



Environmental
Defense
Fund



乳业甲烷核算

基于企业温室气体清单开展乳业甲烷排放核算指南

美国环保协会
Pure Strategies Inc.



扫描下载电子版报告

CH₄



CH₄

乳业甲烷核算

基于企业温室气体清单开展乳业甲烷排放核算指南

作者

美国环保协会

Vrashabh Kapate

Katie Anderson

Pure Strategies Inc.

Ariella Sela

Cora Kerber

Lou Tarricone

译者

美国环保协会

裘 盈

孙 芳

史毓心

高 霁

中国农业大学

王 蔚

中国农业科学院

董利锋

李佳艺

美国环保协会

美国环保协会（Environmental Defense Fund, EDF）是著名的国际非营利性环保组织，成立于1967年，总部位于纽约，目前拥有超过350万名会员，拥有专业团队共计1000余人。美国环保协会聚焦的领域包括气候、能源、生态、健康、海洋等，在全球30余个国家和地区开展工作。美国环保协会自成立以来，一直致力于为减少温室气体排放提供创新性的解决方案，以应对我们这个时代所面临的巨大挑战——气候变化。



乳业甲烷行动联盟

乳业甲烷行动联盟（Dairy Methane Action Alliance, DMAA）是一项旨在加快乳业甲烷减排行动，并提高乳业甲烷排放透明度的全球倡议。加入该开创性倡议的成员公司承诺，开展乳业供应链甲烷排放核算和公开披露工作，并发布和实施全面的甲烷减排行动计划。美国环保协会和非营利性可持续发展组织 Ceres 将提供帮助确保成员公司顺利实现主要阶段性目标。



至本指南出版之时，加入 DMAA 的成员公司包括贝勒集团（Bel Group）、三叶草索诺玛（Clover Sonoma）、达能（Danone）、通用磨坊（General Mills）、卡夫亨氏（Kraft Heinz）、拉克塔利斯美国公司（Lactalis USA）、雀巢（Nestlé）、星巴克（Starbucks）。



Pure Strategies Inc.

Pure Strategies 成立于1998年，是一家可持续发展咨询公司，致力于帮助品牌、零售商和非政府组织实现有意义的环境和社会进步。Pure Strategies 通过聚焦目标设定、有效管理策略以及重新设计产品和供应链，为企业可持续发展提供支持，实现企业和社会的价值双赢。



致谢

美国环保协会感谢以下组织为本指南做出的贡献：

贝勒集团（Bel Group）、三叶草索诺玛（Clover Sonoma）、达能（Danone）、通用磨坊（General Mills）、卡夫亨氏（Kraft Heinz）、拉克塔利斯美国公司（Lactalis USA）、雀巢（Nestlé）、星巴克（Starbucks）。



目录

前言	4
执行摘要	5
引言	7
背景	8
目的	9
乳业甲烷排放源	10
甲烷清单设置	13
清单调整	14
排放因子选择	17
生乳换算	23
生乳排放因子甲烷拆分	27
自定义排放因子（最佳）	30
模型工具（优秀）	32
文献参考值（良好）	48
不明数据来源	55
清单应用	57
识别甲烷排放热点	59
如何识别甲烷排放热点	60
识别排放热点的指标	60
常见的乳业甲烷排放热点	61
结语	62
附录	64
附录 1：食物损失排放	65
附录 2：乳品默认干物质含量	67
参考文献	72



LAURENCE RYCKEN
国际乳品联合会总干事

前言

美国环保协会始终坚定致力于通过合作推动实质性的气候行动。美国环保协会早已认识到应对乳业甲烷排放等复杂挑战需要协调行动，因此积极与各利益相关方沟通，以确保各方所制定的指南既符合行业特性，又贴合社会实际需求。美国环保协会通过促成公共和私营部门的深度协作，充分彰显了公私合作模式在有效的可持续解决方案中的关键价值。美国环保协会通过凝聚政府、企业和社会组织的力量，构建了一种全面的治理模式，使各方诉求被纳入考量，并推动所有相关方在减排行动中发挥关键作用。正是这种协同合作的精神，促使奶制品行业能够采取稳健、可行的减排措施，从而有效减少行业在全球范围内的环境足迹。

乳业在应对气候变化方面承担关键使命，不仅关系着全球环境的可持续发展，更与保障粮食安全息息相关。乳业采取积极的气候行动，不仅能改善农民生计、保障全球粮食安全，还能减少对气候的影响，可谓一举三得。近年来，乳业已在减排方面采取了一系列措施，推动甲烷减排行动更是为行业提供了重大机遇。这些措施不仅让行业能够在短期内有效降低全球气候风险，同时还增强全球粮食体系的稳定性。尽管目前公众的关注点主要集中在反刍动物的排放上，但需要澄清的是，人为排放约为全球甲烷排放总量的 60%，而其中奶牛、水牛、山羊和绵羊等主要乳源动物的甲烷排放量还不到人为甲烷排放的 15%，并且农业 / 乳业的甲烷排放源于自然生物循环，其生命周期相对较短。要最大限度地减少乳业的温室气体 (Greenhouse Gases, GHG) 排放，需要制定科学、系统的策略。以生命周期评估 (Life Cycle Assessment, LCA) 和碳足迹测算为代表的科学方法，是衡量产品从生产到消费全过程碳排放的关键工具，且已获得广泛认可。在制定相关标准和方法方面发挥了重要作用的国际乳品联合会 (International Dairy Federation, IDF)，在提供技术支持的同时对美国环保协会的指南进行了审核，确保其与国际乳品联合会第 520/2022 号公报《国际乳品联合会 全球乳业碳足迹 (Carbon Footprint, CF) 标准》保持一致。

推进有效的气候行动，离不开完善的政策监管体系，这不仅能够为关键研究提供资金支持，还能激励可持续发展的实践，并加速创新技术的应用。各利益相关方之间的协作同样重要，这正是美国环保协会一直以来积极倡导并推动的方向。我们由衷感谢他们在这项重要工作中的持续投入与合作。

Laurence Rycken
国际乳品联合会总干事



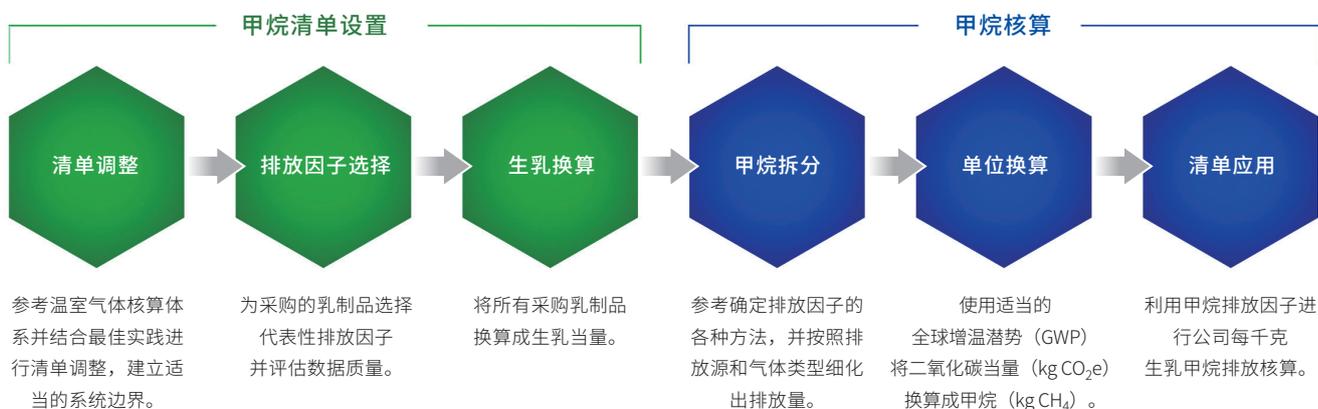
执行摘要

考虑到甲烷的高增温潜势和在大气中的短寿命特征，全球减排活动必须重点关注农业，特别是奶牛养殖业产生的甲烷排放。在气候行动方面处于领先地位的乳制品行业公司正日益认识到自身在推动甲烷减排中的关键作用。因此，他们通过测量和披露甲烷排放量、设定减排目标、评估其影响以及参与农场减排，优先减少甲烷排放。

乳业企业要实施甲烷减排措施，首要前提是全面了解自身乳业相关的甲烷排放总量。然而，现有的技术指南和核算框架仍存在空白，无法根据温室气体和价值链环节（如，肠道发酵、粪便管理、饲料）对乳业相关的排放按气体类型拆分核算。为填补这一空白，乳业甲烷行动联盟正式发布了首个面向乳业企业的技术指南，旨在指导乳业企业基于常用排放数据来源核算甲烷排放。

本指南采用循序渐进的方法，引导企业制定甲烷排放清单。首先，指南将指导企业完成必要步骤，确保其企业温室气体清单具备进行甲烷拆分的基础条件；随后，将详尽说明甲烷拆分核算的具体方法。

图 1 甲烷温室气体清单编制过程



本指南对以下常用的排放因子（Emission Factor, EF）获得方法进行了详细介绍，以便企业根据所使用的排放因子进行甲烷排放的核算。

- **自定义因子法：**企业委托开展生命周期评估并经过同行评议得出用于计算企业牛奶供应所产生排放的自定义排放因子。
- **模型工具法：**将获得的数据输入在线计算工具或模型中通过计算排放量得出排放因子。
- **文献参考值法：**引用已经发表经同行评议的研究成果中的排放因子或生命周期评估数据库中的排放因子。
- **不明数据来源法：**来源不明且缺乏数据透明度的排放因子。

选择合适的排放因子是准确的从温室气体清单中分解量化甲烷排放的核心。本指南根据不同气体类型和排放源（如肠道发酵、粪便管理、饲料生产）排放因子的可获得性，以及不同地域、技术、时间段、农场规模、生产系统和其他影响乳业排放因素的自定义数据的可获得性，建立了一套“良好 - 优秀 - 最佳”的评级系统。本指南并不建议企业使用某一特定来源的数据，而是引导企业选择最合适的排放因子来编制甲烷清单。

通过本指南的学习，企业将掌握基于温室气体清单编制甲烷清单的知识和工具。在此基础上，乳业企业可以识别企业的甲烷排放热点，进行信息公开披露，并进一步采取甲烷减排的优先行动。本甲烷核算指南是乳业甲烷行动联盟倡议发布的首份文件，旨在推动乳业甲烷减排的行动。

图 2 乳业甲烷行动联盟倡议的推进路径





引言

INTRODUCTION

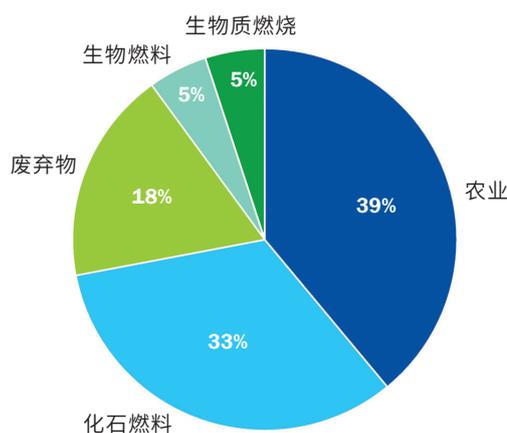
引言

背景

全球粮食系统的温室气体排放量约占人为温室气体排放量的三分之一¹。其中，畜牧业的温室气体排放量占比约占全球人为温室气体排放量的 15%²。同时，畜牧业（尤其是牛养殖）也是农业甲烷（CH₄）的最大排放源，约占人为甲烷排放量的 32%³。

具体来说，肠道发酵和粪便管理产生的甲烷占畜牧业甲烷排放量的一半以上，其中奶牛养殖的甲烷排放约占全球甲烷排放量的 10%⁴。

图 3 人为甲烷排放源⁵



在短期内，甲烷具有较高的温室效应，在被释放到大气中的前 20 年内，其吸热能力是二氧化碳的 80 倍以上。尽管甲烷对全球温升的影响巨大，但与在大气中存在数百年的二氧化碳相比，甲烷的存留时间相对较短。

相比二氧化碳，甲烷具有寿命短且增温潜势高的特征。因此，我们在努力遏制二氧化碳排放以实现《巴黎协定》提出的全球温升不超过 1.5°C 目标的同时，减少甲烷排放可以在未来几十年内快速地减缓气候变暖的速度。联合国环境规划署发布的《全球甲烷评估报告》⁶提出到 2030 年，甲烷排放量应减少至少 40-45%⁶。

肠道发酵和粪便管理产生的甲烷在乳业供应链总排放量中占显著比例，因此，乳业在减少甲烷排放影响方面具有巨大潜力。甲烷的短期减排行动是企业实现气候目标、降低气候变化系统风险以及增强运营和供应链韧性最有效的方式之一。

清晰了解甲烷排放的情况，有助于乳业企业识别并聚焦最具影响力的温室气体减排机会。要实现这一目标，关键在于将甲烷排放从其他温室气体排放中区分出来。然而，当前许多温室气体核算方法尚未具备这种能力。

目的

本指南基于以下标准开发，旨在帮助已建立温室气体清单的企业依照现有标准，对乳业甲烷的排放量按气体类型进行拆分核算：

- 国际乳品联合会第 520/2022 号公报：《国际乳品联合会 全球乳业碳足迹标准》
- 欧洲乳业协会（European Dairy Association, EDA）《乳品产品环境足迹分类规则（Product Environmental Footprint Category Rules, PEFCR）》
- 《温室气体核算体系标准》
- 美国乳业创新中心《美国乳业合作社和加工商范围三温室气体清单指南》

上述文件共同构成了计算乳制品原料及产品温室气体排放量和编制企业温室气体清单的基础框架，但未提供明确的甲烷排放核算方法。

本指南旨在弥补这一不足，帮助在供应链中大规模采购乳制品的企业精准识别乳业温室气体排放中的甲烷排放。考虑到甲烷排在乳业供应链的排放中占有很大的比例（约 60%），将甲烷减排列为优先事项对于实现企业气候目标至关重要。本指南特别针对甲烷排放的测量、报告和减排规划提供技术支撑。具体而言，本指南将：

- 为加工商 / 制造商、生产商 / 农场主等企业提供计算乳业价值链中甲烷排放的测算方法，重点关注农场水平的乳业甲烷排放。
- 支持企业编制乳业甲烷清单，以识别乳业甲烷排放热点、披露乳业甲烷排放量，并识别乳业甲烷减排的潜在机会。
- 根据不同气体类型和生产活动（如肠道发酵、粪便管理、饲料）排放因子的可获得性，以及不同生产系统和数据质量标准的自定义数据的可获得性，建立一个针对不同数据来源的乳业排放因子的分类评级框架。

如果使用本指南的企业还在编制企业温室气体清单，或者正根据温室气体核算体系《土地利用与移除指南》以及科学碳目标倡议（Science Based Targets initiative, SBTi）、《森林、土地和农业（Forests, Land and Agriculture Guidance, FLAG）指南》完善企业温室气体清单，建议参考本指南及所列出的上述相关标准，以确保其核算工作的准确性和一致性。

本甲烷核算指南是乳业甲烷行动联盟倡议发布的首个指导文件。

图 2 乳业甲烷行动联盟倡议的推进路径



乳业甲烷排放源

本指南重点关注甲烷减排机会，因此本节重点介绍“从摇篮到农场大门”范围内最主要的甲烷排放源，即肠道发酵和粪便管理。

图 4 2015 年全球奶牛养殖系统温室气体排放源⁷

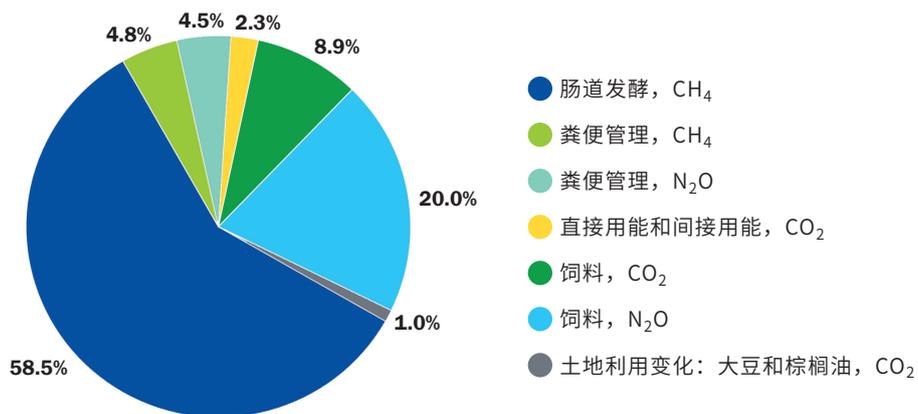


图5 全球“从摇篮到农场大门”乳业甲烷排放热点⁷



来源：比扎里 (Bizzarri, G.) . (2019年). 《气候变化与全球乳业：乳业在低碳未来中的作用》

肠道发酵

成母牛、后备牛、犊牛和公牛等所有反刍动物都具有在自然消化过程产生甲烷的共性特征。甲烷是反刍动物瘤胃发酵的副产物，瘤胃微生物可以分解难以消化的膳食纤维并产生甲烷。奶牛养殖业最大的温室气体排放源是肠道发酵，“从摇篮到农场大门”温室气体排放总量的59%来自肠道发酵。

粪便管理

粪便管理是乳业供应链中的第二大甲烷排放源，实际上粪便管理还会造成大量的氧化亚氮(N₂O)排放，氧化亚氮也是一种高增温效应的温室气体，但本指南未对氧化亚氮进行详细讨论。奶牛场粪便管理方法多样，包括液态贮存、堆肥、日常田间施肥、固液分离和厌氧消化。从粪液中分离出的固体有多种用途，例如用作牛舍的垫料。粪便贮存产生的甲烷排放量受多种因素影响，包括温度、水分、贮存时间长短、覆盖物以及粪便贮存设施的几何形状。一些农场已采用技术手段和积极的管理措施来减少粪便在贮存设施中形成和释放的甲烷量，例如加盖以捕集逸出气体，或在粪污进入贮存设施前先进行固液分离。

一般来说，粪便管理条件的含氧量会直接影响甲烷的排放量，呈现显著负相关。厌氧、缺氧的粪便管理条件（如粪便池）比好氧、富氧的条件（如粪便堆肥）产生的甲烷多。因此牧场粪便管理产生的甲烷通常少于封闭式奶牛场⁸。在全球层面，粪便管理产生的甲烷平均占农场乳业排放的5%，但在集约化经营的农场，甲烷排放量可高达19%⁹。

饲料生产

在饲料生产过程中，奶牛饲料种植所施粪便、奶牛复合饲料中的稻米应用以及农业废弃物燃烧，都会导致少量的甲烷排放。与肠道发酵和粪便管理产生的甲烷相比，这些排放源产生的甲烷排放量可以忽略不计，因此将不在本指南作详细讨论^{10, 11}。

食物损失和浪费

联合国粮食及农业组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 将“食物损失”定义为因食物供应链上游环节的决策和不当行为导致的食物数量减少或质量下降。“食物浪费”则指在食物供应链下游环节（如零售商、餐饮服务行业和消费者）造成的食物数量减少或质量下降¹²。针对全球食物供应链，每年大约损失或浪费三分之一的食物，其中有14%来自上游食物损失，17%来自下游食物浪费¹³。

乳制品加工企业上游食物损失主要发生在农场阶段。企业运营过程中的加工和生产环节也会产生食物损失。下游的食物浪费则发生在运输和配送、零售环节以及最终的消费环节。

不同供应链环节产生的食物损失和浪费对环境会产生不同程度的影响。消费者是造成食物浪费的主要因素，43%的食物浪费发生在价值链的终端环节¹⁴。当食物浪费的发生越趋向供应链下游，对环境的影响越复杂。除了处理废弃食品本身产生的排放，食品运输所投入的时间、能源和经济等资源也被一并浪费。因此，解决食物浪费问题对减少甲烷排放具有双重效益：一方面减少产奶量，另一方面减少有机废物。

更多细节和背景信息，请参阅附录1：食物损失排放。



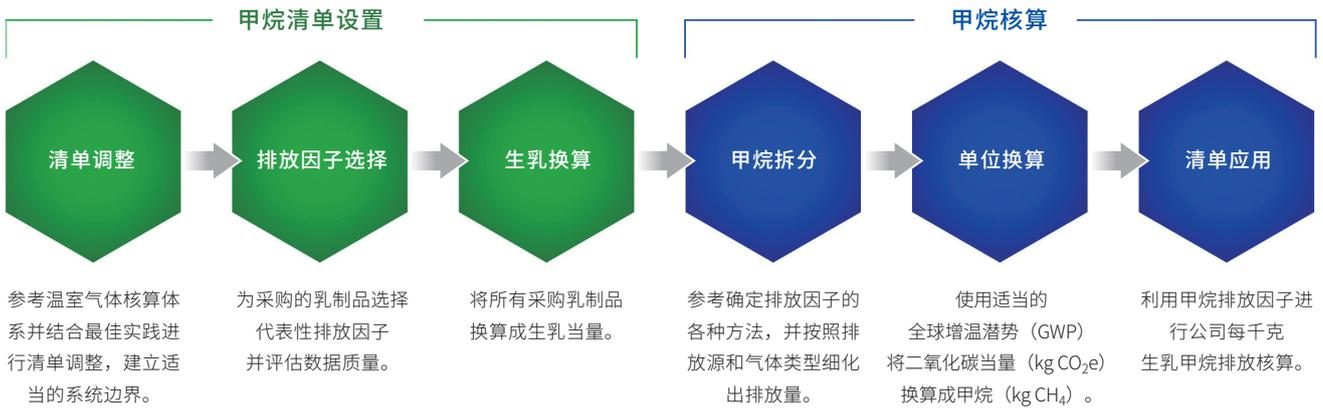
甲烷清单设置

METHANE INVENTORY SETUP

甲烷清单设置

企业在计算乳业甲烷排放足迹之前，需要先按照一定的步骤编制甲烷排放清单。图 1 给出了基于企业现有的温室气体清单编制甲烷温室气体清单的步骤。

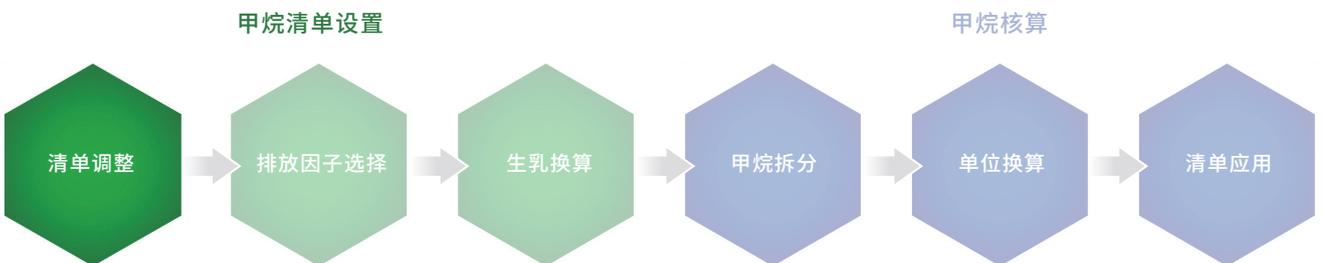
图 1 甲烷温室气体清单编制过程



即使企业的温室气体清单已经包含了甲烷排放，本指南仍建议企业在开展甲烷排放核算之前，先使用适当的生乳排放因子，并将所有乳制品换算成等量生乳，以确保所编制的清单符合温室气体核算体系。下一步，将详细介绍编制清单的流程。本节虽然不会赘述编制温室气体清单的所有步骤，但会介绍几个关键的步骤，帮助企业优化其清单编制。

清单调整

图 1.1 甲烷温室气体清单编制过程：清单调整



企业在对其甲烷排放量进行核算时，要确保企业温室气体清单符合行业的最佳实践，如温室气体核算体系企业标准和企业价值链（范围三）标准。同时，为了确保排放核算的准确性和一致性，企业还需根据其财务状况和 / 或运营控制水平，合理划定范围一、范围二和范围三的排放边界。

温室气体清单核算方法

本指南主要采用企业温室气体清单核算方法而不是生命周期评估或产品碳足迹（Product Carbon Footprint, PCF）核算方法进行乳业甲烷排放的核算。因此，可能与某些参考的标准和指南文件有所不同。

生命周期评估 / 产品碳足迹与清单核算法的主要区别在于分析过程中边界范围和时间尺度不同。生命周期评估是对产品 / 服务的全生命周期和寿命周期的环境影响（如用水和土地利用、淡水富营养化等）进行评估和报告，包括原材料获取、生产或加工、运输、使用和报废管理。产品碳足迹属于生命周期评估的一部分，其核心是量化产品全生命周期的温室气体排放，而不包括其他环境影响因素。

与之相比，温室气体清单则是对企业运营及其价值链在特定时间段内（通常为一年）的所有温室气体排放进行系统性量化记录和统计，常被用于建立排放基准线、追踪温室气体排放变化并衡量企业减排效果。由于企业需要减少全价值链的乳业甲烷排放，而不是减少某一特定产品生命周期的甲烷排放。因此，本指南采用清单的核算方法。尽管这些核算方法的系统边界不同，但它们在计算农场水平的排放时采用的是相同的方法学。获取关于乳业企业编制温室气体清单的更多信息，请参阅《国际乳品联合会 全球乳业碳足迹标准》和美国乳业创新中心《美国乳业合作社和加工商范围三温室气体清单指南》。

企业必须根据其控制水平调整研究的范围和 / 或时间尺度，产品碳足迹的研究结果则可以应用于编制企业温室气体清单。

系统边界

系统边界是生命周期评估或产品碳足迹研究框架的重要组成部分。当产品碳足迹和温室气体清单相结合利用时，最重要的是依据排放发生的具体价值链环节和企业控制水平，确保产品碳足迹排放的系统边界与温室气体清单中定义的范围和分类保持一致。

图 6 总结了乳业价值链各环节和各价值链参与者相关的排放范围。需要说明的是，虽然财务状况和运营控制水平因涉及的公司和实体有所不同，但为了帮助企业更好地理解其排放责任，图 6 展示的是典型的价值链责任分工。

图 6 不同生命周期阶段和价值链参与者的乳业甲烷排放范围

价值链参与者	采购投入 (如饲料、肥料)	牛奶生产 (包括饲料 生产、肠道发酵、 粪便管理)	运输 / 分销 (价值链环节)	加工	零售	使用 (如家庭冷藏)	报废
 农场主 / 生产商	范围三	范围一	范围三	通常为范围三 如农场主加工牛奶， 则为范围一、二	范围三	范围三	范围三
 合作社	范围三	如该主体拥有 / 经营农场，则为范围一、二； 如该主体没有或不经营农场，则为范围三	如该主体拥有 / 控制分销渠道，则为范围一、二； 如该主体没有 / 不控制分销渠道，则为范围三	如该主体拥有 / 经营加工厂，则为范围一、二； 如该主体没有 / 不经营加工厂，则为范围三	范围三	范围三	范围三
 加工商 / 生产商	范围三	如该主体拥有 / 经营农场，则为范围一、二； 如该主体没有或不经营农场，则为范围三	如该主体拥有 / 控制分销渠道，则为范围一、二； 如该主体没有 / 不控制分销渠道，则为范围三	范围一和二	范围三	范围三	范围三
 物流供应商 / 分销商	不适用	不适用	范围一和二	不适用	不适用	不适用	不适用
 零售商	范围三	如该主体拥有 / 经营农场，则为范围一、二； 如该主体没有或不经营农场，则为范围三	如该主体拥有 / 控制分销渠道，则为范围一、二； 如该主体没有 / 不控制分销渠道，则为范围三	如该主体拥有 / 经营加工厂，则为范围一、二； 如该主体没有 / 不经营加工厂，则为范围三	范围一和二	范围三	范围三
 消费者	范围三	范围三	范围三	范围三	范围三	范围一和二	范围三

“从摇篮到农场大门”边界

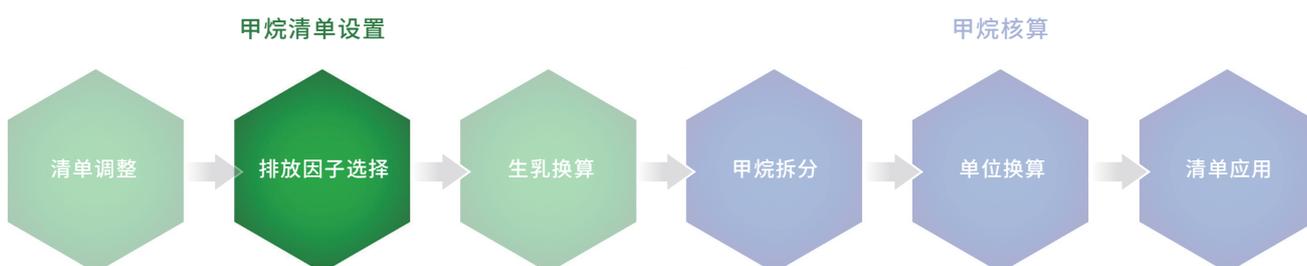
“从摇篮到农场大门”边界是核算采购牛奶产生排放时的常用系统边界。这一边界涵盖了与动物饲料生产和牛奶生产相关活动，和牛奶运离农场大门之前的所有上游排放。

在进行温室气体清单核算时（作为范围三类别 1 “采购商品和服务”排放的一部分），加工企业可能会从产品碳足迹中分离出“从摇篮到农场大门”的牛奶排放，产品碳足迹核算的是每千克（kg）生乳的碳足迹。而乳制品生命周期其他阶段产生的排放，如零售业的冷藏或消费者对产品和包装的处置）需进行单独分析，以确保对企业活动和运营控制相关假设进行合理模拟。

使用“从摇篮到农场大门”作为边界的另一个重要原因，是它允许用户衡量农场进展，并进行包括农场、养殖系统、合作社、地区和国家等不同层面的比较。需要注意的是，尽管生命周期评估和产品碳足迹还会使用其他系统边界（例如“从摇篮到工厂大门”和“从摇篮到坟墓”），但本指南主要采用的是更适用于乳业甲烷核算的“从摇篮到农场大门”边界。

排放因子选择

图 1.2 甲烷温室气体清单编制过程：排放因子选择



企业首先根据适当的边界和时间尺度对企业清单进行调整，使其与温室气体核算体系相一致，下一步企业需要为代表其供应链的外购乳品选择合适的排放因子。

排放因子和全球增温潜势

企业在依据现有的温室气体清单进行乳业甲烷排放核算时，必须选取能够用于代表价值链中乳业相关活动碳排放影响的排放因子。排放因子表示特定排放源或活动所产生的温室气体排放量。排放因子常以二氧化碳当量 (CO₂e) 表示，需要将所有相关气体根据其全球增温潜势 (Global Warming Potentials, GWPs) 进行折算。全球增温潜势是衡量单位质量 (如 1 kg) 温室气体在特定时间尺度内 (通常为 100 年或 20 年) 对全球温度相对影响的一个指标¹⁵。对于非二氧化碳温室气体用二氧化碳当量 (CO₂e) 表示¹⁶。本指南采用 100 年全球增温潜势 (GWP100)，以二氧化碳为参考气体 (二氧化碳 100 年尺度的全球增温潜势为 1)，符合国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 14067 标准、温室气体核算体系及其他指南，以及行业最佳实践^{17,18,19}。

全球增温潜势是基于甲烷在大气中的相对增温潜势和停留时间确定的，因此在不同时间尺度下，甲烷对气候的影响存在差异。例如，在 100 年的时间尺度下，甲烷对全球变暖的影响约为二氧化碳的 30 倍，而在 20 年的时间尺度下，甲烷对全球变暖的影响约为二氧化碳的 80 倍。理解了甲烷在短期内（20 年）的重要影响，企业可以知道控制全球升温所需的甲烷减排量。

另一个指标 GWP* 用于计算大气中流动气体波动幅度的影响。GWP* 不考虑现有温室气体浓度所引发的变暖，只衡量温室气体排放在一段时间内造成的升温幅度。作为一种短寿命气候污染物，甲烷的管理目标应该是通过减少排放减缓全球变暖速度，而不是追求净零变暖。因此，GWP* 不适用于企业气候减缓目标的设定。全球多方利益相关者倡议（包括全球甲烷承诺（Global Methane Pledge）和政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）均将甲烷减排视为将全球变暖控制在 2° C 以下的关键举措。

本指南提供的甲烷排放核算方法，采用的是 100 年的全球增温潜势。多个权威行业组织，如联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）、温室气体核算体系（Greenhouse Gas Protocol, GHGP）和科学碳目标倡议（SBTi）也均在其研究、指南和标准中使用了这一时间尺度。本指南引用的许多排放因子数据来源也采用 100 年全球增温潜势（如酷农场工具（Cool Farm Tool, CFT）、全球畜牧环境评估模型（Global Livestock Environmental Assessment Model, GLEAM）等）。其他排放因子也支持使用 20 年全球增温潜势计算甲烷排放量（如生命周期评估数据库）。如果乳业企业希望计算 20 年的甲烷排放影响，则需要利用适当的 GWP100 因子对温室气体排放进行分类，再用甲烷的 20 年全球增温潜势乘以其在所评估环节的甲烷排放量。

如果将所有温室气体都换算成二氧化碳当量（CO₂e），那么换算后的全球增温潜势将无法充分体现每种温室气体对全球气候变化的短期和长期影响。企业可以按甲烷原始排放千克（kg）为单位编制甲烷清单（所有全球增温潜势的数值一致），通过使用这一客观指标来减轻其甲烷影响。最后，美国环保协会建议企业针对每种非二氧化碳气体（即甲烷和氧化亚氮）设定具体目标，而不是将它们合并计算。

有关甲烷全球增温潜势的更多信息，请参阅美国环保协会《美国农林雄心气候减缓路径：2030 年展望报告》

本指南的“生乳排放因子甲烷拆分核算”部分，提供如何从常见排放因子数据来源中拆分核算乳业相关温室气体排放中甲烷的指导方法。

选择适当的排放因子是从温室气体清单中准确分解量化甲烷排放的核心。本指南提供了一个针对不同来源的排放因子进行分类的框架，支持企业基于数据的可获得性自定义乳业生产参数。本指南所探讨的排放因子包括自定义排放因子、模型工具、文献参考值、不明数据来源，以及在不同价值链环节结合多种排放因子类型的“混合排放因子”。然后采用“良好 - 优秀 - 最佳”对不同类型的排放因子进行评级。评级主要考虑因素有：分气体类型和排放源（如肠道发酵、粪便管理、饲料）的排放因子的可获得性；分地域、技术、时间段、农场规模、生产系统和其他影响乳业排放的因素的自定义数据的可获得性。有些排放因子数据可以自动按气体和 / 或价值链环节（如饲料生产、牛奶生产、运输）的排放进行分解，而另一些则需要结合多源数据进行估算。图 8 详细列出了每种排放因子类型的“良好 - 优秀 - 最佳”评级情况。需要注意的是，本指南并不指定温室气体清单必须使用的特定数据来源，而是说明如何从常用数据类型中分解量化甲烷排放，同时提供一个可持续优化的框架。

虽然本指南未指定使用特定数据来源，但如果牛奶或乳品的温室气体排放是清单的热点，本指南不建议使用基于支出的排放因子或利用经济投入产出模型来追踪温室气体排放。因为基于支出的数据可能难以追踪排放源（如肠道发酵和粪便管理），也不利于追踪排放变化趋势，从而导致难以制定具体的减排计划。

专栏 2 一手数据和二手数据

在本指南中，“**一手数据**”指直接从排放源收集的原始数据（如从农场收集的数据）。“**二手数据**”指除直接测量的特定环节排放数据外，从其他来源收集的数据（如从非农场供应商收集的数据）。当一手数据不可用或难以获取时，可使用二手数据进行补充。

政府间气候变化专门委员会（IPCC）是联合国下设机构，致力于推进针对人类活动导致的气候变化的科学研究。IPCC《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》（2019年更新，下文简称“清单指南”）为各国估算和报告各行业温室气体排放提供了核算方法。与乳业相关的内容可见于清单指南的第四卷第十章，该章节讨论了牲畜和粪便管理产生的排放，提供了估算乳业甲烷排放的方法和框架，并构成了许多排放因子数据来源所采用的基础方法。

IPCC 模型采用的是分层级的方法，各层级方法的复杂程度和一手数据要求都不同。Ball 等（2020）对 IPCC 方法层级进行了说明²⁰。

- “层级 1 模型使用基础数据，通常依赖 IPCC 推荐的国家级默认值，并非针对单个地点。这类模型常用于国家或地区层面，进行潜在气候影响的总体介绍。
- 层级 2 模型的复杂程度中等，会使用一些站点层面的数据。这类模型常用于国家或地方层面，能够对特定行业（如农业或能源）的潜在气候影响进行更详细的评估。
- 层级 3 模型最为复杂，需要大量数据，最适合提供特定地点的估算。这类模型常用于局部区域，能够对特定生态系统（如农场或流域）中管理变化的结果进行高度详细的评估。

为了计算甲烷排放量，需要将畜群数量、饲料摄入量、饲料成分、粪便排泄量和粪便管理方法等方面的详细数据输入 IPCC 公式中，各层级主要输入一手数据。下文讨论的许多排放因子数据来源都会采用 IPCC 指南的方法，尤其是层级 2 或层级 3 方法。

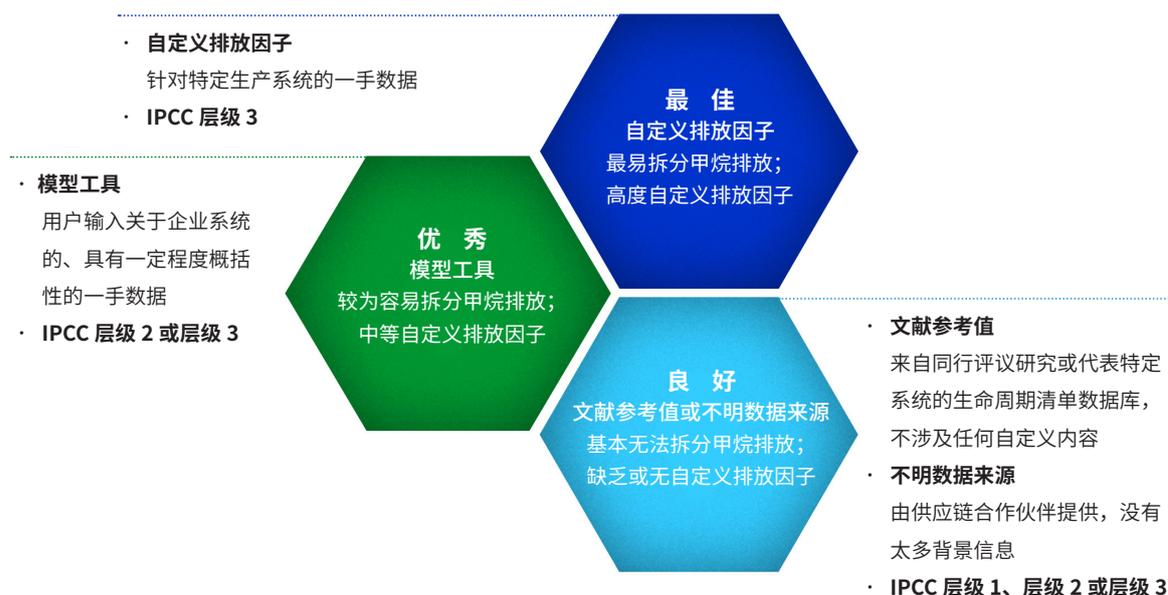
排放因子数据质量

通过质量和透明度比较高的数据不仅可以识别企业价值链中乳业甲烷排放热点，还能够为企业采取减少乳业甲烷排放行动提供依据。通过准确掌握甲烷排放源（即甲烷排放环节）和甲烷排放量，企业可以确定甲烷减排的关键领域。因此，所收集的数据越准确、越详细，公司就越易于制定针对性的甲烷减排策略。

数据评估应考虑以下标准：

- 假设的透明度
- 了解数据来源（是一手数据还是二手数据）
- 是否有充分的文件记录，以便不断改进
- 时间尺度的代表性
- 地域或区域代表性
- 技术代表性
- 生产系统的技术特征
- 取整规则的设定
- 完整性
- 对变化和不确定性进行适当管理

图 7 按“良好 - 优秀 - 最佳”评级的各类排放因子



例如，了解“奶牛场正在使用的粪便管理系统的类型”以及“农场所在地的气候条件”，可帮助农场主确定可采用的潜在粪污管理替代方案。

最后，虽然数据质量决定着甲烷排放核算和干预分析的准确性，但企业在追求高质量数据的同时，也要考虑数据收集的效率和可行性。

有关数据质量要求的更多内容，请参阅《国际乳品联合会 全球乳业碳足迹标准》第 5.1 节。

图 8 排放因子数据汇总

排放因子数据来源	排放因子类别	按气体类型	按排放源	IPCC 层级	GWP 时间尺度	GWP 数值及来源 ^a	系统边界	结果归一化
自定义因子								
自定义因子 ^b	自定义	✓	✓	3	100, 20	IPCC 第 6 次评估报告：27	从摇篮到农场大门	脂肪和蛋白质校正乳
模型工具								
CAP'2ER	模型工具	✓	✓	1, 2, 3 ^c	100	IPCC 第六次评估报告：27.2	从摇篮到农场大门	脂肪和蛋白质校正乳
COMET-Farm	模型工具	✓	✓	1, 2, 3 ^c	100	IPCC 第四次评估报告：25	从摇篮到农场大门，不受上游饲料 / 化肥的影响	畜群的排放量
Cool Farm Tool	模型工具	✓	✓	2	100	IPCC 第六次评估报告：27.9	从摇篮到农场大门	脂肪和蛋白质校正乳
FARM ES	模型工具	✓	✓	2	100	IPCC 第四次评估报告：25	从摇篮到农场大门	脂肪和蛋白质校正乳
GLEAM	模型工具	✓	✓	2	100	IPCC 第六次评估报告：27	从摇篮到农场大门	脂肪和蛋白质校正乳，生乳
Holos	模型工具	✓	✓	2	100	以 kg 甲烷为单位进行报告	从摇篮到农场大门	整个农场排放
文献参考值								
生命周期评估数据库、活动数据	文献参考值	✓	视情况而定	视情况而定 (层级 1 或层级 2)	视情况而定 (通常为 100 或 20)	视情况而定	视情况而定	视情况而定
生命周期评估研究 (学术期刊文章) ^d	文献参考值	视情况而定	视情况而定	视情况而定 (层级 1 或层级 2)	视情况而定	视情况而定	视情况而定	视情况而定
生命周期评估数据库、基于支出的数据	文献参考值	✓	✓	视情况而定 (层级 1 或层级 2)	视情况而定	视情况而定	视情况而定	美元
其他								
不明数据来源	不明数据来源	视情况而定	视情况而定	视情况而定 (层级 1 或层级 2)	视情况而定	视情况而定	视情况而定	视情况而定

^a 即使都参考 IPCC 报告，不同排放因子的 GWP 仍可能存在差异，这是由于某些研究使用了最终报告发布前的不同版本。模型工具中使用的 GWP 会随着模型的更新而改变。

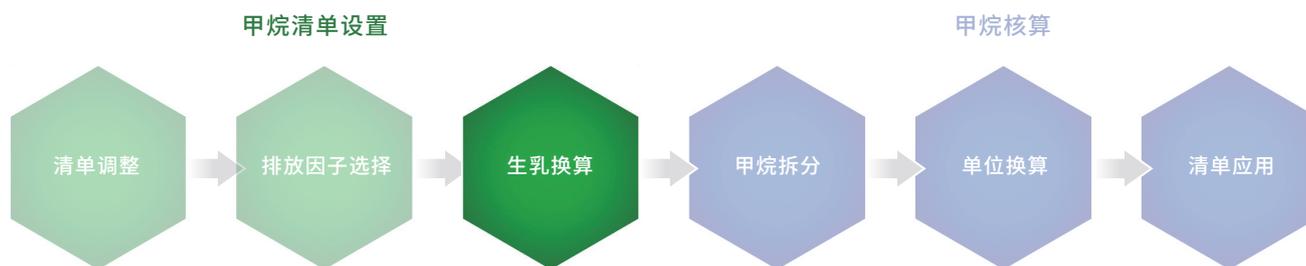
^b 自定义因子根据研究的具体设置方式而确定。表中提供的信息仅代表理想的甲烷研究设置。

^c 模型工具中层级 1、2 和 3 方法可用于模型的不同方面。例如，CAP'2ER 使用层级 3 方法计算肠道发酵产生的甲烷排放，使用层级 2 方法计算粪便管理产生的排放，使用层级 1 方法计算土壤产生的 N₂O 排放量。

^d 由于文献研究的甲烷分类能力各不相同，通常不被认为是甲烷分类的最佳排放因子数据来源。通常，文献研究会单独列出肠道发酵产生的甲烷排放，但不会单独计算粪便管理产生的甲烷排放、使用最新的 GWP100 表征因子报告结果。

生乳换算

图 1.3 甲烷温室气体清单编制过程：生乳换算



将生乳换算成脂肪和蛋白质校正乳（Fat- and Protein-Corrected Milk, FPCM）

功能单位（Functional Unit, FU）是一个用来量化所研究的产品或服务的性能的基础单位²¹。本指南以“从摇篮到农场大门”生产每千克脂肪和蛋白质校正乳为功能单位，阐述利用排放因子开展乳业甲烷排放的核算方法。以脂肪含量为 4.0%，蛋白质含量为 3.3% 的脂肪和蛋白质校正乳作为标准奶。脂肪和蛋白质校正乳主要用于比较不同生产系统的产量、资源利用率或效率。由于生乳的脂肪和蛋白质含量存在差异，脂肪和蛋白质校正乳量可能高于或低于实际的生乳量。

依据《国际乳品联合会 全球乳业碳足迹标准》第 4.3.2 节所概述的最佳实践选择脂肪和蛋白质校正乳的功能单位。基于现有温室气体清单核算甲烷排放时，乳品生产商和加工商应以“从摇篮到农场大门”每千克脂肪和蛋白质校正乳作为乳品的功能单位。对于乳品生产企业而言，该功能单位代表的是乳品生产企业的经营活动的边界，包括范围一排放和乳业生产企业经营过程中所采购的商品和服务（如采购饲料、肥料投入等）的范围三类别 1 排放。对于乳品加工企业而言，该功能单位代表所采购商品和服务产生的范围三类别 1 排放。从生乳运输到加工企业以及乳品加工过程所产生的排放，将作为加工商范围一和范围二排放纳入温室气体清单其他部分。有关温室气体排放范围的更多信息，请参见图 6——按范围和价值链参与主题分类的乳业甲烷排放以及温室气体核算体系《企业核算和报告标准》。

由于本指南使用每千克脂肪和蛋白质校正乳作为功能，因此温室气体清单必须首先将生产或采购的所有牛奶和含乳制品换算成脂肪和蛋白质校正乳标准乳量，用于区分甲烷排放与其他温室气体排放。

根据生乳已知的脂肪和实际蛋白质含量，利用“从摇篮到农场大门”排放因子进行脂肪和蛋白质校正乳换算公式见公式 1。

公式 1 利用“从摇篮到农场大门”排放因子进行功能单位（kg FPCM）计算公式

$$\text{脂肪和蛋白质校正乳 (kg)} = \text{产奶量 (kg)} \times [0.1226 \times \text{脂肪 \%} + 0.0776 \times \text{实际蛋白质 \%} + 0.2534]$$

关于脂肪和蛋白质校正乳作为功能单位的更多信息，请参阅《国际乳品联合会 全球乳业碳足迹标准》第 4.3.1 节。

加工乳制品换算成脂肪和蛋白质校正乳

干物质 (Dry Matter, DM) 或乳固体含量指乳品中除水分外的其他成分, 包括碳水化合物、蛋白质、脂肪和矿物质²²。考虑乳品生产通常以单一生乳为原料, 最终产生多种不同营养成分、不同干物质含量的乳产品。欧洲乳业协会《乳品产品环境足迹分类规则》建议乳品加工企业使用干物质含量来分析不同加工乳品的碳足迹。对于加工乳品的采购企业而言, 将干物质含量换算成生乳当量, 可以计算加工乳品相关的排放量。

乳品生产企业和品牌商在采购加工乳品 (如奶粉或奶酪) 作为加工配料或合作生产产品时, 必须考虑最终成品的碳足迹。如果无法获取所采购乳品的特定供应企业的排放因子, 可利用干物质含量估算适当的排放因子。首先, 获得牛奶供应企业的排放因子 (kg CO₂e/kg 脂肪和蛋白质校正乳)。若牛奶供应企业数据不可用, 可使用现有的乳业行业最佳排放因子 (千 kg CO₂e/kg 脂肪和蛋白质校正乳), 然后按采购乳品的干物质含量来估算牛奶排放量。排放量的计算方法是, 用乳业排放因子乘以乳品干物质与脂肪和蛋白质校正乳干物质的比值 (12.15%)²¹。更多信息和计算示例见下文公式 2。

本指南附录 1 提供了多种乳品的干物质含量供参考, 数据来自欧洲乳业协会《乳品产品环境足迹分类规则》。需要注意的是, 不同地区和 / 或数据源对脂肪和蛋白质校正乳干物质含量的定义存在差异。例如, 欧洲乳业协会认为脂肪和蛋白质校正乳全乳的平均干物质含量为 12.3%, 而国际乳品联合会则使用 12.15% 作为标准。因此, 在计算过程中需要对这些假设进行说明。此外, 将生乳加工成其他乳品过程中产生的食物损失也会造成大量温室气体排放, 因此在计算时, 企业也应考虑到这些潜在损失。

公司向消费者提供乳品排放因子时, 可以利用制造成品牛奶原料 “从摇篮到农场大门” 的排放因子、成品的干物质含量、以及加工成品所需的能源进行计算。

然后, 企业可利用自己企业的生产数据或行业数据 (如附录 1 所示) 来确定乳品生产所需的脂肪和蛋白质校正乳量, 再利用公式 2 计算乳品排放因子。

公式 2 表明了如何通过已知干物质含量得出采购乳品的排放因子, 详细示例见下文。

$$EF_{DP_i} = \left[\frac{\left[\left[\frac{DM_{DP_i}}{DM_{FPCM_x}} \right] * EF_{FPCM_x} \right] + [(E_i) * (EF_{E_i})]}{(100\% - L_i)} \right]$$

其中：

EF_{DP_i}：乳品 i 从摇篮到农场大门”的排放因子（kg CO₂e/kg DPi）

DM_{DP_i}：乳品 i 的干物质含量（以干物质百分比或干物质重量 / 产品 i 重量表示）。附录 2 提供了按不同乳品的建议默认值表。

DM_{FPCM_x}：特定乳业生产系统 x 的脂肪和蛋白质校正乳干物质含量（以干物质百分比或干物质重量 / 脂肪和蛋白质校正乳重量表示）。国际乳品联合会提供的脂肪和蛋白质校正乳干物质标准值为 12.15%²¹

EF_{FPCM_x}：特定乳业生产系统 x “从摇篮到农场大门” 脂肪和蛋白质校正乳排放因子（kg CO₂e/kg FPCM）

L_i：产品 i 的出厂损耗率

E_i：生产单位（kg）乳品 i 所需的能源

EF_{E_i}：E_i 中使用的能源排放因子（kg CO₂e/ 单位）

示例：

在这个例子中，某乳品品牌企业想计算从美国合作商采购的马苏里拉奶酪“从摇篮到农场大门”的碳足迹。

以下是已知参数和假设：

- 根据附录 2 提供的默认值，马苏里拉奶酪的干物质含量假设为 42.6%
- 根据上表中的默认值，脂肪和蛋白质校正乳的干物质假设为 12.15%
- 根据联合国粮食及农业组织从全球畜牧环境评估模型模型得出北美的排放因子，“从摇篮到农场大门”的排放因子假设为 1.13 kg CO₂e/kg FPCM
- 生产每千克马苏里拉奶酪所需的电量假定为 0.5 kWh，数据由供应商提供
- 根据 2021 年 eGRID 数据，使用美国电网的电力排放因子为 0.389 kg CO₂e/kWh
- 出厂损耗率假定为 4%，数据由供应商提供
- 所有其他固体产出物（如乳清）都供人类食用，因此抵消了部分损失
- 使用公式 2 计算每千克采购的马苏里拉奶酪（加上工厂损耗）“从摇篮到农场大门”的排放因子：

$$EF_{mozzarella} = \left[\frac{\left[\left[\frac{42.6\% DM_{mozzarella}}{12.15\% DM_{FPCM}} \right] \times 1.13 \text{ kg CO}_2\text{e/kg FPCM} \right] + [(0.5 \text{ kWh}) \times (0.389 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh})]}{(100\% - 4\% \text{ loss})} \right] =$$

4.33 kg CO₂e/kg 采购的马苏里拉奶酪

从公式的前半部分来看，按照上述规范，生产 1kg 马苏里拉奶酪大约需要 3.51kg FPCM。用脂肪和蛋白质校正乳的重量乘以脂肪和蛋白质校正乳的排放因子，即可算出马苏里拉奶酪生产所需牛奶的排放因子。公式的后半部分考虑了加工过程中产生的排放，以及生产过程中的可能发生的损失或浪费的排放。需要注意的是，为保证公式 2 的完整性，计算过程中已包括加工排放；然而，在核算“从摇篮到农场大门”的甲烷排放时，不应包括加工排放，因为乳品生产环节并不是加工阶段主要的甲烷排放源。尽管许多生产商可能无法直接获取工厂层面的损耗数据，但通过与供应企业沟通，了解这些乳品成分采购过程中的损耗情况，有助于更准确、更全面地了解乳品排放情况。

对于企业内部加工生产的乳品，生产过程中所有浪费或食物损失导致的排放，已经通过计算所有采购生乳的碳排放（而非生产成品的碳排放）体现在企业温室气体清单中。若从外部采购加工乳品，企业需要收集相关数据或估算产品生产过程中的损耗。欧洲乳业协会 乳品产品环境足迹分类规则表 45 提供了从农场到零售环节的默认损耗率，在没有一手数据的情况下，企业可以用作参考。

企业应尽量从供应商获取用于公式 2 的具体数值，以便建立最能代表其供应链的系统模型。但如果无法获得供应商方面的信息，也可以使用从文献或行业组织获得的行业平均值作为替代数据。

本指南附录 2 提供了欧洲乳业协会 乳品产品环境足迹分类规则附件 5 中不同乳品干物质含量的默认值。有关如何估算不同乳品产品碳足迹的更多信息，请参阅欧洲乳业协会 乳品产品环境足迹分类规则第 5.8.3 节。

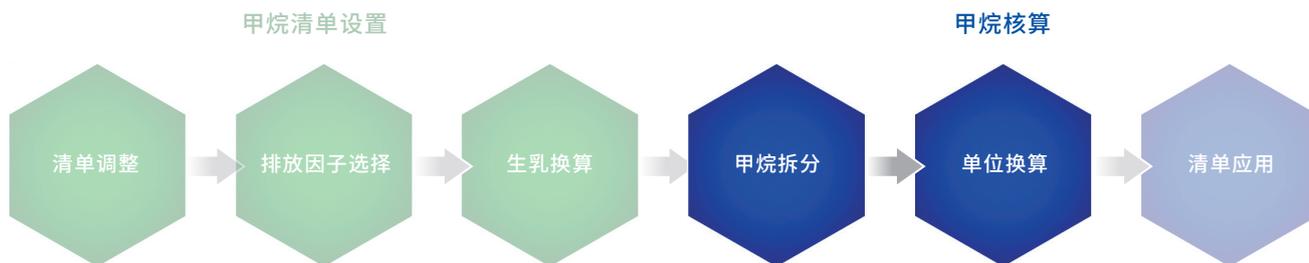


生乳排放因子甲烷拆分

METHANE DISAGGREGATION FOR RAW MILK EMISSION FACTORS

生乳排放因子甲烷拆分

图 1.4 甲烷温室气体清单编制过程：甲烷拆分和单位换算



在按照温室气体核算体系编制清单、选择排放因子并将采购乳品换算成总生乳量后，企业需要从清单使用的生乳排放因子中拆分核算甲烷排放，并将排放因子单位换算成 kg 甲烷。不同排放因子数据来源随着甲烷排放分类方法而改变。某些排放因子数据来源可直接按排放源（如，肠道发酵、粪便管理、饲料）和气体类型来分类和报告甲烷排放，而部分数据来源可能只能按其中的一项（排放来源或气体类型）进行拆分。某些排放因子数据来源缺乏分列排放所需的信息，此时需使用替代数据来估算甲烷排放量。

本指南根据排放因子的自定义程度及其分类核算甲烷能力，建立了一套通用排放因子评级系统。本章以下各节介绍了三类常见的排放因子数据来源：自定义排放因子、模型工具和文献参考值。对于排放因子不提供分类数据，或者来源不明的情况，本指南还提供了分类核算甲烷的方法学。本指南还进一步详细介绍如何将甲烷排放因子整合到企业温室气体清单中，并提供同时采用多来源排放因子数据的操作指南。

以下各节将介绍每种排放因子数据来源，以及利用每个排放因子数据来源分类核算甲烷排放的详细方法。由于排放因子通常以 kg CO₂e 为单位进行报告，因此从排放因子拆分出的甲烷排放必须将单位从 kg CO₂e 换算成 kg CH₄。专栏 4 介绍了这一换算步骤，并就使用哪些全球增温潜势提供了指导。在将排放量转换为 kg CH₄/kg FPCM 后，便可用于企业甲烷清单的编制。

IPCC 评估报告每年更新全球增温潜势，其数值可能会随着相关科学研究的进展而略有变化。自 IPCC 第二次评估报告（Second Assessment Report , SAR）开始，甲烷的 GWP100 值已从 21 变为 34。建议企业尽可能使用 IPCC 第六次评估报告中非化石（生物成因）甲烷排放的最新 GWP100 值：27²³。

在计算 CO₂e 时，不同年份发布的排放因子数据来源使用的甲烷全球增温潜势可能不一样。将 CO₂e 或排放因子换算成甲烷，必须使用排放因子数据来源一致的全球增温潜势。本指南列出了截至 2024 年每个排放因子数据来源所采用的当前全球增温潜势。但需要注意，在模型工具发布更新版本时，这些全球增温潜势可能随之变化。

如果企业希望将甲烷排放量换算回 CO₂e，建议使用第六次评估报告中的非化石 GWP100 值（GWP100 CH₄ = 27），这是基于最新科学研究得出的数据。但是，如果企业使用了不同的全球增温潜势来估算基准甲烷排放量，则应确保所有清单使用同一全球增温潜势值，以确保一致性。

换算示例如下：

$$CH_4 = (EF_{CH_4} \times FPCM) / GWP_{CH_4}$$

其中：

CH₄：甲烷排放量 (kg CH₄)

EF_{CH₄}：甲烷排放强度 (kg CO₂e/kg FPCM)

FPCM：脂肪和蛋白质校正乳总量 (kg FPCM)

GWP_{CH₄}：排放因子数据来源使用的全球增温潜势

示例：

某公司的牛奶排放因子为 1.25 kg CO₂e/kg 脂肪和蛋白质校正乳。使用本指南后续各节介绍的甲烷分类方法，可确定甲烷排放因子为 0.80 kg CO₂e/kg 脂肪和蛋白质校正乳。排放因子数据来源明确来自第四次评估报告的甲烷 GWP100 值为 25。企业希望估算其采购的 50,000kg 脂肪和蛋白质校正乳的甲烷排放量。

EF_{CH₄}：0.80 kg CO₂e/kg FPCM

FPCM：50,000 kg

GWP_{CH₄}：25

$$CH_4 = (0.80 \text{ kg CO}_2\text{e/kg FPCM} \times 50,000 \text{ kg FPCM}) / 25 = 1,600 \text{ kg CH}_4$$

要将其换算回 kg 脂肪和蛋白质校正乳，建议使用第六次评估报告中的非化石 GWP100 值（GWP100CH₄ = 27）：

$$CH_4 \text{ CO}_2\text{e} = 1,600 \text{ kg CH}_4 \times 27 = 43,200 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

自定义排放因子（最佳）

自定义排放因子提供了通过一手数据模拟计算特定农场可排放因子的方法。由于可以对甲烷排放进行全面的拆分，被认为是最佳的排放因子计算方法。提供一个自定义排放因子的应用实例供参考，例如企业可委托开展同行评估的生命周期评估，评估供应商所提供的生乳的环境影响。尽管自定义排放因子因高度自定义和其甲烷拆分能力而被认为是最佳方法，但因其数据需求量大、资源投入量多，目前尚未被大多数企业的广泛采用。

排放因子数据来源概述

自定义排放因子可以由企业内部或外部第三方制定。《国际乳品联合会 全球乳业碳足迹标准》提供了一套基于生命周期评估方法学开发排放因子的标准化流程。采用不同的自定义因子形式，可能会导致数据质量水平产生差异。某些自定义排放因子完全依靠收集一手数据来进行各方面的研究。但如果无法直接进行农场测量，也可以利用 IPCC 模型来估算甲烷排放量。

数据要求

自定义排放因子的数据要求取决于所使用的方法。针对乳品农场的甲烷排放，有多种直接测量方法，其复杂性和准确性各不相同。Bekele 等综述了各种测量方法，并对其优缺点进行了评述²⁴。对于肠道发酵，可使用定点采样方法（如 GreenFeed），该方法可在挤奶或饲喂期间对部分奶牛进行测量，以估算一定时间范围内的甲烷排放量。对于粪便管理，可以采用密闭箱法或微气象技术进行测量²⁵。

如果无法进行田间实验，可以采用 IPCC 方法进行模型模拟和估算。在选择 IPCC 模型的自定义因子时，建议采用层级 3 方法，该方法需要最多的一手数据。在计算甲烷排放自定义因子时，需要畜群数量、饲料摄入量、饲料成分、粪便排泄量和粪便管理方法等多种详细数据。

拆分方法

由于面向特定农场，自定义排放因子能够对不同排放源产生的甲烷排放进行最佳估算。在开展相关研究时，企业应按气体类型和排放源单独报告排放量，以便估算肠道发酵、粪便管理和饲料生产（如适用）产生的甲烷排放量。在使用一手数据完成估算后，可以用排放因子计算年甲烷排放量，通过甲烷排放量除以脂肪与蛋白校正乳年产量，将其用于甲烷排放清单。具体计算方法如公式 3 所示。

$$EF_{CH_4,i} = CH_{4,i} / FPCM$$

其中：

$EF_{CH_4,i}$ ：排放源 i 的甲烷排放因子 (kg CH₄/kg FPCM)

$CH_{4,i}$ ：排放源 i 基于自定义研究估算的甲烷排放量 (kg CH₄)

$FPCM$ ：脂肪和蛋白质校正乳总量 (kg FPCM)

示例：

研究发现，通过肠道发酵排放了 10,000 kg 甲烷，通过粪便管理排放了 1,000 kg 甲烷。参与研究的农场主为公司生产了 500,000 kg FPCM。不同排放源的甲烷排放因子计算如下：

肠道发酵：

$$EF_{CH_4, \text{排放因子}} = 10,000 \text{ kg CH}_4 / 500,000 \text{ kg FPCM} = 0.02 \text{ kg CH}_4, \text{排放因子} / \text{kg FPCM}$$

粪便管理：

$$EF_{CH_4, MM} = 1,000 \text{ kg CH}_4 / 500,000 \text{ kg FPCM} = 0.002 \text{ kg CH}_4, MM / \text{kg FPCM}$$

然后，该排放因子随后可用于具有类似养殖系统的供应商，从而为更广泛的生乳供应提供支持。

虽然在企业层面使用自定义因子，不如使用模型或文献参考值那样常见，但恒天然 (Fonterra)²⁶、有机谷 (Organic Valley)²⁷ 等一些企业仍通过同行评议生命周期评估应用了这一方法。自定义排放因子的高度灵活性和可定制性，可以最准确地反映公司的牛奶供应量，并完全将甲烷排放拆分。因此它也被认为是最优的排放因子数据来源。

模型工具（优秀）

模型是用于模拟系统或过程的计算工具，可以用来估算奶牛场的温室气体排放量。模型需要结合使用一手数据和二手数据，其准确性和代表性可能会因输入数据和模型的复杂程度而有所不同。乳业模型通常需要输入包括地理区域、畜群动态、饲料投入、粪便管理方法和农场能耗等数据。模型可以输出按气体（CO₂、CH₄、N₂O）和排放源（肠道发酵、粪便管理，有时也包括饲料生产）的排放量，从而便于单独核算甲烷排放。

由于模型工具可自定义并且使用一手数据，通常被认为是“优秀”的排放因子数据来源，但它也存在一定局限性。鉴于乳业系统的复杂性，模型工具必须依赖于若干假设，这些假设的准确性可能不同。模型在分配计算方法、模拟能力、系统边界以及考虑减排干预措施的能力方面存在差异。有些模型输出的结果可能需要更多数据进行补充或修正，以便更准确地反映公司的生乳供应情况。此外，部分企业或供应链在提供模型所需要一定数量的一手数据方面存在困难。尽管模型工具存在一定缺陷和局限性，但模型在不断被更新，以优化假设和计算方法，使其更符合新的气候科学和乳业模型方法。本指南的目的并非讨论各模型的局限性，而是就如何开展甲烷排放核算提供指导。

下一节将介绍常用模型工具中的甲烷排放拆分方法。以下列出的所有模型工具具备一定程度的甲烷排放拆分核算能力，因此对于希望披露甲烷排放并重点开展甲烷减排的企业来说，这些工具是有力选择。虽然这份列表并未囊括所有的乳业模型工具，但其中包括了一些乳业较为常用的工具（按字母顺序列出）。如果用户采用的模型工具未在下方列出，只要该工具能够按照气体类型和排放源显示排放结果，则可以遵循相同的甲烷分类原则。本指南的“不明数据来源”部分介绍了在模型未明确显示结果时，如何核算甲烷排放。如果企业需要使用多种模型，可以参考“清单应用”部分，了解如何整合不同模型的结果。

CAP'2ER

排放因子数据来源概述

CAP'2ER 是一款由法国开发用于评估和减少反刍动物对环境影响的工具。其计算方法符合联合国粮食及农业组织畜牧业环境评估与绩效（Livestock Environmental Assessment and Performance, LEAP）指南，并采用 IPCC 层级 1、2、3 方法。CAP'2ER 可评估“从摇篮到农场大门”的排放，作为决策支持工具，用户可通过模型模拟了解某项活动的减排潜力。

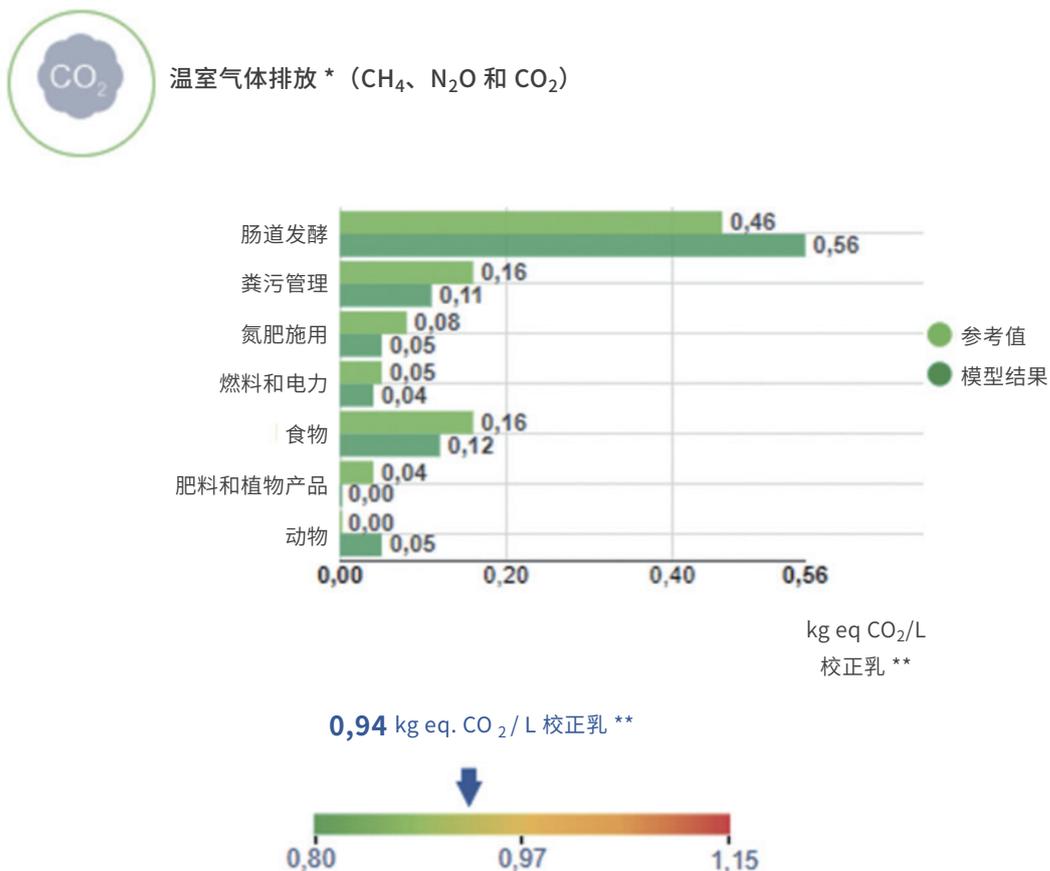
数据要求

CAP'2ER 结合一手和二手数据来计算农场总排放量。CAP'2ER 的数据输入类别包括畜群、畜舍、作物、饲料和能耗，以及畜群数量、产奶量、粪便管理、作物产量、饲料配方和农场能源使用等活动数据。

拆分方法

如图 9 所示，CAP'2ER 可直接按排放源以 kg CO₂e/L 脂肪和蛋白质校正乳为单位对甲烷排放量进行测算和报告。CAP'2ER 还可以按气体类型报告牧场层面的总排放量。CAP'2ER 中甲烷的 GWP100 为 27.2²⁸。

图9 按排放源拆分的 CAP'2ER 排放结果



肠道发酵产生的所有（100%）排放均为甲烷，单位为 kg CO₂e/L 校正乳。粪便管理产生的甲烷排放量，则为甲烷总排放量（kg CO₂e）减去肠道发酵产生的甲烷排放量（kg CO₂e），如公式 4 所示。

公式 4 拆分粪便管理甲烷排放的公式

$$Manure_{CH_4} = Farm_{CH_4} - Enteric_{CH_4}$$

其中：

Manure_{CH₄} = 粪便管理甲烷排放量 (MT CO₂e)

Farm_{CH₄} = 农场层面的甲烷总排放量 (MT CO₂e)

Enteric_{CH₄} = 肠道发酵甲烷排放量 (MT CO₂e)

在使用公式 4 前，用户必须确保将农场排放和肠道发酵排放换算成相同的单位。将排放量除以 CAP'2ER 使用的 GWP (GWP100 = 27.2)，换算成 kg 甲烷。

COMET-Farm

排放因子数据来源概述

COMET-Farm 是科罗拉多州立大学与美国农业部（United States Department of Agriculture, USDA）和国家资源保护局（National Resource Conservation Service, NRCS）联合开发的农场和牧场温室气体核算工具。COMET-Farm 采用 IPCC 层级 3 方法和生物地球化学模型进行计算，用于创建层级 2 排放因子。除碳核算外，该工具还可帮助农场评估管理方案，以减少温室气体排放并增加固碳量。

COMET-Farm 含有种植、畜牧业和林业模块。要计算全农场的排放量，必须同时使用种植和畜牧业模块，并结合与 COMET-Energy 工具（该工具可计算农场能源消耗）。此外，COMET-Farm 只计算乳业系统直接产生的温室气体排放量。间接排放，如饲料和化肥产生的上游生产排放，既不包括在种植模块中，也不包括在畜牧业模块中。因此，其系统边界并不是完整的“从摇篮到农场大门”评估。如果使用 COMET-Farm 来计算“从摇篮到农场大门”的生乳排放因子，需同时用到所有模块，并且需要将饲料和化肥产生的上游排放数据添加到输出结果中。

下文仅讨论 COMET-Farm 的畜牧业工具，即计算和报告乳业甲烷排放的工具。

数据要求

COMET-Farm 的畜牧业模块依靠一手数据和二手数据来计算排放量。图 10 摘录了 COMET-Farm 的部分数据要求，包括动物类型、畜群数量、饲料摄入量、畜舍和粪便管理数据。COMET-Farm 还可以使用气候和土壤状况的空间数据，用于估算特定地点的碳排放量。

图 10 COMET-Farm 结果面板上的数据收集要求



拆分方法

如图 11 所示，COMET-Farm 结果按畜群分组，以 MT CO₂e/ 年为单位报告。

图 11 COMET-Farm 按畜群分组的畜牧业排放结果

排放源	基准排放
奶牛-后备小母牛	
后备奶牛	221.2
合计	221.2
奶牛-泌乳奶牛	
泌乳奶牛	309.4
合计	309.4
奶牛-泌乳奶牛	
泌乳奶牛	1176.6
合计	1176.6
总计 (所有动物)	1707.2

双击畜群分组，系统可以按气体和排放类别拆分结果，如图 12 所示。甲烷类别中“肠道发酵”下面的所有排放都归为粪便管理排放。用户可以选择“动物农业详细报告”选项，将完整结果以逗号分隔值 (Comma-Separated Values, CSV) 文件下载完整的排放数据报告。

图 12 COMET-Farm 泌乳奶牛拆分结果

奶牛-泌乳奶牛	
泌乳奶牛	1176.6
甲烷 (吨二氧化碳当量/年)	
肠道发酵	510.5
畜舍	0.0
谷仓畜舍	46.3
堆肥	2.9
厌氧塘	478.6
厌氧发酵池	0.0
氧化亚氮 (吨二氧化碳当量/年)	
畜舍	0.0
堆肥	138.3
厌氧塘	0.0
合计	1176.6

要计算 COMET-Farm 结果中粪便管理产生的甲烷总排放量，需将图 12 中的以下数值相加：

$$\mathbf{Manure_{CH_4} = Housing_{CH_4} + Barn\ Housing_{CH_4} + Composting_{CH_4} + Anaerobic\ Lagoon_{CH_4} + Anaerobic\ Digester_{CH_4}}$$

其中：

$$\mathbf{Manure_{CH_4} = 0.0 + 46.3 + 2.9 + 478.6 + 0.0 = 527.8\ MT\ CO_2e}$$

$$\mathbf{Enteric_{CH_4} = 510.5\ MT\ CO_2e}$$

$$\mathbf{Farm_{CH_4} = 527.8 + 510.5 = 1,038.3\ MT\ CO_2e}$$

要以 kg CO₂e/kg FPCM 表示排放因子结果，需要先把年排放量从百万吨（Million Tonnes , MT）换算成 kg，然后再除以 FPCM 年产量 (kg)。此外，还必须使用分配系数来估算牛奶和肉类或农场其他副产品产生的排放量。

《国际乳品联合会 全球乳业碳足迹标准》第 5.4.2 节讨论了如何估算奶牛场牛奶和肉类分别产生的排放量。

要将该排放因子从 CO₂e 换算成甲烷，需要除以 COMET-Farm 使用的甲烷表征因子。COMET-Farm 使用 IPCC 第四次评估报告中的 25 作为甲烷的 GWP100 表征因子²⁹。专栏 4 描述了将 CO₂e 换算成甲烷的过程。需注意，COMET-Farm 无法拆分与饲料相关的甲烷排放。

Cool Farm Tool

排放因子数据来源概述

Cool Farm Tool (CFT) 是由 Cool Farm Alliance 开发的在线模型工具，用于评估农场层面的温室气体排放。CFT 对企业实行会员制，但对生产者免费开放。该工具针对不同作物和畜牧系统提供不同的模块。其乳业模块符合《国际乳品联合会 全球乳业碳足迹标准》，排放核算范围为“从摇篮到农场大门”，并基于脂肪和蛋白质校正乳进行标准化处理²¹。乳业模块涵盖的温室气体排放源包括放牧、草地施肥、饲料生产、肠道发酵、粪便管理、能源和加工以及运输等环节。

排放量的计算基于 IPCC 层级 2 方法，辅以同行评议文献和用户提供的数据。

数据要求

Cool Farm Tool 结合一手和二手数据来核算农场总排放量。将总排放量 (kg CO₂e) 除以总产奶量 (kg FPCM)，即可得出脂肪和蛋白质校正乳的排放因子。用户需要提供的数据包括：产奶量和成分、畜群数量和重量、放牧天数、草地施肥情况、饲料成分和用量、粪便管理方法、农场能耗（限乳品生产相关）、主要投入品的进场运输情况，以及将成品运往加工地的出场运输情况（视目标系统边界而定）。CFT 乳业评估的数据输入类别如图 13 所示。针对自产饲料，用户可以将自定义种植评估整合到乳业评估中，用于乳业饲料输入数据。

图 13 Cool Farm Tool 乳业评估数据输入类别



拆分方法

Cool Farm Tool 可在单个农场评估中，按排放源直接估算甲烷排放量。该工具会在详细结果部分展示肠道发酵、粪便管理和饲料生产（如适用）产生的农场甲烷排放量。图 14 显示了 CFT 的结果示例。

图 14 按气体和排放类别拆分的 Cool Farm Tool 结果示例



单个农场的原始数据可以以 CSV 文件进行下载。用户可以从图 15 的结果中得到农场层面的甲烷排放因子（单位：kg CH₄/kg FPCM）：将每个排放源的甲烷总排放量相加，然后除以农场脂肪和蛋白质校正乳总生产量。在此示例中，各排放源对甲烷排放的贡献比例为：肠道发酵：79%、粪便管理：21%、饲料：0.2%。

图 15 Cool Farm Tool 的单个农场下载结果

农场信息							
姓名	测试奶牛场						
国家	美国						
气候	凉爽温带湿润						
气温	45.00	°F					
产品信息							
姓名	奶牛场 #1						
品种	娟姗牛						
年份	2022						
产奶量	20,000,000.00	lb					
合计							
总排放量	9,749,884.75	kg CO ₂ e					
单位面积排放量	481,849.37	acre					
每 kg FPCM 排放量	1.06	kg CO ₂ e					
每吨排放量	1,074.74	kg CO ₂ e					
总排放量							
姓名	CO ₂ (kg)	N ₂ O (kg)	CH ₄ (kg)	总量 (kg CO ₂ e)	kg CO ₂ e/英亩	kg CO ₂ e/kg FPCM	kg CO ₂ e/吨
能耗	985,908	-	-	985,908	19,718	0.11	108.68
肠道发酵	-	-	119,961	3,346,905	66,938	0.36	368.93
饲料	3,931,219	459	281	4,064,265	81,285	0.44	448.01
施肥	1,414	3	-	2,164	43	-	0.24
放牧	-	256	-	69,914	1,398	0.01	7.71
粪便	84,956	1,172	31,090	1,272,228	25,445	0.14	140.24
运输	8,500	-	-	8,500	170	-	0.94
总排放量	5,011,997	1,889	151,332	9,749,885	194,998	1.06	1,074.75

如果企业供应链中涉及多个农场，则计算排放因子时应使用所有农场的加权平均值计算甲烷排放量。Cool Farm Tool 提供的汇总版 CSV 下载结果，并不具备与单个农场结果相同的甲烷排放细分程度。图 16 展示了多农场汇总结果下载文件中的简化示例。

图 16 多个农场的 Cool Farm Tool 汇总结果示例

农场	牛奶	肠道发酵	CO ₂		N ₂ O		CH ₄	
	kg FPCM	kg CO ₂ e	MT CO ₂	MT CO ₂ e	MT N ₂ O	MT CO ₂ e	MT CH ₄	MT CO ₂ e
农场 1	2,163,435	926,826	828	828	0.44	121	46	1,296
农场 2	839,901	391,589	286	286	0.21	58	20	567
农场 3	3,831,671	1,342,061	841	841	0.89	243	69	1,921
农场 4	17,990,333	6,825,138	4,449	4,449	4.90	1,338	261	7,271
农场 5	15,997,014	5,602,311	3,634	3,634	3.74	1,020	290	8,094
合计	40,822,354	15,087,925	10,037	10,037	10.18	2,780	686	19,150

提供的数据包括：总产奶量（kg FPCM）、肠道发酵产生的排放量（kg CO₂e）和农场甲烷总排放量（MT CH₄ 和 MT CO₂e）。利用这些数据，可以通过用总甲烷排放量（kg CH₄）除以总 FPCM 产量（kg），计算出所有农场的加权平均甲烷排放因子。在假设饲料并非主要甲烷排放来源的前提下（在本示例中占比低于 0.2%），上述排放因子还可以进一步拆分为肠道发酵和粪便管理产生的排放。肠道发酵产生的所有（100%）排放均为甲烷，单位为 kg CO₂e。如要估算粪便管理产生的甲烷排放量，需要用农场甲烷总排放量（kg CO₂e）减去肠道发酵总排放量（kg CO₂e）。将排放量除以 CFT 使用的 GWP（GWP100 = 27.9），即可换算成 kg 甲烷³⁰。专栏 6 展示了 CFT 甲烷拆分结果的具体示例。

使用公式 4 拆分图 17 中的甲烷排放量：

$$\mathbf{Manure}_{CH_4} = \mathbf{Farm}_{CH_4} - \mathbf{Enteric}_{CH_4}$$

$$\mathbf{Farm}_{CH_4} = 19,150 \text{ MT CO}_2\text{e}$$

$$\mathbf{Enteric}_{CH_4} = 15,088 \text{ MT CO}_2\text{e}$$

$$\mathbf{Manure}_{CH_4} = 19,150 - 15,088 = 4,062 \text{ MT CO}_2\text{e}$$

要将这些数值从 CO₂e 换算成甲烷，需要除以排放因子数据来源使用的甲烷表征因子。Cool Farm Tool 使用的甲烷 GWP100 因子为 27.9。

在图 16 的例子中，每个排放源的甲烷总排放量如下所示：

$$\mathbf{Enteric}_{CH_4} = 15,088 / 27.9 = 541 \text{ MT CH}_4$$

$$\mathbf{Manure}_{CH_4} = 4062 / 27.9 = 146 \text{ MT CH}_4$$

通过将甲烷排放量除以农场总产奶量，可将其换算成甲烷排放因子，并用于清单：

$$\mathbf{Enteric}_{CH_4} = 541 \text{ MT CH}_4 / 40,822 \text{ MT FPCM} = 0.013 \text{ MT CH}_4 / \text{MT FPCM}$$

$$\mathbf{Manure}_{CH_4} = 146 \text{ MT CH}_4 / 40,822 \text{ MT FPCM} = 0.0036 \text{ MT CH}_4 / \text{MT FPCM}$$

需要注意的是，由于饲料生产产生的甲烷排放量仅占甲烷总排放量的约 0.2%，因此未在甲烷排放源中单独进行拆分。仅当饲料中包含水稻时，饲料所致的甲烷排放才可能显著。由于汇总结果中没有包含相关数据，当供应商使用水稻作饲料时，需要在单个农场层面评估饲料的甲烷排放量。

FARM ES

排放因子数据来源概述

美国国家乳制品生产商联合会开发的农场责任管理 (Farmers Assuring Responsible Mangement, FARM) 环境管理 (Environmental Stewardship, ES) 项目, 是用于估算农场层面温室气体排放和能源强度的模型工具。FARM ES 第 2 版基于 Thoma 等 (2013) 对液态牛奶开展的生命周期评估, 并采用 IPCC 层级 2 方法。系统边界为“从摇篮到农场大门”, 结果标准化为脂肪和蛋白质校正乳³¹。

FARM ES 计划于 2025 年推出第 3 版工具, 通过反刍动物农场系统 (Ruminant Farm Systems, RuFaS) 将 FARM ES 转变为基于过程的模型工具。新版将比第 2 版更完善更准确, 同时还将支持情景分析, 便于对温室气体减排方案进行模拟。以下介绍的数据要求和拆分方法适用于第 2 版工具。在第 3 版工具发布后, 预计可以使用本指南中介绍的类似方法来拆分甲烷排放。

数据要求

FARM ES 依靠一手和二手数据来计算排放量。用户需要输入产奶量记录、畜群数量、饲料配比、粪便管理和能源使用等数据。FARM ES 不支持整合农场层面的作物数据, 而是基于提供的饲料配比数据, 利用乳制品生命周期评估研究, 来推断饲料生产相关假设。此外, FARM ES 不考虑具体的粪肥施用方式。

拆分方法

FARM ES 的结果以 lb CO₂e/lb FPCM 为单位, 可以换算成用户所需的单位 (如 MT CO₂/MT FPCM)。FARM ES 的结果按排放类别和气体类型分类显示, 如图 17 和图 18 所示。这些结果还可与 Thoma 等人生命周期评估研究中的美国地区和全国平均值进行比较。这些对比数据可以用作参考, 但在拆分甲烷排放时并非必要。

图 17 按温室气体排放类别拆分的 FARM ES 结果

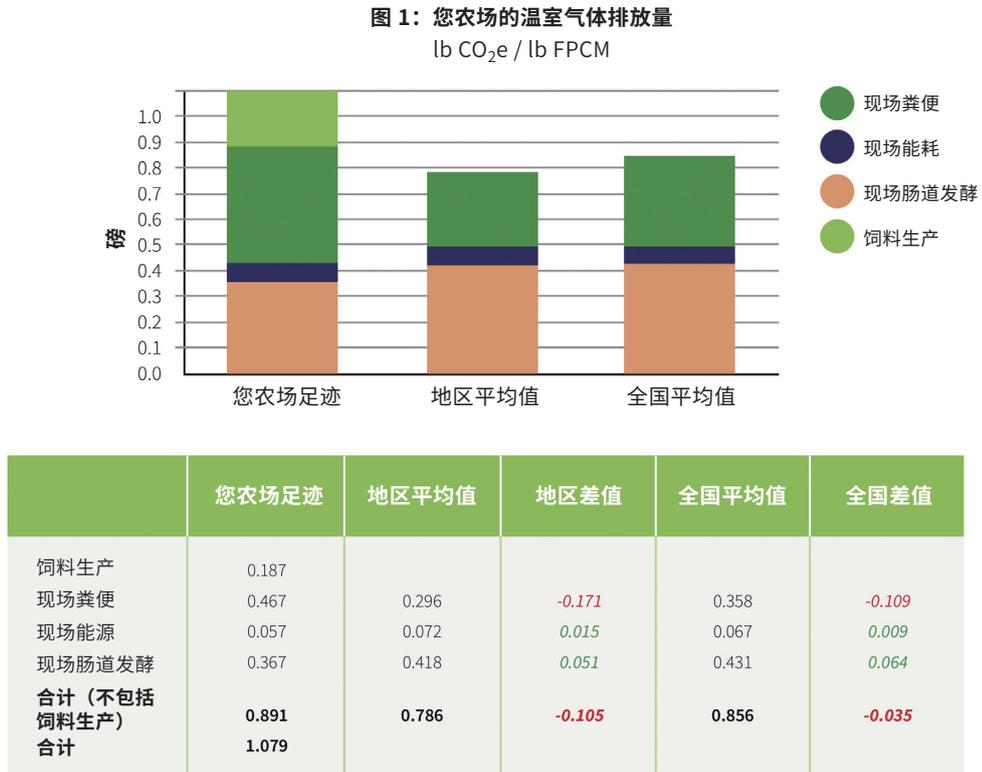


图 18 按温室气体类型拆分的 FARM ES 结果

气体类型分类		
二氧化碳 (CO ₂)	0.224 kg CO ₂ e / kg FPCM	20.8%
甲烷 (CH ₄)	0.524 kg CO ₂ e / kg FPCM	48.6%
氧化亚氮 (N ₂ O)	0.331 kg CO ₂ e / kg FPCM	30.7%
合计	1.079 kg CO₂e / kg FPCM	100.0%

FARM ES 提供农场层面的甲烷排放因子 (kg CO₂e/kg FPCM) , 如图 17 所示, 这些数据可进一步拆分为肠道发酵和粪便管理所产生的甲烷排放。

肠道发酵产生的所有 (100%) 排放均为甲烷, 单位为 kg CO₂e/kg FPCM。要估算粪便管理产生的甲烷排放量, 需要用农场甲烷总排放量 (kg CO₂e/FPCM) 减去肠道发酵产生的甲烷总排放量 (kg CO₂e/kg FPCM) , 如专栏 7 所示。将这些数值换算成 kg CH₄, 需要除以 FARM ES 使用的甲烷 GWP 因子, 如专栏 4 所示。FARM ES 使用 IPCC 第四次评估报告发布的 GWP100 因子 25²⁹。需注意的是, 如果存在来自于饲料的甲烷排放, 其数据是无法从 FARM ES 结果中拆分出来的。

专栏 7 FARM ES 拆分甲烷排放

使用公式 4 拆分图 17 和图 18 中的甲烷排放量:

$$\mathbf{Manure_{CH4EF} = Farm_{CH4EF} - Enteric_{CH4EF}}$$

$$\mathbf{Farm_{CH4} \text{ 排放因子} = 0.524 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg FPCM}}$$

$$\mathbf{Enteric_{CH4} \text{ 排放因子} = 0.367 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg FPCM}}$$

$$\mathbf{Manure_{CH4} \text{ 排放因子} = 0.524 - 0.367 = 0.157 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg FPCM}}$$

要将这些数值从 CO₂e 换算成甲烷, 需要除以排放因子数据来源使用的甲烷表征因子 (FARM ES GWP = 25) :

$$\mathbf{Enteric_{CH4EF} = 0.367 / 25 = 0.015 \text{ kg CH}_4 / \text{kg FPCM}}$$

$$\mathbf{Manure_{CH4EF} = 0.157 / 25 = 0.006 \text{ kg CH}_4 / \text{kg FPCM}}$$

GLEAM

排放因子数据来源概述

全球畜牧环境评估模型 (GLEAM) 由联合国粮食及农业组织开发, 可用于量化畜牧系统的生产和投入, 并评估每个系统的温室气体排放量。GLEAM 采用 IPCC 层级 2 方法, 按地区和全球尺度对 11 种畜牧产品进行排放报告。计算范围涵盖上游排放 (饲料生产、加工和运输)、动物生产排放 (肠道发酵、粪便管理和农场能耗) 以及下游排放 (畜产品加工和场外运输)。系统边界是“从摇篮到农场大门”。

数据要求

GLEAM 使用二手数据计算排放因子，不需要用户提供一手数据。区域级别的数据（如畜群数量和分布、群体参数、化肥施用率、作物产量、生乳产量、粪便管理系统等）来自文献、数据库、调查以及专家咨询。参考的具体数据库包括 FAOSTAT 2015、Gridded Livestock of the World 以及畜牧业环境评估与绩效（LEAP）指南。用户应根据自身系统的特征（如地理位置和养殖方式）选择相应的标准。

拆分方法

GLEAM 可根据所选地区，按气体类型和排放源对排放因子进行全面拆分。如图 19 所示，GLEAM 仪表盘提供了不同的选项来显示排放因子，图中选择展示的是“从摇篮到农场大门”的生乳排放因子。需要注意的是，在评估“从摇篮到农场大门”的排放时，为避免温室气体清单出现重复计算，不应选择农场后端（CO₂）排放源。农场后端排放包括加工、运输和配送环节，这些排放超出了生乳排放的农场大门边界，应在企业排放清单的其他部分单独计算。

图 19 GLEAM 仪表盘上的排放强度显示选项

畜产品排放强度 ⓘ

品种

水牛 家牛 鸡 山羊 猪 绵羊

畜群

肉牛 奶牛

生产系统

饲养场 草场 混合

参考值

动物 商品

商品

肉类 牛奶 蛋白

排放源

肠道发酵 (CH₄) 粪便 (CH₄) 粪便 (N₂O) 饲料 (CH₄) 饲料 (N₂O)

饲料 (CO₂) 土地利用变化: 大豆和棕榈 (CO₂) 农场直接用能 (CO₂)

土地利用变化: 草场扩建 (CO₂) 农场内嵌用能 (CO₂) 农场后环节 (CO₂)

节点

品种 畜群 生产系统

按排放源分列

如图 20 所示，对排放源的排放强度进行排序和选择后，即可按照排放源拆分排放因子。尽管 GLEAM 有选择饲料（甲烷）的选项，但由于此处假定饲料产生的甲烷排放量微乎其微，因此该指标的数据不可用。

图 20 GLEAM 北美 FPCM 排放强度结果



如图 21 所示，原始数据可在数据选项卡中查看和下载，并可直接用于企业的温室气体清单。甲烷排放量以 CO₂e 为单位，基于用户选择的 100 年 GWP 数据计算。默认采用 IPCC AR6，其甲烷表征因子为 27。若要将 kg CO₂e 换算成 kg CH₄，需要除以选定的甲烷表征因子。

图 21 北美 FPCM 肠道发酵和粪便管理产生的甲烷排放量

区域	动物	排放源	产量 [t]	排放 [t CO ₂ eq]	排放强度 [kg CO ₂ eq / kg]
1 北美洲	家牛	肠道发酵 (CH ₄)	102,721,597	57,108,246	0.56
2 北美洲	家牛	粪便 (CH ₄)	102,721,597	24,776,436	0.24

Holos

排放因子数据来源概述

Holos 模型工具是一款软件应用程序，用于估算加拿大农业系统的温室气体排放和土壤碳变化。该工具有情景模拟功能，用户可以评估特定干预措施对温室气体排放和土壤碳的影响。Holos 采用 IPCC 层级 2 方法，并结合加拿大全国土壤数据库和美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 气候数据。乳业模块可与土地管理模块相结合，从而将作物和干草生产纳入农场层面的温室气体评估。

数据要求

Holos 结合使用一手和二手数据来计算农场总排放量。数据输入类别包括：位置信息、种植土地管理方式、畜群数量、畜舍、粪便处理系统以及每组畜群的饲料。Holos 旨在计算农场温室气体排放量，而不是碳足迹，意味着它涵盖所有基于可用数据可估算的农场排放源。要计算生乳的碳足迹，必须通过在模拟农场中添加用于饲料生产的田地，并计算出饲养奶牛群所需的作物田总面积，来全面核算饲料生产。如果系统监测到种植的饲料产量不足以满足动物需求，Holos 会生成警告信息。除了确保囊括饲料总需求量外，用户还需将结果换算回 kg FPCM，具体换算方法详见下方“拆分方法”。

拆分方法

如图 22 所示，Holos 在其详细排放报告中按气体和排放源种类完全拆分了甲烷排放。肠道发酵和粪便管理产生的排放量以 kg CO₂e 或 kg CH₄ 表示。若要查看拆分好的甲烷排放量，用户应选择以 kg CH₄ 为单位来查看排放数据，而非以 kg CO₂e 为单位计算的排放量。

图 22 Holos 乳业甲烷排放结果截图

结果

结果界面显示与您养殖业务相关的各类报告，每个标签页针对碳足迹的不同构成维度生成专项分析

农场		构成名称	排放源	肠道 CH ₄ (kg CO ₂ e)	粪便 CH ₄ (kg CO ₂ e)
▲ 奶牛					
>	奶牛场	奶牛	小奶牛	24439.44	1104.56
	奶牛场	奶牛	泌乳奶牛	68759.55	2462.88
	奶牛场	奶牛	乳牛	不适用	1012.72
	奶牛场	奶牛	第二组小奶牛	37772.21	0.00
				130971.20	4580.15
			总计	130971.20	4580.15

Holos 提供的结果为农场总排放量，需将其与脂肪和蛋白质校正乳相联系，以便公司在其温室气体（GHG）清单中使用排放因子。计算方法是將排放量除以数据收集期间的 FPCM 总产量，并根据农场上生产的牛奶、肉类或其他副产品应用分配因子。《国际乳品联合会 全球乳业碳足迹标准》第 5.4.2 节讨论了如何估算奶牛场牛奶和肉类产生的排放量。

文献参考值（良好）

乳业排放因子的文献参考值源于同行评议研究，其中最常见的是乳制品农业系统和产品的生命周期评估或产品碳足迹分析。文献参考值属于二手数据。

截至 2022 年，已有 4800 多项同行评议研究探讨了乳品和农场系统的碳足迹²¹。由于研究范围广泛，数据质量，对企业自身系统的代表性，以及甲烷拆分能力均存在显著差异。多重原因也导致从文献参考值得出的排放因子数据来源的质量参差不齐。由于缺乏定制性和一手数据，总体而言，文献参考值被归类为“良好”的排放因子数据来源，低于自定义因子（最佳）和模型工具（优秀）的。

在选择文献数据时，用户需评估数据质量、代表性和结果的详细程度。总体来说，用户应确保所选地理位置与公司乳制品供应的区域相符，因为不同国家之间的排放因子可能差异较大⁷。此外，不同的养殖系统和粪便管理措施也可能导致排放量差异。所选文献研究应尽可能与公司乳品供应的地理位置和养殖系统相匹配。

用户还应优先考虑按气体和排放源拆分排放的研究。

以下部分将详细说明如何对文献值中的甲烷排放进行拆分核算，包括生命周期评估数据库、生命周期评估研究以及基于支出的数据。甲烷拆分能力与所选文献参考值相关，并存在很大差异，部分研究能够充分按照排放源和气体类型拆分排放，而另一些研究难以对构成排放因子的气体或排放源进行细化。如果所选文献参考值未明确显示结果时，可参考本指南的“不明数据来源”部分了解如何拆分甲烷排放。如果企业使用多个文献参考值，或者将文献参考值和模型工具结合使用，则可参考“清单应用”部分，了解如何整合不同排放因子数据来源的研究结果。

生命周期评估数据库、活动数据（如 ecoinvent、WFLDB）

排放因子数据来源概述

生命周期评估是一种评估产品在整个生命周期内环境影响的方法。生命周期评估由一系列活动数据组成，称为“生命周期清单（Life Cycle Inventory, LCI）”，并设有系统边界，最常见的是“从摇篮到农场大门（农场或加工）”或“从摇篮到坟墓”。一个完整的“从摇篮到坟墓”生命周期评估包括原材料获取、加工、运输、使用和最终处置的全部数据。“从摇篮到农场大门”的系统边界只包含以农场或加工大门为边界的活动数据。生命周期评估数据库由用于完成生命周期评估的生命周期清单数据组成。这些数据库包含关于多种原材料和制成品在多个行业（如农业、建筑、材料、电子、交通等）中使用过程中的投入、产出、排放、能源与物料流动、资源消耗和环境影响的数据。这些数据集具有很高的数据透明度和数据质量，能够使用生命周期评估软件对这些数据进行分析，以评

估包括全球增温潜势在内的一系列环境影响。常见的包含乳业活动数据的生命周期评估数据库包括 ecoinvent、AgriFootprint、World Food 生命周期评估 Database、AGRIBALYSE (法国数据库)、Big Climate Database (丹麦生命周期评估数据库) 等。

数据要求

生命周期评估数据库由二手数据组成，不需要用户提供一手数据。为确保选择适当的系统边界、生产系统和地理区域，在使用生命周期评估数据库中的排放因子时，用户应选择最能准确代表其供应链的数据集。例如，一家采购法国有有机乳制品的企业应尽可能选择来自同一地区的法国有有机乳品牧场、涵盖“从摇篮到农场大门”边界的生乳研究。此外，选择与农场规模、饲料成分和粪便管理方式相匹配的数据库，有助于获得更具代表性的排放因子。企业应尽可能在温室气体清单中使用同一数据库。然而，对于具有多样化供应链的企业来说，单一数据库可能只能涵盖特定生产系统或地理位置的数据，无法反映公司的实际情况，因此可能需要综合多种数据库的数据。如果所选研究的系统边界超出农场范围，用户应确保显示的结果足够详细，以便识别并提取“从摇篮到农场大门”的影响数据。

拆分方法

生命周期评估软件工具支持用户操作和分析生命周期评估数据库，从而按气体和排放源拆分甲烷排放。最常用的软件工具包括 SimaPro、Sphera (原 GaBi) 和 openLCA。使用 SimaPro 和 Sphera 需要购买授权。目前还有几款开源的生命周期评估软件可供免费下载和使用，包括 openLCA、Activity Browser 和 Brightway。

使用生命周期评估软件拆分甲烷排放，首先应使用 IPCC 2021 GWP100 进行过程分析。该方法使用 IPCC 第六次评估报告中的 27 作为生物成因甲烷排放的 GWP 表征因子 23。生命周期评估软件还支持用户使用其他 GWPs 分析数据 (例如，IPCC 2021 GWP20)。如果希望进一步按排放源拆分排放，必须使用单位过程分析 (Unit Progress)，评估每个投入层面 (如粪便、肥料、饲料等) 的影响。相比之下，系统过程分析 (System Progress) 可汇总生命周期评估结果，但不支持按输入来源查看排放 (即无法识别具体的甲烷来源)。分析结果以 kg CO₂e 表示。

用户可通过“特征化视图”查看结果，从而区分生物源、化石源及土地转化过程中的排放。生物源排放中即包含了生物源甲烷。

生命周期评估数据库的选择将会影响结果的详细程度，并决定是否按排放源完全拆分甲烷排放。一些数据库会按照投入源完全拆分甲烷排放，而其他数据库可能会将肠道发酵、粪便管理和饲料甲烷排放合并为直接大气排放。例如，作为过程输入，世界食品生命周期评估会将肠道发酵和粪便管理明确分开，这样用户就能清楚地查看拆分后的影响评估结果。图 23 展示了使用生命周期评估软件生成的简化示例结果表。需要注意的是，世界食品生命周期评估的分析结果中，输入项的名称可能有所不同。

“GWP100-biogenic”行表示各输入环节对应的生物源甲烷排放，按肠道发酵和粪便管理拆分。将排放量除以用于分析的 IPCC 2021 GWP100 甲烷表征因子 (27)，即可换算成 kg CH₄。

图 23 按投入拆分的每 kg 生乳影响评估结果示例

影响类别	单位	合计	生乳	肠道发酵排放	粪便管理	玉米青贮饲料	电力
GWP100 - 化石源	kg CO ₂ e	0.310	X	X	0.105	0.152	0.039
GWP100 - 生物源	kg CO ₂ e	0.752	X	0.580	0.171	0.001	X
GWP100 - 土地转化	kg CO ₂ e	0.103	X	X	X	0.091	X

如图 24 所示，在 Agri-footprint 和 AGRIBALYSE 数据库中，生物源甲烷已在生命周期清单数据中按来源作为“直接排放到空气中”单独列出，报告单位为 kg CH₄/kg 产品。在使用这类拆分核算甲烷排放的数据库（如 Agri-footprint 和 AGRIBALYSE）时，用户无需通过生命周期评估软件进一步分析结果，因为甲烷已按排放源进行了拆分。如图 24 所示，肠道发酵的甲烷排放因子为 0.038 kg CH₄/kg FPCM，粪便管理的甲烷排放因子为 0.00541 kg CH₄/kg FPCM（包括贮存和放牧）。

图 24 每 kg FPCM 的气体排放示例

气体排放	排放量	单位	备注
氨	0.0035	kg	粪便贮存产生的排放
氧化亚氮	0.000041	kg	贮存直接产生的 N ₂ O 排放
甲烷 - 生物成因	0.038	kg	肠道发酵产生的 CH ₄ 排放
甲烷 - 生物成因	0.0052	kg	粪便贮存产生的 CH ₄ 排放
甲烷 - 生物成因	0.00021	kg	放牧产生的 CH ₄ 排放

Ecoinvent 拆分的细化程度最低，在其单位过程中将粪便管理和肠道发酵产生的生物源甲烷排放合并为气体排放，仅支持用户按气体类型拆分排放数据，而无法按甲烷的具体来源进一步拆分。虽然不同数据库按甲烷排放源拆分排放的方法和有能力有差异，但所有生命周期评估数据库都允许用户在分析生命周期评估结果时按气体种类拆分排放。

生命周期评估研究（学术期刊文章）

排放因子数据来源概述

生命周期评估研究通常是发表在学术期刊上经过同行评议的研究。如前所述，生命周期评估研究在数据质量、代表性和数据透明度等方面可能存在较大差异。因此在从生命周期评估研究中选择排放因子时，必须对这些因素进行评估。

数据要求

生命周期评估研究使用二手数据，不需要用户提供数据输入。在选择研究时，应尽可能确保研究准确地代表用户的供应链、生产方式、地理位置和系统边界（如“从摇篮到农场大门”）。此外，由于生命周期评估研究的结果通常不能直接修改或拆分，因此用户应优先选择使用与自身评估方法一致的研究，例如采用 IPCC GWP100 计算方法的研究。同时，用户应尽可能选择已按气体种类和排放源拆分核算排放结果的研究。

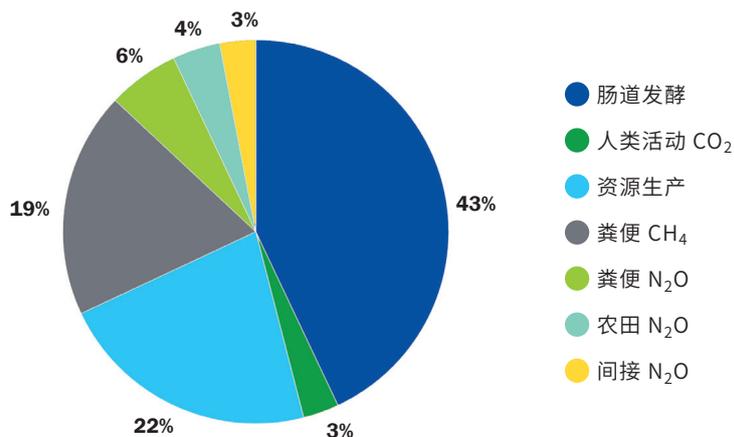
拆分方法

能否准确拆分从生命周期评估研究中得出的排放因子，取决于所选择的研究和结果部分展示的数据详细程度。一些研究明确按来源和气体类型拆分甲烷排放，但更多的研究通常仅会列出肠道发酵产生的排放，但不涉及粪便管理产生的甲烷排放。本节将通过三个例子介绍如何从不同生命周期评估研究中拆分乳品排放因子。如果某项研究未按气体或排放源拆分排放，则可参考“不明数据来源”部分概述的方法。

从《美国奶牛场环境评估》研究中拆分核算乳业甲烷排放

Rotz 等人撰写的《美国奶牛场环境评估》是“从摇篮到农场大门”的生命周期评估研究，涵盖了美国六个地区、六种不同乳业生产系统⁹。研究结果以 kg CO₂e/kg FPCM 为单位，按地区和国家层面进行汇总报告。图 25 展示了按排放源和气体类型拆分的全国平均排放结果，其中肠道发酵和粪便管理产生的甲烷排放分别占总排放量的 43% 和 19%。饲料产生的甲烷排放未被单独列出，因为其并非主要甲烷排放源。

图 25 美国全国平均生乳温室气体（GHG）排放来源和气体类型的贡献率⁹



要估算甲烷排放量，可将这些百分比用于研究中提供的全国排放因子（1.01 kg CO₂e/kg FPCM），然后使用研究中的甲烷表征因子（25）换算成甲烷排放。计算示例见公式 5。

公式 5 使用百分比文献参考值拆分核算甲烷排放的公式

$$EF_{CH_4,S} = EF_{Farm} \times CH_4\%_S$$

其中：

$EF_{CH_4,S}$ = 排放源 s 的甲烷排放因子 (kg CO₂e/kg FPCM)

EF_{Farm} = “从摇篮到农场大门” 排放因子 (kg CO₂e/kg FPCM)

$CH_4\%_S$ = 排放源 s 的甲烷排放百分比 (%)

示例：

Rotz 等人的研究结果如图 25 所示：

$EF_{Farm} = 1.01 \text{ kg CO}_2\text{e/kg FPCM}$

$CH_4\%_S = \text{肠道发酵 } 43\% + \text{粪便管理 } 19\%$

肠道发酵： $EF_{CH_4, \text{排放因子}} = 1.01 \text{ kg CO}_2\text{e/kg FPCM} \times 43\% = 0.43 \text{ kg CO}_2\text{e/kg FPCM}$

粪便管理： $EF_{CH_4,MM} = 1.01 \text{ kg CO}_2\text{e/kg FPCM} \times 19\% = 0.19 \text{ kg CO}_2\text{e/kg FPCM}$

要将这些数值从 CO₂e 换算成甲烷，需要除以排放因子数据来源使用的甲烷表征因子（25）。

从《1990-2019 年荷兰生乳生产碳足迹的演变》研究中拆分核算乳业甲烷排放

Hospers 等人利用荷兰农场会计数据网络（Farm Accountancy Data Network, FADN）提供的国家统计数据 and 农场数据，分析了 1990-2019 年荷兰典型乳业系统 “从摇篮到农场大门” 的生乳碳足迹³²。该研究为荷兰的生乳排放因子提供了文献参考值示例。研究报告了 1990-2019 年每年的结果，单位为 g CO₂e/kg FPCM，并按排放源进行拆分和核算。研究涵盖的排放源包括农场粗饲料生产、肠道发酵、采购资源、粪便贮存和畜舍、能耗及其他。

肠道发酵产生的所有（100%）排放均为甲烷，因此该部分数据可完全拆分出来，并使用公式 5 将其换算成 kg CH₄。该研究使用的生物成因甲烷排放表征因子为 27.2。换算成 kg CH₄ 后，企业可将该排放因子用于甲烷清单。

粪便管理也以 g CO₂e 为单位进行报告，但并未按气体类型拆分。由于粪便管理包括氧化亚氮和甲烷排放，用户需使用替代数据来估算甲烷排放量。鉴于这项研究代表的是荷兰乳业生产系统的平均水平，使用 FAO GLEAM 数据集来估算粪便管理产生的甲烷排放量是更为合适的选择。如果所选研究针对特定的粪便管理系统，那么使用的替代数据应能反映该系统的特点。公式 6 以 Hospers 等人的研究为例，介绍了如何使用替代数据，拆分核算粪便管理产生的甲烷排放。

$$MM EF_{CH_4} = Lit MM \times (Proxy MM_{CH_4} / Proxy MM_{Total})$$

其中：

$MM EF_{CH_4}$ = 粪便管理甲烷排放因子，g CO₂e/kg FPCM

$Lit MM$ = 粪便管理总排放因子，g CO₂e/kg FPCM

$Proxy MM_{CH_4}$ = 粪便管理甲烷排放替代数据，kg CO₂e/kg FPCM

$Proxy MM_{Total}$ = 粪便管理总排放量替代数据，kg CO₂e/kg FPCM

示例：

Hospers 等人提供的 2019 年生乳排放因子为 992 g CO₂e/kg FPCM。这项研究的附录 D 按排放源拆分了排放量，其中肠道发酵为 415 g CO₂e/kg FPCM，粪便管理为 132 g CO₂e/kg FPCM。研究假定饲料不是荷兰乳业系统的重要甲烷排放源。

肠道发酵：

由于肠道发酵排放的都是甲烷，因此可以使用研究中报告的表征因子（27.2）将其换算成 kg CH₄：

$$EF_{CH_4} = 415 \text{ g CO}_2\text{e/kg FPCM} / 27.2 \text{ kg CO}_2\text{e/kg CH}_4 / 1,000\text{g/kg} = 0.015 \text{ kg CH}_4\text{/kg FPCM}$$

粪便管理：

粪便管理没有按气体拆分，因此必须使用替代数据来估算粪便管理排放量。鉴于这项研究代表荷兰典型的粪便管理系统，可以使用 FAO GLEAM 数据集作为替代数据。FAO 报告的地区乳业排放数据非常详细。这项研究重点关注的是西欧地区。以下公式可用于估算粪便管理产生的甲烷排放：

根据公式 6，Hospers 等人粪便管理甲烷排放估算结果如下：

$$MM EF_{CH_4} = 132 \text{ g CO}_2\text{e/kg FPCM} \times (0.21 \text{ kg CO}_2\text{e/kg FPCM} / 0.32 \text{ kg CO}_2\text{e/kg FPCM}) = 86.6 \text{ g CO}_2\text{e/kg FPCM}$$

然后，可以使用研究中报告的表征因子（27.2）将其换算成 kg CH₄ / kg FPCM。

$$MM EF_{CH_4} = 86.6 \text{ g CO}_2\text{e/FPCM} / 27.2 \text{ kg CO}_2\text{e/kg CH}_4 / 1,000\text{g/kg} = 0.003 \text{ kg CH}_4\text{/kg FPCM}$$

在这个例子中，肠道发酵和粪便管理产生的甲烷排放分别占总排放量的 42% 和 9%。只要按排放源和气体拆分出排放因子，并将其换算成 kg CH₄，就可以将其用于公司清单。

从《肯尼亚中部小型奶牛场乳品的碳足迹差异》研究中拆分核算乳业甲烷排放

Wilkes 等对肯尼亚中部的小型奶牛场乳品“从摇篮到农场大门”环节碳足迹进行了研究，旨在评估不同饲养系统、分配方法和使用的全球增温潜势之间的差异³³。该研究评估了 382 个奶牛场的的数据，代表了肯尼亚中部地区牛奶生产的平均排放因子，可作为东非小型奶牛场的一个典型示例。

由于该研究评估的是不同分配方法和全球增温潜势的影响，用户应选择最符合其核算方法的数据。该研究使用 IPCC 2013 GWP 值（28）计算，并根据蛋白质含量估算牛奶和肉类的温室气体排放量，得出的生乳排放量为 2.56 kg CO₂e/kg FPCM。在第 4.2 节关于温室气体排放源的讨论中，研究还指出 55.5% 的温室气体总排放量来自肠道发酵，12.6% 来自粪便管理。

由于肠道发酵产生的所有（100%）排放均为甲烷，因此可以用农场排放因子乘以肠道发酵产生的甲烷排放百分比，再将该值换算成 kg CH₄，从而得出甲烷排放量。计算方法详见公式 5。然而，该研究未将粪污管理排放量按气体种类（甲烷和氧化亚氮）进行细分，因此必须使用替代数据来估算粪便管理甲烷排放所占的比例。鉴于这项研究代表了肯尼亚中部地区典型的粪便管理系统，使用 FAO GLEAM 东非数据值作为替代数据较为合适。用户首先应将农场排放因子乘以粪便管理排放所占百分比，然后按照公式 6 中所述的计算方法进行计算。

生命周期评估数据库、基于支出的数据（如美国环境保护署 EEIO、Exiobase）

排放因子数据来源概述

基于支出的排放因子来自环境扩展投入产出(Environmental-Extended Input-Output Model, EEIO)模型，该模型结合了环境和经济指标，用于估算上游供应链活动生产所产生的排放。由此得出的排放因子能将商品或服务的经济价值与相应的排放量关联起来，以每花费一美元产生的温室气体排放量表示。常见的基于支出的排放因子的常用数据库有 USEEIO 模型和 Exiobase。

基于支出的排放因子最常用于范围三温室气体筛查工作，通常不建议公司将此方法用于完整清单，因为这些排放因子代表了广泛的行业平均值，可能无法反映公司的具体流程或产品。基于支出的排放因子通常存在滞后性，无法准确反映当前的供需情况或通货膨胀，而且仅限于某些特定地区。由于基于支出的排放因子关联的是经济指标（如每年在生乳上的欧元支出），而非物理指标（如每年采购的 FPCM 量）挂钩，所以除减少支出以外，企业无法通过其他方式来模拟不同农场干预措施对温室气体排放的影响。

数据库若没有明确提供按气体拆分核算的数据，就无法从基于支出的排放因子中拆分出甲烷排放，因为数据是基于支出的，而非产奶量。即使数据库提供了按气体拆分核算的数据，但由于这些数据来源通常并不透明，也是无法确定排放源的。如上所述，如果企业使用基于支出的排放因子来计算乳业排放量，则建议改用基于活动的排放因子，以获得更为精确的甲烷排放评估。

不明数据来源

排放因子数据来源概述

当供应商、利益相关方或母公司提供的生乳排放因子缺乏背景信息时，可使用不明数据来源或缺乏数据透明度的排放因子。此外，企业排放清单的早期版本也可能包括无法追溯来源的排放因子。在某些情况下，即使排放因子的数据来源可追溯，但该排放因子无法完全拆分甲烷排放（如文献参考值）时，也可使用“不明数据来源”方法。本节将介绍在这些情况下该如何拆分并核算甲烷排放。不过，在采用该方法之前，企业应尽可能先与供应商和利益相关方合作，确定排放因子的来源。只有在无法确定排放因子数据来源时，才可使用这种方法。

如果供应商或其他利益相关方提供的排放因子不透明或数据质量未知，建议将排放因子与现有数据进行交叉核对后再用于清单。用户可以根据相关地区、养殖系统、系统边界和时间周期来评估排放因子，将其与现有文献参考值进行比较，以判断是否适合使用。通常，“模型工具”部分概述的地区 GLEAM 排放因子是交叉核对排放因子的良好起点。在交叉核对排放因子之后，可以使用以下拆分方法来估算甲烷排放量。

“不明数据来源”法是拆分甲烷排放的最后手段，因为它对甲烷排放量的估算更加笼统。企业应尽可能采用数据透明度高、质量可靠的排放因子来代替此方法。参考《国际乳品联合会 全球乳业碳足迹标准》第 5.1 节介绍的数据质量标准和建议²¹。

拆分方法

从来源不明的排放因子中拆分甲烷排放，可以使用百分比法。该方法将甲烷排放的总百分比应用到排放因子上。所选的替代数据必须能够代表相关地理区域和养殖系统。GLEAM 排放因子通常是很好的代理数据，因为这些数据已经完全按来源拆分甲烷排放，可以很方便地应用百分比，且覆盖多个地区的数据。图 26 展示了北美 GLEAM 生乳排放因子应用于一个来源不明的 EF 的示例。需要注意的是，这里没有包括饲料相关的甲烷排放，因为假设其为不重要的甲烷排放来源。

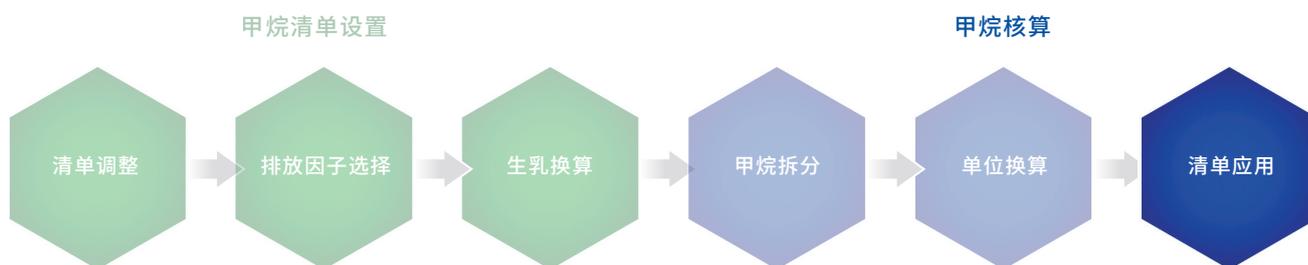
图 26 使用替代数据估算不明排放因子数据来源的甲烷排放量

排放因子	总排放量 (kg CO ₂ e/kg FPCM)	肠道发酵 CH ₄ 排放 (kg CO ₂ e/kg FPCM)	粪便管理 CH ₄ 排放 (kg CO ₂ e/kg FPCM)
替代排放因子	1.13	0.56	0.24
替代百分比	100%	49.6%	21.2%
不明数据来源的排放因子	1.40	$1.40 * 0.496 = 0.69$	$1.4 * 0.212 = 0.30$

估算出甲烷排放量后，可将其除以 IPCC 第六次评估报告中给出的 GWP100 甲烷表征因子（27）换算成 kg CH₄，详见专栏 4。

清单应用

图 1.5 甲烷温室气体清单编制过程：清单应用



一旦所有生乳排放因子中的甲烷排放被拆分并将单位换算成 kg CH₄ 后，接下来是将这些排放因子用于温室气体清单，以确定甲烷总排放量。

当供应链较为复杂时，通常需要多个代表不同地区、生产系统和乳品的排放因子来完成企业温室气体清单。这些排放因子可能会使用不同程度的一手数据，并采用不同的计算方法。因此，当企业使用多个排放因子时，可能需要采用多种甲烷拆分方法。

例如，某企业可能同时采购有机奶和常规奶，并需针对每种养殖系统采用不同的排放因子。这些排放因子可能来自不同的数据来源，以更准确地代表奶源地的养殖系统。例如，有机奶供应的排放因子可能使用模型工具，而常规奶供应可能使用文献参考值。

此外，如“不明数据来源”部分所述，对于来源不明的排放因子或无法完全拆分甲烷排放的数据来源，可能也需要使用多个排放因子。在这种情况下，可将替代数据和所选排放因子结合使用，共同用于清单。

按照上面讨论的方法，从每个排放因子中拆分出甲烷排放后，就可以用公式 7 来计算甲烷总排放量。

$$CH4_{TOTAL} = \sum RM_i * EF_{CH4,i}$$

其中：

$CH4_{TOTAL}$ = 甲烷总排放量

RM_i = 采购养殖系统 i 的生乳量 (kg)

$EF_{CH4,i}$ = 养殖系统 i 的甲烷排放因子 (kg CH_4 /kg FPCM)

示例：

某公司有三个生乳供应商，使用不同的排放因子来最恰当地代表每种牛奶的供应情况。该公司从荷兰的一家供应商采购了 20,000 kg 常规 FPCM，并使用文献研究计算排放量。从法国的一家供应商采购了 10,000 kg 有机 FPCM，并使用 CAP'2ER 计算排放量。该公司还从法国的一家供应商采购了 20,000 kg 常规奶，并使用 GLEAM 计算排放量。

利用上文概述的拆分核算方法，估算出了每个排放源的甲烷排放量：

生乳供应	肠道发酵 CH_4 排放因子 (kg CH_4 / FPCM)	粪便管理 CH_4 排放因子 (kg CH_4 / FPCM)
荷兰常规奶供应	0.019	0.006
法国有机奶供应	0.027	0.008
法国常规奶供应	0.023	0.007

利用上述公式，计算公司甲烷排放量如下：

肠道发酵产生的甲烷排放：

$$(20,000 \times 0.019) + (10,000 \times 0.027) + (20,000 \times 0.023) = 1,110 \text{ kg } CH_4$$

粪便管理产生的甲烷排放：

$$(20,000 \times 0.006) + (10,000 \times 0.008) + (20,000 \times 0.007) = 340 \text{ kg } CH_4$$



识别甲烷排放热点

IDENTIFYING METHANE HOTSPOTS

识别甲烷排放热点

当企业制定好甲烷清单后，识别排放热点将是企业制定更广泛的乳业甲烷减排行动计划的关键步骤。排放热点指的是企业温室气体清单中温室气体排放量异常高的区域。找出这些排放热点可以帮助企业优化减排行动计划，使减排措施聚焦于供应链和温室气体清单中甲烷排放量最高的环节。

如何识别甲烷排放热点

热点应通过分析不同排放源或甲烷对温室气体总排放量的相对贡献来识别。排放热点受产品数量和产品排放因子的影响。例如，某乳品加工企业可能会采购 10,000 吨生乳（其排放因子为 1.1 kg CO₂e/kg 生乳）和 100 吨黄油（其排放因子为 10.5 kg CO₂e/kg 生乳）。尽管黄油的排放因子是生乳的 10 倍，但其排放量在公司乳品总排放量中所占的比例却不到 10%。根据绝对排放量，公司应将减排策略的重点放在生乳供应商上，而不是将主要精力投入到在黄油供应商上。

有关识别排放热点的更多信息，请参阅美国环保协会 + 商业报告《通往净零的路径：决定性的十年》。

识别排放热点的指标

能否通过分析清单数据来确定排放热点，取决于可用数据的详细程度。企业在识别排放热点时可以采取多维度分析方法，考虑多个数据点。以下是企业识别排放热点时可以评估的数据类型：

- **地区：**分析地区层面的数据，以便企业优先考虑排放量最大的地区，无论其受采购总量的影响，还是受农场规模或效率、粪便管理方法或饲料成分等特定国家因素的影响。
- **产品类型：**可按产品类型评估数据，将采购量和甲烷排放量最高的乳品确定为排放热点。
- **排放源：**可按照排放源（肠道发酵、粪便管理、饲料和乳业废物）进一步评估甲烷排放，肠道发酵是已知的最大甲烷排放源，减排策略可围绕肠道发酵进行。
- **供应商：**数据还可按照供应商分析，重点分析供应商的采购量和排放因子。
- **其他：**可根据企业特有的其他因素来确定排放热点。

无论采用何种分析维度，企业都应评估自身在供应链各个环节的影响力。如果企业在某个地区、产品或供应商处缺乏话语权或控制力，那么将减排策略的重点放在这些方面可能难以取得实质性效果。通常，企业对直接供应商的影响力较大，而对供应链上游供应商的影响力较小，因此在制定减排策略时需结合自身的供应链掌控能力，优先选择可以直接影响到的环节。

常见的乳业甲烷排放热点

正如本指南所述，肠道发酵和粪便管理是最大的乳业甲烷排放源。两者共同占生乳总排放量的一半以上，几乎涵盖了所有的乳业甲烷排放。因此，企业应将甲烷减排策略的重点放在这两个关键排放源上。即将发布的乳业甲烷行动联盟《乳业甲烷减排行动计划》（Dairy Methane Action Plan, DMAP）指南，将着重介绍常见的乳业农场甲烷减排策略，重点集中在肠道发酵和粪便管理。



结语

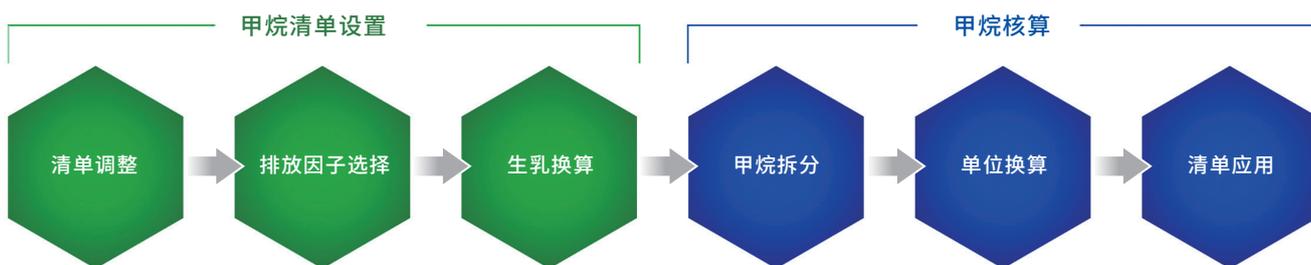
CONCLUSION

结语

减少甲烷排放将在未来几年内对减缓全球变暖产生显著影响，现在正是采取行动的关键时机。鉴于甲烷约占乳业温室气体排放的 60%，该行业在短期内具有显著的减排潜力，有望减缓全球气候变化的进程。为了实现这一目标，乳制品企业需要配备相关工具，能够对甲烷排放量进行测量并向公众披露。

本指南为乳业企业提供了一种方法，帮助乳业企业建立甲烷排放的拆分及核算清单，并根据生乳排放因子数据来源，从总排放量中拆分核算出甲烷排放量。

图 1 甲烷温室气体清单编制过程



这样，公司就能更容易地识别关键排放点、制定目标并实施甲烷减排策略。

乳业甲烷行动联盟即将发布一系列指南文件，将为乳业公司提供框架，帮助企业公开披露其甲烷排放量，制定专门的甲烷减排行动计划，并与供应商和利益相关方开展合作，推动行动计划的落地实施。

图 2 乳业甲烷行动联盟倡议的推进路径



由于所有指南都将建立在准确核算和报告甲烷排放的基础上，因此第一步“核算”对于希望采取行动、减少乳制品甲烷排放的企业而言至关重要。



附录

APPENDICES

附录 1：食物损失排放

食物损失核算概述

从温室气体核算的角度来看，有机废物产生的所有上游“从摇篮到农场大门”的排放都已包含在生乳排放因子中。生乳加工过程中产生的废物，则按照温室气体核算体系归类为范围三类别 5（运营过程中产生的废物）³⁴。此外，分销、零售和消费环节等下游产生的废物则被归入范围三类别 12（已售产品的报废处理）³⁵。

本指南主要面向乳业生产商和加工商，因此重点涵盖以下方面：1）农场生乳损失，该部分已经包含在购买生乳的“从摇篮到农场大门”碳足迹中；2）乳品加工企业在运营过程中产生的食品及纤维类废物，本节重点关注这一部分。

由于乳业生产商和加工商对自身运营环节的控制力最强，因此也最有能力对环节中产生的甲烷排放进行核算和减排。尽管已售出产品报废处理产生的甲烷排放同样具有一定影响，但目前不在乳业甲烷行动联盟的关注范围内。

数据要求

为评估运营过程中产生的废物甲烷排放量，需要计算乳品的有机废物总量，包括食物和纤维包装垃圾。理想情况下，最好使用加工过程或工厂废物审核期间收集到的一手数据，此外还需要了解各类材料的处置方法。

拆分方法

本节将为企业提供一种简化的拆分及核算方法，用于报告和披露运营过程中产生的废物（范围三类别 5）甲烷排放量。

如公式 8 所示，将每类废物的重量乘以每种处置方法的甲烷排放因子，即可计算出运营过程中产生的乳业废物甲烷排放量。

$$CH_{4W} = \sum (DFW * \%DM * EF_{CH_4; DM}) + \sum (FPW_{Dairy} * \%DM * EF_{CH_4, DM})$$

其中：

CH_{4W} = 乳业运营废物甲烷排放，kg CH_4

DFW = 乳品损耗量，kg

$\%DM$ = 采用各种处置方法的废物百分比

$EF_{CH_4; DM}$ = 每种处置方法的甲烷排放因子，kg CH_4 /kg

FPW_{Dairy} = 乳品相关的纤维包装废物量，kg

企业应通过废弃物审计来识别不同材料类型的废弃物数量以及各类废弃物对应的处置方式所占比例。不同处置方式的甲烷排放量差异较大，其中，填埋有机废弃物在厌氧条件下释放的甲烷最多。据美国环境保护署估算，每填埋 1,000 吨（907 公吨）食品废弃物，将产生约 34 公吨的甲烷排放³⁶。这相当于每千克有机废弃物释放 0.04 千克甲烷，或折合 1.08 千克二氧化碳当量。不过，具体排放因子会因废弃物成分、填埋场特性以及气候条件而存在显著差异。

相比之下，将有机废物进行堆肥处理可大幅减少甲烷排放。堆肥过程中甲烷的实际排放量取决于堆肥设施的具体条件。Nordahl 等人对 46 项不同的研究进行了荟萃分析，发现有机食物垃圾堆肥的平均甲烷排放量为 8.79×10^{-4} kg CH_4 / kg 食物垃圾³⁷。如果采用其他处置方法，则每种处置方法都应采用行业平均甲烷排放因子。专栏 8 提供了一个示例计算，详细说明如何计算不同废弃物处理方式的甲烷排放量。

专栏 8 运营过程中食物损耗产生的甲烷排放计算示例

某企业在加工过程中，每年产生 1,000 吨乳业食物废物，其中 50% 被送往垃圾填埋场，30% 被送往堆肥设施，剩下的 20% 被送往当地的养猪场用作饲料。该企业还产生了 100 吨乳品包装材料中的纤维类废物，全部送往回收设施处理。

该企业采用“回收成分法”来进行排放量分摊，即把回收利用过程中产生的处置排放归属于再生材料的使用方³⁴。因此，使用该方法时，与回收处理相关的排放不归属于该公司。同时，用作饲料的食品废弃物也不分配排放。该公司在温室气体核算中，范围三类别 5 乳业甲烷排放量计算如下：

$$CH_{4W} = (1,000 \text{ MT} \times 50\% \times 0.04 \text{ MT } CH_4/\text{MT}) + (1,000 \text{ MT} \times 30\% \times 8.79 \times 10^{-4} \text{ MT } CH_4/\text{MT}) \\ + (1,000 \text{ MT} \times 20\% \times 0 \text{ MT } CH_4/\text{MT}) + (100 \text{ MT} \times 30\% \times 0 \text{ MT } CH_4/\text{MT}) = 20.3 \text{ MT } CH_4$$

在这个例子中，近 99% 的甲烷排放来自食物垃圾填埋，约 1% 来自堆肥。

附录 2：乳品默认干物质含量

下表摘自欧洲乳业协会《乳品产品环境足迹分类规则》附件 5。

主要乳品的默认值

液态奶			
平均干物质含量 (g/100g)	全脂奶	半脱脂奶	脱脂奶
	12.3	10.5	9.1

乳清干制品								
平均干物质含量 (g/100g)	乳清 (未指明)	稀乳清	浓乳清	乳清粉	乳糖粉	浓缩乳清蛋白 (WPC)	乳清分离蛋白粉	高脂浓缩乳清蛋白
	6.8	4.8	26.5	96.5	99.8	94	95	粉

98

奶酪				
平均干物质含量 (g/100g)	鲜奶酪	软奶酪	半硬质奶酪	硬质奶酪
	23	49	59.9	66

发酵奶制品			
平均干物质含量 (g/100g)	匙装, 原味	匙装, 风味	匙装, 果味
	12.2	20.6	23.3

乳脂制品			
平均干物质含量 (g/100g)	无盐黄油	咸黄油	奶酱
	84.4	84.1	42.7

特定乳品的补充值

牛奶和乳清	平均干物质含量 (g/100g)
生乳	12.5
脱脂超高温灭菌奶	9.1
半脱脂巴氏杀菌奶	10.7
半脱脂超高温灭菌奶	10.3
全脂超高温灭菌奶	12.3
甜乳清液	6.8
天然酪乳	10.0
风味酪乳	16.8

奶酪	平均干物质含量 (g/100g)
白干酪, 40%fidm, 用全脂奶制成	21.4
Petit-Suisse 奶酪, 20% fidm, 原味, 用半脱脂奶制成	18.2
欧芝士达奶酪	26.5
低脂未固化奶酪制品	30.3
未固化奶酪酱, 40% fidm, 咸味, 13% 脂肪	34.1
马苏里拉奶酪	42.6
夸克奶酪, 鲜奶酪, 20% fidm	20.5
夸克奶酪, 鲜奶酪, 40% fidm	26.1
鲜奶酪, 50% fidm	40.7
淡味奶酪酱	25.9
奶酪酱	33.5
未固化奶酪酱, 60% fidm, 咸味, 42% 脂肪	52.0
马斯卡彭奶酪	54.7
卡门贝奶酪和类似奶酪, 50%fidm, 26% 脂肪	49.1
曼彻格奶酪	59.7
埃德姆奶酪	58.3
马斯丹奶酪	59.1
多姆奶酪	58.2
拉可雷特奶酪	58.0

奶酪 (续)	平均干物质含量 (g/100g)
高达奶酪	58.9
切达奶酪	63.3
加工奶酪, 25%fdm, 15% 脂肪	41.1
加工奶酪, 45%fdm, 22% 脂肪	48.9
儿童面包棒配加工奶酪零食	57.4
埃曼塔奶酪	63.8
格鲁耶尔奶酪	65.5
孔泰奶酪	68.5
斯蒂尔顿奶酪	63.8
帕玛森奶酪	73.8
帕尔马奶酪	69.1
波罗夫洛奶酪	62.0
佩科里诺奶酪	66.5
蓝纹奶酪	54.7
艾斯阿格奶酪	67.5
贝尔帕塞奶酪	54.5
戈贡佐拉奶酪	60.0
格拉纳奶酪	67.5
明斯特奶酪	57.0
蒂尔西特奶酪	49.0

干制品	平均干物质含量 (g/100g)
半脱脂奶粉	96.4
脱脂奶粉	96.0
全脂奶粉	96.8
甜乳清粉	96.4

发酵奶制品	平均干物质含量 (g/100g)
低脂原味酸奶	11.4
零脂原味酸奶	10.7
全脂原味酸奶	12.2
全脂双歧杆菌原味发酵乳	13.5
全脂原味奶油酸奶	16.7
低脂果味酸奶	19.9
全脂双歧杆菌风味甜味发酵乳	20.6
全脂果味酸奶	23.1
全脂双歧杆菌果味发酵乳	24.8
全脂风味奶油酸奶	25.8
希腊酸奶	21.7
开菲尔酸奶	12.0
保加利亚酸奶 - 全脂牛奶	11.8
保加利亚酸奶 - 全脂羊奶	16.5
保加利亚酸奶 - 全脂水牛奶	16.0
保加利亚酸奶 - 全脂山羊奶	11.0

乳脂制品和奶油	平均干物质含量 (g/100g)
奶酪酱, 低脂 60-62% 脂肪, 咸味 (0.5-3%)	60.5
奶酪酱, 低脂 60-62% 脂肪	63.3
无盐黄油	84.4
黄油, 咸味 (0.5-3%)	84.1
“淡” 奶油, 8% 脂肪, 浓稠或液态	17.4
奶油, 液态, 15-20% 脂肪, 超高温灭菌	24.1
奶油, 液态, 30% 脂肪, 超高温灭菌	37.6
奶油, 38% 脂肪	42.4
奶酱, 25% 脂肪	31.2
奶酱, 39-41% 脂肪	45.2
奶酱, 39-41% 脂肪, 咸味 (0.5-3%)	49.0

乳脂制品和奶油 (续)	平均干物质含量 (g/100g)
淡奶油	23.0
鲜奶油	45.5
稠奶油	53.1
凝脂奶油	67.8
特浓奶油	31.0
法式酸奶油	44.2

数据来源

<i>Ciqual</i>	FR	https://pro.anses.fr/TableCIQUAL/
<i>NEVO</i>	NL	http://www.rivm.nl/
<i>SFK</i>	DE	http://www.sfk-online.net/
<i>DTU</i>	DK	http://www.foodcomp.dk/
<i>BEDCA</i>	ES	https://www.bedca.net/
<i>BDA</i>	IT	http://www.bda-ieo.it/
<i>coF IDS</i>	UK	http://tna.europarchive.org/
<i>del Prato</i>	IT	Ottavio Savlvadori del Prato, "trattato di Tecnologia Casearia"
<i>IDF Bulgaria</i>	BL	保加利亚酸奶国家标准
<i>Uokik</i>	PL	基于 2009 年 12 月《消费者与食品市场报告》数据 http://uokik.gov.pl



参考文献

REFERENCES

- 1 Tubiello, F. N., Rosenzweig, C., Conchedda, G., Karl, K., Gütschow, J., Xueyao, P., Obli-Laryea, G., Wanner, N., Qiu, S. Y., Barros, J. D., Flammini, A., Mencos-Contreras, E., Souza, L., Quadrelli, R., Heiðarsdóttir, H. H., Benoit, P., Hayek, M., & Sandalow, D. (2021). Greenhouse gas emissions from food systems: Building the evidence base. *Environmental Research Letters*, 16(6), 065007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac018e>
- 2 Methane emissions in livestock and rice systems. (2023). FAO EBooks. <https://doi.org/10.4060/cc7607en>
- 3 UNEP. (2021). Global Methane Assessment: Summary for decision makers. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/35917/GMA_ES.pdf
- 4 Danone's Methane Ambition. (2023, January). <https://www.danone.com/content/dam/corp/global/danonecom/about-us-impact/policies-and-commitments/en/2023/methane-matters.pdf>
- 5 Saunio, M., Bousquet, P., Poulter, B., Peregón, A., Ciais, P., Canadell, J. G., Dlugokencky, E. J., Etiope, G., Bastviken, D., Houweling, S., Janssens-Maenhout, G., Tubiello, F. N., Castaldi, S., Jackson, R. B., Alexe, M., Arora, V. K., Beerling, D. J., Bergamaschi, P., Blake, D. R., & Brailsford, G. (2016). The global methane budget 2000–2012. *Earth System Science Data*, 8(2), 697–751. <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>
- 6 IATP (2022). Emissions Impossible: How emissions from big meat and dairy are heating up the planet, Methane Edition. <https://www.iatp.org/emissions-impossible-methane-edition>
- 7 Bizzarri, G. (2019). Climate change and the global dairy cattle sector: The role of the dairy sector in a low-carbon future. <https://www.fao.org/3/CA2929EN/ca2929en.pdf>
- 8 The National Dairy FARM (Farmers Assuring Responsible Management) Program. (2017). Environmental Stewardship Continuous Improvement, R 排放因子 ference Manual 2017. <https://nationaldairyfarm.com/wp-content/uploads/2018/10/ES-R 排放因子 ference-Manual.pdf>
- 9 Rotz, A., Stout, R., Leytem, A., Feyereisen, G., Waldrip, H., Thoma, G., ... & Kleinman, P. (2021). Environmental assessment of United States dairy farms. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128153>
- 10 Neue, H. U. (1993). Methane emission from rice fields. *Bioscience*, 43(7), 466-474. <https://www.ciesin.columbia.edu/docs/004-032/004-032.html>
- 11 Levine, J. S. (1994). Biomass burning and the production of greenhouse gases. *Climate biosphere interaction: biogenic emissions and environmental 排放因子 fects of climate change*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20040152054>
- 12 FAO. (2019). The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. Rome. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>
- 13 FAO. (2019). Food Loss and Food Waste | Policy Support and Governance Gateway | Food and Agriculture Organization of the United Nations | Policy Support and Governance | Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/policy-support/policy-themes/food-loss-food-waste/en/>
- 14 Move For Hunger. (2015). The Environmental Impact of Food Waste. <https://moveforhunger.org/the-environmental-impact-of-food-waste>
- 15 US EPA. (2023). Understanding Global Warming Potentials | US EPA. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- 16 Eagle, A.J., A.L. Hughes, N.A. Randazzo, C.L. Schneider, C.H. Melikov, E. Puritz, K. Jaglo, and B. Hurley. (2022). Ambitious Climate Mitigation Pathways for U.S. Agriculture and Forestry: Vision for 2030. Environmental D 排放因子 ense Fund (New York, NY) and ICF (Washington, DC). <https://www.edf.org/sites/default/files/documents/climate-mitigation-pathways-us-agriculture-forestry.pdf>
- 17 ISO. (2018). Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification. ISO/TS 14067:2018. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/71206.html>
- 18 WRI/WBCSD. (2004). The GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard | Corporate Standard | GHG Protocol.
- 19 (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee, and J. Romero (eds.)].
- 20 Ball, K. R., Burke, I. C., Collins, D. P., Kruger, C. E., & Yorgey, G. G. (2023). Digging deeper: Assessing the predictive power of common greenhouse gas accounting tools for soil carbon sequestration under Organic Amendment. *Journal of Cleaner Production*, 429, 139448.
- 21 International Dairy Federation. (2022). The IDF global Carbon Footprint standard for the dairy sector (Bulletin of the IDF n° 520/2022).
- 22 EDA. 2018. Product Environmental Footprint Category Rules for

- Dairy Products.
- 23 Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson- Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054, doi:10.1017/9781009157896.009.Table 7.15: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07.pdf
 - 24 Bekele, W., Guinguina, A., Zegeye, A., Simachew, A., & Ramin, M. (2022). Contemporary methods of measuring and estimating methane emission from ruminants. *Methane*, 1(2), 82-95. <https://doi.org/10.3390/methane1020008>
 - 25 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2018). Methane emission measurement and monitoring methods. In *Improving Characterization of Anthropogenic Methane Emissions in the United States*. National Academies Press (US).<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK519293/>
 - 26 Ledgard, S. F., Falconer, S. J., Abercrombie, R., Philip, G., & Hill, J. P. (2020). Temporal, spatial, and management variability in the carbon footprint of New Zealand milk. *Journal of dairy science*, 103(1), 1031-1046.<https://doi.org/10.3168/jds.2019-17182>
 - 27 Aguirre-Villegas, H. A., Larson, R. A., Rakobitsch, N., Wattiaux, M. A., & Silva, E. (2022). Farm level environmental assessment of organic dairy systems in the US. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132390.<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132390>
 - 28 IPCC. (2021). Changes to the underlying scientific-technical assessment to ensure consistency with the approved SPM. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_07.pdf
 - 29 IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf
 - 30 IPCC. (2021). IPCC AR6 WG1. Chapter 7: The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity – Supplementary Material.https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FGD_Chapter07_SM.pdf
 - 31 Thoma, G., Popp, J., Nutter, D., Shonnard, D., Ulrich, R., Matlock, M., ... & Adom, F. (2013). Greenhouse gas emissions from milk production and consumption in the United States: A cradle-to-grave life cycle assessment circa 2008. *International Dairy Journal*, 31, S3-S14.<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958694612001975>
 - 32 Hospers, J., Kuling, L., Modernel, P., Lesschen, J. P., Blonk, H., Batlle-Bayer, L., ... & Dekker, S. (2022). The evolution of the carbon footprint of Dutch raw milk production between 1990 and 2019. *Journal of Cleaner Production*, 380, 134863.<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134863>
 - 33 Wilkes, A., Wassie, S., Fraval, S., & van Dijk, S. (2020). Variation in the carbon footprint of milk production on smallholder dairy farms in central Kenya. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121780. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121780>
 - 34 WRI/WBCSD. (2013). *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions. Category 5: Waste Generated in Operations*. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/Ch5_GHGP_Tech.pdf
 - 35 WRI/WBCSD. (2013). *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions. Category 12: End-of-Life Treatment of Sold Products*.<https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/Chapter12.pdf>
 - 36 US EPA. (2023). *Quantifying Methane Emissions from Landfilled Food Waste*.https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-10/food-waste-landfill-methane-10-8-23-final_508-compliant.pdf
 - 37 Nordahl, S. L., Preble, C. V., Kirchstetter, T. W., & Scown, C. D. (2023). Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions from Composting. *Environmental science & technology*, 57(6), 2235-2247.<https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05846>



总部

帕克南大道 (Park Avenue South) 257 号
纽约, 10010
电话: 212 505 2100
传真: 212 505 2375

得克萨斯州奥斯汀

国会大道 (Congress Avenue) 301 号
得克萨斯州奥斯汀, 78701
电话: 512 478 5161
传真: 512 478 8140

马萨诸塞州波士顿

特里蒙特大街 (Tremont Street) 18 号
马萨诸塞州波士顿, 02108
电话: 617 723 2996
传真: 617 723 2999

科罗拉多州博尔德

百老汇大街 (Broadway) 2060 号
科罗拉多州博尔德, 80302
电话: 303 440 4901
传真: 303 440 8052

北卡罗来纳州罗利

韦斯特蔡斯大道 (Westchase Boulevard) 4000 号
北卡罗来纳州罗利, 27607
电话: 919 881 2601
传真: 919 881 2607

加利福尼亚州旧金山

米慎街 (Mission Street) 123 号
加利福尼亚州旧金山, 94105
电话: 415 293 6050
传真: 415 293 6051

华盛顿特区

西北区第 12 街 (12th St., N.W.) 555 号 400 室
华盛顿特区, 20004
电话: 202 387 3500
传真: 202 234 6049

荷兰阿姆斯特丹

芭芭拉 - 斯特罗兹拉恩 (Barbara Strozilaan) 101-201 号
阿姆斯特丹, 1083
荷兰

中国北京

中国北京东城区
安定门东大街 28 号
雍和大厦 C-501
邮政编码: 100007
电话: +86 10 6409 7088
传真: +86 10 6409 7097

比利时布鲁塞尔

艺术大道 (Avenue des Arts) 47-49 号
楼层: + 05
比利时布鲁塞尔, 1000

印度尼西亚雅加达

法特玛瓦蒂亚拉路 (Jl.RS Fatmawati Raya) 15 号
黄金广场写字楼 (Komplek Perkantoran Golden Plaza) E 座 12 号
南雅加达, 12420

墨西哥拉巴斯

中央区 (Zona Central) 革命街 (A. Revolución)
325 号
墨西哥拉巴斯, 23000
电话: +52 612 123 2029

英国伦敦

东契普大街 (Eastcheap) 41 号 3 楼
伦敦 EC3M 1DT
电话: +44 203 310 5909

日本东京

KS 大楼 (KS Building) 8 层
楮町 (Kojimachi) 4-5-20 号
日本东京千代田区, 102-0083

