

中国甲烷浓度季节性变化与水稻种植关系研究

吴星沂¹, 金建炳¹, 夏霁¹, 方力¹, 廖宏¹

1 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 气候系统预测与变化应对全国重点实验室, 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044

摘要 甲烷是一种重要的温室气体, 水稻种植是甲烷排放的主要人为源之一。传统地面观测手段受限于空间覆盖率和时间连续性, 难以有效捕捉农业活动的动态变化过程, 来自卫星的观测为精准解析甲烷浓度时空演变提供了全新视角。对流层观测仪 (TROPOMI) 作为搭载于 Sentinel-5P 卫星上的新型传感器, 具备 5.5 km×7 km 的高空间分辨率和近实时观测能力。本研究创新性地结合 STL 时间序列分解, 通过季节变化特征和 K-means 聚类方法, 全面分析了 2018 年至 2022 年中国区域的甲烷浓度时空变化特征, 将中国区域甲烷浓度的季节性变化归纳为四类模态, 并深入探讨了这些模态与水稻种植 (种植密度、种植模式) 之间的相互联系。研究表明, 中国甲烷浓度空间分布与水稻主产区契合度较高, 总体呈现东南沿海向西北内陆递减的梯度特征, 在 2018-2022 年间甲烷浓度逐年上升, 且大部分省份的甲烷四年平均增幅在 0.6% 以上。此外, 首次揭示了四种主要的季节性模态 (单峰型、双峰型、三峰型和多峰型) 与不同地区的水稻种植密度、种植模式之间的关系, 反映出地区的水稻种植是甲烷季节变化特征的决定性因素。

关键词 甲烷 季节性模态 水稻种植 TROPOMI K-means

文章编号 中图分类号 文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2504.24111

Seasonal variation of methane concentration in relation to rice cultivation in China

WU Xingyi¹, JIN Jianbing¹, XIA Ji¹, FANG Li¹, LIAO Hong¹

收稿日期 2024-10-19; 网络预出版日期

作者简介 吴星沂, 女, 2001 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气成分卫星遥感观测与反演研究, E-mail: xing_yi_wu@163.com

通讯作者 金建炳, E-mail: jianbing.jin@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金面上项目 42475150, 江苏省自然科学基金项目 BK20220031

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42475150), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant BK20220031)

1 School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Tech Key Laboratory of Jiangsu Province atmospheric environmental monitoring and pollution control, Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAET), Nanjing 210044

Abstract Methane is an important greenhouse gas, and rice cultivation is one of the major anthropogenic sources of methane emissions. Traditional ground-based observation means are limited by spatial coverage and temporal continuity, making it difficult to effectively capture the dynamic process of agricultural activities, and observations from satellites provide a new perspective for precisely analyzing the temporal and spatial evolution of methane concentration. The Tropospheric Observatory Projector (TROPOMI), as a new type of sensor mounted on the Sentinel-5P satellite, has a high spatial resolution of $5.5\text{ km}\times 7\text{ km}$ and a near real-time observation capability. In this study, we innovatively combined STL time series decomposition with seasonal variation characteristics and K-means clustering method to comprehensively analyze the characteristics of spatial and temporal variations of methane concentration in the Chinese region from 2018 to 2022, and categorized the seasonal variations of methane concentration in the Chinese region into four types of modes, and explored in depth the interconnections between these modes and rice cultivation (planting density and planting pattern). The study shows that the spatial distribution of methane concentration in China fits well with the main rice production areas, and generally exhibits a gradient characteristic of decreasing from the southeast coast to the northwest inland, with methane concentration increasing year by year during 2018-2022, and the four-year average increase of methane in most of the provinces is above 0.6%. In addition, the relationship between the four main seasonal modes (single-peak, double-peak, triple-peak and multi-peak) and the rice planting density and planting pattern in different regions was revealed for the first time, reflecting that regional rice planting is a determining factor for the seasonal variation characteristics of methane.

Key Words Methane, Seasonal modes, Rice Cultivation, TROPOMI, K-means

1 引言

自工业革命以来,全球气候变暖现象不断加剧 (Feng et al., 2021)。在过去一个世纪中,人类活动导致的温室气体排放量持续增加 (秦大河, 2014),使全球平均温度较工业化前升高 1.1°C (IPCC, 2021)。甲烷 (CH_4) 作为全球第二大温室气体,其全球变暖潜在在 100 年时间尺度上可达到二氧化

餐 (CO₂) 的 28 倍, 在 20 年时间尺度上可达到 CO₂ 的 84 倍 (IPCC, 2021), 对气候变化的贡献不容忽视。根据 2023 年国际能源署发布的《全球甲烷追踪报告》, 全球每年的甲烷排放量约为 580 Mt, 其中超过 60% 来自人为排放 (IEA, 2023), 主要包括农业和能源部门, 如煤炭、石油、天然气和生物燃料。尽管甲烷在大气中的含量远低于二氧化碳 (CO₂), 却能够高效地吸收红外辐射。甲烷减排的紧迫性源于其短寿命特性, 相较于长寿命气体 CO₂, 甲烷在大气中的停留时间仅为 7-12 年, 使得甲烷减排在短期内可以更加有效地减缓气候变暖 (IPCC, 2021)。

卫星遥感是全球甲烷监测的关键手段, 现已成为大气甲烷浓度连续性观测的最有效方式之一。通过分析大气中甲烷的吸收光谱, 卫星遥测能够精确测量甲烷的浓度和分布, 相较于传统的地面和航空监测, 覆盖了更广阔的区域, 可以提供全球区域长期、稳定、广域的三维大气甲烷浓度监测信息。自 2002 年 Envisat-1 卫星搭载 SCIAMACHY 首次实现太空甲烷测量以来 (Frankenberg et al., 2006), TES (2004-2011)、IASI (2007-) 和 GOSAT-1 (2009-) 相继将空间分辨率提升至 26km、12km 和 10.5km (Kuze et al., 2009)。然而, 上述卫星的探测精度有限, 且在覆盖范围和分辨率方面存在一定的问题 (刘毅等, 2021), 但于 2017 年发射的 Sentinel-5p (Sentinel-5 Precursor) 搭载的 TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) 仪器, 为甲烷的长期监测提供了全新视角。TROPOMI 自 2019 年 8 月升级后, 将甲烷的全球覆盖分辨率提升至 5.5 km × 7 km, 其高分辨率和高信噪比使得在更小尺度上识别甲烷排放热点成为可能 (Lorente et al., 2021)。TROPOMI 的数据产品现已成为全球/区域尺度甲烷浓度研究的首选工具, 在包括中国在内的全球多个区域中得到了广泛应用 (Plant et al., 2022, Shen et al., 2021, Song et al., 2023)。TROPOMI 凭借每日覆盖能力, 可捕捉高精度的稻田甲烷季节性变化特征 (Kozicka et al., 2023), 为农业源排放的精准解析提供了不可替代的技术手段。

作为全球人为源甲烷排放的最大贡献者, 农业部门贡献了约四分之一的总排放量 (IEA, 2023), 其中稻田生态系统因其特殊的淹水环境成为重要排放源。研究表明, 稻田作为温室气体排放的净来源 (Liu et al., 2021), 排放量约占全球作物生产温室气体排放的 48% (Qian et al., 2023), 其净排放量取决于产甲烷菌与甲烷氧化菌的动态平衡机制 (余锋等, 2022), 产甲烷菌通过分解土壤有机物产生甲烷, 随后 60%~90% 的甲烷在传输过程中被甲烷氧化菌氧化 (王明星等, 1998)。中国作为世界上最大的水稻生产国和稻米消费国 (FAOSTAT Rice Cultivation, 2024), 其农业活动贡献了 16% 的人为源甲烷排放 (Peng et al., 2016)。2023 年 11 月发布的《甲烷排放控制行动方案》将稻田甲烷减排列为重点任务 (中华人民共和国生态环境部, 2023), 对实现碳中和目标具有关键意义。目前已经有许多学者开展了有关我国甲烷的长期变化趋势和时空分布的研究, 在稻田甲烷排放领域取得重要进展。例如, 唐志伟等 (2022) 基于水稻播种面积、产量及稻田甲烷排放因子计算得到单位产量排放特征, 量化了我国 2001-2018 年稻田甲烷排放的时空格局, 但受限于甲烷数据空间精度不足, 对识别中国

各区域甲烷的主要影响因素存在局限性。Qian 等（2023）基于全球范围内的田间通量观测数据，整合分析归纳出稻田甲烷生长季节排放的四类典型时间模式，揭示了环境条件和管理模式对排放峰值时序的影响，但尚未建立与空间异质性的关联。李志慧等（2024）通过耦合稻田甲烷排放模型（CH4MOD）与 GOSAT 卫星反演数据，定量评估了东北黑土地地区稻田甲烷的时空特征与排放贡献，但因 GOSAT 卫星监测的时空精度有限，可能会增加模型的不确定性。现有研究多聚焦区域尺度，较好地揭示了稻田甲烷排放的区域时空特征，但缺乏从全球高质量卫星观测角度的连续高时空分辨率的季节性甲烷浓度变化特征的相关研究。

为此，本研究将进一步结合 TROPOMI 高分辨率甲烷柱浓度数据与我国省级水稻种植数据库，构建 2018-2022 年时间序列数据集，深入分析中国稻田甲烷的空间分布和季节性变化与水稻种植的关系。通过 STL 时间序列分解方法提取季节信号，揭示了甲烷的季节变化模态，同时利用 K-means 聚类方法，将卫星遥感得到的甲烷季节变化与水稻生长季相关联，首次对甲烷的季节性变化进行详细的归类，评估中国各省份稻田对甲烷浓度的影响，并考虑了不同轮作方式下（单季稻、双季稻）甲烷浓度的差异。

2 数据和方法

2.1 甲烷观测数据

本研究采用欧洲空间局 Sentinel-5P 卫星搭载的 TROPOMI 传感器观测反演的 Level-2 甲烷柱浓度数据（XCH₄）。Sentinel-5P 卫星作为哥白尼计划的重要组成部分，于 2017 年发射进入太阳同步轨道上运行，飞行高度为 817 公里，每日约在当地时间 13:30 扫描过境（Veefkind et al., 2012）。该卫星搭载了 TROPOMI 作为其主要载荷仪器，专门设计用于测量地球大气中的多种痕量气体，包括二氧化氮（NO₂）、臭氧（O₃）、二氧化硫（SO₂）、甲醛（HCHO）、甲烷（CH₄）和一氧化碳（CO）在内的多种大气成分。

TROPOMI 是目前世界上技术最先进、空间分辨率最高的大气监测光谱仪，凭借其多光谱探测能力（覆盖紫外-短波红外波段）和 2600km 的成像幅宽，每日可实现甲烷观测数据的全球覆盖，其空间分辨率自 2019 年 8 月升级为 5.5×7km，显著优于同类型传感器。TROPOMI 具有紫外（UV）、可见光（VIS）、近红外（NIR）和短波红外（SWIR）四个光谱通道，其中 CH₄ 反演算法基于 NIR 和 SWIR 的光谱，光谱范围分别为 675-775 nm 和 2305-2385 nm（Hu et al., 2016）。

TROPOMI 的 CH₄ 数据产品分为不同级别，包括 L1B（原始数据）和 L2（经过大气校正的产品）级别，其中 L2 产品又分为数据流分为近实时（NRTI）、离线（OFFL）和再次处理（RPRO）三种类型。NRTI 数据在卫星成像后大约 3 小时内即可获取，但数据可能不完整或存在一些质量缺陷；OFFL

数据通常在成像后两周内提供，与 NRTI 相比，OFFL 数据经过更彻底的处理，因此数据质量更加可靠；RPRO 数据为再分析处理数据，是经过多次处理后得到的质量最佳的版本。兼顾时效性和数据质量，本文选用了 RPRO 数据，避免高纬度的观测 ($>60^\circ$)，并根据用户手册中推荐的质量保证值 ($qa_value>0.5$) 及经过偏差校正的数据 ($methane_mixing_ratio_bias_corrected$) 来选择 XCH₄ (KNMI, 2023; Qu et al., 2021)，以避免与高太阳或观测天顶角、低地表反照率、过量的气溶胶负荷、云、地形粗糙度和测量噪声相关的错误 (Lorente et al., 2021)，柱浓度单位为十亿分之一 (part per billion, ppb)，以往研究中也采用类似的数据筛选方法 (Lindqvist et al., 2024; Qu et al., 2021)。2018 年 5 月至 2022 年 4 月期间全球有 54350 万次反演通过质量过滤，其中中国区域有 1548 万次可用于分析。将 XCH₄ 数据利用算术平均法网格化为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的分辨率，平均每个网格单元在观测期间有 4457.2 个数据，确保了网格内的数据代表性，往后的分析将基于此分辨率展开。

TROPOMI 能有效捕捉短期的排放事件，如天然气井喷事故 (Pandey et al., 2019) 和石油泄漏 (Schneising et al., 2020)。但由于目前 TROPOMI 数据集有限，而畜牧业等农业活动对温室气体排放的影响通常表现为长期累积效应，需依赖跨年乃至十年的数据才能解析其趋势性变化。目前已有研究表明，针对水稻生长周期 (通常 3-6 个月)，TROPOMI 数据可解析种植阶段的排放峰值，揭示稻田甲烷排放规律 (Liang et al., 2024)。

2.2 中国水稻种植统计数据

中国各省市的水稻播种面积来自国家统计局年鉴以及省级统计年鉴。根据国家统计局数据，中国各省水稻播种面积差异显著，湖南省、黑龙江省和江西省以超过 3000 千公顷的播种面积位居全国前列，而甘肃省、山西省、西藏自治区、北京市和青海省的播种面积则相对较少，均在 10 千公顷以下。然而，为了更准确地评估水稻种植对甲烷浓度的影响，不能仅仅考虑播种面积，而应进一步考虑各省的地理空间差异。因此，本文引入了水稻播种面积比来量化不同省行政区内水稻种植密度，公式如下：

$$P_i = \frac{R_i}{S_i} \quad (1)$$

其中， P_i 表示该省市水稻播种面积比， R_i 表示该省市水稻播种面积， S_i 表示该省市行政面积。

2.3 STL 区域时间序列分解方法

时间序列分解是一种将时间序列数据分解为不同频率数据的方法，以便更好地理解其时间演化特征。STL (Seasonal and Trend decomposition using Loess) 分解法是时间序列分解中的一种先进方法 (Cleveland et al., 1990)，它的基本思想是，时间序列中的每个组成部分都是独立且可加的。具体来说，STL 方法使用局部加权回归 (Loess) 来平滑数据，将时间序列 Y_t 分解为趋势 (T)、季节性 (S)

和随机波动（ R ）三个组分相加而成：

$$Y_t = T_t + S_t + R_t \quad (2)$$

其中， Y_t 表示实际观测值； T_t 表示趋势，反映时间序列随时间推移的长期变化趋势； S_t 表示季节性成分，反映时间序列在固定周期内的规律性变化； R_t 表示随机波动，也叫残差，反映时间序列中无法用趋势和季节性解释的随机波动。

STL 分解法通常通过以下步骤进行：首先使用 Loess 方法对时间序列进行平滑处理，估计季节性成分。其次，从原始数据中移除估计得到的季节性成分，得到趋势和随机波动的组合数据。然后利用 Loess 方法从去季节后的数据中估计趋势成分。最后在去除趋势和季节性成分后，剩余的部分即为随机波动成分。STL 分解特别适合于处理具有复杂季节性模式的长时间序列数据，以灵活性和适应性著称。它可以处理不同类型和强度的季节性，并且允许季节性和趋势成分随时间变化。此外，STL 对异常值不敏感，可以提供更为稳健的分解结果。

我国幅员辽阔，农业生产多样，导致 CH_4 具有各不相同的季节性、长期变化特征，深入分析并量化这些变化规律对于研究 CH_4 的分布规律有重要意义。依据各省级行政区的矢量边界文件，通过对 2018 年 5 月至 2022 年 12 月各省的 XCH_4 月平均数据绘制时间序列，并利用线性插值有效填补了数据中的空缺部分。为了深入挖掘数据的季节性特征，本文将时间序列进行了 STL 分解，设置了 12 个月的时间步长，以反映一个完整的年度周期，得到分解结果为趋势项、季节项和残差项的三个独立部分。作为比较，分别设置时间步长为 6 月和 3 月，发现设置时间步长为 6 月时，季节项提取结果与 12 月份一致，而设置为 3 月时出现明显失实，故最终确定 12 月作为 STL 分解的时间步长。

通过对残差进行纯随机性检验来确保模型分解的可靠性，依据 Ljung-Box 检验统计值，以确定残差是否为白噪声序列，默认延迟阶数为 20。可靠的分解结果中，残差应为白噪声序列，表示有效数据信息已经提取完全。

在 STL 分解过程中，将时间序列数据分解为趋势项 T_t 、季节 S_t 项和残差项 R_t ，本文将特别关注趋势项 T_t ，并计算平均增幅，以衡量中国区域不同省份的甲烷在 2018 年 5 月至 2022 年 4 月间的增长情况。平均增幅是指在一定时间内，某一指标平均每年增长的速率，公式如下：

$$\tau = \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^{\frac{1}{t}} - 1 \quad (3)$$

其中 τ 表示平均增幅， T_0 表示初始值（即 2018 年 5 月的趋势值）， T_n 表示最终值（即 2022 年 4 月的趋势值）， t 表示时间跨度，以年为单位，此处为 4 年。四年平均增幅通过计算四年的复合增长率，能够平滑研究期间的波动，更好地反映长期趋势，有助于减少短期波动对整体增长情况的扭曲，强调一段时间内增长的持续性和稳定性。

2.4 K-means 均值聚类算法

进一步地, 本文利用 STL 分解得到的季节项 S_t , 系统探究中国各省份甲烷浓度的季节性变化复绿。为有效识别不同区域季节模态的共性与差异, 引入基于 K-means 的时间序列聚类方法, 通过无监督学习实现相似性模式的科学分类 (王骏等, 2012)。K-means 均值聚类算法作为经典的非监督学习方法, 最早由 Mac Queen J 于 1867 年提出 (Macqueen, 1967), 其核心在于通过迭代优化将 n 个观测样本划分为 m 个簇, 使得簇内方差 MSE 最小化:

$$MSE = \min \sum_{i=1}^m \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2 \quad (4)$$

式中, C_i 表示第 i 个簇, μ_i 为簇中心。本文的目标是将具有相似季节性变化特征的省份分组, 以便更深入地理解甲烷浓度的季节性分布规律。

针对 K-means 算法对初始值敏感的特性, 本研究采用双重验证策略确定最优聚类数 K (图 1)。肘部法则通过计算簇内平方和 (Within-Cluster Sum of Squares, WCSS), 分析 WCSS 随着 K 变化的趋势。当 K 增大时, 簇内平方和逐渐减少, 但下降速率在某个拐点 (即 “肘部”) 后趋于平缓, 该拐点对应的 K 被认为是合理的聚类数。另一方面, 轮廓系数用于衡量聚类的质量, 其值介于 $[-1, 1]$ 之间, 值越高表示聚类效果越好。轮廓系数可反映簇内数据点的紧密程度以及簇间的可分性, 因此, 与肘部法则结合使用可以提高 K 值选择的稳健性。

在本研究中, 我们针对不同的随机种子 (random seed) 重复计算 K-means 结果, 并对 WCSS 和轮廓系数进行 1000 次平均, 以确保最优聚类数 K 的选择不受随机初始化的影响。由图 1 可知, WCSS 随着 K 值增加不断下降, 符合 K-means 聚类的特性, 并在 $K=4$ 附近下降曲线开始变得较为平缓, 表明此时聚类的边际收益减少 (簇内紧密度提升)。同时, 轮廓系数虽然在 $K=2$ 时最高, 但此时的聚类数量过少, 不能有效区分不同模式。 $K=3$ 和 $K=4$ 时轮廓系数相对较高, 但之后逐渐降低, 簇的分离度不断下降。

最终, 基于这两种方法的综合评估, 本文确定 $K = 4$ 作为最优聚类数, 将我国甲烷浓度季节模态划分为四类典型模式。通过解析各簇的时空分布特征, 可揭示甲烷排放的区域协同规律, 为差异化环境治理提供定量依据。

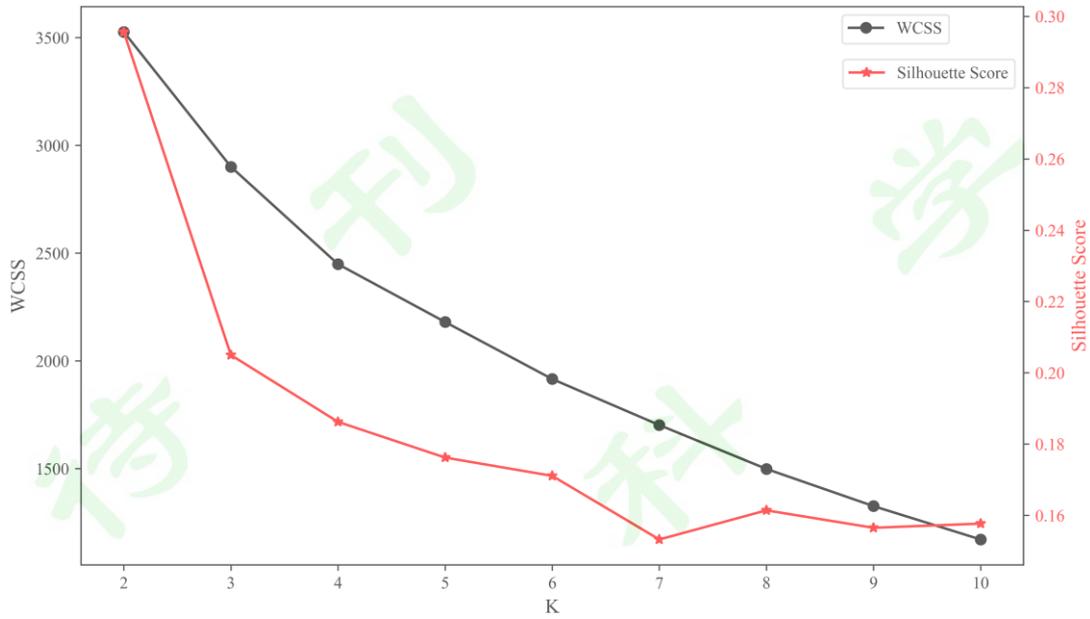


图 1 基于肘部法则（黑线）与轮廓系数（红线）的甲烷排放季节性模式最优聚类数确定。
Fig. 1 Determination of optimal cluster number for seasonal methane emission patterns using the Elbow Method (black line) and Silhouette Score (red line).

3 结果与分析

3.1 中国 CH₄ 的空间分布

图 2 展示了 2018 年 5 月至 2022 年 4 月期间中国甲烷平均柱浓度的空间分布特征。研究区域呈现出明显的空间异质性，总体表现为甲烷柱浓度在地理上呈现出“南高北低、东高西低”的梯度变化格局。其中，华中、华东、华南及西南东部地区构成全国甲烷浓度高值区，其柱浓度值较其他区域平均高出约 30~50 ppb。这一现象可能与上述区域较高的人口密度（尤其是长江中下游城市群）、密集的稻田生态系统以及湿地资源分布密切相关。

值得注意的是，东北平原南部与华北平原结合部形成了次高值区，这可能与该区域集约化农业生产（包括水稻种植与畜牧业）以及城镇化进程中的能源消费结构有关（Wang et al., 2022; Xu et al., 2019; 贾庆宇等, 2020）。同时，新疆地区观测到的线性高值轨迹与油气田开发带的空间分布高度吻合，表明能源基础设施的甲烷泄漏可能对该区域浓度分布产生显著影响（Tang et al., 2010）。相比之下，青藏高原和青海省表现出全国最低甲烷浓度水平，这主要归因于该地区高寒气候特征、稀疏的人类活动以及以高寒草甸为主的生态系统结构（Song et al., 2015）。

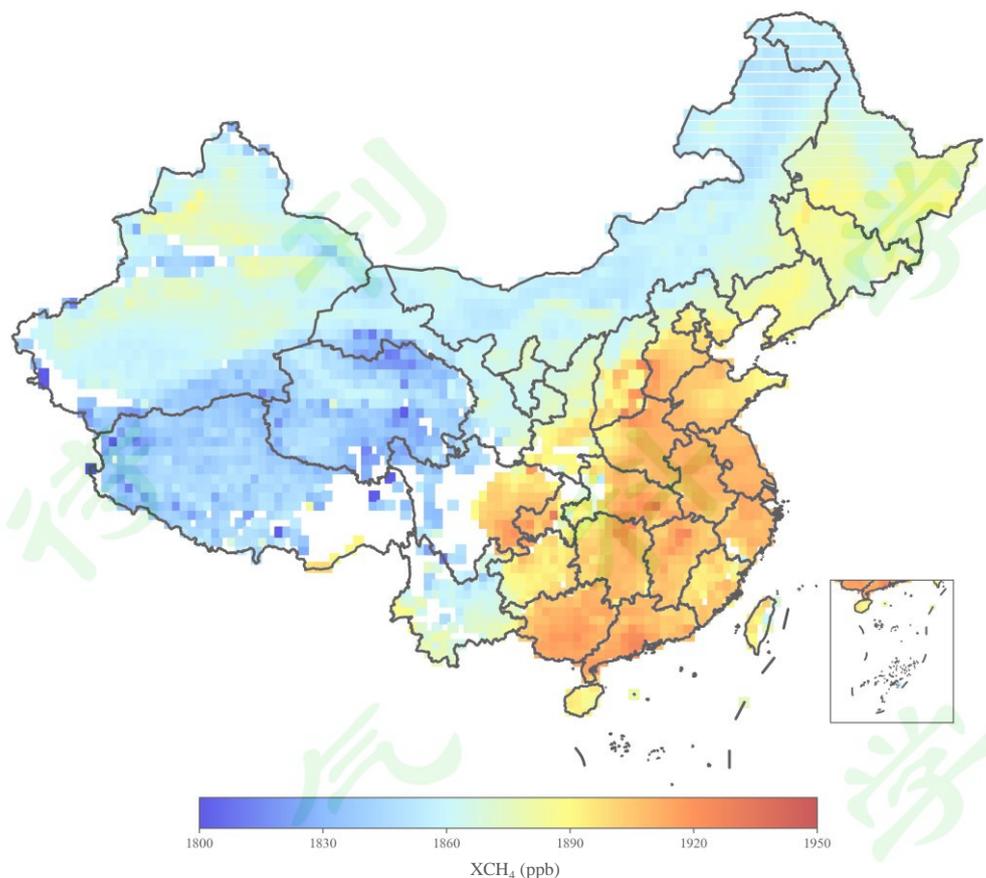


图 2 TROPOMI 卫星反演的中国甲烷柱浓度空间分布 (2018.05-2022.04)。

Fig. 2 Spatial distribution of methane column concentrations over China retrieved from TROPOMI (May 2018–April 2022).

3.2 基于长期趋势的讨论

图 3 显示, 研究时段内各省份甲烷浓度均呈现上升趋势, 但存在显著空间分异。东北三省与西南地区的云南省 (增长率达 0.8% 以上) 构成主要增长极, 江西省和上海市甲烷增长水平最低, 在 0.5%~0.6% 之间。对比浓度分布特征发现 (图 2) 发现, 华南地区虽维持较高浓度水平 (~1920 ppb), 但是增长率较低 (~0.6%), 可能与该地区的土地利用从双季水稻转向蔬菜种植或建设用地有关 (Shen et al., 2024), 双季稻转向菜地最终将使中国南方的全球变暖潜势 (GWP) 降低 63% (Yuan et al., 2016), 因为蔬菜通常具有更高的经济效益, 激励农民改变种植模式以获取更高的利益。与稻田生态系统相比, 蔬菜种植可以显著降低甲烷的排放 (邬磊, 2018)。值得注意的是, 而东北和云南省虽然整体甲烷浓度较低, 但是上升趋势明显。而西北地区 (除新疆外) 在低本底浓度下仍保持低增长率, 这与该区域以旱作农业为主、能源活动强度较低的特征相吻合。

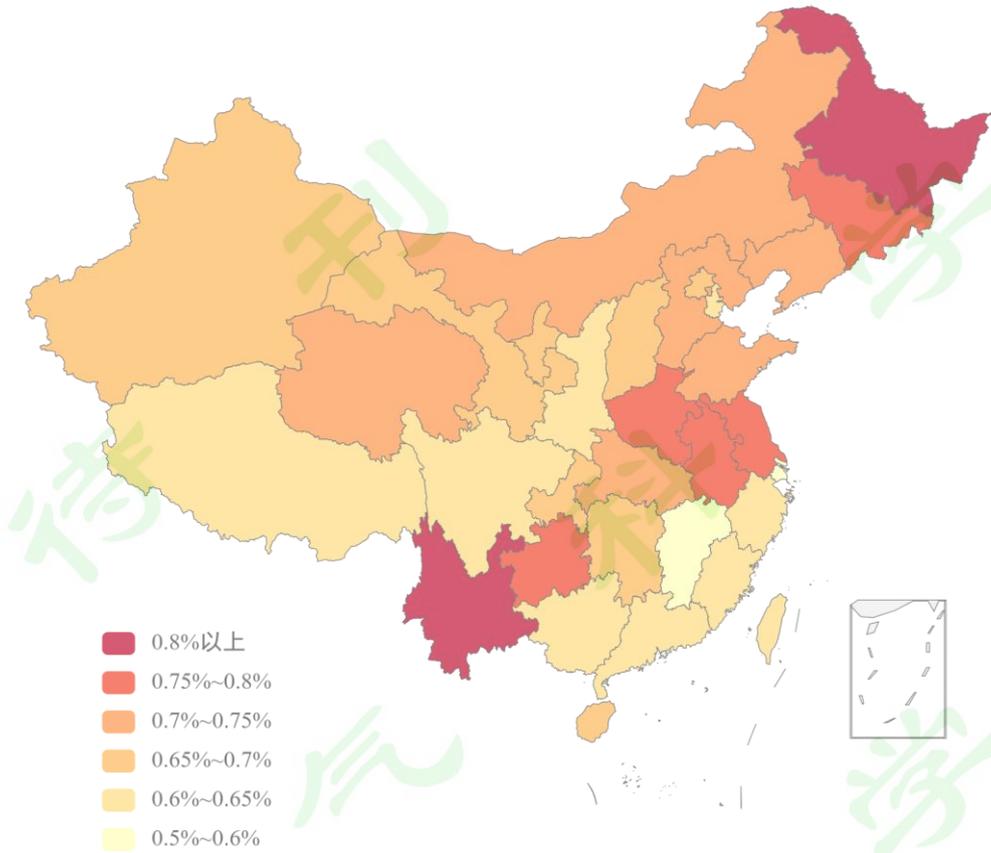


图 3 2018 年 5 月至 2022 年 4 月期间，中国区域甲烷的平均增长率空间分布图。

Fig. 3 Spatial distribution of the average growth rate of regional methane in China for the period May 2018 to April 2022.

3.3 基于季节项的模态分类及与水稻的关系探究

基于 K-means 聚类分析识别出的四类甲烷浓度季节模态图（图 4），在时间演变特征和空间分布格局上均呈现出显著差异。第一类模态呈现典型的夏季单峰结构，峰值出现在 8 月，冬季低谷见于 2 月，季节变化曲线基本单调，3 月份偶有高值。该模态主要分布于以自然生态系统主导的西北地区（西藏、青海、甘肃、宁夏、陕西）、华北（河北、山西）及西南部分省份（四川、云南），其空间分布与水热条件的纬度地带性具有较高一致性。

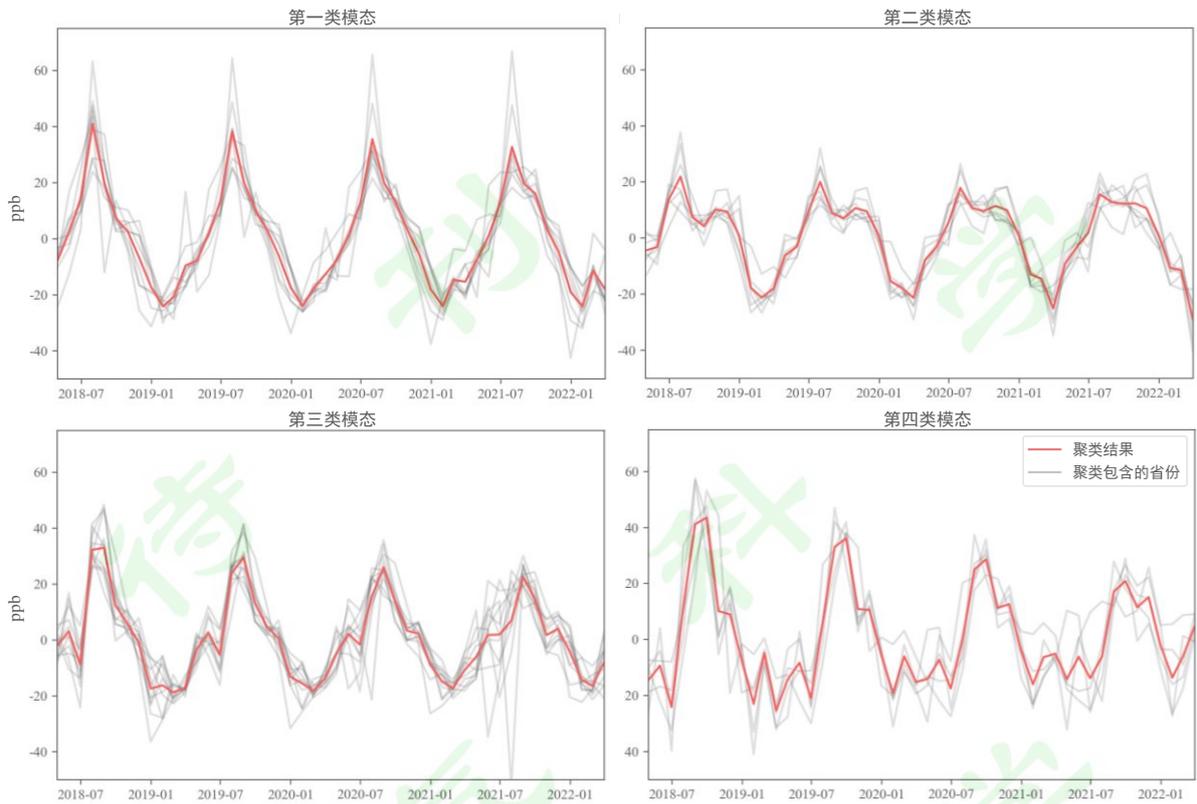


图 4 基于 2018 年至 2022 年甲烷的 K-means 聚类分析获取的中国区域的典型四类模态。

Fig. 4 Typical four-category modality of Chinese regions obtained from K-means cluster analysis based on methane from 2018 to 2022.

第二类模态表现为 8 月主峰与 11-12 月次峰的双峰结构，春季 3-4 月出现明显低谷。这类模态尤以北方地区最为盛行，集中分布于东北三省（黑龙江、吉林、辽宁）、内蒙古、新疆及京津地区。第三类模态的特征为 9 月主峰伴随 6 月和 12 月次峰的"山"字型波动，季节变幅较前两类增大。其空间范围覆盖华中和华东地区（江苏、安徽、浙江、山东、河南）以及部分西南省份（湖南、湖北、重庆、贵州），与双季稻种植区的空间格局存在一定程度上的地理耦合。第四类模态为多峰型分布，呈现 10 月主峰、12 月次峰及多个月份小高峰的复杂波动。该模态以华南地区为核心（广东、广西、海南、福建及台湾省），其多峰特征可能受热带季风气候下频繁的干湿交替过程驱动。

稻田作为甲烷排放的重要人为来源，其空间分布特征与种植模式对区域甲烷柱浓度具有显著影响，这一影响是本研究的核心焦点。基于统计年鉴数据与水稻种植密度指数，研究区域可划分为四类典型模态，其空间分布与水稻种植密度及季节特征呈现显著相关性。高密度种植区（稻田播种面积占比 >20%）如江苏、江西两省主要集中于第三类模态区域，而黑龙江省因省域面积广阔，尽管总播种面积较大，但种植密度较低（<15%），对应第二类模态。图 5 所示是结合水稻种植密度数据绘制甲烷模态的空间分布图，其直观地揭示了中国区域甲烷时间序列典型模态的空间分布。这些模态不仅在地理上有所区分，而且与之前基于季节项的分类紧密相关，水稻种植密度高的地区基本对应第三、四类模态，而低密度的地区对应一、二类模态，进一步验证了水稻种植密度对甲烷排放季节

性特征的影响。

结合季节变化特征分析，四类模态的甲烷浓度均呈现“夏高冬低”的时序特征，峰值集中于 8 月，谷值出现在 1 月，这与稻田生态系统甲烷排放的季节性规律一致。然而，不同模态间的季节波动特征存在显著分异，表明除水稻种植密度外，其他环境因子与人为活动共同驱动了甲烷浓度的时空差异。

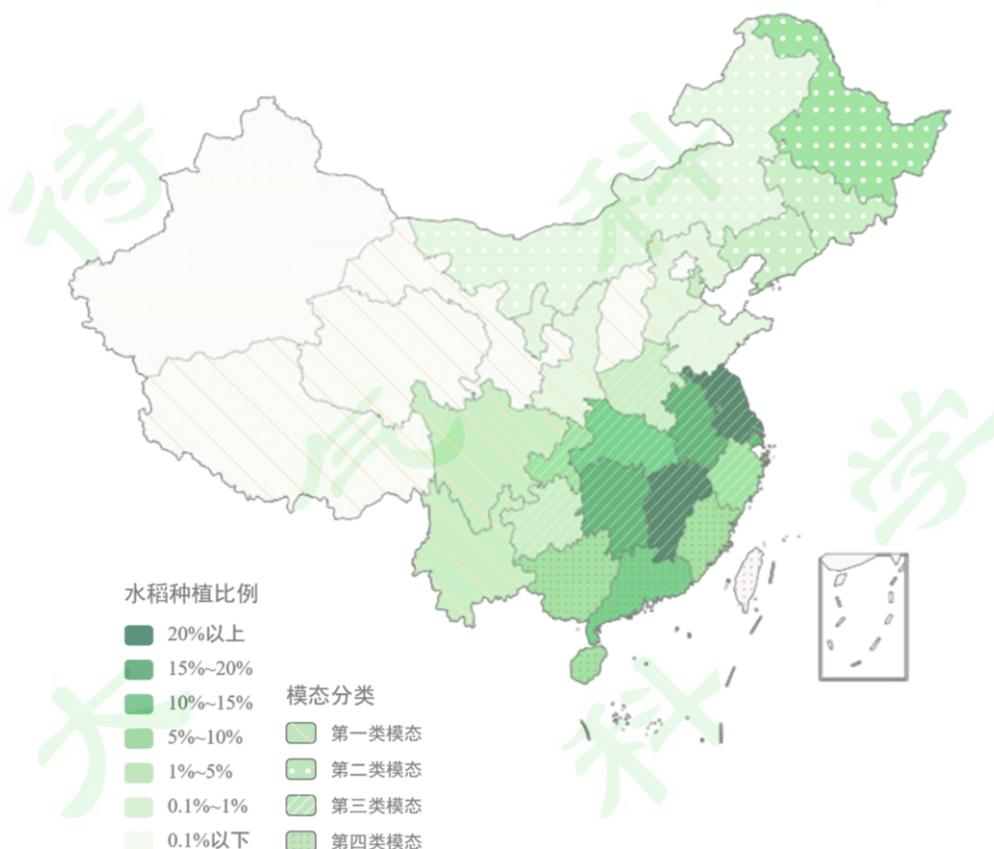


图 5 中国甲烷柱浓度季节性空间模态分布图与五年平均水稻种植比例的叠加图。

Fig. 5 Overlay of seasonal spatial modal distribution of methane column concentration with five-year average proportion of rice cultivation in China.

3.4 甲烷季节性变化因素探究

本文进一步研究了水稻种植模式及其他因素对甲烷季节性变化的可能影响。在中国，水稻种植模式主要分为单季稻和双季稻两种类型。单季稻通常指的是在一年内只种植一次的水稻，其种植周期较长，通常从春季开始播种，经过夏季的生长期，直到秋季收获，适应了较长的生长季节和较低的气温条件，主要分布在中国北方地区。双季稻则是在一年内在同一块土地上连续种植两季水稻，包括早稻和晚稻，早稻在春季播种，夏季收获，晚稻紧随其后播种，至秋季收获，主要分布在气候温暖、水热条件充足的南方地区。详细的水稻种植方式分布情况如表 1 所示，表中不含港澳台数据。

表 1 中国各省市水稻种植模式分类

Table 1 Classification of rice cultivation patterns by provinces and cities in China

水稻	省份
无水稻或水稻种植较少	青海省、西藏自治区、甘肃省、山西省、新疆维吾尔自治区、北京市、内蒙古自治区、河北省、宁夏回族自治区、陕西省、山东省
单一季水稻	辽宁省、天津市、河南省、贵州省、四川省、吉林省、重庆市、黑龙江省、上海市、江苏省
一季水稻为主，两季水稻少	云南省、浙江省、湖北省、安徽省、湖南省
两季水稻为主，一季水稻少	福建省、广西壮族自治区、江西省
两季水稻	海南省、广东省

针对第一类模态的季节变化 (图 6), 尽管总体上这些省份表现为单峰型变化, 但波动的幅度也有所不同, 例如西藏自治区和青海省的波动幅度远超其他省份。值得注意的是, 青海省的水稻播种面积近乎为 0, 甲烷浓度展现出典型的单峰型变化, 从 2 月至 8 月甲烷浓度单调递增, 而从 8 月至次年 2 月则单调递减, 清晰地展现了非水稻种植区域的季节性特征。同时, 水稻种植密度较高的四川省和云南省, 虽然只在夏季有高值, 但波动频率较大, 可能与西南地区降水量主要集中在夏季有关。有小部分的双季水稻种植的云南省, 夏季的波动情况又与单季水稻种植的四川省有所差异, 我们将这归因为云南省的双季稻种植比例远远小于单季稻, 从而使得云南省的甲烷季节模态与单季稻的模态类似。

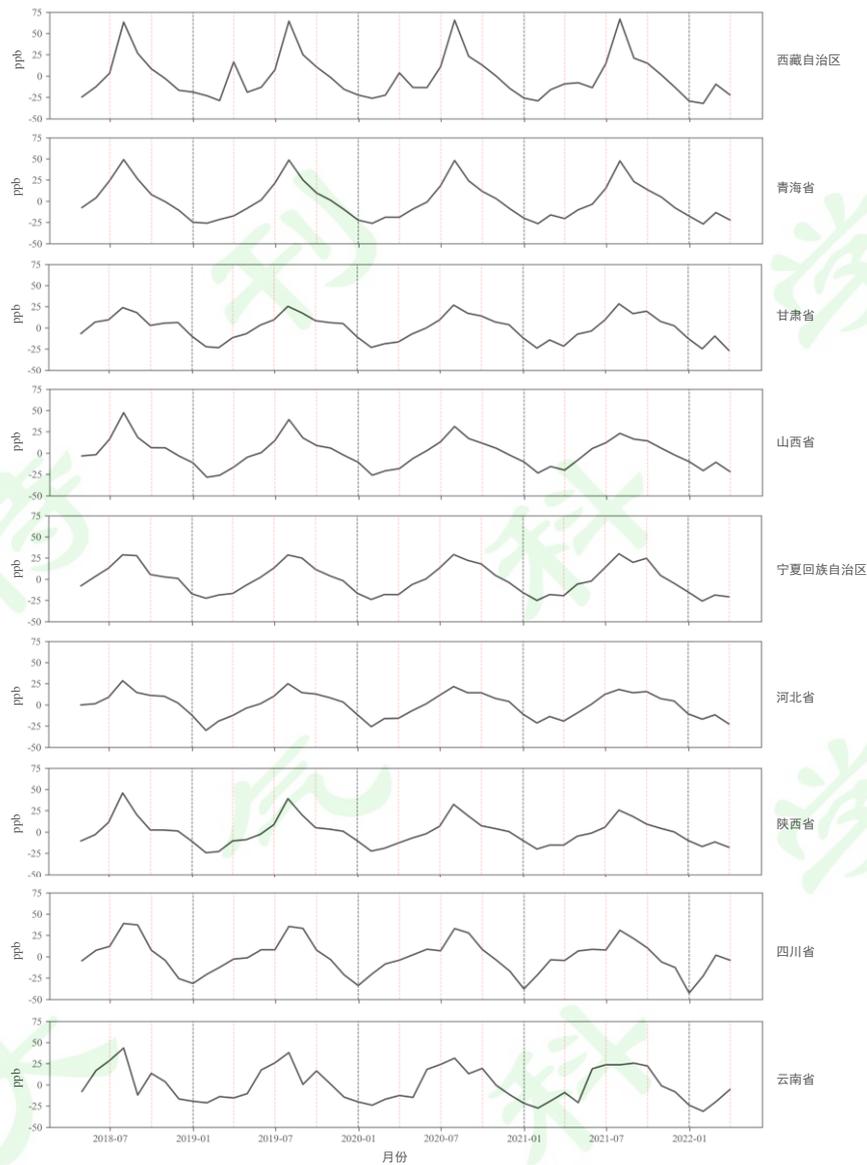


图 6 第一类模态时间序列分解的季节项图，单峰型分布。图中黑色竖虚线代表每年的 1 月份，红色竖虚线代表间隔 3 个月，依次为 4 月、7 月和 10 月。

Fig. 6 Plot of the seasonal terms of the first type of modal time series decomposition with a single-peaked distribution. The black vertical dashed line in the figure represents December of each year, and the red vertical dashed line represents the three-month interval, March, June, and September, in that order.

单季节水稻生长季节甲烷排放通量变化很大，在分蘖期和成熟期一般会出现峰值（熊效振等，1999）。然而在如图 7 所示的第二类模态中，甲烷浓度的季节性变化则表现为 8 月和 12 月的双峰型季节变化模式，与已有研究结果一致（Xu et al., 2023; 徐智超等, 2025）。我们发现，第二类模态包含的省份冬季平均温度都在零度以下，尤以东北地区气温最低。东北对流层甲烷主要分布在大小兴安岭多年冻土地区，而不是水稻种植较多的东北平原（徐智超等, 2025）。根据现有研究，第二种中冬季表现出的峰值很可能与土地冻结期间的甲烷释放有关。根据中国的冻土分布图（冉有华和李新, 2018），冻土分为不同的类型，尤其在黑龙江省南部、吉林省、内蒙古自治区中西部以及新疆维吾尔

自治区北部，主要分布中深季节冻土。这些地区的冻土最大冻结深度介于季节性和多年冻土之间，在土壤冻结过程中，之前积累在活动层中的甲烷可能因冻土挤压而释放，形成冬季甲烷浓度的异常峰值（Mastepanov et al., 2008; 陈哲等, 2016）。而多年冻土在退化后，冻结层下封存的古老碳也会逐渐暴露并以甲烷的形式释放，造成冬春的季节浓度峰（徐智超等, 2025）。值得注意的是，冬季的这个高峰也与水稻种植密度呈现出一定的联系，东北三省的水稻种植密度远大于新疆和内蒙古，这一差异反映在甲烷浓度的季节性变化上，即前者在 12 月的甲烷浓度峰值显著高于后者。

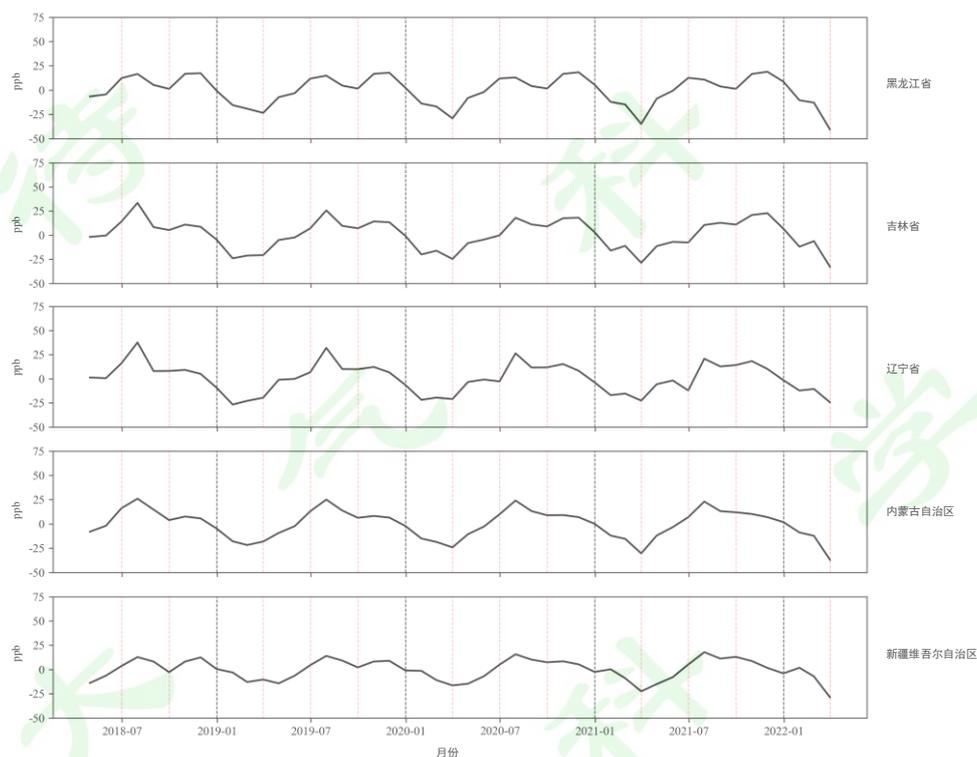


图 7 第二类模态时间序列分解的季节项图，双峰型分布。

Fig. 7 Seasonal term plots of the decomposition of the second type of modal time series with bimodal distribution.

第三类模态和第四类模态都表现为多峰型，区别在于峰数不同，第四类模态在 3 月有一个小高峰，而第三类模态没有。我们认为，这与第四类模态区域的水稻种植以双季稻为主有关。Liu 等(2023)的研究显示，双季稻种植系统中甲烷排放量展现出明显的季节变化。排放量从早稻生长季节开始逐渐增加，在淹水期结束时达到峰值，随后第二个峰值在晚稻移栽的早期产生（上官行健等, 1994）。早稻播种通常在 3 月进行，可能对甲烷的增加有所影响。按照预期的结果，山东和贵州两省的水稻种植密度较小，不应该包含在第三类模态中（图 8）。对比二省与其他省份的季节项变化特征，发现山东省和贵州省的季节变化更趋于单峰型，而不应该被分类为第三类模态，这也暴露了 K-means 算法存在一定的局限性，需要更长时间的 TROPOMI 观测数据作为分类特征。

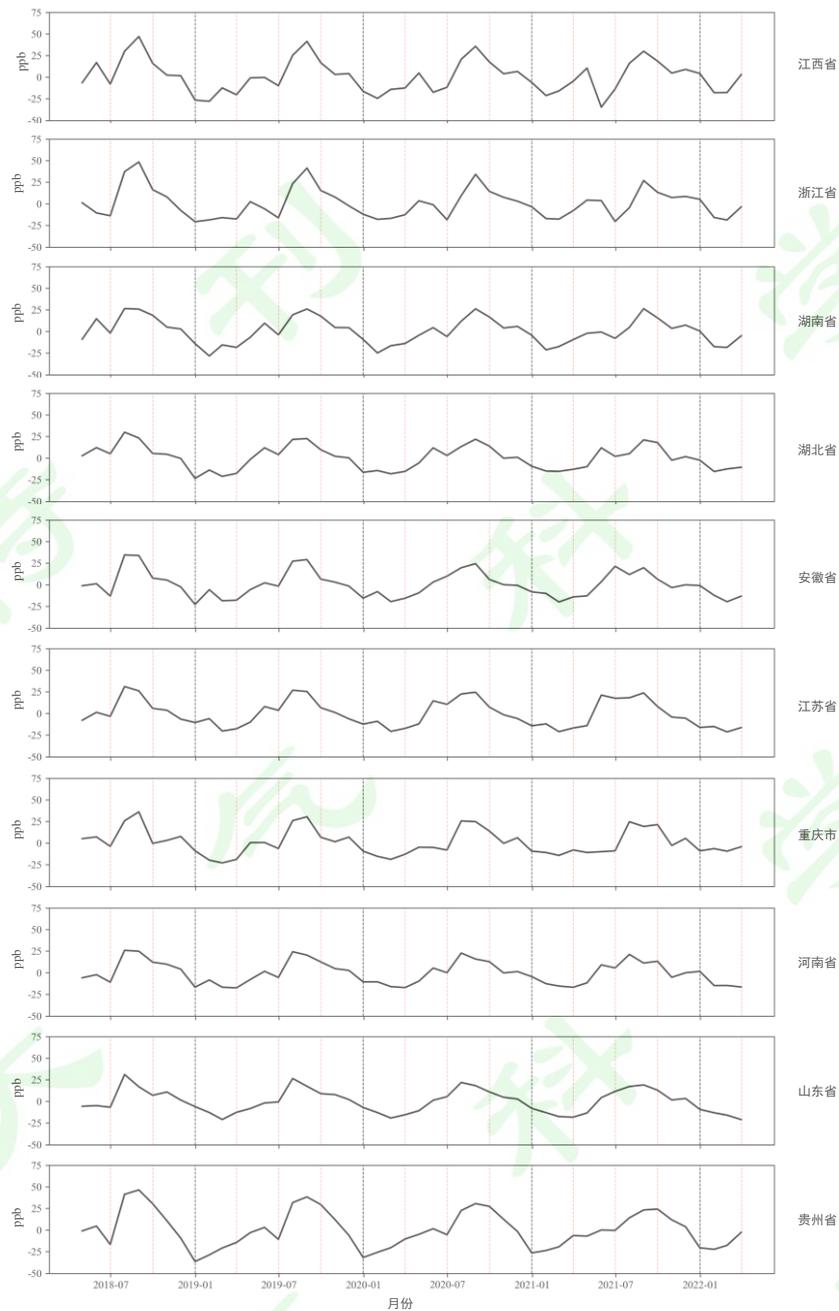


图 8 第三类模态时间序列分解的季节项图，三峰型分布。

Fig. 8 Seasonal term plots of the decomposition of the third type of modal time series with a three-peaked distribution.

对图 5 进一步研究，可以观察到气温对甲烷浓度具有间接影响。从第一类模态到第四类模态，从北到南，随着纬度的增加气温逐渐降低，尽管甲烷浓度的峰值依然出现在夏季，但峰值出现的时间却逐渐提前。这一现象可能与气温的季节性变化和水稻种植周期的地理差异有关。

综上所述，本研究通过 STL 分解和 K-means 聚类分析显示，甲烷季节变化呈现出夏高冬低的典型特征，其时空分布可划分为四类模态，且与水稻种植密度大致对应（图 5）。每类模态展现出独特的季节性演变特征，代表了一类典型地区，并可以间接反映出当地的水稻的种植模式。

3.5 结果不确定性的讨论

尽管时空模态分析表明水稻种植制度可能是驱动甲烷季节变化的重要因子，但需要特别指出的是，大气中的甲烷浓度受到多重过程的调控。在排放端，既包含水稻田、自然湿地等生物源，也涉及油气开采、垃圾填埋等非生物源；在清除端，约 90% 的甲烷消耗由 OH 自由基主导 (Saunio et al., 2020; 姚璐等, 2022)，其光化学生成量存在显著季节波动。

本文采用的 STL 分解虽能有效提取时空模态，但其本质上属于相关性分析而非因果推断，因而可能存在一定的误差和伪相关性。构建从排放清单、模型模拟到多平台观测的全链条验证体系存在显著技术壁垒，甲烷源汇清单中存在巨大的不确定性，尤其是自然源汇部分甚至可高达 100% (Saunio et al., 2020; 姚璐等, 2022)。由于稻田的复杂性，其对甲烷的影响的精确评估也存在相当大的不确定性 (Tariq et al., 2017)，中国西南地区还存在地膜覆盖及再生稻（头季稻收割后稻桩再生分蘖）的水稻种植模式 (Song et al., 2021)，对稻田甲烷的精确评估提出了挑战。

4 结论

本文的主要结论如下：

(1) TROPOMI 的观测结果揭示了中国甲烷浓度分布的地域特征，即东高西低和南高北低的梯度分布。中国甲烷浓度基本在 1800ppb 以上，南方地区的浓度甚至在 1900ppb 以上，2018-2022 年间四年平均增幅可达到 0.6% 及以上。

(2) 结合国家统计局的水稻播种数据，通过 STL 分解提取出时间序列的季节项特征，利用 K-means 聚类分析识别出四种不同的甲烷季节性变化模态，包括单峰型、双峰性、“山”字型和多峰型。这些模态与水稻生长周期的表现较为一致，均呈现“夏高冬低”的时序特征，甲烷浓度于 8 月达到峰值，于 1 月降至最低。

(3) 详细分析了甲烷的不同季节模态对应的水稻种植特征，单峰型模态与水稻种植密度低的地区高度吻合，而双峰型东北和西北地区冬季甲烷浓度的次峰值很可能与冻土层的甲烷释放有关，这一点通过结合土地冻结期间的甲烷释放研究得到了进一步的解释，多峰型模态是双季稻的主产区，与水稻种植密度高的地区相符。水稻生长周期和种植密度是影响甲烷季节性变化的关键因素。

本研究从观测角度揭示了水稻田对甲烷污染的重要作用，特别是强调了随季节变化的独特性规律，为进一步深入理解我国稻田甲烷排放模式提供了观测基础。后续研究亟需结合地面观测和大气化学传输模式去识别决定我国不同区域稻田甲烷排放的主导因素。考虑到存在的不确定性，未来研究建议采用“自上而下”的反演方法，可以降低区域水稻排放的误差 (Liang et al., 2024)，也可以与“自下而上”的方法相结合。使用更高分辨率的稻田数据，通过构建高分辨率排放清单约束先验场，结合大气化学传输模型（如 GEOS-Chem）的同化模拟，可有效解耦生物源与非生物源的贡献。

参考文献

- 陈哲, 韩瑞芸, 杨世琦, 等. 2016. 东北季节性冻融农田土壤 CO₂、CH₄、N₂O 通量特征研究 [J]. 农业环境科学学报, 35(02): 387-395. Chen Zhe, Han Ruiyun, Yang Shiqi, et al. 2016. Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from seasonal freeze-thaw arable soils in Northeast China [J]. Journal of Agro-Environment Science (in Chinese), 35(02): 387-395. doi:10.11654/jaes.2016.02.025
- Cleveland R B, Cleveland W S, McRae J E, et al. 1990. STL: A seasonal-trend decomposition [J]. Journal of Official Statistics, 6(1): 3-73.
- European Space Agency. 2023. Sentinel-5P CH₄ Product Readme File (PRF), Version 02.06.00 [R]/Copernicus Sentinel-5P Mission. Available at: [https://sentinels.copernicus.eu/documents/d/sentinel/s5p-mpc-sron-prf-ch4_v02-06-00_2-5_20231129_signed\[2025-04-03\]](https://sentinels.copernicus.eu/documents/d/sentinel/s5p-mpc-sron-prf-ch4_v02-06-00_2-5_20231129_signed[2025-04-03]).
- Feng G, Tongwen W, Zhang J, et al. 2021. Shortened Duration of Global Warming Slowdowns with Elevated Greenhouse Gas Emissions [J]. Journal of Meteorological Research, 35(2): 225-237. doi:10.1007/s13351-021-0134-y
- FAOSTAT Rice Cultivation [EB/OL]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/GCE> [2024-04-30]
- Frankenberg C, Meirink J F, Bergamaschi P, et al. 2006. Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: Analysis of the years 2003 and 2004 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 111(D7). doi:10.1029/2005JD006235
- Hu H, Hasekamp O, Butz A, et al. 2016. The operational methane retrieval algorithm for TROPOMI [J]. Atmos Meas Tech, 9(11): 5423-5440. doi:10.5194/amt-9-5423-2016
- IEA. 2023. Global Methane Tracker 2023 [R]/International Energy Agency. Paris: IEA.
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [R]/Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- 贾庆宇, 李晓岚, 于文颖, 等. 2020. 温度对东北平原水稻田甲烷排放的影响 [J]. 生态环境学报, 29(01): 1-10. Jia Qingyu, Li Xiaolan, Yu Wenying, et al. 2020. Effect of temperature on methane emission over paddy fields in Northeast Plain [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 29(1): 1-10. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.01.001
- Kozicka K, Orazalina Z, Gozdowski D, et al. 2023. Evaluation of temporal changes in methane content in

- the atmosphere for areas with a very high rice concentration based on Sentinel-5P data [J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30: 100972. doi:10.1016/j.rsase.2023.100972
- Kuze A, Suto H, Nakajima M, et al. 2009. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring [J]. *Appl Opt*, 48(35): 6716-6733. doi:10.1364/AO.48.006716
- 李志慧, 王艺霏, 邓祥征. 2024. 东北黑土地区稻田甲烷排放时空演变及排放潜力分析 [J]. *生态学报*, 44(09): 3814-3829. Li Zhihui, Wang Yifei, Deng Xiangzheng, 2024. Spatiotemporal evolution and potential prediction of methane emissions from paddy fields in the black soil region of Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica (in Chinese)*, 44(9): 3814-3829. doi:10.20103/j.stxb.202304020652
- Liang R, Zhang Y, Hu Q, et al. 2024. Satellite-Based Monitoring of Methane Emissions from China's Rice Hub [J]. *Environmental Science & Technology*, 58(52): 23127-23137. doi:10.1021/acs.est.4c09822.
- Lindqvist H, Kivimäki E, Häkkinen T, et al. 2024. Evaluation of sentinel-5p tropomi methane observations at northern high latitudes [J]. *Remote Sensing*, 16(16): 2979. doi:10.3390/rs16162979
- Liu X, Dai X, Yang F, et al. 2023. CH₄ emissions from a double-cropping rice field in subtropical China over seven years [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 339: 109578. doi:10.1016/j.agrformet.2023.109578
- Liu Y, Ge T, Groenigen K J, et al. 2021. Rice paddy soils are a quantitatively important carbon store according to a global synthesis [J]. *Communications Earth & Environment*, 2(1): 154. doi:10.1038/s43247-021-00229-0
- 刘毅, 王婧, 车轲, 等. 2021. 温室气体的卫星遥感——进展与趋势 [J]. *遥感学报*, 25(01): 53-64. Liu Yi, Wang Jing, Che Ke, et al. 2021. Satellite remote sensing of greenhouse gases: Progress and trends [J]. *National Remote Sensing Bulletin (in Chinese)*, 25(01): 53-64. doi:10.11834/jrs.20210081
- Lorente A, Borsdorff T, Butz A, et al. 2021. Methane retrieved from TROPOMI: Improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(1): 665-684. doi:10.5194/amt-14-665-2021
- Macqueen J. 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations [C]// *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 5: 281-298.
- Mastepanov M, Sigsgaard C, Dlugokencky E J, et al. 2008. Large tundra methane burst during onset of freezing [J]. *Nature*, 456(7222): 628-630. doi:10.1038/nature07464
- Pandey S, Gautam R, Houweling S, et al. 2019. Satellite observations reveal extreme methane leakage from

- a natural gas well blowout [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(52): 26376-26381. doi:10.1073/pnas.1908712116
- Peng S, Piao S, Bousquet P, et al. 2016. Inventory of anthropogenic methane emissions in mainland China from 1980 to 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(22): 14545-14562. doi:10.5194/acp-16-14545-2016
- Plant G, Kort E A, Murray L T, et al. 2022. Evaluating urban methane emissions from space using TROPOMI methane and carbon monoxide observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 268: 112756. doi:10.1016/j.rse.2021.112756
- Qian H, Zhu X, Huang S, et al. 2023. Greenhouse gas emissions and mitigation in rice agriculture [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(10): 716-732. doi:10.1038/s43017-023-00482-1
- 秦大河. 2014. 气候变化科学与人类可持续发展 [J]. *地理科学进展*, 33(7): 874-883. Qin Dahe. 2014. Climate change science and sustainable development [J]. *PROGRESS IN GEOGRAPHY (in Chinese)*, 33(7): 874-883. doi:10.11820/dlkxjz.2014.07.002
- Qu Z, Jacob D J, Shen L, et al. 2021. Global distribution of methane emissions: a comparative inverse analysis of observations from the TROPOMI and GOSAT satellite instruments [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(18): 14159-14175. doi:10.5194/acp-21-14159-2021
- 冉有华, 李新. 2018. 中国冻土分布图(2000)[M]. 国家青藏高原数据中心. Ran Youhua, Li Xin. 2018. Frozen soil map of China (2000). National Tibetan Plateau / Third Pole Environment Data Center. [https://cstr.cn/18406.11.Geocry.tpd.270552\[2025-04-03\]](https://cstr.cn/18406.11.Geocry.tpd.270552[2025-04-03])
- Saunio M, Stavert A R, Poulter B, et al. 2020. The global methane budget 2000–2017 [J]. *Earth System Science Data Discussions*, 12(3): 1561-1623. doi:10.18160/GCP-CH4-2019
- Schneising O, Buchwitz M, Reuter M, et al. 2020. Remote sensing of methane leakage from natural gas and petroleum systems revisited [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(15): 9169-9182. doi:10.5194/acp-20-9169-2020
- 上官行健, 王明星, 沈壬兴, 等. 1994. 我国华中地区稻田甲烷排放特征 [J]. *大气科学*, 18(03): 358-365. Shanguan Xingjian, Wang Mingxing, Shen Renxing, et al. 1994. The Feature of Methane Emission from a Paddy Field in the Central China Region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 18(3): 358-365. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.03.12
- Shen L, Zavala-Araiza D, Gautam R, et al. 2021. Unravelling a large methane emission discrepancy in Mexico using satellite observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 260: 112461.

doi:10.1016/j.rse.2021.112461

- Shen N, Tan J, Wang W, et al. 2024. Long-term changes of methane emissions from rice cultivation during 2000 – 2060 in China: Trends, driving factors, predictions and policy implications [J]. *Environment International*, 191: 108958. doi:10.1016/j.envint.2024.108958
- Song H, Sheng M, Lei L, et al. 2023. Spatial and Temporal Variations of Atmospheric CH₄ in Monsoon Asia Detected by Satellite Observations of GOSAT and TROPOMI [J]. *Remote Sensing*, 15(13): 3389. doi:10.3390/rs15133389
- Song K, Zhang G, Yu H, et al. 2021. Evaluation of methane and nitrous oxide emissions in a three-year case study on single rice and ratoon rice paddy fields [J]. *Journal of Cleaner Production*, 297: 126650. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126650
- Song W, Wang H, Wang G, et al. 2015. Methane emissions from an alpine wetland on the Tibetan Plateau: Neglected but vital contribution of the nongrowing season [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(8): 1475-1490. doi:10.1002/2015JG003043
- Tang J, Yin H, Wang G, et al. 2010. Methane microseepage from different sectors of the Yakela condensed gas field in Tarim Basin, Xinjiang, China [J]. *Applied Geochemistry*, 25(8): 1257-1264. doi:10.1016/j.apgeochem.2010.05.011
- 唐志伟, 张俊, 邓艾兴, 等. 2022. 我国稻田甲烷排放的时空特征与减排途径 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 30(04): 582-591. Tang Zhiwei, Zhang Jun, Deng Aixing, et al. 2022. Spatiotemporal characteristics and reduction approaches of methane emissions from rice fields in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 30(4): 582–591. doi:10.12357/cjea.20210887
- Veefkind J P, Aben I, McMullan K, et al. 2012. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications [J]. *Remote Sensing of Environment*, 120: 70-83. doi:10.1016/j.rse.2011.09.027
- Wang F, Maksyutov S, Janardanan R, et al. 2022. Atmospheric observations suggest methane emissions in north-eastern China growing with natural gas use [J]. *Scientific Reports*, 12(1): 18587. doi:10.1038/s41598-022-19462-4
- 王骏, 王士同, 邓赵红. 2012. 聚类分析研究中的若干问题 [J]. *控制与决策*, 27(03): 321-328. Wang Jun, Wang Shitong, Deng Zhaohong. 2012. Survey on challenges in clustering analysis research [J]. *Control and Decision (in Chinese)*, 27(03): 321-328. doi:10.13195/j.cd.2012.03.4.wangj.013
- 王明星, 李晶, 郑循华. 1998. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理 [J]. *大气科学*, 22(4): 600-612.

- Wang Mingxing, Li Jing, Zheng Xunhua. 1998. Methane Emission and Mechanisms of Methane Production, Oxidation, Transportation in the Rice Fields [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22(4): 600-612. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.04.20
- 邬磊. 2018. 双季稻田转菜地对生态系统碳平衡和温室气体排放的影响研究 [D]. 华中农业大学博士学位论文. Wu Lei. 2018. Effects of land-use conversion from double-rice to vegetable cultivation on net ecosystem carbon budget and greenhouse gas emissions [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Huazhong Agricultural University.
- 熊效振, 沈壬兴, 王明星, 等. 1999. 太湖流域单季稻的甲烷排放研究 [J]. 大气科学, (01): 10-19. Xiong Xiaozhen, Shen Renxing, Wang Mingxing, et al. 1999. Methane Emission from Rice Paddy Field of Taihu Area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 23(1): 9-18. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.01.02
- Xu P, Liao Y, Zheng Y, et al. 2019. Northward shift of historical methane emission hotspots from the livestock sector in China and assessment of potential mitigation options [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 272-273: 1-11. doi:10.1016/j.agrformet.2019.03.022
- Xu Z, Chen Y, Shan W, et al. 2023. Study of Methane Emission and Geological Sources in Northeast China Permafrost Area Related to Engineering Construction and Climate Disturbance Based on Ground Monitoring and AIRS [J]. Atmosphere, 14(8): 1298. doi:10.3390/atmos14081298
- 徐智超, 陈匀杉, 单炜, 等. 2025. 2003~2022 年中国东北对流层大气甲烷浓度时空分布与地质排放影响研究 [J]. 气候与环境研究, 30(01): 77-93. Xu Zhichao, Chen Yunshan, Shan Wei, et al. 2025. Study on Spatio-Temporal Distribution Mechanism of Methane Concentration and Geological Release Sources in the Atmospheric Troposphere across Northeast China during 2003-2022 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 30 (1): 77-93. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2024.23008
- 姚璐, 杨东旭, 蔡兆男, 等. 2022. 面向我国碳中和、碳达峰的大气甲烷观测卫星现状与发展趋势分析 [J]. 大气科学, 46(06): 1469-1483. Yao Lu, Yang Dongxu, Cai Zhaonan, et al. 2022. Status and Trend Analysis of Atmospheric Methane Satellite Measurement for Carbon Neutrality and Carbon Peaking in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(6): 1469-1483. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2207.22096
- 余锋, 李思宇, 邱园园, 等. 2022. 稻田甲烷排放的微生物学机理及节水栽培对甲烷排放的影响 [J]. 中国水稻科学, 36(1): 1-12. Yu Feng, Li Siyu, Qiu Yuanyuan, et al. 2022. Microbiological Mechanism

of Methane Emission in Paddy Field and Influence of Water-saving Cultivation on Methane Emission [J]. Chinese Journal of Rice Science (in Chinese), 36(1): 1-12. doi:10.16819/j.1001-7216.2022.201202

Yuan Y, Dai X, Wang H, et al. 2016. Effects of land-use conversion from double rice cropping to vegetables on methane and nitrous oxide fluxes in southern China [J]. PLoS One, 11(5): e0155926. doi:10.1371/journal.pone.0155926

中华人民共和国生态环境部. 2023. 生态环境部等 11 部门关于印发《甲烷排放控制行动方案》的通知 [R]. 环气候〔2023〕67 号. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2023. Notice on Issuing the "Action Plan for Methane Emission Control" [R]. MEE Climate [2023] No. 67.