

元素硫和硫酸盐混合颗粒肥及其在作物营养中的作用

谢玲 译 涂仕华 校

(国际植物营养研究所成都代表处, 原文译自《Better Crops》2015 第三期 P7 – P10)

硫强化的磷酸铵同时含有速效和缓释硫, 其释放速度取决于作物生长的环境。在硫酸盐易淋失的环境中, 元素硫则具有优势。在淋失风险较小的环境中, 硫酸盐形态硫效果最好。但是, 把硫酸盐与元素硫混合制成大小适宜的颗粒会同样有效。



对油菜这样能在全世界各种气候条件和土壤中都可生长的农作物来说, 使用强化硫肥是一个非常有效的选择

硫元素是植物生长的 18 种必需元素之一, 仅次于氮、磷和钾, 排在第四位。它参与植物光合作用及氨基酸和蛋白质的合成, 在植物营养中发挥关键作用。硫在土壤和植物中的行为与氮相似—易淋失, 易被有机物质固定, 以不同氧化态存在。硫的还原形态包括元素硫, 在淹水土壤中 (比如水稻田) 的硫化铁, 以及与碳结合而存在于土壤有机质中的硫。氧化态硫包括硫酸盐矿物 (如石膏), 土壤有机质中的硫酸酯和土壤溶液中的硫酸盐形态硫。

作物从土壤中吸收的硫主要是土壤溶液中的硫酸盐形态硫。所以, 像氮一样, 土壤中硫的有效性也受土壤有机质矿化或固定反应的影响。与氮另外一个相似点是氧化态硫 (硫酸盐) 在土壤中具有很高的移动性 (像硝酸

盐), 在降雨量高的环境中易被淋出土壤, 从而降低硫肥利用率。

硫肥主要是基于硫酸盐形态存在 (如 硫酸铵, 石膏, 硫酸钾) 或基于元素硫形态存在 (如硫磺颗粒, 氨化或含元素硫的钙基磷酸盐的化肥, 如硫强化重过磷酸钙, 硫强化磷酸一铵, 硫强化磷酸二铵)。硫酸盐基化肥提供的硫能被作物快速吸收利用, 但是这类肥料含硫量相对较低 (含硫 <25%), 所以肥料的施用量和运输成本都相对较高。元素硫肥的优势是硫含量很高 (含硫 >90%), 因此其用量和运输成本都较低。然而, 纯元素硫肥首先需要被氧化成硫酸, 然后才能被植物吸收利用, 因此它给作物提供硫的速度比硫酸盐要慢些。把这两种硫源结合在一起就能给

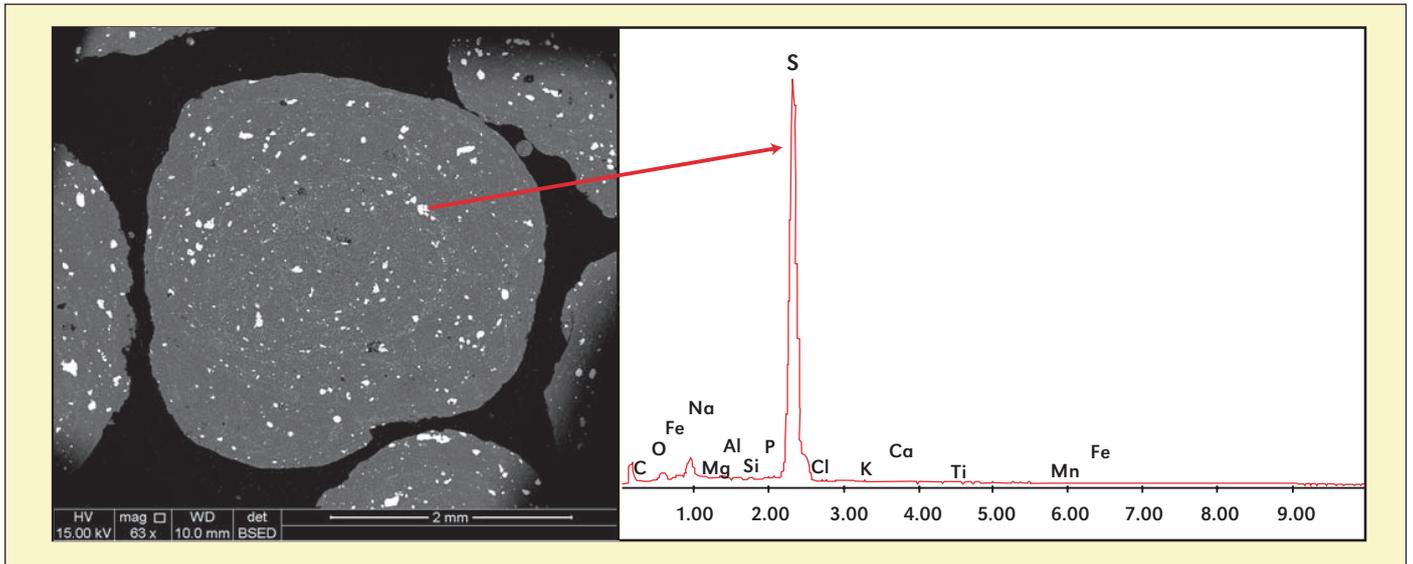


图1 典型元素硫/硫酸盐肥料和磷酸铵混合颗粒的X光分析，大颗粒里发亮的小粒被证实是元素硫

作物提供快慢相宜的硫素营养。但是在这些肥料中的元素硫要多久才能被释放出来呢？

元素硫在土壤中的氧化已经研究了几十年，众所周知元素硫的颗粒大小决定了硫的氧化率和硫酸的释放速度。研究显示小颗粒元素硫氧化更快，因为随着颗粒直径的减小，颗粒的比表面不断增加。

元素硫的氧化是由土壤中一系列微生物完成的，因此它受土壤中微生物丰富程度和活性这些因素的影响。其中最重要的因素是土壤温度和土壤pH值，但是有机碳以及土壤水分含量（影响程度稍小）也发挥作用。温暖气候下有机质含量高的非酸性土壤中元素硫氧化最快。

假设元素硫充分混合到土壤中，基于前面提及的控制氧化的关键因素，预测元素硫氧化的模型已经研发出来了。然而，这种直接施用硫磺粉的情况很少见。元素

硫通常是用粘结剂或分散剂制成小颗粒或颗粒/小锭施入土壤中，或包裹在大量元素肥料表面或与大量元素肥料混合造粒施用。在大棚试验中，发现这些产品中的元素硫，尽管是以小粒嵌入肥料颗粒中（图1），但比同等粒径充分混合到土壤中的元素硫的氧化慢得多（Friesen, 1996）；纯元素硫小颗粒/颗粒的氧化最慢。

这些混合颗粒产品中元素硫的氧化在实验室、大棚和试验田中进行了测试，以进一步明确是哪种因素控制着这些产品中元素硫的氧化。测试土壤中元素硫肥的氧化刚开始看似简单，因为测定氧化后生成的硫酸盐只是相对简单的一个化学程序。然而，从元素硫肥中释放出来的硫酸盐可以被淋洗，被植物吸收或结合到土壤有机物质中（图2），这样即使测得的硫酸盐在增加，也可能会低估元素硫的氧化。

在实验室试验中，通过定期把硫酸盐淋洗出土体以减少其形成土壤有机质（图

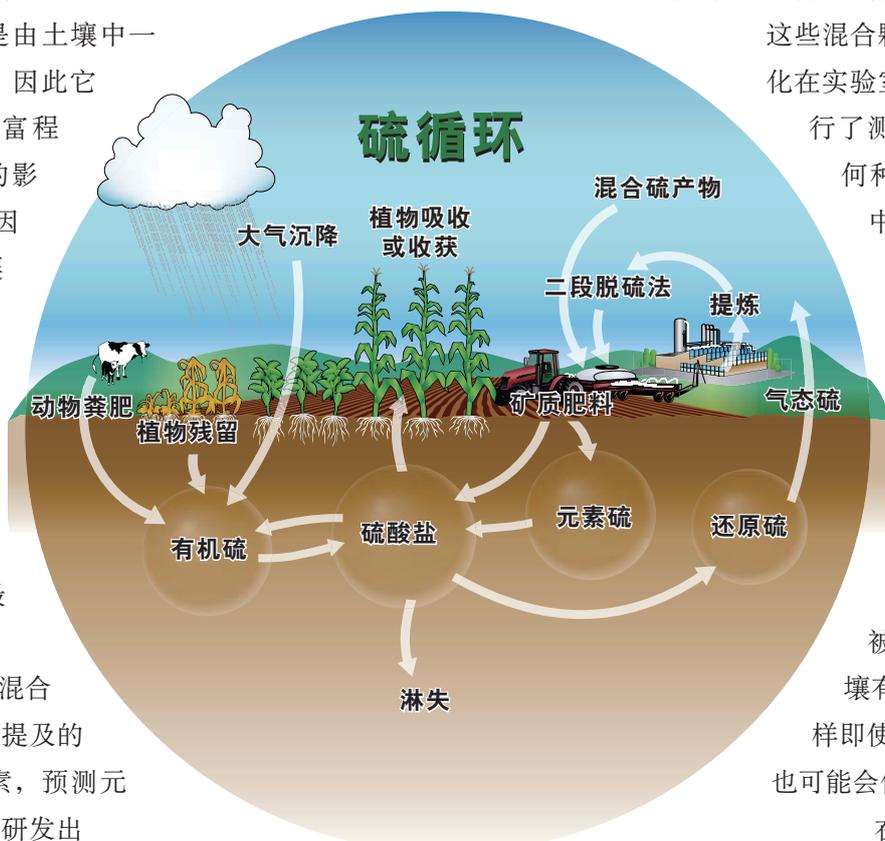


图2 肥料硫的去向，以元素硫或硫酸盐形态硫施入土壤中。硫酸盐的主要损失途径为作物收获带走，土壤有机物质固定和淋失。

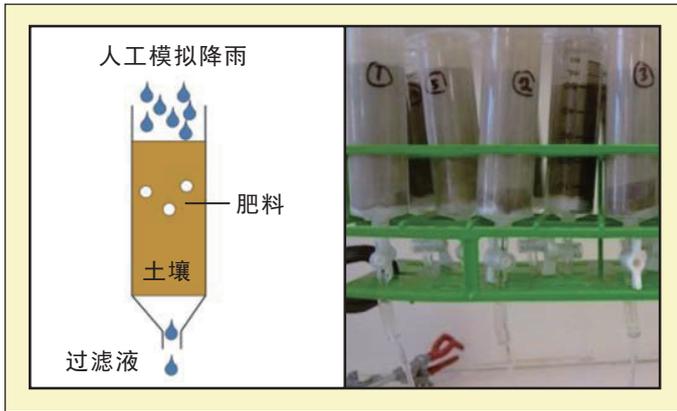


图3 测量土壤中元素硫氧化淋失过程图示
(左边:示意图,右边:淋洗土柱)

3), 以及在试验结束时(通过溶剂提取)测定土壤中剩余的元素硫来核实硫的物质平衡,测定了三种肥料中元素硫的氧化。

经过12个月的试验,元素硫颗粒中的硫氧化慢,元素硫/磷酸一铵/硫酸盐混合颗粒中硫氧化快,而氧化最快的是那些均匀混入土壤中的元素硫(图表4)。与此相对照,在硫酸铵处理中,几乎所有加入的硫在第一次淋洗中都被除去了。

之所以混合颗粒产品中元素硫(与元素硫颗粒大小相同)氧化慢的原因是因为元素硫和土壤(还有土壤微生物)的接触面比同等大小颗粒的元素硫完全混入到土壤中时要小。当可溶性营养元素(氮,磷)从大颗粒中溶解扩散后,只有崩塌的空洞与元素硫留在那里。进一步氧化取决于元素硫颗粒表面与土壤的接触情况,颗粒大小,肥料中元素硫的含量以及元素硫颗粒的直径(见图5)。基于这些几何学考虑,我们可以与元素硫完全混入到土壤中相比较,从而建立混合颗粒中元素硫氧化率下降的模型。

盆栽试验已经证实,大颗粒元素硫的氧化速率比硫强化磷酸一铵中的硫要慢得多,但硫对植物的有效性与磷酸一铵对照相比没什么不同。从第二季作物来看,硫混合颗粒中硫的有效性则高于硫酸铵(图6)。植物从大颗粒元素硫处理中吸收的硫较低是因为硫氧化慢,而从硫酸铵处理中吸收的硫相对较低则是因为第一季作物吸收较多硫以及一部分硫被结合到土壤有机质中。

利用硫的同位素 ^{34}S 标记硫肥试验,测定了作物从硫酸盐-S和两种硫源混合颗粒中元素硫的回收率。 ^{34}S 标记的元素硫肥或硫酸盐硫肥在加工生产后,在北美和南美开展了多点田间试验。

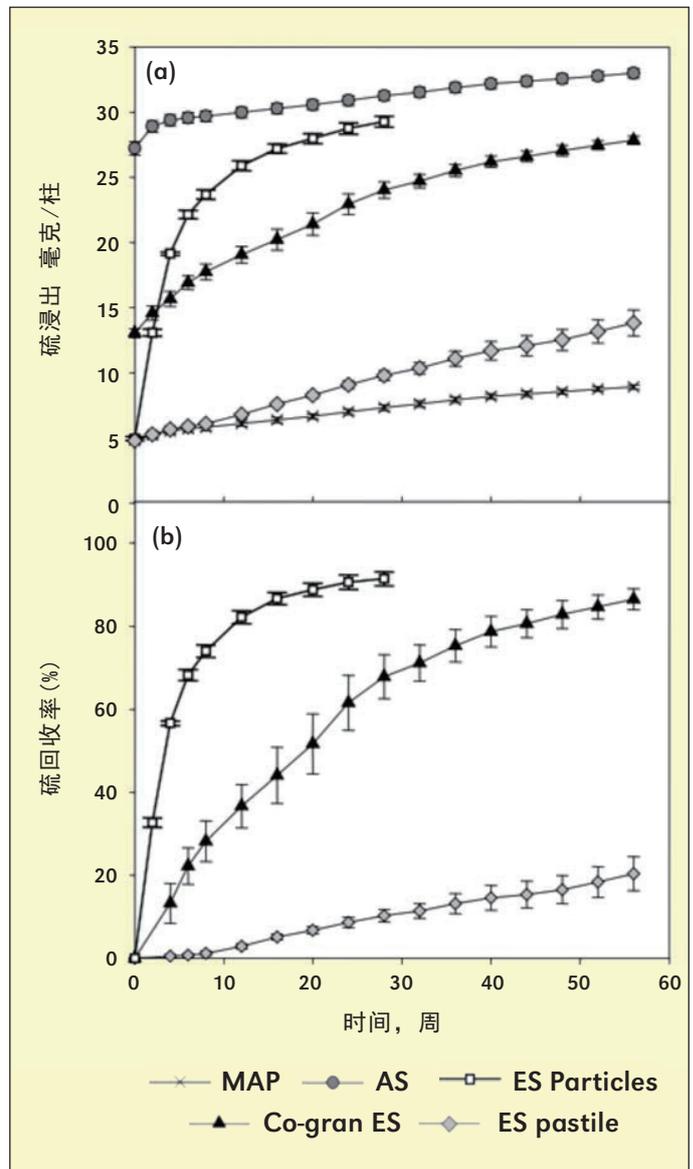


图4 (a)淋洗液中硫酸盐形态硫的释放试验结果 (b)由元素硫氧化而来的硫酸盐回收试验结果。土壤(pH 6.3,沙粒73%,有机碳2.8%)与磷酸一铵或各种含硫肥料(含24毫克硫)在25℃下培养12个月,定期淋洗(Degryse et al., 2015)。MAP=磷酸一铵;AS=硫酸铵;ES Particles=元素硫颗粒(直径为65 μm)与土壤充分混合;Co-gran ES=磷酸一铵中的元素硫/硫酸盐硫;ES pastile=含90%元素硫大颗粒+10%的膨润土;误差柱表示的是4个重复的标准差。

正如所期待的那样,在硫酸盐淋洗存在潜在风险的地方(例如北美为秋季施肥),元素硫肥就比硫酸盐肥更有效(见图7)。另一方面,在硫酸盐淋洗不明显的地方,硫酸盐肥料对作物的初始有效性最高,而元素硫肥则是在作物生长后期缓慢释放,并给后季作物提供硫。如前所述,元素硫的氧化速度主要受温度和土壤pH控制。

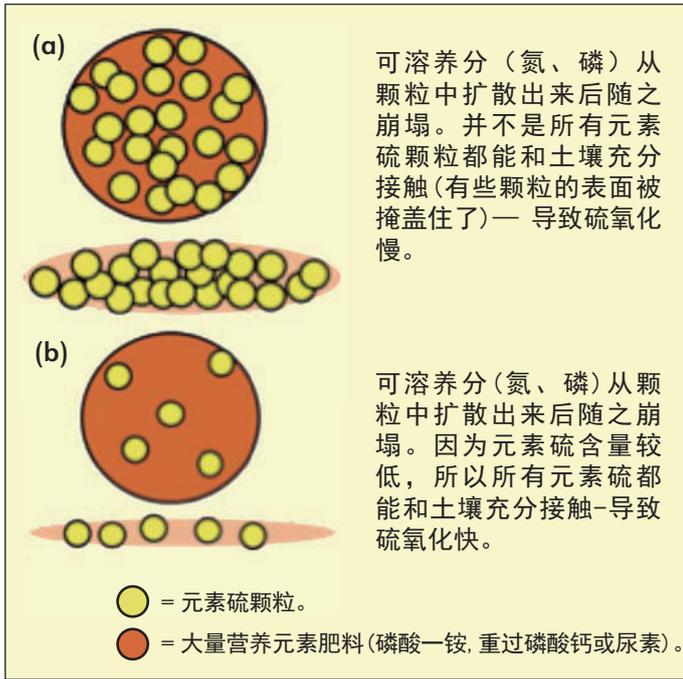


图5 含元素硫的化肥颗粒溶解图,(a) 含元素硫高或 (b) 含元素硫低。

结论

作者正在建立一个模型来预测混合颗粒产品中元素硫的氧化速率, 模型参数基于元素硫粒径大小, 混合颗粒的直径, 肥料中元素硫含量, 以及控制硫氧化的各种环境变量(主要是土壤温度和土壤 pH 值)。一旦该模型被验证, 就可以用来制定各种硫肥配方, 以满足作物在

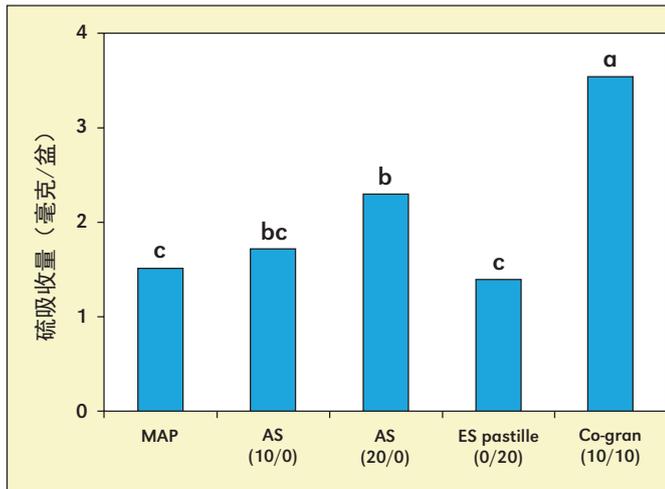


图6 左边一盆栽里第二季油菜的硫的吸收情况。肥料处理包括只施磷酸一铵(MAP)(对照), 硫酸铵(AS), 元素硫颗粒或硫强化磷酸一铵(括号里的数字是施入的硫酸盐态硫/元素硫的量(毫克/公斤))。柱体上的字母表示处理间的显著性差异($p < 0.05$)。

右边—硫强化磷酸一铵处理油菜的生长情况(左边那盆是元素硫处理, 右边那盆是硫强化磷酸一铵处理)

参考文献

[1] Degryse, F., B. Ajiboye, R. Baird, R.C. da Silva and M.J. McLaughlin. 2016. Soil Sci. Soc. Am. J. (accepted).

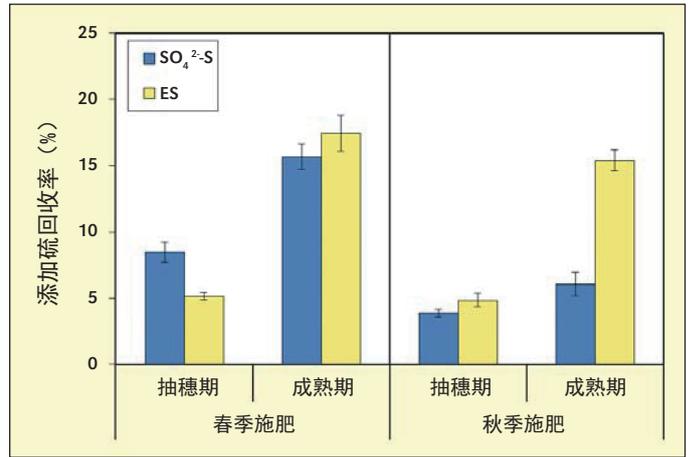


图7 在春季和秋季施用硫酸盐态硫或元素硫强化磷酸一铵, 分别在玉米抽穗期和成熟期(地上生物量)用同位素 ³⁴S 测定硫回收率百分数(Trial in Illinois, 2013-2014)。误差线代表四次重复的标准差。

不同环境和生长条件下对硫的需求。

鸣谢

作者特此鸣谢 Mosaic 有限公司的大力支持。澳大利亚阿德雷德大学肥料技术研究中心(www.adelaide.edu.au/fertiliser/)的 McLaughlin 教授(E-mail: michael.mclaughlin@adelaide.edu.au), Degryse 博士, da Silva 博士和 Baird 女士。

