

冰川冻土
Journal of Glaciology and Geocryology
ISSN 1000-0240, CN 62-1072/P

《冰川冻土》网络首发论文

题目： 青藏高原大气CH₄源汇及其浓度时空变化特征研究进展
作者： 王逸凡, 高晶, 胡迈, 姚檀栋, 牛晓伟, 赵爱斌, 申子恒
收稿日期： 2022-03-10
网络首发日期： 2022-12-13
引用格式： 王逸凡, 高晶, 胡迈, 姚檀栋, 牛晓伟, 赵爱斌, 申子恒. 青藏高原大气CH₄源汇及其浓度时空变化特征研究进展[J/OL]. 冰川冻土.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail//62.1072.P.20221213.1145.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

WANG Yifan, GAO Jing, HU Mai, et al. The source and sink of atmospheric methane and spatial-temporal variation of its concentration on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology.

[王逸凡, 高晶, 胡迈, 等. 青藏高原大气 CH₄ 源汇及其浓度时空变化特征研究进展[J]. 冰川冻土.]

青藏高原大气 CH₄ 源汇及其浓度时空 变化特征研究进展

王逸凡^{1,2}, 高晶², 胡迈³, 姚檀栋², 牛晓伟², 赵爱斌², 申子恒^{1,2}

(1. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100101;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000)

摘 要: 甲烷(CH₄)是仅次于二氧化碳(CO₂)的重要温室气体。随着青藏高原气候的暖湿化,整个高原将可能成为一个潜在的碳源,要实现《巴黎协定》的 1.5 °C 和 2 °C 温控目标,需要准确估算未来剩余的碳排放空间。因此,准确地认识青藏高原大气 CH₄ 的源汇特征、时空变化过程及机理,对预测及应对变暖,帮助政府做出科学的节能减排决策具有重要的现实意义。本文从大气 CH₄ 的观测方法、源和汇、CH₄ 浓度的时空分布特征 3 个方面总结了青藏高原已有大气 CH₄ 的研究进展,结果表明:目前,青藏高原大气 CH₄ 观测主要有地基观测和卫星遥感,缺少空基观测,在卫星产品中,AIRS 的 CH₄ 浓度数据质量最好;青藏高原大气 CH₄ 以自然来源为主,可以确定的主要来源有湿地、湖泊和畜牧业,地质活动、植被和多年冻土是否是 CH₄ 的主要源还存在争议;吸收汇主要是对流层的 OH 自由基和高山草甸;青藏高原 CH₄ 浓度的季节分布呈单峰特征,夏季最高,CH₄ 浓度的增减与亚洲夏季风的进退同步;青藏高原 CH₄ 浓度年均增长约 5~8 μg·L⁻¹,大于周边地区;青藏高原近地面的 CH₄ 高值出现在中部,从地面到对流层顶 CH₄ 浓度逐渐减小,但高原东部和北部减小幅度大于西南部。未来应加强大气 CH₄ 三维连续观测,改进卫星反演算法和源汇解析模型,准确量化青藏高原大气 CH₄ 时空变化过程,揭示其变化机理,以为未来高效减排政策提供科学依据。

关键词: 青藏高原; CH₄ 的时空分布; CH₄ 的源和汇; 大气 CH₄ 影响因素

中图分类号: P412. 1; P412. 2 文章编号: 1000-0240(XXXX)XX-0001-17

0 引言

工业革命以来,温室气体的大量排放促进了全球变暖,带来海平面上升、南北极和高山冰雪融化、灾害性天气频发等一系列环境问题。二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是 3 种最重要的温室气体。虽然 CH₄ 在大气中的相对浓度不到 CO₂ 的 1%,但单个 CH₄ 分子对红外线的吸收能力是 CO₂ 的 28 倍^[1]。CH₄ 在大气中的寿命为 11.8 年,其 20 年全球增温势(GWP)是 CO₂ 的 82.5 倍,百年 GWP 是 CO₂ 的 29.8 倍(表 1),是具有快速增温效应的短寿命强势温室气体。CH₄ 产生的温室作用占总

温室效应的 20%,被认为是仅次于水汽和 CO₂ 的重要温室气体^[2]。通常使用 CH₄ 浓度和通量两个指标描述甲烷变化量。浓度表示 CH₄ 在大气中的体积分数,常用 μg·L⁻¹ 表示;通量表示单位时间内流经单位面积的 CH₄ 质量,用来描述 CH₄ 的传输强度。IPCC 第 6 次评估报告指出,工业革命以来,CH₄ 浓度迅速增加,从 1750 年的 772 μg·L⁻¹ 增长到 2019 年的 1 866 μg·L⁻¹,增长率为 241%。目前,全球 CH₄ 浓度仍以约 4 μg·L⁻¹·a⁻¹ 的速率增长,是增长速率最快的重要温室气体^[3]。大气 CH₄ 浓度的上升与全球变暖的作用是相互的,一方面,CH₄ 浓度上升会加剧温室效应;另一方面,全球变暖引发的环境变化也改变

收稿日期: 2022-03-10; 修订日期: 2022-09-17

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0208); 国家自然科学基金项目(41922002)资助

作者简介: 王逸凡, 硕士研究生, 主要从事大气甲烷浓度变化与机制研究. E-mail: wangyifan20@lzu.edu.cn

表1 各种温室气体的全球增温势^[3]Table 1 Global warming potential of various greenhouse gases^[3]

温室气体	在大气中的存留时间/年	辐射效率	GWP-20	GWP-100	GWP-500
CO ₂	>200	1.33±0.16×10 ⁻⁵	1	1	1
CH ₄ (含化石燃料)	11.8±1.8	5.7±1.4×10 ⁻⁴	82.5±25.8	29.8±11	10.0±3.8
CH ₄ (不含化石燃料)	11.8±1.8	5.7±1.4×10 ⁻⁴	80.8±25.8	27.2±11	7.3±3.8
N ₂ O	109±10	2.8±1.1×10 ⁻³	273±118	273±130	130±64
HFC-32	5.4±1.1	1.1±0.2×10 ⁻¹	2 693±842	771±292	220±87
CFC-11	52.0±10.4	2.91±0.65×10 ⁻¹	8 321±2 419	6 226±2 297	2 093±865
PFC-14	5×10 ⁴	9.89±0.19×10 ⁻²	5 301±1 395	7 380±2 430	10 587±3 692

着地表环境和生物化学过程,造成CH₄排放通量增加。在2018年IPCC发布的特别报告中指出,由于预计的化石燃料碳排放量已超过剩余碳预算的三分之二,所以非CO₂温室气体特别是CH₄的深度减排是将全球升温控制在1.5℃以下的必要条件^[4]。

青藏高原拥有中国最大面积的湿地和多年冻土,二者作为重要的碳库对气候变化十分敏感。目前,青藏高原正以超过全球升温率2倍的速度快速变暖^[5],导致高原上的湿地和冻土都发生了显著变化,这势必影响着青藏高原CH₄浓度的时空分布和变化过程。青藏高原CH₄的时空变化研究可追溯至1997年,姚檀栋等^[6]分析了喜马拉雅山中段达索普冰芯包裹气体中的CH₄含量,发现过去2000年来青藏高原大气CH₄浓度与升温、降温事件有很好的对应关系,并从工业革命前至今增长了近1.5倍。近年来,大量研究表明:湿地、湖泊、畜牧是青藏高原大气CH₄的重要来源。在全球变暖的背景下,青藏高原不断暖湿化^[10],气候变暖改变了产CH₄微生物菌群的活性,降水增加加大了土壤含水量,扩大了湖泊面积,从CH₄的产生和氧化两方面加大了排放通量^[7]。气温升高还会导致多年冻土融化塌陷形成热融湖塘,或者发生热融滑塌、热喀斯特地貌形成,显著影响青藏高原CH₄的收支^[8]。有研究通过卫星遥感发现2003—2016年青藏高原上空CH₄浓度年均增长率达5~8 μg·L⁻¹,显著高于周边地区^[9]。尽管目前青藏高原被认为是CH₄的净汇^[10],但如果变暖和变湿持续下去,整个高原将成为一个不断增加的碳源^[11]。因此,厘清青藏高原大气CH₄的源、汇及其浓度的时空变化,对预测全球变暖,做出科学的节能减排决策具有非常重要的意义。

1 青藏高原大气CH₄的观测方法

目前,青藏高原CH₄的观测可分为地基观测、空基观测和卫星遥感反演三类,各有其优势和不足

(表2)。CH₄的浓度观测三类方法均可实现,通量观测主要采用地基观测和卫星遥感。地基观测数据容易获取,可用于特定地点的CH₄通量和浓度变化研究,但空间局限性较大;空基观测借助于飞机、系留球等平台,能够实现对对流层中上层CH₄浓度的短期观测,但探测成本高昂、难以进行长期连续探测;卫星遥感通常使用红外遥感,拥有探测范围广、时间序列长等优点,是一种全球尺度的宏观观测方法,但由于星载传感器空间分辨率和反演算法的差异,数据精确度需要通过原位观测进一步验证。

表2 CH₄的三类观测方法比较

Table 2 Comparison of three kinds of methane observation methods

CH ₄ 的观测方法	观测时间	观测空间	观测成本	数据精度	观测类型
地基观测	长期连续	定点观测	较低	高	浓度和通量
空基观测	短期不连续	垂直廓线	较高	高	浓度
卫星遥感	长期连续	几乎覆盖全球	很高	有待验证	浓度和通量

1.1 地基观测

青藏高原CH₄的地基观测包括地表通量观测和近地面浓度观测,数据容易获取且瞬时性强,为系统性研究CH₄等温室气体浓度的动态变化规律和源汇机制提供了有效的观测资料。

CH₄地表通量观测的常用方法有静态箱法(叶室法)和涡度协方差法。静态箱法原理是通过测量一个箱体内存测气体浓度随时间的变化率来计算气体的释放通量。该方法常用于测量湿地、水体、草场等不同下垫面温室气体通量。静态箱是一个密封的无底箱体,通常由不锈钢、有机玻璃等坚固、稳定的材料制成。如果待测下垫面为水体、湿地,可在静态箱底部加一圈浮板^[12];如果待测下垫面为旱地,静态箱底部为一个地箱^[13]。与静态箱法需要较多人工投入相比,涡度协方差法可以在不干扰环

境条件的情况下实现对 CH₄ 通量的长期、连续、高精度的自动化观测^[14]。

使用静态箱法研究青藏高原 CH₄ 通量始于 1996 年。林清等^[15]使用有机玻璃静态箱在青海五道梁采集了冻土活动层表面气体样本,埋箱后第 5 天开始,每天在 8:00、14:00、20:00(北京时,下同)各使用针管吸取箱内气体一次,随后运回实验室,用 Mat-271 气体质谱仪测定了 CH₄ 浓度。随后, Cao 等^[16]、魏达等^[17]、郭小伟等^[18]分别在西藏纳木错和青海皇城乡用静态箱收集气体的方法研究了高寒草原 CH₄ 通量。这些研究结果均表明高寒草甸是 CH₄ 的汇。2018 年,张舜尧等^[19]在祁连山南麓的木里镇使用与基于光腔衰荡光谱技术(CRDS)的 G2132i 型甲烷碳同位素分析仪连接的静态箱,实现了对箱内甲烷稳定碳同位素含量的实时监测,得出了青藏高原冻土区湿地近地表生物成因 CH₄ 占比下降,热成因 CH₄ 占比上升的结论。2020 年, Wang 等^[20]使用漂浮静态箱在青藏高原 G109 沿线观测了多个热融湖塘的 CH₄ 通量,得出冒泡是热融湖塘 CH₄ 排放的主要方式。涡度协方差法在青藏高原 CH₄ 通量研究的应用相对较晚,2011 年 Song 等^[21]使用此方法对青海海北州乱海子高山草原进行了 2 年 CH₄ 通量观测,提出非生长季湿地对 CH₄ 排放的重要贡献;之后涡度协方差法还应用于川西高原泥炭地和高山草原 CH₄ 通量的测量^[22-23]。

近地面大气 CH₄ 浓度观测可获取大气 CH₄ 的绝对含量,与通量观测共同反映了地表 CH₄ 变化过程,主要在地面大气观测台站进行长期连续观测。青海的瓦里关全球大气本底站是首个青藏高原地区的大气 CH₄ 浓度观测站,早期使用人工观测方法,2008 年以后开始使用基于光腔衰荡光谱技术(CRDS)的 CH₄ 连续、高精度观测技术。人工观测方法是每周使用便携式采样器和 flask 硬质玻璃瓶采集一次大气样品,在实验室使用气相色谱-火焰化离子检测法(GC-FID)分析得到样品 CH₄ 浓度^[24]。2009 年和 2011 年,青藏高原东南部的香格里拉区域大气本底站和四川海螺沟国家大气背景站也开始了大气 CH₄ 浓度观测^[25-26]。

1.2 空基观测

基于飞机、气球、无人机等飞行平台的观测可获取大气 CH₄ 的垂直分布特征。这不仅弥补了地基观测的空间局限性,而且相较于卫星反演的数据可信度更高^[27]。国际上已有众多研究利用飞机实

现了对 CH₄ 的高空观测^[28-30]。国内对 CH₄ 的空基观测较少,王木林等^[31]于 1988 年 11 月在新疆古尔班通古特沙漠用飞机采样首次获得了从地面到 4 000 m 高空的 CH₄ 廓线,开辟了国内对 CH₄ 空基观测的先河,但在青藏高原开展的相关空基观测几乎空白。

目前在青藏高原地区开展的大气 CH₄ 探空观测十分稀少。安徽光学精密机械研究所的袁峰等^[32]利用基于 CRDS 技术的球载 CH₄ 在线观测系统,于 2019 年 4 月 28 日至 29 日在西藏鲁朗地区成功完成了海拔 3 340~6 000 m 高空 CH₄ 垂直廓线的观测。CRDS 技术由于装置简单、具有更高的检测灵敏度、数据不需要频繁校准,非常适用于基于球载平台的测量^[33]。CRDS 装置(图 1)利用气泵抽取待测气体,经过干燥管和过滤器后进入光腔,进气口和出气口各有一个针阀控制空气流速。由激光发射器发射一束激光耦合进入充满气体的光腔中,在光腔两端各有一个反射率大于 99.99% 的镜片,激光在两个镜片间来回反射。根据朗伯-比尔定律,单色光穿过某一非散射的均匀物质时,由于光与物质的相互作用而发生衰减,衰减量与穿过物质的有效吸收光程和物质本身的吸旋光性质有关,且呈指数型衰减。所以,当入射光与光腔发生共振时,立刻切断光源,光束在光腔中来回反射并被不断吸收,产生数十公里的有效吸收长度,这让 CRDS 拥有很高的灵敏度。当透射光强衰荡到原来的 e⁻¹ 时,记录衰荡时间。根据实验组和对照组的衰荡时间计算腔内气体的光谱吸收系数,进而确定腔内气体浓度。

1.3 卫星遥感

卫星遥感是一种宏观的观测方法,可以在较高的空间分辨率上实现长时间、大区域、从地面到高空三维的大气 CH₄ 浓度观测,能够有效弥补地面观测的不足^[34]。目前,常用的观测 CH₄ 浓度的卫星传感器有 ENVISAT 搭载的 SCIAMACHYS (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography, 扫描成像吸收光谱大气制图仪)、GOSAT 搭载的 TANSO-FTS (Fourier Transform Spectrometer, 傅立叶变换光谱仪)、Aqua 搭载的 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder, 大气红外探测仪)和 Snetinel-5p 搭载的 TROPOMI (The Tropospheric Monitoring Instrument, 对流层监测仪器)^[35]。SCIAMACHY 只能监测大气柱干体积 CH₄ 混合比^[36],观测时段为 2002 年 3 月—2012 年 5 月;GOSAT 仅能分析晴朗天况下的区域,收集的数据只有

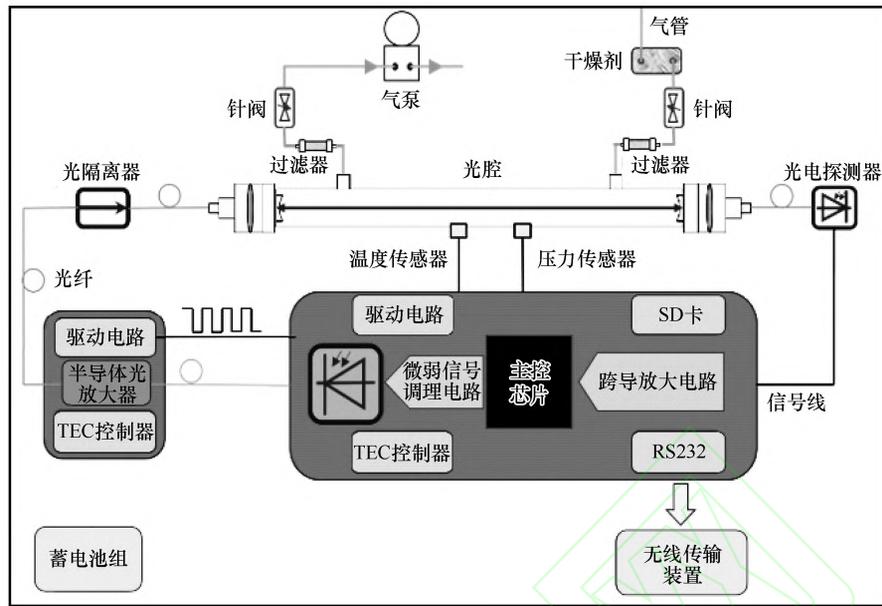
图1 CRDS装置结构图^[32]

Fig. 1 Structure diagram of CRDS

2%~5% 可用于计算 CH_4 浓度^[37], 数据覆盖主要在南北纬 60° 之间, 观测时段为 2009 年 1 月至今; AIRS 采用热红外波段 $7.66 \mu\text{m}$ 检索大气中的 CH_4 浓度, 受云的影响较小^[38], 在 $3.7\sim 15.4 \mu\text{m}$ 间有 2378 个光谱通道, 较前两者拥有更高的光谱分辨率, 数据能覆盖全球。它的空间分辨率为 13.5 km , 观测时段为 2002 年 9 月至今。TROPOMI 自 2017 年 10 月发射以来, 为 CH_4 产品提供了很高的空间分辨率和更快的回访周期, 能有效监测到 CH_4 的点源, 遗憾的是 TROPOMI 在青藏高原地区的 CH_4 数据十分稀少。因此, 目前对青藏高原大气 CH_4 浓度的卫星遥感观测主要采用 SCIAMACHY, GOSAT 和 AIRS 三种卫星传感器, 其中以 AIRS 最多。

目前已有众多研究通过 CH_4 的地基和空基观测数据验证了卫星反演数据。SCIAMACHY, GOSAT 和 AIRS 反演的 CH_4 浓度与全球 90 个地面台站观测结果通过相关系数、均方根偏差 (RMSD) 和平均差等对比评估后, 发现 AIRS 反演的对流层 CH_4 月均浓度与地面台站观测值的相关系数大多大于 0.5 ^[38], 均方根偏差、平均差最低, 其与瓦里关站地面观测数据的相关系数显著高于另外两种卫星数据^[37], 误差在 $0.2\%\sim 2\%$ ^[39-40], 并能较准确反演 CH_4 浓度的年际变化和季节变化趋势。Xiong 等^[41] 利用 NOAA/ESRL/GMD 碳循环集团运营的 26 个地点的飞机气体采样结果验证了 AIRS 传感器反演的对流层中下层 CH_4 廓线数据, 结果表明 AIRS 反演的 CH_4 浓度误

差在 $0.5\%\sim 1.6\%$ 之间。SCIAMACHY 数据和 GOSAT 数据都不能准确反演瓦里关地面数据的季节变化幅度与趋势。

综上, AIRS 反演的 CH_4 数据质量高于 SCIAMACHY 和 GOSAT, 与瓦里关站地面观测数据最相近, 可以用来分析青藏高原大气 CH_4 浓度变化特征。但青藏高原地形复杂、环境恶劣、站点稀少、原位观测困难, 除瓦里关大气本底站之外, 缺乏其他地区的 CH_4 原位观测资料尤其是探空观测资料。为了得到更加精确的青藏高原地区 CH_4 浓度卫星遥感数据, 还需要增加原位观测的时间和密度, 对卫星遥感数据进行多方位的验证。

2 青藏高原 CH_4 的源和汇

CH_4 的排放源可分为自然源和人为源两大类。准确估算不同类型 CH_4 源汇的排放量和贡献率是计算 CH_4 收支、预测 CH_4 对气候变暖的贡献比例、调控 CH_4 排放总量的基础。本节梳理了青藏高原确定的和潜在的 CH_4 源和汇 (图 2), 发现青藏高原 CH_4 排放以自然源为主, 自然源多且复杂, 其中湿地和湖泊的研究较为丰富; CH_4 的汇主要是高山草原 (草甸)。但目前对于植被、地质活动和多年冻土的 CH_4 排放机制不甚了解, 青藏高原整体是碳源还是碳汇仍有争议。因此, 理清青藏高原大气 CH_4 的源和汇现状和产生机制, 对减排政策制定具有十分重要的意义。

表3 青藏高原不同地点的 CH₄ 通量Table 3 CH₄ fluxes at different sites on the Qinghai-Tibet Plateau

土地类型	地点	观测时间	CH ₄ 通量/(mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	参考文献
湿地	四川红原县日干乔沼泽	2013年1月—2017年12月	92.3	[42]
湿地	青海门源县乱海子	2011年7月—2013年12月	72.3~92.6	[21]
湿地	青藏公路沿线	2006年7—8月	600±852	[43]
高山湿草甸	青海玛多县花石峡镇	1996年7—8月	43.2	[44]
泥炭地	青海玛多县花石峡镇	1996年7—8月	13.0	[44]
次生沼泽	青海玛多县花石峡镇	1996年7—8月	45.9	[44]
湖泊	青藏高原上17个大型湖泊	2014年8月, 2015年5月	8.32×10 ⁻⁵	[45]
热融湖塘	四川若尔盖花湖	2009年5—8月	0.83±0.70	[46]
热融湖塘	青藏公路沿线	2020年夏天	0.15	[20]
热融湖塘	青藏公路沿线	2019年6月, 9月, 2020年6—9月	55.7±81.4	[47]
高山草甸	青海海北州	2005—2006年	-7.2~-6.7	[48]
高山草甸	青藏公路沿线	2006年7—8月	-0.69±0.51	[43]
高山灌丛	青藏公路沿线	2006年7—8月	-0.32±0.83	[43]
高山草甸(高植被覆盖斑块)	青海风火山	2017年6—10月, 2018年6—10月	-0.16	[49]
高山草甸(裸斑)	青海风火山	2017年6—10月, 2018年6—10月	-0.61	[49]
高山草原	西藏纳木错	2008年7—9月	-1.13	[17]
高山草甸	青海门源县皇城乡	2016年10月—2017年9月	-0.96±0.30	[18]
高山草甸	四川红原县	2015年6月—2016年12月	-20.7~-2.8	[22]

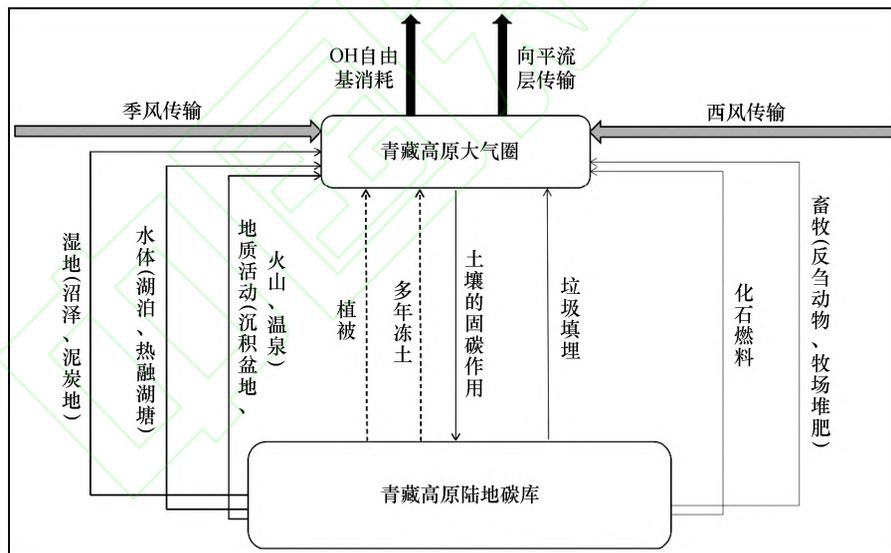
图2 青藏高原 CH₄ 收支示意图(黑色线条表示自然源,灰色线条表示人为源,虚线表示不确定的排放源)

Fig. 2 Methane budget of Qinghai Tibet Plateau (Black lines represent natural sources, grey lines represent anthropogenic sources, dotted lines represent uncertain sources)

2.1 CH₄的自然源

青藏高原地区 CH₄ 的自然源包括湿地、湖泊、地质活动、植被、多年冻土等。湿地和湖泊是重要且明确的自然源,地质活动、植被和多年冻土是潜在的自然源,缺乏对其机制和排放量级的定量研究。

湿地是永久性或季节性积水区,过饱和的土壤水分提供了良好的无氧环境,导致有机质不完全分

解,产生 CH₄。青藏高原上分布着 1.32×10⁵ km² 的湿地,约占中国湿地面积的三分之一^[44],包括水分饱和的高山草甸、泥炭地、沼泽、盐沼等一系列生态系统,作为重要的 CH₄ 源,贡献了大量 CH₄ 排放通量。Kato 等^[43]通过青藏高原上 7 个站点对湿地 CH₄ 通量的观测,推出整个青藏高原湿地 CH₄ 排放量为 0.48 Tg·a⁻¹。Jin 等^[50]通过耦合陆地生态系统模型

模拟计算得到,2000—2010年,青藏高原上自然湿地总的 CH_4 排放量为 $0.95 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ 。青藏高原湿地产生的 CH_4 通量在一年中有两个高峰,分别是春季解冻期和夏季生长季。Chen等^[42]测量了四川红原县日干乔沼泽的 CH_4 通量为 $33.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中解冻期贡献了69.1%~88.6%。Song等^[21]在青海门源县乱海子湿地的观测得出,2012—2013年 CH_4 排放量为 $26.4\sim 33.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,生长季甲烷排放量占年排放量的53.9%~56.8%。研究表明湿地 CH_4 的日排放通量峰值出现在午后12:00—18:00之间,最低值在凌晨,且不同季节基本一致^[17,21,42]。青藏高原湿地 CH_4 的排放通量在年际尺度上呈增长趋势。张贤等^[51]通过TRIPLEX-GHG模型模拟了青藏高原湿地 CH_4 排放的动态特征,结果表明青藏高原湿地 CH_4 排放速率呈逐渐增加趋势,从1978年的 $0.21 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ 增长到2008年的 $0.32 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在空间分布方面,青藏高原南部湿地 CH_4 通量最高可达 $74.97 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其次为东北部,为 $6.14\sim 20.19 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[51]。目前对青藏高原湿地 CH_4 通量的观测多集中在青海和川西地区,由于湿地空间范围的不确定性,以及湿地释放 CH_4 的过程复杂、控制因素众多^[47],要精确量化青藏高原湿地 CH_4 排放量,需要青藏高原不同区域和类型湿地 CH_4 通量的大量观测,以及解冻期和生长期时间长度的准确数据。

湖泊释放的 CH_4 主要由沉积物中的微生物产生,通过扩散、冒泡和植物运输3种方式输送到大气中。青藏高原湖泊众多,模型模拟结果表明,青藏高原湖泊和池塘每年排放 $0.13 \text{ Tg} \text{ CH}_4$,其中87%产生于湖岸地带^[52]。Yan等^[45]对青藏高原上17个大型湖泊湖岸地带进行了 CH_4 通量观测,得出 CH_4 平均扩散通量为 $5.2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,淡水湖 CH_4 通量相对于咸水湖较高。相较于大型湖泊,小型湖塘单位面积释放的 CH_4 更多。Zhu等^[46]于2009年5—8月对若尔盖花湖的观测得出 CH_4 平均通量为 $(52.1\pm 43.7) \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,其中冒泡产生的 CH_4 通量占93%,且在盛夏时达到顶峰。Wang等^[20]在2020年夏天对青藏公路沿线32个热融湖塘进行了 CH_4 通量观测,得到 CH_4 平均扩散通量为 $2.6 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,平均冒泡通量为 $6.6 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,并发现热融湖塘周边植被越好, CH_4 通量越大,但不同湖塘 CH_4 通量的季节变化不一致。由于青藏高原上湖水的变暖 and 湖泊面积的扩张^[53-54],未来可能会排放更多 CH_4 ,其中小型湖塘的形成与扩大和 CH_4 的冒泡排放尤其

值得关注。

地质活动产生 CH_4 的方式包括沉积盆地的微渗透、泥火山、海底渗漏、地热区火山、温泉等^[55]。青藏高原的柴达木盆地蕴藏着丰富的 CH_4 ,目前其生成依然很活跃^[56]。而喜马拉雅山地区占有全球50%以上的泥火山,泥火山中的有机质和烃源岩被热解并产生大量的烃类气体,其成分99%为 CH_4 ^[57]。冯冬霞等^[58]通过AIRS星载传感器反演的 CH_4 浓度发现,青藏高原 CH_4 浓度最大值出现在西南部,该地区位于印度板块和亚欧板块前沿叠瓦式造山带和地缝合线上,推测地质气体的排放可能是该位置 CH_4 浓度长期高值的主要原因,但目前缺乏地质活动产生 CH_4 通量的定量测量。

植被有多种产生 CH_4 的方式。首先,植物的输导组织可以成为 CH_4 传输的通道,阻止了 CH_4 被土壤的消耗,这一作用在热带湿地森林中最为显著^[59];其次,在木本植物中,由于木材内部会形成缺氧环境,给厌氧细菌提供了适宜的生长环境,从而产生 CH_4 ,尤其在枯死植物的树干部位^[60]。但植物本身能否在有氧条件下产生 CH_4 存在较大争议。早年人们一直认为生物圈中大气 CH_4 的源来自于严格厌氧环境中的微生物过程,然而2006年Kepler等^[61]提出在有氧环境下植被叶片会直接释放 CH_4 。随后McLeod等^[62]提出紫外线辐射可能是植物果胶产生 CH_4 的重要机制。Cao等^[16]在青藏高原高山草甸的研究发现,在一年中,草本身会释放 CH_4 ,而灌木从大气中吸收 CH_4 ,并估计了青藏高原地区高山植物贡献的 CH_4 排放量至少是 $0.13 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ 。但Cao等的研究受到了质疑,Wang等^[63]的实验结果表示,之前研究中植被和裸土 CH_4 通量的差异可能是土壤温度和含水量的差异造成的,青藏高原植被是否会在有氧条件下产生 CH_4 仍然悬而未决。随着气候变暖,青藏高原植被返青期提前,净初级生产力(NPP)提高^[64],如果植物本身确实能在有氧条件下产生 CH_4 ,那么整个青藏高原的碳平衡和 CH_4 收支都需要重新估计。

多年冻土是南北极和青藏高原地区独有的 CH_4 排放源。青藏高原42%的区域是多年冻土^[65],大部分温度高于 $-2 \text{ }^\circ\text{C}$,厚度小于 100 m ^[66],因此对温度变化高度敏感。多年冻土储存了大量土壤有机碳(SOC),据估计,青藏高原 $0\sim 2 \text{ m}$ 表层土壤的SOC含量为 $(19.0\pm 6.6) \text{ Pg}$, $2\sim 25 \text{ m}$ 深层土壤的SOC含量为 $(130.0\pm 40) \text{ Pg}$ ^[10],形成了巨大的有机碳库。这

些封存的碳与植被中的碳一起,为湿地、湖泊产生 CH₄ 提供了底物。气候变暖会加速多年冻土的退化和 SOC 的分解,还会融化塌陷形成热融湖塘和热融滑塌,改变地表环境,向大气释放更多的 CH₄。近 30 年间,仅青藏公路沿线的热融湖塘面积就从 107.14 km² 增加到 184.92 km²[67],通过气泡、扩散等方式向大气中排放 CH₄,对青藏高原上 CH₄ 的收支产生了显著贡献[19],但对于整个青藏高原热喀斯特地貌影响的区域面积还没有精确的估计[10]。研究表明,土壤温度、土壤含水量、土壤 pH 值、产甲烷菌丰度、地下水位和土壤碳同位素都是青藏高原多年冻土 CH₄ 通量的潜在影响因素[19,42,68-70],但目前的研究大多限于地表环境因子和土壤物化性质对 CH₄ 排放的影响,缺少深层次挖掘 CH₄ 产生和氧化的微生物机制。

2.2 CH₄ 的人为源

畜牧是青藏高原地区最重要的 CH₄ 人为源,其次是化石燃料和垃圾填埋场。

畜牧有两种方式产生 CH₄:一种是动物不能直接消化植物中的纤维素,由胃室里的微生物群落厌氧发酵产生 CH₄,并随着逆呕动作从口腔中排出,这部分来自于牛、羊、骆驼等反刍动物,占畜牧 CH₄ 主要来源的 90%;另一种是由牧场沉积的动物尿液和粪便发酵产生[71-72]。青藏高原牧场面积广阔,约占高原面积的 60%,畜牧业是其主要的生产生活方式[11]。从 1978 年以来,青藏高原家畜数量增加了近 300%[73],西藏雅鲁藏布江谷地和青海湟水谷地是畜牧引起的 CH₄ 排放高值区,通量大于 3 g·m⁻²·a⁻¹[74]。Xu 等[75]通过测量呼吸室内 CH₄ 浓度的变化,得出 1~3 岁藏绵羊 CH₄ 日排放量分别为 17.65 g、19.49 g 和 21.06 g。畜牧业排放 CH₄ 的强度直接受温度的影响,温度的升高很可能会提升牲畜系统的生产力,导致 CH₄ 排放强度的增加,但温度变化对畜牧 CH₄ 排放的潜在影响尚未得到任何系统的量化[73]。畜牧对草场环境的影响也会间接影响 CH₄ 通量。Lin 等[48]发现,在青藏高原高山牧场,有牦牛粪便的斑块是 CH₄ 的源 (199~586 μg·m⁻²·h⁻¹),对照区是 CH₄ 的汇 (-30~-28 μg·m⁻²·h⁻¹)。Wei 等[76]于 2009—2010 年在青藏高原中部高山草原对温室气体通量观测发现,禁牧区土地对 CH₄ 的吸收速率比放牧区高 14.8 μg·m⁻²·d⁻¹,并提出对牧区的封闭管控是减少高山草原温室气体排放的重要举措。但也有研究表明适度放牧可能会增强碳封存,增加土壤的碳储量[77]。

化石燃料造成的 CH₄ 排放主要是煤炭、石油和天然气在开采、加工、运输、使用过程中产生的,尤其是页岩气的开采[78]。青藏高原的油气工业集中在柴达木盆地[79],随着天然气资源的不断开发,可能会造成更多 CH₄ 排放,但目前还没有研究对柴达木盆地油气工业产生的 CH₄ 通量进行量化。此外,多年冻土融化会导致天然气管道破裂,增加 CH₄ 运输途中的泄露[80]。

垃圾填埋场也是主要的人为 CH₄ 源,主要分布于人口密集的城镇附近。垃圾填埋场提供了良好的厌氧环境和大量有机物,在 CH₄ 菌的发酵作用下,有机物分解产生 CH₄。垃圾组分、填埋场水分状况、垃圾温度、pH 值、垃圾年龄等因素都会影响 CH₄ 产量,其中温度在 30~41 °C 时,厌氧菌繁殖速度最快[81]。降水通常也会加大 CH₄ 产量,但过大的降雨可能导致垃圾内孔隙减少从而阻碍 CH₄ 的释放[82]。2018 年,西藏自治区已建成垃圾填埋场 111 座,生活垃圾清运量 4.5×10⁵ t,7 年间翻了 3 倍[83]。随着西藏城市化水平的不断提高和旅游人次的快速增长,生活和旅游垃圾的产生量和清运量也随之增加,加大了 CH₄ 的排放。

2.3 CH₄ 的汇

与 CH₄ 复杂的源相比,CH₄ 的汇相对简单。大气中 CH₄ 的汇主要有 3 种,分别是对流层中的 OH 自由基、平流层中的氯离子和土壤中的氧化菌。在青藏高原,最具地区特色且研究成果最为丰富的 CH₄ 的汇是高山草原(草甸)。

OH 自由基是低层大气的首要清洁剂,大气中 CH₄ 最主要的清除过程就是与对流层中的 OH 自由基反应生成甲基和水,尤其是在光照充足的热带地区[35]。此过程清除 CH₄ 的多少与大气污染状况相关,在高污染地区,大气中的氮氧化物较多,氮氧化物是臭氧的前身气体,臭氧又是 OH 自由基的前身气体,因此 OH 自由基浓度较高。而在青藏高原,大气污染程度很低,也对应着 OH 自由基浓度的低值区[84]。

对流层中少部分 CH₄ 通过 Brewer-Dobson 环流向上传输至平流层下部[85],其浓度随着高度的升高迅速降低,平流层中的 CH₄ 主要被氯离子氧化消除。在青藏高原,强烈的对流运动主要发生在西南部,在亚洲夏季风的作用下,CH₄ 被抬升至对流层顶,进而进入平流层[86]。值得注意的是,CH₄ 无论是与 OH 自由基反应生成的水汽,还是与氯离子反应生成的

CH₃Cl, 同样是重要的温室气体。

干燥土壤中的CH₄氧化菌能对CH₄起到逐层吸收的作用,且土壤温度、湿度、碳氮含量、pH值和孔隙状况都能影响土壤对CH₄的吸收速率^[87]。在青藏高原,草地和森林土壤对CH₄的吸收量是研究青藏高原碳循环的关键。大多数研究均支持青藏高原高山草甸和高山草原是CH₄的净汇,吸收通量为0.69~7.2 mg·m⁻²·d⁻¹,且高山草原大于高山草甸,夏秋季大于冬春季^[17-18,22,43,48-49]。据估算,青藏高原草地和森林土壤每年吸收0.36 Tg CH₄,其中草地土壤占78.4%,并占全国草地CH₄吸收量的44%^[88],另有估算认为仅青藏高原高山草甸每年就能吸收(0.41±0.04)Tg的CH₄^[22]。

由于高原冻土和湿地生态系统的不稳定性,青藏高原的土壤整体是碳源还是碳汇仍有争议。Jin等^[50]采用耦合陆地生态系统模型模拟得到青藏高原在1979—2000年是CH₄的净排放源,排放量为0.76 Tg·a⁻¹;Yun等^[89]在青海北麓河的观测表明青藏高原多年冻土地区春季是CH₄的源,秋季是CH₄的汇,总体是CH₄的净汇,每年吸收(0.86±0.23)g·m⁻²,比格陵兰岛北部、阿拉斯加和西伯利亚西部等多年冻土区对CH₄的吸收更强烈;Zhang等^[69]通过对51处土壤样品的实验室培养与机器分析的方法估计了青藏高原CH₄的收支,结果表明湿地是CH₄的源,排放量为0.6 Tg·a⁻¹,高山草甸和草原是CH₄的汇,每年吸收10.9 Tg,总体上青藏高原是CH₄的强烈吸收汇,吸收量为10.3 Tg·a⁻¹。但Kato等^[43]提出了不同的意见,在2006年7—8月观测到青藏高原上7个站点湿地CH₄平均通量高达600 mg·m⁻²·d⁻¹,相当于高山草甸和灌丛CH₄吸收通量的100~200倍,并指出至少在夏季,青藏高原整体是CH₄的源。Mu等^[10]指出,由于青藏高原西部和北部的CH₄通量观测十分稀少,尤其缺乏多年冻土深度、SOC含量和土地覆盖类型的精确数据,很大程度上影响了土壤碳的准确估计,所以目前对于青藏高原永久冻土区是CH₄的源还是汇还未达成共识。

3 青藏高原大气CH₄浓度的时空分布

前文已梳理了青藏高原大气CH₄的源和汇及其通量,可以用来自下而上估计CH₄的收支,而其通量变化具有明显的时空变化特征。本章将基于已有研究结果,总结出青藏高原地区CH₄浓度的时间和空间分布特征,由点及面,对青藏高原大气CH₄整体

的变化过程进行梳理。

3.1 时间分布特征

3.1.1 季节变化特征

地面台站观测数据分析表明,青藏高原上的瓦里关站CH₄浓度呈单峰分布,峰值出现在7月,与中国东部地区CH₄浓度季节变化有较明显差异^[90-91]。这可能与瓦里关附近人类活动较少、CH₄生物源和冻土排放的季节性变化有关。云南香格里拉站的CH₄季节变化也呈单峰分布特征,但峰值略晚于瓦里关,出现在9月^[92]。四川海螺沟站CH₄浓度季节变化与瓦里关、香格里拉明显不同,呈春夏低、秋冬高的特征,这可能是因为海螺沟靠近四川盆地,盆地内稻田和湿地产生的CH₄因相对闭塞地形难以流出,在冬季风的作用下在高原东部积累^[26]。在青藏高原3个大气站点中,香格里拉、海螺沟位于高原边缘,属于高山针叶林带,且易受内地地区CH₄排放源的影响;瓦里关相对靠近高原腹地,植被为高山草原,附近人类活动稀少,且站点建在山顶,大气混合较为均匀,在3个站点中最能代表青藏高原大气CH₄的普遍状况。

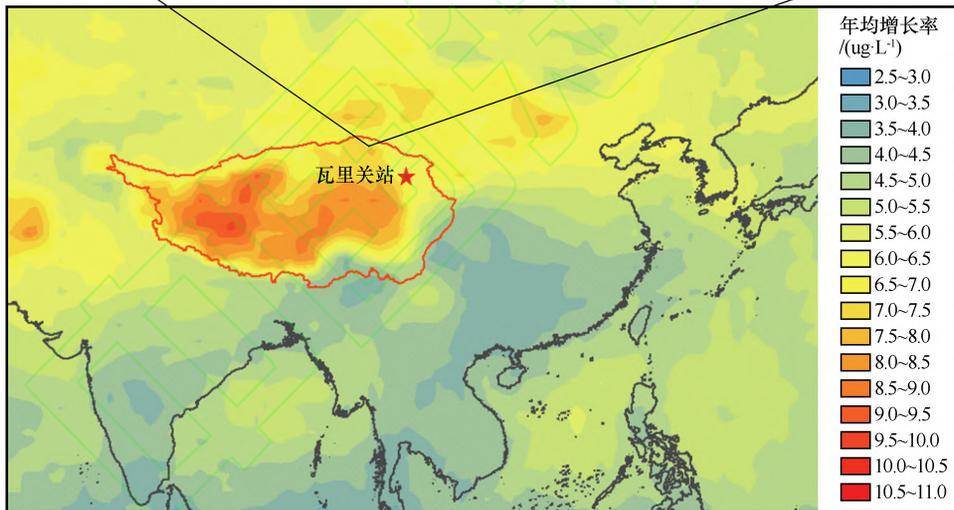
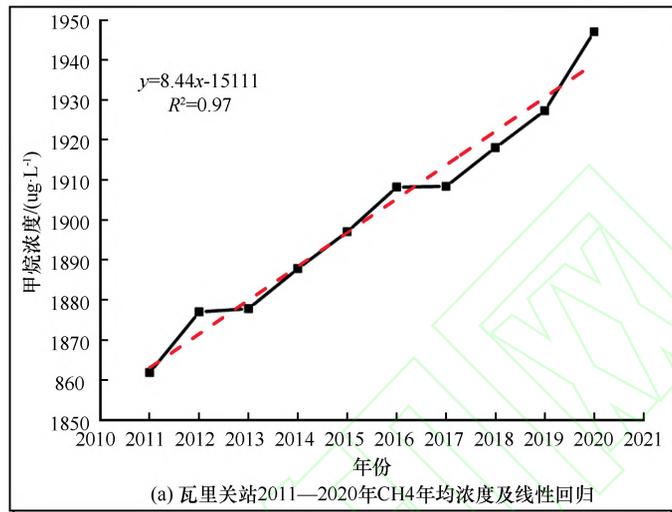
卫星遥感和模型模拟的结果得到的青藏高原500~100 hPa对流层各高度CH₄浓度年变化大体一致^[93],总体表现为单峰季节变化特征^[58],4月浓度最低,6—8月迅速上升,8—9月达到峰值,其中以6—7月CH₄浓度的增幅最大,这与亚洲夏季风的进退和高原反气旋的形成和消散同步^[86],10月至次年春季逐渐下降,但在12月有一个小峰值,这与瓦里关台站的地基观测结果十分相似。在500 hPa,CH₄浓度最高,平均大于1 800 μg·L⁻¹,季节波动幅度达70 μg·L⁻¹;随着高度的上升,CH₄浓度不断减小,季节波动幅度也随之减小。至100 hPa,CH₄平均浓度降至1 680 μg·L⁻¹,季节波动幅度小于20 μg·L⁻¹。这种季节变化很可能与青藏高原特殊的生态环境与以畜牧业为主的生产方式有关。夏季,冻土融化和微生物活动产生了大量CH₄;冬季,湖水结冰,牧草枯萎,而青藏高原又不集中供暖,CH₄的排放源大大减少。但其空间分布特征随高度变化。例如,在407.25 hPa和306.75 hPa,青藏高原中部唐古拉山一线是冬季和春季CH₄浓度的低值区,但夏季和秋季,这一带的CH₄浓度低值消失;在206.25 hPa,青藏高原大气CH₄浓度在四季均呈现出从西南到东北不断降低的变化特征^[58],但喜马拉雅地区年均CH₄柱浓度比西藏腹地高约6×10¹⁸ molecules·cm⁻²^[94],夏

季风期间的上升尤为明显,这可能与亚洲夏季风的进退关系密切。

3.1.2 年际变化特征

青藏高原瓦里关站拥有长期的 CH₄ 观测,能较好地反应其年际变化特征,其 2009—2011 年大气

CH₄ 浓度平均增长率为 $(9.4 \pm 0.2) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{a}^{-1[95]}$, 2010—2016 年的大气 CH₄ 浓度平均增长率为 $(8.2 \pm 0.1) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{a}^{-1[96]}$, 2011—2020 年瓦里关大气 CH₄ 浓度平均增长率为 $8.44 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ [图 3(b)], 均高于全球平均水平。



注: (地区 500 hPa 高度 2011—2020 年 CH₄ 浓度年均增长率插值瓦里关站 CH₄ 浓度月均数据下载自世界温室气体数据中心(<https://gaw.kishou.go.jp/>), AIRS 第七版三级标准产品的 CH₄ 月均浓度网格数据下载自美国宇航局地球科学数据和信息服务中心 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)

图3 基于地面观测和卫星遥感的 CH₄ 浓度增长率

Fig. 3 The growth rate of CH₄ concentration from ground observation and remote sensing [Annual average concentration and linear regression of CH₄ at Waliguan station from 2011 to 2020 (a); Interpolation of annual average growth rate of CH₄ concentration at 500 hPa height in East Asia retrieved by AIRS from 2011 to 2020 (b)]

The monthly average CH₄ concentration data of Waliguan station is downloaded from the world greenhouse gas data center (<https://gaw.kishou.go.jp/>), The monthly average CH₄ concentration grid data of the AIRS L3 V7.0 standard products is downloaded from NASA geoscience data and Information Service Center (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)

卫星遥感也显示出青藏高原大气 CH₄ 浓度在快速增加。2002—2016 年,青藏高原除了藏东南低海拔区域外,500 hPa 的 CH₄ 浓度月均增长率普遍高于

全国其他地区^[9,97],通常大于 $6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,最高值出现在高原中部,最低值出现在高原东南部。这可能是由于青藏高原气候的暖湿化导致冻土活动层加

深、NPP提高以及高原湖区面积的扩大。在对流层中下层(1 000~400 hPa),青藏高原 CH_4 浓度的年均增长速率(约 $5\sim 8\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)显著高于东亚地区(约 $2.0\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$),最大值出现在西藏的东部和西部。这种变化特征可能与外来 CH_4 的积累、畜牧业的发展和冻土封存的碳释放有关。在200 hPa处,青藏高原大气 CH_4 年均浓度平均每年增加 $4.9\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [98]。冬季、春季、秋季 CH_4 的增长率随着海拔的升高而下降,但夏季却随海拔逐渐上升,在200 hPa处达到最大。这可能是由于夏季对流层下层的强对流将 CH_4 输送到上层所致[98]。吴晓迪[99]结合了AIRS传感器和MOZART-4模型,用正弦拟合描绘了中国近地表 CH_4 浓度2007—2020年的变化规律,发现青藏高原近地表 CH_4 浓度增长率仅次于华北地区。

总之,根据目前的研究,近年来青藏高原大气 CH_4 浓度的平均增长率高于周边地区和全球平均水平,且高原腹地 CH_4 浓度增长率大于边缘地区[图3(b)]。但目前大多数研究尚停留在现象分析阶段,没有与 CH_4 的排放源结合进行青藏高原大气 CH_4 浓度快速上升的机制分析。随着青藏高原的暖湿化,冻土的消融、植被的增多、湖泊的扩展以及外界的传输都是 CH_4 浓度快速上升的潜在影响因素,在未

来的研究中亟待深入挖掘。

3.2 空间分布特征

青藏高原区域大气 CH_4 浓度的空间分布特征通常使用卫星反演的 CH_4 浓度产品计算平均值后经过空间插值或栅格化处理得到,或使用模型模拟得出。由于不同论文的数据来源、数据类型、研究时段不同,所以得到的青藏高原大气 CH_4 浓度的空间分布有所差异。AIRS反演数据与青藏高原的瓦里关站数据的相关系数最高($R=0.81$)^[97],分析结果如图4所示。在500 hPa,青藏高原大气 CH_4 浓度呈中间高,南北低的分布特征,四川西北部和西藏阿里地区是两片明显的高值区;在150 hPa,则呈现出西南高,东北低的特征,高值区沿喜马拉雅山分布,与冯冬霞等^[58]的研究结果相似。[图4(b)]反映了青藏高原大气 CH_4 浓度随高度上升而降低的特征,在青藏高原东部和北部下降幅度较大,在西南部下降幅度较小。这可能是因为500 hPa大气 CH_4 浓度主要受局地源汇影响,青藏高原中部湖泊、湿地密布, CH_4 排放量大,所以 CH_4 浓度高;而150 hPa大气 CH_4 浓度主要受大气传输影响,亚洲夏季风将印度地区产生的 CH_4 传输至对流层上层,并在青藏高原西南部汇集形成高值区^[86]。

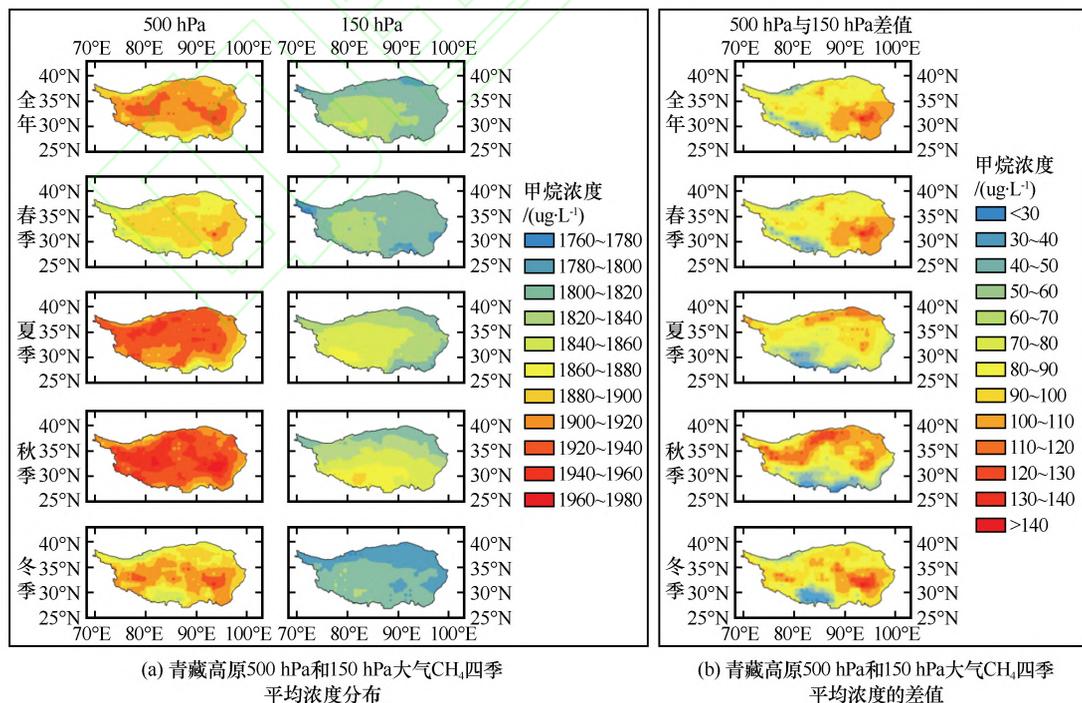


图4 AIRS遥感的青藏高原大气 CH_4 浓度和不同高度差值

Fig. 4 Atmospheric CH_4 seasonal average concentration and D-value of different altitude over the Qinghai Tibet Plateau from AIRS [Distribution of atmospheric CH_4 seasonal average concentration at 500 hPa and 150 hPa over the Qinghai Tibet Plateau (a); D-value of atmospheric CH_4 seasonal average concentration at 500 hPa and 150 hPa over the Qinghai Tibet Plateau (b)]

Zhang 等^[36]、吴晓迪^[99]、Xu 等^[100] 分别利用 SCIAMACHYS 星载传感器、AIRS 星载传感器和 CAM-chem 大气化学模型的数据分析了近年来中国近地表和对流层大气柱平均 CH₄ 浓度的空间分布, 均显示出中国大气 CH₄ 浓度总体呈东高西低的分布特征, CH₄ 浓度高值区主要在华北、华东以及四川盆地等人口密集、工业发达的地区, 青藏高原 CH₄ 浓度最低, 比中东部地区平均低 100 μg·L⁻¹ 左右。不同卫星和模型模拟的结果对青藏高原地区大气 CH₄ 浓度的空间分布和绝对值仍存在较大差异。尽管 AIRS 传感器的数据通过了瓦里关等地面台站的验证, 被证明数据质量很高, 但地面台站的单点验证难以证明大空间区域和垂直方向上数据的可信度。未来, 随着青藏高原地区 CH₄ 空基观测的增加, 将为卫星遥感和模型模拟的数据提供更多的验证途径。

3.3 大气 CH₄ 浓度变化的影响因素

前文已述及青藏高原大气 CH₄ 浓度的时空分布特征, 已有研究认为, 温度、降水、植被类型和东亚季风传输强度是影响青藏高原大气 CH₄ 浓度时空变化的主要因素。前三者通过影响生态系统和大气中的 CH₄ 交换过程, 改变 CH₄ 通量, 进而影响近地面大气 CH₄ 浓度, 后者则通过动力传输作用影响高层大气 CH₄ 浓度。

温度可以直接影响产 CH₄ 菌落的活性, 与湿地、高山草原(草甸)、湖泊的 CH₄ 通量均呈正相关。温度升高造成冰川、冻土的融化形成了众多热喀斯特地貌, 产生了更多的 CH₄ 排放源。Chen 等^[22] 对川西红原县高山草甸的 CH₄ 通量的观测发现气温与 CH₄ 通量显著相关, 气温每升高 1 °C, CH₄ 通量增加约 60.48 μmol·m⁻²·d⁻¹。Cui 等^[101] 对若尔盖湿地的 CH₄ 通量观测也发现温度与 CH₄ 通量密切相关。对青藏高原热融湖塘 CH₄ 通量的研究也都揭示了温度与 CH₄ 通量的强相关性, 因为温度升高会促进溶解性有机碳的分解^[20,46,102]。对于畜牧业, 温度上升可以直接导致牲畜废弃物 CH₄ 排放的增加^[71]。温度虽然不能直接影响牲畜肠道发酵的 CH₄, 但可以通过影响牧草的营养价值导致牲畜排放更多的 CH₄^[103]。据估计, 在牲畜持续摄入牧草时, 温度每增加 1 °C, 甲烷排放就增加 0.9%^[103]。青藏高原大部分地区长冬无夏, 一年中大部分时期土壤和水体处于冻结状态, 限制了 CH₄ 的产出, 所以 CH₄ 的大量排放发生在夏季, 这也解释了青藏高原大气 CH₄ 浓度夏季单峰分布的原因。近年来, 青藏高原的变暖速率约为全

球平均水平的 2 倍^[11], 温度升高与 CH₄ 排放形成了正反馈效应, 造成青藏高原地区 CH₄ 浓度的增速大于周边地区。

降水主要通过增加土壤含水量, 创造缺氧环境为产甲烷菌分解有机碳、加大 CH₄ 通量创造条件, 这一作用主要发生于土壤水分未饱和的高山草甸和高山草原, 因为过高的土壤水分会堵塞 CH₄ 的扩散通道^[104]。青藏高原大部降水集中于夏季, 降水和冰川、冻土的融化都会导致土壤含水量增加, 并形成更多的湿地, 这也是青藏高原大气 CH₄ 浓度在夏季最高的原因。此外, 降水增加也可能通过浸滤和径流的方式增加淡水系统获得的外来有机物的含量, 使水体富营养化, 导致 CH₄ 通量增大^[102]。徐颖怡^[105] 对若尔盖高寒草甸的控雨实验表明, 截雨 50% 极显著增加 59.5% 的 CH₄ 吸收通量。王冬雪等^[106] 在高寒草甸 5 个梯度的田间实验发现土壤含水量在田间持水量的 30%~60% 时, 高寒草甸表现为 CH₄ 的汇, 随着水分增加, 吸收量逐渐减少; 土壤含水量在田间持水量的 60%~90% 时, 高寒草甸表现为 CH₄ 的源, 且随着水分增加, 排放量逐渐增大。

CH₄ 通量与植被类型显著相关^[101]。植被类型影响着土壤和水体中的有机碳含量, CH₄ 通量随植物物种丰富度的增加而显著增加^[107]。对青藏高原不同植被类型的土壤和热融湖塘的 CH₄ 通量研究发现, 高山沼泽草甸的 CH₄ 通量大于高山草甸大于高山草原大于高山荒漠草原^[20,46], 因为植被越丰富的地区土壤、湖水和沉积物中含有越多的有机碳。另有研究发现, 青藏高原的高山草甸和沼泽草甸退化程度越大, CH₄ 的吸收量越高^[18,108], 高山草甸的裸地对 CH₄ 的吸收量显著大于高植被覆盖地^[49]。青藏高原 CH₄ 高值区出现在东部可能与青藏高原东西部植被类型不同有关。青藏高原东部地区分布着大面积的森林、湿地和高山草甸, NPP 较高, 而西部地区则以干草原和高寒荒漠为主, NPP 较低^[11]。

在近地面, CH₄ 浓度的变化主要受局地源汇通量的影响, 但在大气边界层以上, 则主要受大气传输作用的影响。青藏高原受到季风和西风的交替影响, 而季风产生了明显的 CH₄ 的传输。2003—2014 年 AIRS 传感器的 CH₄ 反演数据分析发现^[93,109], 在 4 月初季风开始影响青藏高原, 对流层中高层 CH₄ 浓度开始增加; 6 月高原南部、东南部地区大气低层的 CH₄ 向高原输送, 配合高原南部宽广的低压带, 对流层中高层 CH₄ 浓度开始明显增加。对

流层高层的光化学作用大大低于地表,因此 CH_4 高值能在对流层中高层维持约1个月,其最大值出现在8月底至9月初,比季风指数、水汽、云高和云量峰值推后半个月至一个月。亚洲夏季风的强动态运输将来自印度、东南亚和中国南部的边界层 CH_4 提升到对流层上层,高原反气旋对高空 CH_4 产生包围汇集,这是青藏高原西南部大气 CH_4 局部最大值形成的两个重要因素。

4 总结与展望

随着全球变暖的加剧,青藏高原暖湿趋势日趋明显,厘清其大气 CH_4 的源汇特征以及变化机理对预测其未来变化,准确预估碳排放空间具有重要意义。本文在简述大气 CH_4 的观测方法、源汇及其浓度的时空分布特征和主要影响因素的基础上,指出青藏高原缺乏长期连续大气 CH_4 观测,地面台站密度较低,空基观测更是近乎空白;青藏高原 CH_4 主要的源有湿地、湖泊和畜牧,主要的汇为高山草原和高山草甸。由于观测数据的稀缺、多年冻土碳储量的不确定和SOC分解释放 CH_4 内在机制的不甚了解,青藏高原整体是 CH_4 的源还是汇仍有争议;卫星遥感与模型模拟得出青藏高原大气 CH_4 浓度冬春低、夏秋高的季节变化特征,年均增长率 $5\sim 8\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,显著高于周边地区的年际变化特征,和低层浓度中间高、南北低,高层浓度西南高、东北低的空间分布特征;温度、降水、植被类型和东亚季风是影响青藏高原大气 CH_4 浓度的主要因素,这些因素的变化能很好地解释青藏高原大气 CH_4 浓度的时空分布特征。

为了进一步认识青藏高原 CH_4 的收支,需要增加青藏高原不同生态系统下大气 CH_4 浓度的垂直探空观测和地面 CH_4 通量和浓度的观测,一方面可以对卫星遥感和模型模拟的数据精度进行多方位验证,另一方面可以对计算SOC储量,准确估计青藏高原 CH_4 收支提供数据。多年冻土碳排放是估算青藏高原 CH_4 收支的难点,未来应加强冻土消融与大气 CH_4 浓度变化过程和内在机制的动态系统研究,量化热融湖塘和热融滑塌等地形的范围和 CH_4 释放,完善耦合地球系统模型,提升青藏高原不同类型的生态系统中 CH_4 地气交换过程及其对气候变化影响的模拟和预估能力。随着卫星遥感技术的不断发展,未来除了基于地表观测自下而上计算 CH_4 收支,还应通过卫星发现 CH_4 的点源,填补地面观测

的空白之处,发展自上而下的 CH_4 收支计算方法,为准确估算未来碳排放空间从而实现全球温控目标提供科学支撑。

参考文献(References):

- [1] Myhre G, Shindell D, Bréon F M, et al. Anthropogenic and natural radiative forcing[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 731-738.
- [2] Chen Ao, Huang Haizhou, Zhang Zhinan, et al. Livestock grazing ingestion suppressed the dominant species population (*Stipa aliena*) germination: a laboratory experiment[J]. Nordic Journal of Botany, 2012, 30(5): 635-639.
- [3] IPCC. Climate change 2021: the Physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021, In Press.
- [4] IPCC. Special report: global warming of 1.5 °C[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [5] Kuang Xingxing, Jiao J J. Review on climate change on the Tibetan Plateau during the last half century[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(8): 3979-4007.
- [6] Yao Tandong, Xu Baiqing, Duan Keqin, et al. Temperature and methane records over the last 2 ka in Dasuopu ice core on the Tibet Plateau[J]. Science In China (Series D: Earth Sciences), 2002(4): 346-352. [姚檀栋, 徐柏青, 段克勤, 等. 青藏高原达索普冰芯2 ka来温度与甲烷浓度变化记录[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2002(4): 346-352.]
- [7] Dong Xingfeng, Chen Qiang, Li Hao, et al. Effects of climate change on permafrost greenhouse gas flux in alpine region of China[J]. Soils and Crops, 2019, 8(2): 178-185. [董星丰, 陈强, 李浩, 等. 全球气候变化对我国高寒地区冻土温室气体通量的影响[J]. 土壤与作物, 2019, 8(2): 178-185.]
- [8] Jia Lin, Fan Chengyan, Mu Mei, et al. Studies of thermokarst and its effects on ecosystem carbon cycle in the Third Polar regions and the Arctic[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 157-169. [贾麟, 范成彦, 母梅, 等. 从第三极到北极: 热喀斯特及其对碳循环影响研究进展[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 157-169.]
- [9] Zhang Shaohui, Xie Bing, Zhang Hua, et al. The spatial-temporal distribution of CH_4 over globe and East Asia[J]. China Environmental Science, 2018, 38(12): 4401-4408. [张绍会, 谢冰, 张华, 等. 全球和东亚地区 CH_4 浓度时空分布特征分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4401-4408.]
- [10] Mu Cuicui, Abbott B W, Norris A J, et al. The status and stability of permafrost carbon on the Tibetan Plateau[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 211: 103433.
- [11] Chen Huai, Zhu Qian, Peng Changhui, et al. The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Global Change Biology, 2013, 19(10): 2940-2955.
- [12] Xie Heng, Long Li, Mu Xiaohui, et al. Comparison of floating static chamber and boundary layer equation for measuring CO_2 and CH_4 emission from urban river[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2019, 41(5): 79-83. [谢恒, 龙丽, 穆晓辉, 等. 城市水体 CO_2 和 CH_4 通量监测的静态箱法与薄边界层模型估算法比较[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 79-83.]
- [13] Wang Weiqi, Lei Bo, Li Pengfei, et al. Application of static chamber method on methane emission and strategy of methane reduction in paddy field[J]. Experimental Technology and Management, 2011, 28(7): 53-56, 78. [王维奇, 雷波, 李鹏飞, 等. 静态箱法在甲烷排放及稻田甲烷减排策略研究中的

- 应用[J]. 实验技术与管理, 2011, 28(7): 53-56, 78.]
- [14] Zhang Mengshan, Guo Haiqiang, Ma Jun, et al. Effects of precipitation and fertilization on N₂O discharge from wheat field in Chongming Island, Shanghai estimated by eddy covariance technology[J]. Soils, 2019, 51(5): 929-941. [张梦珊, 郭海强, 马俊, 等. 降雨和施肥对上海崇明岛小麦田 N₂O 排放的影响——基于涡度协方差法的研究[J]. 土壤, 2019, 51(5): 929-941.]
- [15] Lin Qing, Jin Huijun, Cheng Guodong, et al. CH₄ and CO₂ emission from permafrost surface in Wudaoliang in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(4): 325-330. [林清, 金会军, 程国栋, 李宁. 青藏高原五道梁冻土活动层表面二氧化碳和甲烷的排放[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 325-330.]
- [16] Cao Guangmin, Xu Xingliang, Long Ruijun, et al. Methane emissions by alpine plant communities in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Biology Letters, 2008, 4(6): 681-684.
- [17] Wei Da, Xu Ri, Wang Yinghong, et al. CH₄, N₂O and CO₂ fluxes and correlation with environmental factors of alpine steppe grassland in nam co region of Tibetan Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(3): 412-419. [魏达, 旭日, 王迎红, 等. 青藏高原纳木错高寒草原温室气体通量及与环境因子关系研究[J]. 草地学报, 2011, 19(3): 412-419.]
- [18] Guo Xiaowei, Dai Licong, Li Qian, et al. Study on flux of main greenhouse gases and its affecting factors of grazing alpine meadow under different degradation levels on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Grassland and Turf, 2019, 39(3): 72-78. [郭小伟, 戴黎聪, 李茜, 等. 青藏高原放牧高寒草甸主要温室气体通量及其主控因素研究[J]. 草原与草坪, 2019, 39(3): 72-78.]
- [19] Zhang Shunyao, Yang Fan, Zhang Fugui, et al. Research on the methane emission and carbon isotope of permafrost wetland in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geoscience, 2018, 32(5): 1089-1096. [张舜尧, 杨帆, 张富贵, 等. 青藏高原冻土区湿地甲烷排放及同位素特征研究[J]. 现代地质, 2018, 32(5): 1089-1096.]
- [20] Wang Lei, Du Zhiheng, Wei Zhiqiang, et al. High methane emissions from thermokarst lakes on the Tibetan Plateau are largely attributed to ebullition fluxes[J]. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149692.
- [21] Song Weimin, Wang Hao, Wang Guangshuai, et al. Methane emissions from an alpine wetland on the Tibetan Plateau: neglected but vital contribution of the nongrowing season[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(8): 1475-1490.
- [22] Chen Weinan, Zhang Fangyue, Wang Bingxue, et al. Diel and seasonal dynamics of ecosystem-scale methane flux and their determinants in an alpine meadow[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2019, 124(6): 1731-1745.
- [23] Peng Haijun, Chi Jinshu, Yao Hu, et al. Methane emissions offset net carbon dioxide uptake from an alpine peatland on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(19): e2021JD034671.
- [24] Liu Lixin, Zhou Lingxi, Wen Min, et al. Characteristics of atmospheric CH₄ concentration variations at four national baseline observatories in China[J]. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(5): 285-290. [刘立新, 周凌晞, 温民, 等. 中国4个国家级野外站大气 CH₄ 本底浓度变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(5): 285-290.]
- [25] Yang Qian. The ground-based and satellite-based validation and application of AIRS-AMSU CH₄ products[D]. Nanjing University of Information Science & Technology, 2018. [杨倩. AIRS-AMSU 甲烷反演产品的地基和空基检验及其应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.]
- [26] Liao Qianyi, Chen Jianwen, Du Li. Analysis of CH₄ background concentration characteristics of the alpine forest zone in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(2): 68-75. [廖乾邑, 陈建文, 杜丽. 青藏高原典型高寒森林地带 CH₄ 浓度特征分析[J]. 中国环境监测, 2021, 37(2): 68-75.]
- [27] Liu Wenqing, Xie Pinhua, Hu Zhaokun, et al. High-sensitivity spectroscopic techniques for atmospheric environment monitoring[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2019, 11(5): 1-7. [刘文清, 谢品华, 胡肇焜, 等. 大气环境高灵敏光谱探测技术[J]. 环境监控与预警, 2019, 11(5): 1-7.]
- [28] Tadić J M, Loewenstein M, Frankenberg C, et al. A comparison of *in situ* aircraft measurements of carbon dioxide and methane to GOSAT data measured over railroad valley playa, Nevada, USA[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(12): 7764-7774.
- [29] Schuck T J, Ishijima K, Patra P K, et al. Distribution of methane in the tropical upper troposphere measured by CARIBIC and CONTRAIL aircraft[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D19): D19304.
- [30] Beck V, Chen Huilin, Gerbig C, et al. Methane airborne measurements and comparison to global models during BARCA[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D15): D15310.
- [31] Wang Mulin, Wen Yupu, Cheng Hongbing. A study of the background characters of ch₄ concentration in troposphere over the continent of China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1993, 51(4): 485-489. [王木林, 温玉璞, 程红兵. 中国大陆对流层大气中甲烷(CH₄)浓度的背景特征研究[J]. 气象学报, 1993, 51(4): 485-489.]
- [32] Yuan Feng, Gao Jing, Yao Lu, et al. Development of highly sensitive balloon-borne methane measurement system based on cavity ringdown spectroscopy[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(9): 1881-1892. [袁峰, 高晶, 姚路, 等. 球载 CRDS 高灵敏度甲烷测量系统的研制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 1881-1892.]
- [33] Crosson E R. A cavity ring-down analyzer for measuring atmospheric levels of methane, carbon dioxide, and water vapor[J]. Applied Physics B, 2008, 92(3): 403-408.
- [34] Liu Yi, Wang Jing, Che Ke, et al. Satellite remote sensing of greenhouse gases: progress and trends[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 53-64. [刘毅, 王婧, 车轲, 等. 温室气体的卫星遥感——进展与趋势[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 53-64.]
- [35] Zhang Dingyuan, Liao Hong. Advances in the research on sources and sinks of CH₄ and observations and simulations of CH₄ concentrations[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2015, 5(1): 40-47. [张定媛, 廖宏. 大气甲烷的源和汇及其浓度的观测模拟研究进展[J]. 气象科技进展, 2015, 5(1): 40-47.]
- [36] Zhang Xiuying, Jiang Hong, Wang Yueqi, et al. Spatial variations of atmospheric methane concentrations in China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(3): 833-847.
- [37] Zhang Xiaomin, Zhang Xiuying, Zhang Linjing, et al. Accuracy comparison of monthly AIRS, GOSAT and SCIAMACHY data in monitoring atmospheric CH₄ concentration[C]//2013 21st International Conference on Geoinformatics. Kaifeng, China. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 1-4.

- [38] Zhang Linjing, Wei Chong, Liu Hui, et al. Comparison analysis of global methane concentration derived from SCIAMACHY, AIRS, and GOSAT with surface station measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(5): 1823-1840.
- [39] Zhang Xingying, Bai Wenguang, Zhang Peng, et al. Spatio-temporal variations in mid-upper tropospheric methane over China from satellite observations [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(33): 2804-2811. [张兴赢, 白文广, 张鹏, 等. 卫星遥感中国对流层中高层大气甲烷的时空分布特征[J]. *科学通报*, 2011, 56(33): 2804-2811.]
- [40] Huang Mantang. Estimation and numerical study of atmospheric methane in China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019. [黄满堂. 中国地区大气甲烷排放估计与数值模拟研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.]
- [41] Xiong Xiaozhen, Barnet C, Maddy E, et al. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, 113(G3): G00A01.
- [42] Chen Huai, Liu Xinwei, Xue Dan, et al. Methane emissions during different freezing-thawing periods from a Fen on the Qinghai-Tibetan Plateau: four years of measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 297: 108279.
- [43] Kato T, Hirota M, Tang Yanhong, et al. Spatial variability of CH₄ and N₂O fluxes in alpine ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(31): 5632-5639.
- [44] Jin Huijun, Wu Jie, Cheng Guodong, et al. Methane emissions from wetlands on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(24): 2282-2286.
- [45] Yan Fangping, Sillanpää M, Kang Shichang, et al. Lakes on the Tibetan Plateau as conduits of greenhouse gases to the atmosphere [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(7): 2091-2103.
- [46] Zhu Dan, Wu Yan, Chen Huai, et al. Intense methane ebullition from open water area of a shallow peatland lake on the eastern Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 542: 57-64.
- [47] Jia Lin. Variations and influencing factors of CH₄ and CO₂ emissions from thermokarst lakes on the Qinghai-Tibet Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. [贾麟. 青藏高原热融湖塘 CH₄ 和 CO₂ 释放速率及影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.]
- [48] Lin Xingwu, Wang Shiping, Ma Xiuzhi, et al. Fluxes of CO₂, CH₄, and N₂O in an alpine meadow affected by yak excreta on the Qinghai-Tibetan Plateau during summer grazing periods [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(4): 718-725.
- [49] Li Yang, Wang Genxu, Rui Pengfei, et al. Effects of bare patches on ecosystem respiration and methane uptake of alpine meadow in a permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Mountain Research*, 2020, 38(2): 190-200. [李阳, 王根绪, 芮鹏飞, 等. 裸斑对青藏高原多年冻土区高寒草甸生态系统呼吸和甲烷吸收的影响[J]. *山地学报*, 2020, 38(2): 190-200.]
- [50] Jin Zhenong, Zhuang Qianlai, He Jinsheng, et al. Net exchanges of methane and carbon dioxide on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1979 to 2100 [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(8): 085007.
- [51] Zhang Xian, Zhu Qiu'an, Yang Bin, et al. Evaluating patterns of wetland methane emissions in Qinghai-Tibet Plateau based on process model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 3060-3071. [张贤, 朱求安, 杨斌, 等. 基于过程模型的青藏高原湿地甲烷排放格局评估[J]. *生态学报*, 2020, 40(9): 3060-3071.]
- [52] Chen Huai, Zhu Qiu'an, Peng Changhui, et al. Methane emissions from rice paddies natural wetlands, lakes in China: synthesis new estimate [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 19-32.
- [53] Yang Hong, Xie Ping, Ni Leyi, et al. Underestimation of CH₄ emission from freshwater lakes in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(10): 4203-4204.
- [54] Zhang Guoqing, Xie Hongjie, Kang Shichang, et al. Monitoring Lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003—2009) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(7): 1733-1742.
- [55] Ma Xiangxian, Zheng Guodong, Liang Shouyun, et al. Contributions of geologic methane to atmospheric methane sources and sinks [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2012, 31(2): 139-145, 183. [马向贤, 郑国东, 梁收运, 等. 地质甲烷对大气甲烷源与汇的贡献[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(2): 139-145, 183.]
- [56] Shuai Y, Zhang S, Ma D, et al. Quaternary biogenic gases in the Qaidam Basin, Western China [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2015, 63(1): 75-83.
- [57] Li Hongjun, Tang Junhong. Research progress of atmospheric methane emission sources [J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University*, 2014, 34(2): 52-55. [李红军, 唐俊红. 大气甲烷排放源研究进展[J]. *杭州电子科技大学学报*, 2014, 34(2): 52-55.]
- [58] Feng Dongxia, Gao Xiaoqing, Zhou Ya, et al. Characteristics of spatial-temporal variation of atmospheric methane over the Tibetan Plateau [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2017, 22(3): 346-354. [冯冬霞, 高晓清, 周亚, 等. 青藏高原大气甲烷浓度时空分布变化特征[J]. *气候与环境研究*, 2017, 22(3): 346-354.]
- [59] Pangala S R, Moore S, Hornibrook E R C, et al. Trees are major conduits for methane egress from tropical forested wetlands [J]. *New Phytologist*, 2013, 197(2): 524-531.
- [60] Mukhin V A, Voronin P Y. Methanogenic activity of woody plants [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2009, 56(1): 138-140.
- [61] Keppeler F, Hamilton J T G, Braß M, et al. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions [J]. *Nature*, 2006, 439(7073): 187-191.
- [62] Mcleod A R, Fry S C, Loake G J, et al. Ultraviolet radiation drives methane emissions from terrestrial plant pectins [J]. *New Phytologist*, 2008, 180(1): 124-132.
- [63] Wang Shiping, Yang Xiaoxia, Lin Xingwu, et al. Methane emission by plant communities in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau: a new experimental study of alpine meadows and oat pasture [J]. *Biology Letters*, 2009, 5(4): 535-538.
- [64] Piao Shilong, Zhang Xianzhou, Wang Tao et al. Responses and feedback of the Tibetan Plateau's alpine ecosystem to climate change [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2842-2855. [朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 等. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2842-2855.]
- [65] Wang Taihua, Yang Dawen, Yang Yuting, et al. Permafrost thawing puts the frozen carbon at risk over the Tibetan Plateau [J]. *Science Advances*, 2020, 6(19): eaaz3513.
- [66] Piao Shilong, Fang Jingyun. Terrestrial net primary production

- and its spatio-temporal patterns in Qinghai-Xizang Plateau, China during 1982—1999 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 373-380. [朴世龙, 方精云. 1982—1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 373-380.]
- [67] Chen Xu. Distribution and regional changes of thermokarst lakes on the Qinghai-Tibet Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. [陈旭. 青藏高原热融湖塘分布及其区域变化特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.]
- [68] Mu Cuicui, Li Lili, Wu Xiaodong, et al. Greenhouse gas released from the deep permafrost in the northern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4205.
- [69] Zhang Qiwen, Yang Guibiao, Song Yutong, et al. Magnitude and drivers of potential methane oxidation and production across the Tibetan alpine permafrost region [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(24): 14243-14252.
- [70] Mao Nan. Characteristics and microbial mechanism of methane emission from grassland in permafrost regions of Qilian mountains [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021. [毛楠. 祁连山多年冻土区草地甲烷排放特征及其微生物机制[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.]
- [71] Reay D S, Smith P, Christensen T R, et al. Methane and global environmental change [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2018, 43: 165-192.
- [72] Tapio I, Snelling T J, Strozzio F, et al. The ruminal microbiome associated with methane emissions from ruminant livestock [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2017, 8: 7.
- [73] Du Mingyuan, Kawashima S, Yonemora S, et al. Mutual influence between human activities and climate change in the Tibetan Plateau during recent years [J]. *Global and Planetary Change*, 2004, 41: 241-249.
- [74] Yu Jiashuo, Peng Shushi, Chang Jinfeng, et al. Inventory of methane emissions from livestock in China from 1980 to 2013 [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 184: 69-76.
- [75] Xu Tianwei, Zhao Na, Hu Linyong, et al. Characterizing CH₄, CO₂ and N₂O emission from barn feeding Tibetan sheep in Tibetan alpine pastoral area in cold season [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 157: 84-90.
- [76] Wei Da, Xu Ri, Wang Yinghong, et al. Responses of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes to livestock enclosure in an alpine steppe on the Tibetan Plateau, China [J]. *Plant and Soil*, 2012, 359(1/2): 45-55.
- [77] Hafner S, Unteregelsbacher S, Seiber E, et al. Effect of grazing on carbon stocks and assimilate partitioning in a Tibetan montane pasture revealed by ¹³C₂ pulse labeling [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(2): 528-538.
- [78] Schwietzke S, Sherwood O A, Bruhwiler L M P, et al. Upward revision of global fossil fuel methane emissions based on isotope database [J]. *Nature*, 2016, 538(7623): 88-91.
- [79] Li Guoxin, Shi Yajun, Zhang Yongshu, et al. New progress and enlightenment of oil and gas exploration and geological understanding in Qaidam Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(6): 1-18. [李国欣, 石亚军, 张永庶, 等. 柴达木盆地油气勘探、地质认识新进展及重要启示[J]. *岩性油气藏*, 2022, 34(6): 1-18.]
- [80] Zhou J, Horsley D, Rothwell B. Application of strain-based design for pipelines in permafrost areas [C]//Proceedings of 2006 International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada. 2008: 899-907.
- [81] Setiadi T, Husaini, Djajadiningrat A. Palm oil mill effluent treatment by anaerobic baffled reactors: Recycle effects and biokinetic parameters [J]. *Water Science and Technology*, 1996, 34(11): 59-66.
- [82] Zhang Xiangfeng, Xiao Xuezhi, He Yi, et al. CH₄ emission and its reduction from MSW landfill [J]. *China Biogas*, 2006, 24(1): 3-5, 14. [张相锋, 肖学智, 何毅, 等. 垃圾填埋场的甲烷释放及其减排[J]. *中国沼气*, 2006, 24(1): 3-5, 14.]
- [83] Xu Hui. Study on environmental risk assessment system of municipal solid waste landfill in Qinghai-Tibet Plateau [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. [徐慧. 青藏高原生活垃圾填埋场环境风险评估体系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.]
- [84] Su Mingfeng, Lin Yunping, Fan Xinqiang. Impacts of global emissions of CO, NO_x and CH₄ on China tropospheric hydroxyl free radicals [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(4): 838-854.
- [85] Liu Chuanxi, Wang Haiping, Liu Yi. Evolutionary characteristics of polar stratospheric methane and water vapor during the explosive Northern Hemisphere warming in the winter of 2003—2004 [J]. *Basic Information*, 2009, 19(4): 425-433. [刘传熙, 王海平, 刘毅. 2003—2004 年冬季北半球爆发性增温期间极地平流层甲烷、水汽的演变特征[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(4): 425-433.]
- [86] Xiong X, Houweling S, Wei J, et al. Methane plume over south Asia during the monsoon season: satellite observation and model simulation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(3): 783-794.
- [87] Wang Chenrui, Huang Guohong, Liang Zhanbei, et al. Advances in the research on sources and sinks of CH₄ and CH₄ oxidation (uptake) in soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1707-1712. [王琛瑞, 黄国宏, 梁战备, 吴杰, 徐国强, 岳进, 史奕. 大气甲烷的源和汇与土壤氧化(吸收)甲烷研究进展[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1707-1712.]
- [88] Wang Yanfen, Chen Huai, Zhu Qian, et al. Soil methane uptake by grasslands and forests in China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 74: 70-81.
- [89] Yun Hanbo, Wu Qingbai, Zhuang Qianlai, et al. Consumption of atmospheric methane by the Qinghai-Tibet Plateau alpine steppe ecosystem [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(9): 2803-2819.
- [90] Fang Shuangxi, Zhou Lingxi, Xu Lin, et al. CH₄ concentrations and the variation characteristics at the four WMO/GAW background stations in China [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9): 2917-2923. [方双喜, 周凌曦, 许林, 等. 我国 4 个 WMO/GAW 本底站大气 CH₄ 浓度及变化特征[J]. *环境科学*, 2012, 33(9): 2917-2923.]
- [91] Yang Qian, Guan Li, Tao Fa, et al. Changes of CH₄ concentrations obtained by ground-based observations at five atmospheric background stations in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(6): 1-7. [杨倩, 官莉, 陶法, 等. 中国 5 个大气本底站观测的 CH₄ 浓度变化规律[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(6): 1-7.]
- [92] Fang Shuangxi, Li Zou, Zhou Lingxi, et al. Variation of CH₄ concentrations at Yunnan Xianggelila background station in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(10): 2568-2574. [方双喜, 李邹, 周凌曦, 等. 云南香格里拉本底站大气 CH₄ 体积分数及变化特征[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(10): 2568-2574.]
- [93] Zhou Jie, Guan Li. Characteristics of spatial and temporal distributions of methane over the Tibetan Plateau and mechanism

- analysis for high methane concentration in summer[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2017, 22(3): 315-321. [周杰, 官莉. 青藏高原上空甲烷的时空分布特征及其夏季高值形成机制分析[J]. *气候与环境研究*, 2017, 22(3): 315-321.]
- [94] Rupakheti D, Kang Shichang, Rupakheti M, et al. Long-term trends in the total columns of ozone and its precursor gases derived from satellite measurements during 2004—2015 over three different regions in South Asia: Indo-Gangetic Plain, Himalayas and Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(21): 7384-7404.
- [95] Fang Shuangxi, Zhou Lingxi, Masarie K A, et al. Study of atmospheric CH₄ mole fractions at three WMO/GAW stations in China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(10): 4874-4886.
- [96] Guo Minrui, Fang Shuangxi, Liu Shuo, et al. Comparison of atmospheric CO₂, CH₄, and CO at two stations in the Tibetan Plateau of China[J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(5): e2019EA001051.
- [97] Wu Xiaodi, Zhang Xiuying, Chuai Xiaowei, et al. Long-term trends of atmospheric CH₄ concentration across China from 2002 to 2016[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 538.
- [98] Feng Dongxia, Gao Xiaoqing, Yang Liwei, et al. Analysis of long-term (2003—2015) spatial-temporal distribution of atmospheric methane in the troposphere over the Qinghai-Xizang Plateau based on AIRS data[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 137(1/2): 1247-1255.
- [99] Wu Xiaodi. Estimation of ground-level CH₄ concentrations over China based on satellite retrievals[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020. [吴晓迪. 中国近地表CH₄浓度的遥感估算研究[D]. 南京: 南京大学, 2020.]
- [100] Xu Jianhui, Liu Qingfang, Wang Kai, et al. Spatiotemporal variation in near-surface CH₄ concentrations in China over the last two decades[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(34): 47239-47250.
- [101] Cui Mengmeng, Ma Anzhou, Qi Hongyan, et al. Warmer temperature accelerates methane emissions from the Zoige wetland on the Tibetan Plateau without changing methanogenic community composition[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11616.
- [102] Williamson C E, Saros J E, Vincent W F, et al. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change[J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6part2): 2273-2282.
- [103] Lee M, Davis A, Chagunda M, et al. Forage quality declines with rising temperatures, with implications for livestock production and methane emissions[J]. *Biogeosciences*, 2016, 14: 1403-1417.
- [104] Li Xinxing. Emissions of CH₄ and its microbial mechanism in the permafrost regions of the upper Heihe River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2020. [李新星. 黑河上游多年冻土区CH₄释放特征及其微生物机制研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.]
- [105] Xu Yingyi. The effect of climate change on greenhouse gas emissions in an alpine meadow on the zoige plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017. [徐颖怡. 气候变化对若尔盖高原高寒草甸温室气体排放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.]
- [106] Wang Dongxue, Gao Yongheng, An Xiaojuan, et al. Responses of greenhouse gas emissions to water table fluctuations in an alpine wetland on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(8): 27-35. [王冬雪, 高永恒, 安小娟, 等. 青藏高原高寒湿地温室气体释放对水位变化的响应[J]. *草业学报*, 2016, 25(8): 27-35.]
- [107] Zhang Chongbang, Sun Hongying, Ge Ying, et al. Plant species richness enhanced the methane emission in experimental microcosms[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 62: 180-183.
- [108] Wang Junfeng, Wang Genxu, Hu Hongchang, et al. The influence of degradation of the swamp and alpine meadows on CH₄ and CO₂ fluxes on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(3): 537-548.
- [109] Xiong Xiaozhen, Zhang Ying, Chen Liangfu, et al. Variation of methane, water vapor and clouds over Tibetan Plateau under the impact of Asian summer monsoon[J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2011, 26(5): 480-485. [熊效振, 张莹, 陈良富, 等. 季风影响下的青藏高原上空甲烷、水汽及云的变化[J]. *成都信息工程学院学报*, 2011, 26(5): 480-485.]

The source and sink of atmospheric methane and spatial-temporal variation of its concentration on the Qinghai-Tibet Plateau

WANG Yifan^{1,2}, GAO Jing², HU Mai³, YAO Tandong², NIU Xiaowei²,
ZHAO Aibin², SHEN Ziheng^{1,2}

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China)

Abstract: Methane (CH₄) is regarded as the second most important greenhouse gas after carbon dioxide (CO₂). Under the warming and wetting of the climate, the Qinghai-Tibet Plateau may become a potential carbon source. To achieve the 1.5 °C and 2 °C temperature control targets of the Paris Agreement, it is necessary to accurately estimate the remaining carbon emission space in the future. Therefore, an accurate understanding of the source and sink functions, spatial-temporal changes and mechanisms of atmospheric CH₄ in the Qinghai Tibet-Plateau is of great practical significance to predict and cope with warming and help the government make scientific decisions on energy conservation and emission reduction. This paper summarizes the existing research progress from the following three aspects: observation method of atmospheric methane, source and sink of methane, and the spatial-temporal variation of the atmospheric CH₄. The results show that the observations of atmospheric CH₄ on the Qinghai-Tibet Plateau are mainly ground-based observations and satellite remote sensing, lacking space-based observations, and AIRS has the best data quality among satellite products; Methane of the Qinghai-Tibet Plateau is mainly from natural sources, the main sources are wetlands, lakes and animal livestock, geological activities, vegetation and permafrost are the uncertain CH₄ sources. The sink of CH₄ is mainly tropospheric hydroxyl radical and alpine meadow; The seasonal distribution of CH₄ on the Qinghai-Tibet Plateau has a single-peak in summer, which is synchronized with the seasonal pattern of the Asian summer monsoon; The average rising rate of CH₄ concentration on the Qinghai-Tibet Plateau is about 5~8 μg·L⁻¹·a⁻¹, which is greater than that in the surrounding areas; The high value of CH₄ concentration near the surface of Qinghai-Tibet Plateau appears in the middle part, and decreases gradually from the ground to the tropopause, but the decrease in the east and north of the plateau is greater than that in the southwest. In the future, three dimensional continuous observation of atmospheric CH₄ should be strengthened, satellite inversion algorithm and source sink analytical model should also be improved. In addition, we need to accurately quantify the spatial-temporal change process of atmospheric CH₄ in the Qinghai-Tibet Plateau and reveal its change mechanism to provide a scientific basis for the future efficient emission reduction policies.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; spatial-temporal variation of CH₄; source and sink of CH₄; atmospheric CH₄ influencing factors