

# 青藏高原若尔盖沼泽潜在 $\text{CH}_4$ 氧化与生成的分布特征

王智平<sup>1,2</sup> 段 毅<sup>2</sup> 杨居荣<sup>3</sup> 陈全胜<sup>1</sup> 韩兴国<sup>1</sup>

(1 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

(2 中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室, 兰州 730000)

(3 北京师范大学资源与环境学院, 北京 100875)

**摘 要** 该实验采集若尔盖草本沼泽 3 种生境(洼地、草坪、微丘草地)中的 4 个层位(0 ~ 5、5 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 50 cm)的土壤样品,在实验室培养条件下,测定潜在  $\text{CH}_4$  氧化与生成,分析其分布特征。草坪泥炭层与矿质层分明,两层都表现出显著的  $\text{CH}_4$  氧化能力,与高、低亲合力  $\text{CH}_4$  氧化菌跟随地下水位、 $\text{CH}_4$  源在两层之间的迁移变化有关。然而,草坪  $\text{CH}_4$  生成不明显。洼地土壤剖面缺乏层次性,但  $\text{CH}_4$  氧化呈现明显的梯度特征,表层(0 ~ 5 cm)土壤  $\text{CH}_4$  生成率显著高于其它层位。洼地表层土壤是  $\text{CH}_4$  氧化菌与  $\text{CH}_4$  生成菌的共聚层位,在它们各自适宜条件下贡献着  $\text{CH}_4$  氧化与生成。微丘草地的土壤也缺乏层次性, $\text{CH}_4$  生成不明显, $\text{CH}_4$  氧化弱。土壤理化因子、通气状况以及植被条件是影响若尔盖沼泽  $\text{CH}_4$  氧化与生成分布的重要因素。需在不同季节测定  $\text{CH}_4$  氧化与生成,进一步评估高原沼泽土壤  $\text{CH}_4$  氧化与生成及对  $\text{CH}_4$  源汇的影响。

**关键词**  $\text{CH}_4$  氧化  $\text{CH}_4$  生成 生境 土壤层位 若尔盖沼泽

## SPATIAL DISTRIBUTION OF POTENTIAL $\text{CH}_4$ OXIDATION AND PRODUCTION IN ZOIGÊ MARSH OF QINGHAI-TIBET PLATEAU

WANG Zhi-Ping<sup>1,2</sup> DUAN Yi<sup>2</sup> YANG Ju-Rong<sup>3</sup> CHEN Quan-Sheng<sup>1</sup> and HAN Xing-Guo<sup>1</sup>

(1 Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

(2 State Key Laboratory of Gas Geochemistry, Lanzhou Institute of Geology, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

(3 College of Resource and Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract** In a temperate marsh in Qinghai-Tibet plateau, the potential  $\text{CH}_4$  oxidation and production were investigated by field sampling and lab incubation experiments. The potential  $\text{CH}_4$  oxidation and production rates were measured for four horizons (0 - 5, 5 - 15, 15 - 30, 30 - 50 cm) at three typical sites (hill-sod, drained, waterlogged). General soil factors usually showed a significant difference between the upper peat horizon (0 - 15 cm) and the underlying mineral horizon (15 - 50 cm) at the drained site and little distinct values for horizons at the hill-sod site and the waterlogged site. At the hill-sod site,  $\text{CH}_4$  oxidation and production were weak. At the drained site, the subsurface peat showed much greater  $\text{CH}_4$  oxidation rates than the other soil horizons, with a maximal rate of  $20.9 \text{ ng CH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{ DW} \cdot \text{h}^{-1}$  at initial  $20 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{L}^{-1}$ . The underlying mineral also showed a very strong  $\text{CH}_4$  oxidation capacity at an initially high  $\text{CH}_4$  concentration. However, at the drained site,  $\text{CH}_4$  production was weak. At the waterlogged site, the surface soil (0 - 5 cm) was a most active co-horizon with the maximal  $\text{CH}_4$  oxidation and production rates in aerobic and anaerobic incubations, respectively;  $\text{CH}_4$  production of  $29 \text{ ng CH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{ DW} \cdot \text{h}^{-1}$  was much greater than  $\text{CH}_4$  oxidation of  $7.8 \text{ ng CH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{ DW} \cdot \text{h}^{-1}$ , suggesting a net  $\text{CH}_4$  efflux from this site. The spatial distribution of  $\text{CH}_4$  oxidation and production was influenced by soil physico-chemical factors, soil air status, and vegetation in Zoigê marsh. The hill-sod site and the drained site were probably  $\text{CH}_4$  sinks, but the waterlogged site was probably a  $\text{CH}_4$  source. However, it is unclear whether or not the whole marsh is a  $\text{CH}_4$  source or  $\text{CH}_4$  sink. Further work is required to measure and evaluate  $\text{CH}_4$  oxidation and production in the various seasons in this plateau marsh. It is anticipated that our preliminary investigation will increase interest in studies of C cycling in plateau wetland.

**Key words** Methane oxidation, Methane production, Soil, Horizon, Zoigê marsh

收稿日期: 2002-10-22 接受日期: 2003-03-24

基金项目: 气体地球化学国家重点实验室开放基金 (SJJ-01-07)、国家自然科学基金 (40072040) 和国家重点基础研究发展规划项目 (G2000018603)

感谢四川省若尔盖县林业局左林局长提供若尔盖沼泽的背景材料, 兰州大学测试分析中心薛敦渊老师提供气相色谱仪的使用。

E-mail: wangzp5@yahoo.com

甲烷( $\text{CH}_4$ )是重要的温室气体,它的大气浓度正以约 1% 的年速度增加,在过去 300 年间从约  $0.8 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$  增至约  $1.7 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$  (Crutzen, 1991)。大气  $\text{CH}_4$  表现出温室效应和大气化学作用,对流层的光化学反应和土壤细菌的  $\text{CH}_4$  氧化是消耗大气  $\text{CH}_4$  的重要途径。虽然全球陆地土壤  $\text{CH}_4$  年汇约占大气库中  $\text{CH}_4$  消耗的 3% ~ 9%,但近似于估算的大气库中  $\text{CH}_4$  的年增加,使得土壤细菌的  $\text{CH}_4$  氧化成为大气  $\text{CH}_4$  浓度变化的关键性决定因子 (Prather *et al.*, 1995)。

沼泽是重要的陆地生态系统类型,在植被、水文和土壤等方面具有显著的特征,常生长着水生植物,土壤为水成土,在某些季节被水所饱和或被浅水所覆盖。沼泽在维持全球生物多样性和 C 平衡方面尤为重要,长期的低有机质分解是沼泽 C 积累的关键因素。自然湿地是大气  $\text{CH}_4$  的重要排放源,约贡献着全球  $\text{CH}_4$  排放量的 20% 份额,因而自然湿地 C 循环的变化对全球气候变化具有重要的影响 (Saarnio *et al.*, 2000)。沼泽土壤  $\text{CH}_4$  氧化是调节“地-气”间  $\text{CH}_4$  排放通量的关键因素。例如, Lidstrom 和 Somers (1984)、Yavitt 等 (1988) 报道,泥炭生成的  $\text{CH}_4$  在排放到大气之前,有相当部分的  $\text{CH}_4$  被氧化。沼泽“地-气”间  $\text{CH}_4$  排放取决于  $\text{CH}_4$  生成与  $\text{CH}_4$  氧化等活动的相对程度,然而对这些活动及其微生物作用知之甚少。

我国在  $\text{CH}_4$  的研究方面,大量的工作投入到“地-气”间排放通量的测定上,尤其是对水稻田  $\text{CH}_4$  排放通量的测定 (王明星, 2001), 以便于估算中国地区  $\text{CH}_4$  排放总量。我国在人工湿地(稻田)进行过  $\text{CH}_4$  氧化的大量研究 (Cai & Yan, 1999; Cai & Mosier, 2000); Jin 等 (1999) 曾评估青藏高原湿地  $\text{CH}_4$  排放,并认为若尔盖沼泽是青藏高原湿地  $\text{CH}_4$  排放的中心区之一。然而,鲜见在我国自然湿地进行过  $\text{CH}_4$  氧化与生成的调查。本文野外采集青藏高原若尔盖沼泽的土壤样品,在实验室培养条件下,测定潜在  $\text{CH}_4$  氧化与生成,分析其分布特征。期望我们的初步调查将引起学术界对高原湿地 C 循环研究的关注。

## 1 材料和方法

### 1.1 若尔盖沼泽概况

土壤样品采自青藏高原东北隅的若尔盖沼泽。若尔盖沼泽是第四纪喜马拉雅造山运动以来处于低

位发育的草本沼泽,面积约  $4\,000 \text{ km}^2$ ,在沼泽发育过程、元素生物地球化学特征等方面与低纬度热带沼泽和高纬度北方沼泽有着显著差异。若尔盖沼泽位于四川省阿坝藏族羌族自治州若尔盖县境内,沼泽的核心部分现已开辟为国家级自然保护区。若尔盖沼泽植被繁茂,覆盖度达 80% 以上。洼地生长的优势植物为西藏嵩草 (*Kobresia tibetica*),草坪为线性嵩草 (*K. capillifolia*)、木里苔草 (*Carex muliensis*),微丘草地为羊茅 (*Festuca ovina*) 等。保护区为高原浅丘沼泽地貌,介于  $102^\circ 29' \sim 102^\circ 59' \text{ E}$ 、 $33^\circ 25' \sim 34^\circ 00' \text{ N}$ ,海拔高度约  $3\,400 \sim 3\,600 \text{ m}$ ,相对海拔高度一般小于  $100 \text{ m}$ 。若尔盖沼泽属寒温带湿润气候,11 月至次年 4 月受西伯利亚和蒙古冷空气控制,5 月至 10 月受西南季风控制,年均气温  $0.7^\circ \text{C}$ ; 年均降水  $650 \text{ mm}$ ,集中在 6 ~ 9 月份,相对湿度 78%。土壤属非地带性土壤。

### 1.2 取样方法

土壤 0 ~ 50 cm 剖面通常是  $\text{CH}_4$  氧化与生成的活跃层位。本实验根据微地貌、土壤水分、植被状况等,在保护区花湖岸边到热尔坝保护站的微缓坡地段(约位于  $102^\circ 53' \text{ E}$ 、 $33^\circ 55' \text{ N}$ ,海拔高度约  $3\,450 \text{ m}$ ) 中确定 3 种采样生境:洼地、草坪以及微丘草地。1) 花湖岸边的洼地,周年被水覆盖;2) 向上约 3 ~ 4 km 处的草坪,为季节性沼泽,雨季常有浅层积水;3) 再向上约 2 km 处的微丘草地,土壤干爽。相对海拔高度表现为微丘草地高于草坪约 3 ~ 5 m,草坪高于洼地约 1 ~ 2 m。综合各生境的土壤剖面特征,分 4 个层次位(0 ~ 5、5 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 50 cm) 采样。于 2001 年 10 月 12 ~ 13 日野外采样,采样时的气温  $12 \sim 15^\circ \text{C}$ 、水温  $6 \sim 8^\circ \text{C}$ 、土温  $18 \sim 22^\circ \text{C}$ ; 采样时洼地被 3 ~ 5 cm 深的浅水覆盖、草坪和微丘草地的地下水位在 50 cm 以下。在每种生境直径约 50 m 的面积范围内,随机在 3 个 0 ~ 50 cm 的采样点采样,剔除可见的草根和砂石,分层混合均匀,装入广口瓶中带回实验室贮存在  $4^\circ \text{C}$  的冰箱中,在装瓶过程中防止压实。在一个月内完成潜在  $\text{CH}_4$  氧化与生成的测定。

### 1.3 实验室培养测定

#### 1.3.1 $\text{CH}_4$ 氧化测定

称取 6 g 湿土装入 120 ml 培养玻璃瓶中,用直径 20 mm 的丁基橡胶垫塞住瓶口,铝质薄盖封口,通过“进-出”针管,用钢瓶中的空气冲洗培养瓶内空间约  $2 \text{ min}$  ( $200 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ ),培养在室温  $18 \sim 19^\circ \text{C}$  的黑暗条件下。用针管从玻璃瓶中抽取 1 ml 气样(为平衡瓶内气压,先注入 1 ml 空气),注入到气相色谱

仪中。气相色谱仪是岛津(Shimadzu)GC-9A, 匹配 FID 和 2 m 长的 Porapak Q 柱子。柱温 40 ℃, 进样口和检测器温度皆 150 ℃。N<sub>2</sub> 作载气, 流速 40 ml·min<sup>-1</sup>。空气和 H<sub>2</sub> 的流速分别为 450、60 ml·min<sup>-1</sup>。岛津积分仪(Shimadzu C-R2A)计算峰面积, 用标样定量 CH<sub>4</sub> 浓度。玻璃瓶中起始 CH<sub>4</sub> 浓度通过注入用空气稀释的 CH<sub>4</sub> 来获得, 设定低(约 20 μl·L<sup>-1</sup>)、高(约 2 000 μl·L<sup>-1</sup>)CH<sub>4</sub> 浓度, 检验高、低亲和力 CH<sub>4</sub> 氧化菌的反应。另外, 还设计了加 20 ml 去离子水, 检测在振荡(243 rpm)培养条件下的洼地土壤 CH<sub>4</sub> 氧化。在 CH<sub>4</sub> 浓度开始下降的线性时段计算 CH<sub>4</sub> 氧化率。每处理 3 次重复。

1.3.2 CH<sub>4</sub> 生成测定

测定 CH<sub>4</sub> 生成与测定 CH<sub>4</sub> 氧化具有类似的实验程序和培养条件, 不同之处在于: 1) 通过“进-出”针管, 用纯 N<sub>2</sub> 冲洗培养瓶内空间约 4 min(200 ml·min<sup>-1</sup>), 获得厌氧条件(经检测土壤样品处于厌氧培养条件); 2) 不添加起始 CH<sub>4</sub>。分别在开始的自然生长期和随后的诱导线性期, 计算 CH<sub>4</sub> 生成率。

1.3.3 土壤理化因子测定

在 15 ml 去离子水与 15 g 湿土混合的土壤水溶液中, 用玻璃电极法(PHS-25 型酸度计、上海雷磁厂)测定土壤 pH。称取 10 g 湿土, 加 50 ml 2 mol·L<sup>-1</sup> KCl 溶液, 振荡(243 rpm)1 h, 过滤出浸提液, 应用蒸馏法的凯氏定 N 仪(Kjeltec System 1028 Distilling Unit)测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、锌还原的紫外分光光度法(Shimadzu Spectrophotometer UV-120-02)测定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N。应用烘重法、丘林法、碱解扩散法以及 EDTA(乙

二胺四乙酸)间接滴定法分别测定土壤水分、有机质、碱解 N 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量。参考农化分析(鲍士旦, 2000)的常规方法测定这些土壤理化因子。

1.4 统计分析

应用 SAS (Version 8.2) 软件 ANOVA 程序进行多重比较 (Duncan's Multiple-Range Test) (高惠璇, 2001), 分析处理间的差异显著性。

2 结果与讨论

2.1 土壤 CH<sub>4</sub> 氧化的分布

表 1 列出若尔盖沼泽 3 种典型生境的土壤理化特征。在若尔盖沼泽中, 草坪 0~15 cm 为黑色有机泥炭层, 15~50 cm 为浅灰色矿质层, 泥炭层的有机质、碱解 N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 以及 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量显著高于矿质层。微丘草地和洼地的各层间理化因子的差异没有草坪显著。

微丘草地的土壤水分含量低, 相应的 CH<sub>4</sub> 氧化率也低; 草坪的泥炭层持水量大, 表现出较强的 CH<sub>4</sub> 氧化能力(图 1, A、B、C)。“通气-厌气”界面通常是微生物群落的活跃区域, 易发生微量气体的代谢活动 (Brune *et al.*, 2000)。例如, CH<sub>4</sub> 氧化菌通常聚集在湿泥炭地的“通气-厌气”界面 (Sundh *et al.*, 1994)。水位常被认为是“通气-厌气”界面。在草坪和微丘草地的 0~50 cm 剖面未发现水位, 是由于采样日期在 10 月中旬, 水位下降到 50 cm 以下, 因而未能从水位界面处发现并解释 CH<sub>4</sub> 氧化峰值。但 CH<sub>4</sub> 氧化峰值发生在亚土层(图 1, B), 与 Krumholz 等(1995)在泥炭地、Priemé 和 Christensen (1997) 和 Saari 等(1997)在森林土壤中的观测结果相一致, 即

表 1 若尔盖沼泽土壤理化特征  
Table 1 Soil physico-chemical characteristics in Zoigé marsh

|                                 | 深度<br>Depth (cm) | pH                   | 水分<br>Water content<br>(w/w, %) | 有机质<br>Organic matter<br>(w/w, %) | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N<br>(μg·g <sup>-1</sup> DW) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N<br>(μg·g <sup>-1</sup> DW) | 碱解 N Alkali-<br>hydroly zale N<br>(μg·g <sup>-1</sup> DW) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>(μg·g <sup>-1</sup> DW) |
|---------------------------------|------------------|----------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|--|---|--|
| 微丘草地<br>The hill-<br>sod site   | 0~5              | 7.9 <sup>d,e</sup>   | 25.4 <sup>h</sup>               | 8.5±0.1 <sup>f</sup>              | 7.9±0.8 <sup>f</sup>                                       | 2.0±0.4 <sup>d,e</sup>                                     | 421±8.2 <sup>f,g</sup>                                    | 60.3±3.9 <sup>d,e</sup>                                  |
|                                 | 5~15             | 7.9 <sup>d</sup>     | 25.1 <sup>i</sup>               | 8.0±0.1 <sup>f</sup>              | 9.2±1.2 <sup>f</sup>                                       | 3.5±0.3 <sup>c</sup>                                       | 444±4.6 <sup>f</sup>                                      | 65.0±1.3 <sup>d</sup>                                    |
|                                 | 15~30            | 8.1 <sup>c</sup>     | 24.1 <sup>j</sup>               | 6.4±0.2 <sup>f,g</sup>            | 7.8±2.9 <sup>f</sup>                                       | 2.7±0.1 <sup>c,d</sup>                                     | 336±4.9 <sup>g,h</sup>                                    | 48.3±5.5 <sup>e,f</sup>                                  |
|                                 | 30~50            | 8.1 <sup>b,c</sup>   | 22.1 <sup>k</sup>               | 4.6±0.1 <sup>g</sup>              | 8.6±0.8 <sup>f</sup>                                       | 1.5±0.2 <sup>d,e,f</sup>                                   | 190±1.6 <sup>i</sup>                                      | 45.4±1.2 <sup>f</sup>                                    |
| 草坪<br>The drained<br>site       | 0~5              | 7.2 <sup>g</sup>     | 67.8 <sup>a</sup>               | 60.6±3.6 <sup>a</sup>             | 29.9±2.5 <sup>a</sup>                                      | 14.4±0.4 <sup>b</sup>                                      | 3445±67.2 <sup>a</sup>                                    | 112.8±6.4 <sup>c</sup>                                   |
|                                 | 5~15             | 7.8 <sup>e,f</sup>   | 60.9 <sup>b</sup>               | 29.2±0.5 <sup>b</sup>             | 18.9±3.1 <sup>c</sup>                                      | 17.2±1.7 <sup>a</sup>                                      | 1984±13.1 <sup>b</sup>                                    | 71.6±7.5 <sup>d</sup>                                    |
|                                 | 15~30            | 8.3 <sup>a</sup>     | 31.1 <sup>g</sup>               | 4.7±0.2 <sup>g</sup>              | 7.9±0.5 <sup>f</sup>                                       | 1.5±0.5 <sup>d,e,f</sup>                                   | 237±4.5 <sup>h,i</sup>                                    | 29.0±4.3 <sup>g</sup>                                    |
|                                 | 30~50            | 8.2 <sup>a,b</sup>   | 30.9 <sup>g</sup>               | 4.4±0 <sup>g</sup>                | 8.6±0.1 <sup>f</sup>                                       | 0.6±0.2 <sup>f</sup>                                       | 202±2.9 <sup>i</sup>                                      | 63.7±9.4 <sup>d</sup>                                    |
| 洼地<br>The water-<br>logged site | 0~5              | 7.8 <sup>e,f</sup>   | 51.1 <sup>c</sup>               | 15.1±0.6 <sup>c</sup>             | 12.6±1.9 <sup>d,e</sup>                                    | 0.9±0.3 <sup>e,f</sup>                                     | 827±8.7 <sup>c</sup>                                      | 158.8±10.1 <sup>a</sup>                                  |
|                                 | 5~15             | 7.8 <sup>f</sup>     | 49 <sup>d</sup>                 | 14.3±0.3 <sup>c,d</sup>           | 14.6±1.1 <sup>d</sup>                                      | 1.1±0.1 <sup>e,f</sup>                                     | 756±60.8 <sup>c,d</sup>                                   | 151.0±7.0 <sup>a,b</sup>                                 |
|                                 | 15~30            | 8 <sup>d</sup>       | 47.6 <sup>c</sup>               | 12.5±0.5 <sup>d,e</sup>           | 21.4±2.0 <sup>b,c</sup>                                    | 1.0±0.1 <sup>e,f</sup>                                     | 648±99.1 <sup>c</sup>                                     | 145.0±8.7 <sup>a,b</sup>                                 |
|                                 | 30~50            | 7.9 <sup>e,d,f</sup> | 46.4 <sup>f</sup>               | 11.3±0.4 <sup>e</sup>             | 24.4±0.7 <sup>b</sup>                                      | 1.1±0.3 <sup>e,f</sup>                                     | 662±98.2 <sup>d,e</sup>                                   | 143.0±3.8 <sup>b</sup>                                   |

表中数值为 3 次重复的平均值±标准差, pH 值和水分的标准差很小, 仅给出平均值。对不同生境同一指标进行 Duncan 多重比较, 表中不同字母间代表显著性差异( $p < 0.05$ )。Data are mean ± SE ( $n = 3$ ) (standard error,  $n = 3$ ) with the exceptions of pH and water content where the SE were always too small to be listed. Means with different letters identify significant differences ( $p < 0.05$ ) between horizons.

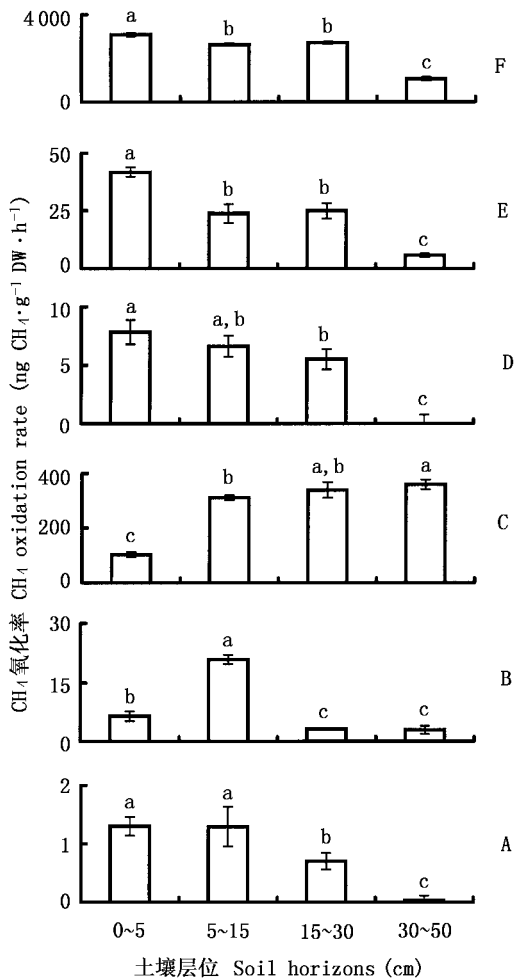


图1 若尔盖沼泽潜在CH<sub>4</sub>氧化率的分布

Fig.1 Vertical profiles of potential CH<sub>4</sub> oxidation rates by soils from the Zoigê marsh

A: 微丘草地 B、C: 草坪 D、E、F: 洼地, 其中 E、F 培养在振荡条件下。A、B、C、D、E、F 的起始 CH<sub>4</sub> 浓度分别约为 (20 ± 0.5) μL · L<sup>-1</sup>、(20 ± 0.7) μL · L<sup>-1</sup>、(2 043 ± 63) μL · L<sup>-1</sup>、(22 ± 1.6) μL · L<sup>-1</sup>、(20 ± 0.4) μL · L<sup>-1</sup>、(2 152 ± 57) μL · L<sup>-1</sup>; CH<sub>4</sub> 氧化率时间间距分别为 0 ~ 26.8、0 ~ 26.8、0 ~ 42.6、0 ~ 26.8、0 ~ 2.5、0 ~ 15 h。所称土壤的实际水分含量相应地比表 1 中各层水分含量低 2% (微丘草地)、1% (草坪)、3% ~ 5% (洼地)。图中值为 3 次重复的平均值 ± 标准误差 (SE), 有的标准误差太小, 隐藏在图中。以每个土壤剖面为统计分析单位, 进行 Duncan 多重比较, 图中不同字母间代表显著性差异 (*p* < 0.05) A: The hill-sod site B, C: The drained site D, E, F: The waterlogged site, in which E, F was incubated in rotation A, B, C, D, E, F: CH<sub>4</sub> oxidation rates were calculated during the first 0 ~ 26.8, 0 ~ 26.8, 0 ~ 42.6, 0 ~ 26.8, 0 ~ 2.5, 0 ~ 15 h at the initial (20 ± 0.5), (20 ± 0.7), (2 043 ± 63), (22 ± 1.6), (20 ± 0.4), (2 152 ± 57) μL CH<sub>4</sub> · L<sup>-1</sup>, respectively. The rates are means ± SE (*n* = 3). Means with different letters identify significant differences (*p* < 0.05) between horizons

亚土层 (约 5 ~ 15 cm) 具有最大的 CH<sub>4</sub> 氧化能力, 此层 (有机-无机过渡层) 通常是富含矿质颗粒的腐殖层或富含腐殖质的矿质层。因大气 O<sub>2</sub> 通过浅层水的渗透, 洼地的“通气-厌气”界面在土壤表层 (0 ~ 5 cm), 此层常是好氧微生物的活跃区, 显著地贡献 CH<sub>4</sub> 氧化 (图 1, D、E、F)。大气 O<sub>2</sub> 也能通过水生植物

的根系渗透到深层土壤 (5 ~ 30 cm), CH<sub>4</sub> 氧化菌活动在水生植被的根际区, 使洼地深层土壤也表现出较高的 CH<sub>4</sub> 氧化能力。

土壤 CH<sub>4</sub> 氧化的适宜 pH 值在酸沼中为 6.0 ~ 7.0 (Dunfield *et al.*, 1993), 泥炭藓沼中为 4.5 ~ 5.5 (Dedysh & Panikov, 1997)。若尔盖沼泽土壤 pH 值却高达 7.9 ± 0.3 (表 1), 仍表现出显著的 CH<sub>4</sub> 氧化能力。Borne 等 (1990) 认为 CH<sub>4</sub> 氧化菌在通气土壤中适于 pH 值 3.5 ~ 8.0 环境。甚至, Dörr 等 (1993) 认为 pH 值与 CH<sub>4</sub> 吸收 (氧化) 量不具相关性。这些调查表明, CH<sub>4</sub> 氧化菌适于各类生境土壤广幅的 pH 值环境, 或在具体地点 CH<sub>4</sub> 氧化菌只适于较窄的 pH 值环境。CH<sub>4</sub> 氧化菌对 pH 值的适应可能是在具体生境中经长期演化而形成的。

在低、高起始 CH<sub>4</sub> 浓度下, CH<sub>4</sub> 氧化可相应反映出高、低亲和力 CH<sub>4</sub> 氧化菌活动 (Bender & Conrad, 1992)。在起始约 20、2 000 μL · L<sup>-1</sup> CH<sub>4</sub> 浓度下, 草坪和洼地的土壤表现出显著的 CH<sub>4</sub> 氧化能力 (图 1, B、C、D、E、F), 表明土壤中高、低亲和力 CH<sub>4</sub> 氧化菌共存。在起始 (20 ± 0.5) μL · L<sup>-1</sup> CH<sub>4</sub> 浓度下, 微丘草地的 CH<sub>4</sub> 氧化活动弱, 0 ~ 15 cm 层位 CH<sub>4</sub> 氧化率显著高于 15 ~ 50 cm 层位 (图 1, A), 与表层易获得 CH<sub>4</sub>、O<sub>2</sub> 供应有关。在起始 (20 ± 0.7) μL · L<sup>-1</sup> CH<sub>4</sub> 浓度下, 草坪 CH<sub>4</sub> 氧化活跃, 5 ~ 15 cm 层位 CH<sub>4</sub> 氧化率最高, 达 20.9 ng CH<sub>4</sub> · g<sup>-1</sup> DW · h<sup>-1</sup>, 其它层位 CH<sub>4</sub> 氧化活动显著减弱 (图 1, B)。草坪 0 ~ 5 cm 泥炭层位 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> -N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> -N 和碱解 N 含量通常显著高于其它层位, 与此层高有机质含量有关 (表 1), 对 CH<sub>4</sub> 氧化可能存在一定程度的抑制作用; 表层不稳定的温度和水分变化也不利于 CH<sub>4</sub> 氧化菌集聚, 致使 0 ~ 5 cm 泥炭土表现出相对较低的 CH<sub>4</sub> 氧化。在起始 (2 043 ± 63) μL · L<sup>-1</sup> CH<sub>4</sub> 浓度下, 草坪矿质土 (15 ~ 50 cm) 也表现出很强的 CH<sub>4</sub> 氧化能力 (图 1, C), 可能与矿质土中起支配地位的 CH<sub>4</sub> 氧化菌种群有关, 即矿质土层以聚居低亲和力的 CH<sub>4</sub> 氧化菌为主。洼地 CH<sub>4</sub> 氧化活动随土壤深度增加而减弱, 其中 0 ~ 5 cm 表层土壤表现出最强的 CH<sub>4</sub> 氧化活动 (图 1, D)。洼地各层位的 CH<sub>4</sub> 氧化率显著高于具有通气条件下的微丘草地 (图 1, A、D), 这与洼地的水生植被和内生 CH<sub>4</sub> 供应有关。

土壤气体扩散涉及到物理动力学过程和相关的 CH<sub>4</sub> 浓度分布和气体传输, 进而影响 CH<sub>4</sub> 氧化。例如, 过筛能够提高大部分土壤样品的 CH<sub>4</sub> 氧化率, 表

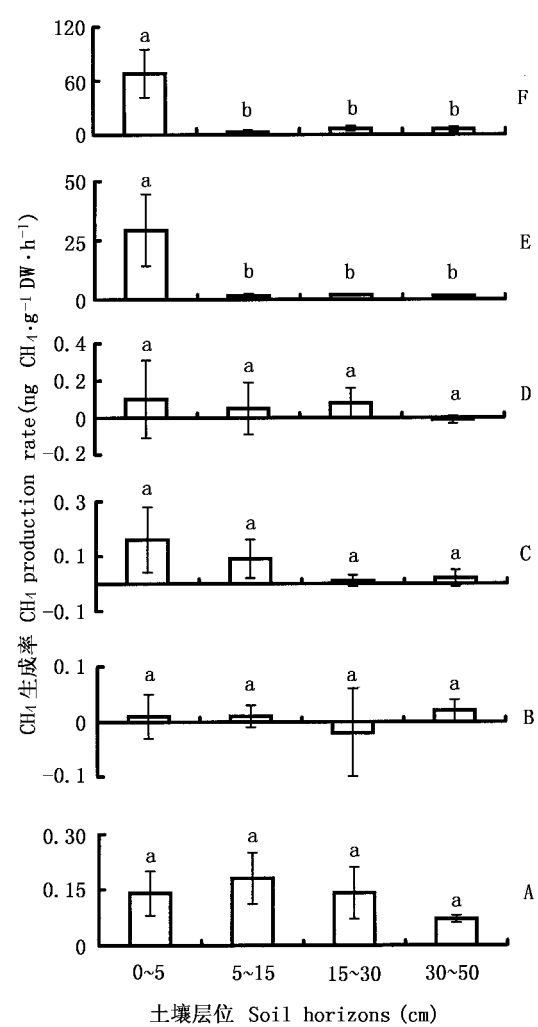


图2 若尔盖沼泽潜在CH<sub>4</sub>生成率的分布  
Fig.2 Vertical profiles of potential CH<sub>4</sub> production rates by soils from the Zoigê marsh  
A、B: 微丘草地 C、D: 草坪 E、F: 洼地 计算CH<sub>4</sub>生成率时, A、C、E的时间间距为0~42 h,代表CH<sub>4</sub>自然生成期; B、D、F的时间间距为42~109 h,代表CH<sub>4</sub>诱导生成期。所称土壤的实际水分含量相应地比表1中各层水分含量低2% (微丘草地)、1% (草坪)、3~5% (洼地)。图中值为3次重复的平均值±标准误差(SE),有的标准误差太小,隐藏在图中。以每个土壤剖面为统计分析单位,进行Duncan多重比较,图中不同字母间代表显著性差异( $p < 0.05$ ) A、B: The hill-sod site C、D: The drained site E、F: The waterlogged site. Methane production rates were calculated for treatments: A、C、E during the first 0~42 h and B、D、F during the 42~109 h, respectively. The rates are means ± SE ( $n = 3$ ). Means with different letters identify significant differences ( $p < 0.05$ ) between horizons

明气体扩散是土壤CH<sub>4</sub>氧化的重要影响因子(Brumme & Borken, 1999)。振荡能加速土壤气体扩散,即加速O<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>与CH<sub>4</sub>氧化菌的充分接触,极大地促进了洼地土壤的CH<sub>4</sub>氧化,但CH<sub>4</sub>氧化的垂直分布模式未变(图1, D、E、F)。

## 2.2 土壤CH<sub>4</sub>生成的分布

土壤CH<sub>4</sub>生成需厌氧条件。微丘草地和草坪的地下水位低于50 cm, 0~50 cm层位缺乏充足的

厌氧条件,土壤缺乏CH<sub>4</sub>生成或表现出很微弱的CH<sub>4</sub>生成,各层位CH<sub>4</sub>生成缺乏显著性差异(图2, A、B、C、D)。微丘草地和草坪土壤缺乏CH<sub>4</sub>生成,CH<sub>4</sub>氧化可能是CH<sub>4</sub>循环的主要机理过程。洼地0~5 cm表层土壤CH<sub>4</sub>生成率在自然生长期(0~42 h)和诱导线性期(42~109 h)分别高达29、68 ng·CH<sub>4</sub>·g<sup>-1</sup> DW·h<sup>-1</sup>,显著高于其它层位CH<sub>4</sub>生成率(图2, E、F)。Williams和Crawford(1984)、黄国宏等(2001)也发现,表层土壤具有显著的CH<sub>4</sub>生成能力。为什么洼地表层(0~5 cm)土壤CH<sub>4</sub>生成率显著高于其它层位?可解释为,表层土壤具备厌气生态龛、为植物茎叶枯死层、有机质含量高,较易发生CH<sub>4</sub>生成。在近似原位培养条件下,洼地表层土壤CH<sub>4</sub>生成高于CH<sub>4</sub>氧化,表明洼地具有净CH<sub>4</sub>排放。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量与CH<sub>4</sub>生成密切相关,高SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度通常抑制CH<sub>4</sub>生成,但洼地0~5 cm层位既是CH<sub>4</sub>生成活跃区(图2, E、F),又是SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量相对高区(表1)。抑制CH<sub>4</sub>生成的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度阈值还不清楚,有待于进一步调查。洼地土壤的诱导线性期(图2, F)的CH<sub>4</sub>生成率显著高于自然生长期(图2, E),这是由于CH<sub>4</sub>生成菌的数量和活性增加所致。样品重复间的CH<sub>4</sub>生成率差异(标准差)大(图2),这是由于CH<sub>4</sub>生成菌的分布存在高度的异质性,尽管在取样时尽量做到取样均匀。

## 参 考 文 献

Bao, S. D. (鲍士旦). 2000. Soil agro-chemical analysis. Beijing: China Agriculture Press. 25~69. (in Chinese)  
Bender, M. & R. Conrad. 1992. Kinetics of CH<sub>4</sub> oxidation in oxic soils exposed to ambient air or high CH<sub>4</sub> mixing ratios. FEMS Microbiology Ecology, **101**: 261~269.  
Borne, M., H. Dörr & I. Levin. 1990. Methane consumption in aerated soils of the temperate zone. Tellus, **42**: 2~8.  
Brumme, R. & W. Borken. 1999. Site variation in methane oxidation as affected by atmospheric deposition and type of temperate forest ecosystem. Global Biogeochemical Cycles, **13**: 493~501.  
Brune, A., P. Frenzel & H. Cypionka. 2000. Life at the oxic-anoxic interface: microbial activities and adaptations. FEMS Microbiology Reviews, **24**: 691~710.  
Cai, Z. C. & X. Y. Yan. 1999. Kinetic model for methane oxidation by paddy soil as affected by temperature, moisture and N addition. Soil Biology & Biochemistry, **31**: 715~725.  
Cai, Z. C. & A. R. Mosier. 2000. Effect of NH<sub>4</sub>Cl addition on methane oxidation by paddy soils. Soil Biology & Biochemistry, **32**: 1537~1545.  
Crutzen, P. J. 1991. Methane's sinks and sources. Nature, **350**: 380~381.  
Dedysh, S. N. & N. S. Panikov. 1997. Effect of pH, temperature, and concentration of salts on methane oxidation kinetics in Sphagnum peat. Microbiology, **66**: 476~479.

- Dörr, H., L. Katruff & I. Levin. 1993. Soil texture parameterization of the methane uptake in aerated soils. *Chemosphere*, **26**: 697 ~ 713.
- Dunfield, P. F., R. Knowles, R. Dumont & T.R. Moore. 1993. Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: response to temperature and pH. *Soil Biology & Biochemistry*, **25**: 321 ~ 326.
- Gao, H.X. (高惠璇). 2001. Practical statistics method and SAS system. Beijing: Peking University Press. 41 ~ 66. (in Chinese)
- Huang, G.H. (黄国宏), Y.X. Li (李玉祥), G.X. Chen (陈冠雄), Y.C. Yang (杨玉成) & C.W. Zhao (赵长伟). 2001. Influence of environmental factors on  $\text{CH}_4$  emission from reed wetland. *Environmental Science (环境科学)*, **22**: 1 ~ 5. (in Chinese with English abstract)
- Jin, H. J., J. Wu, G. D. Cheng, T. Nakano & G.Y. Sun. 1999. Methane emissions from wetlands on the Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, **44**: 2282 ~ 2286.
- Krumholz, L.R., J.L. Hollenback, S.J. Roskes & D.B. Ringelberg. 1995. Methanogenesis and methanotrophy within a *Sphagnum* peatland. *FEMS Microbiology Ecology*, **18**: 215 ~ 224.
- Lidstrom, M. E. & L. Somers. 1984. Seasonal study of methane oxidation in Lake Washington. *Applied Environmental Microbiology*, **47**: 1255 ~ 1260.
- Prather, M., R. Derwent, D. Ehhalt, P. Fraser, E. Sanhueza & X. Zhou. 1995. Other trace gases and atmospheric chemistry. In: Houghton, J.T., L.G. Meire Filho, J. Bruce, J. Lee, B. A. Callander, E. Haites, N. Harris & K. Maskell eds. *Climate change 1994*. Cambridge: Cambridge University Press. 77 ~ 126.
- Priemé, A. & S. Christensen. 1997. Seasonal and spatial variation of methane oxidation in a Danish spruce forest. *Soil Biology & Biochemistry*, **29**: 1165 ~ 1172.
- Saari, A., P.J. Martikainen, A. Ferm, J. Ruuskanen, W. De Boer, S.R. Troelstra & H.J. Laanbroek. 1997. Methane oxidation in soil profiles of Dutch and Finnish coniferous forests with different soil texture and atmospheric nitrogen deposition. *Soil Biology & Biochemistry*, **29**: 1625 ~ 1632.
- Saarnio, S., T. Saarinen, H. Vasander & J. Silvola. 2000. A moderate increase in the annual  $\text{CH}_4$  efflux by raised  $\text{CO}_2$  or  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  supply in a boreal oligotrophic mire. *Global Change Biology*, **6**: 137 ~ 144.
- Sundh, I., M. Nilsson, G. Granberg & B.H. Svensson. 1994. Depth distribution of microbial production and oxidation of methane in northern boreal peatlands. *Microbial Ecology*, **27**: 253 ~ 265.
- Wang, M.X. (王明星). 2001. Methane emissions from paddy fields of China. Beijing: Science Press. 83 ~ 215. (in Chinese)
- Williams, R.T. & R.L. Crawford. 1984. Methane production in Minnesota peatlands. *Applied Environmental Microbiology*, **47**: 1266 ~ 1271.
- Yavitt, J. B., G. E. Lang & M.D. Downey. 1988. Potential methane production and methane oxidation rates in peatland ecosystems of the Appalachian Mountains, United States. *Global Biogeochemical Cycles*, **2**: 253 ~ 268.

责任编辑: 周广胜 责任编辑: 姜联合