

DOI: 10.19666/j.rfd.202305058

发电行业二氧化碳排放监测技术 现状与综述

吴昊, 任鑫, 朱俊杰

(中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

[摘要] 为了利用市场机制减少二氧化碳排放和推动绿色低碳转型, 世界各国相继建设碳排放权交易市场。二氧化碳排放监测技术是实现碳排放精准计量的主要技术手段, 是辅助碳排放核算体系的重要技术支撑。重点分析了发电行业二氧化碳排放监测与核算现状, 详细介绍了发电行业的二氧化碳排放监测技术, 包括排放因子法、在线监测法、碳平衡法、软测量法、卫星监测法。针对这些监测技术, 系统综述了国内外二氧化碳排放监测技术研究, 阐述不同监测技术的优缺点, 并从准确性、时效性、可靠性和监测成本对其进行对比分析, 为发电行业二氧化碳排放监测提供可靠的技术方案, 并对未来研究方向和实际应用做出展望。

[关键词] 火力发电; 二氧化碳; 排放因子; 在线监测; 排放管理

[引用本文格式] 吴昊, 任鑫, 朱俊杰. 发电行业二氧化碳排放监测技术现状与综述[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 1-13.
WU Hao, REN Xin, ZHU Junjie. Current situation and review of carbon dioxide emission monitoring technology in power generation industry[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 1-13.

Current situation and review of carbon dioxide emission monitoring technology in power generation industry

WU Hao, REN Xin, ZHU Junjie

(China Huaneng Clean Energy Technology Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: In order to use the market mechanism to reduce carbon dioxide emission and promote green low-carbon transition, countries around the world have successively built carbon emission trading markets. Carbon dioxide emission monitoring technology is the main technical method to achieve accurate carbon emission measurement. It is an important technical support to assist the carbon emission accounting system. This paper focuses on the analysis of the current situation of carbon dioxide emission monitoring and accounting in the power generation industry, and introduces the carbon dioxide emission monitoring methods in the power generation industry in detail, including emission factor based method, online monitoring method, carbon balance method, soft sensing method, and satellite monitoring method. In view of these monitoring methods, this paper systematically reviews the researches of carbon dioxide emission monitoring methods in the world, expounds the advantages and disadvantages of the monitoring methods, compares the methods from accuracy, timeliness, reliability and monitoring cost, and provides reliable technical solutions for carbon dioxide emission monitoring in the power generation industry. Finally, we make an outlook on future research directions and practical applications.

Key words: thermal power generation; carbon dioxide; emission factor; online monitoring; emission management

大量温室气体排放导致的全球气候变化问题已经成为全人类社会面临的主要生存危机。根据 2021 年联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC)

发布的《气候变化 2021: 自然科学基础》^[1], 全球升温可能在未来 20 年达到或超过 2015 年《巴黎协定》规定的 1.5 °C 临界值。2021 年全球 CO₂ 排放量

收稿日期: 2023-05-17 网络首发日期: 2023-06-30

基金项目: 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司基金项目 (CERI/TO-22-CERI02)

Supported by: China Huaneng Clean Energy Technology Institute Co., Ltd. Fund Project (CERI/TO-22-CERI02)

第一作者简介: 吴昊 (1994), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为新能源发电技术, h_wu@qny.chng.com.cn.

达到 363 亿 t, 相比 2020 年增长 6%。如果温室气体排放不能得到有效遏制, 地球的生态系统将遭受永久性转变。因此, 全球温室气体减排尤其是 CO₂ 减排将是未来世界各国需要考虑的主要任务之一。

2020 年 9 月 22 日, 习近平总书记在联合国大会一般性辩论上表示, 中国 CO₂ 的碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取到 2060 年前实现碳中和。2020 年和 2021 年, “双碳”目标连续 2 年被写入政府工作报告, 彰显了我国做好碳达峰碳中和工作和构建清洁低碳高效安全能源体系的决心。

电力行业是我国最大的 CO₂ 排放行业, 碳排放量约占全国碳排放总量的 40%。基于我国能源结构偏煤、电力结构重碳的特点, 电力行业已经成为我国碳达峰碳中和的首要目标。尽管我国大力发展新能源, 火力发电仍是我国主要发电形式。2021 年我国火力发电量约为全社会总发电量的 71%。在未来一段时间内, 火电机组仍将承担保障供电和灵活调节的作用, 针对火电机组的减碳任务依然十分艰巨^[2]。

为了利用市场机制减少 CO₂ 排放和推动绿色低碳转型, 世界各国相继建设碳排放权交易市场。我国于 2011 年在 7 个省市启动了碳排放权交易试点工作, 福建省于 2016 年启动碳交易市场, 有效促进了试点省市企业温室气体减排, 为全国碳市场建设积累了宝贵经验。发电行业作为最主要的碳排放主体, 最先纳入了碳排放核算体系和碳市场交易体系。2017 年, 国家发改委印发了《全国碳排放权交易市场建设方案(电力行业)》, 标志着全国碳排放交易体系完成了总体设计。2021 年 1 月, 生态环境部印发了《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)》, 明确了纳入配额管理的发电行业重点排放单位名单。2021 年 7 月, 全国碳市场启动上线交易, 发电行业成为首个纳入全国碳市场的行业, 总计 2 225 家发电企业和自备电厂。2022 年 12 月 21 日, 生态环境部印发了《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》和《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》, 详细规定了发电行业的碳排放核算和核算内容。精准的碳监测技术能够帮助企业全面掌握自身碳排放情况, 有助于企业落实碳资源精细化管理, 制定有效的节能减排措施, 提升低碳经济运营水平, 对于参与全国碳市场交易具有指导意义。做好发电企业 CO₂ 排放监测, 对于我国发电行业乃至全国早日实现“双碳”目标具有不可替代的重要作用。

本文首先介绍了国内外发电行业 CO₂ 排放监测的现状, 详细总结了发电行业 CO₂ 排放监测技术, 包括排放因子法、在线监测法、碳平衡法、软测量法、卫星监测法, 阐述其技术特点和实现过程, 并系统分析了不同碳排放监测方法的技术优缺点, 为发电行业 CO₂ 排放监测的技术发展提供可行的技术方案和参考依据。最后, 本文对发电行业 CO₂ 排放监测技术的未来研究方向和实际应用提出了展望, 切实服务于我国乃至世界的温室气体减排任务。

1 发电行业 CO₂ 排放监测现状

目前国内外发电行业广泛使用的 CO₂ 排放监测技术是排放因子法和在线监测法。排放因子法是 IPCC 推荐的温室气体排放量计算方法, 也是国内外使用最广泛的方法^[3-4]。排放因子法是一种基于燃料端的排放量监测方法, 通过将活动数据(燃料消耗量、燃料发热量等)和对应的排放因子(单位热值含碳量、元素碳含量、碳氧化率等)计算企业的 CO₂ 排放量。其原理相对比较简单, 但对于生产环节较为复杂的企业, 不同活动排放因子难以选取, 进而造成计算结果存在较大误差。发电企业的工艺流程比较简单, 主要包括燃料消耗和外购电力, 因此发电行业比较适合采用排放因子法。在线监测法是一种基于排放端的排放量监测方法, 利用仪器设备测量烟道的 CO₂ 质量浓度、烟气流量、温度、压力、湿度等参数计算企业的 CO₂ 排放量。

美国环境保护署于 2009 年出台了《温室气体强制报告制度》, 将 CO₂ 排放量大于 25 000 t 的工厂纳入报告范围, 覆盖了 31 个工业部门和种类约 1 万个排放源, 占全国排放总量的 85%~90%^[5-6]。该规定包括上述的 2 种监测方法, 并要求已经拥有连续排放监测系统(continuous emission monitoring systems, CEMS)的企业必须采用在线监测法进行碳排放计量, 对于拥有 SO₂、NO_x 等废气污染物在线监测系统的企业也要求对系统进行升级加入 CO₂ 监测。此外, 美国还要求燃煤和采用其他固体燃料的发电机组必须采用 CEMS 监测 CO₂, 燃气和燃油机组可以使用排放因子法进行核算。CEMS 要求至少 15 min 检测 1 次, 并同时配备自动数据采集与处理系统, 对 CEMS 的监测数据计算每小时平均值。美国的强制报告制度在很大程度上规范了企业 CO₂ 排放监测方法, 尤其以在线监测法为主。

欧盟委员会于 2005 年启动欧盟碳排放交易系

统,正式开展 CO₂ 排放监测,覆盖 31 个国家和超过 1 万家能源企业,占欧盟排放总量的 50%。欧盟的碳排放监测可分为 4 个阶段,分别对应欧盟碳市场的 4 个阶段。第 1 阶段于 2004 年发布《温室气体排放核算与报告指南》,首次引入了数据质量等级的概念,规定在能够证明在线监测系统的数据质量高于排放因子法时可以采用 CEMS 进行碳排放监测^[7]。第 2 阶段于 2007 年对《温室气体排放核算与报告指南》进行了修订,对排放设施进行了分级并采取不同等级的监测要求,明确了不确定性的计算方法和相关参数的测量要求^[8]。第 3 阶段于 2012 年出台了《监测及报告条例》^[9]和《认证及审核条例》^[10],替代之前的核算与报告指南,不需要证明 CEMS 的数据质量等级高于排放因子法,在评价测量设备时将不确定性作为主要参数,并提出对不确定性分析和风险评估的要求。第 4 阶段于 2022 年通过了碳边界调整机制,采用全生命周期方法核算碳排放。目前,欧盟约有 23 个国家 155 台机组(占比 1.5%)采用了 CEMS 系统,主要分布在德国、法国、捷克等国家。

我国于 2013 年首次发布了《中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[11],并于 2022 年 12 月发布了《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》^[12],其中规定我国发电行业碳排放监测采用排放因子法进行核算,将化石燃料排放量根据活动数据和 CO₂ 排放因子进行计算,与外购电力排放量一起进行每月定期报告。

我国对于 CO₂ 在线监测法的相关法规政策相对美国和欧盟较为落后,然而,我国的火电厂基本已经安装了 CEMS 用于 SO₂、NO_x 等废气污染物在线监测,具备了初步利用 CEMS 进行 CO₂ 在线监测的良好基础。国务院印发《计量发展规划(2021—2035 年)》中提到,完善温室气体排放计量监测体系,加强碳排放关键计量测试技术研究和应用,健全碳计量标准装置,为温室气体排放可测量、可报告、可核查提供计量支撑。生态环境部公布的《生态环境监测规划纲要(2020—2035 年)》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。浙江、江苏、福建等省份相继研发了碳排放监测系统平台,推进碳排放全面、智能、精准、高效监测管理。2021 年 12 月,经国家能源局批准,电力行

业标准《火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范》(DL/T 2376—2021)公开发布^[13]。该标准对火电厂烟气 CO₂ 排放连续监测技术的系统组成和功能、技术性能、安装、技术指标调试监测、技术验收、日常管理、日常运行质量保证等方面做出了规范和要求。作为我国首个 CO₂ 排放连续监测行业技术标准,该标准填补了我国发电行业碳排放连续监测技术标准空白,完善了我国发电行业碳排放监测核算体系。

2 发电行业 CO₂ 排放监测技术

2.1 排放因子法

排放因子法是最常用的方法,资料来源为政府间气候变化专门委员会 IPCC 的公开资料和《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》^[12]。该方法计算统计期内发电设施各种化石燃料燃烧产生的 CO₂ 排放量的加和^[14]:

$$E_{rs} = \sum_{i=1}^n \left(FC_i \times C_{ar,i} \times OF_i \times \frac{44}{12} \right) \quad (1)$$

式中: E_{rs} 为化石燃料燃烧排放量(以 CO₂ 计), t; FC_i 为第 i 种化石燃料消耗量,固体、液体燃料单位为 t, 气体燃料单位为 10⁴ m³ (标准状态,下同); $C_{ar,i}$ 为第 i 种化石燃料的收到基元素碳含量,固体、液体燃料单位 t/t, 气体燃料单位 t/(10⁴ m³); OF_i 为第 i 种化石燃料的碳氧化率,%; 44/12 为 CO₂ 和 C 的相对分子质量之比。

化石燃料消耗量应根据重点排放单位用于生产所消耗的能源实际测量值来确定。燃煤消耗量应优先采用经校验合格后的皮带秤或耐压式计量给煤机的入炉煤测量值。不具备入炉煤测量条件的,应采用每日或每批次入厂煤盘存测量值统计消耗量。燃油、燃气的消耗量应至少每月测量。

元素碳含量应为收到基元素碳含量,燃煤按照 3 种方式之一进行计量: 1) 每日检测,采用每日入炉煤检测数据加权计算得到入炉煤月度平均收到基元素碳含量,权重为每日入炉煤消耗量; 2) 每批次检测,采用每月各批次入厂煤检测数据加权计算得到入厂煤月度平均收到基元素碳含量,权重为每批次入厂煤接收量; 3) 每月缩分样检测,每日采集入炉煤缩分样品,每月将日缩分样品合并混合,检测其元素碳含量。燃油、燃气的收到基元素碳含量应至少每月检测。收到基元素碳含量也可以通过收到基低位发热量和单位热值含碳量计算:

$$C_{ar,i} = NCV_{ar,i} \times CC_i \quad (2)$$

式中: $NCV_{ar,i}$ 为第 i 种化石燃料的收到基低位发热量, 固体、液体燃料单位为 GJ/t , 气体燃料单位为 $GJ/(10^4 m^3)$; CC_i 为第 i 种化石燃料的单位热值含碳量, t/GJ 。对于未开展实测的收到基低位发热量和单位热值含碳量, 按照国家规定的缺省值进行统计和计算。

碳氧化率按照当前规定, 目前不接受实测值, 燃煤的碳氧化率一律取 99%, 燃油和燃气的碳氧化率取对应的缺省值。

除了燃料产生 CO_2 外, 发电厂配备的辅助用油、脱硫装置也会产生额外的 CO_2 排放。辅助用油主要用于锅炉启动初期和低负荷稳燃过程, 可以按照公式(1)进行核算。脱硫过程所用脱硫剂有效成分为碳酸盐, 如 $CaCO_3$ 、 $MgCO_3$ 、 Na_2CO_3 , 会产生 CO_2 排放。根据《温室气体排放核算与报告要求 第 1 部分: 发电企业》(GB/T 32151.1—2015) 中的要求, 企业需要核算脱硫过程碳排放^[15]。脱硫过程的碳排放 E_{d1} 计算如下^[16]:

$$E_{d1} = \sum_{i=1}^n (L_{CAL,i} \times F_{EF,i}) \quad (3)$$

式中: $L_{CAL,i}$ 为第 i 种脱硫剂中碳酸盐消耗量, t ; $F_{EF,i}$ 为第 i 种脱硫剂中碳酸盐的排放因子, t/t 。但目前国家生态环境部《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》里仅要求核算化石燃料燃烧产生的 CO_2 排放和购入使用电力产生的 CO_2 排放, 对于脱硫剂的 CO_2 排放并未进行规定。

龚颖等^[17]将国内 7 个碳交易试点发布的温室气体核算方法与报告指南与国家标准进行对比, 并分析了核算方法之间的差异。周盟等^[18]为了解决 CO_2 排放的实时监测问题, 通过实际运行数据计算得到的实际燃煤量等中间变量, 结合入炉煤质分析, 设计实现了一种火电厂碳排放测试平台, 有效消除了传统 CO_2 排放监测方法产生的累积误差。王小龙等^[19]针对燃煤电厂关键排放因子对碳排放量的影响进行了研究, 指出在进行排放因子法核算的最主要影响因子是单位热含碳量和碳氧化率。

排放因子法是当前我国规定的 CO_2 排放量核算方法。其优点有: 1) 计算简单, 便于统计; 2) 能够比较准确地定量计算 CO_2 排放量。但是也存在一些缺点: 1) 部分数值未实测, 采用缺省值; 2) 电厂普遍存在燃料掺烧现象, 容易造成测量困难和数据错误; 3) 每月实测仅能按月统计排放量, 无

法得到实时数据; 4) 人为参与因素过多, 数据存在错报造假的问题。

2.2 在线监测法

在线监测法最早在国外被应用于开展相关研究。美国环保署规定燃煤机组必须使用在线监测设备, 且机组运行时, 在线监测设备必须同时开始监测。欧盟要求规模超过 20 MW 的火电机组可采用排放因子法或在线监测法。Lee 等人分析了在线监测法和排放因子法的碳排放数据差异^[20]。Quick 等人^[21]分析了 210 家美国燃煤电厂的在线监测结果, 认为提高烟气流量的测量精度可有效提高 CO_2 监测的可靠性。近 2 年, 我国开展了广泛的 CO_2 在线监测技术研究。李峥辉等^[22]对比了在线监测碳排放与核算碳排放的结果。结果表明, 在线监测碳排放比核算碳排放少 5%~30%, 且碳排放与锅炉产出能量变化呈正相关关系, 与过滤效率之间呈负相关关系。张钦等^[23]对 3 家企业的在线监测法与排放因子法数据进行了对比, 相对差距分别为 7.2%、-11.9%、6.8%。2 类监测方法所得碳排放数据存在偏差不可避免且正负不一, 源于 2 类监测方法皆存在测量误差和不确定性。在线监测法的不确定性主要源于烟气流量的测量, 排放因子法的不确定性主要源于净热值的测量和排放因子的选取。2021 年生态环境部启动碳监测评估试点工作, 中国电力企业联合会、中国华电集团有限公司、国家能源投资集团有限责任公司、上海电力股份有限公司等共计 18 家火电厂 22 台机组参与试点。2022 年中国华能集团有限公司开展“高准确性火电厂二氧化碳排放连续监测系统开发及应用示范”项目, 对 35 台代表性机组进行了 CO_2 在线监测系统的试验研究。

在线监测法是利用 CEMS 系统连续在线监测排放源烟气中 CO_2 质量浓度、烟气流量、温度、压力、湿度等, 计算烟气中 CO_2 排放量的监测方法^[24]。 CO_2 的排放质量速率计算公式为:

$$E_h = c_d \times Q_{sn} \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中: E_h 为烟气 CO_2 排放质量速率, t/h ; c_d 为标准状态下 CO_2 干基质量浓度, g/m^3 ; Q_{sn} 为标准状态下干烟气体积流量, m^3/h 。

CO_2 体积分数计算公式为:

$$c_d = c_s \times \frac{44}{22.4} \times 10 \quad (5)$$

式中: c_s 为 CEMS 系统测得的 CO_2 干基体积分数, %。

干烟气体积流量计算公式为:

$$Q_{sn} = Q_s \times \frac{273}{273 + t_s} \times \frac{p_{atm} + p_s}{101\ 325} \times (1 - X_{sw}) \quad (6)$$

$$Q_s = 3\ 600 \times A \times \bar{v}_s \quad (7)$$

$$\bar{v}_s = K_v \times \bar{v}_p \quad (8)$$

式中: Q_s 为实际工况下湿烟气体积流量, m^3/h ; t_s 为烟气温度, $^{\circ}C$; p_{atm} 为大气压力, Pa ; p_s 为烟气静压 (表压), Pa ; X_{sw} 为烟气含湿量; A 为流速测定的断面面积, m^2 ; \bar{v}_s 为测定断面的湿烟气平均流速, m/s ; \bar{v}_p 为测定断面流速 CEMS 测得的湿烟气平均流速, m/s ; K_v 为速度场系数。

目前常用的烟气流量测量仪器主要有差压式、热导式、超声波流量计 3 类^[25]。差压式流量计以伯努利定理为基础, 通过测量流体流过节流件所产生的前后差压, 计算得到流体的流速。差压式流量计包括皮托管和矩阵式流量计, 皮托管是最常用的单点测量流量计, 矩阵式流量计则通过多点取压的方式, 对于多个取压点的平均速度进行测量。矩阵式流量计在精度方面具有较强优势, 但是在高粉尘烟气中, 由于取压孔数量太多容易堵塞, 必要时需要加装反吹装置进行除尘清扫。热导式流量计以热传导原理为基础, 利用流动中的流体和热源之间进行热量交换的关系对烟气流量进行测量。热导式流量计相比于差压式流量计, 在安装、防堵、耐磨方面均有明显优势, 且对于烟气流场不会产生阻力影响。但热导式流量计一般都是单点测量, 测量精度相对较低。超声波流量计依据超声波在顺流和逆流中传播速度之差与介质流速有关的原理, 通过测量超声波在顺流和逆流的传播时间, 计算得到流体介质的流速。超声波流量计的测量精度高, 在防堵、阻力等方面均有明显优势, 并且能够通过增加通道

数进行多点测量, 进行加权求和计算烟道截面流量, 但超声波流量计的价格相对较高。表 1 列出了不同流量计的对比情况, 可以根据实际需求选择合适的烟气流量测量方式。

表 1 不同烟气流量计的对比情况
Tab.1 Comparison of different gas flowmeters

项目	皮托管	多点矩阵式	热导式	超声波
原理	差压	差压	热导	超声波
测点	单点	多点	单点	单/多点
成本	低	中	低	高
精度	低	高	低	高
阻力	有	有	无	无
堵塞	会	会	不会	不会

目前常用的 CO_2 浓度测量方案主要有完全抽取法、稀释抽取法和直接测量法。完全抽取法是通过加热管对抽取的烟气进行加热保温, 保持烟气不结露, 经细除尘、干燥装置、冷凝除湿等预处理装置后再送至分析仪。稀释抽取法是将除尘后的取样烟气用大量的干燥纯净空气按一定比例稀释 (100~250 倍) 后, 使样气的露点温度远低于室温 (一般达到 $-30\ ^{\circ}C$ 以下), 再送至微量分析仪进行分析, 分析结果乘以稀释比, 得到 CO_2 质量浓度值。直接测量法则避免了抽取烟气和尾气排放, 直接通过光路对烟气样品进行分析测量, 利用流动标气校准装置对气体浓度进行校准, 得到 CO_2 质量浓度值。表 2 列出了 3 种测量方案的对比情况, 可以根据实际需求选择合适的 CO_2 浓度测量方式。当前普遍的 CO_2 浓度分析仪采用非分散性红外吸收光谱法 (NDIR), 部分采用可调谐半导体激光吸收光谱法 (TDLAS)、差分吸收激光雷达法 (DIAL)、差分光学吸收光谱法 (DOAS)、傅立叶变换光谱法 (FTIR)。

表 2 3 种 CO_2 浓度测量方式的对比情况
Tab.2 Comparison of three measures for carbon dioxide concentration

测量方式	优点	缺点
完全抽取法	用常量分析仪监测, 精度可靠; 无需稀释气, 维修费用低; 可进行多种污染物监测, 成本较低	需要电 (或汽) 伴热; 需要采样泵和预处理装置
稀释抽取法	样气稀释后降低露点, 防止结露和堵管现象; 防止酸性凝结水腐蚀管道引起的故障; 烟气抽取量小, 延长过滤器使用寿命; 不需要烟气预处理装置	样气中未除去水分, 湿法测量结果需修正; 需用微量分析仪, 精度要求高; 需要空气净化装置; 成本较高
直接测量法	不需要抽取烟气, 安装工艺简便; 减少尾气处理环节, 实现零排放; 避免抽气时延, 实时性好	设备维护困难, 需要较高可靠性; 流动环境复杂, 需要校准装置

在线监测法的优势为: 1) 每个排放源只需 1 套监测设备, 在排放源处直接确定 CO_2 排放量; 2) 排

放数据监测和分析可实现高度自动化; 3) 可连续获得实时排放数据, 且数据自动传输到主管部门;

4) 多种燃料混合燃烧时,有更好的适用性和更高的精度。但其缺点主要有:1) 相关人员通常需要单独培训;2) 需要对现有测量系统进行替换或优化;3) 主要适用于集中烟道,不适用于分散的排放源。

2.3 碳平衡法

碳平衡法是基于物料平衡原理,根据统计时间内燃料消耗中碳的量减去燃烧后灰渣中碳的量计算得到释放到大气中 CO₂ 的排放量。图 1 展示了燃料发电过程中碳的输入和输出的过程,对于发电机组而言,碳的输入为燃料中的碳和燃烧过程中添加到机组中的碳(如脱硫工艺),碳的输出为烟道排放的 CO₂ 和损失碳,如炉渣和飞灰中的未燃碳,碳捕集、封存与利用(carbon capture utilization and storage, CCUS) 技术吸收的碳。

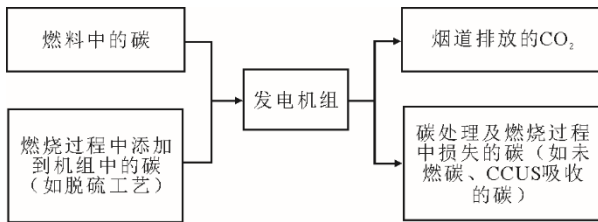


图 1 燃料发电过程中碳的输入和输出

Fig.1 Carbon input and output in fuel power generation

根据碳的物料平衡,可以得到 CO₂ 排放量的计算方法为:

$$E_{rs} = \frac{44}{12} \times \left[\sum_{i=1}^n (FC_i \times C_{ar,i}) - Q_a \times C_a - Q_b \times C_b \right] - E_{xs} \quad (9)$$

式中: Q_a 为燃烧后飞灰的产生量, t; C_a 为燃烧后飞灰的含碳量, t/t; Q_b 为燃烧后炉渣的产生量, t; C_b 为燃烧后炉渣的含碳量, t/t; E_{xs} 为 CCUS 工艺的 CO₂ 吸收量, t。

飞灰和炉渣的含碳量一般需要每月至少检测 1 次,取月平均值。飞灰和炉渣按照月记录实际测量值,若无法测量时,可按照式(10)进行估算^[26]:

$$Q_{hz} = \sum_{i=1}^n FC_i \times \left(\frac{A_{ar,i}}{100} + \frac{NCV_{ar,i} q_4}{33\ 870 \times 100} \right) \quad (10)$$

锅炉的飞灰产生量按式(11)计算:

$$Q_a = Q_{hz} \times \phi_a \quad (11)$$

锅炉的炉渣产生量按式(12)计算:

$$Q_b = Q_{hz} \times \phi_b \quad (12)$$

式中: Q_{hz} 为锅炉产生的灰渣量, t; $A_{ar,i}$ 为第 i 种化石燃料的收到基灰分, %; q_4 为锅炉机械未完全燃

烧热损失, %, ϕ_a 和 ϕ_b 为锅炉产生飞灰和炉渣占灰渣量的百分比, %, 由锅炉厂家提供或参照《火力发电厂除灰设计规程》(DL/T 5142—2012) 进行选取。

针对碳平衡法的研究,涂华等^[27]提出了基于典型动力用煤煤质数据及综合考虑煤种的影响,通过计算煤燃烧产物获得标准煤碳排放值及 CO₂ 排放值。武世福等^[28]根据煤质变化对 CO₂ 的影响,阐述和分析了基于碳平衡的燃煤电厂 CO₂ 排放量计算方法。李进等^[29]通过分析燃煤电厂的碳流通过程,基于碳平衡关系,建立了燃煤过程和脱硫过程的碳排放核算方法。谭超^[26]采用碳平衡法重点分析了在 100% 碳氧化率、无炉渣飞灰含碳量下的碳氧化率和实测碳氧化率下的电厂碳排放量。蔡宇等^[30]基于燃煤电厂的日报数据,将碳平衡结果与排放因子法进行了对比,得出相对误差为 27%~35%,并指出燃煤含氢量是产生误差的主要原因。

碳平衡法相较于目前常用的排放因子法,对于碳氧化率的计算进行了更为精细的规定。当按照排放因子法将碳氧化率取缺省值 99% 时,若飞灰和炉渣中含碳量小于 1%,则排放因子法计算的 CO₂ 排放量会低于实际值;反之,排放因子法则会高于实际值。此外,碳平衡法虽然排除了飞灰和炉渣的含碳量干扰,但其假设燃烧反应将 C 全部转化成 CO₂,实际上部分 C 会生成 CO、CH₄ 和非甲烷挥发性有机物,因此碳平衡法理论上计算的 CO₂ 排放量仍然高于实际的 CO₂ 排放量。

2.4 软测量法

在碳平衡法中,CO₂ 排放量准确测量的关键是对飞灰和炉渣含碳量的测量。目前国内外发电企业主要采用人工检测、光学检测等方法进行飞灰含碳量的检测,在线监测多采用灼烧法装置,但这类方法存在较大误差且滞后性严重。目前国内外对于炉渣含碳量几乎没有可以在线实时监测的装置,均为人工取渣后进行化验。由于炉渣排渣过程时间长,且需要烘干研磨后再进行含碳量化验,因此滞后性更严重。

为了解决发电企业锅炉飞灰和炉渣含碳量的在线监测问题,利用软测量方法构建数据驱动模型得到了学术界和工业界的广泛关注。软测量不直接测量待测变量,而是通过间接测量容易测得的变量(即辅助变量),再根据难以测量或不易测量的待测变量和辅助变量之间的关系,利用机理分析或数据驱动的方式来计算待测变量。软测量的核心内容

是发现和建立辅助变量与待测变量之间的模型关系，其基本原理如图 2 所示。

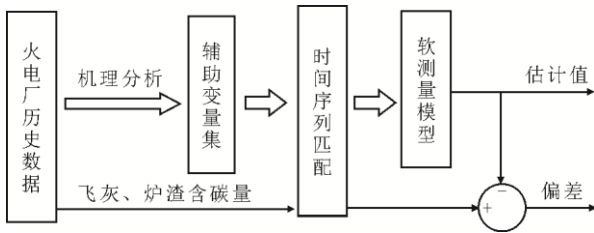


图 2 软测量的基本原理

Fig.2 Basic principal of soft sensing

影响飞灰和炉渣含碳量的辅助变量包括总煤量、总风量、锅炉负荷、炉膛压力、出口风压、过量空气系数、一二次风压、煤粉性质（水分、灰分、挥发分、低位发热量）、烟气含氧量、烟气温度等。将辅助变量作为软测量模型的输入，将飞灰和炉渣含碳量化验值作为输出。锅炉燃烧机组发电是一个典型的动态过程，飞灰和炉渣含碳量化验值相比于辅助变量的实时连续测量具有滞后性和离散性，因此通常需要给辅助变量增加延迟时间，炉内参数对飞灰和炉渣含碳量的影响较快，延迟时间较小；炉外参数对飞灰和炉渣含碳量的影响较慢，延迟时间较大。关于辅助变量延迟时间的计算，可采用格兰杰检验或传递熵等方法计算因果变量之间的时滞。

针对飞灰含碳量的研究，文献[31-33]提出了基于支持向量机（SVM）的飞灰含碳量软测量方法。文献[34]提出了采用多模型融合的飞灰含碳量软测量方法，基于支持向量机融合的多模型进行动态建模。文献[35-36]提出了基于 KPCA 和 LSSVM 的软测量模型来解决飞灰含碳量的精确测量和滞后问题。文献[37]提出了一种基于 LSSVM 稀疏化算法的飞灰含碳量软测量方法，显著降低了软测量模型的计算量，可用于计算性能受限的工业控制器。文献[38]采用多元线性回归建立软测量模型，并根据飞灰含碳量的化学试验实测值进行滚动验证和修正。针对辅助变量选择问题，文献[39]提出了一种基于互信息变量选取的神经网络飞灰含碳量软测量模型。针对灰渣含碳量的研究，文献[40]提出了一种基于自适应模糊神经网络的燃煤锅炉灰渣含碳量软测量模型，可得到实时在线软测量的灰渣含碳量数值。文献[41]提出了一种基于神经网络子母模型的锅炉灰渣含碳量预测方法，子模型通过煤质参数预测煤质燃尽特性指数，母模型通过锅炉运行参数与煤质燃尽特性指数预测灰渣含碳量的实时值。文

献[42]提出了一种基于神经遗传的炉渣含碳量软测量技术，通过遗传算法对神经网络的权值进行了训练，对于锅炉炉渣含碳量实时在线监测取得了较好的预测效果。

除此之外，有研究直接通过机器学习模型建立相关变量与火电厂碳排放变量的映射关系。卫冬丽^[43]提出一种基于 BP 神经网络预测燃煤电厂 CO₂ 排放量的方法。龙芸^[44]提出了一种利用燃煤电厂常规易测量变量预测 CO₂ 的排放，基于 RBF 人工神经网络的预测能力，计算每月的 CO₂ 排放量。孟欣欣^[45]提出了一种利用 SVM 的燃煤电厂 CO₂ 预测模型。Zhu 等人^[46]提出了一种基于 XGboost 的火电厂 CO₂ 排放预测模型，通过输入燃煤消耗量、石灰石消耗量、固定碳、挥发分、低位热值、锅炉负荷、排气温度、炉膛负压、辅助设施功耗、碳氧化速率，计算每月的 CO₂ 排放量。

综上所述，目前对于飞灰含碳量的软测量技术已经取得了较大的进展，对于炉渣含碳量的软测量技术还有待进一步研究。目前的飞灰和炉渣含碳量软测量技术主要是通过关联度分析、互信息法、随机森林等方法进行辅助变量选择，然后基于支持向量机、神经网络、随机森林等机器学习方法进行软测量建模，实现飞灰和炉渣含碳量的实时在线计算。基于飞灰和炉渣含碳量，结合飞灰炉渣产生量和燃料消耗数据，依据碳平衡法可以实现 CO₂ 排放量的精准实时监测。此外，基于机器学习数据驱动进行火电厂 CO₂ 排放量实时预测也是未来的重要研究方向。

2.5 卫星监测法

2019 年，第 49 届 IPCC 全会明确增加了采用基于大气浓度观测数据的“自上而下”大气反演温室气体通量方法。欧洲于 2002 年发射的卫星 ENVISAT 首次搭载了能够探测边界层 CO₂ 浓度变化的星载扫描成像光谱仪 SCIAMACHY。日本于 2009 年发射了全球第一颗专门用于温室气体监测的卫星 GOSAT，能对全球的 CO₂、CH₄、N₂O 和 O₃ 进行监测；并于 2018 年发射了 GOSAT-2，可获得更高精度的温室气体浓度数据。美国于 2014 年和 2019 年成功发射了 OCO-2 和 OCO-3 卫星^[47]。

2016 年 12 月 22 日，我国首颗全球 CO₂ 监测科学实验卫星（“碳卫星 TanSat”）在酒泉发射成功。继日本、美国之后，中国成为第 3 个拥有“碳监测卫星”的国家^[48]。2017 年 10 月 24 日，碳卫星数据已经通过国家卫星气象中心网站面向社会公众开放共

享。2021年8月15日,基于碳卫星的大气CO₂含量观测数据,利用先进的碳通量计算系统,获取了中国碳卫星首个全球碳通量数据集。2021年12月20日,中国气象局已经建成碳监测核查支持系统(CMA.Carbon MVS v1.0)。该系统依托59个温室气体在线监测站高精度CO₂质量浓度数据以及碳卫星CO₂柱浓度数据,掌握全球1°×1°、中国区域45 km×45 km,城市5 km×5 km格点的人为和自然碳通量变化。

国内外从SCIAMACHY卫星数据开始研究卫星遥感监测碳排放方法,主要通过卫星遥感CO₂反演算法。国际上主流的CO₂反演算法有NIES-FP(日本)、ACOS(美国)、UoL-FP(英国)、RemoTeC(荷兰/德国)、IAPCAS(中国)等。其原理是基于辐射传输模型 F ,利用碳卫星记录的光谱数据 y ,通过反演迭代估计状态向量 x ,包含CO₂的柱浓度数据。具体计算式见式(13)。式中, b 为影响辐射传输的固定参数, ε 为测量误差^[49]。

$$y = F(x, b) + \varepsilon \quad (13)$$

基于卫星遥感监测CO₂技术,国内外有研究利用卫星遥感数据进行发电企业单体火电厂的碳排放监测,提供了一种“自上而下”进行发电企业碳排放监测和核查技术手段。Bovensmann等人^[50]提出了一种基于卫星遥感数据进行火电厂局部CO₂点源监测并量化其排放的方法,采用高斯羽流模型对火电厂CO₂排放引起的CO₂柱浓度变化进行了模拟。卫星定位火电厂碳排放要求以2 km×2 km的空间分辨率绘制大气CO₂柱浓度分布,精度应达到0.5%。研究表明,风速对火电厂碳排放量估计具有较大影响,碳排放量估计值与风速呈线性关系。Velazco等人^[51]研究了利用多颗碳卫星进行火电厂碳排放监测。研究表明,对于90%的年排放大于等于5 Mt CO₂的大型火电厂,利用卫星遥感数据估计火电厂碳排放量的系统误差低于12.4%,随机误差低于13%。此外,卫星数量越多,火电厂碳排放量的系统误差就越小。Nassar等人^[52]利用OCO-2的观测数据,通过高斯羽流模型模拟,对多个燃煤电厂进行每日CO₂排放量的监测。研究表明,卫星对于美国3个燃煤电厂的日CO₂排放量估计值在实际排放量的117%以内。Hill等人^[53]利用多张图像对监测结果进行了改善,对于年排放为13 Mt CO₂的火电厂,卫星监测估计值为(13.143±0.566) Mt,精

度为4.35%;对于年排放为6 Mt CO₂的火电厂,卫星监测估计值为(5.923±0.407) Mt,精度为6.78%。Liu等人^[54]提出了利用NO_x和CO₂排放量关系的卫星监测单个发电厂CO₂排放量的方法,首先利用卫星监测发电厂NO_x的排放量,然后根据CEMS的烟道排放数据确定NO_x/CO₂排放比,最后估算发电厂的CO₂排放量。研究表明,基于卫星数据估算8个美国发电厂的CO₂排放量相对于CEMS测量值的精度为8%。中科院通过火电厂地理坐标、大气风向量、OCO-2观测数据,结合改进的高斯羽流模型,估算了上海外高桥发电厂和河南沁北电厂的CO₂排放量,并与核算数据进行比较^[55]。Nassar等人^[56]利用OCO-2卫星观测数据对美国8个发电厂的某天CO₂排放量进行估算,结果偏差在1.4%~26.7%,但估算的每天CO₂排放量平均值的偏差仅有0.8%。该结果表明,利用卫星监测发电厂CO₂日排放量的偏差是随机的,但通过累加到周、月、年,能够减小偏差的随机性,可以“自上而下”估算出较为准确的发电厂CO₂排放量。

3 发电行业CO₂排放监测技术分析

随着国际上对于温室气体排放的重视,发电行业CO₂排放监测、报告、核查体系也在不断完善。目前国际上普遍认可的是排放因子法、碳平衡法、在线监测法^[57]。由于火电厂普遍缺少CO₂连续在线监测设备,国内目前以排放因子法为主,但从2021年起发电行业内逐步开展在线监测的试点工作,在未来将发展成为“核算为主,监测为辅”的CO₂排放监测体系。碳平衡法能够考虑CCUS技术在火电厂的应用效果,并通过飞灰和炉渣含碳量弥补排放因子法的碳氧化率数据缺失和不精确的问题。在未来的发电行业CO₂排放监测体系中,软测量法和卫星监测法也能起到重要作用。软测量法能够利用火电厂运行数据计算实时精准的飞灰和炉渣含碳量,甚至进一步通过构建CO₂排放量的软测量模型,实现火电厂CO₂排放的实时计算。卫星监测法对于全国乃至世界范围内“自上而下”进行碳排放监测与核查具有重要意义。发电行业采用多种CO₂排放监测技术手段并用,有助于通过多源数据减少发电行业CO₂排放数据弄虚作假、错报漏报的问题,提升CO₂排放数据的准确性和可靠性。表3对5种CO₂监测方法的准确性、时效性、可靠性、监测成本方面进行对比和分析。

表 3 5 种 CO₂ 监测方法的对比情况
Tab.3 Comparison of five methods for carbon dioxide monitoring

项目	准确性	时效性	可靠性	监测成本
排放因子法	低	月、日	低	中
在线监测法	高	实时	高	高
碳平衡法	中	月	低	中
软测量法	较高	实时	中	低
卫星监测法	低	月、日	高	较低

3.1 准确性

影响排放因子法的关键数据是燃料相关指标,测量过程涵盖取样、检测、化验、统计等环节,受到取样频率、取样方法、热值等间接因素影响,并且燃煤种类复杂、工况差异大、掺烧频繁,造成排放因子法的 CO₂ 核算数据不准确。根据当前要求,碳氧化率完全采用缺省值,未进行实测。因此,排放因子法的数据准确性并不高,一般情况下存在高估情况。

在线监测法通过直接测量烟气内 CO₂ 的排放,主要误差来自于烟气流量和 CO₂ 浓度的测量,人为误差影响极小,且能够避免碳排放数据弄虚作假、错报漏报的问题。通常情况下,超声波流量计和多点矩阵流量计的烟气流量测量误差在 6% 内,单点皮托管的烟气流量测量误差在 10% 左右,完全抽取法的 CO₂ 浓度测量误差在 3% 内,稀释抽取法的 CO₂ 浓度测量误差在 10% 左右。整体上,烟气 CO₂ 排放量的测量误差在 3%~10%,相较于排放因子法的数据平均低 15% 左右。

碳平衡法会考虑到 CCUS 的 CO₂ 吸收量以及飞灰和炉渣的碳含量,相较于排放因子法准确性更高,但飞灰和炉渣的产生量以及含碳量较难测准,数据准确性也一般。软测量法通过锅炉运行实时数据对飞灰和炉渣含碳量进行估计,飞灰和炉渣含碳量的平均相对误差可达到 1%。

卫星监测法通过“自上而下”的方式,误差主要来源于卫星观测数据和风速影响。卫星监测法应在天气较好的情况下进行应用,测量误差在 5%~15%。

综上所述,5 种发电企业 CO₂ 排放监测技术的准确性排序为:在线监测法>软测量法>碳平衡法>卫星监测法~排放因子法。

3.2 时效性

排放因子法的燃料消耗量可以实现实时或每日计量,燃料的收到基低位发热量、单位热值含碳

量通常情况下为每日或每月检测,火电厂可以自行检测,但燃料的元素碳含量要求通过 CMA 认定或 CNAS 认可的检测机构/实验室出具检测报告,一般为每月检测。因此,根据检测方案的不同,排放因子法可以核算火电厂每日或每月的 CO₂ 排放量。

在线监测法通过烟气流量计和烟气分析仪能够实时测量烟气流量、CO₂ 浓度、温度、压力、湿度等数据,通过计算实现烟气中 CO₂ 排放量的实时计量。

碳平衡法的飞灰和炉渣产生量按月记录实际测量值或估计值,飞灰和炉渣含碳量要求每月至少检测 1 次并计算月平均值,因此,碳平衡法可以测算火电厂每月的 CO₂ 排放量。软测量法在碳平衡法的基础上,飞灰和炉渣产生量可以实现实时估算,并利用软测量模型实现飞灰和炉渣含碳量的实时监测。

卫星监测法能够通过卫星遥感数据反演 CO₂ 柱浓度,通过高斯羽流模型计算火电厂每日的 CO₂ 排放量。但受限于目前大部分火电厂仅有月排放数据,以及天气、风速等因素影响,构建火电厂日排放模型的误差相对较大,目前仅能监测火电厂每月的 CO₂ 排放量。随着技术的不断进步,卫星监测法也能够对火电厂每日的 CO₂ 排放量进行监测。

综上所述,5 种发电企业 CO₂ 排放监测技术的时效性排序为:在线监测法~软测量法>排放因子法~卫星监测法>碳平衡法。

3.3 可靠性

排放因子法通常需要碳排放管理专职人员进行取样、检测、核算、记录、上报等步骤,既存在弄虚作假的风险,又容易出现错报漏报的失误^[58]。近 2 年,国家生态环境部频频通报电厂和核查机构的碳排放数据问题。相比于自动化方法,人为参与主导碳排放核算导致数据可靠性较低。

在线监测法属于自动化方法,大大减少了人为因素的影响,数据可靠性主要受限于设备可靠性。烟气流量计在烟道内高温、高湿环境较为恶劣,设备容易发生堵塞、磨损、腐蚀,设备和数据可靠性较低,需要定期进行检维修。CO₂ 浓度分析仪存在零点漂移、量程漂移的问题,需要定期通入零点气体和量程校准气体,才能保证较高的数据可靠性。根据 DL/T 2376—2021,在线监测设备需要每 7 天至少校准 1 次仪器零点和量程,每 3 个月至少进行 1 次全系统的校准和校验。

碳平衡法与排放因子法相同,都需要专职人员高度参与,数据可靠性较低。软测量通过模型实时估计飞灰和炉渣含碳量,相比于传统碳平衡法自动化程度更高,数据可靠性相对较好。

卫星监测法完全通过卫星数据和火电厂数据进行反演计算,不需要人员参与,且由于碳监测卫星的设备可靠性较高,可以根据实际情况不断进行模型更新修正。相较于其他“自下而上”的监测方法,卫星监测法能够保证较高的数据可靠性。

综上所述,5种发电企业CO₂排放监测技术的可靠性排序为:卫星监测法>在线监测法>软测量法>碳平衡法~排放因子法。

3.4 监测成本

排放因子法可在火电厂现有的监测设备基础上进行计算,其监测成本主要包括人工成本和检测成本。人工成本是指火电厂通常需要安排碳排放专职人员进行相关工作,并且由于大部分火电厂没有CMA或CNAS认证的检测资质,每月需要将燃料样品进行第三方送检进而产生检测成本,单个电厂的检测成本每月需要千元左右。

在线监测法的监测成本主要来源于设备成本和施工安装成本。监测设备主要有烟气流量计和CO₂浓度分析仪,还包括烟气温度、压力、湿度、大气压力等监测单元。相较于其他方法,当前在线监测法的监测成本较高,单台机组的设备成本大致在几十万元。

碳平衡法与排放因子法相同,主要包括人工成本和检测成本,飞灰和炉渣含碳量通常可以在火电厂内部进行检测。软测量法能够利用模型进行实时估计,相比于碳平衡法的监测成本更低。

卫星监测法的监测成本包括碳监测卫星的数据使用成本,相较于碳平衡和排放因子法的人工成本和检测成本,数据使用成本较低。卫星监测法与软测量法都属于数据建模方法,但由于卫星监测法需要额外的碳监测卫星数据,因此综合成本略高于软测量法。

综上所述,5种发电企业CO₂排放监测技术的监测成本排序为:软测量法<卫星监测法<碳平衡法~排放因子法<在线监测法。

4 总结与展望

在“双碳”目标下,发电企业的CO₂排放监测已成为国家和电力行业面临的主要问题之一。本文

通过研究和分析国内外碳排放核算的相关政策要求,结合近十几年的文献研究,总结并分析了当前发电企业的CO₂排放监测技术,系统性地介绍了排放因子法、在线监测法、碳平衡法、软测量法、卫星监测法5种碳排放监测方法,并从准确性、时效性、可靠性和监测成本的角度对其进行了详细对比。

目前我国仍然以排放因子法为主,在线监测法将成为未来几年的主要发展趋势^[59]。根据生态环境部的《“十四五”生态环境监测规划》,要形成“核算为主、监测为辅、国际等效、适度超前”的碳监测数据支撑体系。因此,当前阶段火电厂应以排放因子法和在线监测法为主要手段,结合数字化、自动化、智能化方式提升碳管理水平。在此基础上,结合碳平衡法、软测量法等其他手段对碳监测进行数据辅助核算,判断数据的有效性。同时,从国家乃至世界的角度,利用卫星监测法可对火电厂的监测数据进行评估分析。未来的发电行业将形成燃料端和排放端、机理模型和数据驱动、“自下而上”和“自上而下”相结合的多源碳排放监测体系,克服单一监测方法的局限性。

在今后的研究工作中,除了不断深入研究现有的CO₂监测方法,还应进一步研究多源碳排放监测方法的对比分析和数据校正方法,提高数据的准确性、时效性、可靠性,并逐步降低监测成本,才能更好地在发电行业进行推广应用。最后,在获取到高质量碳排放监测数据的基础上,发电行业应进一步研究如何利用碳排放监测数据进行火电厂的节能降碳,将碳排放监测技术与“三改联动”相结合实现碳排放与能耗协同管控,才能真正将碳监测数据用于减少CO₂排放。这对于实现碳排放“双控”具有重要意义,为我国达到“双碳”目标和解决全球气候变化问题提供切实有效的途径。

[参考文献]

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2021: the physical science basis[R/OL]. (2021-08-09)[2023-06-30]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [2] 毛俊杰, 郜小芳. 电力行业对“双碳”目标的贡献、问题及对策探讨[J]. 电力勘测设计, 2022(5): 60-66. MAO Junjie, GAO Xiaofang. Discussion on the potential contribution, problems and countermeasures of the power industry to the “dual carbon” goal[J]. Electric Power Survey & Design, 2022(5): 60-66.
- [3] 刘学之, 孙鑫, 朱乾坤, 等. 中国二氧化碳排放量相关计量方法研究综述[J]. 生态经济, 2017, 33(11): 21-27. LIU Xuezhi, SUN Xin, ZHU Qiankun, et al. Review on the measurement methods of carbon dioxide emissions in

- China[J]. *Ecological Economy*, 2017, 33(11): 21-27.
- [4] LIU R, ZHAI X B, CHUA V. Carbon emission calculation of thermal power plant-an overview[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 962-965: 1368-1372.
- [5] U.S. Environment Protection Agency. Mandatory reporting of greenhouse gases[R/OL]. (2009-10-03)[2023-06-30]. <https://www.epa.gov/ghgreporting/ghg-reporters>.
- [6] 董文福, 刘泓汐, 王秀琴, 等. 美国温室气体强制报告制度综述[J]. *中国环境监测*, 2011, 27(2): 18-22. DONG Wenfu, LIU Hongxi, WANG Xiuqin, et al. Review of mandatory reporting of greenhouse gases in America[J]. *Environment Monitoring in China*, 2011, 27(2): 18-22.
- [7] 欧盟委员会. 温室气体排放核算与报告指南[R/OL]. (2004-01-29)[2023-06-30]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32004D0156>. European Commission. Monitoring and reporting guidelines[R/OL]. (2004-02-26)[2023-06-30]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32004D0156>.
- [8] 欧盟委员会. 温室气体排放核算与报告指南[R/OL]. (2007-08-31)[2023-06-30]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32007D0589>. European Commission. Monitoring and reporting guidelines[R/OL]. (2007-08-31)[2023-06-30]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32007D0589>.
- [9] 欧盟委员会. 监测及报告条例[R/OL]. (2012-07-18)[2023-06-30]. <https://emissions-euets.com/monitoring-and-reporting-regulation>. European Commission. Monitoring and reporting regulation[R/OL]. (2012-07-18)[2023-06-30]. <https://emissions-euets.com/monitoring-and-reporting-regulation>.
- [10] 欧盟委员会. 认证及审核条例[R/OL]. (2012-07-18)[2023-06-30]. <https://emissions-euets.com/verification-and-accreditation-regulation>. European Commission. Accreditation and verification regulation[R/OL]. (2012-07-18)[2023-06-30]. <https://emissions-euets.com/verification-and-accreditation-regulation>.
- [11] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)[R/OL]. (2013-10-15)[2023-06-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960.html. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Guidelines for accounting methods and reporting greenhouse gas emissions of power generation enterprises in China (trial)[R/OL]. (2013-10-15)[2023-06-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960.html.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施[R/OL]. (2022-12-21)[2023-06-30]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202212/t20221221_1008430.html. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Guidelines for accounting and reporting greenhouse gas emissions for enterprises power generation facilities[R/OL]. (2022-12-21)[2023-06-30]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202212/t20221221_1008430.html.
- [13] 火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范: DL/T 2376—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021: 1. Specification for continuous emissions monitoring of CO₂ in flue gas emitted from thermal power plants: DL/T 2376—2021[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2021: 1.
- [14] 高建强, 宋铜铜, 杨东江. 燃煤发电机组碳排放折算方法研究与应用[J]. *热力发电*, 2020, 49(2): 88-92. GAO Jianqiang, SONG Tongtong, YANG Dongjiang. Research and application of carbon emission conversion method for coal-fired generating units[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(2): 88-92.
- [15] GAI Z J, ZHAO J G, ZHANG G. Typical calculation and analysis of carbon emissions in thermal power plants[J]. *3rd International Conference on Energy Equipment Science and Engineering*, 2018, 128: 012176.
- [16] 刘高军. 碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放分析与建议[J/OL]. *洁净煤技术*: 1-8[2023-06-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20211209.0713.012.html>. LIU Gaojun. Analysis and suggestion of carbon emission in thermal power plants under the background of carbon peak and carbon neutrality[J/OL]. *Clean Coal Technology*: 1-8[2023-06-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20211209.0713.012.html>.
- [17] 龚颖, 王洪涛. 发电企业温室气体核算方法与报告指南对比研究[J]. *化学工程与装备*, 2015(3): 234-236. GONG Ying, WANG Hongtao. A comparative study of greenhouse gas accounting methods and reporting guidelines for power generation enterprises[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2015(3): 234-236.
- [18] 周盟, 熊扬恒, 周建龙. 火电厂碳排放测试平台设计研究[J]. *计算机仿真*, 2018, 35(3): 71-75. ZHOU Meng, XIONG Yangheng, ZHOU Jianlong. Design of carbon emission test platform for thermal power plant[J]. *Computer Simulation*, 2018, 35(3): 71-75.
- [19] 王小龙, 王强, 王小峰, 等. 燃煤电厂关键排放因子对碳排放量影响研究[J]. *山东化工*, 2019, 48(23): 239-243. WANG Xiaolong, WANG Qiang, WANG Xiaofeng, et al. A study on the influence of key emission factors of coal-fired power plant on carbon emission[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2019, 48(23): 239-243.
- [20] LEE S, CHOI Y, WOO J, et al. Estimating and comparing greenhouse gas 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.
- [21] QUICK J C. Carbon dioxide emission tallies for 210 US coal-fired power plants: a comparison of two accounting methods[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2014, 64(1): 73-79.
- [22] 李峥辉, 卢伟业, 庞晓坤, 等. 火电企业 CO₂ 排放在线监测系统的研发应用[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(4): 182-189. LI Zhenghui, LU Weiye, PANG Xiaokun, et al. Research and application of on-line monitoring system for CO₂ emissions from thermal power enterprises[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(4): 182-189.
- [23] 张钦, 张达, 张希良. 在线监测应用于中国碳排放监测的相关问题和制度建议[J]. *环境经济研究*, 2021, 6(3): 136-146. ZHANG Qin, ZHANG Da, ZHANG Xiliang. Application of online monitoring to China's carbon emission trading system: key issues and policy recommendations[J]. *Journal of Environmental Economics*, 2021, 6(3): 136-146.
- [24] 刘科, 杨兴森, 王太, 等. 基于实时监测的燃煤机组碳排放特性研究[J]. *热力发电*, 2022, 51(10): 47-53. LIU Ke, YANG Xingsen, WANG Tai, et al. Research on

- carbon emission characteristics of coal-fired units based on real-time monitoring[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10):47-53.
- [25] 罗培军. 电站锅炉烟气流量测量常用流量计的选择[J]. 电工文摘, 2013(2): 34-35.
LUO Peijun. Selection of flowmeter for flue gas flow measurement of power plant boiler[J]. Electrical Equipment and Economy, 2013(2): 34-35.
- [26] 谭超. 燃煤电厂碳排放监测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 1.
TAN Cao. Study on monitoring methods of carbon emission in coal fired power plants[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 1.
- [27] 涂华, 刘翠杰. 标准煤二氧化碳排放的计算[J]. 煤质技术, 2014(2): 57-60.
TU Hua, LIU Cuijie. Calculation of CO₂ emission of standard coal[J]. Coal Quality Technology, 2014(2): 57-60.
- [28] 武世福, 苏铁熊, 张培华, 等. 我国火电行业燃用不同煤质时 CO₂ 排放量计算[J]. 中国煤炭, 2014, 40(12): 120-123.
WU Shifu, SU Tiexiong, ZHANG Peihua, et al. The calculation of carbon dioxide emissions from different kinds of coal in thermal power industry of China[J]. China Coal, 2014, 40(12): 120-123.
- [29] 李进, 于海琴, 陈蕊. 燃煤发电厂 CO₂ 排放强度计算方法解析与应用[J]. 环境工程学报, 2015, 9(7): 3419-3425.
LI Jin, YU Haiqin, CHEN Rui. Analysis and application of calculating method for CO₂ emission intensity per unit of electricity generation in coal-fired power plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(7): 3419-3425.
- [30] 蔡宇, 李保卫, 胡泽春, 等. 燃煤机组碳排放指标计算及影响因素分析[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1185-1189.
CAI Yu, LI Baowei, HU Zechun, et al. Calculation of carbon emission index of coal-fired generating unit and analysis on influencing factors[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1185-1189.
- [31] 刘长良, 孙晓娇, 刘站营. 支持向量机在锅炉飞灰含碳量软测量中的应用[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(1): 39-43.
LIU Changliang, SUN Xiaojiao, LIU Zhanying. Soft-sensing modeling of unburned carbon in fly ash based on SVM for power plant[J]. Electric Power Science and Engineering, 2010, 26(1): 39-43.
- [32] 王春林, 周昊, 周樟华, 等. 基于支持向量机的大型电厂锅炉飞灰含碳量建模[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 72-76.
WANG Chunlin, ZHOU Hao, ZHOU Zhanghua, et al. Support vector machine modeling on the unburned carbon in fly ash[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 72-76.
- [33] BIAN H Y, LI Z Q, FANG Y J. Study on soft-sensing model of carbon content in fly ash based on support vector regression[J]. Information Technology Journal, 2014, 12(15): 3122-3128.
- [34] 乔弘, 李瀚, 王天堃. 火电厂飞灰含碳量多模型融合软测量方法[J]. 南方能源建设, 2015, 2(增刊 1): 10-14.
QIAO Hong, LI Han, WANG Tiankun. Multi-model fusion soft sensor method for thermal power plant carbon content of fly ash[J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(Suppl.1): 10-14.
- [35] 金秀章, 张杨. 基于 KPCA 和 LSSVM 的锅炉飞灰含碳量软测量[J]. 仪器仪表用户, 2018, 25(7): 73-76.
JIN Xiuzhang, ZHANG Yang. Soft-sensing of boiler fly ash carbon content based on KPCA and LSSVM[J]. Instrumentation, 2018, 25(7): 73-76.
- [36] 张杨. 锅炉飞灰含碳量软测量[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 1.
ZHANG Yang. Soft measurement of carbon content in fly ash[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 1.
- [37] 张大海, 楼锐, 刘宇穗, 等. 基于 LS-SVM 稀疏化算法的飞灰含碳量软测量方法[J]. 南方能源建设, 2019, 6(4): 69-74.
ZHANG Dahai, LOU Rui, LIU Yusui, et al. A soft measurement method for carbon content of fly ash based on sparseness approach for LS-SVM[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(4): 69-74.
- [38] WANG S, JU Y F, WANG W B. Study on soft-sensing model of the carbon content in coal ash[C]. International conference on instrumentation, measurement, circuits and systems (ICIMCS), 2011(1): 419-422.
- [39] 乔源, 王建峰, 杨永存, 等. 基于神经网络的飞灰含碳量软测量模型及实现[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(11): 55-61.
QIAO Yuan, WANG Jianfeng, YANG Yongcun, et al. Soft measurement model and implementation of fly ash carbon content based on neural network[J]. Electric Power Science and Engineering, 2019, 35(11): 55-61.
- [40] 徐赛坤, 花义锋, 汪思源, 等. 基于 SLR-ANFIS 的灰渣含碳量软测量建模研究[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(12): 43-45.
XU Saikun, HUA Yifeng, WANG Siyuan, et al. Soft sensing modeling of carbon content in ash residue based on SLR-ANFIS[J]. Industrial Control Computer, 2017, 30(12): 43-45.
- [41] 陈斌, 王树宇, 刘林涛, 等. 基于神经网络的 CFB 锅炉灰渣含碳量预测[J]. 浙江电力, 2022, 41(3): 93-99.
CHEN Bin, WANG Shuyu, LIU Lintao, et al. Prediction of carbon content in CFB ash based on neural networks[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(3): 93-99.
- [42] 张磊, 韦红旗. 基于神经遗传的电站锅炉炉渣含碳量软测量技术[J]. 能源研究与利用, 2006(4): 25-27.
ZHANG Lei, WEI Hongqi. The soft sensor technology of carbon content in power station boiler slag based on genetic-neural network[J]. Energy Research & Utilization, 2006(4): 25-27.
- [43] 卫冬丽. 中国燃煤电厂二氧化碳排放量计算方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014: 1.
WEI Dongli. Calculation methods on carbon dioxide emission of Chinese coal-fired power plants[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014: 1.
- [44] 龙芸. 燃煤电厂 CO₂ 排放计算模型与方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 1.
LONG Yun. Study on calculation model and method of carbon dioxide emissions for coal-fired power plant[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 1.
- [45] 孟欣欣. 燃煤电厂二氧化碳配额核算方法分析及其排放量预测模型[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 1.
MENG Xinxin. Analysis of carbon quota calculation method and predictive model of carbon dioxide emissions from coal-fired power plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 1.
- [46] ZHU C, SHI P, LI Z, et al. Carbon emission on prediction of thermal power plants based on machine learning techniques[C]. 5th International Conference on Energy,

- Electrical and Power Engineering, 2022: 1142-1146.
- [47] 刘良云, 陈良富, 刘毅, 等. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战[J]. 遥感学报, 2022, 26(2): 243-267. LIU Liangyun, CHEN Liangfu, LIU Yi, et al. Satellite remote sensing for global stocktaking: methods, progress and perspectives[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(2): 243-267.
- [48] 刘毅, 姚璐, 王靖, 等. 中国碳卫星数据的应用现状[J]. 卫星应用, 2022(2): 46-50. LIU Yi, YAO Lu, WANG Jing, et al. Application status of carbon satellite data in China[J]. Satellite Application, 2022(2): 46-50.
- [49] 周敏强, 张兴赢, 王普才, 等. 二氧化碳柱浓度的卫星反演试验及地基验证[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(6): 856-863. ZHOU Minqiang, ZHANG Xingying, WANG Pucai, et al. XCO₂ satellite retrieval experiments in short-wave infrared spectrum and ground-based validation[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2015, 45(6): 856-863.
- [50] BOVESMANN H, BUCHWITZ M, BURROWS J P, et al. A remote sensing technique for global monitoring of power plant CO₂ emissions from space and related applications[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2010, 3: 781-811.
- [51] VELAZCO V A, BUCHWITZ M, BOVESMANN H, et al. Towards space based verification of CO₂ emissions from strong localized sources: fossil fuel power plant emissions as seen by a CarbonSat constellation[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2011, 4: 2809-2822.
- [52] NASSAR R, HILL T G, MCLINDEN C A, et al. Quantifying CO₂ emissions from individual power plants from space[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(19): 10045-10053.
- [53] HILL T, NASSAR R. Pixel size and revisit rate requirements for monitoring power plant CO₂ emissions from space[J]. Remote Sensing, 2019, 11: 1608.
- [54] LIU F, DUNCAN B N, KROTKOV N A, et al. A methodology to constrain carbon dioxide emissions from coal-fired power plants using satellite observations of co-emitted nitrogen dioxide[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20: 99-116.
- [55] HU Y Q, SHI Y S. Estimating CO₂ emissions from large scale coal-fired power plants using OCO-2 observations and emission inventories[J]. Atmosphere, 2021, 12: 811.
- [56] NASSAR R, MASTROGIACOMO J, BATEMAN-HEMPHILL W, et al. Advances in quantifying power plant CO₂ emissions with OCO-2[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 264: 112579.
- [57] 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: 1. WANG Muhan. Research on carbon emission monitoring system and accounting method of thermal power plant[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020: 1.
- [58] 陈公达, 邹祥波, 卢锐, 等. 中外火电企业排放统计方法与质量控制现状分析[J]. 热力发电, 2022, 55(10): 54-60. CHEN Gongda, ZOU Xiangbo, LU Rui, et al. Domestic and international statistical methods and quality control for carbon emission from fossil-fired power plant[J]. Thermal Power Generation, 2022, 55(10): 54-60.
- [59] SUN S Z, ZHOU C L, WANG M, et al. The extension of continuous carbon emission monitoring system in China's thermal power plants under the carbon market[C]. 4th International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection, 2020, 467: 012165.

(责任编辑 刘永强)