

水电工程项目碳足迹核算技术路径研究

吴兴华¹, 李哲², 唐锡良¹, 米闯¹, 陈永柏¹

1. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北武汉 430014; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714

摘要: 水电是清洁、低碳的可再生能源, 大力发展水电是应对气候变化不可或缺的重要途径。本研究从温室气体的源汇变化及生命周期的物质和能量输入输出等方面深入分析了水电工程碳足迹的科学内涵。水电工程的碳足迹包含水电站本身碳足迹与服务功能导致的其他碳足迹两大部分, 主要包括前期准备阶段、施工建设阶段、运营维护阶段及拆除恢复阶段。研究提出了基于不同方法对水电碳足迹进行核算的技术路径, 核算的技术路径通常包括碳足迹核算的准备、建立水电工程碳足迹核算的生命周期清单、碳足迹影响的分析、碳足迹核算结果的解释、碳足迹核算报告编制与评审。水电工程项目碳足迹核算将为支撑水电工程的清洁及优越属性, 探索减少水电工程生命周期碳排放的途径提供理论指导, 同时为水电行业碳排放管理提供技术支持。

关键词: 水电项目; 温室气体; 生命周期; 碳足迹; 碳管理

DOI: 10.14068/j.ceia.2023.05.011

中图分类号: X324 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-6444(2023)05-0059-05

Research on Technical Path of Carbon Footprint Accounting for Hydropower Projects

WU Xinghua¹, LI Zhe², TANG Xiliang¹, MI Chuang¹, CHEN Yongbo¹

1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, China;

2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

Abstract: Hydropower is a clean, low-carbon renewable energy source, developing hydropower is an important way of the fight against climate change. In this study, the scientific connotation of carbon footprint of hydropower projects is analysed from the change of greenhouse gas sources and sinks, and the input and output of matter and energy in the life cycle. The carbon footprint of hydropower project includes the carbon footprint of hydropower station itself and other carbon footprints caused by service functions, including the preliminary preparation stage, construction stage, operation and maintenance stage and demolition and restoration stage. Further, this study puts forward the technical path of accounting for hydro-electric carbon footprint based on different methods. The technical path of accounting usually includes the preparation of carbon footprint accounting, the establishment of the life cycle list of carbon footprint accounting for hydropower engineering, the analysis of carbon footprint impact, the interpretation of carbon footprint accounting results, the preparation and review of carbon footprint accounting report. The carbon footprint accounting of hydropower projects will provide theoretical guidance for supporting the clean and superior attributes of hydropower projects and exploring ways to reduce carbon emissions during the life cycle of hydropower projects. At the same time, it will provide technical support for carbon emission management of hydropower industry.

Keywords: hydropower project; greenhouse gas; life cycle; carbon footprint; carbon management

收稿日期: 2023-03-21

作者简介: 吴兴华(1979—), 女, 湖北宜昌人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为水环境生态, E-mail: wu_xinghua@ctg.com.cn

通讯作者: 李哲(1981—), 男, 福建漳州人, 研究员, 博士, 主要研究方向为水利工程相关生态环境问题, E-mail: lizhe@cigit.ac.cn

加快发展方式绿色低碳转型, 是党中央立足全面建成社会主义现代化强国、实现第二个百年奋斗目标, 以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴作出的重大战略部署。要坚决贯彻落实党的二十大部署和要求, 推动绿色发展, 积极稳妥推进“碳达峰、碳中和”(以下简称“双碳”),

促进人与自然和谐共生。

国际能源署(International Energy Agency, IEA)提出,到本世纪中叶,全球水电装机容量、发电量均翻倍才能满足全球“净零排放”的情景需求。为此,2021年的IEA特别报告明确建议:(1)将水电列入各国能源和气候政策议程;(2)对所有水电开发实施强有力的可持续性发展标准,并制定精简的规章制度^[1]。

水电是清洁低碳、安全高效的能源,随着我国水电建设运营能力的不断提升,水电已成为我国产业结构调整、“双碳”目标实现的中坚力量^[2]。截至2021年年底,我国水电发电量占全国发电量的17.4%;水电装机容量为3.91亿kW,占全国可再生能源装机容量的46.4%。开发水电能源是实现“双碳”目标的重要路径。水电开发形成的水库淹没土地,改变水文泥沙情势,导致温室气体源汇发生变化^[3],水电项目可能造成一定程度的温室气体的排放。科学开展水库温室气体监测评估、水电项目碳足迹核算,对正确认识水电清洁低碳属性具有重要意义,也是实现“双碳”目标亟待解决的重大问题。

1 水电工程项目碳足迹核算的重要意义

相较于煤炭、石油、天然气等一次能源消费和产能过程,以水电为代表的可再生能源在能源生产的环节并不直接产生碳排放。在当前的环境管理体系中,水电被认为是“零碳”能源,并不属于碳排放的“控排”行业。同时,水电在优化能源结构和电网运行、提供多种社会服务(防洪、灌溉、航运、旅游、供水保障)等方面具有无可比拟的优势。如何摆正在“双碳”战略中的角色、积极稳妥参与碳管理,这是水电行业面临的难题。

因我国独特的自然地理条件,当前我国大中型水电项目生命周期碳足迹的阈值大概率为13.2~24.8 gCO_{2eq}/(kW·h),这显著低于煤炭、石油、天然气等一次能源消费所产生的碳排放水平,同国际水电行业平均水平相比(国际水电项目的碳足迹阈值大概率为15.0~31.2 gCO_{2eq}/(kW·h))也具有较为突出的低碳属性,显著低于热带水电,这主要是由于我国大中型水电项目均处于亚热带,依据联合国政

府间气候变化专门委员会(IPCC)的气候分区,水库排放因子也较热带水库低(见图1)^[4-5]。2022年,国家发展改革委、统计局和能源局联合印发的《关于进一步做好新增可再生能源消费不纳入能源消费总量控制有关工作的通知》明确水电为不纳入能源消费总量的可再生能源,为“绿证”核发范围,但水电行业如何发挥作用并建立健全可再生能源电量消费核算制度,目前尚待进一步探索^[6]。

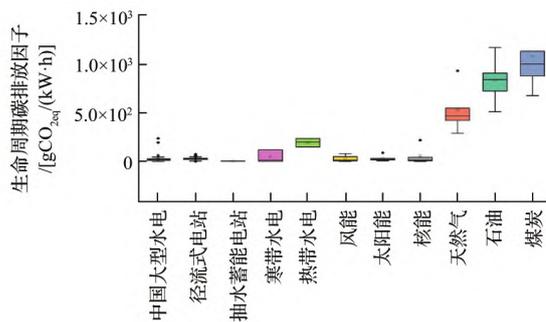


图1 我国水电项目碳足迹阈值同其他能源形式的比较

Fig. 1 Carbon footprint threshold of Chinese hydropower project with other energy types

2 水电项目碳足迹核算的科学内涵

2.1 碳足迹概念

碳足迹的概念起源于20世纪90年代初Rees提出的“生态足迹”(Ecological footprint)^[7]。2008年,Wiedmann最先定义碳足迹(Carbon footprint)是指对人类活动直接或间接引起或在产品的生命周期内累积的二氧化碳排放总量的测度^[8]。随着对碳足迹概念的深入发掘和实践,国际学界和业界逐步形成了对碳足迹认识的普遍共识。2018年,国际标准化组织(ISO)在《温室气体—产品的碳排放量—量化的要求和指南》(ISO 14067)标准中将碳足迹定义为产品生命周期内产生或去除的温室气体总和,以二氧化碳当量(CO_{2eq})表示^[9]。同时,也将产品生命周期的某一阶段产生或去除的温室气体总和定义为部分碳足迹(Partial carbon footprint of a product)。

2.2 碳足迹概念的科学内涵

(1)温室气体排放与去除:碳足迹仅关注于温室气体的源汇变化,反映了人类活动直接或间接地对全球大气辐射平衡产生的影响。对于产品或某一人类活动产生的其他生态环境影响并不考虑在内。

(2) 生命周期概念: 碳足迹强调了以产品或者任何活动的生命周期作为边界, 是以生命周期作为衡量的边界, 要求涵盖产品或某一活动前后衔接的一系列阶段, 包括从自然界或从自然资源中获取原材料, 直至最终处置、恢复自然条件等。

2.3 水电工程的碳足迹

就水电项目的本质而言, 它是一项集社会、经济、资源、环境等众多因素于一体的大型综合性服务工程, 拥有与其他产品或服务相似而又截然不同的性质。作为典型的可再生能源, 水力发电过程将天然水体势能、动能转化为电能输出, 水电在生产过程中并不直接产生温室气体, 故传统观点认为, 水电并不产生温室气体排放(水电碳足迹为零)。但是, 水电生产需依赖于水坝修建与运行, 水利水电工程建设运营各环节产生的温室气体排放均同水电能源生产密切相关。且水电站投产后服务寿命一般会长达几十甚至上百年, 不仅生产大量的电能、提供各种社会服务, 也会影响当地自然环境, 如蓄水活动会产生大量的碳足迹, 水电碳足迹的评估不应仅局限于水电站本身的碳足迹, 还应包含由于水电站服务功能的实现而导致的其他碳足迹。因此, 水利水电工程项目碳足迹(以下简称为“水电工程的碳足迹”)是指工程项目全生命周期内各种人类活动所产生的二氧化碳当量(CO_{2eq})排放总量, 反映了水电工程项目在其全生命周期内对全球大气辐射平衡(或“气候变化”)产生的影响。从全生命周期视角评价水电工程项目碳足迹是衡量水电碳排放最为科学、客观的方法。需要指出, 碳足迹核算需要针对研究产品系统或者人类活动整个生命周期中物质和能量输入、输出进行汇编, 并进行温室气体排放和去除情况的量化。

水电工程的碳足迹通常应结合水电工程项目特征, 且符合生命周期的观点。水电工程的全生命周期包括项目前期准备阶段、施工建设阶段、运营维护阶段和拆除恢复阶段(见图 2)。其中, 项目前期准备包括施工区征地拆迁、施工区场地平整和水库库底清理。库底清理具有“多功能性”^[10], 有利于大坝和水质安全, 且在蓄水前对淹没土地有机质的清理能够有效减少温室气体排放, 在水电项目的整个生命周期中发挥了重要作用。遵循 ILCD 手册^[11]

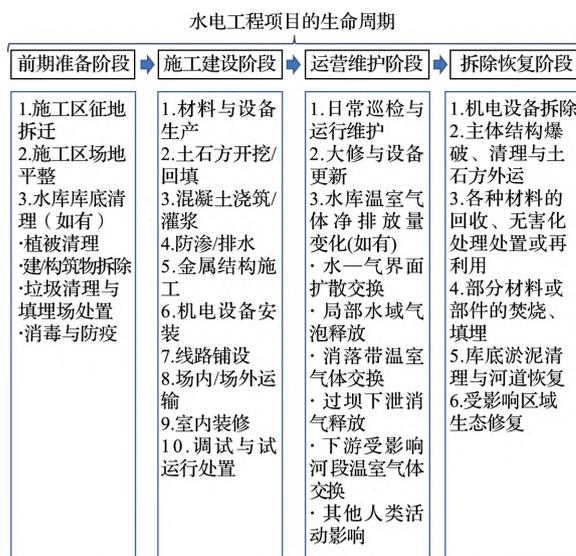


图 2 水电工程生命周期不同阶段与主要的单元过程
Fig. 2 Units of carbon footprint of hydropower projects

和 ISO 14044^[9]提出的层次结构方法, 库底清理可以细分为植被清理、建/构筑物拆除、固体废弃物清理和处置以及消毒与防疫 4 个部分; 施工建设阶段包括材料与设备生产、土石方开挖/回填、混凝土浇筑/灌浆等; 运营维护阶段的碳足迹不仅来源于日常巡检、运行维护、大修和设备的更新, 该阶段内水库释放及汇入的温室气体也需要考虑在内; 拆除恢复阶段的主要活动包括机电设备拆除、主体结构爆破和清理、土石方外运、各种材料的回收、无害化处理处置或再利用、部分材料或部件的焚烧、填埋, 以及生态环境恢复过程中的库底淤泥清理、河道恢复和对受影响区域的生态修复。在上述所有活动中, 运维阶段的水库生命周期温室气体排放量的估算最为灵活, 因此, 在水电工程生命周期碳足迹的估算中需要水库这一部分单独进行估算。其中, 部分水电工程(如径流式电站)并不需要通过蓄水而实现发电, 故因筑坝蓄水导致的水库温室气体净排放问题可不予考虑在内。

3 水电工程项目碳足迹核算的技术路径

3.1 国内外碳足迹核算的思路与方法

对水电工程项目开展碳足迹核算, 通常包括两种基本核算思路^[12-14]: 一种是基于清单分析的生命周期评价, 它是一种“自下而上”的分析方法, 该

方法以清单分析为基础,解析并梳理水电站全生命周期中每个单元过程的物质、能量流动并开展温室气体排放的计算。目前该方法主要以 ISO 14067—2018 作为执行标准。该方法具有针对性强、精度高的优势,但也可能存在“截断误差”(即清单核算不完整性)的问题;另一种是“自上而下”的投入产出分析方法,它通常以货币形式反映各经济活动的物质与能量流动,利用投入产出表计算各经济活动的能耗及排放水平,再通过评价对象与经济活动的对应关系评价具体产品或服务的环境影响。目前该方法主要以美国卡梅隆大学开发的 EIO-LCA 模型为工具。当前,全球不同案例所采用的方法各不相同。早期研究多以清单分析为主,聚焦于大坝的施工建设环节,梳理材料与能源消耗并核算碳排放量。2010 年以后,越来越多的研究逐渐采用投入产出法(EIO-LCA)对大坝建设施工与运营等环节的碳排放进行核算,并逐步形成了将清单分析法与投入产出法相结合的“混合分析法”^[9,12,15]。但是,在混合分析法的具体应用实践中,围绕数据来源、全生命周期各阶段或各单元过程的层次分解方面,不同研究案例仍参差不齐。因碳足迹评价方法选择与使用过程中存在差别,目前全球案例中碳足迹评价结果之间的可比性仍值得商榷。

3.2 水电工程碳足迹核算的技术路径

基于上述方法,本研究构建了水电工程碳足迹核算技术路径(见图 3)。水电工程碳足迹核算通常包括碳足迹核算的准备,包括目标与范围的确定、功能单位选择、系统边界划定等步骤。还包括建立水电工程碳足迹核算的生命周期清单,对碳足迹影响进行分析,对碳足迹核算结果进行解释、报告编制与审核等基本流程。

水电工程碳生命周期评价的第一步为碳足迹核算的准备。目标与范围的确定直接决定生命周期评价的侧重点,根据研究目标规划后期的工作重点。而研究范围的确定是服务于研究目的,而范围的确定包括产品系统、产品系统的功能、功能单元、系统边界的影响类别和影响评价的方法,及要使用的后续解释、数据需求、假设和限制、原始数据质量要求等。生命周期评价处于动态变化之中,在研究的过程,需要反复核对,不

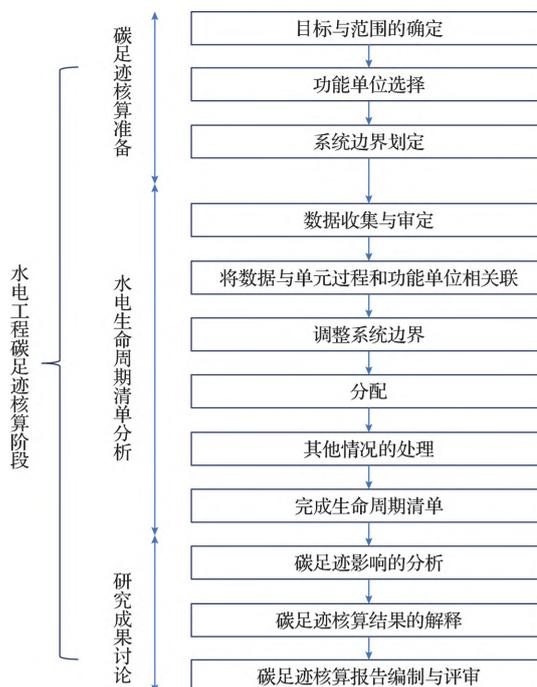


图 3 水电工程碳足迹核算技术路径

Fig. 3 Technical road of carbon footprint accounting for hydropower projects

断改进。功能单位为相关的输入和输出提供参考,量化所选定的产品功能(绩效特征),从而保证生命周期评价结果的可比性。系统边界指研究过程包含的要素,确定纳入计算的子单元,理想状况下,以系统的输入输出作为基本流。系统边界主要包含时间边界与空间边界两大要素。

水电生命周期清单分析主要分为数据的收集与审定、将数据与单元过程和功能相关联、调整系统边界、分配以及完成生命周期清单。生命周期清单主要分为四大阶段:筹建阶段,建设阶段,运营维护阶段,退役阶段。碳排放过程主要为能源、材料的消耗过程与水库蓄水的碳释放过程。

生命周期清单分析完成之后将继续开展碳足迹影响的分析、碳足迹核算结果的解释及碳足迹核算报告编制与评审。这一部分主要将前段研究成果进行讨论,明确各个阶段碳足迹具体影响程度,探索其中的规律。本研究的重点在于评估水电的清洁及优越属性,探索减少水电工程生命周期碳排放的途径,为整个水电工程的碳排放的过程管理提供技术支撑。

水电工程项目复杂、系统庞大、周期长。在开

展水电工程项目碳足迹核算中,数据来源与收集、物质能量的输入输出、各阶段或各单元过程的温室气体排放和去除情况等,并不易完全满足构建生命周期清单的各项要求。另外,生命周期的部分阶段、部分单元过程、输入项或输出项所产生的温室气体排放,也可能在其他行业或部门进行计算。故基于清单分析的方法学仍具有自身的局限性。而投入产出法默认为货币形式同碳排放强度在区域或国际层面上具有正相关关系,但估算的主观性和不确定性依然较大。混合生命周期评价方法是将清单分析法与投入产出法相结合的方法,包括分层混合生命周期评价(Tiered hybrid life cycle assessment)、基于投入产出的混合生命周期评价(I-O based hybrid life cycle assessment)以及集成混合生命周期评价(Integrated hybrid life cycle assessment)等不同形式^[9]。因此,近年来,混合生命周期分析方法逐渐成为针对大工程生命周期碳足迹分析的主要方法。

水电项目碳足迹核算是科学、客观掌握水电项目生命周期流程碳排放的基础,也是衡量不同能源行业低碳清洁属性的关键标尺。未来应逐步完善适合于我国水电项目的碳核算方法,以国际标准化组织产品碳足迹评价标准(ISO 14067)为基础,结合IPCC水淹地国家温室气体清单,梳理并编制水电项目全生命周期的温室气体排放清单,通过推广实践,探索并构建适合于我国水电项目的碳核算技术导则,支撑水电行业开展碳排放“基准”的核定。

4 结束语

2021年,国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》明确指出应统筹水电开发和生态保护,探索建立水能资源开发生态保护补偿机制。依托水电项目碳监测核算标准化体系,在水电项目碳核算、碳认证与碳绩效等方面,积极探索适用于我国碳交易市场的水电项目碳管理制度,加快推进水电项目碳监测核算标准化体系的推广应用。探索将水电项目温室气体排放权交易与生态保护修复工作相融合的机制,运用政策工具与经济杠杆,敦促水电企业将通过温室气体排放交易所获经济利益用于生态补偿与企业碳中和相关工作,引导水电企业制定明确的

碳中和路线图,积极开展生态环境保护修复工作。

综上,应充分考虑水电在我国能源结构体系中的重要地位,结合水电行业可持续发展的重大需求,通过技术标准制定与完善、碳排放摸底与基准线制定,对水电碳排放管理逐步标准化,进一步设计与优化水电行业碳交易体系,逐步促进我国水电行业积极纳入国家“双碳”目标管理体系并发挥其应有的作用。

参考文献(References):

- [1] IEA. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector [R]. 2021.
- [2] 中国水力发电工程学会. 水电仍是中国可再生能源的压舱石! [EB/OL]. (2021-02-04) [2323-03-21]. <http://www.hydropower.org.cn/showNewsDetail.asp?nsId=29791>.
- [3] 李哲,王殿常. 从水库温室气体研究到水电碳足迹评价:方法及进展[J]. 水利学报 2022(2): 139-153.
- [4] LI Z, DU H, XU H, et al. The carbon footprint of large-and mid-scale hydropower in China: Synthesis from five China's largest hydro-project [J]. Journal of Environment Management, 2019 (250): 109363.
- [5] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. 2019.
- [6] 国家发展改革委,国家统计局,国家能源局. 关于进一步做好新增可再生能源消费不纳入能源消费总量控制有关工作的通知(发改运行(2022)1258号) [EB/OL]. (2022-08-15) [2023-03-21]. https://www.ndrc.gov.cn/sxxgk/zcfb/tz/202211/t20221116_1341323.html.
- [7] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992(2): 121-130.
- [8] WIEDMANN T, MINX J. A Definition of "Carbon Footprint" [R]. 2008.
- [9] ISO. Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines: ISO 14044 [S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
- [10] LI Z, LU L, LYU P, et al. Carbon footprints of pre-impoundment clearance on reservoir flooded area in China's large hydro-projects: Implications for GHG emissions reduction in the hydropower industry [J]. Journal of Cleaner Production 2017(168): 1413-1424.
- [11] CHOMKHAMSRI K, WOLF M A, PANT R. International reference life cycle data system (ilcd) handbook: review schemes for life cycle assessment [M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.

(下转第70页)

- be substantially underestimated in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(21): 12089-12096.
- [9] 陈培林,肖欣欣,王勤耕. 基于卫星观测的 2010—2020 年中国高分辨率 NH_3 排放特征[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(6): 2673-2682.
- [10] LYU S J, WANG F L, WU C, et al. Gas-to-aerosol phase partitioning of atmospheric water-soluble organic compounds at a rural site in China: An enhancing effect of NH_3 on SOA formation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(7): 3915-3924.
- [11] XU W, ZHAO Y H, WEN Z, et al. Increasing importance of ammonia emission abatement in $\text{PM}_{2.5}$ pollution control [J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(17): 1745-1749.
- [12] 国务院. 关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知(国发〔2018〕22 号) [EB/OL]. (2018-07-03) [2023-03-06]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm.
- [13] 中共中央 国务院. 关于深入打好污染防治攻坚战的意见 [EB/OL]. (2021-11-07) [2023-03-06]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-11/07/content_5649656.htm.
- [14] 周斌,戴圣炎,汪开英. 浙江省规模畜禽场臭气治理现状与对策[J]. *浙江畜牧兽医*, 2018, 43(3): 20-22.
- [15] 浙江省农业农村厅. 关于推介发布 2022 年农业主导品种和主推技术的通知 [EB/OL]. (2022-03-08) [2023-03-06]. http://nynct.zj.gov.cn/art/2022/3/8/art_1589297_58940338.html.
- [16] 曹玉博,邢晓旭,柏兆海,等. 农牧系统氨挥发减排技术研究进展[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 566-580.
- [17] 生态环境部. 排污许可证申请与核发技术规范 畜禽养殖业: HJ 1029—2019 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [18] 生态环境部大气环境司. 关于印发《2018—2020 年全国恶臭/异味污染投诉情况分析》报告的函(大气函〔2021〕17 号) [EB/OL]. (2021-08-02) [2023-03-06]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/sthjbs/202108/t20210802_853623.html.
- [19] 王文林,杜薇,韩宇捷,等. 我国畜禽养殖氨排放特征及减排体系构建研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(11): 2305-2316.
- [20] 邹克华. 恶臭污染评估技术及环境基准 [M]. 北京: 化学工业出版社出版, 2013.
- [21] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 规模化畜禽场良好生产环境 第 1 部分: 场地要求: GB/T 41441.1—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [22] 原卫生部, 国家标准化管理委员会. 村镇规划卫生规范: GB 18055—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [23] 高宗源. 长三角典型规模化鸡场氨排放研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2022.
- [24] 陈园. 上海市典型规模化猪场氨排放特征研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- [25] 周志强. 上海市典型规模化奶牛场氨排放特征研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2019.
- [26] 浙江省农业农村厅, 浙江省生态环境厅. 关于印发浙江省畜禽养殖场规模标准的通知(浙农牧发〔2022〕9 号) [EB/OL]. (2022-09-16) [2023-03-06]. https://www.zj.gov.cn/art/2022/9/16/art_1229278041_2424683.html.
- [27] 浙江省发展改革委. 浙江省农业农村厅. 关于印发《浙江省畜牧业高质量发展“十四五”规划》的通知(浙发改规划〔2021〕253 号) [EB/OL]. (2021-06-18) [2023-03-06]. https://www.zj.gov.cn/art/2021/7/7/art_1229203592_2310415.html.
- [28] 浙江省市场监督管理局. 关于下达 2022 年第三批浙江省地方标准制修订计划的通知(浙市监函〔2022〕250 号) [EB/OL]. (2022-07-26) [2023-03-06]. <https://bz.zjmr.zj.gov.cn/public/news/view/plan/37a1fc0c981149d1aeccad229fb8b262.html>.
- [29] 鲁胜坤,晁娜,陈金媛,等. 浙江省 2013—2020 年人为源氨排放清单 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4525-4536.
- [30] 连纲,罗涛,傅智慧,俞洁. 2001—2018 年浙江省酸雨变化特征及影响因素分析 [J]. *中国环境监测*, 2021, 37(4): 104-110.

(上接第 63 页)

- [12] International Organization for Standardization. Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification: BS EN ISO 14067 [S]. Switzerland: ISO Copyright office 2018.
- [13] MASANET E, CHANG Y, GOPAL A R, et al. Life - Cycle Assessment of Electric Power Systems, *Social Science Electronic Publishing* [J]. 2013(38): 107-136.
- [14] RAADAL H L, GAGNON L, MODAHL I S. Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011(7): 3417-3422.
- [15] MAHMUD M, HUDA N, FARJANA S H, et al. Life-cycle impact assessment of renewable electricity generation systems in the United States [J]. *Renewable Energy* 2020, 151: 1028-1045.