植物营养与肥料学报 2016, 22(6): 1603–1611
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.15477
http://www.plantnutrifert.org

硅磷肥配施提高四川春玉米的氮磷钾吸收和产量

朱从桦[1,2]，张嘉莉[1]，郭 翔[3]，王兴龙[1]，姚发玲[1]，孔凡磊[1,2]，袁继超[1,2*]
（1 四川农业大学农学院，四川成都 611130；2 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室，四川成都 611130；
3 四川省农业气象中心，四川成都 610072）

摘要:【**目的**】通过 2014 年和 2015 年两年田间定位试验，研究低磷棕紫泥土上不同硅、磷肥料组合对土壤速效磷含量、植株氮、磷和钾吸收量和利用率、产量及产量构成的影响，为利用硅肥提高该地区肥料的效应提供依据。【**方法**】试验采用两因素裂区设计，品种为主区，设 2 个品种，即正红 2 号和正红 115；肥料组合为副区，设 4 种硅、磷肥组合，即：不施用磷肥和硅肥对照、单施硅 (SiO_2) 75 kg/hm^2、单施磷 (P_2O_5) 60 kg/hm^2、P_2O_5 60 kg/hm^2 加 SiO_2 75 kg/hm^2，分别记为 P_0Si_0、P_0Si_{75}、$P_{60}Si_0$ 和 $P_{60}Si_{75}$。在拔节期、吐丝期和收获期取 0—20 cm 和 20—40 cm 土壤土样，测定速效磷含量，取植株样品测定氮、磷、钾吸收量、产量。【**结果**】两个玉米品种收获期植株氮、磷和钾吸收量四个处理间差异均不显著，2014 年正红 2 号产量明显高于正红 115，2015 年两品种间产量无显著差异。与对照相比，施硅、磷以及硅、磷肥配施均能提高 0—20 和 20—40 cm 土壤速效磷含量，提高玉米植株氮、磷、钾吸收量及籽粒产量，其中以硅、磷配施处理的效果最佳。在吐丝期、收获期，植株氮、磷和钾吸收量与土壤速效磷含量呈显著正相关，植株氮、磷和钾吸收量之间亦相互呈显著正相关；此外，籽粒产量与吐丝期和收获期玉米植株氮、磷和钾吸收量之间均呈显著正相关。与单施磷肥相比，硅、磷肥配施处理氮、磷和钾肥的吸收效率和偏生产力 (两年平均) 分别提高 13.30% 和 10.25%、24.77% 和 10.25%、8.58% 和 10.25%，同时两品种 2014 年和 2015 年平均产量分别提高 8.34% 和 12.12%。【**结论**】低磷棕紫泥土条件下，硅、磷肥配施能显著改善土壤供磷能力，增加玉米植株对氮、磷和钾养分吸收量，提高氮、磷和钾肥利用效率及籽粒产量。

关键词: 春玉米；硅肥；磷肥；棕紫泥土

中图分类号: S513　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)06–1603–09

Effect of increasing N, P and K uptake and yield of spring maize through combined silicon and phosphate fertilizer application in Sichuan

ZHU Cong-hua[1,2], ZHANG Jia-li[1], GUO Xiang[3], WANG Xing-long[1], YAO Fa-ling[1], KONG Fan-lei[1,2], YUAN Ji-chao[1,2*]
(*1 College agronomy of Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;*
2 Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China;
3 Sichuan Agro-meteorological Center, Chengdu 610072, China)

Abstract:【**Objectives**】The effect of combined application of phosphorous fertilizer and silicon fertilizer on the N, P and K uptake and grain yield of spring maize was investigated on the low phosphorus brown purple soil in Sichuan Province in 2014 and 2015, in order to provide support for using silicon fertilizer to improve the efficiencies of fertilizers in this area.【**Methods**】A split plot field experiment was conducted continually in two years with two maize cultivars ZH2 and ZH115 as the main plots and fertilizer treatment as the subplots: neither Si nor P fertilizer,only Si fertilizer (SiO_2 75 kg/hm^2), only P fertilizer (P_2O_5 60 kg/hm^2), both P (P_2O_5, 60 kg/hm^2) and Si fertilizer (SiO_2, 75 kg/hm^2), named P_0Si_0, P_0Si_{75}, $P_{60}Si_0$ and $P_{60}Si_{75}$, respectively. The contents of soil available P in 0–20 and 20–40 cm soil depths were measured; The N, P and K uptake of plants in jointing stage,

收稿日期: 2015–11–30　　**接受日期:** 2016–01–26
基金项目: 公益性行业（农业）科研专项（20150312705）；国家科技支撑计划项目（2012BAD04B13-2）资助。
作者简介: 朱从桦（1986—），男，四川自贡人，博士研究生，主要从事作物高产优质高效栽培理论与技术研究。
E-mail：zchsicau@163.com。* 通信作者 E-mail：yuanjichao5@163.com

silking stage and harvest stage were determined, and the yield and yield components were investigated at harvest. 【**Results**】There was no significant difference in N, P and K uptake of plants between the two cultivars of ZH2 and ZH115 in the two years' experiment, but the grain yield of ZH2 was significantly higher than that of ZH115 in 2014, not significant in 2015. Comparing with P_0Si_0, the N, P and K uptake in plant and grain yield were increased significantly under the treatment of P_0Si_{75}, $P_{60}Si_0$ and $P_{60}Si_{75}$, with the highest increase in $P_{60}Si_{75}$. In jointing and harvest stage, the N, P and K uptake in maize show significantly positive correlation with the contents of soil available P, and plant N uptake positively correlated with P and K uptake in plant. grain yield strongly positive correlated with N, P and K uptake in jointing stage and harvest stage. Compared to $P_{60}Si_0$ treatment, the uptake efficiency and partial factor productivity (average of 2014 and 2015) of N, P and K fertilizer were average increased 13.30% and 10.25%, 24.77% and 10.25%, 8.58% and 10.25% respectively. The grain yield was increased by 8.34% and 12.12% respectively in $P_{60}Si_{75}$ treatment, compared to $P_{60}Si_0$. 【**Conclusions**】Combined application of Si and P fertilizer could significantly improve the P supply of soil during the whole growth stage, increase the N, P and K uptake of maize in jointing, silking and harvest stage, and increase the utilization efficiency of N, P and K fertilizers. So the technique is recommended as an effective way for increasing yield and fertilizer efficiency in the low phosphorus brown purple soil in Sichuan Province.

Key words: spring maize; Si fertilizer; P fertilizer; brown purple soil

玉米 (*Zea mays* L.) 是重要的粮饲兼用及能源作物，其稳产高产受资源、环境及土壤养分特性的影响。作物三大营养元素氮、磷、钾存在相互影响，如施氮能促进作物吸收和利用土壤中的磷和钾[1–3]；施磷能促进作物吸收和利用土壤中的氮和钾[4–7]；施钾能促进作物吸收和利用土壤中的氮和磷[8–9]，因此玉米生产中氮、磷和钾合理配施至关重要。硅是玉米等作物的有益元素[10–14]，玉米各器官硅含量约为4～75 g/kg，含量表现为叶 > 叶鞘 > 根 > 茎 > 种子，并且各器官氮、磷、钾含量与其硅含量呈一定正相关[15]。施硅能改善作物对硅、氮、磷和钾等养分吸收利用[8, 16]，增加作物产量[8, 17–19]。硅和磷由于相似的化学性质存在肥效的互促关系[20]，硅可缓解玉米的低磷胁迫[10]，硅、磷肥配施能改善土壤养分供应能力[21–22]，但硅、磷配施条件下土壤速效磷含量以及氮、磷、钾的吸收利用是否存在差异鲜见报道。本研究以正红 2 号和正红 115 为材料，在低磷土壤条件下进行田间试验，研究硅、磷配施对土壤速效磷含量、玉米氮磷钾养分吸收量和产量的影响，以及以上指标间的相互关系，以期为玉米高产高效节本栽培技术体系提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

于 2014 和 2015 年在四川省简阳市芦葭镇英明村试验点 (30°70′N，103°86′E) 进行两年定位试验，试验地土壤为紫色砂泥岩母质发育而成的棕紫泥土，pH 为 7.68 ± 0.15，有机质含量 15.58 g/kg，碱解氮 34.09 mg/kg、速效磷 4.92 mg/kg、速效钾 124.50 mg/kg，有效硅 210.93 mg/kg，属于低磷、低硅土壤。

供试玉米品种为饲粮兼用型正红 2 号和正红 115，分别于 2014 年 3 月 28 日育苗，4 月 1 日单株移栽，7 月 29 日收获；2014 年 10 月 25 日播种小麦 (不施用任何肥料)，2015 年 3 月 25 日拔除小麦植株并整地，2015 年 4 月 3 日点播，4 月 21 日定苗 (每穴留壮苗 1 株)，7 月 26 日收获。两年均采用宽窄行栽培方式，即宽行 1.6 m，窄行 0.4 m，株距 0.2 m，种植密度约为 50000 株/hm^2。试验采用裂区设计，品种为主区，肥料组合为副区，设 4 种硅、磷肥组合，即：P_0Si_0，不施用硅肥和磷肥；P_0Si_{75}，仅施硅 (SiO_2) 75 kg/hm^2；$P_{60}Si_0$，仅施磷 (P_2O_5) 60 kg/hm^2；$P_{60}Si_{75}$，施磷 (P_2O_5) 60 kg/hm^2，且施硅 (SiO_2) 75 kg/hm^2。磷肥为过磷酸钙 (P_2O_5≥12%)，硅肥为迈乐土壤调理剂 (硅≥20%、钙≥16%、钾≥5.0%、镁≥4.0%，山西迈乐肥业有限责任公司提供)，设置 3 次重复，共 24 个小区，小区面积为 17 m^2 (4.25 m × 4 m)。

2014 年和 2015 年小区分布和试验处理均相同，所有小区纯氮 (尿素，含氮量≥46%) 180 kg/hm^2，K_2O (氯化钾，含 K_2O≥60%) 90 kg/hm^2，施用硅肥带入的钾从钾肥中等量扣除，未施用硅肥处理用氯化钙和氯化镁等量补充钙和镁。氮、磷、钾和硅肥全做底肥，将各小区所施肥料混匀后撒施于窄行上

面，然后覆土 5～8 cm，并用水浇透 0—25 cm 土壤，2014 年于起垄覆膜后第 3 天选择长势一致的壮苗，撬窝单苗带土移栽，2015 年于起垄覆膜后第 2 天直接播种 (每穴 2 粒)，其余田间管理措施同当地大面积高产田块。

1.2　测定项目与方法

1.2.1　土壤速效磷含量　于拔节期、吐丝期和收获期，各小区选 3 个代表性点位取 0—20 cm 和 20—40 cm 土样，风干后过 2 mm 筛，经 0.5 mol/L 碳酸氢钠溶液提取后用钼锑抗比色法进行测定。

1.2.2　植株氮、磷、钾吸收量　于拔节期 (2014-5-8 和 2015-5-11)、吐丝期 (2014-6-8 和 2015-6-17) 和收获期 (2014-7-29 和 2015-7-26)，各小区选取代表性植株 5 株，按照叶片 (含苞叶)、茎鞘 (含叶鞘和穗轴)、雄穗和籽粒分开，放入烘箱中，105℃ 杀青 30 min，80℃ 烘干至恒重并称重，将称完干重后的各器官粉碎过 0.177 mm 筛，采用浓 H_2SO_4-H_2O_2 消煮，用 BUCHI Distillation Unit K-355+Hanon T860 全自动电位滴定仪测定全氮含量，用 FP6410 型火焰光度计测定钾含量，用钼锑抗吸光光度法测定各部位磷含量，并计算氮、磷和钾素积累量。

1.2.3　考种与计产　于收获期，每个小区选取 20 个代表性果穗，调查穗行数、行粒数、穗粒数、千粒重等产量构成因素，并按田间实收株数计产。

1.2.4　参数计算　氮 (磷、钾) 素干物质生产效率 (NDME、PDME、KDME, kg/kg) = 干物质重 (kg/hm^2)/植株氮 (磷、钾) 素吸收量 (kg/hm^2)

氮 (磷、钾) 素利用效率 (NUE、PUE、KUE, kg/kg) = 籽粒产量 (kg/hm^2)/植株氮 (磷、钾) 吸收量 (kg/hm^2)

氮 (磷、钾) 收获指数 (NHI、PHI、KHI) = 籽粒中氮 (磷、钾) 吸收量 (kg/hm^2)/植株氮 (磷、钾) 素吸收量 (kg/hm^2) × 100%

氮 (磷、钾) 肥吸收效率 (NUPE、PUPE、KUPE, kg/kg) = 植株氮 (磷、钾) 素吸收量 (kg/hm^2)/施氮 (磷 P_2O_5、钾 K_2O) 量 (kg/hm^2)

氮 (磷、钾) 肥偏生产力 (NPFP、PPFP、KPFP, kg/kg) = 施氮 (磷、钾) 区产量 (kg/hm^2)/施纯氮 (磷 P_2O_5、钾 K_2O) 量 (kg/hm^2)。

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　硅、磷肥配施对土壤速效磷含量的影响

从表 1 可见，肥料组合对土壤速效磷含量的影响十分显著，0—20 cm 土壤速效磷含量明显比 20—40 cm 土壤高。与对照 (P_0Si_0) 相比，两个品种 3 个时期平均，0—20 cm 土壤中，施硅处理 (P_0Si_{75})、施磷处理 ($P_{60}Si_0$) 和硅、磷配施处理 ($P_{60}Si_{75}$) 速效磷含量分别提高 17.12%、59.51% 和 96.42% (2014 年) 和 19.40%、43.48% 和 93.86% (2015 年)；20—40 cm 土壤中，施硅处理 (P_0Si_{75})、施磷处理 ($P_{60}Si_0$)和硅、磷配施处理 ($P_{60}Si_{75}$) 速效磷含量分别提高 28.83%、89.47% 和 153.73% (2014 年) 和 21.46%、89.34% 和 151.42% (2015 年)。2014 年玉米收获后播种小麦 (未施用肥料) 进一步消耗地力，与 2014 年相比，2015 年玉米生产季各处理同期土壤 0—20 cm 和 20—40 cm 土壤速效磷含量均较低。可见，为获得高产生产中需要适时足量补充磷肥，施硅可以减少土壤对磷的吸附，提高土壤速效磷含量。

2.2　硅、磷肥配施对玉米产量及其构成的影响

从表 2 得出，肥料组合显著影响着玉米的产量及产量构成因素。磷肥和硅肥均有一定增产效果，单施磷肥的增产效果远大于硅肥，硅、磷肥配施的增产效果最好，硅肥和磷肥表现出明显的互促和配合效应。与单施磷处理相比，硅、磷配施处理分别增产 8.34% (2014 年) 和 12.12% (2015 年)，比单施硅肥增产更多。2015 年各处理的产量均较 2014 年低，特别是对照，导致施肥处理的增产幅度均较 2014 年大，原因可能是 2014 年播种冬小麦 (未施用任何肥料)，2015 年地力更低 (表 1)，对照 2 年 3 季均未施磷肥，导致产量特别低，因此 2015 年施肥的增产效果特别好。施用磷肥和硅、磷配施增产的主要原因是促进了玉米的生长发育，增加了穗粒数 (特别是行粒数)，同时也促进了灌浆结实，提高了千粒重，特别是 2015 年，两年两品种联合分析，玉米产量与穗粒数和千粒重均极显著正相关，相关系数分别为 0.958** 和 0.979**。

2.3　硅、磷肥配施对玉米氮、磷和钾素吸收量及其收获指数的影响

从表 3 可见，肥料组合显著影响玉米氮、磷及钾的吸收量及其收获指数。玉米对氮素的吸收量明显多于磷素和钾素，各施肥处理玉米植株氮、磷和钾吸收量表现出高度同步。施磷不仅促进了玉米各

表 1 不同硅、磷肥处理土壤速效磷含量 (mg/kg)

Table 1 Soil available P content in different P and Si fertilizer treatments

品种 Cultivar	处理 Treatment	土层 (cm) Soil depth	2014 拔节期 Jointing	2014 抽穗期 Silking	2014 收获期 Harvest	2015 拔节期 Jointing	2015 抽穗期 Silking	2015 收获期 Harvest
正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	0—20	3.84 c	2.22 d	2.15 d	2.67 b	1.29 c	0.90 b
		2—40	0.93 d	1.16 c	0.87 d	0.60 c	0.45 c	0.43 c
	P_0Si_{75}	0—20	3.80 c	3.04 c	2.67 c	2.66 b	1.51 c	0.99 b
		2—40	1.88 c	1.21 bc	1.03 c	0.70 c	0.51 c	0.59 b
	$P_{60}Si_0$	0—20	5.62 b	3.64 b	3.13 b	2.79 b	1.77 b	1.03 b
		2—40	2.57 b	1.38 b	1.39 b	1.35 b	0.75 b	0.61 b
	$P_{60}Si_{75}$	0—20	6.72 a	4.36 a	3.68 a	3.21 a	2.28 a	1.73 a
		2—40	4.21 a	1.99 a	1.58 a	2.28 a	0.85 a	0.74 a
平均数 Average		0—20	5.00 A	3.31 B	2.91 A	2.83 B	1.73 A	1.16 A
		2—40	2.39 A	1.44 A	1.21 A	1.23 A	0.64 A	0.60 A
正红 115 ZH115	P_0Si_0	0—20	4.56 c	2.20 c	2.35 d	2.30 c	1.07 d	0.68 d
		2—40	1.53 c	1.02 c	0.75 b	0.50 c	0.37 c	0.37 b
	P_0Si_{75}	0—20	4.83 bc	2.68 c	2.70 c	2.91 b	1.51 c	0.83 c
		2—40	1.76 c	1.14 c	0.91 b	0.47 c	0.42 bc	0.57 a
	$P_{60}Si_0$	0—20	5.34 b	5.06 b	3.62 b	2.90 b	1.99 b	1.31 b
		2—40	3.97 b	1.56 b	1.27 a	1.81 b	0.49 b	0.40 b
	$P_{60}Si_{75}$	0—20	7.43 a	6.54 a	4.13 a	4.02 a	2.43 a	1.85 a
		2—40	5.01 a	2.16 a	1.33 a	2.27 a	0.65 a	0.51 a
平均数 Average		0—20	5.54 A	4.12 A	3.20 A	3.03 A	1.75 A	1.17 A
		2—40	3.07 A	1.47 A	1.06 B	1.26 A	0.49 B	0.46 B
F 值 *F*-value	品种 Cultivar (C)	0—20	4.53	35.52^{**}	3.68	35.08^{*}	3.44	0.73
		2—40	138.91^{**}	6.89	35.81^{**}	1.95	50.62^{*}	32.92^{*}
	肥料 Fertilizer (F)	0—20	65.33^{**}	62.52^{**}	68.61^{**}	20.90^{**}	61.06^{**}	151.89^{**}
		2—40	231.75^{**}	65.69^{**}	5.77^{**}	243.10^{**}	56.69^{**}	29.71^{**}
	品种 × 肥料 C × F	0—20	2.95	14.67^{**}	1.44	5.29^{*}	1.96^{**}	10.70^{**}
		2—40	39.96^{**}	2.13^{ns}	0.60	9.96^{*}	4.88^{*}	8.27^{*}

注（Note）：同列数值后不同小字母表示同一品种不同肥料处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different small letters in a column are significantly different among treatments in the same cultivar at 0.05 level; 同列数值后不同大写字母表示同一生育期品种间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different capital letters in a column are significantly different between cultivars at the same growth stage at 0.05 level. * — $P < 0.05$; ** — $P < 0.01$.

生育时期对磷素的吸收，同时也促进了其对氮和钾的吸收，特别是吐丝前的氮素吸收量及其比例；施硅也在一定程度上促进了玉米植株各生育时期对氮、磷、钾的吸收。在不施磷条件下施硅与不施硅相比，两年 2 品种 3 生育时期，氮、磷、钾素吸收量的平均增幅分别为 19.06%、30.00% 和 24.54%；在施磷条件下相应的增幅分别为 9.63%、22.42% 和 10.55%；而硅磷配施处理 ($P_{60}Si_{75}$) 与对照 (P_0Si_0) 相比，相应的氮、磷、钾素吸收量的平均增幅分别为 83.28%、173.69% 和 68.82%，远大于单施磷肥或单施硅肥，硅肥和磷肥表现出明显的协同作用。综上所述，硅、磷肥配施不仅显著促进玉米对磷素的吸收，还能同步促进植株对氮、钾素的吸收，最终改善玉米植株的氮、磷及钾素营养。

表 2　硅、磷肥配施对玉米产量及产量构成的影响

Table 2　Grain yield and yield components of maize affected by phosphate and silicon fertilizer application

品种 Cultivar	处理 Treatment	2014 产量 Yield (kg/hm^2)	2014 穗粒数 Grain No. per ear	2014 行数 Rows per ear	2014 行粒数 Grains per row	2014 千粒重 (g) 1000-kernel weight	2015 产量 Yield (kg/hm^2)	2015 穗粒数 Grain No. per ear	2015 行数 Rows per ear	2015 行粒数 Grains per row	2015 千粒重 (g) 1000-kernel weight
正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	7198.61 c	499.91 c	15.83 c	31.59 b	306.30 c	2376.21 d	236.78 d	13.76 c	17.23 d	245.69 b
	P_0Si_{75}	7240.92 c	499.96 c	16.03 bc	31.18 b	307.89 c	2974.17 c	302.38 c	14.91 b	20.28 c	256.59 b
	$P_{60}Si_0$	7972.74 b	523.23 b	16.70 a	31.39 b	313.28 b	5307.95 b	447.45 b	16.16 a	27.71 b	283.32 a
	$P_{60}Si_{75}$	8589.24 a	557.14 a	16.43 ab	33.92 a	320.56 a	6017.03 a	502.36 a	16.12 a	31.16 a	287.52 a
平均数 Average		7750.38 A	520.06 A	16.25 A	32.02 A	312.01 A	4168.84 A	372.24 A	15.24 A	24.10 B	268.28 A
正红 115 ZH115	P_0Si_0	6554.71 c	470.51 bc	14.67 a	32.12 b	297.08 c	2744.52 d	262.41 d	13.32 b	19.70 d	254.14 b
	P_0Si_{75}	6640.10 c	468.44 c	14.43 a	32.47 b	305.73 b	3490.49 c	350.50 c	12.92 b	27.12 c	246.77 b
	$P_{60}Si_0$	7478.85 b	490.68 b	14.60 a	33.60 b	319.54 a	5533.51 b	451.14 b	14.12 a	31.94 b	294.53 a
	$P_{60}Si_{75}$	8150.92 a	518.73 a	14.17 a	36.62 a	322.75 a	6138.04 a	498.77 a	14.26 a	34.99 a	292.83 a
平均数 Average		7206.15 B	487.09 A	14.47 B	33.70 A	311.27 A	4476.64 A	390.70 A	13.66 B	28.44 A	272.07 A
F 值 *F*-value	品种 Cultivar (C)	23.25**	7.84	185.39**	2.92	0.02	6.55	11.74	175.15**	165.22**	0.43
	肥料 Fertilizer (F)	44.89**	21.03**	2.28	12.07**	41.14**	200.35**	370.80**	28.93**	280.74**	25.68**
	C × F	0.20	0.12	3.68*	1.06	5.52*	0.52	3.87*	5.89*	5.56**	1.13

注（Note）：同列数据后不同小字母表示同一品种不同肥料处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different small letters in a column are significantly different among different fertilization treatments for the same cultivar at 0.05 level; 同列数据后不同大写字母表示不同品种间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different capital letters are significantly differen between cultivars at 0.05 level. * — $P < 0.05$; ** — $P < 0.01$.

2.4　硅、磷肥配施对玉米氮、磷和钾利用的影响

从表 4 得出，肥料组合显著影响着正红 2 号和正红 115 氮、磷和钾肥的利用。与对照 (P_0Si_0) 相比，两年两品种平均，施硅处理 (P_0Si_{75}) 的氮肥吸收效率 (NUPE) 和氮肥偏生产力 (NPFP) 分别提高 11.80% 和 13.55%，钾肥吸收效率 (KUPE) 和钾肥偏生产力 (KPFP) 分别提高 20.08% 和 13.57%；单施磷肥处理 ($P_{60}Si_0$) 的 NUPE 和 NPFP 分别提高 41.35% 和 62.46%，KUPE 和 KPFP 分别提高 44.02% 和 62.48%，硅、磷肥处理 ($P_{60}Si_{75}$) 的 NUPE 和 NPFP 分别提高 58.62% 和 80.13%，KUPE 和 KPFP 分别提高 56.76% 和 80.16%。与单施磷肥相比，两年两品种平均，硅、磷肥配施处理氮肥吸收效率和氮肥偏生产力分别提高 13.30% 和 10.25%，磷肥吸收效率和磷肥偏生产力分别提高 24.77% 和 10.25%，钾肥吸收效率和钾肥偏生产力分别提高 8.58% 和 10.25%。可见，硅、磷肥间互促效应显著，硅、磷肥配施能同步提高玉米对氮、磷和钾肥的利用，因此氮、磷、钾、硅肥应科学配施。

3　讨论

四川丘陵旱地，土壤瘠薄，山坡地玉米高产、稳产依赖大量投入氮、磷和钾肥[23–24]。通过筛选适宜品种[25]，优化栽培方式[26]，改进施肥方式[27–28]，优选肥料种类[29]，并结合土壤地力开展配方施肥等提高玉米产量和肥料利用率。缺磷条件下，施用磷能明显改善玉米生长，提高籽粒产量[4–7]；硅作为植物的有益元素，能够提高植株抗生物和非生物胁迫能力[12]，能提高玉米光合速率[11]和籽粒产量[18–19]。本研究结果表明，磷肥的增产效果远远大于硅肥，但是硅、磷肥配施的增产效果比单施磷肥更为显著，2014 年和 2015 年分别增加 1288.57 kg/hm^2 和 1313.61 kg/hm^2，相应的增幅分别为 8.34% 和 12.12%。与 2014 年相比，经过 2014 年播种冬小麦 (未施任何肥料) 进一步消耗地力 (见表 1)，导致 2015 年对照、施硅、施磷和硅、磷配施处理分别减产 62.56%、53.18%、29.72% 和 27.32%，其中以硅、磷配施处理减产幅度最小并且籽粒产量最高，更进一步表明硅、磷配施能够增强玉米低磷土壤条件下的耐瘠[10, 13]、抗旱能力[30–32]。

表 3 硅、磷肥配施对玉米氮、磷、钾吸收量 (kg/hm^2) 及收获指数 (%) 的影响

Table 3 Nutrient uptake amount (kg/hm^2) and harvest index (%) of maize affected by P and Si fertilizer application

养分 Nutrient	品种 Cultivar	处理 Treatment	2014 拔节期 Jointing	2014 吐丝期 Silking	2014 收获期 Harvest	2014 收获指数 HI	2015 拔节期 Jointing	2015 吐丝期 Silking	2015 收获期 Harvest	2015 收获指数 HI
N	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	6.91 b	72.07 c	128.19 c	63.30 a	9.58 d	45.222 d	80.17 d	60.13 b
		P_0Si_{75}	5.71 b	99.99 b	138.88 b	62.03 a	13.49 c	62.99 c	92.19 c	60.95 b
		$P_{60}Si_0$	10.84 a	113.58 a	137.83 b	62.09 a	26.42 b	102.00 b	123.66 b	63.31 a
		$P_{60}Si_{75}$	11.30 a	94.76 b	152.88 a	61.89 a	31.03 a	116.71 a	144.22 a	64.90 a
		平均数 Average	8.69 A	95.10 A	139.45 A	62.33 A	20.07 A	81.65 A	110.34 A	62.32 A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	5.12 b	77.76 b	123.13 c	60.83 a	13.12 c	62.11 c	78.83 b	60.69 b
		P_0Si_{75}	7.36 a	81.68 b	137.35 b	55.81 c	14.37 c	73.93 c	90.68 b	59.24 b
		$P_{60}Si_0$	8.22 a	91.41 a	132.05 b	56.58 c	20.98 b	108.67 b	155.71 a	60.55 b
		$P_{60}Si_{75}$	8.23 a	88.82 a	156.95 a	58.65 b	26.69 a	130.76 a	163.07 a	63.10 a
		平均数 Average	7.23 A	84.92 B	137.37 A	57.97 B	18.89 A	95.00 A	122.42 A	60.90 A
	F 值 *F*-value	品种 Cultivar (C)	1.93	35.01*	0.53	176.06**	0.45	16.20	10.88	1.19
		肥料 Fertilizer (F)	29.65**	50.74**	30.98**	8.16**	130.59**	103.19**	109.09**	8.36**
		C × F	8.80**	15.71**	1.05	3.33	8.78*	0.47	5.50*	1.31
P	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	0.85 c	7.51 d	18.86 d	66.92 b	0.59 d	3.02 d	6.70 d	80.61 a
		P_0Si_{75}	0.86 c	10.61 c	23.20 c	67.98 b	0.85 c	4.56 c	8.69 c	79.39 ab
		$P_{60}Si_0$	1.34 b	13.91 b	31.11 b	71.73 a	2.38 b	10.22 b	12.27 b	77.12 c
		$P_{60}Si_{75}$	1.62 a	16.02 a	38.99 a	72.24 a	3.11 a	11.95 a	16.50 a	78.46 bc
		平均数 Average	1.17 A	13.27 A	28.04 A	69.72 A	1.73 A	7.44 A	11.04 A	78.89 A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	0.69 c	8.28 d	21.17 d	67.25 b	0.68 d	4.17 c	6.30 c	81.12 a
		P_0Si_{75}	0.96 b	10.80 c	26.59 c	71.30 a	0.86 c	5.45 c	7.40 c	77.23 b
		$P_{60}Si_0$	1.19 a	13.21 b	31.13 b	71.04 a	1.79 b	10.57 b	14.85 b	76.39 b
		$P_{60}Si_{75}$	1.29 a	15.15 a	38.31 a	72.25 a	2.32 a	14.05 a	17.36 a	77.92 b
		平均数 Average	1.03 A	13.23 A	29.30 A	70.46 A	1.41 A	8.54 A	11.48 A	78.17 A
	F 值 *F*-value	品种 Cultivar (C)	0.86	0.44	4.41	8.63	10.76	6.54	1.17	1.05
		肥料 Fertilizer (F)	41.83**	586.01**	671.41**	34.68**	517.08**	143.14**	207.41**	15.14**
		C × F	3.32	7.77*	9.41**	5.20**	24.93*	1.03	6.25**	1.57
K	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	4.76 b	74.08 b	78.59 b	22.25 b	6.68 d	32.83 d	41.88 d	29.35 b
		P_0Si_{75}	3.67 c	92.93 a	98.19 a	21.77 b	9.02 c	38.30 c	47.72 c	30.89 b
		$P_{60}Si_0$	6.02 a	91.23 a	92.28 a	23.39 b	12.14 b	49.97 b	61.98 b	30.26 b
		$P_{60}Si_{75}$	6.24 a	93.68 a	97.00 a	25.06 a	15.21 a	57.53 a	69.84 a	34.03 a
		平均数 Average	5.17 A	87.98 A	91.52 A	23.11 B	10.76 A	44.66 A	55.35 A	31.13 A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	3.10 b	67.07 c	73.12 c	26.32 a	5.83 d	31.50 d	35.87 d	36.56 ab
		P_0Si_{75}	5.46 a	80.33 b	87.49 b	23.79 b	8.34 c	37.83 c	44.01 c	36.94 a
		$P_{60}Si_0$	4.90 a	95.58 a	100.15 a	25.99 a	11.31 b	50.51 b	62.94 b	34.38 bc
		$P_{60}Si_{75}$	5.03 a	96.12 a	105.40 a	26.59 a	14.08 a	60.06 a	69.33 a	33.89 c
		平均数 Average	4.62 A	84.77 A	91.54 A	25.67 A	9.89 A	44.98 A	53.04 A	35.44 A
	F 值 *F*-value	品种 Cultivar (C)	0.72	18.21	0.22	50.07*	1.04	0.05	0.85	11.64
		肥料 Fertilizer (F)	13.52**	58.28**	40.44**	6.68**	154.87**	77.58**	74.05**	1.88
		C × F	13.24**	7.51**	7.71**	1.30	0.10	0.37**	0.90	7.78**

注（Note）：同列数值后不同小字母表示同一品种不同肥料处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different small letters in a column are significantly different among treatments in the same cultivar at 0.05 level; 同列数值后不同大写字母表示同一生育期品种间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different capital letters in a column are significantly different between cultivars at the same growth stage at 0.05 level. * — $P < 0.05$; ** — $P < 0.01$.

表 4　不同硅、磷肥处理玉米氮、磷和钾肥利用率 (kg/kg)

Table 4　Nutrient utilization efficiency of maize under different P and Si fertilization treatments

年份 Year	品种 Cultivar	处理 Treatment	干物质生产率 DME			肥料利用率 UE			养分吸收效率 UPE			肥料偏生产力 PFP		
			N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
2014	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	96.6 c	661.7 a	157.5 a	56.3 a	385.8 a	91.8 a	0.7 c		0.9 b	40.0 c		80.0 c
		P_0Si_{75}	98.7 b	592.4 b	139.5 b	52.1 b	312.3 b	73.7 b	0.8 b		1.1 a	40.2 c		80.4 c
		$P_{60}Si_0$	102.3 a	454.6 c	153.7 a	58.0 a	257.4 c	86.7 a	0.8 b	0.5 b	1.0 a	44.3 b	133.0 b	88.6 b
		$P_{60}Si_{75}$	99.9 b	392.3 d	158.0 a	56.2 a	220.5 d	88.7 a	0.9 a	0.6 a	1.1 a	47.7 a	143.2 a	95.4 a
	平均数 Average		99.4 B	525.2 A	152.1 A	55.6 A	294.0 A	85.2 A	0.8 A	0.6 A	1.0 A	43.1 A	138.0 A	86.1 A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	104.8 b	614.1 a	176.9 a	53.4 b	313.3 a	90.3 a	0.7 c		0.8 c	36.4 c		72.8 c
		P_0Si_{75}	106.5 b	553.8 b	167.2 a	48.4 c	251.8 b	76.0 b	0.8 b		1.0 b	36.9 c		73.8 c
		$P_{60}Si_0$	113.9 a	475.4 c	147.5 b	57.7 a	241.3 b	74.7 b	0.7 bc	0.5 b	1.1 a	41.6 b	124.6 b	83.1 b
		$P_{60}Si_{75}$	99.0 c	406.4 d	147.5 b	51.9 bc	212.9 c	77.4 b	0.9 a	0.6 a	1.2 a	45.3 a	135.8 a	90.6 a
	平均数 Average		106.1 A	512.5 A	159.8 A	52.7 A	254.8 B	79.6 A	0.8 A	0.6 A	1.0 A	40.0 B	130.2 A	80.1 B
	F 值 *F*-value	品种 Cultivar (C)	594.9**	18.4	7.5	3.2	31.4*	16.0	0.7	0.4	0.4	23.2**	5.3	23.2*
		肥料 Fertilizer (F)	59.4**	162.7**	6.0**	9.7**	59.8**	7.4**	30.7**	342.3**	38.5**	44.9**	14.9*	44.9**
		C × F	28.7**	4.4*	9.1**	0.8	4.8*	2.1	1.5	1.0	7.6**	0.2	0.1	0.2
2015	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	90.2 a	1077.9 a	173.0 b	29.7 b	355.1 b	56.8 b	0.4 c		0.5 d	13.2 d		26.4 d
		P_0Si_{75}	89.5 ab	948.8 b	173.1 b	32.3 b	342.6 b	62.5 b	0.5 c		0.5 c	16.5 c		33.0 c
		$P_{60}Si_0$	86.4 bc	919.1 b	173.4 b	43.1 a	433.9 a	86.6 a	0.7 b	0.2 b	0.7 b	29.5 b	88.5 b	59.0 b
		$P_{60}Si_{75}$	87.6 c	792.4 c	182.3 a	42.2 a	371.2 b	87.8 a	0.8 a	0.3 a	0.8 a	33.4 a	100.3 a	66.9 a
	平均数 Average		88.4 A	934.6 A	175.4 B	36.8 A	375.7 B	73.4 B	0.7 A	0.2 A	0.6 A	23.2 A	94.4 A	46.3 A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	83.2 a	1041.4 a	182.8 c	34.8 a	435.7 a	76.6 a	0.4 b		0.4 d	15.2 d		30.5 d
		P_0Si_{75}	83.5 a	1024.0 a	172.2 d	38.4 a	470.3 a	79.1 a	0.5 b		0.5 c	19.4 c		38.8 c
		$P_{60}Si_0$	82.0 a	853.0 b	203.0 a	35.6 a	373.5 b	88.3 a	0.8 a	0.2 b	0.7 b	30.7 b	92.2 b	61.5 b
		$P_{60}Si_{75}$	82.4 a	765.9 c	193.4 b	37.7 a	353.7 b	88.7 a	0.9 a	0.3 a	0.8 a	34.1 a	102.3 a	68.2 a
	平均数 Average		82.7 B	921.1 A	187.9 A	36.6 A	408.3 A	83.2 A	0.6 A	0.3 A	0.6 A	24.9 A	97.3 A	49.7 A
	F 值 *F*-value	品种 Cultivar (C)	53.9*	1.6	161.5**	0.5	28.0*	118.5**	11.5	15.2	0.8	6.1	10.9	6.1
		肥料 Fertilizer (F)	3.9*	49.7**	41.3**	6.5**	1.8	13.7**	105.3**	51.8**	75.9**	200.3**	18.7*	200.3**
		C × F	0.8	3.2	28.2**	5.7*	7.9**	2.6	5.5*	3.9	1.0	0.5	0.1	0.5

注（Note）：DME—Dry matter production efficiency; UE—Nitritent utilization efficiency; UPE—Fertilizer uptake efficiency; PFP—Fertilizer partial factor productivity; 同列数据后不同小字母表示同一品种不同肥料处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different small letters in a column are significantly different among different fertilization treatments for the same cultivar at 0.05 level; 同列数据后不同大写字母表示不同品种间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different capital letters are significantly differen between cultivars at 0.05 level. * — $P < 0.05$; ** — $P < 0.01$.

玉米不同品种对氮、磷和钾的吸收存在差异进而影响其籽粒产量[5, 33]。本研究结果表明，正红 2 号和正红 115 收获期氮、磷和钾吸收量和产量无显著差异，但是玉米吐丝期、收获期植株的氮、磷、钾吸收量与籽粒产量呈显著正相关，因此确保植株吸收足量的氮、磷和钾素养分是玉米稳产、高产的重要前提。

氮、磷和钾肥间肥效互促已被证实，其中任何一种养分丰缺都会影响作物对其余两种养分的吸收利用[1−7, 9, 34]，作物从播种到收获，任何阶段出现氮、磷和钾养分亏缺都将影响作物产量。硅、磷元素化

学性质相似，两者具有相互促进肥效的关系[20]，加硅能减少土壤磷的吸附并增加土壤磷的解吸，从而提高土壤磷的活性和生物有效性[21]，氮、硅混施或磷、硅混施能增加作物叶片氮、磷含量[8, 16]。本研究结果表明，硅、磷配施能够显著提高土壤速效磷含量及玉米植株氮、磷和钾素吸收量。各生育期氮、磷和钾吸收量间彼此呈显著正相关，其中拔节期氮和磷、氮和钾、磷和钾吸收量相关系数分别为 0.868、0.977、0.830 ($P < 0.01$)，吐丝期氮和磷、氮和钾、磷和钾吸收量相关系数分别为 0.782、0.425、0.795 ($P < 0.01$)，收获期氮和磷、氮和钾、磷和钾吸收量相关系数分别为 0.699、0.760、0.934 ($P < 0.01$)，玉米植株氮、磷和钾营养关系如此密切，因此在生产中氮、磷、钾肥必须要合理配施。此外，磷素吸收量更是与吐丝期和成熟期 0—20 cm、20—40 cm 土壤速效磷含量呈显著正相关，相关系数为 0.762、0.965 和 0.729、0.911 ($P < 0.01$)，同期玉米植株氮、钾吸收量也与土壤速效磷含量呈现显著正相关，可见土壤磷供应状况能够影响玉米植株磷氮、磷、钾养分吸收量。就生育期而言，拔节期和吐丝期、吐丝期和成熟期玉米株氮、磷和钾吸收量间也存在显著正相关，表明玉米各生育期氮、磷和钾养分吸收环环相扣，从时间节点联系紧密。硅、磷肥配施能减少土壤对磷的吸附，提高土壤磷素供应水平，提高玉米磷吸收量的同时增强对氮、钾的吸收，改善玉米植株氮、磷和钾三大矿质营养，提高氮、磷和钾肥的利用效率和玉米产量，这是其高产高效的重要机理。

4 结论

在四川丘陵低磷棕紫土壤条件下，通过硅、磷肥配施，能够改善土壤供磷能力，促进玉米对磷素的吸收，直接或间接带动玉米对氮、钾的协同吸收，提高氮、磷和钾肥的利用效率和籽粒产量，但是氮、磷、钾、硅肥的最佳施用比例，以及水肥耦合机制有待进一步的研究。

参 考 文 献：

[1] 景立权, 赵福成, 王德成, 等. 不同施氮水平对超高产夏玉米氮磷钾积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1478–1490.
Jing L Q, Zhao F C, Wang D C, *et al*. Effects of nitrogen application on accumulation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium of summer maize under super-high yield conditions [J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(8): 1478–1490.

[2] 刘水, 李伏生. 不同水氮条件下灌溉方式对玉米干物质量和氮钾利用的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5249–5256.
Liu S, Li F S. Effect of irrigation method on dry mass and nitrogen and potassium utilization of maize under different water and nitrogen conditions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5249–5256.

[3] 纪德智, 王端, 赵京考, 等. 不同氮肥形式对玉米氮、磷、钾吸收及氮素平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 106–111.
Ji D Z, Wang R, Zhao K J, *et al*. Effects of different nitrogen forms on N, P, K uptake of corn and nitrogen balance [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 106–111.

[4] 张静, 王艳. 不同磷水平玉米自交系根系形态及吸收氮、钾差异研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 92–94.
Zhang J, Wang Y. Differences of corn inbred lines in root morphology, nitrogen uptake and potassium uptake at different phosphorus levels [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(1): 92–94.

[5] 袁硕, 彭正萍, 史建霞, 等. 磷对不同基因型玉米生长及氮磷钾吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(1): 29–32, 84.
Yuan S, Peng Z P, Shi J X, *et al*. Effects of P fertilizer application on the plant growth and nutrient uptake of N, P and K in different maize cultivars [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(1): 29–32, 84.

[6] 李绍长, 胡昌浩, 龚江, 等. 供磷水平对不同磷效率玉米氮、钾素吸收和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 237–240.
Li S C, Hu J H, Gong J, *et al*. Effects of phosphorus supply on nitrogen and potassium absorption and distribution of maize with different phosphorus efficiency [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 237–240.

[7] 章爱群, 贺立源, 门玉英, 等. 磷水平对不同耐低磷玉米基因型幼苗生长和养分吸收的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(3): 347–350.
Zhang A Q, He L Y, Men Y Y, *et al*. Effect of phosphorus levels on growth and nutrient absorption of low-p tolerant maize seedlings [J]. Chinese Journal of Applied Environment and Biology, 2008, 14(3): 347–350.

[8] 魏朝富, 谢德体, 杨剑虹, 等. 氮钾硅肥配施对水稻产量和养分吸收的影响[J]. 土壤通报, 1997, 28(3): 121–123.
Wei C F, Xie D T, Yang J H, *et al*. Effects of application nitrogen, potassium and silicon fertilizer together on yield and nutrient uptake of rice [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1997, 28(3): 121–123.

[9] 李文娟, 何萍, 金继运. 钾素营养对玉米生育后期干物质和养分积累与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 799–807.
Li W J, He P, Jin J Y. Potassium nutrition on dry matter and nutrients accumulation and translocation at reproductive stage of maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(4): 799–807.

[10] Yang Y, Li J W, Shi H C, *et al*. Alleviation of silicon on low-P stressed maize (*Zea may* L.) seedlings under hydroponic culture conditions[J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2008, 4 (2): 168–172.

[11] Xie Z M, Song R, Shao H B, *et al*. Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils [J]. The Scientific World Journal, 2015: 245072. doi: 10.1155/2015/245072.

[12] Ma J F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants tobiotic and abiotic stresses[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2004, 50: 11–18.

[13] Owino-Gerroh C, Gascho G. J. Effect of silicon on low pH soil phosphorus sorption and on uptake and growth of maize [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35(15): 2369–2378.

[14] Ma J F, Yamaji N. Silicon uptake and accumulation in higher plants [J]. Trends in Plant Science, 2006, 11(8): 392–397

[15] 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.
Li X Y, Sun L, Wu L H. The distribution of silicon, nitrogen, phosphorus and potassium in the organs of different silicon-absorbing plants [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(1): 193–198.

[16] 刘慧霞, 郭正刚. 不同土壤水分条件下添加硅对紫花苜蓿茎叶和土壤氮磷钾含量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(6): 347–350.
Liu H X, Guo Z G. Effects of supplementary silicon on nitrogen, phosphorus and potassium contents in the shoots of medicago sativa plants and in the soil under different soil moisture conditions [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, 17(6): 347–350.

[17] 陆福勇, 江立庚, 秦华东, 等. 不同氮、硅用量对水稻产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 846–850.
Lu F Y, Jiang L G, Qing H D, *et al*. Effects of nitrogen and silicon levels on grain yield and qualities of rice [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(6): 846–850.

[18] 张月玲, 王宜伦, 谭金芳, 等. 氮硅配施对夏玉米抗倒性和产量的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(4):122–125.
Zhang Y L, Wang Y L, Tan J F, *et al*. Effect of nitrogen application combined with silicon on the lodging-resistance and the yield of summer corn [J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(4):122–125.

[19] 周青, 潘国庆, 施作家, 等. 玉米施用硅肥的增产效果及其对群体质量的影响[J]. 玉米科学, 2002, 10(1): 81–183, 94.
Zhou Q, Pan G Q, Shi Z J, *et al*. Increasing production efficiency of using Si and the influence on quality of population in maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2002, 10(1): 81–183, 94.

[20] 胡克伟, 肇雪松, 关连珠, 等. 水稻土中硅磷元素的存在形态及其相互影响研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(4): 272–274.
Hu K W, Qing X S, Guan L Z, *et al*. Study on interaction and forms of silicon and phosphate in paddy soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(4): 272–274.

[21] 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.
Li R Y, Qiu Z X, Liu C Y, *et al*. Adsorption-desorption behaviors of phosphorus under different silicon concentrations in paddy soils [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(5): 1134–1139.

[22] 王东, 王晓岑, 李淑芹, 等. 硅磷交互作用对土壤酶活力的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(3): 70–74.
Wang D, Wang X L, Li S Q, *et al*. Effects of silicon-phosphorus interactions on soil enzyme activities [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(3): 70–74.

[23] 陈庆瑞, 冯文强, 涂仕华, 等.四川盆中丘陵区不同台位旱坡地土壤养分状况研究[J]. 西南农业学报, 2002, 15(1): 74–79.
Chen Q R, Feng W Q, Tu S H, *et al*. Study on nutrient status in sloping uplands of Sichuan hilly areas [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2002, 15(1): 74–79.

[24] 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.
Xü Z L, Gou X, Li K, *et al*. Distribution and characteristics of cultivated soil nutrients and its dynamic change trend in Sichuan province [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(3): 718–723.

[25] 李强, 马晓君, 程秋博, 等. 氮肥对不同耐低氮性玉米品种干物质及氮素积累与分配的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2015, 41(5): 527–536.
Li Q, Ma X J, Cheng Q B, *et al*. Effects of nitrogen fertilizer on the accumulation and allocation of dry matter and nitrogen for maize cultivars with different low nitrogen tolerance [J]. Journal of Zhejiang University (Agric.& Life Sci.), 2015, 41(5): 527–536.

[26] 王小春, 杨文钰, 邓小燕, 等. 玉米/大豆和玉米/甘薯模式下玉米干质积累与分配差异及氮肥的调控效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 46–57.
Wang X C, Yang W Y, Deng X Y, *et al*. Differences of dry matter accumulation and distribution of maize and their responses to nitrogen fertilization in maize /soybean and maize / sweet potato relay intercropping systems[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 46–57.

[27] 战秀梅, 韩晓日, 王帅, 等. 不同施肥对春玉米源库特征及其关系的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 887–891.
Zhan X M, Han X R, Wang S, *et al*. Effect of different amounts of fertilizer on source and sink and their relationships of spring maize[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(4): 887–891.

[28] 王丽梅, 李世清, 邵明安. 水、氮供应对玉米冠层营养器官干物质和氮素累积、分配的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(13): 2697–2705.
Wang L M, Li S Q, Shao M A, *et al*. Effects of N and water supply on dry matter and N accumulation and distribution in maize (*zea mays* L.) leaf and straw-sheath [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(13): 2697–2705.

[29] 赵斌, 董树亭, 张吉旺, 等. 控释肥对夏玉米产量和氮素积累与分配的影响[J].作物学报, 2010, 36(10): 1760–1768.
Zhao B, Dong S T, Zhang J W, *et al*. Effects of controlled-release fertilizer on yield and nitrogen accumulation and distribution in summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(10): 1760–1768.

[30] 李清芳, 马成仓, 尚启亮. 干旱胁迫下硅对玉米光合作用和保护酶的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 531–536.
Li Q F, Ma C C, Shang Q L. Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of maize under drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(3): 531–536.

[31] 邹春琴, 高霄鹏, 张福锁. 施硅对玉米生长及蒸腾速率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 55–57.
Zou C Q, Gao X P, Zhang F S. Effects of silicon application on growth and transpiration rate of maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(3): 55–57.

[32] 李清芳, 马成仓, 季必金. 硅对干旱胁迫下玉米水分代谢的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4163–4168.
Li Q F, Ma C C, Ji B J. Effect of silicon on water metabolism in maize plants under drought stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4163–4168.

[33] 齐文增, 陈晓璐, 刘鹏, 等. 超高产夏玉米干物质与氮、磷、钾养分积累与分配特点[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 26–36.
Qi W Z, Chen X L, Liu P, *et al*. Characteristics of dry matter, accumulation and distribution of N, P and K of super-high-yield summer maize [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 26–36.

[34] 龚金龙, 胡雅杰, 龙厚元, 等. 不同时期施硅对超级稻产量和硅素吸收、利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1475–1488.
Gong J L, Hu Y J, Long H Y, *et al*. Effect of application of silicon at different periods on grain yield and silicon absorption, use efficiency in super rice [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(8): 1475–1488.