

# 样品保存条件对温室气体浓度的影响

王婧瑜<sup>1</sup>, 刘志铭<sup>1</sup>, 曹玉军<sup>1</sup>, 吕艳杰<sup>1</sup>, 魏雯雯<sup>1</sup>, 吴兴宏<sup>1</sup>, 王永军<sup>1,2</sup>, 姚凡云<sup>1\*</sup>

(1. 吉林省农业科学院, 长春 130033; 2. 吉林农业大学农学院, 长春 130118)

**摘要:**本研究以CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O标准混合气体和12 mL真空玻璃样品瓶等为试验材料,探讨了气体样品瓶的保存天数(1~180 d)、保存温度(室温条件为10~25 °C,冷冻条件为-18 °C)和密封垫使用次数(2、10、20、30、40、50、60次)对温室气体浓度变化的影响。研究结果表明:与保存1 d内的气体样品相比,CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O浓度在保存天数分别为60、120、90 d时降低了1.5%、0.5%和2.0%。保存天数和保存温度对CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O浓度的影响均存在交互作用,3种气体在冷冻条件下的保存天数分别为30、90、150 d,分别较室温条件下延长了10、30、130 d。因此,为确保温室气体检测结果的准确性,田间温室气体样品如不能及时检测,建议在冷冻条件下保存。此外,密封垫的使用次数对CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O浓度均没有影响,但却影响CO<sub>2</sub>浓度。冷冻保存条件下,当密封垫使用2次、10~50次和60次时,建议分别在120~150 d、60~90 d和30~60 d内完成检测。

**关键词:**室温;冷冻;密封垫使用次数;CH<sub>4</sub>;CO<sub>2</sub>;N<sub>2</sub>O

中图分类号:S181

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2022)04-0113-05

## Effects of Storage Conditions on Greenhouse Gases Concentrations

WANG Jingyu<sup>1</sup>, LIU Zhiming<sup>1</sup>, CAO Yujun<sup>1</sup>, LYU Yanjie<sup>1</sup>, WEI Wenwen<sup>1</sup>, WU Xinghong<sup>1</sup>, WANG Yongjun<sup>1,2</sup>, YAO Fanyun<sup>1\*</sup>

(1. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033; 2. Faculty of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** In this study, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O standard gases mixtures and 12 mL vacuum flask was used as experiment materials, to study the influences of cap use frequencies (2, 10, 20, 30, 40, 50, 60 times), storage temperatures (room temperature at 10–25 °C, freezing at –18 °C) and storage days (1–180 days) on the change of greenhouse gases (GHGs) concentration. The results showed that, compared with the gas samples stored for 1 day, the concentrations of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O decreased by 1.5%, 0.5% and 2.0% when the store 60, 120, 90 days, respectively. The effects of storage days and storage temperature on the concentrations of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O were interactive. The storage days of the three gases under freezing conditions were 30, 90, 150 days, respectively, which were 10, 30, 130 days longer than that under room temperature. Therefore, field GHG samples that cannot be detected in time are recommended to be stored under freezing conditions for the accuracy of GHGs detection results. In addition, the cap use frequency had no effects on the concentration of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O, but it did affect the concentration of CO<sub>2</sub>. At freezing temperature, GHGs should be tested within 20–150 days, 60–90 days and 30–60 days, when the cap was used twice, 10–50 times and 60 times.

**Key words:** Room temperature; Freezing; Influences of cap use frequencies; CH<sub>4</sub>; CO<sub>2</sub>; N<sub>2</sub>O

2018年10月,联合国政府间气候变化专门委

收稿日期:2020-10-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0300303);吉林省科技发展计划项目(20200702011NC)

作者简介:王婧瑜(1989-),女,助理研究员,硕士,主要从事作物生产系统综合管理研究。

通讯作者:姚凡云,女,博士,副研究员,E-mail: yaofanyun@163.com

员会(IPCC)发布《全球升温1.5 °C特别报告》,报告强调当前迫切需要采取严厉措施,防止全球变暖超过1.5 °C<sup>[1]</sup>。面对日益严峻的气候变化形势,温室气体减排已成为各国政府和科学家关注的焦点<sup>[2-4]</sup>。大气中CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O是最重要的温室气体,对温室效应的贡献率占了近80%<sup>[5]</sup>。温室气体的监测与分析是进行气候变化研究的重要科学基础,可为估算全球温室气体收支和制定有效减排

措施提供科学依据。世界各国均高度重视温室气体观测和分析过程中的质量保证工作<sup>[6-7]</sup>。农田是温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)的重要排放源<sup>[8]</sup>,全球农业温室气体排放约占人类活动产生温室气体排放总量的10%~12%<sup>[9]</sup>。农田温室气体浓度监测的准确性直接关系到农田温室气体排放通量的准确性,影响温室气体产生温室效应的判断。

国内外开展陆地生态系统温室气体排放研究使用最为广泛的测定技术是静态箱技术<sup>[10]</sup>,目前静态箱-气相色谱法所测温室气体多用铝箔气体样品袋或真空玻璃瓶保存<sup>[11-13]</sup>,然而铝箔气体样品袋不但所需气体样品量大,气体样品保存时间短(一般可保存7 d)<sup>[14-15]</sup>,而且不便于运输。而顶空瓶通常采用优质材料加工而成,适用于各种质谱待测气体的保存,是将温室气体直接导入气相色谱仪进行分离和检测的理想进样装置,已在温室气体检测中得到广泛使用。但密封垫内外两侧的压力差或浓度差会导致气体的泄露<sup>[16]</sup>。为不使待测样品在保存或运输过程中造成成分损失或污染,监测人员都希望气体样品在采集后马上进行分析。有时候样品不能及时分析,可能会给试验结果带来一定的影响<sup>[17]</sup>,随着样品瓶密封垫使用次数的增加,样品瓶的气密性也会受到影响,从而影响样品瓶中样品浓度。

要确定气体样品在保存或运输过程中成分的变化比较困难,因此,研究取气后样品如何保存才能使其变化降到最低程度是十分必要的。目前研究中多陈述了抽取气体样品及所用真空瓶的体积<sup>[18-20]</sup>,虽然温室气体玻璃瓶采样标准方法(QX/T164-2012)中要求从样品采集到完成实验室分析一般不超过半年<sup>[21]</sup>,但气体样品的保存温度和密封垫使用次数对气体样品浓度的影响尚不明确。因此,本研究将温室气体存放在不同使用次数的密封垫样品瓶中,分别放在冷冻和温室条件下保存,观察温室气体浓度随时间的变化,以期为温室气体样品的保存提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

本研究所需材料有农田温室气体研究中常用的35 mL注射器(包括三通和针头,针长1.6 cm,针粗0.45 mm)、12 mL真空玻璃样品瓶(密封垫由丁基橡胶材料加工而成)以及混合标准气体,注射器和玻璃样品瓶由北京精阳流体科技有限公司提供,标准样品由长春巨洋气体有限责任公司提

供(经国家质量监督检验检疫总局批准),标准气体中CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O浓度(摩尔分数)分别为314.5、20.5、5.03 μmol/mol(平衡气为氮气)。

### 1.2 样品保存方法

试验于2017年8月8日至2018年2月4日在吉林省农业科学院农业资源与环境研究所/玉米国家工程实验室进行。注入标准气体的玻璃瓶装入自封袋密封后分别在室温(10~25 °C)和冷冻(-18 °C)条件下保存,样品瓶密封垫扎针次数分别为2(抽真空和气体样品注入)、10、20、30、40、50、60次,由GAS-300A型气体进样器进行扎针,保存时间分别为1、5、10、20、30、60、90、120、150、180 d,每个处理重复3次。用注射器抽取30 mL标准气体分别注入不同扎针次数密封垫的样品瓶中,样品在达到保存时间后进行测定,冷藏和冷冻样品恢复室温后24 h内完成测定,在每次测定前均用当天抽真空和注射的标准气校准仪器。

### 1.3 仪器与分析条件

采用岛津GC-2010 Plus气相色谱仪进行样品测定分析,气相色谱仪配有电子捕获检测器(ECD)、火焰离子检测器(FID)以及精阳流体GAS-300A型气体进样器。色谱仪分析柱为毛细柱,柱箱温度为50 °C,载气为高纯(纯度≥99.999%)氮气,N<sub>2</sub>O测定用电子捕获检测器(ECD),工作温度350 °C。CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>测定采用氢火焰(FID)检测器,工作温度200 °C。ECD尾吹气为95%的氩气和5%的甲烷混合气,辅助气为高纯空气和高纯氢气。气相色谱仪可测定成分为CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O,CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>测定范围均为0.5 μmol/mol以上,N<sub>2</sub>O检测范围为0.03 μmol/mol以上,进样体积1.0 μL,分析时间1 min,进样重复性RSD≤2.0%。GAS-300A型气体进样器除了自动进样外,还用于样品瓶使用前的抽真空处理,每个样品瓶抽真空时间为35 s,预热时间为15 s。

### 1.4 数据处理及分析方法

采用Excel 2010对数据进行处理,三种温室气体浓度变化的差异性采用SPSS 18.0软件中重复测量方差分析(Repeated measures ANOVA)进行统计比较,均值比较采用最小显著性差异法(LSD),显著水平为0.05,采用Origin 2016软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 CO<sub>2</sub>浓度变化

气体样品瓶的保存天数能够影响CO<sub>2</sub>浓度( $P < 0.001$ ,图1、表1)。CO<sub>2</sub>浓度保存30 d内无显著变

化( $P>0.05$ ),随着保存时间超过 60 d,  $\text{CO}_2$  浓度可由保存 1 d 的  $314.9 \mu\text{mol/mol}$  降为 60 d 的  $310.2 \mu\text{mol/mol}$ , 降幅为 1.5%, 显著低于保存 1 d 时的  $\text{CO}_2$  浓度( $P<0.001$ )。保存温度对样品瓶中的  $\text{CO}_2$  浓度没有显著影响( $P>0.05$ )。另外,密封垫的使用次数对样品瓶中的  $\text{CO}_2$  浓度有显著影响( $P<0.001$ ,图 1、表 1)。密封垫使用达到 10 次时  $\text{CO}_2$  浓度显著降低( $P<0.05$ ),由使用 2 次时的  $314.9 \mu\text{mol/mol}$  降为 10 次时的  $312.8 \mu\text{mol/mol}$ , 降幅为 0.67%;使用次数达到 60 次时,  $\text{CO}_2$  浓度为  $310.7 \mu\text{mol/mol}$ , 降幅为 1.3%。

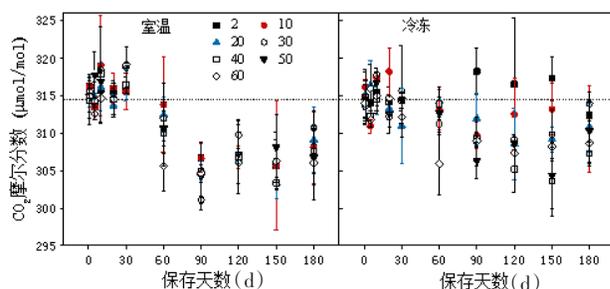


图 1 不同保存条件下  $\text{CO}_2$  浓度变化

表 1  $\text{CO}_2$  浓度重复测量方差分析结果

项目	自由度	F 值	P 值
保存天数	9	63.565	<0.000 1
保存温度	1	0.009	0.925
使用次数	6	7.892	<0.000 1
保存温度×使用次数	6	0.173	0.982
保存天数×保存温度	9	13.791	<0.000 1
保存天数×使用次数	54	1.591	0.015
保存天数×保存温度×使用次数	54	1.222	0.174

样品的保存天数与保存温度和密封垫的使用次数对  $\text{CO}_2$  浓度的影响均具有交互作用(均为  $P<0.05$ ,图 1、表 1)。在室温条件下,样品保存 20 d 内  $\text{CO}_2$  浓度无显著变化( $P>0.05$ ),保存天数超过 30 d,  $\text{CO}_2$  浓度由保存 1 d 的  $315.2 \mu\text{mol/mol}$  变为 30 d 的  $318.0 \mu\text{mol/mol}$ , 变化幅度为 0.89%;在冷冻条件下,样品保存 30 d 内  $\text{CO}_2$  浓度无显著变化( $P>0.05$ ),保存天数超过 60 d 时,  $\text{CO}_2$  浓度由 1 d 的  $314.4 \mu\text{mol/mol}$  降为 60 d 的  $310.2 \mu\text{mol/mol}$ , 降幅为 1.3%。密封垫使用 2 次时,样品保存 180 d 内  $\text{CO}_2$  浓度无显著变化( $P>0.05$ ),密封垫使用达到 10~50 次时,样品保存 60 d 内  $\text{CO}_2$  浓度无显著变化( $P>0.05$ ),样品保存天数达到 90 d 时  $\text{CO}_2$  浓度显著降低( $P<0.05$ );密封垫使用达到 60 次时,  $\text{CO}_2$  可保存 30 d 无显著变化( $P>0.05$ ),60 d 后  $\text{CO}_2$  浓度显著降低( $P<0.05$ )。

## 2.2 $\text{CH}_4$ 浓度变化

气体样品瓶的保存天数能够影响  $\text{CH}_4$  浓度( $P<0.001$ ,图 2、表 2)。样品保存 90 d 内  $\text{CH}_4$  浓度无显著变化( $P>0.05$ ),保存时间超过 120 d,  $\text{CH}_4$  浓度由保存 1 d 的  $20.46 \mu\text{mol/mol}$  降为 120 d 的  $20.35 \mu\text{mol/mol}$ , 降幅为 0.54%。保存温度和使用次数对样品瓶中的  $\text{CH}_4$  浓度没有显著影响( $P>0.05$ )。

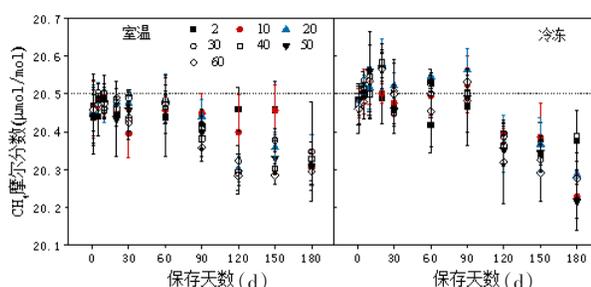


图 2 不同保存条件下  $\text{CH}_4$  浓度变化

表 2  $\text{CH}_4$  浓度重复测量方差分析结果

项目	自由度	F 值	P 值
保存天数	9	62.624	<0.000 1
保存温度	1	2.954	0.097
使用次数	6	0.636	0.700
保存温度×使用次数	6	0.801	0.577
保存天数×保存温度	9	3.582	0.008
保存天数×使用次数	54	0.981	0.521
保存天数×保存温度×使用次数	54	0.765	0.870

样品瓶的保存天数与保存温度对  $\text{CH}_4$  浓度具有交互作用( $P<0.05$ ,图 2、表 2)。室温条件下,样品保存 60 d 内  $\text{CH}_4$  浓度无显著变化( $P>0.05$ ),保存天数达到 90 d,  $\text{CH}_4$  浓度显著降低( $P<0.05$ ),由保存 1 d 时的  $20.45 \mu\text{mol/mol}$  降为保存 90 d 的  $20.41 \mu\text{mol/mol}$ , 降幅为 0.23%;冷冻条件下,样品保存 90 d 内  $\text{CH}_4$  浓度无显著变化( $P>0.05$ ),当保存天数达到 120 d 时,  $\text{CH}_4$  浓度显著降低( $P<0.01$ ),由保存 1 d 时的  $20.47 \mu\text{mol/mol}$  降为保存 120 d 的  $20.37 \mu\text{mol/mol}$ , 降幅为 0.49%。样品瓶的保存天数与密封垫使用次数对  $\text{CH}_4$  浓度无交互作用( $P>0.05$ )。

## 2.3 $\text{N}_2\text{O}$ 浓度变化

气体样品瓶的保存天数能够影响  $\text{N}_2\text{O}$  浓度( $P<0.001$ ,图 3、表 3)。 $\text{N}_2\text{O}$  浓度保存 60 d 内无显著变化( $P>0.05$ ),保存时间达到 90 d,  $\text{N}_2\text{O}$  浓度可由保存 1 d 天的  $5.01 \mu\text{mol/mol}$  降为 90 d 的  $4.91 \mu\text{mol/mol}$ , 降幅为 2.0%;保存至 180 d 时,  $\text{N}_2\text{O}$  浓度为  $4.71 \mu\text{mol/mol}$ , 降幅达到 6.0%。保存温度对样品瓶中的  $\text{N}_2\text{O}$  浓度也存在影响( $P<0.001$ )。室温条件下

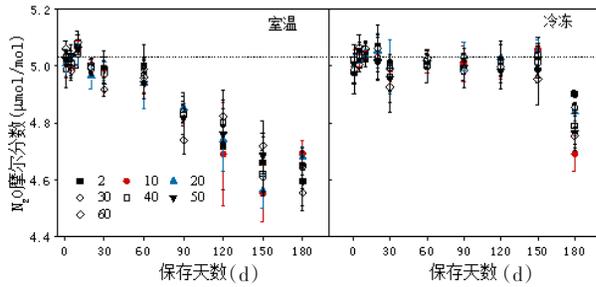


图3 不同保存条件下N<sub>2</sub>O浓度变化

表3 N<sub>2</sub>O浓度重复测量方差分析结果

项目	自由度	F值	P值
保存天数	9	197.129	<0.000 1
保存温度	1	619.741	<0.000 1
使用次数	6	1.802	0.135
保存温度×使用次数	6	1.692	0.160
保存天数×保存温度	9	77.053	<0.000 1
保存天数×使用次数	54	0.746	0.891
保存天数×保存温度×使用次数	54	0.826	0.789

N<sub>2</sub>O浓度为4.89 μmol/mol, 冷冻条件下N<sub>2</sub>O浓度为4.99 μmol/mol, 室温比冷冻条件下N<sub>2</sub>O浓度降低了2.0%。密封垫使用次数对N<sub>2</sub>O浓度无显著影响( $P>0.05$ )。

样品瓶的保存天数与保存温度对N<sub>2</sub>O浓度的影响具有交互作用( $P<0.05$ , 图3、表3)。室温条件下, 样品保存20 d内N<sub>2</sub>O浓度无显著变化( $P>0.05$ ), 保存时间达到30 d, N<sub>2</sub>O浓度显著降低( $P<0.01$ ), 由保存1 d天的5.02 μmol/mol降为30 d的4.97 μmol/mol, 降幅为1.0%; 保存至180 d时N<sub>2</sub>O浓度降为4.63 μmol/mol, 降幅为7.8%。冷冻条件下, 样品保存150 d内N<sub>2</sub>O浓度无显著变化( $P>0.05$ ), 保存时间达到180 d, N<sub>2</sub>O浓度显著降低( $P<0.001$ ), 由保存1 d天的5.00 μmol/mol降为180 d的4.80 μmol/mol, 降幅为4.0%。样品瓶的保存天数与密封垫使用次数对N<sub>2</sub>O浓度的影响无交互作用( $P>0.05$ )。

### 3 讨论与结论

样品瓶中的气体样品在保存过程中, 瓶内气压会大于瓶外气压, 而该气压差可能会导致气体样品由瓶内漏向瓶外(非金属密封垫可近似看作由各向同性的多孔介质所组成, 此时低压侧气体任一组分引起的扩散可忽略不计)<sup>[16]</sup>。在样品瓶内外气压达到平衡之前, 随着保存时间的延长, 瓶内气体的浓度会逐渐降低。本研究结果与上述论点相一致, 气体样品瓶内温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和

N<sub>2</sub>O)的浓度均随保存天数的增加而降低。而且, 保存天数对这三种气体浓度降低的影响程度也不相同。与保存1 d内的样品检测结果相比, 样品瓶内的CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的浓度在保存天数分别为30 d、90 d和60 d时无显著变化, 而在保存天数分别为60 d、120 d和90 d时则会降低1.5%、0.5%和2.0%。因此, 为了同时确保这三种温室气体测定结果的准确性, 其气体样品瓶的保存天数不要超过30 d。

根据布朗运动理论, 气体分子在较高温度下移动速度较快, 容易扩散流失<sup>[22]</sup>。气体样品瓶的保存温度较低时, 其瓶内外的气压差要小于室温条件下瓶内外气压差, 从密封垫渗透外溢的能力也较弱。因此, 低温应该比室温更有利于气体样品保存。本研究发现, N<sub>2</sub>O浓度在不同温度条件下的变化与该理论相一致, 其浓度在室温条件下(10~25 °C)比冷冻条件下(-18 °C)降低了2.0%, 表明样品瓶内的N<sub>2</sub>O气体在室温条件下比在冷冻条件下渗漏出去的更多。在这两个温度条件下, CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的浓度变化虽然不明显, 但却均受到保存温度和保存天数交互效应的影响。与保存1 d内的样品检测结果相比, 在室温条件下, 样品瓶内的CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>浓度分别在保存天数为20 d和60 d时没有显著变化, 而其保存天数在冷冻条件下可以分别延长至30 d和90 d浓度不降低。另外, 保存天数和保存温度对N<sub>2</sub>O浓度的交互作用也表明了低温能够更好地保持温室气体的稳定性, 可由室温条件下20 d的保存天数延长至冷冻条件下的150 d。因此, 当需要同时测定气体样品瓶的CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O浓度时, 其气体样品瓶在-18 °C温度条件下保存30 d不会影响测定结果的准确性, 而在室温条件下的保存天数缩短至20 d。

样品瓶内的气体进行浓度测定时, 需要刺穿橡胶密封垫采集气体样品。当密封垫的使用次数超过一定阈值时, 样品瓶的气密性将无法保证, 从而导致瓶内气体样品向外扩散和浓度降低。本研究结果发现, 密封垫的使用次数对CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O浓度均没有影响, 表明密封垫使用次数在60次以内不会影响样品瓶内气体样品CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O测定结果的准确性。与浓度较小的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O不同, CO<sub>2</sub>较高的浓度使得其对密封垫使用次数的响应较为敏感。与保存1 d内的样品检测结果相比, 样品瓶内CO<sub>2</sub>浓度在密封垫使用2次时没有变化, 而当密封垫使用10次时, 其浓度则会下降0.7%。另外, 样品瓶中CO<sub>2</sub>浓度对密封垫使用次数的响

应受到保存天数的影响,随着密封垫使用次数的增加,其保存天数则会降低。在密封垫使用2次时,样品保存可长达180 d,在密封垫使用达到10~50次时可保存90 d,而当密封垫使用达到60次仅可保存30 d。因此,综合考虑样品瓶密封垫的使用次数和保存天数对于确保CO<sub>2</sub>浓度测定结果的准确性非常重要。

综上,田间温室气体样品如果在室温条件下保存应在20~30 d内完成检测,如不能及时检测,建议在冷冻条件下保存。冷冻保存条件下,当密封垫使用2次、10~50次和60次时,建议分别在120~150 d、60~90 d和30~60 d内完成检测。样品瓶内层表面对CO<sub>2</sub>气体的吸附能力会随着气体浓度的增高而增大,从而影响样品瓶的保存性能<sup>[12]</sup>。另外,国内外不同研究中所采集温室气体的体积也有很大差异(20、25、30、35 mL)<sup>[16-17, 23]</sup>,而样品瓶内气体体积的变化会影响瓶内外的压力差,进而影响气体的渗透能力和样品瓶的保存能力。因此,除了样品瓶的保存时间、保存温度和密封垫的使用次数,气体浓度和体积对样品瓶保存能力的影响仍需进一步探讨。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Bongaarts J. Intergovernmental panel on climate change special report on global warming of 1.5°C Switzerland: IPCC[J]. Population and Development Review, 2019, 45(1): 251-252.
- [ 2 ] Behnke G D, Stacy M Z, Cameron M P, et al. Long-term crop rotation and tillage effects on soil greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2020, 261: 62-70.
- [ 3 ] Thompson R L, Lassaletta L, Patra P K, et al. Acceleration of global N<sub>2</sub>O emissions seen from two decades of atmospheric inversion[J]. Nature Climate Change, 2019, 9(12): 993-998.
- [ 4 ] 张亚飞,张立杰. “一带一路”核心区农业碳排放与农业经济增长研究[J]. 东北农业科学, 2020, 45(2): 106-110.
- [ 5 ] Kiehl J T, Trenberth K E. Earth's annual global mean energy budget[J]. Bullamermeteoroc, 1997, 78: 197-208.
- [ 6 ] 顾 帅,周凌晔,刘立新,等. 静态箱-气相色谱法CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>通量观测的质控方法研究[J]. 气象, 2010, 36(8): 87-91.
- [ 7 ] 刘中华,刘 珂,李招弟. 温室CO<sub>2</sub>智能释放系统的设计研究[J]. 东北农业科学, 2020, 45(4): 55-57, 112.
- [ 8 ] Zhang J T, Tian H Q, Shi H, et al. Increased greenhouse gas emission intensity of major croplands in China: implications for food security and climate change mitigation[J]. Global Change Biology, 2020, 26(11): 6116-6133.
- [ 9 ] Pratibha G, Srinivas I, Rao K V, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity of conventional and conservation agriculture system in rainfed semi-arid tropics of India [J]. Atmospheric Environment, 2016, 145: 239-250.
- [ 10 ] 刘 羽,周 婧,李柯萍,等. 影响静态箱检测开放式气体排放源N<sub>2</sub>O排放通量的关键因子[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 182-187.
- [ 11 ] 屈忠义,高利华,李昌见,等. 秸秆生物炭对玉米农田温室气体排放的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 111-118.
- [ 12 ] Sainju U M, Caesartonthat T, Lenssen A W, et al. Dryland soil greenhouse gas emissions affected by cropping sequence and nitrogen fertilization[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(5): 1741-1757.
- [ 13 ] 姚凡云,王立春,多馨曲,等. 不同氮肥对东北春玉米农田温室气体周年排放的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1303-1311.
- [ 14 ] 程 功,刘廷玺,王冠丽,等. 科尔沁沙丘-草甸梯级生态系统CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O通量特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 96-110.
- [ 15 ] 姜丽娟. 采气袋材质及存放时间对二氧化碳样品浓度的影响[J]. 环境与健康杂志, 1999, 16(1): 39.
- [ 16 ] 顾伯勤. 多孔介质气体流动模型在垫片密封中的应用[J]. 南京化工大学学报, 1999, 21(1): 19-23.
- [ 17 ] 管川莉,马 军,吴 凯,等. 气体取样容器对烃类碳同位素值的影响分析[J]. 低渗透油气田, 2012(1): 125-128.
- [ 18 ] Bista P, Norton U, Ghimire R, et al. Greenhouse gas fluxes and soil carbon and nitrogen following single summer tillage event [J]. International Journal of Plant and Soil Science, 2015, 6: 183-193.
- [ 19 ] 郝小雨,周宝库,马星竹,等. 氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3227-3238.
- [ 20 ] Rogers G S. Variations in the diurnal flux of greenhouse gases from soil and optimizing the sampling protocol for closed static chambers[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2014, 45: 2970-2978.
- [ 21 ] 中国气象局. QX/T164-2012 温室气体玻璃瓶采样标准方法[S]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012.
- [ 22 ] Mazur P. On the theory of brownian motion[J]. Physica, 1959, 25(1-6): 149-162.
- [ 23 ] Barsotti J L, Sainju U M, Lenssen A W, et al. Net greenhouse gas emissions affected by sheep grazing in dryland cropping systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77: 1012-1025.

(责任编辑:刘洪霞)