

仲佳爱,陈国俊,张中宁,等. 四川盆地气矿天然气开发过程中温室气体的排放特征[J]. 环境科学研究, 2015, 28(3): 355-360.

ZHONG Jia'ai, CHEN Guojun, ZHANG Zhongning, et al. Greenhouse gas emissions from natural gas development process in a gas field in Sichuan Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(3): 355-360.

四川盆地气矿天然气开发过程中温室气体的排放特征

仲佳爱^{1,2,3}, 陈国俊^{1,2*}, 张中宁^{1,2}, 杨巍^{1,2,3}, 王作栋^{1,2}

1. 中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 甘肃省油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000

3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 天然气开发过程是化石能源系统重要的排放源之一。包括我国在内的发展中国家对于油气系统温室气体排放的研究尚处于起步阶段, 并且也无统一的计算方法。为研究我国天然气开发过程中温室气体排放情况, 以四川盆地某较大规模(年产气量约 $16 \times 10^8 \text{ m}^3$) 的天然气气矿为研究对象。利用甲烷泄漏浓度检测仪对该气矿井口、集气站、配气站等场站的所有元件的潜在泄漏点进行了逐一检测, 同时采集油田水和天然气样品, 在实验室对油田水露天放置过程和天然气火炬燃烧过程的温室气体排放进行了模拟研究, 计算了该矿 2011 年天然气开发过程中温室气体排放量。结果表明: 2011 年研究气矿 CH_4 和 CO_2 排放量分别为 1 033.32 和 1 295.56 t, 折合 CO_2 当量为 27 128.56 t。与采用 IPCC(政府间气候变化专门委员会)《2006 年国家温室气体清单指南》第一层次方法计算的结果对比发现, IPCC 方法计算结果(CH_4 和 CO_2 排放量分别为 20 287.39、12 479.74 t, 折合 CO_2 当量为 519 664.74 t) 远高于实测法计算结果, 因此, IPCC 方法总体上严重高估了我国温室气体排放量。

关键词: 温室气体; 计算方法; 天然气开发; 四川盆地

中图分类号: X51

文章编号: 1001-6929(2015)03-0355-06

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2015.03.04

Greenhouse Gas Emissions from Natural Gas Development Process in a Gas Field in Sichuan Basin

ZHONG Jia'ai^{1,2,3}, CHEN Guojun^{1,2*}, ZHANG Zhongning^{1,2}, YANG Wei^{1,2,3}, WANG Zuodong^{1,2}

1. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Gansu Province, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Greenhouse gas (GHG) emissions from the process of natural gas development is an important emission source in the fossil energy system. Research on greenhouse gas emissions from the oil and gas system is still in its infancy in developing countries such as China. As a major gas producer, the Sichuan Basin was investigated. A large-scale representative gas field with 160 million m^3 was selected to study GHG emissions in the exploration and development of natural gas. Each potential gas leak point among all the components at the stations, such as wellhead, gas gathering station and gas distributing station, was monitored by CH_4 concentration detector. In addition, the GHG emissions from gas field water storage in open air water pools and torching were simulated in the laboratory. Combining the simulated and field-measured data, the emissions were precisely calculated in the study area in 2011. The results showed that CH_4 and CO_2 emissions were 1,033.32 t and 1,295.56 t in the study area in 2011, converted to an equivalent of CO_2 of 27,128.56 t. As compared with results determined by the first-level method of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (20,287.39 t of CH_4 and 12,479.74 t of CO_2 , converted to equivalent of CO_2 of 519,664.74 t), the IPCC's result is much higher than the results of field measurement.

收稿日期: 2014-03-28

修订日期: 2014-07-18

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05030300)

作者简介: 仲佳爱(1985-), 男, 甘肃民勤人, zhongjia555@163.com.

* 责任作者, 陈国俊(1967-), 男, 甘肃武威人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事油气储层地质、油气田温室气体排放研究, gjchen@lzb.ac.cn

Keywords: greenhouse gas; calculation method; natural gas development; Sichuan Basin

天然气开发不可避免地造成大量 CH_4 、 CO_2 等温室气体的排放, 是非常重要的温室气体排放源之

—^[1-6]. 虽然科学家很早就对这一问题有所认识,但是对于天然气开发过程中碳排放量的定量计算尚缺乏统一的认识^[7-16]. 目前国内外对于我国天然气开发过程中温室气体排放量的计算主要采用 IPCC《2006 年国家温室气体清单指南》第一层次方法(下称 IPCC 方法),该方法用活动因子乘以排放因子而得到排放量,其排放因子对于我国的适用性尚不确定,故计算结果的科学性及准确性无法保证^[17-18].

四川盆地是我国目前最大的天然气生产基地,有 60 多 a 的天然气勘探开发历史,对于我国天然气开发过程中温室气体排放的研究具有代表性^[19-20]. 因此,该研究选取四川盆地某气矿,在 3 个重点研究气田采集了 6 个油田水样品及 21 个钢瓶天然气样品,对油田水样品进行了 CH₄ 排放模拟试验,以得到不同温度条件下油田水中 CH₄ 的排放量数据;对天然气样品进行火炬燃烧试验,以得到自然条件下天然气喷焰的燃烧率. 同时随机选取了研究气田数个井口、单井站、集气站、配气站、分离器、脱硫塔及压缩机,采用甲烷浓度检测仪器对各生产设备的法兰、阀芯、接头、加脂孔等所有潜在漏点进行现场检测,以期得到各漏点处的 CH₄ 浓度,然后运用自行开发的泄漏量计算软件计算出检测点的泄漏数据. 将实验室模拟与现场检测相结合,并详细划分了天然气开发过程中的温室气体排放环节,针对每一环节提出了具体的温室气体排放计算方法,计算出研究气矿 2011 年度温室气体排放通量. 在此基础上,采用 IPCC 方法,计算研究气矿 2011 年温室气体排放量. 对上述 2 种方法计算结果进行对比,以期为我国制订减排措施及参与全球环境活动提供材料.

1 研究方法

1.1 温室气体排放环节

参考 IPCC《2006 年国家温室气体清单指南》以及美国石油协会(API)2009 年《石油天然气工业温室气体排放估算纲要》等国际对于油气系统温室气体排放研究较成熟的成果,同时咨询国内油气田专家的意见,根据我国实际情况,将天然气开发过程划分为钻探、开发、储运三大阶段^[21-30](见图 1).

根据多次现场调查及监测工作,结合油气田专家意见,研究气矿温室气体排放大多发生在钻井、试油、设备维修、气体生产、气体处理及油田水等环节. 这些环节基本涵盖了天然气开发过程中有可能造成温室气体排放的源. 该研究划分的排放环节与 IPCC 方法所划分的油气系统的排放环节进行对比,结果如表

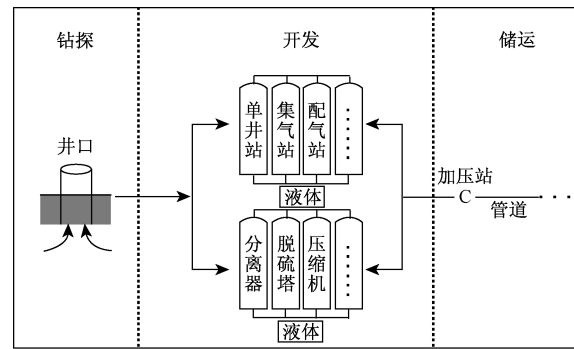


图 1 天然气开发流程

Fig. 1 Natural gas development workflow

1 所示. 由表 1 可知,在除气体环节之外的其他环节中,IPCC 方法与该研究基本相同;而在气体处理环节,IPCC 方法划分为各种生产厂,而国内并不存在 IPCC 方法所列的生产厂,所以该研究统计了气体处理过程中的各种设备. 另外,在设备维修和油田水环节,该研究与 IPCC 方法也存在差异. 其中,该研究的井维修环节包括了天然气开发过程中各个环节可能会出现的设备维修,较 IPCC 方法统计更加全面. 天然气生产过程中会产出大量的油田水,其在采出地表后受温度和压力条件改变的影响,油田水中所溶解的天然气会不断释放,从而导致温室气体排放. 该研究将油田水环节做为一个重要的温室气体排放环节,而 IPCC 方法并未考虑该环节.

表 1 温室气体排放环节对比

Table 1 Comparison between emission stages

排放环节	细分环节	
	IPCC 方法	实测法
钻井	所有	所有
测试井	所有	所有
设备维修	所有	所有
气体生产	所有	井口、单井站、集气站、配气站等
气体处理	脱硫气体厂、酸性气体厂、深度提炼厂	分离器、脱硫塔、压缩机等
油田水	未统计	所有

1.2 各环节计算方法

钻井:由于现代钻井工艺水平的提高及各种防喷技术的实施,钻井过程基本杜绝了天然气泄漏. 现场检测亦表明,钻井过程无温室气体排放,故认为钻井过程温室气体为零排放.

测试井环节:测试井就是对新完钻的探井试油,试油的主要目的是确定所试层位有无工业油气流. 钻井完成后,对可能采出油气的地层射孔,利用专门设备诱导地下岩层中的油气汇入井内,从而采收油气

并对各种流体和地层进行测定。根据现场调查,研究气矿试油环节温室气体排放分为直接泄放和喷焰燃烧2种方式。安装完钻井井口及井底装置后,在未点燃前,首先会有一部分天然气泄放出来,这部分天然气直接排入大气中,可以根据泄放量与天然气组分数据分别计算出 CH_4 和 CO_2 的排放量。之后点燃天然气,天然气燃烧生成的 CO_2 与未充分燃烧的天然气中的 CH_4 是该部分排放的温室气体,根据天然气流量、燃烧率及组分数据可以计算出 CH_4 和 CO_2 的排放量。该研究统计分析了研究气矿2006—2011年30

口气井的试油数据,平均每口井试油过程中直接泄放天然气量达 109.94 m^3 ,燃烧天然气量达 $3\,770.98 \text{ m}^3$,从而可根据2011年新增钻井数量计算当年试油环节天然气的总排放量。

1.2.1 直接泄放过程温室气体排放量计算

研究气矿2011年新增55口钻井,直接泄放天然气 $6\,046.7 \text{ m}^3$,直接泄放的天然气中有 CH_4 、 CO_2 等温室气体以及 C_2 、 C_3 、 C_4 等非温室气体,根据研究气矿天然气组分数据(见表2)和 $w(\text{CH}_4)$ 、 $w(\text{CO}_2)$ 的平均值,计算温室气体排放量。

表2 研究气矿天然气组分特征

Table 2 The characteristic of natural gas composition in focused research gas field

项目	$w(\text{CH}_4)$	$w(\text{C}_2\text{H}_6)$	$w(\text{C}_3\text{H}_8)$	$w(\text{C}_4\text{H}_{10})$	$w(\text{C}_5\text{H}_{12})$	$w(\text{CO}_2)$	$w(\text{H}_2\text{S})$	$w(\text{N}_2)$
范围	90.76~98.33	0.42~4.88	0.04~1.62	0.01~0.60	0.03~0.23	0.04~1.04	0.00~1.47	0.36~2.64
平均值	94.96	2.12	0.64	0.22	0.08	0.35	0.11	1.28

1.2.2 喷焰燃烧过程温室气体排放量计算

根据新增钻井数量及每口井试油过程中平均喷焰燃烧天然气量,计算研究气矿2011年共燃烧天然气 $207\,403.9 \text{ m}^3$ 。燃烧过程中 CH_4 排放来自天然气中未燃烧的 CH_4 ,根据研究气矿天然气火炬燃烧试验可知,天然气的燃烧率为98%,故以平均喷焰燃烧天然气量乘以平均 $w(\text{CH}_4)$ 再乘以2%,即得到燃烧过程中 CH_4 排放量。 CO_2 的排放来自两部分:①来自天然气中原有的 CO_2 ;②来自于 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 及 C_5 燃烧产生的 CO_2 。

1.2.3 设备维修环节温室气体排放量计算

气田生产设备在运行过程中不可避免地要出现故障,对故障设备进行维修就必须把设备内的天然气放空,因此会造成温室气体排放。油气田设备维修种类、周期、频次等复杂多变,并且无规律可循。但根据对油气田专家和设备维护人员的调研可知,一般情况下绝大多数设备3~5 a甚至更长时间才维修一次,故该研究假定所有设备每a平均维修一次,从而根据设备容积计算设备维修环节温室气体排放量的最大值。

收集了研究气矿3个重点研究气田的生产设备容积,根据各气田的组分数据,可以计算设备内温室气体的体积,然后根据标况下的密度,分别计算 CH_4 和 CO_2 的质量。通过产量数据即可得到3个重点研究气田单位产量所排放的温室气体量,对三者平均,即为研究气矿单位产量平均温室气体排放量,结合该矿2011年天然气产量,可计算其当年设备维修环节的 CH_4 和 CO_2 排放量。

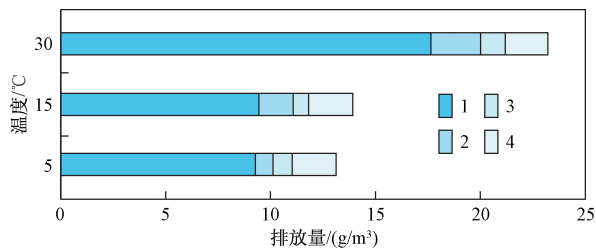
1.2.4 气体生产和处理环节温室气体排放量计算

根据现场调查,天然气生产环节和处理环节温室气体排放方式相同,故可以用同一方法计算。IPCC方法将气体生产和处理环节温室气体的排放分为泄放与喷焰燃烧2种。根据实地调研,研究气矿不存在火炬燃烧,所以不存在喷焰燃烧排放。对于气体生产和处理环节的温室气体泄放,调研汲取了国内外的优良做法,随机抽取了重点研究气田数个井口、单井站、集气站、配气站、分离器、脱硫塔及压缩机,采用温室气体浓度检测仪器对各生产设备的法兰、阀芯、接头、加脂孔等所有潜在漏点进行检测,得到各漏点处的 CH_4 浓度,计算得到每种设备1 a的泄漏量,除以设备数量即得到平均泄漏量,再乘以该类型设备总数得到该设备总泄漏量。

1.2.5 油田水环节温室气体排放量计算

油田水中溶解了大量的天然气,采出地面后,在露天放置过程中会有温室气体释放出来。该研究采集了大量油田水样品,在实验室内模拟了5、15、30℃下温室气体排放过程,结果如图2、3所示^[31]。从图2、3可见,在同一温度下,油田水 CH_4 和 CO_2 排放量随时间增加呈阶梯式递减。

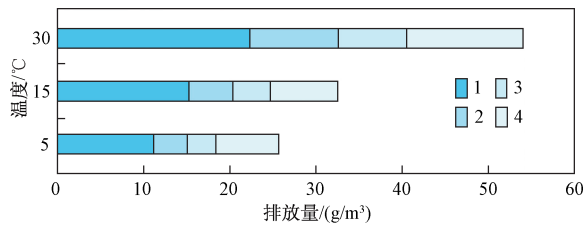
根据现场调查,研究气矿的油田水一般在72 h内回注,当地年均气温约为15℃,故按照0~72 h、15℃条件下计算,油田水 CH_4 排放率为 13.86 g/m^3 , CO_2 排放率为 32.65 g/m^3 (见表3)。研究气矿2011年油田水产量约 $187 \times 10^4 \text{ m}^3$,乘以温室气体排放率即可得到其排放量。



模拟时间/h: 1—0~12; 2—>12~24; 3—>24~36; 4—>36~48.

图2 不同温度条件下各时间段 CH₄ 排放量

Fig. 2 CH₄ emissions in different time at different temperature



模拟时间/h: 1—0~12; 2—>12~24; 3—>24~36; 4—>36~48.

图3 不同温度条件下各时间段 CO₂ 排放量

Fig. 3 CO₂ emissions in different time durations at different temperature

表3 油田水环节温室气体排放率计算值

Table 3 GHG emission simulation results of oil field water g/m³

模拟时间/h	CH ₄ 排放率			CO ₂ 排放率		
	5 °C	15 °C	30 °C	5 °C	15 °C	30 °C
0~12	9.31	9.44	17.63	11.49	15.48	22.40
0~24	10.16	10.96	19.87	15.17	20.42	32.63
0~36	11.03	11.75	21.22	18.62	24.81	40.59
0~72	13.09	13.86	23.29	25.70	32.67	54.02

1.3 IPCC 方法

IPCC 方法把油气系统温室气体排放划分为“能源”类中的“逸散排放”子类,并提供了3种不同层次的计算方法以及相应的排放因子。目前,在无法实测我国油气系统温室气体排放量的前提下,国内外学者通常使用该方法来估算我国温室气体的排放量^[30]。IPCC 方法通过活动因子和排放因子计算排放量,并将油气开发过程分为几个环节,针对每个环节规定了适用于发达国家和发展中国家的2个排放因子。排放量计算:

$$E_{\text{气体},i} = A_i \times EF_{\text{气体},i}$$

$$E_{\text{气体}} = \sum E_{\text{气体},i}$$

式中: $E_{\text{气体}}$ 为工业部门温室气体总排放量, 10^3 t; $E_{\text{气体},i}$ 为 i 工业部门温室气体年度排放量, 10^3 t;

$EF_{\text{气体},i}$ 为 i 工业部门温室气体排放因子, 10^3 t/单位活动; A_i 为工业部门活动值,一般为设备数量或产量。

2 结果与分析

2.1 研究气矿温室气体排放通量

根据 1.2 节归纳的各环节计算方法可得,研究气矿 2011 年共排放 CH₄ 1 033.32 t、CO₂ 1 295.56 t(见表 4)。

表4 研究气矿 2011 年温室气体排放量

Table 4 Total GHG emission in study area in 2011

环节	设备	排放量/t		
		CH ₄	CO ₂	CO ₂ 当量
钻井	所有	—	—	—
测试井	所有	7.95	412.94	611.69
设备维修	所有	7.80	811.55	1 006.55
气体生产	井口	95.38	0.97	
	单井站	101.34	1.03	24 060.50
	集气站	584.42	5.92	
	配气站	180.89	1.83	
气体处理	分离器	16.92	0.17	
	脱硫塔	9.63	0.10	741.55
	压缩机	3.10	0.03	
油田水	所有	25.89	61.02	708.27
合计		1 033.32	1 295.56	27 128.56

注: —表示无排放。

2.2 IPCC 方法计算结果

根据 IPCC 方法,收集了 2011 年研究气矿新增井数量、生产井数量及产量等活动因子数据,选取 IPCC 方法第一层次排放因子中值作为排放因子,计算出研究气矿 2011 年 CH₄ 排放量为 20 287.39 t,CO₂ 排放量为 12 479.74 t(见表 5)。

2.3 实测结果与 IPCC 方法计算结果对比

将实测法和根据 IPCC 方法计算的研究气矿 2011 年各环节 CH₄、CO₂ 排放量以及 CO₂ 当量进行对比,结果如图 4 所示。由图 4 可知:①2 种方法所得的各环节排放量大小、顺序基本一致,最重要的排放环节均是气体生产环节,说明 2 种方法具有可比性。②实测法认为,没有温室气体排放的钻井环节和 IPCC 方法没有涉及的油田水环节对于总排放量的贡献都很小,所以对于计算结果影响不大;该研究中的设备维修环节包含了井维修及其他设备的维修,IPCC 方法的井维修环节温室气体排放量远高于实测值,若 IPCC 方法考虑其他设备维修过程的温室气体排放量,计算出的排放量会更高,二者相差也会更大。③IPCC 方法计算值均高于实测法的计算值,各环节差别在 8~20 倍之间,IPCC 方法所得温室气体总排

表 5 IPCC 方法计算得到的 2011 年温室气体排放量

Table 5 Total GHG emission calculated by IPCC method in 2001

环节	排放来源	排放因子		活动因子	排放量/t		
		CH ₄	CO ₂		CH ₄	CO ₂	CO ₂ 当量
钻井	喷焰燃烧和泄放	2.97×10^{-4}	9.00×10^{-4}	55 口 ¹⁾	16.31	49.50	457.25
测试井	喷焰燃烧和泄放	4.51×10^{-4}	7.95×10^{-2}	55 口 ¹⁾	24.78	4372.5	4 992.00
设备维修	喷焰燃烧和泄放	9.55×10^{-4}	1.70×10^{-5}	502 口 ²⁾	479.41	8.51	11 993.76
气体生产	溢散	1.22×10^{-2}	9.70×10^{-5}	$1 588.6 \times 10^6 \text{ m}^3$	19 364.55	154.09	484 267.84
	喷焰燃烧	8.80×10^{-7}	1.40×10^{-3}	$1 588.6 \times 10^6 \text{ m}^3$	1.40	2 223.98	2 258.98
气体处理	溢散	2.50×10^{-4}	2.00×10^{-5}	$1 588.6 \times 10^6 \text{ m}^3$	397.14	31.77	9 960.27
	喷焰燃烧	2.40×10^{-6}	3.55×10^{-3}	$1 588.6 \times 10^6 \text{ m}^3$	3.81	5 639.39	5 734.27
合计					20 287.40	12 479.74	519 664.74

注: 1) 以新增井数量计; 2) 以生产井数量计。

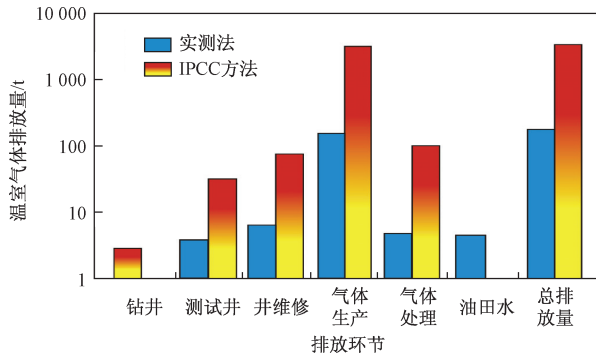


图 4 IPCC 方法与实测法计算结果对比

Fig. 4 Comparison of in-field method and IPCC method

放量是实测法的 19 倍,表明用 IPCC 方法计算的排放量会被严重高估. ④2 种计算结果的对比表明,该研究实测法既具有与国际推荐方法上的一致性,同时又反映了我国的实际情况.

2.4 不确定性分析

依据 IPCC 方法,钻井环节温室气体排放量为 457.2 t,占总排放量的 0.09%,但笔者认为钻井环节没有排放,对总排放量的分析有一定的误差,所以具有一定的不确定性.

气体生产环节温室气体排放量占研究气矿 2011 年温室气体直接总排放量的 89%,但是该数据是在对重点研究区块的抽样检测基础上计算得到的,仪器误差和抽样区块可能存在的特殊性对计算结果可能也会造成较大的不确定性,并且该环节主要按现场检测的 CH₄ 浓度计算,其增温潜力大,折合 CO₂ 当量具有扩大效应,对温室气体排放量准确性也会造成最大影响.

设备维修环节是根据油气田专家人为的经验判断,计算结果为最大排放量,也具有一定的不确定性.

3 结论

a) 基于现场检测和大量基础数据,计算出研究

气矿 2011 年 CH₄ 排放量为 1 033.32 t,CO₂ 排放量为 1 295.56 t,折合 CO₂ 当量 27 128.56 t;IPCC 方法计算可得,该气矿 2011 年 CH₄ 排放量为 20 287.39 t,CO₂ 排放量为 12 479.74 t,折合 CO₂ 当量为 519 664.74 t.

b) 气体生产环节排放 CH₄ 962.03 t、CO₂ 9.75 t,折合 CO₂ 当量为 24 060.50 t,是最大的排放源,占温室气体总排放量的 89%,这主要是由于气体生产环节存在大量的 CH₄ 微泄漏,微泄漏量占总排放量的 99% 以上. 而微泄漏主要与接头、阀芯、法兰等设备老化程度、年运行时间、管理水平、操作人员的责任心有直接关系,存在很大的减排潜力. 因而,通过设备更新以及开展员工培训、强化操作管理,可以大幅削减研究区温室气体排放量.

c) IPCC 方法计算出的研究气矿 CO₂ 当量为实测法计算结果的 19 倍,说明之前国内外利用 IPCC 方法进行的估算严重高估了我国温室气体排放量. 因此,只有通过实地检测和计算,方能客观地反映油气开发过程中温室气体排放的实际情况.

参考文献 (References):

[1] 姜奕波. 建立温室气体排放数据统计和管理体系: 谈谈数据收集方法[J]. 科协论坛, 2010(10): 111-112.

[2] 齐玉春,董云社. 中国能源领域温室气体排放现状及减排对策研究[J]. 地理科学, 2004, 10(5): 528-534.

QI Yuchun, DONG Yunshe. Emission of greenhouse gases from energy field and mitigation countermeasures in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 10(5): 528-534.

[3] 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, 6(2): 194-202.

ZHANG Renjian, WANG Mingxing, LI Jing, et al. The present status of the emission methane in China [J]. Climatic and Environmental Research, 1999, 6(2): 194-202.

[4] 沈平平,杨永智. 温室气体在石油开采中资源化利用的科学问题[J]. 中国基础科学, 2006(3): 23-31.

SHEN Pingping, YANG Yongzhi. Problems on enhanced oil recovery bu using greenhouse gas [J]. China Basic Science, 2006

- (3):23-31.
- [5] 朱松丽. 加拿大油气系统温室气体逃逸排放清单简述[J]. 油气田环境保护, 2005, 12(4):4-6.
ZHU Songli. Fugitive emission of greenhouse gas from oil and gas system in Canada [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2005, 12(4):4-6.
- [6] 张燕萍, 黄新春, 李慧敏. 油气田温室气体清单编制的作法[J]. 油气田环境保护, 2011, 8(4):6-7.
ZHANG Yanping, HUANG Xinchun, LI Huimin. The practice of greenhouse gases inventory compilation in oil-gas fields [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2011, 8(4):6-7.
- [7] CAI Zucong. Greenhouse gas budget for terrestrial ecosystems in China[J]. Science China (Earth Sciences), 2012, 55(2):173-182.
- [8] ZHOU Xing, ZHENG Youfei, KANG Na, *et al.* Greenhouse gas emissions from sewage treatment in China during 2000-2009 [J]. Advances in Climate Change Research, 2012, 3(4):205-211.
- [9] National Development and Reform Commission of China. China's policies and actions for addressing climate change[R]. Beijing: The National Development and Reform Commission, 2013.
- [10] PIAO Shilong, FANG Jingyun, PHILIPPE C, *et al.* The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458(7241):1009-1012.
- [11] MATTHEW R, THERESA M, JANE K, *et al.* Methane emissions from the natural gas industry [R]. United States Environmental Protection Agency Center for Environmental Research Information, 1997.
- [12] ZHU Songli, WANG Wentao. Development of national greenhouse gas emissions inventories in the context of international climate negotiations[J]. Advances in Climate Change Research, 2013, 4(1):60-68.
- [13] LIM B, BOILEAU P, BONDUKI Y, *et al.* Improving the quality of national greenhouse gas inventories[J]. Environmental Science & Policy, 1999, 2(3):335-346.
- [14] ZHANG Bo, CHEN Guoqian. Methane emissions by Chinese economy: inventory and embodiment analysis[J]. Energy Policy, 2010, 38:4304-4316.
- [15] 蒋金荷. 中国碳排放量测算及影响因素分析[J]. 资源科学, 2011, 33(4):597-604.
JIANG Jinhe. An evaluation and decomposition analysis of carbon emissions in China [J]. Resources Science, 2011, 33(4):597-604.
- [16] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [17] IPCC. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventory [R]. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2000.
- [18] 冉隆辉. 论四川盆地天然气勘探前景[J]. 天然气工业, 2006, 26(12):42-44.
RAN Longhui. Natural gas exproation prospect in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12):42-44.
- [19] 张廷山, 王顺玉, 陈晓慧, 等. 四川盆地天然气资源状况与可持续发展问题思考[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(1):44-47.
ZHANG Tingshan, WANG Shunyu, CHEN Xiaohui, *et al.* Natural gas resource status and sustainable development cnsideration of Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(1):44-47.
- [20] THERESA M, CHRISTOPHER J, STEPHANIE J, *et al.* Compendium of greenhouse gas emissions methodologies for the oil and natural gas industry [R]. Washington DC: American Petroleum Institute, 2004.
- [21] THERESA M, CHRISTOPHER J, STEPHANIE J, *et al.* Compendium of greenhouse gas emissions methodologies for the oil and natural gas industry [R]. Washington DC: American Petroleum Institute, 2009.
- [22] CAPP. CH₄ and VOC emissions from the Canadian upstream oil and gas industry [R]. Calgary: Canadian Association of Petroleum Producers, 1999.
- [23] American Petroleum Institute. Toward a consistent methodology for estimating greenhouse gas emissions from oil and gas industry operations [R]. Washington DC: American Petroleum Institute, 1999.
- [24] KARIN R, MIRIAM L, THEREAS S. Development of a consistent methodology for estimating greenhouse gas emissions from oil and gas industry operations [R]. Washington DC: American Petroleum Institute, 2005.
- [25] International Petroleum Industry Environmental Conservation Association. The oil and gas industry and climate change [R]. London: IPIECA, 2007.
- [26] World Resources Institute. Discussion paper for a natural gas transmission and distribution greenhouse gas reporting protocol [R]. California: California Climate Action Registry and World Resources Institute, 2007.
- [27] United States Environmental Protection Agency. Protocol for equipment leak emission estimates [R]. North Carolina: U. S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, 1995.
- [28] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策[J]. 第四纪研究, 2006(5):722-732.
HUANG Yao. Emissions of greenhouse gases in China and its reduction strategy [J]. Quaternary Sciences, 2006(5):722-732.
- [29] 崔翔宇, 邓皓, 刘光全, 等. 油气田温室气体排放测试与评估方法[J]. 石油和化工节能, 2011(5):44-47.
- [30] 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.
- [31] CHEN Guojun, YANG Wei, FANG Xuan, *et al.* Greenhouse gases (GHG) emissions from gas field water in southern Gas Field, Sichuan Basin, China [J]. Water Air Soil Pollution, 2014, 225:1902-1910.

(责任编辑:孙彩萍)