

连续监测方法在全国碳市场应用的挑战与对策

李 鹏 吴文昊 郭 伟*

摘要:全国碳市场启动在即,探索适合的碳排放量化方法具有重要现实意义。本文介绍了国内外连续监测方法的应用现状,比较分析了基于核算的方法与基于连续监测的方法的优缺点,剖析了在我国碳市场中应用连续监测方法面临的问题和挑战。本文建议在推广连续监测方法之前,需要选取试点设施获取实际应用经验,建立监测、报告、核查和认证等一系列配套的支撑体系,并解决与传统污染物监测设备的一致性以及与核算方法确定的历史排放数据的一致性。

关键词:温室气体排放;连续排放监测系统;全国碳市场

一、引言

高质量的温室气体排放数据是碳排放权交易体系顺利运行的基础。为确保报告数据的可靠性和准确性,以及同一水平下的数据可比,应制定相关的温室气体量化标准。目前,广泛使用的温室气体排放量化方法主要有两种(US EPA, 2009; AG DEE, 2017; EC, 2018)^①,即基于核算的方法和基于连续监测的方法。基于核算的方法是指通过活动数据乘以排放因子或通过计算生产过程中的碳质量平衡来量化温室气体排放量。基于连续监测的方法是通过直接测量烟气流速和烟气中CO₂浓度来计算温室气体的排放量,主要通过连续排放监测系统(CEMS)来实现。一些研究介绍了欧盟和美国监测、报告和核查(MRV)体系的特点,并对我国MRV体系建设提出了一些建议(董文福等, 2011; 周颖等, 2013; 孙天晴等, 2016)。我国自2013年开始成立碳排放权交易试点,此后,部分学者进行了有关完善碳排放

*李鹏(通讯作者),北京中创碳投科技有限公司,邮政编码:100007,电子信箱:lipeng@sino-carbon.cn;吴文昊,北京中创碳投科技有限公司,邮政编码:100007,电子信箱:wuwenhao@sino-carbon.cn;郭伟,北京中创碳投科技有限公司,邮政编码:100007,电子信箱:guowei@sino-carbon.cn。

本文系国家重点研发计划“我国重点行业温室气体排放监测及质量控制关键技术”(2018YFC1509004)的阶段性成果。感谢匿名审稿人的宝贵建议,文责自负。

①AG DEE: Australian Government Department of Environment and Energy; EC: European Commission; US EPA: United States Environmental Protection Agency。

数据 MRV 机制和改善数据质量的研究(尹蕾等,2014;郑爽等,2015)。2017年12月,全国碳排放权交易体系正式启动,一些学者发表了关于 MRV 数据相关的挑战以及建设全国碳市场的建议的文章(Tang et al.,2018;Zeng et al.,2018)。由于在实际应用过程中,试点和国家碳市场都只采用了基于核算的方法,因此上述分析主要针对核算方法的使用情况。对连续监测方法应用的分析比较有限,王霖晗等(2020)和周春蕾等(2018)介绍了美国和欧盟在应用 CEMS 监测温室气体排放方面的法律框架和质量控制措施等方面的经验,并对我国提出了一些政策建议。

2018年,应对气候变化职能由国家发改委调整到生态环境部,主管部门明确表示了温室气体与污染物排放协同治理的重要性。近年来,生态环境部在电力、水泥、钢铁等行业大气污染物(如SO₂、NO_x、颗粒物等)排放监测方面积累了丰富的经验,因此,有学者建议考虑采用连续监测的方法确定温室气体排放量,以便实现温室气体与污染物排放的协同监测。2020年6月,生态环境部公布《生态环境监测规划纲要(2020—2035年)》(生态环境部,2020a)提出遵循“核算为主、监测为辅”的原则,探索建立重点排放单位温室气体排放源监测的管理体系和技术体系,在火电行业率先开展CO₂排放在线监测试点。然而,如果在全国碳排放权交易体系下应用连续监测方法,还需要针对一系列的问题进行研究,比如连续监测方法是否适用于碳市场纳入的八大行业;连续监测方法本身的数据质量如何,其与核算方法计算的结果是否有可比性;如果应用的话,其成本如何,是否需要建立相关的配套机制,比如监测报告与核查机制;另外,传统的污染物监测的相关参数能否直接用于量化温室气体排放,连续监测方法确定的排放量与核算方法确定的历史排放量之间如何衔接等。

针对上述问题,本文首先就连续监测方法在国内外的应用现状进行了简要介绍,在此基础上,系统地梳理了连续监测方法在实际应用中面临的挑战,并提出相应的解决方案,以利于此方法在全国碳市场中的顺利应用。本文的创新点为对比分析了国内外连续监测方法应用的现状,剖析了连续监测方法与核算方法的优劣;为连续监测方法在我国的运用提出了详细的建议。本文余下内容如下:第二节比较了国内外连续监测方法的应用现状;第三节识别了连续监测方法在应用过程中的一些具体问题和挑战;第四节针对连续监测方法在全国碳市场中的应用提出了一些建议;第五节给出了最终结论。

二、连续监测方法的应用现状

连续监测系统(CEMS)主要包括气体取样和条件控制系统、气体监测和分析系统、数据采集和控制系统等。由于连续监测方法能够实时、自动地监测固定排放源温室气体排放量,无需对多种燃料类型的排放量进行区分和单独核算,具有数据显示更加直观、操作简便的特点。该方法在国际上已有较成熟的应用,而在我国的应用尚在摸索阶段。

(一)美国连续监测方法应用现状

美国控排企业连续监测系统具有如下特点:美国火电烟囱高度较矮,通常会有运维、监测平台,因此,常会将监测点设在烟囱80米高处,测点气态污染物混合均匀,流场稳定,数据代表性较高,误差较小。美国环保署(EPA)采用CEMS数据作为报送数据,其他部分安装的仪器监测的数据可应用于厂内自检。CEMS运维人员需要履行一套完善的考核制度,对人员的专业性要求较高,因此,CEMS维护通常由企业自行管理,定期完成RATA以及年度监督试验(AST)。此外,美国环保局开发了强大的在线校准电子系统,可实现远程在线校准,更好地保证数据质量(王霖晗,2020)。在数据报送方面,美国环保署要求采用电子方式传输信息,通过监测数据检查(MDC)软件,允许企业进入、分析、打印和输出电子监测计划。美国环保署使用MDC开展电子审计并提供自动反馈,MDC能够每小时自动查找错误、误算和监察企业的监测报告及报告系统,以帮助企业确保排放数据的真实性和完整性,保证数据质量(王毅刚等,2011)。美国环保署认为连续监测的数据准确度最高,高于核算方法(US EPA,2009),而CEMS排放数据成为EPA有史以来收集得最完整的数据。

在CEMS经济成本方面,早期美国《酸雨计划》规定的SO₂总量控制与交易体系中,对于应用CEMS的一个重要考量是能否用成本更低的监测方法替代CEMS取得相同的监测效果。然而,最终应用CEMS来核证SO₂的实际排放在交易体系中获得了重要支持。尽管在交易的第一阶段,应用CEMS增加了7%的履约成本,相对低成本的“物质平衡”方法(Materials Balance)可以提供相同的排放总量监测,但是,环保组织质疑后一种方法,应用这种方法与管制机制之间的争议和协商也增加了交易成本(王毅刚等,2011)。基于CEMS的连续监测方法与应用核算方法确定CO₂排放的比较与上述情况非常类似,由此可以推断,在CO₂排放量化方面,应用连续监测方法在美国获得了较高的认可度。根据美国环保署的统计,2015年美国73.9%的火电机组应用连续监测方法进行碳排放监测,由此可知,美国采用安装CEMS设备进行碳排放监测的方式普及度很高(周春蕾等,2018)。

(二)欧盟连续监测方法应用现状

在欧盟碳交易体系(EU ETS)下,连续监测方法与核算方法的监测结果具有等效性(EC 2018)。欧盟通过规定各类数据应满足的数据层级要求,确保两种方法具有可比的数据质量。欧盟制定了系统的质量控制标准体系(包括EN 15259、EN 15267-3、EN 14181等),用来规范连续监测方法的质量控制,其中EN 14181《固定源排放——自动测量系统的质量保证》是欧洲标准化委员会有史以来制定的最重要、要求最高的标准之一,奠定了欧盟CEMS质量保证体系的基础。通过对CEMS的设备选用、安装、校准、运行和年度检查进行全过程控制,对监测数据进行持续性把控,确保数据质量始终处于规定的不确定度范围内。

2019年,德国环境部详细分析了德国应用连续监测方法确定CO₂排放的现状及其特点,其

中对于连续监测方法和核算方法的优缺点进行了对比,具体如表1所示。同时,他们认为,在全面及完善的质量保证体系下,连续监测方法同核算方法一样,可以提供高质量的可比的数据监测,并且进一步指出,排放量的数据质量取决于两种方法各自标准规范的要求、标准规范执行的严格程度以及持续质量保证措施的实施情况,而不取决于究竟采用哪种方法(German EPA, 2019)。

表1 连续监测方法和核算方法优缺点分析

项目	连续监测方法	核算方法
优点	<p>每个排放源只需一套监测设备,原始数据分解量少</p> <p>在排放设施直接确定排放量</p> <p>数据采集、评估、质量控制和数据记录方面有标准规范</p> <p>在评估排放数据方面,可实现高度自动化</p> <p>任何时间可获得原始数据,且数据自动传输到主管部门</p> <p>当多种燃料混合燃烧时,有更好的适用性,且不用付出额外成本</p>	<p>数据质量评估方法有多年实施经验,企业、主管机构及核查单位都了解</p> <p>有各种物质的组分及特性(如热值、排放因子等),可基于此综合评估排放量的数据质量</p> <p>如果测量设备相对独立,系统误差一般较小</p> <p>有相关的组织架构、责任分工和技术知识来保证数据质量</p> <p>可采用协同方式保证质量,如用发票和能源台账数据进行对比</p> <p>适用于分散的排放源</p>
缺点	<p>在准确实施各种“复杂”数据保证规程方面缺乏经验</p> <p>只有烟气的相关信息,无法通过各种物质(如组分)进行评估</p> <p>较高的产生系统误差的风险,如测量设备安装和校准不当或计算机参数设定错误等</p> <p>通常,人员必须单独培训,并对固有风险有敏感性</p> <p>通常,有必要对现有测量系统进行替换或优化</p> <p>主要适用于集中烟道,不适用于分散的排放源</p>	<p>需要频繁处理来自不同排放源的多个原始数据(如测量设备、库存、实验室分析等)</p> <p>取决于量化方法,部分相关数据也需要在设施外收集整理</p> <p>各种各样的数据保证系统,在测试结果的评估和记录等方面缺乏一致的规范</p> <p>经常需要大量的人工处理步骤</p> <p>原始数据经常有不同来源(如实验室化验或者供应商提供),而且为了深入测量,必须单独提供</p> <p>当多种燃料混合燃烧时,需要较高的取样和分析成本</p>

尽管连续监测方法有上述优点,欧盟使用连续监测方法的案例较少,2019年只有155个设施(占总设施数的1.5%)。采用连续监测方法,主要集中在德国、法国、捷克等,绝大多数设施仍采用核算方法确定温室气体排放量。连续监测的方法未被广泛采用的原因是其需要部署相关配套的监测设施,同时烟气中相关温室气体的浓度测量等工作具有较高的专业性,而这些都是小型运营商所不具备的(EC, 2020)。

(三)中国连续监测方法应用现状

我国试点碳市场中,每个试点地区都有各自的核算和报告指南。尽管在北京市、上海市、

广东省、深圳市和湖北省的指南中提到,允许使用连续监测的方法来确定温室气体排放量(上海市发改委,2012;深圳市市场监督管理局,2012;湖北省发改委,2017;北京市发改委,2017;广东省发改委,2018),且北京市要求连续监测方法的数据不确定性不能高于采用核算方法的计算结果,类似欧盟第一个碳排放权交易期的规定(EC,2004);上海市要求根据连续监测方法量化的排放量应通过核算方法进行验证,类似欧盟和美国的规定。然而,这些指南对于如何应用连续监测方法缺乏详细的技术要求,如监测参数、监测要求、质量保证和质量控制措施等。在全国范围内,从2013—2015年,我国发布了三批涵盖24个主要行业的温室气体排放核算方法与报告指南(国家发改委,2013a;国家发改委,2014;国家发改委,2015)。然而,24个行业指南均未提及应用连续监测的方法确定温室气体排放量。国家和试点地区核算和报告指南中关于连续监测方法的具体要求如表2所示:

表2 我国各类监测和报告指南中对连续监测方法的不同要求

试点和全国碳市场	连续监测方法的应用	具体监测要求	报告内容	其他要求
北京市	√	×	×	数据不确定性不能高于采用核算方法的计算结果
上海市	√	×	√	排放量结果应根据核算方法进行验证
广东省	√	×	×	×
深圳市	√	×	×	×
湖北省	√	×	×	×
全国	×	×	×	×

注:“√”表示相关,×表示不相关。

由上文可知,虽然连续监测方法可以用于部分试点地区温室气体排放量的确定,但由于缺乏具体的监测和报告要求,导致实际上难以实施。因此,我国很少有企业采用CEMS直接监测碳排放量(Zeng et al.,2018)。

采用连续监测的方法量化温室气体排放量,需监测烟气流速、烟气CO₂浓度、湿度、温度、压力等参数。2012年,中国出现第一家采用CEMS监测温室气体排放量的电厂(段志洁等,2014)。到目前为止,只有少数发电企业在烟气管道上安装了CEMS,来直接监测温室气体排放。有研究指出,中国大部分电厂都安装了用以监测SO₂、NO_x等传统气态污染物的CEMS,只需增加一个CO₂浓度监测模块,就可以确定温室气体排放量(胡永飞等,2019),类似观点是否准确可行有待进一步研究。Sun等(2020)对中国碳市场中火电企业应用连续监测方法和核算方法的情况进行了对比,指出连续监测方法有高度的自动化,能够避免系统误差和计算错误,降低人为因素的干扰,提高企业排放数据质量的可信度,并且连续监测方法可以与电力市场更有效的融合,进一步降低碳排放。最后指出,现阶段火电厂更适用于应用核算方法,但连续

监测方法在未来将变成量化温室气体排放的首要选择。

三、连续监测方法应用面临的挑战

采用温室气体排放连续监测方法,只要监测设备经过校准后可自动采集数据,获取设施实时的排放量,数据显示更加直观;同时,即使输入侧有不同类型的燃料,也不用像核算方法那样单独区分燃料类型,分别核算排放量并加总,只需要关注烟气的流量及烟气中CO₂浓度情况即可,操作更加简便。由于上述优点,连续监测方法在美国、欧盟、澳大利亚、韩国等碳市场都有不同程度的应用。然而,在讨论连续监测方法在我国碳市场中应用的可行性之前,先探讨一些现实问题和挑战。

(一)应用范围有限

美国区域温室气体减排行动(RGGI)将电厂作为管制对象,仅允许采用连续监测的方法确定温室气体排放量(US RGGI, 2017)。然而,同样在美国,加州ETS(ARB, 2019)规定企业可以在核算方法和连续监测方法之间进行选择,但对于一些行业的生产设施,如固定燃料燃烧排放源、水泥窑、玻璃熔炉、石灰窑、高炉等,当满足一定条件时,如额定热输入大于250MMBtu/h、年运行小时数超过1000小时、已安装通过认证的CEMS等,必须采用CEMS监测和报告其温室气体排放量。在EU ETS下,根据其监测和报告条例(EC, 2018),应采用连续监测方法量化N₂O和CO₂转移的排放量,采用核算方法确定航空业的排放量。除此之外,运营商可以在核算或连续监测方法中自行选择。

我国碳排放权交易体系首批纳入了发电行业,并将逐步扩大到其他高耗能行业(国家发改委, 2017a)。可以推测,连续监测方法存在局限性,不适用于以上所有行业。一方面,连续监测方法主要适用于固定装置,航空等移动装置的排放仍需采用核算的方法进行量化。另一方面,连续监测的方法更适用于单一排放口。在全国碳排放权交易体系覆盖的八大行业中,化工、石化行业生产工艺流程复杂,排放口多,如果要测算企业法人边界的排放量,需要安装多套连续监测装置,操作可行性较差。此外,有色金属和造纸行业的直接排放量较小,不太适合采用连续监测方法。最后,由于所有行业都涉及电力和热力消耗导致的间接排放量,而间接排放量只能采用核算方法进行量化,这意味着,在所有行业中,为了量化企业层面的排放量,即使直接排放量可用连续监测方法确定,间接排放量仍需采用核算的方法得出。

(二)数据质量有待提升

连续监测方法测得的温室气体排放量数据质量需要进一步讨论。准确、可靠的数据是碳市场顺利运行的基础,需要引起高度重视。

一方面,所监测的排放量本身的数据质量是一个重要问题,其中影响最大的参数是CO₂浓度和烟气流速。对于CO₂浓度的数据质量,研究者几乎一致认为其数据不确定度较低,应

在2%以内(Evans et al., 2009; Lee et al., 2014; Quick, 2014)。然而,对于烟气流速的数据质量,目前还没有统一的结论。有些文章提到不确定度在10%以内(Bryant et al., 2014; Lee et al., 2014),有些文章提到典型误差为10%~20%(Munukutla & Craven, 2011)。美国国家标准技术研究所(NIST)的学者进一步指出,烟气流速的数据质量很大程度上取决于测量设备,如单声道超声流量计(USM)的误差在5%~17%之间,而带涡流补偿的X型超声流量计的误差则小得多,在NIST追踪的平均速度下,误差在1%以内(Johnson et al., 2018)。CO₂浓度和烟气流速数据质量的详细对比见表3:

表3 CO₂浓度和烟气流速数据质量对比

序号	参考文献	设施信息	CO ₂ 浓度数据质量	烟气流速数据质量
1	Munukutla & Craven, 2011	美国清洁空气法管制下的燃煤机组	×	误差约为10%~20%
2	Evans et al., 2009	5家电厂	不确定度<1%	不确定度<5%
3	Bryant et al., 2014	实验室	×	不确定度为1.4%~9.3%
4	Lee et al., 2014	能源供应设施	不确定度1%~1.5%	不确定度3.9%
5	Quick, 2014	2009年210家燃煤电厂	误差为0.8%	×
6	Johnson et al., 2018	烟道模拟器	×	单声道USM误差为5%~17%;X型USM误差<0.5%

注:①“×”表示不相关;②一些参考文献使用“不确定度”量化数据质量水平,一些参考文献使用“误差”进行量化。

从以上分析可知,烟气流速的数据不确定度较高,因此,尽管在欧盟和美国允许使用连续监测方法,但其结果仍需用EU ETS中基于核算的方法进行验证(EC 2018),或者根据美国环保署(US EPA, 2009)的要求使用燃料燃烧量进行验证。

另一方面,由于在某些ETS中,如EU ETS和加州ETS,均允许采用基于连续监测的方法和基于核算的方法,理论上这两种方法应具有可比的数据质量,然而实际情况并非如此。美国能源信息署(EIA)的数据库是根据核算方法确定排放量,而美国EPA的eGRID数据库包含了基于连续监测的排放量数据。有文章根据这两个数据库比较了使用不同方法的排放量。可以看出,虽然总排放量的差异不是很大(在5%以内),并且连续监测方法的排放量稍高(Ackerman & Sundquist, 2008; Borthwick et al., 2011; Quick, 2014),但个别生产设施的差异要大得多(标准差5.4%~8%,平均绝对差17.1%)。此外,一些文章比较了单个生产设施的排放量,结果表明,连续监测方法的排放量远高于核算方法的排放量(Evans et al., 2009; Lee et al., 2014)。有文献对这两种方法下的数据质量进行了比较,Quick(2014)认为核算的方法更准确,同时也说明烟气流量测量的准确性无法保证,与核算方法相比,使用连续监测方法校准的烟气流量测量将产生更高的排放量,而使用《美国环保署标准技术规范》规定的2GH和M2H方法校准测量将产生较低的排放量。Lee等(2014)和Uotila(2012)的结果表明,这两种方法具有可比的

不确定度,各自在5%以内。这两种方法的具体对比见表4:

表4 连续监测方法和核算方法的排放量结果和数据质量的比较

序号	参考文献	生产设施信息	连续监测方法的数据质量	核算方法的数据质量	连续监测方法的排放量(E_M)与核算方法的排放量(E_C)对比
1	Ackerman & Sundquist, 2008	2004年828家燃煤电厂	× ^①	×	平均差5.4% ^② 平均绝对差17.1%
2	Borthwick et al., 2011	2005年1066台锅炉	×	×	1.5% ^③ , 标准偏差8%
3	Quick, 2014	2009年210家燃煤电厂	数据质量无法保证	误差约为1.3%~7.2% (平均1.6%)	-0.7% ^② , 标准偏差5.4%
4	Evans et al., 2009	2家燃煤电厂和1台燃气/燃油锅炉	×	×	15%~33% ^②
5	Lee et al., 2014	1座能源供应设施	不确定度为4%~4.5%	不确定度为3.4%	21.6% ^③
6	Uotila, 2012	1家燃煤电厂	不确定度为2.8%	不确定度为1.2%	7% ^③

注:①“×”表示不相关;②数值根据公式 $(E_M - E_C) / [(E_M + E_C) / 2]$ 计算;③数值根据公式 $(E_M - E_C) / E_C$ 计算。

相比之下,EU ETS的监测和报告条例中明确规定了不同类型的生产设施、不同监测方法下应满足的数据质量要求。例如,对于年排放量在50万吨以上的设施,应满足层级4的要求,其中连续监测方法的温室气体排放量不确定度应在-2.5%~2.5%以内,而对于核算方法,仅给出了活动水平数据的不确定度要求,应在-1.5%~1.5%以内,而计算系数(如低位发热值、含碳量、氧化率等)的数据质量则仅仅明确要采用设施实测值,但未给出具体的不确定度要求。德国环境部指出,如果采用高质量的测量设备,合适的分析方法并满足最高层级的要求,则连续监测方法和核算方法的排放量偏差可控制在1%~2%(German EPA, 2019)。

虽然国内只有少数几个生产设施安装了CEMS来监测温室气体排放,但一些研究(张海滨等, 2013;段志洁等, 2014)也对这两种量化方法下的温室气体排放进行了一些比较,对于哪种方法得出的温室气体排放量更高,没有给出一致的结论。

(三)相关成本较高

在发电、水泥生产等行业,企业安装了CEMS,对传统的大气污染物SO₂、NO_x等进行监测,同时也会对确定温室气体排放所需的烟气流速、温度、压力、湿度等参数进行监测。在确定应用连续监测方法的相关成本之前,有必要首先分析污染物控制体系下相关监测参数的数据质量,然后确定这些参数是否可以在ETS下使用。如果这些监测参数可以直接用于ETS排放量的确定,则只需增加一个CO₂浓度监测模块。如果无法采用,则需安装一套全新的温室气体排放监测系统。

有研究指出,江苏省现有的很多电厂都采用单点采样法测定烟气流速,烟气流速的合格率仅为20.4%~36.5%(沈建康,2014),这在某种程度上也说明了在污染物控制体系下,烟气流速的不确定度也很高。由此可见,虽然烟气流速是为确定污染物排放量而监测的,且该参数应满足相关技术导则(生态环境部,2017a;生态环境部,2017b)中的相对准确度等数据质量要求,但在ETS下,烟气流速数据是否可以采用尚不清楚。

Zhang和Schreifels(2011)的文章研究了污染物控制体系下中国CEMS的运行和管理,指出CEMS的采购成本约为6~14万美元,年运行成本约为采购成本的10%。此外,增加额外的污染物分析仪(如NO_x)大约需要0.6~1.4万美元。Chien等(2012)指出,在美国和中国台湾,包括SO₂、NO_x、CO在内的不透明度和流量分析仪的CEMS总安装成本分别约为36.6万美元和19.5万美元,年运营成本分别为2.7万美元和2.2万美元。目前,据国内少数安装CEMS监测温室气体排放量的电厂介绍,质量较高的CO₂浓度测量设备的采购成本约为4.28~10万美元,质量较高的烟气流速测量设备的成本约为2.86~14.28万美元,因此,总采购成本在7.14~24.28万美元之间。如果考虑到年运营成本,CEMS的使用成本将更高。与此相反,我国核算方法考虑了传统的能源统计体系特点,监测温室气体排放的额外成本相对较低。以电力行业为例,即使企业根据指南要求测量燃煤的元素碳含量,每年的额外成本也仅为430美元(每月抽样测量,成本约36美元),远低于基于连续监测方法的费用。

(四)需建立一系列的支撑体系

与核算方法的应用一样,如果连续监测方法即将在我国ETS中应用,则需要建立一系列的支撑体系,如监测和报告方法、核查和认证体系等。

从欧盟ETS和美国EPA可以学到很多经验。欧盟的监测和报告条例,其中包括监测方法、层级要求、测量标准和实验室、数据汇总和缺失数据处理要求等。此外,欧盟还制定了具体的技术指南,以确保连续监测方法的数据质量。EN 15259(CEN,2007a)列出了对测量点的要求,以确保采样点的代表性;EN 15267-3(CEN,2007b)分别通过实验室和现场测试的性能标准确保CEMS的数据质量;EN 14181(CEN,2014)通过校准确保CEMS安装后的数据质量,并通过定期检测确定设备漂移和精度,以及年度监督试验(AST),以保证运行期间的数据质量。对于美国EPA,其联邦法规第40卷第75部分“酸雨计划”(US EPA 1990)规定了连续排放监测的内容,包括CEMS的安装、认证、运行和维护、质量保证的一般要求。此外,美国EPA还有相关的具体技术指南,如第40卷第60部分(US EPA,1996),其中列出了性能规范及质量保证要求。

欧盟ETS和美国EPA在数据质量保证方面有一些相同的程序,例如,它们都要求CEMS测试响应时间、漂移、进行线性检查等,但这两个体系之间也存在一些差异。其中最大的差异是,欧盟ETS采用“不确定度”来量化数据质量,这是IPCC温室气体清单和ISO标准中普遍采用的方法,并以“扩展不确定度”的形式确定影响因素的性能特征,如线性检查、温度和压力的

影响、测试气体的不确定度等。因此,可以将这些单个影响因素的不确定度结合起来,以确定烟气流速、CO₂浓度等参数的不确定度。与此不同的是,美国EPA用“相对准确度”来定义数据质量,通过相对准确度测试审核(RATA)将CEMS数据质量与参考标准进行比较,因而无法确定CEMS测量结果的绝对不确定度(Johnson et al., 2015)。

在我国污染物控制体系下发布了多个与CEMS相关的技术指南和管理规范(Zhang & Schreifels, 2011),包括CEMS安装、认证、运行、维护、监管、数据报告等方面,然而,这些指南和管理规范都不涉及CO₂排放量的测量。此外,这些指南与美国EPA的技术标准类似,均以相对准确度为指标对数据质量进行量化,不能确定参数和总排放量的绝对不确定度。

(五)一致性问题尚待解决

在我国,应对气候变化职能已经由国家发改委调整到生态环境部,后者在传统污染物监测方面积累了丰富的经验。然而,由于碳市场与污染物防控体系的目标不同,这两个体系对数据质量的要求也不同。通过本节第(二)点和第(三)点可以推断,传统的污染物防控体系监测到的烟气流速、温度、压力等参数,如果没有进一步的数据质量分析,将不能直接用于碳市场。

另一方面,我国已收集了2013—2019年的温室气体历史排放量(国家发改委,2016;国家发改委,2017b;生态环境部,2019a;生态环境部,2019b),并据此设计了电力行业的配额分配基准值(生态环境部,2020b),该基准值将在全国碳市场的第一阶段使用。如果要在全国碳市场中应用连续监测的方法,则需要回答一系列问题,例如如何确定基准值?基准值能否采用核算方法下的历史排放量来确定?如果不能,装有CEMS的生产设施应至少运行一年至两年,来获得足够多的数据以确定连续监测方法下的基准值。此外,对于一个行业(如电力行业),是否只能用连续监测的方法,如RGGI,还是像欧盟ETS那样两种方法都可以使用?同样,对于数据质量,连续监测方法下量化的温室气体排放量是否应与核算的方法进行验证如欧盟ETS,还是像美国EPA所要求的与燃料消耗量进行验证?

四、连续监测方法应用建议及展望

我国尚没有足够的应用CEMS监测温室气体排放的实践经验,因此有必要在某些行业进行试点应用。根据试点的经验,再进一步决定是否可以推广连续监测方法,如果可以,应确定在多大程度上和在哪些行业应用这种方法。综上所述,对于连续监测方法在我国碳市场中的应用,仍有很多工作需要完成。以下是一些建议方案:

(一)从试点设施中获得应用连续监测方法的经验

如第三节第(一)点所述,连续监测方法通常适用于固定源,且最好为排放口单一的情况。在这种情况下,首批纳入碳市场的发电行业是最优选择,因为发电行业的大部分温室气

体排放来自化石燃料燃烧和脱硫过程,集中通过烟囱进行排放。此外,为确保电力行业的代表性,最好同时选择燃煤电厂和燃气电厂进行研究。

在选择了试点设施后,有必要针对欧盟和美国CEMS相关技术标准以及我国污染物排放的监测技术标准开展研究,包括监测参数、监测位置、监测频率、性能标准、数据收集与报告、不确定度分析等。在实际应用中,从监测位置、采样点选取、CEMS安装与校准、运行中的质量保障等各个环节都要非常重视,以确保获得的数据具有较高的质量。

从文献调研和与专家的现场交流中可以得出结论,烟气流速的测量是最终确定温室气体排放量的最大挑战。实践证明,多点矩阵式流量计比单点流量计的测量结果更为准确,X型超声流量计的不确定度要比单声道超声流量计低得多。因此,最好使用多点矩阵式流量计或X型超声流量计,并计算烟气流速和温室气体排放量的总体不确定度,从而评估连续监测方法自身的可靠性。

有必要对连续监测方法和核算方法所确定的结果进行比较。最好优先选择燃气电厂,因为天然气组分相对稳定,因此核算方法得出的温室气体排放量可能具有较低的不确定度,可通过与核算方法得出的结果进行比较,验证连续监测方法的可靠性。Bryant等(2014)的研究表明,对于燃气锅炉,核算方法的数据不确定度小于1%,连续监测方法的数据不确定度约为4%,两种方法下的总排放量具有良好的一致性。对于燃煤电厂来说,考虑我国的实际情况,保证温室气体排放数据的可靠性非常重要。根据现行的《中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》(国家发改委,2013b),煤炭的净热值需每天采样和测量,可以确保良好的数据质量,但是元素碳含量是每天采集缩分样品,每月将该月样品混合后测量一次。由于中国煤炭种类繁多,而且有很多煤种掺烧的情况,因此元素碳含量的月度测量可能无法反映煤炭的变化特性,因此,最好将元素碳含量的测量频率由每月调整为每天,以保证数据质量。对于碳氧化率,由于许多电厂都会测量炉渣和飞灰的含碳量,因此建议每日测量和确定碳氧化率。通过上述措施,基于更高的测量频率、更好的样本代表性,从而降低核算方法的数据不确定度,从而与连续监测方法的排放量结果进行比较,得出更具说服力的结论。

根据电力行业试点设施的监测数据,可以得出一些结论,如数据质量是否可靠,连续监测法和核算法下的温室气体排放量是否具有可比性等。在此基础上,可以提出相关建议,如是否在整个电力行业推广连续监测的方法,并将其进一步推广到其他行业使用,如水泥行业等。同时在决策过程中,要考虑使用连续监测方法的相关成本。经过综合分析后,如果有可能在全国碳市场中应用连续监测的方法,则可以执行以下步骤。

(二)建设一系列配套体系

为保证连续监测方法的顺利应用,需要建立一系列的支持体系,如监测和报告方法、核查和认证体系。一方面要通过建立支撑体系来保证数据的准确性和可靠性;另一方面,在全国

碳市场中,连续监测方法可能与核算方法并存,因此规定各自方法的数据质量要求非常重要,以确保排放数据的可比性,并确保控排企业在这两种方法下处于平等的竞争环境。具体建议如下:

为确保连续监测方法本身的数据质量,必须制定具体的技术指南,如监测和报告指南,包括监测边界、监测方法、监测标准、数据缺失的处理、监测计划,报告模板以及质量控制和质量保证措施。应制定具体的监测标准,包括CEMS性能测试、安装、校准、运行期间的漂移检测和年度监督测试等的质量要求。不同参数的性能指标应以不确定度的形式给出,确保能够对最终排放结果进行不确定度分析。除监测和报告指南外,还应制定核查和认证指南,以确保报告数据的可靠性。

为了确保连续监测方法和核算方法的排放数据可比性,最好分别列出这两种方法的数据质量要求(例如,以不确定度水平的形式)。此外,如果通过上述措施能够保证两种方法的数据质量具有相同的不确定度水平,则建议连续监测方法下的温室气体排放结果不再需要通过核算方法进行验证。

(三)解决一致性问题

本文所说的一致性问题包含两个方面,一是与传统的用于监测污染物排放的CEMS设备的一致性问题,二是与采用核算方法确定的历史排放数据的一致性问题。建议如下:

由于连续监测方法下量化温室气体排放量的数据质量要求应在本节第(二)点中建议的监测标准中给出,企业需确认污染物控制体系下的烟气流速是否可以满足ETS的要求,如果能直接采用,将在很大程度上为企业节省设备成本和管理成本。

虽然我国已收集了2013—2019年的历史排放量,但由于只有部分生产设施在核算法下实际测量了元素碳含量和碳氧化率,而且即使是对这两个参数进行实测的企业,其实测频率也并没有精确到每天。因此,核算方法的历史排放量很难直接用于确定连续监测方法的基准值。较为合适的做法是在一定时期内(如1~2年)积累连续监测数据,并据此设计相关基准值。

(四)连续监测方法在未来全国碳市场中的应用展望

我国已经建立了较为完善的核算方法下的温室气体排放量化支撑体系,包括监测报告指南、监测计划、对第三方核查和核查机构要求等,并据此收集了2013—2019年的历史排放数据。这些都为全国碳市场的顺利运行提供了坚实的基础。与此相反,目前只有少数电厂安装了CEMS来监测温室气体排放,基于以上分析,还有许多具体问题需要解决。我国在2021年1月1日启动全国碳市场的第一个履约周期(国家发改委,2017a;生态环境部,2021),在目前的情况下,建议全国碳市场初期采用核算方法。从长远来看,基于试点设施应用连续监测方法的经验,以及一到两年积累的实际排放数据,连续监测的方法也可应用于全国碳排放权交易体系的某些行业,甚至在某些行业(例如发电行业),在满足同等数据质量的前提下,两种方法

可以并存。但是,由于应用范围的限制,连续监测的方法不可能完全取代核算方法。

五、结论

在欧盟和美国,已经采用连续监测方法确定部分行业的温室气体排放。虽然我国在污染物控制体系下有使用CEMS进行排放监测的经验,但在我国试点和全国碳排放权交易体系中,目前只采用了核算方法。本文介绍了连续监测方法在国内外的应用现状,剖析了应用连续监测方法所面临的问题和挑战,包括应用范围有限、烟气流速等数据质量仍需进一步研究、与核算方法相比数据准确性尚无明确结论、相对较高的成本,缺乏支撑体系以及尚待解决的一致性问题。基于这些分析和发现,本文建议首先在电力行业中选取试点设施应用连续监测方法,并详细分析连续监测方法的数据质量,以及与核算方法的可比性和数据一致性。在这之后,需要建立一系列的支撑体系,如监测和报告方法、核查和认证制度,以确保数据质量;应分别规定这两种方法各自的不确定度要求,以确保数据的可比性;为解决一致性问题,应根据ETS体系的标准仔细对比传统污染物控制体系下烟气流速等相关参数的质量要求,并积累一至两年的温室气体排放数据,以确定连续监测方法的基准值。总而言之,在当前形势下,全国碳市场应采用核算方法,从长远来看,连续监测方法也可以基于试点设施的实践经验开展应用。

参考文献:

- [1] 北京市发改委. 北京市企业(组织)二氧化碳排放核算和报告指南[S]. 2017.
- [2] 董文福,刘泓汐,王秀琴,劳月娥,殷培红. 美国温室气体强制报告制度综述[J]. 中国环境监测, 2011, 27(2): 18-21.
- [3] 段志洁,张丽欣,李文波,陈琳,王振阳. 燃煤电力企业温室气体排放量化方法对比分析[J]. 中国电力, 2014, 47(2): 120-125.
- [4] 广东省发改委. 广东省企业(单位)二氧化碳排放信息报告指南(2018年修订)[S]. 2018.
- [5] 国家发改委. 国家发展改革委办公厅关于印发首批10个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL]. (2013a-11-4) [2021-01-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960.html.
- [6] 国家发改委. 中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)[S]. 2013b.
- [7] 国家发改委. 国家发展改革委办公厅关于印发第二批4个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL]. (2014-12-3) [2021-01-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/t20150209_963759.html.
- [8] 国家发改委. 国家发展改革委办公厅关于印发第三批10个行业企业温室气体核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL]. (2015-07-06) [2021-01-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111_963496.html.
- [9] 国家发改委. 发展改革委通知切实做好全国碳排放权交易市场启动重点工作[EB/OL]. (2016-01-11) [2021-01-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-01/22/content_5035432.htm.

- [10] 国家发改委. 全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业)[S]. 2017a.
- [11] 国家发改委. 国家发展改革委办公厅关于做好2016、2017年度碳排放报告与核查及排放监测计划制定工作的通知[EB/OL]. (2017b-12-04)[2021-01-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/15/content_5247303.htm.
- [12] 湖北省发改委. 湖北省工业企业温室气体排放监测、量化和报告指南(试行)[S]. 2017.
- [13] 胡永飞,冯田丰,姚艳霞,郭慧东. 连续排放监测法在我国发电行业碳交易应用前景探讨[J]. 电力科技与环保, 2019, 35(3):50-52.
- [14] 上海市发改委. 上海市温室气体排放核算与报告指南(试行)[S]. 2012.
- [15] 生态环境部. 固定污染源烟气(SO₂、NO_x、颗粒物)排放连续监测技术规范[S]. 2017a.
- [16] 生态环境部. 固定污染源烟气(SO₂、NO_x、颗粒物)排放连续监测系统技术要求及检测方法[S]. 2017b.
- [17] 生态环境部. 关于做好2018年度碳排放报告与核查及排放监测计划制定工作的通知[EB/OL]. (2019a-01-17)[2021-01-01]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/201901/t20190124_690807.html.
- [18] 生态环境部. 关于做好2019年度碳排放报告与核查及发电行业重点排放单位名单报送相关工作的通知[EB/OL]. (2019b-12-27) [2021-01-01]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202001/t20200107_757969.html.
- [19] 生态环境部. 生态环境部正式发布《生态环境监测规划纲要(2020—2035年)》[EB/OL]. (2020a-06-19)[2021-01-01]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200619/1082658-2.shtml>.
- [20] 生态环境部. 关于印发《2019—2020年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案(发电行业)》《纳入2019—2020年全国碳排放权交易配额管理的重点排放单位名单》并做好发电行业配额预分配工作的通知[EB/OL]. (2020b-12-30)[2021-01-01]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202012/t20201230_815546.html.
- [21] 生态环境部. 生态环境部举办碳排放权交易管理政策吹风会[EB/OL]. (2021-01-05)[2021-01-10]. http://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202101/t20210105_816140.shtml.
- [22] 沈建康. 火电厂烟道流场测试断面优化试验研究——以江苏省300MW以上火电厂为例[J]. 中国新通信, 2014, 16(13):66-67.
- [23] 深圳市市场监督管理局. 组织的温室气体排放量化和报告规范及指南[S]. 2012.
- [24] 孙天晴,刘克,杨泽慧,江丽,胡国瑞. 国外碳排放MRV体系分析及对我国的借鉴研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5):17-21.
- [25] 王霖晗,朱林,张晶杰,杨帆. 欧盟火电厂二氧化碳排放在线监测系统质量保证体系对中国的启示[J]. 中国电力, 2020, 53(3):154-158.
- [26] 王霖晗. 火电厂碳排放监测体系与核算方法的研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2020.
- [27] 王毅刚,葛兴安,邵诗洋,李亚冬. 碳排放交易制度的中国道路——国际实践与中国应用[M]. 北京:经济管理出版社, 2011.
- [28] 尹蕾,宋然平,陈亮,陈健华,鲍威,张建松. 完善温室气体核算制度:提升企业数据质量的经验与建议[R]. 2014.
- [29] 张海滨,胡永飞,张景奇,孟硕. 二氧化碳排放量化方法探讨[J]. 中外能源, 2013, 18(3):96-101.
- [30] 郑爽,刘海燕,王际杰. 全国七省市碳交易试点进展总结[J]. 中国能源, 2015, 37(9):11-14.
- [31] 中国国家标准化管理委员会. 中国煤炭分类[S]. 2009.
- [32] 周春蕾,王明,李梦,胡军峰,蒋凯,王鹏. 美国火电机组碳排放连续监测机制研究[J]. 价格理论与实践, 2018, (11):54-57.
- [33] 周颖,张宏伟,刘兰翠,蔡博峰,张战胜. 欧盟和美国温室气体排放监测对中国的借鉴意义[J]. 中国环境监测, 2013, 29(5):1-5.
- [34] Ackerman, K. and E. Sundquist. Comparison of Two U. S. Power-Plant Carbon Dioxide Emissions Data Sets

- [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42:5688–5693.
- [35] AG DEE. *Technical Guidelines for the Estimation of Emissions by Facilities in Australia*[R]. 2017.
- [36] ARB. *Regulation for the Mandatory Reporting of Greenhouse Gas Emissions*[R]. 2019.
- [37] Borthwick, R., J. Whetstone, J. Yang, and A. Possolo. *Examination of United States Carbon Dioxide Emission Databases*[C]// EPRI CEM User Group Conference and Exhibit 2011. Gaithersburg, MD: NIST, 2011.
- [38] Bryant, R., O. Sanni, E. Moore, M. Bundy, and A. Johnson. *An Uncertainty Analysis of Mean Flow Velocity Measurements Used to Quantify Emissions from Stationary Sources*[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2014, 64(6):679–689.
- [39] CEN. EN 14181: *Stationary Source Emissions—Quality Assurance of Automated Measuring Systems*[R]. 2014.
- [40] CEN. EN 15259: *Air Quality—Measurement of Stationary Source Emissions—Requirements for Measurement Sections and Sites and for the Measurement Objective, Plan and Report*[R]. 2007a.
- [41] CEN. EN 15267–3: *Air Quality—Certification of Automated Measuring Systems—Part 3: Performance Criteria and Test Procedures for Automated Measuring Systems for Monitoring Emissions from Stationary Sources*[R]. 2007b.
- [42] Chien, T., H. Chu, W. Hsu, T. Tseng, C. Hsu, and K. Chen. *A Feasibility Study on the Predictive Emission Monitoring System Applied to the Hsinta Power Plant of Taiwan Power Company*[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, 53(8):1022–1028.
- [43] EC. *Commission Decision (EC) No 2004/156/EC of 29 January 2004 Establishing Guidelines for the Monitoring and Reporting of Greenhouse Gas Emissions Pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council*[J]. *Official Journal of the European Union*, 2004, L59:1–74.
- [44] EC. *Commission Implementing Regulation (EU) 2018/2066 of 19 December 2018 on the Monitoring and Reporting of Greenhouse Gas Emissions Pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council and Amending Commission Regulation (EU) No 601/2012*[J]. *Official Journal of the European Union*, 2018, L334:1–93.
- [45] EC. *Report from the Commission to the European Parliament and the Council, Report on the Functioning of the European Carbon Market*[R]. 2020.
- [46] Evans, S., S. Deery, and J. Bionda. *How Reliable Are GHG Combustion Calculations and Emission Factors* [C]// CEM 2009 Conference. Italy: Milan, 2009.
- [47] German EPA. *Application of Continuous Emissions Measurement Systems (CEMS) for the Determination of CO₂ Emissions*[R]. 2019.
- [48] Johnson, A. N., L. Shinder, M. Moldover, J. Boyd, and J. Fila. *Progress Towards Accurate Monitoring of Flue Gas Emissions*[C]// 2018 International Symposium on Fluid Flow Measurement (ISFFM). Querétaro: NIST, 2018.
- [49] Johnson, A. N., R. A. Bryant, T. M. Wong, et al. *Measurement Challenges and Metrology for Monitoring CO₂ Emissions from Smokestacks—Workshop Summary*[C]// NIST Special Publication 1201. Querétaro: NIST, 2015.
- [50] Lee, S., Y. Choi, J. Woo, *Emissions with Their Uncertainties Using Different Methods: A Case Study for an Energy Supply Utility*[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2014, 64(10):1164–1173.
- [51] Munukutla, S. and R. Craven. *On-Line Monitoring of Efficiency and Greenhouse Gas Emissions in Coal-Fired Units. Recent Researches in Energy, Environment, Devices, Systems, Communications and Computers*[C]// Recent Researches in Energy, Environment, Devices, Systems, Communications and Computers. Italy: Venice, 2011.
- [52] Quick, J. *Carbon Dioxide Emission Tallies for 210 U. S. Coal-Fired Power Plants: A Comparison of Two Accounting Methods*[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2014, 64(1):73–79.
- [53] Sun, S., C. Zhou, M. Wang, K. Jiang, A. Mujeeb and P. Wang. *The Extension of Continuous Carbon Emission Monitoring System in China's Thermal Power Plants under the Carbon Market*[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. UK: IOP, 2020.

- [54] Uotila, T. CO₂ Emission Monitoring and Measurement Quality Control (Master of Science Thesis)[D]. Finland: Tampere University of Technology, 2012.
- [55] US EPA. Mandatory Reporting of Greenhouse Gases Final Rule[R]. 2009.
- [56] US EPA. Part 75—Continuous Emission Monitoring[R].1990.
- [57] US EPA. Part 60—Standards of Performance for New Stationary Sources(Continued)[R]. 1996.
- [58] US RGGL. Model Rule Part XX CO₂ Budget Trading Program[R]. 2017.
- [59] Tang, R., W. Guo, M. Oudenes, P. Li, J. Wang, J. Tang, L. Wang, and H. Wang. Key Challenges for the Establishment of the Monitoring, Reporting and Verification (MRV) System in China's National Carbon Emissions Trading Market[J]. *Climate Policy*, 2018, 18(sup1): 106–121.
- [60] Zeng, X., M. Duan, Z. Yu, W. Li, M. Li, and X. Liang. Data-Related Challenges and Solutions in Building China's National Carbon Emissions Trading Scheme[J]. *Climate Policy*, 2018, 18(sup1): 90–105.
- [61] Zhang, X., and J. Schreifels. Continuous Emission Monitoring Systems at Power Plants in China: Improving SO₂ Emission Measurement[J]. *Energy Policy*, 2011, 39: 7432–7438.

The Challenges and Recommendations of Application of the Measurement-Based Monitoring Methodology in National Carbon Market

Li Peng , Wu Wenhao and Guo Wei
(SinoCarbon Innovation & Investment Co., Ltd)

Abstract: As the national carbon market is about to start, it is of great practical significance to explore suitable methods for carbon emission quantification. This paper analyzes the current application status of measurement-based method in China's and abroad, compares the advantages and disadvantages of the method based on accounting and the method based on continuous monitoring, presents specific issues and challenges for the application of measurement-based method in China ETS. The paper suggests that, before the measurement-based method is promoted in national ETS, pilot facilities should be selected to accumulate relevant experiences, the monitoring, reporting, verification and accreditation system shall be built to ensure data quality, and the coherence problems for using CEMS under traditional pollutant control system as well as the consistency between CEMS monitoring data and historical emissions data based on calculation method shall be solved.

Keywords: GHG Emissions; Measurement-Based Monitoring Methodology ; CEMS; National Carbon Market

JEL Classification: P18, Q58

(责任编辑:卢 玲)