

我国垃圾填埋碳排放核算标准的编制建议

何晶晶^{1,2*}, 李晓静¹, 吕凡^{1,2}, 仇俊杰¹, 廖南林¹, 章骅^{1,2}

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

摘要: 填埋作为我国主要的垃圾处理方式之一, 是碳排放的重要来源; 编制我国垃圾填埋碳排放核算标准, 将支持碳排放统计核算体系建设, 推进碳达峰、碳中和目标进程。本文梳理了国内外垃圾填埋碳排放核算的相关标准和指南研制进展, 分析了我国垃圾填埋碳排放核算标准编制面临的挑战, 在深入讨论相关标准的基准方法、编制重点任务的基础上提出了有关发展建议。研究认为, 国际上已有的标准和指南以及提供的缺省值不完全适用于我国垃圾填埋碳排放核算的实际情况, 目前我国缺少规范统一的垃圾填埋碳排放核算方法, 也缺乏可靠的核算清单数据。为此, 针对我国填埋垃圾特征和技术现状, 提出了我国垃圾填埋碳排放核算方法、核算范围和清单的建议内容; 明晰了我国垃圾填埋碳排放核算标准编制的重点任务, 提供了适合我国垃圾填埋场景的清单数据获取方式。后续, 可充分考虑地区因素, 采用我国特征性数据, 以获得更贴合实际情况的垃圾填埋碳排放核算结果, 据此开展我国垃圾填埋碳排放核算标准的编制工作。

关键词: 垃圾填埋; 碳排放; 标准; 核算方法; 清单数据

中图分类号: X705 **文献标识码:** A

Suggestions on Landfill Carbon Emission Accounting Standards in China

He Pinjing^{1,2*}, Li Xiaojing¹, Lyu Fan^{1,2}, Qiu Junjie¹, Liao Nanlin¹, Zhang Hua^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China)

Abstract: Landfill, one of the major approaches for waste treatment in China, is a significant source of carbon emissions; compiling landfill carbon emission accounting standards in China will support the construction of a statistical accounting system for carbon emissions and promote the achievement of the carbon peaking and carbon neutrality goals. This study reviews the research progress of landfill carbon emission accounting standards and guidelines in China and abroad, analyzes the challenges faced by the development of these standards in China, and proposes relevant development suggestions based on an in-depth discussion of the baseline methodology for the standards and the priority tasks for compilation. The international standards and guidelines currently available for reference are not fully applicable to China's landfill carbon emission accounting, and there is a lack of standardized and unified landfill carbon emission accounting methodology as well as reliable accounting inventory data in China. Therefore, based on the waste characteristics and technical status of landfills in China, recommendations for carbon emission accounting methodology, scope, and inventory are proposed, priorities for the standards compilation are clarified, and approaches for obtaining inventory data applicable to China's landfill scenarios are provided. Subsequently, regional factors can be fully considered and characteristic data of China can be adopted in order to obtain landfill carbon emission accounting results that

收稿日期: 2023-11-16; **修回日期:** 2023-12-29

通讯作者: *何晶晶, 同济大学环境科学与工程学院教授, 研究方向为固体废物处理处置与资源化利用; E-mail: solidwaste@tongji.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“城市生活垃圾填埋场修复治理策略研究”(2023-HZ-22)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

are more in line with the actual situation, and the compilation of landfill carbon emission accounting standards in China can be carried out accordingly.

Keywords: landfill; carbon emission; standards; accounting methodology; inventory data

一、前言

为了积极应对全球气候变化问题,我国提出了碳达峰、碳中和(“双碳”)战略目标。相关政策文件也明确,将“双碳”纳入经济社会发展全局,推动重点领域、重点行业和有条件的地方率先达峰。垃圾处理是温室气体排放的重要来源,也是实现“双碳”战略目标的重点行业之一^[1]。在过去的40年中,垃圾填埋一直是我国生活垃圾的主要处理方式,虽然城市垃圾填埋占比从2006年的81%下降到2022年的12%,县城垃圾填埋占比相应从87%下降到42%,但相应的碳排放仍会长期存在^[2,3]。因此,减少垃圾填埋的碳排放量尤为关键,是“双碳”的重要任务之一。为了明确我国垃圾填埋的关键排放环节并针对性实施减排措施,需要核算垃圾填埋的碳排放量。

碳排放核算可以衡量人为活动导致的温室气体排放情况,是排放主体开展减排工作的必要前提,国家制定政策、实施考核的重要依据,也是世界各国实现“双碳”目标的重要基础。1990年,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)首次发布相关评估报告,提及了垃圾填埋的碳排放核算。美国国家环境保护局发布的“温室气体报告计划”要求垃圾填埋场上报年度温室气体排放量。在我国,各年度的“中国温室气体公报”也提及了垃圾填埋;但在垃圾填埋碳排放核算的实际工作中,核算方法、核算范围、监测数据、计算参数等存在差异,导致核算结果偏差大、准确性与可靠性不足。需要尽快编制标准来提高垃圾填埋碳排放的核算水平,确保相应核算结果的准确性和可比较性,进而保障垃圾填埋方向的碳达峰工作。

基于我国缺乏垃圾填埋碳排放核算标准的背景,本文梳理国内外相关标准和指南的研制现状,剖析我国垃圾填埋碳排放核算标准编制过程中面临的挑战,提出核算方法及范围的具体建议、标准编制的重点任务,以期为建立和健全我国垃圾填埋碳排放核算标准、深化未来相关标准研究等提供参考。

二、我国垃圾填埋碳排放核算标准的进展与挑战

(一) 国内外垃圾填埋碳排放核算的相关标准和指南

目前,国际上虽有ISO 14064系列标准适用于项目或组织层面的温室气体核算,但垃圾填埋碳排放核算相关的标准仍处于清单编制阶段。IPCC国家温室气体清单指南(简称IPCC指南)为世界各国编制相应国家清单提供了技术规范以及垃圾填埋碳排放的计算方法。《联合国气候变化框架公约》要求,所有缔约方按照IPCC指南编制各国(包括中国在内)的温室气体清单。

我国的清单编制活动主要分为国家和省级温室气体清单编制。国家温室气体清单编制主要参考IPCC指南,我国已提交《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》(2004年)、《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》(2012年)、《中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报》(2018年)。省级温室气体清单编制是在IPCC指南的基础上,以国家发展和改革委员会应对气候变化司编写的《省级温室气体清单编制指南》(2011年)为指导。

《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》(2021年)提出了10项主要任务,涵盖规范垃圾填埋处理设施建设、完善全过程监测监管能力建设,也将垃圾填埋碳排放核算纳入该建设体系。《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》(2022年)提出,组织制定和修订电力、钢铁、有色、建材、石化、化工、建筑等重点行业碳排放核算方法及相关国家标准,推动全国碳市场的进一步发展。我国已有《温室气体排放核算与报告要求》(GB/T 32151)系列标准、《工业企业温室气体排放核算和报告通则》(GB/T 32150—2015)共13个现行推荐性国家标准,24个行业/企业温室气体排放核算方法与报告指南,尚未发布垃圾填埋碳排放核算的相关标准。

(二) 我国垃圾填埋碳排放核算标准编制面临的挑战

1. 核算方法及范围有待确定

近年来,我国“双碳”相关的重大规划提出,建立统一规范的碳排放统计核算体系。《碳监测评估试点工作方案》(2021年)将废弃物处理列为重点行业。《甲烷排放控制行动方案》(2023年)提出的重点任务之一即建立CH₄排放核算、报告和核查制度,推动垃圾填埋场等大型排放源定期报告CH₄排放数据。

我国的国家温室气体清单编制和报告的范围与IPCC指南划分基本相同,其中垃圾填埋CH₄产生量的计算采用一阶降解动力学方程。然而,该方案仅提供了权威数据的收集原则,没有具体的计算参数和方法。《省级温室气体清单编制指南》中的填埋CH₄排放采用质量平衡法进行计算,虽有较为详细的计算过程,但局限于垃圾填埋的直接排放,没有涉及填埋场建设、运营等间接排放以及能源回收利用的碳减排。对于单个填埋场的碳排放,目前缺少明确的核算方法及范围。

2. 获取清单数据有待明确

垃圾填埋碳排放核算需要获取垃圾填埋场当前和历史的特定数据,也需选择合适的计算参数(取决于垃圾性质和填埋场条件^[4,5])。《中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报》指出,填埋排放因子应采用本国数值,结合历史资料与填埋场实际调研来确定符合我国实际情况的相关参数;但没有提供具体的计算参数。《省级温室气体清单编制指南》提供了填埋相关参数的推荐值,但大多源自于IPCC指南中的缺省值。

IPCC指南提供的参数多为发达国家的现场实测数据。鉴于填埋过程的环境影响受生活垃圾性质、填埋技术、管理水平等因素的影响,直接将发达国家的研究成果应用于我国生活垃圾填埋,可能存在不适应甚至造成颠覆性错误。这是因为,不同国家的气候条件差异显著,环境温度、降水量也会直接影响垃圾堆填区的含水量和温度。垃圾的物理组成决定其降解速率和填埋气体产量,对填埋场的温室气体排放有着重要影响^[6];生活垃圾性质受居民消费习惯、经济发展状况、能源使用结构、管理政策导向等因素的影响,在地区和时间上差异性很大。

与发达国家存在明显差异的是,我国混合垃圾的含水率通常较高^[7],以厨余类为主的易降解组分占比超过50%^[8]。垃圾性质会影响温度、pH、微生物等填埋条件。垃圾降解的最佳pH范围是5.6~8,最佳温度范围为22~45℃;堆体温度、pH、含水率通过影响堆填区的微生物活性和有机物降解率来引起填埋气体产量的差异^[9]。当填埋技术处于不同发展阶段时,填埋垃圾的单位碳排放量可从427~703 kg CO₂-eq(露天堆置)变化至578~954 kg CO₂-eq(没有填埋气收集的卫生填埋场)、407~659 kg CO₂-eq(具有火炬系统的卫生填埋场)、220~321 kg CO₂-eq(填埋气回收利用的卫生填埋场)^[9]。

三、我国垃圾填埋碳排放核算标准的方法选择与范围率定

(一) 垃圾填埋碳排放核算标准的方法选择

编制我国垃圾填埋碳排放核算标准,首要工作是围绕核算目标选择合适的核算方法,以标准化核算流程、获取可靠且有可比较性的核算结果。目前,用于垃圾填埋碳排放核算的主流方法有IPCC指南方法、清洁发展机制(CDM)方法、生命周期评价(LCA)方法。

IPCC指南是编制国家温室气体清单的基础^[10,11],在估算垃圾填埋场的CH₄排放量方面提供了质量平衡方法、一阶衰减(FOD)模型方法;前者假设所有CH₄都在垃圾填埋当年释放,根据恒定的经验参数估计一个国家的CH₄总排放量,适用于比较不同垃圾处理方式的CH₄排放潜力;后者假设垃圾中的可降解有机物在数十年内缓慢降解,动态估算填埋过程中的CH₄年排放量,可用于比较垃圾填埋过程中不同年份的CH₄排放情况。

CDM方法是对IPCC指南方法的继承与发展,引入了基准线情形的碳排放计算;也选用过FOD模型来估算CH₄排放量,能够针对减排量进行年度或月度核算,仅适用于计算基准线排放^[12]。

LCA方法用于核算全过程直接相关的能量和物质(如原材料、污染物)的输入/输出,根据排放量计算造成的环境负荷^[13];不仅可以进行碳排放计算,还能够定量评价多个环境影响类别。一般认为,LCA方法是检验垃圾管理系统环境绩效的最全面、最可靠手段^[14],但计算过程较为复杂,设定

的系统边界带有一定的主观性。为此，在垃圾填埋碳排放计算过程中，通常采用质量平衡方法计算 CH_4 排放量^[6]。在核算范围相同的情况下，FOD 模型方法、LCA 方法在评估 100 年周期的垃圾填埋碳排放时可得到相似的结果，但在具体评估每年碳排放情况时存在不可忽视的差异^[15]。

整体上，学术界普遍接受 IPCC 指南方法，也优选 IPCC 指南方法作为应用基础^[4]，这是因为该方法表述简单、易于应用、便于修正改进。然而，IPCC 指南提供的是自上而下的大尺度核算方法，适用于估算宏观层面上的垃圾填埋场排放量；虽然在单一垃圾填埋场上开始有研究应用，但因方法的局限性导致计算结果与实际情况存在较大的偏差^[16]。此外，国内外的填埋条件存在显著区别，带来了温室气体排放源上的差异。为了提高我国垃圾填埋碳排放核算的数据准确性与可靠性，垃圾填埋碳排放核算标准应在 IPCC 指南方法的基础上进一步优化，考虑我国填埋与其他国家的差异并结合生命周期观点来明确核算范围，以利于填埋主体按照标准要求进行可靠核算，确保不同填埋主体核算结果具有可比较性。

(二) 垃圾填埋碳排放核算标准的范围率定

鉴于 IPCC 指南侧重于大尺度碳排放核算，加之国内外填埋场条件存在明显差异，我国垃圾填埋碳排放核算内容需要根据垃圾填埋实际情况，采用中国特色的垃圾性质和填埋技术特征数据，也可应用垃圾填埋碳排放的建议核算范围（见图 1）。相应

核算范围的率定主要包括填埋场建设和运营、渗滤液处理、能源回收利用部分。填埋场开挖、修复治理过程不属于垃圾填埋碳排放核算范围。

1. 纳入填埋场建设和运营过程的碳排放

填埋场在建设运营时会使用多种机械并消耗燃料能源。所用的材料和能源在制造及使用过程中会造成温室气体排放，相应的碳排放不应被忽略^[17]，需纳入相应核算范围。

2. 纳入渗滤液处理的碳排放

渗滤液处理过程中的温室气体直接排放、相关材料 and 能源的使用均会产生碳排放。受我国严格标准的约束，渗滤液处理厂普遍在传统生物处理工艺的基础上，选用膜处理工艺进行深度处理。渗滤液处理厂在处理负荷为 $470 \text{ m}^3/\text{d}$ 时，温室气体年均产生量为 $4 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ ，其中 N_2O 的贡献度 $>95\%$ ^[18]。国内 7 个具有代表性的渗滤液处理厂运营表明^[19]，处理 1 t 渗滤液可产生 $32 \sim 135 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 。

发达国家的渗滤液产率低，往往仅计算降水来源的渗滤液而忽视渗滤液处理导致的碳排放。我国的垃圾含水率高，垃圾填埋场由垃圾自产水形成的渗滤液占到相应总量的 $52\% \sim 82\%$ ^[20]。应用填埋场渗滤液的定量方法，分别计算了降雨入渗产生的渗滤液量、垃圾自含水在填埋过程中形成的渗滤液量，进而对我国 31 个城市的填埋场渗滤液进行了定量计算^[20]；按 100 年周期计量，以每吨垃圾为基准，各地区的渗滤液量为：西北地区 $280 \sim 600 \text{ L}$ ，北方地区 $670 \sim 1200 \text{ L}$ ，南方地区 $1300 \sim 3300 \text{ L}$ 。

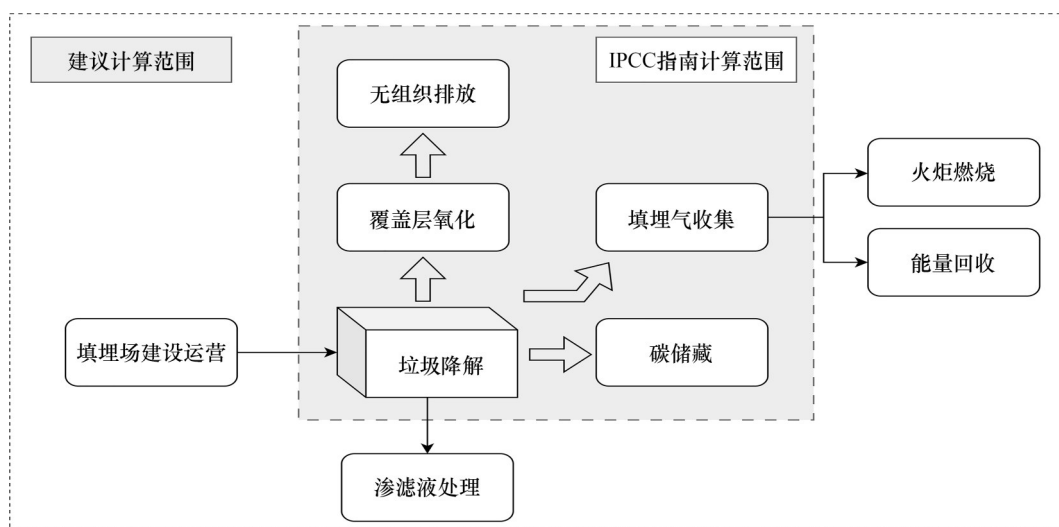


图1 垃圾填埋碳排放核算范围

此外,我国生活垃圾中有机组分的含量通常较高,填埋场中渗滤液积累会导致产酸量增加,垃圾中的有机碳可能转移到渗滤液中而不是作为填埋气释放,进一步提高了渗滤液的处理成本并限制了能源回收潜力^[20-23]。

3. 纳入填埋气用于能量回收的碳减排

对于填埋气回收,IPCC指南提供的CH₄收集效率缺省值为0,也未将能量回收纳入填埋计算范围。我国《生活垃圾填埋场填埋气体收集处理及利用工程技术规范》(CJJ 133—2009)要求,气体收集效率不宜<60%,气体利用率不宜<70%。《生活垃圾填埋场填埋气体收集处理及利用工程技术标准》(征求意见稿)(2019年)提出,设计气体收集率不宜<70%。随着相关技术的发展,填埋场的标准要求会更为严格,因而CH₄收集效率、能量回收效率等参数均需要根据填埋场的实际监测情况进行设定并纳入核算范围。

四、我国垃圾填埋碳排放核算标准编制的重点任务

针对我国垃圾填埋碳排放核算标准的编制过程(从方法选择一直到结果报告)提出全面要求,才能确保相应核算结果的可靠性和可比较性。输入数据对于碳排放核算至关重要,将直接影响核算结果。为此,我国垃圾填埋碳排放核算标准的重点任务即为明确核算所需的数据清单、做好数据质量控制工作。

(一) 数据清单

一般,根据核算方法和选定范围编制数据清单。我国垃圾填埋碳排放标准需针对我国垃圾填埋现状,明确核算所需的清单数据,采用具有地方特色的我国自有参数以提高数据质量,获得契合实际情况的碳核算结果。本研究提出了可供参考的数据清单(见表1),其中的数据可在核算范围内与单元过程相关的实际场景中收集,也可通过其他渠道获取或者计算(估计)而得出。除了记录数据的数值和单位,还应注明数据的获取方法、获取时间等影响数据质量指标的详细信息。在数据收集的过程中,需检查数据的有效性,可采用物质和能量平衡等方法来确保数据质量。

(二) 关键计算参数

填埋运行参数如购入材料和能源的量、能量回收效率等,均可通过填埋主体的台账数据来测算。填埋气产生量难以监测,可采用FOD模型进行计算^[10,11],相应计算公式如下:

$$\text{DDOC}_m = W \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times \text{MCF} \quad (1)$$

$$\text{DDOC}_{\text{De}}(T) = \text{DDOC}_{\text{De}}(T-1) \times (1 - e^{-k}) \quad (2)$$

$$\text{CH}_4(T) = 4/3 \times \text{DDOC}_{\text{De}}(T) \times F \quad (3)$$

式(1)中,DDOC_m为可厌氧降解有机碳质量(t);W为垃圾总量(t);DOC为垃圾中可降解有机碳含量(%);DOC_f为可厌氧降解有机碳比例;MCF为CH₄修正因子。式(2)中,T为清单年份,DDOC_{De}(T)为T年垃圾在填埋场中厌氧降解的有机碳质量(t);k为垃圾在填埋场中的厌氧降解速率(1/a);式(3)中,CH₄(T)为T年产生的CH₄量(t);4/3为CH₄/碳的分子量比率;F为CH₄体积分数。

FOD模型所需的关键计算参数包括:垃圾物理组成、可降解有机碳含量、厌氧降解速率、CH₄修正因子、CH₄体积分数。

1. 垃圾物理组成

有研究表明,在垃圾管理系统生命周期评价结果的不确定性方面,垃圾物理组成的贡献度为83%^[24]。世界银行将垃圾分为:食品和绿色废物、纸和纸板、塑料、橡胶和皮革、木材、玻璃、金属、其他^[25];美国国家环境保护局将垃圾分为:食品垃圾、纸和纸板、玻璃、金属、塑料、橡胶皮革和织物、木材、庭院修剪物、其他^[26];IPCC指南中的垃圾分类方式为:食品垃圾、纸和纸板、木材、纺织品、橡胶和皮革、塑料、金属、玻璃、其他^[11]。我国的《生活垃圾采样和分析方法》(CJ/T313—2009)将生活垃圾分为11类:厨余类、纸类、木竹类、纺织类、橡塑类、灰土类、砖瓦陶瓷类、玻璃类、金属类、其他、混合类。与IPCC指南相比,我国将橡胶和皮革、塑料两类合并为橡塑类,增加了灰土类、砖瓦陶瓷类、混合类,其余7类均有对应。

垃圾中的厨余类、纸类、纺织类、木竹类,在填埋场中会发生降解。灰土类(含有无法检出的有机物)也有一定的可降解有机碳含量,但在现场实验中,灰土与其他粒径较小的组分掺杂而难以开展灰土的分拣及定量。在垃圾物理组成的相关文献中,普遍认为灰土组分占比<11%^[27],但大多未能提供单独的灰土组分数据以及灰土的可降解有机碳

表1 垃圾填埋碳排放核算数据清单

数据类别	数据	说明
购入电力	购入电量 电网排放因子	包括核算范围内所有过程中的用电量
购入燃料	燃料 <i>i</i> 用量 燃料 <i>i</i> 排放因子	包括核算范围内所有过程中的燃料用量，需列出每一种类对应的用量及排放因子
购入材料	材料 <i>j</i> 用量 材料 <i>j</i> 排放因子	包括核算范围内所有过程中的材料用量，需列出每一种类对应的用量及排放因子
填埋气产生	垃圾量 垃圾物理组成 可降解有机碳含量 可厌氧降解有机碳 厌氧降解速率 CH ₄ 体积分数 CH ₄ 修正因子	可根据 IPCC 指南中提供的 FOD 模型进行计算
无组织排放	填埋气收集效率 氧化因子 N ₂ O 排放量	若填埋气 CH ₄ 浓度低，既不能回收也不能火炬燃烧处理，则视收集效率为 0 我国大多采用膜材料作为覆盖层，此时氧化因子为 0；如采用其他覆盖层材料，应提供相应依据 可根据 N ₂ O 与 CH ₄ 之间的关系获取该数据 ^[9]
填埋气收集	填埋气燃烧效率 发电量 上网电量 供热量	
碳储藏	碳储藏因子	在填埋场中的垃圾经过厌氧降解后，部分生物质碳无法降解或以腐殖质的形式长期存在于填埋场中，减少了该部分生物质碳向大气的释放，相当于起到碳减排作用，可视为碳储藏 ^[14,23]
渗滤液处理	渗滤液产生量 渗滤液收集效率 CH ₄ 排放量 N ₂ O 排放量	

含量^[28,29]。《生活垃圾填埋场填埋气体收集处理及利用工程技术规范》(CJJ133—2009)以及后续的“征求意见稿”(2019年)中均指出，灰土的可降解有机碳含量仅为3.71(湿基重量%)，对垃圾填埋碳排放的影响<3%；IPCC指南中未提供灰土的可降解有机碳含量^[10,11]。因此，为了降低获取实地采样数据成本，建议将填埋场入场垃圾分为5类：厨余类、纸类、纺织类、木竹类(包括各种木竹制品及园林垃圾)、其他类。

在不同国家、同一国家的不同地区，垃圾物理组成之间都存在明显差异；即使是同一地点的垃圾，其物理组成也会随着经济水平、社会发展等因素发生变化(见图2)。为了提高数据的准确性，建议垃

圾填埋碳排放核算采用实测法，参照《生活垃圾采样和分析方法》(CJ/T313—2009)中的方法步骤，通过现场调研来获取当地相应时期的垃圾物理组成数据；建立适用于我国现状的垃圾物理组成及化学性质数据库，包含我国不同地区的时间序列数据。

2. 可降解有机碳含量

DOC决定了垃圾在填埋过程中产生的CH₄总量。当DOC由8%变为20%时，CH₄产量会从27 kg/t-垃圾增加到67 kg/t-垃圾。DOC主要受垃圾组成及含水率的影响。我国生活垃圾中的厨余类组分占比通常>50%，而发达国家通常<50%；我国生活垃圾的含水率高于发达国家^[28]，而垃圾中的碳含量偏低。例如，我国城市生活垃圾中食品垃圾的干基含碳量

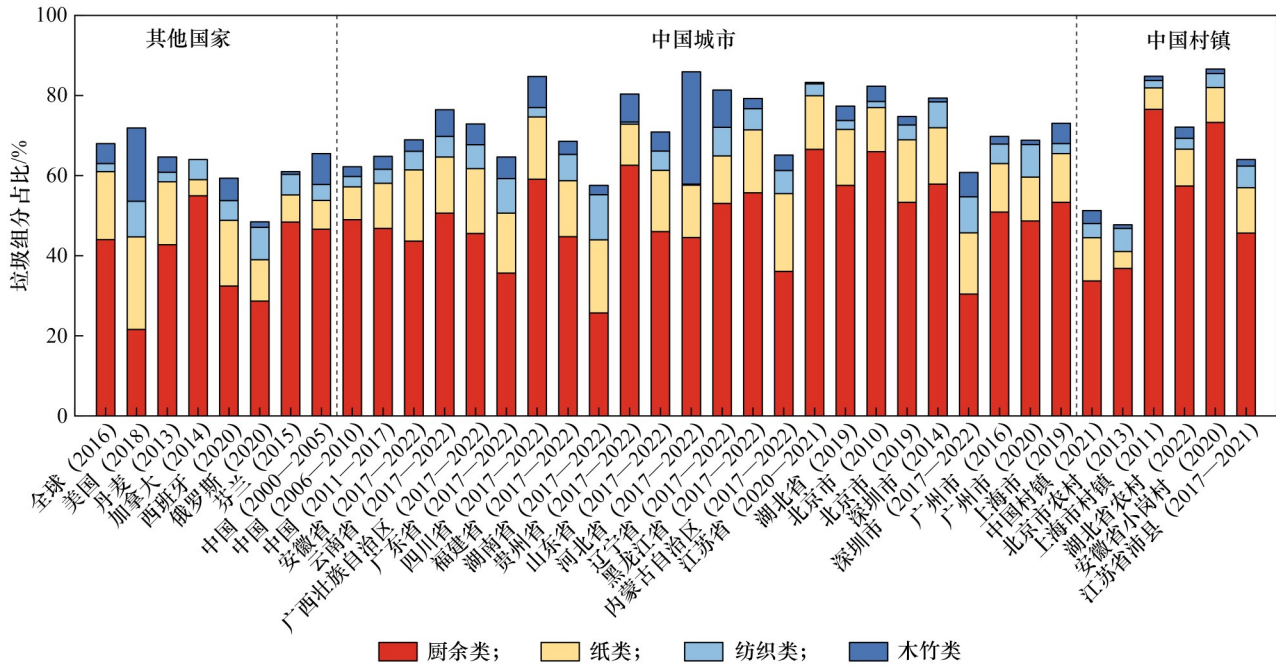


图2 不同国家和地区生活垃圾物理组成的代表性数据

注：图中数据来自参考文献[25,26,30-49]。

平均为37%，显著低于其他发达国家水平（44%~51%）^[14]。基于我国垃圾成分的调研结果，选取厨余类、纸类、纺织类、木竹类的29种物料，分别进行生物产CH₄潜力测试并获得对应的厌氧降解参数^[50]。通过剖析物料厌氧降解的行为规律，进一步验证了相关数据的可靠性^[14]。

本研究依据这些前期研究工作，进一步计算出可降解有机碳含量的建议值，提供了现有文献中基于我国场景的DOC数据以及与IPCC指南缺省值的对比情况（见表2）。尽管这些值基本上均在IPCC指南的推荐范围内，但差异明显，尤其是厨余类；相比其他文献数据，本研究的厨余类建议值处于IPCC指南建议范围的中高区段。此外，本研究基于2019年上海市的垃圾物理组成数据，提供了不同DOC取值

条件下单位填埋垃圾的CH₄产量（见图3）。

值得指出的是，在填埋场中不是所有DOC都是生物可利用的，故IPCC指南建议填埋场中的DOC_c采用缺省值0.5。相关研究按垃圾成分对DOC_c值进行加权平均的计算值为0.5~0.6^[6]，证明了IPCC指南中相应缺省值的可用性。

3. 厌氧降解速率

*k*受填埋场所在地的气候条件，特别是温度、降水、蒸散发的影响^[10,51]，不同来源的推荐*k*值分类方式有差异。本研究基于我国场景的文献数据，根据地区气候类型提出了相应的建议值（见表3）。*k*决定了CH₄产生的速度，但不影响CH₄产生总量（见图4）。因此，建议填埋主体根据所在地条件，选择合适的参数进行填埋气产生量计算。

表2 不同来源的可降解有机碳含量

数据来源	厨余类	纸类	纺织类	木竹类
IPCC指南（2006） ^[10]	8~20	36~45	20~40	39~46
CJJ 133—2009 ^[52]	7.23	25.94	30.20	28.29
文献[29]	11	24	27	33
文献[53]	4.27~10.19	23.34~28.53	27.68~32.71	21.07~35.51
本研究建议值*	12~17	30~39	27~30	18~27

注：*表示基于文献数据统计结果，采用矩估计方法，获取的95%置信水平下的置信区间^[9,14,50,54]。

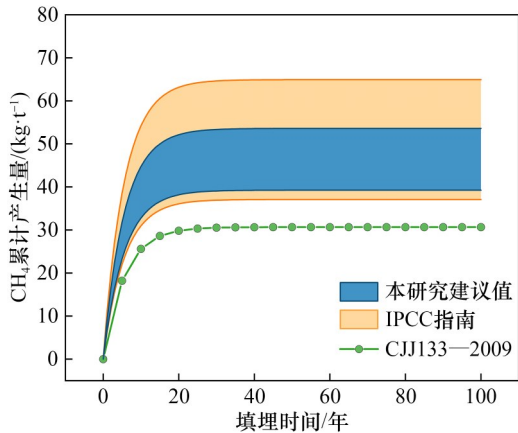


图3 不同DOC取值条件下的填埋累计产CH₄量

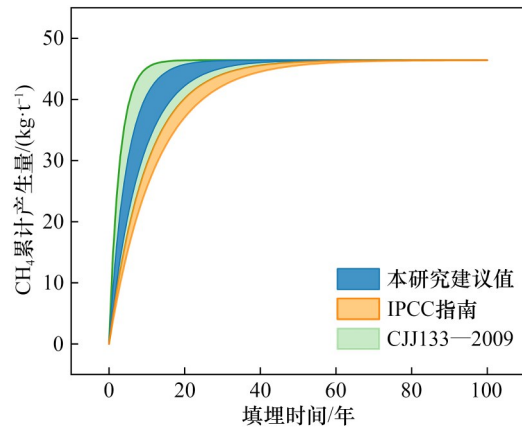


图4 不同k取值条件下的填埋累计产CH₄量

表3 不同来源的厌氧降解速率推荐值

(单位: 1/a)

数据来源	类型	推荐值 (范围)
IPCC指南 (2019) ^[11] (数值与2006年一致)	温带干燥气候	0.05 (0.04~0.06)
	温带湿润气候	0.09 (0.08~0.1)
	热带干旱气候	0.065 (0.05~0.08)
	热带湿润气候	0.17 (0.15~0.2)
CJJ133—2009 ^[51]	湿润气候	0.1~0.36
	中等湿润气候	0.05~0.15
	干燥气候	0.02~0.1
中国垃圾填埋气模型 (Version 1.1) ^[51]	寒冷干燥气候	0.04
	寒冷湿润气候	0.11
	温暖湿润气候	0.18
	文献[14]	我国南方地区
文献[27]	我国北方地区	0.04
	我国西北地区	0.02
	寒冷干燥气候	0.06
文献[54]	寒冷湿润气候	0.16
	温暖湿润气候	0.21
	我国东部地区	0.202 (0.187~0.217)
本研究建议值*	我国中部地区	0.166 (0.156~0.176)
	我国西部地区	0.180 (0.146~0.214)
	我国南方地区**	0.12~0.21
	我国北方地区**	0.04~0.16
	我国西北地区**	0.02~0.10

注: *表示基于文献数据统计结果, 采用矩估计方法, 获取的95%置信水平下的置信区间^[9,14,27,50,54]; **表示在我国南方地区年降水量>800 mm, 在我国北方地区年降水量为400~800 mm, 在我国西北地区年降水量<400 mm^[14]。

4. CH₄体积分数与CH₄修正因子

在IPCC指南的填埋场CH₄计算模型中, 填埋气中F的缺省值为50%。由于该缺省值是依据关于生物质厌氧分解的研究结果而提出的, 故F又指

在厌氧条件下填埋垃圾转化为气体的碳中CH₄碳的比例^[55]。日本的大多数垃圾填埋场、韩国50%以上的垃圾填埋场、马来西亚的部分垃圾填埋场已经按照准/微好氧填埋场模式进行建设和运营, 但相关工作在我国仍处于研究探索阶段, 工程化应用较少^[56,57]。我国卫生填埋场一般采用厌氧卫生填埋工艺, 如上海老港、杭州天子岭等项目; 我国东部、南部地区的填埋场内具有高的液位, 也不宜采用准好氧填埋模式, 因而可采用F的缺省值(50%)。但在我国早寒地区, 渗滤液产生量低, 也有准好氧填埋模式的试点和应用场景; 可根据现场实测数据来确定F的数值^[56,58]。

鉴于部分厌氧填埋场管理情况不良的现状, IPCC指南中采用MCF来校正F的数值。MCF指有机碳在填埋过程中进行厌氧分解的比例, 其值取决于填埋操作^[55]。目前, 有关MCF的现场验证研究很少, 也因不同国家的填埋管理水平存在差距而使文献研究值处于较宽的范围(0.1~1)^[16]。在IPCC指南中, 管理良好的厌氧填埋场的MCF缺省值为1, 管理不善的深层(>5 m)填埋场为0.8, 管理不善的浅层(<5 m)填埋场为0.4。若无特殊说明, 经济合作与发展组织(OECD)国家的厌氧填埋场MCF取值为1^[16]。

我国《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889—2008)规定, 生活垃圾填埋场管理机构应每天进行1次填埋场区和填埋气体排放口的CH₄体积分数监测。因此, 垃圾填埋碳排放核算标准可采用现场实测的CH₄体积分数统计结果, 该实测值的数理统计结果即IPCC指南中的F·MCF。

五、结语

垃圾填埋是碳排放的重要来源，在推进“双碳”的背景下我国亟需建立和健全统一规范的垃圾填埋碳排放核算标准。本文立足现有进展和自有研究成果，提出我国垃圾填埋碳排放核算标准的编制建议。

一是确立我国垃圾填埋碳排放核算方法与范围的定义至关重要。应在厘清国内外填埋场条件的差异的基础上，根据我国实际情况来明确垃圾填埋碳排放的核算方法与范围。建议在IPCC指南计算范围的基础上，增加填埋场建设运营、渗滤液处理与能源回收利用等部分，以将填埋场全生命周期的各个阶段纳入核算范围，确保对垃圾填埋碳排放的全面覆盖。

二是明确数据清单，做好数据质量控制工作，以此为我国垃圾填埋碳排放核算标准编制的重点任务。相关标准应当规定活动数据、排放因子及其他相关信息的确定和获取方式，质量控制和质量保证的相关要求等，确保核算结果的准确性和可比性。

三是获取我国特征性数据并建设专业数据库。在可降解有机碳含量、厌氧降解速率、CH₄体积分数等碳排放核算关键计算参数方面，系统化的本地数据依然缺乏，需加强对垃圾物理组成等重要参数的定期监测工作；在实测以外，需配套建设包括垃圾性质和填埋参数在内的专业数据库，更好汇集和管理清单数据，保障垃圾填埋碳排放核算的准确性和科学性。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: November 16, 2023; **Revised date:** December 29, 2023

Corresponding author: He Pinjing is a professor from the College of Environmental Science and Engineering, Tongji University. His major research fields include solid waste treatment, disposal and resource utilization. E-mail: solidwaste@tongji.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategies for Remediation and Management of Municipal Solid Waste Landfills” (2023-HZ-22)

参考文献

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2022: Mitigation of climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城乡建设统计年鉴 [EB/OL]. [2023-12-26]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/sjfb/tjxx/index.html>.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Yearbook of urban and rural construction statistics [EB/OL]. [2023-12-26]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/sjfb/tjxx/index.html>.
- [3] Dastjerdi B, Strezov V, Ali R M, et al. A systematic review on life cycle assessment of different waste to energy valorization technologies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290: 125747.
- [4] Delgado M, López A, Esteban-García A L, et al. The importance of particularising the model to estimate landfill GHG emissions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 325: 116600.
- [5] Mohsen R A, Abbassi B. Prediction of greenhouse gas emissions from Ontario's solid waste landfills using fuzzy logic based model [J]. *Waste Management*, 2020, 102: 743–750.
- [6] Liao N L, Bolyard S C, Lyu F, et al. Can waste management system be a greenhouse gas sink? Perspective from Shanghai, China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 180: 106170.
- [7] Yang N, Damgaard A, Scheutz C, et al. A comparison of chemical MSW compositional data between China and Denmark [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 74: 1–10.
- [8] Ren Y B, Zhang Z Y, Huang M. A review on settlement models of municipal solid waste landfills [J]. *Waste Management*, 2022, 149: 79–95.
- [9] Yang N, Zhang H, Shao L M, et al. Greenhouse gas emissions during MSW landfilling in China: Influence of waste characteristics and LFG treatment measures [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 510–521.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Hayama: The Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.
- [11] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019.
- [12] United Nations Framework Convention on Climate Change. Clean development mechanism [EB/OL]. [2023-11-10]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/mechanisms-under-the-kyoto-protocol/the-clean-development-mechanism>.
- [13] Matthews H S, Hendrickson C, Matthews D H. Life cycle assessment: Quantitative approaches for decisions that matter [M]. New York: Elsevier Inc., 2014.
- [14] 杨娜. 基于全生命周期分析的中国城市生活垃圾填埋过程环境影响 [D]. 上海: 同济大学 (博士学位论文), 2014.
Yang N. Environmental analysis of municipal solid waste landfilling in China based on life cycle perspective [D]. Shanghai: Tongji University (Doctoral dissertation), 2014.
- [15] Li X J, Lyu F, Liao N L, et al. Greenhouse gas emissions of municipal solid waste in Shanghai over the past 30 years: Dependent on the dynamic waste characteristics and treatment technologies [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 201: 107321.
- [16] Krause M J. Intergovernmental panel on climate change's landfill methane protocol: Reviewing 20 years of application [J]. *Waste Management & Research*, 2018, 36(9): 827–840.

- [17] Yang N, Damgaard A, Lyu F, et al. Environmental impact assessment on the construction and operation of municipal solid waste sanitary landfills in developing countries: China case study [J]. *Waste Management*, 2014, 34(5): 929–937.
- [18] Wang X J, Jia M S, Chen X H, et al. Greenhouse gas emissions from landfill leachate treatment plants: A comparison of young and aged landfill [J]. *Waste Management*, 2014, 34(7): 1156–1164.
- [19] Zhang L Y, Bai H, Zhang Y W, et al. Life cycle assessment of leachate treatment strategies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(19): 13264–13273.
- [20] Yang N, Damgaard A, Kjeldsen P, et al. Quantification of regional leachate variance from municipal solid waste landfills in China [J]. *Waste Management*, 2015, 46: 362–372.
- [21] Qian Y F, Hu P F, Lang-Yona N, et al. Global landfill leachate characteristics: Occurrences and abundances of environmental contaminants and the microbiome [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 461: 132446.
- [22] Ma S J, Zhou C B, Pan J J, et al. Leachate from municipal solid waste landfills in a global perspective: Characteristics, influential factors and environmental risks [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 333: 130234.
- [23] Barlaz M A. Carbon storage during biodegradation of municipal solid waste components in laboratory-scale landfills [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(2): 373–380.
- [24] Bisinella V, Götz R, Conradsen K, et al. Importance of waste composition for life cycle assessment of waste management solutions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 1180–1191.
- [25] Kaza S, Yao L S, Bhada-Tata P, et al. What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050 [R]. Washington DC: World Bank Group, 2018.
- [26] United States Environmental Protection Agency. Advancing sustainable materials management: 2018 fact sheet [R]. Boston: United States Environmental Protection Agency, 2020.
- [27] Niu X X, Wang S Z, Niu Y C, et al. Improvement and optimization for the first order decay model parameters at typical municipal solid waste landfills in China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2023, 14(4): 605–614.
- [28] 杨娜, 邵立明, 何晶晶. 我国城市生活垃圾组分含水率及其特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(3): 1033–1038.
- Yang N, Shao L M, He P J. Study on the moisture content and its features for municipal solid waste fractions in China [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(3): 1033–1038.
- [29] Cai B F, Liu J G, Gao Q X, et al. Estimation of methane emissions from municipal solid waste landfills in China based on point emission sources [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 5(2): 81–91.
- [30] Edjabou M E, Jensen M B, Götz R, et al. Municipal solid waste composition: Sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation [J]. *Waste Management*, 2015, 36: 12–23.
- [31] Guérin J É, Paré M C, Lavoie S, et al. The importance of characterizing residual household waste at the local level: A case study of Saguenay, Quebec (Canada) [J]. *Waste Management*, 2018, 77: 341–349.
- [32] Peula F J, Martín-Lara M Á, Calero M. Effect of COVID-19 pandemic on municipal solid waste generation: A case study in Granada City (Spain) [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2023, 25(4): 2543–2555.
- [33] Sereda T G. Study of the morphological composition of municipal solid waste in the Perm Region [C]. Tokyo: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021.
- [34] Liikanen M, Sahimaa O, Hupponen M, et al. Updating and testing of a finnish method for mixed municipal solid waste composition studies [J]. *Waste Management*, 2016, 52: 25–33.
- [35] Zhu Y L, Zhang Y X, Luo D X, et al. A review of municipal solid waste in China: Characteristics, compositions, influential factors and treatment technologies [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23(5): 6603–6622.
- [36] 王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 等. 近 5 年我国部分城市群生活垃圾特性 [J]. *环境科学*, 2023, 44(11): 6421–6432.
- Wang X B, Liu A Q, Zhong H Q, et al. Characteristics of municipal solid waste in some urban agglomeration in the past five years [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(11): 6421–6432.
- [37] 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 等. 基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 [J]. *环境科学*, 2022, 43(12): 5861–5872.
- Zhang T, Zheng J W, Sun Y C, et al. Environmental benefit analysis of municipal solid waste typical disposal scenarios in Zhangjiagang City based on classification [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(12): 5861–5872.
- [38] Zhou C B, Ma S J, Yu X, et al. A comparison study of bottom-up and top-down methods for analyzing the physical composition of municipal solid waste [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2022, 26(1): 240–251.
- [39] Wang H, Wang C M. Municipal solid waste management in Beijing: Characteristics and challenges [J]. *Waste Management & Research*, 2013, 31(1): 67–72.
- [40] 温冬, 郑风才, 王明飞. 垃圾分类政策实施后对北京市现有焚烧设施的影响及对策 [J]. *环境卫生工程*, 2020, 28(5): 88–92.
- Wen D, Zheng F C, Wang M F. Impact and measures on the existing incineration facilities in Beijing after the waste classification policy implementation [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2020, 28(5): 88–92.
- [41] 深圳市环境卫生管理处, 华中科技大学环境学院. 2014 年深圳市生活垃圾基础数据统计与分析 [EB/OL]. (2014-11-20)[2023-09-25]. <https://www.wdu.edu.cn/gljg/jckb/smjs/201706/P020170601444560341608.pdf>.
- Shenzhen Environmental Hygiene Management Bureau, Huazhong University of Science and Technology. Statistics and analysis of basic data on domestic waste in Shenzhen in 2014 [EB/OL]. (2014-11-20)[2023-09-25]. <https://www.wdu.edu.cn/gljg/jckb/smjs/201706/P020170601444560341608.pdf>.
- [42] Tang J F, Wei L Z, Su M H, et al. Source analysis of municipal solid waste in a mega-city (Guangzhou): Challenges or opportunities? [J]. *Waste Management & Research*, 2018, 36(12): 1166–1176.
- [43] 广州市城市管理和综合执法局. 广州市城市管理和综合执法局关于 2020 年广州市生活垃圾组成和性质抽样调查结果的公告 [EB/OL]. (2021-04-12)[2023-09-27]. http://cg.gz.gov.cn/zwgk/tzgg/content/post_7225398.html.
- Guangzhou Urban Management and Comprehensive Law Enforce-

- ment Bureau. Announcement of the Guangzhou Urban Management and Comprehensive Law Enforcement Bureau on the results of the sampling survey on the composition and nature of domestic waste in Guangzhou in 2020 [EB/OL]. (2021-04-12)[2023-09-27]. http://cg.gz.gov.cn/zwgk/tzgg/content/post_7225398.html.
- [44] 袁续胜, 孟棒棒, 黄慧, 等. 基于我国典型村镇生活垃圾特性的利用处置途径分析 [J]. 环境工程, 2023, 41(3): 216–221.
- Yuan X S, Meng B B, Huang H, et al. Analysis of utilization and disposal methods of typical rural solid waste in China based on its characteristics [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(3): 216–221.
- [45] 岳波, 张志彬, 黄启飞, 等. 我国6个典型村镇生活垃圾的理化特性研究 [J]. 环境工程, 2014, 32(7): 105–110.
- Yue B, Zhang Z B, Huang Q F, et al. Study on the physico-chemical properties of living solid waste in several typical villages and towns in China [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(7): 105–110.
- [46] 谭和平, 胡建平, 吴冰思, 等. 上海村镇生活垃圾分类收集模式与配套设施设置初探 [J]. 环境卫生工程, 2015, 23(5): 57–59, 62.
- Tan H P, Hu J P, Wu B S, et al. Domestic waste classification collection mode and supporting facilities in Shanghai rural area [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2015, 23(5): 57–59, 62.
- [47] 黄凯葳. 基于生命周期方法的农村生活垃圾碳减排潜力研究——以湖北省为例 [D]. 武汉: 华中农业大学 (硕士学位论文), 2022.
- Huang K W. Study on carbon reduction potential of rural household waste based on life cycle method: A case study in Hubei Province [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University (Master's thesis), 2022.
- [48] 吴莉鑫, 薛映, 虞文波, 等. 南方多雨地区村镇垃圾理化特性分析及对比研究 [J]. 环境卫生工程, 2021, 29(6): 59–66.
- Wu L X, Xue Y, Yu W B, et al. Analysis and comparative study on physicochemical characteristics of rural waste in rainy areas of southern China [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021, 29(6): 59–66.
- [49] Liao N L, Lyu F, Zhang H, et al. Life cycle assessment of waste management in rural areas in the transition period from mixed collection to source-separation [J]. *Waste Management*, 2023, 158: 57–65.
- [50] Zheng W, Phoungthong K, Lyu F, et al. Evaluation of a classification method for biodegradable solid wastes using anaerobic degradation parameters [J]. *Waste Management*, 2013, 33(12): 2632–2640.
- [51] User's manual China landfill gas model, version 1.1 [EB/OL]. (2009-05-10)[2023-11-15]. https://globalmethane.org/documents/models/pdfs/UsersManualChinaLFGmodel_v1.1-eng.pdf.
- [52] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾填埋场填埋气体收集处理及利用工程技术规范: CJJ 133—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for projects of landfill gas collection treatment and utilization: CJJ 133—2009 [S]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co., Ltd., 2010.
- [53] 高庆先, 杜吴鹏, 卢士庆, 等. 中国典型城市固体废物可降解有机碳含量的测定与研究 [J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 10–15.
- Gao Q X, Du W P, Lu S Q, et al. The measurement and research of degradable organic carbon of municipal solid waste in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(3): 10–15.
- [54] 郑苇. 城市固体废物中可生物降解组分在填埋环境中的转化特征研究 [D]. 上海: 同济大学 (博士学位论文), 2014.
- Zheng W. Transformation and fate of biodegradable components in municipal solid waste under landfill environment [D]. Shanghai: Tongji University (Doctoral dissertation), 2014.
- [55] Kim R H, Lee N H, Yoon S P, et al. Considerations on the methane correction factor and fraction of methane parameters in the IPCC first-order decay model for active aeration landfills [J]. *Waste Management*, 2023, 169: 232–242.
- [56] 蒲红霞, 邵立明, 张根升, 等. 准好氧填埋在旱寒地区工程化试验 [J]. 环境卫生工程, 2023, 31(2): 8–14.
- Pu H X, Shao L M, Zhang G S, et al. Practical application research of semi-aerobic landfill in arid and cold regions [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2023, 31(2): 8–14.
- [57] Ritzkowski M, Stegmann R. Landfill aeration worldwide: Concepts, indications and findings [J]. *Waste Management*, 2012, 32(7): 1411–1419.
- [58] 胡泸丹, 邵立明, 蒲红霞, 等. 旱寒黄土区渗滤液灌溉蒸发影响因素初探 [J]. 环境卫生工程, 2022, 30(6): 1–5, 10.
- Hu L D, Shao L M, Pu H X, et al. Preliminary study on influencing factors of leachate irrigation evaporation in arid loess area [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2022, 30(6): 1–5, 10.