



清洁生产杂志

第 365 卷, 2022 年 9 月 10 日, 132848

综合 CO₂ 减排战略的最小边际减排成本曲线的发展

穆罕默德·拉梅, Dhabia M. Al-Mohannadi, 帕特里克 林克

展示更多

大纲 | 分享 引用

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132848>

获得权利和内容

根据知识共享许可

开放获取

抽象的

由于气候行动的成本很高, 规划者和政策制定者需要就可能的战略提供一致的指导, 以低成本减少温室气体排放。此类策略的制定需要考虑给定位置的能源以及 CO₂ 捕获、利用和存储系统中存在的许多可能选择。此外, 确定最佳成本 CO₂ 减排途径所需的集成系统分析最好以简单的图形格式进行交流, 以利于不同教育背景的规划者和政策制定者的理解。用于制定以 CO₂ 为重点的战略捕获、利用和存储 (CCUS) 系统, 最近提出了一种方法来执行 CO₂ 的高级成本分析。通过制定综合最小边际减排成本曲线 (Mini-MAC) 的减排途径。这项工作扩展了考虑详细能源系统选项的方法。该方法涉及使用能源系统模型为综合能源系统开发额外的边际减排成本曲线, 这些模型可以考虑替代技术, 包括太阳能、风能和燃料转换以及可再生能源供应和能源需求的动态, 这会影响到此类系统的规模和成本系统。该方法还涉及将能源系统信息纳入组合的最小边际减排成本曲线, 该曲线捕获跨能源和 CCUS 选项的低成本 CO₂ 信息减排。由此产生的 Mini-MAC 曲线总结了能源和 CCUS 选项中可用的最低成本解决方案, 以实现不同程度的二氧化碳减排。该方法应用于考虑多个 CO₂ 排放源、利用选项、存储以及可再生能源和燃料转换选项的案例研究, 以说明其用途。



关键词

CO₂减排; CO₂捕获; 再生能源; 边际减排成本; 间歇性

1. 介绍

为了应对全球变暖及其相关后果,全球努力集中于限制温室气体排放,尤其是 CO₂,目标是到 2050 年实现净零排放(国际能源署, 2021 年)。为实现这一目标,需要在全球范围内大规模实施不同的策略来限制 CO₂的产生、避免其排放到大气中以及从大气中去除 CO₂。可再生能源系统(RES)、CO₂捕获利用和封存(CCUS)以及负排放技术(NETs)被认为是实现净零目标的关键支柱(IEA, 2021)。然而,由于成本高昂,实施这些途径同时保持可观的经济增长具有挑战性。据预测,全球需要投资约 50 万亿美元来实施主要的 CO₂减排战略:可再生能源、电动汽车、CO₂捕获和储存、氢气和生物燃料(Klebnikov, 2019 年)。由于可用的选项多种多样但价格昂贵,因此遵循系统的评估方法非常重要,这些方法可以筛选并选择最有效的途径。

实施可持续技术的有效和有见地的决策需要考虑路径对不同可持续性维度的影响:社会、经济和环境。这项工作的范围包括后两个维度,特别是从经济和环境评估中得出相互矛盾的结论是很常见的(Wunderlich et al., 2021)。在许多情况下,经济和环境影响作为技术经济和生命周期评估的结果分别报告。忽略任何一个维度都可能导致负面结果(Norris, 2001),因为在一个标准中表现良好的各种途径可能在另一个标准中失败。例如,最近对 CO₂的经济前景的评论捕获和利用(Hepburn 等人, 2019 年)报告称,甲醇生产的 CO₂盈亏平衡成本介于 -50 至 370 \$/tCO₂之间。不同的经济绩效归因于影响环境绩效的基本假设(如 H₂源:廉价的污染重整或昂贵的清洁电解)。因此,整合问题的双方可以通过启用组合分析来平衡权衡(Zimmermann 等人, 2020 年)。

过程集成领域提供了多种基于优化的方法,这些方法在探索大量替代减排策略方面非常强大,同时考虑了不同途径的环境和经济特征。这些方法使用数学规划或夹点方法来优化在环境约束下减少 CO₂的成本(Manan 等人, 2017 年)。已经开发了不同的模型来优化各种 CO₂减排选项中的规划。例如,Al-Mohannadi 和 Linke(2016)通过提出混合整数非线性程序(MINLP)来优化 CCUS 实施,以最大限度地降低改造 CO₂的成本在设定的 CO₂排放配额下捕获、利用和封存现有产业集群。Al-Mohannadi 等人。(2020)提出了一种两步建模方法,可以对 CO₂运输基础设施进行更详细的建模,同时简化 CO₂网络优化模型。Lameh 等人后来提出了一种简单且互补的图形方法。(2020)通过源汇概况的利用和封存探索 CO₂减排方案的高层次经济学和分配。Eladl 等人。(2020)通过采用遗传算法来最小化能源中心的成本,同时通过引入可再生能源来满足环境约束,解决了优化可再生能源实施的问题。阿维索等人。(2021)提出了一种模糊优化模型,用于规划其中一种负排放技术(增强风化网络)。优化可以为成本最优的 CO₂减排途径的详细实施提供综合指导。然而,开发的模型并未考虑整体 CO₂涵盖不同可用途径的还原系统。每个模型都侧重于一个路径,该路径由可能构成解决方案的不同选项组成。此外,解决方案是以集成系统的形式获得的,需要进一步分析才能理解和证明。

作者最近开展的一项工作(Lameh 等人, 2021 年)解决了这一差距,方法是使用最小边际减排成本(Mini-MAC)曲线为高水平分析经济有效的 CO₂减排途径提供系统方法。边际减排成本曲线(MAC)是一个有效的指标,可以整合不同 CO₂减排方案的技术经济和环境绩效(Zimmermann 等人, 2020 年)。它被定义为经济影响(成本)与环境影响(CO₂减排)之比,并且可以针对任何 CO₂减排途径进行计算(Enkvist 等人, 2007 年)。(Lameh 等人,

2021 年) 开发了一种方法来获得可以代表 CCUS、RES 和 NET 路径的成本曲线, 同时考虑各种选项的成本、二次排放和容量。通过使用 Mini-MAC 对路径进行优先排序, 实现了经济高效的 CO₂ 减排规划。假定每个考虑的选项对于指定的 CO₂ 水平具有不变的成本减少, 这意味着总成本与相关减排水平之间存在线性关系。虽然这对许多 CCUS 和 NET 路径都适用, 假设实施规模足够大以保持线性假设, 但在表示 RES 时可能会出现问题。这是因为无法准确表示可再生能源间歇性供应和需求变化的动态。不同的可再生能源的动态和波动的需求可以在设计能源系统中发挥重要作用 (Limpens 等人, 2019 年), 应该考虑它们以提供全面的见解。

可以在各种能源建模工具中考虑变化的可再生能源供应的动态和能源需求的波动。不同的建模方法, 无论是基于模拟还是优化, 都通过定义以建模时间步长和时间范围为特征的时间分辨率来表示能源供需的时间变化 (Chang 等人, 2021 年)。根据建模工具的不同, 时间步长可以在 1 小时到一年之间变化, 时间范围可以从 1 天到多年不等。根据 (Poncelet 等人, 2016), 较低的分辨率可能会导致过于乐观的结果 (低成本和高容量)。另一方面, 更高的分辨率可能会导致技术困难, 因为模型需要非常高的计算能力才能解决问题, 这是一个足够的时间。优化模型尤其面临后一个问题。可以通过从高分辨率集中采样数据并解决不太复杂的采样问题的优化来在模型的准确性和技术要求之间进行权衡。抽样应确保数据代表能源供应和需求的每日和季节性变化, 以尽量减少误差。加布里埃利等人。(2018) 开发了一种混合整数线性程序 (MILP), 允许考虑具有小时时间步长的年度数据 (时间范围), 同时通过选择捕获全年时间变化的典型日期来降低问题的复杂性。这种方法由 Limpens 等人实施。(2019) 其中提出了一个线性规划模型来最小化涵盖不同能源需求 (电力、热力和交通) 的能源系统的成本。这种优化方法确定了能源生产和存储单元的规模, 以满足环境限制 (排放限额或规定的可再生能源渗透率) 下的规定需求。其他基于模拟的模型 (Lund 等人, 2021 年) 实施启发式方法来确定每个工厂的规模 (优先考虑最便宜的能源或污染较少的能源), 这使得问题的计算要求较低。与优化问题一样, 能量模型的解决方案是集成系统, 通常不容易理解, 需要进一步分析。

这项工作提出了一种将能量模型的解决方案集成到 Mini-MAC 曲线中的系统方法。所提出的方法提供了一个高级分析, 可以解释能源供应和需求的时间变化。该分析还将有助于理解从能源系统建模中获得的综合解决方案, 并将这些解决方案与其他可用的减排途径进行比较。正式的问题陈述出现在第 2 节中。该方法被提议为一个四步法, 首先是数据采集 (第 3.1 节), 然后利用收集到的数据来确定所有考虑选项的 MAC (第 3.2 节)。第 3.3 节描述了一种算法, 用于确定每个选项的实施规模, 同时优先考虑最便宜的路径。之后, 可以构建集成的微型 MAC 来表示和分析 CO₂ 减排系统 (第 3.4 节)。该方法的描述侧重于集成 CCUS 和能源系统 (ES) 路径, 并且在一个案例研究中展示了一个应用程序, 该案例研究证明了分析的相关性 (第 4 节)。

2. 问题陈述

所提出的方法考虑了一组 CO₂ 排放源, 可以通过过渡到低排放能源系统或通过改造 CO₂ 捕获工厂, 然后储存或利用捕获的排放来减少排放。该方法根据所考虑途径的成本效益实施确定了 CO₂ 减排的成本和潜力。这项工作解决的问题可以正式表述如下:

给定的是一个由一组 CO₂ 源 $S (S = [s_1, s_2, \dots, s_m], m \in \mathbb{N})$ 组成的系统, 其中包含一组化石能源 $F (F = [f_1, f_2, \dots, f_n], n \in \mathbb{N}, F \subset S)$ 。我们考虑一组 CO₂ 利用和储存汇 $D (D = [d_1, d_2, \dots, d_p], d \in \mathbb{N})$ 和一组能源系统 $E (E = [e_1, e_2, \dots, e_q], q \in \mathbb{N})$, 其中包含所有能源生产和存

储选项（可再生能源和化石能源）。所提出的方法提供了一种说明性表示，允许识别参与 CO₂ 网络的元素（从哪些源捕获以及分配给哪些汇）以及基于给定水平的最便宜选项的优先级的能源系统布局 CO₂ 减排目标。因此，考虑到所有选项的经济和环境特征，可以调查 CO₂ 减排目标的成本，以深入了解在经济有效地实施技术的情况下 CO₂ 减排的潜力。

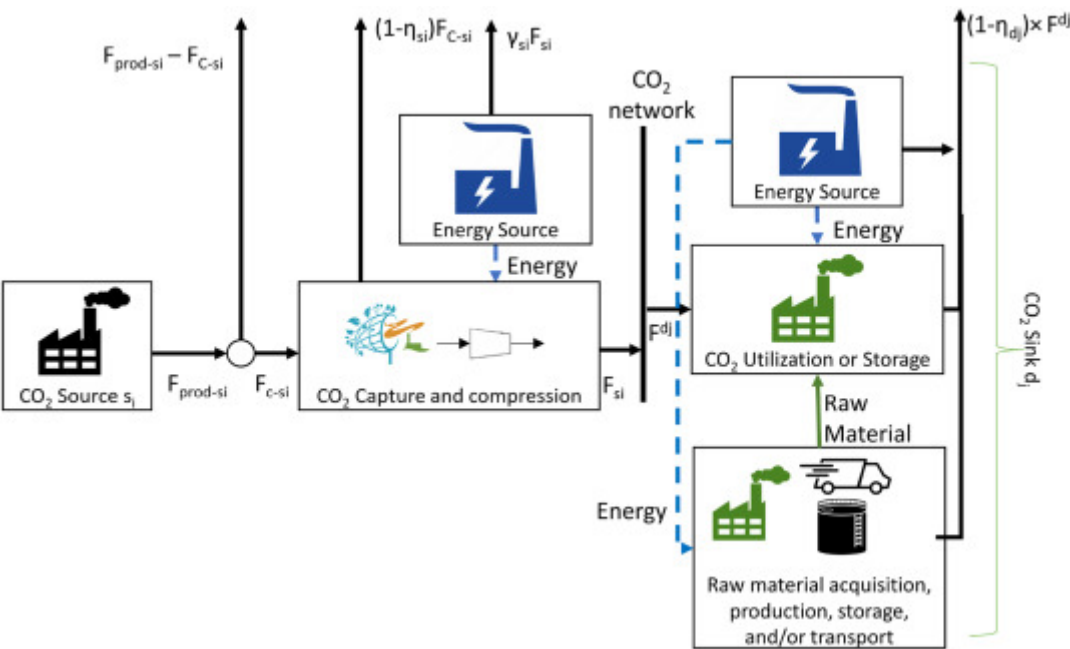
拟议的环境和技术经济绩效之间的整合考虑了所考虑技术的成本、收入、二次排放、能力和效率。可再生能源的间歇性（如太阳辐射和风速）和需求的时间变化是通过使用能源模型来收集代表所考虑的能源系统的参数来考虑的。对于所有 CCUS 和能源系统 (ES) 选项，这些参数将允许估算相对于减少的 CO₂ 的边际减排成本，并且所提出的算法根据具有最低 MAC 的优先选项确定实施能力。每个 CCUS 选项都表示为源汇配对，如 (Lameh 等人, 2021 年)。每个 ES 选项都是一个完整的能源系统，包含不同的化石能源、可再生能源和储能技术。第3节提供了定义拟议方法的范围和步骤的更多详细信息。

3. 方法

拟议的方法定义了一种方法，其中分别确定 CCUS 和 ES 选项的 MAC。之后，提出了一种用于整合路径的算法以获得代表整体 CO₂ 减排系统的经济性的集成迷你 MAC 配置文件。该解决方案由更新的能源系统（具有更高的 RE 贡献）和生成的 CO₂ 网络组成。该方法考虑了能源供应和需求的时间变化，从而可以研究 CO₂ 的经济学裁减要专门针对正在调查的案件。这将产生更准确和更具代表性的结果，允许放宽在进行此类分析时必须做出的一些假设（例如考虑平均 LCOE 来表示能源系统的经济性 (IRENA, 2021) 或假设平均 CO₂ 水槽的盈亏平衡成本 (Hepburn 等人, 2019 年)）。

3.1。范围

确定问题的范围并据以设定边界对于评估经济和环境绩效指标都很重要。技术经济和生命周期评估的边界定义需要保持一致，以避免对性能指标的估计不一致。在 Lameh 等人。(2021)，我们定义了描述源和汇之间 CCUS 选项中 CO₂ 流动的系统，以及由此产生的二次排放。在这项工作中遵循相同的表示。图 1 显示了在表示捕获和汇过程时考虑的不同组件。考虑整个 CO₂ 供应链强调考虑用于表征整个路径的环境和经济参数。每个来源的特征在于相应捕获过程的经济性（CO₂ 捕获的特定成本）和环境影响（CO₂ 捕获的二次排放）。这同样适用于表示汇，其中经济学的特征是汇可以从处理 CO₂ 中获得的特定净利润（考虑能源和原材料获取的成本）。环境影响以整个过程的 CO₂ 减排效率为特征，占二次排放的全部。

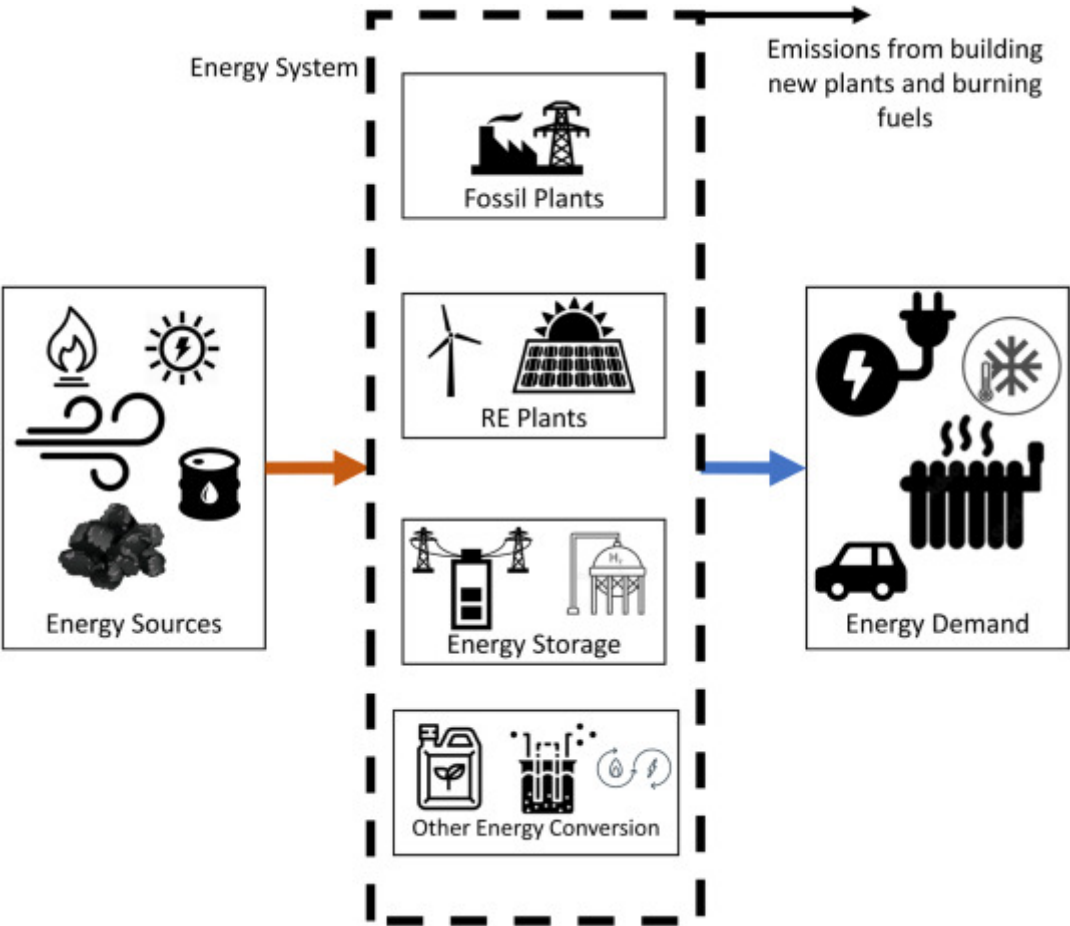


下载 :下载高分辨率图像 (324KB)

下载: 下载全尺寸图像

图 1。CCUS 选项的流程图。

能源系统的解决方案涉及不同的相互作用组件，具有不同的供应和需求。因此，对于每一个 CO₂ 减排水平，总成本最低的整个能源系统被认为是相应的解决方案。所考虑的能源系统的范围如图2 所示。能源系统的目的是使用可用的原始能源（燃料、太阳辐射、风.....）来生产不同形式的能源以满足需求（电力、冷却、加热、运输）。每个能源系统的特点是排放水平根据所需的 CO₂ 减少水平而变化，以及占运营和引入新选项的年度总成本。



下载 :[下载高分辨率图像 \(395KB\)](#)

下载 :[下载全尺寸图像](#)

图 2。能源系统的代表范围。

请注意，通过为每个选项和/或每个替代能源技术输入最大容量来考虑对 CCUS 和 ES 路径的最大负载的技术限制。最大负载限制确保技术的容量不会超过出于安全、环境、市场或技术考虑而设定的限制。

3.2 。 边际减排成本

CO₂ 边际减排成本是 CO₂ 减排规划中的一个重要指标，因为它综合了不同 CO₂ 减排技术的技术经济和生命周期性能。MAC 是评估拟议方法中不同选项的基础，该程序首先确定所考虑的 CCUS 和 ES 选项的 MAC。

3.2.1 。 ES 解决方案的边际减排成本

对于能源系统，CO₂ 减排成本和水平取决于系统中不同组成部分（化石工厂、可再生能源工厂、存储和能量转换单元）对总能源生产和存储的贡献大小。系统中不同组件之间存在的相互作用，无论是满足需求还是在可再生能源和需求的时间变化下储存能量，都需要实施建模和优化工具来确定不同组件的大小。如前所述，对能源、能源系统和需求之间的能源平衡进行建模的各种工具，在时间的基础上确定相应的 CO₂ 排放水平和相应的系统成本（示例：EnergyPlan¹）。其中一些工具超越了建模，通过找到与最低成本相对应的规模来优化系统，

同时遵守设定的 CO_2 排放限额（例如：EnergyScope²）。许多此类工具都是可访问的和开源的，用户可以使用这些方法进行情景分析以确定给定 CO_2 的系统最佳成本减少水平。用户必须定义可用的系统组件（它们的容量和容量因子、原始能源需求、建筑环境影响.....），然后运行基于现有能源系统的基本案例场景。之后，用户将调查排放量较低的能源系统，同时跟踪组件的大小、年度排放流量 (F_{ES}) 和年度总成本 (TAC_{ES})。优化工具允许在指定允许的 CO_2 排放水平时确定成本最优的能源系统。因此，情景分析可以通过改变允许的 CO_2 排放和跟踪系统的成本。从各种 (n) 情景（案例 1、案例 2、...案例 q、...案例 n）中获得的不同解决方案在基本案例情景之后按 CO_2 排放量的降序排列（从最高排放水平到最低水平）（案例 0）。基于所获得解的不同 F_{ES} 和 TAC_{ES} ，可以确定每个选项的 MAC，如等式 1 所示。(1)：

$$MAC_{ES}^{e_q} = \frac{TAC_{ES}^{e_q} - TAC_{ES}^{e_{q-1}}}{F_{\text{prod}-e_{q-1}} - F_{\text{prod}-e_q}} \quad (1)$$

方程式中所示的 MAC 的定义。(1)将每个能源系统的经济和环境绩效与 CO_2 排放量较低的能源系统的经济和环境绩效进行比较。这将有助于说明提高 CO_2 减排所需水平的进一步经济影响。此外，方程式中的定义。(1)进一步深入了解可以通过建模和优化模型执行的分析。

3.2.2 。CCUS 的边际减排成本

每个 CCUS 选项的 MAC 由Lameh 等人所述确定。(2021)。如第3.1节所述，每个来源 s_i 的特征在于 CO_2 供应成本 (C_{s_i}) 和相应的二次排放 (γ_{s_i})。每个汇的特征在于处理 CO_2 产生的净利润 (R_{d_j}) 和净 CO_2 固定效率 (η_{d_j})。在为所考虑的选项收集数据后，源和汇之间所有可能组合的 MAC 被确定，如等式 1 所示。(2)。请注意，利用选项的净利润 (R_{d_j}) 也可以称为 CO_2 盈亏平衡成本，这是汇可以为 CO_2 支付并且仍然能够盈亏平衡（并偿还成本）的成本用于构建和操作过程）。 CO_2 收支平衡成本对进行技术经济分析时所做的假设很敏感，使用与汇过程的固定效率一致的成本很重要。二氧化碳 2 盈亏平衡成本考虑资本成本和流程的运营成本（包括设备、催化剂、能源和任何其他购买的原料的成本），并考虑销售产品的收入。请注意，对于成本超过收入的昂贵利用过程， R_{d_j} 为负。

$$MAC_{CCUS}^{s_i-d_j} = \frac{C_{s_i} - R_{d_j}}{\eta_{d_j} - \gamma_{s_i}} \quad (2)$$

3.3 。综合求解算法

所提出的方法可以遵循逐步方法来说明可用路径并将它们安排在集成的微型 MAC 配置文件中，同时遵守容量限制。该方法可以描述如下：

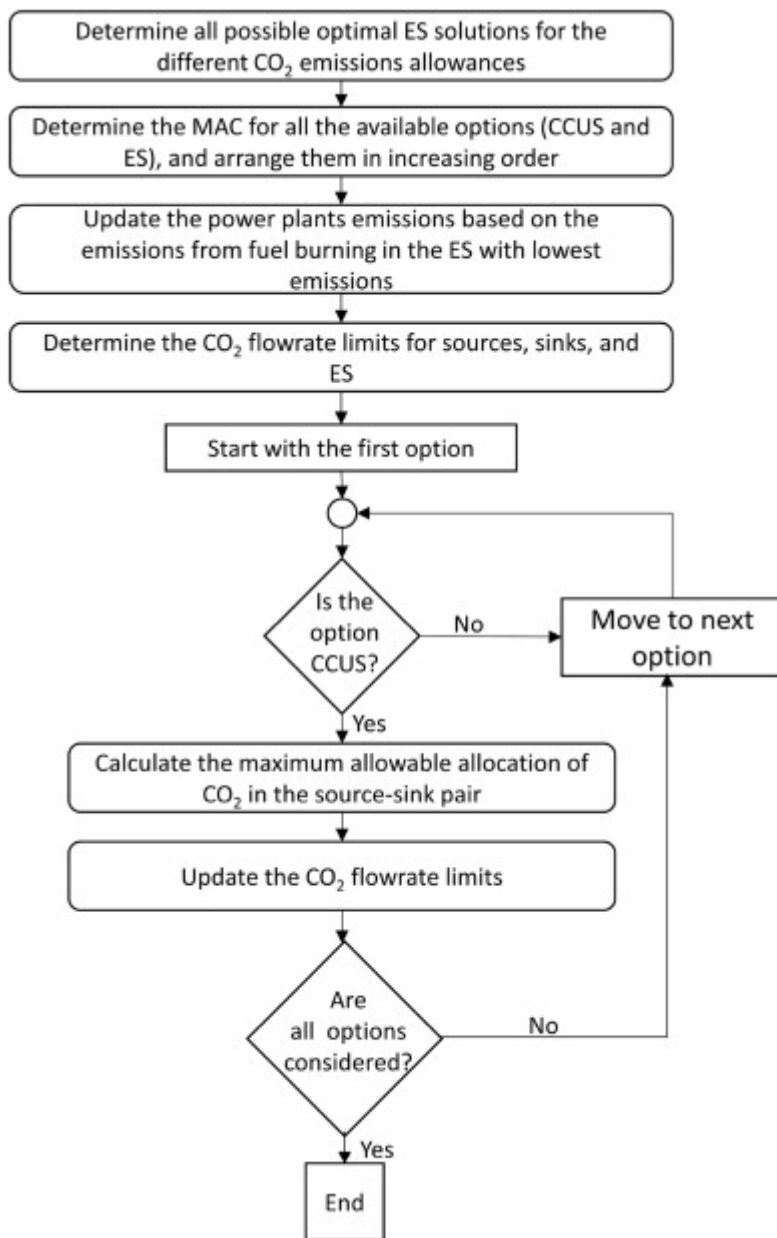
- 步骤 1：现有资源、现有能源系统、考虑汇和考虑能源选项的数据采集。
- 第 2 步：识别所有可能的选项及其相应的 MAC。
- 第 3 步：确定每个可用选项的 CO_2 减排能力。
- 第 4 步：生成集成的 mini-MAC 配置文件并深入了解具有成本效益的 CO_2 减排计划。

前两个步骤已在第3.1节（第 1 步）和第3.2节（第 2 步）中解决，它们定义了表示不同系统所需的数据以及如何使用这些数据来确定可用选项的 MAC。之后可以按照 MAC 的递增顺序排列选项。第 3 步确定每个选项的实施能力以确保有效规划。应在考虑 CO_2 的可用性的同时选择每个选项的容量所考虑的汇和能源系统的排放和实施能力。在确定能力时遵循的优先次序将影响不同

选项的实施规模。在这项工作中，本节（第3.3节）讨论了可以确定不同选项能力的所选优先顺序。在确定每个选项的 CO₂ 减排限度后，可以生成迷你 MAC 配置文件，其中可以针对给定的 CO₂ 减排水平确定 CO₂ 减排系统。这将在第3.4节中进一步解释。

所考虑的系统包含针对不同排放源的不同减排解决方案。将一种解决方案应用于源会影响其应用于其余源时的容量。对于发电厂，在实施 ES 和 CCUS 解决方案之间进行选择会影响总减排潜力，并可能影响 CO₂ 减排的总成本。如果 CCUS 选项优先于 RES，则发电厂的排放将分配给可用的 CO₂ 汇，因此这些汇处理来自剩余来源的 CO₂ 的能力将降低，因为总 CO₂ 加工能力约束。因此，ES 选项可以减少的排放量将与剩余排放量竞争 CO₂ 汇的可用容量。当需要高水平的 CO₂ 减少时，这可能不会产生有效的解决方案。CO₂ 利用的缺点之一是与现有的 CO₂ 减少水平相比，可用技术处理 CO₂ 的能力有限。

当优先考虑可再生能源选项时，处理来自剩余来源的 CO₂ 排放的汇的能力将增加（因为 RES 将减少可用于捕获的排放总量），这将导致更高的 CO₂ 减排潜力。mini-MAC 方法的一般方法是基于对具有最低 MAC 的选项进行优先排序，以最大限度地提高最便宜选项的实施能力。在我们提出的算法中，分配遵循经济价值顺序，同时为 ES 途径提供实现其最大减排潜力的机会。图 3 显示了将容量分配给可用选项的步骤。



[下载: 下载高分辨率图像 \(440KB\)](#)

[下载: 下载全尺寸图像](#)

图 3。根据标准 1 确定 CO₂ 减排能力的程序流程图。

该方法的目的是通过优先考虑成本最低的途径来确定不同选项的 CO₂ 减排能力，同时考虑 ES 转型带来的 CO₂ 减排的全部潜力。使用能源建模工具针对不同水平的 CO₂ 排放确定最佳能源系统。然后确定各种 CCUS 和 ES 选项的 MAC，并相应地安排路径。

为确保充分发挥 ES 转型的潜力（对应于最低排放水平），仅允许 ES 方案不能减少的排放从 ES 源捕获 CO₂。因此，能源系统可捕获排放的流量对应于具有最低排放水平的 ES 中燃料燃烧的排放。该流量取决于建模或优化工具中考虑的可再生能源选项的容量，用于确定不同 ES 选项的布局（光伏可用区域、电池尺寸、逆变器额定功率……）。

CO₂ 流量限制是每个源可以供应、每个汇可以处理并且每个 ES 可以减少的最大流量。这些限制因每次分配而异，它们的初始化如下：

- 源 s_i ($F_{s_i}^{max}$) : 这是可以从源头捕获的最大排放流量, 它取决于源头产生的排放流量和捕获技术的效率 ($F_{s_i}^{max} = F_{prod-si} \times \eta_{si}$). 对于化石能源, 产生的排放量 ($F_{prod-si}$) 是从具有最低排放水平的 ES 获得的。
- 水槽的流量限制 d_j ($F_{d_j}^{max}$): 这是汇可以处理的分配排放的最大流量。最初, 它与接收器的处理能力 (F_{dj}) 相同。
- 能量系统的流量限制 e_q ($F_{e_q}^{max}$): 该流量反映了将现有能源系统 e_0 转换为 e_q 相对于将 e_0 转换为 e_{q-1} 所实现的减排量可以增加多少减排量。能源系统 e_{q-1} 是排放水平高于 e_q 的系统中排放水平最低的 ES。因此, e_q 的流量限制是 e_{q-1} 和 e_q 排放流量之间的差异, ($F_{e_q}^{max} = F_{prod-e_{q-1}} - F_{prod-e_q}$).

CO₂减排能力的分配从最便宜 (最低 MAC) 到最昂贵的选项开始。拟议方法的最终解决方案将是一个完整的 CO₂减排系统, 包括一个 ES 和一个 CCUS 网络。考虑的 ES 方案是整个系统, 根据最终的 CO₂减排水平, 从中选择一个作为 ES 解决方案。因此, 实施一种 ES 不会影响其他方案的 CO₂减排能力。因此, 不同 ES 选项的流量限制将等于它们的初始值 (等式 (3))。

$$F_{e_q}^{max} = F_{prod-e_{q-1}} - F_{prod-e_q} \quad (3)$$

这不适用于作为最终解决方案的 CCUS 网络组件的 CCUS 选项。由于来自源头的流量可用性和汇点的容量的限制, 每个选项的实施规模都会影响其他选项的容量。分配 CCUS 选项 (源-汇对) 容量所遵循的程序旨在最大化最便宜选项的容量, 同时遵守排放可用性和汇的容量限制。对于由源 s_i 和汇 d_j 组成的每个 CCUS 选项, 可以分配的捕获的 CO₂排放的最大流量 (F_{max}^{ij}) 是源可以提供的最小值 ($F_{s_i}^{max}$) 以及接收器可以处理的内容 ($F_{d_j}^{max}$).

$$F_{max}^{ij} = \argmin (F_{s_i}^{max}, F_{d_j}^{max}) \quad (4)$$

每次分配后, 源 s_i 和汇 d_j 的容量都会更新并用于以下选项, 直到考虑所有选项。

$$F_{s_i}^{max} = F_{s_i}^{max} - F_{max}^{ij} \quad (5)$$

$$F_{d_j}^{max} = F_{d_j}^{max} - F_{max}^{ij} \quad (6)$$

减排量 (F_{ij}^{red}) 通过实施每个 CCUS 选项实现取决于可以分配的最大流量 (F_{max}^{ij}), 捕获的二次排放 (γ_{s_i}) 和汇的固定效率 (η_{d_j}):

$$F_{ij}^{red} = F_{max}^{ij} \times (\eta_{d_j} - \gamma_{s_i}) \quad (7)$$

3.4。构建集成的 Mini-MAC 曲线

所有可用的 CO₂减排选项都可以根据其 MAC (第 3.2 节) 和 CO₂减排潜力 (第 3.3 节) 在迷你 MAC 曲线上表示, 如图 4 所示。CCUS 路径的表示使得每个选项都是对应于 CO₂集成网络扩展的源-汇对。段下的区域 (图 4a) 对应于将源和汇添加到网络的净成本。能源选项具有相似的表示 (图 4b) 然而, 解释可能不同, 因为每个 ES 选项代表整个系统, 而不像 CCUS 那样代表系统中的一个组件。每个 ES 选项的 MAC 和 CO₂减排潜力是相对于较便宜系统 (具有较高排放水平) 的成本和排放水平确定的。ES 解决方案的表示说明了扩大可再生能源在系统中的渗透以

满足需求对环境和经济的影响。因此，代表 ES 选项 e_q 的部分下的区域是实施 e_q 相对于实施 e_{q-1} 以减少排放的额外净成本。

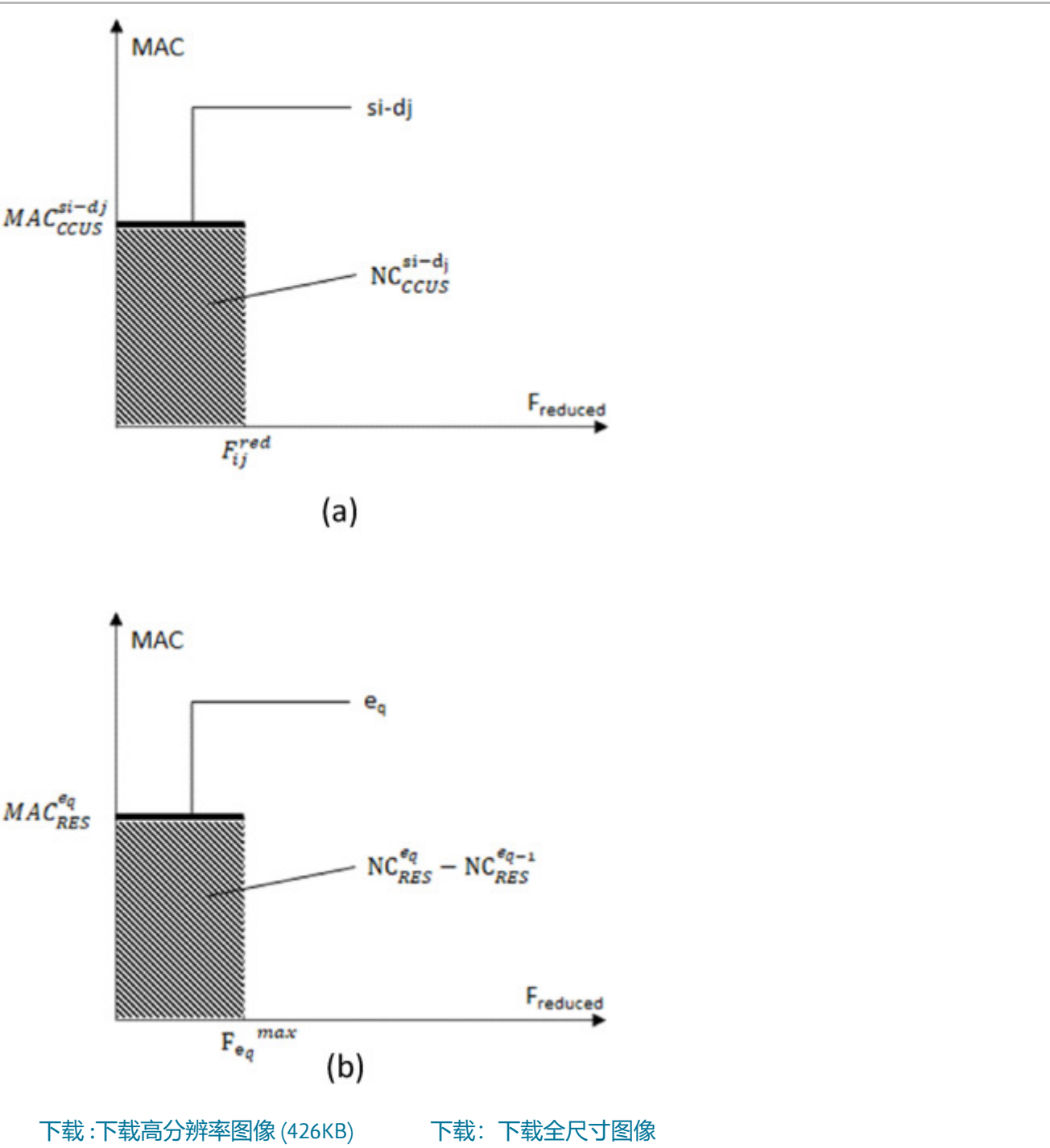
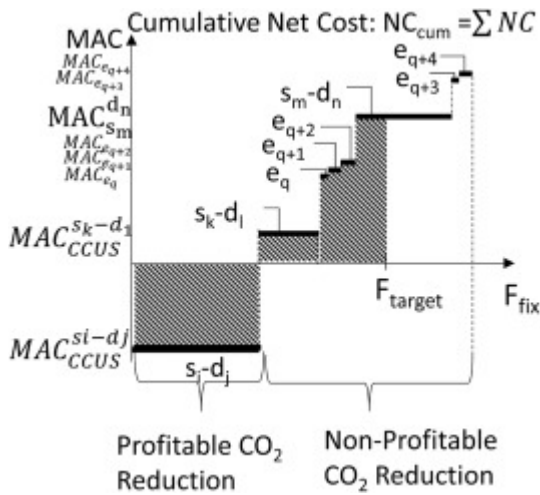


图 4。迷你 MAC 上 CCUS (a) 和 ES (b) 选项的表示。

MAC 曲线允许表示不同的 CO₂减排选项，以提供对 CO₂减排成本和潜力的深入分析。不同的 CCUS 和 ES 选项可以在集成的迷你 MAC 曲线上排列和表示，如图 5 所示。综合配置文件确定了为实现设定的 CO₂减排水平而应实施的选项。请注意，对于 CCUS 选项的情况，CO₂集成网络由 CO₂左侧部分中表示的源和汇组成减排目标，而相应的能源系统是由距离减排目标最近的部分（从左到右）表示的能源系统。图形表示允许根据经济和环境绩效对不同选项进行比较，从而确定具有成本效益的途径和高成本技术开发的影响。



下载: 下载高分辨率图像 (283KB)

下载: 下载全尺寸图像

图 5。集成的迷你 MAC 配置文件。

CO₂减排系统的年化净成本为各段与横轴之间的面积之和。平均CO₂减排成本是CO₂减排系统的年化净成本与相应的CO₂减排水平的比值。一些期权可能有负 MAC，这意味着它们的实施将产生净利润。这对应于 CCUS 选项，其中汇的收支平衡 CO₂价格高于处理和运输 CO₂的成本来自源头的排放流。如果 ES 选项的成本低于基本情景的成本（例如，从昂贵的煤电过渡到排放强度较低的廉价天然气电），则 ES 选项可以盈利。图形工具允许用户清楚地识别 CO₂减排的盈利机会，并跟踪具有不同可实现的 CO₂减排水平的整个系统的净成本。

4. 说明性例子

为了演示所描述方法的应用，我们在本节中实施它以分析具有不同工业和电力排放源的假设系统。为了简化演示，只考虑电力。CO₂的各种应用被认为代表了利用和存储选项。不同的可再生能源生产和存储选项被认为可以取代现有的化石能源。

4.1. CCUS数据

CCUS 数据描述了具有所有考虑来源的现有系统，并根据技术经济和环境特征描述了 CO₂捕获、利用和存储选项。表 1 显示了代表来源的数据。考虑了三个主要的工业点源：CO₂浓度高（高纯度）的排放源、工业燃烧和水泥工业。高纯度来源包括 CO₂分离是工艺的一部分（例如，在氨或天然气加工中净化主要工艺流）。工业燃烧源代表通过燃烧化石燃料为过程提供热量（通过产生蒸汽或使用熔炉）产生的排放物。水泥排放物产生于煅烧阶段，其中 CO₂是将石灰石转化为氧化钙的副产品。电力部门现有的能源结构包括为天然气和燃煤电厂发电以满足 41.8 TWh/y 的需求。煤电占总需求的 34%，天然气 (NG) 电占 66%。表 1 显示了描述不同 CO₂的数据来源及其相应的捕获量，包括排放流量、CO₂供应成本和来自 CO₂供应的二次排放。CO₂供应包括 CO₂捕获、压缩和运输。成本和二次排放是根据 Metz 等人确定的。(2005)，利森等人。(2017)和 von der Assen 等人。(2016)。燃烧后基于胺的吸收被认为是具有 90% 捕获效率的可用 CO₂捕获技术。

表 1。CO₂来源的数据。

来源	排放流量 (MtCO ₂ /y)	CO ₂ 供应成本 (\$/tCO ₂ -捕获)	CO ₂ 二次排放 (tCO ₂ /tCO ₂ -captured)
高纯度	8个	5个	0.06
工业燃烧	30	38	0.2
水泥	2.2	60	0.25
发电厂 - 煤炭	12.4	30	0.18
发电厂 - 天然气	15.9	35	0.2

表 2显示了表征 CO₂汇的技术经济和环境参数。考虑用于 CO₂的不同汇涵盖广泛的应用，包括在提高石油采收率(EOR)、化学品生产（甲醇）、燃料生产（费托和合成天然气）和地质储存中的利用。利用 CO₂生产化学品和燃料需要 H₂作为主要原料，假定 H₂ 是从低排放过程中产生的。因此，代表这些过程的数据是从利用 CO₂生产甲醇的技术经济研究中收集的（Pérez-Fortes 等人，2016 年）、合成天然气 – SNG（Chauvy 等人，2021 年）和费托燃料 – FT 燃料（Zang 等人，2021 年）。这些过程的成本和产生产品的排放量是根据这些研究以及 H₂和 CO₂要求确定的。根据国际可再生能源署 (IRENA, 2019)，考虑到 H₂和可再生能源成本，计算出CO₂盈亏平衡成本。对于 EOR 和存储，成本基于Hepburn 等人。(2019)和GCCSI (2011)。基于所描述的系统，总排放量为 68.5 MtCO₂/y，其中 53.5 MtCO₂ /y 可以在可用的不同水槽中进行处理。

表 2。CO₂利用率和存储选项的数据。

下沉	产能 (MtCO ₂ /年)	CO ₂ 收支平衡成本 (\$/tCO ₂ -捕获)	CO ₂ 减排效率 (tCO ₂ -减少/tCO ₂ -捕获)
提高采收率	2个	45	100%
贮存	30	-15	100%
甲醇	1.5	20	92%
SNG	10	-328	98%
费托燃料	10	-137	43%

4.2 。ES数据

所考虑的能源系统包括现有发电厂（第4.1节中描述的煤炭和天然气），并有可能引入表 3和表 4中数据表征的新电力生产和存储选项. 电力系统的排放强度可以通过将现有的化石燃料发电厂产生的电力替换为排放较少的电力选项的组合来降低。这考虑从煤炭转向天然气、可再生能源或两者的混合，以及从天然气转向可再生能源。能源系统的年化总成本是在能源系统内安装和运行不同电力生产和存储选项的成本。因此，这些选项中的每一个都以相应的总安装成本和固定的运行和维护成本为特征。成本是根据IRENA (2021)、EIA (2020)和Limpens 等人确定的。(2019). 对于化石发电厂，可变运营成本由燃料价格表示，天然气为 2.8 美元/MMBtu（Insider, 2021b），煤炭为 80 美元/吨（Insider, 2021a）. 发电厂的效率为 50%，天然气燃烧产生的排放量为 0.27 kgCO₂/ kWh，煤炭为0.4 kg/kWh（EIA, 2021 年）。

表 3。发电选项的数据。

电力生产	总安装成本（\$/kWp）	运维成本（\$/kWp/y）	年容量系数（kWh/kWph）
发电厂 - 煤炭	2300	40.58	0.865
发电厂 - 天然气	958	12.2	0.85
太阳能光伏	1101	10	0.24
风	1066	15	0.36

表 4。电力存储选项的数据。

储能	总安装成本（美元/千瓦时）	运维成本（\$/kWh/y）	往返效率	充放电率(kWh/kW)
锂电池	350	25	90%	4小时
P2G/G2P	3340	165	60%	1小时

请注意，对于年化，每项考虑的技术（无论是 CCUS 还是 ES）的项目寿命为 20 年，利率假定为 3%。

由于技术限制，无法达到不同选项的峰值功率。这些限制包括化石能源工厂的计划内和计划外关闭、太阳能光伏板 (Solar PV) 和风力涡轮机的天气条件，以及电力存储选项的逆变器容量。存储选项包括锂离子电池储能系统 (Li-Battery) 和电转气和气转电 (P2G/G2P) 过程，其中电力用于产生天然气并储存起来，然后用于发电厂发电。从ERCOT (2021a)中获得太阳能光伏和风能容量因子的小时分布。年度需求的小时分布是从 (ERCOT, 2021b). 存储选项的往返效率考虑了充电和放电时的功率损耗。

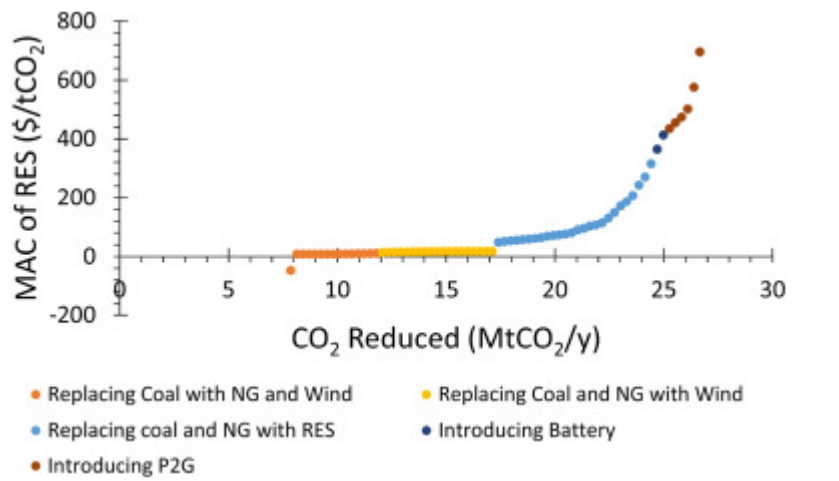
4.3。结果

考虑到 CCUS 或 ES 路径，所提出的方法适用于所描述的数据。之后，展示了一种集成方法，其中规划遵循第3.3节中描述的算法。

4.3.1。考虑ES转型的CO₂减排规划

EnergyScope (Limpens 等人, 2019 年) 被用作能源系统分析方法，在给定特定能源需求和可用能源生产选项的情况下，它可以最大限度地降低能源系统的总成本。在这项工作中，热量和运输需求被停用（设置为 0），以及所有未包含在表 3 和表 4 中的能源生产和存储选项（容量设置为 0）。请注意，现有的天然气和燃煤电厂的特点是投资成本为 0。第一次模拟是通过放宽对 CO₂ 排放的限制（设置高 CO₂ 津贴）来确定最便宜的 ES。结果发现，最优系统对应于排放水平较低的能源组合，包括现有天然气发电厂（满足 66% 的需求）、引入的天然气发电（满足 19% 的需求）和风力涡轮机（满足 15% 的需求）。这表明用天然气和风能取代现有的煤电将降低能源系统的总成本，因为建造和运营新的天然气和风能发电厂比继续支付运营和燃料成本要便宜。燃煤电厂。从现有 ES 到最佳 ES 的过渡将降低排放水平，因为天然气和风能的排放强度低于煤电。(1)，具有 7.85 MtCO₂/年的 CO₂ 减排潜力。

图 6 显示了可减少现有能源系统 CO₂ 排放的可能 ES 转换的 mini-MAC 配置文件。剖面上的每个点代表一个 ES 转换选项，从现有的煤-天然气混合到化石贡献较低和可再生能源贡献较高的系统。通过在 EnergyScope 上运行不同的模拟并改变能源系统的 CO₂ 排放限额来确定各个点。因此，通过确定最佳途径来确定对应于每个 CO₂ 减少水平的最低成本。MAC 和 CO₂ 还原潜力表示迷你 MAC 配置文件中的每个选项，如方程式 1 所示确定。(1) 和方程式。(3)。在图 6 中，我们根据现有能源系统所需的转换对不同的 ES 选项进行了分类。成本最低的改造对应于引入天然气发电和风力涡轮机来取代煤电。来自该路径的 CO₂ 的容量受到风力的间歇性的限制。除此之外，将需要风能逐渐取代现有的煤炭和天然气发电，直到需要太阳能光伏发电来支持风力涡轮机。这对应于用由风能和太阳能光伏组成的可再生能源系统 (RES) 取代天然气和煤电。要求 RES 规模随着 CO₂ 的增加而逐渐增加减少水平。在这里，超大 RES 和引入电力存储选项之间的权衡在选择最佳选项时发挥作用。由于所考虑的电力存储选项的成本高，这些途径在具有非常高的 MAC (>365\$/tCO₂) 的高水平 CO₂ 还原时被激活。

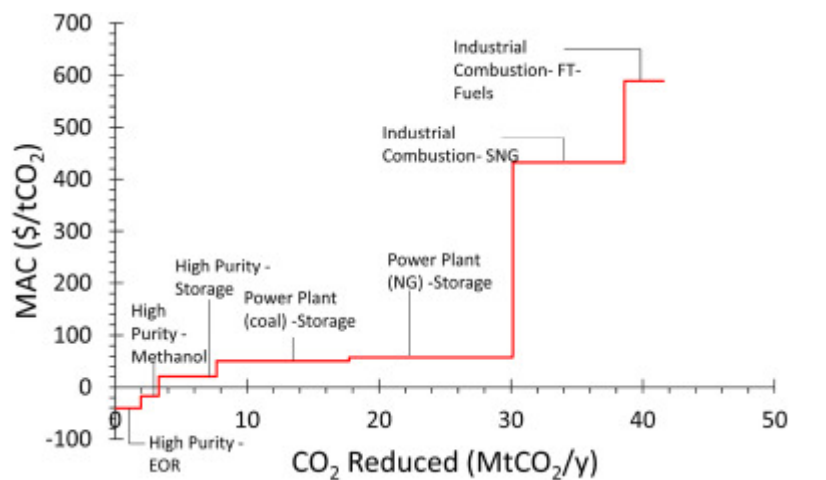


[下载：下载高分辨率图像 \(219KB\)](#) [下载：下载全尺寸图像](#)

图 6。不同 ES 转换选项的 mini-MAC 配置文件。

4.3.2 。考虑 CCUS 途径的CO₂减排规划

仅考虑 CCUS 选项（图 7）的开发概况确定了通过利用 EOR 和甲醇中的高纯度排放物实现的 CO₂减排盈利潜力有限。这是由于上述 CO₂使用方案的高盈利能力以及来自高纯度来源的 CO₂供应的低成本。另一方面，利用 CO₂生产 FT 燃料和合成天然气的高成本导致 CCUS 途径的 MAC 大幅增加，超过30 MtCO₂/y 的 CO₂减排水平（从 58 \$/tCO₂至 430 \$/tCO₂和 590 \$/tCO₂）。这表明需要进一步发展此类技术，使其在经济上与现有途径具有竞争力。请注意，尽管所有考虑的汇的总容量为 53.5 MtCO₂/y，但由于 CO 的二次排放，实施 CCUS 途径可实现的 CO₂最大减排量约为 42 tCO₂/y₂供应和利用过程。二次排放的影响显示在不同选项的安排中，其中 CO₂用于生产 SNG 的优先级高于 FT 燃料的利用，尽管后者过程的 CO₂盈亏平衡成本要低得多。这是由于低 CO₂ FT-Fuels 生产过程的还原效率。这一结果显示了整合环境 和经济绩效在评估可持续发展路径中的重要性，以及边际减排成本在评估这两个方面之间权衡的能力。



[下载：下载高分辨率图像 \(215KB\)](#) [下载：下载全尺寸图像](#)

图 7。仅考虑 CCUS 途径的 mini-MAC 配置文件。

4.3.3 。考虑综合系统的CO₂减排规划

图 8显示了同时考虑 ES 和 CCUS 选项的 CO₂减排综合概况。CCUS 和 ES 路径之间的整合是通过基于 ES 路径的最大 CO₂减排潜力更新化石燃料发电厂的可捕获排放来执行的（第3.3节）。ES mini-MAC 配置文件（图 6）显示，通过可用的存储选项，可再生能源可以完全取代化石能源发电厂。因此，CCUS 被考虑用于剩余的排放源：高纯度、工业燃烧和水泥。最大 CO₂减排潜力从 42 MtCO₂/y（仅考虑 CCUS 途径时）到 56 MtCO₂/y（考虑集成系统时）。这是由于能源转型途径的高 CO₂减排效率（可达到电力部门排放量的 94%）。此外，通过实施可再生能源途径减少电力部门的排放量可使汇处理来自其他来源的所有剩余 CO₂排放量。集成迷你 MAC 配置文件中 CCUS 选项的表示表明，五个考虑的 CO₂汇中只有四个需要处理工业源产生的排放。集成 CCUS 和 ES 选项时，不激活 FT-Fuels 槽，这降低了 CO 的总成本₂通过避免低效的选择（相对于其他考虑的途径）来减少。

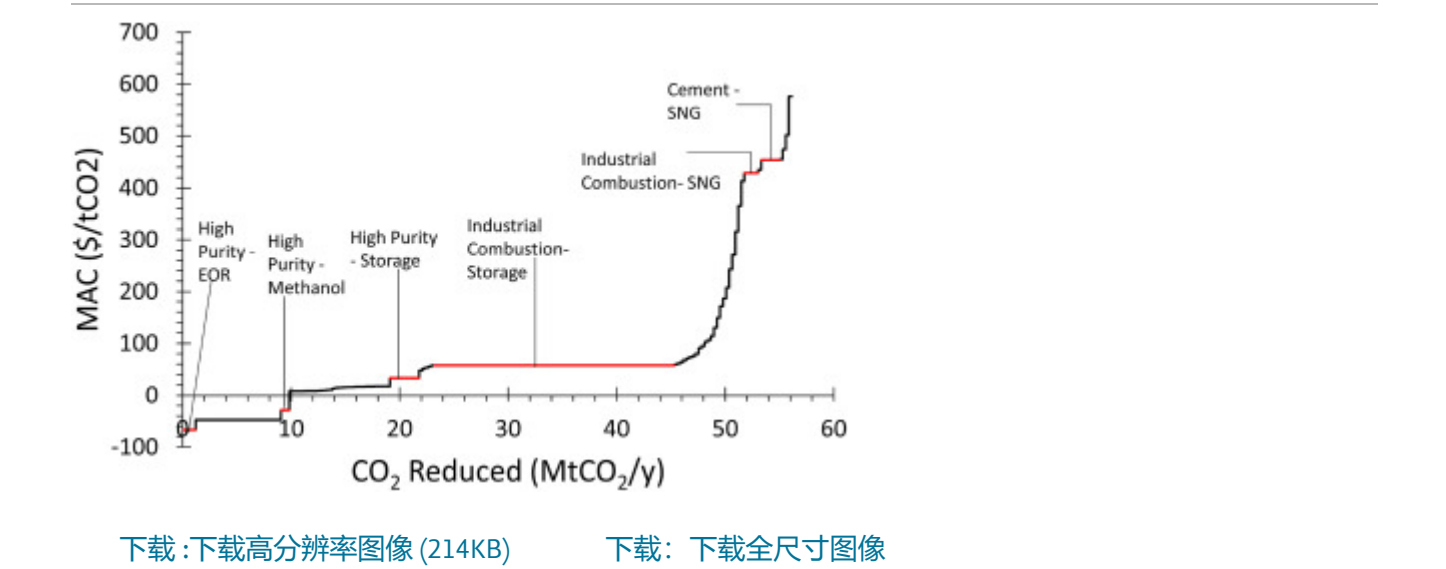
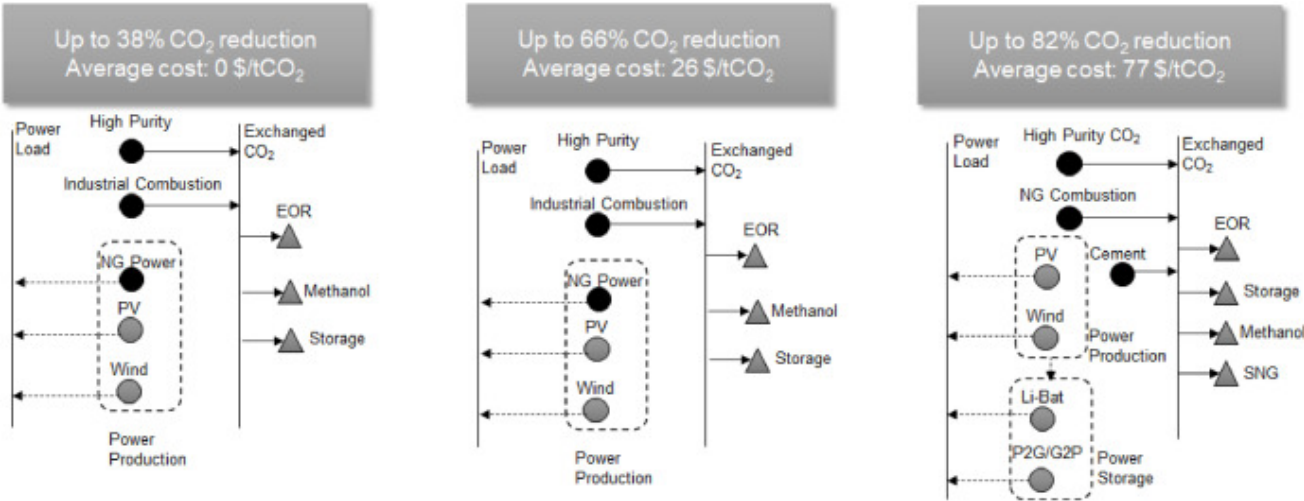


图 8。考虑到可用的 CCUS 和 ES 选项的集成迷你 MAC 配置文件。

对综合概况的进一步分析表明，CO₂减排网络具有较高的 CO₂减排幅度，这与零净成本相关。图 9 显示了 CO₂减排网络的不同可能布局，以及它们相应的成本和减排潜力。成本中性的 CO₂减排是通过使用 EOR 和甲醇利用过程的利润以及煤炭燃料的节省来资助 CO₂捕获和储存以及引入的可再生能源发电厂（风能和光伏）来实现的。这将与所有考虑的排放量减少 38% 有关。此外，当电力存储和 CO_{SNG} 中的₂利用率需要实现高水平的 CO₂减排，MAC 迅速增加。结果表明，高达 66% 的考虑排放量（45 MtCO₂/年）可以以 26 \$/tCO₂的相对较低的平均价格减少。由于 CO₂使用和能量存储选项的高成本，该成本将增加三倍，达到 77 \$/tCO₂最大程度的 CO₂减排 (82%)。

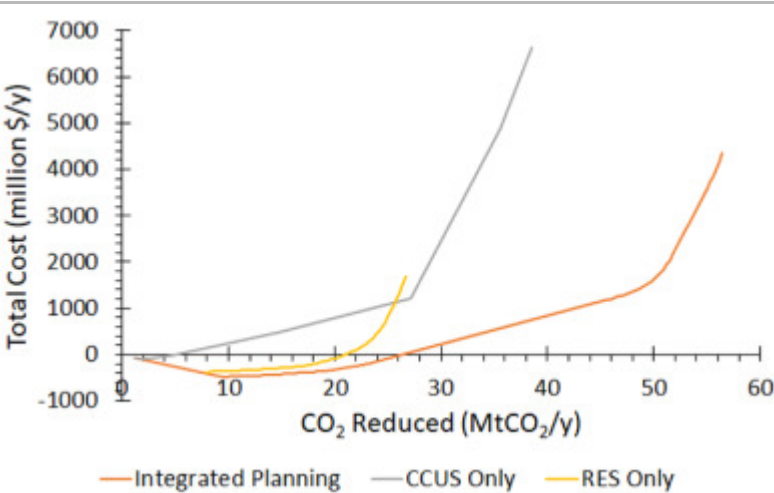


[下载 : 下载高分辨率图像 \(558KB\)](#)

[下载: 下载全尺寸图像](#)

图 9。不同层次的CO₂减排的CO₂减排网络。

综合概况表明，对于不同水平的 CO₂ 减排，最佳途径包含 ES 和 CCUS 选项的组合，因为不同途径的成本具有相互交织的范围。这表明可持续 CO₂ 减排的有效规划需要能够同时考虑不同 CO₂ 减排途径的综合方法。图 10 显示了在考虑单个路径（无论是仅 ES 还是仅 CCUS 选项）和考虑综合规划时 CO₂ 减排网络总成本的比较。综合规划降低了不同水平的 CO₂ 减排成本，并降低了高 CO₂ 还原潜力。实施不同途径的能力是相互依存的，因为一些来源的排放可以通过不同的选择来减少。因此，集成方法考虑所有可能的选项以确保选择最佳路径非常重要。



[下载 : 下载高分辨率图像 \(248KB\)](#)

[下载: 下载全尺寸图像](#)

图 10。考虑单个选项和综合路径的 CO₂ 减排总成本。

5. 结论

已经提出了一种高级成本分析方法，该方法可以代表和评估不同的 CO₂ 减排途径，同时考虑间歇性可再生能源供应的动态和不断变化的需求。该系统方法确定了进行分析所需的数据，并相应地定义了从可用途径中减少 CO₂ 的边际减排成本。开发了一种算法，用于整合不同的 CO₂ 减少选项，同时考虑容量和排放可用性的限制。该方法在案例研究中的应用表明，它能够识别与 CO₂ 减排盈利机会相关的主要见解，即成本中性 CO₂ 减量、CO₂ 减量潜力和 CO₂ 减量的总成本。这些见解将有助于规划者和决策者选择成本最优的 CO₂ 减排途径以实现减排目标。研究人员和技术开发人员可以深入了解未来应将重点放在何处，以在经济实惠的 CO₂ 减排方面取得重大突破。

未来的工作将展示所描述方法的系统应用，以分析战略性国家层面的脱碳。该方法允许考虑 CO₂ 减排网络中的不同细节，从而允许对特定案例系统进行分析。因此，国家级脱碳分析将适合此类应用，因为 mini-MAC 曲线可以呈现最佳 CO₂ 定义明确的系统的减少策略。可以相应地评估已实施的政策和承诺。集成迷你 MAC 曲线的另一个应用是评估未来的技术路线图。该方法的简单性和强大的可视化功能使其适合进行敏感性和多场景分析，以确定技术发展对 CO₂ 减排总成本的影响，以及不同 CO₂ 减排途径的潜力。

案例研究的结果显示了在规划 CO₂ 减排时考虑所有可能和可用选项的重要性。所提出的整合算法展示了如何整合 CCUS 和 ES 途径，同时有可能从化石能源选项中捕获排放。考虑到其他 CO₂，可以将其他途径纳入规划来自更多排放源的减排方案。通过简单的图形或代数方法解决问题可能会变得复杂，优化可以成为筛选最佳解决方案的工具。然而，迷你 MAC 曲线仍然可以用于系统地评估和理解可以从可视化中获得的解决方案。未来的工作将侧重于开发一个通用优化模型，该模型可以解释所有可能的 CO₂ 减排策略，以提出集成系统，该系统可以通过描述的迷你 MAC 曲线进行简化和评估。

CRedit 作者贡献声明

Mohammad Lameh: 概念化、方法论、调查、写作——原稿、写作——评论和编辑、软件。

Dhabia M. Al-Mohannadi: 方法论、写作 - 评论和编辑、监督。**Patrick Linke:** 概念化、方法论、写作 - 评论和编辑、监督、资金收购。

竞争利益声明

作者声明，他们没有已知的可能影响本文报告的工作的竞争经济利益或个人关系。

特刊文章

推荐文章

参考

Al-Mohannadi 等人, 2020 年 Dhabia M. Al-Mohannadi、Gihong Kwak、Patrick Linke 使用线性多期碳整合方法确定向气候足迹减少目标的最佳过渡
电脑。化学。工程。 , 140 (2020) , p. 106907 , [10.1016/j.compchemeng.2020.106907](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106907)
ISSN 0098-1354


文章




下载PDF


在 Scopus 中查看记录

谷歌学术

Al-Mohannadi 和 Linke, 2016 年 DM Al-Mohannadi, P. 林克
论减少气候足迹的工业园区系统碳整合
J. 清洁。产品。 , 112 (2016 年) , 第4053 - 4064页, [10.1016/j.jclepro.2015.05.094](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.094)
文章  下载PDF 在 Scopus 中查看记录 谷歌学术


Aviso 等人, 2021 年 KB Aviso , J.-Y. 李AT Ubando RR Tan _ _
使用工业废料增强风化网络的模糊优化模型。清洁技术和环境政策
(2021) , [10.1007/s10098-021-02053-8](https://doi.org/10.1007/s10098-021-02053-8)
谷歌学术

Chang 等人, 2021 年 M. Chang 、 JZ Thellufsen 、 B. Zakeri 、 B. Pickering 、 S. Pfenninger
、 H. Lund 、 PA Østergaard
能源转型建模工具和方法的趋势
Appl. Energy, 290 (2021), Article 116731, [10.1016/j.apenergy.2021.116731](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116731)
文章  下载PDF 在 Scopus 中查看记录 Google Scholar

Chauvy et al., 2021 R. Chauvy, D. Verdonck, L. Dubois, D. Thomas, G. De Weireld
Techno-economic feasibility and sustainability of an integrated carbon capture and conversion process to synthetic natural gas
J. CO2 Util., 47 (2021), Article 101488, [10.1016/j.jcou.2021.101488](https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101488)
文章  下载PDF 在 Scopus 中查看记录 Google Scholar

EIA, 2020 EIA
Capital Cost and Performance Characteristic Estimates for Utility Scale Electric Power Generating Technologies
(2020)
https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capital_cost_AEO2020.pdf
Google Scholar

EIA, 2021 EIA
How Much Carbon Dioxide Is Produced when Different Fuels Are Burned?
U.S. Energy Information Administration (2021)
Google Scholar

Eladl et al., 2020 A.A. Eladl, M.I. El-Afifi, M.A. Saeed, M.M. El-Saadawi
Optimal operation of energy hubs integrated with renewable energy sources and storage devices considering CO2 emissions
Int. J. Electr. Power Energy Syst., 117 (2020), Article 105719, [10.1016/j.ijepes.2019.105719](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105719)
文章  下载PDF 在 Scopus 中查看记录 Google Scholar

Enkvist et al., 2007 P. Enkvist, T. Nauc  r, J. Rosander
A cost curve for greenhouse gas reduction
McKinsey Q., 1 (2007), p. 34
在 Scopus 中查看记录 Google Scholar

[ERCOT, 2021a](#) ERCOT

Hourly Aggregated Wind Output

Electric Reliability Council of Texas (2021)

https://www.ercot.com/gridinfo/load/load_hist/

[Google Scholar](#)

[ERCOT, 2021b](#) ERCOT

Hourly Load Data Archives

Electric Reliability Council of Texas (2021)

https://www.ercot.com/gridinfo/load/load_hist/

[Google Scholar](#)

[Gabrielli et al., 2018](#) P. Gabrielli, M. Gazzani, E. Martelli, M. Mazzotti

Optimal design of multi-energy systems with seasonal storage

Appl. Energy, 219 (2018), pp. 408-424, [10.1016/j.apenergy.2017.07.142](#)

[文章](#)  [下载PDF](#) [在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)

[GCCSI, 2011](#) GCCSI

The Costs of CO₂ Storage: Post-demonstration CCS in the EU

Global CCS Institute (2011)

[Google Scholar](#)

[Hepburn et al., 2019](#) C. Hepburn, E. Adlen, J. Beddington, E.A. Carter, S. Fuss, N. Mac Dowell, J.C. Minx, P. Smith, C.K. Williams

The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal

Nature, 575 (7781) (2019), pp. 87-97

[交叉引用](#) [在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)

[IEA, 2021](#) IEA

Net Zero by 2050

International Energy Agency, Paris (2021)

<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

[Google Scholar](#)

[Insider, 2021a](#) Insider

Coal Price. Business Insider

(2021)

<https://markets.businessinsider.com/commodities/coal-price>

[Google Scholar](#)

[Insider, 2021b](#) Insider

Natural Gas (Henry Hub) Price Business Insider

(2021)

<https://markets.businessinsider.com/commodities/natural-gas-price>

[Google Scholar](#)

[IRENA, 2019](#) IRENA

Hydrogen: A Renewable Energy Perspective

(2019)

[Google Scholar](#)

[IRENA, 2021](#) IRENA

Renewable Power Generation Costs in 2020

(2021)

[Google Scholar](#)

[Klebnikov, 2019](#) S. Klebnikov

Stopping Global Warming Will Cost \$50 Trillion: Morgan Stanley Report

Forbes (2019)

<https://www.forbes.com/sites/sergeiklebnikov/2019/10/24/stopping-global-warming-will-cost-50-trillion-morgan-stanley-report/?sh=7a292cf351e2>

[Google Scholar](#)

[Lameh et al., 2020](#) Mohammad Lameh, Dhabia M. Al-Mohannadi, Patrick Linke

Graphical analysis of CO₂ emissions reduction strategies

Clean. Eng. Technol., 1 (2020), p. 100023, [10.1016/j.clet.2020.100023](#)

ISSN 2666-7908

[文章](#)  [下载PDF](#) [在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)

[Lameh et al., 2021](#) M. Lameh, D.M. Al-Mohannadi, P. Linke

Minimum marginal abatement cost curves (Mini-MAC) for CO₂ emissions reduction planning


Clean Technol. Environ. Policy (2021), pp. 1-17, [10.1007/s10098-021-02095-y](#)

[在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)

[Leeson et al., 2017](#) D. Leeson, N. Mac Dowell, N. Shah, C. Petit, P. Fennell

A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources

Int. J. Greenh. Gas Control, 61 (2017), pp. 71-84

[文章](#)  [下载PDF](#) [在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)

[Limpens et al., 2019](#) G. Limpens, S. Moret, H. Jeanmart, F. Maréchal

EnergyScope TD: a novel open-source model for regional energy systems

Appl. Energy, 255 (2019), Article 113729


[文章](#)  [下载PDF](#) [在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)

[Lund et al., 2021](#) H. Lund, J.Z. Thellufsen, P.A. Østergaard, P. Sorknæs, I.R. Skov, B.V. Mathiesen

EnergyPLAN – advanced analysis of smart energy systems


Smart Energy, 1 (2021), Article 100007, [10.1016/j.segy.2021.100007](#)


[文章](#)  [下载PDF](#) [在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)

[Manan et al., 2017](#) Z.A. Manan, W.N.R. Mohd Nawi, S.R. Wan Alwi, J.J. Klemeš
Advances in Process Integration research for CO₂ emission reduction – a review
J. Clean. Prod., 167 (2017), pp. 1-13, [10.1016/j.jclepro.2017.08.138](#)
[文章](#)  [下载PDF](#) [在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)


[Metz et al., 2005](#) B. Metz, O. Davidson, H. De Coninck
Carbon Dioxide Capture and Storage: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
Cambridge University Press (2005)
[Google Scholar](#)


[Norris, 2001](#) G.A. Norris
Integrating economic analysis into LCA
Environ. Qual. Manag., 10 (3) (2001), pp. 59-64, [10.1002/tqem.1006](#)
[在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)

[Pérez-Fortes et al., 2016](#) M. Pérez-Fortes, J.C. Schöneberger, A. Boulamanti, E. Tzimas
Methanol synthesis using captured CO₂ as raw material: techno-economic and environmental assessment
Appl. Energy, 161 (2016), pp. 718-732, [10.1016/j.apenergy.2015.07.067](#)
[文章](#)  [下载PDF](#) [在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)

[Poncelet et al., 2016](#) K. Poncelet, E. Delarue, D. Six, J. Duerinck, W. D'haeseleer
Impact of the level of temporal and operational detail in energy-system planning models
Appl. Energy, 162 (2016), pp. 631-643, [10.1016/j.apenergy.2015.10.100](#)
[文章](#)  [下载PDF](#) [在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)

[von der Assen et al., 2016](#) N. von der Assen, L.J. Müller, A. Steingrube, P. Voll, A. Bardow
Selecting CO₂ sources for CO₂ utilization by environmental-merit-order curves
Environ. Sci. Technol., 50 (3) (2016), pp. 1093-1101, [10.1021/acs.est.5b03474](#)
[Google Scholar](#)

[Wunderlich et al., 2021](#) J. Wunderlich, K. Armstrong, G.A. Buchner, P. Styring, R. Schomäcker
Integration of techno-economic and life cycle assessment: defining and applying integration types for chemical technology development
J. Clean. Prod., 287 (2021), Article 125021, [10.1016/j.jclepro.2020.125021](#)
[文章](#)  [下载PDF](#) [在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)

[Zang et al., 2021](#) G. Zang, P. Sun, A.A. Elgowainy, A. Bafana, M. Wang
Performance and cost analysis of liquid fuel production from H₂ and CO₂ based on the Fischer-Tropsch process
J. CO₂ Util., 46 (2021), Article 101459, [10.1016/j.jcou.2021.101459](#)
[文章](#)  [下载PDF](#) [在 Scopus 中查看记录](#) [Google Scholar](#)

[Zimmermann et al., 2020](#) A. Zimmermann, L. Müller, Y. Wang, T. Langhorst, J. Wunderlich, A. Marxen, K. Armstrong, G. Buchner, A. Kätelhön, M. Bachmann
Techno-Economic Assessment & Life Cycle Assessment Guidelines for CO2 Utilization
(2020)
Version 1.1
[Google Scholar](#)

被 (1) 引用

[EnergyPLAN 的审查和验证](#)
2022 年, 可再生和可持续能源评论
[显示摘要](#) ✓

Glossary

S	The set of CO ₂ sources
F	The set of fossil-based energy sources
D	The set of CO ₂ sink
E	The set of energy systems
$TAC_{ES}^{e_q}$	The total annualized cost of the energy system e_q
F_{prod-e_q}	The emissions flowrate produced by the energy system e_q
C_{si}	The specific cost of supplying CO ₂ emissions from source s_i
γ_{si}	Energy-related emissions factor for CO ₂ capture from source s_i
η_{si}	CO ₂ capture efficiency from source s_i
η_{dj}	Net CO ₂ fixation efficiency in sink d_j

R_{dj}	The specific profit generated from the sink d_j
F_{si}	CO ₂ flow rate allocated by source s_i to the CO ₂ network
$F_{s_i}^{max}$	The maximum CO ₂ flow rate that can be allocated by source s_i to the CO ₂ network
$F_{prod-si}$	The flowrate f CO ₂ produced by the source s_i
F_{c-si}	CO ₂ flow rate of the original emissions stream fed into the capture process by source s_i
F^{dj}	CO ₂ flow received by sink d_j
$F_{d_j}^{max}$	The maximum flowrate that the sink can process
$F_{e_q}^{max}$	The CO ₂ flowrate limit that can be further reduced by implementing the energy system e_q relative to the system e_{q-1}
F_{fix-ij}	Net CO ₂ flowrate fixated through adding source s_i and sink d_j to the network
$MAC_{ES}^{e_q}$	The marginal abatement cost associated with implementing the energy system e_q
$MAC_{CCUS}^{s_i-d_j}$	The marginal abatement cost associated with adding source s_i and sink d_j to the network
$NC_{CCUS}^{s_i-d_j}$	The net cost of adding source s_i and sink d_j to the network
$NC_{RES}^{e_q}$	The additional net cost of adding implementing the energy system e_q
F_{max}^{ij}	The upper limit of the flow that can be incorporated in the network through adding source s_i and sink d_j
F_{ij}^{red}	通过将源 s_i 和汇 d_j 引入网络减少了 CO ₂ 的流量
1↑	www.energyplan.eu 。
2↑	www.energyscope.ch 。



版权所有 © 2023 Elsevier BV 或其许可人或贡献者。
ScienceDirect® 是 Elsevier BV 的注册商标

