标题：低碳锂提取使深层地热电厂在能源系统中具有成本竞争力

作者：Jann Michael Weinand，[1] Ganga Vandenberg，[1] Stanley Risch，[1,2] Johannes Behrens，[1,2]Noah Pflugradt，[1] Jochen Linßen，[1] 和 Detlef Stolten[1,2]

机构：

[1]于利希研究中心有限公司，能源与气候研究所——技术经济系统分析（IEK-3），52425 于利希，德国[2]亚琛工业大学，机械工程学院燃料电池教席，52062 亚琛，德国

通讯 作者：Jann Michael Weinand，j.weinand@fz-juelich.de，+49 175 4985402

Conf利益冲突声明：作者没有需要披露的利益冲突 e.

摘要：锂是能源转型的关键材料，但传统采购方式会造成显著的环境影响。本研究利用区域能源系统优化，探讨在深层地热电厂中采用低碳替代方案——直接提锂的技术经济潜力。我们发现，即使在不利条件下，地热电站与锂提取相结合也将具备成本竞争力，并部分替代能源系统中的光伏、风力发电和储能。我们的分析表明，如果德国上莱茵地堑地区有 10% 的市镇建造深层地热电厂，每年就可生产足够的锂，用于制造约 120 万套电动汽车电池组，相当于欧盟今日年度电动汽车注册量的 70%。这种方法可带来显著的环境效益，也有望在其他国家大规模应用，例如美国、英国、法国和意大利，这凸显了进一步研究和开发这项技术的重要性。

1. 引言

锂对于向温室气体中和型能源系统转型至关重要。2019年，开采出的锂有超过60%用于制造锂离子电池。这种紧凑、高能量密度的储能设备应用于低碳排放电动汽车；其次，锂也用作太阳能和风能等可再生能源的储能介质 [1,2]。在符合 2 °C 目标的

情景下，today`s全球锂需求预计到2050年[3]还将增长500%。

然而，传统的锂提取方法，如盐湖卤水提锂和硬岩采矿，碳强度很高，会造成空气和水污染，需要消耗大量水和土地，而且与侵犯人权及工人保护不力有关 [4]。全球约90%的锂提取发生在澳大利亚、智利和中国，近100%的锂加工则在中国、智利和阿根廷进行，因此世界上大多数其他国家都完全依赖锂进口 [5]。为满足预期需求并提升矿产安全，需要提高产量并实现锂供应多元化；同时，还需要采用可持续的提取方法，以降低碳强度和环境影响 [6,7]。

一种颇具前景、可减少水土占用的可持续提取方案是混合地热电厂，将深层地热发电和热能生产与低碳直接提锂（DLE）相结合 [8]。目前，采用这项技术的试点项目正在法国的上莱茵地堑（URG）[9] 和德国 [10], 、英国康沃尔 [8], 以及美国加利福尼亚州的索尔顿海 [11] 开发。从经济角度看，深层地热能在德国等低至中焓地区尚不可行 [12,13] ，因此无法与其他可再生能源相竞争。与低成本光伏 [14] 和风能 [15,16], 相比，未来成本预计只能小幅下降 [17]。鉴于应用范围广泛且锂价不断上涨 [5,18,19], ，可调度深层地热系统仍有望在未来能源系统中发挥重要作用。要对此进行评估，需要开展综合能源系统分析，将地热电站与直接提锂结合起来考察。

少数研究已将深层地热系统纳入分布式能源系统，例如区域供热应用 [20,21] ，或作为市镇综合能源系统优化的一部分，同时提供电力与热能 [12,17,22], ，但从未将其与直接锂提取相结合。对于从地热卤水中进行锂提取，既有研究主要关注技术与经济潜力，尤其是萨尔顿海已知地热资源区（KGRA）[23–25], ，以及增加锂供应所带来的供应链影响 [26], ，和以下地热卤水的地球化学特征：

德国的地热卤水（磨拉石盆地 [27], 、上莱茵地堑 [28,29] 和北德盆地 [30–32]），以及锂提取的环境影响 [33,34]。

本文首次研究了在分布式能源系统中安装和运行结合锂提取的深层地热系统所产生的技术经济影响。为此，我们聚焦于德国的上莱茵地堑，其盐水锂矿床与目前开采的蒸发盐水和硬岩矿锂开采项目相当 [29,32,35,36]。基于开源框架 ETHOS.FINE [37], 构建的综合能源系统模型经过扩展，纳入了混合地热电厂（第 2 节），并用于从宏观经济视角优化德国上莱茵地堑市镇在 2045年 的温室气体中和能源系统（第 3 节）。因此，我们基于对锂提取厂关键参数的专家评估，并通过有针对性的敏感性分析，展示了深层地热能结合直接锂提取（DLE）成为未来能源系统不可或缺组成部分的条件。第 4 节中，我们结合全球能源转型的背景讨论研究结果，并得出结论。

2. 方法

在方法部分，我们首先介绍所使用的能源系统优化框架，该框架是各个市镇区域模型的基础（第 2.1 节）。随后，我们说明用于表示地热发电厂的关键方程（第 2.2 节），以及水热温度和钻井如何纳入模型（第 2.3 节）。第 2.4 节介绍直接提锂厂的实现方式及关键成本假设。最后，第 2.5 节介绍案例研究中所考察的市镇。

2.1. ETHOS.FNE 优化

本研究采用一种市镇级能源系统优化模型，该模型基于开源 Python 软件包 Framework for Integrated Energy System Assessment (ETHOS.FINE) [37]。该模型提供了一个框架，利用高分辨率的发电和能耗数据对区域能源系统进行建模、优化和评估。模型的目标是在考虑技术和环境约束的前提下，尽可能降低为市镇所有需求部门供能的总年成本（TAC），以实现温室气体净零排放

的 2045年 可再生能源系统。成本由所有已建可再生能源发电技术、转换技术和储能技术，以及源/汇（例如光伏板或锂需求）的总年成本构成，并根据各项技术的单位资本成本、年金系数、已建装置数量以及运营和维护成本确定。组件的总成本可能为负，因为源/汇产生的收入也计入运营成本（例如通过电力或碳酸锂销售获得的收入）。优化以完全预见条件下的中央规划者视角进行。尽管该模型也可用于 NUTS-3 行政级别或更高层级的分析，但本研究所述分析均在市镇级开展。采用时间序列聚合模块（TSAM）[38] 进行层次聚类，将时间序列划分为 60 个时期和 16 个区段，从而能够以小时分辨率（8760 h）分析大量能源系统，且不会显著损失精度（优化后的总年成本平均偏差：0.3%）。

该优化模型涵盖陆上风电、屋顶光伏（PV）、地面光伏（OFPV）、生物质、沼气和废弃物，并进一步纳入深层地热电厂以及锂和碳酸锂（Li_2CO_3）等商品（见图1）。屋顶光伏、地面光伏以及风能的区域潜力通过区域可再生能源潜力工具（TREP）[39]确定。能源需求汇包括家庭、贸易、商业和服务业（TCS）、工业，以及各自的商品。工业能源需求包括电力、热和工艺热需求。工艺热分为三种形式：低温（不超过100 °C）、中温（100至500 °C）和高温（超过500 °C的工艺）。对于区域需求时间序列，根据就业、人口和CO_2排放数据对自上而下的需求数据[40] 进行区域化处理。

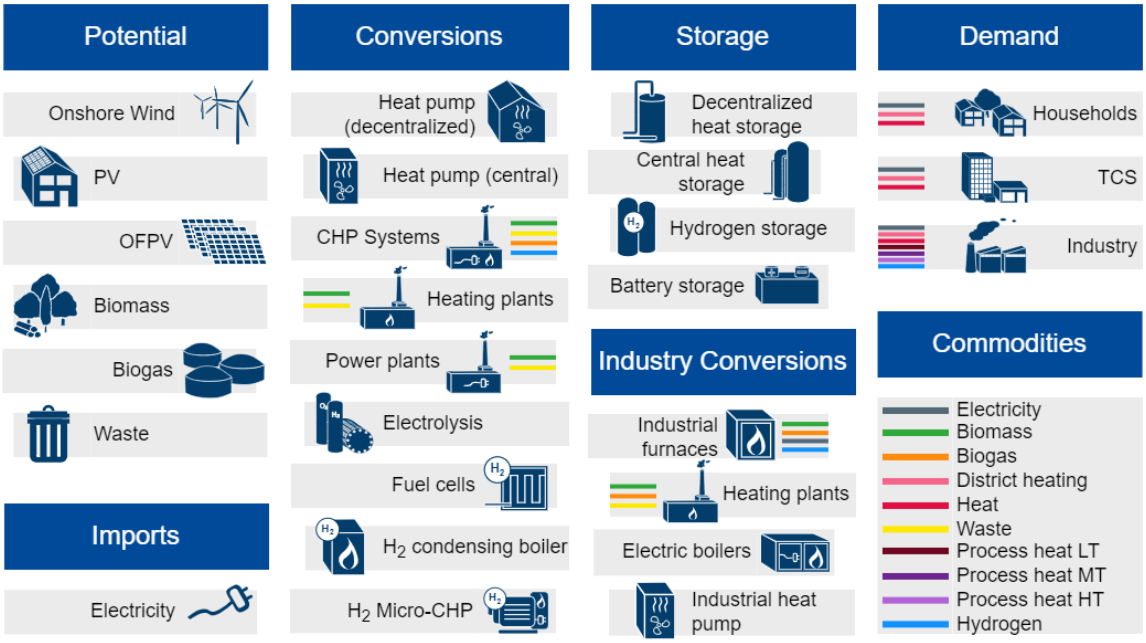


图 1：能源系统优化模型的组成部分。这些包括可再生能源潜力、进口、能量转换和储能技术，以及需求部门。需求或供应的商品以不同颜色标示，但仅限涉及一种以上商品的技术。

2.2. 深层地热电站模型

地热发电厂利用深层热液含水层中的热能生产热和/或电力（见图2）。有机朗肯循环电厂每个时间步长t的发电量P_{el} 以及区域供热厂的供热量$\dot{Q}_{th}$按如下方式确定[12]。

$$\dot{V}_B \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot \left(T_{PW}(t) - T_{ORC}(t)\right) \cdot \eta_{el} = P_{el}(t) \qquad \forall t \qquad (1)$$

$$\dot{V}_B \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot \left(T_{ORC}(t) - T_{DHP}(t)\right) \cdot \eta_{th} = \dot{Q}_{th}(t) \qquad \forall t \qquad (2)$$

其中，$\dot{V}_B$ 为地热卤水的体积流量，单位为 l/s；ρ_w 为地热水的平均密度，单位为 kg/l；$c_{p,w}$ 为地热水的平均热容量，单位为 kJ/(kg·K)；T_{PW}、T_{ORC}和 T_{DHP} 分别为生产井中的温度，以及传热至有机朗肯循环或区域供热网络后的温度。由于流量 $\dot{V}_B$ 会因当地地质条件而有很大差异，本模型采用德国现有深层地热系统的平均流量 75 l/s，除非另有说明（见情景）。假设平均密度 ρ_w 为 0.95 kg/l，平均热容量 $c_{p,w}$ 为 4.31 kJ/(kg·K) [12]。

最低注入温度为 50 °C，这会直接影响传热至区域供热网络后的温度 T_{DHP}。优化模型可选择建设区域供热厂和/或有机朗肯循环电厂；如果两者均建成，则由模型决定如何在两者之间分配热源。假设 ORC电厂的效率 η_{el} 为 10%，区域供热厂的效率 η_{th} [12]为 65%。

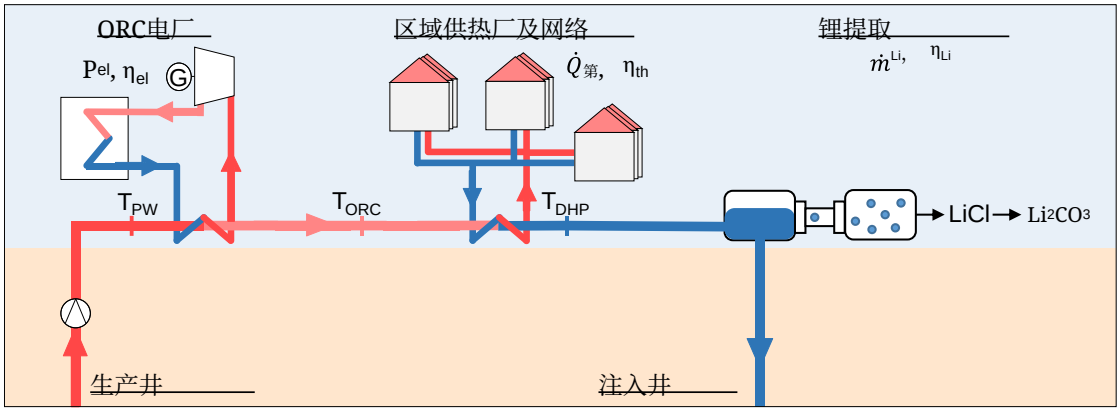


图2：本研究所考虑的有机朗肯循环（ORC）与区域供热（DH）电厂及网络，以及锂提取的示意图。地热卤水由生产井泵抽至地面，并输送至换热器，在此加热ORC电厂中的工质；工质继而驱动发电机，产生电力。随后，卤水经过区域供热厂的另一台换热器，该厂向区域供热网络供热。冷却后的卤水可输送至锂提取厂，并与锂选择性吸附剂接触，吸附剂会结合锂离子。随后将锂从吸附剂中分离出来，并可进一步提纯为碳酸锂；之后，冷却后的贫锂卤水经注入井回注地下。

2.3. 水热温度与钻井

钻井成本占地热厂投资成本的多数，最高可达70% [12]。由于这些成本函数是非线性的（见式 3 [12]），优化模型必须从最多400个离散选项中选定一个钻井深度：从1000米起，以10米为步长，最深可达5000米。采用1000米的下限，是因为锂储量仅存在于更深处。假设这些钻井成本具有规模经济，第二口井的成本为第一口井的90%。钻井成本根据钻井深度 z_D （单位为米）以及生产井与注入井之间的距离计算

d_D 米：

$$C_D = 610{,}000€ + 1.015 \cdot 1.198\, e^{0.00047894} \cdot \sqrt{z_D^2 + d_D^2} \cdot 10^6€ \qquad (3)$$

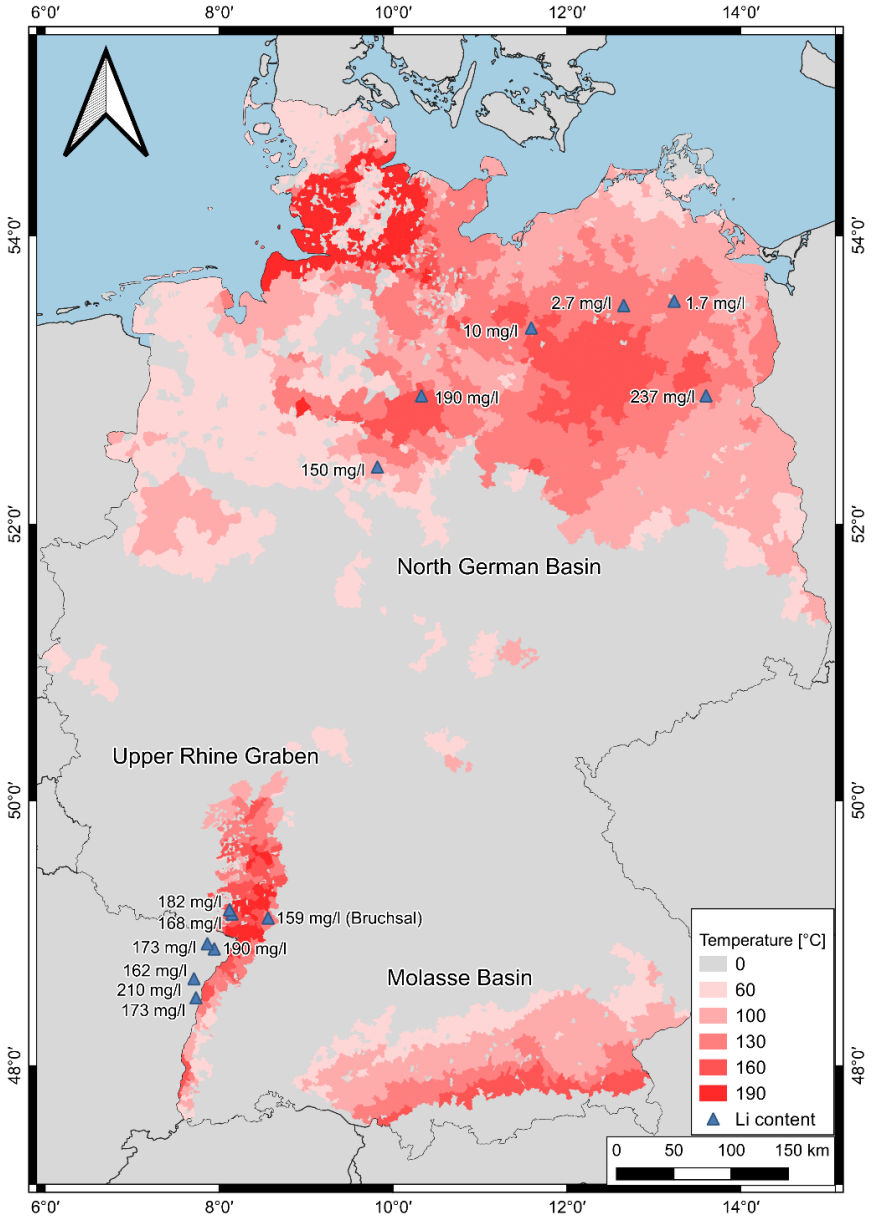


图 3：德国深达 5,000 米处可实现的水热温度*[41]* 和测得的锂含量*[28,31,32,42,43]*。

所选钻井深度决定了优化中可实现的最高水热温度；德国市镇在 5000 米钻井深度下的理论最高温度见图 3。主要地热盆地——磨拉石盆地、北德盆地和上莱茵地堑——假设的平均温度梯度分别为 32 C/km、35 C/km 和 43 °C/km。不过，在局部地区，上莱茵地堑的温度梯度可能高得多，[44], 尤其是在深度不超过 3 公里的区域，平均

最高可达 110 °C/km。因此，对于上莱茵地堑，假定的平均温度梯度分为三个区段：深度达到 1900 m 时为 47 °C/km，深度在 1900 m 至 3250 m 之间时为 41 °C/km，深度从 3250 m 起为 33 °C/km。

2.4. 直接提锂

与有机朗肯循环和区域供热网络进行热交换后，冷却后的卤水被输送至锂提取厂，并与锂选择性吸附剂接触，后者会结合锂离子。随后，锂从吸附剂中分离出来并提纯为碳酸锂，冷却后的贫锂卤水则通过注入井回注地下（图2）。优化计算中，根据上莱茵地堑的实测数据（图3），假定平均锂浓度为 175 mg/l。根据公式 4，利用含锂地热卤水提取的锂量为：

$$\dot{V}_B \cdot C_{Li} \cdot \eta_{Li} = \dot{m}_{Li} \tag{4}$$

其中，$\dot{V}_B$ 为盐水流量，单位为 l/s；C_{Li} 为盐水中的锂浓度，单位为 mg/l；η_{Li} 为提取效率；最终产品为元素锂 $\dot{m}_{Li}$，单位为 mg/s。提取后，锂经过 5.324 [23] 的能量转换系数转化为碳酸锂。碳酸锂是一种大量交易的原材料，可用于生产锂离子电池等产品 [6]。

有关从地热卤水中提取锂的经济和技术数据十分匮乏，因此存在很大的不确定性。尽管我们找到了所有所需参数的文献数据，但仍通过广泛的敏感性分析评估了每项参数的影响（见正文）。此外，我们假设碳酸锂市场的固定合同价格在每吨 8500 欧元至 25,500 欧元之间。自 2020 年以来，固定合同的碳酸锂年均价格已上涨逾一倍，在 2021 [5] 达到每吨 17,000 欧元。此类碳酸锂固定合同通常为期三至五年 [4]。近来，现货价格波动更为剧烈，从 2020 年 9 月碳酸锂每吨约 5500 欧元，涨至 2022 [5] 年 9 月每吨超过 76,000 欧元。然而，现货价格通常高于合同价格，而且研究预计，从长期来看，市场价格将显著低于当前的现货市场价格 [45,46]。过去也曾出现碳酸锂价格波动，

固定合同价格从 2015 年上涨至 2018 年，随后一直大幅下跌至 2020 年。2015 年和当前的价格飙升可归因于“电动汽车市场意外且爆发式增长” [46], ，而后者也与 COVID-19疫情有关。未来市场价格将主要取决于可用储量以及电动汽车销量的增长。从长期来看，碳酸锂价格可能降至每吨 10,000 欧元 [46]。

2.5. 案例研究

德国上莱茵地堑共有330个市镇（见图3），其可实现的水热温度达到或超过60 °C。我们研究了这些市镇在URG平均情景下采用和不采用直接锂提取（DLE）方案时的最优能源系统（见表1和第3.3节）。这些市镇约有450万人口，平均人口密度为400人/km2。上莱茵地堑人口最多的三个城市分别是卡尔斯鲁厄（约312,000人，人口密度为1,800人/km2）、曼海姆（310,000人，人口密度为2,140人/km2）和弗赖堡（230,000人，人口密度为1,510人/km2）。

表1。本文考察的能源系统优化情景。基准情景采用布鲁赫萨尔地点经证实的现有数据，以及根据文献和专家意见确定的直接提锂（DLE）工厂平均值或最可能值。最差和最佳情景分别采用文献或现有工厂数据中的最差值和最佳值。乐观情景代表一种可能达到的状态，采用基准情景与最佳情景之间的平均值。URG平均情景用于第3.3节中对上莱茵地堑所有市镇进行的能源系统优化，代表该地区所有现有工厂的平均值，以及基准情景中的DLE数值。不过，由于每个市镇的最高可达温度数据均可获得，因此该情景中的温度因市镇而异，范围为60至190 °C。

参数	最坏情况情景	基准情景情景	乐观情景	最佳情况情景	平均上莱茵地堑情景
流量 [l/s] [47]	24	24	82	140	75
最高井口温度 [°C] [47]	65	131	176	220	60–190
锂浓度 [mg/l] [28,29,31,42,43,48]	86	159	198	237	175
直接提锂资本支出 [M€] [49]	31.2	20.8	15.8	10.9	20.8
直接提锂运营支出 [€/t] [23]	8,000	4,000	3,000	2,000	4,000
直接锂提取效率 [-] [50]	50%	70%	80%	90%	70%
碳酸锂市场价格 [€/t] [5]	8,500	17,000	21,250	25,500	17,000

本文在另外四种情景（表1，第3.1节）和多项敏感性分析（第3.2节）中，考察了上莱茵地堑某个特定市镇布鲁赫萨尔的最优能源系统。布鲁赫萨尔约有44,800名居民，市镇面积为93 km^2，，人口密度约为480人/km^2 [51]。该市镇的可再生能源最大潜力包括75 MW_{el} 陆上风电、31 MW_{el} 地面光伏和290 MW_{el} 屋顶光伏[39]。除这些潜力外，布鲁赫萨尔已建成1.22 MW_{el} 地面光伏和24 MW_{el} 屋顶光伏装机容量，本研究将其计为现有装机容量。该市镇的总电力需求约为480 GWh_{el}，总供热需求约为465 GWh_{th}。居民供热需求约占总热需求的45%，而工业电力需求占总电力需求的比例最大，约为31%。所述总电力需求还包括优化计算所得的约183 GWh_{el}，用于储能损耗、电转热、工艺热和氢气（H_2）生产。

3. 结果

3.1. 直接提锂有利于深层地热电厂

目前，研究人员正在上莱茵地堑的布鲁赫萨尔地热井开展试点项目，以筛选合适的锂选择性吸附剂、确定储层可持续性、评估环境影响，并判断从地热卤水中提取锂，能否在经济上与采用传统方法从南美洲和澳大利亚获取锂相竞争。布鲁赫萨尔的锂含量（159 mg/l）、温度梯度（平均为 43 °C/km）和储层温度（131 °C）均适合开展此类项目[29,41]，因此本文将其作为首个案例研究，并考察四种情景（表1）。有关该市供需结构的更多信息，请参见方法部分。

仅用于电力和热能生产的深层地热电厂，只有在条件极为有利时才具有成本竞争力。因此，由于布鲁赫萨尔可实现的流量较低，它们不会被纳入最优能源系统。这一发现与此前采用不同能源系统优化模型的分析结果一致 [12,17]。如果不建设地热发电厂，大部分电力或热能将分别由陆上风电、屋顶和地面光伏或热泵提供；参见

图 4 中的最坏情景，该情景产生的能源系统与不含直接锂提取的基准情景相同。

然而，根据地热资源的地质特征，.....的选择方案
锂提取与销售使深层地热电厂具有成本竞争力（见图4中的基准情景、乐观情景和最佳情况情景）。尽管部署地热电站会增加能源供应技术的年度成本，但每年销售450–3,900吨碳酸锂带来的收入抵消了这部分成本，甚至在最佳情况情景下实现了年度成本为负。根据流量、井口温度、锂浓度和提取效率的不同，地热发电厂可替代6–29%的屋顶光伏。区域供热厂比有机朗肯循环更受青睐，因此只有在假设热液资源极佳的最佳情况情景下，才会建设后者。由于地热发电厂具备基荷供电能力，且大型区域供热可替代7–75%的热泵，整体发电量以及对热能和电力储能的需求均有所下降。

所开发的地热发电厂模型相当准确地反映了实际情况。若在基准情景中将布鲁赫萨尔电站的实际温度（123 °C）设为固定值，模型得出的参数与实际情况相近：钻井深度为 2470 m，而实际值为 2542 m（-3%）；区域供热厂容量为 4.66 MW_{th}，而实际值为 5.7 MW_{th}（-18%）[12]。在这项评估中，需要谨记，为确保所开发的模型适用于德国的每个市镇，我们假设采用了平均参数，例如温度梯度和效率等。不过，地热项目中最不确定的因素——钻井成本——无法通过我们的模型进行非常准确的估算。在这方面，模型得出的成本为 1140 万欧元，比实际成本 810 万欧元高出 41%[12]。对于成本，我们的模型采用了稳妥保守的估算，因为地热项目可能会因意外产生额外成本，导致费用高于最初估算。这意味着，本研究对特定地区地热电站的估值可能略有低估。

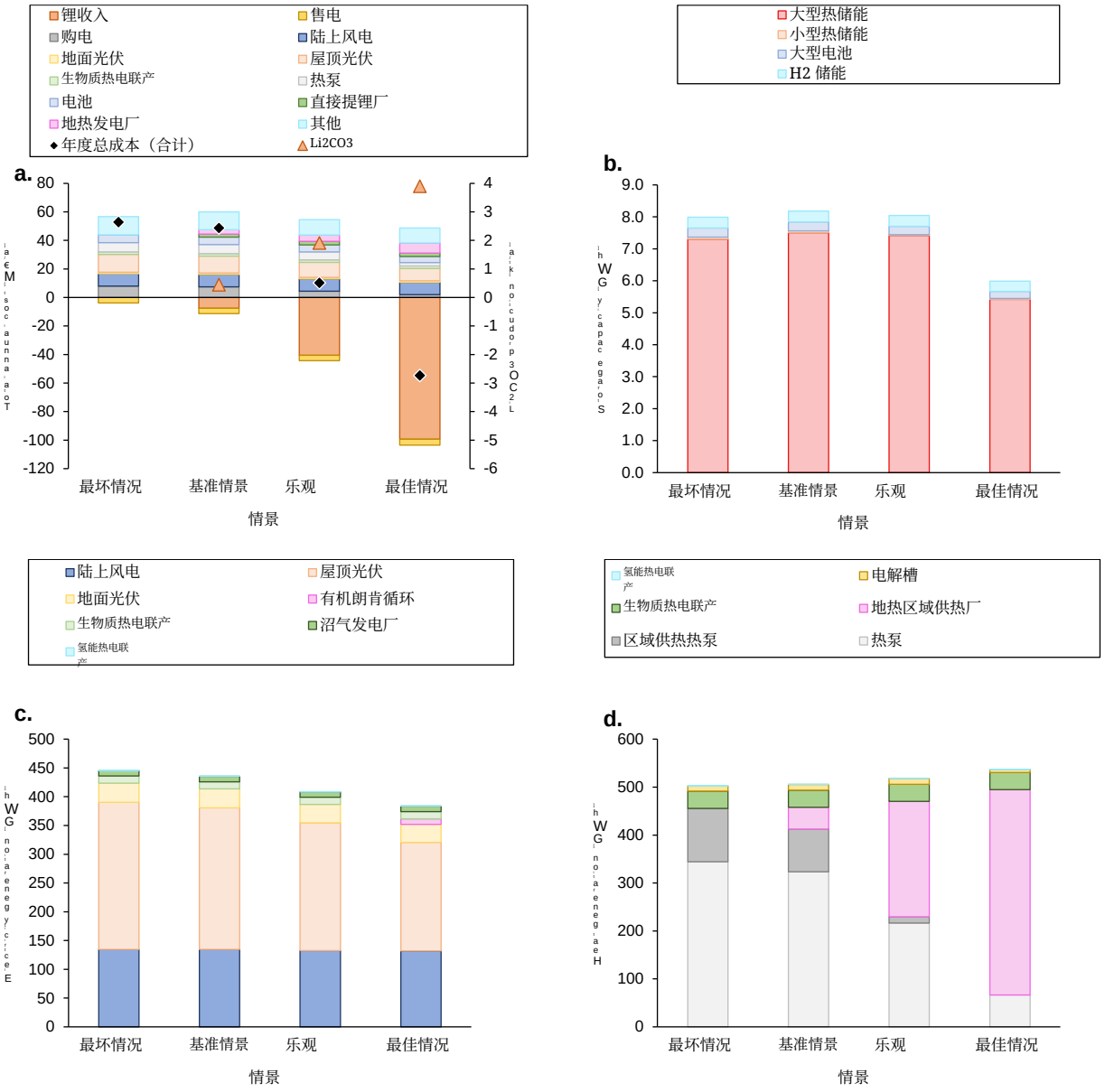


图4：布鲁赫萨尔市镇在最坏情况、基准情景、乐观情景和最佳情况情景下，到2045年的优化能源系统。各图分别展示不同情景下成本最优能源系统的年度总成本（a）、储能容量（b）、发电量（c）和供热量（d）。

3.2. 即使在悲观条件下也具有成本竞争力

到目前为止，重点一直放在布鲁赫萨尔现有电站的特征上。由于该站点的流量在德国所有现有电站中最低，因此在基准情景或最坏情景下，往往会低估深层地热能的潜力；因此，我们现在将考察上莱茵地堑地热电站的平均值，以开展若干敏感性分析，针对

布鲁赫萨尔能源系统（井口温度为115 °C；其他参数请参见表1中的URG平均情景）。不同于最坏情景，在该情景中，不利参数值的组合导致尽管存在直接锂提取的可能性，仍未安装任何地热系统；在敏感性分析中，我们一次仅改变一个参数，以了解其对能源系统设计和成本的单独影响。

如果仅改变单个参数值，而其他参数采用平均值，配备锂提取的地热电站在能源系统中仍具有竞争力。由于地热能和锂采购与流量直接相关，这一假设的变化会显著影响结果（图5）。德国地热电站的平均流量为75 l/s，但这一数值会因当地地质条件而大不相同。在德国，卤水流量从布鲁赫萨尔地热电站的24 l/s到磨拉石盆地的最高150 l/s不等[12]。通过额外钻井可以提高流量，直接锂提取试点工厂的运营商Vulcan Energy Resources Ltd.计划在上莱茵地堑实现100–120 l/s的流量[49]。然而，敏感性分析结果表明，即使流量大幅降低，地热—锂综合电站在成本优化能源系统中仍然有利。

另一个重要假设是，鉴于缺乏公开数据，采用先前研究测得的地热卤水平均锂浓度。然而，这忽视了这样一个事实：不同地点测得的地热卤水锂含量差异很大。这可能会对北德盆地的结果产生尤其显著的影响，因为该地区的锂矿床高度集中，测得的锂含量范围为0至237 mg/l [31] 这也是我们选择上莱茵地堑开展研究的另一个原因。此外，尽管专家认为磨拉石盆地的锂浓度为0 mg/l，但进一步研究也可能在那里发现锂矿床。

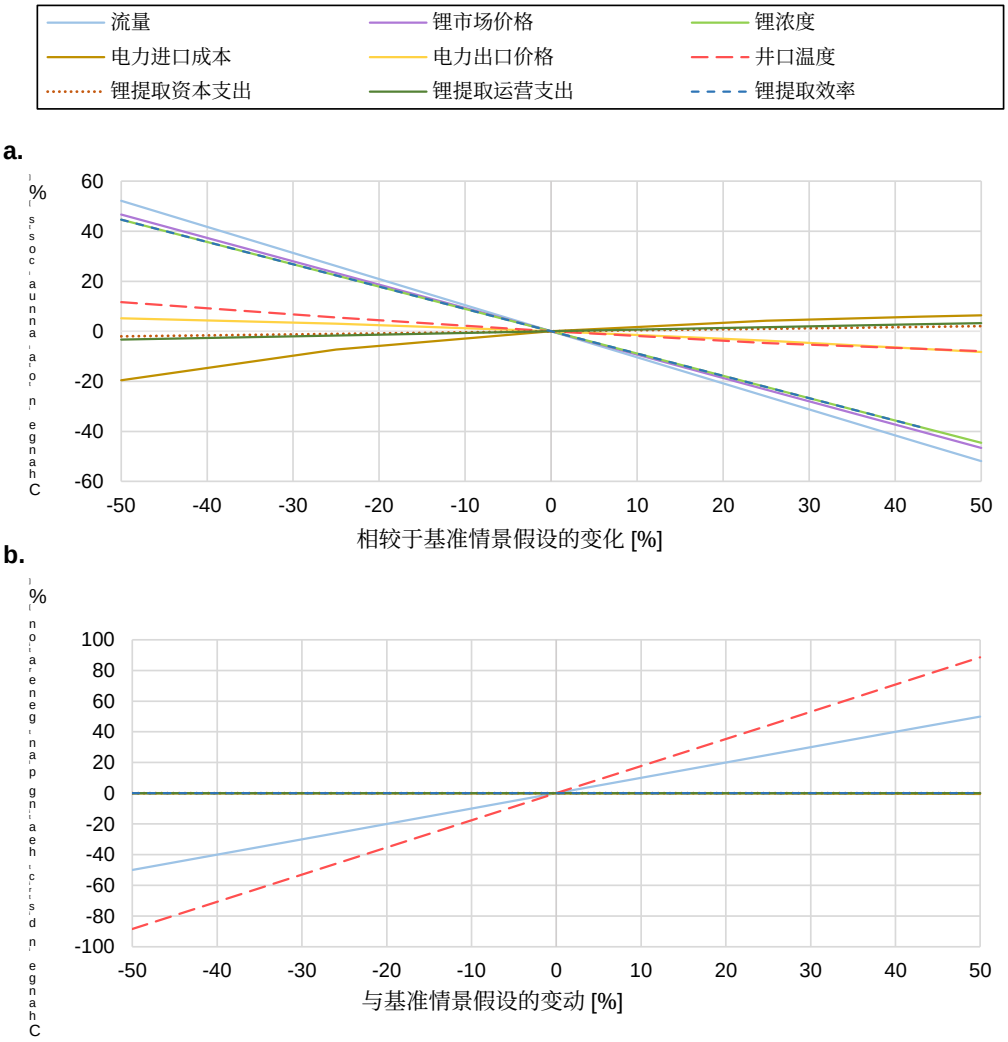


图5：参数变化对布鲁赫萨尔最优能源系统设计的影响。面板（a）显示敏感性分析对年度总成本的影响，面板（b）显示其对区域供热厂发电量的影响。由于这些分析中未安装有机朗肯循环，因此图中未显示其发电量。对成本影响最大的是那些直接影响碳酸锂产量和销售的参数，例如流量，以及锂提取效率、市场价格或浓度。其中，流量的影响最大，因为它还直接影响区域供热厂可实现的最大容量和发电量。除流量和井口温度外，所分析的其他参数对区域供热厂设计没有显著影响。

开展这项研究时，围绕直接锂提取的经济性、效率以及碳酸锂的市场价格，也出现了许多问题。文献中的提取效率介于50%至90%之间[10,49]，并且对系统总成本有重大影响（图5）。碳酸锂的市场价格也是如此，该价格在近几个月大幅上涨。美国地质调查局估计，2021年固定合同中碳酸锂的平均年价格为17,000 €/t，这一数值是2020 [5]中相同数值的两倍以上。

然而，2022年9月的现货市场价格最高约为76,000欧元/吨，预计还将上涨[52]。

由于对低碳产品的需求不断增长，可持续低碳锂相较于通过传统开采获得的锂，也可能实现溢价定价。汽车行业存在这类需求，电动汽车制造商正推动供应链脱碳，其中包括大众汽车和丰田；两家公司都设定了消除其价值链碳排放的远大目标[53]。雷诺、大众汽车、优美科、LG新能源和Stellantis签署地热锂承购协议，已证明市场对低碳锂具有商业兴趣[54]。由于锂市场价格会对总体成本产生重大影响，这种溢价定价可能进一步改善能源系统（包括地热—锂综合电站）的经济性。

直接提锂工厂的运营支出（OPEX）和资本支出（CAPEX）对能源系统设计和成本的影响可以忽略不计。文献综述确定的运营支出从Vulcan Energy报告的略低于2,000欧元/吨[49], , 到美国能源部报告的约4,000欧元/吨[23], , 再到与专家讨论得出的最高约8,000欧元/吨不等。资本支出同样具有较大的不确定性：尽管我们采用了20,800百万欧元的数值，但此类项目的实际资本支出可能存在显著差异。

3.3. 采用锂提取的地热电站的大规模影响

与之前的敏感性分析不同，我们现在针对 URG 平均情景，优化上莱茵地堑全部 330 个市镇的能源系统。该情景采用各市镇特有的实际最高井口温度，而非固定为 115 °C。即使不考虑建设直接提锂厂的选项，330 个市镇中仍有 152 个（46%）开发了深层地热系统。这些市镇拥有中高焓资源，水热温度范围为 130–190 °C，平均温度为 131 °C。这一结果与既往研究的发现一致[17] ，并表明在条件十分适宜的地点，深层地热电厂具有与传统能源竞争的成本优势。152 个市镇均安装了区域供热系统，而 330 个市镇中有 113 个（34 %）建成了有机朗肯循环工厂。

若可建设锂提取厂，并通过销售碳酸锂获得额外收入，那么深层地热电厂在全部 330 个市镇都具有成本竞争力。平均而言，上莱茵地堑的每个市镇年度总成本减少 22.4 M€/a，即 1000%；这体现了地热—锂联合电厂带来的额外效益（见图6，“> 100%”的成本降幅意味着市镇实现了盈利）。尤其是在较小的社区，锂销售所得利润显然发挥了特别显著的作用。330 个市镇采用的主要发电技术包括屋顶和地面光伏（每个市镇的平均装机容量分别约为 67 MW 和 23 MW）以及陆上风力涡轮机（平均装机容量：11 MW）；深层地热有机朗肯循环电厂的应用则较少（平均装机容量：0.9 MW）。热能主要由热泵和深层地热区域供热厂供应。

有机朗肯循环工厂的发展与陆上风电和光伏潜力较低或为零、水热温度可达值较高的市镇相关；而区域供热厂则更适合卡尔斯鲁厄、海德堡或曼海姆等规模较大、人口密度较高的市镇。与不采用直接锂提取的情景下的最优系统相比，深层地热系统主要替代屋顶光伏装机容量（平均为 2.0 MW，即原装机容量的 -24%），其次是地面光伏（1.9 MW，即 -14%）和陆上风电（1.2 MW，即 -29%）；而区域供热厂主要替代热泵（2.1 MW，即 -64%）。尽管电力的发电成本较低，光伏仍被替代得更多，这一趋势可以用其相较于风力发电更高的系统集成成本来解释 [55]。

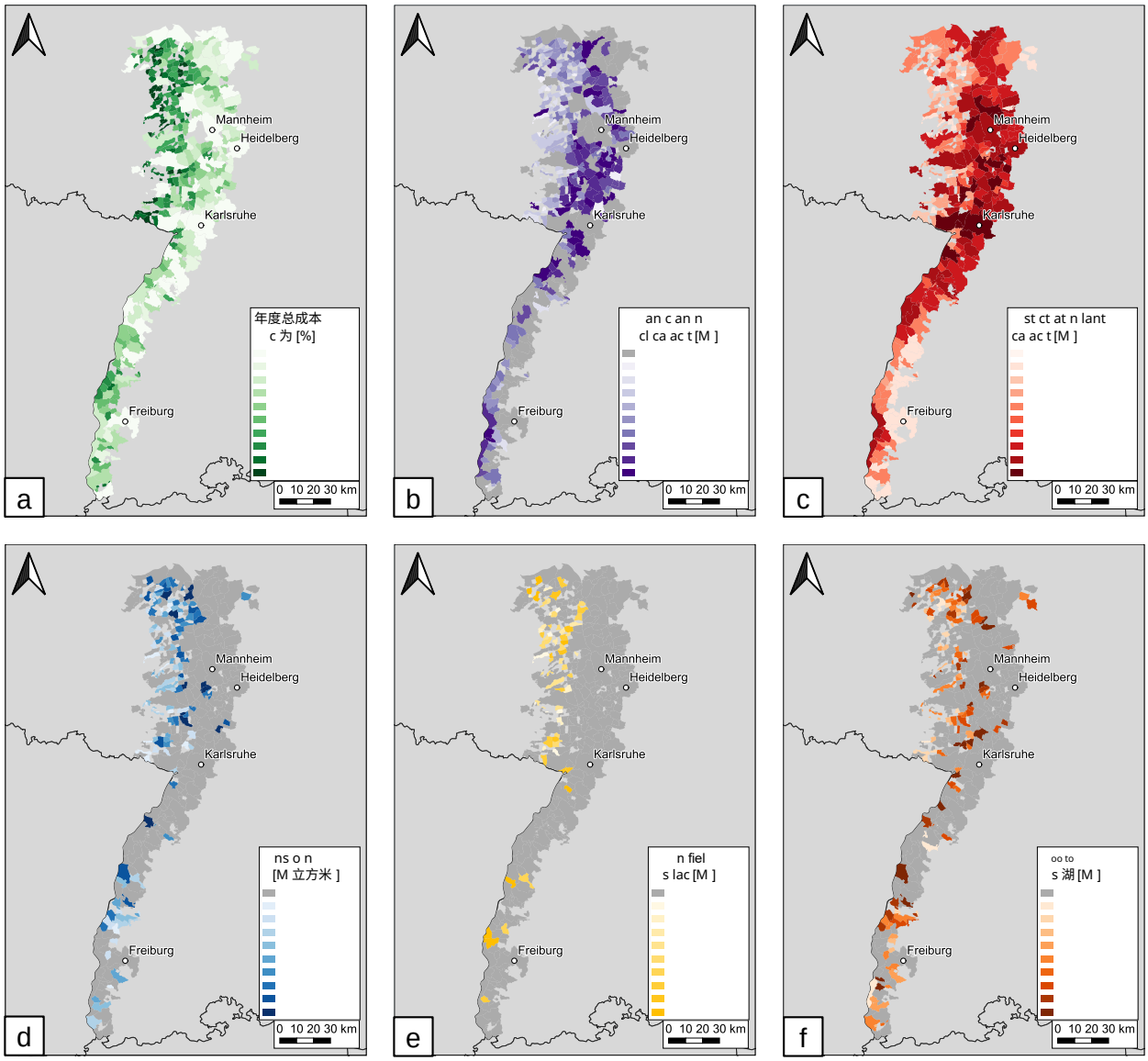


图6：上莱茵地堑330个市镇中，采用直接提锂方案的成本最优能源系统与不采用该方案的能源系统对比。各图分别展示了在可采用直接提锂方案的情况下，相较于不采用该方案的最优能源系统，年度总成本（a）、有机朗肯循环容量（b）、区域供热厂容量（c）、陆上风力涡轮机容量（d）、地面光伏（e）和屋顶光伏（f）受到的影响。

如果上莱茵地堑的每个市镇都安装带锂提取功能的混合型地热发电厂，则可生产约 510 kt 碳酸锂，这一数值完全处于当前估算范围之内。典型的电动汽车锂离子电池组（NMC523 型）含有约 8 kg 锂 [56]，足以每年制造超过 1190 万组电池，远超 2021 年全年新增电动汽车注册量 170 万辆的

欧盟 [57]。然而，鉴于深层地热混合项目未来发展面临诸多重大障碍，包括勘探风险、财务不确定性和公众反对（参见讨论），预计不会有100%的市镇建成地热—锂综合电站。尽管如此，如果上莱茵地堑内仅有10%的市镇部署此类电站，也能带来显著效益（参见图7）。假设电站建于地热潜力最高的地区，则每个市镇的年度总成本可大幅降低，平均降幅约为190%；区域供热厂和ORC电厂的总装机容量则分别约为655 MW_{th} 和74 MW_{el}。这些市镇每年可生产超过50 kt的碳酸锂，足以制造约120万辆电动汽车的电池组。

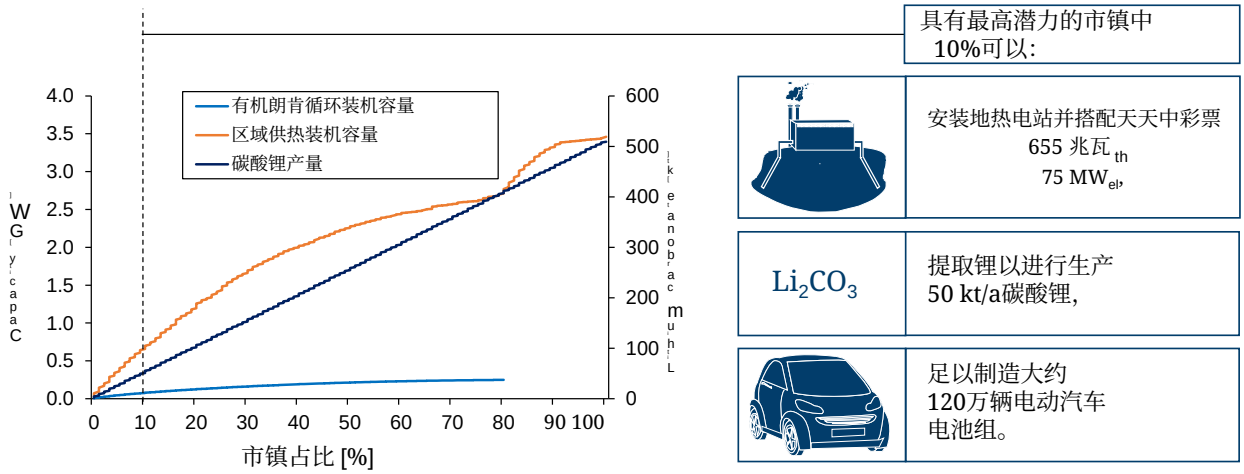


图7：上莱茵地堑内各市镇占比对应的有机朗肯循环电厂和区域供热厂优化装机容量，以及碳酸锂产量；其中，100%的市镇占比对应330个市镇。市镇按最高可实现井口温度（即最高潜力）以及有机朗肯循环电厂装机容量排序。由于其余市镇均未安装有机朗肯循环电厂，后者导致区域供热厂装机容量曲线出现跃升。

4. 讨论与结论

从地热卤水中提取锂的研究可追溯至20世纪80年代初，而直接锂提取技术已在阿根廷 Livent Corporation 的矿场应用了 20 多年 [58]。尽管该技术已证实在盐湖卤水中具备技术可行性，但其应用于地热卤水仍存在不确定性，商业效益也尚待验证。尽管地热提锂潜力巨大，但重要的是要认识到，近期出现了一股

有关地热提锂的炒作热潮，可能夸大了其潜力 [26]。例如，Vulcan Energy 在上莱茵地堑开展的零碳锂项目预计，其运营支出约为索尔顿海地区地热锂项目的一半，尽管其流量和锂浓度都显著较低 [23,49]。对这种锂提取方式可持续性的担忧并非毫无根据，因为这些锂矿床的地质来源和补给速率尚未得到充分了解。此外，社会反对、诱发地震风险以及财务方面的不确定性，都可能成为未来开发的重大障碍。

锂矿床的地质来源和补给速率尚未完全明了；然而，这些因素可能会对结果产生重大影响 [29]。地热卤水富含镁、钾和钠等矿物质，并含有大量总溶解固体，这可能导致地热发电厂结垢，进而造成设备部件劣化，并增加维护和清洁成本 [25,59]。目前尚不清楚增设提锂设施会如何影响结垢和腐蚀。此外，资本密集型的钻井阶段伴随着相当大的风险，我们在模型中通过对勘探成本采用保守假设来考虑这一因素。地下地热资源往往尚未得到充分了解，钻探可能无法找到具备适宜特征、可用于地热开发的热液资源。总体而言，德国被视为地热开发成本较高的国家，例如，其钻井成本高于美国。钻探失败的风险可能造成重大经济损失和延误 [60]。

此外，包括本文在内的深层地热能文献主要关注其应用面临的技术障碍 [61]。然而，社会接受度对进一步建设地热电站至关重要。2006年，瑞士巴塞尔一座地热发电厂被认为引发了一场地震，震级达到里氏震级3.4级。这一事件成为公众对德国地热能利用看法的转折点，并促使一场强大的反地热抗议运动兴起 [62]。此后，德国一些城镇发生的地面沉降和注入诱发地震震级最高达2.6级，这些事件加深了人们对地热能利用的担忧 [62,63]。社会接受度的重要性可从这一例子中看出。

上莱茵地堑中现已废弃的布吕尔地热场，其规划中的地热发电厂因缺乏公众接受度而停建，尽管钻探成功并达到较高的流量 [64]。除了提高社会接受度的策略，包括预防和尽量减少不良影响、在发生损害时补偿当地社区、为当地社区创造利益，以及加强社区参与之外 [65], ，联合提锂也可能因其“绿色锂”概念产生积极影响。近期，它获得了大量正面媒体报道，也为地热发电厂运营商提供了一个吸引公众关注的话题。

如果由于上述某一原因，地热—锂技术的结合未能实现商业成功，那么锂采购的需求及其环境影响可能会进一步增加。目前的锂供应不足以满足预计到2050年为满足欧盟需求而增长60倍的锂需求，因此，对来自中国、澳大利亚和智利等国家的锂进口依赖可能会增加，进而影响能源供应安全以及向碳中和能源系统的转型。此外，传统锂提取所带来的环境和气候影响可能会加剧，而由于供应高度集中，锂市场可能变得日益波动 [3]。如果锂市场价格也继续上涨，这可能促使新的锂资源得到开发，尤其是澳大利亚的高碳密集型硬岩矿床，其碳足迹约为每千克碳酸锂当量15.8千克$CO_{2,eq}$ 。相比之下，南美洲盐水矿床的估算碳足迹为0.3千克$CO_{2,eq}$ [67]。进一步研究发现，卤水提取的碳足迹为3.2千克$CO_{2,eq}$ ，预计这一数值将在2100 [68]年增至3.3千克$CO_{2,eq}$ 。锂的预计寿命终止回收率不足1%，使这些影响进一步加剧 [69]。假设与传统硬岩采购方法相比，碳减排潜力为15.8千克$CO_{2,eq}$ ，那么在上莱茵地堑建设约30座此类地热—锂联合电厂，每年可实现800千吨CO_2 的减排。因此，地热—锂联合项目可能是实现锂供应链脱碳的最佳机会之一；如果将所产生的电力/热能的抵消量出售给电网，并取代燃煤发电，这些项目甚至可能实现净负碳排放 [64]。

鉴于众多正在开展的试点项目证明了从地热卤水中进行直接锂提取的潜力，以及近年来该技术的快速发展，商业成功的假设可能更加可靠。德国的技术潜力总量为4155 TWh_{el}/a，深层地热能可在实现气候目标方面发挥关键作用 [70]。这些地热电站能够减少能源部门的CO_2 排放，并提供急需的、不受天气影响且土地利用强度低的可再生热能和电力基荷供应 [70]。鉴于能源危机以及希望逐步停止进口俄罗斯天然气的愿望，基荷供热具有重要意义 [71]。将锂提取与地热能利用相结合，还可以增加并实现锂供应多元化，减少锂提取带来的环境和气候影响，并通过推动电动汽车电池和用于电网级储能的锂离子电池等低碳技术的发展，助力能源转型。混合地热电厂还可通过创造稳定就业岗位以及在德国建立新的国内锂产业，带来显著的经济效益；德国在上莱茵地堑拥有丰富的锂资源 [5,29]。这一锂资源潜力并不局限于德国：美国、法国、英国和意大利也已发现大量含锂地热卤水矿床 [26,29] ，这表明在未来的转型战略中，利用地热—锂联合电厂至关重要。

数据与代码可用性。所使用的 ETHOS.FINE 框架可在 GitHub 上公开获取（https://github.com/FZJ-IEK3-VSA/FINE）。用于帕累托最优时间序列聚合的 TSAM 工具也可在 GitHub 上获取（https://github.com/FZJ-IEK3-VSA/tsam）。优化中使用的可再生能源潜力数据已存储于 Zenodo（https://zenodo.org/record/6414018#.Y4m6bHbMI2w）。关于德国市镇可实现水热温度的数据集已与一篇数据论文一同发表于期刊《Scientific Data》（https://www.nature.com/articles/s41597-019-0233-0）。

致谢。本研究得到了德国联邦经济事务与气候行动部（BMWK，3EE5031D）和亥姆霍兹联合会的支持，属于“能源系统设计”计划的一部分。由于这一主题的已发表文献匮乏，本研究期间我们咨询了许多专家。我们谨向弗赖堡大学地质系的 Ingrid Stober 教授、Thomas Kölbel 博士

以及巴登-符腾堡能源公司（EnBW）和 UnLimited 项目的 Elif Kaymakci、法国地质调查局（BRGM）的 Bernard Sanjuan 博士、联邦地球科学与自然资源研究所（BGR）的 André Stechern 博士，以及美国地质调查局（USGS）的矿产商品专家 Brian Jaskula 致以谢意，感谢他们提供的建议。

CRediT 声明。概念构思：J.W.；数据整理：G.V., J.W.；正式分析：G.V., J.W.；经费获取：D.S.；调查研究：G.V., J.W.；方法论：G.V., S.R., J.B., J.W.；软件（FINE 优化模型）：S.R.；监督：D.S.；验证：G.V., J.W.；可视化：G.V., J.W.；撰写——初稿：J.W., G.V.；撰写——审阅与编辑：S.R., J.B., N.P., J.L., D.S., G.V. 和 J.W.

参考文献

[1] Tabelin CB、Dallas J、Casanova S、Pelech T、Bournival G、Saydam S 等。迈向低碳社会：锂资源可用性、采矿、提取与回收领域的挑战和创新，以及未来展望综述。《矿物工程》2021；163：106743。

[2] Desaulty A-M、Monfort Climent D、Lefebvre G、Cristiano-Tassi A、Peralta D、Perret S 等。利用锂同位素追踪锂离子电池中锂的来源。《自然通讯》2022；13(1)：4172。

[3] Hund K、La Porta D、Fabregas TP、Laing T、Drexhage J。《气候行动所需矿产：清洁能源转型的矿产强度》。（[年19, 2022]月）；获取地址：https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf。

[4] 联合国贸易和发展会议。《商品概览：特别版》战略电池原材料问题。纽约：联合国；2020年。

[5] 美国地质调查局。《2022年矿产商品摘要》。[3月27, 2023]；可获取来源：http://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2022.

[6] IEA。《关键矿产在清洁能源转型中的作用》[7月19, 2022]；可查阅来源：https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions.[7] Penniston-Dorland S. 让白色黄金保持绿色。《自然·能源》2022;7(10):910–1.

[8] 《C. Early：绿色锂的新“淘金热”》[5月08, 2021]；可获取自：https://www.bbc.com/future/article/20201124-how-geothermal-锂-could-revolutionise- green-energy.

[9] Eramet集团。EuGeLi项目：为未来的电动汽车电池提取欧洲锂。[7月19, 2022]；来源：https://www.eramet.com/en/activities/innovate- design/eugeli-project.

[10] 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所。BrineMine项目：利用地热资源提取能源、原材料和淡水。[7月19, 2022]；可访问：https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/news/2021/brinemine-project-looks-at-geothermal-resources-for-extraction-of-energy-raw-materials-and-fresh-water.html。

[11] Brigham K.（K·布里格姆）。如果新型提取技术奏效，索尔顿海有望生产出世界上最绿色环保的锂。[7月19, 2022]；来源：https://www.cnbc.com/2022/05/04/the-salton-sea-could-produce-the-worlds-greenest-lithium.html。

[12] Weinand JM、McKenna R、Kleinebrahm M、Mainzer K。评估……的贡献离网市镇地热电站的热电联产。Applied Energy 2019;255:113824.

[13] Agemar T、Weber J、Schulz R。德国的深层地热能生产。《能源》2014；7(7)：4397–416。

[14] Victoria M、Haegel N、Peters IM、Sinton R、Jäger-Waldau A、del Cañizo C 等。太阳能光伏已准备好为可持续未来提供动力。《焦耳》2021；5(5)：1041–56。

[15] Wiser R、Jenni K、Seel J、Baker E、Hand M、Lantz E 等。关于未来风能成本的专家征询调查。《自然·能源》2016；1(10)。

[16] Wiser R、Rand J、Seel J、Beiter P、Baker E、Lantz E 等。专家征询调查预测到2050年，风能成本下降37%至49%。《自然·能源》2021;6(5):555–65.

[17] Weinand JM, McKenna R, Kleinebrahm M, Scheller F, Fichtner W. 公众接受度对分布式能源系统中成本效率和环境可持续性的影响。Patterns（纽约，纽约州）2021;2(7):100301.

[18] 美国地质调查局。矿产商品摘要。[5月08, 2021]；获取地址：htt ps://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/mcs/mcs2016.pdf。

[19] 美国地质调查局。矿产商品摘要。[5月08, 2021]；获取地址：https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf。

[20] Weinand JM、Kleinebrahm M、McKenna R、Mainzer K、Fichtner W。开发一种基于深层地热能的区域供热网络设计组合优化方法。Applied Energy 2019;251:113367。

[21] Molar-Cruz A、Keim MF、Schifflechner C、Loewer M、Zosseder K、Dre ws M 等。采用长距离热输送的大型深层地热区域供热系统的技术经济优化。Energy Conversion and Management 2022;267:115906。

[22] Weinand JM、Ried S、Kleinebrahm M、McKenna R、Fichtner W。识别具有 100% 可再生能源供应的潜在离网市镇，以用于未来电力电网设计。《IEEE电力系统学报》。2022；37(4)：3321–30。

[23] Warren I. 从地热卤水中提取锂的技术经济分析；2021年。

[24] Ventura S, Bhamidi S, Hornbostel M, Nagar A. 从地热卤水中选择性回收锂。[7月 19, 2022]；可从以下网址获取：https://www.energy.ca.gov/publications/2020/selective-recovery-lithium-geothermal-

brines#:~:text=预计从地热卤水中回收锂将有助于在美国创造就业岗位。

[25] Stringfellow WT, Dobson PF. 地热卤水中锂的回收技术。《能源》2021;14(20):6805.

[26] Toba A-L, Nguyen RT, Cole C, Neupane G, Paranthaman MP. 美国地热资源中的锂及其提取可行性。《资源、保护与回收》2021;169:105514.

[27] Stober I. 德国西南部磨拉石盆地深层碳酸盐岩含水层的水化学性质。《地热能源》2014;2(1).

[28] Sanjuan B, Millot R, Innocent C, Dezayes C, Scheiber J, Brach M. 上莱茵地堑花岗岩基底地热卤水的主要地球化学特征，以及对温度和循环过程的约束。《化学地质学》2016;428:27–47.

[29] Sanjuan B, Gourcerol B, Millot R, Rettenmaier D, Jeandel E, Rombaut A. 欧洲富锂地热卤水：地球化学特征的最新进展及其对潜在锂资源的影响。《地热学》2022;101:102385.

[30] Regenspurg S、Feldbusch E、Norden B、Tichomirowa M。《地热二叠纪/石炭纪储层中的流体-岩石相互作用（北德盆地）》。Applied Geochemistry 2016;69:12–27。

[31] Regenspurg S、Feldbusch E、Byrne J、Deon F、Driba DL、Henninges J 等。二叠纪 Rotliegend 储层地热流体开采过程中的矿物沉淀。《Geothermics》2015；54：122–135。

[32] Lüders V、Plessen B、Romer RL、Weise SM、Banks DA、Hoth P 等。北德盆地罗特利根阶与上石炭统地层水的化学组成和同位素组成。《化学地质学》2010；276(3-4)：198–208。

[33] Huang T-Y、Pérez-Cardona JR、Zhao F、Sutherland JW、Parantha man MP. 从地热卤水中回收锂的生命周期评估与技术经济评估。《ACS Sustainable Chem. Eng.》2021;9(19):6551–60。

[34] Liang Y、Su J、Xi B、Yu Y、Ji D、Sun Y 等. 锂离子电池温室气体排放的生命周期评估。《Resources, Conservation and Recycling》2017;117:285–93。

[35] Dugamin EJM、Richard A、Cathelineau M、Boiron M-C、Despinois F、Brisset A. 沉积盆地地下水作为潜在锂资源：全球前瞻性研究。《Scientific Reports》2021;11(1):21091。

[36] Kloppmann W、Négrel P、Casanova J、Klinge H、Schelkes K、Guerrot C. 二叠纪盐丘附近（德国北部盆地）由岩盐溶解形成的卤水。来自硼、锶、氧和氢同位素的证据。《Geochimica et Cosmochimica Acta》2001;65(22):4087–101。

[37] Welder L、Ryberg D、Kotzur L、Grube T、Robinius M、Stolten D。德国面向电转氢应用的未来能源系统时空优化。《能源》2018；158：1130–49。

[38] Hoffmann M、Kotzur L、Stolten D。能源系统模型的帕累托最优时间聚合。Applied Energy 2022；315：119029。

[39] Risch S、Maier R、Du J、Pflugradt N、Stenzel P、Kotzur L 等。德国可再生能源的潜力及土地利用数据集的影响。《能源》2022；15(15)：5536。

[40] Stolten D、Markewitz P、Schöb T、Kullmann F、Risch S、Groß T 等。2045年实现温室气体中和能源供应的策略。[2月18, 2023]；参见：https://www.fz-juelich.de/en/iek/iek-3/projects/ksg2045-study-for-germany。

[41] Agemar T、Schellschmidt R、Schulz R。德国地下温度分布。《地热学》2012;44:65–77。

[42] Sanjuan B、Négrel G、Le Lous M、Poulmarch E、Gal F、Damy P-C。法国阿尔萨斯温登海姆深层地热卤水的主要地球化学特征及其对温度和流体循环的约束。载于：世界地热大会论文集2020+1；2021年。

[43] Sanjuan B、Scheiber J、Gal F、Touzelet S、Genter A、Villadangos G。井间化学法国阿尔萨斯里特斯霍芬地热场的示踪剂测试。载于：欧洲地热大会；2016年。

[44] Bauer M、Freeden W、Jacobi H、Neu T（编）。《深层地热手册》。柏林，海德堡：Springer Berlin Heidelberg；2014年。

[45] Penisa XN、Castro MT、Pascasio JDA、Esparcia EA、Schmidt O、Ocon JD。预测采用多因素学习曲线模型预测锂离子NMC电池组的价格。《能源》2020年；13(20)：5276。

[46] Sun X、Ouyang M、Hao H。锂价飙升不会阻碍电动汽车热潮。《焦耳》2022；6(8)：1738–42。

[47] Agemar T、Alten J-A、Ganz B、Kuder J、Kühne K、Schumacher S 等。《德国地热信息系统》——GeotIS。zdgg 2014；165(2)：129–44。

[48] Bosia C、Mouchot J、Ravier G、Seibt A、Jähnichen S、Degering D 等。增强型地热系统（EGS）地热电厂运行过程中卤水地球化学组成的演变。载于：《第46届地热储层工程研讨会论文集》；2021年。

[49] Vulcan Energy Resources。Vulcan Energy Resources 公司介绍。[11月03, 2022]；获取地址：https://v-er.eu/wp-content/uploads/2022/04/Apr-Corp-Preso.pdf。

[50] Goldberg V、Kluge T、Nitschke F。德国地热系统锂提取的挑战与机遇——第1部分：现有提取技术的文献综述。《地下水——水文地质学专业分会期刊》2022；27(4)：239–59。

[51] Weinand JM、McKenna R、Mainzer K。用于市级能源系统分析的空间高分辨率社会能源数据。《Scientific Data》2019；6(1)：243。

[52] 标普全球商品洞察。碳酸锂商品价格评估。[12月05, 2022]；来源：https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/our-methodology/price-assessments/metals/lithium-carbonate.

[53] Hoffmann C、van Hoey M、Zeumer B。钢铁脱碳挑战。[12月13日，2022]；来源：https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel.

[54] 路透社。Vulcan Energy 将锂产量目标推迟一年。[2月10, 2023]；来源：https://www.reuters.com/business/energy/vulcan-energy-delays-lithium-output-target-by-year-2022-12-14/。

[55] Heptonstall PJ、Gross RJK。《将可变可再生能源并入电力电网的成本与影响：系统性综述》。《自然·能源》2021；6(1)：72–83。

[56] Castelvecchi D. 电动汽车与电池：世界将如何生产足够的电动汽车和电池？《自然》2021;596(7872):336–9.

[57] EEA. 欧洲电动汽车新注册量。[February 07, 2023]; 获取地址：https://www.eea.europa.eu/ims/new-registrations-of-electric-vehicles.

[58] Grant A. 从卡塔马卡到青海：商业规模的直接锂提取运营。[November 03, 2022]; 获取地址：h
ttps://static1.squarespace.co
m/static/5c9aa323c46f6d499a2ac1c5/t/5ff39e61eebd1e37a68b a2ac/1609801318490/From+Catamarca+to+Qinghai+-+The+Commercial+Scale+DLE+Operations.pdf.

[59] Mouchot J, Genter A, Cuenot N, Schreiber J, Seibel O, Bosia C 等。法国阿尔萨斯增强型地热系统（EGS）地热电厂投运首年：结垢问题。载于：第43届地热储层工程研讨会论文集；2018。

[60] Goodman D、Mirick P、Wilson K。《索尔顿海电力开发：准入的非技术性障碍——分析与观点》。[11月17, 2022]；可从以下网址获取：
htt
ps://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-32717.pdf。

[61] Krupnik S、Wagner A、Vincent O、Rudek TJ、Wade R、Mišík M 等. 超越技术：欧洲可再生能源领域社会科学与人文科学研究议程. 《能源研究与社会科学》2022;89:102536.

[62] Kunze C、Hertel M。《德国备受争议的深层地热能——一场环境抗议运动的兴起》。《能源研究与社会科学》2017；27：174–80。

[63] Grünthal G. 中欧与地热项目相关的诱发地震、天然构造地震及其他类型的诱发地震事件。Geothermics 2014;52:22–35.

[64] Reinecker J、Hochschild T、Kraml M、Löschan G、Kreuter H。《上莱茵地堑地热勘探的经验与挑战》。[11月 17, 2022]；可见：https://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/307.pdf。

[65] Meller C、Schill E、Bremer J、Kolditz O、Bleicher A、Benighaus C 等。《地热设施的可接受性：GeoLaB 的地质伦理学概念》。Geothermics 2018;73:133–45。

[66] Jiang S、Zhang L、Li F、Hua H、Liu X、Yuan Z 等。《锂生产的环境影响：上游过程生命周期评估中一手数据的重要性》。Journal of environmental management 2020;262:110253。

[67] Notter DA、Gauch M、Widmer R、Wäger P、Stamp A、Zah R 等。《锂离子电池对电动汽车环境影响的贡献》。Environmental science & technology 2010;44(17):6550–6。

[68] Ambrose H, Kendall A. 理解锂的未来：第 2 部分，时空分辨生命周期评估建模。《工业生态学期刊》2020;24(1):90–100。

[69] 联合国环境规划署国际资源委员会。《金属回收率：现状报告》。[11月17, 2022]；可访问：https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/8702。

[70] Jain C, Vogt C, Clauser C. 基于增强型地热系统的德国地热发电最大潜力. Geotherm Energy 2015;3(1).

[71] Spijkerboer RC、Turhan E、Roos A、Billi M、Vargas-Payera S、Opazo J 等。蒸汽耗尽了吗？地热能源的社会科学与人文学科研究议程。《能源研究与社会科学》2022；92：102801。