

施用硅肥对田间春小麦花后源库关系的影响

郝立冬¹, 贾 森¹, 刘绍武¹, 郭海滨¹, 于立河²

(1. 绥化学院, 黑龙江 绥化 152061; 2. 黑龙江八一农垦大学, 黑龙江 大庆 163319)

摘 要: 以两个黑龙江春小麦品种即龙麦 26(不耐密)和克旱 16(耐密)为材,在田间机播条件下进行不同硅肥用量基施试验,通过测定不同生育期的光合性能、籽粒灌浆速率及产量构成因素,以探明基施硅肥对春小麦源库特性及产量的影响。结果表明,基施硅肥可协调小麦源库关系,使小麦源足、库大。两个春小麦品种施入硅肥后穗长和小穗数增加,千粒重未达到显著水平,硅肥提高了不耐密品种的穗粒数和穗粒重,增加了耐密品种的穗数。不耐密品种龙麦 26、耐密品种克旱 16 的最优硅肥施用量分别为 30 kg·hm⁻²、60 kg·hm⁻²,过多施入硅肥反倒有不利影响。

关键词: 硅肥;春小麦;源库特性;产量

中图分类号: S143.7;S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)06-0119-06

Effect of application of silicon fertilizer to source-store relationship of spring wheat after flowering

HAO Li-dong¹, JIA Sen¹, LIU Shao-wu¹, GUO Hai-bai¹, YU Li-he²

(1. Suihua University, Suihua, Heilongjiang 152061, China;

2. Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: Taking two types of spring wheat cultivars of Longmai 26 (non-density tolerance) and Kehan 16(density tolerance) of Heilongjiang Province as for materials, carried out the experiment of different quantity of silicon fertilizer under the condition of field mechanical sowing. Through measuring the photosynthetic performance at the different growth period, grain-filling rate and yield constitute factors, were searched and clarified the effects of base silicon fertilizer to source-store characteristics and yield of spring wheat. The results showed that: The source-store relationship of wheat can be coordinated by base silicon fertilizer, making the wheat source sufficient and large store. The spike length and spikelet number were increased of two spring wheat varieties after application of silicone fertilizer, but the weight of thousand seeds did not reach the significant level. The grain numbers and grain weight per spikelet were increased for non-density tolerance variety of wheat and the spikelet numbers were increased for density tolerance variety by using silicon fertilizer. The optimal applied amount of silicon fertilizer was 30 kg·hm⁻² and 60 kg·hm⁻² respectively for non-density tolerance variety of Longmai 26 and density tolerance variety of Kehan 16. If use too much silicon fertilizer will have disadvantage effect.

Keywords: silicon fertilizer; spring wheat; source-store characteristics; production

硅是地壳中丰度仅次于氧的第二位元素,但土壤溶液中能供给植物吸收利用的硅素却很少。硅对许多植物生长有益^[1],它可促进植物对 N、P、K 等营养的吸收^[2],降低植株高度,增加茎秆壁的厚度,提高植株抗倒伏能力^[3]。施硅可调节叶片中可溶性糖和可溶性蛋白质含量,改变植株碳氮平衡^[4]。硅肥能降低植物膜脂过氧化程度,提高对重金属毒害、盐害、干旱等非生物胁迫,以及病虫害等生物胁迫的抗性^[5-7]。而去硅营养液培养会导致植物的非典型环境胁迫^[8];在 7 种不同类型土壤的大田试验证明,施用硅肥均能不同程度地增加小麦产量^[9];此外,硅肥还可以改善小麦籽粒品质^[10]。

光合作用是作物形成产量的基础,植物干重的 90% 以上是通过光合作用合成的^[11]。植物吸收硅以后使叶细胞中的叶绿体增大、基粒增多^[12],抑制基部叶片活氧化物酶(POD)活性,减轻木质化程度,

收稿日期:2014-04-28
基金项目:绥化市科学技术项目(重点)“硅对春小麦产量和品质的研究”(K1404005)
作者简介:郝立冬(1987—),男,黑龙江省绥化市人,助教,硕士,主要从事作物高产理论与技术研究。E-mail: haolidong1987@163.com。
通信作者:于立河(1962—),男,黑龙江省大庆市人,教授,博士,主要从事作物高产理论与技术研究。

有利于延缓基部叶片的早衰,增加对光的吸收^[13]。施用硅肥的水稻生长健壮,茎秆充实度明显提高,而且茎秆对水分、无机盐等养分的输送畅通无阻,叶与茎夹角缩小,叶片挺立^[14-15],冠层受光姿态改善,最适叶面积增大,减少植株间相互遮荫,从而提高叶片光合速率,并能促进碳水化合物向籽粒中转移,提高产量^[16]。

自从 Mason 和 Maskell 通过研究光合产物在棉株内的分配方式,提出作物产量的源库理论(Source-sink theory)以来,人们常以源库的观点去探讨作物高产的途径。作物产量的形成实质上是源库互作的过程^[17]。小麦的经济产量通常指籽粒,小麦籽粒在开花后形成并充实,其干物质的 70%~90%来自开花后积累的光合产物^[18]。前人提出了硅肥可增加小麦花后干物质积累,增强光合作用,有效协调源、库二者之间的关系^[19],提高产量,但未见深入研究的报道。硅在生产实践中的应用屡见报道,且效果明显^[10,26]。基于此,本试验以光合面积(叶面积

指数)和光合能力(*SPAD*、*Pn*、*Gs*、*Ci*、*Ls*)代表源,以穗长、小穗数、穗粒数、千粒重代表库,以单位叶面积负担的粒重即总结实粒重与孕穗期最大叶面积之比粒重叶比($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)表示库和源的相对大小,在大田机播条件下施用不同量的硅肥,研究其对黑龙江两个春小麦品种源库关系的影响,为硅在小麦生产中的应用效果提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为黑龙江省主栽的两种不同类型的春小麦:不耐密的龙麦 26(试验代号:L)和耐密的克早 16(试验代号:K)。

1.2 试验环境

试验于 2011 年在黑龙江省密山市裴德镇黑龙江八一农垦大学农业科学研究所进行,试验地土壤类型是草甸白浆土,前茬种植作物为大豆,0~20 cm 土壤的养分含量状况见表 1。

表 1 土壤养分含量状况
Table 1 Conditions of soil nutrient content

有效硅 Available silicon /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Alkali-hydro N /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质 Organic materials /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH
127.34	171.36	36.4	114.7	37.44	6.7

1.3 试验设计

试验中硅肥用量为 5 个水平(表 2),采用的硅肥形态为硅酸钠(分析纯 99.00%)。此外,试验田还施用氮、磷、钾肥,分别采用尿素(含氮量 46.30%)与磷酸二铵(含氮量 18.00%、含磷量 46.00%),氯化钾(有效含量 60.00%),肥料用量(纯 N、P、K 量之和)为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,N:P:K = 1.00:1.10:0.50。总肥量的 1/3 作种肥,2/3 作为底肥施入,硅肥(硅酸钠)同底肥一起施入。

表 2 试验中硅肥梯度
Table 2 The gradient of silicon fertilizer in the experiment

处理 Treatment	硅肥施用量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) Silicon fertilizer rate
CK	0
Si1	15
Si2	30
Si3	45
Si4	60
Si5	75

试验采用随机区组设计,3 次重复,小区面积为 15 m^2 ,各小区之间管理保持一致。使用小区试验播

种机播种,等行距 15 cm。龙麦 26 的种植密度为 $6.00\times10^6\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$,克早 16 的种植密度为 $8.00\times10^6\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 叶片光合指标测定 小麦灌浆期,于晴天上午 10:00,采用日本生产的 SPAD-502 叶绿素仪测定旗叶 SPAD 值。每小区随机取 20 株长势均匀一致的小麦,叶绿素仪读数时对准最上部完全展开叶的中部(叶缘和叶脉之间的中间部位)进行测定,测定时避开叶脉和有损伤的叶片,并在同一位置,用美国生产的 LI-6400 便携式光合仪,叶室为 $2\text{ cm}\times3\text{ cm}$,测定小麦叶片的净光合速率(*Pn*)、气孔导度(*Gs*)、胞间 CO_2 浓度(*Ci*)、蒸腾速率(*Tr*);如果小麦叶片不能充满叶室,量出小麦叶片的宽度,用 LI-6400 便携式光合仪换算成 $2\text{ cm}\times3\text{ cm}$ 。利用上述指标,根据公式计算叶片气孔限制值(*Ls*)和水分利用效率(*WUE*):

$$Ls = 1 - Ci/Co$$
$$WUE = Pn/Tr$$

式中, *Co* 为气室中 CO_2 浓度。

1.4.2 叶面积测定 在开花期、灌浆期、乳熟期,每

小区随机取单株 20 个,在 105℃下杀青 30 min,80℃烘至恒重,用干质量法测定叶面积。

1.4.3 籽粒灌浆速率测定 开花期每小区选取生长一致且同日开花的主茎穗 20 个,挂牌标记。分别于开花后 4 d、10 d、16 d、22 d、28 d、34 d 随机取 20 个标记主茎穗于室内脱粒、计数,105℃下杀青 30 min,然后在 80℃下烘至恒质量,1/100 天平称量并折算单株粒质量,再算出籽粒灌浆速率。

1.4.4 测产及考种 小区实收测产,收获前各处理选取长势一致的 20 株进行室内考种。

1.5 数据处理方法

测定数据用 EXCEL 2007 作图,DPS 7.05 进行统

计分析。

2 结果分析

2.1 硅对小麦花后源特性的影响

源是指生产或输出同化物的器官或组织^[20-22]。本试验把小麦叶片的光合面积(LAI)和光合能力(SPAD、*Pn*、*Gs*、*Gi*、*Tr*)作为源的代表。

试验表明,随着生育期的推进,小麦叶面积逐渐降低;龙麦 26 在施入硅肥后,各生育时期叶面积低于 CK;克旱 16 在乳熟期前 Si1 处理的叶面积低于 CK,Si2—Si4 处理高于 CK,Si5 处理低于 CK,在乳熟期各处理叶面积均低于 CK。

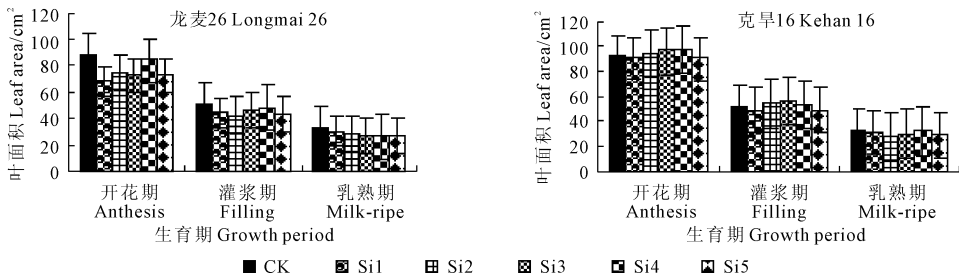


图 1 硅肥对春小麦不同生育时期叶面积的影响

Fig.1 Effect of silicon fertilizer to the leaf area of spring wheat at different growth periods

注:本文的图形误差线均为标准差。 Note: In this paper, graphics are the standard deviation error line.

由表 3 可知,施硅处理不同程度提高了小麦叶片的叶绿素含量,但总体而言,随施硅量的增加叶绿素含量有降低的趋势;硅肥处理小麦旗叶的净光合速率表现与叶绿素含量大致相同;叶片气孔导度随硅肥施用量的增加逐渐增加,施硅量超过 Si4 水平后气孔导度大幅下降;而胞间 CO₂ 浓度随施硅量的

增加呈单峰曲线,峰值处理为 Si4,且 Si2—Si5 处理的胞间 CO₂ 浓度均高于对照;基施不同量硅肥,小麦的叶片气孔限制值表现与气孔导度、胞间 CO₂ 浓度相反分布规律,而叶片蒸腾速率与气孔导度分布规律相同。

表 3 硅肥对小麦灌浆期旗叶光合特性的影响

Table 3 Effects of silicon fertilizer to photosynthetic characteristics of flag leaves in grain filling stage of wheat

处理 Treatmentnt	SPAD	净光合速率 Net photosynthetic rate /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance /($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration /($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	气孔限制值 Limiting value of stomata	蒸腾速率 Transpiration rate /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
L CK	40.16b	6.7c	0.53b	302b	0.118a	8.4b
L Si1	42.53a	9.0ab	0.54b	298b	0.122a	8.4b
L Si2	41.63ab	7.8bc	0.56ab	304b	0.120a	8.7b
L Si3	42.90a	10.4a	0.58ab	307b	0.102b	9.1ab
L Si4	42.46a	8.7b	0.70a	316a	0.100b	9.7a
L Si5	40.43b	6.7c	0.44b	305b	0.110ab	8.4b
K CK	38.10c	5.6d	0.32c	292b	0.128b	6.2b
K Si1	41.56a	8.8a	0.42b	288b	0.150a	7.1a
K Si2	40.90ab	7.7b	0.43b	293b	0.139ab	7.3a
K Si3	40.10ab	7.5b	0.45ab	296ab	0.128b	7.5a
K Si4	39.60bc	6.8bc	0.51a	303a	0.108c	7.8a
K Si5	38.40c	6.5c	0.42b	294b	0.126b	7.5a

2.2 硅对小麦花后库特性的影响

表 2 结果表明,施用硅肥不同程度地增加了克早 16 的穗数,且 Si1—Si5 处理穗数随着硅肥施用量的增加先升高后降低,Si4 处理与 CK 差异达显著水平;施硅对龙麦 26 穗数的影响不显著。随着硅肥施用量的增加,龙麦 26 的穗粒重先升后降,其中 Si2 处理穗粒重最高,为 0.92 g,与对照相比差异显著;施硅对克早 16 穗粒重影响较小。施用硅肥对春小麦千粒重的影响不显著;对耐密品种克早 16 穗粒数的影响亦未达显著水平,随着硅肥施用量的增加,龙麦 26 的穗粒数先降低后升高,但均高于对照,平均

提高了 7.60%。

施用硅肥显著增加了小麦的穗长。龙麦 26 的 Si2—Si5 处理的穗长显著高于对照,平均增加 1.02 cm;而克早 16 的穗长随着硅肥的施入呈先增加后减少的趋势,Si3 处理穗长最长,比对照高 0.61 cm,Si5 处理低于对照。硅肥显著增加了两种不同类型春小麦的小穗数,施入硅肥后,龙麦 26 的小穗数平均增加 1.38 个,克早 16 平均增加 0.39 个。

由硅肥对小麦库特性的影响分析得出:硅肥可提高小麦的穗长,从而增加小麦的小穗数和穗粒数,使小麦有较大的库容。

表 4 硅肥对小麦库特性的影响
Table 4 Effects of silicon fertilizer to the characteristic of wheat store

处理 Treatment	穗数 Numbers of spikelet /(10 ⁶ ·hm ⁻²)	穗粒重 Grain weight per spikelet /g	千粒重 1000 grains mass /g	穗粒数/个 Grain numbers per spikelet	穗长 Ear length /cm	小穗数/个 Numbers of spikelet
L CK	4.53a	0.74b	33.10a	20.90b	7.31b	10.05b
L Si1	4.57a	0.86ab	33.10a	23.66a	8.08a	11.20ab
L Si2	4.69a	0.92a	33.36a	22.55ab	8.25a	11.43a
L Si3	4.73a	0.85ab	33.85a	21.63b	8.53a	11.80a
L Si4	4.53a	0.81ab	33.78a	22.38ab	8.45a	11.37a
L Si5	4.41a	0.77b	33.59a	22.25ab	8.34a	11.37a
K CK	5.13b	0.57a	35.01a	14.96a	5.90ab	9.47b
K Si1	5.35ab	0.58a	35.23a	15.13a	6.01ab	9.85ab
K Si2	5.55ab	0.64a	35.38a	16.14a	6.26ab	10.39ab
K Si3	5.59ab	0.68a	35.85a	16.79a	6.51a	10.77a
K Si4	5.69a	0.69a	35.24a	17.80a	5.93b	10.06ab
K Si5	5.36ab	0.58a	35.67a	14.63a	5.89b	9.71b

2.3 硅对小麦花后源库关系的影响

灌浆速率对产量的直接影响较大,既反映了库的物质接受能力,又表示了源的物质供应能力^[23]。由图 2、3 可知,随着硅肥施入量的增加,硅肥对两个品种春小麦灌浆速率的调控效应不同。龙麦 26 的籽粒灌浆速率随着小麦籽粒形成后的生长表现为先上升后下降,其下降的速度较快,在各生育期内施硅处理均高于其它处理,且 Si3 处理一直维持较高的水平;克早 16 随着小麦的生长其灌浆速率亦是先上升后下降,但下降的速度比较缓慢,施入硅肥后,各个生育期的灌浆速率表现为 Si2、Si3、Si4 处理高于对照,Si5 处理低于对照。说明施入硅肥,增强库对源的调运能力,并促使源加快光合物质的生产。

粒叶比,即单位叶面积对产量的贡献,是源库互作的最终结果,反映了源的质量水平和库对源的调运能力^[23]。在群体适宜的叶面积范围内,努力提高粒叶比是衡量源、库关系和群体光合生产力的一个综合指标。试验表明,随着施硅量的增加,小麦的粒

叶比呈先上升后下降趋势;龙麦 26 表现为 Si2 处理与对照达到显著水平,其它处理与对照差异不显著,而克早 16 则表现为 Si4 处理与对照差异显著。这说明基施硅肥可以促进生长发育,粒叶比均有明显提高,龙麦 26 在叶面积指数提高的同时,总结实粒数增加的速度较快,而克早 16 在叶面积指数提高的同时,总结实粒数增加速度较慢。施用硅肥能较好地协调群体的库源关系,实现了“开源扩库”的目标。

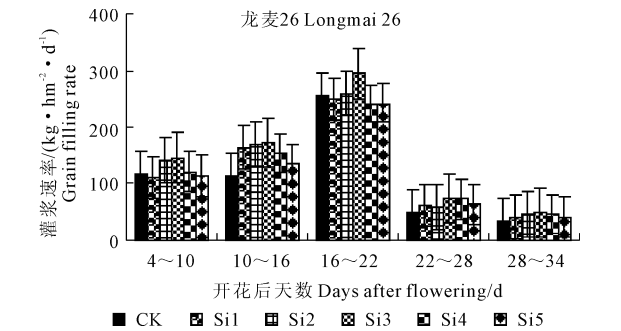


图 2 硅肥对龙麦 26 籽粒灌浆速率的影响
Fig.2 Effects of silicon fertilizer to grain filling rate of Longmai 26

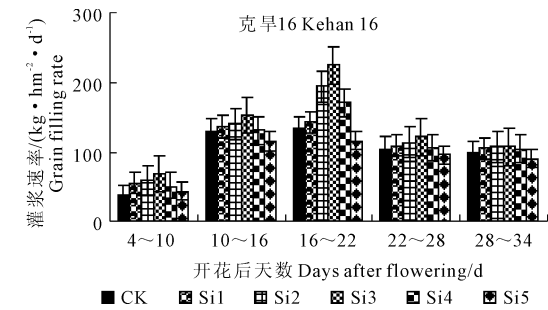


图 3 硅肥对克早 16 籽粒灌浆速率的影响
Fig.3 Effects of silicon fertilizer to grain filling rate of Kehan 16

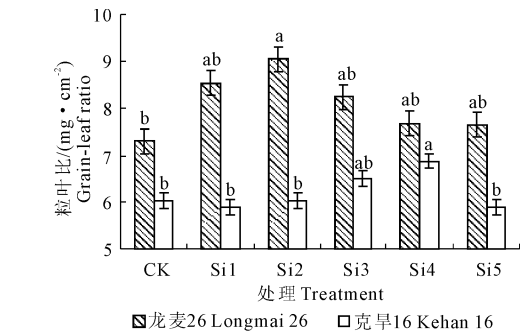


图 4 硅肥对小麦粒叶比的影响
Fig.4 Effects of silicon fertilizer to grain-leaf ratio of wheat

2.4 硅肥对小麦产量的影响

由图 5 可知,施用硅肥可显著增加小麦籽粒的产量。随着硅肥施入量的增加,两种不同类型的春小麦产量先升高后降低。龙麦 26 的 Si1—Si5 处理产量均高于对照,施硅处理平均增产 9.70%,其中 Si2 处理与对照之间差异显著;克早 16 则表现为 Si1—Si4 比对照分别增产 2.20%、5.70%、11.00%、14.70%,Si5 处理低于对照,硅肥施用量过高时产量与对照相比有所降低。龙麦 26 的最佳硅肥施用量为 Si2 处理,而克早 16 为 Si4 处理。

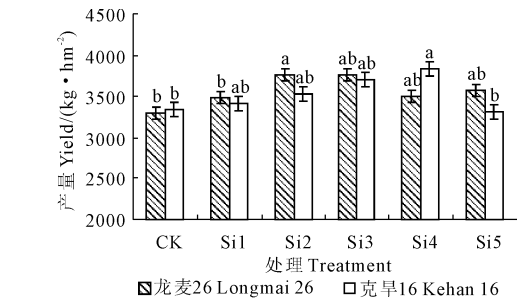


图 5 硅肥对春小麦产量的影响
Fig.5 Effect of silicon fertilizer to yield of spring wheat

3 结论与讨论

前人对基施硅肥改善作物光合性能的研究较少,且分析方法不一。有人把气孔导度和光合速率

之间的高度正相关当作光合作用受气孔限制的依据,把接近恒定的胞间 CO₂ 浓度当作光合速率降低的非气孔原因的判断依据。而有人认为,气孔因素还是非气孔因素限制叶片光合速率的主要判据,是胞间 CO₂ 浓度和气孔限制值的变化方向^[24]。本试验表明,大田基施不同量的硅肥可以不同程度地提高春小麦旗叶气孔导度、胞间 CO₂ 浓度,但使春小麦旗叶的气孔限制值下降,说明大田施入硅肥使植物叶片光合速率的提高是非气孔限制因素;随着施硅量的增加胞间 CO₂ 浓度逐渐上升,气孔限制值则下降;硅施用量超过 Si4 处理时胞间 CO₂ 浓度降低,而气孔限制值增加,叶片气孔导度降低,这说明随着硅肥施入量的增加是气孔导度的下降引发光合速率的下降,从本文光合速率和气孔导度数据上来看恰巧与这一变化规律相吻合,随着硅肥施入量的增加,春小麦旗叶的净光合速率和气孔导度大致呈现先升高后降低,其最高点均为 Si4 处理。综上所述,硅肥是通过两方面来提高小麦的净光合速率的:一方面是增加光合面积,另一方面是增强光合能力。

前人研究^[25-27]表明,硅肥能提高不同地域不同品种麦田的产量,但是对硅肥增产的途径前人说法不一,张兴梅^[28]研究表明,在土壤有效硅含量低于 511.2 mg·kg⁻¹ 的土壤上,麦田施用硅肥均表现不同程度的增产。本研究发现,在黑龙江前茬种植作物为大豆、土壤有效硅为 127.34 mg·kg⁻¹ 的草甸白浆土上基施硅肥可提高两种不同类型春小麦的产量,龙麦 26 的平均增产幅度为 9.70%;克早 16 的平均增产幅度为 6.60%。但克早 16 在过量施硅后,产量稍有降低。前人研究^[26-28]总结亦发现,硅肥可以增加小麦的穗长和小穗数,本研究也恰恰证实了这一点,这说明不同类型不同地域的小麦在施入硅肥后,可能会增加茎秆壁的厚度^[26],加大节间的宽度^[27],促进了茎部维管束的分化和建成,加强了小穗的生长发育,使穗长和小穗数增多。

对于硅肥对小麦产量构成因素的影响研究结果有所不同。施加硅肥增加了冬小麦的分蘖成穗率,增加穗粒重和穗粒数从而提高小麦的产量^[29]。在千粒重方面,前人的说法不一,邵长泉^[29]研究表明施入硅肥与不施硅肥的对照相比,小麦千粒重显著增加;而周青^[30]的研究表明,硅肥对小麦千粒重无显著影响。本试验研究表明,施入硅肥后,对两个不同类型春小麦的千粒重无显著影响,这可能与不同的小麦品种对硅肥的反应特性不同相关。本研究发现,耐密品种克早 16,基施硅肥后单位面积穗数显著增加,但基施硅肥对克早 16 的穗粒数和穗粒重的影响不大,而不耐密品种龙麦 26 穗数变化不大,其

产量增加的原因主要在于其穗粒数和穗粒重的增加。这说明施硅对不同类型品种的增产途径存在差异,但硅肥协调了源、库、流三者之间的关系,进而达到提高产量、增加效益的作用。

小麦在整个生长期,营养物质在植株体内各器官间存在着相互交流、运转。源器官既是养分的吸收或生产场所,又是养分运输的中转站,同时又是养分的临时贮存室;而库是养分运转的终点。加强干物质运转,协调源库对养分的需求,植株内须有发达的输导组织^[31]。小麦的经济产量是源、库关系协调的最终表现,生物产量是小麦一生中积累同化产物的总量,表示源的生产潜力,籽粒库容限定籽粒贮存同化产物即经济产量的多少,收获指数标志着同化物向籽粒分配的效率,在一定生态条件下,源、库、流三者的协调平衡可最终决定小麦产量,只有当作物群体和个体的发展达到源足、库大、流畅的要求才能获得高产^[32]。本研究在小麦基施硅肥的条件下,以小麦叶片的光合面积和光合能力代表源,以具有经济价值的籽粒数量和粒重代表库,以单位叶面积负担的粒数和生物粒重即总结实粒数和最终粒重与孕穗期最大叶面积之比(粒叶比)表示库和源的相对大小,分析两者在小麦生长过程中的相互关系,其结果是小麦在施入硅肥后,各时期叶面积增大,光合强度提高,光合产物增加,这说明硅肥可使小麦的源足;硅可使小麦的小穗数和穗粒数增加,这说明施硅后小麦的库容增大;在小麦灌浆后,硅可增加胞间 CO₂ 浓度,加快籽粒灌浆速率,说明硅可使小麦疏导组织畅通。另外,本研究在粒叶比方面证明了硅肥可协调小麦的源、库特性,使小麦的群体和个体的发育达到了源足、库大。

参 考 文 献:

[1] 饶立华,覃莲萍,朱玉贤.硅对杂交水稻形态结构和生理的效应[J].植物生理学通讯,1986,(3):20-24.

[2] 贺立源,江世文.小麦施用硅钙肥效应的研究[J].土壤肥料,1999,(3):8-11.

[3] Lidon F C, Loureiro A S, Vieira D E. et al. Photo inhibition in chilling stressed wheat and maize[J]. Photosynthetica, 2001,39(2):161-166.

[4] 武安泉,杨同文.水培条件下不同浓度硅对小麦幼苗生长的影响[J].安徽农业科学,2009,37(29):14083-14084.

[5] 董敬娜,李光德,敬 佩,等.硅作用下铜对小麦幼苗生理特性影响研究[J].水土保持学报,2011,25(2):222-226.

[6] 宫海军,陈坤明,陈国仓,等.硅对小麦生长及其抗氧化酶系统的影响[J].土壤通报,2003,34(1):55-57.

[7] 丁燕芳,梁永超,朱 佳,等.硅对干旱胁迫下小麦幼苗生长及光合参数的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(3):471-478.

[8] Epstein E. The anomaly of silicon in plant biology[J]. Academy of science USA, 1994,91:11-17.

[9] 鲁 嘉,陈 斌,赵 峰,等.硅肥在小麦上的应用效果[J].土壤肥料,1997,(5):42-43.

[10] 于立河,高聚林.硅对小麦产量和籽粒品质和影响[J].麦类作物学报,2012,32(3):469-473.

[11] 肖靖秀,朱映安,赵 平,等.间作和氮硅施用水平对小麦氮素吸收利用的影响[J].江苏农业科学,2011,39(6):140-142.

[12] 唐 旭,郑 毅,汤 利,等.高等植物硅素营养研究进展[J].广西科学,2005,12(4):347-352.

[13] 孙 曦.土壤养分、植物营养与合理施肥[M].北京:农业出版社,1983.

[14] Rodrigues F A, Jurick W M, Datnoff L E, et al. Silicon influences cytological and molecular events in compatible and incompatible rice Magnaporthe grisea interactions[J]. Physiological and molecular plant pathology, 2005,66(4):144-159.

[15] Camargo M S D, Pereira H S, Komdrfer G H, et al. Soil reaction and absorption of silicon by rice[J]. Scientia Agricola, 2007,64(2):176-180.

[16] Okuda A, Takahashi E. Studies on the physiological role of silicon in crop plant[J]. Science Soil and Manure in Japanese, 1962,33:1-8.

[17] 马冬云,郭天财,宋 晓.小麦源库关系研究进展[J].河南农业科学,2008,1(1):12-15.

[18] 彭永欣.小麦高光效群体结构与控制程序[J].江苏农学院学报,1993,4(4):56-60.

[19] 陈风华,吕玉亮,温晓慧,等.小麦基施硅肥增产效应研究[J].江苏农业科学,2001,(1):47-49.

[20] 郭天财,王之杰,胡廷积,等.不同穗型小麦品种群体光合特性及产量性状的研究[J].作物学报,2001,27(5):633-639.

[21] 芮仁廉,张继林,聂毓琦,等.氮肥水平对杂交小麦抽穗后群体光合能力的影响[J].江苏农业科学,1993,(1):7-10.

[22] 岳寿松,于振文,余松烈.不同生育时期施氮对冬小麦旗叶衰老和粒重的影响[J].中国农业科学,1997,30(2):42-46.

[23] 凌启鸿.作物群体质量[M].上海:上海科学技术出版社,2000:11-15.

[24] 许大全.光合作用气孔限制分析中的一些问题[J].植物生理学通讯,1997,33(4):241-244.

[25] Govindjee. A role for a light – harvesting antenna complex of photosystem II in photo-protection[J]. The Plant Cell, 2002,14:1663-1668.

[26] 王玉强,王俊仁,吕玉亮,等.小麦基施硅肥的应用效果[J].安徽农业科学,2000,28(1):90-91.

[27] 陈旭霞,芮根华,孙继明,等.小麦硅肥品种及用量试验研究[J].上海农业科技,2002,(4):37-38.

[28] 张兴梅.春小麦硅肥效应的研究[J].土壤肥料,1997,(1):39-45.

[29] 邵长泉,张翠珍.小麦施用硅肥的效果及适宜用量的研究[J].中国土壤与肥料,2006,(4):51-53.

[30] 周 青.不同时期施用硅肥对小麦群体质量和产量的影响[J].作物杂志,2001,(5):20-22.

[31] 郭文善,封超年.小麦开花后源库关系分析[J].作物学报,1995,21(3):334-340.

[32] 邵立刚.黑龙江省不同生态类型春小麦叶面积与干物质积累动态变化与产量的关系[D].哈尔滨:东北农业大学,2002:12-13.