

《温室气体排放核算与报告要求第XX部分：生活污水处理企业（征求意见稿）》编制说明

《温室气体排放核算与报告要求第XX部分：生活污水处理企业》编制组

2025年2月

目 次

1. 工作简况 1

1.1. 制定背景 1

1.2. 政策标准梳理 4

1.3. 任务来源 5

1.4. 主要工作过程 6

1.5. 参加单位、人员及分工 7

2. 标准编制原则和主要内容 9

2.1. 标准编制原则 9

2.2. 标准主要内容及依据 10

3. 采用国际、国外先进标准的程度，以及与国际、国外同类标准水平的对比情况 15

3.1. 国内的污水处理温室气体核算相关标准的工作进展 15

3.2. 国际污水处理温室气体核算相关标准的工作进展 17

4. 主要的验证（测试）情况 20

5. 与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系 23

6. 重大分歧意见的处理经过和依据 23

7. 国家标准作为强制性国家标准或推荐性国家标准的建议 24

8. 贯彻国家标准的要求和措施建议 24

9. 废止现行有关标准的建议 24

10. 其他应予说明的事项 24

附录A 温室气体排放因子及编制说明 25

A.1污水处理过程直接排放因子 25

A.2 污泥处理过程直接排放因子 28

A.3 药剂使用过程间接排放因子的确定 30

参考文献 32

《温室气体排放核算与报告要求第XX部分：生活污水处理企业》

编制说明

1. 工作简况
	1. 制定背景

“十四五”时期是我国深入推进生态文明建设、推动经济社会高质量发展、全面实现绿色转型以及达成碳达峰碳中和目标的关键阶段。作为城市发展不可或缺的基础设施，污水处理设施不仅是经济发展的重要支撑，更是保障居民安全健康生活的基础条件。因此，适时制定科学规范的生活污水处理企业温室气体核算框架和报告指南，编制《温室气体排放核算与报告要求第XX部分：生活污水处理企业》标准，不仅是积极响应全球气候治理、履行碳达峰与碳中和承诺的具体举措，也是推动行业绿色转型的重要实践。

该标准作为现有的温室气体排放核算与报告体系的组成部分，规定了生活污水处理企业温室气体排放核算方法，有助于促进企业提高能效、优化管理，增强对温室气体排放的理解和控制，进一步推动我国低碳经济转型，为实现国家双碳目标提供支撑，同时为地方政府和相关部门提供监管和决策依据。

* + 1. 生活污水处理行业现状

随着我国对环境保护及污水处理的愈加重视，我国污水处理厂的数量持续增多、污水处理能力持续提高。2022年，我国城市污水和县城污水处理厂数量分别达到2894座和1801座，比2010年分别增长了100.4%和71.2%；污水处理能力分别达到了21606.1万立方米/日和4184.7万立方米/日，比2010年分别增长了107.0%和105.1%（图1）。城市和县城的污水处理量分别为627亿立方米和111.4亿立方米，比2010年分别增长了101.1%和157.3%（图2）。同时，2022年我国污水处理厂干污泥产生量为1370万吨，比2011年增长了130.6%；干污泥处置量1362万吨，比2011年增长了149.7%。



**图1 1978-2022年中国污水处理厂数量与处理能力**

（数据来源：《中国城乡建设统计年鉴》）



**图2 1991-2022年中国城市和县城污水处理量及污水处理率**

（数据来源：《中国城乡建设统计年鉴》）

* + 1. 污水处理行业对我国碳排放的贡献情况

污水处理行业是温室气体排放的重要来源之一，尤其是甲烷（CH4）排放。2005年，污水处理行业的CH4排放量为175.0万吨，占当年温室气体总排放量（不包括土地利用、土地利用变化和林业，LULUCF）的3.7%。到2020年，CH4排放量增加至228.0万吨，占比为3.8% （表1）。2021年，CH4排放量进一步增加到229.7万吨，占比仍为3.9%。这表明污水处理行业的CH4排放量在过去十几年间呈现缓慢增长趋势，但其在总排放中的占比相对稳定。

2005年，污水处理行业的氧化亚氮（N2O）排放量为144万吨，占总排放量（不包括LULUCF）的8.9%。到2020年，排放量增加至197.9万吨，占比为4.4%。2021年，N2O排放量进一步增加到210.2万吨，占比为4.2%。尽管N2O排放量逐年增加，但其在总排放中的占比变化不大，整体保持在较低水平。

根据《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》以及相关数据，污水处理行业在中国温室气体总排放中的占比相对较低，但CH4和N2O的排放量在过去十几年间呈现缓慢的增长趋势。在应对气候变化的过程中，需要关注污水处理行业的温室气体排放，并采取有效措施加以控制，以减少其对整体排放的贡献。

**表1 2005、2020、2021年污/废水处理领域温室气体排放清单（万吨）**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 年份 | 甲烷 | 氧化亚氮 |
| 总排放量（不包括LULUCF) | 污/废水处理领域排放量 | 污/废水处理领域占比 | 总排放量（不包括LULUCF) | 污/废水处理领域排放量 | 污/废水处理领域占比 |
| 2005 | 4683.1 | 175.0 | 3.7% | 144 | 8.9 | 6.2% |
| 2020 | 5902.8 | 228.0 | 3.8% | 197.9 | 8.8 | 4.4% |
| 2021 | 5953.5 | 229.7 | 3.9% | 210.2 | 8.8 | 4.2% |

注：表格数据来自《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》

* 1. 政策标准梳理

随着全球气候变化问题日益严峻，污水处理领域的温室气体排放控制成为环境保护的重要议题。污水处理过程中产生的温室气体，如甲烷和氧化亚氮，对环境造成显著影响。科学开展我国污水处理行业温室气体核算工作对于实现污水处理行业污染物与温室气体的协同控制至关重要。

我国在污水处理领域的温室气体管控上采取了一系列政策和法规措施。2021年1月，《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》提出，要强化污水、垃圾等集中处置设施环境管理，协同控制甲烷、氧化亚氮等温室气体。2021年3月，《第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中提到要加大甲烷等其他温室气体控制力度；2022年6月，由生态环境部联合6部委印发的《减污降碳协同增效实施方案》明确指出开展城镇污水处理和资源化利用碳排放测算，优化污水处理设施能耗和碳排放管理。2023年11月，生态环境部等11部门联合发布《甲烷排放控制行动方案》提出逐步建立甲烷排放控制政策、技术和标准体系，有效提升甲烷排放统计核算、监测监管等基础能力，并加强污水处理等重点领域甲烷收集利用。同年12月，国家发展改革委、住房城乡建设部、生态环境部联合印发的《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》（发改环资〔2023〕1714号）提出要科学开展污水管网清淤管护，减少甲烷排放，加强高效脱氮除磷等低碳技术应用，减少脱氮过程氧化亚氮逸散，并明确了相关的支持政策和保障措施。2023年12月，《中共中央国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》指出加快发展方式绿色转型，积极稳妥推进碳达峰碳中和，落实《甲烷排放控制行动方案》，并研究制定其他非二氧化碳温室气体排放控制行动方案。此外，2024年6月，与本标准同步启动的《协同降碳绩效评价 城镇污水处理》国家标准，为污水处理系统的碳减排工作明确了发展方向，将进一步推动污水处理行业向绿色低碳和高质量发展目标迈进。

目前，我国共有65项现行国家水污染物排放标准，其中《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）和《医疗机构水污染物排放标准》（GB 18466-2005）2项标准，规定了厂界空气中甲烷的控制要求，尚无相关标准对氧化亚氮的排放提出管控要求。

总体而言，我国污水处理领域的温室气体管控政策与法规框架已初步形成，并处于持续优化和完善的过程中。这些政策和法规不仅为污水处理行业实现减污降碳协同增效提供了坚实的法律依据，也为行业绿色转型和可持续发展指明了行动方向。

* 1. 任务来源

2023年12月6日国家标准化管理委员会下达关于2023年第三批推荐性国家标准计划的编制任务，《温室气体排放核算与报告要求第XX部分：生活污水处理企业》正式立项。

* 1. 主要工作过程

2024年5月20日，中国环境科学研究院与中国标准化研究院联合在北京召开了《温室气体排放核算与报告要求第XX部分：生活污水处理企业》（以下简称《标准》）启动会，正式拉开了标准编制工作的帷幕。

2024年6月28日，编制组组织召开线上任务分工会议，将《标准》及编制说明的主要内容细分为七个任务板块，明确各参编单位的职责，确保各方协同推进标准编制工作。

2024年7月13日，中国环境科学研究院、中国标准化研究院、上海市环境科学研究院和北京城市排水集团代表在北京就各自牵头任务的编制进展情况进行汇报。清华大学梁鹏教授、哈尔滨工业大学王秀蘅教授、华东理工大学邱恺培教授以及北控水务吴云生总工等与会专家围绕相关问题展开研讨，对《标准》重点问题的解决思路达成共识，为后续工作的顺利开展奠定了坚实基础。

2024年7月19日，排放因子工作任务组召开研讨会，北京排水集团、清华大学、中国环境科学研究院、同济大学、华东理工大学、中国市政工程中南设计研究总院、上海城投污水处理有限公司、爱森（中国）絮凝剂有限公司等单位代表参会。会议就工作任务分工进行深入讨论，并明确了编制工作要求及关键时间节点，确保各项工作有序推进。

2024年7月至8月期间，上海市环境科学研究院针对核算方法的主体内容，多次与任务内单位及其他工作小组开展讨论，完成核算步骤章节初稿。

2024年9月，核算步骤（上海环境科学研究院牵头）、排放因子（北京城市排水集团与清华大学牵头）、行业发展与温室气体排放现状（北控水务牵头）、计量与监检测要求（华东理工大学完成牵头）、标准编制说明（同济大学牵头）等章节初稿相继完成。中国环境科学研究院与中国标准化研究院对各部分内容进行整合、补充与完善后，邀请哈尔滨工业大学王秀蘅教授与同济大学戴若彬教授分别对《标准》与编制说明文本进行审阅，形成内部讨论稿。

2024年9月29日，编制组针对讨论稿中存在的主要技术问题，在北京召开研讨会，近30家单位派代表参加，生态环境部气候司刘杨副司长莅临指导，与会专家围绕初稿内容充分讨论，为后续修改完善提出意见和建议。

2024年10月至12月，标准编制组聚焦重点问题，集中力量开展攻关研究，反复讨论并征求专家意见。形成《标准》的征求意见稿初稿及其编制说明，并征求参编单位意见。

2025年2月，中国环境科学研究院与中国标准化研究院在线上召开研讨会，针对稿件重点问题的处理和修改思路进行汇报和研讨。《标准》的征求意见稿及其编制说明修改完成。

* 1. 参加单位、人员及分工

本次污水标准的编制工作由30家单位约70位专业人员共同参与，涵盖了科研机构、高校、水务企业、环保科技企业、检测机构和工程设计单位等多领域，体现了跨行业合作、专业多元和地域广泛的特点。参编人员均为污水处理及相关领域的专家和技术骨干，具有丰富的实践经验与理论基础，为标准的科学性、实用性和普适性提供了有力保障。

本文件的主要起草单位：中国环境科学研究院、中国标准化研究院、上海环境科学研究院、北京城市排水集团股份有限公司、长江生态环保集团有限公司、北控水务（中国）投资有限公司、上海城投污水、清华大学、同济大学、华东理工大学、哈尔滨工业大学、中国光大水务有限公司、深圳市水务（集团）有限公司、中环保水务投资有限公司、信开环境投资有限公司、上海化学工业区中法水务发展有限公司、华电水务科技股份有限公司、中国水务投资集团有限公司、北京首创生态环保集团股份有限公司、环德（福建）环保科技有限公司、中冶华天南京工程技术有限公司、中国市政工程中南设计研究总院有限公司、东莞市水务集团净水有限公司、上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司、中国城市规划设计研究院、陕西大胜石油工程技术服务有限公司、深圳市计量质量检测研究院、上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司、北京科技大学、南京师范大学。

本文件的主要起草人：刘舒乐、马占云、孙亮、张晓昕、钱晓雍、戴洁、石磊、刘垚、朱向东、张俊、刘冰玉、吴云生、王丽花、黄霞、王志伟、梁鹏、邱勇、王秀蘅、邱恺培、朱翠萍、冀滨弘、戴若彬、段亮、蔚静雯、袁芳、侯锋、王缘、周珉、陈北洋、陈汪洋、李伏京、吴学钦、薛攀、贺珊珊、杨明、张亦藜、李宏博、常菁、张海亚、高庆先、姚大伟、张涛、林静、李浙英、黎洪元、蒋红与、李爽、庄晓芳、杨晓宇、张璐晶、汤盛达、陈春玥、庞洪涛、曹效鑫、叶书荣、姜栋、龚道孝、陶相婉、陈少华、于洋、邱林清、郭恰、姚婷婷、马志同、吕永鹏、齐珺、黄政锋、程世昆、李子富、杨朕。

1. 标准编制原则和主要内容
	1. 标准编制原则

本标准是首次制定。制定时遵守以下原则：

1. **立足现状，引领发展：**结合我国生活污水处理企业的生产运营现状与发展需求，以先进标准为引领，推动企业提升管理水平，有效控制温室气体排放，强化绿色发展要求。
2. **协调一致，确保合规：**本标准与现行相关法律、法规、规章及标准保持协调一致，确保政策衔接顺畅，为企业提供明确的规范指引。
3. **实践导向，科学实用：**基于生活污水处理企业在温室气体排放监测与核算方面的丰富实践经验，本标准在核算边界、核算方法、数据管理及报告要求等方面力求科学合理、全面系统，并注重可操作性，便于推广应用。
4. **规范编写，严谨统一：**按照GB/T 1.1-2020等标准的要求，对标准的结构、格式及表达方法进行规范化编写，确保标准的严谨性和统一性。
	1. 标准主要内容及依据

本标准分为8章和5个附录，主要内容如下：

**1）第1章：范围。**本标准规定了生活污水处理企业温室气体排放量的核算和报告相关的术语、核算边界、核算步骤和核算方法、数据质量管理、报告内容和格式等内容。本标准适用于生活污水处理企业温室气体排放量的核算与报告，涉及的温室气体主要是甲烷（CH4）、氧化亚氮（N2O）和二氧化碳（CO2）。

**2）第2章：规范性引用文件。**全文共计引用了21项与本标准相关的标准。

**3）第3章：术语和定义。**本章主要明确了适用于本标准的相关术语和定义，如温室气体、报告主体、生活污水、生活污水处理企业、全球变暖潜势、二氧化碳当量、排放因子等。

**4）第4章：核算边界。**本章主要阐明了报告主体应以企业法人或视同法人的独立核算单位为边界，核算和报告其生产系统产生的温室气体排放。介绍了常见生活污水处理过程的主要温室气体排放源，并分别对不同排放源的核算和报告范围进行了相应规定。

**5）第5章：计量与监检测要求。**本章总结了生活污水处理企业各主要生产环节温室气体排放计量与监检测参数及其计量方法和设备，并对计量监测过程提出了管理要求。

**6）第6章：核算步骤与核算方法。**

本章主要介绍核算步骤及相关核算方法。核算工作围绕污水和污泥处理过程的直接排放，以及电力和热力消耗所导致的间接排放展开。

在污水处理过程中，温室气体的直接排放主要来源于微生物对有机物降解及氮类化合物转化，主要排放气体为甲烷（CH4）和氧化亚氮（N2O）。其中，CH4主要由厌氧条件下的有机物降解产生，N2O则与含氮化合物的硝化-反硝化过程密切相关。因此，需关注进水和出水的化学需氧量（COD）和总氮（TN）浓度，以评估潜在排放量。

污泥是污水处理的主要副产物之一，富含有机物和营养元素。在污水处理过程中，部分有机污染物会随污泥富集，而污泥在后续的处理和处置过程中，如厌氧消化、好氧发酵、填埋或焚烧等，均可能产生CH4和N2O，是污水处理系统中不可忽视的温室气体排放源。

由于本标准的核算边界遵循企业法人边界原则，部分污水处理厂的污泥会转运至厂外进行处理，而部分污水处理厂同时承担外部污泥的处理任务。为避免重复核算，本标准在参考过国内外主要核算标准后（表2），将污水和污泥的排放分成两部分计算。

污水和污泥处理过程的排放因子可通过现场监测数据获取。在缺乏监测数据的情况下，可参考本标准提供的缺省值（见标准附录C）。 其中，污水处理过程的排放因子主要基于生态环境部碳监测评估试点工作的成果，通过选取多个地区覆盖全年的月度监测数据进行系统提炼得出。污泥厌氧消化的排放因子来源于文献调研值，而污泥好氧发酵和焚烧的排放因子则基于少量实测数据确定。这些因子为污水处理企业提供了科学、可靠的核算依据，支持温室气体排放的精准管理和有效控制。

燃料燃烧、电力消耗和热力消耗的核算方法及排放因子，与GB 32151系列国家标准保持一致，并依据国家最新发布的区域电网碳排放因子进行同步调整（见标准附录D)。

在污水污泥处理过程中，碳源的使用会直接产生碳排放，而其他化学药剂的使用则可能导致间接碳排放。因此，水务企业在开展温室气体控制与减排工作时，需统筹考虑药剂使用带来的碳排放影响。标准编制组对国内主要水务企业的药剂使用情况进行了深入分析，明确了主要化学药剂的类别，并通过调研国内外相关标准和数据库（如T/CAEPI49[1]、T/CUWA50055[2]、CPCD[3]、Ecoinvent[4]、Simapro[5]、Incopa[6]等），系统收集和整理了污水处理过程中温室气体排放因子。基于全生命周期核算，推荐了适用于我国的缺省排放因子，主要参考团体标准T/CUWA50055和因子库Ecoinvent中的推荐值。污水处理企业可依据本标准提供的核算方法及因子数据进行试算和排放管理，并在标准附录表格B.1中选择相关数据进行报送。

表2 国内外主要核算标准的边界

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 方法1[7] | 方法2[8] | 方法3[1] | 方法4[2] | 方法 5[9] | 方法6[10] | 本标准 |
| 排放/抵消 | 污水/污泥 | 系统边界（管网、泵站、厂界、污泥、出水） | 属地管理原则，以企业法人或视同法人的独立核算单位为边界，与环境统计、温室气体统计工业企业核算边界保持一致。（厂界+污泥） | 报告主体经过行业主管部门核验通过，且稳定运行一年以上。（厂界+污泥） | 对市政排水系统收集的污水进行处理的设施（厂界+污泥） | 属地管理原则，核算空间边界设置为企业法人或独立核算的企业厂界，时间边界为核算城镇污水厂在运维阶段的碳排放。（厂界+污泥） | 基于行政区域的温室气体核算（厂界+污泥+出水） | 主要包含城镇公用事业属性的市政给水、污水、再生水和雨水四个系统（管网、厂界、污泥） | 属地管理原则，以企业法人或视同法人的独立核算单位为边界，与环境统计、温室气体统计工业企业核算边界保持一致。 |
| 排放端 | 污水 | 污水处理产生的CH4 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 污水处理的CH4回收 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 污水处理产生的N2O | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 污泥 | 污泥焚烧处置产生的CH4和N2O |  | √ |  | √ | √ | √ | √ |
| 污泥浓缩脱水产生的CH4和N2O |  |  |  |  |  |  | √ |
| 污泥干化产生的CH4和N2O |  |  |  |  |  |  | √ |
| 污泥厌氧消化产生的CH4和N2O | √ |  |  | √ |  | √ | √ |
| 污泥好氧发酵产生的CH4和N2O |  |  |  | √ |  | √ | √ |
| 污水+污泥 | 化石燃料燃烧产生的CO2 |  | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 出水阶段排入环境的CH4和N2O |  |  |  |  | √ |  |  |
| 电力消耗产生的CO2 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 热力消耗产生的CO2 |  | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 运行中各类物耗产生的CO2 |  | √ | √ | √ |  | √ | √ |
| 抵消端 | 污水+污泥 | 减碳：技术减少的碳排放 |  | √ |  | √ |  | √ |  |
| 碳汇：污泥土地利用的固碳量 |  | √ |  | √ |  | √ |  |
| 替碳：厂内清洁能源产生量 |  | √ |  | √ |  | √ |  |

方法1. 《城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南》

方法2. 《上海城镇污水处理厂温室气体排放核算指南》

方法3. 《污水处理厂低碳运行评价技术规范》

方法4. 《城镇污水处理厂碳减排评估标准》

方法5. 《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》

方法6. 《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》

**7）第7章：数据质量管理。**本章主要列出了报告主体温室气体数据质量管理工作的内容。

**8）第8章：报告内容和格式。**本章确定了报告主体基本信息、温室气体排放量、活动数据及来源、排放因子数据及其来源等报告内容及格式要求。

**9）附录A，B，C，D，E。**附录A介绍生活污水处理企业核算边界；附录B是报告模板及具体表格；附录C提供各环节的缺省排放因子；附录D是电网排放因子的选取说明；附录E是数据质量控制模板。

1. 采用国际、国外先进标准的程度，以及与国际、国外同类标准水平的对比情况
	1. 国内的污水处理温室气体核算相关标准的工作进展
		1. 地区级温室气体排放核算标准

为提升省级温室气体清单编制能力，国家组织多家单位和部门，在IPCC核算方法的基础上，编制并发布了《省级温室气体清单编制指南（试行）》。该指南汇总了省级区域内所有活动的温室气体排放与吸收信息，为区域层面的温室气体核算提供了科学、规范且可操作的指导。与IPCC核算方法相比，该指南中的碳排放因子更贴合我国能源消耗的实际情况，具有更强的适用性和针对性。

在地方层面，各地也相继出台了相关核算标准，以支持区域温室气体清单编制工作：

广东省：广东省生态环境厅发布了《广东省市县（区）级温室气体清单编制指南（试行）》。该指南结合市（县）应对气候变化的统计基础，确保与省级温室气体清单在统计口径和核算方法上保持一致，有效提升了市（县）级温室气体清单编制能力。

重庆市：重庆市发布了《重庆市区县温室气体清单编制指南（试行）》，为区县级温室气体清单编制提供了明确依据。

上海市：2012年，上海市发布了《上海市温室气体排放核算与报告指南（试行）》，旨在规范企业、相关部门及专业机构在温室气体排放监测、报告、核查和管理方面的科学方法，为区域温室气体核算提供了重要参考。

这些核算标准的制定与实施，不仅完善了我国温室气体核算体系，还为不同层级区域的温室气体减排工作提供了科学依据和实践指导。

* + 1. 项目级温室气体排放核算标准

以项目为核算主体的标准方面，国家核证自愿减排量CCER发布过《CM-088-V01 通过在有氧污水处理厂处理污水减少温室温室气体排放》和《CMS-077-V01 废水处理过程通过使用有氧系统替代厌氧系统避免甲烷的产生》等多项涉及生活污水处理碳排放的核算方法。以上方法建立了生活污水处理温室气体排放的核算框架，包括直接碳排放与间接碳排放，并且对核算过程所需的活动数据及排放因子取值均有规定，或采用默认值，或通过统计和采样检测的方式获取。但随着碳市场的重启，污水处理领域尚未有新温室气体排放核算方法发布。

* + 1. 企业级温室气体排放核算标准

以生活污水处理企业为核算主体的标准方面，国内已有三个团体标准，即《污水处理厂低碳运行评价技术规范》（T/CAEPA-2022）、《城镇污水处理厂碳排放核算标准》（T/CRSUD-2023）和《城镇污水处理厂碳减排评估标准》（T/CUWA 50055-2023）。以上三个标准都对污水处理厂温室气体排放核算的范围、核算方法提出具体要求。

2015年，国家发展和改革委员会发布了《工业企业温室气体排放核算和报告通则》，该标准规定了碳排放量计算的基本原则、核算方法和报告要求。2021年，生态环境部发布了《企业温室气体排放报告核查指南（试行）》，为企业温室气体排放核算方法、核算数据、活动数据、排放因子以及其他核算相关数据提出了具体的核查要求，生活污水处理项目温室气体排放报告核查可根据该指南进行。

* 1. 国际污水处理温室气体核算相关标准的工作进展

国际污水处理碳核算相关标准方法主要有IPCC指南方法、清洁发展机制（CDM）、核证减排标准（VCS）、GHG Protocol及生命周期评价法（LCA）等。

* + 1. 国家级温室气体排放核算标准——IPCC指南方法

由政府间气候变化专业委员会（The Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）编制的《IPCC国家温室气体清单指南》是全球范围内应用最广泛的碳排放核算指南之一。该指南将温室气体排放划分为五大领域：能源、工业生产过程、农业、林业与土地利用以及废弃物。其中，第五卷“废弃物”部分专门针对废水处理与排放，详细列出了生活污水处理过程中可能产生直接碳排放的环节，并提供了生活污水处理直接碳排放的具体核算方法。

《IPCC国家温室气体清单指南》历经多次更新，最新版本于2019年5月18日在日本京都召开的IPCC专家组全体会议上发布。此次更新基于2006年版指南，进一步补充了温室气体排放源和吸收汇的估算方法，并对部分排放因子进行了修订，以更好地反映最新的科学研究成果和实践经验。

* + 1. 项目级温室气体排放核算标准——清洁发展机制（CDM）、核证减排标准（VCS）及GHG Protocol

清洁发展机制（Clean Development Mechanism, CDM）是《京都议定书》引入的履约机制之一，允许发达国家通过向发展中国家购买减排量（CERs），抵消自身的部分排放义务，从而促进发展中国家的温室气体减排项目。生活污水处理过程中产生的温室气体减排也被纳入CDM的多个废弃物处置相关方法学中，例如《AM0080 Mitigation of greenhouse gases emissions with treatment of wastewater in aerobic wastewater treatment plants》。其碳排放计算逻辑为：碳减排量 = 基准排放 - 项目排放，其中，基准排放通常指采用厌氧塘处理污水的情形。CDM方法学在IPCC核算方法的基础上，引入了间接碳排放的计算，以更全面地评估生活污水处理项目的碳排放和减排效果。

核证减排标准（Verified Carbon Standard, VCS）由非营利组织Verra于2005年创建，是全球应用最广泛的自愿减排机制。VCS通过签发核证碳单位（Verified Carbon Units, VCUs）推动碳减排项目的实施。其备案方法学涵盖能源、制造、建筑、交通、废弃物、采矿、农业、林业、草原、湿地和畜牧业等49个领域。此外，VCS标准承认CDM的全部备案方法学，因此，在污水处理领域，VCS采用CDM的方法学计算碳排放和碳减排量。

《GHG Protocol 温室气体核算体系》由世界资源研究所（WRI）和世界可持续发展工商理事会（WBCSD）自1998年联合制定，现已成为全球广泛认可的碳核算标准。GHG Protocol 将温室气体排放分为范围一（Scope 1）、范围二（Scope 2）和范围三（Scope 3），并对项目边界的确定提供指导。其中：

**范围一：**指项目边界内的直接温室气体排放，包括污水及污泥处理过程中无组织排放的甲烷和氧化亚氮，以及燃料燃烧的二氧化碳。

**范围二：**指外购电力、蒸汽和热能等能源消耗所导致的间接温室气体排放。

**范围三：**指除范围二以外的其他间接排放，包括污水处理厂上下游过程（如污泥外运、污泥处置）产生的碳排放。但在GHG Protocol框架下，范围三的排放目前尚未被强制纳入核算范围。

* + 1. 产品级温室气体排放核算标准 - 生命周期评价法（LCA）

生命周期评价法（Life cycle assessment， LCA）是一种评估与商业产品、过程或服务“从摇篮到坟墓”的生命周期所有阶段相关的环境影响方法。该方法主要包括三个步骤：编制环境、能源投入/产出清单，评估环境影响，以及结果解释说明。国际标准化组织（ISO）的ISO14040和ISO14044环境管理标准分别对LCA方法的“原则和框架”以及“要求和指南”作出了明确规定。

LCA方法已被开始于美国、中国、加拿大、英国等多个国家的生活污水处理碳排放核算研究，由于LCA方法考虑了生活污水处理的碳排放，用LCA方法得到的碳核算结果较为全面。但由于该方法的使用需要污水、处理药剂、处理构筑物全生命周期的大量数据，而相关数据的收集往往存在较大的困难。

1. 主要的验证（测试）情况

本标准标准是在总结国内生活污水处理行业温室气体排放实际现状的基础上，充分调研、研讨、征求意见后完成的。本标准在确定内容之前开展以下工作：

1）收集、分析了温室气体排放与核算相关的国内标准、技术文献和统计资料。

2）开展生活污水处理企业的碳排放核算边界、主要生产单元、主要生产设备、原辅料、主要工艺过程、温室气体排放来源识别、活动水平数据统计、排放因子数据等相关材料内容的梳理、分析（表1）。

3）组织近30家参编单位针对主要技术问题多次召开线上线下的研讨会，对标准中的核心问题广泛吸纳了相关单位的专业意见和建议。

4）咨询生活污水处理企业、碳排放核算以及标准化研究等领域多位学者和行业专家意见，并在长江生态环保集团、中环保水务有限公司和中国水务投资集团有限公司的协助下开展试算，试算结果见下表3～5所示。企业反映本标准计量监测体系较为科学、规定简明清晰，与相关碳核查规范及用能管理要求相一致，具备较强的可操作性。

表3. 参与试算的三家企业的活动水平

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **排放源** | **活动水平****（年均值）** | **单位** | **企业1** | **企业2** | **企业3** |
| 污水处理 | 污水处理量 | 万立方米，104 m3 | 996 | 337 | 1585.1 |
| 进水COD浓度 | 毫克每升，mg/L | 143.19 | 212.29 | 264 |
| 出水COD浓度 | 毫克每升，mg/L | 15.98 | 9.39 | 15.1 |
| 进水TN浓度 | 毫克每升，mg/L | 29.63 | 23.32 | 0 |
| 出水TN浓度 | 毫克每升，mg/L | 9.31 | 3.43 | 23.32 |
| 甲烷回收量 | 吨甲烷，tCH4 | 0 | 0 | 3.43 |
| 污泥处理 | 浓缩脱水污泥干重 | 吨，t  | 4663.7 | 3724 | 1585.1 |
| 好氧发酵污泥干重 | 吨，tDS |  |  | 2512.3 |
| 干化污泥干重 | 吨，tDS |  |  |  |
| 焚烧污泥干重 | 吨，tDS |  |  | 532.8 |
| 沼气产量 | 立方米，m3 |  |  |  |
| 沼气中甲烷比例 | 百分比，% |  |  |  |
| 沼气泄露比例 | 百分比，% |  |  |  |
| 甲烷回收利用量 | 吨，t |  |  |  |
| 购入电力 | Mwh | 2043 | 3842 | 507.5 |
| 输出电力 | Mwh | 496.701 | 0 |  |
| 电网排放因子 | tCO2/MWh | 0.5395 | 0.2268 | 0.5617 |
| 购入热量 | GJ |  | 0 |  |
| 输出热量 | GJ |  | 0 |  |
| 药剂使用1 | t | 605.9 | 1157.1 |  |
| 燃料使用 | 燃料1 | t或104m3 |  |  |  |
| 燃料2 | t或104m3 |  |  |  |
| 燃料3 | t或104m3 |  |  |  |

1. 药剂的计算过程见表2

表4. 试算企业药剂使用情况

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **药剂名称** | **排放因子** | **用量（t)** | **二氧化碳排放（**tCO2e） |
| （kg CO2/kg) | **企业**1 | **企业**2 | **企业**3 | **企业**1 | **企业**2 | **企业**3 |
| 氯化铁 | 2.86 | 120.3 |  |  | 344.0 | 0 | 0 |
| 硫酸亚铁 | 0.03 | 38.5 |  |  | 1.2 | 0 | 0 |
| 硫酸铁 | 0.23 |  |  | 1074.3 | 0 | 0 | 247.1 |
| 聚合氯化铝 | 1.75 | 24.1 | 78.5 |  | 42.1 | 137.4 | 0 |
| 乙二醇 | 无 | 38.3 |  |  |  |  |  |
| 葡萄糖 | 1.4 | 115.0 |  |  | 161.0 | 0 | 0 |
| 甲醇（煤制） | 2.9 | 15.3 |  |  | 44.5 | 0 | 0 |
| 聚丙烯酰胺 | 1.48 | 8.3 | 4.98 |  | 12.3 | 7.4 | 0 |
| 发酵液 | 无 | 23 |  |  | 0 | 0 | 0 |
| 氧气 | 0.32 | 0.27 |  |  | 0.087 | 0 | 0 |
| 氯 | 1.08 | 0.76 |  |  | 0.824 | 0 | 0 |
| 次氯酸钠 | 2.99 |  |  | 254.2 | 0 | 0 | 760.0 |
| 乙酸钠 | 2.9 |  | 349.1 |  | 0 | 1012.4 | 0 |
| 生石灰 | 1.18 |  |  | 556.4 | 0 | 0 | 656.5 |
| 新型脱泥药剂 | 无 |  |  | 218.0 |  |  |  |
| 复合碳源 | 无 |  |  | 779.0 |  |  |  |
| **排放总量** |  |  |  |  | **605.9** | **1157.1** | **1663.6** |

表5. 试算企业核算的排放量情况 （tCO2e)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **排放源类别** | **企业1** | **企业2** | **企业3** |
| 1. 污水处理的甲烷排放量
 | 245 | 132.2 | 761.6 |
| 1. 污水处理的氧化亚氮排放量
 | 53 | 21.2 | 100.7 |
| 1. 污泥处理的甲烷排放量
 | 外运 | 外运 | 0.0075 |
| 1. 污泥处理的氧化亚氮排放量
 | 外运 | 外运 | 2.01 |
| 1. 药剂使用导致的排放量
 | 6061 | 1157 | 16641 |
| 1. 购入电力产生的排放
 | 1102 | 871.4 | 285.1 |
| 1. 输出电力产生的排放
 | 268.0 | 无 | 无 |
| 1. 购入热力产生的排放
 | 无 | 无 | 无 |
| 1. 输出热力产生的排放
 | 无 | 无 | 无 |
| 1. 燃料燃烧的排放
 | 无2 | 无2 | 无2 |
| **企业温室气体排放总量** | 以上1～4项的排放 | 298 | 153.4 | 864.3 |
| 以上1～10项的排放 | 2274.1 | 2181.8 | 2813.0 |

1本标准提供的排放因子尚未覆盖该厂使用的复合药剂，故此核算结果偏低。

2 企业1和2均采用污泥外包处置，运输相关的燃料由第三方负责；企业3未有燃料使用记录。

综上，本标准指标参数确定过程中，考虑了行业技术发展趋势，参考了现行的相关标准文件，综合了相关单位的意见和建议，各主要参数均合理有效、切实可行。

1. 与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

随着"双碳"目标纳入生态文明建设整体布局，企业温室气体排放核算规范已成为环境信息披露制度的核心技术要件。GB/T 32151《温室气体排放核算与报告要求》立足行业特性，系统规定了核算边界界定、核算方法选择、数据质量管控及报告格式规范等内容，目前已形成覆盖发电、化工、建材等49个重点行业的标准化核算体系。本次编写的标准《温室气体排放核算与报告要求第X部分：生活污水处理企业》主要规定了生活污水处理企业温室气体排放量的核算和报告相关的术语、核算边界、核算步骤和核算方法、数据质量管理、报告内容和格式等内容,对生活污水处理企业温室气体排放量核算和报告的具体要求做了进一步细化及提升。

1. 重大分歧意见的处理经过和依据

对于本标准的内容，无重大分歧意见。

1. 国家标准作为强制性国家标准或推荐性国家标准的建议

建议作为推荐性国家标准发布实施。

1. 贯彻国家标准的要求和措施建议

本标准由全国碳排放管理标准化委员会（SAC/TC548）归口并解释。

标准发布后1年内，将根据各方反馈意见择期召开标准宣贯会议。向监管部门、技术审评部门、检验机构、生产企业等使用单位发放标准宣贯资料，并解答标准中相关技术难点和疑点。

1. 废止现行有关标准的建议

无。

1. 其他应予说明的事项

无。

**附录A**

温室气体排放因子及编制说明

A.1污水处理过程直接排放因子

A.1.1 甲烷排放因子设计

污水收集处理过程甲烷产排机制比较明确，即有机物在厌氧环境下，通过消化作用即可产生甲烷。在污水收集处理系统中，化粪池、污水收集管网、初沉池等是主要排放源。由于甲烷具有较高的溶解度，污水管网产生的甲烷会进入污水处理厂并在后续工艺段进行释放，这部分甲烷排放计入污水处理企业甲烷直接排放量。研究显示，污水处理厂甲烷排放中接近90%来自污水管网，甚至影响生化处理好氧区的CH4排放，是污水处理厂甲烷排放的主要贡献来源。综上，本标准在确定甲烷排放因子时聚焦系统的整体排放，而未针对工艺类型细分。

编制组依托生态环境部碳排放监测试点工作基础，收集了来自北京、上海、山东、江苏等省市典型生活污水处理厂2022和2024年的实际监测数据，具有良好的代表性。监测结果如表1所示，本标准推荐的缺省值根据我国实际监测数据，监测周期为12个月，采取平均值法计算获得（表A.1）。

表A.1 污水处理设施甲烷排放因子

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **序号** | **项目名称** | **监测数据（kg CH4/t CODRe）** |
| 1 | 北京 | 4.30  |
| 2 | 上海1 | 7.08 |
| 3 | 上海2 | 6.87 |
| 4 | 深圳 | 15.2 |
| 5 | 济南 | 2.96 |
| 6 | 江阴 | 5.12 |
| 7 | 平均值 | 6.92 |

A.1.2 氧化亚氮排放因子设计

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）、美国国家环境保护局（EPA）等权威机构已相继发布了方法学指南和温室气体核算报告，为全球温室气体排放核算提供了重要参考。任智勇等学者针对不同类型的活性污泥工艺开展了深入研究，提出了不同工艺类型下氧化亚氮（N2O）的排放强度范围。然而，由于氧化亚氮产生和排放机制的复杂性，不同类型工艺的排放因子存在较大的不确定性。此外，目前对氧化亚氮排放的研究仍不充分，尚不具备全面区分活性污泥细分工艺氧化亚氮排放因子的条件。

基于此，本标准在确定氧化亚氮排放因子时遵循以下原则：

**符合产排机理：**工艺类型的排放强度需与氧化亚氮的产生和排放机理相一致；

**具备数据支持：**排放因子的数值需基于国内实测项目数据的支持；

**覆盖主要工艺：**所选工艺类型需覆盖污水处理领域的主要工艺类型，以确保标准的广泛适用性。

综上，本标准按照推流式活性污泥工艺、完全混合式污水处理工艺及生物滤池工艺对氧化亚氮因子进行分类。其中：推流式活性污泥工艺包括CAS、AAO、AO、r-AAO、多级AO、MBR、SBR、CASS、CAST、Unitank等；完全混合式活性污泥工艺工艺包括：Carrousel、Orbal等。氧化亚氮排放因子根据生态环境部碳排放监测试点成果确定。如表A.2 所示。

表A.2 推流式活性污泥处理设施氧化亚氮排放因子

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 项目名称 | 监测数据**（kg N2O-N/t TNRe）** |
| 1 | 北京 | 5.20 |
| 2 | 上海A | 6.43 |
| 3 | 上海B | 5.02 |
| 4 | 深圳 | 4.98 |
| 5 | 平均值 | 5.55 |

由于完全混合式活性污泥工艺及生物滤池工艺在国内尚未开展系统性测试，编制组选取包含上述两种工艺的典型污水处理设施开展实测研究，如表A.3。

表A.3 完全混合式活性污泥处理及生物滤池氧化亚氮排放因子

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 监测时间 | 完全混合式**（kg N2O-N/t TNRe）** | 生物滤池**（kg N2O-N/t TNRe）** |
| 1月 | 0.468  | 26.716  |
| 2月 | 0.245  | 19.403  |
| 3月 | 0.289  | 11.501  |
| 4月 | 0.794  | 0.421  |
| 5月 | 1.373  | 3.016  |
| 6月 | 1.209  | 9.869  |
| 7月 | 0.969  | 15.613  |
| 8月 | 0.627  | 1.166  |
| 9月 | 1.601  | 3.301  |
| 10月 | 0.197  | 3.447  |
| 11月 | 0.622  | 33.344  |
| 12月 | 0.661  | 50.213  |
| 平均值 | 0.755  | 14.834  |

A.2 污泥处理过程直接排放因子

A.2.1 污泥厌氧消化过程甲烷逸散因子的确定

对消化池、沼气系统这样的大型构筑物，需采用移动示踪气体弥散法（MTDM）、逆弥散模拟法(IDMM)、径向羽流测绘（RPM）等方法。我国在此领域尚缺少可靠的监测研究。因此，本标准采用文献调研数据确定消化逸散的排放因子。

IPCC提出的消化系统甲烷逸散因子范围为0%~10%，缺省建议值为5%。编制组对相关文献调研情况如表A.4所示，由于部分样本值出现显著偏离，故采用中位值作为排放因子。

表A.4 污泥厌氧消化设施甲烷排放因子调研情况[11-21]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **混凝土设施** | **双膜气柜** |
| 样本数 | 11 | 39 |
| 平均值 | 0.366% | 0.150% |
| 中位值 | 0.278% | 0.016% |

A.2.2 污泥好氧发酵过程温室气体排放因子的确定

污泥好氧发酵工艺甲烷及氧化亚氮排放因子根据北方某好氧发酵项目温室气体排放量监测数据获得，测试期内分别于春季、夏季、秋季、冬季进行取样监测，每次2个堆体，本标准推荐的缺省值根据实际监测数据，采取平均值法计算获得，各阶段甲烷排放因子如表A.5所示。

表A.5 污泥好氧发酵设施温室气体排放因子

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **监测样品** | **甲烷排放因子** | **氧化亚氮排放因子** |
| **Kg CH4/t DS** | **Kg N2O/t DS** |
| 冬季 | 0.089 | 0.464 |
| 春季 | 0.324 | 0.460 |
| 夏季 | 0.972 | 0.157 |
| 秋季 | 0.850 | 1.070 |
| 平均值 | 0.480 | 0.538 |

注：本标准中污泥好氧堆肥温室气体排放因子根据表4中的监测数据，采取平均值法计算获得。

A.2.3污泥焚烧过程温室气体排放因子的确定

污泥焚烧是一种常见的污泥稳定化、无害化处理方法，它可以将污泥体积减少约85%~95%，并杀死病原体。在污泥焚烧过程中，会产生温室气体排放，主要包括二氧化碳、甲烷与氧化亚氮。由于污泥碳为生源碳，焚烧过程产生的二氧化碳气体不增加环境的温升，因此在核算过程中不进行核算。

本标准采用实测因子，测试场景为：污泥焚烧采用一体式干化焚烧工艺，封闭污泥焚烧设施，通过除臭设施将空间逸散气体进行收集与处理。监测时，监测焚烧排气中的甲烷与氧化亚氮总量，同步监测除臭系统收集到的逸散温室气体，通过两部分温室气体排放总量分别核定甲烷与氧化亚氮排放因子。

取样点位为服务于污泥干化间、半干污泥接收间、半干污泥接收坑、半干污泥输送设备、雨污水泵房的一套臭气处理设施排放口和焚烧烟气排放口。烟气中的排放浓度利用烟气在线监测系统（CEMS）传感器测得。干化尾气一部分进入焚烧炉，一部分在干化系统内循环，因此焚烧烟气中包含一部分干化环节产生的温室气体排放。排放监测数据如表A.6所示。

表A.6 污泥干化焚烧设施温室气体排放因子

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **测试项目** | **甲烷排放因子** | **氧化亚氮排放因子** |
| **Kg CH4/t DS** | **Kg N2O/t DS** |
| 1 | 0.00092 | 0.6996 |
| 2 | 0.00520 | 0.9048 |
| 平均值 | 0.0031 | 0.802 |

A.3 药剂使用过程间接排放因子的确定

污水及污泥处理过程使用的化学药剂种类繁多，对药剂排放进行核算及管理将使企业在整个价值链上承担起减碳责任，而不仅仅是关注直接运营排放和能源使用排放，是实现低碳转型的重要环节。

本标准以国内典型污水及污泥处理工艺为例，开展药剂使用过程间接排放量试算。其中：

演算场景（一）：华北地区，污水处理工艺采用推流式工艺；污泥处理采用厌氧消化耦合深度脱水，污泥泥饼外运处置。

演算场景（二）：华东地区，污水处理工艺采用序批式工艺；污泥处理采用污泥焚烧工艺。

演算场景（三）：华中地区，污水处理工艺采用推流式工艺；污泥处理采用板框脱水工艺，污泥泥饼外运处置。

表A.7 各类药剂使用过程碳排放占比

|  |  |
| --- | --- |
|  | **排放占比** |
| 演算场景（一） | 演算场景（二） | 演算场景（三） |
| **化学药剂占总排放：** | 6.7% | 18.2% | 48.5% |
| 碳源类药剂占化学药剂 | 47.9% | 25.9% | 0.0% |
| 化学除磷类药剂占化学药剂 | 21.1% | 3.9% | 30.7% |
| 消毒类药剂占化学药剂 | 7.8% | 50.0% | 36.8% |
| 脱水类药剂占化学药剂 | 16.2% | 1.4% | 22.8% |
| 其他药剂占化学药剂 | 7.0% | 13.8% | 9.7% |

可见，使用化学药剂产生的间接排放量是污水污泥处理过程不可忽视的组成部分，水务企业在开展温室气体控排工作中应予统筹考虑，并在标准附表B.2中选择性报送。

标准编制组分析了国内主要水务企业药剂使用构成，提出主要化学药剂品类，并检索汇总药剂排放因子。污水处理企业可参考本标准核算方法及因子数据进行试算及控排管理。

参考文献

1. 中国环境保护产业协会. T/CAEPI49 污水处理厂低碳运行评价技术规范[EB/OL].
2. 哈尔滨工业大学、龙江环保集团股份有限公司. 城镇污水处理厂碳减排评估标准[EB/OL]. [2025-02-02].
3. 中国城市温室气体工作组. 中国产品全生命周期温室气体排放系数库（CPCD）[EB/OL]. [2025-02-02].
4. Wernet G, Bauer C, Steubing B, et al. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21(9): 1218-1230.
5. PRé Sustainability. Introduction to LCA with SimaPro[EB/OL]. [2025-02-02]. <https://pre-sustainability.com/files/2014/05/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>.
6. INCOPA. Life Cycle Analysis of Leading Coagulants: Executive Summary[EB/OL]. [2025-02-02].
7. 中国环境科学研究院、环境保护部环境与经济政策研究中心. 城镇污水处理厂污染物去除量协同控制温室气体核算技术指南（试行）[EB/OL]. [2025-02-02]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/201804/W020230209535120797073.pdf>.
8. 上海市排水行业协会. 上海城镇污水处理厂温室气体排放核算指南[EB/OL]. [2025-02-02]. <https://www.cssn.net.cn/cssn/productDetail/a99aac8f03d04ae83c7d7223f9103a4c>.
9. IPCC. 《2006年IPCC国家温室气体清单指南》(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)[R]. Japan: IPCC, 2006.
10. 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
11. Wechselberger V, Reinelt T, Yngvesson J, et al. Methane losses from different biogas plant technologies[J]. Waste Management, 2023, 157: 110-120.
12. Baldé H, Wagner-Riddle C, MacDonald D, et al. Fugitive methane emissions from two agricultural biogas plants[J]. Waste Management, 2022, 151: 123-130.
13. Reinelt T, McCabe B, Hill A, et al. Field measurements of fugitive methane emissions from three Australian waste management and biogas facilities[J]. Waste Management, 2022, 137: 294-303.
14. Hrad M, Huber-Humer M, Reinelt T, et al. Determination of methane emissions from biogas plants, using different quantification methods[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 326: 109179.
15. Wang S, Sahoo K, Jena U, et al. Life-cycle assessment of treating slaughterhouse waste using anaerobic digestion systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 126038.
16. Zeng J, Xu R, Sun R, et al. Evaluation of methane emission flux from a typical biogas fermentation ecosystem in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 257: 120441.
17. Reinelt T, Delre A, Westerkamp T, et al. Comparative use of different emission measurement approaches to determine methane emissions from a biogas plant[J]. Waste Management, 2017, 68: 173-185.
18. Baldé H, Vanderzaag A C, Burtt S D, et al. Methane emissions from digestate at an agricultural biogas plant[J]. Bioresource Technology, 2016, 216: 914-922.
19. Hrad M, Piringer M, Huber-Humer M. Determining methane emissions from biogas plants – Operational and meteorological aspects[J]. Bioresource Technology, 2015, 191: 234-243.
20. Westerkamp T R, Torsten; Oehmischen, Katja; Ponitka, Jens; Nauman, Karin; Nelles, Michael. KlimaCH₄ - Klimaeffekte von Biomethan: Messungen von direkten Treibhausgasemissionen an Biogasanlagen mit Methanaufbereitung[M]. Deutsches Biomasseforschungszentrum, 2023.
21. Liebetrau J, Reinelt T, Clemens J, et al. Analysis of greenhouse gas emissions from 10 biogas plants within the agricultural sector[J]. Water Science and Technology, 2013, 67: 1370-1379.