

喀斯特地区土壤剖面 CO₂、CH₄和 N₂O 浓度的相关关系^{*}

刘芳^{1,2} 刘丛强^{1**} 王仕禄¹ 朱正杰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, 广西百色 533000 ³重庆地质矿产研究院, 重庆 400042

摘要 2006年6月—2007年5月对喀斯特地区土壤剖面中 CO₂、CH₄和 N₂O进行采样测定,分析了三者间时空分布的相关关系。结果表明,土壤剖面中 CO₂和 N₂O含量分别为 0.35~35.3 m^l L⁻¹和 0.31~5.31 μ^l L⁻¹,夏秋季节高于冬春季节;CH₄浓度为 0.1~4.7 μ^l L⁻¹,季节差异不大。随着土壤深度的增加,CO₂和 N₂O的浓度先增加而后明显减小或趋于稳定,CH₄浓度则与 CO₂和 N₂O相反。相关分析表明,土壤剖面 CO₂与 N₂O浓度的时空分布呈显著正相关,与 CH₄则呈显著负相关。N₂O和 CH₄的时空变化规律为互逆关系,但只在花溪荒草地、清镇阔叶林以及森林公园的马尾松林和阔叶林观测点达到显著水平。

关键词 喀斯特; 温室气体; 相关关系; 黔中地区

中图分类号 X511 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)4-0717-07

Correlations among CO₂, CH₄, and N₂O concentrations in soil profiles in central Guizhou Karst area. LIU Fang², LIU Congqiang², WANG Shi-lu¹, ZHU Zheng-jie¹ (State Key Laboratory of the Environmental Geochemistry Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; ²Department of Chemistry and Life Science, Baize University, Baize 533000, Guangxi, China; ³Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China). Chinese Journal of Ecology 2010 29(4): 717-723.

Abstract From June 2006 to May 2007, the monthly CO₂, CH₄, and N₂O concentrations in soil profiles in central Guizhou Karst area were measured with their spatiotemporal correlations analyzed. The CO₂ and N₂O concentrations in the soil profiles were 0.35-35.3 m^l L⁻¹ and 0.31-5.31 μ^l L⁻¹, respectively being higher in summer and autumn than in winter and spring, and the CH₄ concentration was 0.1-4.7 μ^l L⁻¹, with no significant difference among seasons. With the increase of soil depth, the CO₂ and N₂O concentrations increased first and then decreased or tended to be stable while CH₄ had an inverse trend unlike CO₂ and N₂O. The spatiotemporal distribution of CO₂ in the soil profiles was significantly positively correlated with that of N₂O but negatively correlated with that of CH₄; while the spatiotemporal variations of CH₄ and N₂O were negatively correlated being significant in Huaxi grassland, Qingzhen hardwood forest and forest park Pinus massoniana forest and hardwood forest.

Key words: Karst; greenhouse gas; correlation; central Guizhou

大气中的 CO₂、N₂O和 CH₄被认为是最重要的温室气体(王明星等, 2003)。土壤是 CO₂、N₂O和 CH₄重要的生物源和汇,涉及 C、N的生物地球化学过程(韩兴国和王智平, 2003)。土壤温室气体的释

放和吸收主要是其在土壤中产生、消耗和扩散综合作用的结果,剖面中气体的时空分布直接影响气体的地-气交换。目前,国内外许多学者研究了不同生态系统和不同类型土壤剖面中温室气体的时空变化规律及影响因素(Luo et al., 1998; 郑乐平, 2000; Risk et al., 2002; 梁冬丽等, 2003; 梁战备, 2004; Han et al., 2005),并建立扩散模式预测其潜在的释放能

^{*}国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403200)和中国科学院西部行动计划资助项目(KZCX2-XB2-08)。

^{**}通讯作者 E-mail: liucqiang@vip.sj.cn

收稿日期: 2009-08-25 接受日期: 2010-01-11

力 (Fang & Moncrieff 1999, Flechard et al., 2007), 但主要是单一地研究某一种气体, 很少考虑它们之间的联系。

我国西南溶岩区是一个巨大的碳库, 贵州位于华南碳酸盐岩出露的中心部位, 是我国乃至世界热带、亚热带喀斯特分布面积最大、发育最强烈的地区。以碳酸盐岩为物质基础形成的喀斯特生态环境, 特定的地质、地貌、土壤、植被、气候、水文等环境因子的综合作用赋予了其独特内涵。本试验以黔中喀斯特地区土壤为研究对象, 初步研究土壤 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 剖面浓度分布之间的关系, 为了解温室气体在土—气界面的分布提供依据。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

研究区地处贵州中部 ($106^\circ 20' \text{E}$ — $107^\circ 00' \text{E}$, $26^\circ 22' \text{N}$ — $26^\circ 48' \text{N}$), 属亚热带湿润温和型气候, 年平均气温 15.3°C 。受季风影响, 雨量较为充沛, 年平均降水量在 1200 mm 以阴雨天气居多, 冬季无降雪或降雪很少。采样区域分别位于贵阳市区的森林公园, 市郊的花溪区和清镇。花溪位于贵阳市西南部, 区域内植被条件好; 清镇位于贵阳市西部, 属于典型的喀斯特生态环境条件 (梅再美和熊康宁, 2003)。各个采样区域内, 又按植被类型分别设立 2~3 个采样点。森林公园采样点分别位于马尾松林 (*Pinus massoniana*) 和油茶林 (*Camellia oleifera*) 内; 花溪荒地采样点退耕 3 年以上, 以三叶草 (*Trifolium pratense*) 为主; 灌丛采样点基岩裸露约为 40%, 土壤厚度 $< 30 \text{ cm}$ 以火棘 (*Pyracantha fruncea*) 和柃木 (*Loropetalum chinense*) 为优势种, 在较平的梯级平地上开垦为旱田; 马尾松林采样点土壤发育母岩为第四纪红色粘土, 土壤呈砖红色, 土质粘重。清镇灌丛采样点土被不连续, 岩石裸露 70% 以上, 土层浅薄, 一般 $< 30 \text{ cm}$ 植被覆盖度差, 物种较单一, 优势物种为花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*)、异穗鼠栗 (*Rhamnus heterophylla*) 和悬钩子蔷薇 (*Rosa rubus*); 阔叶林采样点为喀斯特常绿阔叶林, 林内草本、蕨类、灌木、乔木共生, 植被物种丰富, 土层深厚, 土壤发育不完全, 夹杂砾石较多。各观测点植被类型与土壤理化性质见表 1。

1.2 采样方法

1.2.1 气体样品采集 在各采样点随机划一块 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 采样区域, 2006 年 6 月—2007 年 5 月, 每

表 1 各观测点土壤理化性质

Tab. 1 Physical and chemical characteristics of the soil in studied sites

采样点	植被类型	土壤类型	pH	有机碳 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
花溪	退耕荒地	淋溶石灰土	7.3	28.5	2.35
	灌丛	淋溶石灰土	6.3	34.9	3.64
	马尾松林	黄壤	4.0	19.2	1.65
清镇	灌丛	淋溶石灰土	6.3	44.2	3.69
	阔叶林	淋溶石灰土	7.9	56.0	6.09
森林公园	马尾松林	黄壤	4.0	26.0	2.41
	阔叶林	黄壤	4.7	23.3	2.06

月 12—14 日 9:00—11:00 点采集各土壤剖面气体 (7 月只采集清镇灌丛剖面)。用自制的采样装置 (郑乐平, 1999) 由上至下采集剖面 $5 \sim 80 \text{ cm}$ (花溪灌丛和清镇灌丛采集 $5 \sim 30 \text{ cm}$) 土层的气体, 30 cm 以上间隔 5 cm , 以下间隔 10 cm 。将内径为 6 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 cm 部分均匀分布 2 mm 的通气孔, 便于土壤空气流入管道。每次采样将 3 根连通钢管插入土壤指定的深度, 使用 100 mL 注射器除去管道内的空气后采集土壤气体, 用三通连接转存储于事先抽成高真空 (1.0 Pa) 的 30 mL 玻璃气瓶内。

1.2.2 样品测定 样品带回实验室后使用 HP 6890 气相色谱仪分析, 使用自动进样系统, 每次进样体积为 1 mL 。 N_2O 的测定使用 PorapakQ 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 Ar/CH_4 ($95\% : 5\%$), 流速 $20 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。 CH_4 的测定使用 PorapakQ 填充柱分离, 火焰原子检测器 (FD) 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 N 催化剂高温催化为 CH_4 后测定, 催化温度为 375°C 。

1.2.3 土壤理化性质和环境因子的测定 采用电位法测定土壤 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$, 水土比为 $5 : 1$ 。利用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HC 溶液浸泡 24 h 去除土壤碳酸盐后在 PE2400 型元素分析仪上测定土壤有机碳、全氮含量 (Midwood & Boutton, 1998)。每次采集气体样品同时用地温计测定气温、地表温度和 $5 \sim 30 \text{ cm}$ 土层温度 (间隔 5 cm 测定), 并使用土钻采集剖面 $5 \sim 80 \text{ cm}$ 土壤 (30 cm 以上间隔 5 cm 采集, 以下间隔 10 cm 带回实验室用烘干法测定土壤含水量。

1.3 数据处理

试验设 3 个采样点共 7 个剖面, 分别计算各剖面 CO₂、N₂O 和 CH₄ 浓度的季节平均值 (春季为 3—5 月; 夏季为 6—8 月, 秋季为 9—11 月; 冬季为 12、1、2 月) 所有数据用 Origin 7.0 软件进行处理。同时使用 SPSS 11.5 软件分析全年剖面 CO₂、N₂O 和 CH₄ 浓度的相关性。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面中 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的时间变化

由图 1 可见, 土壤剖面中 CO₂ 和 N₂O 浓度分别介于 0.35~35.3 ml·L⁻¹ 和 0.31~5.31 μL·L⁻¹。总体上, 剖面 CO₂、N₂O 浓度在夏、秋季节高于冬春季。土壤温度较高有利于土壤呼吸及氮的转化, 尤其在夏季, 高温多雨的天气可使剖面中 CO₂ 浓度超过 20.0 ml·L⁻¹。全年土壤剖面中 CH₄ 浓度介于 0.1~4.7 μL·L⁻¹ (图 1 图 2 和图 3) 季节差异不大。

2.2 土壤剖面中 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的空间变化

土壤剖面气体的浓度分布反应了气体产生、消耗和扩散释放后的综合结果。虽然不同土壤剖面气

体的空间分布有差异, 但总体上, 自地表向下, 随着土壤深度的增加, CO₂ 和 N₂O 的浓度先增加而后明显减小或趋于稳定 (图 1、图 2 和图 3) 与很多研究结果相似 (Amundson & Davidson 1990, Billings et al, 1998, 郑乐平, 2000, 梁冬丽, 2003)。在土壤的有机质层, 丰富的有机质改变了土壤结构, 增加了土壤的渗透性, 使土壤自身产生的 CO₂ 和 N₂O 与大气中的 CO₂ 和 N₂O 混合, 导致剖面中 CO₂ 和 N₂O 浓度由上往下逐渐升高; 在较深的土层中, 土壤中气体的扩散能力减弱, 自身生成的 CO₂ 和 N₂O 与大气的混合作用减小, CO₂ 和 N₂O 浓度主要取决于土壤中气体的产生能力。随着土壤深度的增加, 土壤呼吸作用减小, 有机质含量减小, 提供给微生物的反应底物减少, 同时反硝化生成的 N₂O 也易被进一步还原成 N₂, 此时土壤中 CO₂ 和 N₂O 浓度随着土壤深度的增加而逐渐减小或趋于稳定。

随着土壤深度增加, CH₄ 浓度先减小而后逐渐增加或趋于稳定, 与 CO₂ 和 N₂O 的相反。浅层土壤 CH₄ 浓度主要取决于大气 CH₄ 向土壤的扩散能力和土壤中 CH₄ 氧化菌的氧化能力。随着深度的增

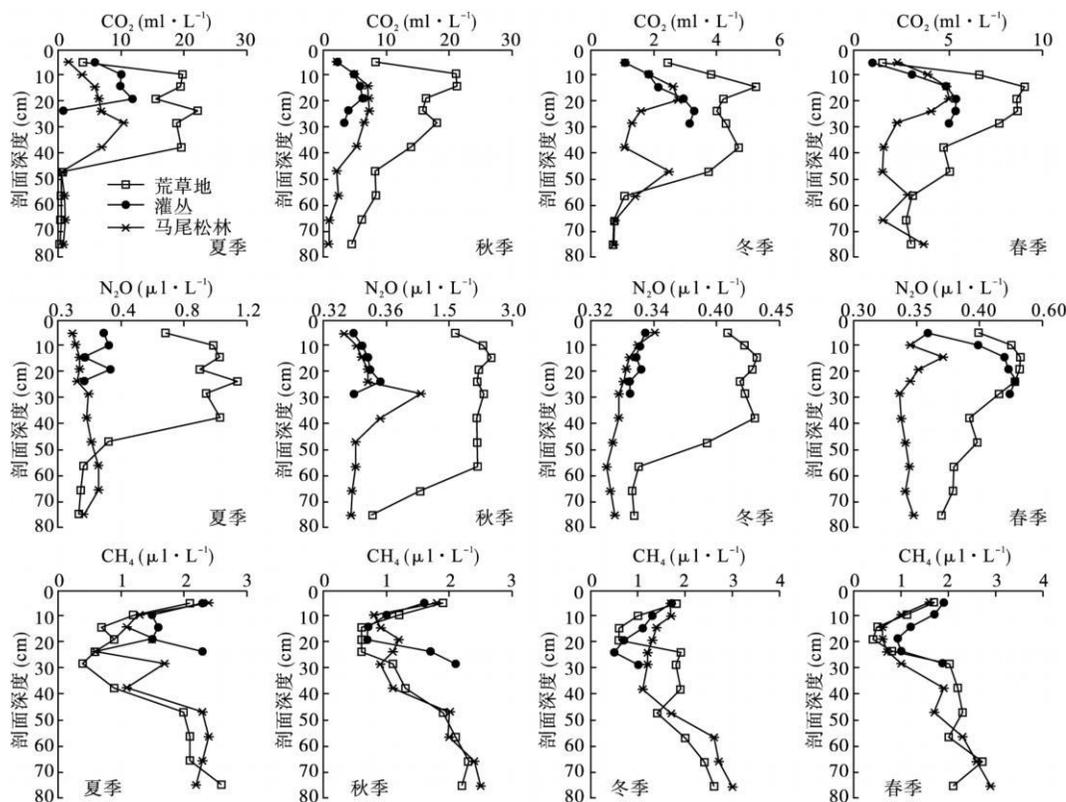


图 1 花溪各采样点剖面土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 浓度的时空变化

Fig. 1 Temporal and spatial variations of profile concentration of CO₂, CH₄ and N₂O in Huaxi

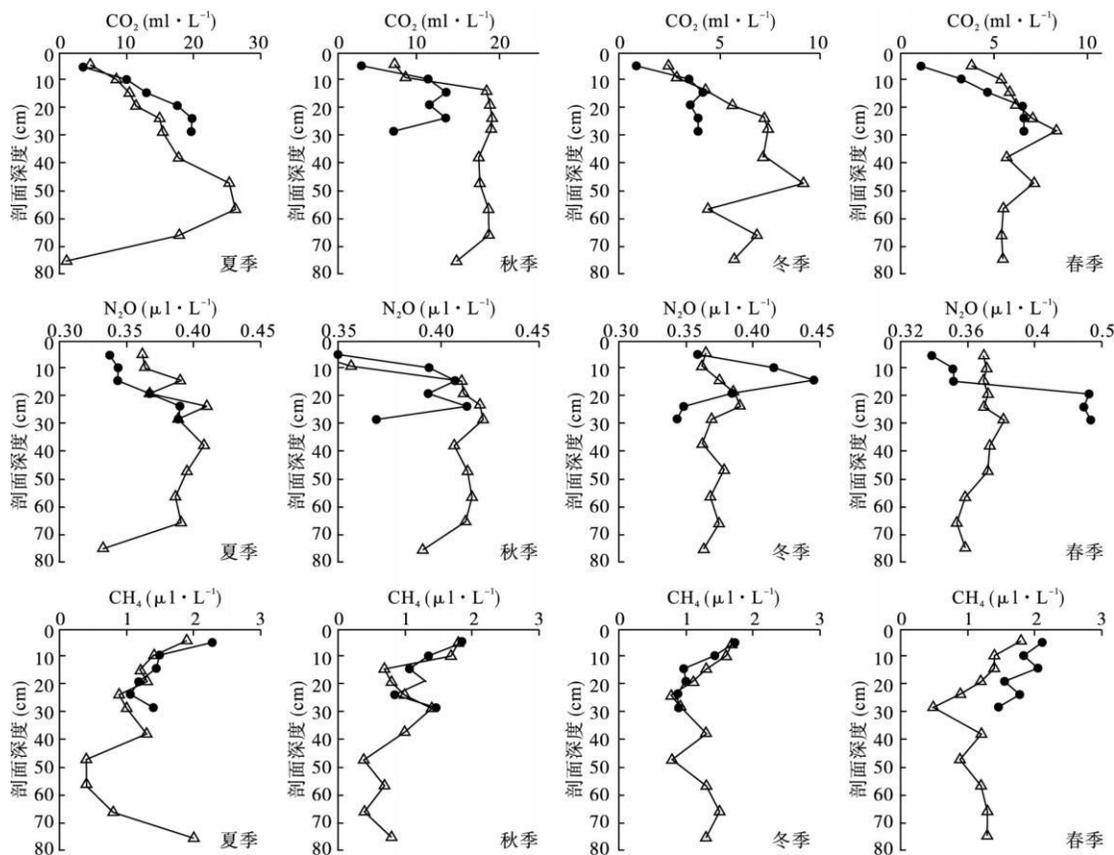


图 2 清镇公园采样点剖面土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 浓度的时空变化

Figure 2 Temporal and spatial variations of profile concentration of CO_2 , CH_4 and N_2O in Qingzhen

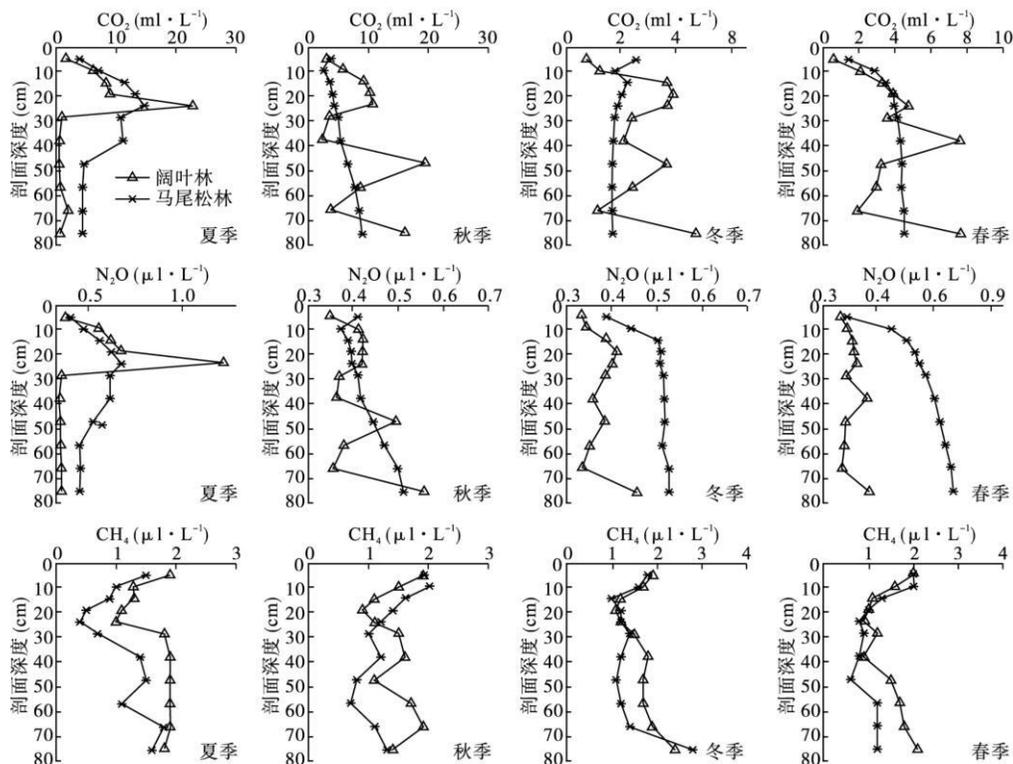


图 3 森林公园采样点剖面土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 浓度的时空变化

Figure 3 Temporal and spatial variations of profile concentration of CO_2 , CH_4 and N_2O in Forest Park

加,一方面,土壤对 CH₄的氧化能力由于大气 CH₄扩散和供 O₂的受限而降低。另一方面,当土壤厌氧环境达到产甲烷细菌活动的条件时,产甲烷菌将各类细菌发酵分解形成的低碳有机酸(如己酸)、H₂和 CO₂还原生成 CH₄。因此,土壤 CH₄剖面浓度随着土壤深度的增加,先减小而后逐渐增大或趋于稳定。

2.3 土壤剖面 CO₂、N₂O和 CH₄的相关性

2.3.1 土壤剖面 CO₂和 N₂O的相关性 由表 2可见,除了清镇灌丛淋溶石灰土以外,其他采样点土壤剖面 CO₂和 N₂O显著正相关,显示出相同的时空变化规律,与 Šimek等(2004)的研究结果相同。Baeggs等(2003)和 Ineson等(1998)研究表明,土壤中 CO₂的累积可促进反硝化反应,而 Azam等(2005)发现,土壤中硝化反应也与 CO₂浓度有关,CO₂浓度的降低会抑制硝化反应。高浓度的 CO₂可以促进土壤中碳、氮循环(Zak et al., 1993; Ross et al., 2000),从而为硝化和反硝化细菌活动提供反应底物和能量,而植物呼吸造成的氧胁迫也可以调节土壤中 N₂O的产生和消耗,进而影响土壤中整个 N素的转化(Azam et al., 2005)。另外,有研究表明,土壤反硝化过程中,土壤呼吸也会增加(Christensen et al., 1990; van Kessel et al., 1993)。

表 2 土壤剖面中 CO₂、CH₄和 N₂O相关性分析
Tab. 2 Correlation analysis among CO₂, CH₄ and N₂O in soil profile

地区	植被类型	项目	N ₂ O	CO ₂	CH ₄
退耕荒草地	花溪 (n=112)	N ₂ O	1		
		CO ₂	0.231*	1	
		CH ₄	-0.287**	-0.443**	1
灌丛	花溪 (n=112)	N ₂ O	1		
		CO ₂	0.502**	1	
		CH ₄	-0.166	-0.398**	1
	清镇 (n=112)	N ₂ O	1		
		CO ₂	0.109	1	
		CH ₄	-0.128	-0.351**	1
马尾松林	花溪 (n=111)	N ₂ O	1		
		CO ₂	0.364**	1	
		CH ₄	-0.157	-0.749**	1
森林公园	(n=121)	N ₂ O	1		
		CO ₂	0.363**	1	
		CH ₄	-0.476**	-0.396**	1
阔叶林	清镇 (n=121)	N ₂ O	1		
		CO ₂	0.717**	1	
		CH ₄	-0.407**	-0.616**	1
森林公园	(n=114)	N ₂ O	1		
		CO ₂	0.747**	1	
		CH ₄	-0.267**	-0.369**	1

* P<0.05, ** P<0.01

清镇淋溶石灰土 CO₂和 N₂O剖面浓度的时空分布相关性分析不显著,进一步分析表明,二者在剖面中的浓度分布仍然显著正相关,只是在不同的月份二者回归的耦合关系方程不同。2006年 6月:

$$y = 794.22x - 256.9 \quad (r = 0.894 \quad P < 0.05)$$

式中, y为 CO₂的剖面浓度(mL L⁻¹), x为 N₂O的剖面浓度(μL L⁻¹)。二者剖面浓度与土壤温度均呈显著负相关(CO₂: r = -0.994 P < 0.01; N₂O: r = -0.898 P < 0.05),主要受到土壤温度的影响。

2006年 7月—2006年 12月、2007年 2月—2007年 4月:

$$y = 79.241x - 22.327 \quad (r = 0.780 \quad P < 0.01)$$

式中, y为 CO₂的剖面浓度(mL L⁻¹), x为 N₂O的剖面浓度(μL L⁻¹)。此时,二者剖面浓度与土壤水分均呈显著正相关(CO₂: r = 0.473 P < 0.01; N₂O: r = 0.423 P < 0.01),土壤水分为主要的影响因素。

2007年 1和 5月:

$$y = 19.342x - 5.5704 \quad (r = 0.819 \quad P < 0.01)$$

式中, y为 CO₂的剖面浓度(mL L⁻¹), x为 N₂O的剖面浓度(μL L⁻¹)。二者剖面浓度与土壤温度、水分的相关性均不显著,土壤温度和水分对 CO₂和 N₂O剖面浓度的影响很小。

可见,石漠化严重的喀斯特地区,不同月份土壤温度和水分对剖面中 CO₂和 N₂O的影响程度不同,导致二者回归出来的耦合关系方程也不同。

2.3.2 土壤剖面 CO₂和 CH₄的相关性 土壤剖面中 CO₂和 CH₄显著负相关,表现为互逆的时空变化规律(表 2),且二者之间的相关性并不受土壤类型和植被类型的影响,在所有的观测点均极显著相关。土壤中 CO₂和 CH₄的产生和消耗都涉及土壤碳的生物地球化学反应。一方面,在好氧条件下,CH₄可以被 CH₄氧化菌氧化成 CO₂;另一方面,在厌氧条件下,CO₂可作为产 CH₄菌的底物而促进土壤中 CH₄的产生(Driscoll et al., 1999)。

2.3.3 土壤剖面 CH₄和 N₂O的相关性 总体上,土壤剖面中 N₂O和 CH₄的时空变化规律互逆,但只在花溪荒草地、清镇阔叶林以及森林公园的马尾松林和阔叶林观测点达到显著水平(表 2)。林地土壤剖面中二者间的相关性较好,而在基岩裸露较严重的花溪灌丛和清镇灌丛观测点,二者间的相关系最差。不少学者先后报道了土壤 N₂O和 CH₄通量之

间存在的显著负相关 (Mosier et al, 1991; 张秀君等, 2002; 肖冬梅等, 2004) 或正相关关系 (徐慧, 1999) 认为二者间的相互关系很可能是自然界存在的一种生物学现象, 但形成的机理尚未完全弄清, 一般认为主要与土壤中的无机氮含量有关。一方面, NH_4^+ 通过与 CH_4 竞争甲烷单氧酶来抑制土壤中 CH_4 的氧化; 另一方面, 在厌氧条件下, 土壤中 NO_3^- 的反硝化作用因与产 CH_4 菌争夺底物中的 H 也会抑制土壤中 CH_4 的生成 (Clarens et al, 1998; Klüber & Conrad 1998)。此外, 也有学者通过实验室培养验证 CH_4 氧化可影响硝化和反硝化反应 (Lee et al, 2001; Islas-Lima et al, 2004; Modin et al, 2007)。 N_2O 和 CH_4 二者相互关系还有待进一步的研究。

3 结论

土壤剖面中气体分布特征反映了气体产生、消耗和扩散的综合结果。黔中土壤剖面中 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 浓度分别介于 $0.35 \sim 35.3 \text{ m} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.31 \sim 5.31 \mu \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.1 \sim 4.7 \mu \cdot \text{L}^{-1}$ 。总体上, 剖面中 CO_2 、 N_2O 含量在夏秋季节较高, CH_4 则季节差异不大。自地表向下, 随着土壤深度的增加, CO_2 和 N_2O 的浓度先增加而后明显减小或趋于稳定, CH_4 浓度则与 CO_2 和 N_2O 相反, 先减小而后逐渐增加或趋于稳定。

全年土壤剖面中 CO_2 和 N_2O 显著正相关, 其中清镇灌丛土壤剖面中二者的相关性还受到土壤温度、水分的影响。 CH_4 与 CO_2 在所有采样点均极显著负相关, 与 N_2O 趋于互逆关系, 但只在花溪荒草地、清镇阔叶林以及森林公园马尾松林和阔叶林观测点达显著水平。

土壤中温室气体的产生和消耗涉及到土壤呼吸、硝化作用、反硝化作用、甲烷氧化作用等几类不同的微生物学过程, 对于 3 种气体剖面浓度分布相关性的进一步确证、形成机理及其调控因素还有待进一步的研究。

参考文献

韩兴国, 王智平. 2003 土壤生物多样性与微量气体 (CO_2 , CH_4 , N_2O) 代谢. 生物多样性, 11(4): 322-332
梁冬丽, 同延安, Ove E 等. 2003 娄士土壤剖面 N_2O 浓度的时间和空间变异. 生态学报, 23(4): 731-737.

梁战备, 史 弈, 王琛瑞, 等. 2004 长白山阔叶红松林不同深度森林土壤氧化 CH_4 研究. 中国科学院研究生院学报, 21(1): 71-77.
梅再美, 熊康宁. 2003 喀斯特地区水土流失动态特征及生态效益评价. 中国岩溶, 22(2): 136-143
王明星, 张仁健, 郑循华. 2000 温室气体的源与汇. 气候与环境研究, 5(1): 75-79.
肖冬梅, 王 森, 姬兰柱, 等. 2004 长白山阔叶红松林土壤氧化亚氮和甲烷的通气量研究. 应用生态报, 15(10): 1855-1859
徐 慧. 1999 森林土壤氧化亚氮排放速率和甲烷吸收速率间的相互关系. 中国学术期刊文摘, 5(10): 1360-1361.
张秀君, 徐 慧, 陈冠雄. 2002 影响森林土壤 N_2O 排放和 CH_4 吸收的主要因素. 环境科学, 23(5): 8-12
郑乐平. 1999 土壤气体采样装置的研制. 地质地球化学, 27(1): 113-114
郑乐平. 2000 黔中岩溶地区草地土壤 CO_2 含量的变化特征. 上海环境科学, 19(7): 333-335
Amundson RG, Davidson EA. 1990 Carbon dioxide and nitrous gases in the soil atmosphere. Journal of Geochimical Exploration 38: 13-41.
Azam F, Gill S, Farooq S. 2005 Availability of CO_2 as a factor affecting the rate of nitrification in soil. Soil Biology & Biochemistry 37: 2141-2144
Baggs EM, Richter M, Cadisch G, et al. 2003 Denitrification in grass sward is increased under elevated atmospheric CO_2 . Soil Biology & Biochemistry 35: 729-732
Billings SA, Richter DJ, Yarie J. 1998 Soil carbon dioxide fluxes and profile concentrations in two boreal forests. Canadian Journal of Forest Research 28: 1773-1783
Christensen S, Sinkins K, Tiedje J. 1990 Temporal patterns of soil denitrification: Their stability and causes. Soil Science Society of America Journal 54: 452-457.
Clarens M, Bemet ND, DeGenes JP, et al. 1998 Effects of nitrogen oxides and denitrification by Pseudomonas suzeri on acetotrophic methanogenesis by Methanosarcina mazei. FEMS Microbiology Ecology 25: 271-276
Driscoll DA, Ricker E, Zechmeister-Boitenstem S. 1999 Oxidation of ethylene and methane in forest soils: effect of CO_2 and mineral nitrogen. Geoderma 90: 147-159
Fang C, Moncrieff JB. 1999 A model for soil CO_2 production and transport. 1. Model development. Agricultural and Forest Meteorology 95: 225-236
Flecharl CR, Nefel A, Jocher M, et al. 2007 Temporal change in soil pore space CO_2 concentration and storage under permanent grassland. Agricultural and Forest Meteorology 144: 66-84
Han GH, Yoshikoshi H, Nagai H, et al. 2005 Concentration

- and carbon isotope profile of CH₄ in paddy rice canopy: Isotopic evidence for change in CH₄ emission pathways upon drainage. *Chemical Geology* **218**: 25–40.
- Ineson P, Coward PA, Hartwig UA. 1998. Soil gas fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ beneath Lolium perenne under elevated CO₂. The Swiss free air carbon dioxide enrichment experiment. *Plant and Soil* **198**: 89–95.
- Isas-Lima S, Thalasso J, Gomez-Hernandez J. 2004. Evidence of anoxic methane oxidation coupled to denitrification. *Water Research* **38**: 13–16.
- Klüber HD, Conrad R. 1998. Effects of nitrate, nitrite, NO and N₂O on methanogenesis and other redox processes in anoxic rice field soil. *FEMS Microbiology Ecology* **25**: 301–318.
- Lee HJ, Bae H, Cho KM. 2001. Simultaneous nitrification and denitrification in a mixed methanotrophic culture. *Biotechnology Letters* **23**: 935–941.
- Luo J, Tiltman RW, White RE, et al. 1998. Variation in denitrification activity with soil depth under pasture. *Soil Biology & Biochemistry* **30**: 897–903.
- Midwood AJ, Boutton TW. 1998. Soil carbonate decomposition by acid has little effect on δ¹³C of organic matter. *Soil Biology & Biochemistry* **30**: 1301–1307.
- Modin O, Fukushima Y, Yamamoto K. 2007. Denitrification with methane as external carbon source. *Water Research* **41**: 2726–2738.
- Mosier A, Schimel D, Valentine D, et al. 1991. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature* **350**: 330–332.
- Risk D, Kelman L, Beltramini H. 2002. Carbon dioxide in soil profiles: Production and temperature dependence. *Geophysical Research Letters* **29**: 1427. doi: 10.1029/2001GL013578.
- Ross DJ, Tate KR, Newton PC, et al. 2000. Carbon and nitrogen pools and mineralization in a grassland gley soil under elevated carbon dioxide at a natural CO₂ spring. *Global Change Biology* **6**: 779–790.
- Šmek M, Elhottová D, Klimeš F. 2004. Emissions of N₂O and CO₂, denitrification measurements and soil properties in red clover and ryegrass stands. *Soil Biology & Biochemistry* **36**: 9–21.
- van Kessel C, Pennock DJ, Farrel RE. 1993. Seasonal variation in denitrification and nitrous oxide evolution at landscape scale. *Soil Science Society of America Journal* **57**: 988–995.
- Zak DR, Pregitzer KS, Curtis PS, et al. 1993. Elevated atmospheric CO₂ and feedback between carbon and nitrogen cycles. *Plant and Soil* **151**: 105–117.

作者简介 刘芳女, 1980年生, 博士, 主要从事土壤温室气体生物地球化学过程的研究. Email: hkrufan@gmail.com
责任编辑 魏中青
