

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 20051301971

UDC\_\_\_\_\_

廈門大學

硕士学位论文

我国红树林湿地中硫的分布特征及影响因素

**Distribution of sulfur in plants and sediments of mangrove in  
China and Influential Factors**

林慧娜

指导老师姓名: 丁振华教授

专业名称: 植物学

论文提交时间: 2008年4月

论文答辩时间: 2008年5月

学位授予时间: 2008年5月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评阅人: \_\_\_\_\_

2008年5月

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。  
本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日



## 本研究受以下项目联合资助

1. 国家自然科学基金（40676064，305301502）；
2. 厦门大学创新团队

本论文的实验工作在厦门大学生命科学学院生态所完成。

## 目 录

摘 要	1
Abstract	3
第一章 前 言	5
1 环境中硫的分布及生态环境效应	5
1.1 硫在环境中的分布及来源	5
1.2 硫的生物学功能及生态环境效应	7
2 红树林生态系统与硫	9
3 选题依据和意义	10
第二章 材料和方法	12
1 研究区域概况	12
2 样品采集和制备	14
3 主要试剂和仪器	14
4 测定方法	15
4.1 沉积物中全硫的测定	15
4.2 植物中全硫的测定	16
4.3 土壤中铁元素的测定	16
4.4 土壤粒度的测定	16
4.5 沉积物 pH、盐度、有机质的测定	17
5 数据处理	17
第三章 全国主要红树林湿地沉积物中硫的分布及影响因素	18
1 全国主要红树林湿地表层沉积物中硫的分布	18
1.1 红树林湿地沉积物中硫的总体分布特点	18
1.2 不同地区沉积物中硫的特点及原因	19
1.3 湿地不同利用方式造成的硫的分布差异	20
1.4 典型红树林地区沉积物中硫的分布	23
1.5 影响红树林沉积物水平分布的因素	23
2 全国主要红树林湿地沉积物中硫的垂直分布	28
2.1 红树林湿地沉积物中硫的垂直分布	28

2.2 影响红树林沉积物中硫垂直分布的因素 .....	38
3 小结 .....	39
<b>第四章 全国主要红树植物中硫的分布和影响因素</b> .....	<b>40</b>
1 全国主要红树林湿地红树植物中硫的特点 .....	40
2 不同红树植物叶片硫的含量 .....	41
3 不同红树植物叶片对硫的富集系数 .....	42
4 影响红树林植物分布的因素 .....	43
5 小结 .....	45
<b>第五章 结论与展望</b> .....	<b>46</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>48</b>
<b>附录</b> .....	<b>52</b>
<b>致谢</b> .....	<b>53</b>

## Content

<b>Abstract (in Chinese)</b> .....	1
<b>Abstract (in English)</b> .....	3
<b>Chapter 1: Preface</b> .....	5
<b>1 Distribution of sulfur in the environment and its eco-environment effect</b> .....	5
1.1 Distribution of sulfate in the environment and its source .....	5
1.2 Biological function of sulfate and its eco-environment effect .....	7
<b>2 Sulfur in mangrove ecosystems</b> .....	9
<b>3 Significance of study</b> .....	10
<b>Chapter 2: Materials and methods</b> .....	12
<b>1 Study area</b> .....	12
<b>2 Sampling and preparation</b> .....	14
<b>3 Reagents and instruments</b> .....	14
<b>4 Analytical methods</b> .....	15
4.1 Measurement of sulfur content .....	15
4.2 Measurement of iron .....	16
4.3 character of sediments of character of sediments .....	16
4.4 Measurement of pH, organic matter and salinity .....	16
<b>5 Data processing</b> .....	17
<b>Chapter 3: Distribution of sulfur in mangrove sediments in China and Influential Factors</b> .....	18
<b>1 Distribution of sulfur in top-soil of mangrove wetlands</b> .....	18
1.1 Distribution character of sulfur in mangrove sediments in china .....	18
1.2 Distribution of sulfur in sediments of different wetlands .....	19
1.3 Effect of different land use of mangrove on sulfur .....	20
1.4 Distribution of sulfur in sediments of typical mangrove wetlands .....	23
1.5 Influential Factors in the distribution of sulfur in surface sediments .....	23
<b>2 Distribution of sulfur in vertical profiles in mangrove wetlands in China</b> .....	28
2.1 Distribution character of sulfur in mangrove sediments in China .....	28
2.2 Influential factors in distribution of sulfur in vertical profiles in mangrove wetlands in China .....	29
<b>3 Brief summary</b> .....	39

---

<b>Chapter 4: Distribution of sulfur in mangrove plants in China</b> .....	40
<b>1 Distribution of sulfur in mangrove plants in China</b> .....	40
<b>2 The content of sulfur in leaves of mangrove</b> .....	41
<b>3 Enrichment coefficients of mangrove leaves to sulfur in top-soil</b> .....	42
<b>4 Influential Factors in the distribution of sulfur in mangrove plants</b> .....	43
<b>5 Brief summary</b> .....	45
<b>Chapter 5: Conclusions and perspective</b> .....	46
<b>Reference</b> .....	48
<b>Appendix</b> .....	52
<b>Acknowledge</b> .....	53



## 摘 要

以全国红树林主要分布地区——海南、广东、广西、福建共 4 个省份 13 个地区为研究对象，采集红树植物、沉积物样品。通过测定红树植物叶片，茎，根中的硫含量，分析红树植物中硫的累积和分布规律。通过测定表层沉积物，柱状沉积物中硫含量和 pH 值，盐分，有机质，土壤粒度等环境因子，分析红树林湿地沉积物植物中硫的分布规律，讨论环境影响因子对红树林湿地中硫的影响。通过研究，得出如下几点主要结论：

主要结果如下：

(1) 我国红树林湿地表层沉积物中硫的平均含量达到 0.214%，高于附近非红树林区沉积物中硫的平均含量 (0.153%)；海南、广东、广西、福建这四个省区红树林沉积物中硫的平均含量分别为：0.34%、0.19%、0.20%、0.18%。13 个地区硫含量顺序为：三亚>东寨港>云霄>钦州>鹅湾>姚家屿>高桥>山口>大冠沙>北仑河口>福田>洛阳桥>浮宫，不同地区间沉积物中的硫含量差异显著。即使同一湿地，不同利用方式的沉积物中的硫含量也存在较大不同。

(2) 我国红树林湿地的沉积物中硫的分布受沉积物中有机质、pH 值、盐分的影响。表层沉积物中硫的含量与沉积物中有机质、盐分都达到显著正相关，而与 pH 值呈显著性负相关。沉积物的粒度组成和铁元素对沉积物中硫元素的分布也有一定的影响。全国红树林湿地表层沉积物中有机质含量范围为：1.24%~11.1%，平均含量为 2.53%；pH 值范围为：3.0~7.5，平均为 6.0；盐分含量范围为：2.42‰~23.85‰，平均含量为 10.86‰。

(3) 沉积物剖面中硫含量在垂直方向上产生分异，并随着深度的增加各自出现不同规律。硫的垂直分布大致可以分成四种类型：上部富集型（包括大冠沙泥质，东寨港剖面 A），硫主要富集在 15-25cm；下部富集型（包括福田，东寨港剖面 B，大冠沙沙质），硫主要富集在 25-35cm；不规则递增型（如浮宫）；无规律型（如高桥）。不同红树林湿地沉积物剖面中硫的平均含量差异显著，顺序为：福田>东寨港剖面 B>大冠沙（泥质）>高桥>大冠沙（沙质）>东寨港剖面 A>浮宫>高桥农田。各个沉积物剖面中硫的分布情况是：福田 0.21%(0.156%~0.27%)；东寨港剖面 B 0.20%(0.14%~0.27%)；大冠沙（泥质）0.19%(0.10%~0.30%)，高桥 0.11%(0.08%~0.16%)；大冠沙（沙质）0.11%(0.05~0.17%)；东寨港剖面 A 0.07%

(0.014%~0.21%), 浮宫 0.06% (0.016%~0.20%); 高桥农田 0.04% (0.16%~0.27%)。这是由于红树林湿地不同沉积物的粒度组成、沉积速率以及人类对红树林沉积物的影响程度不同。此外, 红树植物的吸收和累积也是造成沉积物硫垂直变化的一个原因。

(4) 我国红树林湿地沉积物中硫的垂直分布受有机质、pH 以及盐分的影响。全国红树林湿地沉积物剖面中硫含量与有机质含量呈显著正相关; 浮宫红树林沉积物和大冠沙红树林剖面沙中的硫含量都与 pH 值呈极显著负相关; 大冠沙红树林湿地沉积物和其沙质剖面中的硫含量都与盐份含量呈显著相关。沉积物剖面中有机质含量范围为 0.07%~7.3%, 平均为 3.98%; pH 值范围为 3.5~6.5, 平均为 4.7; 盐分含量范围为 3%~45%, 平均为 23%。

(5) 各种红树植物对硫的吸收能力顺序为: 无瓣海桑>海漆> 桐花树>秋茄>白骨壤>红海榄>黄槿。红树植物中硫的平均含量为 0.46%, 同种红树植物不同个体中硫含量也有较大差异。红树植物各个器官中硫含量分配顺序为: 叶>根>茎。不同红树林湿地中, 白骨壤中硫含量顺序为: 大冠沙>三亚>山口>福田>钦州>东寨港>浮宫; 桐花树中硫含量顺序为: 山口>北仑河口>高桥>钦州>东寨港>福田。

(6) 不同红树植物叶片中硫含量也各异, 顺序为: 无瓣海桑>角果>白骨壤>秋茄>海漆>桐花树>正红树>红海榄>海莲>黄槿。全国红树林湿地不同红树植物叶片的富集系数大小顺序为: 角果>海漆>秋茄>白骨壤>无瓣海桑>黄槿>正红树>木榄>红海榄>海莲>桐花树。

(7) 硫含量较高的沉积物, 其生长的红树植物叶片中的硫含量也高。

**关键词:** 红树林; 沉积物; 硫; 分布

## Abstract

Thirteen important mangrove areas including Hainan, Guangdong, Guangxi, Fujian were studied. Samples of mangrove plants, surficial sediments and vertical profiles were collected from these places. Accumulation and distribution of sulfur in mangrove plants were discussed by examining the content of sulfur in the leaves, stems and roots of mangrove. Accumulation and distribution of sulfur in mangrove sediments were also analyzed by examining the content of sulfur, pH, organic matter, salinity, the character of soil, iron element. The environmental effect factors were studied to show their relations with the content of sulfur. The results showed:

1. Average content of sulfur in surficial sediment was 0.214% in Chinese mangrove wetlands, higher than in the sediments without mangroves, which is only 0.153%. The average content of sulfur in sediments of mangrove wetlands of Hainan, Guangdong, Guangxi, Fujian was 0.34%, 0.19%, 0.20%, 0.18%, respectively. The content of sulfur in the sediments of thirteen areas was Sanya > Dongzhaigang > Yunxiao > Qinzhou > Ewan > Yaojiayu > Gaoqiao > Shankou > Daguansha > Beilunhekou > Futian > Luoyangqiao > Fugong. The content of sulfur was remarkable different among these areas. Even in the same wetland, the sulfur content differed in different types of sediments.

2. The character of the mangrove wetland was influenced by environment, organic matter, pH, salinity etc. Sulfur content correlated significantly with organic matter and salinity in sediments, but correlated negatively with pH. The character of sediments and iron concentration were also the factors which influenced distribution of sulfur in the sediments. The ranges of organic matter content, pH and salinity content in the surficial sediments were: was 1.24%~11.1%, 3.0~7.5, 1.8%~5.5%, respectively. Average content of organic matter, pH and salinity were 2.53%, 6.0, 2.2%, respectively.

3. Sulfur content changed irregularly in the vertical profiles of mangrove wetlands. It included four different types: first, bottom-enrichment, such as profiles of Futian, Daguansha (soil), Daguansha (sand); second, upper-enrichment, such as profiles of Dongzhaigang A, Dongzhaigang B; third, homogeneous type, such as Fugong; fourth, irregularly, such as profile of Gaoqiao. Average content of sulfur was different in vertical profiles. In the profiles of Futian, Dongzhaigang B, Daguansha (soil), Gaoqiao, Daguansha (sand), Dongzhaigang A, Fugong mangrove wetlands, sulfur content was 0.21%(0.16%~0.27%), 0.20%(0.14%~0.27%), 0.19%(0.10%~0.30%), 0.11%(0.08%~0.1

6%),0.11%(0.05%~0.17%),0.07%(0.014%~0.21%),0.06%(0.016%~0.20%),respectivel. It was because of properties of sediments and deposit rate change greatly in different mangrove wetland. Human activities also affected distribution of sulfur in the profiles.

4. In the vertical profiles of mangrove wetlands, Sulfur content correlated significantly with organic matter in all the vertical profiles; correlated negatively with pH in Fugong and Daguansha (sand) mangrove wetlands. And salinity correlated significantly with sulfur content in Daguansha (soil) and Daguansha (sand) wetlands. The ranges of organic matter and salinity were 0.07%~7.3% and 3‰~45‰; the average content was 4.0‰ and 23‰.

5. It was a big different of total sulfur concentrations among several major plants in mangrove wetland. Average content of sulfur in mangrove plants was 0.046%, sulfur content differed in the same species of plants in the same mangrove wetlands. The order of sulfur content in plant organs was: leaf>root>stem. Sulfur content in the same species of mangrove plant was distinct in different mangrove wetlands. The order of sulfur content in *Avicennia marina* in mangrove wetlands was: Daguansha>Sanya >Shankou>Futian>Qinzhou>Dongzhaigang >Fugong. The order of sulfur content in *Aegiceras corniculatum* was: Shankou>Beilunhekou>Gaoqiao>Qinzhou>Dongzhaigang > Futian.

6. Sulfur content in the leaves of different mangrove plants varied remarkable. The order of sulfur content in different leaves was: *Ceriops tagal* >*Kandelia obovata* > *Rhizophora stylosa* >*Avicennia marina* >*Lumnitzera racemosa* >*Hibiscus tiliaceus* >*Aegiceras corniculatum* >*Bruguiera sexangula*. The order of accumulation ratio of sulfur in different leaves to top-soil in mangrove wetlands was: *Ceriops tagal* > *Excoecaria agallocha* > *Kandelia obovata* > *Avicennia marina* > *Sonneratia apetala* > *Hibiscus tiliaceus* >*Rhizophora apiculata* > *Bruguiera gymnorrhiza* > *Rhizophora stylosa* >*Bruguiera sexangula* > *Aegiceras corniculatum*.

7. In profiles of sediments with higher sulfur content, the leaves of plants accumulated more sulfur.

**Keywords:** Mangrove; sediment; sulfur; distribution

## 第一章 前言

红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带的常绿木本植物群落，是海滩上特有的森林类型，在海岸河口生态系统中占有十分重要的地位。红树林生态系统处于海洋与陆地的动态交界面，遭受海水周期性浸淹，因而在结构与功能上具有不同于陆地生态系统，也不同于海洋生态系统的特性。

红树林生长在河口海岸深厚的潮滩上，基底土壤含高水分、高盐分，含有丰富的植物残体和有机质，但缺乏氧气。由于厌氧分解产生大量的硫化氢，土壤带有特殊的臭味。此外，红树林淤泥中也含有大量钙质，包括软体动物死亡后的碎壳和潮汐带来的石灰物质。土壤的pH值在3.5~7.5之间，通常在5以下。

红树植物具有每日浸润的潮间带生长的真红树和只有高洪潮方可浸润的高潮带以上的两栖性半红树植物。红树植物有6个主要作用<sup>[1]</sup>：（1）通过网罗碎屑的方式促进土壤的形成，抵抗潮汐和洪水的冲击，保护堤岸；（2）过滤陆地径流和内陆带出的有机物质和污染物；（3）为许多海洋动物（包括渔业、鸟类、水产生物）提供栖息和觅食的理想生境；（4）为近海生产力提供有机碎屑的主要生产者；（5）植物本身的生产物，包括木材、薪炭、食物、药材和其他化工原料等；（6）红树林可以为社会教育和旅游提供自然和人文景观。因此开展红树林研究具有重要的理论意义和现实的经济意义。

### 1 环境中硫的分布及生态环境效应

#### 1.1 硫在环境中的分布及来源

硫在自然界中以单质硫、硫化物、硫酸盐以及与碳和氢结合的有机态存在，在环境中主要分布于土壤、大气、植物和海洋。

##### (1) 土壤中的硫

土壤中的硫可分为有机态和无机态。呈多种氧化态，从+6价到-2价，并可有固、液、气三种形态。无机态主要包括硫酸盐和硫化物<sup>[2]</sup>。有机态硫主要包括碘化氢可还原硫、碳结合硫、惰性硫。土壤中的硫来源于大气降水、灌溉、杀虫剂和除草剂的使用。含硫燃料的燃烧，致使SO<sub>2</sub>大量进入大气，这些硫氧化物最终都会以湿沉降或干沉降的形式进入土壤。大气硫污染越严重，土壤得到补充的硫也就越多<sup>[3]</sup>。根据pH的不同土壤中的硫可以呈现不同的形态。在pH为3.5~8.5之间，土壤中硫的氧化速度随pH升高而加快，土壤全硫含量呈下降趋势<sup>[4-7]</sup>。

## (2) 大气中的硫

大气中的硫化物包括  $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  和各种有机硫气体, 如二甲基硫 DMS、甲基硫醇  $\text{CH}_3\text{SH}$ 、和甲基二硫 DMDS、羟基硫 (COS)、甲硫醇 (MSH) 和二硫化碳 ( $\text{CS}_2$ ), 它们主要来自地表的自然源和人为源。自然源主要有海洋挥发、陆地土壤释放、植物释放、火山喷发等, 而人为源主要为含硫矿物的燃烧<sup>[8]</sup>。

## (3) 海洋环境中的硫

在海洋环境中硫有 30 余种存在形式, 其存在形态主要由环境的 pE, pH 控制<sup>[9]</sup>。在实际存在中最重要的有 5 类:  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{S}_x^0$ 、 $\text{H}_2\text{S}_x$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 。硫酸盐是海水及沉积物 (间隙水) 中硫的主要存在形态, 一般占总硫的 99% 以上。海洋中的有机硫化物主要包括二甲基硫 (Dimethylsulfide, 简称 DMS)、甲硫醇 ( $\text{CH}_3\text{SH}$ )、二硫化碳 ( $\text{CS}_2$ )、羰基硫 (COS)、二甲亚砷 (DMSO)、二甲基二硫 (DMDS)、苯并噻吩 (BT)、二苯并噻吩 (DBT) 等。由于许多含硫有机物易挥发, 能穿越海-空界面进入到大气中去, 从而参入硫的全球循环, 并对区域或全球的气候和酸雨的形成重要影响。在各种挥发性硫化物中, DMS 已经被公认为占优势地位的一种硫化物, 占海洋中硫释放量的 55%~80%。DMS 来源于浮游植物和浮游动物, 其在海水中的浓度及海气排放通量有着明显的时空变化。已有证据表明<sup>[10]</sup>, 从海洋中释放的生源硫会净输送到陆地大气中去。DMS 作为海洋中最主要的生源硫化物, 会直接影响到整个大气环境。DMS 在大气中的氧化产物大都具有较强的酸性, 将对天然沉降物的酸度产生重要影响。它来源于浮游植物和浮游动物, 主要存在于海洋真光层中。在大气中, DMS 主要的氧化反应是与 OH 自由基的反应, 生成物  $\text{SO}_2$ , MSA,  $\text{SO}_4^{2-}$  的产率受反应物和光氧化剂浓度、温度、光强等因素的影响, 主要的最终产物是  $\text{SO}_4^{2-}$ <sup>[11]</sup>。同时, 海洋输送到大气中的 DMS 经氧化形成的硫酸盐气溶胶是海洋大气中云凝结核 (CCN) 的主要来源。而云凝结核的密度变化会影响着云的形成和太阳辐射的漫散射系数, 硫酸盐气溶胶使云的反照率增强, 导致地表温度及海水温度下降, 使气候受到影响, 此过程被认为是控制地球温度的负反馈系统<sup>[12]</sup>。Andreae<sup>[13]</sup>认为, 如果 DMS 的通量变化一倍, 全球的平均温度将会变化几度。微生物的降解、光化学的氧化以及海-空扩散是 DMS 在海洋中迁移变化的三个最重要的途径。

## (4) 植物中的硫

大气中  $\text{SO}_2$  对植物生态系统具有重要的补偿效应,  $\text{SO}_2$  主要通过干、湿沉降进入土壤或被植物直接吸收, 这是植物获得硫素的重要途径之一。不同类型的植

物对气态硫化物的忍受能力有明显不同<sup>[14]</sup>。通常草本植物比木本植物敏感，木本植物中针叶树比阔叶树敏感，阔叶树中落叶比常绿的抗性弱。大气中过高浓度的SO<sub>2</sub>会对植物生理活动产生很大影响。叶片硫含量与大气二氧化硫含量相关系数较大的树种可以用来对大气SO<sub>2</sub>的污染状况的进行生物监测<sup>[15]</sup>。

硫主要靠根系从土壤中吸收和通过叶片从大气中吸收，Hill等（1978，1979）已经证明矿质元素的浓度和再转运率之间有显著的正相关，硫从老叶向新叶的再转运率较小，故硫在植物体内应集中于老叶和根系中，缺硫首先发生在幼叶上。维持植物正常需要的硫主要是以硫酸根的形式从土壤中吸收，进入植物体后，一部分保持不变，大部分被还原成硫氢基和联硫基而形成有机化合物，成为蛋白质的组分。而植物从气孔吸收的二氧化硫，主要是以亚硫酸根的形式存在于叶室，其含量对植物有害，只有经过较长时间的反应后，亚硫酸根才氧化形成硫酸根，而使毒性降低<sup>[15]</sup>。

对于硫在植物体内的变化，不同学者所持的观点不同，有人认为在生长旺盛时期含量最低，而生长末期最高。他们认为生长旺盛期，植物生理活动虽然很旺盛，对硫的吸收很快，但是对硫的转化也快，含量反而低<sup>[16-21]</sup>；有人持相反观点，认为生长旺盛时期吸收的硫比其他时期高，含量也高<sup>[22, 23]</sup>。据蒋高明等研究，以承德市油针松为例，其体内硫含量变化为生长末期>休眠期>生长初期>生长旺盛期，除冬季外整个生长季节硫含量的变化与大气二氧化硫的变化基本相符合。

## 1.2 硫的生物学功能及生态环境效应

### 1.2.1 硫的生物学功能

硫是植物生长必需的营养元素之一，它是一些氨基酸和酶（磷酸甘油醛脱氢酶、氨基转移酶、尿酶等）的组成成分，同时也是合成叶绿素、硫胺素等所必需的。硫的营养生理功能（蛋白质合成、酶活性、光合作用、脂类合成、生长调节、防卫机制、解毒机理、抗逆机理、养分吸收），具体如下：

- （1）合成含硫氨基酸。是铁氧还蛋白、半胱氨酸(Cys)、蛋氨酸(Met)以及所有含半胱氨酸和蛋氨酸的蛋白质的必需组成成分，二硫键的形成对蛋白质结构的稳定性作用。
- （2）参与氧化还原反应。如：铁氧还蛋白是一种含硫基化合物，参与亚硝酸还原、硫酸盐还原、分子氮的固定、氮的同化以及光合作用等过程。另外还

参与呼吸作用，脂类的形成。

- (3) 硫对叶绿素的形成有一定作用，缺硫时叶绿素含量降低。
- (4) 硫还是某些作物的成分，如芥子油，蒜油等。它们的特殊气味主要与以硫为结构成分的硫代异氰酸盐和亚砷等挥发性化合物有关。
- (5) 植物单宁中也含有硫，它是植物在长期的生态环境适应中行成的一种次生代谢产物。它能够增强植物的抗病能力；抵御植食动物的噬食，可作为树种抗性的标志；同时单宁还可作为食品添加剂。
- (6) 金属硫蛋白（MT）是一类广泛存在于生物体内的低分子量，富含 CYS、能被金属诱导的金属结合蛋白。MT 对重金属具有解毒作用；MT 对生物体内所必需微量元素的储存、运输和代谢起着重要作用；MT 具有清除自由基、抑制脂质过氧化过程而保护细胞膜的突变，增强吞噬细胞的功能来提高免疫力；MT 还能抗电离辐射；MT 还具有增强机体的应激能力以及应激保护作用。

### 1.2.3 硫的生态学效应

硫是控制海洋体系氧化还原反应过程的主要体系之一，能够参与络合，交换，吸附，沉淀等一系列的成岩过程；作为大气污染主要成分之一的  $\text{SO}_2$ ，在空气中被氧化为  $\text{SO}_3$ ，形成酸雨，造成土壤的酸化板结，农作物大幅度减产甚至绝产，经冲淋注入海洋；浅海养殖鱼，贝、虾底质环境的恶化，也主要是底质层产生  $\text{H}_2\text{S}$ ，使养殖环境变化，造成养殖损失。

从海洋释放到大气中的二甲基硫化合物（DMS）数量极大，会影响到硫的全球平衡。如 Nguyen 等人<sup>[24]</sup>发现，DMS 的氧化产物是酸雨物质的主要来源，可贡献雨酸度的 40% 左右。特别在远离化石燃料燃烧的地区，DMS 的氧化产物会成为天然沉降物酸度的主要来源。

大气中过高浓度的  $\text{SO}_2$  也会对植物的生理活动产生很大影响。如：使植物气孔不正常地开放或关闭，影响其正常生理活动；使植物呼吸作用受到干扰，且过高  $\text{SO}_2$  可能使植物营养代谢过程发生变化；过高  $\text{SO}_2$  对植物光合作用和叶绿素含量也有明显影响，高浓度  $\text{SO}_2$  抑制  $\text{CO}_2$  在二磷酸戊酮羧化酶活性中心的结合， $\text{CO}_2$  固定受阻，严重影响光合作用<sup>[25]</sup>； $\text{SO}_2$  浓度过高对植物生殖器官正常发育产生不利影响； $\text{SO}_2$  浓度过高还对小麦胚囊分化和受精过程有伤害效应。



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库