



# 1970—2018 年中国甲烷排放量时空分布特征及行业排放源分析

## 摘要

在 100 年时间尺度上,甲烷(CH<sub>4</sub>)气体的全球增温潜势是 CO<sub>2</sub> 的 25 倍,研究 CH<sub>4</sub> 排放的时空特征及排放源组成结构对于国家“双碳目标”的实现具有重要价值.本文基于全球大气研究排放数据库(EDGAR)中的数据集,刻画了中国 CH<sub>4</sub> 排放的时空分布特征,利用空间自相关和热点分析方法,揭示了 CH<sub>4</sub> 排放的空间集聚效应,并基于不同的行业部门排放数据对 CH<sub>4</sub> 的排放源进行分析.研究表明:1970—2018 年 CH<sub>4</sub> 排放的热点区主要分布在中国的华东、华北以及华南地区,有逐渐向西北地区延伸的趋势;年 CH<sub>4</sub> 排放量平均值达 8.33 t·a<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup>,变化曲线总体上呈现平缓上升—急速上升—稳定排放三个阶段;从各行政区的排放量来看,上海一直处于最高,全市排放量十年间平均值不低于 25 t·km<sup>-2</sup>;能源活动和工业生产的 CH<sub>4</sub> 排放量贡献突出,尤其是交通运输和煤炭开采近些年排放占比逐渐攀升.

## 关键词

CH<sub>4</sub>; 时空特征; 行业排放源; 双碳目标

中图分类号 X511

文献标志码 A

收稿日期 2022-04-26

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23070400)

## 作者简介

王小雨,女,硕士生,研究方向为地理信息系统与环境效应研究.wangxiaoyu\_simlab@163.com

周德民(通信作者),男,博士,研究员,研究方向为湿地环境和遥感地理信息系统.5818@cmu.edu.cn

## 0 引言

随着我国经济发展水平的持续增长,能源需求和能源消费也持续增加,使得全球气候变暖问题逐渐凸显<sup>[1-2]</sup>.全球变暖所引起的一系列环境问题越来越受到人们的关注<sup>[3-5]</sup>,我国的温室气体排放总量将在较长的时期内保持增长的趋势<sup>[6]</sup>.面对气候变化的现实压力和国际社会的严峻挑战,减少温室气体排放为减少未来气候变化的压力提供了机会<sup>[7-10]</sup>.1997 年签署的《京都议定书》中界定的非 CO<sub>2</sub> 温室气体包括甲烷(CH<sub>4</sub>)、一氧化二氮(N<sub>2</sub>O)、六氟碳化物(HFC)、全氟化合物(PFC)和六氟化硫(SF<sub>6</sub>),它们加起来约占目前全球温室气体排放量的 25%<sup>[11]</sup>.其中,CH<sub>4</sub> 是主要的温室气体之一,也是大气中含量较多的有机气体<sup>[12]</sup>,分析其空间分布及排放来源对于控制温室气体排放、减缓温室效应具有重要意义<sup>[13]</sup>.

大气中 CH<sub>4</sub> 持续增长将会对地球的辐射均衡产生效应,直接对气候造成影响<sup>[14]</sup>.一直以来,对 CH<sub>4</sub> 的各种排放源和排放因子测定与排放量的估算始终是研究的热点,并取得了一系列的成果,针对各个排放来源和不同区域的研究已取得相关进展<sup>[15-18]</sup>.在关注 CH<sub>4</sub> 排放量核算和结果的评估研究之外,聚焦于 CH<sub>4</sub> 人为排放来源的分析也是目前减排的重要议题,仲冰等<sup>[19]</sup> 研究了我国天然气行业甲烷排放控制的相关问题,对天然气行业甲烷排放提出对应的建议,宋磊等<sup>[20]</sup> 针对甲烷的排放对中国油气行业产生的负面影响开展了相关研究,也有关于畜牧业甲烷排放源的低碳化发展的路径选择分析<sup>[21]</sup>,这些研究只针对单一行业的甲烷排放展开,对于甲烷多排放来源的研究分析较少,且一般集中于区域的单角度研究,例如卢映杉<sup>[22]</sup> 研究了广西省区域供应链视角下的 CH<sub>4</sub> 排放源及脱钩效应,刘均荣<sup>[23]</sup> 针对油气系统的排放源进行了分析,目前对于多行业部门的 CH<sub>4</sub> 排放存在一定的研究空白.

全球大气研究排放数据库(EDGAR)基于公开的统计数据(<https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>),为大气建模和政策制定者提供全

1 首都师范大学 资源环境与旅游学院,北京,100048

2 中国科学院 地理科学与资源研究所/陆地表层格局与模拟重点实验室,北京,100101

3 中国科学院大学,北京,100049

球人为排放和排放趋势的独立估计,同时包括特定部门排放源的网格数据.EDGAR 已成为政策制定者和科学界的参考数据集,为他们提供了一致并且可靠的基准.本文对 1970—2018 年的年平均 CH<sub>4</sub> 排放进行了空间和时间变化的分析,基于全国分布的 Moran's I 和热点分布状况,分析全国 CH<sub>4</sub> 排放的热点区域,同时在各个省级尺度中分析不同区域的 CH<sub>4</sub> 排放变化趋势,并基于不同的行业部门排放数据,进一步分析 CH<sub>4</sub> 的排放结构和主要来源.研究结果有助于对温室气体排放的管理,并为应对全球气候变化提供现实依据.

## 1 数据

EDGAR 来自欧盟委员会内部建立的一种用于估算排放的自下而上的模型<sup>[24]</sup>,其特定的排放量编制方法得到全世界所有国家一致应用,为研究人员提供了方法学的透明度和国家之间的可比性<sup>[25]</sup>.EDGAR 提供所有国家的数据,并在全球范围内按 0.1°×0.1°的网格进行空间分配<sup>[26]</sup>.EDGAR 涵盖了 IPCC(2006) 指南中所有的报告类别,并按部门进行详细划分.其时间序列每年都会根据其数据源的可用性进行更新,目前的时间覆盖范围为 1970—2018 年,是当前可获取的空间分辨率较高且时间范围较长的 CH<sub>4</sub> 排放量空间数据.

## 2 方法

EDGAR 数据作为千米级的全球范围数据,对于中国地区而言,时间上的变化趋势和空间上的分布特征需要基于具有典型创新性的空间分布特征分析方法.

### 2.1 Moran's I

采用全局 Moran 指数<sup>[27]</sup>作为全局空间自相关的指标,分析中国 CH<sub>4</sub> 内部空间单元排放的空间相关性和差异性,其表达式为

$$I = \frac{\left[ n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \right]}{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right]}, \quad (1)$$

式中: $n$  为 CH<sub>4</sub> 排放量栅格像元个数; $i$  和  $j$  分别为  $i$  和  $j$  空间单元的 CH<sub>4</sub> 排放量; $\bar{x}$  为各个栅格像元 CH<sub>4</sub> 排放量的均值; $W_{ij}$  为空间权重矩阵.

采用局部 Moran 指数对中国 CH<sub>4</sub> 排放聚集情况进行局部空间自相关分析,识别 CH<sub>4</sub> 排放的高值聚

集区和低值聚集区,以反映 CH<sub>4</sub> 排放的空间依赖性和异质性.局部 Moran 指数的表达式为

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j}{\sum_{i=1}^n x_i}, \quad (2)$$

当  $I_i$  大于 0 时,呈现空间正相关关系; $I_i$  小于 0 时呈现空间负相关关系.

### 2.2 热点分析 (Getis-Ord $G_i^*$ )

Getis-Ord  $G_i^*$  空间热点分析<sup>[28]</sup>可以反映出研究对象在局部空间上的热点和冷点分布,这对于研究中国 CH<sub>4</sub> 气体排放分布的热点区域具有重要参考意义.探测中国 CH<sub>4</sub> 高值聚集区 (High) 和低值聚集区 (Low) 的计算公式:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{\left[ n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - \left( \sum_{j=1}^n w_{ij} \right)^2 \right]}{n-1}}}, \quad (3)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}, \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2}, \quad (5)$$

式中: $w_{ij}$  为  $i$  与  $j$  的空间关系,对应空间相邻权重矩阵的元素; $x_j$  是空间单元距离表达式.当计算结果  $G_i^* > 0$  时,研究区域呈现高值聚集区,即“热点”;当  $G_i^* < 0$  时,研究区域呈现低值聚集区,即“冷点”.应用  $Z$  检验对  $G_i^*$  结果进行统计推断,若差异无统计学意义,则认为研究区域呈随机分布.

## 3 结果

### 3.1 1970—2018 年 CH<sub>4</sub> 时空分布特征

由图 1 可以看出,CH<sub>4</sub> 排放的地域分异特征明显,根据中国的区域分类标准:东北地区,包括辽宁、吉林、黑龙江和内蒙古东部 5 盟市(呼伦贝尔市、通辽市、赤峰市、兴安盟、锡林郭勒盟);华东地区,包括上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东、台湾;华北地区,包括北京、天津、河北、山西和内蒙古共计 5 个省级行政单位;华中地区,包括河南、湖北、湖南 3 省;华南地区,包括广东、广西、海南、香港、澳门;西南地区,包括四川、贵州、云南、西藏、重庆等 5 个省市;西北地区,包括陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆 5 个省(自治区),华东和华南地区的 CH<sub>4</sub> 排放量较

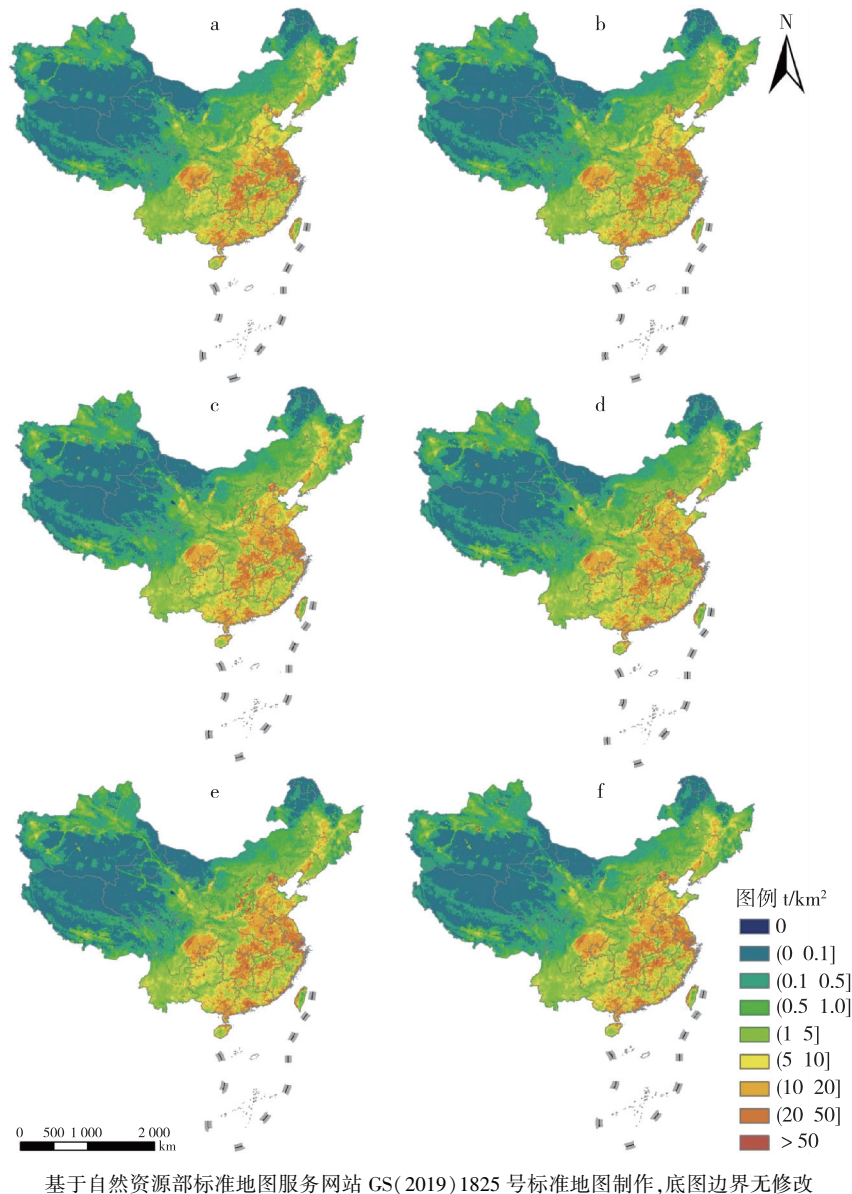


图 1 1970—2018 年 CH<sub>4</sub>排放量空间分布

(a,b,c,d,e,f 分别表示 1970—1979 年、1980—1989 年、1990—1999 年、2000—2009 年和 2010—2018 年的平均值)

Fig. 1 1970—2018 CH<sub>4</sub> county-level spatial distribution (a,b,c,d,e and f represent the averages of 1970—1979,1980—1989,1990—1999,2000—2009 and 2010—2018, respectively)

高,各个时间段的平均排放量一般高于  $5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ,西北地区的 CH<sub>4</sub>排放量相对较低,排放量一般处于  $0 \sim 5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 之间,这主要与排放源的排放强度和空间分异有关,大气中的甲烷排放由自然排放和人类活动排放两部分组成,自然湿地作为最大的自然排放源,其空间分布与 CH<sub>4</sub>排放的区域分异特征具有密切联系,这也使得整体上中国的南方比北方的 CH<sub>4</sub>排放量高,且区域分布范围较广.人类活动所产生的 CH<sub>4</sub>排放主要由能源排放(包括石油、天然气和煤矿开

采)、反刍动物、垃圾填埋、水稻田和生物质燃烧组成,不同时间阶段对于各个排放来源的组成基本不变,各个来源的组成比例具有一定的变化.随着经济社会发展,由人类活动所产生的 CH<sub>4</sub>排放加大了不同区域之间的排放差异.从 1970—2018 年的时间变化趋势来看,整体上变化较为平缓,但在 1990—1999 年华北地区开始出现较为明显的高 CH<sub>4</sub>排放量的区域分布,且在新疆的西北部开始出现小区域的 CH<sub>4</sub>排放高于  $5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 区域.在华东地区,CH<sub>4</sub>排放连年

居于高排放梯队.值得注意的是2010—2018年的甲烷排放空间与前面的四个时间段相比,不具有明显的高增长趋势,这与自然排放源,如湿地的减少具有一定的关系,社会经济的发展使得人为排放源增加的同时也减少了自然排放源,像华东地区的江苏省和浙江省,其 $\text{CH}_4$ 排放的高排放区域相对于1970—1979年的排放区域略有减少.

由图2可见,1970—2018年平均 $\text{CH}_4$ 排放量变化曲线总体上呈上升趋势,平均值达 $8.33 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ ,21世纪初期出现了高速上升趋势,使得整个变化曲线呈现平缓上升—急速上升—稳定排放3个阶段,时间分别对应于1970—2002年、2003—2012年和2013—2018年,第1阶段经济发展处于起步时期,发展水平相对缓慢,相关能源燃烧和排放量增长也较为缓和,且自然排放源也处于稳定状态, $\text{CH}_4$ 呈现相对缓慢的增长变化;第2阶段出现的快速增长则由于中国经济的飞速发展,相关煤矿燃料的大量燃烧,自然排放源开始受到影响,造成了自然 $\text{CH}_4$ 排放量稳定而人为排放量激增的状态;第3阶段一方面由于自然排放源的减少,另一方面也受到出台的关于经济发展和环境优化、气候变化缓解的相关政策,使得排放速度明显放缓,不同时间阶段 $\text{CH}_4$ 排放量的差异性需要考虑不同时期多因素驱动.中国的空间经济发展差异能够体现在产业结构的发展过程中,华东、华南地区在改革开放后逐渐建立起具有全球价值链的产业集群,其中包含整合劳动力、能源、地理区位等过程,这与温室气体的排放密切相关,而

西北地区产业主要以内向型产业发展为主,不同的产业类型和布局也影响了自然排放源的分布和排放强度,这就使得 $\text{CH}_4$ 排放空间差异加大<sup>[29]</sup>.

由图3可知整体上各个省份之间 $\text{CH}_4$ 的排放量分布不平衡,像上海、山西和北京的 $\text{CH}_4$ 排放值在不同的时间段内明显高于其他省份,尤其是2000—2009、2010—2018年这3个省的排放值均高于 $30 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ,且1970—2018年 $\text{CH}_4$ 的平均排放量也高于 $25 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ,江苏、安徽、山东和河南也有一定的 $\text{CH}_4$ 排放量的分布,时间变化相对平缓.高排放区域由于其自然环境条件与产业结构等进行综合因素影响,像上海和北京在进入21世纪之后,快速的城市化使得相关产业的迅猛发展,相对于自然排放的减少量,能源活动和农业生产等人为排放量的激增造成了整体排放量快速增长的状态,而山西省由于得天独厚的资源禀赋,采矿业快速发展,使得 $\text{CH}_4$ 排放量尤其突出.

### 3.2 1970—2018年 $\text{CH}_4$ 空间集聚性分析

1970—2018年 $\text{CH}_4$ 的空间自相关(图4)具有明显的时间分异规律,从空间上看东部地区的普遍具有高一高聚集性分布区域特征,西部地区的低—低聚集性明显;从时间变化的角度来看,1970—2018年的高一高聚集和低—低聚集区域明显减少,从1970年西北地区大面积的低—低聚集区域、东南地区的高—高聚集区域逐渐过渡到青海、西藏和四川部分区域的低—低聚集区域,以及山西和山东组成的华北平原的部分地区的高—高聚集区域.总体上看,

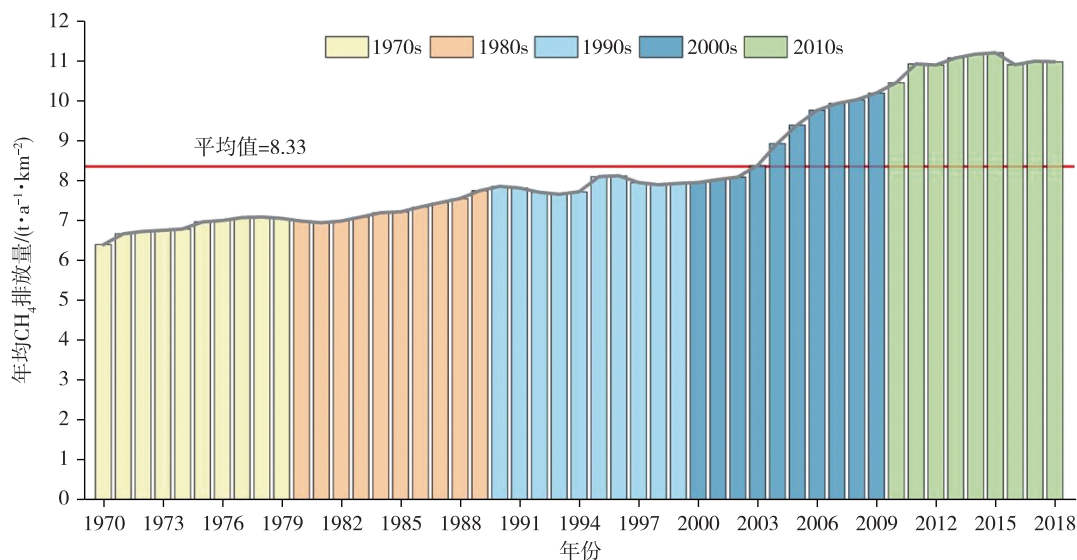
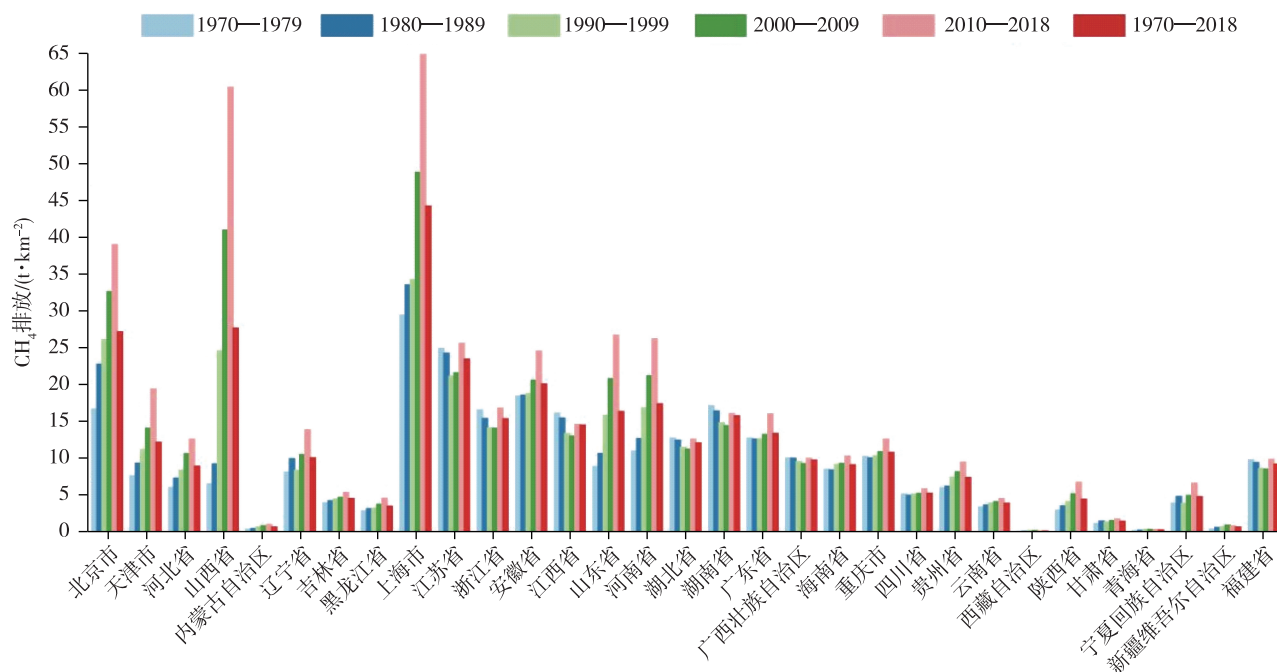


图2 1970—2018年平均 $\text{CH}_4$ 排放量变化

Fig. 2 Changes in annual average  $\text{CH}_4$  emissions from 1970 to 2018



注:由于相关统计数据的缺失,本研究只统计中国大陆地区省级行政区

图3 中国1970—2018年分省份CH<sub>4</sub>排放量

Fig. 3 Statistical map of CH<sub>4</sub> emissions by province in China from 1970 to 2018

高一高聚集区域随着时间的演变逐渐减少,这也与CH<sub>4</sub>的时空分布规律相契合,CH<sub>4</sub>排放的空间变化显示随着时间的演变高排放区域逐渐增多,使得高排放区域聚集性减少,CH<sub>4</sub>排放的空间异质性减弱.低一低聚集区域也随着时间的变化逐渐减少,这与西北地区的高CH<sub>4</sub>排放区域的出现相一致.CH<sub>4</sub>高排放区域在华东、华南和华北等地区的逐渐扩展以及西北低值排放区的逐渐增长,使得全国大面积的高一高聚集区域和低一低聚集区域逐渐减少,这是人为排放源占比增长在排放量和排放区域上的具体表现.

CH<sub>4</sub>的热点分布(图5)于我国的华东、华北以及华南地区,在空间上主要呈现东南部的热点区域分布和西北部的冷点区域分布,中间具有小部分区域的过渡;时间上的变化也具有明显特征,主要表现为热点区域从1990年开始从南方逐渐北移,过渡区域也逐渐向北部和西部扩张,冷点区域从1970年的99%的置信水平逐渐降低至90%.冷点和热点区域的移动和缩小与CH<sub>4</sub>排放空间一致性减弱趋势保持一致,在1970—1979年、1980—1989年以及1990—1999年的CH<sub>4</sub>排放早期阶段中,热点区域在本区域内凭借资源环境禀赋和经济发展政策等因素排放的贡献尤为突出,而随着时间演变,本区域不能继续满

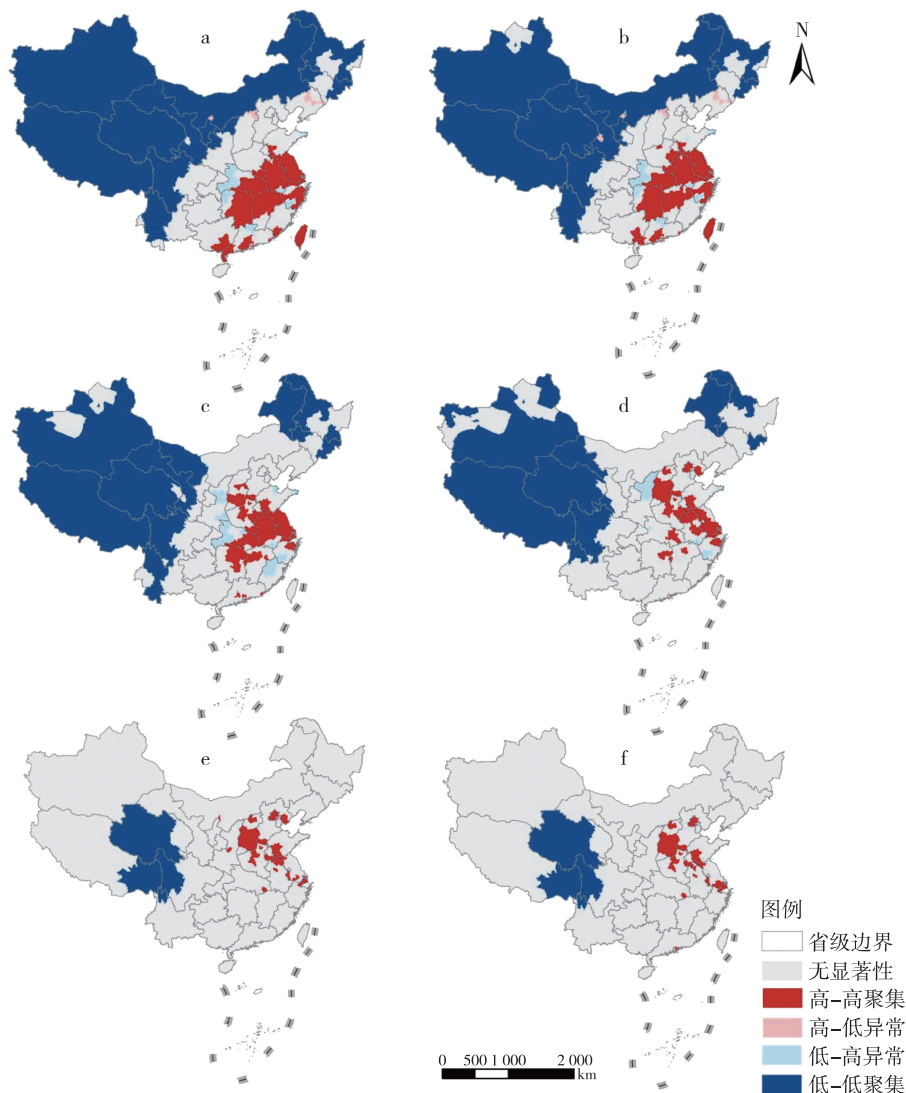
足发展的需要,就会考虑向冷点区域转移,从而产生这种冷点和热点区域面积和位置上的变化.

### 3.3 行业排放源分析

参考EDGAR中的部门CH<sub>4</sub>排放数据,基于Crippa等<sup>[30-33]</sup>完成的能源统计中所描述的时间分布曲线,本文将IPCC中的部门分类对应到我国的温室气体清单编制指南所对应的部门中,将数据库中CH<sub>4</sub>排放的人为排放源归并为能源活动、工业生产过程、农业、土地利用变化与林业、废弃物处理5个来源,并在ArcGIS中选择中国行政区域数据对每个部门进行排放总量统计(表1).

从每个部门的排放总量统计(表1)中发现,农业源中的稻田排在整个部门的统计中居于最高位,1970—2018年排放总量达到77.28 t·km<sup>-2</sup>,同时能源活动排放源中的煤炭开采逃逸占居第2位,1970—2018年排放总量达到53.46 t·km<sup>-2</sup>,相对于这2个主要来源,像土地利用变化与林业排放源和废弃物处理排放源则在整体上对CH<sub>4</sub>排放贡献较小(图6).

选定1970—1979年、1980—1989年、1990—1999年、2000—2009年、2010—2018年和1970—2018年6个时间段,计算5个CH<sub>4</sub>排放源中17个部



注:基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)1825 号标准地图制作,底图边界无修改

图4 1970—2018年CH<sub>4</sub>排放量 Moran's *I* 空间分布

(a,b,c,d,e,f 分别表示 1970—1979 年、1980—1989 年、1990—1999 年、2000—2009 年和 2010—2018 年的平均值)

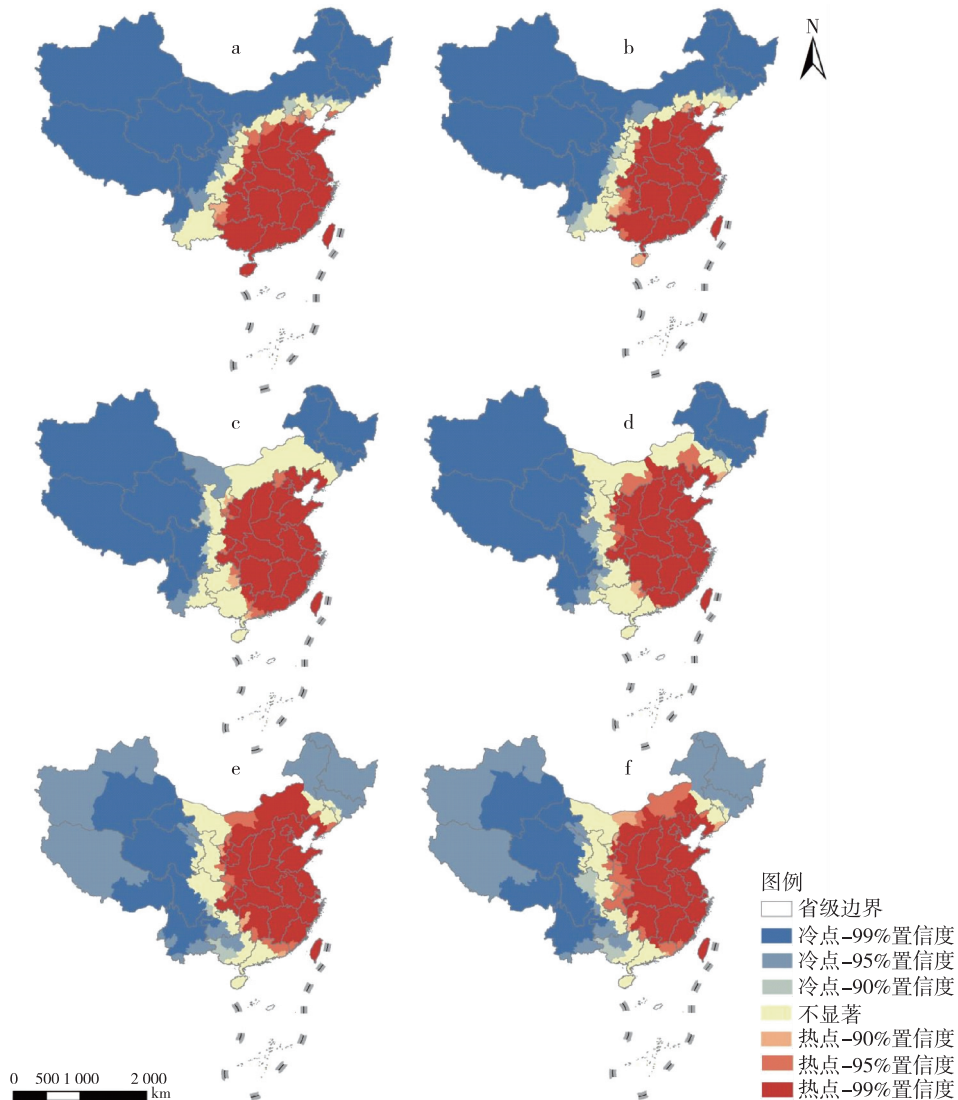
Fig. 4 Moran's *I* spatial distribution map of CH<sub>4</sub> emissions from 1970 to 2018

(a,b,c,d,e and f represent the averages of 1970—1979, 1980—1989, 1990—1999, 2000—2009 and 2010—2018, respectively)

门的排放值与总量占比,并制成堆积柱状图,显示高于5%的部门的标注.可以发现,总体上在1970—2018年,能源活动中的交通运输行业的CH<sub>4</sub>排放占比高于50%,其中a21(铁路和其他运输)部门CH<sub>4</sub>排放占比最高,达到21%,但不同部门随时间的变化趋势存在一定差异,不具有占比稳定增长或下降的变化规律.

在选定的前5个时间阶段中,部门10年间会产生巨大变化,像a24(公路运输)部门在1970—1979年占比17%,而在1980—1989年则占比不足5%,在之后的几个时间阶段中也出现了激增和骤减的现

象,而农业和土地利用变化与林业排放源的占比则较为稳定,c11(稻田,施用石灰、施用尿素、源自管理土壤的直接排放、稻米种植排放)、c21(动物肠道发酵)和c31(动物粪便管理系统)的占比较为平缓,前期在1970—1979年、1980—1989年高于5%占比,之后低于该值,在整个时间段内呈现逐渐下降的变化趋势.总体来看,能源活动和工业生产过程的2个排放源,在整个时间段以及各个时间段内的排放占比总值都超过50%,且后期逐渐攀升,而农业、土地利用变化与林业和废弃物处理3个传统排放源在整个时间段内呈现出排放占比下降的趋势,这也从侧面



注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1825号标准地图制作,底图边界无修改

图5 1970—2018年CH<sub>4</sub>排放量热点分布

(a,b,c,d,e,f分别表示1970—1979年、1980—1989年、1990—1999年、2000—2009年和2010—2018年的平均值)

Fig.5 Hot spot distribution map of CH<sub>4</sub> emissions from 1970 to 2018

(a,b,c,d,e and f represent the averages of 1970—1979, 1980—1989, 1990—1999, 2000—2009 and 2010—2018, respectively)

反映了社会经济发展过程中所进行的工业生产和能源活动对CH<sub>4</sub>排放增长的贡献。

#### 4 结论与讨论

通过分析1970—2018年我国CH<sub>4</sub>排放的时空特征及行业排放来源,发现随着时间的推移,CH<sub>4</sub>排放的高值分布空间范围逐渐扩大,排放重心由东南部逐渐向西北部地区过渡,排放量呈现稳定增长趋势;从时间的推演来看,CH<sub>4</sub>排放量呈现总体增长趋势,1970—2018年经历了平缓上升—急速上

升—稳定排放3个阶段;从各个省级行政区域的CH<sub>4</sub>排放量统计变化来看,江浙沪和京津冀以及中部平原地区尤其是山西省具有明显的高CH<sub>4</sub>排放特征;农业源作为CH<sub>4</sub>排放的稳定来源需要持续关注,而煤矿开采和交通运输也是CH<sub>4</sub>减排需要关注的重点行业,相对于农业和土地利用变化与林业等排放源,对能源活动和工业生产的干预减排效果更明显。

本研究对CH<sub>4</sub>排放总量进行了空间化,为了解和研究温室气体的空间分布状况提供基础.CH<sub>4</sub>作为

表 1 甲烷排放源部门名称及其 IPCC 代码

Table 1 Sector names of methane emission sources and their IPCC codes

| 排放源         | 排放部门描述        | IPCC 部门代码                                   | 部门标识  | 1970—2018 年<br>排放总量/<br>( $t \cdot km^{-2}$ ) |       |
|-------------|---------------|---|---|---|-------|
| 能源活动        | 化石燃料燃烧        | 石油提纯、固体燃料制造、移动源(其他)、非受控燃烧和燃烧煤堆、其他、加工、固体燃料运输 | 1A1b + 1A1ci + 1A1cii + 1A5biii + 1B1b+1B2aiii6+1B2biii3+1B1c | a11   | 1.32  |
|             | 交通运输          | 铁路、其他运输                                     | 1A3c+1A3e   | a21   | 4.68  |
|             |               | 民航  | 1A3a_LTO + 1A3a_CRS + 1A3a_CDS+1A3a_SPS                       | a22   | 8.37  |
|             |               | 水运  | 1A3d  | a23   | 4.33  |
|             |               | 公路运输  | 1A3b_noRES  | a24   | 0.34  |
| 工业生产过程      | 煤炭开采逃逸        | 煤炭燃料开采                                      | 1B1a  | a31   | 53.46 |
|             | 油气系统逃逸        | 石油、天然气(泄放、喷焰燃烧)                             | 1B2aiii2+1B2aiii3+1B2bi+1B2bii                                | a41   | 5.10  |
|             | 其他生产过程        | 制造工业和建筑                                     | 1A2   | b11   | 0.55  |
|             |               | 钢铁生产、铁合金生产                                  | 2C1+2C2   | b12   | 0.15  |
|             |               | 化学工业  | 2B  | b13   | 0.13  |
| 主要活动电能和热能生产 |               | 1A1a  | b14   | 9.58  |       |
| 农业          | 稻田            | 施用石灰、施用尿素、源自管理土壤的直接排放、稻米种植                  | 3C2+3C3+3C4+3C7   | c11   | 77.28 |
|             | 动物肠道发酵        | 肠道发酵  | 3A1   | c21   | 33.09 |
|             | 动物粪便管理系统      | 粪便管理  | 3A2   | c31   | 5.75  |
| 土地利用变化与林业   | 森林转化碳排放(燃烧排放) | 农田的生物量燃烧                                    | 3C1b  | d11   | 7.84  |
| 废弃物处理       | 固体废弃物         | 废弃物的焚化和露天燃烧                                 | 4C  | e11   | 0.81  |
|             |               | 固体废弃物处理、固体废弃物的生物处理                          | 4A+4B   | e12   | 9.01  |

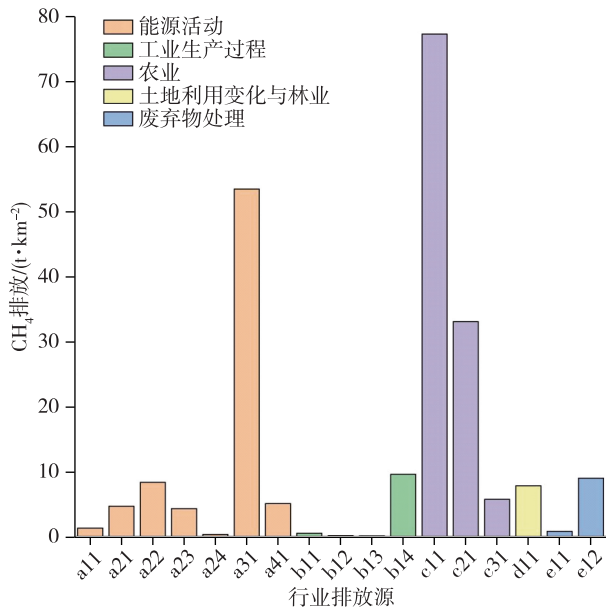


图 6 1970—2018 年行业排放总量统计图  
(x 轴标注所代表的部门与表 1 中的标注保持一致, 根据不同的排放源进行命名和分类, 下同)

Fig. 6 Statistical chart of total industry emissions from 1970 to 2018

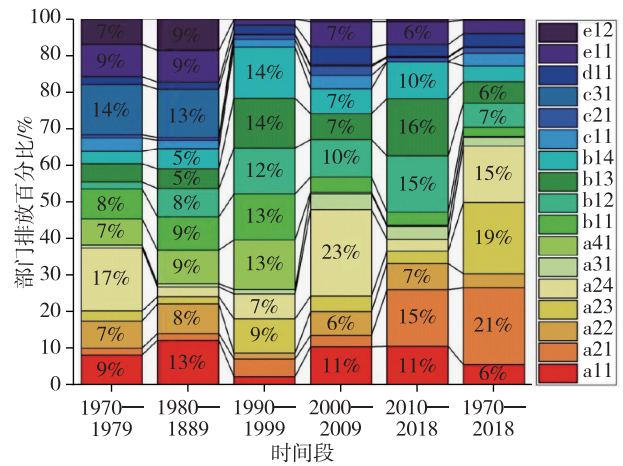


图 7 1970—2018 年部门排放百分比堆积柱状图

Fig. 7 Percentage of sectoral emissions to total annual emissions from 1970 to 2018

增温潜势最高的非二氧化碳温室气体,其排放源的结构和占比分析为减排提供了关注方向,这对于控制碳排放总量的减少具有重要意义。



## 参考文献

## References

- [ 1 ] 谭秋成.中国农业温室气体排放:现状及挑战[J].中国人口·资源与环境,2011,21(10):69-75  
TAN Qiucheng.Greenhouse gas emission in China's agriculture:situation and challenge[J].China Population, Resources and Environment,2011,21(10):69-75
- [ 2 ] 邓祥征,蒋思坚,刘冰,等.全球二氧化碳浓度非均匀分布条件下碳排放与升温关系的统计分析[J].自然资源学报,2021,36(4):934-947  
DENG Xiangzheng,JIANG Sijian,LIU Bing,et al.Statistical analysis of the relationship between carbon emissions and temperature rise with the spatially heterogeneous distribution of carbon dioxide concentration[J].Journal of Natural Resources,2021,36(4):934-947
- [ 3 ] Zickfeld K,Solomon S,Gilford D M.Centuries of thermal sea-level rise due to anthropogenic emissions of short-lived greenhouse gases[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2017,114(4):657-662
- [ 4 ] Liu L C,Wu G.The effects of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emission taxes:an empirical study in China[J].Journal of Cleaner Production,2016,142:1044-1054
- [ 5 ] Kyung D,Kim M,Chang J,et al.Estimation of greenhouse gas emissions from a hybrid wastewater treatment plant[J].Journal of Cleaner Production,2015,95:117-123
- [ 6 ] Li Z H,Deng X Z,Peng L.Uncovering trajectories and impact factors of CO<sub>2</sub> emissions:a sectoral and spatially disaggregated revisit in Beijing[J].Technological Forecasting and Social Change,2020,158:120124
- [ 7 ] Delgado J A,Mosier A R.Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux[J].Journal of Environmental Quality,1996,25(5):1105-1111
- [ 8 ] 邓祥征,丹利,叶谦,等.碳排放和减碳的社会经济代价研究进展与方法探究[J].地球信息科学学报,2018,20(4):405-413  
DENG Xiangzheng,DAN Li, YE Qian, et al. Methodological framework and research progress on the social and economic costs of carbon emission and reduction[J].Journal of Geo-Information Science,2018,20(4):405-413
- [ 9 ] Wang P,Deng X Z,Jiang S J.Global warming, grain production and its efficiency:case study of major grain production region[J].Ecological Indicators,2019,105:563-570
- [ 10 ] Jiang S J,Deng X Z,Liu G,et al.Climate change-induced economic impact assessment by parameterizing spatially heterogeneous CO<sub>2</sub> distribution[J].Technological Forecasting and Social Change,2021,167:120668
- [ 11 ] Pulles T,van Amstel A.An overview of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases[J].Journal of Integrative Environmental Sciences,2010,7(sup1):3-19
- [ 12 ] 林余,张稳,黄耀.中国动物源 CH<sub>4</sub>排放空间分布和时间变化研究[J].环境科学,2011,32(8):2212-2220  
LIN Yu,ZHANG Wen,HUANG Yao.Estimating spatio-temporal dynamics of methane emissions from livestock in China[J].Environmental Science,2011,32(8):2212-2220
- [ 13 ] 黄满堂,王体健,赵雄飞,等.2015年中国地区大气 CH<sub>4</sub>排放估计及空间分布[J].环境科学学报,2019,39(5):1371-1380  
HUANG Mantang,WANG Tijian,ZHAO Xiongfei.Estimation of atmospheric methane emissions and its spatial distribution in China during 2015[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2019,39(5):1371-1380
- [ 14 ] 徐爱锋,徐俊,龚健雅.基于 Skyline 的三维管线系统的设计与实现[J].测绘通报,2013(6):75-77  
XU Aifeng,XU Jun,GONG Jianya.Design and implementation of 3D underground pipeline system based on Skyline[J].Bulletin of Surveying and Mapping,2013(6):75-77
- [ 15 ] 乐群,张国君,王铮.中国各省甲烷排放量初步估算及空间分布[J].地理研究,2012,31(9):1559-1570  
YUE Qun,ZHANG Guojun,WANG Zheng.Preliminary estimation of methane emission and its distribution in China[J].Geographical Research,2012,31(9):1559-1570
- [ 16 ] 孙景鑫,刘东,秦璐,等.艾比湖地区棉田、撂荒地土壤 CH<sub>4</sub>排放通量日变化规律研究[J].新疆农业科学,2012,49(8):1489-1496  
SUN Jingxin,LIU Dong,QIN Lu.Research on soil CH<sub>4</sub> flux of cotton fields and abandoned lands in Ebinur Lake area[J].Xinjiang Agricultural Sciences,2012,49(8):1489-1496
- [ 17 ] 朱思明,吴群,毛艳玲,等.1980—2011年福建省农业甲烷排放估算研究[J].河南农业大学学报,2017,51(2):250-257  
ZHU Siming,WU Qun,MAO Yanling.Estimation of the amount of agricultural methane emission in Fujian province from 1980 to 2011 based on model CH<sub>4</sub>MOD and GIS[J].Journal of Henan Agricultural University,2017,51(2):250-257
- [ 18 ] 蔡祖聪,谢德体,徐华,等.冬灌田影响水稻生长期甲烷排放量的因素分析[J].应用生态学报,2003,14(5):705-709  
CAI Zucong,XIE Deti,XU Hua.Factors influencing CH<sub>4</sub> emissions from a permanently flooded rice field during rice growing period[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2003,14(5):705-709
- [ 19 ] 仲冰,张博,唐旭,等.碳中和目标下我国天然气行业甲烷排放控制及相关科学问题[J].中国矿业,2021,30(4):1-9  
ZHONG Bing,ZHANG Bo,TANG Xu,et al.Methane emission controls and related scientific issues in China's natural gas industry under the goal of carbon neutrality[J].China Mining Magazine,2021,30(4):1-9
- [ 20 ] 宋磊,翁艺斌.中国油气行业甲烷排放管控政策研究[J].世界石油工业,2021,28(2):25-30  
SONG Lei,WENG Yibin.Methane emissions management policy of China's oil and gas industry[J].World Petroleum Industry,2021,28(2):25-30
- [ 21 ] 詹晶,张俊娜,邓荣荣.我国畜牧业低碳化发展的路径

- 选择:基于畜牧业排放源对甲烷增长的回归分析[J]. 广西社会科学,2012(9):50-54
- [22] 卢映杉.中国区域供应链甲烷排放及脱钩效应研究:基于广西的投入产出数据分析[J].新营销,2019(12):288-292
- [23] 刘均荣,姚军.油气系统甲烷排放源及减排技术[J].油气田地面工程,2008,27(7):55-56
- [24] Solazzo E, M Crippa, Guizzardi D, et al. Uncertainties in the emissions database for global atmospheric research (EDGAR) emission inventory of greenhouse gases [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, 21 (7): 5655-5683
- [25] Crippa M, Guizzardi D, Muntean M, et al. Gridded emissions of air pollutants for the period 1970–2012 within EDGAR v4.3.2 [J]. Earth System Science Data Discussions, 2018, 4: 1-40
- [26] Oreggioni G D, Ferrario F M, Crippa M, et al. Climate change in a changing world: socio-economic and technological transitions, regulatory frameworks and trends on global greenhouse gas emissions from EDGAR v.5.0 [J]. Global Environmental Change, 2021, 70: 102350
- [27] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics [J]. Geographical Analysis, 2010, 24(3): 189-206
- [28] Jesri N, Saghafipour A, Koohpaei A. Mapping and spatial pattern analysis of COVID-19 in Central Iran using the local indicators of spatial association (LISA) [J]. BMC Public Health, 2021, 21: 2227
- [29] 郭晓蓓.改革开放40年我国产业结构演进历程与新时代重大战略机遇[J].当代经济管理,2019,41(4): 1-10  
GUO Xiaobei. The evolution of China's industrial structure and the major strategic opportunities in the past 40 years of reform and opening up [J]. Contemporary Economy & Management, 2019, 41(4): 1-10
- [30] Janssens-Maenhout G, Crippa M, Guizzardi D, et al. Fossil CO<sub>2</sub> and GHG emissions of all world countries [M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017
- [31] Crippa M, Solazzo E, Huang G, et al. High resolution temporal profiles in the emissions database for global atmospheric research [J]. Sci Data, 2020, 7: 121
- [32] Jalkanen J P, Johansson L, Kukkonen J, et al. Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(5): 2641-2659
- [33] Johansson L, Jalkanen J P, Kukkonen J. Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution [J]. Atmospheric Environment, 2017, 167: 403-415

## Spatiotemporal dynamics and source analysis of China's methane emissions from 1970 to 2018

WANG Xiaoyu<sup>1</sup> DENG Xiangzheng<sup>2,3</sup> LIU Yujie<sup>2,3</sup> SHI Wenjiao<sup>2,3</sup> ZHOU Demin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Resource, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048

<sup>2</sup> Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research/ Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** On a 100-year time scale, the global warming potential of methane (CH<sub>4</sub>) is 25 times that of CO<sub>2</sub>. Revealing the spatiotemporal dynamics of CH<sub>4</sub> emissions and the composition of emission sources is of great value for the realization of the national dual-carbon goal. Based on the data set in the Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), this paper characterizes the spatiotemporal distribution characteristics of CH<sub>4</sub> emissions in China, and uses spatial autocorrelation and hotspot analysis methods to reveal the spatial agglomeration effect of CH<sub>4</sub> emissions. The data were analyzed for CH<sub>4</sub> emission sources. The results show that the hotspots of CH<sub>4</sub> emissions from 1970 to 2018 mainly distributed in East China, North China and South China, and had a trend of gradually extending to the northwest region. In general, there were three stages from gradual rise to rapid rise and then stable emission; from the perspective of emissions in each administrative region, Shanghai has always been at the highest level, with average emission in ten years being not less than 25 t·km<sup>-2</sup>; energy activities and industrial production contributed most to CH<sub>4</sub>, especially the transportation and coal mining sectors which held gradually increasing proportions of emissions in recent years. The research results can provide effective guidance for exploring industry emission reduction plans and practicing low-carbon paths.

**Key words** CH<sub>4</sub>; spatiotemporal dynamics; industry emission sources; dual-carbon target