

## 硫肥对土壤质量和生物有效性的研究进展

郑诗樟<sup>1</sup>,刘志良<sup>2</sup>

1. 江西农业大学国土资源与环境学院, 江西 南昌 330045

2. 江西农业工程职业学院, 江西 樟树 331200

**摘要:** 本文综述了硫肥对土壤质量及生物有效性的影响, 阐明了硫肥对土壤物理性状、化学性状、微生物学性状的影响及土壤环境效应以及硫肥的生物有效性及互作效应。并阐述了当前土壤硫素研究应用的一些新方法和技术。最后展望了土壤硫的转化及相关过程的研究前景。

**关键词:** 硫肥; 土壤质量; 土壤环境效应; 有效性; 互作效应

**中图分类号:** S152

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2015)05-0688-06

## Advances on the Availability of Sulphur Fertilizers for Soil Quality and Biology

ZHENG Shi-zhang<sup>1</sup>, LIU Zhi-liang<sup>2</sup>

1. College of Land Resources and Environment/Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2. Jiangxi Vocational College of Agricultural Engineering, Zhangshu 331200, China

**Abstract:** The research advances on the availability of different sulphur fertilizers for soil quality and biology was summarized in this paper including soil physical properties, chemical properties, microbiological properties, soil environmental effects, sulphur forms and its bioavailability, the interaction between sulphur and other nutritional elements in soils and several new methods and techniques of present researching on the transformation of sulphur in soils. Finally, the research perspective was put forward.

**Keywords:** Sulphur fertilizers; Soil quality; soil environmental effects; availability; interaction

自然界存在着较多的硫化合物, 包括含硫氨基酸及相关化合物、磺酸、硫氧化酸、硫酸酯盐、单质硫和态硫等六大类, 这些物质在各种自然和人为因素的影响下, 进入到地质大循环和生物小循环过程中, 发生一系列复杂的物理、化学和生物学变化。这些变化和过程给农业生产带来了不同的影响, 大气沉降的硫对缺硫地区是有益的, 但对于酸性较强的土壤或是需硫量较少的作物来说则不然。硫素不足时, 需硫较多的作物产量和品质会降低; 硫素过量时, 也会造成作物减产和品质下降等, 同时硫素也是水体、土壤、大气环境的重要污染物, 对人和动物也会有害。硫素在营养作用方面的意义不如氮和磷, 但它与其它元素间的交互作用及其效应方面要超过它的营养作用<sup>[1]</sup>。所以科研工作者在硫素营养和硫素互作效应等方面进行了大量研究, 也取得了较多的成果。

### 1 硫肥对土壤质量的影响

硫是作物必需的营养元素, 继氮、磷、钾后居第四的重要营养元素<sup>[2]</sup>。在植物内含量占干物质的0.1%~0.5%, 平均为0.25%。

我国缺硫地区主要分布在长江以南, 该区高温多雨, 土壤硫易分解淋失, 而且该地区的土壤有机质含量较低, 土壤贫瘠<sup>[3]</sup>。但在北方和西南部也有缺硫的报道<sup>[4-6]</sup>。近年来由于高产粮食、蔬菜和经济作物的推广种植以及复种指数的提高, 高浓度低硫量的化肥的施用, 硫肥施用不被重视、环保措施的改善等因素<sup>[5,7-8]</sup>, 使收获物从土壤中携带出的硫素大幅度增加, 而投入不足, 导致了植物吸收养分的不平衡, 使作物出现缺硫或亚缺硫症状。

硫肥在土壤中反应机理包括: 土壤有机硫的矿化; 土壤对硫的吸附; 土壤氧化还原反应和土壤酸化; 土壤微生物固定作用等。硫肥施入土壤后, 会进行一系列的物理、化学、生物及交互作用等过程, 对土壤质量产生一定影响。直接的结果是土壤酸化, 也可以间接通过不同植物对硫的吸收和根系活力的影响, 使土壤性状发生变化。

#### 1.1 硫肥对土壤物理性状的影响

收稿日期: 2014-07-11

修回日期: 2014-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(31260143); 江西农业大学博士启动经费项目(2012)

作者简介: 郑诗樟(1969-),男,博士,副教授主要从事土壤肥力、土壤生态、土壤化学与环境等教学和研究工作。E-mail:zhshz123@126.com

数字优先出版: 2015-10-05 <http://www.cnki.net>

施用硫肥后,硫的氧化作用可以产生酸,导致土壤中矿物溶解,风化和脱硅富铝化作用增强,土壤颗粒变细,盐基离子淋失而使结构遭到破坏。或者土壤结构体不能形成,土壤板结,容重增大,孔隙度增加,持水能力增强,温度趋于稳定,但通气透水能力变差。故农田土壤一般不推荐施用硫肥,或者要结合石灰施用。

硫肥可以作为碱性土壤的改良剂。硫酸钙改良土壤的机理在于  $\text{Ca}^{2+}$  离子可以代换  $\text{Na}^+$  离子,形成硫酸钠容易淋洗或排出土体。 $\text{Ca}^{2+}$  离子可以促使大的团聚体形成,增加土壤的通透性,改良碱化土壤不良的物理性状。

## 1.2 硫肥对土壤化学性状的影响

硫肥经氧化作用产生硫酸,导致酸溶物质增加,又由于  $\text{H}^+$  离子与盐基离子的代换作用,使  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子淋失量增加,土壤颗粒有机物降低。由于土壤酸化增加了活性铝的含量,从而增加磷的活性吸附点位,使有效磷含量降低<sup>[9]</sup>,  $\text{Al}^{3+}$  离子还影响植物对  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的吸收、传输和利用。酸性土壤上,可溶性铝是作物生长的主要限制因子<sup>[10-11]</sup>。矿物态钾可以间接通过根系分泌物和植物吸收促使其释放<sup>[12]</sup>。由于阳离子容易淋失,电导率、盐基饱和度和碱化度则降低。由于酸性增强,土壤中的铁、锰、铜、锌、钴等元素活性增强,淋失量增加;硼、钼元素淋失量增加,同时有效性随酸性增强而下降<sup>[13]</sup>。有研究表明水稻土长期施用含硫化肥可显著降低水稻对 Fe、Mo、B、Mg、Cl 的吸收<sup>[14]</sup>。

硫磺氧化形成的酸可以改良碱性土壤。而烟气石膏是一种湿式烟气脱硫副产石膏(中性),其硫酸钙含量高于普通石膏。对改良酸性土壤也有较好的效果,可以提高土壤 pH,增加  $\text{Ca}^{2+}$  和一些中微量元素等<sup>[15]</sup>。

## 1.3 硫肥对土壤微生物学性状的影响

1.3.1 微生物量 土壤微生物的种类有细菌、真菌、放线菌、藻类、原生动物等。其数量也很多,1g 土壤中就有几亿到几百亿个微生物个体,其中细菌是土壤微生物中数量最多的一个类群,决定了微生物总量的变化。各种微生物都有其生长的最适 pH 值,过低或过高 pH 下,微生物生长受抑制或导致死亡。根据微生物生长最适 pH 值,可将微生物分为:嗜碱微生物(硝化细菌、尿素分解菌和多数放线菌)、耐碱微生物(许多链霉菌)、中性微生物(绝大多数细菌、一部分真菌)、嗜酸微生物(硫杆菌)和耐酸微生物(乳酸杆菌、醋酸杆菌)。化能无机异养型硫杆菌适于酸性环境,异养微生物适于中性和碱性环境,一般土壤中异养型微生物要大于自养型微生物。

蛋白质、尿素等分解可产生碱性物质,使土壤 pH 值上升;糖类和脂类分解可产生酸性物质,使土壤 pH 下降。土壤中施入含硫肥料后,土壤 pH 值降低。这样,必然会影响到某些适于中性和碱性环境的微生物活性。有研究表明土壤 pH 的变化会影响微生物量和活性<sup>[16-18]</sup>。对于硫杆菌来说,最适宜生长的土壤 pH 为 1.0~4.0,所以随着 pH 值的下降,会促进硫杆菌的生长繁殖。硫酸盐还原细菌不能在 pH<5 的培养基中生长,却可以在 pH<3.5 的酸性矿水中还原  $\text{SO}_4^{2-}$ <sup>[1]</sup>。施用硫磺有时也可以增加某些自养和异养硫氧化微生物的数量<sup>[19-20]</sup>。

1.3.2 酶 酶对土壤有机硫的活化具有重要意义。施用硫肥使土壤酸化,会影响某些酶的活性<sup>[21]</sup>,从而影响土壤养分特别是有机态养分的转化和循环。低酸度对脲酶、中性磷酸酶有一定的激活作用,酸度过高则会抑制脲酶和蛋白酶的活性<sup>[22]</sup>。在无植物土壤上培养的硫酸酯酶,无机  $\text{SO}_4^{2-}$  释放数量与硫酸酯酶活性无关<sup>[1]</sup>。脲酶一般适宜在近中性环境中生长,最适 pH 值为 6.5~7.0<sup>[23,24]</sup>。蔗糖酶活性在 pH5.0 时活性最强。王涵等<sup>[25]</sup>在酸性土壤上加酸或碱对酶活性影响的研究表明,脲酶、蛋白酶、磷酸酶、脱氢酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶活性大致呈现酸化抑制碱化激活的规律。施用硫肥,改变了土壤的理化性状,可以间接影响酶活性,尤其是碱性磷酸酶和硫酸酯酶活性<sup>[26]</sup>。

## 1.4 硫肥的土壤环境效应

硫与其它元素间的交互作用还表现在硫与一些有毒元素的效应方面。硫肥可以促进或者抑制植物对某些有毒元素的吸收。有研究认为硫可以促进油菜对重金属 Pb、Zn 的吸收,而三叶草则不明显

[27-30]。也有研究认为含硫钝化剂可降低芥菜对重金属的 Pb、Cd 的吸收<sup>[31]</sup>。镉硫交互处理对水稻吸收累积 Cd 及其蛋白巯基含量影响的研究表明,硫能有效地增加 Cd 在水稻叶片中的累积<sup>[32]</sup>。过量施用 S 肥,可以增加植物根系中 Cu、Zn、Cd 的含量,而降低茎叶中的含量<sup>[33]</sup>。施 S 可以降低水稻对 Cd 和 As 的吸收<sup>[34-37]</sup>,增加鹰嘴豆对 Cu 的吸收<sup>[38]</sup>,增加玉米对 Cu、Zn 的吸收<sup>[39]</sup>。综上所述,硫肥对重金属吸收的影响不仅取决于作物类型,更要取决于土壤性状、养分状况和环境因素等。

土壤硫的还原也是一个微生物参与的过程。土壤中硫酸盐的还原有两种机制:一是  $\text{SO}_4^{2-}$  通过同化还原成有机化合物中的硫基;二是  $\text{SO}_4^{2-}$  通过同化还原由细胞分泌出  $\text{H}_2\text{S}$ 。还有些硫酸盐还原细菌能同化中间价态的 S 和  $\text{S}^0$  还原成  $\text{H}_2\text{S}$ <sup>[1]</sup>。土壤硫的还原可分成两种途径进行:一是硫的同化还原,就是将硫酸盐中的  $\text{S}^{6+}$  同化为还原态的硫,并形成含硫代谢物(如半胱氨酸和胱氨酸等),构成生物细胞的组分。大多数微生物和植物均可参与这一过程。二是硫的异化还原。在淹水条件下,有机底物被氧化时,氧化还原电位 Eh 下降,在 Eh 的变化范围内会发生一系列的生物化学反应<sup>[40]</sup>。异化还原的硫酸盐还原菌可分两个生理种:一类是不能完全氧化有机底物的细菌,其最终产物为乙酸;另一类是能完全氧化有机底物的细菌,其最终产物为  $\text{CO}_2$ ,而  $\text{SO}_4^{2-}$  被还原成  $\text{H}_2\text{S}$ ,即  $2\text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+ \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$ <sup>[41]</sup>。生成的  $\text{H}_2\text{S}$  或扩散出土体,或遇到金属离子生成沉淀,或进一步与有机质反应生成碳键硫<sup>[42]</sup>。当然,土壤中的  $\text{SO}_4^{2-}$  还原过程要受到厌气、 $\text{SO}_4^{2-}$  浓度和有机碳的有效性等条件的限制<sup>[1]</sup>。

## 2 硫肥的生物有效性及互作效应

通常,作物吸硫量大约是吸氮量的 9~15%,与吸 P 量接近<sup>[1]</sup>。不同作物对硫的需求量不同,一般需硫量较多的作物有结球甘蓝、花椰菜、四季萝卜等;需硫中等的作物有豆科植物、百合科和十字花科作物等;需硫较少的作物有禾本科、甘蔗、棉花和烟草等。施用硫肥可以促进作物产量和品质的提高,但对不同作物的效应不同。近年来,国内外对硫肥的效应也进行了较多的研究<sup>[43-45]</sup>。

硫主要是以  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 形态和以质流的方式被植物主动吸收。植物叶片可以吸收和同化其他形态和来源的硫,如大气沉降中的  $\text{SO}_2$ 。根系和叶片还能吸收  $\text{S}^{2-}$ 、 $\text{HSO}_3^-$ 、 $\text{SO}_3^{2-}$  和含硫有机化合物<sup>[1]</sup>。植物吸收  $\text{SO}_4^{2-}$  与土壤 pH、温度、土壤溶液中陪伴离子<sup>[46]</sup>、土壤类型和植物种类<sup>[47]</sup>、介质中 S 的浓度、外源氨基酸等有关。pH 4 时吸收  $\text{SO}_4^{2-}$  速度最快,pH 升高吸收速度减慢。而环境温度升高,吸收  $\text{SO}_4^{2-}$  速度加快。土壤溶液中的  $\text{SeO}_4^{2-}$  能抑制  $\text{SO}_4^{2-}$  的吸收。硫素供应充足的条件下,介质中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度若低于细胞内的浓度,则吸收速度减慢。半胱氨酸、还原性谷胱甘肽等有机化合物能抑制植物根系对  $\text{SO}_4^{2-}$  的吸收<sup>[1]</sup>。为提高土壤硫的肥效,必须减少土壤对  $\text{SO}_4^{2-}$  吸附和固定,增加微生物对 S 的转化和植物对 S 的吸收。

硫与其它元素间的交互作用及其效应方面要超过它单独的营养作用<sup>[1]</sup>。硫可以提高氮肥的利用率,增加植物的新陈代谢和羧酸酶辅酶的活性,提高脂类或蛋白质的含量,从而提高作物的产量和品质<sup>[48-54]</sup>。但是,在氮肥施用量过多的情况下,可能会诱导植物缺硫<sup>[55]</sup>。土壤中有效 S 与有效 N 的比值为 7 时,最有利于油菜对硫的吸收和同化<sup>[56]</sup>。

$\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  会产生竞争吸附<sup>[57]</sup>,土壤胶体对  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  的吸附更牢固<sup>[58]</sup>,施用磷肥可以提高硫肥的利用率<sup>[59-60]</sup>。张继榛等<sup>[61]</sup>研究认为低磷时,硫和磷之间是协助作用;高磷时,两者间是拮抗作用<sup>[58]</sup>。这种相互作用取决于土壤肥力、肥料用量和作物种类。 $\text{SO}_4^{2-}$  能促进植物对阳离子的吸收, $\text{Ca}^{2+}$  存在下,促进  $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$  离子的吸收;施 N 量高时, $\text{Ca}^{2+}$  促进  $\text{K}^+$  的吸收;施 N 量低时, $\text{Ca}^{2+}$  促进  $\text{NH}_4^+$  的吸收。S 与 K、Ca、Mg 具有较好的正交互作用<sup>[33,62-64]</sup>。

硫肥或含硫肥料能使土壤 pH 或肥料微域 pH 下降,土壤氧化还原电位降低,氧化态物质被还原,Fe、Mn 溶解性增加,还会引起某些离子存在状态与比例变化(如 B、Mo、Zn 等),这些元素有效性发生变化,从而可以矫治缺素症或诱发中毒。S 与 Se、Mo 之间存在拮抗作用,但也有正交互作用<sup>[65-66]</sup>。S 与 Zn 之间存在协助作用<sup>[29,33,67]</sup>。施硫可促进植物对 Fe、Mn 的吸收<sup>[38]</sup>。

## 3 土壤硫素研究方法和技术

近年来,随着边缘学科的相互渗透,生物技术在植物营养学研究领域的应用与发展以及研究手段的不断提高,促进了植物矿质营养学与生物化学的结合,新仪器的应用使这一领域得到了拓展。电镜技术是该领域用得较多的技术。王庆仁等<sup>[68]</sup>应用扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)并结合X-衍射显微探针分析(XMA)技术对硫胁迫对油菜各器官硫分布的影响研究,能够很直观的揭示硫素营养对油菜细胞正常结构的维持和硫胁迫导致细胞结构和生理功能的异常现象。张秋芳等<sup>[69]</sup>用透射电镜观察水稻根系和叶片的超微结构,发现低S胁迫下,叶肉细胞内的叶绿体结构肿胀,基粒片层松弛且散乱,细胞器减少,线粒体遭到破坏,根系细胞内几乎无内含物;S浓度高时,则叶绿体的基粒片层致密、无规则化,细胞发生质壁分离等现象,从微观上清晰地揭示了硫胁迫对水稻生长的影响机理。

红外分近红外、中红外和远红外。在作物品质的分析上,采用近红外光谱分析技术。在有关C、H、O、N、P、S的官能团的检测上,傅里叶红外光谱起了很好的作用,可以定性地测出官能团的状况,再结合其他仪器使用,若是液体样,可结合液相色谱HPLC分析;若是固体样,结合XRD、XPS和SEM/EDS等分析。可进一步确定与官能团相应的化合物的类型和数量情况。此外,同步辐射<sup>[8]</sup>、微热分析等技术也应用较多。

微生物学机制研究是近年来研究热点,应用PCR-DGGE和16rDNA等分子生物学技术手段,通过提取土壤DNA,并依此为模板,选择特异性引物,对16SrRNA基因进行目的基因片段的PCR扩增,纯化PCR产物,最后对目的DNA片段进行克隆,测序,序列结果通过Blast程序与GenBank中核酸数据进行同源性比对,可以分析出微生物群落结构及多样性<sup>[70-71]</sup>。与传统的平板培养方法相比,变性梯度凝胶电泳(DGGE)技术能够更精确的反映出土壤微生物多样性,尤其是对一些不能培养的微生物来说,它是一种更有效的微生物多样性研究技术。

## 4 展望

土壤硫的转化是一个重要而复杂的土壤过程,对环境生态、地球变化和生物代谢有着重要影响。由于土壤存在复杂的氧化还原体系、酸碱反应、沉淀溶解平衡,吸附解吸平衡等化学过程,又由于硫元素具有多种化合价易于变化的特点,给研究工作带来了很多不便。结合以上所述,目前对硫的研究是现象研究多于机理研究,实验室研究多于大田研究。基于硫肥对土壤和作物生长的影响及其生态环境效应,笔者认为可以加强以下方面的研究:

(1) 从土壤硫素转化的机理方面研究,包括土壤化学和微生物学机制等。如水稻土中硫的形态及转化的微生物学机制;水稻土中硫化细菌、反硫化细菌作用下硫的形态及转化;土壤硫的行为动力学、电化学和热力学性质研究;土壤界面特性与硫的化学行为及机理研究等。

(2) 研究应由实验室转到大田中来。实验室研究目的是为解决生产上遇到的问题服务的,然而实验室与大田的环境差异大,造成许多实验室的研究成果在生产实践中应用较少。

(3) 土壤硫的转化与其他元素的关系研究,对于环境生态、地球变化和生物代谢都有重要意义。如土壤硫的转化过程与土壤C、N的循环的关系研究;硫与其他元素(包括重金属元素)相互作用的酶学、微生物学和土壤化学机制等。

(4) 新的研究方法和技术手段的探讨。随着科技的发展,要把新的科技手段引入到科学研究中来,让测定变得更容易,研究更深入、结果更精确。如电镜扫描技术、PCR-DGGE、16SrDNA、同步辐射和微热分析等技术等。

## 参考文献

- [1] 曹志洪,孟赐福,胡正义.中国农业与环境中的硫[M].北京:科学出版社,2011
- [2] Salisbury FG, Ross CW. Plant physiology[M]. Belmont, CA: Wadsworth Publ. Co. 1992
- [3] Messick DL, Fan MX. IFA Regional conference for Asia and the Pacific[C]. Korea:chenju Island, 2003
- [4] Wu J, O'Donnell AG, Syers JK. Influence of glucose, nitrogen and plant residues on the immobilization of sulphate-S in soil[J]. Soil Biol Biochem, 1995,27:1363-1370
- [5] 刘崇群.中国南方土壤硫的状况和对硫肥的需求[J].磷肥与复肥,1995,10(3):14-18

- [6] 李金凤,陈洪斌,张玉龙,等.辽宁大豆主产区土壤硫素状况及不同硫肥肥效研究[J].土壤通报,2004,35(4):470-473
- [7] 王利,高祥照,马文奇,等.中国农业中硫的消费现状、问题与发展趋势[J].植物营养与肥料学报,2008,14(6):1219-1226
- [8] 刘利娟,崔明启,赵佳,等.同步辐射中能 X 射线近边吸收谱方法研究不同施肥制度对土壤中硫形态的影响[J].核技术,2010,33(1):5-9
- [9] 刘广深,许中坚,徐文彬,等.模拟酸雨对土壤有效磷衰减的影响[J].矿物学报,2002,22(1):35-38
- [10] 孟赐福,傅庆林.施石灰石粉后红壤化学性质的变化[J].土壤学报,1995,3:300-307
- [11] Meng CF, Lu XN, Cao ZH, *et al.* Long-term effects of lime application on soil acidity and crop yield on a red soil in central Zhejiang[J]. *Plant Soil*, 2004,265:101-109
- [12] 崔建宇,王敬国,张福锁.肥田萝卜、油菜对金云母中矿物钾的活化与利用[J].植物营养与肥料学报,1999,5(4):328-334
- [13] Havlin JL, Beaton JD, Tisdale SL, *et al.* Soil Fertility and Fertilizers, An Introduction to Nutrient Management[M]. Singapore: Pearson Education Inc,2007:221
- [14] 邹长明,高菊生,王伯仁,等.长期施用含硫化肥对水稻土化学性质和水稻吸收微量元素的影响[J].安徽技术师范学院学报,2004,18(1):19-25
- [15] Chen L. Flue gas desulphurization by-products additions to acid soil Alfalfa productivity and environment quality[J]. *Environ Pollu*, 2001,114(2):161-168
- [16] 林惠荣,施积炎,傅晓萍,等.硫对铅污染水稻土微生物活性及群落结构的影响[J].2010,21(7):1829-1834
- [17] Pietri J CA, Brookes PC. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2008,40:1856-1861
- [18] Heinze S, Raupp J, Joergensen RG. Effects of fertilizer and spatial heterogeneity in soil pH on microbial biomass indices in a long-term field trial of organic agriculture[J]. *Plant Soil*, 2010,328:203-215
- [19] Janzen HH, Bettany JR. The effect of temperature and water potential on sulphur oxidation in soils[J]. *Soil Sci*, 1987,144:81-89
- [20] Lee A, Boswell CC, Watkinson JH. Effect of particle size on the oxidation of element sulfur thiobacillus number, soil, sulphate and its availability to pasture[J]. *New Zealand Agric Res*, 1988,31:179-186
- [21] Bitton G, Boylan RA. Effect of acid precipitation on soil microbial activity: I. Soil core studies[J]. *J Environ Qual*, 1985,14:66-69
- [22] 徐冬梅,刘广深,许中坚,等.模拟酸雨对土壤酸性磷酸酶活性的影响及机理[J].中国环境科学,2003,23(2):176-179
- [23] Hoffmann E, Schmidt W. Enzyme system of our culture media. II. Urease[J]. *Biochem Z*, 1953,324(2):124-127
- [24] Pettit NM, Smith ARJ. Soil urease: Activity, stability and kinetic properties[J]. *Soil Biol Biochem*, 1976,8(6):479-484
- [25] 王涵,王果,黄颖颖,等. pH 变化对酸性土壤酶活性的影响[J].生态环境,2008,17(6):2401-2406
- [26] Floch C, Capowiez Y, Criquet S. Enzyme activities in apple orchard agroeco -systems: How are they affected by management strategy and soil properties[J]. *Soil Biol Biochem*, 2009,41:61-68
- [27] Cui Y, Wang Q, *et al.* Elemental sulfur effects on Pb and Zn uptake by indian mustard and winter wheat[J]. *J Environ Sci*, 2003,6:18-23
- [28] 崔岩山,王庆仁,董艺婷,等.硫磺对土壤中 Pb、Zn 形态的影响[J].环境化学,2004,23(1):46-50
- [29] 崔岩山,王庆仁.不同种类硫肥对油菜吸锌的影响[J].中国农业生态学报,2008,16(1):113-116
- [30] 李媛,崔岩山,陈晓晨,等.几种含硫肥料对油菜和三叶鬼针草吸收铅镉的影响[J].中国科学院研究生院学报,2009,2(5):621-626
- [31] 张建丽,何盈,蔡顺香,等.含硫钝化剂对抑制芥菜 Pb、Cd 富集的效果研究[J].福建农业学报,2007,22(3):293-297
- [32] 安志装,王校常,严蔚东,等.镉硫交互处理对水稻吸收累积及其蛋白巯基含量的影响[J].土壤学报,2004,41(5):728-734
- [33] 孟赐福,姜培坤,曹志洪,等.硫素与其他营养元素的交互作用对作物养分吸收、产量和质量的影响[J].土壤,2009,41(3):329-334
- [34] Gao MX, Hu ZY, Wang GD, Xia X. Effect of Elemental Sulfur Supply on Cadmium Uptake into Rice Seedlings When Cultivated in Low and Excess Cadmium Soils[J]. *Communi Soil Sci Plant Analy*, 2010,41(8):990-1003
- [35] Fan JL, Hu ZY, Ziadi N, *et al.* Excessive sulfur supply reduces cadmium accumulation in brown rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environ Pollut*, 2010,158:409-415
- [36] Hu ZY, Zhu YG, Li M, *et al.* Sulfur(S)-induced enhancement of iron plaque formation in the rhizosphere reduces arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. *Environ Pollu*, 2007,147:387-393
- [37] 胡正义,夏旭,无从杨慧,等.硫在稻根微域中化学行为及其对水稻吸收重金属的影响机理[J].土壤,2009,41(1):27-31
- [38] Islam M, Ali S, Hayat R. Effect of integrated application of phosphorus and sulphur on yield and micronutrient uptake by chickpea (*Cicer arietinum* L.) [J]. *Int J Agric Biol*, 2009,11:33-38
- [39] 张伟华,奉小优,皮荷杰,等.硫代硫酸钾萃取土壤中重金属及其对玉米苗期的毒理效应[J].中国农学通报,2010,26(21):198-201
- [40] 王国平,刘景双.湿地生物地球化学研究概述[J].水土保持学报,2002,16(4):144-148
- [41] Pfenning N, Widdel F. Ecology and physiology of some anaerobic bacteria from the microbial sulfur cycle. *In*: Bothe H,

- Trebst A. Biology of Inorganic Nitrogen and Sulfur[M]. Berlin:Springer-Verlag,1981:169-177
- [42] Brown KA. Sulfur distribution and metabolism in waterlogged peat[J]. Soil Biol Biochem, 1985,17:39-45
- [43] Hoffmann C, Stockfisch N, Koch HJ. Influence of sulphur supply on yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) determination of a threshold value[J]. Europ J Agron, 2004,21:69-80
- [44] Pascale DP, Maggio A, Pernice R, et al. Sulphur fertilization may improve the nutritional value of *Brassica rapa* L. subsp. *Sylvestris*[J]. Europ J Agron, 2007,26:418-424
- [45] Mathot M, Mertens J, Verlinden G, et al. Positive effects of sulphur fertilisation on grasslands yields and quality in Belgium[J]. Europ J Agron, 2008,28:655-658
- [46] Jaggi RC, Aulakh MS, Sharma R. Impacts of elemental S applied under various temperature and moisture regimes on pH and Available P in acidic, neutral and alkaline soils[J]. Biol Fertil Soils, 2005,41:52-58
- [47] Vong PC, Nguyen C, Guckert A. Fertilizer sulphur uptake and transformations in soil as affected by plant species and soil type[J]. Europ J Agron, 2007,27:35-43
- [48] Asare E, Scarisbrick DH. Rate of nitrogen and sulphur fertilizers on yield, yield components and seed quality of oilseed rape (*brassica napus* L)[J]. Field Crops Res, 1995,44:41-46
- [49] Fismes J, Vong PC, Guckert A, et al. Influence of sulfur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown on a calcareous soil[J]. Europ J Agron, 2000,12:127-141
- [50] Thomas SG, Hocking TJ, Bilsborrow PE. Effect of sulphur fertilisation on the growth and metabolism of sugar beet grown on soils of differing sulphur status[J]. Field Crops Res, 2003,83:223-235
- [51] Fazli IS, Abidin MZ, Jamal A, et al. Interactive effect of sulphur and nitrogen on lipid accumulation, acetyl-CoA concentration and acetyl-CoA carboxylase activity in developing seeds of oilseed crop(*Brassica campestris* L. and *Eruca sativa* Mill.) [J]. Plant Sci, 2005,168:29-36
- [52] Ahmad G, Jan A, Arif M, et al. Influence of nitrogen and sulfur fertilization on quality of canola (*Brassica napus* L.) under rainfed conditions[J]. J Zhejiang Univ Sci B, 2007,8(10):731-737
- [53] 张永春,汪吉东,梁永红,等.硫包衣尿素对水稻的增产效应及氮素利用率的影响研究[J].水土保持学报,2007,4:108-111
- [54] 汪吉东,张永春,郭巧云,等.硫包膜尿素对水稻养分吸收利用及土壤反应的影响[J].华北农学报(增刊),2008:293-297
- [55] McGrath SP, Zhao FJ. Sulphur uptake, yield responses and interactions between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (*Brassica napus*) [J]. J Agri Sci, 1996,126:53-62
- [56] 孟赐福,吕晓男,曹志洪,等.水稻和油菜施硫的增产效应和土壤有效硫临界指标的研究[J].植物营养与肥料学报,2004,10(2):218-220
- [57] 陈 铭,刘更另,孙富臣.红壤对  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  的吸附与竞争吸附研究[J].热带亚热带土壤科学,1996,5(2):85-89
- [58] Hedge DM, Murthy IYLN. Management of secondary nutrients[J]. Indian J Fert, 2005,9:93-100
- [59] Tiwari KN, Gupta BR. Sulphur for sustainable high yield agriculture in Uttar Pradesh[J]. Indian J Fert, 2006,1:37-52
- [60] Kumar N, Sinha UP. Response of spring-planted sugarcane (*Saccharum officinarum*) to phosphorus and sulphur application[J]. Indian J Agron, 2008,53(2):187-191
- [61] 张继榛,郑 路,竺伟民,等.大豆硫磷配施的效应研究[J].安徽农业大学学报,2000,27(增刊):176-181
- [62] 鲁剑巍,陈 防,陈行春,等.钾、硫肥配施对作物产量与品质的影响[J].土壤通报,1994,25(5):215-218
- [63] 姚丽贤,周修冲,侯剑泉,等.沙田柚配施钾及不同形态镁、硫肥的效应研究[J].土壤肥料,2003,6:21-24
- [64] 林蔚刚,吴俊江,董德健,等.硅钙肥、生石灰、硫肥三因素二次多项式回归大豆产量效应分析[J].大豆科学,2007,26(3):351-352
- [65] Chatterjee C, Pratima S, Dube BK. Zinc stress in mustard as altered by sulphur deficiency[J]. J Plant Nutri, 2005,28(4):683-690
- [66] 邱志满,詹长庚,姜丽娜,等.钾硫、硼硫肥配施对油菜效应的研究[J].土壤通报,1993,24(2):77-79
- [67] 王昌全,李 冰,周 瑾,等.硒硫配合喷施对大蒜营养品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2004,10(2):206-211
- [68] 王庆仁,林 葆.硫胁迫对油菜超微结构及超细胞水平硫分布的影响[J].植物营养与肥料学报,1999,5(1):46-49
- [69] 张秋芳,彭嘉桂,林 琼,等.硫素营养胁迫对水稻根系和叶片超微结构的影响[J].土壤,2008,40(1):106-109
- [70] 林惠荣,施积炎,傅晓萍,等.硫对铅污染水稻土微生物活性及群落结构的影响[J].应用生态学报,2010,21(7):1829-1834
- [71] 陈 哲.长期施肥对水稻土反硝化作用和反硝化功能微生物的影响机理[D].北京:中国科学院研究生院,2010