

# 中国油气行业甲烷逃逸排放核算与时空特征研究

杨梓诚<sup>1</sup>, 高俊莲<sup>1</sup>, 唐旭<sup>2</sup>, 仲冰<sup>1</sup>, 张博<sup>1\*</sup>

1 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083

2 中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249

\* 通信作者, zhangbo@cumtb.edu.cn

收稿日期: 2020-12-31

国家自然科学基金基础科学中心项目(72088101)、国家自然科学基金面上项目(71774161)资助

**摘要** 甲烷是仅次于二氧化碳的第二大温室气体, 油气开发利用的全产业链均会产生甲烷逃逸排放。在2060年前实现碳中和的愿景下, 我国油气行业的甲烷减排需求迫切, 而准确地核算与评估甲烷逃逸排放是油气行业开展甲烷排放控制工作的前提。本文采用《IPCC2006年国家温室气体清单指南(2019修订版)》推荐的排放因子, 核算了2000—2017年我国油气行业甲烷逃逸排放, 并分析了具体的时空演变特征。结果表明, 2000—2017年我国油气行业的甲烷逃逸排放持续增长, 2000年所估算的区间范围为703.6 Gg(低排放情景)~970.4 Gg(高排放情景), 到2017年增长为1697.3~3288.3 Gg; 其中石油系统的甲烷排放先增加后下降, 从2000年的561.9~648.0 Gg增长到2017年的696.6~783.0 Gg; 天然气系统的甲烷排放保持持续增长, 从2000年的141.7~322.5 Gg增长到2017年的1000.7~2505.3 Gg。天然气系统相比于石油系统, 其甲烷逃逸排放增长更快。从具体的排放源类别来看, 在以排放更低的技术和实践为主的低排放情景, 油气行业的生产环节为关键排放源, 而在排放更高的技术和实践为主的高排放情景下, 天然气系统的运输环节也成为关键的排放源, 表明这些排放源具有较大的减排潜力。从空间特征来看, 伴随油气资源勘探开发布局的变化, 我国油气行业甲烷逃逸排放的分布总体呈现出由东北、华北地区向西北、西南地区转移的趋势; 对比现有的清单研究结果发现, 由于排放源完整性、核算方法和数据精度方面的差异, 关于我国油气系统甲烷逃逸排放的估算研究仍存在较大的不确定性。最后, 从国家清单编制常态化、清单编制方法学完善、高分辨率排放源识别等方面, 对促进我国油气行业甲烷排放清单的编制提出了相应建议。

**关键词** 甲烷排放; 石油系统; 天然气系统; 温室气体排放; 清单编制

## Accounting and spatial-temporal characteristics of fugitive methane emissions from the oil and natural gas industry in China

YANG Zicheng<sup>1</sup>, GAO Junlian<sup>1</sup>, TANG Xu<sup>2</sup>, ZHONG Bing<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>

1 School of Management, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083

2 School of Economics and Management, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249

**Abstract** Methane is the second largest greenhouse gas after carbon dioxide. The emissions of methane inevitably occur along

引用格式: 杨梓诚, 高俊莲, 唐旭, 仲冰, 张博. 中国油气行业甲烷逃逸排放核算与时空特征研究. 石油科学通报, 2021, 02: 302-314

YANG Zicheng, GAO Junlian, TANG Xu, ZHONG Bing, ZHANG Bo. Accounting and spatial-temporal characteristics of fugitive methane emissions from the oil and natural gas industry in China. Petroleum Science Bulletin, 2021, 02: 302-314. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.02.024

the entire oil & natural gas supply chains. Under the vision of being carbon neutral by 2060, China's oil & gas industry has an urgent need to reduce methane emissions. Accurate accounting and evaluation of fugitive methane emissions is a prerequisite for the oil and gas industry to carry out methane emissions control. Based on the emission factors recommended by 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory, we estimate the fugitive methane emissions from China's oil & natural gas systems from 2000 to 2017, identify the main features of temporal and spatial inventory changes, and compare the inventory data with those adopted from existing studies. The results show that methane emissions from China's oil & natural gas systems increased continuously, from 703.6 Gg (low emission scenarios)~970.4 Gg (high emission scenarios) in 2000 to 1697.3~3288.3 Gg in 2017. The methane emissions of the oil system increased from 561.9~648.0 Gg in 2000 to 696.6~783.0 Gg in 2017; methane emissions from the natural gas system continued to grow, from 141.7~322.5 Gg in 2000 to 1000.7~2505.3 Gg in 2017. The natural gas system had a much larger growth rate of fugitive methane emissions than the oil system. Considering most activities occurring with lower-emitting-technologies and practices, the production segment of the oil & natural gas industry is the key emission source. The transportation segment of the natural gas system is an important emission source under the condition of most activities occurring with higher-emitting-technologies and practices, suggesting large mitigation potentials in different fields. From the point of view of spatial characteristics, the distribution of methane emissions in China's oil & natural gas industries of China shows the trend of shifting from Northeast and North China to Northwest and Southwest China, along with the layout change of oil & natural gas resources exploration and development. Comparing with the results of the existing inventory research, it is found that there is still a great uncertainty in the estimation of methane emission from oil & natural gas systems in China, owing to the differences on the completeness of emission sources, accounting methods and data accuracy. Finally, this study provides some suggestions to develop the inventories of methane emissions in China's oil & natural gas industries, such as the normalization of national inventory compilation, the improvement of accounting methodology and the implementation of high-resolution source monitoring.

**Keywords** methane emissions; oil systems; natural gas systems; greenhouse gas emissions; inventory compilation

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.02.024

## 0 引言

大气中的甲烷是仅次于二氧化碳的第二大温室气体,作为一种短寿命的温室气体,其在20年内的全球增温潜势是二氧化碳的84倍,在100年内的全球增温潜势是二氧化碳的28倍<sup>[1]</sup>。在2003~2012年的十年间,全球甲烷排放量约为每年558 Tg,范围在540~568 Tg之间;2012年大气甲烷的表面干空气摩尔分数达到1810 ppb,是1750年的2.5倍<sup>[2]</sup>。我国在全球甲烷排放格局中占有重要位置,2000年以来约占全球人为甲烷排放量的14%~22%<sup>[3]</sup>。

近年来,我国人为源甲烷排放增长较快。2019年6月发布的《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》显示,2014年我国甲烷排放总量为5529.2万t,其中能源活动中油气行业甲烷逃逸排放为112.7万t,是2005年相应排放量的5.1倍,年均增长率为20%<sup>[4]</sup>。伴随我国油气消费的快速增长<sup>[5-7]</sup>,在油气系统各环节,例如生产、处理、储运和分销过程,均会产生大量的甲烷逃逸排放<sup>[8]</sup>。如果不对甲烷排放及其气候效应加以考虑,我国未来天然气消费需求的急剧攀升将会直接影响天然气在能源绿色低碳转型过程中有效发挥其“过渡能源”的作用。

然而,我国油气行业的甲烷逃逸排放问题尚未得

到充分重视,相关研究并不多见。早期,张仁健等<sup>[9]</sup>结合油气活动水平及单一的甲烷排放因子,计算出1990年和1994年我国油气行业甲烷逃逸排放量。Zhang等<sup>[10]</sup>估算了我国1980—2007年能源活动相关的甲烷排放,该研究考虑油气系统的主要环节并且采用具体的排放因子,识别了我国油气行业的甲烷逃逸排放及相应变化趋势。Peng等<sup>[11]</sup>参考国外文献的相关排放因子,核算了1980—2010年我国主要人为源的甲烷排放情况,分析了油气行业甲烷逃逸排放的空间分布特点。黄满堂等<sup>[12]</sup>考虑了IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)排放因子缺省值的不足,对2015年我国油气行业的甲烷逃逸排放进行了测算,相关结果涉及省级尺度甲烷排放的具体情况。尽管我国油气行业甲烷逃逸排放的相关研究已取得一定进展,但是仍然存在诸多不足:首先,大部分研究采用《IPCC 2006年国家温室气体清单指南》推荐的缺省排放因子,不能很好地反映我国油气甲烷逃逸排放的实际情况,排放因子存在很大的不确定性;其次,在时间尺度上各研究核算的年份较早,缺少涵盖近期年份的时间序列研究;第三,缺少针对不同尺度油气行业甲烷逃逸排放的专门研究。在我国积极履行2030年碳达峰和2060年碳中和国际承诺,实现温室气体全面减排的大背景下,开展我国油气行业甲烷逃逸排放相关研究的

重要性日益凸显。

基于此,本文拟基于油气行业甲烷逃逸排放清单编制方法,对2000年以来我国油气行业的甲烷逃逸排放进行初步测算,展现2000—2017年我国油气行业甲烷逃逸排放的时空特征,着重分析其时空演变趋势以及结构变化,并综合相关研究进展,探讨甲烷逃逸排放清单研究的差异性与存在的不足,最终提出完善和改进油气行业甲烷逃逸排放清单编制的相关建议,以期对我国油气行业的甲烷排放研究起到一定的促进作用。

## 1 油气行业甲烷逃逸排放核算方法与数据来源

根据《联合国气候变化框架公约》要求,为提高同其他清单研究结果的对比性,IPCC提供国家温室气体清单编制方法学,其编制的相关指南是世界各国编制官方国家清单的技术规范和参考标准<sup>[13]</sup>。为进一步完善国家温室气体清单的编制,IPCC陆续推出了一系列清单指南<sup>[14-18]</sup>,其中包括石油和天然气行业的温室气体清单编制方法。经过多年的实践,相关内容、方法、技术更加完整、合理、科学,推动了各国官方清单准确性和可比性的持续提高。我国从《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》开始参考应用《2006年IPCC国家温室气体清单指南》(以下简称《IPCC 2006指南》)<sup>[19]</sup>。近年来,我国国家温室气体排放清单的编制开始朝常态化更新的方向发展<sup>[20]</sup>。

根据最新的《IPCC2006年国家温室气体清单指南2019修订版》(以下简称《IPCC 2019》)的内容,油气系统中的甲烷逃逸排放包括整个系统中的设备泄漏、工艺排空和火炬燃烧3个部分<sup>[21]</sup>。《IPCC 2006指南》提供了3个层级的方法核算石油和天然气系统产生的甲烷逃逸排放,考虑到数据的可获得性,使用最为广

泛的是第一层级方法,甲烷排放计算公式为:

$$E_i = \sum_{ik} P_{ik} \times EF_{ik} \quad (1)$$

其中, $E$ 代表甲烷逃逸总排放量, $P$ 为原油和天然气系统各环节的活动水平数据, $EF$ 为甲烷排放因子, $i$ 为石油或天然气系统, $k$ 为石油和天然气系统的活动类别。

参照《IPCC 2019》的界定,石油系统的排放源包括原油勘探、生产、运输、炼制、分销过程中的工艺排空、设备泄漏和火炬燃烧(见图1);天然气系统的排放源涉及天然气勘探、生产、加工处理、运输和储存、分销过程中的工艺排空、设备泄漏和火炬燃烧(见图2)。本研究对油气系统不同环节的逃逸排放分别进行核算,石油系统涉及的排放源包括原油勘探、原油生产(陆上、海上)、原油运输(管道、油轮、油罐车或铁路)、原油炼制;天然气系统包括天然气勘探、天然气生产(陆上、海上)、天然气处理、天然气运输、天然气的储存和分销。相关甲烷排放因子均来自《IPCC 2019》(见表1)。相比于《IPCC 2006指南》,《IPCC 2019》将油气系统各个环节中工艺排空、设备泄漏和火炬燃烧进行了统一核算,未进行细分。同时,《IPCC 2019》考虑了不同减排技术和实践的影响。考虑到目前油气系统中各个环节技术比例数据难以获取,文中分别按照两种推荐的情景进行估算和分析,分别为油气系统以排放更高的技术和实践为主的高排放情景和排放更低的技术和实践为主的低排放情景。省级原油和天然气产量数据源自《中国能源统计年鉴》<sup>[22]</sup>、海上原油和天然气产量来源于《中国海洋统计年鉴》<sup>[23]</sup>和《中国海洋经济统计公报》<sup>[24]</sup>,各地区历年油气产量见表2和表3(考虑到篇幅问题,选取部分年份)。由于2017年省级海洋原油和天然气产量数据无法获得,本研究采取前两年数据的平均占比推算得到。

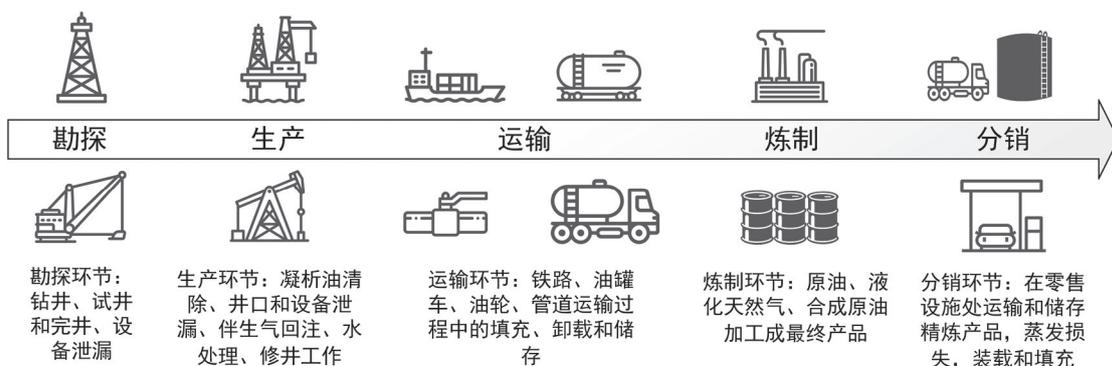


图1 石油系统甲烷逃逸排放的主要环节

Fig. 1 Fugitive methane emissions in the production chains of oil systems

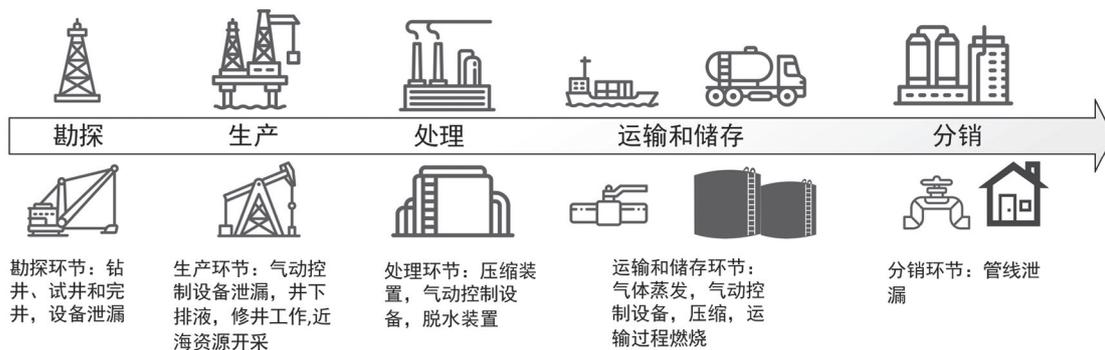


图 2 天然气系统甲烷逃逸排放的主要环节

Fig. 2 Fugitive methane emissions in the production chains of natural gas systems

表 1 油气系统各环节的甲烷排放因子

Table 1 Methane emission factors of oil & natural gas production chains

排放源	排放因子	单位
石油系统		
原油勘探	0.02	t/1000 m <sup>3</sup>
原油生产(陆上: 以排放更高的技术和实践为主)	3.43	t/1000 m <sup>3</sup>
原油生产(陆上: 以排放更低的技术和实践为主)	2.91	t/1000 m <sup>3</sup>
原油生产(海上)	2.46	t/1000 m <sup>3</sup>
原油运输(管道)	0.0054	t/1000 m <sup>3</sup>
原油运输(油罐车或铁路)	0.025	t/1000 m <sup>3</sup>
原油运输(油轮)	0.065	t/1000 m <sup>3</sup>
原油炼制	0.03	t/1000 m <sup>3</sup>
天然气系统		
天然气勘探	0.06	t/MM m <sup>3</sup>
天然气生产(陆上: 以排放更高的技术和实践为主)	4.09	t/MM m <sup>3</sup>
天然气生产(陆上: 以排放更低的技术和实践为主)	2.54	t/MM m <sup>3</sup>
天然气生产(海上)	2.94	t/MM m <sup>3</sup>
天然气处理(以排放更高的技术和实践为主)	1.65	t/MM m <sup>3</sup>
天然气处理(以排放更低的技术和实践为主)	0.57	t/MM m <sup>3</sup>
天然气运输(以排放更高的技术和实践为主)	3.36	t/MM m <sup>3</sup>
天然气运输(以排放更低的技术和实践为主)	1.29	t/MM m <sup>3</sup>
天然气储存(以排放更高的技术和实践为主)	0.67	t/MM m <sup>3</sup>
天然气储存(以排放更低的技术和实践为主)	0.29	t/MM m <sup>3</sup>
天然气分销(以排放更高的技术和实践为主)	2.92	t/MM m <sup>3</sup>
天然气分销(以排放更低的技术和实践为主)	0.62	t/MM m <sup>3</sup>

表 2 各地区原油产量(单位: 1000 m<sup>3</sup>)

Table 2 Crude oil production by region(1000 m<sup>3</sup>)

地区	2000 年	2003 年	2005 年	2007 年	2010 年	2013 年	2015 年	2017 年
天津	8891	15 318	20 866	22 394	38 784	35 431	40 694	36 104
河北	6031	5947	6546	7681	6971	6878	6751	6274
内蒙古	1053	1292	1710	1938	0	0	533	142
辽宁	16 306	15 504	14 674	14 048	11 056	11 649	12 069	12 152

(续表)

地区	2000年	2003年	2005年	2007年	2010年	2013年	2015年	2017年
吉林	4055	5544	6407	7261	8173	8189	7745	4898
黑龙江	61 757	56 327	52 555	48 526	46 607	46 561	44 672	39 804
上海	614	442	294	241	97	92	79	79
江苏	1804	1936	1917	2278	2165	2344	2217	1817
山东	31 138	31 020	31 358	32 504	32 422	31 729	30 351	26 009
河南	6542	6398	5902	5645	5794	5545	4796	3292
湖北	874	902	909	995	1007	932	826	646
广东	16 213	14 846	17 108	14 676	14 979	15 033	18 301	16 702
广西	38	38	40	34	31	509	591	513
海南	0	88	117	124	233	308	349	349
四川	202	162	162	211	176	260	179	101
陕西	8687	14 750	20 693	26 369	35 114	42 920	43 486	40 613
甘肃	643	855	918	965	677	847	775	547
青海	2328	2560	2578	2568	2166	2496	2595	2653
宁夏	1618	0	0	0	36	71	156	8
新疆	21 509	24 676	28 005	30 308	29 771	32 497	32 528	30 162

表3 各地区天然气产量(单位: MM m<sup>3</sup>)Table 3 Natural gas production by region(MM m<sup>3</sup>)

地区	2000年	2003年	2005年	2007年	2010年	2013年	2015年	2017年
北京	0	0	0	0	0	750	1688	1541
天津	910	849	879	1334	1720	1873	2054	2150
河北	514	634	692	714	1270	1558	1043	739
山西	114	250	324	0	0	2511	4308	4676
内蒙古	455	0	0	0	0	1004	924	19
辽宁	1470	1328	1172	872	800	832	659	511
吉林	205	232	540	522	1370	2391	2031	1858
黑龙江	2304	2096	2443	2550	3000	3499	3582	4054
上海	260	497	604	507	330	235	188	171
江苏	24	33	64	58	60	51	37	294
山东	688	810	925	784	533	511	457	415
河南	1495	2014	1762	1576	672	493	419	298
湖北	91	94	112	117	200	309	135	127
广东	3460	2688	4475	5248	7840	7526	9657	8923
海南	0	0	166	203	180	225	188	110
重庆	194	223	327	500	120	170	3332	6070
四川	8860	11 343	14 230	18 746	23 765	24 481	26 722	35 639
贵州	70	52	53	0	12	41	93	415
云南	5	24	22	14	6	2	0	4
陕西	2110	5286	7546	11 010	22 350	37 165	41 592	41 940
甘肃	20	21	84	63	20	17	8	60
青海	391	1557	2226	3402	5610	6806	6137	6401
新疆	3538	4984	10 671	21 020	24 990	28 398	29 302	30 704

## 2 我国油气行业甲烷逃逸排放规模与构成的历史变化

图3展示了我国石油行业甲烷逃逸排放的总体变化趋势。其中,图3(a)为以排放更低的技术和实践为主情景下的石油行业甲烷逃逸排放量,图3(b)为以排放更高的技术和实践为主情景下的石油行业甲烷逃逸排放量。可以看出图3(a)和图3(b)在历年甲烷排放趋势上是一致的。从2000年到2015年,除2009年,总体排放一直保持稳定增长,但2015年以后开

始下降,主要归因于原油产量的下降。以低排放情景为例,2015年,我国石油行业的甲烷逃逸排放总量为762.4 Gg,是2000年的1.4倍,平均年增长率为2.0%。2017年相比于2015年下降了9.1%,为696.6 Gg。

从排放源来看,原油生产过程对石油系统甲烷排放的贡献最大,主要来源为陆上和海上原油生产。研究期内,陆上原油生产在低排放情景下平均占石油系统甲烷排放的77.5%,而在高排放情景下为80.3%。原油勘探、运输环节(管道、油罐车和铁路)相关的甲烷排放普遍较小,图中一并归为其他来源。在图3(a)中,2017年陆上原油生产甲烷排放量为483.0 Gg,占

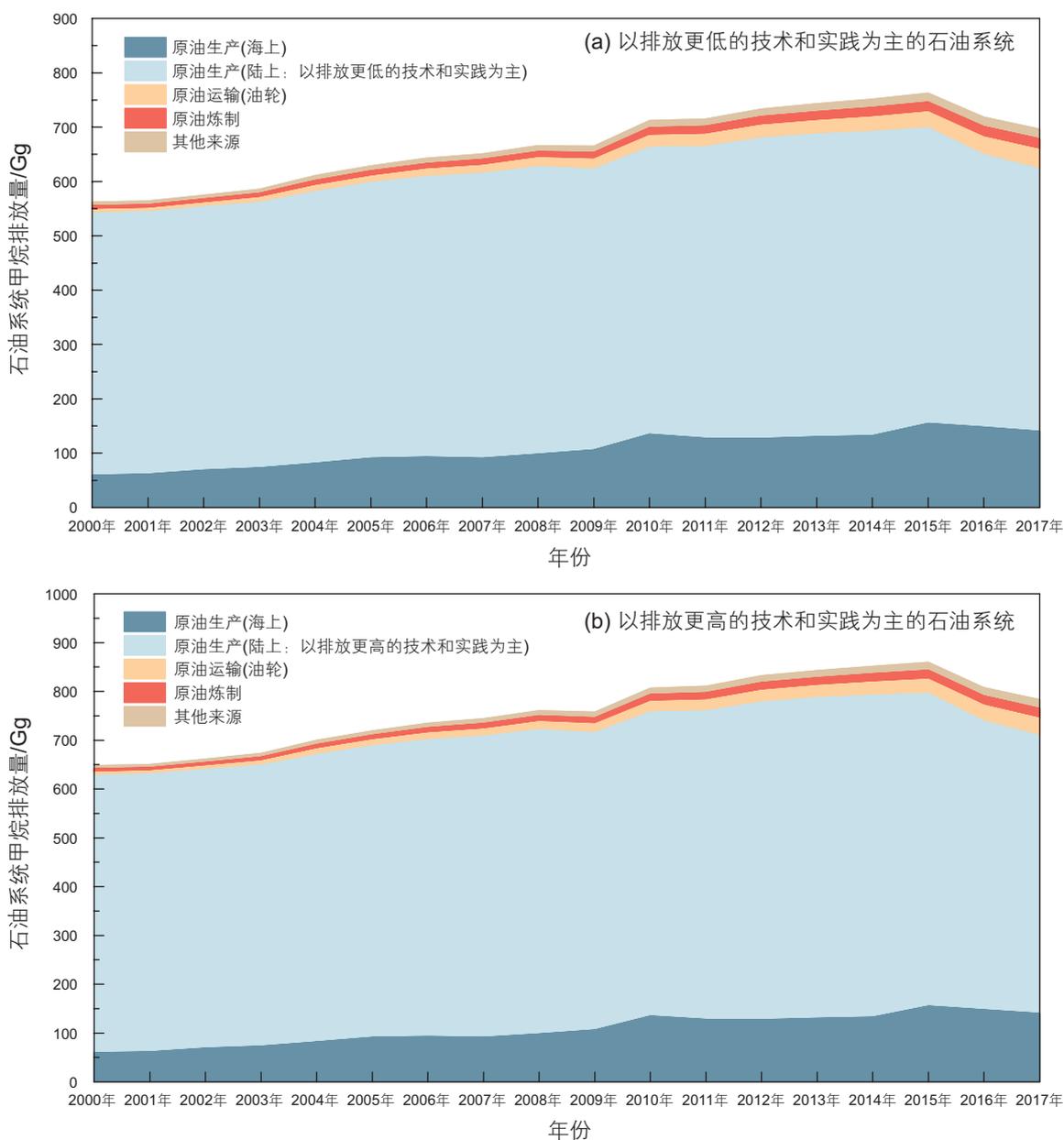


图3 2000—2017年石油系统的甲烷排放情况

Fig. 3 Methane emissions of oil systems from 2000 to 2017

总排放的69.3%，海上原油生产为139.9 Gg(20.0%)，原油运输(油轮)为35.4 Gg(5.0%)，原油炼制为20.4 Gg(2.9%)，其他来源为17.8 Gg(2.5%)。2000~2017年，生产环节(陆上和海上)、运输环节、炼制环节和其他来源总体贡献我国石油系统甲烷排放总量的93.5%、2.8%、2.0%和1.7%。在图3(b)中，2017年陆上原油生产甲烷排放量为569.4 Gg，占总排放的72.7%，海上原油生产为139.9 Gg(17.9%)，原油运输(油轮)为35.4 Gg(4.5%)，原油炼制为20.4 Gg(2.6%)，其他来源为17.8 Gg(2.3%)。生产环节(陆上和海上)、运输环节、炼制环节和其他来源总体贡献我国石油系

统甲烷排放总量的94.3%、2.4%、1.7%和1.5%。可以发现，高排放情景下的陆上原油生产排放比低排放情景高出86.4 Gg，从而导致各环节占比发生一定变化。

图4展示了2000~2017年我国天然气行业的甲烷逃逸排放情况。图4(a)为低排放情景下的天然气行业甲烷排放情况。伴随天然气产量的不断提升，天然气系统的甲烷逃逸排放也在不断增加，2000年的排放量为141.7 Gg，此后一直保持快速增长，到2017年为1000.7 Gg，是2000年的7.0倍，平均年增长率为12.1%。在高排放情景下(图4(b))，天然气行业甲烷排放量平均年增长速度与前者大致相同，但增长量较大，

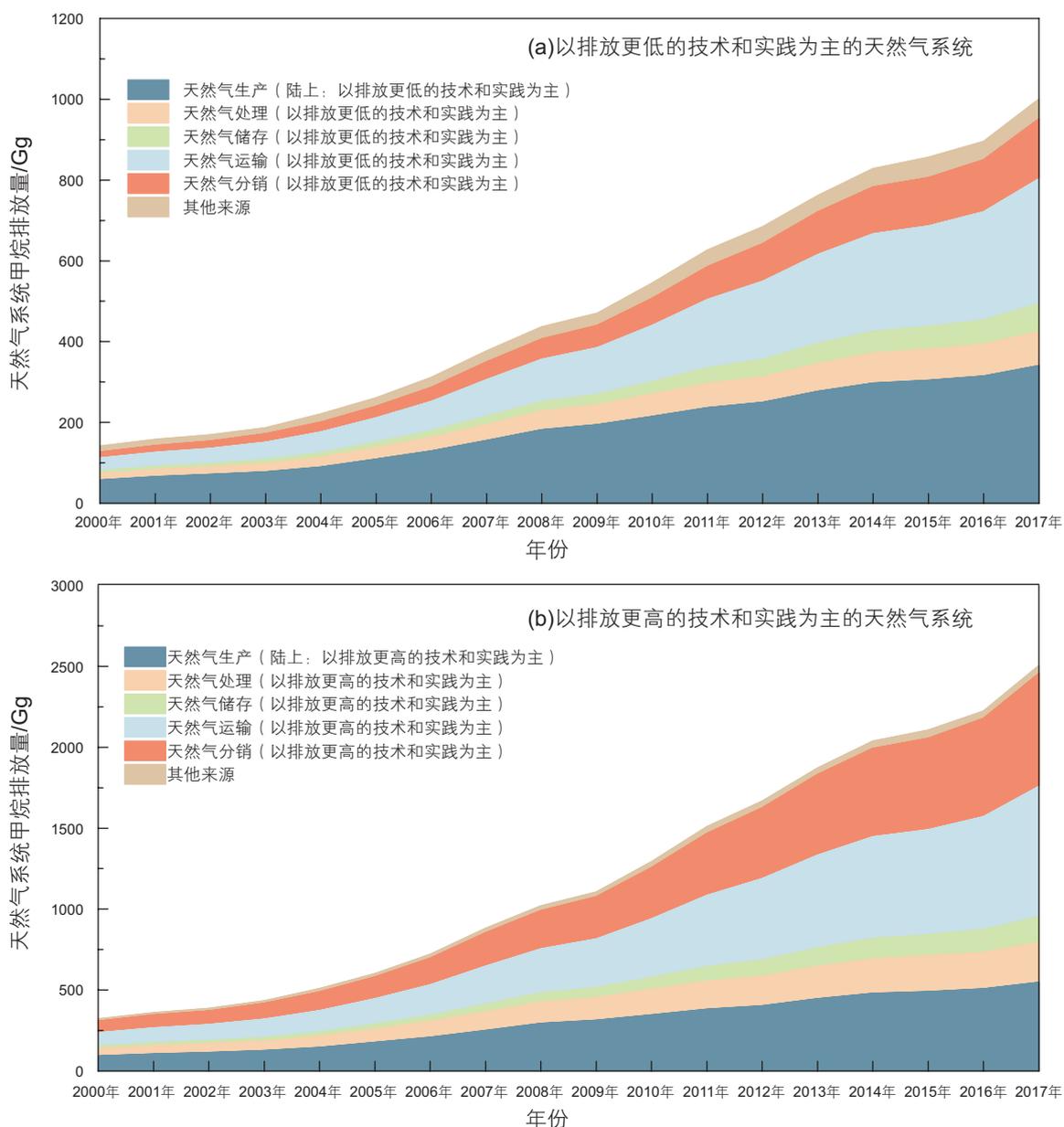


图4 2000—2017年天然气系统甲烷排放情况

Fig. 4 Methane emissions of natural gas systems from 2000 to 2017

2000 年的排放量为 322.5 Gg, 到 2017 年为 2505.3 Gg, 是 2000 年的 8.0 倍。

在排放来源方面, 低排放情景下天然气行业中的生产环节是最大的排放源, 该环节 2000 年的甲烷排放量为 57.4 Gg, 到 2017 年增长到 340.5 Gg, 是 2000 年的 6.0 倍。2017 年, 该环节占天然气系统总排放的 34.0%。天然气运输环节 2000 年的甲烷排放量为 31.6 Gg, 到 2017 年增加到 308.8 Gg, 是 2000 年的 9.8 倍。2017 年, 该环节占天然气系统总排放 30.8%。此外, 天然气分销和处理环节分别占 2017 年总排放的 14.8% 和 8.4%。其他排放来源(如海上天然气生产以及天然气勘探)甲烷排放量较小。总体上, 生产、处理、储存、运输、分销环节和其他来源在天然气系统排放总量中的占比为 37.7%、9.5%、6.1%、27.2%、13.0% 和 6.3%。但在高排放情景下, 天然气行业中的运输环节成为最大的甲烷排放源, 其中 2000 年甲烷排放量为 82.3 Gg, 2010 年所贡献的甲烷量超过天然气生产环节, 为 362.9 Gg。2017 年, 天然气运输、分销和生产环节的甲烷排放量分别为 804.2 Gg(32.0%)、698.9 Gg(27.9%) 和 548.2 Gg(21.9%)。生产、处理、储存、运输、分销环节和其他来源总体占天然气系统排放总量的 25.1%、11.4%、5.9%、29.4%、25.5% 和 2.6%。天然气运输环节在两种情景下的甲烷逃逸排放差异说明其具有较大的减排潜力。

### 3 我国油气行业甲烷逃逸排放的区域分布特征

图 5 为我国各地区油气勘探开发环节相关的甲烷逃逸排放情况。由于数据的可获得性, 未考虑油气储存和分销等环节的甲烷排放。图 5(a) 和 (b) 分别是在低排放情景和高排放情景下各地区甲烷逃逸排放量。计算后发现, 两种情景下各地区的甲烷排放占比基本一致, 因而以低排放情景为例进行结果分析。从图 5(a) 中区域分布特征来看, 东北、西北以及华东地区都存在排放大省。2000 年, 黑龙江、山东、新疆和四川贡献全国油气勘探开发相关甲烷逃逸排放总量的 60.5%, 相应的排放量分别为 188.3 Gg(30.0%)、92.2 Gg(14.5%)、74.2 Gg(11.7%) 和 28.7 Gg(4.50%)。其他省份甲烷排放量合计 139.4 Gg(22.0%)。到 2010 年, 陕西(173.7 Gg) 成为第一大省份, 新疆(166.4 Gg)、黑龙江(146.0 Gg)、天津(104.1 Gg) 也是油气勘探开发相关甲烷排放的重要区域, 上述 4 个地区合计贡献 60.6%。2017 年, 陕西贡献的排放量达到 251.9 Gg(22.7%), 其次是新疆

185.7 Gg(16.7%)、黑龙江 129.4 Gg(11.7%)、四川 113.2 Gg(10.2%), 上述 4 个地区贡献全国排放总量的 61.2%。

整体来看, 我国油气勘探开发布局的变动使得甲烷排放在空间分布上也相应变化。从 2000 年到 2017 年陕西油气勘探开发相关甲烷排放的年均增长率为 12.8%, 远高于其他地区。黑龙江的甲烷排放逐年减少, 但在全国仍占很大比例。2000—2008 年主要的甲烷排放省份为黑龙江、山东和新疆, 到 2017 年主要集中在陕西、新疆和四川, 油气勘探开发关联甲烷排放的空间转移很大程度上和西北以及西南地区天然气产量快速增加有关, 因而呈现出由东北以及华北地区向西北和西南地区的转移趋势。

### 4 我国油气行业甲烷逃逸排放总体清单及文献结果对比

本研究遵循《IPCC 2006 指南》第一层级方法, 选取《IPCC 2019》中更新的甲烷排放因子区间, 按照两种情景估算了我国油气行业历年的甲烷排放范围, 其中 2000 年的甲烷逃逸排放总量的估值范围为 703.6~970.4 Gg, 2017 年为 1697.3~3288.3 Gg。在低排放情景下, 2000 年石油和天然气系统的甲烷逃逸排放量分别为 561.9 Gg(占比 79.9%) 和 141.7 Gg(占比 20.1%); 到 2017 年, 石油和天然气系统的甲烷逃逸排放总量分别增长为 696.6 Gg(占比 41.0%) 和 1000.7 Gg(占比 59.0%)。在高排放情景下, 2017 年石油和天然气系统的甲烷逃逸排放总量分别为 783.0 Gg 和 2505.3 Gg, 占我国油气行业甲烷逃逸排放总量的 23.8% 和 76.2%。具体结果见表 4。

为进一步说明我国国家尺度油气行业甲烷逃逸排放清单研究情况, 图 6 对比了代表性文献和本研究的核算结果。从整体排放变化趋势来看, 共同的判断是我国油气行业的甲烷逃逸排放呈逐年增加。作为对比情景, 采用《IPCC 2006 指南》中第一层级的方法和适用发展中国家报告范围中的排放因子估算了历年油气行业甲烷逃逸排放量<sup>[17]</sup>, 2000 年的结果为 372.2 Gg, 到 2017 年为 1337.7 Gg, 结果普遍偏低。EDGAR5.0 数据库中所给出的我国 2015 年油气行业甲烷逃逸排放量为 3169.5 Gg, 是 2000 年的 2.35 倍, 并且年均增长率为 6.0%<sup>[25]</sup>, 上述数值均远大于国内研究人员的核算结果。Peng 等<sup>[11]</sup>认为, 2000 年和 2010 年我国油气行业的甲烷逃逸排放量为 900 Gg 和 1600 Gg, 高于基于《IPCC 2006 指南》计算得出的 369.7 Gg 和 849.8 Gg, 但在本研究的结果范围内。国家温室气体

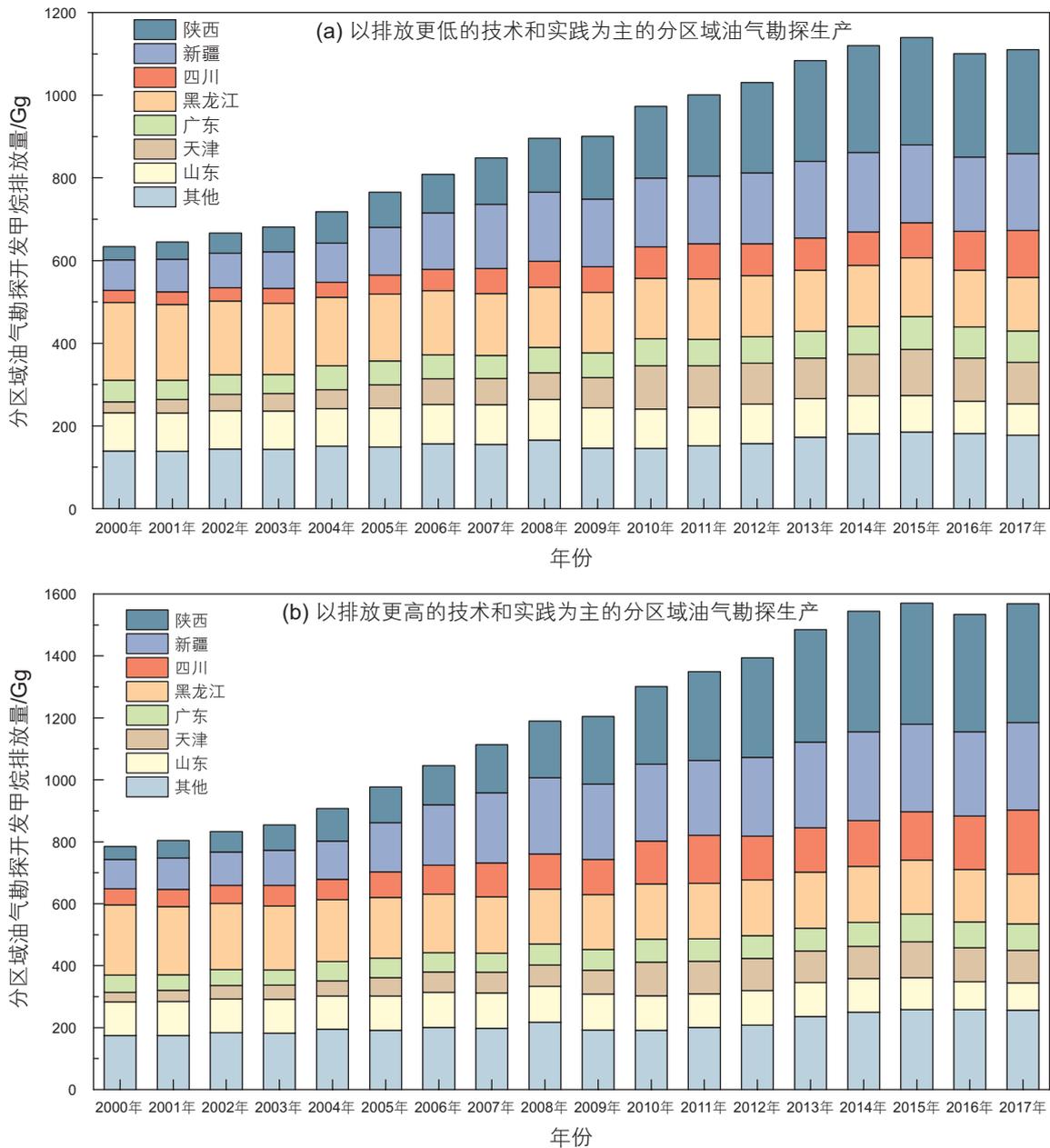


图5 2000—2017年分区域油气勘探开发相关甲烷排放

Fig. 5 Methane emissions from oil and natural gas exploration and production by region from 2000 to 2017

清单报道的2010、2012和2014年的甲烷逃逸排放量分别为964 Gg、1119 Gg和1127 Gg，与基于《IPCC 2006 指南》的核算结果较为接近<sup>[4,19,26-27]</sup>，低于本研究结果。Chen等<sup>[28]</sup>研究表明，2010—2013年我国油气生产的甲烷逃逸排放没有明显的增长趋势，甚至在2011年甲烷排放量还出现了下降。由于Zhang等<sup>[10]</sup>所选取的计算方法和《IPCC 2006 指南》的核算方法相同，因而在2000—2007年的核算结果非常相近。

总体上，上述研究的结果差异主要可以归因于核算范围、所选取的方法和不同来源的排放因子以及活

动水平数据。其中，从核算范围看，相比于其他研究而言，Chen等<sup>[28]</sup>缺少对原油炼制、天然气的储存和分销等环节的核算，这是导致其核算值略低的原因之一。从活动水平数据看，大部分研究均采用公开的统计数据，偏差很少。因此，估算值的差异主要来自于方法的差异和排放因子的选取。从方法上看，Zhang等<sup>[10]</sup>和Chen等<sup>[28]</sup>的研究采用《IPCC 2006 指南》第一层级方法。Peng等<sup>[11]</sup>将石油系统作为整体，采用统一排放因子(2.9 t/1000 m<sup>3</sup>)进行估算，而在天然气系统依据天然气产量和逃逸排放比率(4.8%~2.0%)进行估算，因而

表 4 中国油气行业甲烷逃逸排放总量(单位: Gg)

Table 4 Total methane emissions from China's oil & natural gas systems(Gg)

年份	低排放情景			高排放情景		
	石油系统	天然气系统	总计	石油系统	天然气系统	总计
2000年	561.9	141.7	703.6	648.0	322.5	970.5
2001年	564.0	158.0	722.0	650.2	361.0	1011.2
2002年	574.5	169.3	743.8	661.0	386.6	1047.6
2003年	585.8	187.1	772.9	673.1	433.5	1106.6
2004年	610.6	220.8	831.4	699.8	508.8	1208.6
2005年	628.7	261.0	889.7	719.2	602.4	1321.6
2006年	642.7	311.7	954.3	734.9	720.7	1455.6
2007年	650.8	377.4	1028.2	744.3	881.8	1626.1
2008年	665.9	436.3	1102.2	760.4	1020.3	1780.7
2009年	665.0	469.9	1135.0	757.3	1105.9	1863.2
2010年	711.9	545.1	1257.0	806.3	1292.9	2099.2
2011年	714.8	627.2	1341.9	810.6	1509.6	2320.2
2012年	733.2	684.1	1417.4	831.9	1667.1	2499.0
2013年	742.9	762.3	1505.2	842.5	1872.0	2714.5
2014年	751.5	828.2	1579.7	851.5	2038.0	2889.5
2015年	762.4	856.7	1619.1	859.4	2105.5	2964.9
2016年	718.2	895.4	1613.6	807.8	2222.5	3030.3
2017年	696.6	1000.7	1697.3	783.0	2505.3	3288.3

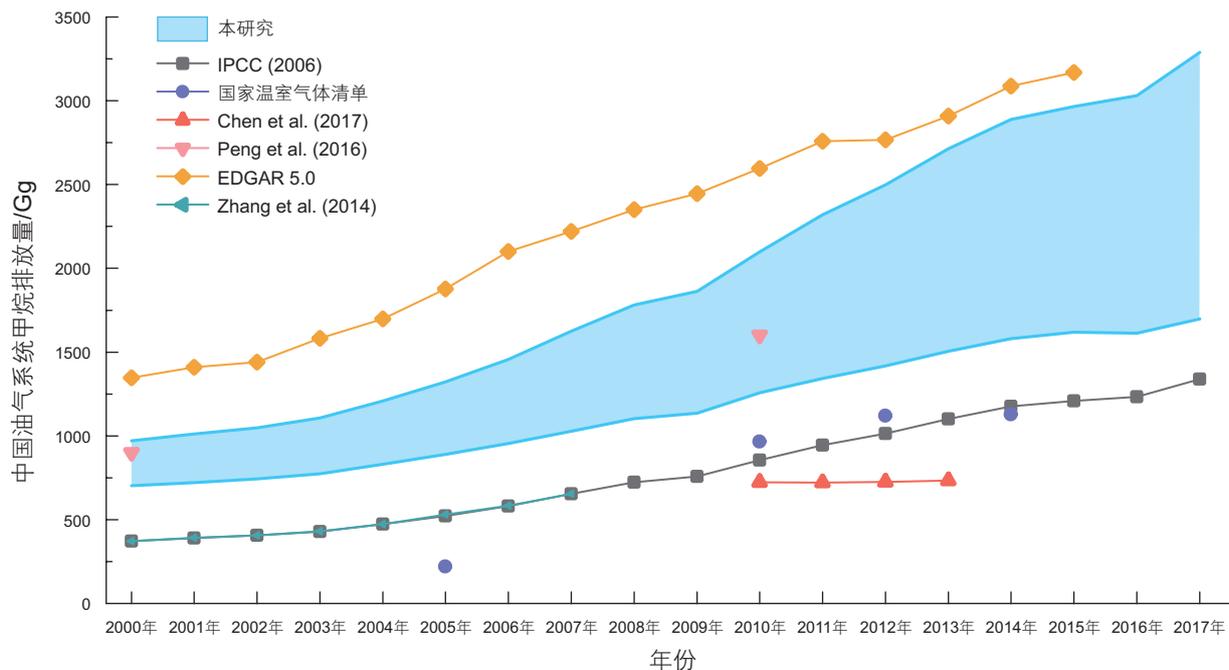


图 6 我国油气系统甲烷逃逸排放相关代表性研究结果对比

Fig. 6 Comparison of representative studies on the methane emissions from China's oil and natural gas systems

与其他研究相比,其不确定性较大。我国国家温室气体清单采用《IPCC 2006 指南》中第一层级和第三层级相结合的方法。EDGAR5.0 数据库和中国国家清单并未对中国油气系统排放估算细节进行说明,也未提

供所采用的排放因子,但均指出清单的不确定性较大。从表 5 可以看出,Chen 等<sup>[28]</sup>的甲烷排放因子较小是其估算值偏小的另一个原因。《IPCC2019》提高了部分环节的排放因子水平,因此估算结果明显高于基于

表5 代表性文献中的甲烷排放因子

Table 5 Methane emission factors in representative literature

排放源	《IPCC 2006 指南》 <sup>[17]</sup>	排放源	Chen et al. <sup>[28]</sup>
石油系统		天然气生产和运输	56.7 t/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>
原油生产(陆上设备泄漏)	0.3 t/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	油气共同生产和运输	0.247 t/10 <sup>4</sup> t
原油生产(海上设备泄漏)	0.000 59 t/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	原油生产和运输	11.1 t/10 <sup>4</sup> t
原油生产(工艺排空)	0.855 t/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>		
原油生产(喷焰燃烧)	0.0295 t/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>		
原油运输(管道)	0.0054 t/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>		
原油运输(油罐车或铁路)	0.025 t/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>		
原油炼制	0.0103 t/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>		
天然气系统			
天然气生产(设备泄漏)	3.01 t/MM m <sup>3</sup>		
天然气生产(喷焰燃烧)	0.000 88 t/MM m <sup>3</sup>		
天然气处理(设备泄漏)	0.25 t/MM m <sup>3</sup>		
天然气处理(喷焰燃烧)	0.0024 t/MM m <sup>3</sup>		
天然气运输(设备泄漏)	0.427 t/MM m <sup>3</sup>		
天然气运输(喷焰燃烧)	0.18 t/MM m <sup>3</sup>		
天然气储存	0.0415 t/MM m <sup>3</sup>		
天然气分销	1.8 t/MM m <sup>3</sup>		

《IPCC 2006 指南》的值,这与近年来国际上的相关研究报道油气甲烷排放通常被低估的发现相一致。

## 5 结论和建议

### 5.1 结论

(1)2000—2017年我国油气行业甲烷逃逸排放持续增加。综合考虑特定甲烷排放因子,2000年油气行业甲烷逃逸排放总量的估算范围为703.6(低排放情景)~970.4 Gg(高排放情景),到2017年增长到1697.3~3288.3 Gg。石油系统的甲烷排放先增加后下降,从2000年的561.9~648.0 Gg增长到2017年的696.6~783.0 Gg;天然气系统的甲烷排放保持持续增长,从2000年的141.7~322.5 Gg增长到2017年的1000.7~2505.3 Gg。在我国能源转型进程中,天然气被视为关键过渡能源,对天然气的需求量不断扩大,与之相关的天然气系统各环节甲烷排放正在快速增长。

(2)在研究期内,低排放情景下生产环节(陆上和海上)、运输环节、炼制环节和其他来源总体贡献我国石油系统甲烷排放总量的93.5%、2.8%、2.0%和1.7%;生产、处理、储存、运输、分销环节和其他来源在天然气系统排放总量中的总体占比为37.7%、9.5%、6.1%、27.2%、13.0%和6.3%。在高排放情景下,生产环节(陆上和海上)、运输环节、炼制环节和其他来源

总体贡献我国石油系统甲烷排放总量的94.3%、2.4%、1.7%和1.5%;生产、处理、储存、运输、分销环节和其他来源占天然气系统排放总量的25.1%、11.4%、5.9%、29.4%、25.5%和2.6%。油气系统中的生产环节以及天然气系统的储存和运输环节(高排放情景)是关键排放源,这些重点排放源具有较大的减排潜力。

(3)2000—2017年,我国油气勘探开发相关甲烷逃逸排放存在较大的空间分布差异且变化显著。2000年,甲烷逃逸排放主要源自于东北和华北地区的油气资源开发,黑龙江和山东是这两个地区的排放大省。随后,黑龙江和山东的甲烷排放呈下降趋势,而陕西、新疆和四川的甲烷排放持续增加,主要归因于油气勘探开发区域转移。其中,陕西油气勘探开发相关甲烷排放的增长最为显著,2017年陕西、新疆、四川和黑龙江合计占当年油气勘探开发环节甲烷排放总量的61.2%(低排放情景)。

(4)与其他清单研究结果的对比表明,关于我国油气行业甲烷逃逸排放研究的核算结果仍然存在较大的差异。甲烷逃逸排放因子和活动水平数据以及核算范围不完整都是引起清单差异的重要来源。现有研究的有限性以及相关清单研究方法与手段的不足导致当前仍然不足以清晰准确地认识我国不同尺度油气系统甲烷排放格局。

## 5.2 建议

针对我国油气行业甲烷逃逸排放清单研究的不足,本研究仅对我国2000—2017年的油气行业甲烷逃逸排放进行了初步的核算与分析,完善油气行业甲烷逃逸排放清单的编制工作仍有大量工作要做。主要建议如下:

(1) 积极推进我国官方国家甲烷排放清单编制的常态化。采用《IPCC 2006 指南》方法学和后续更新的国家温室气体清单方法学编制长时间序列的官方国家温室气体清单,尤为迫切。目前,基于项目负责制的国家温室气体清单编制安排无论从质量上还是效率上,均无法满足不同层面的清单需求,不利于及时推进甲烷减排工作。清单编制的常态化可以动态反映我国不同类别甲烷排放的变化情况,而且清单的一致性和可比性会大大提高,同样有利于针对油气行业制定具体的减排行动计划<sup>[29]</sup>。

(2) 建立适宜于我国油气行业甲烷逃逸排放清单编

制的方法学。支持开展反映不同尺度油气系统特征的甲烷逃逸排放因子研究以及基于实测的计算方法和其他清单编制方法学研究。加快我国油气行业特定排放因子的测量和数据收集与统计,探讨“自上而下”和“自下而上”的清单编制方法的结合<sup>[30]</sup>。整合不同层级活动水平和关联排放因子数据,针对全产业链,构建完整全面的清单可靠性识别与优化方法,强化清单研究的一致性。

(3) 积极推进高分辨率油气系统甲烷排放源识别工作。鼓励涉及油气产业链不同环节的能源企业,积极投入自主技术装备研发,对代表性的设备进行连续性甲烷排放现场检测,建立设备级的排放水平数据库<sup>[31]</sup>。积极开展不同空间尺度(如设备、场站、采油厂、区块、油气田)的高分辨率甲烷排放监测与分析工作<sup>[32]</sup>,将有助于形成基于大数据的油气行业甲烷减排决策和最佳工程实践,协同推进我国能源行业甲烷减排事业。

## 参考文献

- [1] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). IPCC fifth assessment report: Climate change 2013 (AR5)[EB/OL]. [2020-12-28]. <http://www.ipcc.ch/index.htm>.
- [2] SAUNOIS M, BOUSQUET P, POULTER B, et al. The global methane budget 2000–2012[J]. *Earth System Science Data*, 2016, 8: 697–751.
- [3] KIRSCHKE S, BOUSQUET P, CIAIS P, et al. Three decades of global methane sources and sinks[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(10): 813–823.
- [4] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[R]. 北京: 生态环境部, 2019: 7–19. [National Development and Reform Commission. The People's Republic of China's second biennial update on climate change[R]. Beijing: China Environmental Press, 2019: 7–19.]
- [5] 国家能源局石油天然气司, 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 自然资源部油气资源战略研究中心. 中国天然气发展报告[R]. 北京: 石油工业出版社, 2019. [Department of Petroleum and Natural Gas, National Energy Administration; Institute of Resources and Environmental Policy, Development Research Center of the State Council; Oil and natural gas Resources Strategic Research Center, Natural Resources Department. China natural gas development report[R]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.]
- [6] 康玉柱. 塔里木盆地油气资源潜力及勘探方向. 石油科学通报, 2018, 04: 369–375. [KANG Y Z. The resource potential and exploration for oil and gas in the Tarim Basin. *Petroleum Science Bulletin*, 2018, 04: 369–375.]
- [7] 贾承造, 庞雄奇, 姜福杰. 中国油气资源研究现状与发展方向[J]. 石油科学通报, 2016, 1(01): 2–23. [JIA C Z, PANG X Q, JIANG F J. Research status and development directions of hydrocarbon resources in China. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 1(01): 2–23]
- [8] 刘均荣, 姚军. 油气系统甲烷排放源及减排技术[J]. 油气田地地面工程, 2008, 27(07): 55–56. [LIU J R, YAO J. Methane emission sources and emission reduction technologies for oil and natural gas systems[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2008, 27(07): 55–56.]
- [9] 张仁健, 王明星, 李晶, 等. 中国甲烷排放现状[J]. 气候与环境研究, 1999, 2(02): 3–5. [ZHANG R J, WANG M X, LI J, et al. The present status of the emission methane in China[J]. *climatic and environmental research*, 1999, 2(02): 3–5.]
- [10] ZHANG B, CHEN G Q, LI J S, et al. Methane emissions of energy activities in China 1980–2007[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29: 11–21.
- [11] PENG S S, PIAO S L, BOUSQUET P, et al. Inventory of anthropogenic methane emissions in mainland China from 1980 to 2010[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(22): 14545–14562.
- [12] 黄满堂, 王体健, 赵雄飞, 等. 2015年中国地区大气甲烷排放估计及空间分布[J]. 环境科学学报, 2019, 39(05): 1371–1380. [HUANG M T, WANG T J, ZHAO X F, et al. Estimation of atmospheric methane emissions and its spatial distribution in China during 2015[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(05): 1371–1380.]

- [13] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等.《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读[J]. 环境工程, 2019, 37(08): 1–11. [CAI B F, ZHU S L, YU S M, et al. The interpretation of 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(08): 1–11.]
- [14] IPCC. Revised 1996 IPCC guidelines for uncertainty management in national greenhouse gas inventories[M]. Kanagawa: The Institute for Global Environmental Strategies, 1996.
- [15] IPCC. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories[M]. Kanagawa: The Institute for Global Environmental Strategies, 2000.
- [16] IPCC. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry[M]. Kanagawa: The Institute for Global Environmental Strategies, 2003.
- [17] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Kanagawa: The Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [18] IPCC. 2013 Supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories wetlands[R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- [19] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[R]. 北京: 生态环境部, 2012: 57–86. [National Development and Reform Commission. The second national communication on climate change of the People's Republic of China[R]. Beijing: China Environmental Press, 2012: 57–86.]
- [20] 王田, 董亮, 高翔.《巴黎协定》强化透明度体系的建立与实施展望[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(06): 684–692. [WANG T, DONG L, GAO X. Establishment and implementation prospects of the enhanced transparency system under the Paris Agreement[J]. Climate Change Research, 2019, 15(06): 684–692.]
- [21] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[R]. Kyoto: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.
- [22] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001–2018. [Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China energy statistical year book (2001–2018)[M]. Beijing: China Statistical Press, 2001–2018.]
- [23] 中华人民共和国自然资源部. 中国海洋统计年鉴[M]. 北京: 海洋出版社, 2001–2017. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China marine statistical year book (2001–2017)[M]. Beijing: Marine Press, 2001–2017.]
- [24] 国家海洋局. 2017 年中国海洋经济统计公报[EB/OL]. [2020–12–25]. <http://www.nmdis.org.cn/c/2018-03-27/60499.shtml>. [State Oceanic Administration. Statistical bulletin of China's marine economy in 2017. <http://www.nmdis.org.cn/c/2018-03-27/60499.shtml>]
- [25] EDGAR. Emission database for global atmospheric research (EDGAR), 2019. Release version 5.0. European Commission, Joint Research Centre (JRC)/PBL Netherlands Environmental Assessment Agency[DB/OL]. [2020–12=28]. <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/index.php/>.
- [26] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告[R]. 北京: 中国环境出版社, 2016: 9–21. [National Development and Reform Commission. The People's Republic of China first biennial update report on climate change National Development and Reform Commission[R]. Beijing: China Environmental Press, 2016: 9–21.]
- [27] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报[R]. 北京: 中国环境出版社, 2018: 20–42. [National Development and Reform Commission. The third national communication on climate change of the People's Republic of China[R]. Beijing: China Environmental Press, 2018: 20–42.]
- [28] CHEN G J, YANG S, LV C F, et al. An improved method for estimating GHG emissions from onshore oil and natural gas exploration and development in China[J]. Science of The Total Environment, 2017, 574: 707–715.
- [29] 马翠梅, 王田. 国家温室气体清单编制工作机制研究及建议[J]. 中国能源, 2017, 39(04): 20–24. [MA C M, WANG T. Study on working mechanism of national greenhouse gas inventories and suggestions[J]. Energy of China, 2017, 39(04): 20–24.]
- [30] 孙永彪, 张春香, 解东来, 等. 天然气系统甲烷排放测量与估算研究现状[J]. 油气田地面工程, 2020, 39(10): 30–37. [SUN Y B, ZHANG C X, XIE D L, et al. Current status of measurement and estimation of methane emission in natural gas system[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2020, 39(10): 30–37.]
- [31] 李政, 孙铄, 董文娟, 等. 能源行业甲烷排放科学测量与减排技术[EB/OL]. [2021.02.05]. <http://iccsd.tsinghua.edu.cn/reasearch/reasearch.html>. [LI Z, SUN S, DONG W J, et al. Methane emissions measurement and reduction in the energy sector[EB/OL]. [2021.02.05]. <http://iccsd.tsinghua.edu.cn/reasearch/reasearch.html>.]
- [32] 薛明, 翁艺斌, 刘光全, 等. 石油与天然气生产过程甲烷逃逸排放检测与核算研究现状与建议[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(2): 187–196. [XUE M, WENG Y B, LIU Q G, et al. Current status on fugitive methane emission measurements and inventory during oil and gas production[J]. Climate Change Research, 2019, 15(2): 187–196.]