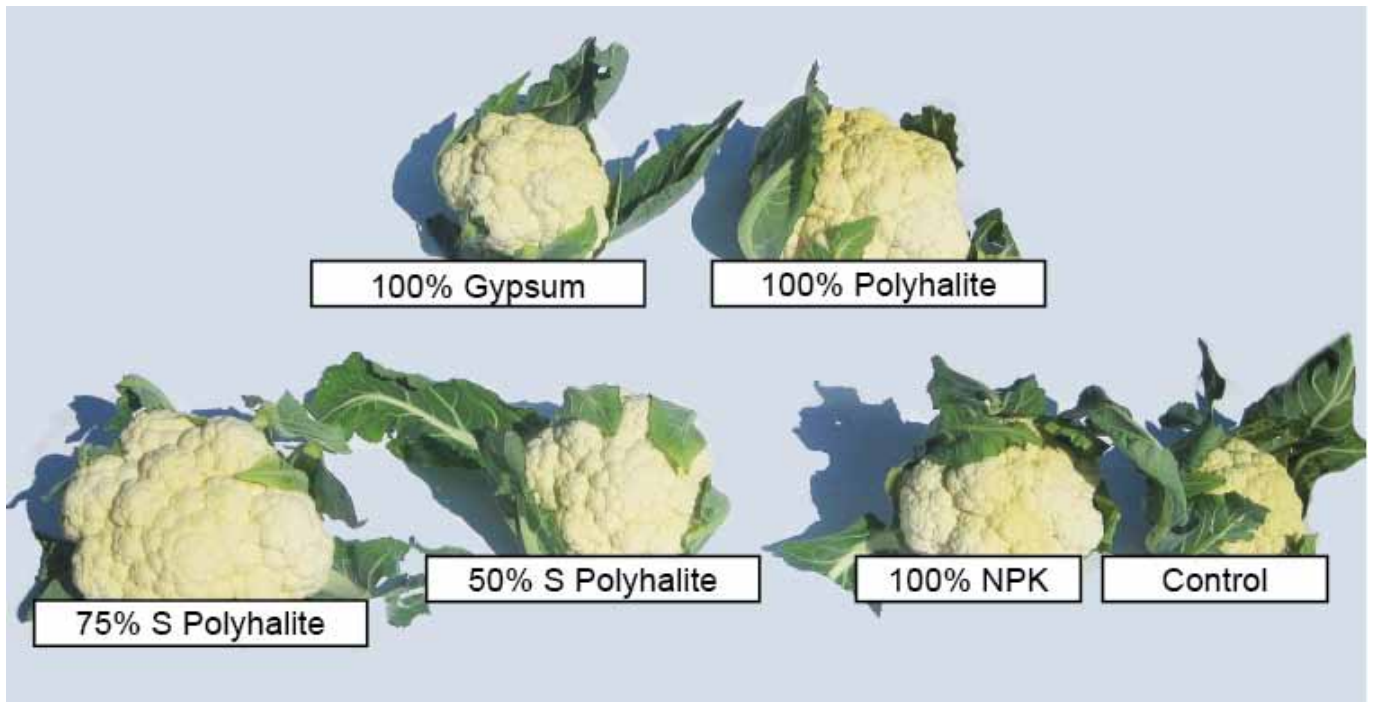


研究论文



施用杂卤石对卷心菜及花椰菜产量及品质的影响

Satisha, G.C.⁽¹⁾, and A.N. Ganeshamurthy⁽¹⁾

摘要

硫 (S) 已被认为是一个重要的植物大量营养元素,尤其是在芸薹属作物上,施用硫肥经常与高产及高品质联系在一起。杂卤石是一种天然矿物,海洋蒸发时沉积生成,由包含钾 (K)、钙 (Ca)、镁 (Mg) 的含水硫酸盐组成。本研究的目的是测试杂卤石中的游离酸对印度两大芸薹属植物花椰菜和卷心菜的影响。施用硫会显著提高这两种作物的产量和品质。钾促进了硫的吸收,同样反过来,硫似乎促进了磷 (P) 和钙的吸收。卷心菜和花椰菜的最高产量分别比对照增加39.5%和32.8%,其最高产量的施肥水平为施用N-P-K推荐量的100%及施S推荐量的75%,硫由杂卤石提供。无论硫是由杂卤石提供还是由石膏提供,对施用S推荐量100%的处理没有进一步提高产量的原因进行了讨论。当施用硫时需要更多的研究来调整氮 (N) 及钾的施肥管理。

引言

硫 (S) 被公认为是继氮 (N)、磷 (P) 和钾 (K) 元素之后的第4个主要的植物营养元素 (Khan *et al.*, 2005), 并与高产目标联系在一起 (Zhao *et al.*, 1999; Hawkesford, 2000; Saito, 2004; Jamal *et al.*, 2010; Kovar and Grant, 2011; Steinfurth *et al.*, 2012)。已经报道的施用硫对作物带来的有利效应主要是有关芸薹属作物产量方面 (McGrath and Zhao, 1996; Gironde *et al.*, 2014; Tiwari *et al.*, 2015), 特别是在油菜作物上 (*Brassica oleracea*) (Susila Locacsio, 2001)。

⁽¹⁾ 首席科学家, ICAR-印度花卉研究所, Bengaluru 560089, India

*通讯作者: satishagc@gmail.com



地图1. 位于印度Karantaka省Bengaluru西北部Hesaraghatta的试验点. 数据来源: Source: Google地图.

芸薹属植物是一个世界范围的主要食用作物, 包括几个形态独特的物种, 如羽衣甘蓝、东方甘蓝、花椰菜、卷心菜、抱子甘蓝、甘蓝、西兰花、皱叶甘蓝、花羽衣甘蓝, 一般来说, 它们全都是植株整个收获的 (Broadley *et al.*, 2008)。在过去的30年里, 对十字花科作物的研究焦点是基于人类健康功效的 (Stoewsand, 1995; Bjorkman *et al.*, 2011)。发现含硫次生代谢物, 例如芥子油苷及其他等, 参与一些抗癌活动 (Cartea Velasco, 2008; Sarıkamış, 2009), 且有降低退化性疾病、心血管疾病和糖尿病的风险 (Björkman *et al.*, 2011, 以及文后参考文献中与此有关的文献)。一些煮熟的芸薹属蔬菜产品中需要含硫化合物来调味 (Schutte and Teranishi, 1974; Engel *et al.*, 2002)。芥子油苷的含量很大程度上取决于硫的有效性, 随硫肥施用发生显著变化 (Falk *et al.*, 2007)。

然而, 发现作物对硫肥施用的反应相差很大, 因为地理位置、土壤类型、土壤中各种含硫化合物及其有效性、作物基因型、环境条件和作物管理存在差异 (Bjorkman *et al.*, 2011)。油菜作物对硫的需求较大, 当这种矿物质的有效性受限时, 油菜的产量及质量通常会下降 (McGrath *et al.*, 1996; Haneklaus *et al.*, 2008)。在过去的20年里, 由于严格的法规禁止工业硫排放, 每年全球硫的大气沉积量显著下降 (Kovar and Grant, 2011)。以此同时, 食品生产的要求随人口增加却日益增长。随后, 对硫肥的需求大幅上升以满足一年生作物的需求。缺硫植物通常小而细长, 嫩叶脉间变黄, 逐渐变得弯曲和易碎, 最终可能停止生长 (Haneklaus *et al.*, 2008)。萎黄病非常典型的

特点是纹理突出, 蓝绿色且模糊的块状印在浅绿色的叶片上。在叶片的远轴 (低) 面, 这些黑暗的区域是紫色的, 这种颜色后来可能会传播到整片叶子。症状发展往往缓慢。抱子甘蓝的缺硫症状为顶部黄化, 生根受限。可能造成缺硫土壤出现情况有: 土壤有机质含量低、被暴雨淋滤或过度灌溉的轻质沙土、集约化种植造成的贫瘠土壤、土壤物质本身硫含量低的土壤 (Jordan and Reisenauer, 1957)。

Polysulphate™ (英国克利夫兰钾肥有限公司生产) 主要成分是天然矿物质杂卤石。杂卤石是在海洋蒸发沉积时生成, 组成成分为水合硫酸钾钙镁, 分子式为 $K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2(H_2O)$ 。在英国约克郡发现的杂卤石沉淀物比较有代表性, 组成成分含量通常为: K_2O (14%), SO_3 (48%), MgO (6%), CaO (17%)。石膏是一种普通的补充硫和钙的备选物质, 其中的硫含量仅为18.6%, 本研究的目的是检验杂卤石中的游离酸对印度两种主要芸薹属作物 (花椰菜和卷心菜) 的影响。

材料和方法

2013年10月至2014年3月在印度卡纳塔克邦班加罗尔市Hesaraghatta的印度园艺研究所 (IIHR) 的实验农场 (5块) 进行了田间试验。卷心菜 (cv. Tetries) 和花椰菜 (cv. Unathi) 播种在陶盆中, 用发酵的可可泥炭作为生根培养基, 幼苗在温室中培养。

试验地彻底翻耕耙平。农家肥 (FYM) 在耕地时施入, 用量为 25 Mg ha^{-1} 。N、 P_2O_5 、 K_2O 、S肥料的推荐量 (RDF) 分别为150、100、125、20 kg ha^{-1} , 依据各处理安排

表1. 试验地土壤物理化学性状

| Particulars | Value |
|---|-------------------|
| Particle size analysis (over dry basis) | |
| Sand (%) | 69.6 |
| Silt (%) | 9.9 |
| Clay (%) | 20.5 |
| Textural class | Sandy clay loam |
| Soil classification | Typic haplustepts |
| Chemical properties | |
| Soil reaction (1:2.5) | 6.84 |
| Electrical conductivity (dS m ⁻¹) | 0.125 |
| Organic carbon (g kg ⁻¹) | 11.5 |
| Available nutrients | |
| Nitrogen (kg ha ⁻¹) | 268.7 |
| Phosphorus (kg ha ⁻¹) | 47.8 |
| Potassium (kg ha ⁻¹) | 298.8 |
| Sulfur (ppm) | 16 |
| Exchangeable cations (cmol (p+) kg⁻¹) | |
| Calcium | 4.8 |
| Magnesium | 0.35 |
| DTPA extractable micronutrients (mg kg⁻¹) | |
| Iron | 25 |
| Manganese | 9 |
| Zinc | 0.8 |
| Copper | 2 |

情况施用。在施加有机肥及化肥之前, 从试验地块采集初始土壤样本进行化验分析(表1)。2013年10月28日进行移植。整个种植时期采取适当的植物保护措施控制虫害和病害。

试验设6个处理, 3次重复, 采用随机区组设计。T₁为对照, 不施硫肥、钾肥(100%NP, 尿素、磷酸二铵); T₂为

100% NPK (尿素、磷酸二铵和氯化钾); T₃为100% NP + 50% S, 硫由杂卤石提供(减去杂卤石提供的钾, 剩余的钾由氯化钾补充到推荐量); T₄为100% NP + 75% S, 硫由杂卤石提供(减去杂卤石提供的钾, 剩余的钾由氯化钾补充到推荐量); T₅为100% NP + 100% S, 硫由杂卤石提供(减去杂卤石提供的钾, 剩余的钾由氯化钾补充到推荐量); T₆为100% NPK (尿素、磷酸二铵和氯化钾) + 100% S, 硫由石膏提供。

植株移植(DAT) 30和60天后及收获期, 每小区定期随机选择5株植物进行生长性状及生物计量观察, 如株高和植株叶片数。株高为从植物根部到顶部完全开放叶片的高度。

作物完全成熟后收获, 此时果实顶部结实紧凑。各小区单独计产, 单位为Mg ha⁻¹。每个小区随机选择5棵植株, 测量根重, 果实鲜重及周长。各植株取100 g样品测定粗蛋白(%)、抗坏血酸(mg 100 g⁻¹)、总可溶性物的量(TSS, °Brix)。根和果实称重后, 在干烤箱于70℃烘干到恒重, 这样获得干重的百分比, 并计算干物质产量。烘干的样品进行研磨, 并用来测定根及果实中N、P、K、Ca、Mg、S、Zn的含量。

结果

不施钾、硫肥料, 对照(T₁)植株的生长和发育明显慢于其他施用钾、硫肥料处理的植株(图1)。施用足够的钾肥(T₂), 卷心菜生长速度快且长的高。通过杂卤石来补充硫素到推荐量的75%时, 会进一步提高植物生长和发育(T₄)。施用推荐量的硫(20 kg ha⁻¹), 无论硫素是来自杂卤石(T₅)还是石膏(T₆), 均会使植物的发育减弱一些(图1)。进入收获期的花椰菜, 只有T₄的植株相对较高, 各处理之间的明显差异出现在叶片数上。叶片数的最低和



照片1. 在IIHR农场第五块地上的卷心菜(左)和花椰菜(右)试验田。照片为作者拍摄。

最高分别出现在T₁和T₄上, 而T₂、T₃、T₆处理的叶片数居中且相差不大。值得注意的是T₅的叶片数下降(图1)。

卷心菜和花椰菜, 尽管这两个品种存在相当大的差异, 但植株鲜重及地上部干生物量对钾和硫的施用量及肥料来源均表现出相似的反应类型。最小的根重及果实均出现在对照处理上。施用充足的钾肥可显著增加植株的重量。施用75%的推荐施S量(T₄)出现了最重的植株, 50%的推荐施S量(T₃)对植株重量几乎没有影响, 100%的推荐施S量(T₅、T₆)促进植株的重量, 但是却明显小于T₄的(图2)。

T₄的卷心菜和花椰菜产量最高, 分别为45.7、26.1 Mg ha⁻¹, 这明显高于其他的所有处理(图3)。T₄的优势也可以在品质属性上观察到, 例如收获期果实的直径和密实度(图3)。T₁(对照, 100% NP, 不施用钾、硫肥)表现出最低产量, 卷心菜和花椰菜的产量分别为34.4、18.7 Mg ha⁻¹,

远低于其他所有处理的产量。卷心菜上施用充足的钾肥(T₂)可显著提高产量、果实直径和密实度, 而增加50%的推荐量的S未能带来任何改变。补充100%的推荐量的S(T₅、T₆)可显著增加产量及一些质量属性, 但仍低于T₄带来的影响(图3)。除了T₄, 其他处理对花椰菜的果实直径没有任何影响。随钾肥施用果实的密实度显著增加, 但除了T₄, 增加硫的施用并没有对果实的密实度产生影响(图3)。

收获时卷心菜中的粗蛋白含量, T₁显著较低, 为11.3%, 随施用充足的钾肥(T₂), 粗蛋白含量上升至12.4%, 但增加硫肥(无论硫肥的来源如何)的施用量并不影响粗蛋白的含量(图4)。收获期T₄的抗坏血酸含量最高, 为50.8 mg 100 g⁻¹, 但除了与T₁处理外, 与其他处理差异不显著。T₁的抗坏血酸含量很低, 为46 mg 100 g⁻¹。各处理

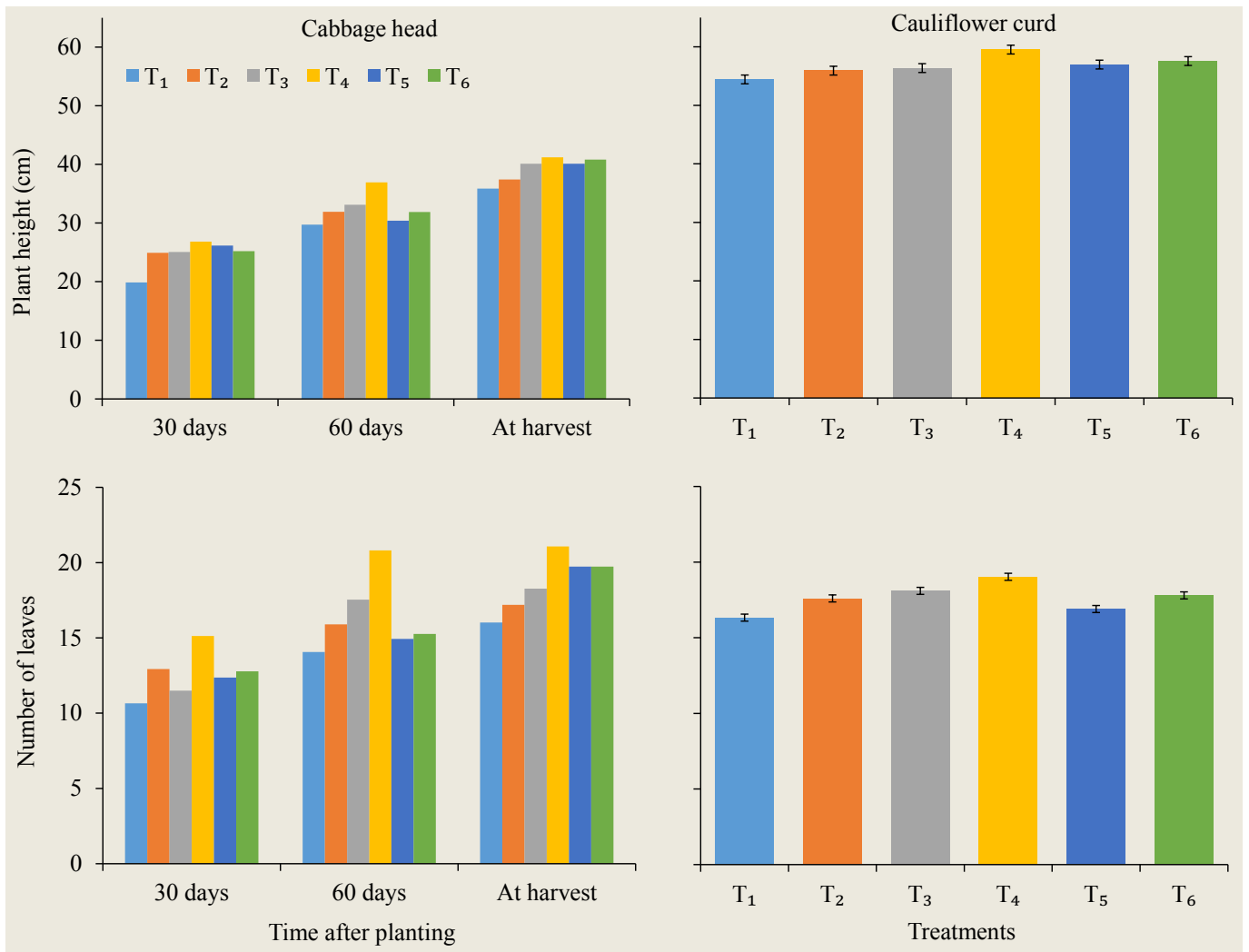


图1.施用钾和硫对播种30天和60天后收获前的卷心菜(左)和花椰菜(右)的高度和叶片数量的影响。

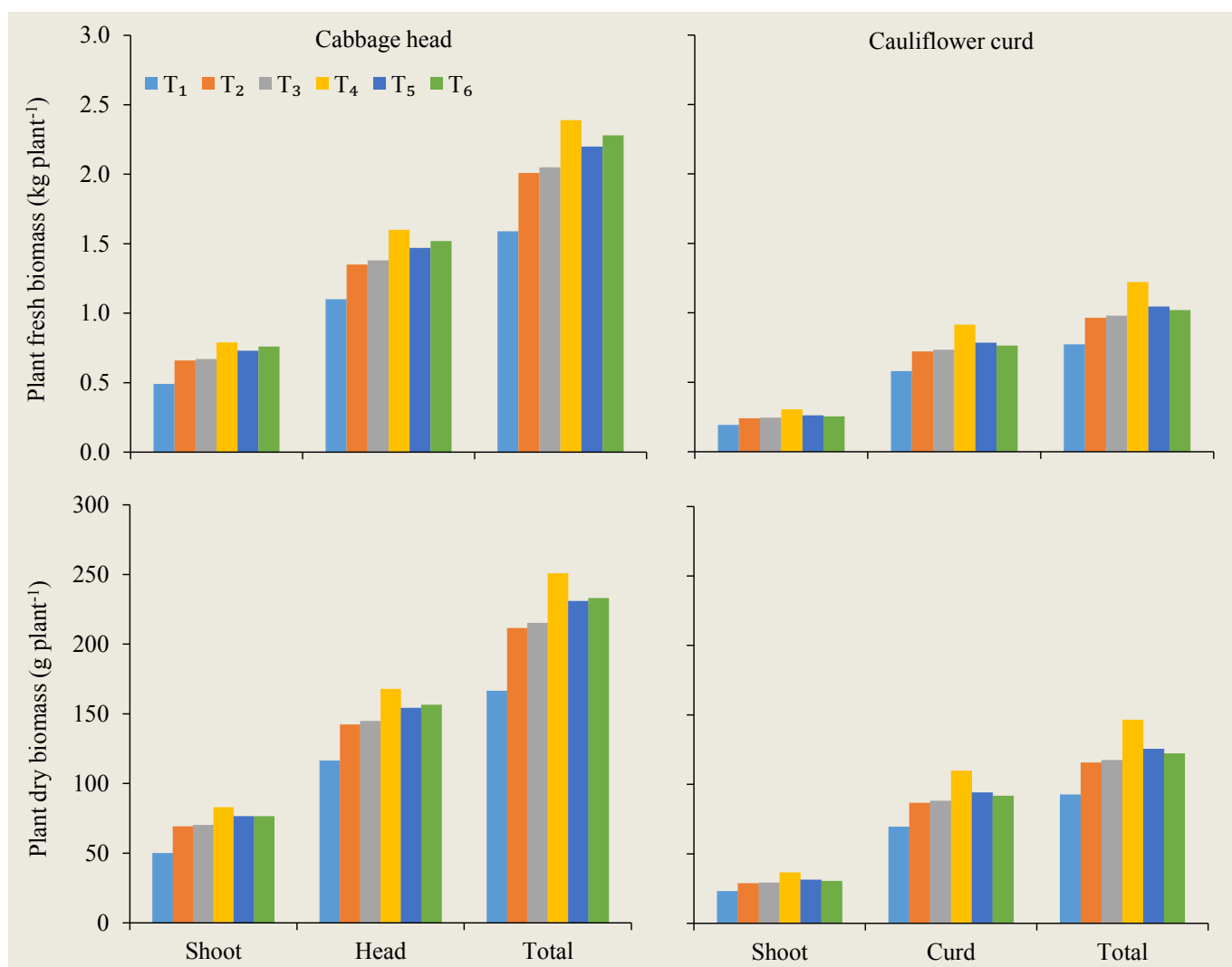


图2.施用钾肥和硫肥对收获的卷心菜和花椰菜的植株干重和鲜重的影响。

的TSS含量波动较大,但是最高值出现在T₄和T₆ (图4)。

虽然各处理氮和磷的施用量一致,但收获期卷心菜和花椰菜根部的物质含量却存在相当大的差异(表2)。T₁显示氮磷这两个元素浓度最低。T₂氮的浓度显著增加,表明需要钾进行氮的代谢。随硫的施用量变化,对氮的浓度影响没有一致规律。然而,施用硫对这两种作物根部磷的浓度均有一些积极的影响(T₃~T₆)。果实中氮的浓度一般低于根部的浓度。卷心菜上施用钾肥适度增加了氮的浓度,施用硫没有产生进一步的影响。花椰菜上施用硫的植株果实中氮的浓度稍高一些。

虽然只有T₄处理卷心菜的磷含量显著增加,但是花椰菜磷的浓度在所有施硫处理的植株中明显较高,当然还是T₄的结果最高(表2)。不出所料,T₁处理钾的浓度最低,

T₂~T₆随钾肥的施用,钾的浓度稍微增加(表2)。施用硫似乎有助于进一步提高两种作物的根部钾浓度。如T₃~T₆所示,不断增加硫的施用量显著增加了卷心菜果实中钾的浓度,然而这种影响效果没有发生在花椰菜上。

根部钙的积累受硫施用量的影响相当大,这在卷心菜上表现的比较明显,钙浓度从T₂的2.51%上升到T₆的4.12%(表2)。这一现象与花椰菜的根部钙浓度的变化规律很相似但在程度上较小。尽管卷心菜中钙的浓度很小,但是硫的施用提高了钙的浓度仍然表现的较明显。花椰菜中钙的浓度与根中钙的浓度相似,随硫的施用量增加到推荐施S量75%(T₄),硫影响钙的浓度,但进一步增加硫的施用量,钙的浓度反而下降。施肥处理对镁浓度的影响较小(表2)。

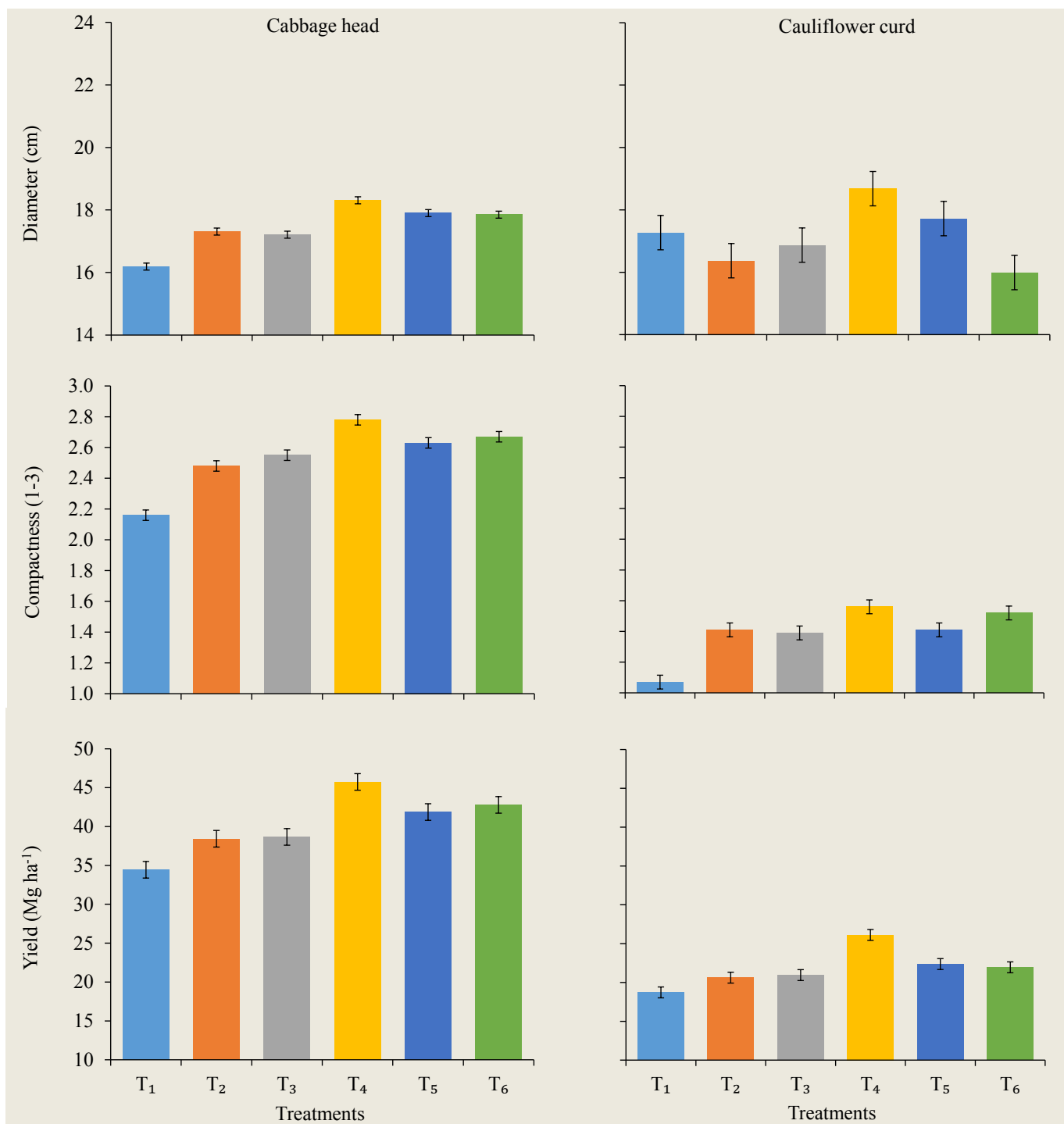


图3.施用钾肥和硫肥对卷心菜(左)和花椰菜(右)的产量、果实直径和密实度的影响。LSD检验水平 $P < 0.05$ 。

令人惊讶的是,适当的钾肥施用量足以增加卷心菜根部硫的浓度,即从0.75% (T₁) 增加到1%~1.1%,这一水平,并没有随硫(杂卤石)的施用进一步改变。通过石膏施用推荐硫用量的100% (T₆) 处理,会增加根部硫的浓度

(表2)。相反,卷心菜中硫的浓度随硫肥施用量增加到推荐施硫量75% (T₄) 时而增加,但进一步增加硫肥的施用量果实中硫的浓度稍微降低。花椰菜根部及果实中硫的浓度在缺硫供应情况下随钾肥的施用也增加,并随硫肥的

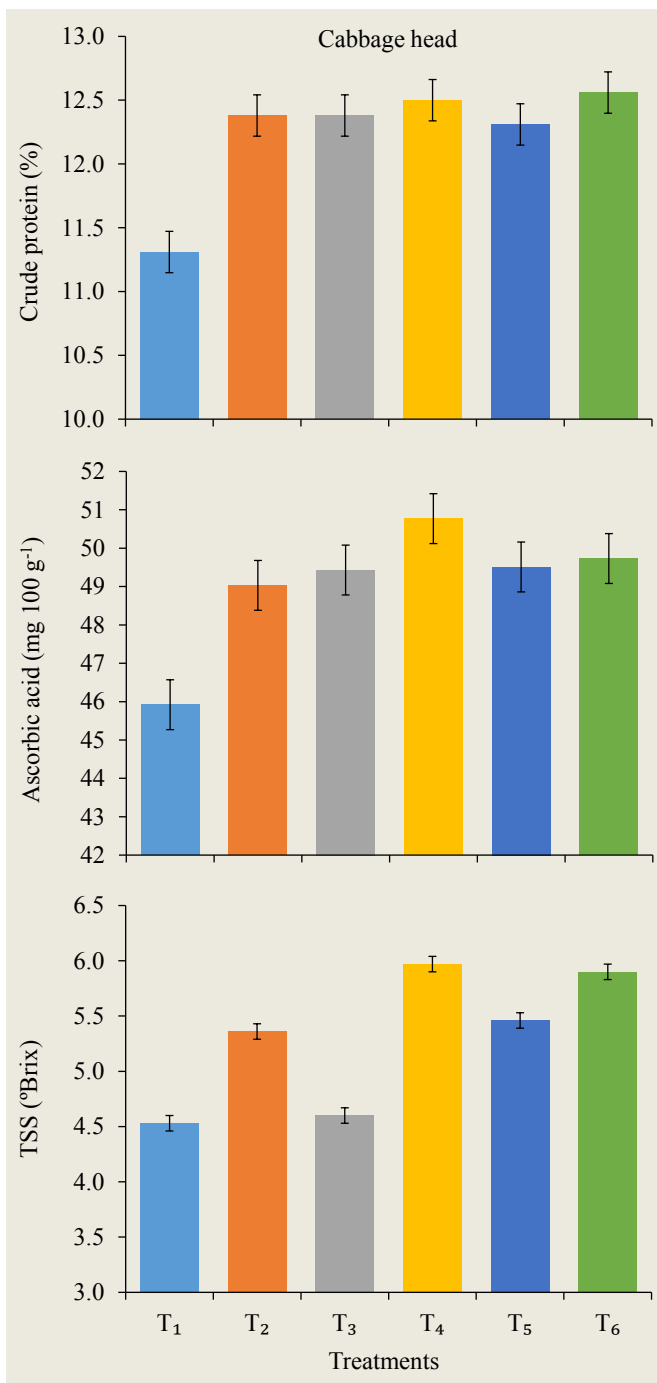


图4.施用钾肥和硫肥对卷心菜内部品质指标的影响。LSD检验水平 $P < 0.05$ 。

施用量增加到推荐施硫量75%时继续增加,再进一步提高硫肥的施用量则不产生影响(表2)。植物体内锌的浓度为12~23 ppm,随肥料的施用并没有产生一致的响应。

根据作物收获时的最终生物量及养分浓度,通过各元素吸收的累积量提供了各处理施肥效果的综合信息

(图5)。T₄,施用推荐量的100%氮磷钾肥和75%硫肥,测量各元素的吸收值最大。卷心菜作物上,N、K、Ca、S这4种元素的吸收量T₆紧随T₄,而花椰菜上各元素的吸收却是更复杂(图5)。这两种作物上,氮的吸收显著受益于钾肥的施用,而硫的施用却抑制氮的吸收。在卷心菜和花椰菜上,磷的吸收随钾肥的施用也是明显增加,并会随硫的施用量增加到推荐硫肥量的75%而一直增加。卷心菜上钾的吸收随硫肥的施用而反应剧烈,但花椰菜上除了T₄,钾的吸收与硫肥的施用关系不大。两种作物上钙的吸收随钾肥的施用而增加,随硫肥的施用卷心菜对钙的吸收继续增加,但花椰菜随硫肥的施用变化不大(同样,T₄除外)。两种作物对镁的吸收规律比较类似,即随钾肥的施用镁的吸收显著上升,随硫肥施用的增加,对镁的吸收却表现出非常温和的效应。钾的可用性显著影响到硫的吸收,但补充硫素也增加了钾的可用性(图5)。

讨论

实际上,先不考虑施用量,硫的施用促进了卷心菜和花椰菜的生长,提高了其产量及质量属性。在芸薹属作物上施硫肥的重要作用可在前人的研究中得到大致了解(McGrath and Zhao, 1996; Khan et al., 2005; Tiwari et al., 2015),但像本文这样专门在油菜作物中进行相关研究却比较少见(Susila Locascio, 2001)。

检验硫的施用量对卷心菜和花椰菜的影响,获得了一个重要且一致的结果是,当硫肥源为杂卤石,施用量为推荐硫肥用量的75%时(N和K的施用量为推荐施用量的100%),即T₄,卷心菜和花椰菜的产量相对于对照处理(T₁),分别增加了32.8%和39.5%。一般来说,当推荐硫肥施用量得到完全满足时,记录显示产量没有进一步增加,不管硫肥源是杂卤石还是石膏,产量甚至下降(图3)。这一结果表明,可能存在一个甚至多个因素限制作物对额外的可用硫源产生反应。

众所周知,氮和硫之间存在积极的相互作用。在许多植物上,提高硫的有效性可促进氮素的吸收,反之亦然(McGrath and Zhao, 1996; Abdallah et al., 2010; Jamal et al., 2010)。本研究中,氮作为一个固定的推荐量,表明当硫的有效性提高时可能低估了植物需求。然而,钾的影响似乎更有趣,随钾肥的施用,硫的吸收急剧增加,即使没有任何额外施加的硫,但是相对于硫的施用,钾的反应却不明显(图5)。这表明硫的吸收和代谢强烈依赖钾的可用性。钾是植物体内最丰富的无机阳离子,占植物干重的10%(Watanabe et al., 2007),在生长条件一致的情况下,十字花科植物根部钾的浓度往往高于那些被子植物(Broadley et al., 2004)。钾参与许多生理过程,钾影响植物-水的关系,光合作用、吸收运输和酶的激活

表2. 不同K和S施肥量对来源对卷心菜和花椰菜的根部和地上收获物部分干物质中养分含量的影响

| Nutrient | Cabbage | | | | | | Cauliflower | | | | | |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Treatment | | | | | | Treatment | | | | | |
| | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ |
| | Shoot | | | | | | Shoot | | | | | |
| | -----% DM----- | | | | | | | | | | | |
| N | 2.75 | 3.15 | 3.32 | 3.16 | 2.94 | 3.22 | 2.14 | 2.85 | 2.8 | 2.98 | 2.84 | 2.93 |
| P | 0.48 | 0.48 | 0.56 | 0.52 | 0.52 | 0.52 | 0.32 | 0.4 | 0.42 | 0.42 | 0.44 | 0.48 |
| K | 3.56 | 3.68 | 3.67 | 3.92 | 3.85 | 3.93 | 2.33 | 3.17 | 2.61 | 3.04 | 3.32 | 3.30 |
| Ca | 1.75 | 2.51 | 3.39 | 3.92 | 3.75 | 4.12 | 1.04 | 1.04 | 1.11 | 1.34 | 1.18 | 1.08 |
| Mg | 0.20 | 0.24 | 0.27 | 0.28 | 0.28 | 0.30 | 0.19 | 0.23 | 0.27 | 0.29 | 0.32 | 0.24 |
| S | 0.75 | 1.10 | 1.00 | 1.10 | 1.00 | 1.47 | 0.30 | 0.48 | 0.66 | 0.86 | 0.75 | 0.71 |
| | -----ppm----- | | | | | | | | | | | |
| Zn | 12 | 16 | 18 | 18 | 18 | 14 | 16 | 16 | 16 | 23 | 12 | 13 |
| | Head | | | | | | Curd | | | | | |
| | -----% DM----- | | | | | | | | | | | |
| N | 1.77 | 2.00 | 2.04 | 2.00 | 1.97 | 2.16 | 0.85 | 0.93 | 0.85 | 0.95 | 0.98 | 0.95 |
| P | 0.36 | 0.40 | 0.44 | 0.52 | 0.40 | 0.44 | 0.32 | 0.34 | 0.44 | 0.58 | 0.50 | 0.45 |
| K | 2.47 | 2.85 | 3.38 | 3.67 | 3.38 | 3.36 | 2.93 | 3.97 | 3.92 | 3.98 | 3.25 | 3.08 |
| Ca | 0.16 | 0.19 | 0.20 | 0.36 | 0.36 | 0.41 | 0.90 | 1.11 | 1.17 | 1.31 | 0.96 | 1.16 |
| Mg | 0.21 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.25 | 0.23 | 0.23 | 0.27 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.23 |
| S | 0.54 | 0.66 | 0.70 | 0.90 | 0.82 | 0.83 | 0.26 | 0.36 | 0.46 | 0.47 | 0.46 | 0.51 |
| | -----ppm----- | | | | | | | | | | | |
| Zn | 17 | 18 | 16 | 17 | 17 | 12 | 14 | 13 | 18 | 12 | 13 | 14 |

Note: Bold numbers represent particularly higher values, while gray represent the lower ones.

可以直接影响作物生产力 (Marschner, 1995; Pettigrew, 2008; Hochmuth and Hanlon, 2010)。然而, 无论是直接关系还是作物对钾和硫吸收之间的相互作用, 在其他地方都还没有被证明 (White et al., 2010)。本研究的结果表明, 卷心菜和花椰菜上推荐的钾肥施用量无法支持其利用



超过某一极限的硫, 甚至会限制进一步的增长和发育。另外, 撒施的作为基肥的氮肥和钾肥有相当一部分可能会从根际区域淋失掉, 从而造成植物生长发育的后期阶段的缺乏。另一个可能性是, 推荐的硫肥施用的量 (20 kg ha⁻¹) 超出了油菜作物对硫需求的最优曲线的峰值。因此, 当考虑到硫肥的实际施用时, N-P-K施肥实践中可能需要做一些调整。

有趣的是, 硫肥的施用大大促进了磷和钙的吸收。磷是植物生长发育必不可少的元素。磷是构成DNA/RNA的主要元素, 它参与所有能量交换过程及大量的调整途径 (Marschner, 1995)。二价阳离子Ca²⁺在植物细胞壁和细胞膜中扮演结构性的角色, 是液泡中无机有机阴离子的一个反向阳离子, 是细胞溶质的一个细胞内的传递者。钙的吸收由根部共质体和非原质体的流动来协调, 而钙出入共质体分别由局部的细胞膜的Ca²⁺-透水离子通道和Ca²⁺-AT酶巧妙的控制 (Broadley et al., 2008)。然而, 相关证据表明, 任何硫和磷或者钙吸收之间的直接的相互作用比较少, 因此需要做进一步的研究。

对作为硫素的供应者杂卤石性能的综合分析, 与替



照片2. 一块T₄处理 (100% NP, 75% S) 试验地块收获时的情景。照片由作者拍摄。

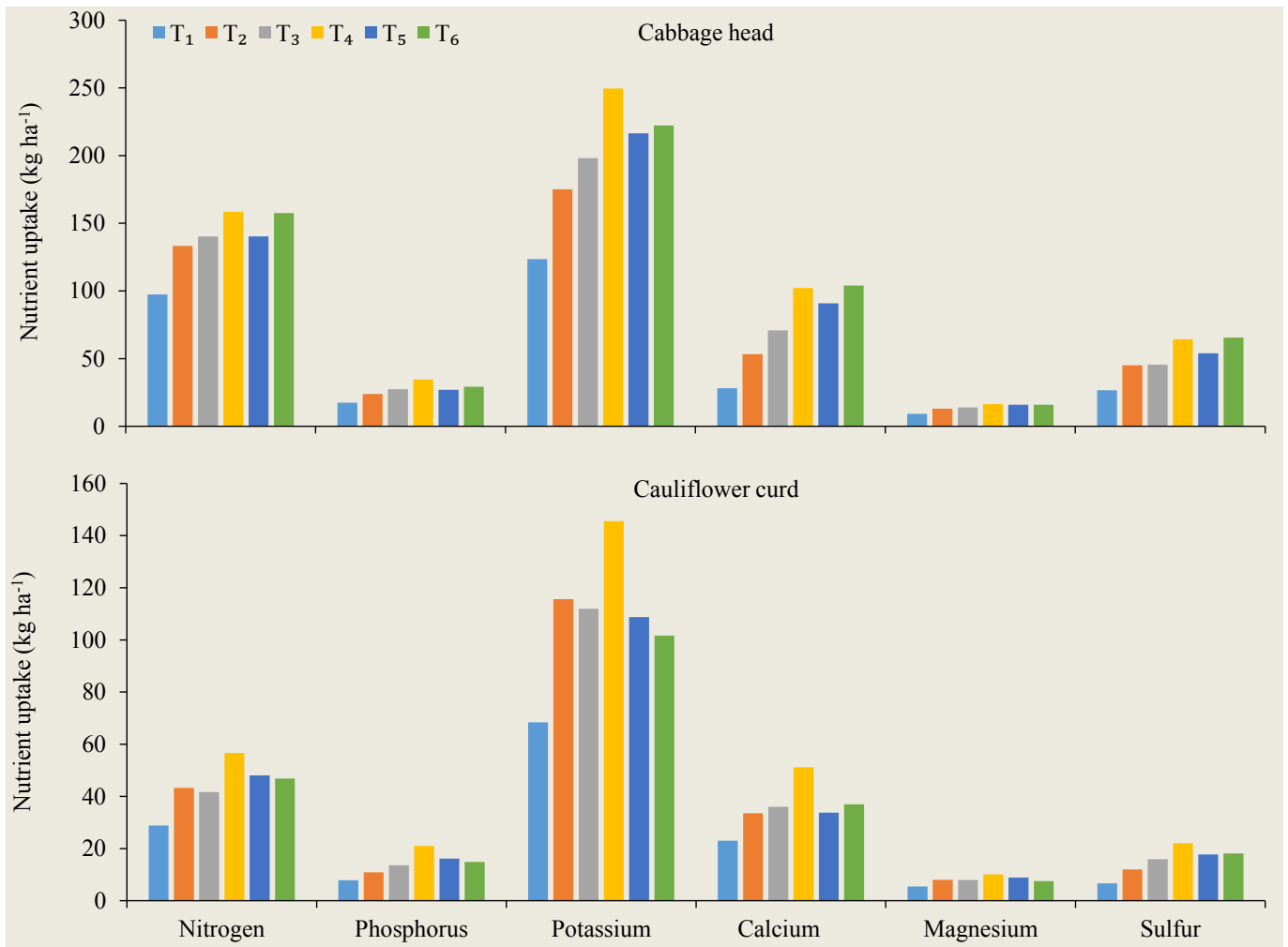


图5.施用钾肥和硫肥对卷心菜和花椰菜养分吸收累积的影响。

代化肥进行全面的施用量相比超出了本研究的范围。在这里,当完全施用推荐的硫肥量时,没有发现石膏和杂卤石之间存在显著差异。然而,当硫肥源为杂卤石时,所有处理的产量和质量属性均低于硫肥施用量为推荐硫肥施用量75%的处理。在整个生长季节最佳养分有效性至关重要,随植物需求的增加,它们摄取养分率往往低于淋溶过程的损失率(Hawkesford, 2000; Susila and Locascio, 2001; Abdallah *et al.*, 2010; Hochmuth and Hanlon, 2010; Steinfurth *et al.*, 2012; Girondé *et al.*, 2014)。因此,杂卤石比较大的优势是它的养分缓释模式,当然也包括在灌水量的土壤中极易移动的钾素的缓慢释放。

总之,硫的施用极大的提高了卷心菜和花椰菜的产量及品质。钾促进了硫的吸收,随之,硫似乎促进磷和钙的吸收。最高产量出现在施用充足的N-P-K肥料且硫源为

杂卤石的75%的硫肥施用量的处理,同时确定了杂卤石因其缓释性能作为S-K-Ca-Mg肥料供应源的合理性。有必要对因硫肥的施用而调整氮钾肥的施肥实践作进一步的研究。

参考文献:

- Abdallah, M., L. Dubousset, F. Meuriot, P. Etienne, J.-C. Avice, and A. Ourry. 2010. Effect of Mineral Sulphur Availability on Nitrogen and Sulphur Uptake and Remobilization During the Vegetative Growth of *Brassica napus* L. *J. Experimental Botany* 61:2635-2646.
- Björkman, M., I. Klingen, A.N.E. Birch, A.M. Bones, T.J.A. Bruce, T.J. Johansen, R. Meadow, J. Mølmann, R. Seljåsen, L.E. Smart, and D. Stewart. 2011. Phytochemicals of Brassicaceae in Plant Protection and Human Health - Influences of Climate, Environment and Agronomic Practice. *Phytochemistry* 72:538-556.

- Broadley, M.R., H.C. Bowen, H.L. Cotterill, J.P. Hammond, M.C. Meacham, A. Mead, and P.J. White. 2004. Phylogenetic Variation in the Shoot Mineral Concentration of Angiosperms. *J. Experimental Botany* 55:321-336.
- Broadley, M.R., J.P. Hammond, G.J. King, D. Astley, H.C. Bowen, M.C. Meacham, A. Mead, D.A.C. Pink, G.R. Teakle, R.M. Hayden, W.P. Spracklen, and P.J. White. 2008. Shoot Calcium and Magnesium Concentrations Differ between Subtaxa, are Highly Heritable, and Associate with Potentially Pleiotropic Loci in *Brassica oleracea*. *Plant Physiol.* 146:1707-1720.
- Cartea, M.E., and P. Velasco. 2008. Glucosinolates in Brassica Foods: Bioavailability in Food and Significance for Human Health. *Phytochemistry Reviews* 7:213-229.
- Engel, E., C. Baty, D. le Corre, I. Souchon, and N. Martin. 2002. Flavor-Active Compounds Potentially Implicated in Cooked Cauliflower Acceptance. *J. Agriculture and Food Chemistry* 50:6459-6467.
- Girondé, A., L. Dubousset, J. Trouverie, P. Etienne, and J-C. Avice. 2014. The Impact of Sulfate Restriction on Seed Yield and Quality of Winter Oil Seed Rape Depends on the Ability to Remobilize Sulfate from Vegetative Tissues to Reproductive Organs. *Frontiers in Plant Science* 5:1-13. DOI 10.3389/fpls.2014.00695.
- Falk, K.L., J.G. Tokuhisa, and J. Gershenzon. 2007. The Effect of Sulfur Nutrition on Plant Glucosinolate Content: Physiology and Molecular Mechanisms. *Plant Biol.* 9:573-581.
- Haneklaus, S., E. Bloem, and E. Schnug. 2008. History of Sulfur Deficiency in Crops. In: J. Jez (ed.). *Agronomy Monographs* 50: Sulfur: A Missing Link between Soils, Crops, and Nutrition. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI 53711-5801, USA. p. 45-58. DOI 10.2134/agronmonogr50.c4.
- Hawkesford, M.J. 2000. Plant Responses to Sulphur Deficiency and the Genetic Manipulation of Sulphate Transporters to Improve S-Utilization Efficiency. *J. Experimental Botany* 51:131-138.
- Hochmuth, G., and E. Hanlon. 2010. *Principles of Sound Fertilizer Recommendations*. University of Florida, IFAS Extension SL315.
- Jamal, A., Y-S., Moon, and M.Z. Abdin. 2010. Sulphur - A General Overview and Interaction with Nitrogen. *Australian J. Crop Sci.* 4:523-529.
- Jordan, H.V., and H.M. Reisenauer. 1957. Sulphur and Soil Fertility. In: *Soil, the Yearbook of Agriculture 1957*, USDA. p. 107-111.
- Khan, N.A., M. Mobin, and Samiullah. 2005. The Influence of Gibberellic Acid and Sulfur Fertilization Rate on Growth and S-Use Efficiency of Mustard (*Brassica juncea*). *Plant and Soil* 270:269-274.
- Kovar, J.L., and C.A. Grant. 2011. Nutrient Cycling in Soils: Sulfur. Publications from USDA-ARS/UNL Faculty. Paper 1383. <http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1383>.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, New York.
- McGrath, S.P., and F.J. Zhao. 1996. Sulfur Uptake, Yield Response and the Interactions between N and S in Winter Oilseed Rape (*Brassica napus*). *J. Agric. Sci.* 126:53-62.
- McGrath, S.P., F.J. Zhao, and P.J.A. Withers. 1996. Development of Sulphur Deficiency in Crops and its Treatments. Proceedings of the Fertiliser Society, No. 379. Peterborough, The Fertiliser Society.
- Pettigrew, W.T. 2008. Potassium Influences on Yield and Quality Production for Maize, Wheat, Soybean and Cotton. *Physiologia Plantarum* 133:670-681.
- Saito, K. 2004. Sulfur Assimilatory Metabolism. The Long and Smelling Road. *Plant Physiol.* 136:2443-2450.
- Sarıkamış, G. 2009. Glucosinolates in Crucifers and their Potential Effects Against Cancer. Review. *Canadian J. Plant Sci.* 89:953-959.
- Schutte, L., and R. Teranishi. 1974. Precursors of Sulfur-Containing Flavor Compounds. *CRC Critical Reviews in Food Technology* 4:457-505.
- Steinfurth, D., C. Zörb, F. Braukmann, and K.H. Mühlung. 2012. Time-Dependent Distribution of Sulfur, Sulphate and Glutathione in Wheat Tissues and Grain as Affected by Three Sulfur Fertilization Levels and Late S Fertilization. *J. Plant Physiol.* 169:72-77.
- Stoewsand, G.S. 1995. Bioactive Organosulfur Phytochemicals in *Brassica oleracea* Vegetables - A Review. *Food Chem. Toxicol.* 33:537-543.
- Susila, A.D., and S.J. Locascio. 2001. Sulphur Fertilization for Polyethylene-Mulched Cabbage. Proceedings of the Florida State Horticultural Society 114:318-322.
- Tiwari, D.D., S.B. Pandey, and N.K. Katiyar. 2015. Effects of Polyhalite as a Fertilizer on Yield and Quality of the Oilseed Crops Mustard and Sesame. *International Potash Institute e-ifc* 42:13-20. <http://www.ipipotash.org/eifc/2015/42/2>.
- Watanabe, T., M.R. Broadley, S. Jansen, Philip J. White, J. Takada, K. Satake, T. Takamatsu, S.J. Tuah, and M. Osaki. 2007. Evolutionary Control of Leaf Element Composition in Plants. *New Phytologist* 174:516-523.
- White P.J., J.P. Hammond, G.J. King, H.C. Bowen, R.M. Hayden, M.C. Meacham, W.P. Spracklen, and M.R. Broadley. 2010. Genetic Analysis of Potassium Use Efficiency in Brassica oleracea. *Annals of Botany* 105:1199-1210.
- Zhao, F.J., M.J. Hawkesford, and S.P. McGrath. 1999. Sulfur Assimilation and Effects on Yield and Quality of Wheat. *J. Cereal Sci.* 30:1-17.

“施用杂卤石对卷心菜及花椰菜产量及品质的影响”一文可以在国际钾肥研究所 (IPI) 的官方网站上浏览下载: [区域活动/印度](#)。