

# 适用于生物质直接耦合煤发电过程的温室气体核算方法优化

赵悦, 李小姗, 张立麒, 赵永椿

(华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 生物质与煤直接耦合燃烧发电作为降低火电行业碳排放的关键技术选择得到广泛关注, 在双碳目标的推动下, 准确量化生物质掺烧电力生产过程温室气体排放能有效提升发电行业碳排放数据的准确性与一致性, 确保国内碳排放交易市场向更公平稳定的方向发展。介绍了国内外生物质耦合煤发电机组碳核算方法, 提出生物质直接耦合发电机组温室气体核算边界、计算方法和核算参数的选取原则。结果表明: 与现行核算法相比, 基于生物质直接耦合煤发电的温室气体核算方法在核算边界、核算范围和计算方法上均有一定差异。对于核算边界, 有必要新增燃料燃烧过程  $N_2O$  排放、新增设备资源带来的间接碳排放; 针对常见生物质是否可视为零碳燃料进行评估, 发现在各省份生物质的最佳经济运输半径内秸秆、城市垃圾、林类剩余物等常见生物质均达到温室气体减排要求, 且合理运输范围 (48 km) 内均可视为零排放; 在计算方法上, 燃料消耗量建议根据碳排放量分层级选取测定方法, 小比例掺烧时碳氧化率可直接选取缺省值 99%, 并且建议核算脱硫环节带来的碳排放, 对循环流化床燃烧温度在 1 123 K 以下的工况需要进行  $N_2O$  核算。

**关键词:** 生物质; 直接耦合; 火电行业; 核算法; 温室气体; 碳排放

中图分类号: X51 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2024)08-0058-08

## Optimization of greenhouse gas accounting methods applicable to biomass direct-coupled coal power generation processes

ZHAO Yue, LI Xiaoshan, ZHANG Liqi, ZHAO Yongchun

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Direct coupled combustion of biomass and coal for power generation has gained widespread attention as a key technology option for reducing carbon emissions in the coal power sector. Driven by Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals, the accurate quantification of greenhouse gas (GHG) emissions from biomass-coupled power production processes can effectively improve the accuracy and consistency of carbon emission data in the power generation industry and ensure the development of the domestic carbon trading market in a more fair and stable direction. Carbon accounting methods for biomass-coupled coal generating units at home and abroad were first introduced. Then the biomass direct-coupled generating unit greenhouse gas accounting boundary, calculation method and the selection principle of accounting parameters were proposed with reference to the experience of European and American countries. The results show that, compared with the current accounting method, the GHG accounting method based on biomass directly coupled with coal power generation has some differences in the accounting boundary, accounting scope and calculation method. For the accounting boundary, it is necessary to add  $N_2O$  emissions from the fuel combustion process and indirect carbon emissions from new equipment resources. The common biomass fuels were evaluated to see if zero emissions could be considered, and common biomasses was found, such as straw, municipal solid waste, and forest residues, met the GHG emission reduction requirements within the optimal economic transportation radius of the biomass in each province, and zero emissions within the reasonable transportation range (48 km) could be considered. In the calculation method,

收稿日期: 2024-01-29; 责任编辑: 常明然 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.LC24012903

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFF0601003)

作者简介: 赵悦 (2000—), 女, 四川达州人, 硕士研究生。E-mail: bestzhaoyue@163.com

通讯作者: 李小姗 (1990—), 女, 江西萍乡人, 副教授, 博士。E-mail: lxs0721@hust.edu.cn

引用格式: 赵悦, 李小姗, 张立麒, 等. 适用于生物质直接耦合煤发电过程的温室气体核算方法优化 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30 (8): 58-65.

ZHAO Yue, LI Xiaoshan, ZHANG Liqi, et al. Optimization of greenhouse gas accounting methods applicable to biomass direct-coupled coal power generation processes [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30 (8): 58-65.



移动阅读

fuel consumption was recommended to select the measurement method according to the carbon emission stratification, the carbon oxidation rate could be directly selected as the default value of 99% in the case of small-ratio blending, carbon emission brought by the desulfurization link calculation is recommended, and the  $N_2O$  accounting was needed for the circulating fluidized bed combustion temperature under the working condition of 1 123 K.

**Key words:** biomass; direct coupling; thermal power industry; accounting method; GHG; carbon emission

## 0 引言

工业革命以来,以  $CO_2$  为主的温室气体所引起的温室效应对人类生存造成极大威胁。我国火电生产过程中的碳排放量占比巨大,据统计 2021 年我国火电行业  $CO_2$  排放量约为 46.9 亿 t, 占全国总排放的 40% 左右<sup>[1]</sup>, 位于碳排放之首。我国各地燃煤电厂都在积极探索有效的碳减排策略, 生物质作为一种碳中和燃料, 在碳减排方面有巨大潜力。我国燃煤电厂与生物质资源的空间匹配度极高<sup>[2]</sup>, 且大型燃煤机组混烧生物质发电可以实现高效率低排放<sup>[3]</sup>, 相比于不可控的风力发电和太阳能发电, 掺烧生物质的灵活性更高。生物质与煤掺烧技术可分为直接耦合和间接耦合两种方式, 直接耦合作为最易实施、效率最高的方式<sup>[4]</sup>, 可大幅降低  $CO_2$  排放且不增加过多投资成本<sup>[5-6]</sup>, 因此生物质与煤直接耦合燃烧发电将成为降低煤电行业碳排放的关键技术选择。为保证火电企业在参与碳交易时能提供准确有效的排放数据, 准确量化生物质直接耦合煤发电技术下温室气体排放非常有必要。

我国碳计量体系正处于不断细化与完善阶段, 生物质耦合发电碳计量技术还存在一些不足。燃料消耗量作为衔接能源计量和碳计量体系的关键参数, 也是碳核算法的重要误差来源, 现有电厂能源计量方法难以支撑碳核算实现精准计量<sup>[7]</sup>。 $^{14}C$  法能够准确鉴别生物源和化石源燃料<sup>[8]</sup>, 但由于操作繁琐、所需设备昂贵, 更多考虑应用在大型燃煤电厂。从我国火电企业碳核算指南和相关报告来看, 温室气体核算范围不够全面, 据世界气象组织 2022 年度《温室气体公报》提供的数据显示, 电站循环流化床中  $N_2O$  排放体积分数在  $(50 \sim 500) \times 10^{-6}$ 。调研发现, 当燃烧温度低于 1 123 K 时,  $N_2O$  带来的温室效应能力至少为  $CO_2$  排放的 6% 以上<sup>[9-11]</sup>, 因此这一部分温室气体造成的环境影响不容忽视。我国大部分研究认为生物质的利用过程均可视为零排放, 但并非所有生物质作为燃料燃烧时均可视为零排放<sup>[12]</sup>。

本次研究侧重在电厂碳核算法上进行优化, 通过研究欧美等国家的温室气体管理机制对我国电力行业碳排放统计核算提供思路, 制定适用于生物质

直接耦合发电机组温室气体核算的技术路线。基于我国生物质耦合燃煤机组温室气体核算存在的问题, 研究了适用于不同排放源的核算方法, 评估了利用不同生物质过程中的碳排放, 为生物质能否视为零排放燃料提供了理论依据, 并对温室气体核算范围进行扩充, 为生物质掺烧技术下的燃煤电厂碳核算方法提供了建议。

## 1 生物质耦合发电碳核算体系梳理

### 1.1 欧盟生物质耦合发电碳核算体系

虽然生物质燃烧排放的  $CO_2$  量与其生长过程吸收的  $CO_2$  几乎相同, 但在栽培、收集、加工、运输生物质过程中也会产生碳排放。欧盟 MRR 规定生物质燃料必须达到可持续性和温室气体减排标准的相关规定才能作为零排放因子生物质燃料, 若不符合标准则需确定温室气体减排量, 当温室气体减排量达到规定阈值仍可视为零碳燃料, 否则应将生物质视为化石燃料<sup>[13]</sup> (以下论述中“生物质燃料”即为零排放)。透明起见, 在涉及掺烧生物质燃料的情况, 欧盟规定需根据初步排放因子和燃料的生物质部分确定排放因子:

$$F = F_{pre} (1 - B_F), \quad (1)$$

式中,  $F$  为排放因子;  $F_{pre}$  为初步排放因子, 是基于混合燃料生物质部分及其化石部分的碳含量的假定总排放系数;  $B_F$  为生物质分数。

### 1.2 美国生物质耦合发电碳核算体系

对于共烧生物质燃料和化石燃料的机组, 美国规定温室气体排放必须报告化石燃料部分  $CO_2$  排放量和  $N_2O$  排放量, 生物质部分的碳排放量会作为信息项进行记录。美国联邦法规第 40 卷第 98 章节提出了两种核算混合燃料中生物质碳排放量的方法, 两种方法的原理均是利用生物质掺烧比与年度  $CO_2$  总质量排放量的乘积得到生物质  $CO_2$  排放量。生物质掺烧比例的计算方法如下:

方法 1: 基于 CEMS 系统得到烟气中全年  $CO_2$  总体积, 采用排放因子法得到化石燃料产生的年  $CO_2$  体积, 从而得到生物质部分排放的年  $CO_2$  体积, 由生物质部分排放的年  $CO_2$  体积与全年  $CO_2$  总体积的比值计算生物质占比。

方法2:每季度至少收集1次固定排放源排放的生物质和化石来源的CO<sub>2</sub>集成样品,对气体样品进行放射性碳分析,得到年度内所有样本的生物质平均百分比。

### 1.3 中国生物质耦合发电碳核算体系

目前我国碳计量体系建设正处于起步阶段,燃煤电厂传统碳计量体系还未囊括燃煤/生物质发电机组的碳核算问题,对于生物质混合燃煤燃烧发电的CO<sub>2</sub>排放,相关标准<sup>[14]</sup>中粗略提出仅统计混合燃料中化石燃料的CO<sub>2</sub>排放:在采用计算法核算碳排放量时,仅统计燃煤消耗量,其他参数未做规定;若直接监测掺烧生物质机组的碳排放量,须根据基于核算的方法或连续监测烟气中放射性碳(<sup>14</sup>C)的方

法确定生物质燃烧导致的排放量并将其扣除。

## 2 生物质直接耦合发电温室气体核算方法优化

为完善火电企业碳计量体系,针对燃煤/生物质电厂开展温室气体排放核算工作。鉴于燃煤/生物质电厂对各温室气体排放源的控制能力及排放数量,温室气体核算范围包括(图1):燃煤产生的CO<sub>2</sub>排放、脱硫过程的CO<sub>2</sub>排放、燃煤/生物质燃烧产生的N<sub>2</sub>O排放以及间接碳排放。生物质燃料燃烧产生的CO<sub>2</sub>排放仅作为交叉检查目的和避免重复计算的信息项目,不纳入电厂总温室气体排放量中,数据监测和获取参考第1.2节。

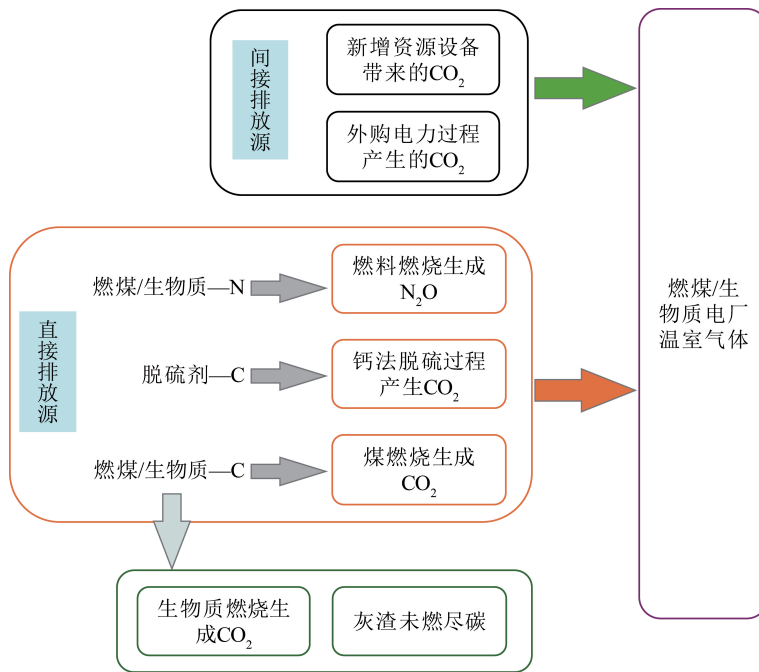


图1 生物质直接耦合发电温室气体排放源

Fig.1 Biomass direct coupled generation GHG emission sources

燃煤/生物质电厂温室气体排放量等于不同种类温室气体排放折算成CO<sub>2</sub>当量后的和:

$$E_{\text{GHG}} = E_{\text{ff}} + E_{\text{s}} + E_{\text{in}} + E(\text{N}_2\text{O})G(\text{N}_2\text{O}) \quad (2)$$

其中, $E_{\text{GHG}}$ 为温室气体排放量(以CO<sub>2</sub>计),t; $E_{\text{ff}}$ 为化石燃料燃烧产生的CO<sub>2</sub>排放量,t; $E_{\text{s}}$ 为脱硫过程CO<sub>2</sub>排放量,t; $E_{\text{in}}$ 为购入电力、新增设备资源等环节间接产生的CO<sub>2</sub>排放量,t; $E(\text{N}_2\text{O})$ 为燃料(包括生物质)燃烧的N<sub>2</sub>O排放量,t; $G(\text{N}_2\text{O})$ 为N<sub>2</sub>O相比CO<sub>2</sub>的全球变暖潜势值,IPCC第6次评估报告给出的 $G(\text{N}_2\text{O})$ 为273。

### 2.1 生物质零排放评估

碳核算之前,首先需判断生物质能否作为零排放燃料。参照欧盟MRR相关要求,生物质的温室

气体减排比率至少达到表1规定阈值才可视为零碳燃料,否则应视为化石燃料。

表1 不同时间节点生物质利用温室气体减排比率阈值  
Table 1 GHG reduction ratio thresholds for biomass utilization at different time points

开始运行时间节点	温室气体减排比率阈值/%
2015-10-05 前	50
2020-12-31 前	60
2021-01-01 前	65
2025-12-31 前	70
2026-01-01 前	80



温室气体减排比率计算方法如下:

$$\eta_{\text{saving}} = (F_F - F_B) / F_F, \quad (3)$$

$$F_B = E / \eta, \quad (4)$$

式中,  $\eta_{\text{saving}}$  为温室气体减排比率;  $F_F$  为所替代的化石燃料排放因子,  $\text{t/GJ}$ ;  $F_B$  为生物质利用过程全生命周期排放因子,  $\text{t/GJ}$ ;  $E$  为生物质利用的排放量,  $\text{t/GJ}$ ;  $\eta$  为发电效率。

生物质利用的排放量计算如下:

$$E = (e_{\text{ec}} + e_1 + e_p + e_{\text{id}} + e_u - e_{\text{sca}} - e_{\text{ccs}} - e_{\text{ccr}}) / V_b, \quad (5)$$

式中,  $e_{\text{ec}}$  为原料提取或栽培排放量,  $\text{t/t}$ ;  $e_1$  为土地利用变化引起的碳储量变化的排放量,  $\text{t/t}$ ;  $e_p$  为加工排放量,  $\text{t/t}$ ;  $e_{\text{id}}$  为运输排放量,  $\text{t/t}$ ;  $e_u$  为燃料燃烧排放量, 对于生物质燃烧排放的  $\text{CO}_2$  应取 0, 非  $\text{CO}_2$  温室气体 ( $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ ) 应包括在  $e_u$  因子中,  $\text{t/t}$ ;  $e_{\text{sca}}$  为通过改善农业管理从土壤碳积累中节省的排放量,  $\text{t/t}$ ;  $e_{\text{ccs}}$  为  $\text{CO}_2$  捕获和地质储存的减排量,  $\text{t/t}$ ;  $e_{\text{ccr}}$  为  $\text{CO}_2$  捕获和替换所节省的排放量,  $\text{t/t}$ ;  $V_b$  为生物质的低位发热量,  $\text{GJ/t}$ 。

针对常见生物质进行评估, 表 2~4 分别列出农作物秸秆、城市垃圾、林类剩余物利用过程中的排放因子。其中,  $e_1$  只有在农用地内部转变、农用地向非农用地转变情况下才考虑;  $e_{\text{sca}}$  只有在提供可核查证据的情况下才做考虑;  $e_{\text{ccs}}$ 、 $e_{\text{ccr}}$  只有在 CCS/CCU 应用时才相关。因此一般情况下  $e_1$ 、 $e_{\text{sca}}$ 、 $e_{\text{ccs}}$ 、 $e_{\text{ccr}}$  取 0。

表 2 农作物秸秆利用不同环节排放因子<sup>[15-16]</sup>

Table 2 Emission factors for different stages of crop residue utilization process<sup>[15-16]</sup>

项目	排放因子
加工环节 包括运输、筛分、干燥粉碎、制粒等/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	0.095 2
运输环节 水稻秸秆/ $(\text{kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1})$	0.143 5
小麦秸秆/ $(\text{kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1})$	0.127 0
玉米秸秆/ $(\text{kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1})$	0.340 3
燃烧环节( $\text{N}_2\text{O}$ )/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	35.49

表 3 城市垃圾利用不同环节排放因子<sup>[17-19]</sup>

Table 3 Emission factors for different stages of the municipal waste utilization process<sup>[17-19]</sup>

项目	排放因子
收集环节/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	10.283 3
转运环节/ $(\text{kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1})$	0.277 3
渗滤液处理环节/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	15.727 9

表 4 林类剩余物利用不同环节排放因子<sup>[20]</sup>

Table 4 Emission factors for different stages of the utilization process of forest residues<sup>[20]</sup>

项目	排放因子
收集环节/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	2.463 7
原料运输环节/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	7.200 9
加工环节/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	51.309 6
成品运输环节 电力/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	1.710 9
柴油/ $(\text{kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1})$	0.160 7
燃烧环节( $\text{N}_2\text{O}$ )/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	35.49

根据文献[21]提供的中国各省份生物质的最佳经济运输半径, 发现各省份利用生物质的减排比例均达到 70% 以上, 生物质利用过程全生命周期排放因子与温室气体减排比率呈相反趋势, 如图 2 所示。玉米秸秆的平均减排比率与稻秆、麦秆最大相差 8.6%, 原因在于运输环节的单位碳排量较高, 在发电过程中的净碳收支量较低。相比于农作物秸秆而言, 城市垃圾、林类剩余物的平均减排比率较低, 主要考虑在利用过程中由于加工处理阶段的机械化程度高, 通过消耗电力能源产生较多的碳排放, 约占总碳排放的 48.8%、50.5%。

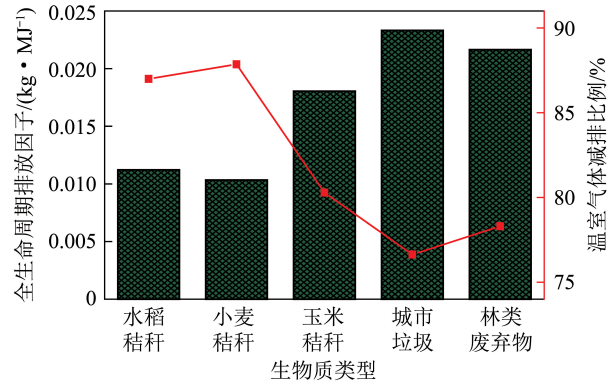


图 2 不同生物质利用过程全生命周期排放因子及温室气体减排比率

Fig.2 Life cycle emission factors and GHG emission reduction ratios of biomass utilization processes

在对生物质利用过程进行碳排放评估时, 原料运输距离是影响生物质可视为零排放燃料的重要因素。利用生物质所替代的煤种排放因子与计算得到的不同生物质全生命周期排放因子, 得到 2025 年之前可视作生物质燃料的最远运输距离, 如图 3 所示。可以看出生物质能否视为零排放燃料, 与运输距离、替代煤种、生物质类型都有一定的关系。和无烟煤、褐煤相比, 替代煤种为烟煤时, 不同类型的生物质燃料运输距离最短, 且在所有评估对象中城市垃圾的



运输距离范围最小,为48 km。对于某一特定煤种,城市垃圾、秸秆、林类废弃物的最远运输距离呈不断上升的趋势,其中城市垃圾和林类废弃物的温室气体减排比率却较为相近,但由温室气体减排比率阈值反推得到的最远运输距离却存在较大差异。相比于城市垃圾,林类生物质的发热量高、运输排放因子低,两者的相互作用将增加生物质最远运输距离。一般情况下,稻秆、麦秆、林类剩余物可直接视为零排放燃料,城市垃圾、玉米秸秆在合理范围内可视为零排放,对于生物质利用潜力较低的地区,运输半径增加,一旦超过最远运输范围,需将生物质视作化石燃料。

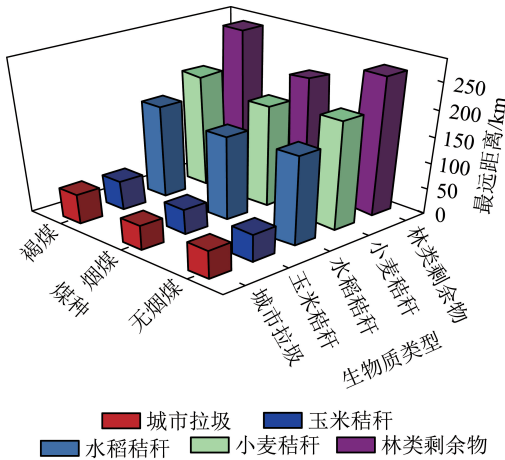


图3 生物质燃料的最远运输距离

Fig.3 Maximum transportation distance for biomass fuels

表5 燃料消耗量计量等级相关信息

Table 5 Information on fuel consumption measurement levels

	Tier1	Tier2	Tier3	Tier4
电厂种类	A1	A2	B	C
CO <sub>2</sub> 排放量/(t·a <sup>-1</sup> )	<25 000	25 000~<50 000	50 000~<500 000	≥500 000
燃料消耗量	允许的最大不确定度/%	±7.5	±5.0	±2.5
	计量方法	入炉前计量法	入炉前计量法	能量法或 <sup>14</sup> C法

从获取途径来看,碳氧化率可由式(7)计算得到,也可采用缺省值。目前无法实际测得灰渣中<sup>14</sup>C含量,从影响程度来看,掺烧20%以下生物质后大型商用锅炉燃尽性能良好,生物质几乎能完全燃尽,因此一般情况下 $C_{14c,Z}$ 、 $C_{14c,H}$ 取0即可。

从现有研究来看掺烧生物质后飞灰含碳量并无明显上升,炉渣含碳量较纯煤燃烧并未有明显变化<sup>[22-23]</sup>,造成碳氧化率波动范围在0.3%以内,建议稳定负荷下小比例掺烧时仍选用《指南》缺省值,即99%。

### 2.3 脱硫环节 CO<sub>2</sub>核算方法

常见脱硫过程 CO<sub>2</sub>核算方法共3种,包括碳酸

### 2.2 化石燃料燃烧环节 CO<sub>2</sub>核算方法

对生物质进行评估后,计算化石燃料燃烧过程 CO<sub>2</sub>排放量:

$$E_{ff} = \sum_{i=1}^n (C_i C_{ar,i} O_c \frac{44}{12}), \quad (6)$$

式中, $C_i$ 为第*i*种化石燃料消耗量,t; $C_{ar,i}$ 为第*i*种化石燃料收到基含碳量; $O_c$ 为碳氧化率。

由于掺烧生物质对化石燃料含碳量的测定没有影响,下面只论述燃料消耗量和碳氧化率两个参数。

1)燃料消耗量。为提高碳排放数据的准确度,在碳核算计划编制阶段需要明确燃料量测定的方法和原则。参考MRR对能源计量引入层级概念,根据生物质直接耦合电厂年CO<sub>2</sub>排放量将电厂分为4个层级,层级越高,要求计量方法的精度就越高,具体分级见表5。

2)碳氧化率。基于碳平衡原理,在反平衡法的基础上考虑灰渣中未燃尽<sup>14</sup>C的影响,得到如下公式:

$$O_c = 1 - \frac{G_Z(C_Z - C_{14c,Z}) + G_H \frac{C_H - C_{14c,H}}{\eta_{cc}}}{\sum_{i=1}^n C_i C_{ar,i}}, \quad (7)$$

式中, $G_Z$ 为炉渣产量,t; $C_Z$ 为炉渣总含碳量; $C_{14c,Z}$ 为炉渣平均<sup>14</sup>C含量; $G_H$ 为飞灰产量,t; $C_H$ 为飞灰总含碳量; $C_{14c,H}$ 为飞灰平均<sup>14</sup>C含量; $\eta_{cc}$ 为除尘效率,无参照时取100%。

盐法、二氧化硫法、石膏法。目前国内大部分采用碳酸盐法来计算脱硫过程排放:

$$E_s = \sum_{k=1}^m B_k I_k F_{k,t} r, \quad (8)$$

式中, $B_k$ 为第*k*种脱硫剂消耗量,t; $I_k$ 为第*k*种脱硫剂中碳酸盐含量; $F_{k,t}$ 为碳酸盐完全转化时的排放因子,t/t; $r$ 为碳酸盐转化为CO<sub>2</sub>转化率,一般取100%。

纯煤燃烧时脱硫产物中仍存在少量碳酸盐,现有《指南》直接忽略该部分碳酸盐带来的误差,而在生物质与煤耦合燃烧情景下,产物石膏中的碳酸盐含量是否能忽略不计还需进一步研究,可采用以下方法确定脱硫过程碳排放<sup>[24]</sup>:

$$E_s = \sum_{k=1}^m (B_k I_k - M_G C_G) F_{k,t}, \quad (9)$$

式中,  $M_G$  为脱硫产生的石膏产量, t;  $C_G$  为石膏中碳酸盐含量。

对于传统煤炭燃烧发电机组, 脱硫过程产生的碳排放量仅占总量的 1% 左右<sup>[7]</sup>, 《指南》删除了该过程的碳排放, 但由于掺烧生物质导致发电过程碳排放总量减少, 脱硫过程的碳排放占比可能增加, 直接忽略脱硫环节碳排放这一做法的合理性还有待验证。

## 2.4 间接碳排放核算方法

对于耦合生物质的火电企业在电力生产环节的间接碳排放源包括外购电力产生的碳排放和新增设备间接产生的碳排放, 具体计算式如下:

$$E_{in} = E(\text{CO}_2)_e + E(\text{CO}_2)_a, \quad (10)$$

$$E(\text{CO}_2)_e = D_e F_e, \quad (11)$$

式中,  $E_{in}$  为间接碳排放量, t;  $E(\text{CO}_2)_e$  为外购电力间接产生的碳排放量, tCO<sub>2</sub>;  $E(\text{CO}_2)_a$  为由于掺烧生物质电厂新增设备资源产生的碳排放量, t;  $D_e$  为企业的净购入电量, MWh;  $F_e$  为区域电网年平均供电排放因子, t/MWh。

由于电厂设备消耗的电能绝大部分来自自身发电量, 只有在机组启动等较少情况下才会消耗厂外购电, 因此一般不考虑外购电力部分的间接碳排放量。

一般来说生物质与煤燃烧特性差异较大, 生物质掺烧改造的燃煤电厂需要新增燃料储存系统、制粉系统、管道系统、辅机系统等相关设备, 同时掺烧生物质需要通过燃料预处理、更换催化剂类型、增加添加剂、使用涂层及烟气脱氯等方式确保机组运行安全、排放达标<sup>[25]</sup>。为保证火电企业碳排放数据的一致性, 新增设备产生的碳排放需要纳入核算范围内, 相关的碳排放量应按厂家提供的数据核算, 若厂家未提供时, 参考文献<sup>[26-27]</sup>推荐值。

## 2.5 燃料燃烧环节 N<sub>2</sub>O 核算方法

针对生物质直接耦合煤发电机组, 当满足床温在 1 123 K 以下时需核算燃烧过程中 N<sub>2</sub>O 排放量, 若满足以下条件之一, 可适当放宽床温限值<sup>[28-30]</sup>: ① 过量空气系数大于 1.2; ② 烟气中 CO 排放量较高, 或烟气中 O<sub>2</sub> 浓度较高; ③ 燃料中 O/N 比较高, 煤阶较高, 生物质含氮量较高。

基于 N<sub>2</sub>O 生成机理, 提出一种适用于火电机组核算 N<sub>2</sub>O 排放量的方法, 该方法既可用于传统煤炭燃烧, 又可用于耦合生物质发电机组。具体计算式如下:

$$E(\text{N}_2\text{O}) = \sum_{i=1}^j (r_{i,v} r(\text{N}_2\text{O})_v + r_{i,c} r(\text{N}_2\text{O})_c \times C_i N_{ar,i}) \times \frac{22}{7}, \quad (12)$$

式中,  $r_{i,v}$  为第  $i$  种组分的燃料 N 转化为挥发分 N 的百分比;  $r(\text{N}_2\text{O})_v$  为第  $i$  种组分的挥发分 N 转化为 N<sub>2</sub>O N 的百分比;  $r_{i,c}$  为第  $i$  种组分的燃料 N 转化为焦炭 N 的百分比;  $r(\text{N}_2\text{O})_c$  为第  $i$  种组分的焦炭 N 转化为 N<sub>2</sub>O N 的百分比;  $N_{ar,i}$  为第  $i$  种组分的燃料收到基含氮量;  $j$  为燃料组分总数。

## 3 案例分析

以某 300 MW 煤粉炉为例, 为相应国家号召, 电厂开始采用生物质掺烧发电, 在原有机组上进行改造, 考虑到经济性和场地问题, 采取现有磨煤机+生物质与煤切换系统+生物质燃烧器这一技术路线, 新增生物质仓、生物质输送管道、磨煤机冷一次风管路、煤与生物质切换系统。发电机组的负荷稳定在 250 MW, 年运行时间 5 000 h, 主要燃料为烟煤, 收到基碳含量为 57.9%, 掺烧生物质为秸秆, 质量比控制在 9.68% 左右, 平均运输距离为 20 km, 考虑秸秆为零碳燃料。本案例中, 燃料消耗量采用皮带秤测量数值即可, 碳氧化率基于灰渣含碳量实测得到, 由于煤粉炉的燃烧温度在 1 123 K 以上, 因此无需考虑 N<sub>2</sub>O 生成。

烟煤单独燃烧和秸秆+烟煤燃烧不同环节的年碳排放量对比见表 6。烟煤单独燃烧时, 发电过程的总碳排放量为 1 270 417 t, 其中脱硫环节排放量约占 0.44%, 而掺烧生物质后总排放量减少了 6.61%, 脱硫环节占比增至 0.47%, 间接碳排放的占比为 0.01%。总的来说, 生物质耦合煤发电能实现碳减排, 考虑到掺烧生物质热量占比仅为 6.54%, 因此达到的减排比率较低; 虽然脱硫环节碳排放降低, 但由于总碳排放量降幅更大, 导致脱硫环节占比上升, 建议核算脱硫环节产生的碳排放; 本案例中新增设备带来的碳排放量可忽略不计, 但考虑到不同改造方案带来的碳排放差异较大, 为帮助企业减少温室气体强度高的设备消耗, 有必要将该环节带来的碳排放纳入核算范围。

表 6 不同环节的年碳排放量

Table 6 Annual carbon emissions from different segments

项目	燃烧环节 碳排放量/t	脱硫环节 碳排放量/t	间接排 放量/t	总排放 量/t
烟煤	1 270 417	5 672	0	1 276 089
秸秆+烟煤	1 186 009	5 558	173	1 191 740

## 4 结 语

传统火电厂碳核算方法不能直接适用于生物质直接耦合发电的温室气体核算,存在能源计量体系难以支撑碳核算实现精准计量、温室气体核算范围不够全面、生物质碳核算中的零碳误判等问题。本次研究提出了生物质直接耦合发电机组温室气体核算边界、计算方法和核算参数的选取原则。对于核算边界,新增燃料燃烧过程  $N_2O$  排放、新增设备资源带来的间接碳排放两大排放源;针对常见生物质是否可视为零碳燃料进行了评估,结果表明在各省份生物质的最佳经济运输半径内秸秆、城市垃圾、林类剩余物等常见生物质均达到温室气体减排要求,且合理运输范围(48 km)内均可视为零排放;在计算方法上,燃料消耗量建议根据碳排放量分层级选取测定方法,小比例掺烧时碳氧化率建议直接选取缺省值 99%,对循环流化床燃烧温度在 1 123 K 以下的工况需进行  $N_2O$  核算;最后通过核算某 300 MW 煤粉炉发电过程各环节碳排放,论证了核算脱硫环节碳排放以及新增设备碳排放的合理性。

## 参考文献 (References):

- [1] 黄少中,袁家海. 以火电低碳转型支撑保供降碳双重目标[J]. 中国电力企业管理, 2022(34): 52-55.  
HUANG Shaozhong, YUAN Jiahai. Supporting the dual goals of supply protection and carbon reduction with low-carbon transformation of thermal power[J]. China Power Enterprise Management, 2022(34): 52-55.
- [2] 郑丁乾,田善君,马思宁,等. 基于空间分析方法的我国燃煤耦合生物质发电潜力分析[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(6): 35-43.  
ZHENG Dingqian, TIAN Shanjun, MA Sining, et al. Potential analysis of coal-biomass co-firing power generation in China based on a spatial analysis method[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(6): 35-43.
- [3] MOLCAN P, LU G, LEBRIS T, et al. Characterisation of biomass and coal co-firing on a 3 MWth combustion test facility using flame imaging and gas/ash sampling techniques [J]. Fuel, 2009, 88(12): 2328-2334.
- [4] AGBOR E, ZHANG X, KUMAR A. A review of biomass co-firing in North America [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 40: 930-943.
- [5] The Energy Technology Systems Analysis Programme. Biomass for heat and power[R]. The International Renewable Energy Agency, 2015: 1-28.
- [6] 韩伟哲. 燃煤锅炉耦合生物质(气)燃烧特性及污染物排放[D]. 保定:华北水利水电大学, 2023.
- [7] 盖志杰,王鹏辉. 燃煤电厂碳排放典型计算及分析[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 178-184.

- GAI Zhijie, WANG Penghui. A Typical calculation and analysis of carbon emissions from coal-fired power plants [J]. Electric Power, 2017, 50(5): 178-184.
- [8] MOHN J, SZIDAT S, FELLNER J, et al. Determination of biogenic and fossil  $CO_2$  emitted by waste incineration based on  $14CO_2$  and mass balances[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(14): 6471-6479.
- [9] SUN P, HUI S E, GAO Z X, et al. Experimental investigation on the combustion and heat transfer characteristics of wide size biomass co-firing in 0.2 MW circulating fluidized bed [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 52: 284-292.
- [10] LIU D C, MI T, SHEN B X, et al. Reducing  $N_2O$  emission by co-combustion of coal and biomass [J]. Energy & Fuels, 2002, 16(2): 525-526.
- [11] XIE J J, YANG X M, ZHANG L, et al. Emissions of  $SO_2$ ,  $NO$  and  $N_2O$  in a circulating fluidized bed combustor during co-firing coal and biomass [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(1): 109-116.
- [12] EUROPEAN COMMISSION. MRR Guidance document No. 3: Biomass issues in the EU ETS[EB/OL]. (2022-10-17) [2023-12-15]. [https://climate.ec.europa.eu/system/files/2022-10/gd3\\_biomass\\_issues\\_en.pdf](https://climate.ec.europa.eu/system/files/2022-10/gd3_biomass_issues_en.pdf).
- [13] EUROPEAN COMMISSION. MRR Guidance document No. 1: The Monitoring and Reporting Regulation-General guidance for installations[EB/OL]. (2023-02-20) [2023-12-15]. [https://climate.ec.europa.eu/system/files/2023-03/gd1\\_guidance\\_installations\\_en.pdf](https://climate.ec.europa.eu/system/files/2023-03/gd1_guidance_installations_en.pdf).
- [14] 中华人民共和国生态环境部.《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施(2022年修订版)》[EB/OL]. (2022-03-15) [2023-12-15]. <http://www.szguanxia.cn/article/2755>.
- [15] 李佳仑,苑翔. 北方地区生物质颗粒燃料全生命周期碳排放评价[J]. 山西建筑, 2023, 49(15): 22-24, 38.  
LI Jialun, YUAN Xiang. Assessment of carbon emissions from biomass particulate fuel throughout its lifecycle in the northern region [J]. Shanxi Architecture, 2023, 49(15): 22-24, 38.
- [16] 何珍,吴创之,阴秀丽. 秸秆生物质发电系统的碳循环分析[J]. 太阳能学报, 2008(6): 705-710.  
HE Zhen, WU Chuangzhi, YIN Xiuli. Carbon cycle analysis of straw biomass power generation system [J]. Acta Energetica Sinica, 2008(6): 705-710.
- [17] 边潇,宫徽,阎中,等. 餐厨垃圾不同“收集-处理”模式的碳排放估算对比[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 449-456.  
BIAN Xiao, GONG Hui, YAN Zhong, et al. Comparison of carbon emission estimation among different "collection-disposal" modes for food waste [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(2): 449-456.
- [18] 付凤英,徐拥军,夏金雨,等. 垃圾分类下苏州市生活垃圾处理碳排放分析[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2023, 46(3): 133-140.  
FU Fengying, XU Yongjun, XIA Jinyu, et al. Carbon emissions analysis of municipal solid waste treatment in Suzhou after waste classification [J]. Journal of Nanjing Normal University



- (Natural Science Edition), 2023, 46(3): 133-140.
- [19] 张炳康, 李云玉, 张欣, 等. 垃圾焚烧发电项目碳排放核算与减排效应研究[J]. 环境保护科学, 2023, 49(1): 75-81.  
ZHANG Bingkang, LI Yuyu, ZHANG Xin, et al. Carbon emission calculation and reduction effects of municipal solid waste incineration power generation project[J]. Environmental Protection Science, 2023, 49(1): 75-81.
- [20] 周媛. 基于采伐剩余物的生物质固体燃料利用评价[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [21] 蔡青旺. 生物质利用对燃煤电厂 CO<sub>2</sub> 和大气污染物协同减排的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- [22] WANG X B, TAN H Z, NIU Y Q, et al. Experimental investigation on biomass co-firing in a 300 MW pulverized coal-fired utility furnace in China[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2725-2733.
- [23] 谭厚章, 杨富鑫, 阮仁晖, 等. 掺烧生物质对 660 MW 燃煤机组锅炉影响研究[J]. 热力发电, 2022, 51(4): 23-29.  
TAN Houzhang, YANG Fuxin, RUAN Renhui, et al. Study on influence of biomass co-firing on a 660 MW pulverized coal-fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(4): 23-29.
- [24] 龙芸. 燃煤电厂 CO<sub>2</sub> 排放计算模型与方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [25] 王一坤, 邓磊, 贾兆鹏, 等. 燃煤机组大比例直接耦合生物质发电对机组影响研究[J]. 热力发电, 2021, 50(12): 80-91.  
WANG Yikun, DENG Lei, JIA Zhaopeng, et al. Influence of large-scale direct coupled biomass power generation on coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(12): 80-91.
- [26] 张泽琳, 李鸿菲, 王蕾等. 考虑低碳的再制造工艺方案选择方法[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-16 [2024-01-23].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230801.1446.004.html>.
- [27] 温纪新. 供需多重视角下中国制造业碳排放驱动机理与减排路径研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [28] 廖子昱. 循环流化床锅炉 N<sub>2</sub>O 生成与控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [29] GLARBORG P. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2003, 29(2): 89-113.
- [30] ARMESTO L, BOERRIGTER H, BAHILLO A, et al. N<sub>2</sub>O emissions from fluidised bed combustion. The effect of fuel characteristics and operating conditions[J]. Fuel, 2003, 82(15/17): 1845-1850.