

全生命周期视角下 城市固体废弃物（MSW） 管理过程中产生的 温室气体排放估算工具



第三版-中文版

用户手册

基于生命周期角度的城市固体废弃物（MSW）管理温 室气体排放（GHG）估算工具

该工具是基于“亚洲低碳发展监测、报告和核查（Measurement, Reporting and Verification, MRV）”项目（2013 财政年度）下开发

2021 年 12 月

第 III 版-中文版



用户须知:

这是 IGES 温室气体排放估算工具的第三版，专门用于量化中国废弃物管理系统在生命周期内产生的温室气体排放。在这个版本中，包括了中国所有现有的废弃物处理技术，并采用了中国具体的缺省值和排放因子来估算化石能源消耗以及电网用电等产生的排放。此外，带有气体回收的卫生填埋也包括在该版本的估算工具中。

我们欢迎所有用户的反馈意见，以改进该模拟计算工具，使其最适用于当地政府和其他用户的要求，以促进可持续的废弃物管理并减缓气候变化。

IGES 保留此估算工具的版权。IGES 将该估算工具公开给所有想改进这一工具的用户，但它不应该被抄袭用于出售或任何商业目的，感谢您尊重 IGES 的工作。

所有反馈意见请联系 Nirmala Menikpura 博士（nirmala.menikpura@mx.iges.or.jp），Dickella Gamaralalage Jagath Premakumara 博士（premakumara@iges.or.jp）以及 Rajeev Kumar Singh 博士（singh@iges.or.jp）。

资金支持

日本环境省

执行概要

2011 年，全球环境战略研究所（IGES）的可持续消费和生产小组开发了一个简单的电子表格模拟，即“IGES- GHG 计算器”，以促进地方政府就选择适当技术和设计适当的废弃物管理系统以减缓气候变化作出决策，以及评估它们在减缓温室气体排放方面取得的成就或进展。2013 年，我们开发了第二版，在技术和地域覆盖范围方面进行了几次修改。此后，亚太区域的许多城市和机构开始利用该工具估算废弃物管理中的温室气体排放。

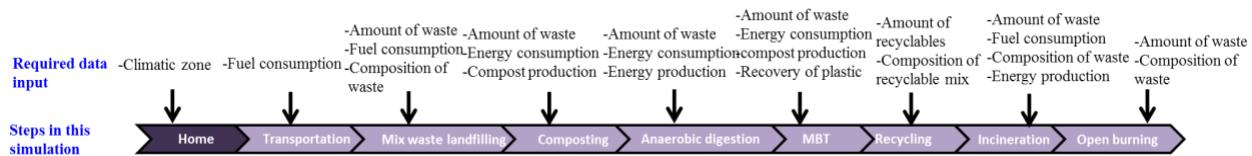
中国磐之石环境与能源研究中心(REEI)也计划举办几场关于提高认知能力的研讨会或工作坊，以支持关注城市生活垃圾管理问题的中国非政府组织，帮助他们将气候政策融入项目设计，并掌握城市生活垃圾管理中碳核算的方法。REEI 认为“IGES- GHG 计算器”是一个可以介绍给非政府组织和其他利益相关以估算中国废弃物处理部门气候影响的用户友好使用的工具，因此联系了 IGES-UNEP 环境技术合作中心（IGES Centre Collaborating with UNEP on Environmental Technologies，CCET)以寻求合作，共同修改该工具。考虑到 REEI 的请求和改进工具的兴趣，CCET 与 REEI 合作，进行必要的修改以适应中国的废物管理情景，同时修改 GHG 计算器和用户手册的中文翻译，以便更好地协助中国非政府组织去理解和使用该工具。在此，CCET 感谢 REEI 在工具和用户手册中文翻译的支持和贡献。

因此，这是“IGES-GHG 计算器”的第三版，该计算器是专门为了量化在生命周期角度下，中国废物管理系统产生的温室气体排放而开发的。这个版本整合了中国现有的所有废物管理方案。例如，在处理方案中新增了带有气体回收的卫生填埋选项，以扩大技术覆盖的范围，此外，还对“回收”的表格进行了重大修改，以从材料回收和循环能力的角度估算温室气体减排潜力，我们对“垃圾焚烧”表格也进行了改进，以计算中国通过能源回收可能避免的温室气体排放。

此外，在这个版本的温室气体计算器中，整个工具都使用了中国化石燃料的热值和更新的中国电网发电的温室气体排放因子，以更精确地计算温室气体排放。此外，还使用了 IPCC 第四次评估报告(AR4)中所述的更新的全球变暖潜势(GWP)值。我们还修订了用户手册，纳入了所有的改进和修改，并将计算器和用户手册翻译成中文，让用户使用起来更方便。

该估算工具由十个电子表格组成，包括用户指南、主页、废弃物运输、混合垃圾填埋/露天倾倒、堆肥、厌氧分解、机械生物处理（Mechanical Biological Treatment, MBT）、回收、焚烧和露天焚烧。除了前两个电子表格（用户指南和主页）以外，用户被要求在其他所有表格中输入数据，并选择符合当地废弃物管理的最适当条件。因此，用户应在每页表格中提供所需的输入数据，以便计算从废弃物运输、填埋、堆肥、厌氧消化、MBT、

回收、焚烧和露天焚烧等不同方面产生的温室气体排放，如下图所示。如果市政当局没有其中的某一项技术，但希望了解其气候影响，可以使用开发者提供的缺省值。



该估算工具采用了《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南》，以量化各种废弃物管理技术的温室气体排放。因此，这一工具对于国家温室气体排放清单的自下而上的方法是有用的，为了实现这一目标，应报告直接的排放量。每当使用其它文献进行排放量估算，我们都已在手册中标明文献来源。同时电子表格中的单元格都已分配了数学公式，以量化生命周期不同阶段的温室气体排放。在不同的废弃物处理技术下，对整个模拟过程中所使用的数学公式都进行了详细的说明，以模拟估算温室气体排放总量和个别技术的总温室气体减排潜力。基于温室气体排放总量和减排潜力，估算了各个废弃物处理技术的净温室气体排放量。考虑到从废弃物中回收所有可能的资源和材料的影响，温室气体净排放量反映了某一特定废弃物处理技术的总体气候影响/效益。因此，在决策和政策建议过程中，单个废弃物处理方法估算的温室气体净排放量可作为具体数字使用。

如果这种模拟估算工具适用于量化综合废弃物管理系统的气候效益，则将根据这些技术处理的废弃物的比例进一步汇总各个技术产生的温室气体净排放。综合系统的温室气体排放量估计值显示了该系统的总体进展，这种整体方法将非常有利于提高废弃物管理系统的气候效益，然后量化综合废弃物管理系统中潜在的温室气体减排。温室气体排放估算结果将对地方政府选择气候友好型废弃物管理技术的决策非常有用。

然而，这个版本没有计算露天焚烧垃圾产生的黑碳排放对气候的影响，因此不可能比较不同情景下的气候影响。如果相关的中国组织/非政府组织希望从包括黑碳影响在内的几种情景估计总体气候影响，强烈建议他们使用更详细的“排放量化工具”即“Emission Quantification Tool (EQT)”，该工具由 IGES-CCET 开发。

目录

前言	1
1. 用户指南页面	2
2. 主页	3
3. 废弃物运输的温室气体排放估算	4
4. 填埋的温室气体排放估算	6
5. 堆肥的温室气体排放估算	11
6. 厌氧分解的温室气体排放估算	14
7. 机械生物处理（MBT）的温室气体排放估算	18
8. 回收的温室气体排放估算	22
9. 焚烧的温室气体排放估算	26
10. 露天焚烧的温室气体排放估算	29
综合固体废弃物管理系统的温室气体排放估算	31
估算工具的不足以及改进的可能性	33
参考文献	34
附录 I: 需要的数据	35

前言

亚洲发展中国家传统固体废弃物管理产生的温室气体（GHGs）排放是全球气候变化的重要原因之一。露天倾倒和填埋是第三大人为甲烷排放源，这两种方法是目前亚洲国家最常用的废弃物处理方法。此外，由于使用化石能源，来自废弃物处理、运输和机械运作方面的温室气体排放（如 CO₂, N₂O）的影响也很大。然而，通过从废弃物管理中回收材料和能源，有可能间接减少温室气体排放。但是，负责废弃物管理的地方当局并不清楚废弃物管理与气候变化之间的联系。

IGES 的可持续消费与生产小组（SCP）在柬埔寨、老挝和泰国为地方政府举办了能力建设研讨会，以促进废弃物利用，并减缓气候变化。此外，还有关于废弃物管理做法产生的温室气体排放估算的培训。但是，对地方当局的人员来说很困难，因为他们不熟悉用于温室气体估算的计算公式。因此，IGES 开发了一个简单的电子表格模拟，即第一版 IGES 温室气体计算器，方便地方政府估计目前废弃物管理产生的温室气体排放，支持地方政府在选择适当的温室气体减缓技术方面的决策过程，评估采取合适的废弃物管理方法所取得的进展，并为国家温室气体清单报告提供自下而上的方法。

该废弃物管理温室气体排放估算工具用于量化单个处理技术和综合系统的温室气体排放。该估算工具采用生命周期方法（LCA），通过使用该估算工具，用户可以看到直接排放（用于国家温室气体清单和碳市场）和温室气体减排潜力（用于决策）的结果。通过在每个表中选择/输入特定国家或位置参数，这个估算工具可以适用于整个亚太地区的发展中国家。开发者通过纳入中国的排放因子、缺省值和废弃物特征，对温室气体排放计算器第三版进行了专门修改，以适用于中国情境。

该估算工具由十个电子表格组成，包括用户指南、主页、废弃物运输、混合垃圾填埋、堆肥、厌氧分解、机械生物处理（MBT）、回收、焚烧和露天焚烧。除前两页（用户指南和主页）之外，用户须在其他所有页上输入数据，并选择符合当地废弃物管理实践的最适当条件。因此，用户须输入每一页表格所需的数据，以计算废弃物运输、混合垃圾填埋、堆肥、厌氧分解、机械生物处理（MBT）、回收、焚烧和露天焚烧等不同方面的温室气体排放。如果市政当局没有采用所有这些废弃物处理技术，他们可以在相应的废弃物处理技术表格中输入数据，特别是现有的技术或将要使用的处理技术。下面将详细说明各个废弃物处理技术产生的温室气体排放计算表格。

1. 用户指南页面

第一页是为了介绍开发此估算工具的目的，并为用户提供有用的应用指南。通过阅读“用户指南”表格，用户将了解根据现有废弃物处理技术量化废弃物管理系统的温室气体排放所需的数据类型。估算工具中的用户指南页面如图 1 所示。

从全生命周期角度对不同固体废弃物处理方式产生的温室气体排放的量化模拟 - 中文版(2021)

开发此模拟计算工具的目的是提供一个简单的电子表格，用于计算和评估亚洲发展中国家现有的固体废弃物管理技术的温室气体排放。此外，考虑到生命周期角度废弃物资源回收带来的气候效益，该模拟计算工具将有助于估算您所在城市当前的废弃物管理实践中所产生的温室气体减排量。

在该模拟计算工具表格中，您需要选择与当地政府废弃物处理方式一致的页面输入相对应的数据。因此，如下图所示，您需要在每页表格中输入所需的数据，以计算从废弃物运输、混合垃圾填埋、堆肥、厌氧分解、机械生物处理、回收、焚烧和露天焚烧等不同方面的温室气体排放。如果您所在的地方没有运用到其中某些废弃物处理技术，可不必填写该部分数据，完善匹配你当地废弃物处理情况的信息即可。

The diagram illustrates the waste management process and the required data inputs for each step:

- Home:** -Amount of waste, -Fuel consumption, -Composition of waste
- Transportation:** -Amount of waste, -Fuel consumption, -Composition of waste
- Mix waste landfilling:** -Amount of waste, -Energy consumption, -Compost production
- Composting:** -Amount of waste, -Energy consumption, -Compost production
- Anaerobic digestion:** -Energy production, -Recovery of plastic
- MBT:** -Amount of recyclables, -Energy consumption, -Compost production
- cycling:** -Amount of recyclable mix, -Energy production
- Incineration:** -Fuel consumption, -Composition of waste, -Energy production
- Open burning:** -Amount of waste, -Composition of waste, -Energy production

Steps in this simulation: Home → Transportation → Mix waste landfilling → Composting → Anaerobic digestion → MBT → cycling → Incineration → Open burning

该模拟计算工具参考了《IPCC2006国家温室气体排放清单指南》以量化不同固体废弃物处理阶段的温室气体排放。温室气体排放是以二氧化碳当量 (CO₂-eq) 来衡量的，甲烷的温室气体效应是二氧化碳的 21 倍。

该模拟计算工具可作为培训材料，用于亚太地区地方政府开展固废处理温室气体排放估算的能力建设活动。**这是计算工具的第三版，为了适用于中国固废处理情况，第三版工具进行了专门的修改，加入了中国的排放因子、缺省值和废弃物特征。**如果想使用碳市场下的碳信用额度，建议使用更具体的现场数据来估算温室气体排放量。

该版本为试用版，供所有用户免费使用。我们欢迎所有用户的反馈意见，以改进该模拟计算工具，使其最适用于当地政府和其他用户的要求，以促进可持续的废弃物管理并减缓气候变化。版权所有声明：当以任何形式或任何方式复制或传送该表格时，必须明确标注来源。

开发者: Dr. Nirmala Menikpura Director: Premakumara Jagath DICKELLA GAMARALALAGE
Sustainable Consumption and Production (SCP) Group,
Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan.
邮箱: nirmala.menikpura@mx.iges.or.jp, samanthinir@yahoo.co.in, premakumara@iges.or.jp

IGES
Institute for
Global Environmental
Strategies



图 1: 用户指南页面

2. 主页

在该估算工具的主页上，用户被要求写下所在城市/直辖市的名字，选择国家和国家所属的气候带。选项以“下拉列表”的形式给出，如图 2 所示。一旦用户写下位置并选择了气候带，所有的对应的数据/信息（例如来自国家电网电力产生的温室气体排放、来自化石燃料燃烧产生的温室气体排放）将自动被匹配到各个相应的数学公式中以量化不同生命周期阶段的温室气体排放。

此外，主页还显示出废弃物管理系统所排放的温室气体数值。在数据输入阶段，用户可以看到“一旦您在其他表格中输入所需的数据，您所在城市的废弃物管理产生的直接和间接温室气体排放汇总将出现在以下活动中”。因此，一旦用户完成数据输入，他们要再次查看主页，以便看到温室气体估算的总体结果。在汇总表中，将显示来自每种处理方法和整个废弃物管理系统的直接温室气体排放（例如由于化石能源消耗、废弃物降解以及垃圾焚烧产生的温室气体排放）、避免产生的温室气体排放（例如物质和能量回收所避免的温室气体排放）和净温室气体排放。此外，还会显示每月废弃物管理的温室气体减少/排放总量，这将有助于确定当地废弃物管理所取得的进展。

The screenshot shows the homepage of the 'Chinese Solid Waste Management Greenhouse Gas Emissions Quantification Model'. At the top, there is a navigation bar with icons for Home, Waste Transport, Mixed Landfilling, Composting, Anaerobic Digestion, Mechanical Biological Treatment, Recycling, Incineration, and Open Burning. Below the navigation bar, the title '中国固体废弃物处理方式产生的温室气体排放量化模拟' is displayed, along with a note '第三版 (edited) - 2021年12月'. There are two input fields: '城市/地方政府' (City/Government) and '请选择当地所属气候区' (Please select the local climate zone), with a dropdown menu showing '潮湿热带地区' (Humid Tropical Region). A large text block below the inputs states: '一旦您在其他表格中输入所需的数据，您所在的城市/直辖市的废弃物管理产生的直接和间接温室气体排放汇总将出现在以下活动中' (Once you enter the required data in other tables, the direct and indirect greenhouse gas emissions from waste management in your city/province will be summarized in the following activities). Below this text is a table titled '整个废弃物管理系统的温室气体减排' (Greenhouse gas reduction of the entire waste management system). The table has columns for '固体废弃物处理方式' (Waste treatment method), '温室气体直接排放' (Direct greenhouse gas emissions), '通过资源回收间接减少的温室气体排放' (Greenhouse gas emissions reduced through resource recycling), '净温室气体排放' (Net greenhouse gas emissions), and '单位' (Unit). The table lists various waste management methods and their corresponding emission values. At the bottom of the page, there is a footer with links for '指南' (Guidelines), 'Home' (highlighted in red), 'Waste Transport', 'Mixed Landfilling', 'Composting', 'Anaerobic Digestion', 'Mechanical Biological Treatment', 'Recycling', 'Incineration', and 'Open Burning'.

固体废弃物处理方式	温室气体直接排放	通过资源回收间接减少的温室气体排放	净温室气体排放	单位
废弃物运输				千克二氧化碳当量/吨废弃物
混合城市固体废弃物填埋 - 露天倾倒				千克二氧化碳当量/吨混合废弃物
带有气体回收的固体废弃物填埋				千克二氧化碳当量/吨混合废弃物
堆肥				千克二氧化碳当量/吨有机垃圾
厌氧分解				千克二氧化碳当量/吨有机垃圾
机械生物处理				千克二氧化碳当量/吨混合垃圾
回收				千克二氧化碳当量/吨混合回收物
焚烧				千克二氧化碳当量/吨焚烧垃圾
露天焚烧				千克二氧化碳当量/吨露天焚烧垃圾
整个废弃物管理系统的温室气体减排				千克二氧化碳当量/吨收集废弃物
每月收集废弃物产生的总温室气体排放量				千克二氧化碳当量/每月收集废弃物

图 2:主页

3. 废弃物运输的温室气体排放估算

城市生活垃圾运输消耗了大量的化石燃料，而化石燃料的燃烧造成了温室气体排放。因此，估算工具的第三页用于量化废弃物运输过程中产生的温室气体排放。在亚洲发展中国家，废弃物运输主要使用两种化石燃料，即柴油和天然气。因此，用户需要输入每月使用这两种化石燃料运输的废弃物运输量和对应的化石燃料消耗量，如图3所示。此外，中国的一些城市正在使用电动卡车运输废弃物。因此，用户需要输入电动汽车运输的垃圾废弃物总量和所有电动卡车的月度耗电量。

The screenshot displays the 'Waste Transport Greenhouse Gas Emissions Estimation' page. At the top, a navigation bar includes 'Home', 'Waste Transport' (highlighted in yellow), 'Mixed Landfilling', 'Composting', 'Anaerobic Digestion', 'Mechanical Biological Treatment', 'Recycling', 'Incineration', and 'Open Incineration'. Below the navigation is a title 'Emissions from Waste Transport' and a 'User Guide' section with three points:

- 1) Please enter the quantity of waste transported by diesel trucks and monthly diesel consumption.
- 2) Please enter the quantity of waste transported by natural gas trucks and monthly natural gas consumption.
- 3) Please enter the quantity of waste transported by electric trucks and monthly electricity consumption.

The 'Input Data' section contains three groups for different transport methods:

- Diesel Truck Transport:** Fields for monthly transport volume (tonnes/month) and monthly fuel consumption (litres/month).
- Natural Gas Truck Transport:** Fields for monthly transport volume (tonnes/month) and monthly natural gas consumption (kilograms/month).
- Electric Truck Transport:** Fields for monthly transport volume (tonnes/month) and monthly electricity consumption (kilowatt-hours/month).

The 'Results' section shows the calculated emissions:

- 通过柴油卡车运输废弃物产生的温室气体排放: 0.00 千克二氧化碳当量/吨废弃物
- 通过天然气卡车运输废弃物产生的温室气体排放: 0.00 千克二氧化碳当量/吨废弃物
- 通过电动卡车运输废弃物产生的温室气体排放: 0.00 千克二氧化碳当量/吨废弃物

At the bottom, a summary row shows the total annual emissions: 0.00 千克二氧化碳当量/月. The footer includes a 'Guide' link and the same navigation bar as the top.

图 3: 废弃物运输的温室气体排放估算页面

本估算工具不包括原油开采、进口和炼油过程中产生的温室气体排放，因为这些排放（与燃烧过程中的排放相比）可能并不显著（Menikpura, 2011）。此外，化石燃料燃烧产生的 CH₄ 和 N₂O 排放被认为可以忽略不计。因此 CO₂ 可以被认为是废弃物运输中温室气体排放的主要组成部分。每种化石燃料都有对应的数学公式来量化 CO₂ 排放量。

在废弃物运输过程中，任何一种化石燃料燃烧产生的温室气体排放可用如下方式计算：

$$Emissions_{FF} = \frac{Fuel(units)}{Waste(tonnes)} \times Energy(MJ/unit) \times EF(kgCO2/MJ)$$

Emissions_{FF} – 使用化石燃料的运输工具产生的温室气体排放（千克CO₂/吨运输的废弃物）
Fuel (units) – 每月化石燃料消耗总量，（柴油单位为升；天然气单位为千克）
Waste (tonnes) – 每月通过柴油车或天然气车运输的废弃物的总量（吨）
Energy (MJ/unit) – 化石燃料的热值（例如柴油为36.42 兆焦/升，天然气为37.92 兆焦/千克）
EF – 化石燃料的CO₂排放因子（例如柴油为0.074 千克CO₂/兆焦，天然气为0.056 千克CO₂/兆焦）

使用电动卡车运输废弃物产生的温室气体排放总量可用如下方法计算：

$$Emissions_E = \frac{Electricity(kWh)}{Waste(tonnes)} \times EF(kgCO2/kWh)$$

Emissions_E – 电动卡车运输垃圾产生的温室气体排放（千克CO₂/吨运输的废弃物）
Electricity (kWh) – 每月电动卡车的电力消耗量（千瓦时）
Waste (tonnes) – 每月通过电动卡车运输的废弃物总量，单位是吨
EF – 中国电网发电的CO₂排放因子（0.855 千克CO₂当量/千瓦时）

一些城市正在尝试用天然气替代柴油，以减少废弃物运输产生的温室气体排放。因此，该估算工具显示了柴油卡车和天然气卡车运输每吨废弃物产生的温室气体排放。如果当地使用了这两种燃料以及电动卡车，结果将显示由于使用柴油、天然气和电力的综合影响，如图 3 所示。此外，废弃物运输的月度温室气体排放可以通过以下公式计算：

每月废弃物运输产生的温室气体排放量（千克 CO₂ 当量/月）= 运输每吨废弃物的温室气体排放 × 每月运输的废弃总物量

4. 填埋的温室气体排放估算

填埋是全球最常见的垃圾处理方法。垃圾填埋技术在过去几十年有了巨大发展，但世界各地的填埋技术发展并不均衡（Manfrediet等人, 2019）。例如，亚洲大多数发展中国家仍在实行没有气体回收的露天倾倒和垃圾填埋。大多数情况下，垃圾是在没有填埋设施的露天垃圾场处理的，但政府在推动卫生填埋场处理城市垃圾。因此，在一些情况下，卫生填埋技术的应用没有气体回收系统，大部分填埋气体释放到大气中，没有任何处理或控制。然而，在中国，利用垃圾填埋气体回收系统来减少甲烷排放到大气和从垃圾填埋气体中回收能源是一种日益增长的趋势。因此，“带有气体回收的卫生填埋”选项的温室气体排放已纳入到该计算工具“填埋”表格的第二部分。如果您所在的城市没有“带有气体回收的卫生填埋”项目，则不需要在第二部分输入任何数据。在第一部分中输入露天倾倒/无回收气体的填埋的数据，就足以估计最后通过填埋处置所产生的排放量。

城市生活垃圾在露天倾倒和填埋的厌氧分解中最终产生的填埋气体（Landfill Gas, LFG）中，约60%是甲烷，40%是二氧化碳。LFG中的甲烷组分对全球变暖产生影响而二氧化碳组分通常被认为是源于生物的，因此不被认为是温室气体（CRA, 2010）。来自填埋的不受控制的甲烷排放已被列为第三大人为排放污染源（IPCC, 2007）。

垃圾填埋处置地点产生的甲烷体量取决于许多因素，如垃圾的体量和组成、水分含量、pH 值和废弃物管理措施。一般来说，填埋处置场所的甲烷产量随着有机质含量和水分的增加而增加。有管理的卫生填埋场产生的甲烷可能比无管理的处置场（露天堆放）更高。在露天堆放的填埋场，大量垃圾会在上层厌氧腐烂。对于露天堆放的填埋场，堆放较深的固体废弃物处理场的甲烷排放量大于堆放较浅的处理场。

政府间气候变化专门委员会（IPCC）2006 年提出的废弃物模型在考虑到国家或地区特定的垃圾成分和气候信息，以及处置地点的情况，得出缺省值后，能够估算各种固体废弃物处置地点类型的排放量。因此，为了量化堆填区的正常废弃物管理处置措施所产生的温室气体排放，本估算工具采用了 IPCC 2006 废弃物模型。IPCC 清单强烈鼓励使用一阶衰减(FOD)模型，该模型能更准确地估计排放，因为它反映了堆填区废弃物的降解率 (IPCC 2006)。IPCC 模型中使用了以下数学公式来量化填埋或露天倾倒产生的温室气体排放。

一阶衰减模型的基本方程为：

$$(1) DDOC_m = DDOC_{m(0)} \times e^{-kt}$$

其中 $DDOC_{m(0)}$ 是可分解的可降解有机碳 (DDOC) 在反应最开始的质量，此时 $t=0$ 且 $e^{-kt}=1$ ， k 是反应常数，而 t 是以年为单位的时间。 $DDOC_m$ 是 DDOC 在任意时刻的质量。

从方程(1)可以看出在第一年结束的时候(从时间轴上的 0 点到 1 点)固体废物处理场中未分解的 DDOC 质量为::

$$(2) DDOC_{m(1)} = DDOC_{m(0)} \times e^{-k}$$

分解成 CH₄ 和 CO₂ 的 DDOC 的质量为:

$$(3) DDOC_{mdecomp(1)} = DDOC_{m(0)} \times (1 - e^{-k})$$

在一级反应中，产物（分解的 DDOC_m）的量总是与反应物（DDOC_m）的量成正比。这意味着何时存放 DDOC_m 并不重要。这也意味着，当已知处置现场累积的 DDOC_m 体量，加上去年的存量，就可以计算出 CH₄ 的产量，就像每年是时间序列中的第 1 年一样。然后，所有的计算都可以用公式(2)和(3)在一个简单的电子表格中完成。默认的假设是，每年累计的所有垃圾的 CH₄ 生成始于沉积后一年的 1 月 1 日。假设第一年的分解可以在不产生甲烷的情况下进行（厌氧条件形成所需的时间）。然而，当计算包括垃圾沉积年份垃圾较早开始反应的可能性时，就需要对沉积年份进行单独的计算。

从垃圾材料(W)中计算可分解的 DOC，即(DDOC_m):

$$(4) DDOC_{md(T)} = W_{(T)} \times DOC \times DOC_f \times MCF$$

在第 T 年末时该年存入未分解的 DDOC_m 体量:

$$(5) DDOC_{mrem(T)} = DDOC_{md(T)} \times e^{(-k \cdot ((13-M)/12))}$$

在第 T 年末时该年存入且分解的 DDOC_m 体量:

$$(6) DDOC_{mdec(T)} = DDOC_{md(T)} \times (1 - e^{(-k \cdot ((13-M)/12))})$$

在第 T 年末处置场地沉积的 DDOC_m 的体量:

$$(7) DDOC_{ma(T)} = DDOC_{mrem(T)} + (DDOC_{ma(T-1)} \times e^{-k})$$

在第 T 年末处置场地该年分解的 DDOC_m 的体量:

$$(8) DDOC_{mdecomp(T)} = DDOC_{mdec(T)} + (DDOC_{ma(T-1)} \times (1 - e^{-k}))$$

从已分解的 DOC 中生成的 CH₄ 的体量:

$$(9) CH_4 \text{ generated}_{(T)} = DDOC_{mdecomp(T)} \times F \times 16/12$$

从处置场地排放的 CH₄ 的体量:

$$(10) CH_4 \text{ emitted in year } T = (\Sigma CH_4 \text{ generated}_{(T)} - R_{(T)}) \times (1 - OX_{(T)})$$

其中:

T – 库存年

x – 材料种类 / 废弃物类别

W_(T) – 在第 T 年的沉积量

MCF – 甲烷校正因子

DOC - 可降解有机碳 (在有氧条件下)

DOC_f - 在厌氧条件下分解 DOC 的比例 (0.0-1.0)

DDOC - 可分解的可降解有机碳 (在厌氧条件下)

DDOC_{md(T)} - 在第 T 年所存入的 DDOC 量

DDOC_{mrem(T)} - 在第 T 年末时该年存入未分解的 DDOCm 体量

DDOC_{mdec(T)} - 在第 T 年末时该年存入且分解的 DDOCm 体量

DDOC_{ma(T)} - 在第 T 年末处置场地沉积的 DDOCm 的体量

DDOC_{ma(T-1)} - 在第 T-1 年末处置场地沉积的 DDOCm 的体量

DDOC_{mdecomp(T)} - 在第 T 年末处置场地该年分解的 DDOCm 的体量

CH₄ generated_(T) - 从已分解的 DOC 中生成的 CH₄ 的体量

F - 填埋气体中甲烷的体积分数 (0.0 – 1.0)

16/12 - CH₄/C 的分子质量之比

R_(T) - 在第 T 年回收的 CH₄

OX_(T) - 在第 T 年的氧化因子 (分数)

k - 反应速率常数

M – 反应开始的月份 (= 延后期 + 7)

为了计算垃圾填埋场或露天垃圾场的甲烷排放量，需要大量的缺省值，而甲烷生成量高度依赖于这些数值的准确性。表1给出了所需缺省值的详细说明。

表 1: 应用IPCC 2006垃圾模型所需的因子和缺省值

因子	单位	推导方法
混合垃圾处理量	吨/月	处理量/ 描述
沉积量	吉克/年	城市固体废弃物 (吨/月) ×12/1000
可降解有机碳(DOC)	DOC	根据 IPCC 的 DOC 缺省值, DOC _{MSW} = % of 厨余垃圾×0.15+ % of 园艺 垃圾×0.43 + % of 纸垃圾 × 0.4 + % of 纺织垃圾 × 0.24
厌氧条件下分解的 DOC 分 数 (DOC _f)	DOC _f	IPCC 缺省值是 0.5
甲烷生成速率常数	k	k 值将取决于当地的垃圾组成 k _{MSW} =% of 厨余垃圾×0.4+ % of 园艺垃圾 ×0.17 + % of 纸垃圾 × 0.07 + % of 纺织垃圾 × 0.07 + % of 一次性尿布 × 0.17+ % of 木头和稻 草 × 0.035
半衰期 (t _{1/2} , 年)	h=ln(2)/k	可根据 k 值计算
exp1	exp(-k)	可根据 k 值计算
分解开始的时间,月份 M	M	IPCC 推荐值是 12 个月之后

Exp2	$\exp(-k((13-M)/12)$	可根据 k 值以及 M 值推导
填埋气体中 CH ₄ 的体积分数	F	IPCC 推荐值是 0.5
有填埋覆盖层的甲烷氧化因子	OX	对于有填埋覆盖层的卫生填埋（不管是否有气体回收），IPCC 推荐值是 0.1，对于露天垃圾场，氧化因子为 0
填埋/露天堆放的甲烷校正因子	MCF	这个值将会根据管理实践改变，IPCC 推荐的缺省值针对有管理的（带有填埋覆盖物和衬垫），无管理的-深 (>5 米)，无管理的-浅 (<5 米)，未分类的分别为 1, 0.8, 0.4 以及 0.6

在模拟过程中，为了估算某一特定地点露天倾倒以及卫生填埋（带气体回收或无气体回收）的温室气体排放，使用者需输入每月平均数据，例如填埋混合垃圾的体量、填埋作业活动的化石燃料使用情况及混合城市固体废弃物的成分。此外，还要求用户在下拉列表中选择填埋场的类型，如图 4 所示。为了计算垃圾填埋场的温室气体排放，垃圾中不同部分的百分比之和应当是 100%，否则会出现错误信息，直到调整为 100%。

如果某城市有含气体回收项目的卫生填埋场，本计算工具假设其处置垃圾成分与第一部分中处置类型的垃圾成分相似，其他的技术具体数据例如日处理量、特定地点垃圾处置的起始年和结束年，作业活动的化石燃料和电网用电量、气体收集效率、回收的垃圾填埋气体的处理方法、垃圾填埋气体收集的起始和结束年份等需要在第二部分中输入。

在整个生命周期中，每吨降解废弃物的甲烷产量将被计算出来，并在第一部分和第二部分以千克 CH₄/吨处理垃圾的形式表示。此外，混合垃圾排放的温室气体总量将计算如下：

第一部分的温室气体排放：混合垃圾填埋/露天倾倒产生的温室气体排放 = 每吨垃圾产生的 CH₄ 排放 × GWP_{CH4} + 作业活动的温室气体排放

第二部分的温室气体排放：每吨经带气体回收的卫生填埋场处理混合垃圾产生的温室气体排放 = 作业活动的温室气体排放 + (每吨垃圾的 CH₄ 排放 – 收集的 CH₄) × GWP_{CH4} – 通过回收电力/将填埋气体作为热能所避免产生的温室气体排放

其中： GWP_{CH4} - CH₄ 的 GWP 值 (在 100 年的时间尺度内，CH₄ 的 GWP 被认为是 CO₂ 的 25 倍)

基于此，可以模拟计算出混合垃圾填埋场在特定地点的月度温室气体排放量。

每月的温室气体排放/减排（千克 CO₂ 当量/月） = 在第一部分中每吨填埋处理垃圾产生的温室气体排放 × 第一部分的堆填/露天倾倒的垃圾总量(吨/月) + 在第二部分中每吨填埋处理垃圾产生的温室气体排放× 带回收气体的卫生填埋场的垃圾总量(吨/月)

城市固体废弃物最终处置产生的温室气体排放

用户指南

- 输入每月混合垃圾填埋量
- 输入填埋过程中维持机械运行的化石能源总类及消耗量
- 为您所在城市的垃圾填埋选择合适的垃圾填埋类别
- 请在表1中输入用于填埋的混合垃圾组成
- 如果您所在的城市有带有气体回收的卫生填埋场，请在第二部分中输入数据，如果没有可不填入数据。

第一部分: 数据输入 (露天倾倒/没有气体回收的填埋)

用于填埋的混合垃圾总量	吨/月
机械活动过程中使用的化石燃料种类	升/月
机械活动过程中化石燃料消耗总量	升/月
选择您所在城市的垃圾填埋场类型	

请输入用于填埋的垃圾组成

组成	比例 (%)
厨余垃圾	
园林垃圾	
塑料	
纸张	
纺织品	
皮革/橡胶	
玻璃	
金属	
木屑和稻草	
一次性尿布	
有害垃圾	
其他垃圾	
合计	0.00

第二部分: 数据输入 (仅用于气体回收的卫生填埋)

在带有气体回收的卫生填埋场收处置的废弃物数量	吨/月
废弃物在卫生填埋场处理的起始年份 (例如 2019年)	年
废弃物处置的结束年份 (例如 2025年)	年
当前废弃物处置的年份 (例如2021年)	年
机械活动过程中使用的化石燃料种类	类型
在填埋场机械设施消耗的化石燃料总量	升/月
在填埋场机械设施消耗的电网电力总量	千瓦时/月

垃圾填埋气体 (LFG) 回收项目规格

气体收集效率	%
收集的垃圾填埋气体处理方式	%
垃圾填埋气体的利用效率 (例如发电效率、火炬效率)	年
开始填埋后气体回收项目的起始年份	年
开始填埋后气体回收项目的终止年份	年

结果

选项一: 露天倾倒/没有气体回收的填埋

有机废弃物露天倾倒/没有气体回收填埋的甲烷排放	0.00 千克甲烷/吨
混合废弃物填埋露天倾倒的温室气体排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨混合废弃物

选项二: 带有气体回收的卫生填埋

带有气体回收的卫生填埋的甲烷排放	0.00 千克甲烷/吨
甲烷逸散和机械活动产生的温室气体排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨混合废弃物
通过回收垃圾填埋气避免的温室气体排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨混合废弃物
带有气体回收的卫生填埋产生的温室气体净排放量	0.00 千克二氧化碳当量/吨混合废弃物

每月通过露天倾倒填埋处理废弃物产生的温室气体排放总量

0.00 千克二氧化碳当量/每月处理的废弃物

图 4: 填埋的温室气体排放估算页面

5. 堆肥的温室气体排放估算

在亚洲发展中国家，有机垃圾堆肥的手段已日益得到重视。在有机垃圾处理技术中，当地政府更喜欢堆肥，因为它简单、易于管理和成本低。因此，在亚洲，堆肥正成为一种流行的垃圾处理方式。在这个模拟中，第 4 张 Excel 表格是用于量化堆肥技术产生的潜在的温室气体排放。

堆肥过程产生的主要温室气体排放包括：i) 利用化石能源（例如电力和柴油）进行堆肥处理过程中所产生的温室气体排放；ii) 有机垃圾降解产生的温室气体排放。

就有机垃圾降解产生的温室气体排放而言，堆肥是一种好氧降解过程，废弃物中可降解的有机碳很大一部分被转化为 CO₂，这种 CO₂ 是来源于生物的，因此在计算碳排放时不会被考虑在内。CH₄ 可以在深层的堆肥中通过废弃物的厌氧降解产生。然而，其中的大部分又会在好氧环节被氧化掉。堆肥也会产生少量的 N₂O 排放，在本研究中，IPCC 公布了平均排放因子缺省值（例如 4kg CH₄/吨湿基有机垃圾和 0.3kg N₂O/吨湿基有机垃圾）用于量化堆肥产生的温室气体排放（IPCC, 2006）。

从一吨有机垃圾中可产生大量可销售的肥料。产生出来的肥料可用于农业，取代传统肥料。据文献所述，一吨优质堆肥可用于替代化肥，因为有可能以每吨堆肥产生 7.1kg 氮（N）、4.1kg 磷（P₂O₅）、5.4kg 钾（K₂O）的速率提供必要的养分（Patyk, 1996)¹。根据这些数据，在这个模型计算工具中估计了避免化肥生产的温室气体减缓潜力。通过生产每吨堆肥而避免使用化肥的温室气体排放量为 21.29 kg CO₂, 0.003 CH₄, 0.069 N₂O。然而，在实践中，如果农民在堆肥后没有减少化肥的使用，这种共同效益不应包括在计算中。

为了计算所有这些潜在的排放以及可能的温室气体排放规避量，用户被要求输入每月的平均数据，如用于堆肥的有机垃圾的体量、堆肥过程中消耗的化石能源、堆肥生产总量以及其中用于农业活动的比例，如图 5 所示。

下列数学公式已分配到对应的电子表格单元，以量化堆肥的温室气体排放。

堆肥作业活动的化石燃料燃烧产生的温室气体排放计算如下。如前所述，化石燃料燃烧产生的CH₄和N₂O的排放量被认为是可以忽略的，因此没有包括在这个公式中：

$$Emissions_{Operation} = \frac{Fuel(L)}{Waste(tonnes)} \times Energy(MJ / L) \times EF(kgCO2 / MJ)$$

Emissions_{operation} – 堆肥作业活动产生的温室气体排放（千克CO₂/吨运输垃圾）

¹如果有特定地点或国家的数据，这个数据可以更改。

Fuel (L) – 每月化能源消耗量（升）

Waste (tonnes) – 每月有机垃圾利用量（吨）

Energy (MJ/unit) – 化石燃料热值（例如柴油为36.42兆焦/升）

EF – 燃料的CO₂排放因子（例如柴油为0.074千克CO₂/兆焦）

有机垃圾降解产生的温室气体排放量计算如下：

$$Emission_{Degradation} = E_{CH4} \times GWP_{CH4} + E_{N2O} \times GWP_{N2O}$$

其中：

Emissions_{Degradation} – 有机垃圾降解产生的温室气体排放（千克CO₂/吨有机垃圾）

E_{CH4}- 有机垃圾降解时的CH₄排放（千克CH₄/吨垃圾）；在这个模型中应用了0.4这个缺省值（IPCC给出的平均数值（IPCC, 2006），如果有具体地点的数据，这个值是可以修改的。

GWP_{CH4} - CH₄的GWP（25千克CO₂/千克CH₄）²

E_{N2O} – 有机垃圾降解时的N₂O排放（千克N₂O/吨垃圾）；在这个模型中应用了0.3这个缺省值（IPCC给出的平均数值（IPCC, 2006），如果有具体地点的数据，这个值是可以修改的。

GWP_{N2O}- N₂O的GWP（298千克CO₂/千克N₂O）²

堆肥产生的总温室气体排放可通过将作业和垃圾降解产生的温室气体排放相加来计算

$$\text{堆肥产生的总温室气体排放} = Emissions_{Operation} + Emission_{Degradation}$$

用堆肥代替化肥所避免的温室气体排放计算如下：

$$AvoidedGHG_{Compost} = AC \times PC_{Agriculture} \times A_{GHG}$$

AvoidedGHG_{Compost} – 用堆肥代替化肥所避免的温室气体排放（千克 CO₂当量/吨垃圾）

AC – 产生的堆肥量（吨堆肥/吨垃圾）

PC_{Agriculture} – 堆肥用于农业和园艺的比例（%）

A_{GHG} – 相当于一吨堆肥替代化肥的温室气体减排潜力（千克 CO₂当量/吨堆肥）

² 在文献中，CH₄和N₂O的GWP值不同。该模型使用的CH₄和N₂O的数值分别为25和298，因为大多数已发表的工作都使用了AR4值，因此在该计算器中使用了100年时间尺度的AR4的全球变暖潜势值。

但是，如果堆肥使用者即使在施用堆肥后也不减少化肥的使用，AGHG 则不应该被包含在其中。

避免的温室气体排放总量可以用以下方法计算：

$$\text{总避免的温室气体排放} \left(\frac{\text{千克 CO}_2 \text{ 当量}}{\text{吨有机垃圾}} \right) = \text{堆肥替代化肥所避免的温室气体排放}$$

为了了解堆肥技术的整体气候效益或影响，净温室气体排放量可如下计算：

堆肥的净温室气体排放量 = 总温室气体排放 - 避免的温室气体排放总量

如果估算的温室气体净排放量仍然为正值(例如，由于消耗了过多的化石燃料或对生产的堆肥应用到农业和园艺的比例较低)，用户应清楚，目前的堆肥系统仍会对气候造成影响，因此需要进一步改进以减少温室气体排放。如果净温室气体排放值为负，则表明堆肥可能减少温室气体排放，以及其用作碳汇的可能性。

此外，每月由堆肥产生的温室气体排放量可估计如下：

每月堆肥产生的温室气体排放/减排（千克 CO₂ 当量/月）= 每吨堆肥处理的垃圾的温室气体排放 × 每月堆肥处理的垃圾总量（吨）

The screenshot shows a software interface for estimating greenhouse gas emissions from composting. The top navigation bar includes links for Home, Waste Transport, Mixed Waste Landfill, Composting, Anaerobic Digestion, Mechanical Biochemical Treatment, Recycling, Incineration, and露天焚烧 (Open-air Combustion). A blue header bar highlights '堆肥产生的温室气体排放' (Greenhouse gas emissions from composting). Below the header, there are three sections: 'User Guide' (用户指南), 'Data Input' (数据输入), and 'Results' (结果). The 'User Guide' section contains four numbered instructions. The 'Data Input' section contains input fields for various parameters, each with a unit: 吨/月 (ton/month) for waste type, 升/月 (liter/month) for fuel type, 吨/月 (ton/month) for total compost production, and % (percentage) for agricultural use. The 'Results' section displays three values: 0 千克二氧化碳当量/吨垃圾 (kg CO₂ equivalent/ton waste) for mechanical activity emissions, 0 千克二氧化碳当量/吨垃圾 (kg CO₂ equivalent/ton waste) for decomposition emissions, and 0.00 千克二氧化碳当量/吨垃圾 (kg CO₂ equivalent/ton waste) for the total greenhouse gas emission from composting. At the bottom, a blue bar shows the net greenhouse gas emission per ton of organic waste (0.00 千克二氧化碳当量/吨有机垃圾 (kg CO₂ equivalent/ton organic waste)). A summary line at the bottom indicates the monthly greenhouse gas emission total (0.00 千克二氧化碳当量/月 (kg CO₂ equivalent/month)). The bottom navigation bar includes links for Guide, Home, Waste Transport, Mixed Waste Landfill, Composting (highlighted in green), Anaerobic Digestion, Mechanical Biochemical Treatment, Recycling, and Incineration.

图 5: 堆肥的温室气体排放估算页面

6. 厌氧分解的温室气体排放估算

厌氧分解作为有机垃圾处理的潜力技术之一，在亚洲发展中国家越来越受到重视。在生物处理方法中，因为与该过程有关的高能量回收潜力及其有限的环境影响，厌氧分解是最具成本效益的。

为了量化厌氧分解的温室气体排放总量，我们设计了一个表格来量化温室气体排放和避免产生的温室气体排放量，厌氧分解主要通过两种方法排放温室气体：i) 使用化石燃料（如电力和柴油）产生的温室气体；ii) 由于反应堆不可避免的温室气体泄漏。该估算工具使用平均缺省值（2kg CH₄/吨干有机垃圾；IPCC, 2006）。如果有地区具体的数据，则应该替换缺省值。

厌氧分解有产生大量能量的潜力。沼气是厌氧分解的主要产物，其热值为20-25MJ/m³。沼气可通过各种技术转化为热能或电能。例如，在小型发电机(<200kW)和大型内燃机(1.5MW)中燃烧沼气可以产生大量的电力。(Pöschl et al., 2010)所产生的电能或热能可用于取代以化石燃料为基础的常规电能和热能生产，从而减少这些常规过程的温室气体排放。

与堆肥技术的结果类似，厌氧分解也有助于亚洲发展中国家避免有机垃圾填埋，从而避免有机垃圾在填埋降解过程中产生的温室气体排放。

为了从一个特定的厌氧分解设备计算所有这些潜在的排放和避免产生的温室气体排放量，用户被要求输入每月的平均数据，如用于厌氧分解的有机垃圾量，厌氧分解过程中使用的化石燃料和电能消耗量以及厌氧分解产物的类型（电能或热能），如图 6 所示。

下列数学公式已包含在对应的表格，以便根据用户输入的数据量化厌氧分解产生的温室气体排放和温室气体减排量。

用户被要求从厌氧分解中选择产物。例如，选择“电力”选项，在对应的“输出”下，会自动计算出潜在发电量，如图 6 所示。为了得到这个结果，我们使用了几种文献数据。详细的量化方法已经显示在同一表格的下半部分即所谓的“沼气和电力的计算”。

图 6: 厌氧分解的温室气体排放估算页面

由于化石燃料燃烧和使用电力操作机器所产生的二氧化碳排放量可以如下公式计算。如前所述，化石燃料燃烧产生的CH₄和N₂O的排放量被认为是可以忽略的。

$$Emissions_{Operation} = (FC \times NCV_{FF} \times EF_{CO_2}) + (EC \times EF_{el})$$

Emissions_{Operation} – 厌氧分解作业活动产生的温室气体排放（千克CO₂/吨有机垃圾）

FC - 不同活动类型的燃料消耗量（质量或体积/吨有机垃圾）

NCV_{FF} - 所消耗的化石燃料的净热值（兆焦/单位质量或体积）

EF_{CO₂} - 化石燃料燃烧的CO₂排放因子（千克CO₂/兆焦）

EC - 作业活动的电力消耗（兆瓦时/吨有机垃圾）

EF_{el} - 国网发电排放系数（千克CO₂当量/兆瓦时）

厌氧分解系统泄漏产生的温室气体排放(主要是 CH₄)可如下计算:

$$Emissions_{Treatment} = E_{CH_4} \times 1000 \times GWP_{CH_4}$$

Emissions_{Treatment} – 有机垃圾处理产生的温室气体排放（千克CO₂/吨有机垃圾）

E_{CH₄} – 由于泄露产生的CH₄排放（千克CH₄/千克湿重）

1000 – 计算每吨有机垃圾的干物质含量的换算因子

GWP_{CH4} – CH₄的GWP值（25千克CO₂/千克CH₄）

厌氧分解产生的总温室气体排放量可以通过将作业活动产生的温室气体排放量和由于泄漏产生的温室气体排放量相加来计算：

$$\text{总温室气体排放量} = \text{Emissions}_{\text{Operation}} + \text{Emissions}_{\text{Treatment}}$$

此外，我们还推导出数学公式来估计由于发电或使用沼气作为热能而可能避免的温室气体排放。如果市政当局开发厌氧分解设施，利用沼气发电，对避免潜在温室气体的贡献可计算如下：

$$AvoidanceGHG_{\text{Electricity}} = C_{\text{Biogas}} \times P_{\text{CH}_4} \times E_{\text{CH}_4} \times \frac{1}{CF_{\text{Energy}}} \times E_{\text{Powerplant}} \times EF_{\text{el}}$$

Avoidance GHG_{Electricity} – 发电所避免的温室气体排放总量（千克CO₂当量/吨有机垃圾）

C_{Biogas} – 沼气生成量（立方米/吨有机垃圾）

P_{CH4} – CH₄在沼气中的比例 (%)

E_{CH4} – CH₄的热值（兆焦/立方米）

CF_{Energy} – 能源转换系数（3.6兆焦/千瓦时）

E_{Powerplant} – 发电效率 (%)

EF_{el} - 国网发电排放系数（千克CO₂当量/兆瓦时）

如果市政当局开发厌氧分解设施，利用沼气作为热能来源，避免温室气体排放的潜力可计算如下：

$$AvoidanceGHG_{\text{Thermal}} = C_{\text{Biogas}} \times P_{\text{CH}_4} \times E_{\text{CH}_4} \times EF_{\text{CO}_2}$$

Avoidance GHG_{Thermal} – 由于热能生产所避免的总温室气体减排量（千克CO₂当量/吨有机垃圾）

C_{Biogas} – 收集的沼气体量（立方米/吨有机垃圾）

P_{CH4} – 沼气中CH₄的比例 (%)

E_{CH4} – CH₄的热值（兆焦/立方米）

EF_{CO2} – 液化石油气(LPG)燃烧的CO₂排放因子（千克CO₂/兆焦）（在该模型中，假设液化石油气的消耗可以用沼气代替）

厌氧分解所避免的温室气体排放总量可计算如下：

$$\text{避免的温室气体排放总量} \left(\frac{\text{千克 CO}_2 \text{ 当量}}{\text{吨有机垃圾}} \right) = \text{由于能源回收所避免的温室气体排放}$$

为了清楚厌氧分解作为一种有机垃圾管理办法的总体气候效益或影响，温室气体净排放量计算如下：

$$\text{厌氧分解的温室气体净排放量} \left(\frac{\text{千克 CO}_2 \text{ 当量}}{\text{吨有机垃圾}} \right) = \text{总温室气体排放} - \text{总温室气体减排}$$

与堆肥技术类似，如果估算的温室气体净排放量为正值，则意味着厌氧分解技术仍在对气候产生影响，因此应进一步提高能源回收效率，以减少温室气体排放。如果净温室气体排放值为负，则表明厌氧分解可能避免的温室气体排放和成为碳汇的可能性。此外，可以利用每吨有机垃圾的温室气体排放/减排量的估计结果来计算某一城市每月的温室气体排放/减排量。

$$\text{每月的温室气体排放/减排 (千克 CO}_2 \text{ 当量/月)} = \text{每吨厌氧分解处理有机垃圾产生的温室气体排放} \times \text{每月厌氧分解处理的有机垃圾总量 (吨)}$$

7. 机械生物处理（MBT）的温室气体排放估算

一般来说，机械生物处理（MBT）会被用作热处理前的预处理或作为固体废弃物的最终处置方式。MBT 可以通过在填埋前分解有机物质来减少有机垃圾的体积，将填埋地点的温室气体排放（甲烷）降至最低，并加强对不同物质的分离，如最终垃圾处置前废弃物稳定后的堆肥类材料和高能组分。MBT 促进有机垃圾在优化条件下（均质、通风、冲洗）快速降解。在 MBT 过程中，总体积减少高达 50%。稳定的材料可以分成三部分，如可降解材料、废塑料（用于生产垃圾衍生燃料（RDF））和惰性材料。

就MBT的过程而言，各阶段作业所使用的化石燃料和电力，以及有机垃圾的降解是温室气体排放的主要原因。在良好的管理下，如果有有机垃圾在好氧条件下降解，从垃圾堆中产生温室气体的可能性将大幅减小。如果甲烷（CH₄）在底层的MBT堆中产生，其中的大部分将在有氧环节被氧化。因此，释放甲烷（CH₄）进入空气的概率将会非常小。一般来说，MBT过程是一个有氧过程，因此垃圾中可降解有机碳的很大一部分被转化成二氧化碳，这部分二氧化碳又是源于生物的，根据相关规定，在计算温室气体排放时不会考虑在内。根据IPCC的指南，MBT过程也产生一氧化二氮（N₂O），但浓度较小。在此处模拟估算中，IPCC公布了4kg CH₄每吨湿基有机垃圾（范围为0.03-8kg CH₄每吨垃圾的均值）以及0.3kg N₂O每吨湿基有机垃圾（范围为0.06-0.6kg N₂O每吨垃圾的均值）的基准值，这些数值用于量化MBT堆中有机垃圾降解产生的温室气体排放。

与堆肥或厌氧分解技术类似，MBT工艺有助于最大程度减少有机垃圾填埋，从而避免在填埋的有机垃圾降解过程中产生的温室气体排放。此外，还可以利用降解的有机垃圾作为堆肥，从而减少化肥的使用量。避免使用化肥也可以大大有助于减少温室气体。然而，在使用混合垃圾MBT产生的堆肥类的产品中存在着重金属污染问题。在决定是否将该材料用作堆肥前，应测量重金属污染程度。

除此以外，亚洲发展中国家对从降解混合垃圾中回收的塑料用于RDF生产或通过热解工艺提取原油的兴趣日益浓厚。尽管RDF和原油生产需要额外的能源，但通过这两种方式从塑料中回收能源将有助于进一步减少温室气体，考虑到所有潜在的温室气体减排潜力，可以估算MBT过程对气候的影响。

为了量化 MBT 的总温室气体排放，本估算工具中设计了一个表格。这将估算 MBT 过程产生的温室气体排放量和温室气体减排潜力。类似于其他表格，要求用户输入 MBT 过程的月度平均数据如用于 MBT 过程的垃圾量、作业过程中使用的化石燃料种类和消耗量以及电力的消耗量。此外，如果用户将“可降解的堆肥类物料利用情况”选项选择为“是”，则用户应输入与堆肥生产有关的数据，例如每月生产堆肥的体量和生产的堆肥用于土壤改善的百分比。如果上述选项选择为“否”，则无需输入。

下一步将从下拉列表中进行“MBT 末端的塑料分离”选项的选择，如果用户在选项框里选择“是-用于RDF生产”或“是-用于原油生产”，则需要输入以下数据：用于原油/RDF生产的回收废塑料的体量、原油/RDF生产所需的柴油和电力量以及用于能源生产的原油/RDF的百分比。如果上述选项的选择是“否”，那么就不用输入相关数据。

如果用户输入所有需要的数据，输出将显示作物生产的堆肥使用量，以及 MBT 处理每吨垃圾产生的用于能源生产的原油/RDF 的量。此外，该工具还将计算整个 MBT 过程中根据每吨垃圾投入产生的温室气体排放、温室气体减排量和净温室气体排放量。

在MBT处理厂，由于化石燃料燃烧和使用电力操作机器而产生的二氧化碳排放量可以计算如下。如前所述，在此模拟中，化石燃料燃烧产生的CH₄、N₂O排放被认为是可以忽略的。

$$Emissions_{Operation} = (FC \times NCV_{FF} \times EF_{CO_2}) + (EC \times EF_{el})$$

Emissions_{Operation} – 作业活动的温室气体排放（千克CO₂/吨垃圾）

FC – 不同活动类型的燃料消耗量（质量或体积/吨垃圾）

NCV_{FF} – 所消耗的化石燃料的净热值（兆焦/单位质量或体积）

EF_{CO2} – 化石燃料燃烧的CO₂的排放因子（千克CO₂/兆焦）

EC – 作业活动的电力消耗（兆瓦时/吨垃圾）

EF_{el} – 国网发电排放系数（千克CO₂当量/兆瓦时）

MBT处理厂中垃圾降解产生的温室气体排放计算如下：

$$Emission_{Degradation} = E_{CH_4} \times OW_{Percentage} \times GWP_{CH_4} + E_{N_2O} \times OW_{Percentage} \times GWP_{N_2O}$$

其中：

Emissions_{Degradation} – 有机垃圾降解产生的温室气体排放（千克CO₂/吨有机垃圾）

E_{CH4} – 有机垃圾降解的CH₄排放（千克CH₄/吨有机垃圾）

OW_{Percentage} – 混合垃圾中有机垃圾的比例 (%)

GWP_{CH4} – CH₄ 的 GWP 值 (25 千克CO₂/千克CH₄)

E_{N2O} – 垃圾降解的N₂O排放（千克N₂O/吨垃圾）

GWP_{N2O} – N₂O的 GWP 值 (298 千克CO₂/千克N₂O)

MBT的总温室气体排放量将通过将作业活动产生的温室气体排放量和在深层的厌氧条件下有机垃圾降解产生的温室气体排放量相加来计算。

$$\text{总温室气体排放} = Emissions_{Operation} + Emissions_{Treatment}$$

此外，如果回收的塑料碎片用于生产RDF或原油，在本模拟中，将使用以下数学公式估算这些过程的温室气体排放：

$$Emissions_{RDF/crudeoilproduction} = (FC \times NCV_{FF} \times EF_{CO_2}) + (EC \times EF_{el})$$

EmissionsOperation – RDF和原油生产的温室气体排放（千克CO₂/吨垃圾）

FC – 不同活动类型的燃料消耗量（质量或体积/吨垃圾）

NCV_{FF} – 所消耗的化石燃料的净热值（兆焦/单位质量或体积）

EF_{CO₂} – 化石燃料燃烧的CO₂的排放因子（千克CO₂/兆焦）

EC – 作业活动的电力消耗（兆瓦时/吨垃圾）

EF_{el} – 国网发电排放系数（千克CO₂当量/兆瓦时）

如前所述，MBT 可通过几种方式减少温室气体排放。利用降解的有机物料作堆肥避免的温室气体排放可用如下方法估算：

$$AvoidedGHG_{Compost} = AC \times PC_{Agriculture} \times A_{GHG}$$

AvoidedGHG_{Compost} – 减少化肥生产过程所避免的温室气体排放（千克 CO₂ 当量/吨垃圾）

AC – 堆肥生产量（吨堆肥/吨垃圾输入）

PC_{Agriculture} – 生产的堆肥用于农业的比例 (%)

A_{GHG} – 相当于一顿堆肥的温室气体减排潜力（千克 CO₂ 当量/吨堆肥）

应当指出，使用RDF 或原油生产的能源会对气候变化不利，因为这种能源生产是以化石燃料为基础的（废塑料来自于原油）。换句话说，RDF 和原油燃烧产生的排放将等同于原始化石燃料燃烧产生的排放。因此，在这个估算中，没有考虑到由于使用塑料参与的、RDF 或原油生产的能源而减少的温室气体排放。但是，因为使用了塑料生产的RDF 或原油可能间接影响生产链（即可能少生产RDF 或原油），所以原油的开采、运输和加工有关的温室气体排放应包括在内。这个替代生产过程使其有助于节约化石能源，从而避免非生物资源的耗竭。

MBT 所避免的温室气体排放总量可计算如下：

避免的温室气体排放总量（千克 CO₂ 当量/吨垃圾）

= 使用堆肥类物料代替化肥所减少的温室气体排放

+ 减少原始化石燃料生产过程所避免的温室气体排放

下一步，为了了解 MBT 过程的总体气候效益或影响，对温室气体净排放量的估计是很重要的。温室气体净排放量的计算方法如下：

$$\text{MBT 的净温室气体排放 (千克 CO}_2 \text{当量/吨垃圾)} \\ = \text{总温室气体排放} - \text{总温室气体减排}$$

如果估计的温室气体净排放量仍然为正值，这确实意味着 MBT 过程仍在对气候产生影响。然而，与未事先处理的 100% 垃圾填埋相比，预计将有显著的温室气体减排。如果净温室气体排放值为负，这表明 MBT 的温室气体减排潜力和成为碳汇的可能性。

此外，一个特定城市/地点的每月温室气体排放量/减排量可以通过 MBT 处理的每吨垃圾的温室气体排放或减排估计结果来表示。

$$\text{每月的温室气体排放/减排 (千克 CO}_2 \text{当量/月)} = \text{每吨 MBT 处理垃圾产生的温室气体排放} \times \text{每月 MBT 处理的垃圾总量 (吨)}$$

The screenshot shows a web-based calculator for MBT greenhouse gas emissions. At the top, there is a navigation bar with icons for '主页' (Home), '废弃物运输' (Waste Transport), '混合垃圾填埋' (Mixed Waste Landfill), '堆肥' (Composting), '厌氧分解' (Anaerobic Digestion), '机械生物处理' (Mechanical Biological Treatment), '回收' (Recycling), '焚烧' (Incineration), and '露天焚烧' (Open-landfill Incineration). Below the navigation bar, the title '机械生物处理(MBT)产生的温室气体排放' (Greenhouse gas emissions from mechanical biological treatment) is displayed. The interface is divided into several sections:

- 用户指南 (User Guide):** A list of 7 items detailing data entry requirements:
 - 请输入通过MBT处理的垃圾量
 - 请输入MBT机械活动所需化石燃料的类型和消耗量
 - 请输入MBT机械活动所需的电量
 - 请输入每月生产堆肥类产品的比例
 - 请输入生产的堆肥类产品用于土壤改良的比例
 - 请选择MBT处理后的塑料垃圾利用状况
 - 请提供所选塑料垃圾能源转换过程的详细信息
- 数据输入 (Data Input):** Fields for entering data:
 - MBT处理的混合垃圾总量
 - 混合垃圾中可生物降解垃圾的比例
 - 请选择机械活动使用的化石燃料类型
 - 用于机械活动的化石燃料总量
 - 机械活动用电总量
 - 可降解的堆肥类物料利用情况
- 输出 (Output):** Fields for outputting results:
 - 没有产出
- 结果 (Results):** Summary table showing emissions values:

机械活动产生的温室气体排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨垃圾
垃圾降解产生的温室气体排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨垃圾
MBT过程产生的温室气体直接排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨垃圾
- 化肥生产所避免的温室气体排放**: 0.00 千克二氧化碳当量/吨混合垃圾
- MBT整个过程产生的温室气体净排放量(生命周期角度)**: 0.00 千克二氧化碳当量/吨混合垃圾
- 每月MBT过程产生的温室气体排放总量**: 0.00 千克二氧化碳当量/月

图 7: MBT 的温室气体排放估算页面

8. 回收的温室气体排放估算

经过令人信服的论证，循环回收是一个可持续的选择，大量有价值的材料可以回收再利用。因此，这将在环境、经济和社会领域产生巨大的影响。回收利用的主要环境效益之一就是对温室气体减排的重大贡献。因此，将回收纳入综合废弃物管理将是推动可持续性发展的最有价值的行动。

与其他技术类似，回收过程也会产生大量的温室气体排放。回收并不是一个简单的过程，在分拣设施进行预处理，用重型卡车将预处理的可回收物运输到回收厂，以及在分拣中心对不同类型的可回收物进行回收，都将排放大量的温室气体。另一方面，在此过程中回收的材料可以用来替代等量的原始材料生产，从而避免了大量的温室气体排放。因此，对回收计划产生的温室气体净排放量的估算对于决定整体气候影响是非常重要的。

分类回收是一个繁琐的过程。在一些城市，分类的可回收物品可能必须被送到位于不同省份的回收中心去进行处理，因此获取与不同类型可回收物回收相关的特定场地数据是一个具有挑战性的问题。由于这个原因，很难找到更多具体国家与分类回收相关的温室气体排放数据。为了详细评估一个具体地区回收过程的温室气体减排效果，需要知道回收物的成分、预处理设施的工序、预处理过程总的化石能源和电力消耗（清洁、减少颗粒大小、包装等）、运输到回收设施的距离、回收过程的化石能源和电力消耗量、具体国家的化石能源燃烧和电网发电的排放因子、不同可回收物的可回收性、以及计算回收材料的体量。分类回收是一个相当复杂的计算过程，需要不同层次的利益相关者的参与。例如，在城市一级，可获得的数据将限于每月产生的可回收物品的体量和可回收物品的组成。许多其他类型的数据需要从运输公司和回收公司收集。由于地方当局无法获得这些数据，因此很难更精确地计算整个回收过程生命周期的温室气体排放。

这个版本的工具在量化回收产生的温室气体排放方面提供了更多的灵活性。用户有两个选择：一是输入特定位置的数据（如果有），二是选择由开发人员提供的缺省值。选项I则根据具体地点的数据估计排放量；各城市可与相关回收/冶炼公司合作收集这些数据。通常回收公司会记录每月的数据（例如营运能力、作业活动的总化石燃料和电力消耗、每种可回收物品的再循环能力）。一旦将特定地点的数据输入到给定的表中，就可以根据用户提供的垃圾组成数据计算出温室气体排放量。如果用户没有特定位置的信息，那么他们可以使用选项II。在此选项下，根据缺省值估算温室气体排放量：在该工具的这个版本中，开发人员提供了最近发布的缺省值，这些缺省值来自于公开的文献。

回收过程产生的温室气体排放是基于在分拣过程和回收器械作业过程中化石燃料燃烧和电力使用产生的二氧化碳。如前所述，在这个估算中，甲烷（CH₄）和氧化亚氮（N₂O）的排放忽略不计。每一种垃圾回收所产生的温室气体排放量可通过如下计算：

$$Emissions_{Recycling} = (FC \times NCV_{FF} \times EF_{CO_2}) + (EC \times EF_{el})$$

Emissions_{Recycling} – 回收产生的温室气体排放（千克CO₂/吨可回收物）

FC – 不同活动类型的燃料消耗量（质量或体积/吨可回收物）

NCV_{FF} – 所消耗的化石燃料的净热值（兆焦/单位质量或体积）

EF_{CO₂} – 化石燃料燃烧的CO₂的排放因子（千克CO₂/兆焦）

EC – 作业活动的电力消耗（兆瓦时/吨可回收物）

EF_{el} – 国网发电排放系数（千克CO₂当量/兆瓦时）

为了量化温室气体减排潜力，应该考虑从每种类型的可回收物中回收的材料。从每种可回收物中回收的材料可以估算如下：

$$\text{回收的材料 (千克/吨可回收物)} = \text{可回收物的数量 (千克/吨)} \times \text{再循环能力 (\%)}$$

根据文献资料，纸张、塑料、铝、金属、玻璃等主要可回收物品的再循环能力为90-95%。回收材料的数量将等于可能避免使用的未开发资源的数量。开发者提供了通过原始生产过程链生产不同类型材料的缺省温室气体排放值，这些缺省值将被用来估计避免的排放。用户应意识到，用于计算温室气体避免排放总量的缺省系数与各国具体数据无关，这些系数是全球平均值。然而，如果可以使用中国特定的排放因子，将会提高总体结果的准确性。

为了量化回收产生的温室气体排放总量，可采用以下公式：

$$\begin{aligned} \text{混合回收物的温室气体排放 (千克CO}_2\text{当量/吨可回收物)} &= \text{纸制品的温室气体排放} \\ &(\text{千克CO}_2\text{当量/吨}) \times \text{可回收垃圾中纸制品的比例 (\%)} + \text{塑料的温室气体排放} \\ &(\text{千克CO}_2\text{当量/吨}) \times \text{可回收垃圾中塑料的比例 (\%)} + \text{玻璃的温室气体排放} \\ &(\text{千克CO}_2\text{当量/吨}) \times \text{可回收垃圾中玻璃的比例 (\%)} + \text{铝的温室气体排放} \\ &(\text{千克CO}_2\text{当量/吨}) \times \text{可回收垃圾中铝的比例 (\%)} + \text{金属的温室气体排放} \\ &(\text{千克CO}_2\text{当量/吨}) \times \text{可回收垃圾中金属的比例 (\%)} \end{aligned}$$

可以采用类似的方法来量化每吨混合可回收物的温室气体减排潜力。一旦对每吨混合可回收物的温室气体排放和温室气体减排量进行量化，就可以估算出温室气体净排放量如下：

$$\text{回收的净温室气体排放 (千克 CO}_2 \text{当量/吨混合可回收物)}$$

$$= \text{总温室气体排放} - \text{总温室气体减排}$$

如果估计的温室气体净排放量仍为正值，则意味着回收过程仍在对气候产生影响。在大多数情况下，由于避免了来自原始资源生产链的大量温室气体排放，预计温室气体净排放值可能为负。如果结果为净负温室气体排放值，则表示回收工艺链的温室气体减排潜力和成为碳汇的可能性。此外，根据回收每吨混合可回收物所产生的温室气体排放净额估计值，可以计算出特定城市/地点每月的温室气体排放/减排量。这一估计将显示回收对气候的总体影响。

每月的温室气体排放/减排（千克 CO₂当量/月） = 每吨混合回收物的温室气体排放 × 每月回收垃圾总量（吨）

必须指出的是，与其他废物管理技术相比，适当的回收的温室气体减排潜力将是显著的。因此，有必要更精确、更简洁地量化回收企业的温室气体排放。考虑到特定地点的数据，IGES 开发了更全面的模拟，以量化特定回收系统的总体气候效益。这种整体方法将非常有用，可以提供系统的方法，然后量化回收企业可能减少的温室气体排放。研究结果将有助于在新的市场机制下应用碳信用。

回收过程产生的温室气体排放

用户须知
回收并不是一个简单的单阶段过程。您所在的市政府或城市的分类可回收物可能被送往位于不同省份的各种回收设施。因此，获得与不同类型可回收物的回收有关的具体地点的数据是一个具有挑战性的问题。由于这个原因，很难找到更多关于回收利用的具体地点/工厂的温室气体排放。在本表中，您可以通过提供可回收物的成分和工厂的具体化石燃料和电力消耗数据，计算出您所在城市/市政当局的可回收物组合的大致温室气体排放量。如果您没有工厂的具体数据，请在单元格E28中选择“默认值”，然后将根据文献中的最佳可用排放因子计算每类可回收物的温室气体排放量。

用户指南

- 1) 输入每月可分离回收垃圾的数量
- 2) 在下表中输入可回收垃圾的组分

数据输入

已分离的可回收垃圾总量	吨/月
-------------	-----

请输入已收集的可回收垃圾组分

可回收物的类型	比例 (%)
纸制品	
塑料	
铝	
钢	
玻璃	
总计	0.00

估计回收利用的温室气体排放的数据来源

回收的废弃物数量	吨/月
用于回收利用的化石燃料类型	类型
化石燃料的消耗量	升/月
电网用电量	千瓦时/月
材料的再循环能力	%

回收物的类型				
纸制品	塑料	铝	钢	玻璃

结果

回收过程产生的温室气体直接排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨混合回收物
因回收而避免的温室气体排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨混合回收物

回收产生的温室气体净排放量(生命周期角度)	0.00 千克二氧化碳当量/吨混合回收物
------------------------------	-----------------------------

每月回收过程中产生的温室气体排放总量	0.00 千克二氧化碳当量/月
---------------------------	------------------------

图 8: 回收的温室气体排放估算页面

9. 焚烧的温室气体排放估算

最初，垃圾焚烧技术被重视的主要目的是为了减少75%的垃圾质量和90%的垃圾体积。如今，从垃圾焚烧中回收能源作为能源危机的解决方案引起了人们的极大兴趣，而且它还通过能源回收实现了经济效益。由于这些原因，在亚洲发展中国家，将焚烧作为一种短期解决方案来解决日益严重的垃圾管理问题，引起了越来越多的关注。就气候影响而言，焚烧技术将直接消除垃圾填埋场厌氧降解产生的甲烷（这是亚洲发展中国家的常规做法），并取代以化石燃料为基础的发电。

一般来说，应用设计合理、适合当地情况的垃圾转化能源技术将大大有助于减缓温室气体排放和增加能源回收。然而，亚洲发展中国家大多数现有焚烧场的共同问题是焚烧效率太低，导致了许多失效案例。例如，垃圾的组成和水分含量对焚烧厂的效率有很大的影响。

为了对一些特定地区焚烧产生的温室气体排放进行详细评估，需要收集有关可燃物成分、现场作业活动的化石能源和电力消耗量以及从焚烧过程中回收的总电力和热量等数据。为了计算通过能源回收可能避免的温室气体排放，用户应提供能源回收的类型、电和热回收的效率、用于现场作业活动的回收的电/热的百分比等。所有必需的用户指南已提供给用户以了解输入数据的规格。

焚烧过程释放出大量的二氧化碳进入大气层，从而加剧了温室效应。然而，正如IPCC指南所建议的，只有化石燃料燃烧产生的与气候变化相关的二氧化碳排放才被认为是温室气体排放（IPCC, 2006）。由于焚烧的城市垃圾是一种不均匀的垃圾混合物，就二氧化碳而言，对生物成因碳和化石成因碳做了区分。而氧化部分，只有来自含化石燃料的垃圾（塑料、某些纺织品、橡胶、液体溶剂和废油）焚烧产生的碳排放会被考虑在内，垃圾中所含的生物质材料（如纸张、食物和木材废料）燃烧产生的排放属于有机生物源排放，不应在温室气体排放估算中考虑在内（IPCC, 2006）。该工具使用了IPCC不同类型垃圾的干物质含量、总碳含量、化石碳组分和氧化因子的缺省值，以量化焚烧过程产生的温室气体。

此外，正如IPCC清单指南里所述，在焚烧过程中有可能排放像CH₄和N₂O这样的温室气体，然而，这种排放的量级取决于焚化炉的类型和管理做法。因此，在表格中需要选择焚烧技术类型，这决定了CH₄和N₂O排放的缺省值。

利用化石燃料和电网电力运行作业所产生的温室气体排放可以用如下公式量化：

$$Emissions_{Operation} = (FC \times NCV_{FF} \times EF_{CO_2}) + (EC \times EF_{el})$$

Emissions_{Operation} – 焚烧产生的温室气体排放（千克CO₂/吨焚烧物）

FC – 现场活动的燃料消耗量（质量或体积/吨焚烧物）
 NCV_{FF} – 所消耗的化石燃料的净热值（兆焦/单位质量或体积）
 EF_{CO2} – 化石燃料燃烧的CO₂排放因子（千克CO₂/兆焦）
 EC – 现场活动的电力消耗量（兆瓦时/吨焚烧物）
 EF_{el} – 国网发电排放系数（千克CO₂当量/兆瓦时）

IPCC推荐的Tier 2方法(IPCC, 2006)在这个模拟中被采用，以量化燃烧一吨湿城市生活垃圾所产生的基于化石的CO₂排放。

$$CE = \sum_i (SW_i \times dm_i \times CF_i \times FCF_i \times OF_i) \times \frac{44}{12}$$

CE – 燃烧排放（千克CO₂/吨垃圾）

SW_i - 焚烧第i种固体废弃物的体量（湿重）（千克/吨垃圾）

dm_i - 焚烧垃圾中的干物质含量(部分湿重)

CF_i - 干物质中的碳比重（总碳含量），（比重： 0.0 – 1.0）

FCF_i - 化石碳在总碳中的比例（比重： 0.0 – 1.0）

OF_i - 氧化系数（0.0 – 100%）

44/12 - 从C到CO₂的转化系数

i - 焚烧的化石基的垃圾种类例如纺织品、橡胶、皮革、塑料

垃圾焚烧时，燃烧产物中的大部分碳会氧化成二氧化碳。然而，由于燃烧过程的低效率，一小部分碳可能会不完全氧化，留下一些未燃烧或部分被氧化的碳。而对于垃圾焚烧，则假设燃烧效率接近100%，因此可以假设OF_i为1。

一旦对上述阶段的CO₂排放进行了量化，焚烧在生命周期中的温室气体排放可计算如下：

焚烧总温室气体排放量（千克CO₂当量/吨）= OE + CE

TE – 作业排放（千克CO₂当量/吨焚烧物）

CE – 燃烧排放（千克CO₂当量/吨焚烧物）

此外，焚烧的总温室气体减排潜力可以计算如下：

总温室气体减排潜力(千克 CO₂ 当量/吨焚烧物)

= 避免的等量的常规电力生产所产生的温室气体

+ 避免的由化石燃料提供等量热量排放的温室气体

下一步，可以对温室气体净排放量进行估算，以了解焚烧过程的总体气候效益或影响。焚烧产生的温室气体净排放量估计如下：

$$\text{焚烧产生的温室气体净排放量 (千克 CO}_2\text{ 当量/吨焚烧物)} \\ = \text{总温室气体排放量} - \text{总温室气体减排量}$$

与任何其他技术类似，如果焚烧产生的估算温室气体净排放量为正值，则意味着焚烧对气候产生了影响。如果进行了焚烧，由于避免了传统发电和供热以及有机垃圾填埋所产生的大量温室气体排放，预计将产生净负温室气体排放值。此外，如果结果为净负温室气体排放值，则表明焚烧的温室气体减排潜力。根据焚烧每吨可燃物所产生的净温室气体排放估计值，可以计算出特定城市/地点每月的温室气体排放/减排量。这一估计将显示焚烧对气候的总体影响。

$$\text{每月的温室气体排放/减排 (千克 CO}_2\text{ 当量/月)} = \text{每吨湿垃圾燃烧产生的温室气体排放} \times \text{每月燃烧的垃圾量 (吨)}$$

用户指南

- 请选择焚烧方式
- 请输入用于焚烧焚烧的垃圾总量
- 请输入焚烧厂机械活动所需的化石燃料消耗量
- 请输入焚烧厂机械活动所需的电网电量
- 请输入用于焚烧的垃圾组成
- 请输入从焚烧厂回收的能量种类和数量

数据输入

选择焚烧的类型	类型
输入垃圾焚烧总量	吨/月
输入焚烧厂机械活动所需的化石燃料类型	类型
输入焚烧厂机械活动所需的化石燃料数量	升/月
输入焚烧厂机械活动所需的电网电量	千瓦时/月

请输入用于焚烧的垃圾组成

组成	比例 (%)
厨余垃圾	40.00
园林垃圾	10.00
塑料	7.00
纸制品	6.00
纺织品	6.00
皮革·橡胶	5.00
玻璃	5.00
一次性尿布	2.00
有害垃圾	3.00
其他垃圾	3.00
合计	100.00

能量回收的数据输入

热力和电力都有
15
10
50
10
煤油

输出

总电力生产	0.00 千瓦时/吨
总热力生产	0.00 兆焦每吨

结果

机械活动产生的温室气体排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨燃烧的垃圾
垃圾燃烧产生的温室气体排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨燃烧的垃圾
焚烧过程产生的化石燃料温室气体直接排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨燃烧的垃圾
替代传统电力生产而避免的二氧化碳排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨燃烧的垃圾
替代传统燃料而避免的二氧化碳排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨燃烧的垃圾
焚烧过程避免的温室气体排放	0.00 千克二氧化碳当量/吨燃烧的垃圾

焚烧产生的化石燃料类温室气体的净排放 (生命周期角度) **0.00 千克二氧化碳当量/吨焚烧垃圾**

每月焚烧过程产生的温室气体排放总量 **0.00 千克二氧化碳当量/月**

图 9: 焚烧的温室气体排放估算页面

10. 露天焚烧的温室气体排放估算

人们认为，在露天垃圾场和填埋场不加控制地焚烧大量垃圾是节约土地和处置可燃材料的最便宜、最简单的减少体积的方法，因此，这种趋势在日益加强。然而，这种主要的方法已经不能再被接受了，因为它对环境和当地社区都构成了严重的威胁。需要制定法规来禁止这种不可接受的做法。

除了化石燃烧产生的CO₂排放，露天焚烧还会产生不完全燃烧的各种有毒副产品，如碳氢化合物、颗粒物和黑碳、苯和一氧化碳。最近的研究表明，黑碳是导致全球气温上升的第二大因素，而二氧化碳仍然是导致全球变暖的第一大因素。然而，IPCC或任何其他国际组织仍没有公布黑碳对气候的影响的缺省值。因此，在这个版本中，只考虑了露天焚烧的化石燃料产生的CO₂排放来量化气候影响。然而，估算黑碳排放和相关气候影响的选项是未来将其纳入该工具的非常重要的一步。

与填埋管理不同，任何作业和维护活动都不需要使用化石燃料，因此在作业活动中不存在任何温室气体排放。

IPCC推荐的Tier 2方法（IPCC, 2006）在该模拟中被采用，以量化湿城市生活垃圾露天焚烧的化石燃烧产生的CO₂排放。正如IPCC指南中所解释的，对于露天焚烧，除了氧化因子外，所有的缺省值都与焚烧相似。在露天焚烧过程中，较高的垃圾氧化率并不完全是由于燃烧过程效率低，IPCC建议露天焚烧的氧化因子（OF）为58%。

$$CE = \sum_i (SW_i \times dm_i \times CF_i \times FCF_i \times OF_i) \times \frac{44}{12}$$

CE – 燃烧排放（千克CO₂/吨垃圾）

SW_i - 露天焚烧第*i*种固体废弃物的体量（湿重）（千克/吨垃圾）

dmi - 焚烧垃圾中的干物质含量(部分湿重)

CF_i - 干物质中的碳比重（总碳含量），（比重： 0.0 – 1.0）

FCF_i - 化石碳在总碳中的比例（比重： 0.0 – 1.0）

OF_i – 氧化系数（0.0 – 100%）

44/12 – 从C到CO₂的转化系数

i – 露天焚烧的化石基的垃圾种类例如纺织品、橡胶、皮革、塑料

一旦对露天焚烧过程中以化石为基础的CO₂排放进行了量化，就可以将其视为总温室气体排放。与其他处理方法不同，露天焚烧不可能避免温室气体排放过程。因此，温室气体净排放等于温室气体总排放过程。

值得注意的是，为了量化露天焚烧对气候的总体影响，黑碳排放的影响应该被考虑在内。这些改进需要在未来的中文版本中完成。

主页 > 废弃物运输 > 混合垃圾填埋 > 堆肥 > 厌氧分解 > 机械生物处理 > 回收 > 焚烧 > 露天焚烧

用户指南

- 1)请输入露天焚烧的垃圾总量
- 2)请输入露天焚烧的垃圾成分

数据输入

请输入露天焚烧的垃圾总量 吨/月

请输入露天焚烧垃圾的成分	
组分	比例 (%)
厨余垃圾	
园林垃圾	
塑料	
纸制品	
纺织品	
皮革/橡胶	
玻璃	
金属	
一次性尿布	
有害垃圾	
其他垃圾	
合计	0.00

结果

露天焚烧产生的化石类二氧化碳排放 0.00 千克二氧化碳当量/吨露天焚烧垃圾

每月露天焚烧产生的温室气体排放总量 0.00 千克二氧化碳当量/月

[指南](#) [主页](#) [废弃物运输](#) [混合垃圾填埋](#) [堆肥](#) [厌氧分解](#) [机械生物处理](#) [回收](#) [焚烧](#) [露天焚烧](#)

图 10: 露天焚烧的温室气体排放估算页面

综合固体废弃物管理系统的温室气体排放估算

该计算工具可用于量化个别处理技术以及综合废弃物管理系统的气候效益。为了估算来自一个综合系统的温室气体净排放，将进一步根据这些技术处理的废弃物的比例汇总来自各个技术分别的温室气体净排放。通过将不同类型的废弃物，如有机垃圾、可回收物、可燃物和混合都市固体废弃物聚集在一起，就可以估算出某一特定地点每吨收集的废弃物的温室气体排放量。在“主页”中运用了以下的数学公式。

综合系统的净温室气体排放（千克CO₂当量/吨垃圾）=

填埋的净温室气体排放（千克CO₂当量/吨填埋的混合垃圾）×经填埋处理的垃圾的比例
+堆肥的净温室气体排放（千克CO₂当量/吨有机垃圾）×经堆肥处理的垃圾的比例 + 厌氧分解的净温室气体排放（千克CO₂当量/吨有机垃圾）×经厌氧分解处理的垃圾的比例 + MBT的净温室气体排放（千克CO₂当量/吨有机垃圾）×经MBT处理的垃圾的比例 + 回收的净温室气体排放（千克CO₂当量/吨筛选的可回收物）×经回收处理的垃圾的比例 + 焚烧的净温室气体排放（千克CO₂当量/吨焚烧物）×经焚烧处理的垃圾的比例 + 露天焚烧的净温室气体排放（千克CO₂当量/吨垃圾）×经露天焚烧处理的垃圾的比例

综合系统估计的温室气体净排放量表明了系统的总体进展。各个处理方法和综合系统的温室气体排放汇总将在“主页”显示，如图 11 所示。

The screenshot shows the homepage of the 'China Solid Waste Management Greenhouse Gas Emissions Quantification Model'. At the top, there is a navigation bar with steps: '主页' (Home) > '废弃物运输' (Waste Transport) > '混合垃圾填埋' (Mixed Waste Landfill) > '堆肥' (Composting) > '厌氧分解' (Anaerobic Digestion) > '机械生物处理' (Mechanical Biological Treatment) > '回收' (Recycling) > '焚烧' (Incineration) > '露天焚烧' (Open Burning). Below the navigation bar, it says '中国固体废弃物处理方式产生的温室气体排放量化模拟' (Quantification of greenhouse gas emissions from solid waste management methods in China) and '第三版 (edited) - 2021年12月' (Version 3 (edited) - December 2021). There are dropdown menus for '城市/地方政府' (City/Government) set to '北京' (Beijing) and '请选择当地所属气候区' (Please select your local climate zone) set to '潮湿热带地区' (Humid Tropical Region). A note below says '一旦您在其他表格中输入所需的数据，您所在的城市/直辖市的废弃物管理产生的直接和间接温室气体排放汇总将出现在以下活动中' (Once you enter the required data in other tables, the direct and indirect greenhouse gas emissions from waste management in your city/straight轍 will appear in the following activities). A large table below lists various waste management processes and their corresponding greenhouse gas emission factors:

固体废弃物处理方式	温室气体直接排放	通过资源回收间接减少的温室气体排放	净温室气体排放	单位
废弃物运输				千克二氧化碳当量/吨废弃物
混合城市固体废弃物填埋 - 露天倾倒				千克二氧化碳当量/吨混合废弃物
带有气体回收的固体废弃物填埋				千克二氧化碳当量/吨混合废弃物
堆肥				千克二氧化碳当量/吨有机垃圾
厌氧分解				千克二氧化碳当量/吨有机垃圾
机械生物处理				千克二氧化碳当量/吨混合垃圾
回收				千克二氧化碳当量/吨混合回收物
焚烧				千克二氧化碳当量/吨焚烧垃圾
露天焚烧				千克二氧化碳当量/吨露天焚烧垃圾
整个废弃物管理系统的温室气体减排				千克二氧化碳当量/吨收集废弃物
每月收集废弃物产生的总温室气体排放量				千克二氧化碳当量/每月收集废弃物

At the bottom, there is a footer with navigation links: '指南' (Guidelines), '主页' (Home), '废弃物运输' (Waste Transport), '混合垃圾填埋' (Mixed Waste Landfill), '堆肥' (Composting), '厌氧分解' (Anaerobic Digestion), '机械生物处理' (Mechanical Biological Treatment), '回收' (Recycling), '焚烧' (Incineration), and '露天焚烧' (Open Burning).

图 11: 主页的温室气体排放总结

这种整体方法将非常有利于提供系统的计算方式，从而量化综合废弃物管理系统可能达到的温室气体减排效果。温室气体排放估算结果也将对地方政府在选择气候友好型垃圾管理技术方面的决策过程非常有用。

估算工具的不足和改进的可能

如前所述，开发估算工具电子表格来量化地方的温室气体排放方面有很多优势。然而，了解开发/应用此生命周期评估工具的局限性也很重要。一些具体数据，例如废弃物成分的组成数据，可能无法在地方层面获得，即使开发者尽力来开发一个用户友好的工具，用户仍然会在收集一些必要数据时发现困难。

在这个工具版本中，模拟估算中包括了所有的垃圾处理技术。然而，作者正在考虑进一步改进该估算工具，以提高用户友好性。此外，在估算中还做了一些可能影响最终结果准确性的假设。例如，与其他废弃物管理技术相比，适当的回收计划具有显著的温室气体减排潜力。因此，有必要对地方政府层面的回收企业的温室气体排放进行更准确、更简明的量化。然而，由于缺乏具体国家的数据，这个版本的模拟使用了在全球范围内公开的缺省值和排放因子。但是，对于中国的材料回收，建议使用国家/地区特定的排放因子。

在这个模拟中，由于大多数亚洲发展中国家都在实践这些主要的处理方法，因此将填埋和露天倾倒作为比较常见的基础场景。然而，在某些情况下，其他类型的技术，如焚烧或 MBT 将是一些城市的垃圾处理基础方案，作者理解这些问题，并将在未来改进工具，以包括不同类型的基本情景。

敬请广大用户提出意见和建议，以便进一步改进此估算工具。

参考文献

Bovea, M.D., Ibáñez-Forés, V., Gallardo, A., Colomer-Mendoza, F.J. 2010. Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study. *Waste Management* 30 (2010) 2383–2395.

Conestoga-Rovers & Associates (CRA), 2010. Landfill gas management facilities design guidelines, Richmond, British Columbia. Available in <http://www.env.gov.bc.ca/epd/mun-waste/waste-solid/landfills/pdf/Design-guidelines-final.pdf> (accessed 20 August 2012).

DEDE (Department of Alternative Energy Development and Efficiency). 2008. Annual report, Ministry of Energy, Thailand.

IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston HS Buendia L Miwa K Ngara T Tanabe, K (Eds.). Published: IGES, Japan.

IPCC, 2007. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

Manfredi S., Tonini. D., Christensen, T.H. and Scharff, H. 2009. Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research* 27: 825–836.

Menikpura, S.N.M. 2011. Development Sustainability Indicators for Evaluating Municipal Solid Waste Management Systems- LCA Perspective, PhD thesis, The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.

Patyk, A. 1996. Balance of Energy Consumption and Emissions of Fertilizer Production and Supply. Reprints from the International Conference of Life Cycle Assessment in Agriculture, Food and Non-Food Agro-Industry and Forestry: Achievements and Prospects, Brussels, Belgium, 4-5 April 1996.

Pöschl, M., Ward, S. and Owende, P, 2010. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy*, 87, 11, pp. 3305-3321.

附录 I：所需数据

步骤/处理技术	需要的数据类型	单位
废弃物运输	通过柴油卡车运送的废弃物量	吨/月
	月度柴油消耗量	升/月
	通过天然气卡车运送的废弃物量	吨/月
	月度天然气消耗量	千克/月
	通过电动卡车运送的废弃物量	吨/月
	月度电力消耗量	千瓦时/月
混合垃圾填埋（露天倾倒/无气体回收的卫生填埋）	月度混合垃圾填埋量	吨/月
	填埋作业柴油消耗量	升/月
	垃圾组成	%
混合垃圾填埋（带气体回收的卫生填埋）	带气体回收的卫生填埋场处理的垃圾量	吨/月
	填埋时操作机械所用燃料的总消耗量	升/月
	填埋作业活动的电网电力消耗量	千瓦时/月
	气体收集效率	%
	填埋气体利用效率	%
	被填埋回收气体所替代的化石燃料类型	类型
堆肥	经填埋处理的厨余和园林垃圾量	吨/月
	堆肥作业的化石能源消耗量	升/月
	堆肥总产量	吨/月
	用于农业及园艺的堆肥比例	%
厌氧分解	经厌氧分解处理的厨余和园林垃圾量	吨/月
	厌氧分解作业的化石能源消耗量	升/月
	厌氧分解作业的电力消耗量	千瓦时/月
机械生物处理 (MBT)	经 MBT 处理的垃圾量	吨/月
	MBT 作业的化石能源消耗量	升/月
	MBT 作业的电力消耗量	千瓦时/月
	堆肥类物料的生产量	吨/月
	生产的堆肥类物料用于土壤改善的百分比	%
回收	分离的可回收物量	吨/月
	可回收物组成	%
	回收的垃圾体量	吨/月

	用于回收利用的化石燃料类型	类型
	化石燃料的消耗量	升/月
	电网用电量	千瓦时/月
	材料的再循环能力	%
焚烧	经焚烧处理的垃圾量	吨/月
	焚烧作业的化石能源消耗量	升/月
	焚烧作业的电力消耗量	千瓦时/月
	可燃物的组分	%
	电力生产量	千瓦时/月
	现场作业的用电比例	%
	回收热量	兆焦/月
	现场作业的回收热利用比例	%
露天焚烧	经露天焚烧处理的垃圾量	吨/月
	垃圾组成	%

全生命周期视角下城市固体废弃物（MSW）管理过程中产生的温室气体排放 估算工具第三版-中文版

开发者 Dr. Nirmala Menikpura, Dr. Dickella Gamaralalage Jagath Premakumara 以及 Dr. Rajeev Kumar Singh

贡献者 赵昂、袁雅婷、陈仕凯（实习生）

翻 译 袁雅婷、陈仕凯（实习生）

通 讯 Dr. Dickella Gamaralalage Jagath Premakumara (premakumara@iges.or.jp) and Dr. Rajeev Kumar Singh (singh@iges.or.jp)

IGES Centre Collaborating with UNEP on Environmental Technologies (CCET)
Institute for Global Environmental Strategies (IGES)
2108-11 Kamiyamaguchi, Hayama, Kanagawa 240-0115 Japan