李梦圆,李 军,陈 伟,等.基于 TROPOMI 的华北地区 CH_4 浓度时空变化与数据对比 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5378-5389.
Li M Y, Li J, Chen W, et al. Spatiotemporal variations and data comparison of ch$_4$ concentrations in north china based on TROPOMI [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5378-5389.

基于 TROPOMI 的华北地区 CH_4 浓度时空变化与数据对比

李梦圆[1,2],李 军[1,2*],陈 伟[2],解北京[3],张成业[1,2],丁雅欣[2],黄月军[4] (1.中国矿业大学(北京)内蒙古研究院,内蒙古 鄂尔多斯 017010；2.中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083；3.中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院,北京 100083；4.国能北电胜利能源有限公司,内蒙古 锡林浩特 026000)

摘要：甲烷(CH_4)作为短寿命、高增温潜势的温室气体,了解其浓度分布和变化对我国实现“双碳”目标至关重要.本研究利用 Google Earth Engine 平台和德国 Bremen 大学分别基于 TROPOMI 卫星生产的甲烷浓度产品,系统分析我国华北地区甲烷浓度的分布情况和变化规律,并对两种数据的质量进行对比分析.结果表明,自 2019 年至 2023 年,华北地区的甲烷浓度呈上升趋势,其中 Offline Methane 数据从 1850.25×10^{-9} 上升到 1899.15×10^{-9},增长 48.90×10^{-9};Level 2XCH$_4$ 数据从 1860.13×10^{-9} 上升到 1909.60×10^{-9},增长 49.47×10^{-9};天津市和河北省的甲烷浓度相对较高,内蒙古自治区的甲烷浓度相对较低;甲烷浓度异常高值主要分布在河北省和山西省;两种数据之间具有较高的相关性(r 为 0.92),与香河站数据的相关性均大于 0.85,两种数据均能较好地反映地面甲烷浓度.Offline Methane 数据可提供可视化下载和高空间分辨率,但数据缺失较多,实际应用中可以采用数据融合等方法进行插补;Level 2XCH$_4$ 数据空间分辨率较低但覆盖度高,可以根据研究区大小进行网格化处理,适合大区域研究.

关键词：甲烷(CH_4)；时空变化；TROPOMI 产品数据；华北地区
中图分类号：X831 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)10-5378-12

Spatiotemporal variations and data comparison of CH_4 concentrations in north China based on TROPOMI.

LI Meng-yuan[1,2], LI Jun[1,2*], CHEN Wei[2], XIE Bei-jing[3], ZHANG Cheng-ye[1,2], DING Ya-xin[2], HUANG Yue-Jun[4] (1.Inner Mongolia Research Institute, China University of Mining and Technology-Beijing, Erdos 017010, China；2.College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China；3.College of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China；4.Guoneng Beidian Shengli Energy Co., Ltd., Xilinhot 026000, China). *China Environmental Science*, 2025,45(10)：5378~5389

Abstract：Methane (CH_4), as a short-lived and high-warming potential greenhouse gas, understanding its concentration distribution and changes is crucial for China to achieve its “Dual Carbon” goal. This study systematically analyzed the distribution and changing pattern of methane concentration in North China utilizing methane concentration products produced by the Google Earth Engine platform and the University of Bremen, Germany, based on the TROPOMI satellite data, and conducted a comparative analysis of the quality of the two datasets. The results demonstrate that the methane concentrations in North China exhibited an increasing trend from 2019 to 2023. Specifically, the Offline Methane data rose from 1850.25×10^{-9} to 1899.15×10^{-9}, representing an increase of 48.90×10^{-9}, while the Level 2XCH$_4$ data rose from 1860.13×10^{-9} to 1909.60×10^{-9} with an increase of 49.47×10^{-9}. The methane concentration was relatively high in Tianjin and Hebei Province, while that in the Inner Mongolia Autonomous Region was relatively low. The anomalously high methane concentrations were mainly distributed in Hebei and Shanxi provinces. A strong correlation between the two datasets was observed (r=0.92). Both datasets demonstrated a correlation greater than 0.85 with data from the Xianghe station, indicating that both datasets can effectively reflect the ground-level methane concentration. The Offline Methane data can provide visual downloads and high spatial resolution, but there are many data gaps. In practical applications, data fusion and other interpolation methods can be employed to fill these missing observations. The Level 2XCH$_4$ data has lower spatial resolution but higher coverage, and can be processed by gridding based on the size of the study area, making it suitable for large-scale research.
Key words：methane(CH_4)；temporal and spatial variations；TROPOMI product data；North China

我国宣布到 2030 年实现碳排放达峰、到 2060 年实现净零碳排放的“双碳”战略[1-2].甲烷作为全球第二大温室气体,其增温效应远高于二氧化碳[3-4],且为短寿命气候强迫因子,因此,减少甲烷排放能在短期内迅速降低气候变化的影响[5].华北地区作为

收稿日期：2025-01-03
基金项目：鄂尔多斯市科技计划项目(YF20250255);丝绸之路经济带创新驱动发展试验区、乌昌石国家自主创新示范区科技发展计划项目(2023LQY02);教育部“春晖计划”国际合作项目(202201628);中央高校基本科研业务费项目(2023ZKPYDC10)
* 责任作者, 教授, junli@cumtb.edu.cn

我国经济规模第三大的区域,其面积约占全国总面积的 10%,碳排放量约占全国的 26%[6],因此对该地区的研究可以为我国甲烷浓度的监测提供有效的数据支撑,进而助力实现“双碳”目标[7-8].甲烷排放问题一直以来都是各国学者研究的热点,卫星遥感能够高效实现大空间范围、高时间分辨率的浓度监测.随着甲烷监测卫星及数据产品增多,选择合适的数据产品对甲烷分布研究至关重要.

当前,国内外主要利用 AIRS、GOSAT 和 TROPOMI 等卫星对甲烷的时空分布进行分析[9-11].此外,许多学者也对不同卫星的数据进行了对比研究,例如,GOSAT 和 TROPOMI 卫星的甲烷柱浓度数据被曹钰等[12]进行了对比分析,并被利用总碳柱观测网进行了评估;AIRS、GOSAT 和 SCIAMACHY 的甲烷监测数据与瓦里关地面监测站数据的相关系数被 Zhang 等[13]进行了对比;GOSAT、TROPOMI、IASI 和 AIRS 卫星监测得到的甲烷浓度差异被 Ni 等[14]进行了对比,并被与排放清单进行了比较.在上述卫星中,TROPOMI 作为全球技术最先进、空间分辨率最高的大气监测光谱仪之一[15-17],已衍生出多种产品数据.然而关于不同产品数据的应用差异及其在不同场景下的优劣性研究仍较为有限.随着在轨运行时间的增加,TROPOMI 数据的应用会更加广泛,因此深入探究其衍生产品数据尤为必要.

本文利用 Google Earth Engine 平台提供的 TROPOMI 甲烷浓度离线数据集 Offline Methane,以及由德国 Bremen 大学制作的 TROPOMI 产品数据 Level 2XCH_4 and XCO v1.8,揭示华北地区甲烷浓度的时空分布以及变化规律,并通过对这两种数据的分析比对,探究二者的差异.

1　材料与方法

1.1　材料

1.1.1　研究区概况　研究区为华北地区,位于 34°34′N~53°23′N,87°12′E~126°04′E,包括北京、天津两市,河北、山西两省,以及内蒙古自治区,研究区如图 1 所示.华北地区总人口超 1.7 亿,总面积约 115.7 万 km^2,作为重要的工业基地、煤炭主生产地和消耗区,碳排放量约占全国碳排放量的 26%[6].此外,华北地区还包含多种人类活动,是中国北方经济规模最大的地区.

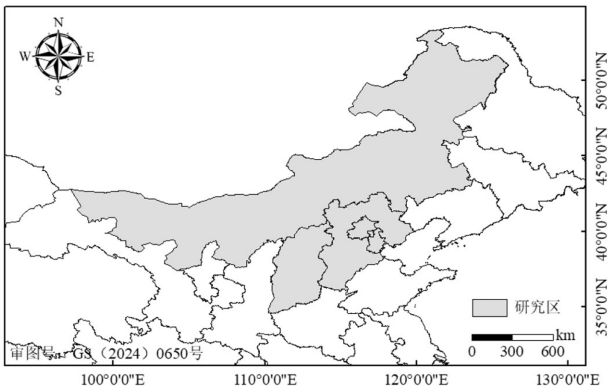


图 1　研究区概况

Fig.1　Overview of the study area

1.1.2　研究数据　选择 Google Earth Engine 平台上的 Sentinel-5P OFFL CH_4: Offline Methane 数据[18-19],和德国 Bremen 大学环境物理研究所网站提供的甲烷浓度数据 Level 2$XCH_4$and XCO v1.8,选取时间范围为自 2019 年 1 月~2023 年 12 月.数据详细信息如表 1 所示.

表 1　研究数据信息

Table.1　Datasets information of this study

	Offline Methane	Level 2$XCH_4$and XCO v1.8
处理方法	Harpconvert	加权函数修正差分光学吸收光谱法(WFM-DOAS)[21]
时间范围	2019 至今	2017 至今
像素大小	1113.2m(≈0.01°)	0.2°×0.2°
数据格式	Tiff	NetCDF
获取地址	Google Earth Engine 平台 https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_OFFL_L3_CH4	德国不来梅大学环境物理研究所网站 https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/products/tropomi_wfmd/index.php

此外,本文选择位于河北省廊坊市的香河大气本底监测站,获取其 2019~2023 年的甲烷浓度数据作为验证数据 (https://doi.org/10.14291/tccon.ggg2020.xianghe01.R0).该气象站自 2016 年投入使

用,并于 2018 年完成高分辨率 Bruker IFS 125HR 光谱仪观测系统的部署,是目前华北地区唯一对温室气体监测卫星进行地基验证的 TCCON 站点[20].

1.2 方法

1.2.1 甲烷浓度数据一致性分析 为探究 Offline Methane 数据与 Level 2XCH$_4$ 数据,以及二者与香河大气本底监测站甲烷月均值数据的一致性,利用 Pearson 相关系数对两两数据的甲烷月均值进行分析,判断其趋势的一致性,如公式(1)所示:

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Xi-\bar{X})}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Yi-\bar{Y})^2}} \tag{1}$$

式中:r 为 Pearson 相关系数; $\bar{X}$ 、$\bar{Y}$ 分别代表不同甲烷浓度数据产品 X、Y 的均值;X_i、Y_i 分别是不同甲烷浓度数据产品 X、Y 在第 i 个月的观测值.r 的范围为−1~1,若 r>0,则说明变量 X 和 Y 为正相关,越接近 1 说明其正相关性和正向一致性越强;若 r<0,则说明二者为负相关,越接近−1 说明负相关性和负向一致性越强;若 r=0,则二者无相关性和一致性[22].

1.2.2 甲烷浓度分布空间依赖性 探究甲烷浓度分布的空间依赖性,即空间自相关性,采用 Moran's I 指数、Z 得分和 P 值作为评价显著性的指标.通过计算 Moran's I 指数分析研究区内的甲烷浓度空间分布,可以得到其空间自相关性,理解其分布特征和潜在空间模式, Moran's I 指数如公式(2)所示:

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}(X_i-\bar{X})(X_j-\bar{X})}{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}} \tag{2}$$

式中:n 为甲烷浓度栅格像元个数;X_i 和 X_j 分别为 i 和 j 空间元素的甲烷浓度; $\bar{X}$ 为各个栅格像元甲烷浓度的均值;$w_{i,j}$ 为空间权重矩阵.Moran 指数 I 的值在−1~1 之间,若 I<0,则表示甲烷浓度存在负空间自相关,呈现“排斥性”依赖,相邻位置;若 I=0,则表示无自相关性,即无明显依赖性;若 I>0,则表示正自相关性,呈现依赖性[23].

1.2.3 甲烷浓度空间聚集程度 采用 Getis−Ord Gi*指数来探究甲烷浓度的空间聚集程度及局部空间特征.Getis−Ord Gi*是一种局部空间统计量,用于识别甲烷浓度在局部空间上的热点(高值)和冷点(低值)分布,即高值和低值的空间聚集,其计算如公式(3)所示:

$$G_i^*=\frac{\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}X_j-\bar{X}\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}X_j^2}{n}-\bar{X}^2}\sqrt{\frac{\left[n\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}-\left(\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}\right)\right]}{n-1}}} \tag{3}$$

式中:n 为甲烷浓度栅格像元个数;X_i 和 X_j 分别为 i 和 j 空间元素的甲烷浓度; $\bar{X}$ 为各个栅格像元甲烷浓度的均值;$w_{i,j}$ 为空间权重矩阵.当 Gi*>0 时,表示甲烷浓度呈高值聚集状态,即为热点区;当 Gi*<0 时,表示甲烷浓度呈低值聚集状态,即为冷点区[24].

1.2.4 甲烷浓度聚集区异常值 为了进一步细化对甲烷浓度的分析,利用异常值分析对甲烷浓度较高的位置进行检测,可以对甲烷浓度的热点区域进行更深入的分析,判定异常值的公式如下所示:

$$X_0=X-X_{\mathrm{m}} \tag{4}$$

式中:X_0 为甲烷浓度异常值;X 为原始甲烷浓度值;X_{m} 为研究区内的甲烷浓度中值[25].

1.2.5 甲烷浓度重心迁移分析 为探究甲烷浓度分布重心的变化轨迹,利用式(5)计算两种数据每年的甲烷浓度重心:

$$\begin{aligned}X&=\sum(x_i\cdot w_i)/\sum w_i\\Y&=\sum(y_i\cdot w_i)/\sum w_i\end{aligned} \tag{5}$$

式中:X 和 Y 为重心的坐标;x_i 和 y_i 分别为第 i 个空间单元的坐标;w_i 为第 i 个空间单元的甲烷浓度.通过计算不同年份内的重心并连接形成迁移轨迹,可以反映甲烷浓度空间分布的变化趋势[26].

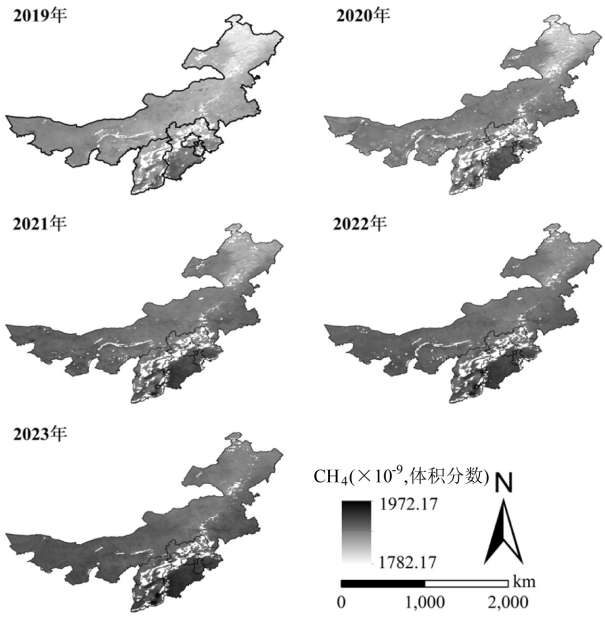
2 结果与分析

2.1 华北地区甲烷浓度时间变化分析

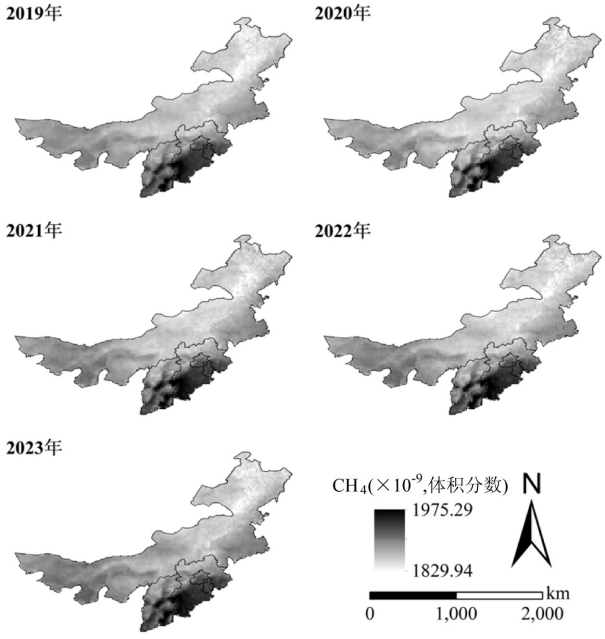
从 2019~2023 年的甲烷浓度年均值变化来看,研究区的甲烷浓度呈现出明显的逐年上升状态, Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据的甲烷浓度变化情况如图 2 所示.

其中 Offline Methane 数据由 2019 年的 1850.25×10^{-9},体积分数(以下简化为×10^{-9})上升到 2023 年的 1899.15×10^{-9},共增长 48.90×10^{-9},增长速率为 9.78×10^{-9}/a;Level 2XCH$_4$ 数据由 2019 年的 1860.13×10^{-9} 上升到 2023 年的 1909.60×10^{-9},共增长 49.47×10^{-9},增长速率为 9.89× 10^{-9}/a,二者的增长速率

接近.从整体来看,2020 年是两种数据的拐点,2020 年前 Offline Methane 数据的增长速率较高,2020 年后 Level 2XCH$_4$ 数据的增长速率较高,二者在 2020 年均达到了 1871×10^{-9},此后 Level 2XCH$_4$ 数据的浓度始终高于 Offline Methane 数据,年均值变化曲线如图 3(a)所示.



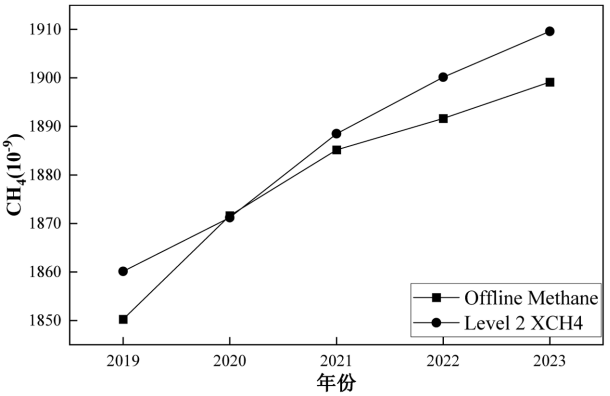
(a) Offline Methane 数据甲烷浓度分布



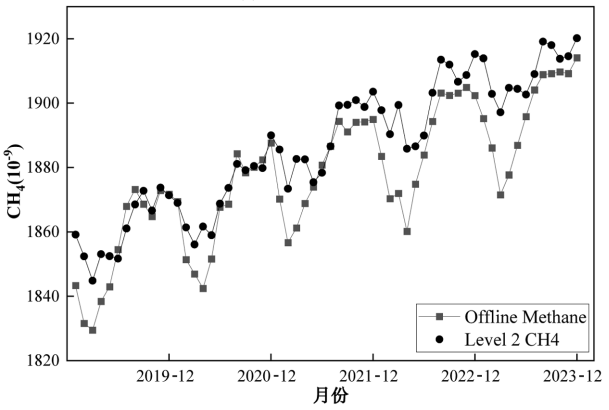
(b) Level 2XCH$_4$ 数据甲烷浓度分布

图 2　2019~2023 年研究区 Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据甲烷浓度分布

Fig.2　Distribution of methane concentrations from Offline Methane data and Level 2XCH$_4$ data in the study area (2019~2023)



(a) 年均值变化



(b) 月均值变化

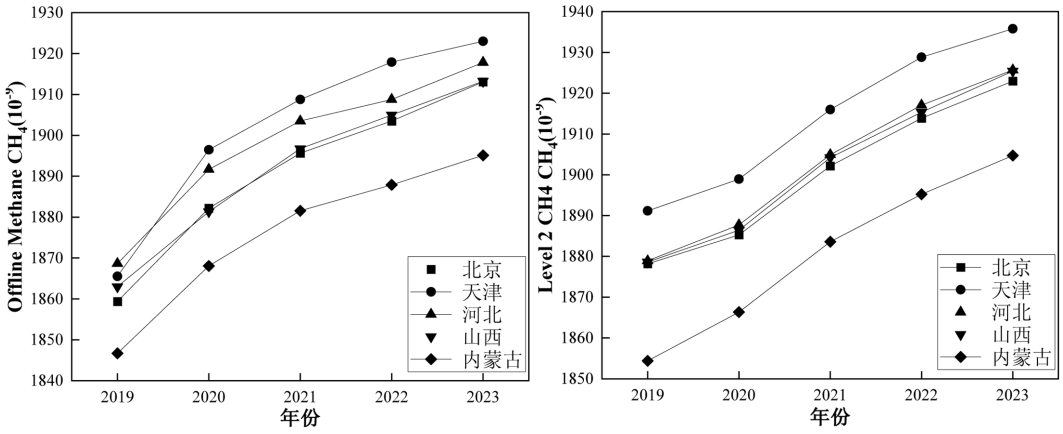
图 3　2019~2023 年研究区甲烷浓度年均值和月均值变化

Fig.3　Annual and monthly average methane concentrations in the study area (2019~2023)

从 2019~2023 年的甲烷浓度月均值变化来看,研究区呈现出较强的季节变化特征,甲烷浓度在 8~12 月较高,在 2~6 月较低,整体呈现波动上升的趋势.定义季节振幅为一年中每月浓度最大值与最小值之差[27],其中,Offline Methane 数据 2019 年至 2023 年的季节振幅为 43.73×10^{-9}、45.19×10^{-9}、38.35×10^{-9}、44.73×10^{-9}、42.60×10^{-9},呈现波动趋势,年均下降 0.23×10^{-9},平均季节振幅为 42.85×10^{-9};Level 2XCH$_4$ 数据 2019~2023 年的季节振幅为 28.94×10^{-9}、33.90×10^{-9}、30.15×10^{-9}、29.41×10^{-9}、23.04×10^{-9},呈现先上升后下降的趋势,年均下降 1.18×10^{-9},平均季节振幅为 28.87×10^{-9}.两种数据的甲烷浓度月均值变化如图 3(b)所示.

比较分析华北地区各省的甲烷浓度发现,天津市的甲烷浓度最高,内蒙古自治区的甲烷浓度最低.根据 Offline Methane 数据显示,河北省的浓度略高于山西省和北京市,后两者的浓度非常接近,内蒙古自治区的浓度与其他地区的差距随着时间推移不断增加;根据 Level 2XCH$_4$ 数据显示,河北省、山西省

和北京市的甲烷浓度非常接近,而内蒙古自治区的甲烷浓度远低于其余地区,但是随着时间推移,其差距在缩小.华北地区五个省市的甲烷浓度年平均变化如图 4 所示.

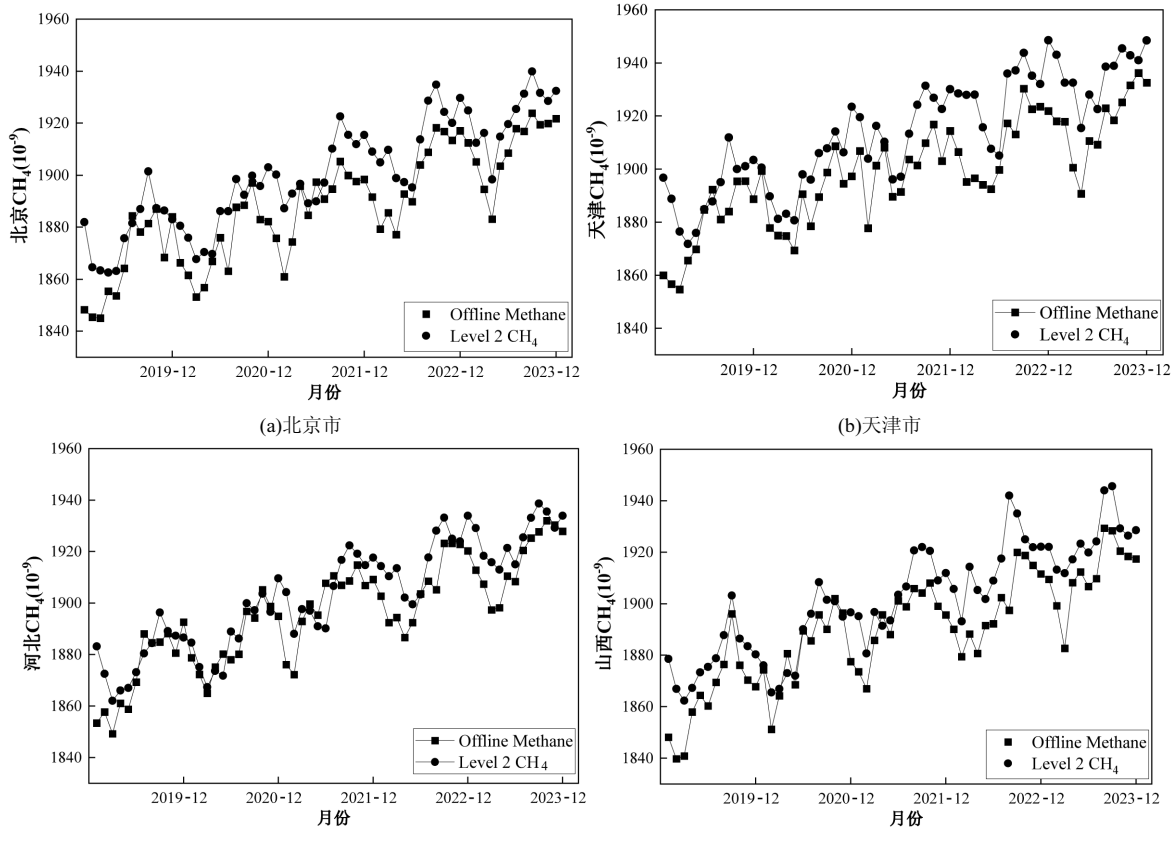


(a)Offline Methane 数据 (b)Level 2XCH$_4$ 数据

图 4 2019~2023 年华北五省甲烷浓度年均值变化对比

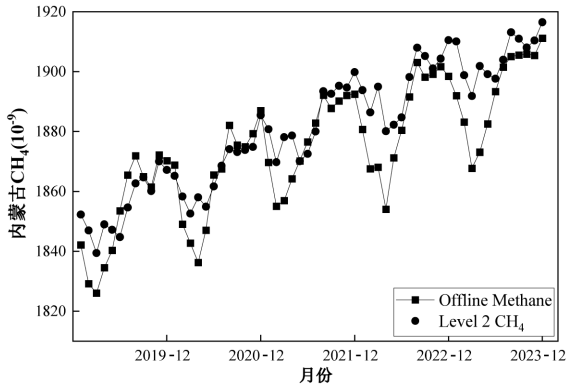
Fig.4 Comparison of annual average methane concentrations of five provinces in North China (2019~2023)

进一步细化对比华北五省甲烷浓度月均值变化,结果如图 5 所示,可以发现,2019 年 1 月~2021 年 7 月两种数据的变化趋势存在较大差异,Offline Methane 数据个别月份的浓度高于 Level 2XCH$_4$ 数据;2021 年 8 月~2023 年 12 月,两种数据的变化趋势相近,Level 2XCH$_4$ 数据持续高于 Offline Methane 数据浓度.分析各省甲烷浓度变化发现,京津冀地区的两种甲烷浓度在 2021 年 8 月之后的变化幅度相近,而山西省和内蒙古自治区的变化幅度相差较大.



(a)北京市 (b)天津市

(c)河北省 (d)山西省



(e)内蒙古自治区

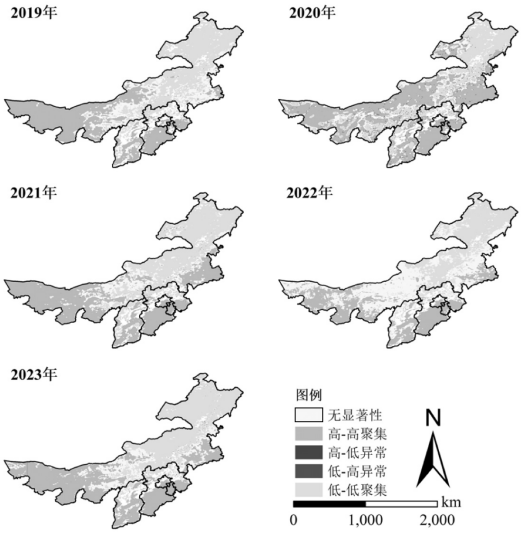
图 5　2019~2023 年各省甲烷浓度月均值变化对比

Fig.5　Comparison of monthly average methane concentrations by province (2019~2023)

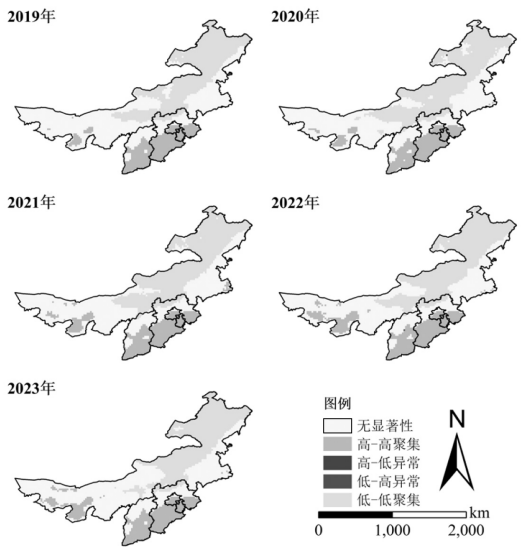
2.2　华北地区甲烷浓度空间变化分析

2.2.1　空间依赖性与聚集程度分析　利用 Moran's *I* 指数对华北地区甲烷的空间依赖性特征进行分析,探究该地区的甲烷浓度分布特点.分别对两种数据从 2019~2023 年各年的甲烷浓度年均值进行分析,其中 Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据的空间自相关分析结果如图 6 所示.

从图 6(a)可以看出,华北地区的东北部以低-低聚集为主,而西南部则以高-高聚集为主,研究区几乎没有出现高-低或低-高异常区域,这与甲烷浓度实际分布相符.内蒙古自治区东北部和中部的甲烷浓度较低,所以低-低聚集区域分布较多;而天津市、河北省南部、山西省南部以及内蒙古自治区西部的甲烷浓度较高,所以高-高聚集区域分布较多,与研究区甲烷浓度空间分布相一致.从时间变化来看,2019~2023 年间,研究区内的低-低聚集区域波动变化趋势,而高-高聚集区域呈现先增后减再增的变化趋势. 对 Level 2XCH$_4$ 数据利用 Moran's *I* 指数进行空间自相关分析与冷热点分析.从图 6(b)可以看出,Level 2XCH$_4$ 数据整体分布趋势与 Offline Methane 数据一致,东北部主要为低-低聚集区域,南部和西部的小部分区域主要为高-高聚集区域,个别像素点出现高-低异常或者低-高异常区域,可忽略不计.从空间分布来看,高-高聚集区域主要集中在天津市、北京市以及河北省和山西省的南部,在内蒙古自治区的西南部也有少量分布,低-低聚集区域主要集中在内蒙古东北部和中部地区.从时间变化来看,2019~2023 年研究区内的高-高聚集区域呈现略微增长的趋势,而低-低聚集区在 2020 年后持续减少,这与甲烷浓度的时间变化趋势相同.



(a) Offline Methane 数据空间自相关分析结果



(b) Level 2XCH$_4$ 数据空间自相关分析结果

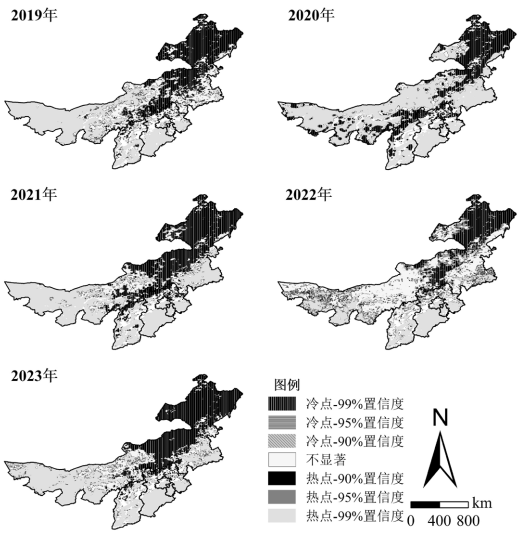
图 6　2019~2023 年 Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据空间自相关分析结果

Fig.6　Spatial autocorrelation analysis results of Offline Methane Data and Level 2XCH$_4$ Data (2019~2023)

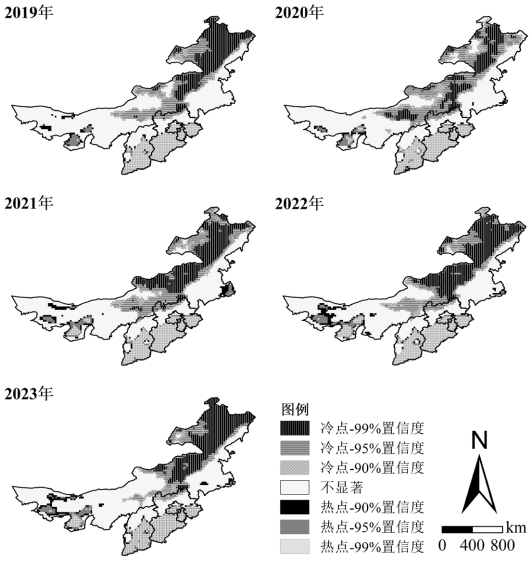
其中,低-低聚集区域主要集中在内蒙古自治区中部变化,高-高聚集区域在内蒙古自治区东南部、天津市、山西省南部呈现增长的趋势,在内蒙古自治区西部波动,这与甲烷浓度的时间变化规律相契合.总体而言,2019~2023 年研究区内整体甲烷浓度在逐年升高,高-高聚集区域和低-低聚集区域虽有波动变化,但前后差异不大,并且主要分布区域未发生变化.

如图 7(a)所示,Offline Methane 数据中的甲烷浓度冷热点分布展现了明显的时空分布特征.从空间分布来看,冷热点分布的位置与聚集区域高度一致,主要表现为东北部的冷点区域和西南部的热点区域:从时间上来看,自 2019 年起,冷点区域和热点区域呈现波动变化,对 2019 年和 2023 年的冷热点区域占比进行比较发现,2023 年相较于 2019 年,90%和 95%置信度的冷点区域减少,99%置信度的冷点区域有所增加并且占比最多,而不同置信度的热点区域均有一定增加,其中 99%置信度的热点区域占比最多.

Level 2XCH$_4$ 数据的甲烷浓度冷热点分布如图 7(b)所示,从图中可以看出,冷热点分布区域与低-低聚集区域和高-高聚集区域位置相符,并且在内蒙古西南部的热点区域呈现略微增多的趋势.Level 2XCH$_4$ 数据中位于 90%和 95%置信度的冷热点区域占比高于 Offline Methane 数据,不同置信度的热点区域均呈现逐年增长的趋势;冷点区域中,99%置信度自 2020 年后主要为增长趋势,而 90%和 95%置信度区域自 2020 年后为减少趋势.



(a) Offline Methane 数据数据热点分析结果



(b) Level 2XCH$_4$ 数据数据热点分析结果

图 7 2019~2023 年 Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据热点分析结果

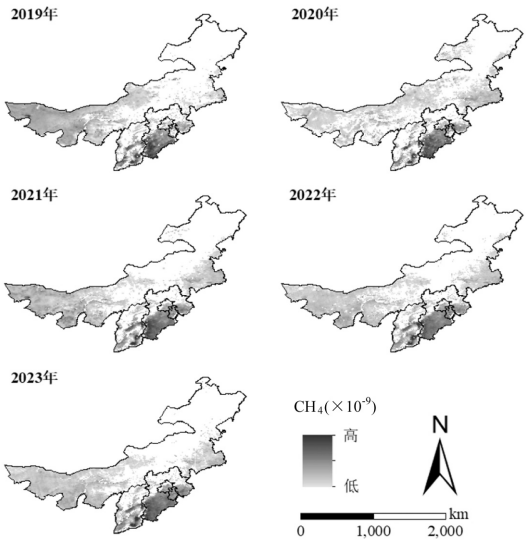
Fig.7 Spatial hotspot analysis results of Offline Methane Data and Level 2XCH$_4$ Data (2019~2023)

2.2.2 聚集区异常值分析 利用异常值分析探究 2019~2023 年研究区内的甲烷浓度异常值分布情况,分析结果分别如图 8(a)和图 8(b)所示.

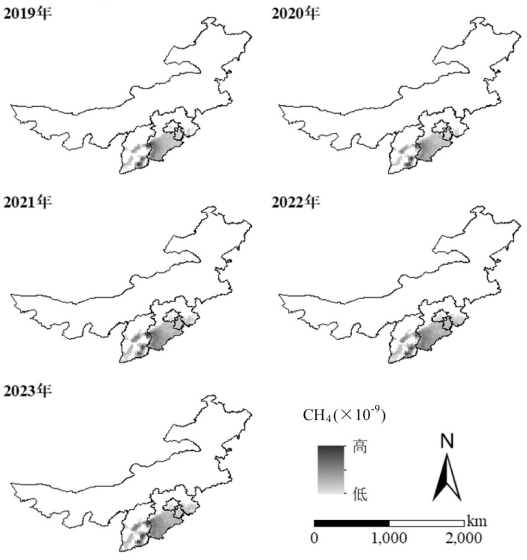
从 Offline Methane 数据图中可以看到,甲烷浓度异常值在华北地区内各省市均有分布,其中,内蒙古自治区的甲烷异常值主要分布在西部和东南部,甲烷浓度呈现浅灰色,表明该地区的甲烷异常值较低;而河北省和山西省内部分区域的甲烷浓度呈现深灰色,表明该地区的甲烷异常值较高;此外,灰色区域主要集中在河北省东部、山西省西南部、内蒙古自治区西部以及天津市和北京市的东南部,表明这些区域的甲烷异常值处于中等水平.结合各年的甲烷浓度图像进行分析,可以发现河北省南部和山西省中部和东南部的甲烷浓度持续处于高异常值区域,天津市的甲烷异常值呈现逐年升高的趋势.但是由于 Offline Methane 数据本身存在缺失,所以北京市北部区域、河北省北部区域和山西省内的空白区域并不代表该区域的甲烷浓度没有异常值.

从 Level 2XCH$_4$ 数据图中可以看到, 甲烷浓度的异常值主要集中在研究区南部,河北省和山西省的部分地区是异常值较高的主要分布区,天津市的异常值较低.与 Offline Methane 数据不同的是,内蒙古自治区并没有出现甲烷异常值的分布,河北省的

甲烷高异常值主要分布在西南部,天津市内部的异常值水平较低,Level 2XCH$_4$ 数据的异常值整体较 Offline Methane 数据更低.此外,由于 Level 2XCH$_4$ 数据本身的完整性更高,没有数据缺失现象,因此可以发现,山西省内的异常值颜色逐渐加深,表明其异常值浓度逐年升高,山西省东南部的异常值浓度出现极高点;河北省内异常值的分布也呈现由东北向西南逐渐增高的趋势,并且其异常值也在逐年升高;北京市南部区域和河北省东部的小部分区域随着时间推移也出现了异常值的分布,在图中呈现浅灰色,说明其甲烷浓度异常值较低.



(a) Offline Methane 数据异常值分析结果



(b) Level 2XCH$_4$ 数据异常值分析结果

图 8　2019~2023 年 Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据异常值分析结果

Fig.8　Analysis results of outliers in Offline Methane Data and Level 2XCH$_4$ Data (2019~2023)

2.3　浓度较高省份针对性分析

结合前文分析发现,华北地区浓度数值最高的省份为天津,但是结合图像分析发现,热点和异常值在河北省的南部也有较为集中的分布,但是由于河北北部的浓度数值偏低,整体平均浓度略低于天津,所以本节对天津市和河北省进行重点分析,并且由于 Level 2XCH$_4$ 数据的完整性更高,与 Offline Methane 数据的相关性较高,为分析更加准确,选用 Level 2XCH$_4$ 数据.

2.3.1　天津市甲烷浓度时空变化分析　在天津市中,甲烷浓度的异常值主要分布在中部和南部,并且中部区域的浓度异常值呈现从西向东移动的趋势,如图 9 所示.这一变化与天津市“十四五”期间城市空间布局调整相吻合,根据 2021 年《天津市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要的通知》中提出做强中部区域“津城”的同时大力推进市东部的滨海新区建设,全面提升“滨城”的综合实力,因此甲烷浓度热点东移可能与产业布局东移有关.天津市在推进建设的同时也严格执行国家的低碳政策,完善空间治理体系,节能减排,根据 2020~2023 年《天津市生态环境统计年报》中二氧化硫、氮氧化物等大气污染物排放量减少,说明天津市开展了有效的治理,由于甲烷排放与上述污染物具有同源性,因此甲烷异常值区域也呈现出恢复正常的趋势.

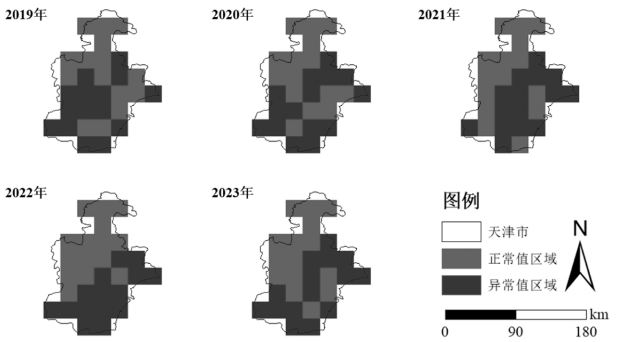


图 9　2019~2023 年天津市甲烷浓度异常值分析结果

Fig.9　Analysis results of outliers in Tianjin (2019~2023)

2.3.2　河北省甲烷浓度时空变化分析　从 2019 年到 2023 年,河北省甲烷浓度异常值稳定分布在南部和东部区域,结果如图 10 所示.

通过空间自相关分析可以发现,河北省的甲烷浓度高值聚集区主要分布在南部,即石家庄、邢台和邯郸等市区,低值聚集区分布在北京北侧,即张家

口、承德两市,并且在研究期间其浓度分布未发生明显改变,空间自相关分析结果如图 11 所示.

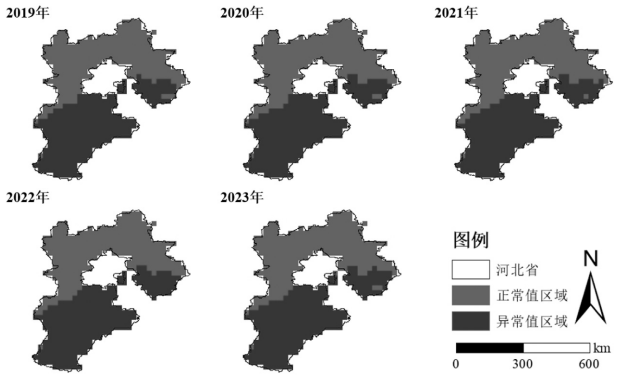


图 10 2019~2023 年河北省甲烷浓度异常值分析结果

Fig.10 Analysis results of outliers in Hebei (2019~2023)

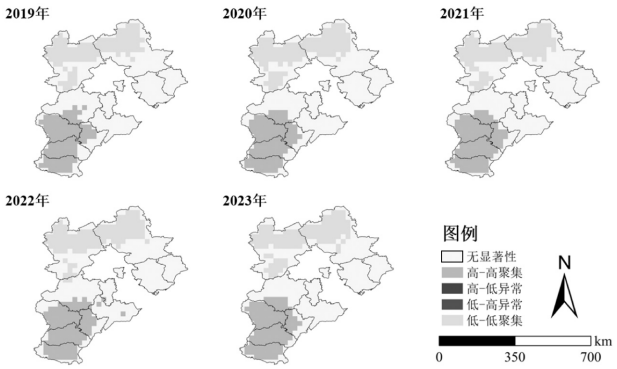


图 11 河北省甲烷浓度空间自相关分析结果

Fig.11 Spatial autocorrelation analysis results of Hebei (2019~2023)

河北省是我国人口大省,根据《河北统计年鉴》结果表明,其人口主要集中在河北省南部的石家庄、保定、邯郸、沧州以及东部的唐山市,从图中可以分析出甲烷异常值的分布区域与人口数量具有较高的相关性.除此之外,甲烷异常值分布也与河北省的工业重心有密切联系,根据《河北省生态环境保护“十四五”规划》表明,新能源、煤化工、钢铁和重型装备等先进制造业主要分布在河北省南部的石家庄、邯郸、沧州等市区和东部的唐山市,而根据河北省北部的张家口以及承德主要生产可再生能源以及清洁能源.图中还可以发现,保定市虽然在人口数量和工业类型都偏向于高甲烷浓度,并未出现甲烷异常值区域.根据《保定市生态环境保护“十四五”规划》和《京津冀协同发展规划纲要》,保定市的定位主要着力于建设京津冀一体化,建设国家新能源与先进制造业基地、新型城镇化与乡村振兴示范区,大力推进保定的生态文明建设,取得了初步成效.

2.4 数据一致性分析和质量对比

2.4.1 一致性分析 为了进一步比较 Offline Methane 数据和 Level 2XCH_4 数据的浓度相关性,对两种数据从 2019 年 1 月~2023 年 12 月的月平均浓度进行相关性分析,以 Level 2XCH_4 为行数据,Offline Methane 为列数据,分析结果如图 12 所示.

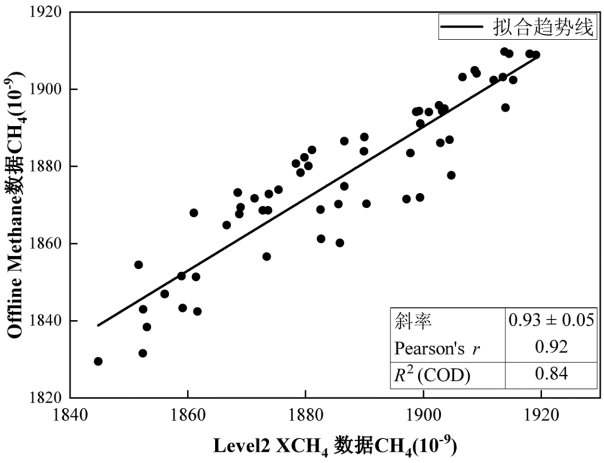


图 12 Offline Methane 数据和 Level 2XCH_4 数据相关性分析结果

Fig.12 Correlation analysis between Offline Methane data and Level 2XCH_4 data

从图 12 可以看出,Offline Methane 数据和 Level 2XCH_4 数据的相关性较高,二者线性关系的斜率为 0.93:对二者进行相关性分析,其皮尔逊相关性系数 r 为 0.92,并且通过了置信度为 0.01 的显著性检验,说明两种数据具有较强的相关性.

将 Offline Methane 数据和 Level 2XCH_4 数据分别与香河大气本底观测站的监测数据的相关性进行对比,由于可获取到的香河站数据仅到 2023 年 5 月,所以只对 2019 年 1 月~2023 年 5 月的数据进行相关性分析,以香河站数据为自变量,Offline Methane 和 Level 2XCH_4 数据为因变量,结果如图 13 所示.

从图中可以看出,相较于 Level 2XCH_4 数据,Offline Methane 数据与香河站数据的相关性更好,通过相关性分析可以发现,Offline Methane 数据与香河站数据的皮尔逊相关性系数为 0.90,Level 2XCH_4 数据与香河站数据的皮尔逊相关性系数为 0.86,均显示出较强的相关性,并且均通过了置信度为 0.01 的显著性检验.

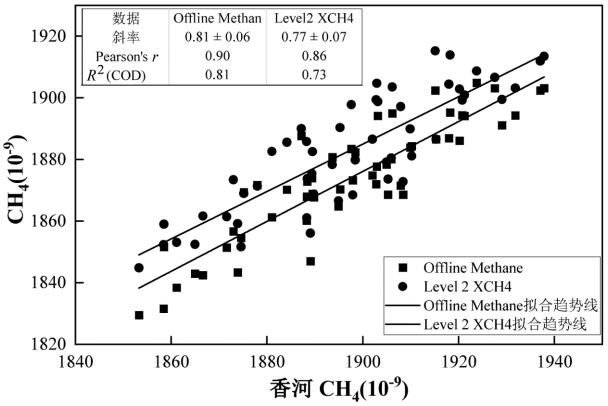


图 13　Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据与香河站数据相关性分析结果

Fig.13　Correlation analysis of Offline Methane data and Level 2XCH$_4$ data with data from Xianghe station

由此可见,Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据均能较好地表征甲烷浓度的变化情况,且二者的相关性较高,差异较小,Offline Methane 数据的变化趋势略更接近地面观测结果.

2.4.2　数据质量对比　根据上文分析可以发现,与 Level 2XCH$_4$ 数据相比,Offline Methane 数据的缺失较多,存在很多无数据区域.为量化缺失率,对研究区的年均值影像创建像元大小的渔网,除去图像中不包含栅格数值的网格,并将边界可能会存在的不包含栅格数值的网格,一并统计为缺失,这可能会导致结果略有高估.统计结果如表 2 所示:

表 2　Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据缺失率

Table.2　Missing data percentages for Offline Methane data and Level 2XCH$_4$ data

年份	Offline Methane 数据(%)	Level 2XCH$_4$ 数据(%)
2019	15.50	0.39
2020	15.95	0.39
2021	13.71	0.39
2022	13.06	0.39
2023	12.25	0.39

结合表中缺失率与实际遥感影像可以发现,Level 2XCH$_4$ 数据从 2019~2023 年均缺失 0.39%,这是由于其像元尺寸较大,导致研究区边界部分像元数值缺失;而 Offline Methane 数据的缺失率随着时间推移逐年降低,但是缺失率相对 Level 2XCH$_4$ 数据较高,2019~2023 年期间均大于 10%.因此,相对于 Offline Methane 数据,Level 2XCH$_4$ 数据的完整性更高,更适合用于较大范围的分析.

2.4.3　重心分析　对两种数据的重心位置变化进行分析,结果如图 14 所示,左图和右图分别为 Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 的重心分布.

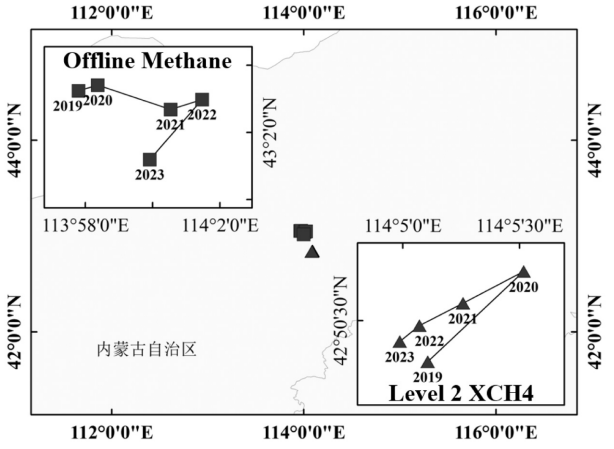


图 14　Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据重心分析结果

Fig.14　Analysis results of gravity center of Offline Methane data and Level 2XCH$_4$ data

从图中可以看出,Offline Methane 数据的重心位于 Level 2XCH$_4$ 数据重心的西北侧,二者重心均在内蒙古自治区内.从 2019~2023 年,Level 2XCH$_4$ 数据的浓度重心的位置变化较小,基本保持稳定;而 Offline Methane 数据的重心变化相对较大,2019 年到 2020 年,浓度的重心向北移动,从 2020 年到 2023 年,浓度重心持续向南移动.由此可见,Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据在表征浓度变化的细节上存在一定的差异.

3　讨论

3.1　华北地区及各省的甲烷时空分布特征和变化规律

综上所述,从时间变化来看,2019~2023 年间,华北地区的甲烷浓度呈现逐年上升的趋势,具体而言,Offline Methane 数据由 1856.08×10^{-9} 上升到 1903.66×10^{-9},共增长 47.58×10^{-9},年均增长速率为 9.52×10^{-9};Level 2XCH$_4$ 数据由 1867.58×10^{-9} 上升至 1914.63×10^{-9},共增长 47.05×10^{-9},年均增长速率为 9.41×10^{-9}.同时,甲烷浓度表现出明显的季节变化趋势,秋季和冬季(8~12 月)的浓度较高,春季和夏季(2~6 月)浓度较低.

从空间变化来看,华北地区南部的甲烷浓度明显高于北部,高浓度区主要分布在研究区南部,低浓度区主要分布在研究区北部,具体而言,内蒙古自治

区的甲烷浓度相较于其他地区较低,而内蒙古自治区内东北部和中部区域的甲烷浓度相对最低;河北省和山西省南部、天津市的甲烷浓度相较于其他地区较高,此外,内蒙古自治区西部和东南部也有较高的甲烷浓度分布.

3.2 Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据结果对比分析

通过对比两种数据的时间变化,可以发现二者的变化趋势相同,均呈现逐年增长的趋势.然而在 2020 年,两种数据出现了不同的转折点,Level 2XCH$_4$ 数据在 2020 年后的增长率加快,而 Offline Methane 数据则相反,此外,Level 2XCH$_4$ 数据的浓度数值始终高于 Offline Methane 数据.

通过对比两种数据的空间变化,发现在 Offline Methane 数据中,华北地区甲烷浓度呈现出三面(西、南、东)高-高聚集,一面(北)低-低聚集的分布,即内蒙古自治区东北部和中部主要为低-低聚集和冷点分布区域,而内蒙古自治区西南部和东南部、山西省和河北省南部、天津市主要为高-高聚集和热点分布区域;在 Level 2XCH$_4$ 数据中,低-低聚集和冷点分布区域主要分布位置与 Offline Methane 相同,但是高-高聚集和热点分布区域主要分布在南部,少量分布在西南部,Offline Methane 数据中高-高聚集区域和热点区域的占比显著高于 Level 2XCH$_4$ 数据.此外,在冷热点分布图中,Offline Methane 数据的冷热点区域的置信度较高,而 Level 2XCH$_4$ 数据的冷热点区域中置信度过渡区域相对较多,其中高置信度冷点区域呈现逐渐向研究区东北部和中部扩张的趋势,低置信度热点区域则呈现向研究区西南部略微扩张趋势.同样,两种数据的甲烷浓度异常值也在内蒙古自治区存在差异,Offline Methane 数据中,内蒙古自治区西部和东南部存在较多的低异常值分布,但是 Level 2XCH$_4$ 数据在该处并未出现异常值分布.

通过相关性分析发现,Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据的相关性较高,与香河站的相关性均大于 0.85,Offline Methane 数据的相关性略大于 Level 2XCH$_4$ 数据,二者对于华北地区的甲烷浓度的代表性均较好.然而,Offline Methane 数据的完整性相对较低,每年都有 10%以上区域的数据缺失.因此,从整体来看,利用 Level 2XCH$_4$ 数据对于华北地区的分析更加准确.此外,二者对甲烷浓度的空间分布重心存在一定的差异,Offline Methane 数据的重心位于 Level 2XCH$_4$ 数据的西北方,且位置移动轨迹明显不同.

综上所述,我国华北地区的甲烷浓度呈现逐年增长的趋势,并且天津市和河北省作为华北地区甲烷浓度较高的省市,需要继续坚持相关治理措施,以降低甲烷浓度.

作为 TROPOMI 数据的三级产品数据,Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据均能较好地反映地面甲烷浓度的真实情况,二者差异较小.但是从数据获取方式来看,Offline Methane 数据相对于 Level 2XCH$_4$ 数据更为便捷,用户可以直接从 Google Earth Engine 平台上选择所需时间和地区的数据进行下载;并且 Offline Methane 数据的像元尺寸更加精细;从数据完整性角度来看,Level 2XCH$_4$ 数据的空缺相对较少,更能满足需要覆盖度更高的研究.然而 Level 2XCH$_4$ 数据的像元尺寸较大,对研究区范围要求更大,可以考虑通过重采样的方法缩小像元尺寸,使其更适用于小范围的分析.

4 结论

4.1 华北地区甲烷浓度高-高聚集和热点区域主要集中在南部,即河北省、天津市和山西省,低-低聚集和冷点区域集中在内蒙古自治区东北部和中部,此外,西部和东南部也有少量甲烷浓度高-高聚集和热点区域分布.甲烷浓度高异常值主要集中在山西省东南部和河北省的西南部地区.

4.2 从 2019~2023 年,华北地区的甲烷浓度逐年增长,并且呈现出季节变化趋势,春夏季低,秋冬季高.Offline Methane 数据中 2023 年的冷点区域和热点区域均较 2019 年有所增加,Level 2XCH$_4$ 数据中热点区域有所增加,而冷点区域有所减少.

4.3 Offline Methane 数据和 Level 2XCH$_4$ 数据的相关性较高(相关系数>0.92),二者与香河站的监测数据均有较高的相关性(相关系数分别为 0.90 和 0.86),说明两种数据均能较好反映华北地区的甲烷浓度分布和变化情况.但在细节上存在一些差异.

4.4 Offline Methane 数据的完整性不如 Level 2XCH$_4$ 数据,但其获取和处理更为便捷.而 Level 2XCH$_4$ 数据格式为 NetCDF,处理相对复杂,且其分辨率并没有统一标准,但数据覆盖较高,使用者应根据研究区域和目的确定合适数据,同时应探索提高

Offline Methane 数据完整性或优化 Level 2XCH_4 数据分辨率的方法,提高甲烷浓度数据质量.

参考文献：

[1] 周启星,王　辉,欧阳少虎.基于碳中和新技术的美丽中国建设 [J]. 中国环境科学, 2024,44(4):1777-1787.
Zhou Q X, Wang H, Ouyang S H. Beautiful China construction based on carbon neutralization new technology [J]. China Environmental Science, 2024,44(4):1777-1787.

[2] Cao Y, Li X M, Yan H, et al. China's efforts to peak carbon emissions: targets and practice [J]. Chinese Journal of Urban and Environmental Studies, 2021,9(1):83-96.

[3] 袁佳双,邱　爽.IPCC AR6 相关甲烷研究进展分析及其对中国的启示 [J]. 气候变化研究进展, 2024,20(3):327-336.
Yuan J S, Qiu S. A review analysis of methane research progress related to IPCC AR6 and its implications for China [J]. Climate Change Research, 2024,20(3):327-336.

[4] 陈冀岱,左钦文,孙茂盛,等.甲烷卫星遥感探测的研究进展 [J]. 遥感信息, 2024,39(2):1-11.
Chen J D, Zuo Q W, Sun M S, et al. Research Progress of Satellite Remote Sensing Detection of Methane [J]. Remote Sensing Information, 2024,39(2):1-11.

[5] Bongaarts J. Intergovernmental panel on climate change special report on global warming of 1.5°C Switzerland: IPCC, 2018 [R]. Population and Development Review, 2019,45:251-252.

[6] 袁　亮,柴　林,何伟军,等.时空异质性视角下华北地区碳足迹评估及驱动因子分析 [J]. 生态经济, 2025,41(1):70-79.
Yuan L, Chai L, He W J, et al. Carbon footprint assessment and analysis on driving factor in North China from the perspective of spatial and temporal heterogeneity [J]. Ecological Economy, 2025, 41(1):70-79.

[7] 龙　凤,董战峰,连　超,等.甲烷排放控制的国际经验及对我国的启示 [J]. 环境保护, 2023,51(Z1):68-71.
Long F, Dong Z F, Lian C, et al. International experience of methane emission control and its inspiration to China [J]. Environmental Protection, 2023,51(Suppl. 1):68-71.

[8] Gao J, Guan C, Zhang B, et al. Decreasing methane emissions from China's coal mining with rebounded coal production [J]. Environmental Research Letters, 2021,16(12):129601.

[9] Xiong X, Barnet C, Maddy E, et al. Seven years' observation of Mid-Upper tropospheric methane from atmospheric infrared sounder [J]. Remote Sensing, 2010,2(11):2509.

[10] Maasakkers D J, Jacob J D, Sulprizio P M, et al. Global distribution of methane emissions, emission trends, and OH concentrations and trends inferred from an inversion of GOSAT satellite data for 2010~2015 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19(11):7859-7881.

[11] He B, Xue Y, Lu X, et al. Monitoring of XCH4changes and anomaly in hebei province, china based on TROPOMI [C]//IGARSS 2023 - 2023IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2023:2107-2108.

[12] 曹　钰,李如仁,张慧芳,等.GOSAT 与 TROPOMI 的甲烷柱浓度(XCH_4)对比分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1185-1197.
Cao Y, Li R R, Zhang H F, et al. Comparison analysis of methane column concentrations (XCH_4) between GOSAT and TROPOMI [J]. China Envirenmental Science, 2025,45(3):1185-1197.

[13] Zhang L, Jiang H, Zhang X. Comparison analysis of the global carbon dioxide concentration column derived from SCIAMACHY, AIRS, and GOSAT with surface station measurements [J]. International Journal of Remote Sensing, 2015,36(5):1406-1423.

[14] Ni Q, Zhou M, Wang J, et al. Intercomparison of CH_4 products in China from GOSAT, TROPOMI, IASI, and AIRS satellites [J]. Remote Sensing, 2023,15(18):4430.

[15] Pankaj S, Sudhanshu P, Maasakkers J D, et al. Methane emissions from superemitting coal mines in Australia quantified using TROPOMI satellite observations [J]. Environmental Science & Technology, 2021,55(24):16573-16580.

[16] Zhen Q, Maasakkers J D, Lu S, et al. Global distribution of methane emissions: a comparative inverse analysis of observations from the TROPOMI and GOSAT satellite instruments [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021,21(18):14159-14175.

[17] Hemati M, Mahdianpari M, Nassar R, et al. Urban methane emission monitoring across North America using TROPOMI data: an analytical inversion approach [J]. Scientific Reports, 2024,14(1):9041.

[18] Tabunschik V, Gorbunov R, Gorbunova T. Unveiling air pollution in crimean mountain rivers: analysis of Sentinel-5satellite images using Google Earth Engine (GEE) [J]. Remote Sensing, 2023,15(13):3402.

[19] 李　军,张艺蓉,张彩月,等.基于 LandTrendr 和 CCDC 算法的神东煤炭基地植被损毁识别对比分析 [J]. 金属矿山, 2023,(1):55-64.
Li J, Zhang Y C, Zhang C Y, et al. Applicability analysis of Land Trendr and CCDC algorithms for vegetation damageIdentification in Shendong Coal Base [J]. Metal Mine, 2023,(1):55-64.

[20] 周敏强,倪启晨,王佳欣,等.甲烷柱浓度红外高光谱遥感反演与验证 [J]. 遥感学报, 2024,28(8):1968-1985.
Zhou M Q, Ni Q C, Wang J X, et al. CH_4 column retrievals from ground-andspace-based infrared spectra and satellite validation [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024,28(8):1968-1985.

[21] Schneising O, Buchwitz M, Reuter M, et al. A scientific algorithm to simultaneously retrieve carbon monoxide and methane from TROPOMI onboard Sentinel-5Precursor [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019,12(12):6771-6802.

[22] 刘　静,温仲明,刚成诚.黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应 [J]. 生态学报, 2020,40(2):678-691.
Liu J, Wen Z M, Gang C C. Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the LoessPlateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(2):678-691.

[23] 夏玲君,巩志宇,李柏贞.基于 GOSAT 卫星遥感的我国中部地区大气 CH_4 时空分布 [J]. 气象与减灾研究, 2019,42(1):1-8.
Xia L J, Gong Z Y, Li B Z. Spatial and temporal distribution of atmospheric CH_4 in central China based on satellite observations [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2019,42(1):1-8.

[24] 王小雨,邓祥征,刘玉洁,等.1970~2018 年中国甲烷排放量时空分布特征及行业排放源分析 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2022,14(4):419-428.
Wang X Y, Deng X Z, Liu Y J, et al. Spatiotemporal dynamics and source analysis of China's methane emissions from 1970 to 2018 [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2022,14(4):419-428.

[25] Zhang J, Han G, Mao H Q, et al. The spatial and temporal distribution patterns of XCH_4 in China: New observations from TROPOMI [J]. Atmosphere, 2022,13(2):177.

[26] 周　亮,周成虎,杨　帆,等.2000~2011 年中国 $PM_{2.5}$ 时空演化特征及驱动因素解析 [J]. 地理学报, 2017,72(11):2079-2092.
Zhou L, Zhou C H, Yang F, et al. Spatio-temporal evolution and the influencingfactors of $PM_{2.5}$ in China between 2000 and 2011 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017,72(11):2079-2092.

[27] Zhu J, Zeng X. Trend in seasonal amplitude of northern net ecosystem production: Simulated results from IAP DGVM in CAS-ESM2 [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2024,17(2):47-53.

致谢： 感谢不莱梅大学(University of Bremen)提供的 Level 2XCH_4 and XCO v1.8 数据,以及 GEE 平台提供的 Offline Methane 数据.

作者简介： 李梦圆(2000-),女,湖南湘潭人,中国矿业大学(北京)硕士研究生,主要研究方向为大气甲烷遥感监测.monalmy@163.com.