

植物硫素营养诊断技术的研究进展^①

孟赐福, 姜培坤*, 曹志洪, 徐秋芳, 周国模

(浙江林学院生命科学院, 浙江临安 311300)

摘要: 作物缺 S 的状况在世界范围内呈现扩大的态势。作物和土壤的 S 素分析有助于作物获得高产。本文综述了植物可见症状、植物组织分析和土壤分析诊断技术的研究进展。植物组织分析诊断技术包括全 S、硫酸盐-S、N/S比、苹果酸盐/硫酸盐比、种子含 S 量及小麦籽粒戊二醛浸泡比色法。分析种子的 S 含量是诊断大豆 S 素状况一个简单而又可靠的方法。这种方法诊断植物 S 素营养状况的新方向, 因为它可以在作物播种前确定作物的 S 素状况。土壤分析作为诊断土壤 S 状况时, 还应考虑深层土壤的 S 含量、硫酸盐淋溶指数、环境条件及田间管理历史。

关键词: 硫素营养; 诊断技术; 可见症状; 植物组织分析; 土壤分析

中图分类号: S15; S154.1

作物缺硫(S)的状况在世界范围内呈现扩大的态势。作物 S 素营养的正确诊断对于作物的正常生长和获得高产是十分重要的, 但是要鉴定作物和土壤是否缺 S 未必是一件容易的事。为此, 必须采用形态观察、植物和土壤分析等诊断技术。

1 植物可见症状的诊断

当环境中有效 S 供应不足, 植物就会出现明显的缺 S 症状。缺 S 症状最先出现幼嫩的叶片。缺 S 的植物叶片竖立、卷曲、脆弱; 新叶变为黄绿色, 叶心失绿黄化, 但仍保留某些绿色部分; 茎秆细弱, 根细长而不分枝, 开花结实推迟。

2 植物组织分析诊断

作物组织分析虽然对于矫正当季作物的缺 S 已经为时已晚, 但是对于决定后季作物的 S 肥使用还是有用的。

2.1 全 S 和硫酸盐-S

研究表明, 当用全 S 作为指标时, 作物缺 S 的临界值为 2.0 g/kg。油菜叶片缺 S 的临界值是 6.5 g/kg^[1]。作物植株全 S 受环境条件的影响较大, 用它来诊断植物的 S 营养不是十分可靠的。

Jones^[2]提出用 SO_4^{2-} -S 的浓度作为 S 营养的指标, 因为当 S 在植物体内过量存在时, SO_4^{2-} 可以在植物体内积累起来。Spencer^等^[3]认为植物器官中的

SO_4^{2-} -S 的浓度也随植株的年龄而变化。

2.2 硫酸盐-S/全S比、酰胺态-N

Frenay^等^[4]认为, 诊断作物 S 素状况的最有希望指标是硫酸盐-S/全 S 比。这个指标不受作物年龄或供 N 状况的影响, 但它需要进行两个项目的测定。小麦植株的硫酸盐-S/全S比为 1/10 时, 表明供 S 是充足的。用 SO_4^{2-} -S /全S作为缺 S 指标, 玉米叶片的临界值为 7.7 左右^[5]。

温室研究表明, 氨基-N 浓度与 N/S 比有很好的相关性, 而且测定也比 N/S 容易, 因此可以作为在田间条件下诊断作物 S 营养状况的一个指标。玉米植株中的氨基-N 超过 500 mg/kg, 施 S 就会增加玉米产量^[6]。

2.3 N/S 比

用叶片 N/S 比作为 S 营养诊断指标的理论依据是作物组织中的蛋白质含量是比较稳定的, 且不受生育期的影响。它的缺点也是需要进行两个项目的分析。豆科作物在接种根瘤菌的情况下, N/S 比是一个较好的指标。

正常植株中的蛋白质含量大约为 10 g/kg, 含 N 约 170 g/kg, 因此正常植物的 N/S 比为(14 ~ 17):1。油菜花期充分展开的幼叶含 S 量低于 4 g/kg, N/S 比高于131, 就存在缺 S 的可能^[7]。Randall^[8]提出小麦籽粒 S 含量的临界值为 1.0 g/kg, N/S 比的临界值为17:1。

2.4 叶片苹果酸盐/硫酸盐比

迄今为止, 通过作物组织分析确定作物缺 S 的方

^①基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y304206)资助。

* 通讯作者

作者简介: 孟赐福(1941—), 男, 浙江义乌人, 研究员, 主要从事红壤改良和植物营养的研究工作。E-mail:cifu@21cn.com

法(如全 S、 SO_4^{2-} 、N/S 等)都不能令人满意。作物叶片中的苹果酸盐/硫酸盐比(MSR)是可以在作物生长早期诊断缺 S 的一个可靠而又实用的方法^[9],因而可以在作物生长的当季及时采取补救措施。它由英国洛桑试验站根据叶片中的 MSR 建立起来的。苹果酸盐是存在于所有植物中的一种有机酸。它会使植物吸收无机离子(如硫酸盐)处于不平衡状态。当硫酸盐浓度减少时,苹果酸盐浓度就会增加;反之亦然。这表明 MSR 是指示作物 S 素状况的一个有用指标。苹果酸盐和硫酸盐浓度在植物生长期以相同的比例变化。因此,如果供 S 充足的话,这个比例在植物的整个生长期都是稳定的。

叶片或籽粒中的苹果酸盐和硫酸盐可以用离子色谱法来测定,然后根据测定结果确定两者的比例(MSR)。与 N/S 比相比,用籽粒或叶片中的 MSR 诊断小麦缺 S 的失误差要低得多。后者诊断小麦缺 S,3 年平均失误差仅为 4%,而用籽粒和叶片中的 N/S 比诊断小麦缺 S,3 年平均失误差分别为 13% 和 16%。2000 年是中度缺 S 的年份,缺 S 减产 16%,产量损失达 10 t/hm²,用籽粒和叶片中的 N/S 比诊断缺 S,其失误差分别达到 20% 和 37%,而用 MSR 诊断缺 S,其失误差只有 2%。2001 年和 2002 年是严重缺 S 的年份,缺 S 减产 43%,产量损失达 2.4 t/hm²,MSR 诊断缺 S 的失误差为 3%~7%,而用籽粒和叶片中的 N/S 比诊断缺 S,其失误差分别达到 8%~11% 和 6%~10%(表1)。这说明,N/S 比诊断缺 S 只有在缺 S 严重时才有较高的准确率。

在英国,冬小麦取样可在生长阶段 22~27 叶片(主茎有 2.5 个分蘖)时进行。在田间取幼嫩的完全展开叶约 30 片。如果叶片是湿润的,将它们夹在两张纸巾之间,使叶片水分吸干后,再带回实验室。油菜取样可在生长阶段 3.6~3.7 叶片(花主茎伸展至始花)时进行。

表1 3 种方法诊断小麦缺 S 的失误差^[9](%)

Table 1 Error rates of three methods diagnosing sulfur deficiency in wheat

年份	MSR	籽粒 N/S 比	叶片 N/S 比
2000	2	20	37
2001	7	11	10
2002	3	8	6
平均	4	13	16

如 MSR>1.5,则说明植物缺 S。冬小麦就需要施用 S 20~22 kg/hm²。在英国矫治冬小麦缺 S 最迟不能超过 5 月初,矫治油菜缺 S 最迟不能超过 4 月中旬。

测试时间太早,由于作物小,生长缓慢,可能出现实际作物缺 S 而测试不缺 S 的情况。在这种情况下,应进行重新测试。如 MSR 低于 1.5,则说明植物不缺 S。

Blake-Kalff 等^[10]在 2000 年对小麦和油菜用 MSR 作为确定作物缺 S 的指标时,其临界值与上述结果略有不同。该研究采用的指标是用离子色谱法测定的苹果酸盐/硫酸盐峰面积比(malate:sulfate peak area ratio),而不是苹果酸盐/硫酸盐比。该法只需一个简单的分析,而且与取样时间无关。当苹果酸盐:硫酸盐峰面积比≤1 时,说明取样时作物不缺 S,而峰面积比>1 时,说明取样时作物缺 S。MSR 在油菜生长阶段 3.6~3.7 叶片(花主茎伸展至始花)和小麦生长阶段 22~25 叶片(主茎有 2.5 个分蘖)测定的结果是可靠的。

2.5 用种子诊断大豆缺 S

Sexton 等^[11]的研究表明,大豆生殖阶段所吸收的 S 大部分转移到种子蛋白质中,而且这种转移一直持续到鼓粒后期。Sunarpi 和 Anderson^[12]的研究表明,籽粒中的 S 有 87% 是大豆鼓粒期吸收的。因此,要想获得高产、优质的大豆,根据开花期以前植株中的 S 来诊断大豆缺 S 是不能确定整个生育周期缺 S 状况的。

虽然植物缺 S 在很多作物上得到证实,而且也有许多方法来评价土壤的 S 素状况,但是,这些方法很少应用于田间管理。这是因为 S 易于淋失,并积累在深层土壤中^[12],因而很难得到有代表性的土样。有鉴于此,从盆栽试验或从特殊田间试验得到的结果都不能应用于田间管理。

分析种子的 S 含量是诊断大豆 S 素状况一个简单而又可靠的方法。这种方法是诊断植物 S 素营养状况的新方向。它不仅提出 S 营养标准,评价蛋白质质量,而且可以在第一时间内确定作物可能存在的 S 素状况。通过分析耕作土壤不容易确定土壤的 S 素肥力,因为耕作土壤不同土层之间的 S 素肥力变异很大。因此,评价大豆的 S 素状况,分析种子是否缺 S 是必不可少的。Kiyoko 等^[13]的温室研究显示,种子 S 含量与其产量之间有显著的相关性。有缺 S 症状的植株,种子 S 含量为 S 1.5 g/kg,其产量只有施 S 的 60%。大豆种子 S 素的丰缺指标:缺乏(S<1.5 g/kg),很低(1.5 g/kg≤S<2.0 g/kg);低(2.0 g/kg≤S<2.3 g/kg);正常(2.3 g/kg≤S)。由于大豆种子 S 含量非常稳定,分析种子 S 含量也非常容易,而且有足够的时间为即将要播种的大豆施肥,因此诊断大豆 S 素状况,种子分析比叶片分析要优越得多。

Randall 等^[14]通过小麦籽粒分析也认为种子分析是诊断谷类作物缺 S 的有用方法。

2.6 小麦籽粒戊二醛浸泡比色法

Moss 等^[15]根据小麦籽粒用戊二醛浸泡后的颜色变化与其中的 S 素状况相关的原理建立了小麦籽粒戊二醛浸泡比色法确定小麦 S 素营养的诊断方法。从供 S 充足植株中得到的籽粒用戊二醛浸泡后呈像麦秆那样的黄色，而从缺 S 植株中得到的籽粒用戊二醛浸泡后呈棕色或紫棕色。这个方法是从鉴定低 S 籽粒样品而提出来的。用 4% 戊二醛的 pH 6.8 磷酸缓冲液处理小麦籽粒后所形成的颜色可以分为 0、1、2 和 3 四级。根据小麦籽粒在这 4 级中所占的百分率来确定戊二醛的得分。得分范围为 0 ~ 300，得分 > 100 的即为缺 S 样品。戊二醛的得分与籽粒中的 N/S 比有很高的相关性 ($r = 0.88^{***}$)，而与籽粒中的含 S 量成反相关性 ($r = -0.60^{***}$)。

3 土壤分析诊断

通常，评价田间条件下的土壤 S 状况的化学分析并不是非常有效的，但也有持有与此相反的观点。赵言文等^[16]对桑园土壤—桑叶—蚕茧系统的 S 素相关研究显示，桑园土壤有效 S 含量与桑叶全 S 含量呈极显著二次曲线相关，而与蛹全 S 含量呈极显著直线正相关。

探讨土壤 S 分析结果与植物产量之间相关性差的原因有助于指明今后的研究方向。Sanunders 等^[15]认为，在下列情况下，土壤 S 的测定是很重要的：①使用无 S 肥料（磷矿粉、重过磷酸钙和磷铵）的地方；②不施用普钙的地方；③ SO_4^{2-} 淋溶指数超过 5 或 6 的地方，而且 S 肥又施用于易于淋失的季节，④ P 肥需要量小于 S 肥需要量的地方。

3.1 土壤有效 S 的提取剂

应用广泛的 SO_4^{2-} 的提取液有：① $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 或 KH_2PO_4 ；②中性盐溶液；③热水；④ pH 4.8 的 NaOAc；⑤ NaHCO_3 。前两种提取剂所提取的是可溶性 S 和某些吸附态 SO_4^{2-} ，后 3 种提取剂还包括一些有机 S。用磷酸盐提取的 SO_4^{2-} 与作物产量或作物的 S 吸收之间的相关性最好。

3.2 土壤有效 S 极其影响因素

土壤有效 S 的测定主要考虑表层土壤可溶性硫酸盐和部分吸附态硫酸盐。土壤的类型、有机质的含量、酸碱度、水分状况以及种植制度、季节变换和环境条件都会对土壤中有有效 S 的数值产生影响。

3.3 土壤 S 在不同土层中的分布

自然土壤中 SO_4^{2-} 的浓度在不同土层的变异很小，而降雨充沛且质地轻的耕作土壤中， SO_4^{2-} 的浓度在不同土层的变异是很大的。土壤各土层中 S 浓度的变异很大，其变异主要取决于土壤特性和气候条件^[20]。

3.4 SO_4^{2-} 淋溶指数

Saunders 等^[17]认为，确定土壤是否可能缺 S 进行两项测定更为可靠：其一是用 0.01 mol Ca (H_2PO_4)₂ 从 0 ~ 75 cm 土层中提取 S；其二是测定 SO_4^{2-} 淋溶指数。后者可以估计 SO_4^{2-} 从土壤中淋失的程度。 SO_4^{2-} 淋溶指数由 3 个参数决定：①表土对 SO_4^{2-} 的吸持能力；②年降雨量和灌溉水量；③水在土壤中的移动。

SO_4^{2-} 淋溶指数（表 2）对于确定土壤是否需要进行化学测定、土壤取样时间和施用何种形态的 S 肥是有帮助的。在新西兰，当普钙的年用量超过 200 kg/hm²，而且 SO_4^{2-} 淋溶指数在 0 ~ 4 时，放牧的草地可能不会缺 S。

表 2 SO_4^{2-} 淋溶指数^[17]
Table 2 Sulfate leaching indexes

年降雨量+灌溉水量 (mm)	土壤水运动 ¹⁾					
	缓慢运动			自由运动		
	低	中	高	低	中	高
P 的吸持能力 ²⁾ (%)						
0 ~ 75	<60	60 ~ 85	>85	<60	60 ~ 85	>85
硫酸盐吸持能力 ²⁾ (%)						
75 ~ 150	<30	30 ~ 85	>55	<30	30 ~ 55	>55
SO_4^{2-} 淋溶指数						
<500	2	1	0	3	2	1
500 ~ 700	3	2	1	4	3	2
750 ~ 1500	4	3	2	5	4	3
>1500	5	4	3	6	5	4

1) 在黏重土、有黏盘的土壤、灰化土中土壤水的运动是缓慢的，表土产生径流的也属于水分运动缓慢的土壤，水分在所有其他土壤的运动都属于自由运动。

2) 在新西兰除了红壤和棕壤，其他土壤的 P 的吸持和硫酸盐吸持是松弛的。

根据田间观察,在新西兰 SO_4^{2-} 淋溶指数可以作出如下解释^[17]: SO_4^{2-} 淋溶指数为 0、1 或 2 时,说明土壤中无 S 的淋失; SO_4^{2-} 淋溶指数为 3 时,说明在冬季 S 的淋失轻微; SO_4^{2-} 淋溶指数为 4 时,说明冬季 S 的淋失严重; SO_4^{2-} 淋溶指数为 5 时,说明整个冬季中有 S 的淋失,而夏季也有 S 的淋失; SO_4^{2-} 淋溶指数为 6 时,说明整个冬季有 S 的淋失,而夏季 S 的淋失严重。

3.5 诊断指标

目前仍然缺乏合理评价土壤有效 S 的统一指标。国外通常认为,用 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 浸提的土壤有效 S 的临界值为 10 mg/kg。一般认为,土壤有效 S 的临界值在 6~12 mg/kg 之间,不同作物和不同的耕作方式对 S 素的需求差别很大,评价土壤中 S 素供求状况必需与具体生产条件相结合。土壤有效 S 可作为评价土壤供 S 能力的一个重要指标。林葆等^[18]的研究认为,用 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ -T 提取测定的旱地和水田土壤有效 S 临界指标分别为 21.1 mg/kg 和 23.8 mg/kg。但我国近年来的研究结果显示,很多作物在土壤有效 S 为 16 mg/kg,甚至 30 mg/kg 时仍有增产效果。浙江省红壤地区水稻和油菜土壤有效 S 缺乏的临界值分别为 16.4 mg/kg 和 22.2 mg/kg^[19]。安徽的研究也证明,土壤 MCP-S 含量 22.0 mg/kg 可以作为油菜、小麦和大豆施 S 的临界值^[20]。

参考文献:

- [1] 王庆仁, Randall P. 油菜叶片扩展的功能性需硫量及作为缺硫诊断的指标. 植物营养与肥料报, 1997, 3 (4): 334-340
- [2] Jones MB. Effect of sulphur applied and date of harvest on yield, sulfate sulphur concentration, and total sulphur uptake of five annual grassland species. Agron. J., 1963, 55: 251-254
- [3] Spencer K, Jones MB, Freney JR. Diagnostic indices for sulphur status of subterranean clover. Aust. J. Agric. Res., 1977, 28: 401-412
- [4] Freney JR, Spencer K, Jones MB. The diagnosis of sulfur deficiency in wheat, Aust. J. Agric. Res., 1978, 29: 727-738
- [5] Friedrich JW, Schrader LE. Sulfur deprivation and nitrogen metabolism in maize seedlings. Plant Physiol., 1978, 61: 900-903
- [6] Rendig VV, Oputa C, McComb EA. Effects of sulfur deficiency on non-protein nitrogen, soluble sugars, and N/S ratios in young corn (*Zea mays* L.) plants. Plant and Soil, 1976, 44(2): 423-437
- [7] Withers PJA. Influence of sulfur fertilizer on double low winter rapeseed (*Brassica.napus* L.). J. Sci. Food Agric., 1994, 66 (1): 93-101
- [8] Randall PJ, Wrigley CW. Effects of sulfur supply on the yield, composition and quality of grain from cereals, oilseeds, and legumes. Advances in Cereal Science, 1986, 8: 171-206
- [9] Blake-kalff MA, Zhao FJ, Hawkesford MJ, Mcgrath SP. Using plant analysis to predict yield losses caused by sulphur deficiency. Annals of Applied Biology, 2001, 138(1): 123-127
- [10] Blake-Kalff MMA, Hawkesford MJ, Zhao FJ, McGrath SP. Diagnosing sulfur deficiency in field-grown oilseed rape (*Brassica napus* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant and Soil. 2000, 225 (1/2): 95-107
- [11] Sexton P, Paek NC, Shibles RM. Effects of nitrogen source and timing of sulfur deficiency on seed yield and expression of 11S and 7S seed storage proteins of soybean. Field Crops Res., 1998, 9: 1-8
- [12] Sunarpi, Anderson JW. Allocation of S in generative growth of soybean. Plant Physiol., 1997, 114: 687-693
- [13] Kiyoko Hitsuda, Gedi JS, Dirceu Klepker. Diagnosis of sulfur deficiency in soybean using seeds. Soil Sci. Soc. Am. J., 2004, 68: 1445-1451
- [14] Randall PJ, Spencer K, Freney JR. 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. Aust. J. Agric. Res., 1981, 32(2): 203-212
- [15] Moss R, Randall PJ, Wrigley CW. A simple test to detect sulphur deficiency in wheat. Aust. J. Agric. Res., 1982, 33 (3) : 443-452
- [16] 赵言文, 曹志洪, 胡正义, 刘勤, 张新, 徐成凯. 桑园土壤—桑叶—蚕茧系统硫素相关规律研究. 土壤学报, 2002, 39(1): 105-112
- [17] Sanunders WMH, Cooper DM, Sinclair. Soils and fertilizers-sulfur use and interpretation of soil tests for pasture. Aglink FPP 649, Ministry of Agriculture and Fisheries.Wellington, New Zealand, 1981: 1-2
- [18] 林葆, 李书田, 周卫. 土壤有效硫评价方法和临界值的研究. 植物营养与肥料学报, 2000, 6 (4): 436-445
- [19] 孟赐福, 吕晓男, 曹志洪, 胡正义. 水稻和油菜施硫的增产效应及土壤有效硫临界指标的研究. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 218-220
- [20] 张继榛, 马友华, 竺伟民, 郑路, 章力干, 司友斌, 王杰. 安徽省主要作物最佳施硫效应研究. 安徽农业大学学报, 2000, 27 (增刊): 62-68

Progress of the Study on Plant Sulfur Nutrition Diagnosis Techniques

MENG Ci-fu, JIANG Pei-kun, CAO Zhi-hong, XU Qiu-fang, ZHOU Guo-mo
(School of Life Science, Zhejiang Forest College, Linan, Zhejiang 311300, China)

Abstract: Sulfur deficiency has become increasingly widespread in the world. Plant and soil S analysis contributes to achievement of high production goals. A review is presented hereby on recent progress in the study on S diagnosis technologies, such as evaluation by visible symptoms, plant tissue analysis and soil analysis. The technology of plant tissue analysis includes determination of total S, SO_4^{2-} -S, N/S ratio, malate/sulphate ratio, S concentration in seeds, and colorimetric method (by soaking wheat grains in glutaraldehyde). Seed S analysis is a simple and reliable method for diagnosis of S nutrition of soybean and tends to be an important method to diagnose S nutrition in plants because it can be conducted before the seeds are sown. When soil analysis is used to diagnose S status of soils, S contents in deep soil layers, sulfate leaching indexes, environmental conditions, and management history of the fields should be taken into account.

Key words: Sulfur nutrition, Diagnosis technology, Visual symptoms, Plant tissue analysis, Soil analysis

研究生教材《土壤资源概论》出版

主 编：赵其国 史学正

副主编：张甘霖 杨劲松 黄 标 孙 波 陈 杰

由中国科学院南京土壤研究所赵其国等编写的研究生教材《土壤资源概论》一书已由科学出版社出版。全书共分为 16 章，近 80 万字。该书首先论述我国土壤资源概况及合理利用途径，国内外土壤分类及其参比的最新进展；其次，介绍土壤空间变异及其研究方法、土壤资源遥感以及土壤信息系统，并总结了我国土壤信息系统 (SISChina) 的建设成果；第三，论述了如何从土壤资源、土壤多样性和土壤地球化学的角度评价土壤资源；第四，讨论了障碍土壤的退化机理和恢复重建理论以及研究新方法；第五，为了适应全球变化的研究需要，本书最后一章介绍了土壤碳库与全球变化研究的最新进展。

此书编写的指导思想是：不仅要让学生掌握土壤资源领域相关的理论和方法，而且重点强调把该领域的最新研究成果及时地传授给学生，使学生掌握最新的理论和方法。此书各章主要作者都是在土壤资源领域耕耘了 20 多年、奋斗在科研第一线的中青年科学家，他们是或曾经是中国科学院南京土壤研究所的科研骨干，本书多数内容是作者们研究成果的第一手资料，在赵其国院士的指导下，通过系统集成后首次出版。

该书可作为农业科学、地理学、环境科学和土地资源管理等专业研究生基础课教材，也可供从事农业、林业、环保、水利、国土和气象等生产部门以及土壤、地理、生物、生态、资源与环境工作的科技人员和高等院校师生参考。

如需要引用本书的内容或进行学术讨论，请与中国科学院南京土壤研究所史学正先生联系：

E-mail: xzshi@issas.ac.cn; 电话：025-86881273。

欲购书者请直接与科学出版社联系，联系方式如下：

赵峰

魏邵云

联系地址：北京市东黄城根北街 16 号 (100717) 联系地址：北京市东黄城根北街 16 号 (100717)

单位：科学出版社学环分社

单位：科学出版社学土书店

电话：010-64033563; E-mail: zfheng18@163.com 电话：010-64018863; 13520206144

