

低磷胁迫下加硅对玉米苗期硅、磷营养及叶绿素荧光参数的影响

朱从桦^{1,2}, 张鸿², 袁继超¹, 张嘉莉¹, 蒋艺¹, 王兴龙¹, 孔凡磊¹

(1. 四川农业大学农学院, 成都 611130; 2. 四川省农业科学院植物保护研究所, 成都 610066)

摘要: 为研究硅对低磷胁迫下玉米苗期硅、磷吸收积累和叶绿素荧光参数的影响, 采用砂培方式模拟低磷胁迫环境, 以玉米品种正红2号和正红115为供试材料, 设置3个磷浓度: 重度低磷胁迫 P_1 (0.01 mmol/L)、中度低磷胁迫 P_2 (0.1 mmol/L) 和正常磷浓度 P_3 (1 mmol/L), 设置3个硅浓度: Si_1 (0 mmol/L)、 Si_2 (0.75 mmol/L) 和 Si_3 (1.5 mmol/L), 定苗培养28 d, 测定植株顶部往下第1全展叶叶绿素荧光参数、植株干物质重、硅和磷含量和积累量。结果表明: (1) 磷浓度从 P_3 降低至 P_2 和 P_1 , 2个玉米品种平均, 单株干物质积累量、硅积累量、磷积累量分别下降34.73%, 39.26%, 29.10%, 33.01%, 81.81%, 87.63%; 同时降低叶片PSⅡ反应中心开放程度、减弱光能捕获和光能转换能力、降低电子传递效率, 导致植株叶片热耗散能力明显增强。(2) 硅浓度从 Si_1 增加至 Si_2 和 Si_3 , 2个玉米品种平均, 单株干物质积累量、硅积累量、磷积累量分别提高21.54%, 36.05%, 120.08%, 236.65%, 39.81%, 69.17%; 同时增加叶片PSⅡ反应中心开放程度, 提高光能捕获和光能转换效率, 增加电子传递效率, 加速利用过剩激发能。(3) 玉米植株硅积累量和磷积累量呈显著正相关, 并且 F_v/F_m (XE)、 F_v'/F_m' (XE')、 F_q'/F_m' (ϕ PSⅡ)、ETR与植株硅积累量和磷积累量也呈显著正相关。(4) 在 P_3 和 P_2 处理中, 与 Si_1 相比, Si_2 和 Si_3 能明显提高正红2号和正红115植株硅、磷素积累量, 提高叶片对光能的捕获、转化和传递效率, 提高植株的干物质积累量; 在重度低磷胁迫 P_1 处理中施硅对玉米幼苗硅、磷营养和叶绿素荧光参数的改善作用十分微弱。综上所述, 在非严重低磷胁迫条件下, 外源加硅可以增强玉米对硅、磷的吸收和积累, 提高叶片光合物质生产能力, 加速消耗过剩的激发能, 减轻光抑制。

关键词: 低磷胁迫; 硅; 磷; 叶绿素荧光参数; 干物质

中图分类号: Q945.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0303-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.050

Silicon Application on Silicon and Phosphorus Nutrition and Chlorophyll Fluorescence Parameters of Maize During Seedling Stage Under Low Phosphorus Stress

ZHU Conghua^{1,2}, ZHANG Hong², YUAN Jichao¹, ZHANG Jiali¹,

JIANG Yi¹, WANG Xinglong¹, KONG Fanlei¹

(1. College Agronomy of Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130;

2. Institute of Plant Protection, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066)

Abstract: Under low phosphorus stress, the benefits of Si application on improving Si accumulation, P accumulation and chlorophyll fluorescence parameters of maize during seedling stage were investigated using medium ZH2 and ZH115 by sand culture experiment. The treatments consisted of three P levels (0.01 mmol/L, 0.1 mmol/L and 1 mmol/L) and three Si levels (0 mmol/L, 0.75 mmol/L and 1.5 mmol/L). Maize seedlings were incubated for 28 days, then the items were measured, including chlorophyll fluorescence parameters of the first top fully expanded leaf, dry matter accumulation, Si content and accumulation, P content and accumulation. The main results were as follows: (1) The dry matter accumulation, Si and P accumulation amount of these two varieties (ZH2 and ZH115) reduced by 34.73% and 39.26%, 29.10% and 33.01%, 81.81% and 87.63% in average, meanwhile the open degree of PSⅡ reaction center, efficiency of light capture, efficiency of light energy transformation and electron transportation of the leaf all decreased significantly, and

收稿日期: 2016-09-14

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD04B13-2); 公益性行业(农业)科研专项(20150312705)

第一作者: 朱从桦(1986—), 男, 助理研究员, 主要从事农业绿色防控、作物养分调控及节本高效生产技术研究。E-mail: zchsicau@163.com

通信作者: 孔凡磊(1985—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农作制度与作物生理生态研究。E-mail: kflstar@163.com

heat dissipation of the leaf also increased with P concentration from P_3 to P_2 and P_1 in culture medium. (2) The dry matter accumulation, Si and P accumulation amount of these two varieties (ZH2 and ZH115) increased by 21.54% and 36.05%, 120.08% and 236.65%, 39.81% and 69.17% in average, meanwhile the open degree of PS II reaction center, efficiency of light capture, efficiency of light energy transformation and electron transportation of leaf also increased significantly with Si concentration from Si_1 to Si_2 and Si_3 in culture medium. (3) There were significantly positive correlation between P accumulation and Si accumulation in plant. F_v/F_m (XE), F_v'/F_m' (XE'), F_q'/F_m' (ϕ PS II), and ETR showed significantly positive correlation with P accumulation in plant, and the same with Si accumulation. (4) When P concentration in culture medium was 1 mmol/L or 0.1 mmol/L, comparing to treatment of Si_1 , dry matter accumulation, Si accumulation, P accumulation, efficiency of light energy transformation and electron transportation of ZH2 and ZH115 all increased under the treatment of Si_2 and Si_3 ; but the treatment of Si_2 and Si_3 on improving the above items was very weak when P concentration in culture medium was 0.01 mmol/L. In summary, the improvements in phosphorus deficiency tolerance of maize were resulted from increasing Si and P uptake and accumulation in plant, efficiency of light energy transformation and electron transportation of leaf, and decreasing in photo inhibition by Si application, even these benefit of it could be found more under normal P level.

Keywords: low phosphorus stress; silicon; phosphorus; chlorophyll fluorescence parameters; dry matter

玉米 (*Zea mays* L.) 是重要的粮饲兼用及能源作物, 在农业生产中占有重要地位。四川丘陵雨养旱坡地, 土壤速效磷含量低, 缺磷土壤分布较广^[1-2], 为追求玉米高产的同时需要大量增施磷肥, 进一步导致磷肥当季利用率下降^[3-4]。磷肥主要从磷矿中获取, 磷矿属于不可再生资源, 储量有限, 磷肥用量增加必定加速我国磷矿资源的消耗^[5]。因此, 适量减少磷肥施用量、提高玉米耐低磷能力成为缓解以上矛盾的重要途径。低磷胁迫条件下, 玉米根系干重、总根长、根表面积和平均直径减小^[6-7], 植株氮、磷、钾及锌等元素吸收量减少^[8-9], 玉米叶片 PS II 反应中心关闭程度增加、光能转换和电子传递效率下降, 过剩激发能增加^[10], 严重影响玉米产量。硅在作物抵抗生物和非生物胁迫方面具有诸多益处, 在现代农业生产中逐渐被重视^[11], 玉米作为喜硅植物会主动吸收硅, 其各器官硅含量的变化范围约为 4~75 g/kg, 并且与氮、磷、钾含量关系密切^[12]。硅和磷有着肥效互作关系已经被证实^[13-14], 硅能增强豇豆、芦荟、番茄及黄瓜等植株叶片最大光化学效率 (F_v/F_m) 和光合电子传递速率 (ETR), 降低非光化学淬灭系数 (NPQ), 提高叶片 PS II 反应中心的活性^[15-18], 改善锰胁迫下玉米植株对磷素的吸收^[19-20], 提高盐碱地中玉米的光合速率^[21]。低磷胁迫下外源加硅能否改善玉米硅、磷营养以及提高光合物质生产能力的研究却鲜见报道, 因此, 本研究采用砂培试验, 研究硅对低磷胁迫下玉米苗期干物质积累、叶片荧光参数特征、植株硅和磷积累量的影响, 从硅、磷营养和光合物质生产的角度分析硅对低磷胁迫下玉米生长的益处。

1 材料与方法

1.1 试验设计

于 2014 年 3—5 月在四川农业大学成都校区温室大棚内进行砂培试验, 供试材料为正红 2 号和正红 115 (四川农大正红生物技术有限责任公司提供)。试验采用磷浓度×硅浓度二因素完全随机设计。磷浓度设置 3 个水平, 即培养液磷浓度分别为 0.01 mmol/L (重度低磷胁迫), 0.1 mmol/L (中度低磷胁迫) 和 1.0 mmol/L (正常磷浓度), 记为 P_1 、 P_2 、 P_3 ; 硅浓度设置 3 个水平, 即培养液硅浓度分别为 0 mmol/L, 0.75 mmol/L 和 1.5 mmol/L, 记为 Si_1 、 Si_2 、 Si_3 。试验为 9 个处理, 每处理栽种 6 盆, 每盆等行距种植 6 株, 重复 3 次, 2 个品种共计 324 盆。

基本营养液成分参考 Hoagland's (霍格兰氏) 营养液, 即: 2.5 mmol/L $Ca(NO_3)_2$, 1.0 mmol/L K_2SO_4 , 0.65 mmol/L $MgSO_4$, 5.0 mmol/L $CaCl_2$, 1.0 μ mol/L H_3BO_3 , 2.0 μ mol/L $MnSO_4$, 1.0 μ mol/L $ZnSO_4$, 0.3 μ mol/L $CuSO_4$, 0.5 μ mol/L $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$, 200 μ mol/L Fe—EDT, 磷源为 KH_2PO_4 , 硅源为 Na_2SiO_3 。缺磷培养液用 KCl 补充 K^+ , 加硅培养液应最后缓慢加入 Na_2SiO_3 (用盐酸将溶液 pH 控制在 4.0~5.0 之间, 缓慢加入 Na_2SiO_3 , 同时快速搅拌), 完全混匀后用 40% 氢氧化钠溶液将培养液 pH 调节至 5.80±0.05, 然后再定容。

(1) 砂基准备: 砂培基质为石英砂 (大小为 0.5~2 mm), 用 10% 盐酸浸泡 3 h, 用自来水冲洗 20 min, 用蒸馏水洗净后装盆 (盆内径为 20 cm, 高度为 25 cm, 每盆装 7.5 kg)。

(2)培育壮苗:玉米种子用 2%次氯酸钠浸泡消毒 20 min,用蒸馏水洗净并浸泡 4 h,每盆播种 15 粒,播种深度 5 cm,播种后每天上午 9:30 和下午 4:00 每盆浇 200 ml 蒸馏水以保证均匀出苗,待两叶一心后定苗,每盆保留 6 株长势一致的壮苗。

(3)浇培养液:定苗后每间隔 2 d 于上午 9:30 浇 1 L 培养液(浇培养液前用 2.5 L 蒸馏水淋洗盆中石英砂,避免产生盐害),培养 15 d 后,培养液浇用频率调整为间隔 1 d。定苗后培养 28 d,进行取样测定。

1.2 测定项目与方法

(1)干物质选取 10 株代表性植株,分为根、茎、叶,于烘箱中 105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘至恒重,并称重,重复 3 次。

(2)荧光参数选取 5 株代表植株,用 CF Imager 叶绿素荧光成像系统(英国 Technologica 公司生产)测定顶部第 1 全展叶。叶片暗适应 30 min 后测定叶片 F_0 、 F_m ,光强 $1\,000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光适应 30 min 后测定 F' 、 $F_{m'}$,计算 PSII 反应中心潜在的激发能捕获效率 F_v/F_m (XE)、非光化学淬灭系数 $F_m/F_{m'}-1$ (NPQ)、光下开放的 PSII 反应中心的激发能捕获率 $F_v'/F_{m'}$ (XE')、光化学淬灭系数 F_q'/F_v' (qP) 和 $F_q'/F_{m'}$ (φPSII)、电子传递效率 ETR,重复 3 次。

(3)植株硅、磷含量和积累量的测定:将(1)中称完干重后的样品粉碎过 80 目筛,采用浓 H_2SO_4 — H_2O_2 消煮,用钼锑抗吸光光度法测定各部位磷含量,采用强碱高温高压消化处理,用硅钼蓝分光光度法测定硅含量,并计算硅、磷积累量。

1.3 数据分析

用 DPS 7.05 和 SPSS 19.0 软件进行试验数据

分析,用最小显著差法 LSD 检验平均数。

2 结果与分析

2.1 低磷胁迫下硅对玉米叶绿素荧光参数的影响

从表 1 可知,低磷胁迫会降低玉米叶片光能捕获效率、光能转换效率和电子传递效率,同时提高叶片的热耗散能力。与正常磷浓度 P_3 相比,中度低磷胁迫 P_2 处理玉米叶片 F_v/F_m (XE)、 $F_v'/F_{m'}$ (XE')、 $F_q'/F_{m'}$ (φPSII)、ETR 2 个品种平均分别降低 14.97%,13.17%,15.44%,15.91%, $F_m/F_{m'}-1$ (NPQ) 增加 15.32%;严重低磷胁迫 P_1 处理玉米叶片 F_v/F_m (XE)、 $F_v'/F_{m'}$ (XE')、 $F_q'/F_{m'}$ (φPSII)、ETR 分别降低 26.61%,17.40%,27.82%,27.78%, $F_m/F_{m'}-1$ (NPQ) 增加 14.82%。

低磷胁迫处理中,加入适量的硅能够增强玉米叶片光能捕获效率、光能转换效率和电子传递效率,降低叶片的热耗散能力。正常磷浓度 P_3 中, Si_2 和 Si_3 处理正红 2 号和正红 115 叶片 F_v/F_m (XE)、 $F_q'/F_{m'}$ (φPSII)、ETR 均显著增加, $F_m/F_{m'}-1$ (NPQ) 值明显降低,其中 Si_2 的增加量或降低量 $\leq\text{Si}_3$;中度低磷胁迫 P_2 和重度低磷胁迫 P_1 中, Si_3 处理 2 个品种叶片的 F_v/F_m (XE)、 $F_v'/F_{m'}$ (XE')、 $F_q'/F_{m'}$ (qP)、 $F_q'/F_{m'}$ (φPSII)、ETR 值显著增加, $F_m/F_{m'}-1$ (NPQ) 值明显降低。可见,低磷胁迫条件下,玉米叶片光能捕获效率、光能转换效率和电子传递效率下降,植株主要通过增强热耗散来消耗过剩的激发能,减少活性氧的生成,从而保护光合系统,低磷胁迫下加硅处理(硅浓度为 1.5 mmol/L)能显著提高玉米叶片光能捕获效率、光能转换效率和电子传递效率,加速利用过剩激发能来避免光合器官受到损害。

表 1 低磷胁迫下硅对玉米叶片荧光参数的影响

磷浓度	硅浓度	正红 2 号						正红 115					
		F_v/F_m	$F_m/F_{m'}-1$	$F_v'/F_{m'}$	$F_q'/F_{v'}$	$F_q'/F_{m'}$	ETR	F_v/F_m	$F_m/F_{m'}-1$	$F_v'/F_{m'}$	$F_q'/F_{v'}$	$F_q'/F_{m'}$	ETR
		(XE)	(NPQ)	(XE')	(qP)	(φPSII)		(XE)	(NPQ)	(XE')	(qP)	(φPSII)	
P_3	Si_3	0.801a	2.97b	0.531a	0.298a	0.161a	67.41a	0.791a	2.62c	0.527a	0.305a	0.159a	66.57a
	Si_2	0.800a	2.76c	0.519b	0.266b	0.142b	59.71b	0.806a	2.98b	0.520a	0.282b	0.145b	60.97b
	Si_1	0.798a	3.16a	0.502c	0.283b	0.135c	56.63c	0.793a	3.50a	0.478b	0.281b	0.132c	55.44c
平均数		0.800A	2.96B	0.517A	0.276A	0.146A	61.25A	0.797A	3.03B	0.508A	0.289B	0.145A	60.99A
P_2	Si_3	0.732a	3.00c	0.453a	0.283a	0.119a	49.84a	0.717a	3.48b	0.460a	0.441a	0.141a	58.94a
	Si_2	0.698ab	3.30b	0.450a	0.268a	0.111b	46.62b	0.678a	3.53b	0.435b	0.413b	0.130b	54.39ab
	Si_1	0.667b	3.63a	0.438b	0.216b	0.110b	46.13b	0.582b	3.79a	0.433b	0.348b	0.125b	52.43b
平均数		0.699B	3.31A	0.447B	0.289A	0.114B	47.53B	0.659B	3.60A	0.443B	0.367A	0.132B	55.25B
P_1	Si_3	0.674a	3.27b	0.452a	0.290a	0.105a	44.17a	0.591a	3.47b	0.421a	0.302a	0.124a	52.08a
	Si_2	0.644a	3.15b	0.450a	0.255b	0.098ab	41.16ab	0.565a	3.57b	0.420a	0.213ab	0.102b	42.63b
	Si_1	0.551b	3.47a	0.433b	0.257b	0.097b	40.46b	0.490b	3.71a	0.365b	0.165b	0.106b	44.31b
平均数		0.623C	3.30A	0.445B	0.268A	0.100C	41.93C	0.549C	3.58A	0.402C	0.227C	0.110C	46.34C

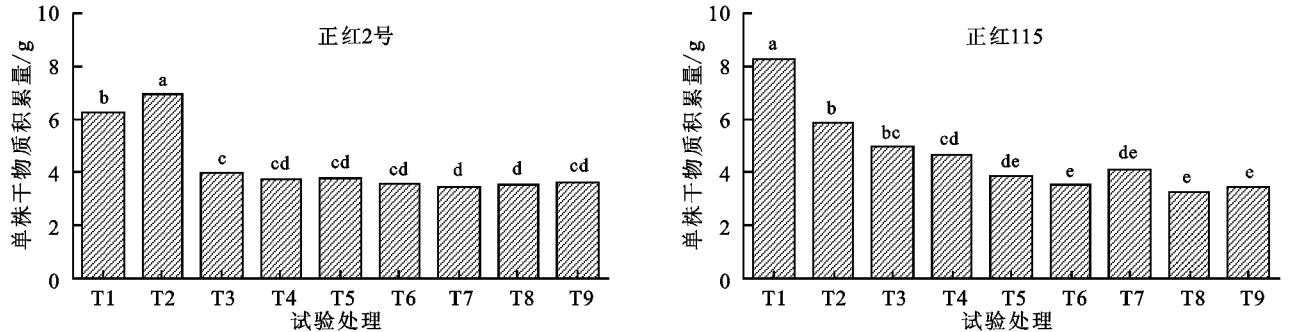
注: P_1 磷浓度为 0.01 mmol/L; P_2 磷浓度为 0.1 mmol/L; P_3 磷浓度为 1 mmol/L; Si_1 硅浓度为 0 mmol/L; Si_2 硅浓度为 0.75 mmol/L; Si_3 硅浓度为 1.5 mmol/L; F_v/F_m (XE) 为 PSII 反应中心潜在的激发能捕获效率; $F_m/F_{m'}-1$ (NPQ) 为非光化学淬灭系数; $F_v'/F_{m'}$ (XE') 为光开放下的 PSII 反应中心的激发能捕获效率; $F_q'/F_{v'}$ (qP) 和 $F_q'/F_{m'}$ (φPSII) 为光化学淬灭系数;ETR 为电子传递效率。同列不同大写字母表示不同磷浓度间 LSD 法检验在 $p=0.05$ 水平上差异显著;同列不同小写字母表示相同磷浓度下不同硅浓度间 LSD 法检验在 $p=0.05$ 水平上差异显著。下同。

2.2 低磷胁迫下加硅对玉米干物质积累及分配的影响

从图 1 可见,低磷胁迫会抑制植株的生长,显著降低植株的干物质积累量,其中茎叶降低的幅度较大,根系降低的幅度相对较小。与正常磷浓度 P_3 处理相比,中度低磷胁迫处理 P_2 处理中,正红 2 号和正红 115 整株干物质积累量分别减少 35.95%和 33.50%;重度低磷胁迫处理 P_1 中,正红 2 号和正红 115 整株干物质积累量分别减少 38.39%和 40.13%。加硅能在一定程度上改善或促进玉米生长,增加干物质积累,但其效果因磷浓度和品种不同而存在差异。在正常磷浓度处理 P_3 中,与不加硅 Si_1 相比, Si_2 和 Si_3 处理能显著提高正红 2 号干物质积累量, Si_3 能显著提高正红 115 干物质积累量,2 个品种平均 Si_2 和 Si_3 整株干物质积累量分别提高 62.88%和 82.29%;在中度低磷胁迫处理 P_2 中,与不加硅 Si_1 相比,加硅后正红 2 号干物质积累量

不再显著增加,加硅处理 Si_3 依然能显著提高正红 115 的干物质积累量;在重度低磷胁迫处理 P_1 中,加硅对 2 个玉米品种干物质积累量无显著影响。

从图 2 可见,培养液中硅、磷浓度显著影响着玉米苗期干物质在根、茎和叶中的分配比例。随着磷浓度降低,正红 2 号和正红 115 根系中干物质分配比例显著增加,茎叶干物质比例快速降低。在正常磷浓度处理 P_3 中,与不加硅 Si_1 相比, Si_2 和 Si_3 能显著提高正红 2 号和正红 115 茎叶干物质分配比例,降低其根系干物质分配比例;在中度低磷胁迫 P_2 和重度低磷胁迫 P_1 中, Si_3 能显著提高正红 115 茎叶干物质分配比例,降低根系干物质分配比例,加硅对正红 2 号根、茎和叶干物质分配比例影响较弱。可见,在非严重缺磷和正常磷水平下,外源加硅提高玉米干物质积累量的效果更佳,特别是正红 115 尤其明显。



注: T1 为培养液磷浓度为 1 mmol/L, 硅浓度为 1.5 mmol/L; T2 为培养液磷浓度为 1 mmol/L, 硅浓度为 0.75 mmol/L; T3 为培养液磷浓度为 1 mmol/L, 硅浓度为 0 mmol/L; T4 为培养液磷浓度为 0.1 mmol/L, 硅浓度为 1.5 mmol/L; T5 为培养液磷浓度为 0.1 mmol/L, 硅浓度为 0.75 mmol/L; T6 为培养液磷浓度为 0.1 mmol/L, 硅浓度为 0 mmol/L; T7 为培养液磷浓度为 0.01 mmol/L, 硅浓度为 1.5 mmol/L; T8 为培养液磷浓度为 0.01 mmol/L, 硅浓度为 0.75 mmol/L; T9 为培养液磷浓度为 0.01 mmol/L, 硅浓度为 0 mmol/L。图柱上不同小写字母表示同一品种不同试验处理间 LSD 法检验在 $p=0.05$ 水平上差异显著。下同。

图 1 低磷胁迫下硅对玉米干物质积累量的影响

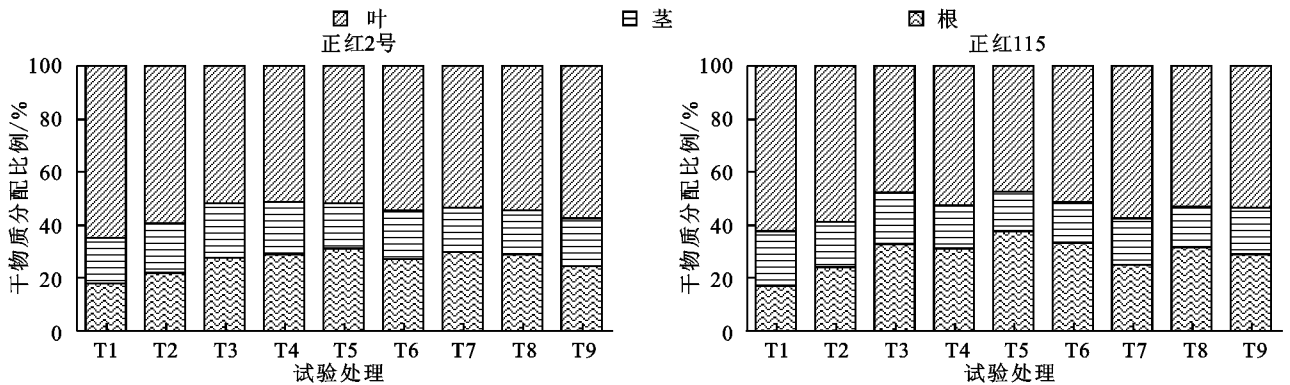


图 2 低磷胁迫下硅对玉米干物质分配比例的影响

2.3 低磷胁迫下加硅对玉米硅含量、积累量及分配的影响

从表 2 可知,磷浓度、硅浓度显著影响着玉米根、茎、叶的硅含量。随着培养液磷浓度下降,玉米茎中硅含量呈现逐渐增加的趋,根系和叶片中硅含量呈现差异性变化。外源加硅处理 Si_2 和 Si_3 均能显著提高玉米根、茎和叶中硅含量,并且茎叶中的增幅大于根系。

由表 3 可知,外源增施硅能够快速增加玉米硅积

累量,并且增施的硅被植株吸收以后会大量沉积在叶片。玉米整株硅积累量随着培养液中磷浓度和硅浓度的增加而增加,磷浓度、硅浓度还显著影响着硅在根、茎和叶中的分配比例。培养液磷浓度从 P_1 增加至 P_3 , 玉米植株硅积累量增加 12.94%~52.24%; 培养液硅浓度从 Si_1 增加至 Si_3 , 玉米植株硅积累量增加 74.86%~398.75%。综上所述,玉米吸收的硅大量分布在叶片中,低磷胁迫不仅会减少玉米硅积累量,而且还会改变硅在玉米各器官的分配比例。

表 2 低磷胁迫下加硅对玉米硅含量的影响

单位:mg/g

磷浓度	硅浓度	正红 2 号			正红 115		
		根	茎	叶	根	茎	叶
P ₃	Si ₃	7.32a	13.55a	10.96a	15.40b	2.57b	13.45a
	Si ₂	6.35b	7.24b	5.26b	21.37a	5.38a	6.96b
	Si ₁	4.69c	3.71c	2.80c	21.38a	1.88c	3.76c
平均数		6.12B	8.17B	6.34A	19.38A	3.28C	8.05B
P ₂	Si ₃	6.93b	15.92a	9.00a	17.83b	11.21a	12.99a
	Si ₂	9.77a	10.47b	6.66b	25.48a	8.40b	7.37b
	Si ₁	3.99c	4.68c	2.93c	17.13c	2.37c	2.76c
平均数		6.90B	10.35A	6.19B	20.15A	7.32B	7.71C
P ₁	Si ₃	9.21a	16.83a	7.69a	12.23a	13.52a	19.20a
	Si ₂	8.30b	10.21b	5.92b	7.66b	10.49b	11.67b
	Si ₁	6.80c	3.67c	3.11c	4.28c	5.25c	4.91c
平均数		8.10A	10.24A	5.57C	8.06B	9.75A	11.93A

表 3 低磷胁迫下加硅对玉米硅积累量和分配的影响

磷浓度	硅浓度	正红 2 号				正红 115			
		单株积累量/mg	根/%	茎/%	叶/%	单株积累量/mg	根/%	茎/%	叶/%
P ₃	Si ₃	67.83a	10.66c	21.52a	67.82a	94.51a	20.14c	4.69b	75.16a
	Si ₂	40.78b	20.09b	24.52a	55.39b	55.85b	44.69b	10.18a	45.13b
	Si ₁	13.60c	31.24a	23.76a	45.01c	31.94c	70.34a	4.97b	24.68c
平均数		40.74A	20.66B	23.26B	56.07A	60.76A	45.06B	6.62C	48.32B
P ₂	Si ₃	37.39a	16.42c	33.99a	49.59a	64.61a	32.26c	14.29a	53.45a
	Si ₂	30.82b	30.24a	23.89b	45.87a	50.23b	58.27b	11.19b	30.54b
	Si ₁	12.56c	25.49b	25.93b	48.58a	23.18c	70.04a	6.10c	23.86c
平均数		26.92B	24.05B	27.93A	48.01B	46.01B	53.52A	10.53B	35.95C
P ₁	Si ₃	33.66a	22.94c	31.44a	45.63a	68.89a	15.35b	14.81c	69.84a
	Si ₂	25.54b	26.93b	25.44b	47.63a	34.15b	18.65ab	17.14b	64.21b
	Si ₁	14.26c	35.02a	17.32c	47.66a	16.69c	21.07a	20.60a	58.33c
平均数		27.82B	28.29A	24.73B	46.97B	39.91B	18.36C	17.52A	64.13A

2.4 低磷胁迫下加硅对玉米磷含量及积累量的影响

从表 4 可知,低磷胁迫会显著降低玉米根、茎和叶中磷含量,从而抑制玉米植株的生长。与正常磷浓度处理 P₃ 相比,中度低磷胁迫处理 P₂ 中正红 2 号和正红 115 根、茎、叶磷含量分别降低 58.52%,82.36%,54.90% 和 53.66%,72.84%,88.84%;重度低磷胁迫处理 P₁ 中正红 2 号和正红 115 根、茎、叶磷含量分别降低 69.77%,76.95%,74.19%和 58.94%,74.69%,92.34%。与不加硅处理 Si₁ 相比,加硅处理 Si₂ 和 Si₃ 能够显著提高玉米叶片中磷含量。从表 5 可知,低磷胁迫会显著降低玉米植株的磷素积累量,加硅可以提高整株磷素积累量和叶片中磷素分配比例,降低茎中磷素分配比例。低磷胁迫导致玉米整株磷积累量降低 76.55%~90.63%,加硅后玉米植株磷积累量提高 19.56%~151.70%。在正常磷浓度 P₃ 和中度低磷胁迫 P₂ 处理中,加硅处理 Si₂ 和 Si₃ 能够显著提高正红 2 号和正红 115 植株磷素积累量和叶片中磷素分配比例,降低茎中磷素分配比例;在重度低磷胁迫 P₁ 处理中,与不加硅处理 Si₁ 相比,加硅处理 Si₂ 和 Si₃ 中 2 个玉米品种磷素积累量无显著提高。综上所述,低磷胁迫会严重抑制玉米

植株磷素吸收和积累,尽管在中度低磷胁迫条件下外源施硅能提高植株磷含量和积累量,但是仍无法完全弥补缺磷带来的负面影响,因此实际生产中,硅肥和磷肥配施对改善玉米硅、磷营养更为有益。

表 4 低磷胁迫下硅对玉米磷含量的影响

单位:mg/g

磷浓度	硅浓度	正红 2 号			正红 115		
		根	茎	叶	根	茎	叶
P ₃	Si ₃	2.95b	4.14c	4.62a	2.55b	5.28a	4.81a
	Si ₂	3.04b	5.98a	4.05b	2.90a	4.88b	4.48b
	Si ₁	3.34a	5.37b	3.30c	1.94c	4.40c	4.40b
平均数		3.11A	5.16A	3.99A	2.46A	4.86A	4.57A
P ₂	Si ₃	1.41a	0.92a	2.33a	1.28a	1.28b	0.70a
	Si ₂	1.32a	0.88a	1.89b	1.10b	1.28b	0.44b
	Si ₁	1.14b	0.92a	1.19c	1.06b	1.41a	0.38b
平均数		1.29B	0.91B	1.80B	1.14B	1.32B	0.51B
P ₁	Si ₃	0.97b	0.97b	1.19a	1.14a	0.97c	0.48a
	Si ₂	1.23a	1.28a	1.06b	0.92b	1.19b	0.31ab
	Si ₁	0.62c	1.32a	0.84c	0.97b	1.54a	0.26b
平均数		0.94C	1.19B	1.03C	1.01C	1.23B	0.35C

表 5 低磷胁迫下硅对玉米磷积累量及其分配的影响

磷浓度	硅浓度	正红 2 号				正红 115			
		单株积累	根/	茎/	叶/	单株积累	根/	茎/	叶/
		量/mg	%	%	%	量/mg	%	%	%
P ₃	Si ₃	26.76b	10.88c	16.66c	72.46a	37.73a	8.40b	24.18a	67.42a
	Si ₂	29.56a	13.24b	27.97b	58.79b	24.80b	13.76a	20.69b	65.55a
	Si ₁	14.94c	20.30a	31.34a	48.37c	14.99c	13.61a	24.81a	61.58b
平均数		23.75A	14.81B	25.32A	59.87B	25.84A	11.92B	23.22C	64.85A
P ₂	Si ₃	6.79a	18.39b	10.95b	70.66a	4.41a	33.79b	23.82c	42.39a
	Si ₂	5.89ab	21.37a	10.50b	68.12a	3.02b	41.73a	28.14b	30.13b
	Si ₁	4.03b	22.78a	15.95a	61.27b	2.59b	38.68a	32.22a	29.11b
平均数		5.57B	20.85A	12.47C	66.69A	3.34B	38.06A	28.06B	33.88B
P ₁	Si ₃	3.79a	21.39b	16.06c	62.55a	2.92a	33.61a	24.92c	41.47a
	Si ₂	4.00a	25.52a	20.28b	54.20b	2.01a	38.18a	33.01b	28.81b
	Si ₁	3.17a	14.35c	28.01a	57.64b	2.32a	34.23a	43.27a	22.51c
平均数		3.65C	20.42A	21.45B	58.13B	2.42B	35.34A	33.73A	30.93C

3 讨论

硅作为水稻、玉米等喜硅作物的有益元素,已经被广大科研工作者所认可^[11-12,22]。硅能提高植株的抗逆性,低磷胁迫下加硅能增加玉米根长、根干重及磷素吸收量,显著提高玉米植株的硅含量和硅积累量^[19-20],铜胁迫下加硅能提高小麦根长和根系活力^[23],盐胁迫下加硅能够保护黄瓜根系中线粒体,提高线粒体中氧化磷酸化及能量代谢,提高线粒体的呼吸作用^[24-26]。本研究结果,玉米硅积累量和磷素积累量显著正相关($r_{0.05,18}=0.569^*$),这表明加硅能促进玉米植株对磷素的吸收,增强玉米适应低磷胁迫的能力。低磷胁迫导致磷素积累量下降,抑制玉米植株的正常生长,降低干物质积累,但地下部受的影响相对地上部小,因此根冠比提高,这是其适应低磷胁迫的形态机制。在正常磷水平 P₃ 和中度磷胁迫 P₂ 条件下,加入 1.5~0.75 mmol/L 硅能够明显增加正红 2 号和正红 115 的植株叶片的磷含量和磷积累量,从而改善玉米苗的生长,增加干物质积累;但在重度低磷胁迫 P₁ 条件下加硅对玉米硅、磷营养的改善减弱,植株的生长依然被严重抑制,从营养的角度说明充足的磷素营养才能保证玉米正常生长,低磷胁迫下硅虽然能够促进植株吸收和积累更多的磷,但因其无法直接替代磷元素参与生理生化代谢,所以在大田生产实践中,为获得玉米高产和减少磷肥用量,可以将硅肥和磷肥进行合理配施。

磷在光合同化力形成和 Calvin 循环中的作用极为重要,影响同化力的形成、Calvin 循环中关键酶的活性、RuBP 的再生以及同化物的运输^[26]。低磷胁迫会导致玉米叶片 PSII 关闭程度增加、光能转换和电子传递效率降低,过剩激发能增加^[10]。本研究结果表明, F_v/F_m (XE)、 F_v'/F_m'

(XE')、 F_q'/F_m' (φPSII)、ETR 与硅积累量显著正相关($r_{0.01,18}=0.421^*,0.490^*,0.724^{**},0.722^{**}$),与叶片磷含量和磷积累量显著正相关($r_{0.01,18}=0.874^{**},0.899^{**},0.736^{**},0.741^{**}$ 和 $r_{0.01,18}=0.767^{**},0.883^{**},0.809^{**},0.811^{**}$),这表明通过提高玉米叶片中磷含量和积累量是硅改善低磷胁迫下玉米光合物质生产能力的重要机制之一。低磷胁迫下正红 2 号和正红 115 通过增强叶片热耗散途径加速消耗过剩的激发能以减少超氧阴离子自由基形成,进而降低光抑制的程度,避免光合器官受到破坏,保证其结构的完整性。在低磷胁迫下加硅能够提高玉米叶片光能捕获率,提高电子传递效率,增加对光能的利用,主动增强 PSII 反应中心对激发能的转化和能量传递途径来减轻光抑制,增强同化物的合成,可见硅很有可能直接或间接参与了玉米叶片对光能的吸收、转化和传递过程。

4 结论

- (1)低磷胁迫会导致正红 2 号和正红 115 叶片光能捕获、转化和传递能力下降,减少干物质积累量,减少硅、磷的吸收和积累,植株通过增强自身热耗散能力,加速消耗过剩的激发能,减少活性氧的产生,避免光合器官受到损伤。
- (2)中度低磷胁迫和正常磷浓度下,外源增施硅能显著提高正红 2 号和正红 115 硅和磷积累量,增加叶片 PSII 反应中心开放程度、光能捕获、光能转换和电子传递效率,借此加强植株主动利用激发能,减轻光抑制,以正红 115 尤为明显。
- (3)本研究结果尽管无法证明硅直接参与玉米叶片光能利用途径,但是加硅能改善低磷胁迫下玉米苗期硅、磷营养,提高玉米苗期物质生产能力,这对指导玉米生产中合理进行硅、磷肥配施具有重要意义。

参考文献:

- [1] 许宗林, 苟曦, 李昆, 等. 四川省耕地土壤养分分布特征与动态变化趋势探讨[J]. 西南农业学报, 2008, 21(3): 718-723.
- [2] 宋春, 徐敏, 赵伟, 等. 不同土地利用方式下紫色土磷有效性及其影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 85-89, 95.
- [3] 王晓慧, 曹玉军, 魏雯雯, 等. 我国北方 40 个高产春玉米品种的磷素利用特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 580-589.
- [4] 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(9): 915-924.
- [5] 黄高强. 我国化肥产业发展特征及可持续性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 51-85.
- [6] 刘存辉, 张可炜, 张举仁, 等. 低磷胁迫下磷高效玉米单交种的形态生理特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 327-333.
- [7] 于兆国, 张淑香. 不同磷效率玉米自交系根系形态与根际特征的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1227-1231.
- [8] 朱从桦, 谢孟林, 郭萍, 等. 硅、磷配施对玉米氮钾养分吸收利用的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1489-1496.
- [9] Izsáki Z. Effects of phosphorus supplies on the nutritional status of maize (*Zea mays* L.) [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2014, 45(4): 516-529.
- [10] 张玉斌, 曹庆军, 张铭, 等. 施磷水平对春玉米叶绿素荧光特性及品质的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(4): 79-81.
- [11] 郭兴华, 郭正刚, 刘慧霞, 等. 硅对植物的有益作用及其对草坪草研究的启示[J]. 草业科学, 2010, 27(3): 55-61.
- [12] 李晓艳, 孙立, 吴良欢. 不同吸硅型植物各器官硅素及氮、磷、钾素分布特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 193-198.
- [13] 屠雯雯. 硅磷配施对水稻土中不同硅磷形态含量及生物有效性的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [14] 李仁英, 邱译萱, 刘春艳, 等. 硅对水稻土磷吸附—解吸行为的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(5): 1134-1139.
- [15] 刘缓, 李建明, 郑刚, 等. 硅肥浓度对温室黄瓜光合和荧光特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 73-78.
- [16] 曹逼力, 李炜蕾, 徐坤. 干旱胁迫下硅对番茄叶片光合荧光特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 495-501.
- [17] 李国景, 刘永华, 朱祝军, 等. 硅和白粉病对长豇豆叶片叶绿素荧光参数和抗病相关酶活性的影响[J]. 植物保护学报, 2006, 33(1): 109-110.
- [18] 徐呈祥, 刘友良, 马艳萍. 硅对盐胁迫下库拉索芦荟叶绿素荧光参数和叶绿体超微结构的影响[J]. 园艺学报, 2007, 34(4): 979-984.
- [19] Yang Y, Li J W, Shi H C, et al. Alleviation of silicon on low-P stressed maize (*Zea mays* L.) seedlings under hydroponic culture conditions[J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2008, 3(6): 168-172.
- [20] Tavakkoli E, English P, Guppy CN. Interaction of silicon and phosphorus mitigate manganese toxicity in rice in a highly weathered soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2011, 42(5): 503-513.
- [21] Xie Z M, Song R, Shao H B, et al. Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils [J]. The Scientific World Journal, 2015(11): Article ID 245072.
- [22] Currie H A, Perry C C. Silica in plants: Biological, Biochemical and chemical studies[J]. Annals of Botany, 2007, 100(7): 1383-1389.
- [23] 张黛静, 马建辉, 杨淑芳, 等. 硅对铜胁迫下小麦幼根细胞超微结构的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2385-2389.
- [24] 钱琼秋, 朱祝军, 何勇. 硅对盐胁迫下黄瓜根系线粒体呼吸作用及脂质过氧化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 875-880.
- [25] 钱琼秋, 宰文娜, 何勇, 等. 外源硅和辅酶 Q10 对盐胁迫下黄瓜根系线粒体的保护作用[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1208-1214.
- [26] 于海秋, 彭新湘, 严小龙, 等. 缺磷对不同磷效率基因型大豆光合日变化的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(5): 519-522.

(上接第 302 页)

- [15] 刘洁, 李贤伟, 纪中华, 等. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2331-2340.
- [16] Niewczas J, Witkowska-Walczak B. Index of soil aggregates stability as linear function value of transition matrix elements[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 70(2): 121-130.
- [17] 全斌, 陈健飞, 郭成达. 福建赤红壤、红壤旱地土壤水库容状况及水分问题研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(2): 96-99.
- [18] 曾爱, 廖永成, 张俊丽, 等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 1009-1015.
- [19] 袁耀, 郭建斌, 陈志豪, 等. 自制多功能土壤改良剂对土壤性状及核桃生长的影响[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3): 69-75.
- [20] 李辉, 唐占辉, 盛连喜. 农业耕作对吉林东部金川湿地土壤保水功能影响及机理的初步探讨[J]. 湿地科学, 2010, 8(2): 151-155.
- [21] 曾路生, 高岩, 李俊良, 等. 寿光大棚土壤团聚体中交换性盐基离子组成与土壤团聚性关系[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 224-228.