

# 不同土壤水分含量下高寒草地 CH<sub>4</sub> 释放的比较研究<sup>\*</sup>

胡启武<sup>1,2</sup> 吴琴<sup>1</sup> 李东<sup>1</sup> 曹广民<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; <sup>2</sup>中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要** 2003年6月30日~9月4日,利用密闭箱-气相色谱法,对发育于不同水分状况下的灌丛草甸(GC)、矮蒿草甸(AC)、藏蒿草甸(ZC)和季节性湿地(SD)的CH<sub>4</sub>释放速率进行了比较研究。结果表明,观测期间,季节性湿地处于淹水状态,其它三种土壤平均水分含量分别为39.6%(GC)、38.4%(AC)、65.9%(ZC),而CH<sub>4</sub>平均释放速率分别为-0.031±0.030(GC)、-0.026±0.018(AC)、1.103±0.240(ZC)和6.922±4.598 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>(SD),随着土壤水分含量的增加,高寒草地土壤CH<sub>4</sub>释放由吸收转为排放,表现出与土壤湿度很好的一致性。矮蒿草甸不同处理CH<sub>4</sub>吸收强度AC<AJ<AL,它们之间的差异除与土壤水分有关,还可能与处理引起的CH<sub>4</sub>传输途径不同有关。实验期间,矮蒿草甸和灌丛草甸土壤-植物系统分别吸收CH<sub>4</sub>38.69和46.13 mg·m<sup>-2</sup>,是大气温室气体CH<sub>4</sub>的弱汇,藏蒿草甸和季节性湿地则是大气温室气体CH<sub>4</sub>的源,分别排放CH<sub>4</sub>1.641和10.30 g·m<sup>-2</sup>。

**关键词** CH<sub>4</sub>, 土壤水分含量, 高寒草甸, 密闭箱

**中图分类号** S812 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2005)02-0118-05

**Comparative study on methane emissions from alpine grasslands with different soil water content.** HU Qi-wu<sup>1,2</sup>, WU Qin<sup>1</sup>, LI Dong<sup>1</sup>, CAO Guangmin<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; <sup>2</sup>Institute of Geographic Science and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(2): 118~122.

From 30 June to 4 September in 2003, using close chamber-GC method, comparative study on methane emissions was conducted in *Potentilla fruticosa* scrub meadow, *Kobresia humilis* meadow, *Kobresia tibetica* meadow as well as seasonal wetland, whose soil moistures varied from 38.4% to 100%. The results indicated that average methane emission rate differed in various treatments, with value of -0.031±0.030 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> for GC, -0.026±0.018 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> for AC, 1.103±0.240 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> for ZC, and 6.922±4.598 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> for SD, respectively. Coinciding with soil moisture increase, alpine grasslands changed from methane emission to absorbing. Furthermore, methane absorbing varied in different treatments in *Kobresia humilis* meadow, in order of AC<AJ<AL. Besides soil moisture, the difference of methane transport pathway caused by treatments may be another reason for the differences of emission rates of AC, AJ, and AL. The results also showed that *Kobresia humilis* meadow and *Potentilla fruticosa* scrub meadow acted as weak methane sink during experiment period. The soil-plant systems of both meadows absorbed 38.69 mg·m<sup>-2</sup>, and 46.13 mg·m<sup>-2</sup> CH<sub>4</sub>, respectively. Mean while, *Kobresia tibetica* meadow and seasonal wetland acted as methane source, with 1.641 g·m<sup>-2</sup> and 10.30 g·m<sup>-2</sup> CH<sub>4</sub>, respectively.

**Key words** methane, soil water content, alpine meadow, close chamber.

## 1 引言

CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O是大气温室气体的主要组成成分,其中,大气CH<sub>4</sub>浓度自工业革命前700 ppbv增加到现在的约1750 ppbv,且每年以1%的速度增加,是三种温室气体增长速率最快的一种<sup>[17,24]</sup>。与CO<sub>2</sub>相比,CH<sub>4</sub>在大气中停留时间更长,且具有更强的红外吸收能力,其增温潜势大约是CO<sub>2</sub>的23倍<sup>[11]</sup>。研究表明,大气中70%~80%的CH<sub>4</sub>来自于生物源<sup>[7]</sup>,其中,稻田和湿地被认为是大气CH<sub>4</sub>的主要源。青藏高原高寒草地属于湿润的土壤水分状况,有关高寒草地温室气体排放报道大多集中在

CO<sub>2</sub>研究上,CH<sub>4</sub>排放报道则不多见<sup>[3~6]</sup>。本文通过野外实际观测,对不同水分含量下高寒草地土壤CH<sub>4</sub>释放进行了比较研究,为高寒草地温室气体排放研究提供更多的参考资料。

## 2 材料与方法

### 2.1 自然概况

样地设置在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站,地处青藏高原东北隅,祁连山北支冷龙岭南

\*中国科学院知识创新重大项目(KZCX1-SW-01-01B)和国家自然科学基金资助项目(40471133)。

\*\*通讯作者

收稿日期:2004-03-09 改回日期:2004-06-15

段南麓的大通河河谷,位于 101°19' E、37°37' N,海拔 3 280 m。年均气温 - 1.7 °C,最暖月(7 月)和最冷月(1 月)平均气温分别为 9.8 °C 和 - 14.8 °C,年均降水量 618 mm,主要集中于 5~9 月,占年总降水量的 80%。

## 2.2 实验样地

选择不同土壤水分含量的金露梅灌丛草甸、矮蒿草草甸、藏蒿草草甸以及季节性湿地为研究对象。

金露梅灌丛草甸分布于山前洪积扇、山地阴坡或偏阴坡,夏季草场,土壤为暗沃寒冻雏形土,植物生长季土壤含水量 42%左右。主要以金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛为建群种,草本以线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、矮蒿草(*K. humilis*)、美丽凤毛菊(*Saussurea superba*)、雪白萎陵菜(*Potentilla nivea*)等为主,其中灌丛盖度约 55%,草地盖度为 40%左右,地表通常有较厚的苔藓层和枯枝落叶层,地表秃斑约为 5%。

矮蒿草草甸分布于山间滩地,冬春草场,土壤为草毡寒冻雏形土,植物生长季土壤含水量 38%左右。植物优势种有矮蒿草、羊茅(*Festuca ovina*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、线叶龙胆(*Gentiana farreri*)、早熟禾(*Poa* spp.)等,植被盖度 95%以上,土壤草毡表层发育良好,没有发生剥蚀脱落。

藏蒿草草甸分布于沼泽、湖泊边缘地带,冬春草场,土壤为纤维正常有机土,植物生长季土壤含水量 64%左右。以藏蒿草(*K. tibetica*)为建群种,伴生种有矮蒿草、华扁穗草(*B. sinocompressus*)、黑褐苔草(*Carex atrofusca*)、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、斑唇马先蒿(*Pedicularis longiflora*)等。植被覆盖度 95%。

季节性湿地系低洼地,地下水出露汇集于凹地中央形成湖泊。夏季地表径流补给,湖面水位升高,湖滨周围淹水;冬季枯水期,水位下降,湖滨周围出露水面。土壤为泥炭沼泽土,植被以窄穗台草(*Carex pamirensis* var. *angustipicata*)为优势种,并伴有杉叶藻(*Hippuris vulgris*)、灯心草(*Juncus thomsonii*)、鼈齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)等。植被覆盖度 80%左右。

## 2.3 实验处理

灌丛草甸、藏蒿草草甸、季节性湿地只作了保持自然状态的未剪草处理,分别命名为 GC、ZC、SD。矮蒿草草甸试验样地作了未剪草(AC)、剪草(AJ)、裸地(AL)3 个处理。其中,AC 是指保持自然状况

下的覆草处理;AJ 是指齐地面剪去植物并清理干净地表的枯枝落叶处理;AL 是指人工剔除草根的处理(完成于本实验开始前一个月)。

## 2.4 气体样品采集与分析

气体采集用静态箱法,采样箱分顶箱、中段箱和底座,箱体用进口 304 K 薄不锈钢板制作。顶箱(50 cm × 50 cm × 50 cm)正五面体,箱顶壁安装有两个搅拌风扇,箱侧面安装有电源插头、取气体样品接口、便携式温度计探头,并配有 F46 采气管线。中段箱(50 cm × 50 cm × 50 cm)和底座(50 cm × 50 cm × 20 cm)为正四面体,上端有密闭水槽。顶箱和中段箱外面粘贴一厚 3 cm 的泡沫隔热板,外覆白色防雨布,以防止太阳辐射下箱内温度的升高对观测结果的影响,中段箱仅用于灌丛草甸。实验前,将底座埋入土壤中,四周以泥土压实,实验期间不再取出,以减小土壤扰动对测定的影响。实验时,底座、中段箱密闭水槽内加水,以使两箱连接间的气路密闭,切断箱内外空气的自由交换。实验从 2003 年 6 月 30 日开始~9 月 4 日结束,气体采集使用 100 ml 注射器,观测频次为一周两次,采样时间间隔为 0、10、20、30 min。每次采样均在 9:00~11:00 时完成,并及时带回实验室进行分析。每种处理均设置三个重复,剪草处理每次实验前一天齐地面剪去地表植物。

CH<sub>4</sub> 浓度采用 HP4890D 气相色谱仪进行分析,检测器为离子火焰化检测器(FID),分离柱为 SS-2 m × 2 mm × 13 XMS(60/80),检测器和分离柱温度分别为 230 °C 和 55 °C。载气为高纯氮气,氢气为燃气,空气为助燃气,流速分别为 30、30、400 ml · min<sup>-1</sup>。

## 2.5 通量的计算

$$F = \frac{V}{A} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_t}{dt}$$

式中, $F$  是被测气体排放通量, $V$  是箱内空气体积, $A$  是箱子覆盖的面积, $C_t$  是  $t$  时刻箱内被测气体的体积混合比浓度, $t$  是时间, $\rho$  是标准状态下的被测气体密度, $T_0$  和  $P_0$  分别为标准状况下的空气绝对温度和气压, $P$  为采样地点的气压, $T$  为采样时的绝对温度。

## 2.6 影响因子的测定

在进行 CH<sub>4</sub> 测定的同时,进行气温、地温(0 和 5 cm)箱体内温度及土壤湿度的测定,其中,温度用 JM624 便携式数字温度计测量,土壤湿度(0~10 cm)用 TDR 水分测定仪测定。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同水分含量梯度下高寒土壤 CH<sub>4</sub> 释放速率变化

实验期间,灌丛草甸(GC)、矮蒿草草甸(AC)、藏蒿草草甸(ZC)土壤平均含水量分别为39.6%(GC),38.4%(AC),65.9%(ZC),季节性湿地则处于淹水状态;CH<sub>4</sub>平均释放速率分别为: $-0.031 \pm 0.030$ (GC)、 $-0.026 \pm 0.018$ (AC)、 $1.103 \pm 0.240$ (ZC)和 $6.922 \pm 4.598 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (SD);随着土壤水分含量的增加,高寒土壤CH<sub>4</sub>释放由吸收转为排放,表现出与土壤湿度很好的一致性(图1)。

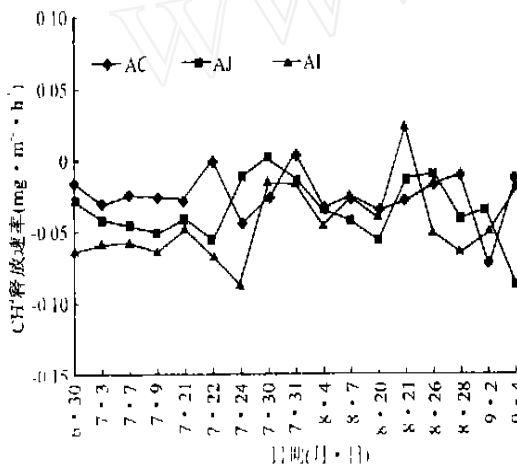


图1 矮蒿草草甸不同处理条件下CH<sub>4</sub>释放速率变化  
Fig.1 Variation of methane emission rates from *Kobresia humilis* meadow under different treatments

除个别实验日外,灌丛草甸CH<sub>4</sub>均表现为负排放,即系统吸收大气CH<sub>4</sub>。CH<sub>4</sub>释放速率变化范围 $-0.133 \sim 0.014 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,变异系数96.8%。CH<sub>4</sub>吸收变异系数在本实验众多处理中最大,这可能一方面与实验日的天气状况有关,另一方面与灌丛植被有关,金露梅灌丛无论从植株的高度,还是面积上均大于其它处理的草本植物,且为了最终估测高寒灌丛草甸对大气温室气体的贡献作用,三个重复植株大小、面积、盖度是按照大、中、小平均的原则选取的,其均匀度不如草甸和湿地草本植物。

矮蒿草草甸(AC)CH<sub>4</sub>吸收变化范围 $-0.076 \sim -0.004 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,变异系数69.2%。它的CH<sub>4</sub>吸收强度与杜睿等报道的羊草草原CH<sub>4</sub>年平均通量 $-27 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;以及Mosier等观测的Colorado温带矮草草原天然未施肥草地CH<sub>4</sub>吸收通量 $24.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 具有一定的可比性<sup>[2,22]</sup>。

藏蒿草草甸只进行了8月份的实验观测,其土壤-植物系统CH<sub>4</sub>表现为正排放,变化范围 $0.802 \sim 1.411 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,变异系数21.8%。

季节性湿地CH<sub>4</sub>表现为正排放,变化范围 $2.91 \sim 16.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,变异系数66.4%。CH<sub>4</sub>平均释放速率大于金会军等报道的7~8月青藏高原花石峡冻土研究站潮湿高寒草甸、泥炭地、次生沼泽的 $43.18, 12.96, 45.90 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,低于国内其它地区以及国外同类沼泽的甲烷排放通量<sup>[1,3,25~27]</sup>。

#### 3.2 高寒矮蒿草草甸不同处理下的CH<sub>4</sub>排放速率变化

高寒矮蒿草草甸AC、AJ、AL不同处理下,实验期间AJ、AL处理平均土壤0~10cm水分含量分别为33.7%、31.4%;CH<sub>4</sub>平均释放速率 $-0.037 \pm 0.022 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (AJ)、 $-0.045 \pm 0.026 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (AL),变异系数分别为59.5%、57.8%,CH<sub>4</sub>吸收强度表现出 $AC < AJ < AL$ 的变化趋势。除个别测定日外,三个处理CH<sub>4</sub>均表现为负排放(图2),个别实验日出现CH<sub>4</sub>正排放,可能与当日的天气有关,如8月21日,AL释放速率 $0.022 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,该实验日前一天至该实验日持续降雨,造成AL土壤表层含水量达到42%。

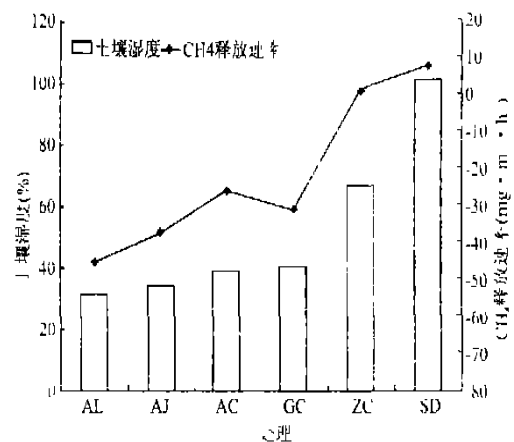


图2 土壤湿度与CH<sub>4</sub>释放速率之间的关系  
Fig.2 Relationship between methane emission rate and soil moisture

### 4 讨论

#### 4.1 土壤水分含量对CH<sub>4</sub>释放的影响

海北高寒草甸定位站地区植被垂直地带性分布明显,从山前洪积扇到山间凹地形成了一条水分含量梯度带,依次发育着灌丛草甸、矮蒿草草甸、藏蒿

草草甸、季节性湿地。高寒土壤 CH<sub>4</sub> 释放随着土壤水分含量的增加,由吸收转为排放,土壤水分含量成为 CH<sub>4</sub> 释放的主要影响因子。

CH<sub>4</sub> 释放是 CH<sub>4</sub> 产生、消耗、传输等诸多过程的综合结果,因而影响这些过程的因素都会对 CH<sub>4</sub> 释放产生影响。其中,土壤水分含量对 CH<sub>4</sub> 产生和消耗过程中产甲烷菌和甲烷氧化菌的数量及活性有重要的影响。实验期间,矮嵩草草甸平均土壤湿度 38.4%,灌丛草甸平均土壤湿度 39.6%,没有达到厌氧环境,不利于 CH<sub>4</sub> 的产生;而甲烷氧化菌在土壤水分未达到田间持水量之前,其活性一直增加<sup>[13,20]</sup>,两种草甸土壤湿度在 40%以下,远没有达到各自的田间持水量(AC、GC 田间持水量分别为 53.56%、99.64%)。较低的土壤水分使得在产甲烷菌和甲烷氧化菌的数量、活性动态平衡过程中,甲烷氧化菌占据了优势,两种草甸表现为甲烷吸收。

藏嵩草草甸土壤水分 65.9%,季节性湿地则处于淹水状态,为 CH<sub>4</sub> 产生提供了良好的厌氧环境;而甲烷氧化菌的数量和活性在较高的土壤水分含量下显著降低<sup>[9,18,21,32]</sup>,土壤水分增加被认为是在土壤微生物上覆盖一较厚的水膜,从而降低了微生物的活性,同时,阻碍了土壤中参与氧化消耗的 CH<sub>4</sub> 的扩散,因为 CH<sub>4</sub> 在水膜中扩散的速率比在土壤空气中的扩散速率低的多<sup>[19]</sup>。因而,系统向大气排放 CH<sub>4</sub>,成为大气 CH<sub>4</sub> 的源。

#### 4.2 土壤温度对 CH<sub>4</sub> 释放的影响

Segers 等<sup>[29]</sup>指出,在甲烷释放的诸多过程中,甲烷产生过程对温度最敏感。甲烷产生的 Q<sub>10</sub> 值变异较大,文献报道多在 1.3~28 之间<sup>[30]</sup>。产甲烷菌最适宜的温度是 30~40,较低的土壤温度不但抑制产甲烷菌的活性,而且降低了参与产甲烷过程的其它微生物的活性<sup>[13]</sup>。自然条件下,高寒草甸地区植物生长季 5~9 月,0~30 cm 地温变化在 4.4~18.5,远远低于土壤产甲烷菌活动最适宜温度,因而本文及文献报道的本地区湿地甲烷释放强度小于其它地区是有可能的。随着全球变暖,本地区湿地甲烷释放强度可能会有所增加。

#### 4.3 植物生长对矮嵩草草甸 CH<sub>4</sub> 吸收的影响

Singh 等<sup>[31]</sup>研究结果表明自然和人工湿地中,有植物的土壤甲烷释放比没有植物的土壤甲烷释放高出许多倍。因为植物通过凋落物以及根系分泌物的输入为产甲烷菌提供基质;另外,植物为土壤与大

气之间的 CH<sub>4</sub> 气体交换提供传输途径<sup>[15,28]</sup>。稻田和湿地甲烷排放的传输过程主要是通过植物的通气组织以及植物细胞间空隙进行的<sup>[8,10,14,16,23]</sup>。在高寒矮嵩草草甸 AC、AJ、AL 三个处理中,CH<sub>4</sub> 吸收存在着与 Singh 相似的变化规律,即 CH<sub>4</sub> 吸收强度 AL > AJ > AC。实验中,AC 处理有地上植物部分和地下根系;AJ 处理只有地下根系部分;而 AL 处理则既没有地上植物部分也没有地下根系部分。尽管矮嵩草植被下的土壤透气性良好,不同于湿地和稻田的极端嫌气环境,但其地上植物部分以及地下根系在甲烷释放过程中仍然具有类似于湿地或稻田植物的通气组织功能,因而,AC、AJ、AL 之间的甲烷吸收差异除了跟土壤湿度不同有关,可能还与处理引起的 CH<sub>4</sub> 传输途径差异有关。AC、AJ、AL 甲烷吸收差异具体的产生机制有待于进一步研究发现。

#### 4.4 不同水分含量梯度下发育的高寒草地 CH<sub>4</sub> 释放对大气温室效应的贡献作用

实验期间正值高寒草甸地区植物生长旺盛期,如果以实验期间各实验样地 9~11 时甲烷平均释放速率代表一天的实际释放速率,则实验期间,矮嵩草草甸和灌丛草甸 CH<sub>4</sub> 吸收量分别为 38.69 和 46.13 mg·m<sup>-2</sup>,是大气温室气体 CH<sub>4</sub> 的弱汇;藏嵩草草甸和季节性湿地 CH<sub>4</sub> 排放分别为 1.641 和 10.30 g·m<sup>-2</sup>,是大气温室气体 CH<sub>4</sub> 的源。

#### 参考文献

- [1] 丁维新,蔡祖聪. 2002. 我国沼泽甲烷排放量估算[J]. 土壤, 6: 348~353.
- [2] 杜睿,陈冠雄,吕达仁,等. 1997. 内蒙古草原生态系统-大气间 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放通量研究的初步结果[J]. 气候与环境研究, 2(3): 264~272.
- [3] 金会军,吴杰,程国栋,等. 1999. 青藏高原湿地 CH<sub>4</sub> 排放评估[J]. 科学通报, 44: 1758~1762.
- [4] 金会军,程国栋,徐柏青,等. 1998. 青藏高原花石峡冻土站高寒湿地 CH<sub>4</sub> 排放研究[J]. 冰川冻土, 20(2): 36~38.
- [5] 金会军,程国栋. 1998. 初冬季节青藏高原清水河地区甲烷排放速率变化[J]. 冰川冻土, 20(4): 368~375.
- [6] 裴志永,欧阳华,周才平. 2003. 青藏高原高寒草原碳排放及其迁移过程研究[J]. 生态学报, 2: 231~236.
- [7] Bouwman AF. 1990. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere [A]. In: Bouwman A F ed. Soil and the Greenhouse Effect [C]. Chichester, New York: John Wiley and Sons, 61~127.
- [8] Bubier JL, Moore TR, Bellisario L, et al. 1995. Ecological controls on methane emissions from a northern peat land complex in the zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada [J]. Global Biogeochem. Cycles, 9: 455~470.
- [9] Castro MS, Steudler PA, Melillo JM, et al. 1992. Exchange of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from the atmosphere and soils in spruce-fir forests in the Northeastern United States [J]. Biogeochemistry, 18: 119~135.

- [10] Cicerone RJ, Shetter JD. 1981. Sources of atmospheric methane: measurements in rice paddies and a discussion [J]. *J. Geophys. Res.*, **86**(C): 7203 ~ 7209.
- [11] Climate Change. 2001. Comparison of Global Warming Potentials from the Second and Third Assessment Reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [12] Conrad R, Lupton FS, Zeilus JG. 1987. Hydrogen metabolism and sulfate-dependant inhibition of methanogenesis in a eutrophic lake sediment (*Lake Mendota*) [J]. *FFMS Microbiol. Ecol.*, **45**: 107 ~ 115.
- [13] Czepiel PM, Crill PM, Harriss RC. 1995. Environmental factors influencing the variability of methane oxidation in temperate zone soils [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **100**: 9359 ~ 9364.
- [14] Dise NB. 1993. Methane emission from Minnesota peatlands: Spatial and seasonal variability [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, **7**: 123 ~ 142.
- [15] Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Seiler W. 1985. Production oxidation and emission of methane in rice paddies [J]. *FEMS Microbiol. Ecol.*, **31**: 343 ~ 351.
- [16] Holzapfel-Pschorn A, Seiler W. 1986. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy [J]. *J. Geophys. Res.*, **91D**: 11803 ~ 11814.
- [17] IPCC. 2001. Houghton JH, (Eds), Climate change [M]. The Scientific Basis, Cambridge: Cambridge University Press, 944.
- [18] Koschorreck M, Conrad R. 1993. Oxidation of atmospheric methane in soil: measurements in the field, in soil cores and in soil samples [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, **7**: 109 ~ 121.
- [19] Le Mer J, Roger P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review [J]. *Soil Biol.*, **37**: 25 ~ 50.
- [20] Le Mer J, Escoffier S, Chessel C, et al. 1996. Microbiological aspects of methane emission by a rice field soil from Camargue (France): 2. Methanotrophy and related microflora [J]. *Eur. J. Soil Biol.*, **32**: 71 ~ 80.
- [21] Lessard R, Rochette P, Topp E, et al. 1994. Methane and carbon dioxide fluxes from poorly drained adjacent cultivated and forest sites [J]. *Can. J. Soil Sci.*, **74**: 139 ~ 146.
- [22] Mosier AR, Stillwell M, Parton WJ, et al. 1981. Nitrous oxide emissions from a native shortgrass prairie [J]. *Soil Sci. Soc. Am.*, **45**: 617 ~ 619.
- [23] Noguchi I, Mariko S, Aoki K. 1990. Mechanism of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants [J]. *Plant Physiol.*, **94**: 59 ~ 66.
- [24] Rasmussen RA, Khalil MAK. 1984. Atmospheric methane in the recent and ancient atmospheres: concentrations, trends, and inter-hemispheric gradient [J]. *Geophys. Res.*, **89**: 11599 ~ 11605.
- [25] Saarnio S, Alm J, et al. 1998. Effects of raised CO<sub>2</sub> on potential CH<sub>4</sub> production and oxidation and CH<sub>4</sub> emission from a boreal mire [J]. *Ecology*, **86**: 261 ~ 268.
- [26] Saarnio S, Saarinen T, et al. 2000. A moderate increase in the annual CH<sub>4</sub> efflux by raised CO<sub>2</sub> or NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> supply in boreal oligotrophic mire [J]. *Global Change Biol.*, **6**: 137 ~ 144.
- [27] Saarnio S, Silvola J. 1999. Effect of increased CO<sub>2</sub> and N on CH<sub>4</sub> efflux from a boreal mire: a growth chamber experiment [J]. *Oecologia*, **119**: 349 ~ 356.
- [28] Schutz H, Seiler W, Conrad R. 1989. Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies [J]. *Biogeochemistry*, **7**: 33 ~ 53.
- [29] Segers R, Kenyon SWM. 1998. Methane Production as a function of anaerobic carbon mineralisation: a Process model [J]. *Soil Biol. Biochem.*, **30**: 1107 ~ 1117.
- [30] Segers R. 1998. Methane production and methane consumption: a review of process underlying wetland methane fluxes [J]. *Biogeochemistry*, **41**: 23 ~ 51.
- [31] Singh SN, Kulshreshtha K, Agnihotri S. 2000. Seasonal dynamics of methane emission from wetlands [J]. *Chemosphere: Global Change Sci.*, **2**: 39 ~ 46.
- [32] Sitaula BK, Bakken LR, Abrahamsen G. 1995. CH<sub>4</sub> uptake by temperate forest soil-effect of N input and soil acidification [J]. *Soil Biol. Biochem.*, **27**: 871 ~ 880.

作者简介 胡启武,男,1979年出生,博士研究生。主要从事草地生态系统的物质循环的研究。  
责任编辑 李凤芹