

研究论文



芥末种植园。照片提供: IPI.

杂卤石做肥料对油料作物芥末和芝麻产量及品质的影响

Tiwari, D.D.⁽¹⁾, S.B. Pandey⁽¹⁾, and N.K. Katiyar⁽¹⁾

摘要

在印度, 芥末 (*Brassica juncea*) 和芝麻 (*Sesamum indicum* L.) 是重要的油料作物。这两种作物都是喜硫作物。Polysulphate™ 主要成分是天然矿物质“杂卤石”, 它由四个关键的植物营养元素硫 (S)、钾 (K)、镁 (Mg) 和钙 (Ca) 组成。本文主要是通过2组不同的试验研究基施 Polysulphate 对芥末和芝麻作物的影响。每组试验包括6个施肥方案: T₁ 为施用推荐量的氮 (N) 和磷 (P) 肥 (不施钾肥), T₂ 为施用推荐量的氮磷钾 (NPK) 肥, 作为对照, T₃-T₅ 为施用推荐剂量的氮磷肥 (NP) + Polysulphate 20、

30和40 kg ha⁻¹, 再分别对应补偿钾的水平到推荐量, 而 T₆ 为施用推荐量的氮磷钾肥 (NPK) + 石膏 (施用量以硫的量计算, 与 T₅ 处理硫的量相同)。与对照相比, 不施钾肥会使芥末和芝麻籽粒产量分别减少12%和17%。对这两种作物而言, 通过基施 Polysulphate, 发现作物产量的增加与硫的

⁽¹⁾ C.S. Azad 农业和技术大学土壤和农化系, Kanpur 208002, India
通讯作者: ddtiwari2014@gmail.com

施用量呈线性关系。当硫的施用量为 40 kg ha^{-1} 时, 与对照相比, 产量增加了33%。硫的施用使整个植物生物量明显增加, 影响大多数的收益参数, 包括含油量。因此, 芥末和芝麻的出油率增加到 1095 、 505 kg ha^{-1} , 与对照相比, 分别增加了39%和43%。硫的施用明显增强了作物对钾素的吸收, 表明这两个元素之间的存在协同关系。此外, 硫和钾转移到谷物中, 可能参与了油脂的生物合成。因此得出结论, 像施用大量元素那样大量施用硫酸肥可显著增加芥末和芝麻等油料作物的产量。讨论了Polysulphate作为基肥优于石膏。

引言

人类的饮食正在发生变化, 越来越依赖植物油。印度是一个主要的油料作物生产国之一, 油料作物有花生、芥末、油菜、芝麻等。传统上, 印度人消耗大量的食用油主要用于烹饪。在印度的油料作物中, 芝麻 (*Sesamum indicum* L.) 是已知最早的用来做日常食用油的农作物之一。它含有50%的油和25%的蛋白质、维生素、矿物质和抗氧化剂。芝麻的种植面积有174万ha, 平均产量为 421 kg ha^{-1} (OAS, 2009)。芝麻籽中的蛋白质富含蛋氨酸、赖氨酸、色氨酸 (Anilakumar *et al.*, 2010)。这些氨基酸是人体营养所必需的, 可是由于其他植物蛋白源如大豆和谷物的替代而逐渐缺乏 (Brosnan and Brosnan, 2006; Fukagawa, 2006)。然而应努力丰富不同主要粮食作物以获取必需的氨基酸 (Ufaz Galili, 2008), 芝麻油或芝麻粉可以用来丰富健康食品, 提供更好的营养平衡 (Prakash, 1985; El-Adawy, 1997; El-Adawy and Mansour, 2000; Quasem *et al.*, 2009)。作为蛋白质生物合成的基本成分蛋氨酸以及半胱氨酸是2种含硫氨基酸, 因此硫的施用对芝麻植物的正常生长和发



照片1. 杂卤石结晶。照片提供: ICL肥料公司

育至关重要。此外, 含硫化合物可大大提高热处理中芝麻籽油和芝麻酱 (tahine) 的香气 (Park *et al.*, 1995)。事实上, 许多研究已经证明了补充硫酸肥对芝麻作物生长和产量会带来有利的影响 (Rahul and Paliwal, 1987; Ghosh *et al.*, 1997; Tiwari *et al.*, 2000; Saren *et al.*, 2005; Puste *et al.*, 2015)。

硫常与十字花科的作物联系在一起, 可能是它们含有大量的含硫次生代谢物以利于植物自我保护, 且有益于人类的健康和饮食 (Stoewsand, 1995; Björkman *et al.*, 2011)。十字花科的作物包括几个油料作物, 其中油菜 (芸苔属植物 *napus*) 和芥末 (芸苔属植物 *juncea*) 是最重要的经济作物。在印度和巴基斯坦北部, 芥子油曾经是流行的食用油, 即使现在仍然是孟加拉、印度和孟加拉国东部地区美食的主要成分。20世纪下半叶, 在印度和巴基斯坦北部芥子油的流行受到限制, 这主要是由于大批量生产植物油的实用性的影响, 但食用芥子油仍是复杂的嵌在该地区的文化中。施用硫和氮

肥, 以及它们之间的平衡, 可明显影响十字花科植物中芥子油苷的浓度, 已经证明增加硫酸肥的施用量会导致芥子油苷总量上升 (Li *et al.*, 2007)。缺硫会增加油菜对各种真菌病原体感病的几率 (Dubuis *et al.*, 2005), 抗真菌活性的损失与芥子油苷减少存在明显的联系, 这表明芥子油苷可以增加抗菌的潜力。硫酸肥施用量的增加也会影响多酚如类黄酮和酚酸的含量 (De Pascale *et al.*, 2007)。

根据Khan *et al.* (2005) 硫越来越被认为是继氮磷钾元素后的第4个主要的植物养分。它是氨基酸--半胱氨酸和蛋氨酸的组成成分, 作为前期合成的所有其他含硫化合物以减少硫 (Marschner, 1995)。芥末 (*Brassica juncea* L.) 是各种油料作物中对硫的需求最高的作物 (McGrath and Zhao, 1996), 但是需求量往往得不到满足, 这主要是因为日常施肥主要以施用氮肥为主 (Zhao *et al.*, 1993)。因此, 作物上硫供应的短缺会导致其他营养元素利用率的降低, 特别是氮元素。

一些研究已经明确的建立了在植物上氮和硫之间同化的作用标准 (Kopriva *et al.*, 2002)。在植物上, 硫的有效性调节氮的利用率, 从而影响光合作用, 作物生长及干物质的积累。

硫只能以无机形式, 即硫酸根 (SO_4^{2-}) 被植物吸收利用。有机硫和单质硫必须通过微生物活动转化为无机形式才能被吸收利用, 这个转化过程取决于土壤中的碳硫比、温度、湿度 (Boswell and Friesen, 1993)。硫酸盐可以用作为液体肥料 (如铵硫代硫酸盐, 12-0-0+26S) 通过灌溉施肥, 尽管应用这种模式所需的设备和基础设施的很少施用或成本较高。硫酸钙 (石膏) 是一种有效的硫源, 但是作为硫肥很少使用, 这是因为它的含硫量较低, 仅为15%~18%。别的包括肥料在内的硫源, 多与氮磷钾结合在一起。氮硫结合在一起的包括硫酸铵 (21-0-0+24S), 硫酸硝酸铵 (30-0-0+15S), 硫酸磷酸铵 (13-39-07S), 硝酸磷酸铵 (27-12-0+4.5S)。钾和硫结合在一起的肥料包括硫酸钾 (0-0-50+18S) 和钾镁硫酸盐 (0-0-22+22S)。硫酸根作为一个带负电荷的离子, 极易在土壤中移动, 经常从作物的根区淋失掉。因此, 应努力减缓硫酸根释放到土壤中的速度 (如造粒), 从而增加养分能量输入, 提高产品成本利用率。

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 (图1)。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 $\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ 。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%)。杂卤石作为一种肥料能为植物提供4个关键的营养元素, 分别是S、K、Mg、Ca。杂卤石可为作物营养提供有吸引力的解决方案。

本研究的目的是评估在印度北



图1. 印度北方邦 (左) 和坎普尔市 (右) 示意图, 该市是试验所在地。
资料来源: <http://office.incometaxindia.gov.in/kanpur/Pages/default.aspx>

方邦的大田条件下施用Polysulphate对芥末和芝麻作物带来的影响和效益。

2013-2014年在印度北方邦坎普尔的C.S Azad农业技术大学的Kalyanpur油料作物农场进行了芥末和芝麻的两组田间试验, 试验土壤为砂壤土, 试验前随机采取表层0-15厘米的土样进行理化性质化验分析 (表1)。

芥末 (品种为 Varuna) 于2013年11月11日播种, 并于2014年3月22日收获。芝麻 (品种为T-78) 于2014年7月20日播种, 并与2014年10月19日收获。两组试验的处理安排相同, 各有6个

处理 (T_1 - T_6), 各处理重复3次, 随机区组设计。小区面积为50 m²。氮磷钾的推荐施用量及硫的施用量根据方案进行。全部的磷、钾、硫肥和50%的氮肥在播种的时作为基肥一次施用。剩下50%的氮肥分作两次, 平均追施在作物的分蘖期和花芽形成期。处理 T_3 - T_5 , 通过施用Polysulphate来提供作物所需的硫和钾, 如果所提供的钾素不够推荐所需的量, 可通过施加氯化钾来补充。各处理所有农事操作和灌溉一致。具体的施肥安排见表2。

快要收获时, 各小区随机选取5棵作物进行测产, 记录每棵作物的荚果数、荚果长度、每荚粒数及千粒重。收获时, 测量计算各小区籽粒和干草产量及收获指数 (籽粒与地上生物量的比例)。植物油可通过使用石油醚作为提取剂的索氏提取的方法 (Sawicka-Kapuskta, 1975) 确定含油量及产

Table 1. Major physico-chemical soil properties of the mustard and sesame experimental fields near Kanpur, Uttar Pradesh, India.

Properties	Mustard	Sesame
pH (1:2.5)	7.4	7.69
EC (1:2.5)	0.44	0.44
Available N (kg ha ⁻¹)	180	181
Available P (P ₂ O ₅) (kg ha ⁻¹)	27.5	14.22
Available K (K ₂ O) (kg ha ⁻¹)	204	198
CaCO ₃ (%)	1.2	1.21
Available S (kg ha ⁻¹)	16.8	16.6
Sand (%)	53.5	53.6
Silt (%)	22.5	22.2
Clay (%)	24	24.2

量。测定芥末粒(鲜基)中的硫和钾的浓度,先用3:1的硝酸和高氯酸消化样品,消化样品的钾用火焰光度计进行分析测定(Jackson, 1967),消化样品中硫根据Chesnin和Yien (1951)的比浊法确定。

结果与讨论

芥末和芝麻的2组试验中,在不施钾肥的情况下,籽粒和干草产量比对照处理(T_2)显著下降,分别下降了12%和17%。最近研究(Mozaffari *et al.*, 2012)报道了芥末上施用钾肥的好处本研究也证实了这一点。然而,一些以前的研究发现施用钾肥对芝麻种植的贡献微不足道的(El-Aman *et al.*, 1998; Shehu, 2014)。本研究的结果却恰恰相反,或者至少表明芝麻种植相当依赖当地的土壤条件。

T_3 、 T_4 、 T_5 3个处理,随着Polysulphate施用量的增加,即硫元素施用量的增加,两种作物的产量随之稳步上升明显

(表3,图1)。芥末粒的产量增加了35%, T_2 硫的施用量为0,芥末粒的产量为1.87 t ha⁻¹,当硫的施用量最大,即Polysulphate的施用量最大,为40 kg ha⁻¹时,芥末粒的产量为2.52 t ha⁻¹。同样在芝麻上,当硫的施用量最大时,芝麻粒的产量增加了33%,为1.11 t ha⁻¹,而对照处理 T_2 的产量只有0.835 t ha⁻¹。 T_6 处理通过施用石膏来进行施硫,硫的施用量与 T_5 相同,但是籽粒产量增加不明显,这在芥末上表现的相当明显(表3,图1)。

这些结果与以前大量相关研究的结果一致,都表明硫在油料作物中起到至关重要的作用(Boswell *et al.*, 1993; Zhao *et al.*, 1993; McGrath and Zhao, 1996; Ghosh *et al.*, 1997; Tiwari *et al.*, 2000; Saren *et al.*, 2005; Puste *et al.*, 2015),导致Khan *et al.*, (2005)声明硫应该被视为植物生长和发展所必需的第四种大量元素。

不同施肥处理并没有影响到收获指数(HI,表3),它们一直很稳定,芥末和芝麻的收获指数分别为0.27和0.34。换句话说,对产量的显著影响并没有体现在营养部分和生殖部分之间干物质分配的任何转变。相反,整个植物对施肥的反应是进一步的增长和发展,表现在荚果数量和大小,以及籽粒数量和重量(表4)。芥末粒的含油量从41.85%上升到43.45%,芝麻粒的含油量从42.2%上升到45.5%。由表4可以看出,这两组试验,如果施肥缺钾和硫

Table 2. Fertilization treatments included in the mustard and sesame experiments.

Treatment	N	P	K	S	Source of fertilizer	
-----kg ha ⁻¹ -----						
T_1	NP 100%	120	60	0	0	Urea and DAP
T_2	NPK 100% (control)	120	60	60	0	Urea, DAP, and MOP
T_3	NPK 100% + S 50%	120	60	60	20	Urea, DAP, MOP, and Polysulphate
T_4	NPK 100% + S 75%	120	60	60	30	Urea, DAP, MOP, and Polysulphate
T_5	NPK 100% + S 100%	120	60	60	40	Urea, DAP, MOP, and Polysulphate
T_6	NPK 100% + S 100%	120	60	60	40	Urea, DAP, MOP, and gypsum

Table 3. Effects of K deficiency (T_1) and of an increasing S dose through Polysulphate (T_3 - T_5), or through gypsum (T_6), on the grain and stover yields of mustard and sesame. The harvest index (HI) presents the calculated ratio between the grain and the whole above ground plant biomasses.

Treatment	Mustard			Sesame		
	Yield		HI	Yield		HI
	Grains	Stover		Grains	Stover	
-----Mg ha ⁻¹ -----						
T_1	1.65	4.455	0.27	0.695	1.350	0.34
T_2	1.87	4.940	0.27	0.835	1.575	0.35
T_3	2.19	5.896	0.27	0.890	1.755	0.34
T_4	2.38	6.188	0.28	1.050	2.040	0.34
T_5	2.52	6.804	0.27	1.110	2.250	0.33
T_6	2.47	6.670	0.27	1.075	2.050	0.34
CD (P=0.05)	0.019	0.018		0.045	0.140	

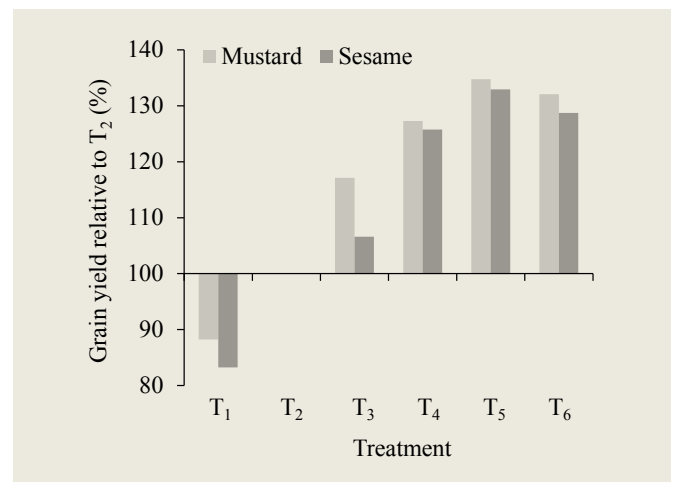


Fig. 1. Effects of K deficiency (T_1), S supplemented at 20, 30, and 40 kg ha⁻¹ through Polysulphate application (T_3 - T_5 , respectively) or through gypsum (40 kg S ha⁻¹, T_6) on the grain yields of mustard and sesame relative to fertilization with the recommended doses of NPK (T_2). For further details, see the materials and method section and Table 2.

都会显著降低籽粒的含油量。

对照处理 T_2 (施用推荐量的氮磷钾肥),芥末和芝麻的产油量分别为786、352 kg ha⁻¹。如果不施用钾肥(T_1),芥末的产油量下降了12%,芝麻的产油量下降了22%(图2)。



照片2. 多聚硫酸盐肥料分为颗粒级 (左) 和标准级 (右)。照片提供: ICL肥料公司。

施用Polysulphate后, 芥末和芝麻的产油量增加明显, 处理 T_5 和 T_2 比较, 分别增加了39%和43%, 即分别增加了1095、505 kg ha^{-1} 。通过施用石膏来补充硫(T_6)也会显著增加两种作物的产油量, 但是效果不如Polysulphate。

芥末粒中积累了大量的硫和钾, 即使这两种营养元素的实际施用量为0, 但是籽粒中的含量却分别为10、13.5 kg ha^{-1} , (图3, T_1)。当施用推荐剂量的钾(T_2), 芥末粒中钾的含量增加了4 kg ha^{-1} 。尽管本处理中没有施用硫肥, 但芥末粒中硫的含量也有所增加。

当施用硫肥时, 关于钾和硫的特殊联系(芥末粒中钾和硫的累积量)变得更加明显。不出所料, 硫在籽粒中的累积量随施用剂量的增加而呈比例增加, 最高达到约20 kg ha^{-1} 。出乎意料的是, 虽然 T_2 - T_6 处理钾的施用量一致, 但是籽粒中钾的累积量却逐渐增加, 籽粒中钾和硫的比率为常数1.37 (图3)。这种模式不能不认为, 施用Polysulphate能更好的提高钾的利用效率, 类似现象也体现在当以石膏来做硫肥时。

在钾素比较缺乏, 且没有硫素供应时(T_1)、籽粒中钾含量的降低明显高于籽粒中硫素的降低以及籽粒和油脂的产量的降低程度。与对照相比, 籽粒中钾的含量下降了24%, 而硫的含量, 出油率和籽粒产量分别下降了14%, 12%, 和11.5% (图4)。然而, 当施用硫肥时, 籽粒产量和产油量以相似的比率增加, 而籽粒中硫的含量却以两倍的速度增长。同时, 籽粒中钾的累积量增长50%, 明显高于籽粒产量及产油量的增加速率。这些结果表明, 在芥末中, 硫素连同大量的钾素被转移到种子中。除了证明对产量的增加有益外, 这两个元素可能在生产次生代谢产物的方面也有重要作用 (Stoewsand, 1995; Fukagawa, 2006; Li *et al.*, 2007; De Pascale *et al.*, 2007)。氮和硫之间的相互作用已被证明有助于油料作物的生长, 产量和质量的提高 (Zhou *et al.*, 1993; McGrath *et al.*, 1996; Tiawri *et al.*, 2000; Kopriva *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2007)。本研究结果明显表明钾和硫之间存在的协同关系有助于提高芥末和芝麻的产量和质量。

Table 4. Effects of K deficiency (T_1), S supplemented at 20, 30, and 40 kg ha^{-1} through Polysulphate application (T_3 - T_5 , respectively), or through gypsum (40 kg S ha^{-1} , T_6), on major yield properties in mustard and sesame.

Treatment	Mustard					Sesame				
	Pods plant ⁻¹	Pod length (cm)	Grains pod ⁻¹	Grain wt (g K ⁻¹)	Oil (%)	Pods plant ⁻¹	Pod length (cm)	Grains pod ⁻¹	Grain wt (g K ⁻¹)	Oil (%)
T_1	195	4.4	9.8	4.85	41.85	97	2.8	43	3.1	39.5
T_2	197	5.1	9.9	5.05	42.02	105	2.9	47	3.4	42.2
T_3	202	5.8	10.2	5.35	42.45	115	3.0	48	3.6	43.5
T_4	204	6.2	11.8	5.36	42.22	125	3.1	58	3.8	44.2
T_5	204	6.2	11.8	5.36	43.45	130	3.2	60	4.0	45.5
T_6	201	6.0	11.7	5.35	42.14	120	3.1	50	3.7	43.9
CD (P=0.05)	1.84	0.26	0.36	0.04	0.51	4.7	-	3.2	0.12	1.1

Note: g K^{-1} = weight of 1,000 grains in grams.

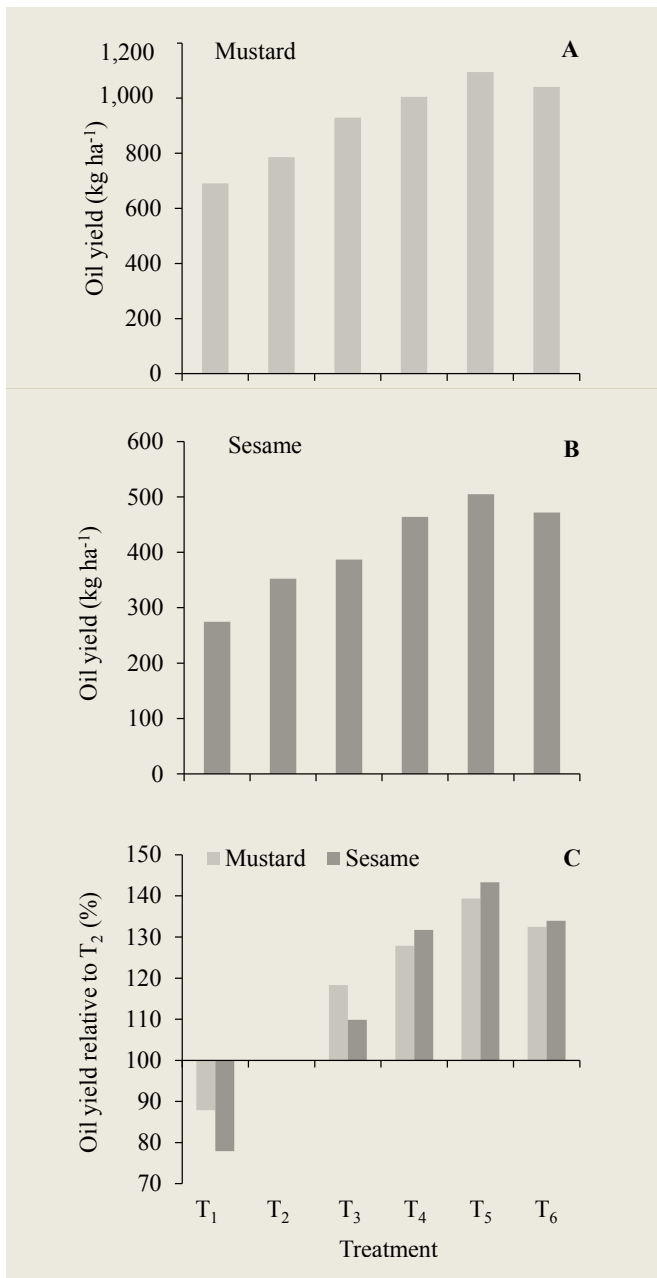


Fig. 2. Effects of K deficiency (T_1), S supplemented at 20, 30, and 40 kg ha⁻¹ through Polysulphate application (T_3 - T_5 , respectively), or through gypsum (40 kg S ha⁻¹, T_6), on the absolute oil yields of mustard (A) and sesame (B), and on their relative oil yields (C), as compared to T_2 .

本研究表明了Polyhalite作为一个有效的植物硫源的价值。相对于石膏, Polyhalite密实度好, 还包含其他大量的重要营养元素(K、Ca、Mg)、又不含氯, 每当要基施硫肥时, Polyhalite值得考虑。

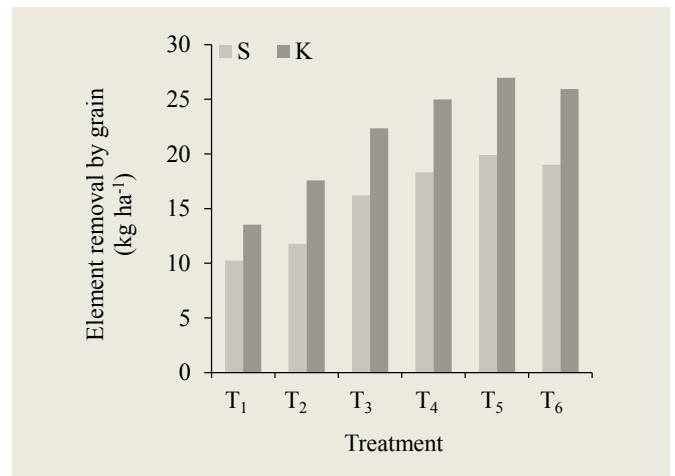


Fig. 3. Sulfur and K removal by mustard grains under K deficiency (T_1), recommended NPK dose (T_2), S supplemented at 20, 30, and 40 kg ha⁻¹ through Polysulphate application (T_3 - T_5 , respectively), or through gypsum (40 kg S ha⁻¹, T_6). For further details, see materials and method section and Table 2.

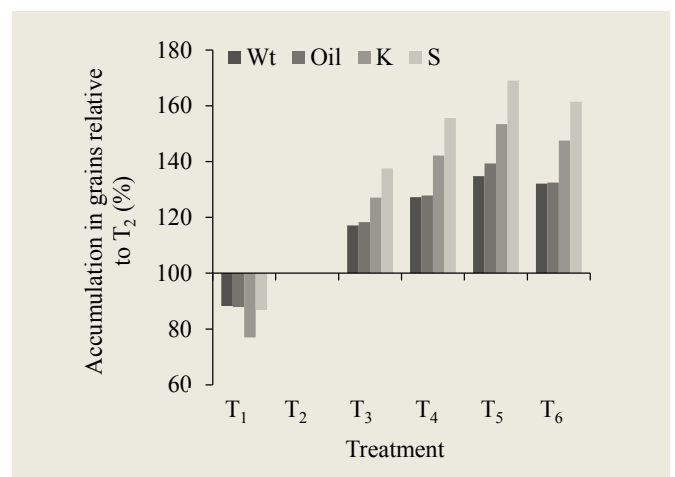


Fig. 4. Effects of K deficiency (T_1), S supplemented at 20, 30, and 40 kg ha⁻¹ through Polysulphate application (T_3 - T_5 , respectively), or through gypsum (40 kg S ha⁻¹, T_6), on the accumulation of fresh weight, oil, K, and S in mustard grains, relative to fertilization with the recommended doses of NPK (T_2). For further details, see materials and method section and Table 2.

结论

- 芥末和芝麻生产中, 想要获取合理的籽粒产量及出油量, 钾肥施用至关重要。
- 像施用大量元素那样大量施用硫肥会显著增加油料作物如芥末和芝麻的产量。
- 在油料作物中硫和钾似乎存在着协同效应。
- 在选择基肥提高土壤中钾和硫时, Polysulphate是一个值得考虑的肥料。

参考文献:

- Anilakumar, K.R., A., Pal, F. Khanum, and A.S. Bawa. 2010. Nutritional, Medicinal and Industrial Uses of Sesame (*Sesamum indicum* L.) Seeds - An Overview. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 75:149-168.
- 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.
- Boswell, C.C., and D.K. Friesen. 1993. Elemental Sulfur Fertilizers and their Use on Crops and Pastures. *Fertilizer Research* 35:127-149.
- Brosnan, J.T., and M.E. Brosnan. 2006. The Sulfur-Containing Amino Acids: An Overview. *J. of Nutr.* 136:16365-16405.
- Chesnin, L., and C.H. Yien. 1951. Turbidimetric Determination of Available Sulphur. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* 14:149-151.
- De Pascale, S., A. Maggio, R. Pernice, V. Fogliano, and G. Barbieri. 2007. Sulphur Fertilization May Improve the Nutritional Value of *Brassica rapa* L. Subsp. *Sylvestris*. *Europ. J. Agron.* 26:418-424.
- Dubuis, P.H., C. Marazzi, E. Städler, and F. Mauch. 2005. Sulphur Deficiency Causes a Reduction in Antimicrobial Potential and Leads to Increased Disease Susceptibility of Oilseed Rape. *J. Phytopathology* 153:27-36.
- El-Adawy, T.A. 1997. Effect of Sesame Seed Protein Supplementation on the Nutritional, Physical, Chemical and Sensory Properties of Wheat Flour Bread. *Food Chemistry* 59:7-14.
- El-Adawy, T.A., and E.H. Mansour. 2000. Nutritional and Physicochemical Evaluations of Tahina (Sesame Butter) Prepared from Heat-Treated Sesame Seeds. *J. of the Science of Food and Agriculture* 80:2005-2011.
- El-Aman, S.T., S.T. El-Seroy, and B.A. El-Ahmar. 1998. Effects of NK Levels on Some Economic Characters of Sesame (*Sesamum indicum* L.). *Sesame Safflower Newsletter* 18:101-107.
- Fukagawa, N.K. 2006. Sparing of Methionine Requirements: Evaluation of Human Data Takes Sulfur Amino Acids Beyond Protein. *J. of Nutr.* 136:16765-16815.
- Ghosh, P., P.K. Jana, and G. Sounda. 1997. Effect of Sulphur and Irrigation on Growth, Yield, Oil Content and Nutrient Uptake by Irrigated Summer Sesame. *Env. Econ.* 15:83-89.
- Jackson, M. L. 1967. *Soil Chemical Analysis*. New Delhi: Prentice Hall of India Pvt. Ltd.
- 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.
- Kopriva, S., M. Suter, P.V. Ballmoos, H. Hesse, U. Krahenbuhl, H. Rennenberg, and C. Brunold. 2002. Interaction of Sulphate Assimilation with Carbon and Nitrogen Metabolism in Lemna Minor. *Plant Physiol.* 130:1406-1413.
- Li, S., I. Schonhof, A. Krumbein, L. Li, H. Stutzel, and M. Schreiner. 2007. Glucosinolate Concentration in Turnip (*Brassica rapa* ssp. *rapifera* L.) roots as affected by nitrogen and sulfur supply. *J. Agricultural and Food Chemistry* 55: 8452-8457.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, New York.
- McGrath, S.P., and F.J. Zhao. 1996. Sulphur Uptake, Yield Response and the Interactions Between N and S in Winter Oilseed Rape (*Brassica napus*). *J. Agric. Scie.* 126:53-62.
- Mozaffari, S.N., B. Delkosh, and A.S. Rad. 2012. Effects of Nitrogen and Potassium Levels on Yield and Some of the Agronomical Characteristics in Mustard (*Brassica juncea*). *Indian J. Science and Technology* 5:2051-2054.
- OAS (Odisha Agricultural Statistics). 2009. Government of Odisha, Department of Agriculture and Food production, Bhubaneswar, p. 32.
- Park, D., J.A. Maga, D.L. Johnson, and G. Morini. 1995. Major Volatiles in Toasted Sesame Seed Oil. *J. Food Lipids* 2:259-268.
- Prakash, V. 1985. Hydrodynamic Properties of \bar{A} -Globulin from *Sesamum indicum* L. *J. Biosciences* 9:165-175.
- Puste, A.M., B. Rey Pramanik, K. Jana, S. Roy, and T. Sunanda Devi. 2015. Effect of Irrigation and Sulphur on Growth, Yield and Water Use of Summer Sesame (*Sesamum indicum* L.) in New Alluvial Zone of West Bengal. *J. Crop and Weed* 11:106-112.
- Quasem J.M., A.S. Mazahreh, and K. Abu-Alruz. 2009. Development of Vegetable Based Milk from Decorticated Sesame (*Sesamum indicum*). *Amer. J. Applied Sciences* 6:888-896.
- Rahul, D.S., and K.V. Paliwal. 1987. Sulphur Requirement of Maize and Sesame in Nutrient Solution. *Indian J. Plant Physiol.* 30:71-77.
- Saren, B.K., P. Nandi, and S. Tudu. 2005. Effect of Irrigation and Sulphur on Yield Attributes and Yield, Oil Content and Oil Yield and Consumptive Use Efficiency of Summer Sesame. *J. Oilseeds Res.* 22:383-84.
- Sawicka-Kapusta, K. 1975. Fat Extraction in the Soxhlet Apparatus. In: Grodziriski, W., R.Z. Klekowski, and A. Duncan (eds.). *Methods for Ecological Bioenergetics*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. p. 288-293.
- Shehu, H.E. 2014. Uptake and Agronomic Efficiencies of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium in Sesame (*Sesamum indicum* L.). *Amer. J. Plant Nutr. and Fertilization Technology* 4:41-56.

- Stoewsand, G.S. 1995. Bioactive Organosulfur Phytochemicals in Brassica Oleracea Vegetables - A Review. *Food Chem. Toxicol.* 33:537-543.
- Tiwari, R.K., K.N. Namdeo, J. Girish, and G. Jha. 2000. Effect of Nitrogen and Sulphur on Growth, Yield and Quality of Sesame (*Sesamum indicum*) varieties. *Res. Crops* 1:163-67.
- Ufaz, S., and G. Galili. 2008. Improving the Content of Essential Amino Acids in Crop Plants: Goals and Opportunities. *Plant Physiol.* 147:954-961.
- Zhao, F.J., E.J. Evans, P.E. Bilsborrow, and J.K. Syers. 1993. Influence of S and N on Seed Yield and Quality of Low Glucosinolate Oilseed Rape (*Brassica napus* L.). *J. Sciences of Food and Agric.* 63:29-37.

论文“杂卤石做肥料对油料作物芥末和芝麻产量及品质的影响”也可以在国际钾肥研究所的官方网站上浏览下载：[区域活动/印度](#)