

研究论文



法国的油菜田。照片拍摄: P.Dugast

在法国油菜和冬小麦上施用杂卤石作为硫源肥料的效果报告

Dugast, P.⁽¹⁾

摘要

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, 它由 K_2O 、 SO_3 、 MgO 、 CaO 组成, 其含量分别为14%、48%、6%、17%。缺硫(S) 已被认为是在世界上许多地区作物生产的限制因素, 特别是在芸苔属植物和谷类作物上。本研究的目的是评估杂卤石肥料和通常施用的硫肥相比, 对常见的适耕作物——油菜 (*Brassica napus* L.) 和冬小麦 (*Triticum aestivum*) 生长性能的影响。试验于2013

年和2014年在法国东北部的两个试验点进行, 分别代表沙壤土和浅钙质土壤。补充硫素导致了油菜产量的明显增加, 尤其是在浅钙质土壤上产量增加更明显。然而, 本试验中硫素对冬小麦产量的影响微不足道, 这可能归因于土壤中可用的硫素是充足的。杂卤石的性能与那些得到确认的硫肥相当, 不过有必要进行进一步的经济评估。

⁽¹⁾咨询者: ph.dugast.consultant@gmail.com

引言

硫 (S) 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 (Khan *et al.*, 2005)。缺硫也被认为是在全球许多地区作物生产上的一个限制因素。特别是在20世纪90年代的西欧, 芸苔属植物和谷类作物发生缺硫现象的报道日益增多, 主要原因是在更严格的法规下, 作为工业污染 (会导致硫通过酸雨的形式进入土壤) 进入大气中的硫大规模减少 (Zhao *et al.*, 1999)。硫是氨基酸类半胱氨酸和蛋氨酸的组成成分, 它们是蛋白质及其他含有含硫化合物合成的前体 (Marschner, 1995)。已有的几项研究已经证实植物体内氮和硫同化吸收之间存在相互调节作用 (Kopriva *et al.*, 2002)。植物体内硫素的有效性调节氮的利用率, 从而影响光合作用、作物生长和干物质积累。

冬小麦 (*Triticum aestivum*) 是一种主要的适于耕种的作物, 适当的施用硫有利于提高产量 (Randall *et al.*, 1981; Zhao *et al.*, 1999; Hoel, 2011; Järvan *et al.*, 2012; Kulhánek *et al.*, 2014), 即使这种提高一眼看不出甚至检测不到。适于小麦最佳生长的硫素需求约为15-20 kg ha⁻¹ (Zhao *et al.*, 1999)。对于缺硫, 小麦的生殖生长比营养生长似乎更为敏感 (Steinfurth *et al.*, 2012), 缺硫会导致麦粒变小 (Zhao *et al.*, 1999)。除了对小麦产量产生影响外, 小麦粒中硫的含量也是小麦产品的一个重要的质量参数 (Moss *et al.*, 1981)。已经证实, 限制硫的可用性可以导致合成和积累的储蛋白质缺硫或低硫, 如 ω -麦醇溶蛋白和分子量麦谷蛋白的亚基为富硫蛋白质变异而成 (Steinfurth *et al.*, 2012; Dai *et al.*, 2015)。缺硫也会减少总蛋白质中高分子蛋白质的比例, 但高分子蛋白质的分布会向低分子量转变 (Wrigley *et al.*, 1984)。这些蛋白质组成的变化导致面团物理性质发生变化, 这对烘焙面包质量产生影响。烘焙面包的质量和根据田间条件施用硫肥之间建立了重要的联系 (MacRitchie and Gupta, 1993; Zhao *et al.*, 1999)。

硫素常与十字花科的作物联系在一起。十字花科的作物包括几种油料作物, 其中油菜 (rapeseed或oilseed rape, *Brassica napus* L.) 已经成为非常重要的经济作物。施用硫肥和氮肥, 以及它们之间的平衡会显著影响十字花科作物中芥子油苷浓度, 已经证明硫施用量的增加会导致芥子油苷总量的增加 (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)。Zhao *et*



地图1. 标注有两个试验地的法国地图: 1.深沙壤土; 2.浅钙质土.

al. (1993) 的研究表明, 补充硫会给油菜的产量带来了相当大的提高。

硫只能以无机形式, 即硫酸根 (SO_4^{2-}) 被植物吸收利用。有机硫和单元素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)。硫酸根是带负电荷的离子, 在土壤中极易移动, 经常从根际区域淋失掉。因此, 要努力减缓土壤中硫酸根的释放速率 (如可使肥料造粒, 但是能量输入和生产成本增加)。

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 $\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ 。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新的解决方案。杂卤石中的硫素可慢慢释放, 其中50%的硫素释放比较迅速, 剩余的硫素则是缓慢释放的。因此, 本研究的目的是评估杂卤石肥料和通常施用的硫肥相比, 对常见的适耕作物——油菜和冬小麦生长性能的影响。

材料和方法

在法国东北部的2个不同的试验地点进行了小麦和油菜的试验，两处试验点的土壤明显不同(图1)。2013年首先在皮卡第地区瓦兹省的卡唐瓦开展试验，此处的土壤为典型的是深沙壤土，2014年在香槟-阿登地区的上马恩省罗谢泰莱埃(油菜)和穆希莱沙泰(小麦)开展试验，此处的土壤为浅钙质土。

油菜

在两个试验中，杂卤石与可溶性硫肥硫酸镁相对比(Mag25™: MgSO₄, 9.8% Mg, 12.3% S)。在两处试验点两种硫肥的施用量分别为30 g S ha⁻¹或28 g S ha⁻¹。2013年，在C₁的发育阶段施用杂卤石(Joosen *et al.*, 2007)，而MgSO₄在15天后，即C₂的发育阶段施用。2014年，根据每个发育阶段的测试施用硫肥(表1)。氮、磷、钾、镁的施用量只要保持平衡且充足状态即可。试验设3次重复。油菜产量(mt ha⁻¹)用含水量为9%干重表示。

表1. 油菜试验详细描述

处理	代号	N	SO ₃	施硫时间	
		-----kg ha ⁻¹ -----			
		(UAN)			
2013 沙壤土	Non-fertilized control	NFC	0	0	
	Nitrogen	NS ₀	210	0	
	Nitrogen+Polysulphate™	NPS	210	72	27/02
	Nitrogen+Mag25™	Ref. S	210	72	20/03
2014 浅钙质土	Nitrogen	NS ₀	0	0	
	Nitrogen+Polysulphate™ C ₁	NPS C ₁	180	70	24/02
	Nitrogen+Mag25™ C ₁	Ref. S C ₁	180	70	24/02
	Nitrogen+Polysulphate™ C ₂	NPS C ₂	180	70	17/03
	Nitrogen+Mag25™ C ₂	Ref. S C ₂	180	70	17/03

Note: UAN = Urea Ammonium Nitrate

表2. 冬小麦试验详细描述

处理	代号	N	SO ₃	施硫时间	
		-----kg ha ⁻¹ -----			
		(AN)			
2013 沙壤土	Nitrogen	NS ₀	210	0	
	Nitrogen+Polysulphate™	NPS	210	50	28/02
	Nitrogen+S	Ref. S	210	50	28/02
		(UAN)			
2014 浅钙质土	Non-fertilized control	NFC	0	0	
	Nitrogen	NS ₀	180	0	
	Nitrogen+Polysulphate™	NPS	180	62	04/03
	Nitrogen+Mag25™	Ref. S	180	62	04/03

Note: AN = Ammonium Nitrate; UAN = Urea Ammonium Nitrate

冬小麦

2013年，用含有硫酸根硝酸铵(AN)粒状肥(26% N; 26% S)作为对照硫肥(20 kg S ha⁻¹)。Polysulphate™(20 kg S ha⁻¹)在小麦分蘖时与氮肥一起施用，氮肥选用硝酸铵。

2014年，杂卤石和对照硫肥的施用量均为25 kg S ha⁻¹，其中对照硫肥为硫酸镁。氮肥是尿素硝铵(UAN)，在第5个分蘖阶段配合硫同时施用。磷、钾、镁的施用量只要保持平衡且充足状态即可。具体的施用方案见表2中。

小麦产量(mt ha⁻¹)用含水量为15.5%的干重表示。蛋白质含量用占含水量为15.5%的小麦干重的百分比表示。

结论与讨论

肥沃的沙壤土(2013)上油菜产量差异较大，最高产量为2.9 mt ha⁻¹，得到该产量并没有补充任何氮肥，而贫瘠的钙质土壤(2014)，最高产量不足2.6 mt ha⁻¹，虽然这里有完美的施肥制度(图1)。排除这两年两处试验点之间天气状况的差异，产量上发生的差异可主要归因于马恩河地区的浅层土壤无法持水，从而不能为作物提供足够的水分(Fismes *et al.*, 2000)。油菜的产量对水分缺乏非常敏感，特别是在开花期、坐果期和种子填充期(Bouchereau *et al.*, 1996; Champolivier and Merrien, 1996; Wright *et al.*, 1996)。

当氮(NFC)单独施用到卡唐瓦肥沃的土壤上，甜菜产量显著增加，约为50%。油菜是一种氮效率低的作物，但渐渐地，额外增加氮的供应得到了认同(Fismes *et al.*, 2000; Rathke *et al.*, 2006)。两个试验中，补充硫会导致产量增加(图1)，然而，在马恩河地区浅钙质土上的油菜的产量增加更显著。卡唐瓦肥沃的土壤上油菜产量仅增加0.45 mt ha⁻¹(约10%)，上马恩省的罗谢泰莱尔油菜产量因硫肥施用几乎翻了一番。

这些结果再次表明无论何时于土壤中十字花科作物施用硫肥的意义及氮和硫之间的协同关系，(Zhao *et al.*, 1993; McGrath and Zhao, 1996;

Fismes *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2007)。在马恩河地区的薄土上施用硫肥对油菜产量产生了巨大的影响, 这可能是因为土壤表层中的硫经常被淋失掉, 因此施用硫肥显著提高了其对作物的有效性。

施用不同的硫肥以及在作物不同的生长发育施用硫肥均没有对油菜的产量带来任何统计学意义上的显著差异。其他的研究也表明, 当优化施用日期时, 杂卤石的施用效果完全类似于硫酸镁 (未公开数据)。

冬小麦

在肥沃的沙壤土 (2013) 上且定期的施用氮肥, 施用硫肥使冬小麦产量略有增加, 为0.3-0.4 mt ha^{-1} , 这在统

计学意义上并不显著 (5%的显著性水平) (图2)。随硫肥的施用麦粒中蛋白质含量没有变化, 保持不变, 为11.3%-11.5%。在浅钙质土 (2014) 上, 对籽粒产量增长的贡献仅氮肥就可达89%, 蛋白质含量也从9.3%急剧上升到10.6%。然而, 施用硫肥对小麦产量和蛋白质含量的影响完全可以忽略不计。在两个冬小麦试验中, 杂卤石和其他硫肥 (硫酸镁和含有硫酸根的硝酸铵) 相比, 对小麦产量的影响它们之间没有差别 (图2)。

本研究中硫肥施用没有显著影响到小麦产量, 这并不奇怪。尽管一些常规研究证明硫肥对小麦产量有影响, 但是它们已经明确表示, 这些可能于取决试验地点或时间,

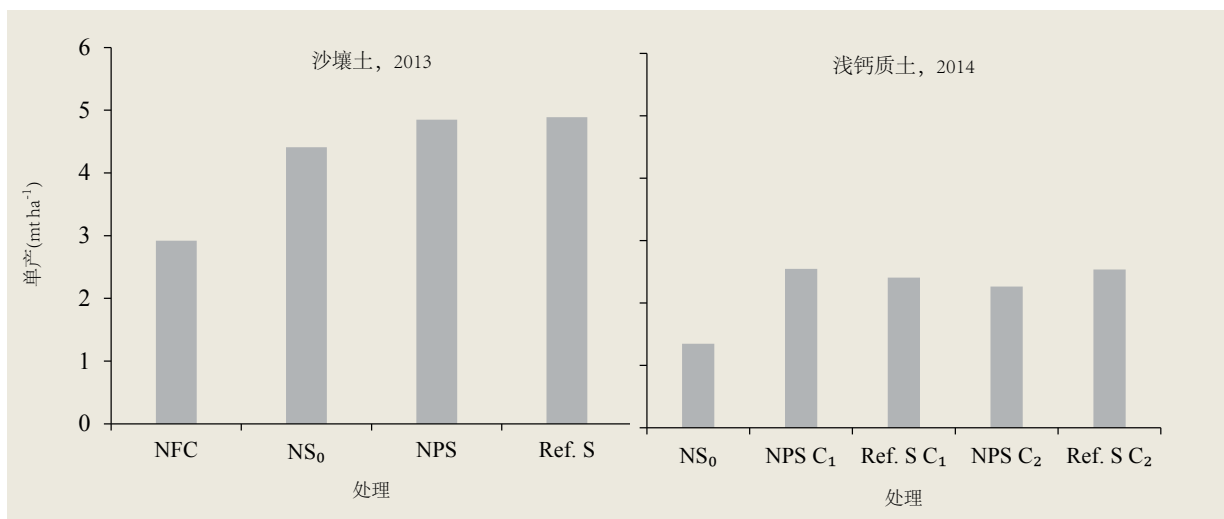


图1. 受杂卤石和硫酸镁两种不同硫源影响的用标准干吨表示的油菜籽的产量。NFC: 不施肥; NS₀: 只施氮肥; NPS: 氮肥+杂卤石。氮和/或硫都是在油菜作物的C₁和C₂时期使用的。In 2013, CV (协方差) 和MSE (平均标准误) 分别为4.6% and 0.2 mt ha^{-1} ; in 2014, CV was 10%。

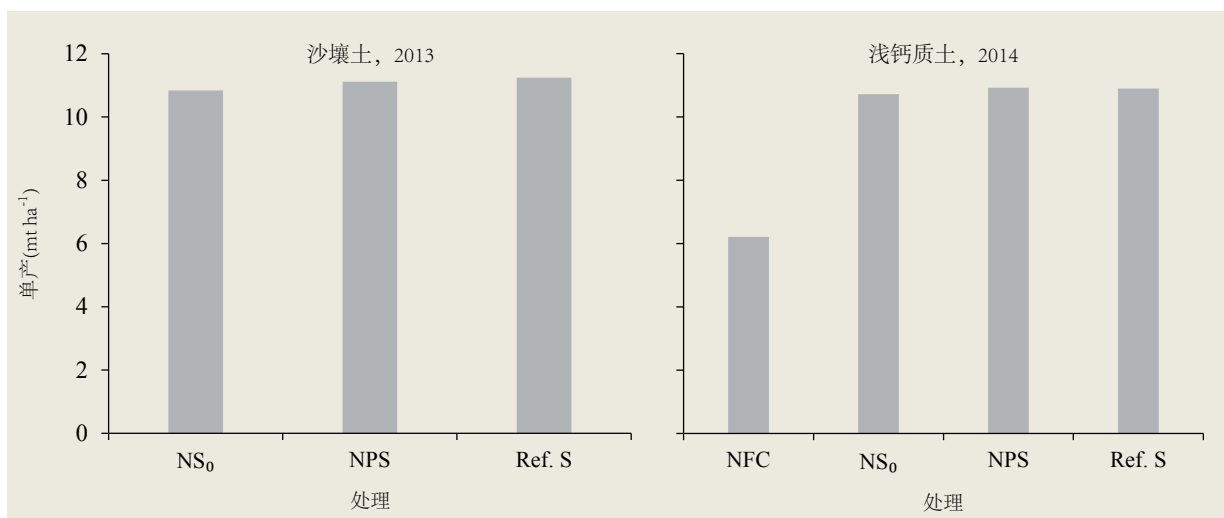


图2. 杂卤石和对照硫肥 (2013年NS和2014年硫酸镁) 两种硫源对用干吨表示的冬小麦产量的影响。NFC: 不施肥对照; NS₀: 只施氮肥; NPS: N + Polyhalite. CV was 2.9% and 2%, in 2013 and 2014, respectively.

与土壤或气候条件密切相关 (Hoel, 2011; Järvan *et al.*, 2012; Kulhánek *et al.*, 2014)。在所有这些研究中, 硫素对冬小麦产量的影响是不一致的, 在某年或某地得到的试验结果, 但换做别的时间或别处却又得不到同样的结果。考虑获得的高产量, 很有可能是这两处试验地点的土壤中硫素本就丰富, 足以提供所有冬小麦作物生长对硫的需求, 所以在这种情况下补充硫素是无效的。施用硫肥可能对小麦及面粉质量产生影响, 遗憾的是, 因超出当前的研究范围而没有做相关检验。

结论

尤其是在浅钙质土壤上施用硫肥对油菜产量的意义已被证实。遗憾的是, 本研究中类似的影响并没有在冬小麦产量上体现出来, 这可能由于土壤中的有效硫比较充足。杂卤石的性能和其他硫肥相当, 不过, 在经济层面上还有待进一步评估。

致谢

特别感谢阿戈拉合作社和EMC₂进行了田间试验。

参考文献:

- Bouchereau, A., N. Clossais-Besnard, A. Bensaoud, L. Leport, and M. Renard. 1996. Water Stress Effects on Rapeseed Quality. *European J. Agron.* 5:19-30.
- Champolivier, L., and A. Merrien. 1996. Effects of Water Stress Applied at Different Growth Stages to *Brassica napus* L. var. *oleifera* on Yield, Yield Components and Seed Quality. *European J. Agron.* 5:153-160.
- Dai, Z., A. Plessis, J. Vincent, N. Duchateau, A. Besson, M. Dardevet, D. Prodhomme, Y. Gibon, G. Hilbert, M. Pailloux, C. Ravel, and P. Martre. 2015. Transcriptional and Metabolic Alternations Rebalance Wheat Grain Storage Protein Accumulation under Variable Nitrogen and Sulfur Supply. *The Plant Journal* 83:326-343.
- De Pascale, S., A. Maggio, R. Pernice, V. Fogliano, and G. Barbieri. 2007. Sulfur Fertilization May Improve the Nutritional Value of *Brassica rapa* L. subsp. *Sylvestris*. *European J. Agron.* 26:418-424.
- Dubuis, P.H., C. Marazzi, E. Städler, and F. Mauch. 2005. Sulfur Deficiency Causes a Reduction in Antimicrobial Potential and Leads to Increased Disease Susceptibility of Oilseed Rape. *Journal of Phytopathology* 153:27-36.
- Fismes, J., P.C. Vong, A. Guckert, and E. Frossard. 2000. Influence of Sulfur on Apparent N-Use Efficiency, Yield and Quality of Oilseed Rape (*Brassica napus* L.) Grown on a Calcareous Soil. *European J. Agron.* 12:127-141.
- Hoel, B.O. 2011. Effects of Sulfur Application on Grain Yield and Quality, and Assessment of Sulfur Status in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil and Plant Science* 61:499-507.
- Järvan, M., L. Edesi, and A. Adamson. 2012. Effect of Sulfur Fertilization on Grain Yield and Yield Components of Winter Wheat. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil and Plant Science* 62:401-409.
- Joosen, R., J. Cordewener, E.D.J. Supena, O. Vorst, M. Lammers, C. Maliepaard, T. Zeilmaker, B. Miki, T. America, J. Custers, and K. Boutilier. 2007. Combined Transcriptome and Proteome Analysis Identifies Pathways and Markers Associated with the Establishment of Rapeseed Microspore-Derived Embryo Development. *Plant Physiol.* 144:155-172.
- 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 Physiology* 130:1406-1413.
- Kulhánek, M., J. Balík, J. Černý, L. Peklová, and O. Sedlář. 2014. Winter Wheat Fertilizing Using Nitrogen-Sulfur Fertilizer. *Archives of Agronomy and Soil Science* 60:67-74.
- 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. *Journal of 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. Sulfur Uptake, Yield Response and the Interactions Between N and S in Winter Oilseed Rape (*Brassica napus*). *J. Agric. Sci.* 126:53-62.
- MacRitchie, F., and R.B. Gupta. 1993. Functionality-Composition Relationships of Wheat Flour as a Result of Variation in Sulfur Availability. *Australian J. Agric. Res.* 44:1767-1774.
- Moss, H.J., C.W. Wrigley, R. MacRitchie, and P.J. Randall. 1981. Sulfur and Nitrogen Fertilizer Effects on Wheat. II. Influence on Grain Quality. *Australian J. Agric. Res.* 32:213-226.
- Randall, P.J., K. Spencer, and J.R. Freney. 1981. Sulfur and Nitrogen Fertilizer Effects on Wheat. I. Concentrations of Sulfur and Nitrogen and the Nitrogen to Sulfur Ratio in Grain, in Relation to the Yield Response. *Australian J. Agric. Res.* 32:203-212.
- Rathke, G.-W., T. Behrens, and W. Diepenbrock. 2006. Integrated Nitrogen Management Strategies to Improve Seed Yield, Oil Content and Nitrogen Efficiency of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.): A Review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 117:80-108.
- Steinfurth, D., C. Zörb, F. Braukmann, and K.H. Mühling. 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.

- Wright, P.R., J.M. Morgan, and R.S. Jessop. 1996. Comparative Adaptation of Canola (*Brassica napus*) and Indian mustard (*B. juncea*) to Soil Water Deficits: Plant Water Relations and Growth. *Field Crops Research* 49:51-64.
- Wrigley, C.W., D.L. Du Cros, J.G. Fullington, and D.D. Kasarda. 1984. Changes in Polypeptide Composition and Grain Quality due to Sulfur Deficiency in Wheat. *Journal of Cereal Science* 2:15-24.
- 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.). *Journal of the Sciences of Food and Agriculture* 63:29-37.
- 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.

“在法国油菜和冬小麦上施用杂卤石作为硫源肥料的效果报告”一文，可以在国际钾肥研究所的官方网站上下载和浏览：[区域活动/欧洲](#)