印 亮,张丽丽,陈 鹭,等.不同环境因子对南方典型蔗田土壤羰基硫通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12):2493-2499. YIN Liang, ZHANG Li-li, CHEN Lu, et al. Effects of various environmental factors on carbonyl sulfide fluxes from typical sugarcane field soils in southern China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(12): 2493-2499.

# 不同环境因子对南方典型蔗田土壤羰基硫通量的影响

印 亮,张丽丽,陈 鹭,王贤凤,黄幸然,方 熊,易志刚\*

(福建农林大学资源与环境学院/土壤环境健康与调控福建省重点实验室,福州 350002)

摘 要:为探讨全球气候变化对土壤羰基硫(COS)的影响,本研究以南方典型蔗田土壤作为研究对象,室内模拟不同环境因子(温度、含水率和大气 CO<sub>2</sub>浓度),利用动态箱/GC-MS 分析了原位和异位土壤 COS 通量。结果表明,土壤原位土和异位土 COS 通量差异较大,原位土 COS 吸收速率小于异位土,而释放速率大于异位土。土壤灭菌后 COS 的吸收显著降低,表明土壤 COS 吸收是一个生物过程。温度对异位土壤 COS 吸收影响较大,25℃异位土壤 COS 吸收最小,为 100.4 pmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>;土壤含水量对原位土壤 COS 吸收影响最大,50%的土壤最大持水量条件 COS 吸收最小,为 0.9 pmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>;大气 CO<sub>2</sub>浓度增加抑制原位土释放 COS。因此,在研究土壤 COS 通量时,需综合考虑土壤结构、土壤温湿度和大气 CO<sub>2</sub>浓度的影响。

关键词:羰基硫;原位土;异位土;环境因子;蔗田土壤

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)12-2493-07 doi:10.11654/jaes.2017-0666

# Effects of various environmental factors on carbonyl sulfide fluxes from typical sugarcane field soils in southern China

YIN Liang, ZHANG Li-li, CHEN Lu, WANG Xian-feng, HUANG Xing-ran, FANG Xiong, YI Zhi-gang\*

(Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation, College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract**: This study aimed to better understand the influence of global climate change on soil carbonyl sulfide (COS). Dynamic chamber and gas chromatography-mass spectrometry methods were used to investigate the effects of various environmental factors (i.e. temperature, soil water content and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentrations) on soil COS fluxes under laboratory conditions. Soil cores were collected from typical sugarcane fields in south China. Parts of the soil cores were collected without disturbance (i.e., intact soil cores), whereas the remaining were broken and mixed after passing through an 8-mm mesh sieve(i.e., disturbed soil cores). The results showed that COS fluxes from the intact soils were significantly different from those of the disturbed soils. The COS emission rates from intact soils were higher than those from the disturbed soils, whereas the COS uptake rates showed an inverse pattern. COS uptake rates were reduced remarkably after sterilization, indicating that they were mainly controlled by biological processes. Temperature significantly influenced the COS fluxes of disturbed soils, and the lowest COS uptake rate(100.4 pmol  $\cdot$  m<sup>-2</sup>  $\cdot$  s<sup>-1</sup>) occurred at 25 °C. Soil water content significantly affected the COS fluxes in intact soils, and the lowest COS uptake rate(0.9 pmol  $\cdot$  m<sup>-2</sup>  $\cdot$  s<sup>-1</sup>) occurred at 50% water holding capacity. High ambient CO<sub>2</sub> concentration(8520 mg  $\cdot$  m<sup>-3</sup>) inhibited COS emission from intact soils. The results suggested that the effects of soil structure, temperature, humidity, and ambient CO<sub>2</sub> concentration should be considered when estimating the global soil COS fluxes.

Keywords: carbonyl sulfide; intact soils; disturbed soils; environment factors; sugarcane field soils

\* 通信作者:易志刚 E-mail:zgyi@fafu.edu.cn

收稿日期:2017-05-08 录用日期:2017-09-01

作者简介:印 亮(1991一),男,江苏泰兴人,硕士研究生,从事环境生态学研究。E-mail:914939375 @qq.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41173090, JA12087, 41473083)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41173090, JA12087, 41473083)

挥发性有机硫化合物是大气中重要的微量气体 成分,对地球气候、大气光化学过程及环境质量均有 重要的影响<sup>[1]</sup>。羰基硫(COS)是含量最丰富、最难降解 的还原态挥发性含硫气体之一。COS 在对流层活性 低、反应慢,但是当其通过某些介质上升到平流层后, 易通过光化学反应等最终转化为颗粒相硫酸和硫酸 盐,从而导致大气环境酸化并加剧形成气溶胶颗粒, 甚至影响地表气温,同时通过干、湿沉降到达地表的 硫,也会影响土壤、水体的地球化学循环过程,甚至破 坏生态系统平衡<sup>[2-3]</sup>。此外 COS 进入臭氧层后,由于其 具有强还原性,会在光照条件下与臭氧发生反应,从 而破坏并损害臭氧层<sup>[4]</sup>。陆地生态系统释放与吸收含 硫气体是一个长期争论的课题,研究表明旱地土壤是 大气 COS 重要的"汇"<sup>[5]</sup>,但易受环境因素的影响造成 时空变异大,导致全球硫循环中的硫难以估算。

影响土壤 COS 通量的因素主要分为生物因素和 非生物因素。生物因素主要是土壤微生物的作用过 程,如:刘俊峰等阿研究北京地区草地土壤经过高温灭 菌后,即使土壤温度湿度达到最佳,COS 通量也不会 产生明显变化。非生物因素主要包括温度、湿度、土壤 pH、Eh 值以及空气 COS 浓度等。随着全球以 CO2 为 代表的温室气体浓度逐年增加,全球增温呈现明显 加快趋势,预计21世纪将上升1.8~4.0℃门。温度是 土壤 COS 通量的重要影响因子,有关研究表明在最 适温度条件下土壤 COS 通量会达到最大值,如: Kesselmeier 等<sup>[8]</sup>报道欧洲旱地土壤在 15~20 ℃时 COS 吸收达到最大值,刘俊峰等<sup>®</sup>报道的北京草地土 壤吸收 COS 最适温度为 25 ℃。全球暴雨、干旱等极 端天气频繁发生<sup>17</sup>,土壤含水率因而也发生改变。土 壤含水率是影响土壤 COS 通量的另一个重要因子, 土壤释放、吸收 COS 也均存在最佳湿度[5-6,9-10]。有研 究表明土壤含水率的改变会影响土壤释放、吸收 COS 的形式, Yi 等[11] 在研究南方水稻土时发现土 壤较干时会吸收COS,完全淹水状态会释放 COS。部 分室内模拟实验采用过筛土进行培育<sup>18</sup>,过筛过程往 往会破坏土壤的物理结构,主要体现在土壤三相值 (固相、液相和气相)比例的变化,进而改变土壤环 境<sup>121</sup>,比较原位、异位土壤可以更好地研究土壤结构 对土壤 COS 通量的影响。目前有关旱地土壤 COS 通 量的研究引起了广泛关注,主要集中在温带地区,刘 俊峰等<sup>10</sup>研究了我国北方地区 COS 在 5 种富氧型旱 地土壤(北京麦田土壤、山东麦田土壤、人工草坪土 壤、天然草坪土壤和森林土壤)中的吸收与转化,发现

#### 农业环境科学学报 第 36 卷第 12 期

温度、含水率等环境因子对旱地土壤 COS 通量有显 著影响。我国亚热带地区旱田面积很大<sup>[13]</sup>,环境因子 造成旱田 COS 通量的改变,对全球硫循环产生的影 响也不容忽视,但目前有关环境因子对南方旱田 COS 通量的研究相对较少。因此本研究以亚热带典型的甘 蔗田土壤为研究对象,通过室内模拟实验,分别观测 不同环境因子对土壤 COS 通量的影响,对全球变化 背景下土壤 COS 通量精确估算有重要意义。

# 1 材料与方法

## 1.1 土壤样品采集与理化性质

实验所用土壤取自福建省福州市闽侯县一甘蔗 农田(26°26′N,119°14′E),近两个月无施肥、翻耕等 行为,甘蔗处于成熟期。福州是典型的亚热带季风 气候,年均降水量为900~2100 mm,年均温度20~25 ℃<sup>[12]</sup>。其中两种土壤处理方式分别为:原位土采用圆 柱形土钻(内径为11 cm,高为12 cm)无破坏取样,带 回实验室后立即套入自制亚克力材料圆柱形培养罐 (内径为11 cm,高为15 cm)。异位土则是将土壤分层 采集(0~5 cm和5~12 cm),带回实验室,风干后过8 mm筛,去除砂石和植物残体及根系,分层装入上述培 养罐中,填充高度和原位土柱保持一致。蔗田土壤基 本理化性质如下:土壤pH为5.39±0.08,含水率为9.00%, 有机质为(44.80±1.64)g·kg<sup>-1</sup>,水解氮(72.76±1.45) mg·kg<sup>-1</sup>,全氮(1.85±0.06)g·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.13 g·kg<sup>-1</sup>,土 壤三相值见表 1,详细参数见胡宝叶等<sup>[14]</sup>。

# 1.2 实验设计

土柱含水率分别调节至最大持水量(Water holding capacity maximum, MWHC)的 20%、50%和 80%(通过每天人工加蒸馏水保持土柱湿度稳定),在

表1 土壤三相值(均值±标准差,n=3)

Table 1 Percentage of the three phases of soll mean $\pm 5L$	ge of the three phases of soil(mean±SD.)	n=3	)	)
--	--	-----	---	---

实验处理	土壤类型	气相/%	固相/%	液相/%
20%MWHC	原位土	28.26±2.59	50.21±1.57	21.53±2.34**
	异位土	42.02±2.91**	44.57±2.94	13.41±0.10
50%MWHC	原位土	11.62±2.91	59.26±2.66**	29.12±3.79
	异位土	10.61±1.23	49.19±0.76	40.20±1.25**
80%MWHC	原位土	6.51±5.32	54.52±9.48*	38.98±5.02
	异位土	11.34±1.53	38.62±2.17	50.03±3.06*

注:MWHC表示最大持水量;\*\*、\*分别表示同一含水率处理下原位、异位土之间差异在0.01、0.05水平显著。

Note: MWHC-Water holding capacity maximum; \*\*, \* indicate significant difference between intact and disturbed soils at the 0.01,0.05 probability level respectively at the same soil water content. 自制恒温冰箱中以 25 ℃培养 7 d。实验考察 4 种影响因素:

①灭菌对异位土 COS 通量的影响:使用高压蒸 汽对异位土进行 3 次灭菌处理后,保持异位土壤含水 率为接近自然状态的 20%MWHC,温度为 25 ℃,设置 3 个不同 COS 进气浓度(418±206)ng·m<sup>-3</sup>(AIR)、 (6696±134)ng·m<sup>-3</sup>(COS-1)和(13 393±263)ng·m<sup>-3</sup> (COS-2),分别为当前空气 COS 浓度 0.3、5 和 10 倍。 土柱在设定温度和含水率下预培养 24 h 后进行气体 采样,每个处理设置 3 个重复。

②不同温度对原位、异位土 COS 通量的影响:保 持土壤含水率 20%MWHC,分别设置 3 个温度(15、25 ℃和 35 ℃)处理和 3 个不同进气 COS 浓度(同上)。土 柱在设定温度和含水率下预培养 24 h 后进行气体采 样,每个处理 3 个重复。

③不同含水率对原位、异位土壤 COS 通量的影 响:保持培养温度为25℃,分别设置 3 个不同含水率 (20%、50%和 80%MWHC)和 3 个不同 COS 进气浓度 (同上),土柱在设定温度和含水率下预培养 24 h 后进 行气体采样,每个处理 3 个重复。

④不同 CO<sub>2</sub> 浓度对原位土 COS 通量的影响:保 持原位土壤含水率为 50%MWHC,温度 25 ℃(COS 释 放最大),进气 COS 浓度控制在(418±206)ng·m<sup>-3</sup>,调 节进气 CO<sub>2</sub> 浓度为 0、393、1375、2357、4321 mg·m<sup>-3</sup> 和 8520 mg·m<sup>-3</sup>,分别为 0 和当前大气 CO<sub>2</sub> 浓度的 0.5、2、 3、6 倍和 10 倍),土柱在设定温度和含水率下预培养 24 h 后进行气体采样,每个处理设置 3 个重复。

## 1.3 气体样品采集和处理

气体样品采集使用动态箱法,进气 30 min 保证 容器内的气体混合均匀,气体通过流量计控制在 1.3 L·min<sup>-1</sup>。气体样品收集于 Teflon 气袋中避光保存,用 于 COS 分析。

COS 测定在郑丽丽等<sup>115]</sup>基础上进行调整,采用预 浓缩法进样方式,连接 7890B-5977A GC-MS 进行测 定。将 Teflon 采样袋接入预浓缩系统,经三级液氮冷 肼,去除样品中的 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub>,并经-150 ℃冷聚焦进 行分离检测。色谱条件:采用 HP-5 色谱柱;升温程序 为:初始温度 10 ℃,保持 3 min,后以 5 ℃·min<sup>-1</sup> 升到 120 ℃,再以 10 ℃·min<sup>-1</sup> 升到 250 ℃保持 20 min。质 谱条件:EI 电离源。每个样品有 3 个重复,每个样品 测 1 次,数据采集采用单扫模式(SIM),然后采用标 准质谱图库(NIST11)、标准气体保留时间双重定性, 在获得总离子(TIC)质谱图后,采用 NIST 标准图谱进 行自动检索,筛选匹配度大于 80%的物质,并将标气 质谱图保留时间及特征离子进行比对,从而确定被测 化合物。本研究中目标化合物与标气中的目标化合物 匹配度大于 80%,保留时间窗口阈值低于 30 s。采用 峰面积-浓度标准曲线内标法进行定量。

#### 1.4 数据分析

COS 通量指单位时间单位面积箱内该气体流通 量,正值表示土壤作为"源",即土壤释放该气体;负值 表示土壤作为"汇",即土壤吸收该气体<sup>[11]</sup>,具体计算 公式如下:

$$F = \frac{\Delta C \cdot Q \cdot 273.15}{S \cdot V_{\rm m}(273.15 + T)} \tag{1}$$

式中:F为气体通量,pmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; $\Delta C$ 为进出气口浓 度差,pmol·mol<sup>-1</sup>;Q表示进气口流量,L·s<sup>-1</sup>;S表示土 壤面积,m<sup>2</sup>; $V_m$ 表示标准气体下摩尔体积,22.44 L· mol<sup>-1</sup>;T为土壤温度, $\mathbb{C}$ 。

利用 SPSS 18.0 进行单因素方差分析(ANOVA), 以 Duncan 多重检验法检验不同处理对 COS 通量的 影响。使用 Sigmaplot 12.5 进行绘图。

# 2 结果与分析

## 2.1 灭菌对 COS 通量的影响

如图 1 所示,当进气浓度为 AIR 时,灭菌土 COS 释放较多,为(39.78±16.84)pmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,且显著高于 非灭菌土(P<0.05);进气浓度分别为 COS-1、COS-2, 灭菌土壤释放 COS 分别为(11.53±19.69)、(53.29± 63.36)pmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,且显著高于非灭菌土(P<0.05)。



不同小写字母表示非灭菌土不同 COS 浓度间具有显著性差异;\*表示同一 COS 浓度下灭菌、非灭菌土间具有显著性差异(P<0.05)

Different lowercase letters indicate significant difference among different COS concentrations for not sterilization soils;\* indicate significant difference between sterilization and not sterilization soils(*P*<0.05)

#### 图 1 灭菌对异位土 COS 通量的影响(均值±标准差,n=3) Figure 1 Effect of sterilization on disturbed soil COS fluxes (mean±SD,n=3)

无论 COS 进气浓度如何变化,灭菌土 COS 释放无明 显变化,而非灭菌土 COS 释放随进气COS 浓度升高 显著降低(P<0.05)。

#### 2.2 土壤处理方式(原位土、异位土)对 COS 通量的影响

整体而言,原位土释放 COS 略高于异位土,吸收 COS 低于异位土。控制土壤含水率为 20%MWHC,当 进气浓度为 AIR,温度为 25 ℃时,原位土 COS 释放显 著高于异位土(P<0.05)(图 2A);当进气浓度为 COS-1,温度为 15 ℃,原位土 COS 吸收显著低于异位土 (P<0.05)(图 2B)。控制温度为 25 ℃,当进气浓度为 AIR 时,原位土释放均显著高于异位土(P<0.05)(图 3A);当进气浓度 COS-1,含水率为 20%和 80% MWHC,以及进气浓度为 COS-2,含水率为 50%和 80% MWHC 时,原位土 COS 吸收显著低于异位土 (P<0.05)(图 3B、图 3C)。

#### 2.3 COS 通量对土壤温度变化的响应

控制土壤含水率为 20%MWHC, 当进气浓度为 AIR(图 2A),温度为 25 ℃时,原位土的释放最多,为 (33±11.03)pmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,且显著高于其他两个温度 (P<0.05);而在此条件下异位土 COS 的通量几乎没 有变化。当进气浓度为 COS-1(图 2B),原位土 COS 的吸收几乎相同;当温度为 25 ℃时,异位土 COS 的 吸收最少,为(100.37±28.98)pmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,且显著低 于其他两个温度(P<0.05)。当进气浓度为 COS-2(图 2C),温度为 35 ℃时,原位土 COS 的吸收显著被抑制 (P<0.05)。当温度为 25 ℃时,异位土 COS 的吸收最 少,为(164.90±55.44)pmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,且显著低于其他 两个温度(P<0.05)。

### 2.4 COS 通量对土壤湿度变化的响应

控制土壤温度为 25 ℃,当进气浓度为 AIR(图 3A),含水率为 50%MWHC 时,原位土 COS 的释放最 多,为(46.97±14.84) pmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,且显著高于其他两 个含水率(P<0.05);当含水率为 80%MWHC 时,异位 土 COS 的通量显著低于其他两个含水率(P<0.05), 且此时由释放转变为吸收。当进气浓度为 COS-1、 COS-2(图 3B、图 3C),含水率为 50%MWHC 时,原位 土 COS 的吸收均最少,分别为(-1.20±0.52)、(-36.5± 33.52)pmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,且显著低于其他两个含水率(P< 0.05);当进气浓度为 COS-2,含水率为 80% MWHC 时,异位土 COS 的吸收显著增加(P<0.05)。

## 2.5 COS 通量对大气 CO2 浓度变化的响应

如图 4 所示,当进气 CO<sub>2</sub> 浓度为 0 时,COS 释放 最大,为(64.42±13.40)pmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,当进气 CO<sub>2</sub> 浓度



不同小写字母表示原位土不同温度间具有显著性差异;不同大写字母 表示异位土不同温度间具有显著性差异;\*表示原位、异位土间具有 显著性差异(P<0.05)

Different lowercase letters indicate significant difference among different soil temperature for intact soils; Different capital letters indicate significant difference among different temperature for disturbed soils;\* indicate significant difference between intact and disturbed soils(*P*<0.05)

# 图 2 温度对 COS 通量影响(均值±标准差,n=3)

Figure 2 Effect of temperature on soil COS fluxes(mean $\pm$ SD, n=3)

为 8520 mg·m<sup>-3</sup> 时,COS 释放最小,为(11.50±6.85) pmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。随着进气 CO<sub>2</sub> 浓度的上升,土壤释放 COS 呈现下降的趋势,尤其与 0 mg·m<sup>-3</sup> 比较时,其他 CO<sub>2</sub> 浓度下 COS 释放均显著被抑制(*P*<0.05)。







Different lowercase letters indicate significant difference among different soil water content for intact soils; Different capital letters indicate significant difference among different water content for disturbed soils;\* indicate significant difference between intact and disturbed soils(*P*<0.05)



# 3 讨论

2017年12月

#### 3.1 微生物对 COS 通量的影响

已有研究发现微生物是影响土壤释放或吸收 COS 的主要因素<sup>[8,16]</sup>。本研究结果显示灭菌土 COS 的



不同小写字母表示原位土 COS 通量在不同 CO2 浓度之间具有显著性 差异(P<0.05)

Lowercase letters indicate significant difference among different  $CO_2$ concentration for intact soils COS fluxes(P<0.05)

图 4 CO<sub>2</sub> 浓度对原位土 COS 通量的影响(均值±标准差, n=3)

Figure 4 Effect of CO<sub>2</sub> concentration on intact soil COS fluxes (mean±SD, n=3)

释放均显著高于非灭菌土(图 1),这表明土壤释放/吸收COS均是重要的生物过程,尤其是土壤对 COS 的吸收。诸多研究表明,影响土壤吸收 COS 的碳酸酐 (Carbonic anhydrase,CA)酶确实存在并会参与到COS 的吸收,Kesselmeier 等<sup>18</sup>将 CA 酶抑制剂加入土壤后 发现土壤 COS 的吸收显著降低,这与本研究结论一致。土壤 COS 在 CA 酶参与下分解生成 H<sub>2</sub>S 和CO<sub>2</sub>,这 个过程易受到土壤温、湿度等因素的影响,因此有关 土壤 COS 通量的研究常常会重点关注各种环境因子 的变化。

#### 3.2 土壤结构破坏对 COS 通量的影响

目前有关 COS 通量研究大多采用过筛土进行室 内模拟实验<sup>[8]</sup>,本研究结果显示原位土释放 COS 显著 大于异位土,吸收 COS 显著低于异位土(图 2、图 3)。 异位土在风干和过筛过程中会对土壤结构造成破坏 (表1),原位土气、液相比例小于异位土,固相比例大 于异位土,土壤含水率和土壤中液相与固相之比成正 比关系,因此原位土实际含水率小于异位土。这造成 土壤微生物生存的环境发生变化,进而影响土壤 COS 的通量。目前有关 COS 通量与土壤结构关系的研究 相对较少,但针对其他气体的研究时有报道。例如:胡 宝叶等<sup>[14</sup>研究南方蔗田土壤 NO 通量变化发现,土壤 结构破坏后NO 通量显著降低:Porre 等印研究农田 土壤结构对N<sub>2</sub>O的影响发现,土壤结构对CO<sub>2</sub>以及 N<sub>2</sub>O 通量有显著影响。这些研究均说明土壤结构对气 体通量有影响,考虑到原位土更接近野外实际状况, 因此用模型估算 COS 通量时要尽可能选择原位土。

#### 3.3 温度对 COS 通量的影响

温度对 COS 通量的影响已有较多报道<sup>[8-9,18]</sup>,本研 究发现原位土最佳释放 COS 的温度为 25 ℃,最佳吸 收 COS 的温度介于 15 ℃到 25 ℃(图 2)。温度对于所 有生物过程的影响均很大,适宜的温度会促进微生物 的生长,温度过高或过低均会使微生物活性发生变化 而抑制土壤 COS 的通量。本研究通过改变进气 COS 浓度使土壤表现为释放或吸收,土壤释放 COS 主要来 自微生物硫酸盐的还原以及含硫氨基酸的降解<sup>[16]</sup>,土 壤吸收 COS 主要受 CA 酶活性的影响<sup>[8]</sup>,影响土壤释 放与吸收的微生物种类不同,因此最佳温度可能也 不一致。温带地区报道的最佳温度介于 15~20 ℃之 间<sup>[8]</sup>,本研究地区处于亚热带,因此最佳温度略高于 温带地区。

异位土在同一含水率、不同温度下 COS 的释放、 吸收与原位土的表现趋势不同(图 2A),当土壤释放 COS时,异位土不存在最佳释放温度,主要原因是前 文提到的土壤结构破坏对土壤 COS 的影响。异位土 实际含水率大于原位土,因此当土壤含水率超过一定 限度后,土壤含水率对土壤释放 COS 可能发挥了更 重要的作用,进而掩盖了温度对土壤 COS 通量的影 响。李新华等<sup>16</sup>研究黄河三角洲翅碱篷湿地 COS 释放 动态时发现土壤含水率是影响土壤释放 COS 的主要 因素,温度是次要因素。温度为 25 ℃时异位土 COS 的吸收反而被抑制(图 2B、图 2C),这与部分研究结 论相反[7-8]。一方面,前人研究进气类型采用的是普通 空气,本研究中进气 COS 浓度突然升高,土壤微生物 及酶可能需要适应过程,导致微生物及酶对土壤吸收 COS 的影响减弱;另一方面,土壤吸收 COS 主要存在 于土壤表层<sup>16</sup>,随着含水率的提升,水会在土壤和空 气交换层形成膜<sup>[18]</sup>,此时可能主要是水参与吸收  $\cos^{\circ}$ 

# 3.4 含水率对 COS 通量的影响

原位土释放 COS 的最佳含水率为 50% MWHC (图 3),说明含水率是影响土壤 COS 通量的另一个重 要因素。当含水率较低时,土壤微生物基本所需水分 得不到满足;当含水率超过一定限度后,会影响土壤 中 O<sub>2</sub> 的可利用率以及气体扩散率,进而影响土壤中 微生物的活性<sup>[19]</sup>。COS-1和 COS-2处理,原位土吸收 COS 在 50% MWHC 时显著被抑制(图 3)。这主要原 因是当含水率在较低水平时,20% MWHC 可能成为微 生物比较适应的含水率,随着含水率升高直接影响了 土壤中可利用的 O<sub>2</sub>,进而抑制了土壤中微生物及酶

#### 农业环境科学学报 第 36 卷第 12 期

的活性。kuhn等<sup>[5]</sup>研究发现含水饱和土壤吸收 COS 高于未饱和土壤 84%,其原因主要是饱和土壤 Eh 值 低于未饱和土壤,这同样适用于本研究。Devai等<sup>[20]</sup>发 现在低 Eh 值状态下,土壤微生物活性更高,因此土 壤中 CA 酶活性可能随之升高,从而促进了土壤吸收 COS。较高进气 COS 浓度下含水率为 80%MWHC 时, 异位土吸收 COS 显著上升同样用此机理解释(图 3C)。

在 AIR 处理时(图 3A),异位土含水率在 20% MWHC 和 50%MWHC 时释放 COS,尤其当含水率为 80%MWHC 时,土壤由释放变成了吸收 COS,这与前 人研究不一致,Yi 等<sup>[11]</sup>发现水稻土壤较干时会吸收 COS,完全淹水状态会释放 COS。这主要由于实验的 采样方式不同,其采用进气方式是普通空气,而本研 究是通过降低 COS 浓度使蔗田土壤表现为释放 COS,大气与土壤之间原本就存在浓度差,因此造成 土壤释放 COS 的最主要因素是物理因素(大气 COS浓 度),随着含水率继续增加,生物因素又占主导因素; 另外 Yi 等<sup>[11]</sup>实验的土壤长期处于淹水状态,土壤主 要利用方式的不同也有可能是造成这种差异的原因。

#### 3.5 CO<sub>2</sub> 浓度对 COS 通量的影响

高浓度的大气 CO<sub>2</sub> 能够影响土壤 COS 的通量以 及土壤呼吸<sup>[21]</sup>。本研究发现随着大气 CO<sub>2</sub> 浓度的上 升,土壤释放 COS 显著被抑制(图 4)。COS 与 CO<sub>2</sub> 的 结构相似,且以相似的途径进入植物叶片中,因此部分 研究使用 COS 代替 CO<sub>2</sub> 来研究植物光合作用过程<sup>[21]</sup>。 土壤释放 COS 机理虽然还不是十分清楚,但一般认 为与分解土壤硫化物的微生物有关,因此高浓度的 CO<sub>2</sub> 可能会与 COS 竞争土壤微生物,从而抑制土壤释 放 COS。另外,有研究发现大气 CO<sub>2</sub> 浓度的上升会对 土壤微生物活性产生影响,Kampichler 等<sup>[23]</sup>研究高浓 度 CO<sub>2</sub> 对土壤微生物响应时发现土壤蛋白酶、木聚糖酶 显著受到抑制,但大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升是否也会抑制分解 土壤硫化物微生物及酶的活性值得进一步去研究。

# 4 结论

(1)原位土释放 COS 高于异位土,吸收 COS 低于 异位土,过筛土模拟实验可能低估了土壤 COS 释放量。

(2)土壤微生物是影响土壤 COS 通量的最主要 因素,温度、含水率和大气 CO<sub>2</sub> 浓度会影响微生物活 性从而影响土壤 COS 通量。灭菌后土壤 COS 的释放 显著高于灭菌前;25 ℃是蔗田土壤释放 COS 的最佳 温度;最佳吸收 COS 的温度在 15~25 ℃之间;50%土 壤最大持水量是释放 COS 的最佳含水率;在一定 CO<sub>2</sub> 浓度范围内,土壤 COS 释放随大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升而 下降。

#### 参考文献:

[1] 易志刚.珠江三角洲典型陆地生态系统挥发性有机硫化合物地气 交换通量研究[D]. 广州:中国科学院研究生院广州地球化学研 究所, 2006.

YI Zhi-gang. Exchange fluxes of volatile organic sulfur compounds between land surfaces and atmosphere in selected typical terrestrial ecosystems in the Pearl River Delta[D]. Guangzhou; China Academy of Sciences Guangdong Institute of Geochemistry, 2006.

- [2] Xu L, Baldocchi D D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2004, 123(1/2):79–96.
- [3] Vet R, Artz R S, Carou S, et al. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 93(3/4):3–100.
- [4] Kitz F, Gerdel K, Hammerle A, et al. In situ soil COS exchange of a temperate mountain grassland under simulated drought[J]. Oecologia, 2017, 183(3):851-860.
- [5] Kuhn U, Ammann C, Wolf A, et al. Carbonyl sulfide exchange on an ecosystem scale: Soil represents a dominant sink for atmospheric COS[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(6):995–1008.
- [6] 刘俊锋, 耿春梅, 牟玉静, 等. 羰基硫(COS)在土壤中的吸收与转化
  [J]. 环境化学, 2004, 23(6):615-620.
  LIU Jun-feng, GENG Chun-Mei, MOU Yu-jing, et al. Uptake and conversion of carbonyl sulfide(COS) by soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2004, 23(6):615-620.
- [7] IPCC. Climate change: The physical science basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [8] Kesselmeier J, Teusch N, Kuhn U. Controlling variables for the uptake of atmospheric carbonyl sulfide by soil[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1999, 104(D9):11577–11584.
- [9] Whelan M E, Min D H, Rhew R C. Salt marsh vegetation as a carbonyl sulfide (COS) source to the atmosphere[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 73(6):131–137.
- [10] Li X H, Zhu Z, Yang L, et al. Emissions of biogenic sulfur gases (H<sub>2</sub>S, COS) from *Phragmites australis*, coastal marsh in the Yellow River estuary of China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(6):770–778.
- [11] Yi Z G, Wang X M, Sheng G, et al. Exchange of carbonyl sulfide(COS) and dimethyl sulfide(DMS) between rice paddy fields and the atmosphere in subtropical China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2008, 123(1):116–124.
- [12] Chen Z, Cui Y L, Liu F P, et al. Effect of irrigation and fertilization on

soil three phase composition change[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014, 69(3):131-138.

- [13] Quan X U, Rui W Y, Bian X M, et al. Regional differences and characteristics of soil organic carbon density between dry land and paddy field in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2007, 6(8):981–987.
- [14] 胡宝叶, 王贤凤, 陈 鹭, 等. 不同环境因子对南方典型蔗田原位和 异位土壤 NO 通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9):1824– 1828.

HU Bao-ye, WANG Xian-feng, CHEN Lu, et al. Effects of different environment factors on NO fluxes from intact and disturbed soils from the typical sugarcane field in southern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9):1824–1828.

[15] 郑丽丽, 郭萍萍, 易志刚. 鼎湖山典型森林土壤苯系物通量对模拟 氮沉降的响应[J]. 生态环境学报, 2015, 24(3): 396-401. ZHENG Li-li, GUO Ping-ping, YI Zhi-gang. Responses of soil BTEX fluxes to stimulated nitrogen desposition in two domainated forests of Dinghushan, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24 (3): 396-401.

- [16] 李新华, 郭洪海, 杨丽萍, 等. 黄河三角洲翅碱篷湿地硫化氢和羰基 硫排放动态研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2):786-791.
  LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, et al. Study on dynamics of hydrogen sulfide and carbonyl sulfide emission fluxes from *Suaeda salsa* marsh in the Yellow River estuary[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):786-791.
- [17] Porre R J, Groenigen J W V, Deyn G B D, et al. Exploring the relationship between soil mesofauna, soil structure and N<sub>2</sub>O emissions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2016, 96:55–64.
- [18] Kenichi K, Haruo T, Katsuyuki M. Emission of dimethyl sulfide, carbonyl sulfide, and carbon bisulfide from paddy fields[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1992, 38(4):709–716.
- [19] Whelan M E, Hilton T W, Berry J A, et al. Carbonyl sulfide exchange in soils for better estimates of ecosystem carbon uptake[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2016, 16:3711–3726.
- [20] Devai I, Delaune R D. Formation of volatile sulfur compounds in salt marsh sediment as influenced by soil redox condition[J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(4):283–287.
- [21] Kesselmeier J, Hubert A. Exchange of reduced volatile sulfur compounds between leaf litter and the atmosphere[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(29):4679–4686.
- [22] Berry J, Wolf A, Campbell J E, et al. A coupled model of the global cycles of carbonyl sulfide and CO<sub>2</sub>: A possible new window on the carbon cycle[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2013, 118 (2):842–848.
- [23] Kampichler C, Kandeler E, Bardgett R D, et al. Impact of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on soil microbial biomass and activity in a complex, weedy field model ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(3):335–346.