

黔中喀斯特石漠化地区土壤温室气体浓度的时空分布特征

刘芳^{1,2}, 刘丛强^{1*}, 王仕禄¹, 吕迎春³

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2 百色学院化学与生命科学系, 百色 533000; 3 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 烟台 264003)

摘要: 2006~2007 年对喀斯特石漠化地区土壤剖面中 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的浓度分布进行观测. 结果表明, 土壤剖面中 CO₂、N₂O 和 CH₄ 浓度分别介于 530.2~31512.6、0.27~0.67 和 0.1~3.5 μL·L⁻¹. 总体上, 自地表向下, CO₂ 和 N₂O 浓度逐渐增大, CH₄ 浓度则为逐渐减小, 但在阴冷潮湿的 10、11 月和 1 月, 15 cm 以下土层中 CO₂ 和 N₂O 浓度随着深度的增加逐渐减小, CH₄ 浓度则明显增加. 土壤温度、水分同时影响剖面中 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的时空分布, 但影响效应以及作用的土层深度有所不同. 相关分析结果表明, 土壤中 CO₂ 和 N₂O 浓度的时空分布显著正相关 (r 为 0.780~0.894, $p < 0.05 \sim 0.01$), 相关关系受环境因子的影响, CO₂ 和 CH₄ 的时空分布则呈显著负相关关系 ($r = -0.330$, $p < 0.01$); N₂O 和 CH₄ 的空间分布为互逆关系, 但只在土壤水分较大月份达到显著水平 (r 为 -0.829~-0.956, $p < 0.05 \sim 0.01$).

关键词: 喀斯特; 土壤; 温室气体浓度; 时空变化; 黔中地区

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3136-06

Temporal and Spatial Variations of Greenhouse Gases Concentrations in Soils in Karst Stone Desertification Areas in Central Part of Guizhou Province

LIU Fang^{1,2}, LIU Cong-qiang¹, WANG Shi-lu¹, LÜ Ying-chun³

(1. State Key Laboratory of the Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences Guiyang 550002, China; 2 Department of Chemistry and Life Science, Baize University, Baize 533000, China; 3 Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences Yantai 264003, China)

Abstract: Concentrations of CO₂, N₂O and CH₄ of soil profile in Karst Stone Desertification Areas were measured monthly from June of 2006 to May of 2007. The results indicated that the concentrations of CO₂, N₂O and CH₄ varied from 530.2 to 31512.6, 0.27 to 0.67 and 0.1 to 3.5 μL·L⁻¹. On the whole, with the increase of soil depth, the concentrations of CO₂ and N₂O increased, while CH₄ decreased. However, in the cold and wet October, November and January, the concentrations of CO₂ and N₂O decreased with the depth below 15 cm. In contrast, CH₄ had the inverse trend. Soil temperature and moisture were the main factors which had impacts on the temporal and spatial variations of CO₂, N₂O and CH₄ concentrations in soil profile, but the influence impacts were different. The correlation analysis showed that there was positive correlation between CO₂ and N₂O (r 0.780-0.894, $p < 0.05-0.01$), while correlation degree was controlled by environmental factors in different months. CH₄ concentrations in soil had significantly negative correlation with CO₂ concentrations ($r = -0.330$, $p < 0.01$), but correlated with N₂O concentrations just in moisture months ($r = -0.829 \sim -0.956$, $p < 0.05 \sim 0.01$).

Key words: Karst; soil; greenhouse gas concentration; temporal and spatial variation; central part of Guizhou Province

二氧化碳、甲烷和氧化亚氮是大气最主要的 3 种温室气体, 对全球变暖的贡献超过了 70%^[1]. 土壤是 CO₂、N₂O 和 CH₄ 重要的生物源和汇, 据估计土壤及其土地利用方式的改变等过程对大气中 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的净释放量的贡献率分别为 5%~20%、30%和 80%~90%^[2]. 土壤剖面中气体的时空分布直接影响气体的地-气交换, 明确土壤剖面中温室气体的时空变化规律, 有助于更好地了解土壤温室气体的库、源汇及其产生机制. 目前对不同生态系统土壤剖面中 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的时空变化规律及

其主要影响因素的研究多为单独地研究某一种温室气体, 很少考虑相互间的关系. 我国南方溶岩区是一个巨大的碳库, 对全球温室气体变化的贡献不容忽视. 贵州位于华南碳酸盐岩出露的中心部位, 碳酸盐岩分布面积有 1.3×10^5 km², 其总厚度达 8 500 m, 是世界碳酸盐岩溶蚀作用强烈的地区之一. 因此, 本实

收稿日期: 2008-12-25; 修订日期: 2009-06-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403200)

作者简介: 刘芳(1980~), 女, 博士, 主要研究方向为土壤温室气体的地球化学特征, E-mail: liu-fang@mails.gucas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: liucongqiang@vip.sjleg.cn

验以黔中喀斯特石漠化地区为研究对象, 分析土壤剖面中 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 浓度分布特征, 初步探讨它们之间的关系, 并研究温度、土壤水分对剖面温室气体浓度分布的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于贵州省清镇市王家寨浅碟状峰丛洼地小流域示范区, 是典型的喀斯特生态环境条件。该区域属亚热带湿润温和型气候, 年均气温 14°C , 受季风影响, 雨量较为充沛, 降水量 $1\ 200\ \text{mm}$ 。采样点土被不连续, 植被覆盖度差, 物种较单一, 优势物种为花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*)、异叶鼠李 (*Rhamnus heterophylla*)、悬钩子蔷薇 (*Rosa rubus*) 和火棘 (*Pyracantha fortuneana*)。出露岩层为石灰岩, 出露面积 70% 以上, 发育的土壤为棕色的石灰土, 土层浅薄, 一般 $< 30\ \text{cm}$, $20\ \text{cm}$ 土层以下, 土壤发育不完全。土壤理化性质见表 1。

表 1 观测点各土层土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical characteristics of profile soil

采样点	土壤深度 /cm	有机碳 /%	有机氮 /%	容重 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	pH	土壤颗粒 /%		
						粘粒	粉粒	砂粒
	0~5	4.416	0.369	1.22	6.33	43.6	41.0	15.4
	5~10	4.542	0.361	1.12	6.42	40.6	30.0	29.4
清镇	10~15	3.255	0.266	1.04	6.44	42.6	22.0	35.4
灌丛	15~20	2.296	0.214	1.16	6.46	11.6	3.0	85.4
	20~25	1.494	0.144	1.31	6.45	45.6	26.0	28.4
	25~30	1.355	0.125	1.30	6.51	46.5	29.0	24.5

1.2 研究方法

2006 年 6 月 ~ 2007 年 5 月, 用自制的采样装置^[3]采集土壤剖面的气体样品(图 1)。使用内径为 $6\ \text{mm}$ T 字型不锈钢管, 一端密封, 另一端接采样装置。钻入土壤的底端打磨成尖形, 便于插入土壤, 其上 $2\ \text{cm}$ 部分均匀分布 $2\ \text{mm}$ 的通气孔, 便于土壤空气流入管道。每次采样按 $5\ \text{cm}$ 间隔由浅至深逐层采集 $5\sim 30\ \text{cm}$ 土层气体, 使用 $100\ \text{mL}$ 注射器采集, 用三通连接转存储于事先抽成高真空 ($1.0\ \text{Pa}$) 的 $30\ \text{mL}$ 玻璃气瓶内。样品带回实验室后使用惠普 6890 气相色谱仪分析, 使用自动进样系统, 每次进样体积为 $1\ \text{mL}$ 。 N_2O 的测定使用 Porapak Q 填充柱分离, 电子捕获检测器 (ECD) 测定。分离柱和检测器的温度分别为 50°C 和 320°C , 载气为 $\text{Ar}-\text{CH}_4$ ($95\%:5\%$), 流速 $20\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。 CH_4 的测定使用 Porapak Q 填充柱分离、火焰原子检测器 (FID) 分离检测, 分离柱和检测器的温度分别为 50°C 和 250°C , 载气为高纯 N_2 , 流速 20

$\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。 CO_2 经 Ni 催化剂高温催化为 CH_4 后测定, 催化温度为 375°C 。

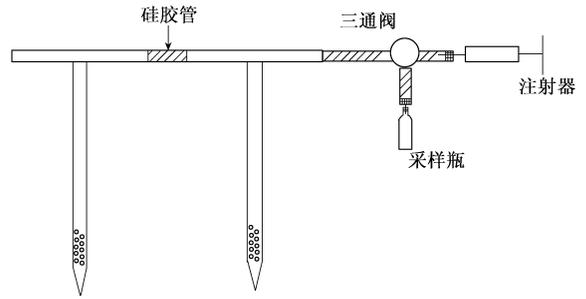


图 1 土壤气体采样装置示意

Fig. 1 Schematic graph of soil gas sampling device

电位法测定土壤 pH (H_2O), 水土比为 $5:1$ 。比重法测定土壤粒径。用 $0.1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液浸泡 $24\ \text{h}$ 去除土壤无机碳氮后, 在 PE2400 型元素分析仪上测定土壤有机质、氮含量。每次采集气体样品同时, 用温度计同步测定气温和剖面土层温度, 用土钻采集剖面 $0\sim 5$ 、 $5\sim 10$ 、 $10\sim 15$ 、 $15\sim 20$ 、 $20\sim 25$ 、 $25\sim 30\ \text{cm}$ 土壤样品, 带回实验室用烘干法测定土壤水分。

数据图表使用 Microsoft Office Excel 2003 和 Origin 7.0 绘制, 相关性分析统计分析使用 SPSS 11.5。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面中 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 的浓度变化

土壤剖面中 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 浓度分别介于 $530.2\sim 31512.6$ 、 $0.27\sim 0.67$ 和 $0.1\sim 3.5\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 。总体上, 随着土壤深度的增加, CO_2 和 N_2O 浓度逐渐增大, CH_4 浓度则为逐渐减小(图 2)。由于采样点土壤浅薄, 土壤中 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 受到大气的影 响, 剖面中温室气体浓度由上自下形成梯度^[4]。在降雨历时长、雨量较大的 10、11 月和 1 月, $15\ \text{cm}$ 以下 CO_2 和 N_2O 浓度随着深度的增加明显减小, 而 CH_4 浓度明显增加。由碳酸盐基岩 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 三相构成的岩溶动力学系统对土壤中的 CO_2 的含量具有明显的影响, 降雨后基岩对土壤中 CO_2 的溶蚀消耗作用增强^[5]; 另一方面, 在厌氧条件下, 土壤中的产 CH_4 菌能以 CO_2 为碳源还原生成 CH_4 ^[6], 使剖面中 CH_4 浓度增大。降雨对底层土壤 N_2O 的影响则主要表现在促进 N_2O 的溶解^[7], 同时形成长期的厌氧环境增加反硝化反应中 N_2O 进一步还原成 N_2 的几率^[8], 导致

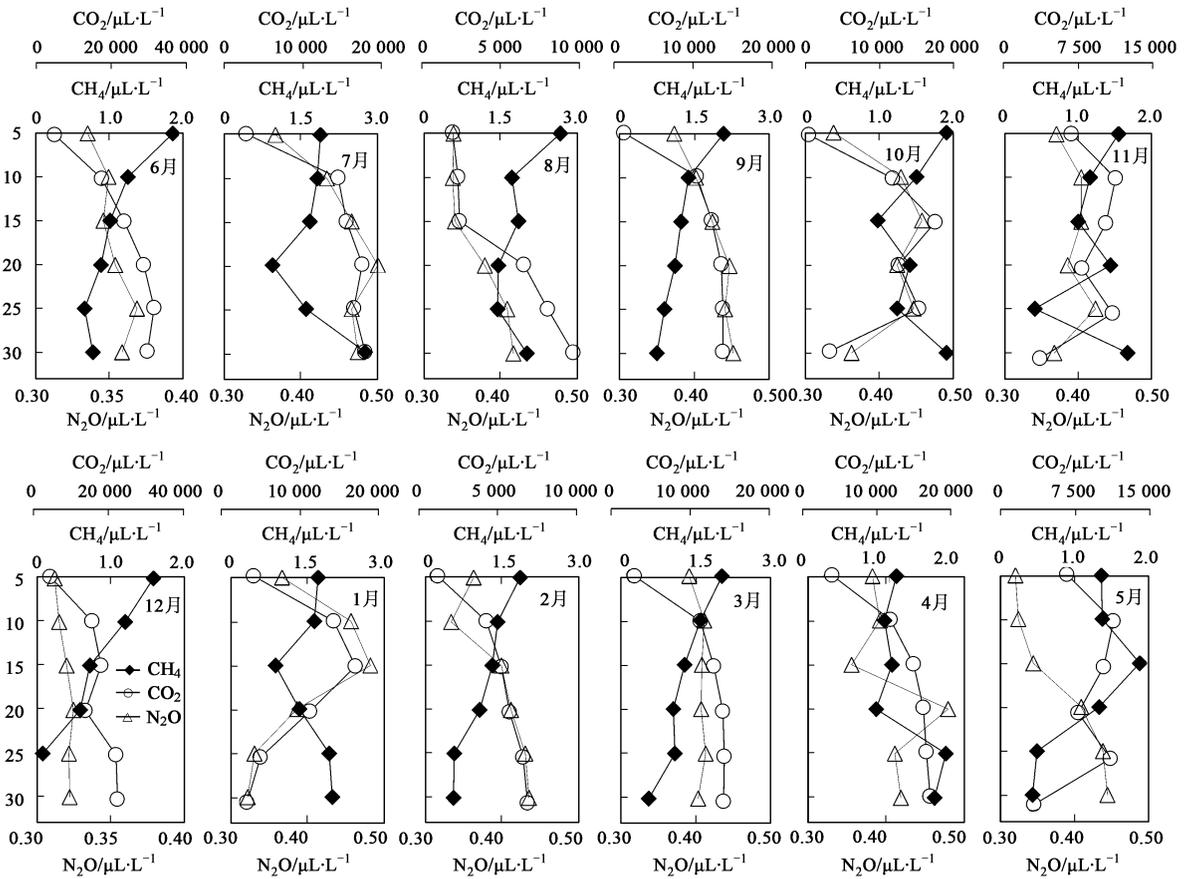


图2 土壤剖面中温室气体浓度随土壤深度的变化

Fig. 2 Variations of greenhouse gases concentrations with the depth in soil profile

底层土壤 N₂O 浓度的降低. 在温度最高的7、8月, 底层中 CH₄ 浓度也要高于表层土壤, 这可能是由于上层土壤温度较高, CH₄ 氧化菌对 CH₄ 的氧化作用增大的结果.

2.2 温度和土壤水分对土壤剖面温室气体浓度的影响

相关分析结果表明, 除了表层土壤(0~5 cm), 土壤温度与5~30 cm 土层剖面 CO₂ 浓度显著相关(图3), 温度是影响土壤剖面 CO₂ 浓度分布的主要因素. 随着温度的升高, 根系呼吸和土壤微生物的代谢活动增强, 尤其在高温多雨的6月份, 10 cm 以下土层中的 CO₂ 浓度都超过了10 000 μL·L⁻¹(图2). 表层土壤中 CO₂ 由于受到大气的影 响, 对温度和土壤水分的响应均不显著. 全年范围来看, 土壤水分与0~15 cm 土层 N₂O 浓度显著相关(图4), 水分的增加有利于促进微生物的硝化和反硝化反应^[9]. 土壤温度和水分则只与表层土壤(0~5 cm) CH₄ 浓度显著相关(图5), 温度的升高和水分的降低有利于提高土壤中 O₂ 浓度, 进而促进 CH₄ 的氧化^[10]. 虽然

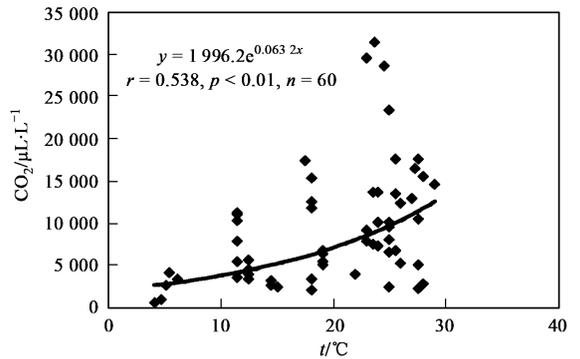


图3 剖面 CO₂ 浓度与地温的相关关系

Fig. 3 CO₂ concentrations versus soil temperature

温度和水分对底土层中 N₂O、CH₄ 浓度全年的时空分布影响不显著, 但在降雨历时长、雨量较大的秋冬季节, 长期的水淹状况会导致底层土壤成为一个 N₂O 的吸收汇, CH₄ 的产生源(图2).

3 讨论

3.1 土壤剖面 CO₂ 和 N₂O 浓度分布的耦合关系

Šmek 等^[11] 早期研究发现土壤中 CO₂ 和 N₂O 浓

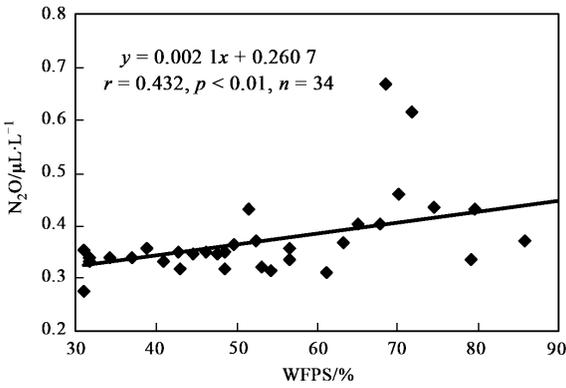


图 4 0~15 cm 土层中 N₂O 浓度与土壤水分的相关关系

Fig. 4 N₂O concentrations versus soil water in the soil profile moisture in 0-15 cm

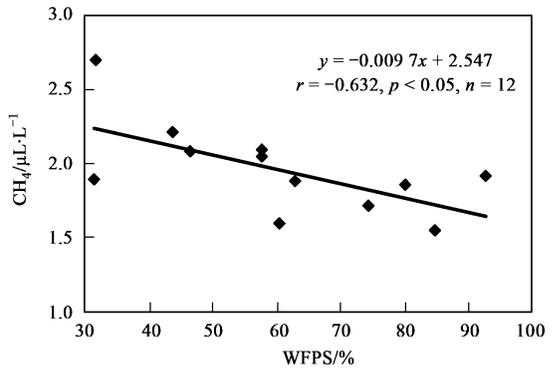
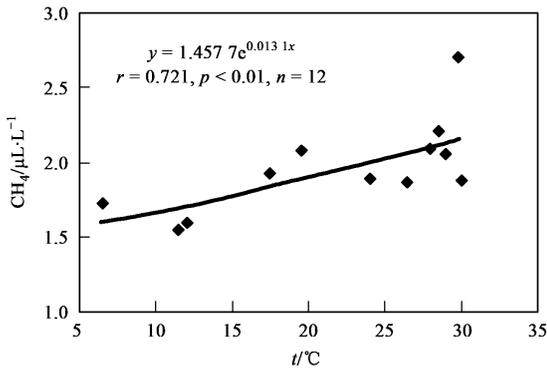


图 5 0~5cm 土层中 CH₄ 浓度与土壤温度、水分的相关关系

Fig. 5 CH₄ concentrations versus soil temperature, water moisture in 0-5 cm

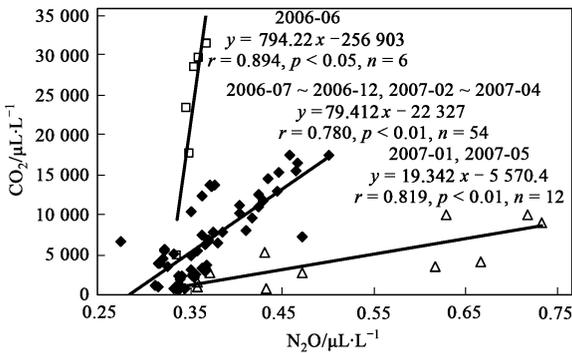


图 6 剖面中 CO₂ 浓度和 N₂O 浓度的相关关系

Fig. 6 Relativity between concentration of CO₂ and N₂O in the soil profile

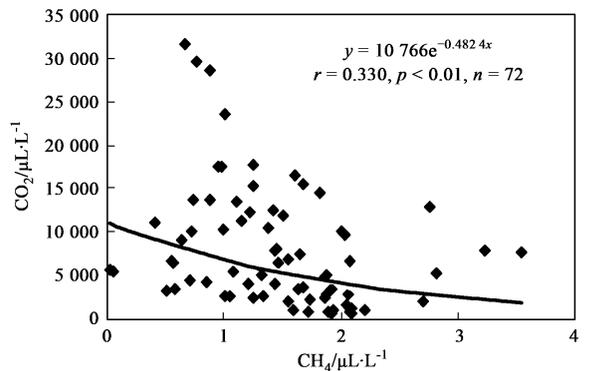


图 7 剖面中 CO₂ 浓度和 CH₄ 浓度的相关关系

Fig. 7 Relivity between concentration of CO₂ and CH₄ in soil profile

度显著正相关. 本研究中, 土壤中 CO₂ 和 N₂O 浓度分布也呈显著正相关, 但在不同的月份回归出来的耦合关系方程不同 (图 6). 土壤中 CO₂ 主要来自于有机质的分解和植物根系的呼吸作用, 二者分布上的一致性反映了 N₂O 可能与这一过程有关. 土壤中有机的分解能够为硝化和反硝化细菌活动提供碳源和能量^[12], 土壤呼吸造成的氧胁迫还可以调节土壤中 N₂O 的产生和消耗^[13-14]; 而土壤中氮的生物化学转化过程也会影响土壤呼吸^[15-16]. 二者之间的耦合关系还受到环境因子的影响, 在不同的月份耦合关系方程式不同. 6 月份, 剖面中 CO₂ 和 N₂O 受到土壤温度的负向调控 (CO₂: $r = -0.999$, $p < 0.01$; N₂O:

$r = -0.909$, $p < 0.05$); 1 月和 5 月, 二者与温度、水分的相关性都不显著; 而在其它月份, 二者则主要受到土壤水分的正向调控 (CO₂: $r = 0.473$, $p < 0.01$; N₂O: $r = 0.423$, $p < 0.01$).

3.2 土壤剖面 CO₂ 和 CH₄ 浓度分布的耦合关系

剖面中 CO₂ 和 CH₄ 的浓度分布规律 (图 7) 呈现

显著负相关关系. 土壤中 CO₂ 和 CH₄ 的产生和消耗涉及碳的生物地球化学反应, 在一定条件下, 二者互为反应基源. 好氧条件下, 土壤对 CH₄ 的氧化主要由 CH₄ 氧化菌完成, 其氧化的最终产物为 CO₂^[17]; 而在厌氧条件下, 土壤中的产 CH₄ 菌又可以利用 H₂ 还原 CO₂ 生成 CH₄^[18]. 从回归出的关系方程来看, 土壤中 CO₂ 和 CH₄ 之间的互逆关系并非 1:1 的线性关

系,这可能是由于土壤呼吸本身也会影响 CH_4 产生和氧化过程^[9].

3.3 土壤剖面 N_2O 和 CH_4 浓度分布的耦合关系

全年土壤中 N_2O 和 CH_4 的浓度分布趋于负相关关系,但只在土壤水分较大的 6、9、10 月和次年的 1 月达到显著水平(图 8),说明土壤水分增加可以增强二者之间的联系.6 月和 9 月,土壤剖面 $\text{N}_2\text{O}/\text{CH}_4$ 随着土壤深度的增加而增大/减小(图 2),整个剖面中表现为产生 N_2O 和消耗大气 CH_4 ;而 10 月和 1 月,15 cm 土层以下 $\text{N}_2\text{O}/\text{CH}_4$ 浓度随着深度的增加

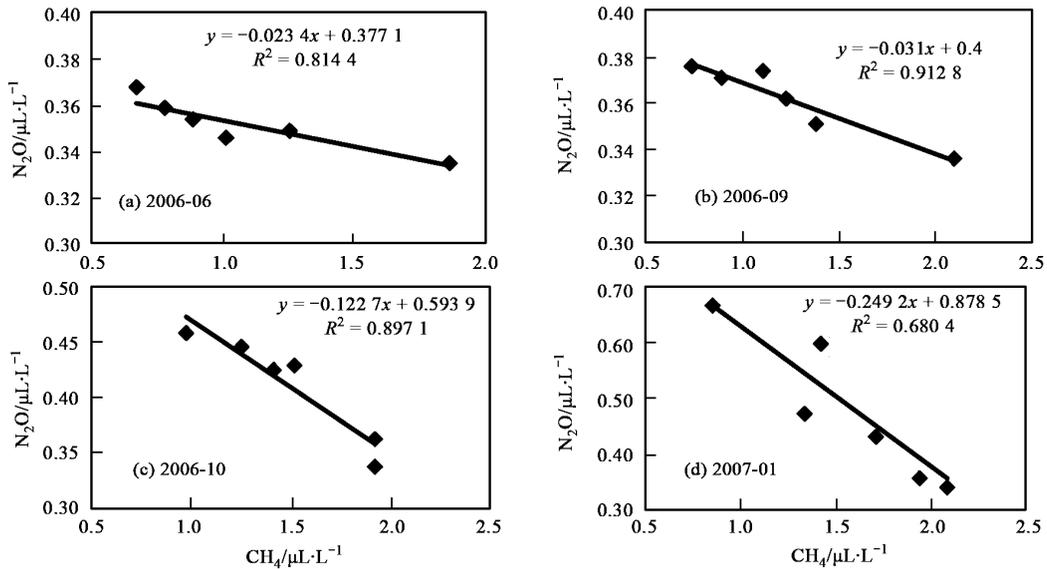


图 8 剖面中 N_2O 浓度和 CH_4 浓度的相关关系

Fig. 8 Relation between concentration of N_2O and CH_4 in soil profile

3.4 气候因子对土壤剖面温室气体浓度的影响

土壤剖面中气体浓度分布特征反映了气体产生、消耗和扩散释放后的综合结果.土壤温度、水分不仅影响土壤中 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 的生成、消耗速率;同时也影响它们在土壤中的迁移和扩散.对于喀斯特地区,土壤温度、水分同时影响剖面中 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 的浓度分布,但影响的效应以及作用的土层深度有所不同.土壤温度是影响土壤剖面 CO_2 浓度分布的主要因素,而气候因子对剖面 N_2O 、 CH_4 浓度分布的调控则主要在浅层和表层土壤.虽然土壤水分对剖面 CO_2 和底土层 N_2O 、 CH_4 浓度分布的影响不显著,但在降雨历时长、雨量较大的秋冬季节,土壤水分的增加会导致底层土壤消耗 CO_2 、 N_2O ,产生 CH_4 .不仅如此,土壤温度和水分也是影响剖面中 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 浓度耦合关系的重要因素,尤其是

逐渐减小/增大(图 2),表现为消耗 N_2O 和产生 CH_4 .早期学者对土壤 N_2O 和 CH_4 通量的监测结果表明土壤中 N_2O 的产生和 CH_4 的消耗相互关联^[20-22],认为这主要与 NH_4^+ (和/或 NH_3) 对 CH_4 氧化菌氧化 CH_4 的竞争性抑制作用有关^[23,24],随着水分的增大,这种抑制作用增强^[23].本研究结果表明,在厌氧条件下,土壤中 N_2O 的消耗和 CH_4 的产生同样相互关联.可见,随着土壤水分的增加,土壤中 N_2O 产生/消耗和 CH_4 消耗/产生的负相关性加强,但要进一步确定二者相关性的诱因,还需要深入研究.

对土壤 CO_2 和 N_2O 之间的耦合关系,进一步反映了二者在土壤中的产生、消耗和扩散同时受到土壤温度和水分的影响.

4 结论

(1)总体上, CO_2 和 N_2O 浓度随着土壤深度的增加逐渐增大, CH_4 浓度则为逐渐减小.但在阴冷潮湿的 10、11 月和 1 月,持续性降雨导致 15 cm 以下 CO_2 和 N_2O 浓度随着深度的增加而明显减小, CH_4 浓度明显增加.

(2)剖面中 CO_2 与 N_2O 、 CH_4 的时空分布显著正相关, N_2O 和 CH_4 的时空分布的互逆性在水分较大的月份也达到显著水平,表明土壤中碳、氮的生物过程是紧密关联的.

(3)土壤温度和水分不仅影响剖面中 CO_2 、 N_2O

和 CH_4 的浓度分布, 同时也调控三者间的耦合关系.

参考文献:

- [1] Shrestha B M, Sitaula B K, Singh B R *et al.* Fluxes of CO_2 and CH_4 in soil profiles of a mountainous watershed of Nepal as influenced by land use, temperature, moisture and substrate addition [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, **68**: 155-164.
- [2] Inubushi K, Furukawa Y, Hadi A. Seasonal changes of CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes in relation to land-use change in tropical peatlands located in coastal area of South Kalimantan [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**: 603-608.
- [3] 郑乐平. 土壤气体采样装置的研制 [J]. *地质地球化学*, 1999, **27**(1): 113-114.
- [4] 郑乐平. 黔中岩溶地区草地下土壤 CO_2 含量的变化特征 [J]. *上海环境科学*, 2000 **19**(7): 333-335.
- [5] 潘根兴, 曹建华, 何师意, 等. 岩溶土壤系统对空气 CO_2 的吸收及其对陆地系统碳汇的意义——以桂林、丫吉村岩溶试验场的野外观测和模拟实验为例 [J]. *地学前沿*, 2000, **7**(4): 580-587.
- [6] 马学慧, 刘兴土. 湿地甲烷排放研究简述 [J]. *地理科学*, 1995, **15**(2): 163-169.
- [7] Huang S, Pant H K, Lu J. Effects of water regimes on nitrous oxide emission from soils [J]. *Ecological Engineering*, 2007 **31**: 9-15.
- [8] Smith K A, Thomson P E, Clayton H. Effects of temperature water content and nitrogen fertilization on emissions of nitrous oxide by soils [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**: 3301-3309.
- [9] Ball B C, Crichton I, Horgan G W. Dynamics of upward and downward N_2O and CO_2 fluxes in ploughed or no-tilled soils in relation to water-filled pore space, compaction and crop presence [J]. *Soil Tillage Research*, 2008, **101**: 20-30.
- [10] Einola J M, Kettunen R H, Rintala J A. Responses of methane oxidation to temperature and water content in cover soil of a boreal landfill [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**: 1156-1164.
- [11] Šmek M, Elhottová D, Klimeš F. Emissions of N_2O and CO_2 , denitrification measurements and soil properties in red clover and ryegrassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004 **36**: 9-21.
- [12] Kettunen R, Saarnio S, Martikainen P J *et al.* Can a mixed stand of N_2 -fixing and non-fixing plants restrict N_2O emissions with increasing CO_2 concentration [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007 **39**: 2538-2546.
- [13] Baggis E M, Richter M, Cadisch G. Denitrification in grass sward is increased under elevated atmospheric CO_2 [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**: 729-732.
- [14] Azam F, Gill S, Farooq S. Availability of CO_2 as a factor affecting the rate of nitrification in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**: 2141-2144.
- [15] Kessel C V, Pennock D J, Farel R E. Seasonal variation in denitrification and nitrous oxide evolution at landscape scale [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, **57**: 988-995.
- [16] Liikainen A, Ratilainen E, Saario S *et al.* Greenhouse gas dynamics in boreal littoral sediments under raised CO_2 and nitrogen supply [J]. *Freshw Biol*, 2003 **48**: 500-11.
- [17] Yavitt B. Methane consumption in decomposing sphagnum-derived peat [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**: 441-447.
- [18] Rigler E, Boltenstem S Z. Oxidation of ethylene and methane in forest soils—effect of CO_2 and mineral nitrogen [J]. *Geoderma*, 1999, **90**: 147-159.
- [19] 宋长春, 杨文燕, 徐小锋. 沼泽湿地生态系统土壤 CO_2 和 CH_4 排放动态及影响因素 [J]. *环境科学*, 2004 **25**(7): 1-6.
- [20] Mosier A, Schimel D, Valentine D *et al.* Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands [J]. *Nature*, 1991, **350**: 330-332.
- [21] 张秀君, 徐慧, 陈冠雄. 影响森林土壤 N_2O 排放和 CH_4 吸收的主要因素 [J]. *环境科学*, 2002, **23**(5): 8-12.
- [22] 肖冬梅, 王淼, 姬兰柱, 等. 长白山阔叶红松林土壤氧化亚氮和甲烷的通量研究 [J]. *应用生态学报*, 2004 **15**(10): 1855-1859.
- [23] Sitaula B K, Bakken L R. Nitrous oxide release from spruce forest soil—relationships with nitrification, methane uptake, temperature, moisture and fertilization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, **25**: 1415-1421.
- [24] Zhang H, He P, Shao L. N_2O emission at municipal solid waste landfill sites: effects of CH_4 emissions and cover soil [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**: 2623-2631.
- [25] Boeckx P, Cleemput O V. Methane oxidation in a neutral landfill cover soil: Influence of moisture content, temperature and nitrogen turnover [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996 **25**: 178-183.