hm^2 磷肥造成花生营养生长过旺,降低了花生产量。Gobarah等^[15]研究认为花生叶面喷锌1.0 g Zn/L与土施60 kg P_2O_5/hm^2 配施也促进了花生生长,提高了花生产量和品质。可见,无论何种锌施用方式,施锌均提高了花生的产量和品质。关于锌肥不同施用方式在我国主要粮食作物小麦、玉米和水稻上的增产效果,王孝忠等^[16]认为,无论是小麦、玉米还是水稻,土施锌肥处理均比叶面喷施和种子处理的增产效果好。然而,

哪种锌肥施用方式对花生增产效果较好,不同施锌方式下外源磷供应水平对花生生长发育、根系形态和光合特性的影响还未见系统性研究,还有待进一步探讨。

砂姜黑土是河南省花生生长的主要土壤类型之一,在豫南花生主产区,该土壤类型占花生总种植面积的40%以上,普遍存在缺锌不缺磷现象^[17]。为此,本文在砂姜黑土区的缺锌土壤上,通过研究不同施锌方式(土壤施锌和叶面喷锌)下,外源磷供应水平对花生生长发育、根系形态和光合特性的影响,明确该地区花生高产高效的最佳磷锌配施模式,旨在为花生合理施用磷肥和锌肥提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况与材料

试验于2019年6~10月在正阳县兰青乡大余村(32°27'28"N, 114°20'29"E)进行。供试土壤类型为砂姜黑土,质地为粘壤。本试验0~20 cm耕层土壤基本理化性状为pH 4.95、全氮1.10 g/kg、速效氮163.0 mg/kg、有效磷29.37 mg/kg、速效钾73.67 mg/kg、有机质18.57 g/kg, DTPA-Zn 0.51 mg/kg远低于酸性土壤有效锌缺锌临界值(DTPA-Zn 1.0~1.5 mg/kg)^[18]。

1.2 试验设计

试验采用裂区试验设计,主处理为施锌方式,分别为不施锌(缺锌,对照),叶面喷锌(0.2% m/V 3 kg/ hm^2)和土施锌肥(30 kg $ZnSO_4 \cdot 7H_2O/hm^2$)3种方式,其中叶面喷锌浓度为0.2%,为生产研究中常用的锌处理浓度^[19,20],土施30 kg $ZnSO_4 \cdot 7H_2O/hm^2$ 为课题组前期研究的结果^[12];副处理为施磷量,分别为0、45、90、135和180 kg/ hm^2 (以 P_2O_5 计)5个水平,共15个处理。每个处理有3个重复,每个小区面积为15 m^2 (长5 m×宽3 m),小区随机区组排列。土壤施锌是在翻地前,将 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 配制成溶液均匀喷施在小区土壤表面,以确保施用均匀;叶面施锌是在花生花针期(2019年7月12日)至结荚期(2019年8月2日),于下午6:00以后,用喷壶每7 d喷施一次

0.2%的 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 溶液,每次锌用量为 1 kg/hm^2 ,连续喷施3次。

以当地普遍种植的花生品种远杂9102为试验材料,采用起垄种植方式,垄宽约80 cm,垄高约18 cm,垄上播两行花生,行距约25 cm,株距约15 cm,每穴播种2粒种子,播种密度为 18.0 万穴/hm^2 ,6月3日播种,9月25日收获。各处理氮(N)和钾用量(K_2O)均为 120 kg/hm^2 。供试氮、钾肥料品种分别为尿素(含N 46%)和氯化钾(含 K_2O 60%),锌肥品种为分析纯七水硫酸锌($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, 99.5%)。由于重过磷酸钙由磷酸处理磷矿粉制成,先用硫酸处理磷矿粉,生成磷酸和石膏,然后将石膏($CaSO_4$)分离除去,使磷酸浓缩,再加入适量磷矿物制成,含有痕量的钙素,因此,选用重过磷酸钙作为磷肥品种。氮磷钾肥料作基肥一次性施入土壤。其它田间管理按照一般丰产大田管理。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系形态的测定 于花生饱果期(8月31号),每处理选取有代表性的3穴(6株)花生,采用田间挖取剖面法^[21],在每个小区内挖取一个长25 cm(行距)×宽15 cm(株距)×深30 cm土块,将土块内的根系全部挖出,然后用流水缓缓冲洗干净,冲洗时在根系下方放置一个100目的筛子以防止脱落的根系被水冲走。然后用吸水纸吸干根系表面水分,从中选取4株生长一致的花生根系,用EPSON Perfection V800/V850扫描仪对根系样品进行扫描获取数字化图像,用WinRHIZO根系分析系统(Regent公司,加拿大)解析图像,获得花生总根长、根系表面积、根系体积及根尖数。

1.3.2 叶绿素的测定 花生饱果期,利用SPAD-502型手持式叶绿素仪,每个处理随机取30片完全新展开叶进行SPAD值测定,然后取平均值。

1.3.3 考种与计产 花生成熟时,每个处理分别取生长一致有代表性的10株考查农艺性状(主茎高、侧枝长、总分枝数)和经济性状(单株饱果数、单株饱果重、百果重、出仁率),并分小区单独收获,晾晒、风干后,称重计产。

1.4 数据处理与分析

所有数据在DPS7.5和SPSS 22.0软件中进行统计分析,方差分析采用双因素有重复分析,平均值多重比较采用LSD最小显著差异法(显著性差异 $P < 0.05$),采用曲线估计进行一元二次回归分析。采用Microsoft Excel 2007和Origin 8.5软件整理数据和作图。

2 结果与分析

2.1 不同施锌方式下外源磷对花生根系形态的影响

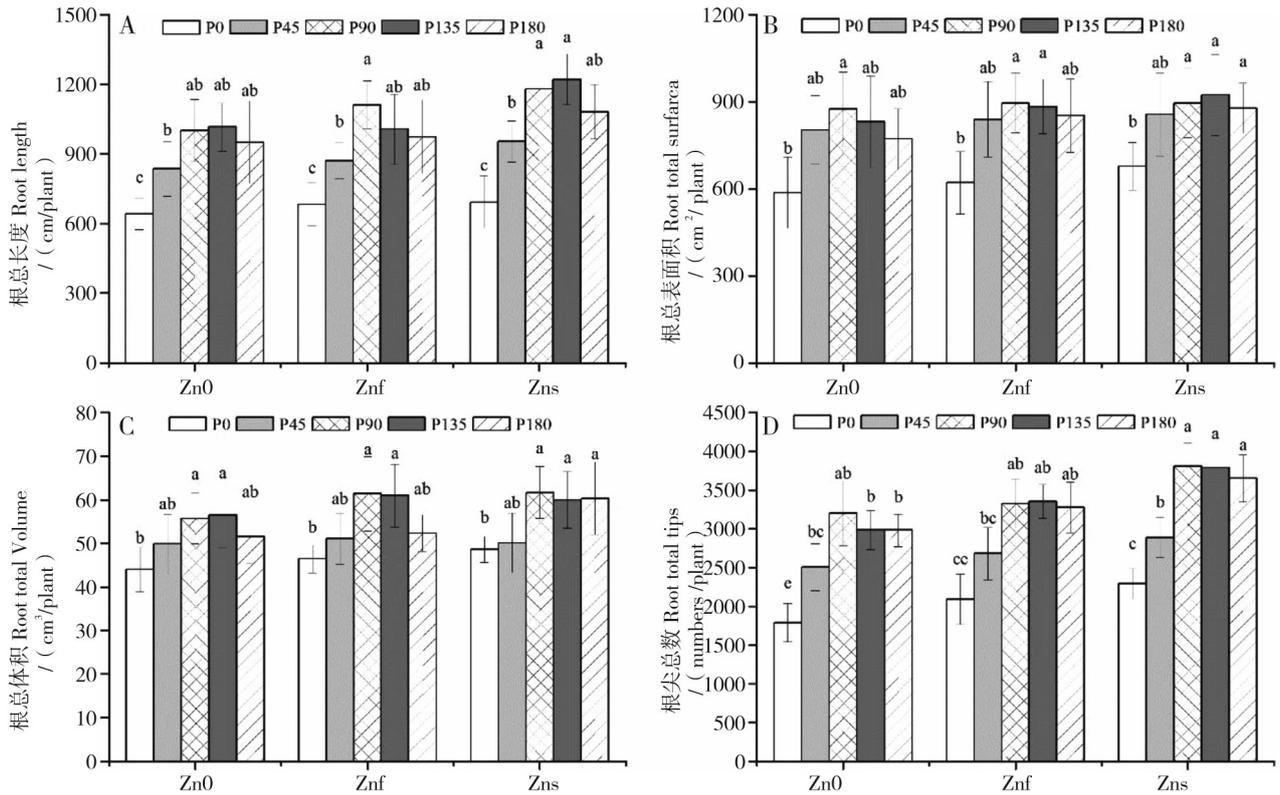
相同锌施用方式下,施磷比不施磷提高了花生根系总长度、根系总表面积、根系总体积和根系体积,0~90 $\text{kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$ 用量范围内,花生根系4个形态指标随施磷量的增加不断增大,90 $\text{kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$ 时基本达到最大,135 $\text{kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$ 时保持稳定,180 $\text{kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$ 时出现不同程度的降低(图1)。不施锌、叶面喷锌和土壤施锌3种施锌方式下P45、P90、P135和P180处理根系总长度分别比对照(P0)平均增加31.9%、63.1%、60.8%和49.1%(图1A),根系总表面积分别平均增加32.7%、41.8%、39.9%和32.7%(图1B),根系总体积分别平均增加8.9%、28.6%、27.8%和18.0%(图1C),根尖总数分别平均增加31.4%、68.1%、64.1%和60.9%(图1D)。可见, P_2O_5 用量达90 kg/hm^2 时较好地促进了花生根系生长,继续增加磷用量对花生根系生长的促进作用减弱或有抑制作用。

相同磷用量下,施锌可提高花生根系各形态指标,叶面喷锌和土壤施锌处理的花生根系总长度分别比不施锌平均增加4.7%和14.9%(图1A),根系总表面积平均增加5.9%和9.6%(图1B),根系总体积平均增加5.5%和8.9%(图1C),根系根尖数平均增加10.1%和22.5%(图1D)。可见,两种施锌方式均在一定程度上促进了花生根系生长,以土壤施锌处理的效果较好。

2.2 不同施锌方式下外源磷对花生叶片叶绿素含量的影响

相同锌施用方式下,施磷比不施磷显著增加花生叶片SPAD值,随着施磷量的增加,花生叶片SPAD值先增加后降低,在 P_2O_5 用量90 kg/hm^2 时达到最大(图2)。P45、P90、P135和P180处理花生叶片SPAD值分别比对照P0增加13.3%~15.2%、25.4%~31.2%、22.8%~25.6%和11.0%~14.7%,分别平均增加14.0%、28.7%、24.3%和13.0%。可见,合理增施磷肥可提高花生叶片叶绿素含量,提高其光合能力,为花生产量的提高提供物质基础。

相同磷用量下,施锌比不施锌提高了花生饱果期叶片SPAD值,土壤施锌处理的花生叶片SPAD值稍高于叶面施锌(图2)。叶面喷锌处理花生叶片SPAD值比不施锌显著或不显著增加4.6%~9.9%,平均增加7.4%;土壤施锌处理花生叶片SPAD值比不施锌显著增加9.2%~15.2%,平均增加12.6%。可见,施锌促进了花生叶片叶绿素的合成,且以土

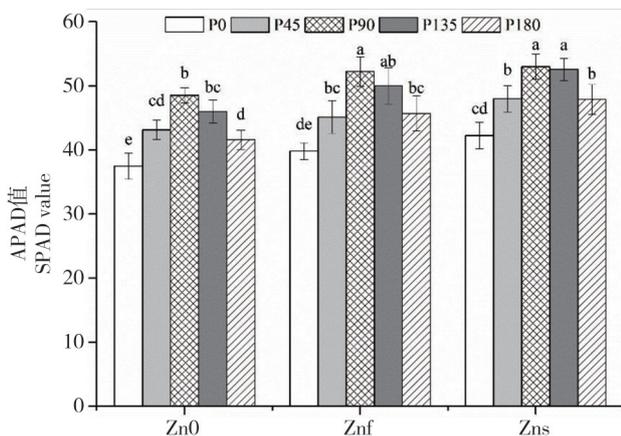


注:Zn0为不施锌,Zns为土壤施锌,Znf为叶面喷锌。柱上不同小写字母表示不同处理间差异达5%显著水平

Note: Zn0 represents no Zn application, ZnF represents foliar Zn application, ZnS represents soil Zn application. Different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ among different treatments. Same as below

图1 不同施锌方式下外源磷对花生根系形态特征的影响

Fig. 1 Effect of P application rates on root morphology characteristics of peanut under different Zn application methods



注:Zn0为不施锌,Zns为土壤施锌,Znf为叶面喷锌。柱上不同小写字母表示不同处理间差异达5%显著水平

Note: Zn0 represents no Zn application, ZnF represents foliar Zn application, ZnS represents soil Zn application. Different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ among different treatments. Same as below

图2 不同施锌方式下外源磷对花生饱果期叶片SPAD值的影响

Fig. 2 Effect of P application rates on leaves SPAD values of peanut in podding period under different Zn application methods

壤施锌的提高效果较好。另外,不难发现,土壤施锌方式下P135和P180处理的花生叶片SPAD值高于或相当于Zn0P90处理,表明施用锌肥缓解了磷肥施用过多对花生光合性能的抑制作用。

2.3 不同施锌方式下外源磷对花生农艺性状的影响

双因素方差分析结果显示,施磷量对花生主茎高、第一侧枝长和总分枝数影响极显著;施锌方式及施锌方式×施P量互作对花生3个农艺性状指标影响不显著(表1)。相同锌施用方式下,施磷比不施磷显著提高了花生主茎高和第一侧枝长,在0~90 kg P_2O_5/hm^2 范围内,随着磷用量的增加,花生植株的主茎高和第一侧枝长显著增加,继续增施磷肥对花生主茎高和第一侧枝长有增加趋势,但两指标在三种施磷量间无显著差异;施磷比不施磷也增加了花生分枝数,但不同施磷处理间花生总分枝数无显著差异。相同磷用量下,施锌可在一定程度上促进花生生长,施锌与不施锌相比,花生主茎高、第一侧枝长和分枝数均无显著差异。可见,合理施磷显著促进花生营养生长,施锌对花生营养生长的促进作用

表 1 不同施锌方式下外源磷对花生主要农艺性状的影响

Table 1 Effect of P application rates on main agronomic traits of peanut under different Zn application methods

处理 Treatment	主茎高 Main stem height /cm	第一侧枝长 Lateral branch length /cm	总分枝数 Total branch number
Zn0P0	20.5 d	24.1 e	7.0 c
Zn0P45	29.2 c	32.7 c	9.0 ab
Zn0P90	35.0 b	38.3 ab	9.0 ab
Zn0P135	35.7 b	38.5 a	9.0 ab
Zn0180	38.9 a	40.4 a	9.3 a
ZnfP0	23.0 d	26.7 de	7.7 bc
ZnfP45	29.5 c	33.3 c	10.3 a
ZnfP90	34.8 b	39.0 a	10.0 a
ZnfP135	35.9 b	38.5 a	9.3 a
ZnfP180	37.7 ab	39.8 a	10.0 a
ZnsP0	23.3 d	27.7 d	7.7 bc
ZnsP45	31.3 c	35.5 bc	9.0 ab
ZnsP90	35.2 b	38.1 ab	9.3 a
ZnsP135	35.0 b	38.6 a	9.7 a
ZnsP180	38.1 ab	39.0 a	9.7 a
双因素方差分析 Two-way analysis of variance (P)			
施 Zn 方式 Zn application methods	0.825	0.342	0.066
施 P 量 P application rate	<0.0001	<0.0001	<0.0001
施 Zn 方式×施 P 量 Zn application methods×P application rate	0.199	0.295	0.913

十分有限。

2.4 不同施锌方式下外源磷对花生产量及产量构成因素的影响

双因素方差分析结果显示,施锌方式对花生单株饱果数、单株饱果重及产量影响显著或极显著;施磷量对花生产量及其构成因素影响均极显著;施锌方式×施 P 量互作对花生产量及其构成因素影响不显著(表 2)。相同施锌方式下,施磷比不施磷可不同程度地提高花生植株单株饱果数、单株饱果重、百果重和出仁率,随着磷用量的增加这 4 个产量构成因素指标基本呈先增加后降低的趋势。不施锌、叶面喷锌和土壤施锌条件下 P45、P90、P135 和 P180 处理单株饱果数分别比对照(P0)平均增加 36.8%、60.7%、48.3% 和 39.2%,单株饱果重分别平均增加 31.8%、65.4%、56.8% 和 48.0%,百果重分别比 P0 平均增加 5.7%、11.5%、7.1% 和 5.2%,出仁率平均增加 10.8%、18.9%、16.8% 和 15.7%。可见,90 kg P₂O₅/hm² 处理时花生产量的 4 个构成因素增幅最大,其中单株饱果重与单株饱果数增幅明显高于百果重和出仁率,说明施磷可能主要通过增加单株饱果数和单株饱果重来提高花生产量。施磷比不施磷处理显著增加花生荚果产量,不同磷处

理间以 90 kg P₂O₅/hm² 处理的花生产量最高,继续增施磷肥花生有所减产,施磷量 180 kg P₂O₅/hm² 时花生减产显著,表明过量施磷不利于花生产量提高。

相同磷用量下,施锌不同程度地提高了花生产量及其产量构成因素,其中土壤施锌与叶面施锌差异不显著(表 2)。叶面喷锌和土壤施锌处理的花生单株饱果数分别比不施锌平均增加 11.3% 和 16.3%,单株饱果重平均增加 20.1% 和 25.3%,百果重平均增加 0.5% 和 1.0%,出仁率平均增加 1.5% 和 1.6%,从而使花生产量平均增加 6.4% 和 10.1%。可见,施锌增加了花生产量及其构成因素,土壤施锌处理的增产效果优于叶面喷锌处理。

2.5 不同施锌方式下外源磷与花生根系形态指标、叶绿素含量和产量关系

表 3 为根长、根表面积、根体积、根尖数、SPAD 值和产量与施磷量之间的关系,可以看出,除叶面喷锌处理的根长、根体积及土壤施锌处理的根体积外,一元二次方程可较好地模拟施磷量与其他根系形态指标之间的关系(0.950<R²<0.992, 0.008<P<0.050);无论何种施锌条件下,一元二次方程均可较好地模拟施磷量与花生 SPAD 值和产量的关系(0.952<R²<0.987, 0.013<P<0.048)。根系形态指

表2 不同施锌方式下外源磷对花生产量及其构成因素的影响

Table 2 Effect of P application rates on yield and its components of peanut under different Zn application methods

处理 Treatment	单株饱果数 Full pods per plant	单株饱果重 Full pod weight / g/plant	百果重 100-pod weight /g	出仁率 Kernel rate /%	产量 Yield /(kg/hm ²)
Zn0P0	7.6 c	9.7 d	152.6 b	67.2 d	3230.5 f
Zn0P45	11.0 b	13.6 c	159.5 ab	74.4 c	4375.5 d
Zn0P90	13.0 ab	18.6 ab	168.1 a	79.5 ab	5215.9 c
Zn0P135	11.9 b	17.1 b	162.1 ab	78.1 b	5017.9 cd
Zn0180	11.3 b	16.1 bc	158.8 ab	77.1 bc	4501.7 d
ZnfP0	9.0 b	13.4 c	151.2 b	67.7 d	3390.6 ef
ZnfP45	12.1 ab	16.8 b	160.7 ab	75.1 c	4706.8 cd
ZnfP90	14.2 a	20.1 a	171.1 a	81.3 a	5565.0 ab
ZnfP135	13.2 ab	19.7 ab	163.1 ab	79.2 ab	5304.7 bc
ZnfP180	12.2 ab	18.6 ab	159.4 ab	78.6 ab	4815.2 cd
ZnsP0	9.6 b	13.8 c	152.4 b	68.0 d	3506.2 e
ZnsP45	12.6 ab	17.9 b	162.1 ab	75.3 c	4831.3 c
ZnsP90	14.7 a	21.3 a	169.6 a	80.5 a	5814.0 a
ZnsP135	13.6 a	20.3 a	163.6 ab	79.6 ab	5535.9 ab
ZnsP180	12.8 ab	19.2 ab	161.7 ab	79.0 ab	4937.5 bc
双因素方差分析 Two-way analysis of variance (P)					
施Zn方式 Zn application methods	0.011	0.006	0.735	0.091	<0.0001
施P量 P application rate	<0.0001	<0.0001	0.0013	<0.0001	<0.0001
施Zn方式×施P量	0.749	0.440	0.987	0.991	0.486
Zn application methods×P application rate					

表3 施磷量与花生根系形态指标、叶绿素含量和产量关系

Table 3 Relationship between P₂O₅ application rate and root morphology, chlorophyll content, yield of peanut

施锌方式 Zn applica- tion method	因变量Y	回归方程 Regression equation	R ²	P值 P value	临界X(P ₂ O ₅)值 Thresholds of P ₂ O ₅ applica- tion rate	Y最大值 Max. of Y
不施锌 Zn0	根长 Length /cm	Y=662.797+6.033X-0.024X ²	0.992	0.008	117.639	1017.629
	根表面积 SurfArea /cm ²	Y=598.980+5.093X-0.023X ²	0.964	0.036	108.898	876.271
	根体积 RootVolume / cm ³	Y=43.380+0.217X-0.001X ²	0.967	0.033	115.816	55.965
	根尖数 Tips	Y=1781.971+21.286X-0.093X ²	0.950	0.050	114.659	3002.270
	SPAD值 value	Y=37.086+0.203X-0.001X ²	0.960	0.040	102.443	47.488
叶面喷锌 Znf	产量 Yield / (kg/hm ²)	Y=3208.369+34.765X-0.154X ²	0.987	0.013	113.005	5172.679
	根长 Length /cm	Y=673.034+6.594X-0.028X ²	0.909	0.091	118.716	1064.468
	根表面积 SurfArea /cm ²	Y=635.729+4.727X-0.020X ²	0.959	0.041	118.059	914.731
	根体积 RootVolume /cm ³	Y=44.743+0.286X-0.001X ²	0.859	0.141	108.228	60.237
	根尖数 Tips	y=2361.229+19.132X-0.089X ²	0.981	0.019	107.746	3391.931
土施锌肥 Zns	SPAD值 value	Y=39.146+0.218X-0.001X ²	0.952	0.048	108.341	50.973
	产量 Yield / (kg/hm ²)	Y=3391.340+37.691X-0.167X ²	0.986	0.014	112.957	5520.087
	根长 Length /cm	Y=729.609+8.593X-0.037X ²	0.986	0.014	116.721	1205.073
	根表面积 SurfArea /cm ²	Y=686.809+3.952X-0.017X ²	0.975	0.025	116.991	925.986
	根体积 RootVolume/cm ³	Y=50.837+0.174X-0.001X ²	0.821	0.179	115.206	60.842
	根尖数 Tips	Y=2519.114+23.359X-0.105X ²	0.955	0.045	111.226	3818.196
	SPAD值 value	Y=41.794+0.202X-0.001X ²	0.977	0.023	109.028	52.808
	产量 Yield / (kg/hm ²)	Y=3481.854+40.358X-0.180X ²	0.984	0.016	111.999	5741.860

标、叶绿素含量及产量取得最大值的临界 P_2O_5 用量在 102.44~118.72 kg/hm², 处于试验设置的 P_2O_5 用量 90~135 kg/hm² 之间。不同施磷方式间, 各指标取得最大值的施磷量存在一定差异, 但差异不大。

3 讨论

根系是花生养分吸收的主要器官, 其生长发育具有高度的可塑性^[22], 良好的根系形态对植物地上部冠层构建和最终产量形成具有重要意义^[23]。磷对植物根系生长发育具有重要影响, 磷素供应对植物根系发育产生“低促高抑”的现象^[24]。紫穗槐随供磷水平增加, 根系平均直径、根系总长、总表面积和总体积均呈先增加后减小的趋势, 说明过高或过低磷浓度不利于根系发育^[25]。郑亚萍等^[5]研究认为适宜的施磷量有利于增加花生根系长度、根表面积和根体积, 过高的施磷量使花生根系生长受阻。Zhang 等^[26]认为随施磷量的增加(0~100 kg P_2O_5 /hm²), 0~60 cm 土层内小麦根系体积、根长密度和根表面积均先增加后趋于稳定(>100 kg/hm²)。本研究发现, 砂姜黑土上, 在适宜的施磷量(0~90 kg P_2O_5 /hm²) 范围内, 饱果期花生根系长度、根系总表面积和根系体积随施磷量的增加而增加, 继续增加施磷量花生各根系形态指标保持稳定或有所下降, 施用 135 kg P_2O_5 /hm² 和 180 kg P_2O_5 /hm² 处理花生根系各形态指标比施 90 kg P_2O_5 /hm² 下降不显著, 花生根系生长受阻。过量施磷抑制花生根系生长的主要原因可能是磷供应量过大降低了植物的光合作用(图 2), 抑制了光合产物从地上向根系转运, 造成根系早衰, 抑制了花生根系生长^[27]。一元二次回归分析也表明, 过量施磷后, 花生根系形态指标、叶绿素含量及产量均受到抑制, 各指标取得最大值的临界 P_2O_5 用量在 102.44~118.72 kg/hm², 高于本研究得出的实际推荐 P_2O_5 用量 90 kg/hm², 但由于 90 kg P_2O_5 /hm² 处理的花生实际产量略高于一元二次回归方程模拟出的产量最大值, 因此, 推荐 90 kg P_2O_5 /hm² 为豫南夏花生种植区的最佳施磷量。锌是作物生长发育必需微量元素, 缺锌不利于植物根系生长发育^[9]。Broadley 等^[28]研究表明, 缺锌抑制水稻根系发育, 减少节根数, 对节根伸长影响不大。周斌等^[29]研究发现缺锌使玉米根系表面积与体积变小, 总根长、侧根总长度与侧根平均长度变短, 侧根密度增大, 直径变细。Nguyen 等^[30]研究了土壤磷和锌有效性对植物响应菌根真菌的影响, 结果发现单独施磷和磷-锌互作对菌根真菌共生植物根系生长显著影

响, 而单独施磷影响不显著。目前, 作物生产上, 锌施用方式有土壤、叶面喷施和拌种等。吴慧贞等^[31]比较了土壤施用(基施和追施)和叶面喷施 3 种施磷方式下丹参根系活力、根重和叶绿素含量变化, 结果发现早期基施和追施磷肥效果明显好于中期喷施磷。本研究发现, 相同磷用量下, 土壤施磷和叶面喷磷比不施磷促进了花生根系各形态指标, 但两种施磷方式间无显著差异, 以土壤施磷对根系生长的促进效果较好, 该处理的花生总根长、根系总表面积、根体积和根尖数较不施磷分别增加 14.9%, 9.6%, 8.9% 和 22.5%。

施磷方式影响作物的增产效果。土壤施用比叶面喷施在小麦、玉米和水稻上的平均增产率分别为 1.3%、1.0% 和 4.2%, 说明无论是小麦、玉米还是水稻, 土施磷肥的增产效果优于叶面喷磷^[16]。本研究中施磷方式显著影响花生产量, 叶面喷磷和土壤施磷分别比不施磷平均增产 6.4% 和 10.1%, 土壤施磷增产率比叶面喷磷高 3.7%。可见, 土壤施磷的增产效果比叶面喷磷好, 这与王效忠等^[16]在小麦、玉米和水稻上的结论一致。花生是需磷量较大的作物, 单独施磷及磷锌互作也可不同程度地影响花生生长、产量和产量构成因素。土壤施磷量显著影响花生株高、侧枝长、单株饱果数、单株饱果重和产量; 除株高外, 土壤施磷量与施磷量交互作用对花生产量及其构成因素无显著影响^[12]。土壤施磷量显著促进花生株高和株幅, 但土壤施磷量及磷锌交互效应影响不显著, 而小区生物量、荚果数、荚果重和每公顷产量受土壤施磷量、土壤施磷量及磷锌互作影响显著^[14]。Gobarah 等^[15]研究了土施磷肥与叶面喷磷对花生生长和产量的影响, 结果发现单独施磷、单独叶面喷磷及二者交互作用均显著提高了花生地上部干物质重、花生荚果数、单株荚果重、百仁重和产量。本试验中, 施磷显著促进了花生地上部营养生长、产量及产量构成因素; 锌肥施用方式对根系和地上部生长无显著影响, 对单株饱果数、单株饱果重和产量影响显著; 施磷方式与施磷量互作对花生根系和地上部营养生长、产量及产量构成因素影响均不显著, 这可能是由于磷、锌的施用量足以满足花生的营养生长和生殖生长。

农业生产中, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 作为锌肥被广泛应用到小麦、玉米、水稻、花生等^[11, 16]作物上。本研究所用锌肥也为 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, 用量为 30 kg/hm², 会向土壤中带入 3.3 kg/hm² 的硫素。硫可参与花生的碳、氮代谢, 施硫能促进花生生长, 提高花生产量, 改善

花生品质^[32]。前期研究表明,花生产量和品质与硫量呈“抛物线”关系,硫用量在0~30 kg/hm²范围内,花生的产量、品质及硫素吸收利用均不会出现显著差异^[33,34]。因此,本研究结果虽为施用ZnSO₄·7H₂O后产生的综合效果,但也能够较好的为合理施用锌肥提供依据。

4 结论

无论叶面喷锌还是土壤施锌,在一定的磷肥施用范围内(P₂O₅<90 kg/hm²),随施磷水平增加,花生根系形态指标、叶绿素含量、主茎高、侧枝长、分枝数、产量及产量构成因素均先增加后保持稳定或有不同程度下降。施锌方式对花生根系和地上部营养生长影响不显著,但显著增加叶绿素含量、单株饱果数、单株饱果重和产量,其中土壤施锌的作用效果较好。高磷用量时,土壤施锌可使花生叶片的叶绿素含量达到或高于不施锌正常供磷处理,表明施锌缓解了磷肥施用过多对花生光合性能的抑制作用。因此,在砂姜黑土区花生生产上,土壤施磷配施90 kg P₂O₅/hm²改善了花生根系形态特征,提高了光合特性,是利于花生生长发育和高产的适宜磷肥和锌肥施用方式。

参考文献:

- [1] 姚云游, 乔玉兰. 花生功能成分及营养价值的研究进展[J]. 中国油脂, 2005, 30(9): 31-33. DOI:10.3321/j.issn: 1003-7969.2005.09.009.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [3] 李忠, 江立庚, 唐荣华, 等. 施磷量对花生光合特性及干物质积累的影响[J]. 广东农业科学, 2017, 44(7): 48-52.
- [4] 路亚, 王春晓, 于天一, 等. 土壤施磷与叶面追肥互作对花生根系形态、结瘤特性及氮代谢的影响[J]. 作物学报, 2020(1): 1-9.
- [5] 郑亚萍, 王春晓, 郑祖林, 等. 磷对花生根系形态特征的影响[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(4): 622-628.
- [6] 郑亚萍, 信彩云, 王才斌, 等. 磷肥对花生根系形态、生理特性及产量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(8): 777-785.
- [7] He H H, Peng Q, Wang X, et al. Growth, morphological and physiological responses of alfalfa (*Medicago sativa*) to phosphorus supply in two alkaline soils[J]. Plant Soil, 2017, 416(1/2): 565-584. DOI:10.1007/s11104-017-3242-9.
- [8] 陆景陵. 植物营养学. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [9] Fageria N K, Moreira A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plants[J]. Advan Agron. 2011, 110: 251-331.
- [10] 司贤宗, 张翔, 索炎炎, 等. 施锌和遮阴对花生叶片生理特性、光合性能及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(10): 52-56.
- [11] 司贤宗, 张翔, 索炎炎, 等. 施用锌肥和遮阴互作对花生生长发育、抗病性及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(3): 399-404.
- [12] 索炎炎, 张翔, 司贤宗, 等. 磷锌配施对花生生理特性、产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(2): 96-102. DOI:10.11838/sfsc.20180214.
- [13] 王少霞, 李萌, 田霄鸿, 等. 锌与氮磷钾配合喷施对小麦锌累积、分配及转移的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 296-305.
- [14] Aboyeji C M, Dunsin O, Adekiya A O, et al. Synergistic and antagonistic effects of soil applied P and Zn fertilizers on the performance, minerals and heavy metal composition of groundnut [J]. Open Agriculture, 2020, 5(1): 1-9. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0002>
- [15] Gobarah M E, Mohamed M H, Tawfik M. Effect of phosphorus fertilizer and foliar spraying with zinc on growth, yield and quality of groundnut under reclaimed sandy soils[J]. J Appl Sci Res, 2006, 2(8): 491-496.
- [16] 王孝忠, 田娣, 邹春琴. 锌肥不同施用方式及施用量对我国主要粮食作物增产效果的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 998-1004.
- [17] 沈云亭, 索炎炎, 张翔, 等. 河南省花生主产区土壤养分状况评价及施肥改进建议[J]. 河南农业科学, 2019, 48(9): 67-73.
- [18] 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.
- [19] 董明, 王琪, 周琴, 等. 花后5天喷施锌肥有效提高小麦籽粒营养和加工品质[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 63-70.
- [20] Wei Y, Shohag M J I, Ying F, et al. Effect of ferrous sulfate fortification in germinated brown rice on seed iron concentration and bioavailability[J]. Food Chem, 2013, 138(2-3):1952-1958.
- [21] Xue Y-F, Zhang W, Liu D-Y, et al. Effects of nitrogen management on root morphology and zinc translocation from root to shoot of winter wheat in the field [J]. Field Crop Res, 2014, 161: 38-45.
- [22] 严小龙. 根系生物学原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.[LinkOut]
- [23] 万书波. 中国花生栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
- [24] 黄智刚. 不同施磷量对油菜根系形态和磷吸收的影响[J]. 广西农学报, 2000, 15(3): 27-29,22.

- [25] 张东梅, 宋鑫, 张丽静, 等. 不同供磷水平对紫穗槐生长及根系形态的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(9): 1767-1773.
- [26] Zhang W, Liu D, Liu Y, et al. Zinc uptake and accumulation in winter wheat relative to changes in root morphology and mycorrhizal colonization following varying phosphorus application on calcareous soil [J]. Field Crop Res, 2016, 197: 74-82.
- [27] 齐敏兴, 刘晓静, 张晓磊, 等. 不同磷水平对紫花苜蓿光合作用和根瘤固氮特性的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(3): 512-516.
- [28] Widodo B, Widodo B, Broadley M R, et al. Response to zinc deficiency of two rice lines with contrasting tolerance is determined by root growth maintenance and organic acid exudation rates, and not by zinc-transporter activity[J]. New Phytol, 2010, 186(2): 400-414. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2009.03177.x.
- [29] 周斌, 张金尧, 乙引, 等. 缺锌对玉米根系发育、生长素含量及生长素转运基因表达的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1352-1358.
- [30] Nguyen T D, Cavagnaro T R, Watts-Williams S J. The effects of soil phosphorus and zinc availability on plant responses to mycorrhizal fungi: a physiological and molecular assessment [J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 14880. DOI:10.1038/s41598-019-51369-5.
- [31] 吴慧贞, 刘德辉, 王培燕, 等. 铜锌不同施用方式对栽培丹参生长和丹参酮类物质积累的影响[J]. 土壤, 2011, 43(5): 781-786.
- [32] Pancholi P, Yadav S, Gupta A. The influence of weed control and sulphur fertilization on oil content and production of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) in semi-arid region of rajasthan [J]. J Pharmacognosy Phytochem, 2017, 6(4): 677-679.
- [33] 司贤宗, 张翔, 索炎炎, 等. 施硫对花生生产质量和硫吸收利用的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(6): 59-63.
- [34] 索炎炎, 范瑞兆, 司贤宗, 等. 砂姜黑土区花生优质高产的氮钙硫施肥模型研究[J]. 核农学报, 2019, 33(7): 1448-1456.

(责任编辑:王丽芳)