

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201811023

引文格式: 秦梅, 韩燕, 乔枫, 等. 硫肥对春油菜幼苗生理指标和土壤酶活性的影响 [J]. 广西植物, 2019, 39(6): 761–767.
QIN M, HAN Y, QIAO F, et al. Effects of sulfur fertilizer on physiological indexes and soil enzyme activity of spring rape seedlings [J].
Guihaia, 2019, 39(6): 761–767.

硫肥对春油菜幼苗生理指标和土壤酶活性的影响

秦梅¹, 韩燕², 乔枫³, 孙小凤², 严焕焕¹, 耿贵工^{2*}

(1. 青海大学农牧学院, 西宁 810016; 2. 青海大学农林科学院, 西宁 810016; 3. 青海师范大学, 西宁 810016)

摘要: 该研究以春油菜幼苗为材料, 采用土壤盆栽试验, 设 7 个不同施硫 (0、35、70、105、140、175、210 mg · kg⁻¹) 处理, 通过测定春油菜幼苗的株高、植株鲜重、叶绿素含量、MDA 含量、SOD、POD、CAT 活性、土壤全氮含量、pH、蔗糖酶、过氧化氢酶和脲酶活性指标, 分析不同施硫量对春油菜幼苗生理生化指标和土壤相关酶活性的影响。结果表明: 在春油菜苗期施用硫肥对幼苗的农艺性状、生理生化指标和土壤酶活性均产生了一定影响。施硫量在 35~105 mg · kg⁻¹ 范围时, 对植株鲜重有明显的促进作用; 施硫量在 70~105 mg · kg⁻¹ 范围时, 类胡萝卜素含量达到最高; 施硫量在 70~105 mg · kg⁻¹ 范围时, 叶片中 POD 和 CAT 的活性明显升高, 而 MDA 含量明显下降; 经相关分析, MDA 含量与 POD 活性呈极显著负相关 ($r = -0.92, P < 0.01$), 与 CAT 活性呈显著负相关 ($r = -0.72, P < 0.05$), 说明叶片 MDA 含量受 POD 和 CAT 活性变化的影响; 施硫量高于 105 mg · kg⁻¹ 时, 土壤脲酶和蔗糖酶活性受到抑制; 施硫量高于 140 mg · kg⁻¹ 时, 土壤过氧化氢酶活性受到抑制; 随着施硫量的增加, 土壤 pH 值和叶片 SOD 活性逐渐下降; 经相关性分析, 土壤脲酶活性和全氮含量间呈极显著正相关 ($r = 1, P < 0.01$), 表明土壤全氮含量受土壤脲酶活性变化的影响。由此可知, 在低硫 (35~105 mg · kg⁻¹) 条件下对春油菜幼苗生理生化指标及土壤酶活性具有一定的促进作用, 而在高硫 (>105 mg · kg⁻¹) 条件下则产生抑制。

关键词: 硫, 春油菜, 生理生化, 土壤酶活性

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2019)06-0761-07

Effects of sulfur fertilizer on physiological indexes and soil enzyme activity of spring rape seedlings

QIN Mei¹, HAN Yan², QIAO Feng³, SUN Xiaofeng²,
YAN Huanhuan¹, GENG Guigong^{2*}

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China; 3. Qinghai Normal University, Xining 810016, China)

Abstract: Sulfur element is a medium trace element needed for plant growth. In order to clarify the physiological and biochemical indexes and soil enzyme activity of spring rape seedlings under different sulfur applications, based on the

收稿日期: 2019-02-04

基金项目: 国家粮油作物产品质量安全风险专项项目 (GJFP2018001); 教育部项目 (Z2016098, Z2017049) [Supported by the Risk Evaluation of Product Quality on Grain and Oil Crop (GJFP2018001); Ministry of Education Program (Z2016098, Z2017049)].

作者简介: 秦梅 (1992-), 女, 四川雅安人, 硕士, 主要从事油菜栽培研究, (E-mail) 1017768477@qq.com。

* 通信作者: 耿贵工 (1978-), 硕士, 副研究员, 主要从事农产品质量安全研究, (E-mail) genggg-298@163.com。

spring rape seedlings, the seven sulfur fertilizer [0, 35, 70, 105, 140, 175, 210 mg · kg⁻¹] were set up by pot experiment, and the plant height, plant fresh weight, the content of chlorophyll and MDA, the activities of SOD, POD and CAT of leaves, the content of soil total nitrogen, pH and the activity of invertase and catalase were measured respectively. The results were as follows: Sulfur application had certain influence on the agronomic characters, physiological and biochemical indexes of spring rape seedlings and soil enzyme activity. In a range of sulfur application (35–105 mg · kg⁻¹) the plant fresh weight was significantly promoted, carotenoid content was the highest when sulfure fertilization was 70–105 mg · kg⁻¹; In a range of sulfur application (75–105 mg · kg⁻¹), the activities of POD and CAT in leaves were significantly increased, but the content of MDA in leaves was significantly decreased; According to correlation analysis, an extremely negative correlation was observed with MDA content and POD activity ($r = -0.92$, $P < 0.01$), and a significant negative correlation was observed with MDA content and CAT activity ($r = -0.72$, $P < 0.05$), indicating that MDA content is affected by the POD and CAT activities; The activities of invertase and urease in soil were inhibited with sulfur application higher than 105 mg · kg⁻¹, the activity of catalase in soil was inhibited with sulfur application higher than 140 mg · kg⁻¹; with the increase of sulfur fertilizer, the activity of SOD in leaves and soil pH showed decreasing trends; according to correlation analysis, an extremely positive correlation was observed between the content of total nitrogen and the activity of urease ($r = 1$, $P < 0.01$), indicating that soil total nitrogen content is affected by the soil urease activity. Therefore, physiological and biochemical indexes of spring rape seedlings and soil enzyme activity were promoted with low sulfur application (35–105 mg · kg⁻¹), while these indexes were inhibited with high sulfur application (>105 mg · kg⁻¹). This study can provide some theory reference for sulfur fertilization of spring rape.

Key words: sulfur, spring rape, physiology and biochemistry, soil enzyme activity

春油菜是我国北方油菜的主要高产区,主要分布在青海、甘肃、新疆等气温较低、无霜期较短的地区,总面积约占全国油菜总面积的10%(杜德志等,2018)。青海是我国春油菜种植的重要产区,其种植面积约占全省的30%(宋佳等,2018)。春油菜是需硫量较大的作物之一,其植株体内含硫和吸硫量甚至高于含磷和吸磷量,在土壤缺硫条件下,大量施入氮磷钾肥将会影响作物对营养元素的吸收和利用,从而降低作物的产量和品质(Ahmad et al., 2007; Jamal et al., 2010; Grant et al., 2012)。硫元素是植物生长所需的中微量元素。合理增施硫肥可促进叶片光合作用,协调氮代谢的能力,进而促进物质的合成与积累(刘晶等,2017; Katarzyna et al., 2018)。

杂交油菜对硫肥的需求量较大,充足的硫肥是优化籽粒产量的前提条件之一(聂俊和刘忠培,2018)。在青海春油菜生产中含硫肥料的使用率较低,硫投入量普遍不足。对青海春油菜种植地区土壤有效硫含量调查结果表明,30%左右的春油菜在种植土壤中有效硫含量在2.88~11.29 mg · kg⁻¹之间。据文献报道,土壤有效硫含量低于

16.0 mg · kg⁻¹时作物就有缺硫的可能(许自成等,2007)。目前,硫对油菜和土壤的研究主要集中在油菜氮硫吸收(白灯莎·买买提艾力等,2009)、油菜产量(崔岩山和王庆仁,2008)、土壤营养元素(Krzysz et al., 2015),而关于硫对油菜幼苗生理指标这一方面尚未报道。因此,本研究针对青海春油菜种植区,在盆栽试验条件下研究不同施硫量对春油菜幼苗生长、生理特性及土壤酶活性的影响,为春油菜硫肥的施用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料

供试材料为春油菜品种‘青杂7号’。供试肥料为尿素(N46%),磷酸二铵(N18%、P₂O₅46%),硝酸钾(N13%、K₂O₄5%),T90硫肥(S90%)。供试土壤为栗钙土,土壤基本理化性状:pH8.21,全氮1.22 g · kg⁻¹,全磷2.65 g · kg⁻¹,全钾25.01 mg · kg⁻¹,有机质15.44 mg · kg⁻¹,碱解氮66.0 mg · kg⁻¹,速效磷15.0 mg · kg⁻¹,速效钾152.0 mg · kg⁻¹,速效硫9.24 mg · kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验于2018年4—8月在青海大学农林科学院试验地大棚中进行,共设7个处理,每个处理重复4次,共28盆。各处理硫肥施用量:T0为 $0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,T1为 $35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,T2为 $70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,T3为 $105\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,T4为 $140\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,T5为 $175\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,T6为 $210\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。施硫量为施入“纯硫”量。将硫肥打碎过筛后与处理好的土壤混合均匀装入盆中(盆高25 cm,直径17 cm),每盆土壤净重1 kg。土壤经吸附沉淀2周后播种油菜种子(精选饱满籽粒,采用点播方式),每盆播种50粒,出苗1周后定苗10株,保持土壤含水量60%~70%,期间不再施入肥料。播种30 d后采集土壤、植株地上和地下部分样品,待测。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶绿素色素含量和抗氧化酶活性 SOD含量测定采用氮蓝四唑(NBT)光还原法(苍晶和赵会杰,2014);POD活性测定采用愈创木酚法(苍晶和赵会杰,2014);CAT活性测定采用紫外分光光度法(苍晶和赵会杰,2014);丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法(苍晶和赵会杰,2014)。

1.3.2 土壤理化性质和土壤酶 pH值测定采用电

位法(盛海彦,2012);全氮含量采用半微量开氏法进行测定(盛海彦,2012);脲酶活性采用靛酚比色法(盛海彦,2012);过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法(盛海彦,2012);碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法(盛海彦,2012)。

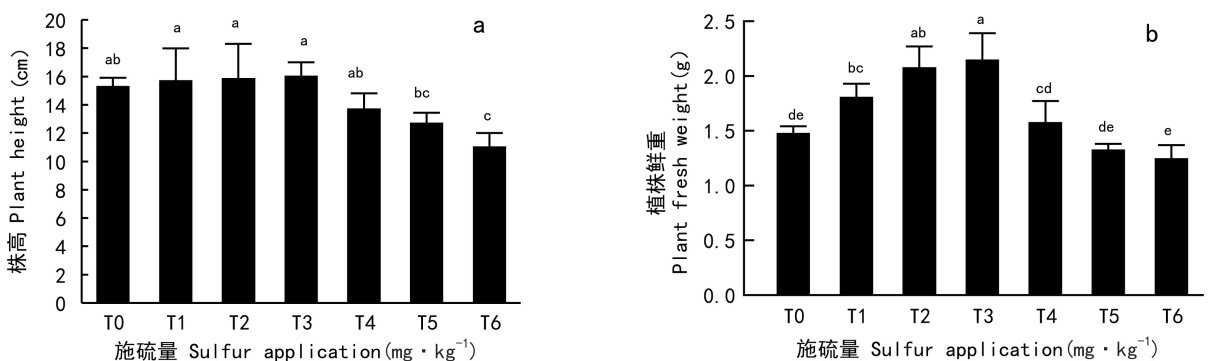
1.4 数据处理

用Microsoft Excel 2007软件作图,用DPS 5.0软件分析数据,用LSD法进行显著性水平检验。

2 结果与分析

2.1 施硫量对春油菜幼苗株高和植株鲜重的影响

硫肥施用量对春油菜幼苗株高和植株鲜重的影响较大。随施硫量的增加,株高和鲜重均呈先上升后下降趋势(图1:a,b),T6处理的株高较T0处理显著降低了24.7%($P<0.05$),T1、T2、T3处理的株高较T0略有增加;T4、T5处理的株高较T0均有所降低;T1、T2、T3处理的植株鲜重与T0处理相比均显著增加,增幅分别为22.4%、40.1%和45.6%($P<0.05$),以T3处理为最高;T4、T5、T6处理的鲜重较T0处理均有下降。由此可知,中低施硫水平对春油菜幼苗的农艺性状影响不明显,而施硫量高于T6处理后,幼苗的生长严重受阻。



注:不同小写字母表示各处理在0.05水平下差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate that the treatments are significantly different at the level of 0.05. The same below.

图1 不同施硫量对幼苗株高和植株鲜重的影响

Fig. 1 Effects of different sulfur applications on plant height and plant fresh weight of spring rape seedling

2.2 施硫对春油菜幼苗光合色素的影响

硫肥的施用对幼苗叶片类胡萝卜素含量有显著性的影响,而对叶绿素ab、叶绿素a、叶绿素b含

量影响不大。T2、T3、T4处理的类胡萝卜素含量较T0处理均显著增加,增幅分别为52.2%、52.2%和44.2%($P<0.05$),T1、T5、T6处理的类胡萝卜素

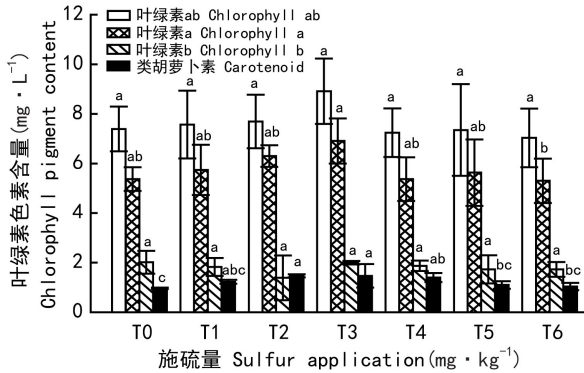


图2 不同施硫量对叶绿素色素含量的影响

Fig. 2 Effects of different sulfur applications on chlorophyll content

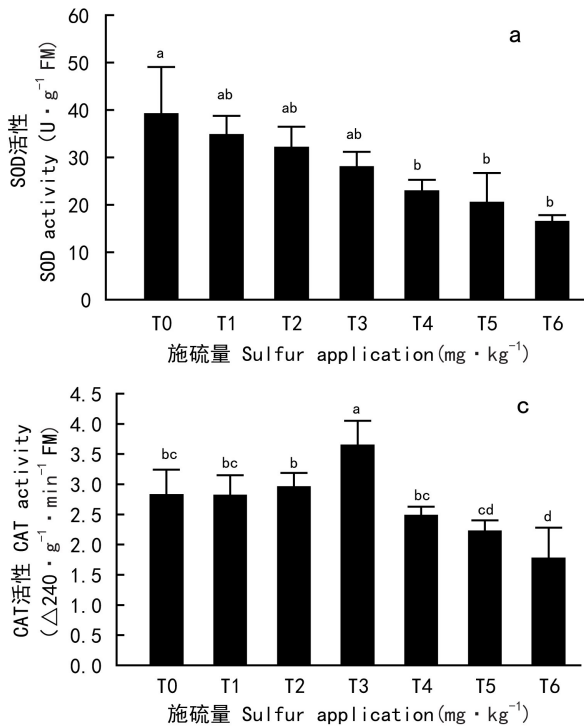


图3 不同施硫量对叶片 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effects of different sulfur applications on SOD, POD, CAT activities and MDA content of leaves

表1 不同施硫量对土壤 pH 的影响

Table 1 Effects of different sulfur applications on soil pH

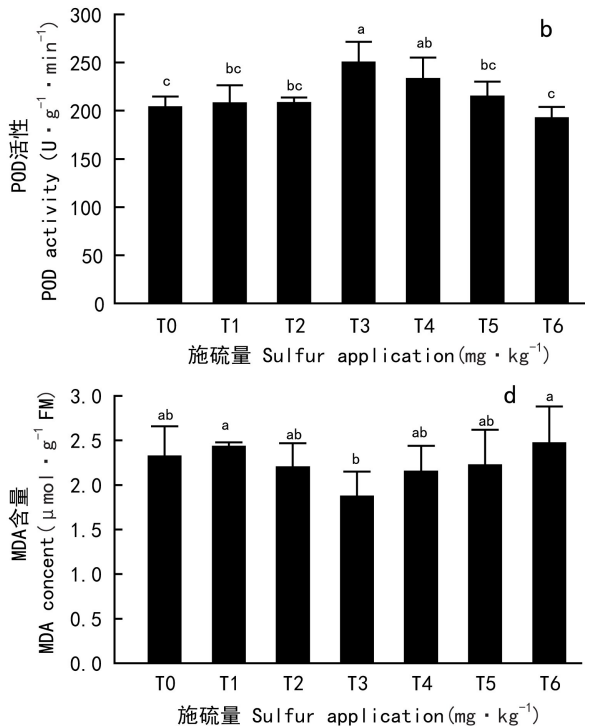
	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
pH	8.37a	8.16b	8.01cd	8.06c	8.03cd	8.07c	7.97d

理降低 37.2% ($P < 0.05$)。结果表明,施硫可有效提高春油菜幼苗叶片 POD 和 CAT 活性,引起 SOD 酶活性丧失,高硫条件抑制了 CAT 活性。由相关

含量较 T0 处理略有增加(图 2)。由此可知,硫元素参与类胡萝卜素的合成,施硫可有效提高类胡萝卜素的含量,但施硫量高于 $140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时抑制其合成。

2.3 施硫量对春油菜幼苗抗氧化酶活性及 MDA 含量的影响

随施硫量的增加,叶片中 SOD 活性逐渐下降,POD 和 CAT 活性呈先升高后降低趋势,而 MDA 含量呈先降低后升高趋势(图 3:a, b, c, d)。T4、T5 和 T6 处理的 SOD 活性与 T0 处理相比均显著降低 ($P < 0.05$); T3、T4 处理的 POD 活性较 T0 处理均显著升高 ($P < 0.05$); T3 处理 CAT 活性显著高于其他处理 ($P < 0.05$), T6 处理 CAT 活性较 T0 处



性分析可知,MDA 含量与 POD 活性呈极显著负相关 ($r = -0.92, P < 0.01$),与 CAT 活性呈显著负相关 ($r = -0.72, P < 0.05$)。

2.4 施硫量对土壤 pH 的影响

土壤 pH 随着施硫量的增加呈现逐渐降低的趋势(表 1)。表 1 结果显示,施硫处理土壤 pH 值均显著低于 T0 处理($P<0.05$),T6 处理土壤 pH 值最低(为 7.97),较 T0 处理降低了 4.78%,表明施硫可降低土壤 pH 值。这可能与硫酸根离子有效地增强了土壤缓冲作用有关(杨杉等,2016)。

2.5 施硫对土壤酶活性及全氮含量的影响

土壤脲酶活性和全氮含量随施硫量的增加均逐渐降低(图 4)。T1、T2 处理的土壤脲酶活性较 T0 处理略有增加,T3、T4、T5、T6 处理较 T0 处理均显著降低($P<0.05$)。T1 处理土壤全氮含量显著高于其它处理($P<0.05$),其它处理间差异不显著。图 4 结果表明,施硫会抑制土壤脲酶活性的提高,而不影响全氮含量,经相关性分析,土壤全氮含量与土壤脲酶活性呈极显著正相性,相关系数 $r=1$ ($P<0.01$),说明根际土壤脲酶活性完全可表征土壤的氮素状况。土壤蔗糖酶活性随施硫量的增加呈缓慢下降趋势(图 5:a)。T1、T2 处理的土壤脲

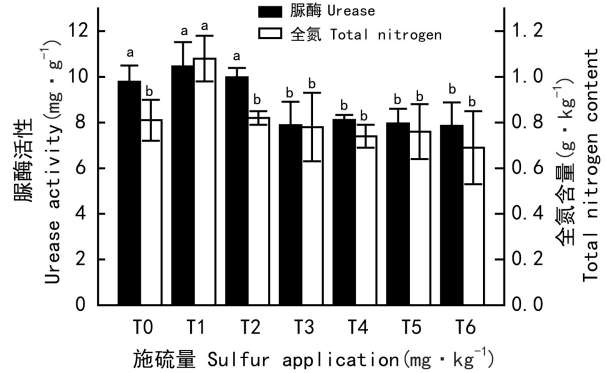


图 4 不同施硫量对土壤脲酶活性和全氮含量的影响
Fig. 4 Effects of different sulfur applications on urease activity and total nitrogen content of soil

酶活性较 T0 处理略有增加,T3、T4、T5、T6 处理较 T0 处理均显著降低($P<0.05$)。土壤过氧化氢酶活性随施硫量的增加呈先上升后下降趋势(图 5:b)。T1、T2、T3 处理土壤过氧化氢酶活性较 T0 处理均显著升高($P<0.05$); T5、T6 处理土壤过氧化氢酶活性较 T0 处理均显著降低($P<0.05$); T4

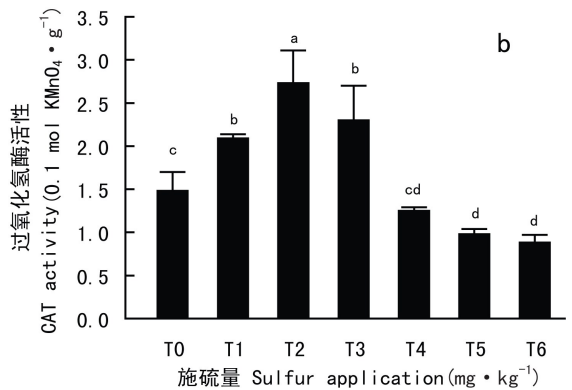
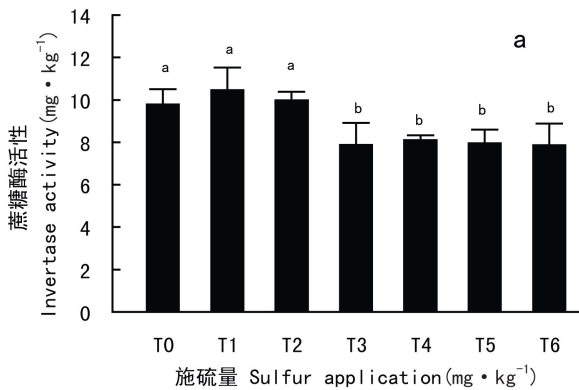


图 5 不同施硫量对土壤蔗糖酶和 CAT 活性的影响

Fig. 5 Effects of different sulfur applications on invertase and CAT activities of soil

处理土壤过氧化氢酶活性较 T0 略有降低。图 5 结果表明,施硫与不施硫对土壤蔗糖酶活性无显著影响,高硫水平会降低其活性;高硫会抑制土壤过氧化氢酶的合成,施硫量在 $35 \sim 105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内可促使其合成。

3 讨论

叶绿素是植株进行光合代谢的基础,而硫恰

是叶绿素合成所必需的元素,并参与叶绿素前体的合成(徐瑶等,2017)。蔡赛男等(2015)指出,施硫会显著增加幼苗叶片中叶绿素 a 和叶绿素 b 含量。在本研究中,施硫对春油菜幼苗叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 ab 的含量无明显影响,但当施硫量为 $70 \sim 105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围时,春油菜幼苗叶片中类胡萝卜素含量明显增加,当施硫量高于 $105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时抑制作用明显。这表明在春油菜苗期,叶片类胡萝卜素合成与施硫量关系密切,

硫肥可能作为介质参与光合作用暗反应生成类胡萝卜素,进而促进春油菜幼苗光合作用,提高生物量。

在正常的代谢过程(如呼吸与光合作用)中,植物体内的氧会被活化形成活性氧(ROS),但当受到生物或非生物胁迫时,将会打破体内 ROS 生成与清除之间的动态平衡,导致 ROS 大量积累,对植物造成伤害,而 SOD、POD 和 CAT 则是清除这些 ROS 的重要酶类。Ali & Teymur(2015)指出,土壤中施入适量硫肥对植株某些抗氧化酶具有激活作用。本研究发现,施硫量为 $105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,对提高春油菜幼苗叶片中 POD 和 CAT 活性最为明显。邹莉娜等(2018)指出,施硫会显著降低水稻幼苗中 MDA 含量。而张雅杰等(2015)认为施硫能使烤烟叶片 MDA 含量升高。本研究结果表明,施硫量为 $35 \sim 105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围时,春油菜幼苗叶片 MDA 含量明显降低,但其他处理随施硫量的增加逐步升高。说明,当春油菜幼苗体内 ROS 积累到一定程度后,施硫对 POD 和 CAT 在清除活性氧和防止膜脂过氧化方面起到很大的作用,且 POD 活性与 MDA 含量极显著负相关, CAT 与 MDA 含量显著负相关,因此 POD 较 CAT 对硫的响应更为敏感。同时,MDA 含量的减少与 POD 和 CAT 活性上升密切相关,幼苗内 ROS 稳定状态打破可能是诱导 POD 和 CAT 活性快速上升的主要原因,而硫恰是激活这一反应的重要物质。马友华和丁瑞兴(2000)认为,硫不足会抑制烟叶 SOD 活性的提高,增施硫可显著提高黄褐土上烟叶 SOD 的活性。朱英华等(2008)认为,烤烟叶片的 SOD 活性随硫浓度的升高而升高。本研究发现,增施硫肥会显著抑制 SOD 活性,这并非仅仅因施硫水平不同而发生的变化,很可能与幼苗在适应生长环境的过程中,内部不断进行代谢调整有关。

硫元素需在土壤中氧化成 SO_4^{2-} 后才能被植株吸收和利用(郑诗樟,2012),施硫后表现出不同的效应也受油菜品种、土壤类型、微生物种类和数量等综合因素影响,同时各种酶对环境的适应性也表现不同。硫肥施入碱性土壤后,会经过氧化作用产生酸,降低土壤 pH,增加中性和碱性微生物数量,激发土壤脲酶和蔗糖酶活性,从而提高土

壤养分的转化和循环(郑诗樟和刘志良,2015)。在本研究中,施硫量为 $35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时土壤全氮及过氧化氢酶活性明显升高,施硫量在 $175 \sim 210 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围时土壤过氧化氢酶和蔗糖酶活性明显降低,说明低硫处理时土壤酶活性被激发,加快土壤养分转化,高硫处理则会产生抑制,这可能与施入过多硫肥后,导致土壤中微生物数量和种类发生改变有关(王凡等,2007)。

4 结论

通过测定不同施硫量下春油菜幼苗生理指标及土壤酶活性,得出合理施硫可有效促进春油菜幼苗生长和增加叶片中叶类胡萝卜素的含量,当施硫量在 $35 \sim 105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围时,对植株鲜重有明显的促进作用;当施硫量在 $70 \sim 105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围时,类胡萝卜素含量表现最高,而施硫对叶绿素 a、b 和 ab 的含量影响不大。施硫会抑制春油菜幼苗叶片 SOD 活性,适量施硫可显著提高叶片中 POD 和 CAT 活性,降低 MDA 含量,当施硫量为 $35 \sim 105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对叶片中 POD 和 CAT 活性有明显促进作用,且在施硫量为 $105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时促进作用最明显。施硫可显著降低土壤 pH 值,当施硫量高于 $105 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时土壤全氮含量、脲酶及蔗糖酶活性受到抑制,当施硫量高于 $140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤过氧化氢酶活性受到抑制。因此,在今后的生产实践中可在春油菜种植区域提前施入适量硫肥,可以保证春油菜幼苗前期生长,为后期春油菜高产打下坚实基础。

参考文献:

- AHMAD G, JAN A, ARIF MJ, et al., 2007. Influence of nitrogen and sulfur fertilization on quality of canola (*Brassica napus* L.) under rainfed conditions [J]. *J Zhejiang Univ Sci B*, 8(10):731-737.
- ALI N, TEYMUR K, 2015. Inoculation of rapeseed under different rates of inorganic nitrogen and sulfur fertilizer: Impact on water relations, cell membrane stability, chlorophyll content and yield [J]. *Arch Agron Soil Sci*, 61(8):1137-1149.
- BAI DS, A YXM, XU F, et al., 2009. Effect of sulphuric fertilizers supply on N, S up take and yield of oil rapeseed

- [J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 31(1):86-89. [白灯莎·买买提艾力, 阿依夏木, 徐舫, 等, 2009. 3 种含硫肥料对油菜干物质累积、氮硫吸收及产量的影响 [J]. *中国油料作物学报*, 31(1):86-89.]
- CUI YS, WANG QR, 2008. Effect of different types of sulphur fertilizer on oilseed rape zinc up take [J]. *Chin J Eco-Agric*, 16(1):113-116. [崔岩山, 王庆仁, 2008. 不同种类硫肥对油菜吸锌的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 16(1):113-116.]
- CANG J, ZHAO HJ, 2014. Experimental course in plant physiology [M]. Beijing: Advanced Education Press: 145-153. [苍晶, 赵会杰, 2014. 植物生理学试验教程 [M]. 北京: 高等教育出版社: 145-153.]
- CAI SN, ZHOU JH, ZHANG Y, et al., 2015. Effect of different application rate of sulfur fertilizer on growth and physiological and biochemical indexes of tobacco [J]. *Crop Res*, 29(2):170-172. [蔡赛男, 周冀衡, 张毅, 等, 2015. 不同硫肥施用量对烤烟生长和生理生化指标的影响 [J]. *作物研究*, 29(2):170-172.]
- DU DZ, XIAO L, ZHAO Z, et al., 2018. Advances in genetic breeding of spring rapeseed in China [J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 40(5):633-639. [杜德志, 肖麓, 赵志, 等, 2018. 我国春油菜遗传育种研究进展 [J]. *中国油料作物学报*, 40(5):633-639.]
- GRANT CA, HALHI SS, KARAMANOS RE, 2012. Sulfur management for rapeseed [J]. *Field Crops Res*, 128:119-128.
- JAMAL A, MOON YS, ABDIN MZ, 2010. Sulphur—A general overview and interaction with nitrogen [J]. *Aus J Crop Sci*, 4(7):523-529.
- KRZYŚZT J, KIJEWski Ł, GROTH D, et al., 2015. The effect of sulfur fertilization on macronutrient concentrations in the post-harvest biomass of rapeseed (*Brassica napus* L. ssp. *oleifera* Metzg) [J]. *J Elem*, 20(3):585-597.
- KATARZYNA P, BOGDAN K, WIKTOR H, et al., 2018. Response of oilseed rape leaves to sulfur and boron foliar application [J]. *ACTA Physiol Plant*, 40:169.
- LIU J, ZHANG HT, YIN Y, et al., 2017. Effects of exogenous hydrogen sulfide on antioxidant metabolism of rice seed germinated under drought stress [J]. *J Southern Agric*, 48(1):31-37. [刘晶, 张鹤婷, 殷悦, 等, 2017. 外源硫化氢对干旱胁迫下萌发水稻种子抗氧化代谢的影响 [J]. *南方农业学报*, 48(1):31-37.]
- MA YH, DING RX, 2000. Effects of selenium-sulfur interaction on sulfur absorption and accumulation of tobacco [J]. *J Chin Soil Sci*, 31(5):232-235. [马友华, 丁瑞兴, 2000. 硒和硫相互作用对烟草硫吸收与积累的影响 [J]. *土壤通报*, 31(5):232-235.]
- NIE J, LIU ZP, 2018. Application effect of secondary and microelement sulfate fertilizers in hybrid rape [J]. *Agric Technol*, (4). [聂俊, 刘忠培, 2018. 中微量元素硫肥在杂交油菜生产上的应用效果 [J]. *农业与技术*, (4).]
- SONG J, XU Q, TIAN H, et al., 2018. Current situation and problem of conventional nutrient management of spring rapeseed in Qinghai Province [J]. *Soils*, 50(5):888-893. [宋佳, 徐倩, 田汇, 等, 2018. 青海春油菜养分管理现状调查与分析 [J]. *土壤*, 50(5):888-893.]
- SHENG HY, 2012. Soil science experimental practice course [M]. Xining: Qinghai People's Publishing House: 39-75. [盛海彦, 2012. 土壤学实验实习教程 [M]. 西宁: 青海人民出版社: 39-75.]
- WANG F, ZHU YJ, LU L, 2007. Sulphur in soil and its transformations [J]. *Chin Agric Bull*, 23(5):249-253. [王凡, 朱云集, 路玲, 2007. 土壤中的硫素及其转化研究综述 [J]. *中国农学通报*, 23(5):249-253.]
- XU ZC, WANG L, XIAO HQ, et al., 2007. Distribution characters of sulfur in flue-cured tobacco leaf and available sulfur in soil in Hunan tobacco growing areas [J]. *Chin J Appl Ecol*, 18(11):119-123. [许自成, 王林, 肖汉乾, 等, 2007. 湖南烟区烤烟硫含量与土壤有效硫含量的分布特点 [J]. *应用生态学报*, 18(11):119-123.]
- XU Y, HE LL, HUANG SJ, et al., 2017. Effects of sulfur-application mode and time on nutritional quality and photosynthetic characteristics of non-heading Chinese cabbage [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 45(23):115-120. [徐瑶, 何玲莉, 黄思杰, 等, 2017. 施硫方式及时期对不结球白菜营养品质与光合特性的影响 [J]. *江苏农业科学*, 45(23):115-120.]
- YANG S, WU SJ, ZHOU WZ, et al., 2016. A study on acidic buffering ability of soils and its affecting factors in three gorges region [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 25(1):163-170. [杨杉, 吴胜军, 周文佐, 等, 2016. 三峡库区典型土壤酸碱缓冲性能及其影响因素研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 25(1):163-170.]
- ZOU LN, DAI YX, QIU WD, et al., 2018. Effect of sulfur on the bioavailability of arsenic in soil and its accumulation in rice plant [J]. *J Agro-Environ Sci*, 37(7):1435-1447. [邹丽娜, 戴玉霞, 邱伟迪, 等, 2018. 硫素对土壤砷生物有效性及水稻吸收的影响研究 [J]. *农业环境科学学报*, 37(7):1435-1447.]
- ZHANG YJ, ZHU JF, HUANG HT, et al., 2015. Effects of interactions between irrigation and sulphur on physiological and biochemical indices and chemical components in flue-cured tobacco [J]. *Water Saving Irrigation*, (7):9-13. [张雅杰, 朱金峰, 黄海荣, 等, 2015. 水硫互作对烤烟叶片生理生化指标和化学成分的影响 [J]. *节水灌溉*, (7):9-13.]
- ZHU YH, TU NM, XIAO HQ, et al., 2008. Effect of sulfur on the growth and physiological and biochemical indices of flue-cured tobacco [J]. *Acta Tab Sin*, 14(4):28-32. [朱英华, 屠乃美, 肖汉乾, 等, 2008. 硫对烤烟生长发育及生理生化指标的影响 [J]. *中国烟草学报*, 14(4):28-32.]
- ZHENG SZ, LIU ZL, 2015. Advances on the availability of sulphur fertilizers for soil quality and biology [J]. *J Shandong Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 46(5):688-693. [郑诗樟, 刘志良, 2015. 硫肥对土壤质量和生物有效性的研究进展 [J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 46(5):688-693.]
- ZHENG SZ, 2012. Effects of sulphur fertilizer on soil properties, heavy metal forms and crop growth [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University: 7-9. [郑诗樟, 2012. 硫肥对土壤性质、重金属形态和作物生长的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学: 7-9.]