

项目报告

中国家用燃气用具甲烷排放评估研究报告

项目名称：家用燃气用具甲烷排放评估

负责单位：重庆大学

负责人：黄小美

摘 要

甲烷是具有快速增温效应的短寿命强势温室气体，中国天然气用户数量庞大，而目前中国缺乏对家用燃气设备的甲烷排放测算以及气候影响评估。本项目从各个厂家向国家燃气具质量检验中心（佛山）送检的全新燃气快速热水器和燃气采暖热水炉样品中各选择 112 台、122 台样品，从送检的全新家用燃气灶具样品中选择 52 台样品，检测其燃烧产生烟气中未燃甲烷的含量，并在重庆两个主城区抽检在用家用燃气具使用过程的甲烷排放情况，把烟气分析仪的取气管深入燃气采暖热水炉和燃气快速热水器的排烟管内部，燃气灶的烟气检测利用取样环采集，记录设备从点火到关火整个过程的烟气成分含量变化。对检测数据进行分析处理，把设备的运行分为开启段、稳定运行段和关闭段三个阶段，分析甲烷浓度变化规律，得出平均每台燃气采暖热水炉、燃气快速热水器和燃气灶的全年甲烷排放总量为 0.38kg、0.21kg、0.087kg。

关键词：燃气采暖热水炉；燃气热水器；燃气灶；甲烷排放

目录

1 研究背景.....	4
1.1 甲烷与气候变化.....	4
1.2 甲烷排放核算方法.....	5
2 研究目的.....	6
3 研究方法.....	7
4 结果与讨论.....	10
4.1 送检燃气具甲烷排放数据收集与统计.....	10
4.1.1 送检燃气具数据收集.....	10
4.1.2 送检燃气具甲烷排放规律分析.....	11
4.2 家用燃气具启停次数调查统计.....	13
4.2.1 选择调查对象.....	13
4.2.2 调查方法.....	14
4.2.3 调查方法可行性验证.....	14
4.2.4 调查结果统计与分析.....	15
4.3 在用燃具甲烷排放实测与统计.....	17
4.3.1 甲烷排放现场实测.....	17
4.3.2 甲烷排放规律分析.....	17
4.4 家用燃气具甲烷排放量计算.....	21
4.5 对全球变暖的贡献.....	22
4.6 控制燃气具未燃甲烷排放的措施.....	24
5 结论.....	24
参考文献.....	25

1 研究背景

1.1 甲烷与气候变化

甲烷是地球上第二大温室气体，同时一种强的短期温室效应气体，其 20 年尺度下的全球增温潜势（GWP₂₀）是 CO₂ 的 84 倍，GWP₁₀₀ 则是 CO₂ 的 28 倍（表 1-1）^[1]。甲烷排放量占全球温室气体排放总量的 16%^[2]，当前大气中的甲烷浓度已达到工业化前水平的 2.5 倍^[3]，在目前人为感知的温室气体全球变暖的贡献则达到了 25%^[4]。2018 年 10 月发布的《IPCC 全球升温 1.5°C 特别报告》中指出，若要实现全球 1.5°C 的控制目标，必须大幅削减甲烷排放^[5]。2020 年 9 月 22 日，中国国家主席习近平在 75 届联合国大会一般性辩论上宣布：中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。这一重要承诺为中国应对气候变化、绿色低碳发展提供了方向，也为各行业排放目标的制定提供了基础。由于非二氧化碳温室气体具有减排成本低、响应速度快、协同效益明显的特点，因此减少甲烷排放是短期控制气候变化的有效手段，对实现气候目标非常重要。

表 1-1 温室气体全球增温潜势值（GWP）^[1]

温室气体	生命周期（年）	GWP20	GWP100
CO ₂		1	1
CH ₄	12.4	84	28
CF ₄	121	264	265
N ₂ O	50000	4880	6630
HFC-152a	1.5	506	138

注：全球增温潜势值来自 2014 年政府间气候变化专门委员会第 5 次评估报告（IPCC AR5）

在全球范围内，甲烷排放总量的 50%~65% 来自煤矿开采、石油天然气系统、垃圾填埋、牲畜、稻田、生物质燃烧等人类活动，其中油气行业的甲烷排放量每年达到 8400 万吨^[6]。国际能源署（IEA）发布的《世界能源展望 2019》显示，中国油气行业甲烷排放约 356.3 万吨，占全球总量的 4.4%，仅次于煤炭行业的排放量^[7]。

围绕油气行业的甲烷排放，全球范围内的学者已经开展了非常丰富的研究，但也多集中在上游开采、储运等环节，关于天然气终端应用过程中产生的甲烷排放研究较少。在天然气的供应链中，城市燃气作为产业链的终端，其甲烷排放的强度或许不如上游生产及储运环节的强度大，但也应对天然气在城市输配以及应用过程中的排放量进行实测及估算，并采取切实可行的降低措施。

在天然气民用范围内，针对家用燃气具甲烷排放的问题目前已有少量研究。Merrin^[8]等人对美国 Boston、MA、IN, IL 和 NY 等地区 100 户家庭的家用天然气用具进行了甲烷排放检测、统计和分析，估算出美国住宅天然气用具甲烷排放的 CO_{2e100} 当量均值达 $8.3 \times 10^8 \text{kg}$ ，占美国人为甲烷排放的 0.1%。Lebel^[9]等人美国加州 64 户家庭的热水器甲烷排放进行了调查评估，发现单个快速热水器每年平均排放 2.39kg 甲烷，占热水器天然气消耗总量的 0.93%；单个容积式热水器平均年排放 1.4kg 甲烷，占其天然气消耗量的 0.39%，预计全美容积式热水器和快速热水器（分别为 568 万台和 120 万台）年度总甲烷排放量为 $8.23 \times 10^7 \text{kg}$ 。

中国天然气居民用户数量庞大，2020 年天然气居民用户达 1.5 亿用户。通常所有居民用户家中都会使用一台双眼燃气灶，绝大部分用户同时使用燃气快速热水器，少部分家庭使用燃气采暖热水炉，2018 年全国居民用气量达到 468.4 亿立方米^[10]。同时中国也是燃气具生产大国，据统计，2009-2018 年十年间，中国企业（含外资企业）共生产燃气灶 3.33 亿台，燃气热水器 1.53 亿台，燃气采暖热水炉 1895 万台^[11]，这些燃气具绝大部分在中国大陆销售和使用。参照国外研究经验，如此大量的燃具不完全燃烧产生的甲烷排放，在中国人为甲烷排放中占有一定的比例。目前中国的甲烷排放清单主要借鉴国外研究的经验数据，而缺乏对家用燃气设备的甲烷排放测算以及气候影响评估。而中国燃气供应系统从设计、制造和使用习惯均与美国不同，因此有必要通过实地监测、设备检测等自下而上方法获取中国本地化的甲烷排放量数据，对中国最常用的家用燃具，即燃气灶、燃气快速热水器和燃气采暖热水炉的甲烷排放进行检测和评估，以评估和量化燃气民用终端甲烷排放水平和对全球变暖的贡献。

1.2 甲烷排放核算方法

目前，国际上尚未建立起标准统一的甲烷气体监测体系，现有的甲烷排放量

化方法主要分为两种，一种是因子计算法，另一种是监测法，后者主要分为“自下而上”法和“自上而下”法^[12]。

因子计算法主要指各国（或地区）在参考《IPCC 国家温室气体清单指南》（专门为各国编制和报告温室气体清单而设计）所提供的计算方法和基本参数的基础上，结合本国（或本地区）的现实情况对计算方法和排放因子进行修正或确认，编制本国或本地区的温室气体排放清单，基于清单查询排放因子数据，从而对不同部门、不同来源的甲烷排放量进行计算的方法。“自下而上”的测量方法是指能够提供微观尺度采样数据的元件级直接测量方法，油气行业主要对各个设备根据可能的排放源（如泄放、放散燃烧、溢散设施泄漏、蒸发损失和意外释放等）进行甲烷排放监测和计算。“自上而下”法主要通过地面、飞机、塔台或卫星观测收集到的甲烷浓度数据与大气传输模型相结合，来估计场地或区域的排放。这些技术发展迅速，可以有效地量化整体排放，并可以区分排放是热成因形成的还是生物成因形成的甲烷（牲畜、垃圾填埋、湿地等等），利用车载监测器、飞机、卫星、无人机和高塔网络等手段，可以更方便地获得大空间尺度、全排放源的总量数据，并为微观数据的校准提供便利。

本项目将采用“自下而上”的测量方法对中国天然气终端应用中居民用气产生的甲烷排放进行检测和评估。

2 研究目的

本项目的研究目的是测量中国典型家用燃气灶、燃气快速热水器和燃气采暖热水炉的甲烷排放，评估中国天然气应用终端中居民用气甲烷排放总量，提出降低中国民用燃气用具甲烷排放的对策。

主要研究内容为探究中国厂商送检的全新燃气采暖热水炉、燃气热水器及燃气灶产品的甲烷排放特征，同时抽检少量具有一定使用年限的上述产品甲烷排放特征。具体内容包括：

- （1）新的家用燃气灶热效率测试周期中烟气甲烷含量动态检测；
- （2）新的燃气快速热水器热效率检测周期中烟气甲烷含量动态检测；
- （3）新的燃气采暖热水炉热效率检测周期中烟气甲烷含量动态检测；
- （4）具有一定使用年限的上述产品烟气中甲烷排放实测；

- (5) 家用燃气用具使用过程中甲烷排放的特征统计分析；
- (6) 家用燃气具甲烷排放量的估算及对全球变暖的贡献评估。

3 研究方法

采用“自下而上”的甲烷测量方法，收集一定数量的样品，在国家燃气具质量检测中心（佛山）开展实验，使用带有甲烷传感器的烟气分析仪检测烟气中未燃烧的甲烷含量；对甲烷排放数据进行统计分析，根据中国天然气用具使用量和检测数据的统计分析结果推算全国总排放数据。具体研究方法如下：

(1) 样品收集

从各个厂家向国家燃气具质量检验中心（佛山）送检的全新燃气快速热水器和燃气采暖热水炉样品中各选择了 112 台、122 台样品，从送检的全新家用燃气灶具样品中选择了 52 台样品。

(3) 实验系统及装置

本项目送检燃气具检测在国家燃气具质量检测中心（佛山）实验室完成，该实验室有完备的配气系统和燃气用具热工性能检测仪器仪表，主要实验装置如图 3-1、3-2 所示。



图 3-1 燃气采暖热水炉、燃气快速热水器检测系统



图 3-2 燃气灶检测系统

烟气中各气体成分的含量采用如图 3-3 所示的富士电子系统公司的 GASRACK-Z 型烟气分析系统检测，可连续测量 NO_x 、 SO_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 和 O_2 的瞬时浓度，技术参数如表 3-1 所示。该仪器甲烷检测原理为非分散型红外吸收法，操作简单、快速，常用于分析对红外辐射有较强吸收的气态物质，如一氧化碳、二氧化碳、甲烷、氨等。仪器检测灵敏度为 1ppm，检测精度为 $\leq 1\%FS$ ，提供两个检测量程（0-500ppm，0-100vol%），可根据烟气中的实际值切换到合适的量程范围。



图 3-3 富士 GASRACK-Z 型烟气分析仪

表 3-1 富士 GASRACK-Z 型烟气分析仪技术参数

测量气体	传感器类型	量程	精度
O ₂	顺磁	0~25%	0.1%
CO ₂	红外 NDIR	0~25%	1%FS
CO	红外 NDIR	0~2500ppm	1%FS
CH ₄	红外 NDIR	0~500ppm	1%FS
NO _x	电化学	0~200ppm	1%FS
SO ₂	电化学	0~500ppm	1%FS

具有一定使用年限的家用燃气具检测使用如图 3-4 所示的德国 VARIO plus new 增强型烟气分析仪，技术参数在表 3-2 中。可测量 NO、NO₂、CO₂、CO、CH₄ 和 O₂ 的浓度，该仪器甲烷检测原理同样为非分散型红外吸收法，甲烷的标准测量量程为 0~3000ppm，最高可达 10000ppm，精度为 2%FS。



图 3-4 德国 MRU MGA6 PLUS 烟气分析仪

表 3-2 MRU MGA6 PLUS 烟气分析仪技术参数

测量气体	传感器类型	量程 (0~标准/最大)	分辨率	精度
O ₂	顺磁原理	0~25%	0.01%	0.1%
CO ₂	红外 NDIR	0~5/40%	0.01%	2%FS
CO	红外 NDIR	0~1/10%	0.01%	2%FS
CH ₄	红外 NDIR	0~3000/10000ppm	1ppm	2%FS
C ₃ H ₈	红外 NDIR	0~1000/10000ppm	1ppm	2%FS

NO	电化学	0~1000/5000ppm	1ppm	5%读数
NO2	电化学	0~200/1000ppm	1ppm	5%读数
SO2	电化学	0~2000/5000ppm	1ppm	5%读数
H2S	电化学	0~2000/5000ppm	1ppm	5%读数

(3) 实验方法

依据国标 GB6532-2015 和 GB16410-2007 规定的检测项目级方法，在燃气用具性能检测过程中，记录燃气用具从点火至熄火全过程的甲烷动态数据，同时记录其他相关检测数据，包括燃气流量、烟气中其他成分数据、排烟温度、环境温湿度、大气压力等。

(4) 数据统计分析

分别统计燃气采暖热水炉、燃气快速热水器和燃气灶的甲烷排放情况，绘制三类家用燃气具产品在开启至关闭时间段内甲烷排放的分布情况，并估算甲烷排放量占相应设备用气量的平均比例。

4 结果与讨论

4.1 送检燃气具甲烷排放数据收集与统计

4.1.1 送检燃气具数据收集

送检燃气具数据的收集在国家燃气具质量检验中心（佛山）燃具热工性能自动检测系统实验台进行检测，记录实验流程、装置等信息，并收集已检测的排放数据。依据中国国标 GB6532-2015 和 GB16410-2007 规定的检测项目级方法，在燃气用具性能检测过程中，记录燃气用具从点火至熄火全过程的甲烷动态数据。

检测过程中，将取气探头伸入排气口内部采集气体，烟气尚未扩散到空气中，确保监测到的气体浓度近似等于废气中的真实浓度。分析仪的数据采集系统可以实时记录烟气浓度变化情况，通过实时监测气体浓度的变化，可以及时发现检测过程中出现的问题并做出相应调整。每检测一段时间，就会使用零气和标准甲烷气对烟气分析仪进行标定。

在佛山燃气具质检中心经过三个月的检测，共收集到 112 组燃气采暖热水炉的烟气数据，燃气种类均为天然气，最高额定热输入分布在 20kW—38kW，额定电功率分布在 90W—130W 不等，燃气快速热水器的烟气数据共收集到了 122 组，燃气种类均为天然气。对数据进行分析处理，其中个别数据有部分缺失或出现较大误差，剔除缺失和误差数据后，整理得到 87 组燃气采暖热水炉的有效数据，98 组燃气快速热水器有效数据。

根据 GB 16410-2007《家用燃气灶具》规定的检测方法进行燃气灶燃烧工况检测，采用取样环取样法，使用专用试验锅，把取样管连接到取样环的排气口处，燃气灶燃烧产生的烟气通过取样环上的进气口直接进入环中，再从排气口进入烟气分析仪，避免烟气扩散到空气中。共收集到了 52 组燃气灶的甲烷排放数据，全部是大气式双眼燃气灶，对数据进行整理分析，共得到了 39 组有效数据。

4.1.2 送检燃气具甲烷排放规律分析

烟气分析仪记录了烟气中 NO、CH₄、CO₂、SO₂ 和 O₂ 浓度随时间变化的结果，数据记录时间间隔为一秒。对数据进行处理，分别整理出燃气采暖热水炉、燃气快速热水器和燃气灶的甲烷排放数据，根据数据显示，可以把家用燃气具的甲烷排放分为开启段、稳定运行段和关闭段三个阶段。

把燃气采暖热水炉开启后一分钟和关闭后一分钟视为开启段和关闭段，中间稳定运行时间为两分钟，每台设备的检测时间均为四分钟。甲烷排放的检测情况如图 4-1 所示。

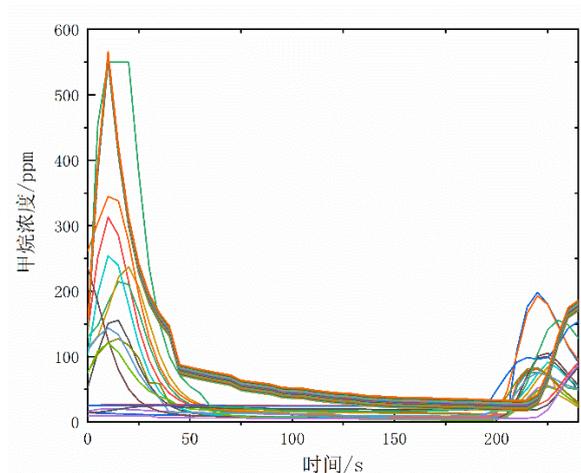


图 4-1 燃气采暖热水炉甲烷排放浓度变化

从上图可以看出燃气采暖热水炉的甲烷排放具有明显的规律。点火时的甲烷排放浓度会快速出现尖峰并迅速衰减，在稳定运行过程中甲烷排放浓度较低且稳定，在关火之后甲烷排放浓度也会快速出现峰值并衰减，但峰值低于点火段。

把燃气快速热水器开启后一分钟和关闭后一分钟视为开启段和关闭段，中间稳定运行时间为六分钟，每台设备的检测时间均为八分钟。热水器甲烷排放的检测情况如图 4-2 所示。

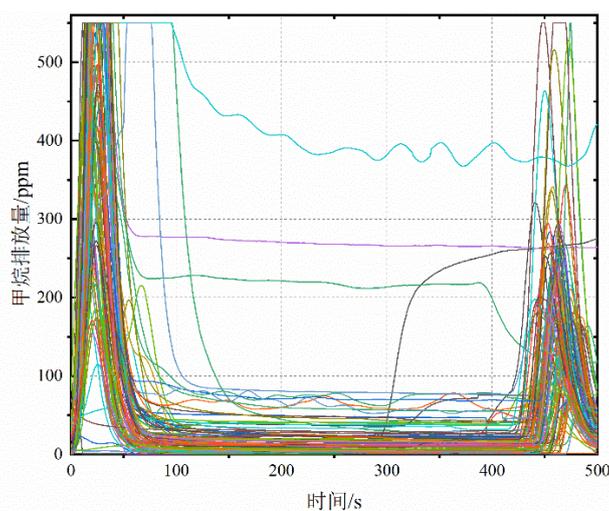


图 4-2 燃气快速热水器甲烷排放浓度变化

从上图可以看出燃气快速热水器的甲烷排放规律与燃气采暖热水炉相似。点火时的甲烷排放浓度会快速出现尖峰并迅速衰减，在稳定运行过程中甲烷排放浓度较低且稳定，在关火之后甲烷排放浓度也会快速出现峰值并衰减，但峰值低于点火段。送检的热水器均为全新热水器，存在一定次品率，因此其中有几台排放数据过高的热水器质量未达标，可能存在明显泄露和燃烧不充分的情况，这些数据在后续甲烷排放量计算过程中不予采用。

同样把燃气灶开启后一分钟和关闭后一分钟视为开启段和关闭段，中间稳定运行时间为十分钟，每台设备的检测时间均为十二分钟。燃气灶甲烷排放的检测情况如图 4-3 所示。

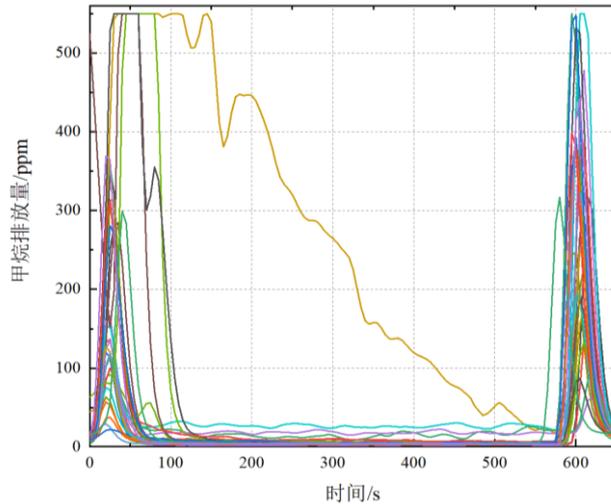


图 4-3 燃气灶甲烷排放浓度变化

从上图可以看出燃气灶的甲烷排放规律与燃气采暖热水炉、热水器略有不同。点火时的甲烷排放浓度会快速出现尖峰并迅速衰减，在稳定运行过程中甲烷排放浓度较低且稳定，在关火之后甲烷排放浓度也会快速出现峰值并衰减，与另外两种燃气具不同的是，燃气灶关闭段的甲烷排放峰值要高于开启段。从图像可以看出，这些燃气灶中也有一台质量不达标的，可能存在明显泄露和燃烧不充分的情况，该数据在后续甲烷排放量计算过程中不予采用。

上述结果表明，家用燃气具的甲烷排放主要来源于点火和关火后的一段时间，稳定运行过程中的甲烷排放量较低，燃气具点火和关火的瞬间会有一股未燃烧的天然气排出，这可能是造成家用燃气具甲烷排放的主要原因。

4.2 家用燃气具启停次数调查统计

家用燃气具甲烷排放规律的分析结果表明燃气具的甲烷排放可以被划分为三个阶段，若想知道各类燃气具的甲烷排放量，就需要对每类燃气具的使用情况进行调查，包括用途、使用频率、持续使用时间等。

4.2.1 选择调查对象

要对包括燃气采暖热水炉在内的家用燃具使用情况进行调查，就必须在采暖季进行，因此春节期间我们对 17 户家庭的燃气具使用情况进行调查，其中使用燃气快速热水器的家庭有 9 户，使用燃气采暖热水炉的有 8 户，一共收集到了

101 组数据。从城市、燃具类型、燃具用途、建筑面积、家庭人数、燃具热负荷这六方面对影响燃具使用次数的因素进行了调查。

4.2.2 调查方法

根据燃气采暖热水炉和燃气快速热水器的工作特性，采用两种方法进行测量。第一种方法是排烟口温度测量法：使用温湿度测量仪测量排烟管口附近的温度，把温度探头固定到烟道口，测温仪每十秒记录一次数据。通过烟气温度的变化来判断燃气具的运行状态，以此来得到燃气具一天内的启停次数。第二种方法是功率测量法：使用电能表测量燃气采暖热水炉和热水器的功率，把设备的插头连接到电能表上，电能表自动记录每秒的功率数据，根据功率变化来统计燃气具的启停次数

4.2.3 调查方法可行性验证

为了验证这两种测量方法的可行性，以某燃气采暖热水炉 12 小时内排烟口附近温度和功率的变化情况为例，对数据记录的准确性进行检验。图 4-4 和图 4-5 分别为该燃气采暖热水炉 12 小时内排烟口附近温度和功率的变化曲线，从这两组曲线可以明显看出燃气采暖热水炉以一个固定时间为周期循环加热的规律，且点火和待机状态的功率、烟气温度具有明显差异，可以根据数据变化规律统计出燃气具的启停次数。

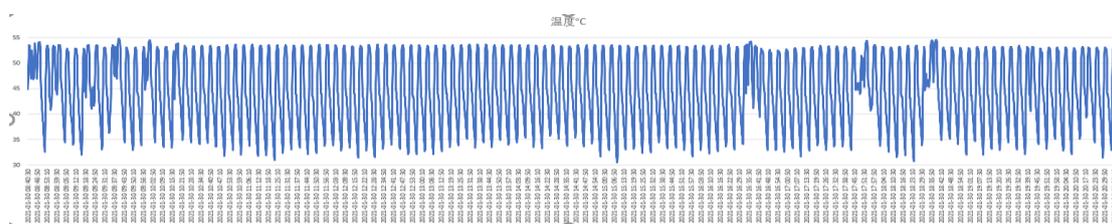


图 4-4 某燃气采暖热水炉 12 小时排烟口附近温度变化

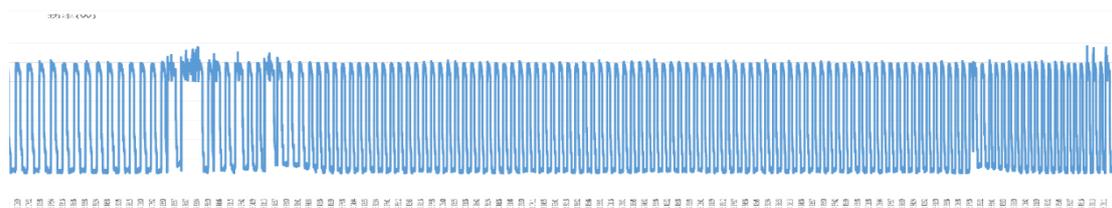


图 4-5 某燃气采暖热水炉 12 小时功率变化

使用 python 语言分别对该燃气采暖热水炉的排烟口附近温度和功率数据进行处理，统计一天内该燃气采暖热水炉的启停次数。排烟口温度变化处理结果显示循环加热的燃气采暖热水器在 24 小时内启停次数为 250 次左右，电能表由于是每一秒记录一次数据，18 个小时数据就已记满，统计这 18 个小时内功率变化，处理结果显示该设备启停了 200 次，根据比例推算 24 小时内启停为 260 次。对比温湿度测量仪和电能表记录的数据，可以认为这两种测量方法均是可行的，由于电能表能连续采集数据的时间仅有 18 个小时，因此后续均采用排烟口温度测量法对燃气具的启停次数进行调查。

4.2.4 调查结果统计与分析

经过近一个月的调查，总共收集到了 49 组燃气采暖热水炉、54 组燃气快速热水器的排烟口附近温度数据。图 4-6 和图 4-7 分别展示了几种不同类型燃气采暖热水炉和燃气快速热水器排烟口附近温度随时间变化的情况。由于各个家庭燃气采暖热水炉的设定温度均不相同，因此循环运行的周期长短、频率也都存在差别，但都遵循一定规律，热水器由于每个家庭的使用时间、使用频率和用途等均不相同，启停次数具有差异性，没有规律可循。

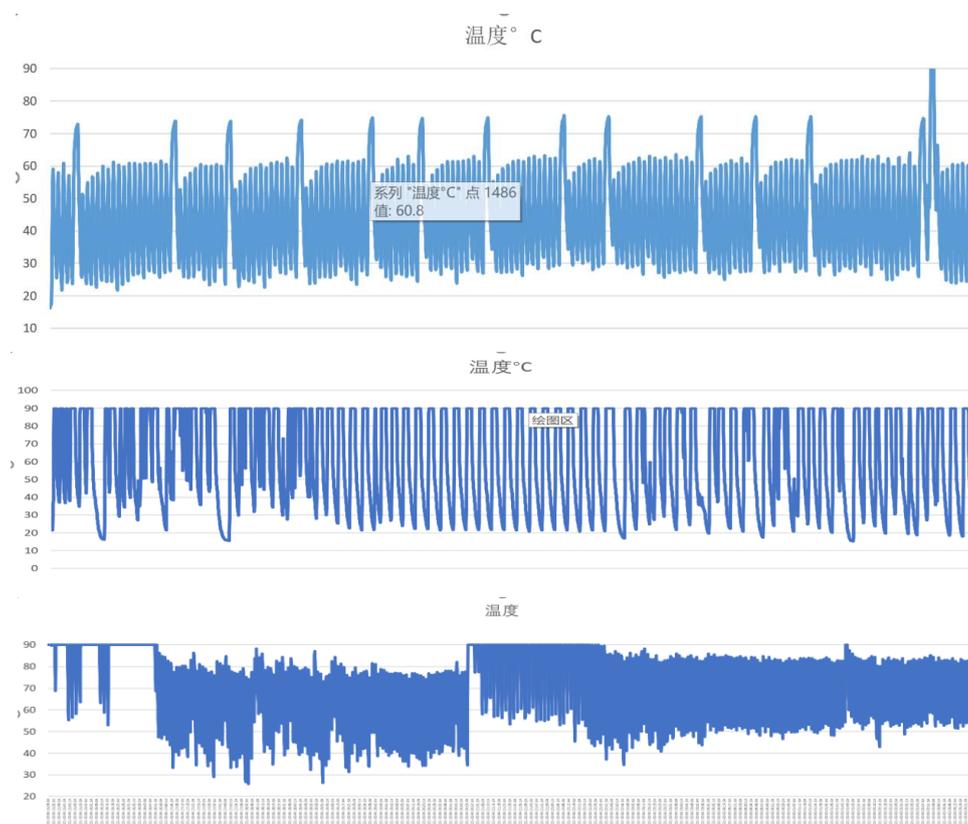


图 4-6 不同类型燃气采暖热水炉排烟口附近温度变化

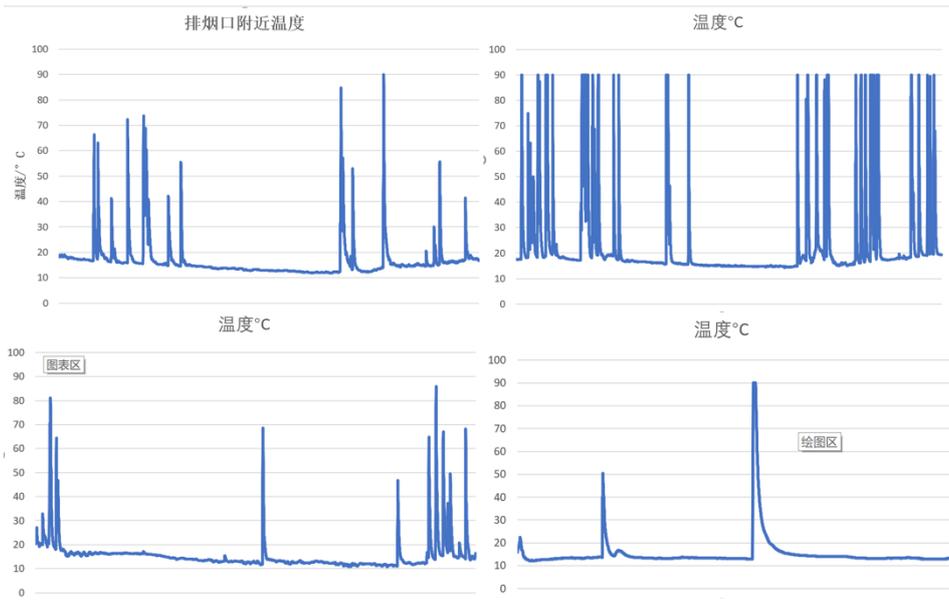


图 4-7 不同类型热水器排烟口附近温度变化

使用 python 语言对收集到的所有排烟口附近温度数据进行处理，计算每台热水器和采暖热水炉一天内的启停次数，根据调查结果显示，燃气快速热水器全天的使用次数的变化范围主要分布在 4-40 次左右，燃气采暖热水炉受设定温度的影响，使用次数差异较大，在全天开启供暖的情况下，燃气采暖热水炉的启停次数在 100 到 600 多次不等。结合平均数和中位数，得到燃气采暖热水炉一天内启停次数为 190 次，热水器为 12 次。

综合上述调查结果，得到了家用燃气具使用次数、持续使用时间等情况的统计表（表 4-1），使用燃气采暖热水炉的用户为区域性供暖，采暖季的供暖时间要短于集中供暖，且南方使用燃气采暖热水炉的时间也短于北方，以北京为例，集中供暖期为每年 11 月 15 日到次年 3 月 15 日，共 120 天，因此取燃气采暖热水炉的全年使用天数为 100 天。参考表 4-1，假设每个家庭每天都有使用热水和做饭的需求，热水器和燃气灶的全年使用天数均记为 365 天。

表 4-1 家用燃气具使用情况统计表

燃气具类型	全年使用天数	全天运行次数	持续运行时间/min
燃气采暖热水炉	100	190	3
燃气快速热水器	365	12	4

4.3 在用燃具甲烷排放实测与统计

各类家用燃气具随着使用时间的增加，设备的各个零部件，如密封件等装置会逐渐老化，燃烧性能、烟气排放量等数据和全新燃气具相比都会存在差异，因此有必要对已经投入使用的家用燃气具的甲烷排放情况进行研究。

使用 VARIO plus new 增强型烟气分析仪，在用户家中进行实测，由于检测时间已经过了采暖季，燃气采暖热水炉已经停用了供暖模式，因此我们只对燃气灶和热水器的实际使用情况进行了检测。定期使用 199ppm 和 499ppm 的标准甲烷气对烟气分析仪进行标定，每次检测前都对分析仪进行了零点校准，初始甲烷浓度均为 0。

4.3.1 甲烷排放现场实测

在重庆市渝中区和沙坪坝区抽检了 72 户安装了燃气灶的家庭，根据 GB 16410-2007《家用燃气灶具》规定的检测方法对燃气灶的烟气进行检测，使用配套的试验用锅和取样环。使用一段橡胶软管连接取样环和烟气分析仪的探管，连续记录从点火到关火后一分钟时间的燃气灶甲烷排放情况，同时记录燃烧时间、燃气表读数。抽检的燃气灶主要为大气式燃气灶，少部分家庭的为多孔红外辐射燃气灶。由于住宅中热水器排烟管安装位置大多在阳台，且部分烟管安装在墙体内，不便于检测，因此到用户家中检测到的热水器数量较少，共收集到了 22 组在用热水器的甲烷排放数据。把烟气分析仪的取样探管前端连接一段橡胶软管，伸入热水器的排烟口内，把水龙头开度调至最大，记录从打开热水到关水后一段时间内的甲烷排放情况，同时记录燃气表读数和运行时间。

4.3.2 甲烷排放规律分析

4.3.2.1 燃气灶甲烷排放规律分析

绘制燃气灶在开启时间段、稳定运行时间段、关闭时间段的甲烷排放分布图。

根据 GB17905—2008《家用燃气燃烧器具安全管理规程》7.3.1 规定：燃具从售出当日起，燃气灶具的报废年限为 8 年；使用液化石油气和天然气的快速热水器、容积式热水器和采暖热水炉的判废年限为 8 年。

经调查抽检的燃气灶中有 12 台灶具的使用时间超过了使用年限，其甲烷排放规律与其他燃气灶有明显不同。分别绘制了使用年限以内（图 4-7）和超过使用年限（图 4-8）的燃气灶的甲烷排放分布图，对比两图可以发现，使用年限以内的燃气灶甲烷排放规律与佛山质检中心送检的燃气灶甲烷排放规律相同，点火时的甲烷排放浓度会快速出现尖峰并迅速衰减，最高峰值超过了 500ppm，在稳定运行过程中甲烷排放浓度较低且稳定，基本在 300ppm 以下，在关火之后甲烷排放浓度也会快速出现峰值并衰减，且关闭段的甲烷排放峰值要高于开启段，最高达到了 1300ppm 左右。而超过使用年限的燃气灶甲烷排放情况有很大差异，不符合其他燃气灶的排放规律，整个燃烧过程中的甲烷排放都保持在较高水平，甚至有些燃气灶的烟气中甲烷浓度已经超过了 2000ppm。超过使用年限燃气灶的点火系统基本都已老化、失效，点火时经常会出现点火时间过长、点火不成功等问题，且燃烧过程中燃烧不充分的情况也更为严重，长期使用这类燃气灶预计将会造成更多的甲烷排放，因此当燃气灶超过使用年限后要及时进行更换。

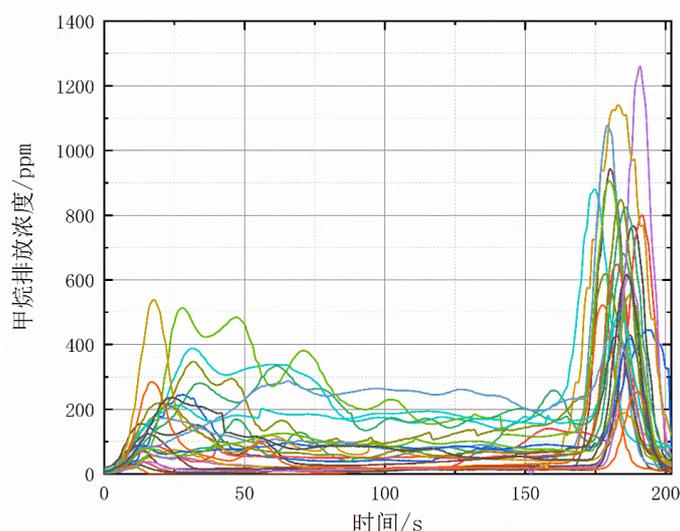


图 4-7 使用年限以内燃气灶甲烷排放浓度变化

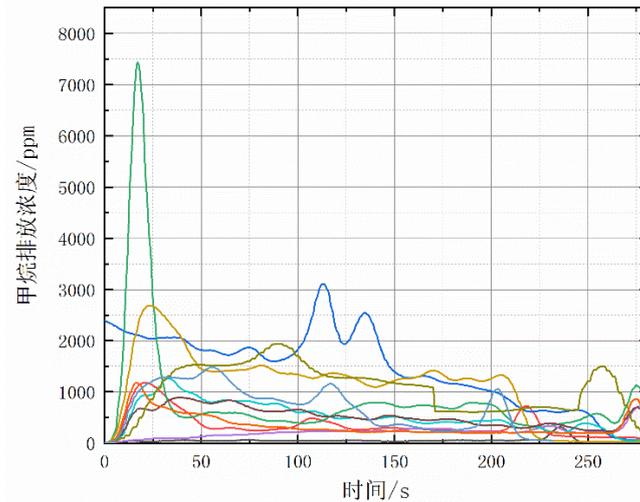


图 4-8 超过使用年限燃气灶甲烷排放浓度变化

对比大气式燃气灶和多孔红外辐射式燃气灶的甲烷排放情况，绘制其在开启段、稳定运行段和关闭段的甲烷排放分布图，如图 4-9 所示。对比两图发现，这两类燃气灶的甲烷排放规律基本相同，同样是点火时的甲烷排放浓度会快速出现尖峰并迅速衰减，在稳定运行过程中甲烷排放浓度较低且稳定，在关火之后甲烷排放浓度也会快速出现峰值并衰减，且关闭段的甲烷排放峰值要高于开启段。不同的是在启动段和稳定运行段多孔红外辐射燃气灶的甲烷排放远低于大气式燃气灶，在开启段，多孔红外辐射燃气灶的甲烷排放浓度峰值最高为 300ppm，大部分在 100ppm 左右，而大气式燃气灶最高达到了 500ppm，且大部分都在 300ppm 左右，稳定运行段，多孔红外辐射燃气灶的甲烷排放水平保持在 20ppm 以下，而大气式燃气灶的甲烷排放水平则在 200ppm 左右，相差较大。而在关闭段，这两类燃气灶的甲烷排放水平基本相同，峰值最高均在 1100ppm 左右。

红外线的波长比可见光长，具有热效应，有极强的穿透能力，不易被大气所吸收，因此多孔红外辐射燃气灶具有明显的节能效果。红外辐射燃气灶采用红外线辐射燃烧器，该燃烧器是一种低压引射式完全预混式燃烧器，燃烧充分，在燃烧过程中没有可见明火，因此相比于传统大气式燃气灶，污染物的排放量大大低于国家标准。

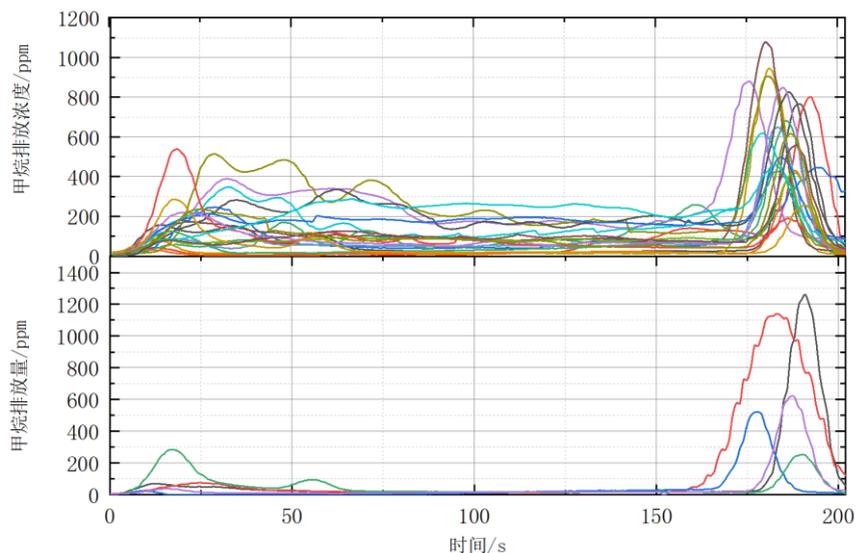


图 4-9 大气式（上）和多孔红外辐射（下）燃气灶甲烷排放浓度变化

4.3.2.2 热水器甲烷排放规律分析

绘制燃气快速热水器在开启段、稳定运行段和关闭段的甲烷排放分布图，如图 4-10 所示。具有一定使用年限热水器的甲烷排放规律与佛山质检中心送检的热水器甲烷排放规律相同，点火时的甲烷排放浓度会快速出现尖峰并迅速衰减，峰值在 1000ppm 左右，在稳定运行过程中甲烷排放浓度较低且稳定，基本在 50ppm 以下，在关火之后甲烷排放浓度也会快速出现峰值并衰减，且关闭段的甲烷排放峰值低于开启段，约为 200ppm。

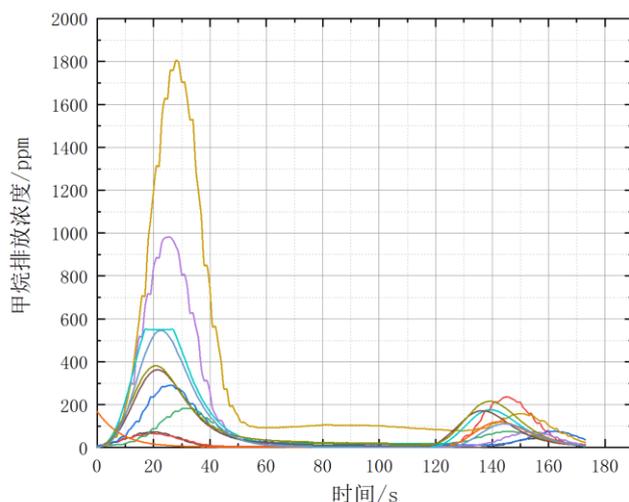


图 4-10 使用年限内燃气快速热水器甲烷排放浓度变化

4.4 家用燃气具甲烷排放量计算

使用表 4-2 的调查数据，根据下列公式，计算三类家用燃气具全年的甲烷排放量。

$$E_L = (V_{on} + V_{off})L_C \times D \quad (1)$$

E_L : 每台燃气具全年开启和关闭时产生的甲烷排放量 m^3/year

V_{on} : 燃具开启时的甲烷排放量 m^3

V_{off} : 燃具关闭时的甲烷排放量 m^3

L_C : 单台燃气具每天打开的次数

D : 全年使用天数

$$E_S = V_S \times T \times L_C \times D \quad (2)$$

E_S : 每台燃具全年稳定运行期间的甲烷排放量 m^3/year

T : 单次运行过程中平均稳定运行时间, min

V_S : 燃具稳态运行期间每分钟平均甲烷排放量 m^3

把开启、关闭段的甲烷排放量和稳定运行段的相加，即可得到单台燃气具全年不完全燃烧产生的甲烷排放（公式 7）。

$$E_{tol} = E_S + E_L \quad (3)$$

E_{tol} : 单台燃具全年运行期间不完全燃烧产生的甲烷排放 m^3/year

其中燃气采暖热水炉除了 100 天采暖期外，全年其他时间使用热水功能，按照热水器的使用规律来计算。分别对启动段、稳定运行段和关闭段的甲烷排放量进行计算，计算结果如图 4-11 所示，单台燃气采暖热水炉、燃气快速热水器、燃气灶的全年甲烷排放总量平均值为 0.38kg、0.21kg 和 0.087kg，燃气采暖热水炉的年度甲烷排放量最高，燃气灶的甲烷排放量最低。尽管单次循环过程中燃气采暖热水炉的排放量低于热水器，但由于燃气从采暖热水炉在供暖状态下始终保持循环运行，全天启停次数达到上百次，因此全年累计甲烷排放量高于热水器。

对比不同运行状态的数据发现，燃气采暖热水炉和燃气快速热水器的甲烷排放主要来源是点火和关火过程产生的排放，而燃气灶的甲烷排放主要来源是稳定运行阶段的排放，这是由于烹饪过程中燃气灶的持续运行时间较长，稳定运行时

间占主要部分，而燃气采暖热水炉和热水器的单次运行时间较短，点火次数多，三个运行阶段的时间相差不大，因此排放就主要来源于点火、关火时的排放，但整体来看，燃气灶的甲烷排放量仍是最低的。

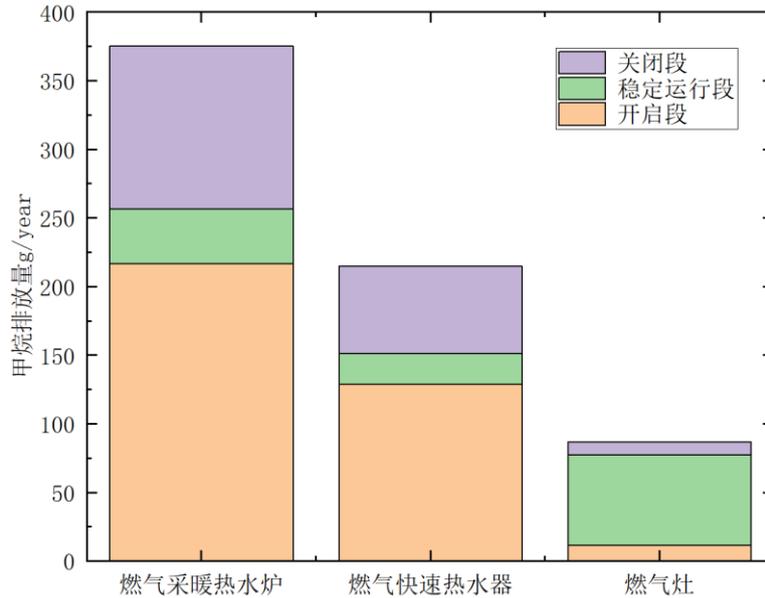


图 4-11 单台家用燃气具平均全年甲烷排放量

4.5 对全球变暖的贡献

采用全球变暖承诺（GWC）来评估中国家用燃气具甲烷排放造成的气候影响，该指标通过用全球变暖潜能值（GWP）量化了给定时间范围内污染物排放的二氧化碳当量气候影响^[16]（公式 4）。

$$GWC = AD \times EF \times GWP \quad (4)$$

GWC: GHG 排放量（以质量单位的二氧化碳当量表示，CO₂e）

AD: 组织活动数据（本文指家用燃气具使用情况）

GWP: 全球变暖潜值

以一台在用热水器的排放数据为例，分别计算在考虑甲烷排放和不考虑甲烷排放的情况下，家用燃气具燃烧产生烟气所造成的温室气体排放（分别使用 GWP₂₀ 和 GWP₁₀₀），结果如图 4-12 所示。

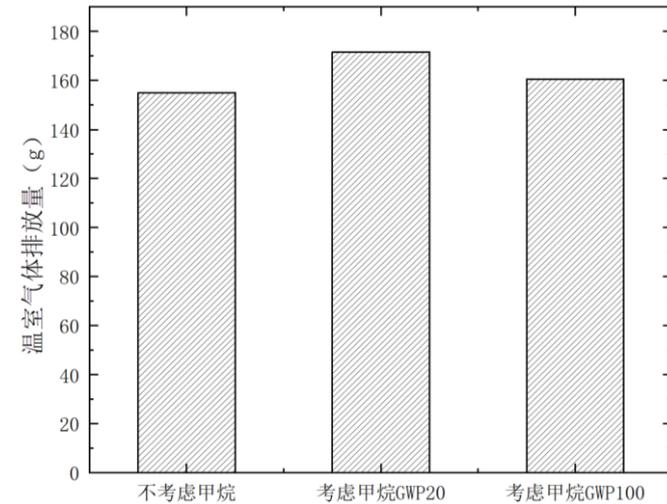


图 4-12 热水器运行四分钟排放烟气造成的温室气体排放

在不考虑甲烷排放的情况下，该热水器运行四分钟产生的二氧化碳排放量为 155g，若考虑未燃甲烷造成的排放，在 20 年尺度下，该热水器运行四分钟产生的温室气体排放量为 162.65g，100 年尺度下为 158.55g，排放量比不考虑甲烷排放的情况各高 4.9%和 2.3%，这表明控制甲烷排放是有必要的。

分别使用 GWP₂₀ 和 GWP₁₀₀ 计算家用燃气具甲烷排放造成的温室气体排放量，结果如表 4-7 所示。甲烷是一种强势短寿命温室气体，大致量化家用燃气具在 20 年尺度下未燃甲烷排放的二氧化碳当量高达 493.27 万吨，100 年尺度下为 167.09 万吨。IEA 的报告显示，2019 年全球二氧化碳排放量约为 330 亿吨，中国的二氧化碳排放量近 100 亿吨^[7]。根据这一数据评估中国家用燃气具在 20 年尺度下甲烷排放的二氧化碳当量约占全国排放量的 0.049%，100 年尺度下约占 0.017%。

表 4-3 家用燃气具全年甲烷排放的二氧化碳当量气候影响

	温室气体排放量 CO ₂ 当量/万吨	
	GWP ₂₀	GWP ₁₀₀
燃气采暖热水炉	57.87	22.29
燃气快速热水器	245.47	83.82
燃气灶	190.93	60.98
总量	493.27	167.09

控制甲烷的排放，不仅有利于减缓短期气候升温速度、协同控制空气污染、

提早收获天然气作为替代燃料带来的气候效益，还能够带来可观的经济效益。

4.6 控制燃气具未燃甲烷排放的措施

控制家用燃气具使用过程中的甲烷排放将会带来明显环境效益，根据本项目的研究结果，我们提出了几个控制燃气具未燃烧甲烷排放的措施。

通过对全新燃具、在用燃具和超出使用年限燃具甲烷排放量的计算，我们发现正常使用年限内的燃气具产生的甲烷排放明显低于超出使用年限的燃气具，预计通过采取更换超过使用年限燃气具的办法将会显著降低甲烷排放量。

燃气具类型会影响其甲烷排放量，检测表明全预混冷凝采暖热水炉的甲烷排放明显低于非全预混设备，多孔红外辐射燃气灶的甲烷排放低于大气式燃气灶。全预混形式下的燃烧器燃烧更充分，不完全燃烧造成的排放更少，热响应速度快，设备热损失可以忽略不计，无频繁启停。假设全部使用全预混燃烧的燃气具将会大大降低家用燃气具的甲烷排放。

定期维护清理燃气具，设备经过长时间使用，难免会出现堵塞、漏气等现象，这会导致设备点火关火响应时间延长，未燃烧甲烷的排放增加。若发现燃气具点火时间变长、点火成功率降低，要及时进行清理，避免阀体等出现堵塞，影响燃烧性能。

研究还发现，家用燃气具在点火和关火过程会产生甲烷排放脉冲，这期间造成的甲烷排放是稳定运行阶段的 10 倍以上，若使用燃具的过程中反复开关火，将会增加未燃甲烷的排放。因此在使用燃气具的过程中，我们建议短时间内不要频繁启动设备，以免造成更多甲烷气体的排放。

5 结论

本项目检测了中国典型燃气采暖热水炉、燃气快速热水器和家用燃气灶的甲烷排放。在国家燃气具质检中心（佛山）各抽检了 112 台全新燃气采暖热水炉、122 台燃气快速热水器和 52 台全新燃气灶，在重庆市的两个主城区抽检了 22 台在用燃气快速热水器和 72 台在用燃气灶。经统计分析得出了三类家用燃气具的甲烷排放规律，评估了中国天然气终端应用中家用燃气具的甲烷排放总量，提出降低中国家用燃气具甲烷排放的对策。

结果表明，家用燃气具运行过程的甲烷排放可以分为启动段、稳定运行段和关闭段三个阶段。燃气采暖热水炉和燃气快速热水器的甲烷排放规律相同。点火时甲烷排放浓度会快速出现尖峰并迅速衰减，在稳定运行过程中甲烷排放浓度较低且稳定，在关火之后甲烷排放浓度也会快速出现峰值并衰减，但峰值低于点火段。家用燃气灶的甲烷排放规律与上述两类燃气具类似，不同的是，燃气灶在关火后的甲烷排放浓度峰值高于点火段。

甲烷排放量影响因素研究表明，不同运行阶段对排放量有明显影响，燃气采暖热水炉点火和关火过程中造成甲烷排放约为稳定运行段的 10 倍，燃气灶的约为稳定运行过程的 5 倍。燃气具使用年份的增加也会导致家用燃气具甲烷排放量的增加，特别是对超出正常使用年限燃气灶的检测中发现，整个运行阶段燃气灶的甲烷排放都会保持较高水平，已不符合正常燃气灶的甲烷排放规律。燃气具类型也会对甲烷排放产生影响，全预混类型的燃烧器燃烧更充分，不完全燃烧造成的排放更少。

对三类家用燃气具全年的甲烷排放量进行计算，结果显示平均每台燃气采暖热水炉、燃气快速热水器、燃气灶的全年甲烷排放总量为 0.38kg、0.21kg、0.087kg，其中单台燃气采暖热水炉的全年甲烷排放量最高，燃气灶的甲烷排放量最低。

通过全球变暖承诺（GWC），分别在 20 年尺度和 100 尺度下大致量化家用燃气具甲烷排放造成的二氧化碳气体排放当量，结果表明在 20 年尺度下甲烷排放的二氧化碳当量高达 493.27 万吨，100 年尺度下为 167.09 万吨。

根据本项目的研究，我们提出了一些可能控制甲烷排放的建议。结果尽管未燃烧甲烷的排放不是用来评估燃气具的典型指标，但它确实会影响效率等级。尽量使用全预混类型的燃气具，燃气具超过 8 年使用年限后及时进行更换。

参考文献

[1] [政府间气候变化专门委员会 \(ipcc.ch\)](http://ipcc.ch).

[2] D.G. Victor, D.Zhou, E.H.M. Ahmed, et al. IPCC Climate change 2014 Mitigation of Climate Change[C]. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014; 01:111-150

- [3] Global Methane Initiative [R/OL]. <https://www.globalmethane.org>.
- [4] EDF calculation based on IPCC AR5 WG1 Chapter 8 [R/OL]
- [5] IPCC Special Report: Global Warming of 1.5°C. Centre for Science and Environment's, 2018; 8
- [6] Overview of Greenhouse Gases[R/OL]. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- [7] Coal mine methane leaks are worse for climate change than shipping&aviation combined[R/OL]. <https://sandbag.org.uk/project/methane-leaks-from-coal-mines-are-worse-for-climate-change-than-all-shipping-and-aviation-combined-says-ieas-new-research-in-weo2019/>
- [8] Merrin Z, Francisco P W. Unburned Methane Emissions from Residential Natural Gas Appliances[J]. Environmental Science & Technology, 2019,53(9):5473-5482.
- [9] Lebel E D, Lu H S, Speizer S A, et al. Quantifying Methane Emissions from Natural Gas Water Heaters[J]. Environmental Science & Technology, 2020,54(9):5737-5745.