

在非灭菌与灭菌条件下对土壤 CO₂ 短期排放特性的研究

张家应, 沈 劲, 张仁铎

(中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘 要:通过室内模拟降雨一维垂直土柱入渗实验,在非灭菌与灭菌条件下,连续地监测土壤不同深度处 CO₂ 浓度以及土壤含水率。采用闭合循环回路测量系统,结合膜管(METT)技术来对降雨条件下土壤不同深度处 CO₂ 浓度进行监测,研究 CO₂ 的短时排放特性。结果表明,在时间上土壤不同深度处含水率与 CO₂ 浓度变化并未呈现出一致的趋势。对于干土加水时,土壤 CO₂ 浓度的迅速增加除了受到微生物矿化作用之外,气体对流、扩散等物理过程也影响较大。对于灭菌土壤,CO₂ 在土壤中的运移只是一个较短的动力学过程,故其变化较快;而对于非灭菌土壤,由于微生物对土壤中有机质的矿化作用,所以 CO₂ 浓度较高但变化相对较缓。

关键词:CO₂ 浓度;非灭菌、灭菌土壤;微生物矿化;膜管技术

中图分类号:S152.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)03-0612-07

Charactering Temporal Release of CO₂ in Sterile and Non-sterile Soils

ZHANG Jia-ying, SHEN Jin, ZHANG Ren-duo

(School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: To better understand soil CO₂ release processes during drying and wetting, infiltration experiments were conducted in soil columns. Air-dried sterile and non-sterile soils were filled into two one-dimensional soil columns, respectively. At the beginning of experiments, a simulated rainfall (with the amount of 3 cm within 1 h) was added to each of the soil columns. Soil water contents at depths of 5, 10, and 20 cm were continuously measured with time domain reflectometry (TDR) during the experiment. Concentrations of CO₂ at the 3 depths were simultaneously measured using the closed loop gas circulating system and membrane tubing technique over the experimental period. Results showed that the changes of soil water content were not consistent with those of soil CO₂ concentrations at any of the three depths in both soils. The 3 cm simulated rainfall induced a pattern of soil water content pulse at depths of 5 and 10 cm in both the sterile and non-sterile soil columns. The wetting process resulted in a rapid increase of CO₂ concentrations at all the three depths in a relatively short period after adding water in both soils. However, CO₂ concentrations at the three depths in the sterile soil were lower than those in the non-sterile soil. The concentrations of CO₂ at the depths decreased much more slowly in the non-sterile soil than in the sterile soil. The results indicated that besides the microbial mineralization, physical processes, such as gas convection and diffusion, had a significant impact on the pulse of CO₂ released from soil and the rapid increase of soil CO₂ concentration. The change of CO₂ concentration in the sterile soil column was a result of a temporal dynamic process. The CO₂ concentration in the non-sterile soil was higher but decreased with time much more slowly than that in the sterile soil, attributable to microbial mineralization of soil organic matter.

Keywords: CO₂ concentration; sterile and non-sterile soils; microbial mineralization; membrane tubing technique

全球气候变化问题在当前倍受关注。越来越多的科学研究表明,气候变化跟温室气体在大气圈、土壤圈和生物圈中的循环密切相关。CO₂ 作为温室气体的重要组成部分,在温室效应中扮演着重要的角色^[1]。

土壤温室气体的排放从机理上说主要是各种物理、化学和生物过程综合作用的结果^[2-3]。其中物理过程主要包括气体在土壤中的对流、扩散运动,生物过程主要是土壤微生物对土壤有机质的不断分解的过程(有机质的矿化)^[4-6]。

在陆地生态系统中,尤其是在干旱、半干旱地区,降雨量的大小、降雨频率的高低会使土壤呈现不同的干湿交替状态。在此过程中,还受到地表植被、土壤质地、土壤初始含水率以及土壤中有机体的特性及其分

收稿日期:2008-06-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50779080,50579079)

作者简介:张家应(1984—),男,河南信阳人,在读硕士,主要从事水环境污染修复研究。E-mail:jiayingzhang2008@yahoo.com

通讯作者:张仁铎 E-mail:zhangrd@mail.sysu.edu.cn

布的影响,因此,表征土壤干湿状态的土壤含水率在时空分布上会呈现出较大的变异性,同时,土壤含水率的时空变异性也会影响土壤中 CO_2 的排放特性^[7-10]。

Schwinning 等^[10]报道在持续时间较短的降雨条件下,干旱地区生态系统中土壤微生物会在较短的时间内对土壤含水率的脉冲刺激发生响应,而植物及动物的响应发生则需要较长的降雨过程。因此,开展在短期状况下土壤 CO_2 的排放特性研究对阐明在干湿交替状态下土壤微生物群落对土壤含水率变化的响应机制以及土壤 CO_2 的排放特性具有重要的生态学意义。

对于干湿交替状况下土壤 CO_2 的短期排放特性的研究,已报道的实验室内的研究工作包括:在干土加湿前后土壤有机质以及有机质的各种成分的变化以及 CO_2 脉冲对土壤有机质及有机质组成、土壤微生物生物量、土壤N转化过程等的影响^[11-13],模拟降雨量以及干湿交替频率对 CO_2 排放特性的影响^[12],干湿交替下土壤 CO_2 脉冲的产生机理等方面^[14],不同深度土壤样品在实验室内培养条件下 CO_2 的短期排放特性及其与含水率的关系^[15]。但在干湿交替条件下土壤不同深度处 CO_2 浓度的变化以及不同深度处浓度变化规律,特别是随时间连续变化过程的研究,报道还很少。野外实验的研究主要是在生态系统(尤其是干旱、半干旱地区)尺度上探讨土壤 CO_2 排放量的短期及长期特性与土壤含水率之间的关系,但其对土壤含水率的测量只是集中在土壤的几个深度内(如0~5 cm、5~10 cm等),并且测量的时间区间也较大;而对在土壤干湿交替状态下土壤不同深度处 CO_2 的短时排放特性的测量也少见报道^[16-18]。

本实验是在室温条件下,对于填装的均匀土柱,通过模拟降雨垂直入渗,在很短的时间间隔上(15 s)和不同深度处连续地监测土壤空气 CO_2 的浓度和土壤含水率,根据测量资料解释土壤 CO_2 的短期排放特性,并通过灭菌与非灭菌土柱的实验对比来探讨土壤 CO_2 的产输机理。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为广州城郊土,采样点位于广州大学城内。采集的土壤经自然风干,剔除砖块、植物根茎等杂物后,碾碎过孔径为2 mm的土筛。其质地为砂壤土,砂粒、粉粒和粘粒含量分别为60.2%、29.0%、10.8%。用烘干法测定供试土壤初始质量含水率为1.5%,有机质含量为2.849%(GB 7857—1987)。

1.2 实验仪器与设备

土壤体积含水率的测定采用德国IMKO公司生产TDR探头TRIME-IT,数据采集部分采用DT800(Data Taker),每15 s采集一次。使用前用烘干法对每个探头都进行了校正^[19-20]。

土壤孔隙中 CO_2 浓度的测定采用闭合回路循环系统,此系统由透气不透水的膜管、气泵(Ecotek,北京)、红外线气体分析仪(IRGA,LI-840,LICOR,NE,America)和塑料管(内径6 mm)等组成。填装土柱时将透气不透水的膜管埋在土壤内,并在膜管两端接内径为6 mm的塑料管,塑料管的另两端连接气泵和红外线气体分析仪,由气泵以 $1\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率不断地抽气以构成循环通路,并通过红外线气体分析仪测定 CO_2 的浓度。此装置除在膜管处土壤孔隙 CO_2 与膜管进行气体交换外,剩下部分均在实验之前作气密性检查,没有发现管道内流动的气体与外界空气发生交换,装置气密性良好^[21-22]。

填装土柱为有机玻璃制成的透明圆柱,高60 cm,直径10 cm。

1.3 灭菌土柱垂直入渗实验

取足够的过筛土置于3 000 mL的烧杯中,密封之后放入手提式高压蒸汽灭菌器内(0.14~0.16 MPa,120 ℃),于20 min后取出并冷却。有机玻璃柱及其他相关实验器材于紫外灭菌箱内持续灭菌1 h,模拟降雨采用去离子水并用电炉煮沸30 min,之后密封冷却至室温。在无菌操作台上填装土柱,土柱按干密度 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,以每2 cm分层填装。土柱填装高度为50 cm,剩余的10 cm的空间用作土壤呼吸速率的测定。在离土壤上边界5、10、20 cm处水平埋入TDR探头,在相应位置处水平埋入透气疏水多孔聚丙烯膜管(Accurel® PPV8/2),以便收集土壤孔隙中的 CO_2 并测定其浓度。土柱填装完后密封并在土壤上方的气室中连接一条长4 m左右的橡皮管以保持土壤上方空气的压强与大气压一致^[23]。为保持柱内无菌的环境,在橡皮管与外界相通之处均用滤菌膜加以过滤。

模拟降雨开始之前,让土柱静置2 h,以使土壤内气体压强与外界大气平衡,并利用TDR和红外线气体分析仪测定土壤不同深度的初始含水率和 CO_2 浓度。

如图1所示,人工降雨装置由马氏瓶及医用输液器构成,依据设计的降雨量计算并调节好流速后,连续均匀降雨1 h,降雨量约为3 cm。使用TDR在深度为5、10和20 cm处进行土壤含水率的连续测定,并利用闭合回路装置对三个深度及土柱上方气室 CO_2

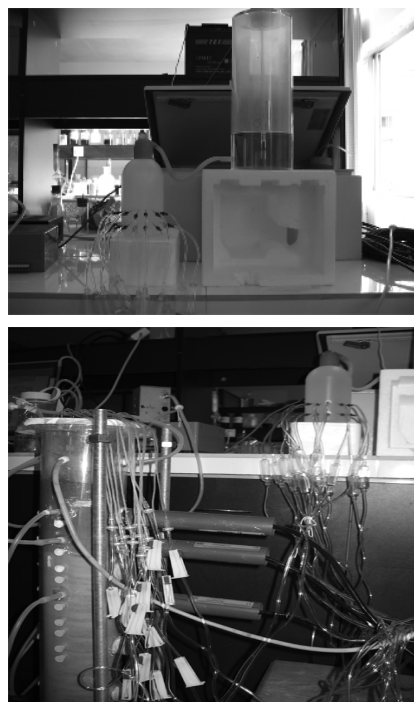
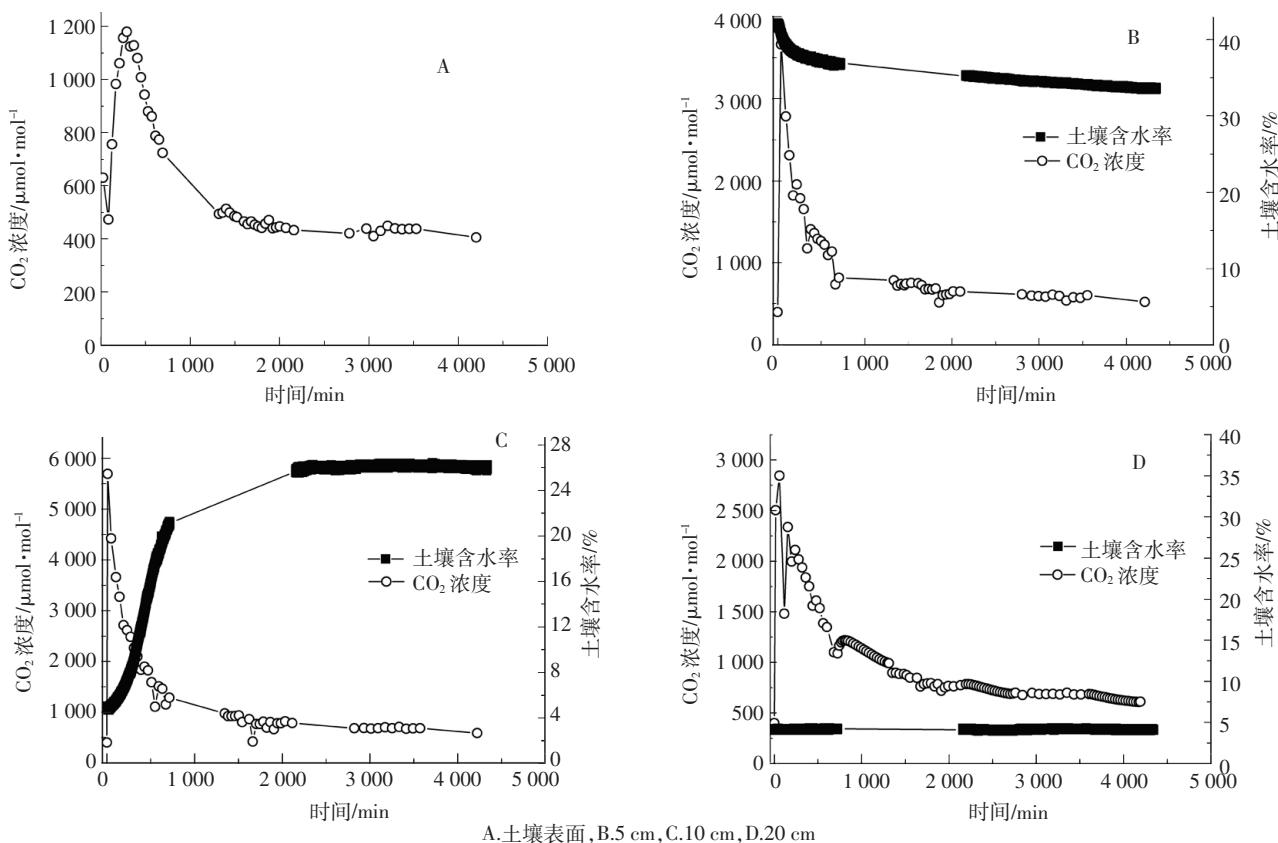


图 1 土柱降雨入渗实验装置图

Figure 1 Photograph of experimental setup of rainfall infiltration into soil column



A. the soil surface, B. 5 cm, C. 10 cm, D. 20 cm

图 2 灭菌土壤不同深度土壤含水率、CO₂ 浓度随时间变化图Figure 2 Distributions of soil water content and CO₂ concentration as a function of time at different soil depths of the sterile soil

浓度进行轮换测定。当土壤空气 CO₂ 浓度降至降雨之前水平时,即停止实验,整个实验持续大约 4 000 min。

1.4 非灭菌土柱垂直入渗实验

此实验步骤与灭菌土柱入渗实验大致相同,只是供试土壤和各种仪器设备均不进行灭菌操作,按照同样的方式装填土柱、静置 2 h 后进行模拟降雨,之后分别测定土壤含水率和 CO₂ 浓度。由于土壤空气 CO₂ 浓度随时间下降较缓,所以实验持续时间较长(大约 12 000 min)。

2 结果与讨论

2.1 灭菌土壤 CO₂ 短时排放特性

模拟降雨之前对灭菌土壤 5、10 及 20 cm 深度处 CO₂ 浓度加以监测发现其浓度均大约在 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 左右,此时由于灭菌土壤中微生物活性很低,土柱 3 个深度处 CO₂ 浓度均接近于外界空气浓度(370 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)。模拟降雨一开始,土壤上方气室中的 CO₂ 浓度在短时间内先迅速升高到峰值(1 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 左右),之后亦较为迅速地降低到相对较低的值,并相对地保持稳定(400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 左右)(图

2A)。这与文献上报道的结果是一致的^[13-15]。第1个深度(5 cm处)的含水率迅速增加,达到峰值后又逐渐下降(图2B);而第2个深度(10 cm处)随着雨水的下渗土壤含水率随着时间的推移增长较快,之后缓慢增长到一个较为稳定的数值(图2C);而第3个深度(20 cm处)在整个实验过程中水分没有入渗至该剖面,故其含水量基本保持不变(图2D)。

结合含水率变化的规律,发现在这种短期土壤含水率因降雨而产生脉冲的条件下,土壤剖面含水率并未表现出与CO₂浓度变化相一致的规律性。而目前文献上报道的有关土壤含水率与CO₂浓度或土壤呼吸速率之间的经验关系^[24-26]都是在较长的时间和空间尺度上得到的。不论是实验室内还是在田间实验中都较少关注在这种短期的土壤含水率变化特性下土壤含水率与土壤呼吸或是CO₂之间的关系,那些经验关系的建立也是在较长的时间尺度测定数据然后加以回归分析,在数据测量或是在回归分析之中都有可能覆盖了这种短期特性,从而导致在干湿交替频繁的地区那些对估计当地碳平衡非常必要的信息的丢失,因而也就不能准确地估计土壤的呼吸量。

对灭菌土壤模拟降雨前后各个深度CO₂浓度对比发现,随着时间的增加,各个深度的CO₂浓度增加和减少均是在较短的时间内发生的(700 min左右),在此之后,土壤各个深度的CO₂浓度均维持在一个较为稳定的水平,且各个深度处CO₂的浓度相差不大(图2)。在模拟降雨初期,影响各个深度CO₂浓度的短时变化机制以气体对流占主导。随着模拟降雨的进行,水分不断地充填着土壤孔隙,迫使之前存在于上部土层中的气体由于受到水分的压迫而不断地向下运动,也即之前存在于整个土柱中的空气将被不断地压缩到下部土层,故此阶段CO₂的浓度会迅速升高。之后由于模拟降雨结束,土壤水分向下运动的速率减小,土壤水分向下驱替土壤空气的趋势减弱,此时由CO₂浓度梯度而导致的分子扩散作用将占主导,但由于分子扩散作用相对于对流来说较慢,所以各个深度CO₂浓度的下降相对于上升来说历时较长。但随着扩散的进行,各个深度处CO₂的浓度趋于一致,各深度间的CO₂浓度梯度越来越小,最终土壤CO₂浓度在各个深度间大致相同。

根据气体扩散原理,由于浓度的差异,土壤孔隙气体会从浓度高的区域扩散到浓度低的区域。土壤孔隙气体的扩散通量可以表示为:

$$F = -D_a \frac{\partial c}{\partial z}$$

式中: F 为扩散通量, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$; D_a 为气体有效扩散系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$, $D_a = D_0 \frac{\theta_a^{7/3}}{f^2}$; D_0 为CO₂在空气中的自

由扩散系数,取 $8.4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$; $\frac{\theta_a^{7/3}}{f^2}$ 为多孔介质孔隙通道的弯曲因子,其表征了多孔介质对CO₂扩散的影响; f 为土壤孔隙度, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,取0.47; θ_a 为单位体积土壤中CO₂的体积含量, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, $\theta_a = f - \theta_w$ (θ_w 为土壤体积含水量, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)。那么在400 min时,灭菌土壤深度5 cm至10 cm的CO₂通量为:

$$F_{5-10,400} = -D_a \frac{\partial c}{\partial z} = -8.4 \times 10^{-4} \times \frac{0.18^{7/3}}{0.47^2} \times \frac{1848-1385}{5} \times \frac{44}{22.4} = 12.65 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$$

深度10 cm至20 cm的CO₂通量为:

$$F_{10-20,400} = -D_a \frac{\partial c}{\partial z} = -8.4 \times 10^{-4} \times \frac{0.365^{7/3}}{0.47^2} \times \frac{1848-1752}{10} \times \frac{44}{22.4} = 6.83 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$$

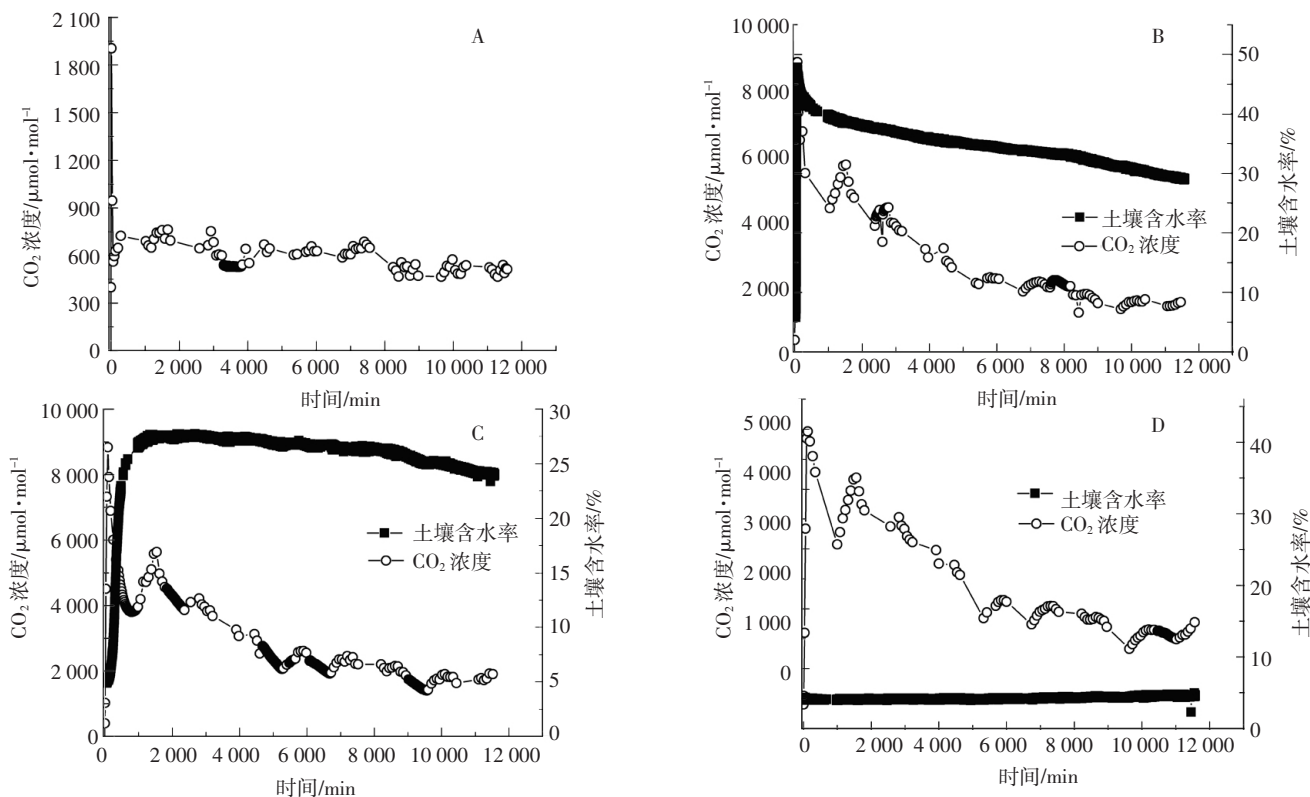
而在较长的时间(如3960 min)时,灭菌土壤5 cm至10 cm的CO₂通量和10 cm至20 cm的CO₂通量均接近0。由计算可得,在400 min时,由于浓度差而造成的CO₂在灭菌土壤不同深度间的扩散较为明显,而随着时间的推移,扩散作用减至弱,CO₂浓度在各个深度间的差异不大。

2.2 非灭菌土壤CO₂短时排放特性

如图3所示,非灭菌土壤在模拟降雨后各个深度土壤含水率的变化规律大致与灭菌土壤一致,该实验持续时间比灭菌土壤的持续时间长,第一个深度和第二个深度的土壤含水率都是在较短时间内达到一个峰值,然后又以较缓慢的速率下降;而第三个深度的含水率由于土壤水下渗较慢而变化不大。

非灭菌土壤在模拟降雨之前,土壤中各个深度的CO₂浓度亦近乎于大气水平。究其原因这是由于此时土壤含水率很低,微生物在水分极缺时活性很低。模拟降雨后非灭菌土壤在土壤表面和3个深度的CO₂变化规律与灭菌土壤基本一致。但是非灭菌土壤相对灭菌土壤来说,CO₂浓度变化呈现出一定的波动性,这可能是由室温的小幅度变化所致。

对非灭菌土壤各个深度CO₂浓度对比发现,与灭菌土壤相似,随着时间的增加,各个深度的CO₂浓度变化是在较短的时间内进行的(图3)。不过,在非灭菌条件下,土壤各个深度CO₂浓度与灭菌条件下相比较,这一方面是由于微生物对土壤有机质的矿化作用,而另一方面是由于在较高浓度存在条件下,CO₂



A. 土壤表面, B. 5 cm, C. 10 cm, D. 20 cm
A. the soil surface, B. 5 cm, C. 10 cm, D. 20 cm

图 3 非灭菌土壤不同深度土壤含水率、CO₂ 浓度随时间变化图

Figure 3 Distributions of soil water content and CO₂ concentration as a function of time at different soil depths of the non-sterile soil

在土壤不同深度间的扩散作用也更为显著。

类似地, 根据气体扩散原理, 可以计算在 3 960 min 时, 非灭菌土壤 5 cm 至 10 cm 的 CO₂ 通量为:

$$F_{5-10,3960} = -D_a \frac{\partial c}{\partial z} = -8.4 \times 10^{-4} \times \frac{0.16^{73}}{0.47^2} \times \frac{5101-3174}{5} \times \frac{44}{22.4} = 40.00 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}.$$

10 cm 至 20 cm 的 CO₂ 通量为:

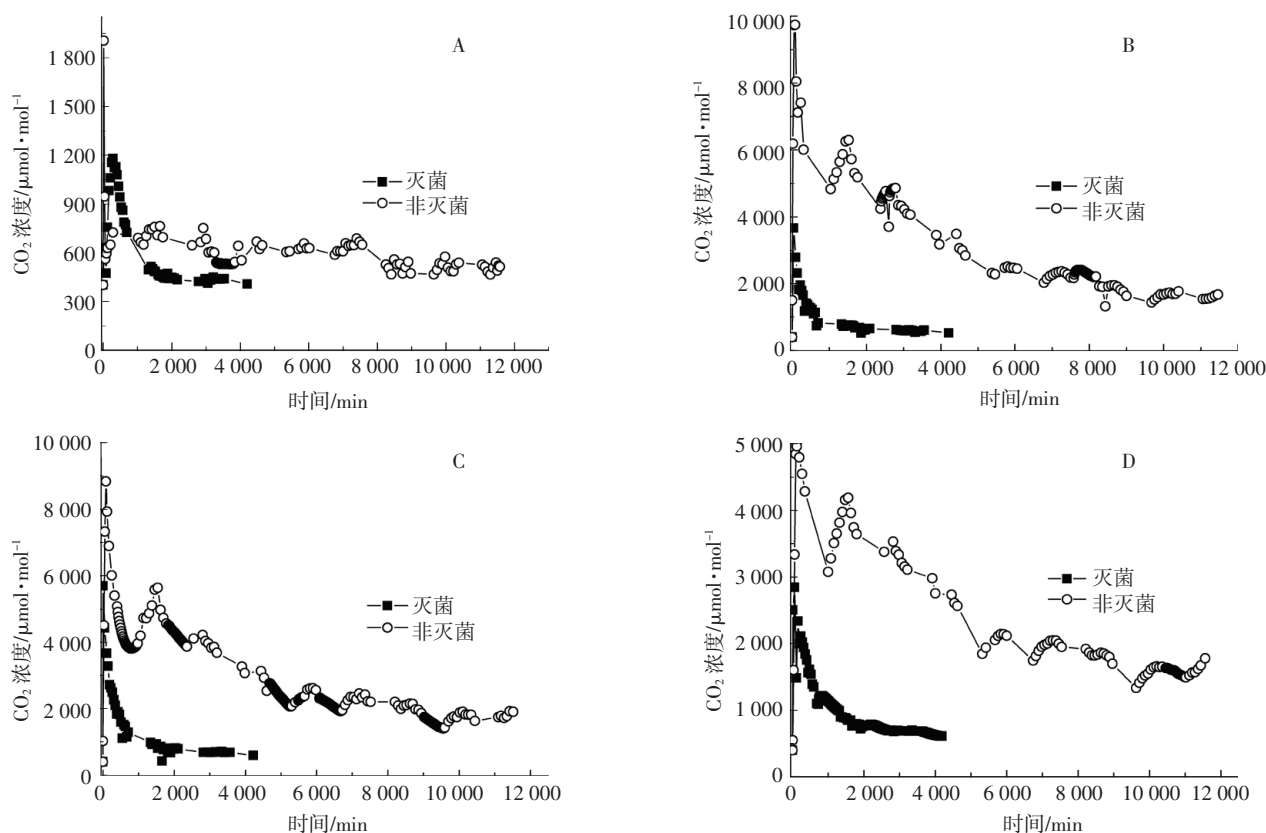
$$F_{10-20,3960} = -D_a \frac{\partial c}{\partial z} = -8.4 \times 10^{-4} \times \frac{0.315^{73}}{0.47^2} \times \frac{5101-1980}{10} \times \frac{44}{22.4} = 157.4 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}.$$

而在较长的时间(如 12 000 min)时, 非灭菌土壤 5 至 10 cm 的 CO₂ 通量和 10 至 20 cm 的 CO₂ 通量均接近 0。由计算可得, 在 6 000 min 左右的时间内, 由于浓度差而造成的 CO₂ 在土壤不同深度间的扩散较为明显, 而随着时间的推移, 扩散作用减至弱, CO₂ 浓度在各个深度间的差异不大。

2.3 灭菌土壤与非灭菌土壤 CO₂ 短时排放特性对比

比较灭菌土壤与非灭菌土壤在不同深度 CO₂ 的

排放特性可见(图 4), 在非灭菌土壤中 CO₂ 浓度要明显高于灭菌土壤, 且在时间上呈现出较大的差异, 从模拟降雨开始大约 15 min 之内, 土壤表面 CO₂ 的浓度就达到了最大值, 而土壤各个深度 CO₂ 浓度达到最大值要滞后于土壤表面 CO₂ 浓度的变化(大约在 100 min 左右)。Fierer 等^[14]通过在室内培养条件下使用同位素示踪方法研究了干土加水过程中 CO₂ 的排放特性, 发现 CO₂ 的排放主要源于土壤微生物为适应加水前后土壤含水率变化而对细胞渗透势所作出的调整。土壤含水率升高, 土壤溶液水势增大, 微生物释放相关细胞质物质用以平衡细胞外界水势, 释放的胞外细胞物质被其他微生物分解, 从而迅速地产生 CO₂。但 Fierer 等^[14]没有考虑由于气体在土壤不同深度处由于对流、扩散效应的影响而引起的土壤 CO₂ 的排放。通过灭菌土壤 CO₂ 排放特性, 我们发现, 在灭菌条件下, 土壤 CO₂ 浓度也会升高到较高的水平, 这说明在干土加水的条件下, 土壤 CO₂ 的排放受到气体对流、扩散等因素的影响也较大, 此结论与文献上的报道基本一致^[15-16]。



A. 土壤表面, B. 5 cm, C. 10 cm, D. 20 cm

A. the soil surface, B. 5 cm, C. 10 cm, D. 20 cm

图4 灭菌与非灭菌土壤不同深度 CO₂ 浓度随时间变化图Figure 4 Concentrations of CO₂ as a function of time at different soil depths of the non-sterile and sterile soils

相对于灭菌土壤来说,非灭菌土壤 CO₂ 浓度的降低较缓,拖尾现象较为明显。这也说明在微生物活性受到抑制情况下,对流、扩散等物理机制作用下的土壤 CO₂ 的运移只是一个较短的动力学过程;而在有微生物作用条件下,由于微生物矿化作用、微生物生理代谢以及生态响应机制的延滞效应的存在,使 CO₂ 浓度保持在一个较高的水平上。

依据质量守恒和气体扩散原理,非灭菌土壤 10 cm 处高度为 1 cm 的微单元体内从 3 960 min 到 4 200 min 质量守恒方程可表达为:

$$\Delta m = m_{4200} - m_{3960} = F - S,$$

其中 m_{4200} 、 m_{3960} 分别为 4 200、3 960 min 时,此微单元体内 CO₂ 的质量,μg; Δm 为从 3 960 到 4 200 min 内此微单元体内 CO₂ 的质量变化量,μg; S 表示从 3 960 到 4 200 min 内由微生物分解有机质所释放出来的 CO₂ 的质量,μg; F 表示此时间段内由扩散所致的 CO₂ 质量的变化量,μg。

经计算可得, $\Delta m = 73\,528\, \mu\text{g}$, $F = 12\,638\, \mu\text{g}$, $S =$

$86\,166\, \mu\text{g}$, $\frac{S}{F} = 6.8$ 。由此可以发现,在此时间段内,微生物对有机质的分解作用大约是扩散作用的 6.8 倍,相对于微生物对有机质的分解作用来说,扩散作用明显较弱。而对灭菌土壤在 4 000 min 左右进行质量平衡计算发现,此时扩散作用接近 0,微生物对有机质的分解作用也近似为 0,这是由于灭菌强烈地抑制了微生物活性的缘故。

通过对非灭菌与灭菌条件下土壤 CO₂ 的运移特性加以对比,我们发现在非灭菌条件下,随着水分入渗,微生物可利用水分逐渐增多,微生物对有机质的矿化作用不断增强,导致 CO₂ 大量产生,土壤孔隙中 CO₂ 浓度升高。同时由于不同深度处土壤含水率不同,进而使 CO₂ 浓度在不同深度间存在梯度,CO₂ 在扩散机制作用下运移。随着水分入渗趋于稳定,不同深度间土壤含水率相差不大,不同深度间微生物活性差别不大,微生物对 CO₂ 浓度的贡献在各个深度间差别不大,加之扩散作用不断减小,因此最终不同深度

间的 CO₂ 浓度趋向一致。而在灭菌条件下,由于微生物活性受到较强抑制,CO₂ 在土壤中的运移只是由于对流、扩散等作用造成的,整个过程变化较快,没有明显的拖尾现象。

3 结论

采用闭合回路循环系统,结合膜管(METT)技术来对降雨条件下土壤不同深度 CO₂ 浓度进行连续监测,研究 CO₂ 的短时间排放特性,为进一步探索土壤 CO₂ 对含水率变化的短时响应机制奠定基础。

降雨导致土壤含水率在不同深度间存在差异,但是在较短的时间尺度上不同深度的含水率与 CO₂ 浓度并未呈现出一致的相关性。

在干土加水的条件下,土壤 CO₂ 浓度的迅速增加除了受到微生物影响之外,气体对流、扩散等物理因素的影响也较大。

灭菌土壤 CO₂ 的运移只是一个较短的对流、扩散等物理过程,而在非灭菌条件下,由于微生物矿化作用的影响,CO₂ 浓度较灭菌条件下高但随时间的变化相对来说较缓。建立土壤 CO₂ 对含水率变化的短时响应机制与较长时间尺度上土壤 CO₂ 排放特性间的关系还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Lydie C L, Nicole W, Aurelie M, et al. Soils, a sink for N₂O? a review[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 1-17.
- [2] Zhou G Y, Liu S G, Li Z A, et al. Old-growth forests can accumulate carbon in soils[J]. *Science*, 2006, 314(5804): 1417.
- [3] Simunek J, Suarez D L. Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: I. model development[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(2): 487-497.
- [4] Alvarez R, Alvarez C R. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 184-189.
- [5] Hanson P, Edwards N, Garten C, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 115-146.
- [6] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration[J]. *Biogeochemistry*, 2005(73): 3-27.
- [7] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, et al. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems [J]. *Oecologia*, 2004, 141: 221-235.
- [8] Loik M E, Breshears D D, Lauenroth W K, et al. A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: climatology and ecohydrology of the western USA[J]. *Oecologia*, 2004, 141: 269-281.
- [9] Potts D L, Huxman T E, Enquist B J, et al. Resilience and resistance of ecosystem functional response to a precipitation pulse in a semi-arid grassland[J]. *Journal of Ecology*, 2006, 94: 23-30.
- [10] Schwinning S, Sala O E, Loik M E, et al. Thresholds, memory, and seasonality: understanding pulse dynamics in arid/semi-arid ecosystems[J]. *Oecologia*, 2004, 141: 191-193.
- [11] Borken W, Davidson E A, Savage K, et al. Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67: 1888-1896.
- [12] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 777-787.
- [13] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, et al. Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64: 613-623.
- [14] Fierer N, Schimel J P. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67: 798-805.
- [15] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 426-436.
- [16] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems[J]. *Oecologia*, 2004, 141: 254-268.
- [17] Lundquist E J, Jackson L E, Scow K M. Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 1031-1038.
- [18] Schwinning S, Sala O E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems[J]. *Oecologia*, 2004, 141: 211-220.
- [19] Laurent J P, Ruelle P, Delage L, et al. Monitoring soil water content profiles with a commercial TDR system comparative field tests and laboratory calibration[J]. *Vadose Zone Journal*, 2005, 4: 1030-1036.
- [20] 周凌云, 陈志雄, 李卫民. TDR 法测定土壤含水量的标定研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 59-64.
ZHOU Ling-yun, CHEN Zhi-xiong, LI Wei-min. Calibration on measurement of soil water content using the time domain reflectometry (TDR)[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1): 59-64.
- [21] DeSutter T M, Sauer T J, Parkin T B. Porous tubing for use in monitoring soil CO₂ concentrations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 2676-2681.
- [22] Gut A, Blatter A, Fahrni M, et al. A new membrane tube technique (METT) for continuous gas measurements in soils[J]. *Plant and Soil*, 1998, 198: 79-88.
- [23] Welles J M, Demetriades-Shah T H, McDermitt D K. Considerations for measuring ground CO₂ effluxes with chambers[J]. *Chemical Geology*, 2001, 177: 3-13.
- [24] Orchard V A, Cook F J. Relationship between soil respiration and soil moisture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, 15: 447-453.
- [25] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 23-36.
- [26] Leiros M C, Trasar-Cepeda C, Seoane S, et al. Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 327-335.