- 7 安徽省地质矿产局区域地质调查队. 安徽地层志, 前寒武系分册. 合肥: 安徽科技出版社, 1985. 1~ 7211
- 8 辽宁省地质矿产局. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989. 1~ 855
- 9 吉林省地质矿产局. 吉林省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1988. 1~ 698
- 10 郭胜哲, 张立东, 张长捷, 等. 辽宁太子河流域晚元古宙青白口系震积岩的发现及其意义. 中国区域地质, 1999, 18(1): 106~ 109
- 11 乔秀夫, 高林志, 彭 阳, 等. 内蒙古腮林忽洞群综合地层和白云鄂博矿床赋矿微晶丘. 地质学报, 1997, 71(3): 202~ 211
- 12 McMenamin M A S, McMenamin D L S. The Emergence of Animals. The Cambrian breakthrough. New York: Columbia University Press, 1990. 1~ 217
- 13 乔秀夫. 青白口群地层研究, 地质科学, 1976, (3): 246~ 265
- 14 乔秀夫, 张德权, 王雪英, 等. 晋南西阳河群同位素年代学研究及其地质意义. 地质学报, 1985, 59(3): 258~ 269

(1999-04-12 收稿, 1999-07-05 收修改稿)

青藏高原湿地 CH₄ 排放评估

金会军 吴 杰^④ 程国栋 中野智子^④ 孙广友

(中国科学院冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000; ④中国科学院应用生态研究所, 沈阳 110015;

④日本东京都立大学地理系, 日本东京 192-03; 中国科学院长春地理研究所, 长春 130062)

摘要 青藏高原高海拔淡水湿地分布面积约 $0.133 \times 10^6 \text{ km}^2$, 具有显著的 CH₄ 排放量. 1996 年 7~ 8 月花石峡潮湿高寒草甸、泥炭地、杉叶藻沼泽和次生沼泽平均 CH₄ 排放率分别为 43.18, 12.96, - 0.28 和 45.90 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 其融化季节湿地面积加权平均值为 5.68 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$. 1997 年 4~ 9 月, 各观测点的融化季节 CH₄ 排放率变化于 - 19.384 ~ 347.15 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 4~ 9 月各点平均 CH₄ 排放率变化于 6.54 ~ 71.97 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 融化季节排放量变化于 1.21 ~ 10.65 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 显示强烈的空间变性. CH₄ 排放率也呈现明显的季节变化, 5~ 6 月为春季大量排放期. 根据代表性测点平均 CH₄ 排放率、湿地分布面积和融化日数估算结果表明, 青藏高原的年 CH₄ 的上限排放量为 0.7~ 0.9 Tg. 区域上排放中心位于长江远源和若尔盖等湿地分布区.

关键词 青藏高原 湿地 CH₄ 排放 时空变性 评估

青藏高原位于中低纬度, 是气候变化的敏感区, 对于研究冻土退化状态下的 CH₄ 排放至关重要. 许多冷湿地 CH₄ 排放研究位于高纬度地区, 这和中纬高海拔地区有很大差异. 利用高北纬地区观测结果对中国湿地 CH₄ 排放评估^[1] 仍缺乏实测资料的验证. 自 1996 年夏天起, 在黄河源区花石峡冻土研究站进行了湿地生态系统与大气间 CH₄, CO₂ 和 N₂O 交换研究, 本文即为研究成果之一. 由于观测资料数量和代表性有限, 本文对青藏高原冷湿地 CH₄ 排放评估只是初步外推的结果. 准确的估计青藏高原湿地 CH₄ 排放仍需要大量的观测研究和模拟.

1 研究地区和方法

1.1 研究区

研究区位于青藏高原东部花石峡(35°39' N, 98°48' E; 4 300~ 4 500 m). 花石峡冻土站的

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-16-1758>

1997年平均气温为 -5.4°C , 降水量为520 mm. 研究区地形和缓, 多年冻土处于退化状态, 年平均地温变化于 $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$, 其厚度变化于数米至数十米之间; 冷湿地之下为多年冻土. 7~8月间, 融化深度多变化于80~120 cm, 融化层土壤在整个融化季节多呈饱水状态. 在实验区, 湿地生态环境主要是湿草甸、沼泽化草甸、泥炭沼泽和杉叶藻沼泽. 人为植被破坏而导致的次生沼泽化地也有一定分布.

观测点HPS₁和HPS_A位于潮湿、半潮湿的高寒草甸, 植被组成主要为*Kobresia humilis*和*K. tibetica*, *Carex moergrftii*, *Poa calliopsis*和*Caltha scaposa*等, 盖度90%, 平均植被高度约20 cm, 变化于5~40 cm. 观测点HPS₂和HPS_B位于平坦的一级河成阶地面泥炭沼泽. 植被建种群为*Batrachium trichophyllum*, *Ranunculus longicaulis*和*Caltha scaposa*. 观测点HPS₃和HPS_C位于新月形热融湖塘(0.5~25 m²)中, 水深10~120 cm. 挺水植物单一, 为*Hippuris vulgaris*, 水面盖度为20%~40%; 沉水植物为*Halerpestes tricuspis*等. HPS₄为1988年青康公路整修时为改善公路上侧径流条件而开挖的长约1 km的导流明渠, 由于破坏植被而使下伏富冰冻土融化, 导致快速侧向溯源热融侵蚀, 到1996年夏天该渠已深达50~350 cm, 宽200~500 cm. 底部形成了次生沼泽化草地, 建种群为*Kobresia tibetica*和*Stipa purpurea*等, 植被高度在20 cm以下, 盖度约50%~60%. HPS_D海拔4500 m, 位于沟谷底部的冻结层上水溢出带, 土壤表层100 cm为泥炭. 植被盖度达90%~100%, 高度变化于3~10 cm. 植物优势种为*Carex atrifusa* schkr., *Triglochin maritima* L., *Ranunculus lobatus et pulchellus*和*Poa alpina* L., 苔藓层连续厚度约5~10 cm.

1.2 CH₄采样和分析方法

CH₄气体采用静态箱(40 cm×40 cm×40 cm)技术. 箱体材料为由乙烯基树脂, 放置于预先固定在观测点不锈钢水槽(高4 cm)上, 水槽下部带有5 cm高和3 mm厚的不锈钢板可插入土壤中, 以隔绝箱体内外的气体侧向交换. 在箱的顶面, 设置有高15 cm的聚氯乙烯圆筒(高2 cm, 内径15 mm)取样舱和针式温度计舱各1个, 以橡皮胶塞密封.

观测时, 静态箱罩上后立即采样1次, 并在随后的30/15 min内取样3次, 共得4个样品. 采样时间间隔为10/5 min. 为了使得采样具有代表性在每一次测量中(剖面调查)或每日测量中(定位观测), 随机在类似环境中由3个人同时取5组样品. 取其平均排放率作为该生态环境或该日CH₄排放率. 每日观测多在10~16点进行. 因此, 所得到的日CH₄排放率可能代表了日间较大值, 以其代表的日均CH₄排放率所估计的CH₄排放量可能代表了其年源强的上限.

采样时先用100 mL塑料注射器抽取少量(约5 mL)箱内气体冲洗注射器, 然后从静态箱中抽取15 mL气体注入预先抽成真空的带有胶塞的棕色玻璃小瓶(12 mL), 储存于阴凉干燥处; 采样同时读取箱中气温. 然后测量箱高、观测点的融化深度、土壤温度、水温和水深、pH、水的电导率、植被盖度和高度等; 若表面积水很薄且不均匀时, 采用TDR测量土壤湿度.

据测定静态箱中CH₄浓度在30 min内呈线性变化, 因此CH₄排放率可根据静态箱内CH₄浓度在30 min内的变化斜率、箱高和箱中气温计算. 首先根据体积混合比和箱中气温和气体方程式计算箱中CH₄密度 $C(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$: $C = 16C_0(0.082T)^{-1}$; 其中, C_0 为的CH₄浓度(ppmv), T 为箱中气温(K). 其次, 计算浓度随时间的变化斜率 $S(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{min}^{-1})$, 利用最小方差原理拟合直线的 $R^2 \geq 0.95$ 时, S 方可使用. 日平均CH₄排放率 $F(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$ 可用下式计算:

$F = S \times H \times 60 \times 24$; 其中 H 为箱高(m).

2 CH₄ 排放率时空变化

2.1 CH₄ 排放率空间变化

1996年7~8月间,每个植物群落内部以及不同群落之间,CH₄排放率变化都很大(表1).全部考虑平均值所得的花石峡湿地生态系统平均CH₄排放率为 $25.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,其标准偏差高达75%.在4个观测组,平均CH₄排放率变化于 $-0.28 \sim 45.90 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,其标准偏差变化于41%~97%.考虑到各群落在花石峡湿地生态系统中的面积百分比,给所观测的4种生态环境的平均CH₄排放率根据面积百分比分别加权0.70,0.10,0.05和0.01,并假定其余14%的湿地环境具有和所观测的群落有相似的平均CH₄排放率,而且融化期以180 d计算,得到花石峡湿地融化季节CH₄排放率的加权平均值为 $5.68 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.假定非融化季节的CH₄排放量占全年的10%,则花石峡地区年湿地平均年CH₄排放量为 $6.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.

表1 1996年7~8月花石峡湿地CH₄排放率(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

点位	最小值	最大值	平均值	标准偏差
HPS ₁	3.82	105.3	43.18	41.92
HPS ₂	3.58	18.76	12.96	6.68
HPS ₃	-4.38	2.81	-0.28	3.00
HPS ₄	27.06	64.73	45.9	18.84

2.2 CH₄ 排放率的季节变化

花石峡1997年融化季节4个定位点的观测结果如表2和3所示.

表2 花石峡冻土站定位观测点1997年融化季节的CH₄排放率(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

点位	最小值	中值	最大值	平均值	标准差
HPS _A	-6.49	2.76	75.59	9.85	19.03
HPS _B	-19.38	3.05	63.28	6.54	17.86
HPS _C	-5.76	5.93	188.34	35.04	55.11
HPS _D	-4.39	22.86	347.15	71.97	102.00
HPS 平均	6.54	22.45	71.97	30.85	26.20

表3 花石峡各观测点1997年融化季节月平均CH₄排放率(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

点位	4月	5月	6月	7月	8月	9月	月平均 CH ₄ 排放量/g	融化季节 CH ₄ 排放量/g
HPS _A	7.46	1.00	-2.45	21.16	8.87	44.78	13.47	2.42
HPS _B	2.83	21.95	1.44	11.82	0.18	3.05	6.71	1.21
HPS _C	2.66	85.51	188.34	58.46	4.09	16.08	59.19	10.65
HPS _D		250.62	21.67	39.79	18.91	17.79	69.76	10.46

海拔高于其余3点200 m的HPS_D,稳定融化期为150 d.对4个定位点的融化季节平均CH₄排放量取平均值,则1997年稳定融化期花石峡湿地生态系统平均CH₄排放量为 $6.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.假定冬季的贡献为10%,则1997年花石峡湿地生态系统的年平均CH₄排放量为 $6.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.

由观测结果看(表3),5~6月是CH₄排放的最高峰值期,但各点出现的时间有差异.1997

年的观测中7~8月排放量不显著,但1996年7~8月排放量很大,这可能归结于强烈的年际变化。

花石峡平均CH₄排放率观测结果和北方湿地的观测结果具可比性。其中,1996年断面调查时观测到的日平均CH₄排放率变化于 $-4.38 \sim 147.63 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,而1997年的日平均CH₄排放率观测值变化于 $-19.384 \sim 347.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。这些结果都落在北方湿地生态系统CH₄排放率观测范围之内。

3 青藏高原年CH₄排放量评估

3.1 评估方法

采用长春地理研究所编制的青藏高原湿地分布图(孙广友等,个人交流)来计算年CH₄排放量。结果表明青藏高原淡水湿地面积为 $1.33 \times 10^{11} \text{ m}^2$,这和赵魁义^[2]的 $4.7 \times 10^{10} \text{ m}^2$ 及郑度等人^[3]的 $7.15 \times 10^{10} \text{ m}^2$ 有较大出入。结果表明,31~35°N和89~95°E湿地分布面积大,其中长江源区为 $3.29 \times 10^{10} \text{ m}^2$,祁连山区为 $1.5 \times 10^{10} \text{ m}^2$,若尔盖高原及其周围山地为 $1.26 \times 10^{10} \text{ m}^2$,黄河源区为 $0.63 \times 10^{10} \text{ m}^2$,雅鲁藏布江谷地为 $0.13 \times 10^{10} \text{ m}^2$ 。在本研究中,排放期主要为融化期,即日均气温高于0℃的日数。主要湿地分布区的融化日数多变化于150~180 d。

3.2 评估结果和讨论

若不考虑冬季排放量,根据1996年剖面调查所得平均CH₄排放率评估的青藏高原湿地年CH₄排放量为0.70 Tg;考虑时,为0.77 Tg。主要的CH₄排放源位于长江源区和若尔盖高原泥炭地,其排放量分别为0.34和0.11 Tg。从经纬度上看,主要CH₄源区落在91~95°E及101~103°E;31~35°N。

若花石峡湿地在高原上有较好的代表性,根据1997年定位观测所得融化季节排放量,并考虑冬季贡献,则高原淡水湿地的年CH₄排放量估计为0.90 Tg。考虑到高原上湿地融化日数多变化于150~210 d,这个估计的变化范围为0.75~1.05 Tg。由于观测结果在日变化方面的缺憾及若尔盖和江河源等湿地区缺乏观测资料,该评估的不确定性很大。

Khalil等人^[1]对中国年CH₄排放量的估计为64 Tg,其中天然湿地约占1.7 Tg。考虑到青藏高原淡水湿地显著的CH₄排放率,以及在东北和东部天然湿地的广泛分布,湿地可能对中国的CH₄收支有重要贡献。中国湿地面积的估计值为 $6.3 \times 10^{11} \text{ m}^2$,其中稻田占 $(3.2 \sim 4.0) \times 10^{11} \text{ m}^2$ ^[2,4]。稻田的年CH₄排放量估计变化很大,为 $5.16 \sim 23 \text{ Tg}$ ^[1,5,6]。天然湿地面积估计为 $(12.5 \sim 25) \times 10^{10} \text{ m}^2$ ^[4,7],其中东北地区为 $7.5 \times 10^{10} \text{ m}^2$ (三江平原为 $2.96 \times 10^{10} \text{ m}^2$,以苔草群落为主的 $1.1 \times 10^{10} \text{ m}^2$)^[8],长江中下游为 $6.9 \times 10^{10} \text{ m}^2$,西北内陆区为 $2.5 \times 10^{10} \text{ m}^2$,沿海为 $1.8 \times 10^{10} \text{ m}^2$ 。若东北的湿地群落具有和花石峡相似的排放率,显著排放期为210 d,则东北区的湿地年CH₄排放量约为0.68 Tg;假定中国其余地区的排放率和HPS_A(湿草甸)相似,显著排放期为300 d,则它们的年CH₄排放量约为0.52 Tg。这样,中国天然湿地的年CH₄排放量约为2 Tg,和Khalil等人^[1]的估计1.7 Tg接近。

全球天然淡水湿地年CH₄排放量的估计变性很大,变化于100~200 Tg,平均值为115 Tg,但对北方湿地的估计多集中于20~40 Tg/a,这相当于全球17%~35%的湿地CH₄排放量。青藏高原湿地的年CH₄排放量在0.7~1.0 Tg,表明高原湿地有显著的CH₄源潜力。

致谢 本工作为KZ95T-A1-204-03, KJ-12-201和KZ95T-06项目,以及陆地生态系统痕量物质过程开放实验室、
<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-16-1758>

冰芯与寒区环境开放实验室和冻土工程国家重点实验室及花石峡冻土站共同资助项目。

参 考 文 献

- 1 Khalil M A K, Shearer M J, Rasmussen R A. Methane sources in China: historical and current emissions. *Chemosphere*, 1993, 26: 127~ 142
- 2 赵魁义, 刘兴土. 湿地研究的现状与展望. 见: 陈宜瑜主编. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. 1~ 9
- 3 郑 度, 王秀红, 申元村. 青藏高原湿地初探. 见: 陈宜瑜主编. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. 236~ 240
- 4 徐 琪, 蔡 立, 董元华. 论我国湿地的特点、类型与管理. 见: 陈宜瑜主编. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. 24~ 33
- 5 王明星, 戴爱国, 黄 俊. 中国 CH₄ 排放量的估算. *大气科学*, 1993, 17(1): 52~ 64
- 6 蔡祖聪. 中国稻田 CH₄ 排放估计. 见: 陈宜瑜主编. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. 79~ 85
- 7 陈伟烈. 中国湿地植被类型、分布及其保护. 见: 陈宜瑜主编. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. 55~ 62
- 8 刘兴土. 三江平原湿地及其合理利用与保护. 见: 陈宜瑜主编. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. 108~ 117

(1998-09-30 收稿, 1999-01-27 收修改稿)

华北克拉通太古宙陆核氧同位素($\delta^{17}\text{O}$ - $\delta^{18}\text{O}$) 组成不均一性的初步研究

刘建忠 张福勤^④ 李春来 王世杰 Ian Franchi^(四)
Robert Hutchison Colin Pillinger^(四)

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002; ④中国科学院地球物理研究所, 北京 100101;

(四)Planetary Science Research Institute, The Open University, Walton Hall, Milton Keynes MK7 6AA, U. K.;

Department of Mineralogy, The Natural History Museum, Cromwell Road, London SW7 5BD, U. K.)

摘要 通过对华北克拉通不同陆核斜长角闪岩类氧同位素组成测试和分析, 表明:() 来自不同陆核的岩石氧同位素数据所构成的演化线都平行于地月演化线, 说明这些陆核演化的母体属于太阳系物质;() 不同陆核的氧同位素组成演化线斜率相近, 截距不同, 说明华北克拉通太古宙不同陆核起源于氧同位素组成不均一的古地幔源。

关键词 华北克拉通 氧同位素($\delta^{17}\text{O}$ - $\delta^{18}\text{O}$) 不均一性

基于氧同位素的研究, Clayton 等人^[1]发现, 所有的地球和月球的样品均落在斜率近于 0.5 的直线上(0.52). 起源于太阳系的陨石, 其氧同位素演化线平行于地月线(即斜率相同而截距不同), 陨石中若含有太阳系外物质(如 C₂ 和 C₃ 型碳质球粒陨石中的白色包体), 则构成与地月线斜交的直线, 这样可以利用氧同位素组成演化特征的差异将陨石划分为 6 大类^[2]. 具有不同氧同位素组成的陨石来源于不同的母体^[3], 因为没有任何一个氧同位素存在已知的天然

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-16-1758>