

秘密宏图第三篇章

地球走向完全可持续能源之路



目录

执行摘要	03
当下能源经济浪费严重	04
完全取代化石燃料的计划	05
1. 用可再生能源驱动现有电网	05
2. 转向电动车	05
3. 在家用、商用和工业领域使用热泵	07
4. 高温储能及可持续制氢	09
5. 在飞机和船舶上应用可持续能源	12
6. 制造可持续能源经济	12
建立全面可持续能源经济模型	13
• 储能技术评估	18
• 发电技术评估	19
模型结果	20
• 满足新电气化需求 —— 美国模型结果	20
• 满足新电气化需求 —— 全球模型结果	21
• 交通运输所需的电池	22
• 车辆	22
• 船舶和飞机	23
• 电气化和交通运输所需电池 —— 全球模型结果	24
投资需求	26
占地面积需求	30
材料需求	31
结论	37
附录	38
• 附录：发电和储能的终端分配	38
• 附录：打造可持续能源经济——能源强度	39

发布于2023年4月5日

致谢

特此感谢推动了可持续能源经济这一主题研究的许多前人文献，感谢国际能源署（IEA）、美国能源信息署（EIA）、美国能源部国家实验室的工作，以及来自许多非Tesla关联企业的顾问的建议。

Tesla撰稿人
Felix Maire
Matthew Fox
Mark Simons
Turner Caldwell
Alex Yoo
Eliah Gilfenbaum
Andrew Ulvestad

Tesla顾问
Drew Baglino
Rohan Ma
Vineet Mehta

执行摘要

2023年3月1日，Tesla发布了《秘密宏图第三篇章》——该篇章希望通过终端电气化、可持续的发电和储能，为实现全球可持续能源经济提供可行方案。本文概述了该方案背后的假设、数据来源和计算过程。欢迎各界人士建言献策。

本文由三大部分组成：

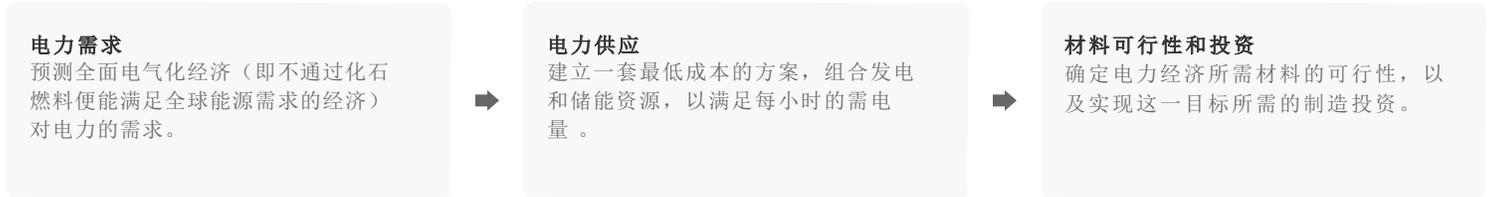


图1：流程概述

本文发现，实现可持续的能源经济在技术上是可行的，且所需的投资和材料开采量均少于非可持续的能源经济。虽然许多先前的研究得出了类似的结论，但本研究旨在对材料强度、制造能力和制造投资这几个方面作进一步思考，以推进世界范围内的能源转型。



图2：秘密宏图第三篇章的资源和投资需求预估

当下能源经济浪费严重

根据国际能源署（IEA）《2019年世界能源平衡》报告，全球一次能源供应量为165PWh/年，化石燃料总供应量为134PWh/年^{1a}。其中，有37%（61PWh）在到达终端消费者之前已被消耗，这之中包括化石燃料开采/精炼过程中的自耗，以及发电过程中的转化损耗。另有27%（44PWh）因为终端（如燃油车和天然气炉）的效率低下而被损耗。总的来说，只有36%（59PWh）的一次能源转化为有用功和有效热量。劳伦斯利弗莫尔国家实验室（Lawrence Livermore National Lab）的分析显示，美国和全球的能源供应方面存在类似的低效问题^{2,3}。

当今能源经济（PWh/年）

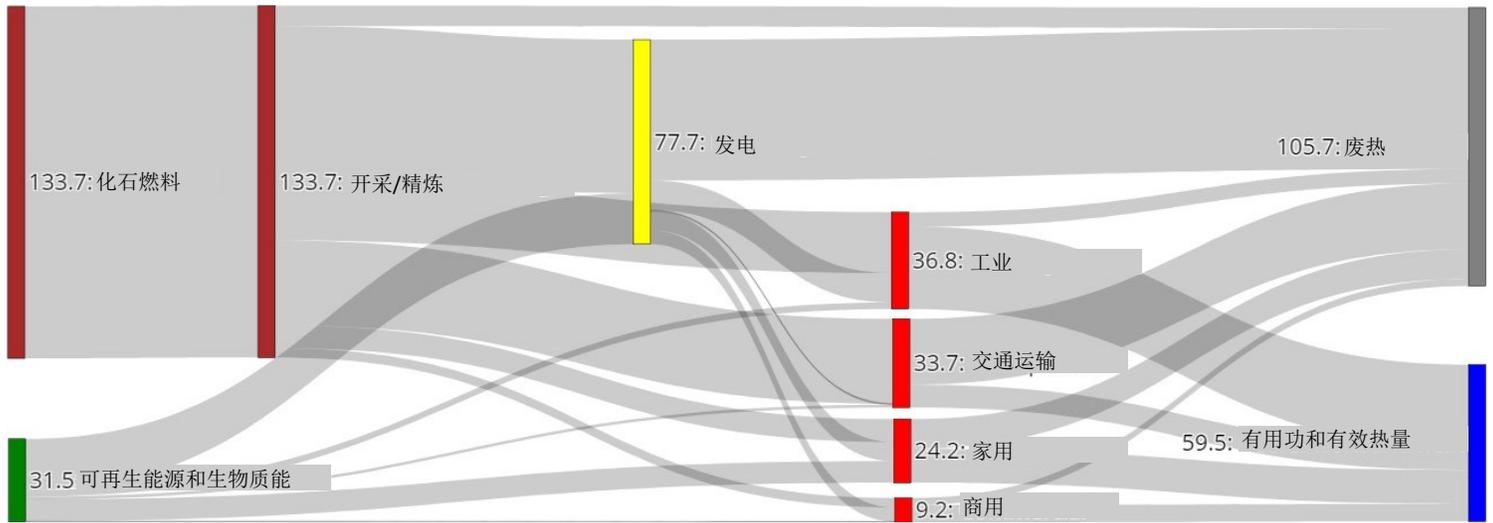


图3：全球能源流（按经济领域划分），来自国际能源署和Tesla的分析

a. 在本研究进行时，国际能源署2021年和2022年的《世界能源平衡》报告尚未完成，而2020年的数据集显示当年的能源消耗较2019年有所下降，这可能与疫情相关，且与能源消耗趋势不一致。
b. 不包括用于非能源目的的某些燃料供应，如塑料制造中使用的化石燃料。

完全取代化石燃料的计划

在能源生产可持续的电气化经济中，与采矿、精炼和燃烧燃料发电相关的大多数上游损耗都可避免，与非电力终端相关的下游损耗也一样可避免。一些工业过程需要更多的能源投入（比如可持续制氢），而一些采矿和精炼活动需要增加（例如与制造电池、太阳能电池板和风力发电机等所需的金属有关的活动）。

以下6个措施展现了实现经济全面电气化、完全消除化石燃料的使用所需采取的行动。这6个措施详细介绍了可持续能源经济的电力需求假设，并据此模拟出了电力需求曲线。

Tesla利用美国能源信息署（EIA）2019-2022年的高保真数据^c，完成了对美国能源经济的建模。根据国际能源署的《能源平衡》报告，Tesla使用美国 and 全球2019年能源消耗标量的6倍比例因子，对结果按一定比例进行了调整，以预测全球经济所需的行动。这个明显简化的计算过程有待未来分析进一步优化，因为全球能源需求在构成上与美国不同，且预计会随着时间的推移而提高。由于能获取到的以小时为单位的高保真数据有限，我们仅对美国进行了分析。

本篇章将陆上/海上风能、太阳能、现有核能和水能视为可持续的发电来源，并且认为现有的生物质能也是可持续的，尽管生物质能可能会随着时间的推移而退出历史舞台。此外，除了合成燃料发电所需的直接空气捕获之外，本篇章并未解决过去一个世纪化石燃料燃烧所排放的二氧化碳的封存问题；未来任何此类技术的实施都可能增加全球能源需求。

01 用可再生能源驱动现有电网

根据美国能源信息署的数据⁴，本文以美国现有每小时的电力需求作为刚性的基准需求进行了建模。考虑到需求、可再生能源可用性、天气和电网输电限制的区域差异，模型中包含了四个美国子区域（得克萨斯、太平洋、中西部、东部）。这种现有的电力需求是基准负荷，必须用可持续发电和储能来满足。

在全球范围内，每年供应给电力部门的一次能源为65PWh，其中化石燃料为46PWh，但由于化石燃料转化为电力的效率低，每年只能产生26PWh的电力^d。如果电网改用可再生能源来供电，则每年只需要26PWh的可持续发电。

02 转向电动车

电动车的能源利用效率约为燃油车的4倍，这归功于电动车更高的传动系统效率、能量回收制动能力以及更优的平台设计。这一比率在乘用车、轻型卡车和8级半挂式卡车上都适用，如表1所示。

车辆种类	燃油车平均效率 ^e	电动车平均效率	效率比
乘用车	24.2 MPG	115 MPGe（292 瓦时/英里） ^e	4.8倍
轻型卡车/货车	17.5 MPG	75 MPGe（450 瓦时/英里） ^f	4.3倍
8级卡车	5.3 MPG（柴油）	22 MPGe（1.7 千瓦时/英里） ^f	4.2倍

表1: 电动车和燃油车的效率对比

c. 用作建模数据的美国小时单位系列数据可在<https://www.eia.gov/opendata/browser/>下载。

d. 每年26 PWh的电力中有3.5 PWh是有效热量，这些热量主要来自热电联产站（即同时生产热能和电力的设施）。

e. 全球Tesla电动车的平均能源效率，包括Model 3、Y、S和X。

f. Tesla基于行业知识的内部估计数。

以Tesla Model 3和丰田卡罗拉作为具体例子说明，丰田卡罗拉的能源效率为34MPG，Model 3的能源效率为131MPGe，[4.7](#)，是卡罗拉的3.9倍。如果考虑到上游损耗（例如开采和精练的能耗），这一比值将更高（见图4）。

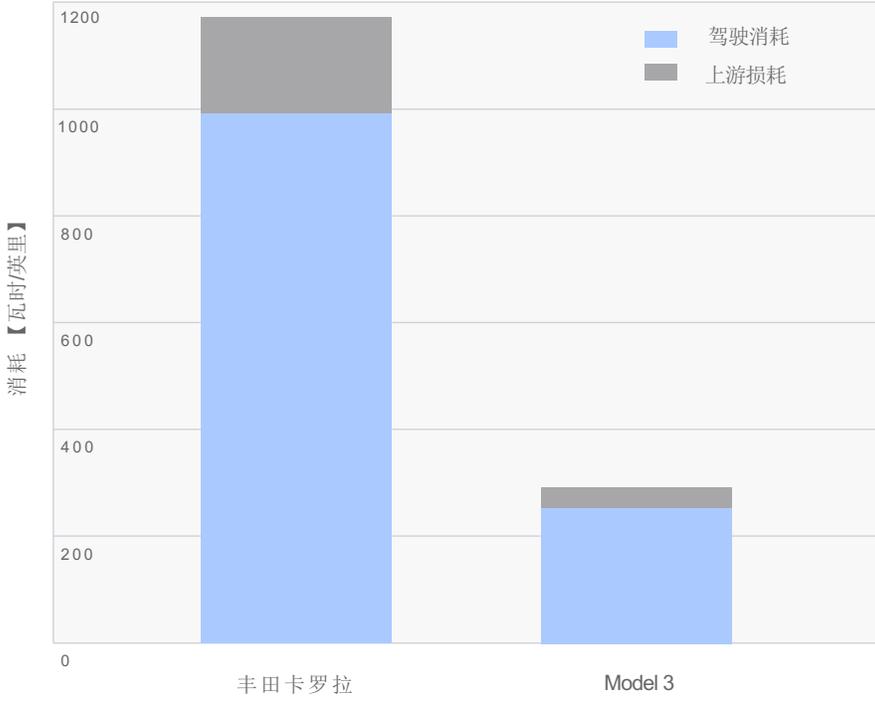


图4：Tesla Model 3和丰田卡罗拉的能耗对比

为了确定电气化交通运输领域的电力需求，Tesla用上文的电动车效率系数（4倍）来按比例推算美国各子区域的历史月度交通运输石油用量⁸（不包括空运和海运）。我们假设，Tesla车辆的每小时充电需求，能代表在交通领域100%电气化的情况下，电动车的充电负荷曲线。这一假设中的充电需求分为刚性的和弹性的——超级充电、商用车辆充电和电量低于50%的车辆充电行为被视为刚性需求；家庭和工作场所的交流充电属于弹性需求。在此基础上，我们以72小时节能为约束条件进行建模，模拟了大多数车主在可再生资源充足时可以灵活充电的事实。平均而言，Tesla车主每1.7天充电一次，将电量从60%充到90%。因此，对于典型的日常续航而言，电动车有足够的续航能力。只要在家庭和工作场所都有充电基础设施，电动车完全可以根据可再生能源的可用性来优化充电行为。

全球交通运输领域的电气化可消除每年28PWh的化石燃料使用量，加之4倍的电动车效率系数，每年还能同时增加约7PWh的电力需求。

03 在家用、商用和工业领域使用热泵

热泵通过中间制冷剂的压缩/膨胀将热量从热源转移到冷源上⁹。只要选用适当的制冷剂，热泵技术就可以应用于住宅和商业建筑的空间供暖、水加热和洗衣烘干机等多种场景，此外还有许多工业用途。

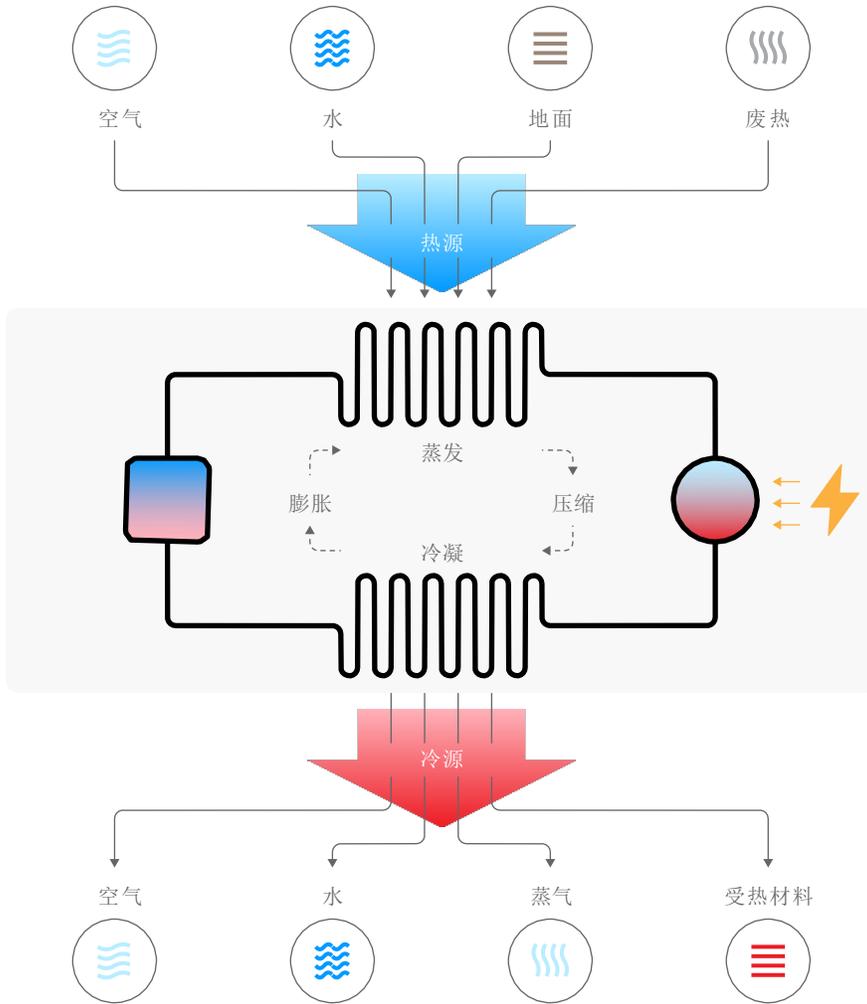


图5：热泵的工作原理¹⁰

空气源热泵是最适合改造现有家庭燃气炉的技术。根据9.5 Btu/Wh的供暖季节性性能系数（HSPF），空气源热泵每单位的能耗可提供2.8单位的热量，这是目前热泵典型的能源效率¹¹。燃气炉通过燃烧天然气来产生热量，其年燃料利用率（AFUE）约为90%¹²。因此，热泵比燃气炉的能耗低3倍（2.8/0.9）。

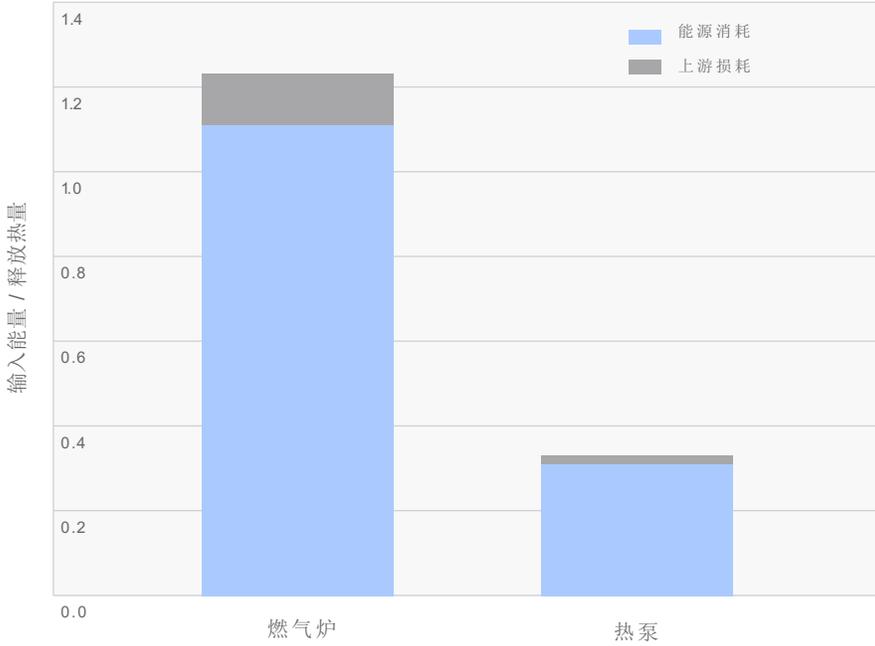


图6：热泵与燃气炉的空间供热效率对比

家用和商用

美国能源信息署提供了美国各子区域家用和商用的月度天然气使用量的历史数据⁸。由于热泵效率为燃气炉的3倍，如果将所有的燃气设备电气化，可大幅减少能源需求。Tesla利用基准电力需求的每小时负荷系数来估计热泵的每小时电力需求变化，并将供暖需求与家庭主动采暖或制冷的时间变化做了有效归因。在夏季，家用/商用的电力需求在午后达到峰值，此时制冷负荷最高；在冬季，用/商业的供热需求遵循著名的“鸭子曲线”，在早晨和晚上达到峰值。

用热泵来实现全球家用和商用电器的电气化，每年可以消除18PWh的化石燃料使用量，同时增加每年6PWh的电力需求。

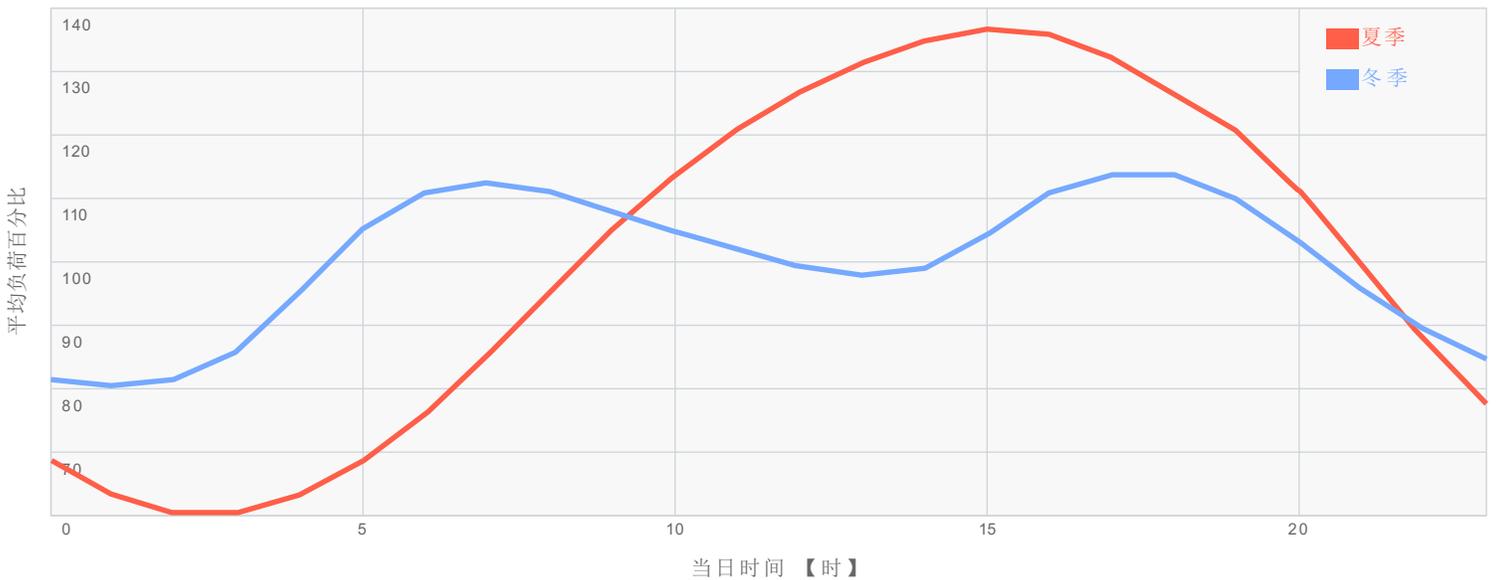


图7：家用及商用的供暖及供冷负荷系数与当日时间的关系

工业领域

环境温度达到200°C左右的工业生产过程，比如食品、造纸、纺织和木材工业，也可以从使用热泵带来的效率增益中受益¹³。不过需要注意的是，热泵效率会随着温差的增加而降低。热泵集成是有细微差别的，确切的效率增益在很大程度上还是取决于系统所利用的热源的温度（温升是决定热泵效率的关键因素），因此Tesla对可实现的能效比（按温度范围划分）使用了如下的简化假设：

温度/设备	能效比（COP）
0-60°C/热泵	4.0
60-100°C/热泵	3.0
100-200°C/热泵	1.5

表2：假设的热泵效率增益，按温度划分

根据国际能源署统计的工业用热的温度构成，以及表2中假设的不同温度的热泵效率，加权得到本模型中的工业热泵效率系数为2.2^{14 15 16}。

美国能源信息署提供了美国各子区域的工业部门对化石燃料的历史月度使用量⁸。Tesla假定，除去一些产品中的嵌入式化石燃料（橡胶、润滑油等），工业化石燃料已全部用于工业生产加热过程。根据国际能源署的数据，有45%的工业生产过程环境温度低于200°C。如果采用热泵发电，则其所需能量比用化石燃料发电少2.2倍。¹⁶。在本模型中，Tesla将工业热泵增加的电力需求建模为刚性的、固定的每小时需求。

使用热泵来实现全球范围内低于200°C的工业生产的电气化，每年可以消除12PWh的化石燃料使用量，同时增加每年5PWh的电力需求。

04 高温储能及可持续制氢

高温储能

需要高温环境（>200°C）的工业生产过程，包括钢铁、化工、化肥和混凝土生产等，占化石燃料使用量剩余的55%，需要单独考虑。

这些工业过程所需的高温可以直接通过电阻加热、电弧炉提供，也可以通过储热系统，在可再生能源过剩时将这种低成本的能量储存起来作为缓冲，在工业过程所需时为其供热。就地储热可能极具价值，它以经济高效的方式加速工业的电气化（例如，直接使用储热介质和辐射加热元件）^{17 18}。

根据温度/应用确定最佳的储热介质



图8：储热概述

为高温生产输送热量的过程

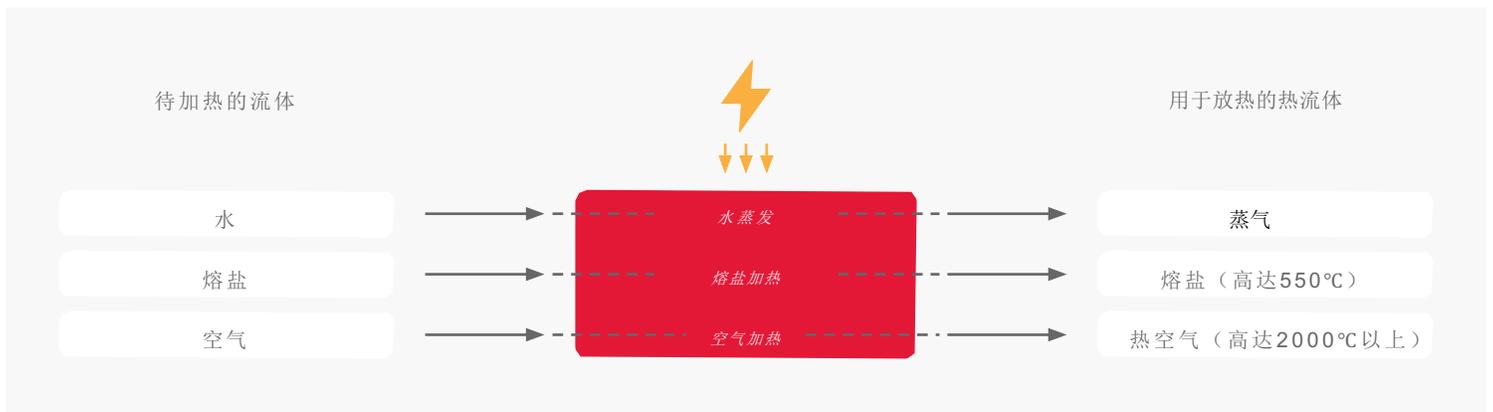


图9A：储热——通过热传递流体向生产过程放热

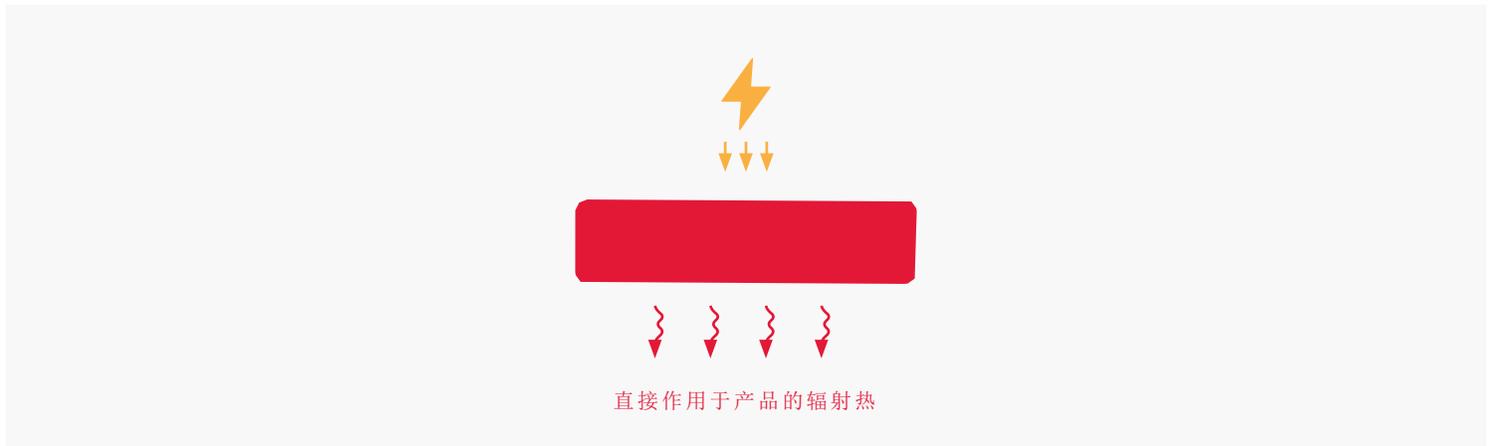


图9B：储热——通过直接辐射热向生产过程放热

电阻加热和电弧炉与高炉加热的效率相近，因此所需的可再生一次能源输入量也相似。Tesla将这些高温生产过程作为刚性且固定的需求进行建模。

本模型将储热系统作为工业领域的高温生产中的能源缓冲器，其循环热效率为95%。在太阳能装机容量较大的地区，储热系统往往在中午充电、夜间放电，以满足全天候的工业用热需求。图9列出了可能的热载体，并提供了可用于高于1500°C的工业生产的几种候选材料。

假设热量传递效率相同，全球范围内用热高于200°C的工业生产实现电气化后，每年可以消除9PWh的化石燃料使用量，同时增加每年9PWh的电力需求。

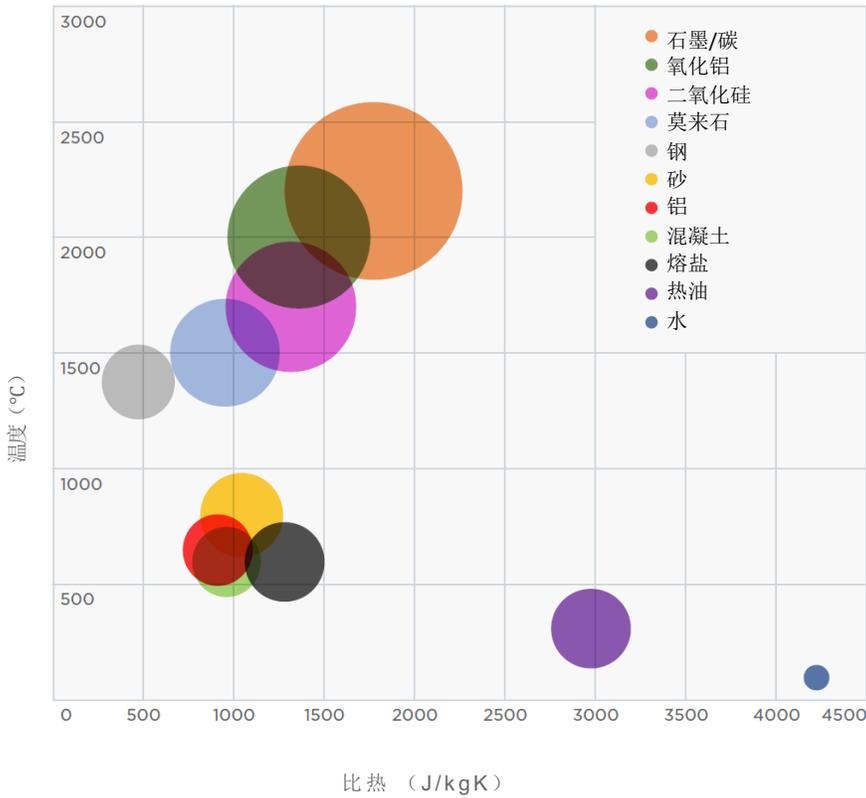


图10：储热——储热介质

注：圆形的半径代表相应温度范围的比热。

可持续制氢用于钢铁冶炼和化肥生产

今天，氢是从煤、石油和天然气中生产的，并用于化石燃料（尤其是柴油）的精炼和各种工业应用（包括钢铁和化肥生产）。

通过电解水（能源强度高，不消耗/产生含碳产品）或者甲烷裂解（能源强度较低，产生的固体碳黑副产品可转化为有用的碳基产品）可以实现可持续制氢^g。

为保守估算可持续制氢的电力需求，假设如下：

- 未来化石燃料的精炼将不再需要氢
- 钢铁生产将转变为直接还原铁工艺，该过程需要氢气的参与。还原铁矿石（假设为 Fe_3O_4 ）所需的氢按照如下还原反应来计算：

用 H_2 来还原

- $Fe_3O_4 + H_2 = 3FeO + H_2O$
- $FeO + H_2 = Fe + H_2O$

- 全球所有氢的生产都来自电解过程

^g 可持续的钢铁生产也可以通过熔融氧化物电解来实现，这需要热量和电，但不需要氢作为还原剂，而且能源强度可能更低，但这超出了本分析的研究范围¹⁹。

完全取代化石燃料的计划

根据这些对工业需求的简化假设得出，全球可持续制氢的需求量为1.5亿吨/年。如果通过电解来满足这一需求，每年需要约7.2PWh的可再生电力^{h, 20, 21}。

Tesla建立了制氢的电力需求模型，模型中将电力需求作为具有年产量限制的弹性负荷，用地下储气设施（如目前的天然气储存）来衡量储氢潜力，并将此作为最大的资源约束条件。今天，我们用于储存天然气的地下储气设施可以改造为储氢设施；模型中，美国储氢需要占用30%左右的现有地下储气设施。请注意，有的储存设施（比如盐穴）在地理上的分布并不平均，会为储氢带来挑战，可能存在更好的储能方案。

全球可持续制氢每年可以消除6PWh的化石燃料能源用量，以及每年2PWh的非能源用量^{i, 24}。化石燃料可以被每年7PWh的额外电力需求所取代。

05 在飞机和船舶上应用可持续能源

通过优化航速和航线，大陆和洲际的海运电气化可以通过在长途航线上使用体积更小的电池、更频繁地停靠充电来实现。根据国际能源署的数据，全球海运每年消耗的电力达到3.2PWh。如果应用预估的1.5倍电气化效率优势，全面电气化后，每年全球海运只会消耗2.1PWh的电力²⁵。

即使保持现在的电池能量密度不变，短途航班也可以通过优化飞机设计和飞行轨迹实现电气化²⁶。长途航班预估占航空出行能源消耗的80%（全球每年消耗850亿加仑的航空燃料），这可用过剩的可再生电力产生合成燃料来供能。这种合成燃料的生产利用了费托合成工艺，使用一氧化碳和氢气的混合体来合成各种液态碳氢化合物。这已被证明是合成航空燃料的可行途径²⁷，每年需要5PWh的额外电力，以及：

- 电解生成的氢气²⁴
- 直接从空气中捕获的二氧化碳^{28, 29}
- 电解二氧化碳而产生的一氧化碳

用于合成燃料的碳和氢也可以从生物质中获取。更高效、更具成本效益的合成燃料生产方法迟早会出现，能量密度更高的电池可以实现长途飞机的电气化，从而降低对合成燃料的需求。

Tesla将合成燃料生产的电力需求建模为有年度能源限制的弹性需求。合成燃料的储存可以通过常规的燃料储存技术来实现（假设储存容量比为1:1）。海运的电力需求被建模为恒定的每小时需求。

全球船舶和飞机的可持续合成燃料和电力供应，每年可以消除7PWh的化石燃料使用量，同时增加每年7PWh的全球电力需求。

06 制造可持续能源经济

建立可持续能源经济所需的发电及储能组合（太阳能电池板、风能发电机和电池）需要更多的电力。这种电力需求被建模为工业领域的增量的、刚性的、固定的每小时需求。更多详情见附录：打造可持续能源经济——能源强度。

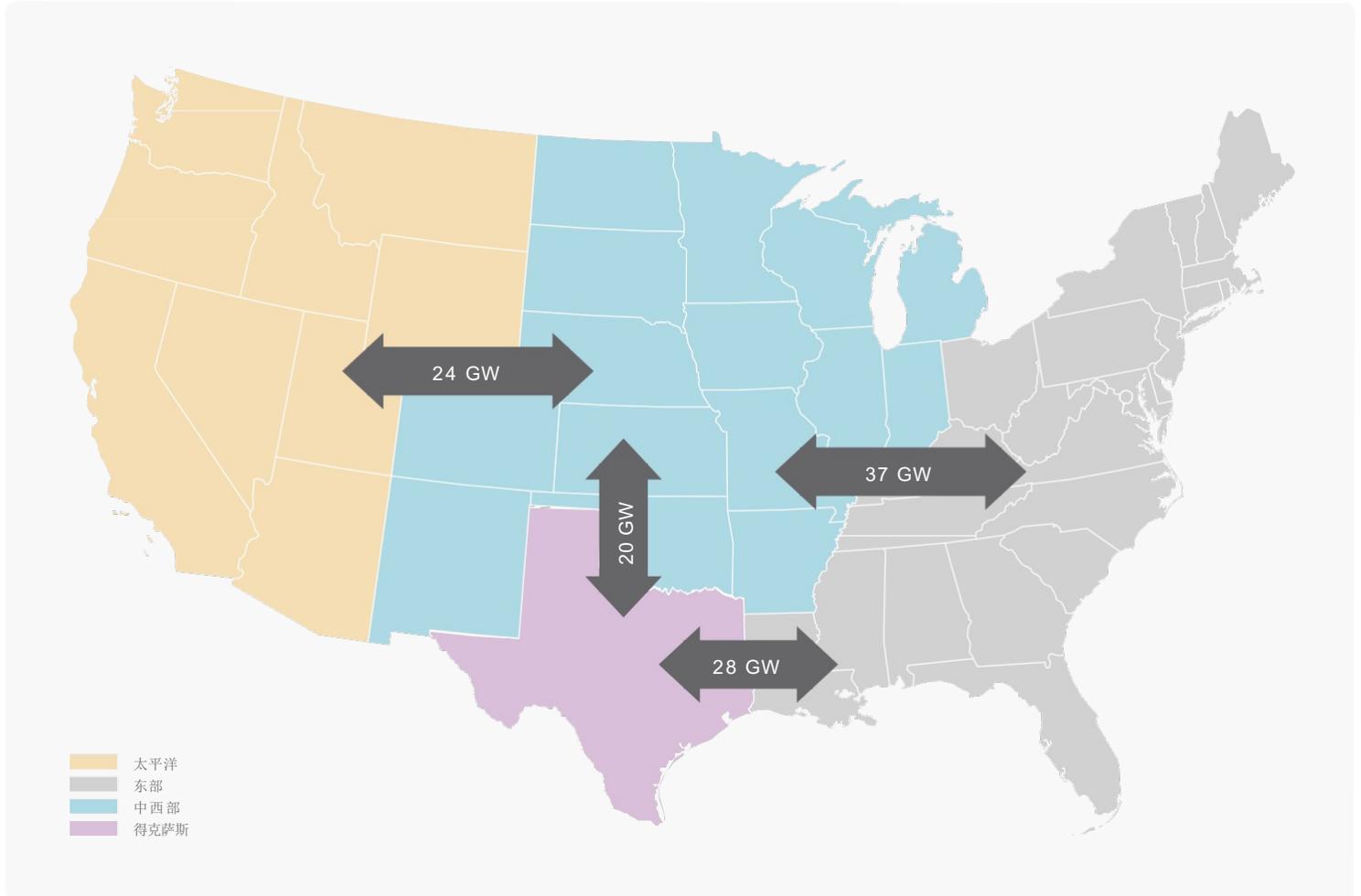
h. 调整了目前对氢的需求，取消了与炼油相关的需求（因为这将不再需要）。假设现在所有用煤和天然气生产的氢都被取代了，在此基础上计算用煤和天然气制氢所需的能量，并将其与电解制氢相比较。

i. 根据国际能源署的数据，85%的天然气非能源消耗用于化肥和甲醇生产。

建立全面可持续的能源经济模型

上文的这6个措施建立了美国的电力需求，我们采取可持续的发电和储能来满足这一需求。为此，Tesla使用每小时成本最优的集成容量扩展和调度模型来确定这个发电和储能的组合方案^j。模型将美国分为四个子区域，对每个子区域按照一定的传输限制条件建立模型，并将模型放在四个气象年（2019-2022年）里运行来捕捉一系列气象条件的影响^k，并根据北美电力可靠性委员会（NERC）的各区域实体（国家电力监管委员会（SERC）³⁰、西部电力协调委员会（WECC）³¹、德州电力可靠性委员会（ERCOT）³²）发布的主要输电路径的现有线路容量评级来估算区域间的输电限制。整个美国的全面电气化经济的能源需求如图11所示。

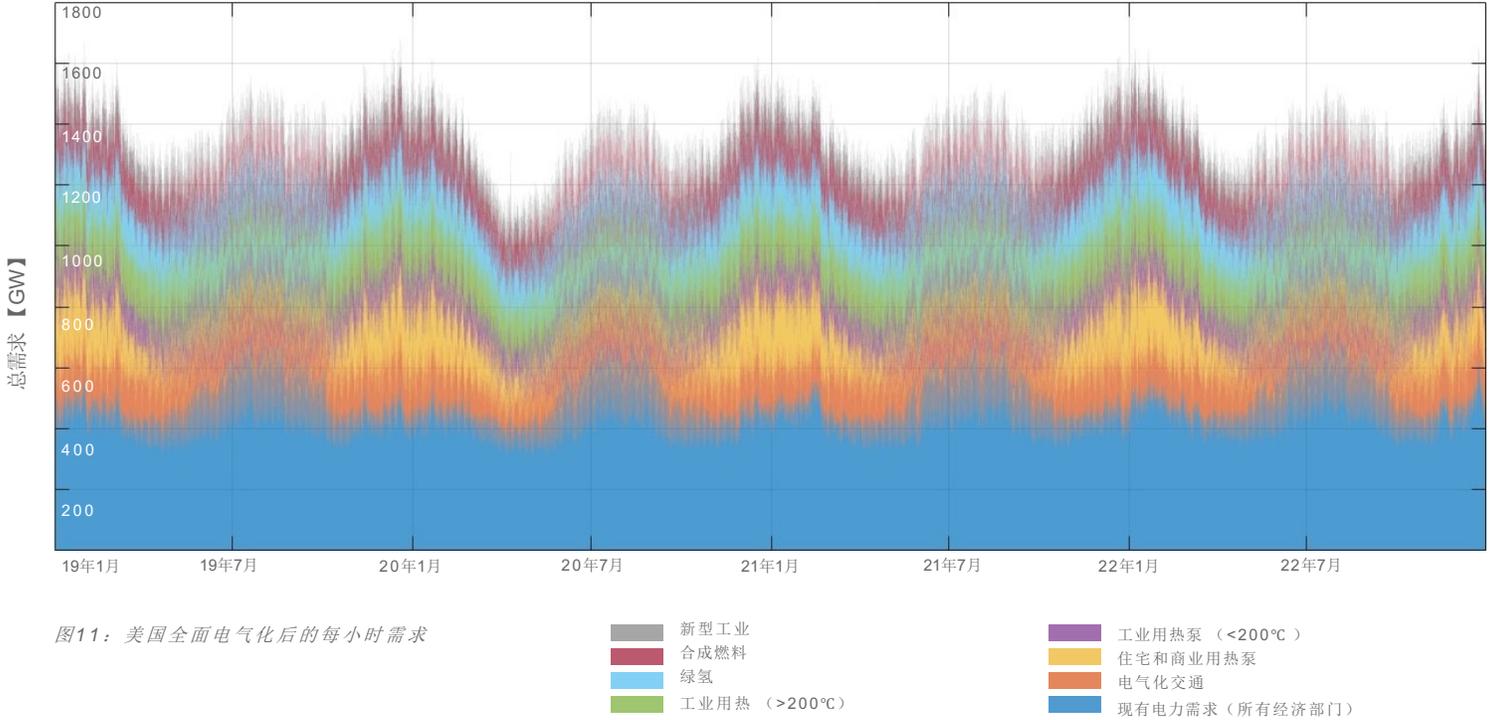
建模区域和电网互连



地图1：美国的建模区域和互连

j. 凸优化模型可以确定最优容量扩展和资源调度，在业界得到了广泛应用。例如，被公用事业单位或系统运营商用于规划其系统（例如，满足预期负荷所需的发电和电网投资），或者用于评估特定的能源政策对能源系统的影响。该模型构建了成本最低的发电和储能组合，以满足所分析的四年期间的每小时需求，并每小时对该组合进行调度以满足需求。该模型将容量扩展和调度决策进一步优化，确保了组合在分析的时间段内是最优的，使储能的价值得到充分体现，并对天气变化的影响进行了建模。其他分析通常将容量扩展和组合调度作为两个独立的步骤进行建模。首先要做出容量扩展决策（例如，在一段时间内，估计需要多少发电和储能才是成本最低的组合），然后对组合进行单独的调度建模（例如，为了保障有足够的运行备用容量来满足需求，每小时应该调度多少发电和储能）。两阶段方法产生了伪最优结果，但在每个阶段可以允许使用更多的计算密集型模型。

k. 在已明确的建模条件之外，该模型必须满足每小时15%的运行储备余量，以确保发电和储能组合适应一系列天气和系统条件。



Tesla对每个区域的风能和太阳能资源进行建模，在模型中应用了各区域各自的每小时容量系数（即每兆瓦装机容量每小时生产多少电）、电网互连成本和模型的最大容量。我们利用美国能源信息署公布的历史风能/太阳能发电量估计了各区域的风能和太阳能的每小时容量系数，从而捕捉到由于区域天气模式而造成的资源潜力差异^{l,m}。根据普林斯顿大学最近的“净零美国”（Net-Zero America）研究，我们对容量系数进行了换算，使其能代表前瞻性趋势³³。整个美国的风能和太阳能的每小时容量系数与时间的关系如图11所示。美国各区域的平均容量系数和需求如表3所示。

l. 鉴于现有的海上风电装机容量有限，美国能源信息署没有报告分析期间的海上风电产量。海上风能发电曲线是用普林斯顿大学的“净零美国”研究估计的海上风电容量系数对历史陆上风能发电曲线进行换算后估算得来的。
 m. 每个区域都用两种陆上风能和两种太阳能资源进行建模，它们具有不同的容量系数、互连成本和最大容量潜力。这就解释了这样一个事实，即最经济的站点通常都是先建造的那批，而后续项目的容量系数通常较低和/或互连成本较高，因为它们可能距离输电需求中心更远，或位于土地成本较高的地方。

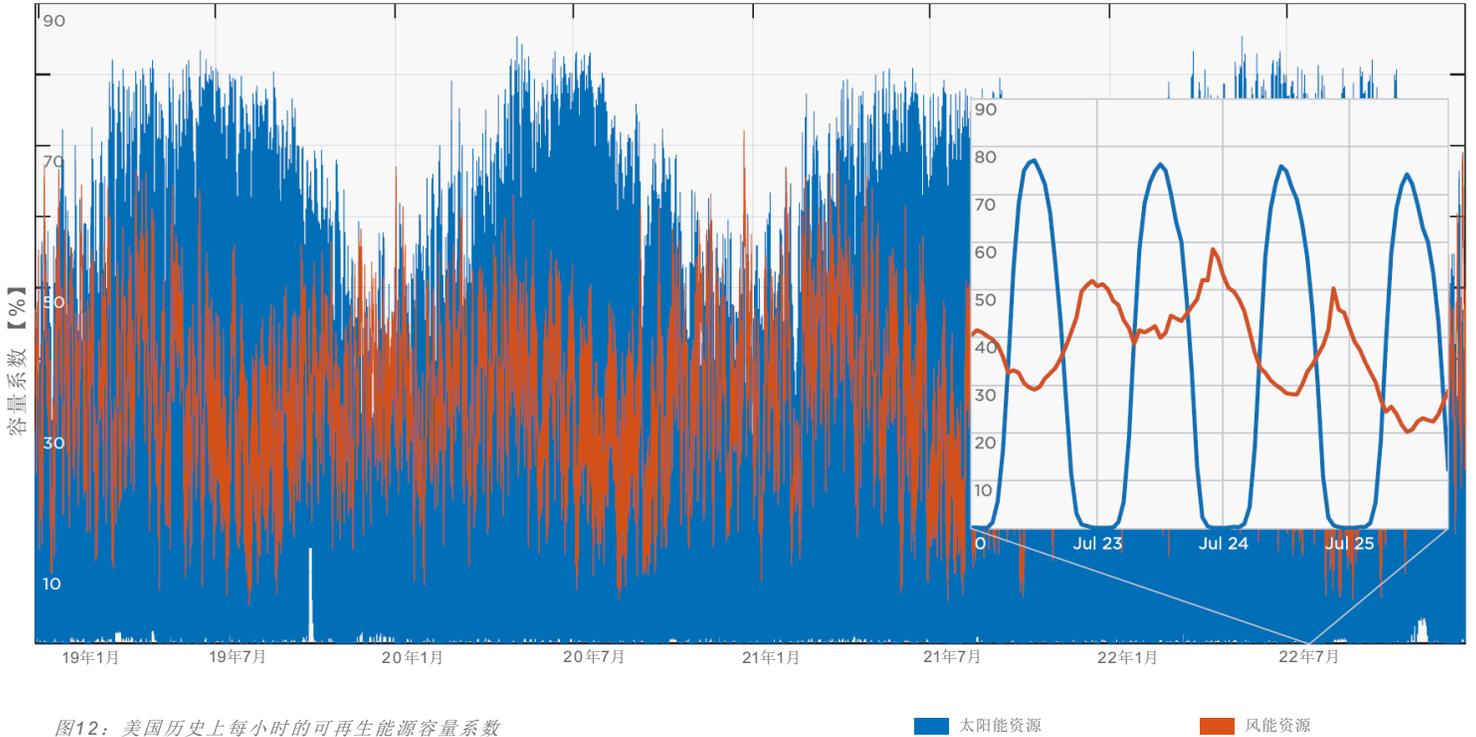


图12：美国历史上每小时的可再生能源容量系数

区域	风能容量系数	太阳能容量系数	需求【PWh/年】
东部	29%	22%	4.6
中西部	40%	27%	3.6
太平洋	36%	27%	1.9
得克萨斯	37%	23%	1.6
全美国	34%	24%	11.6

表3：各区域的风能和太阳能历史平均容量系数，以及全面电气化经济的需求

该模型基于特定资源的成本、性能属性，以及最小化能源平均成本的全球目标，来构建发电和储能组合ⁿ。该模型假设区域间输电容量得到提升^o。

为了保证可靠的全年电力供应，部署过剩的太阳能和风能在经济上是最优的解决方案，但这会导致弃电问题。当（1）太阳能和/或风能发电高于一个区域的电力需求，（2）储能容量已满，（3）没有可用的输电能力将多余的电传输到其他区域时，就会发生弃电问题。在建设过剩的可再生能源发电容量、建设电网储能或扩大输电容量之间，存在经济权衡。这种权衡可能会随着电网储电技术的成熟而发生变化，但在模型的假设场景中，即使最优的发电和储能组合也会导致32%的弃电。

ⁿ 目标函数中考虑的成本：新的发电储能的平准化资本支出（按5%的贴现率计算），运营和维护（O&M）的固定和可变成本。

^o 中西部和东部之间的输电容量为37GW，得克萨斯和东部之间为28GW，太平洋和中西部之间为24GW，得克萨斯和中西部之间为20GW。这些数值相当于模型中区域峰值负荷的3%左右。例如，在我们的模型中，东部和中西部地区的峰值负荷总和为1.2 TW左右，那么中西部和东部之间的输电容量就应该是37GW。但是目前，输电容量远远达不到区域峰值负荷总和的1%（其中，得克萨斯的输电容量最低，输入和输出都是）。输电容量更高，通常意味着可以减少发电储能的建设总量，但是，在建设更多的输电容量以及建设更多的发电加储能之间，存在经济权衡。

建立全面可持续的能源经济模型

我们来看看这个问题的背景。在可再生能源普及率高的市场中，弃电问题早已存在。2020年，苏格兰19%的风能发电被弃电；2022年，加州6%的太阳能发电（加州独立系统运营商（CAISO））被弃电，原因是运行限制，例如火电机组无法降至最低运行水平以下，或者也可能是因为当地输电系统发生阻塞^{34,35}。

可持续能源经济在能源过剩时期提供充足的廉价能源供消费者使用，但这会影响能源的使用方式和时间。

在下面的图12中，我们用秋季的样本来形象地说明每小时调度的情况。图示了各种发电和储能资源在平衡供需方面的作用，同时在太阳能充足的中午，存在集中的经济性弃电情况。

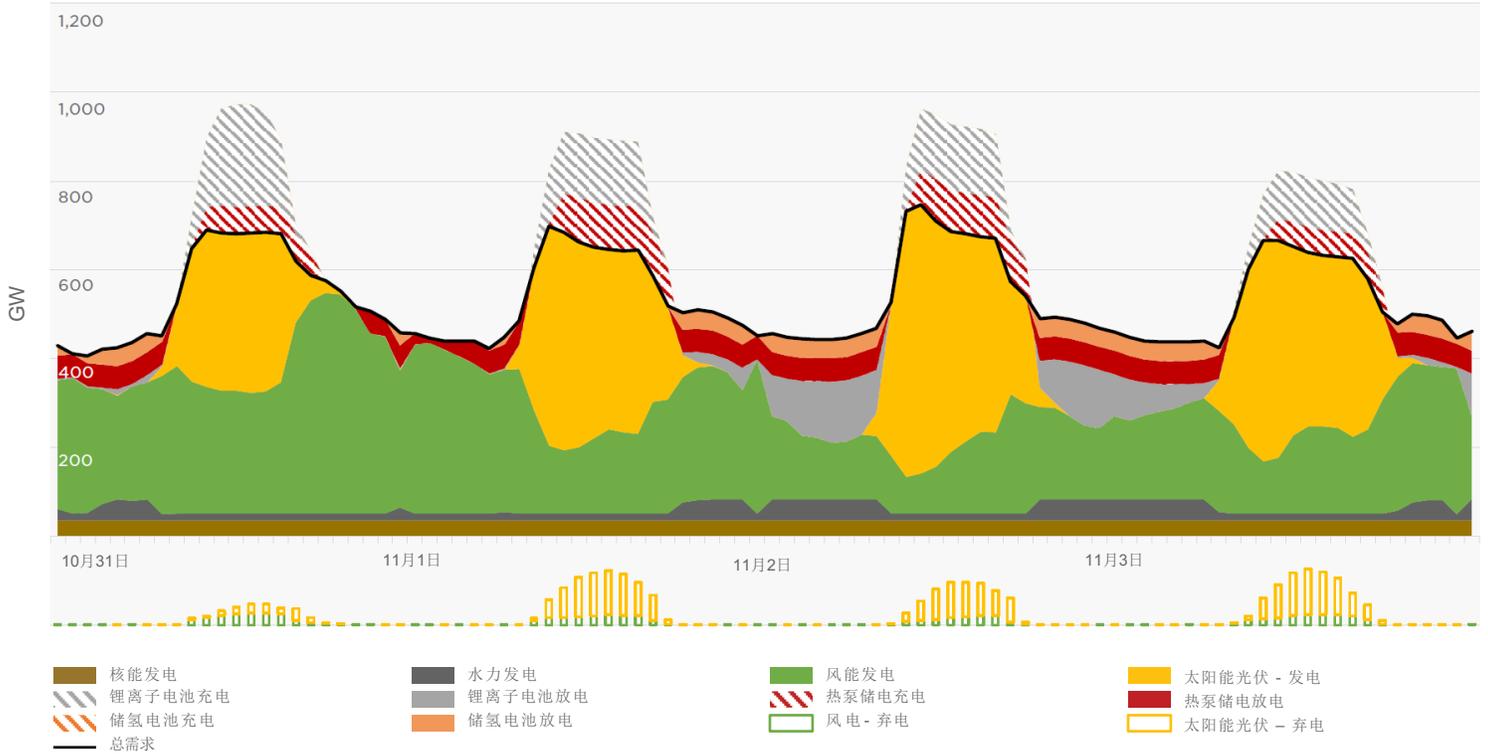


图13：2019年美国东部区域每小时发电量（不包括进出口）

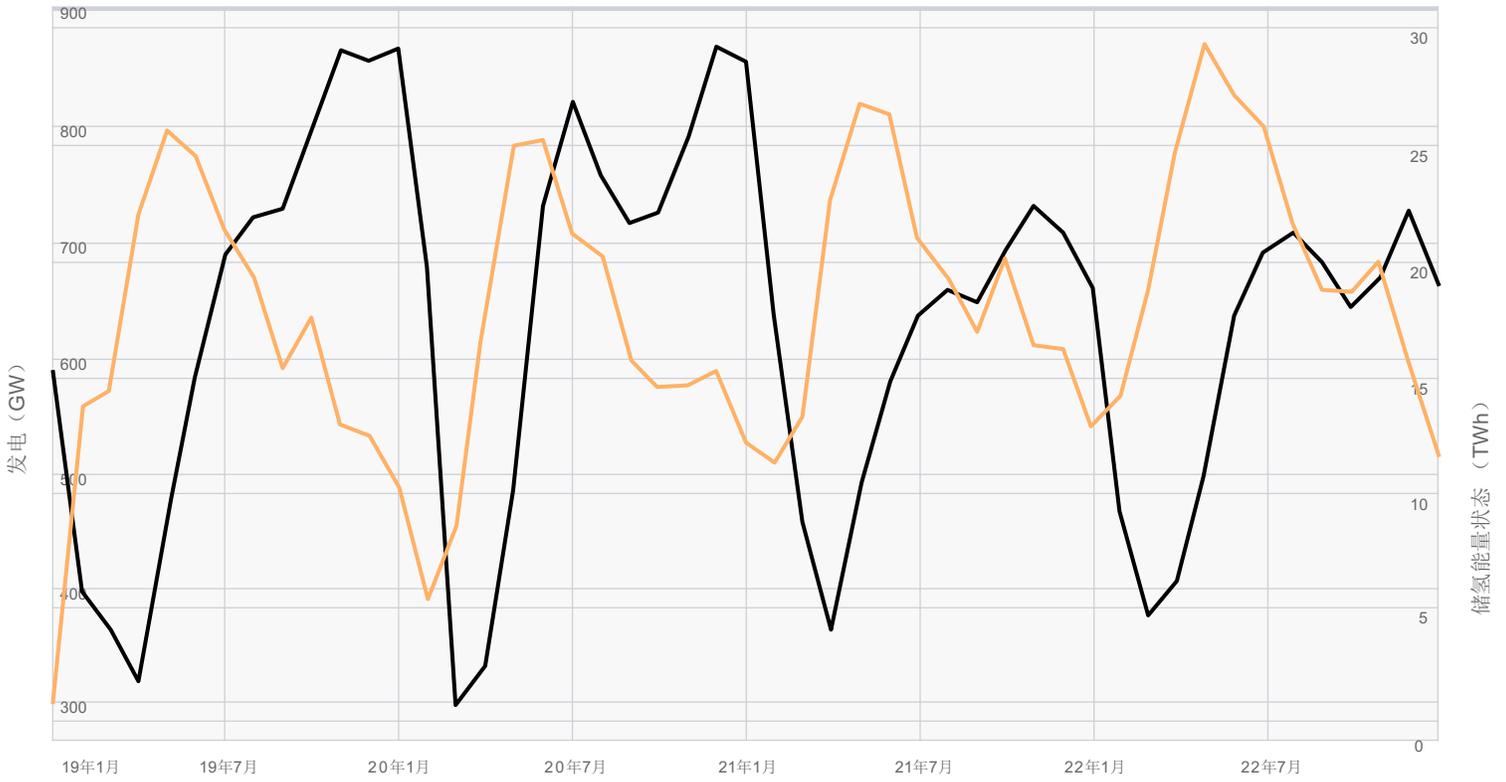


图14：美国东部区域储氢充电和放电的季节性变化（月度平均值）

弃电前的太阳能+风能发电
储氢能量状态

在图14中，氢能一般在肩部月份（春季和秋季）时储满，此时供热和制冷的季节已经结束，电力需求较低，太阳能和风能发电相对较高。同样，随着夏季和冬季过剩发电量的减少，氢能储备量也随之减少，从而提供跨季节的氢能储存。

储能技术评估

对于固定设施应用，Tesla考虑采用下表4中目前已大规模部署的储能技术。锂离子电池指的是LiFePO₄/石墨锂离子电池。考虑到大宗商品（尤其是锂）价格的波动，我们给出了锂离子未来装机容量的保守成本范围。虽然还有其他新兴技术，如金属-空气电池（Fe和Fe₂O₃氧化还原反应）和钠离子电池，但是这些技术尚未投入商业使用，因此在本分析中未予以考虑。

储能	技术	2030-2040年 安装成本 ^p	运维成本 (美元/千瓦·年)	系统循环 效率 (RTE)	年度循环限制	使用寿命	技术潜力（局限性）
机械	热泵（15小时）	\$78/kWh ^r	\$15.00 ^q	95% ^r	无	20年 ^r	仅对工业热量负荷
-	抽水蓄能	>\$270/kWh ³⁶	\$17.80 ⁴⁴	80% ⁴⁴	无	100年	<26TWh（储量） ³⁶
-	季节性水力 （约2个月）	无	无	-	约5.7 （流入有限）	100年	<90TWh（储量和流入） ³⁷
电化学	锂离子电池 （4-8小时）	\$184-\$231/kWh ^r	\$0.80 ³⁸	95% ^r	365 ^r	20年 ^r	-
氢气	地质/盐穴	氢气为\$19/kg ³⁹	无	98%	无	50+年	-

表4：储能技术评估

p. 这包括储能设备成本、系统平衡成本、互连成本和安装成本。

q. 电转热的效率。该模型不包括热能发电。

发电技术评估

下表详细介绍了在可持续能源经济中会考虑的所有发电技术。Tesla通过美国国家可再生能源实验室（NREL）对2030-2040年的研究和普林斯顿大学“净零美国”研究来计算出安装成本。

发电	2030-2040年安装成本	运维成本 (美元/kW-年)	容量系数	使用寿命	模型限制条件	美国的技术潜力（局限性）
太阳能	\$752/kW ⁴⁴ + 互连 ⁴⁰	\$15.97 ⁴¹	23-28% ⁴⁰	30 年 ⁴⁴	每个区域/资源类别的技术潜力 ⁴⁰	<153 TW (可用土地) ⁴²
陆上风能	\$855/kW ⁴⁴ + 互连 ⁴⁰	\$27.57 ⁴¹	36-52% ⁴⁰	30 年 ^s	每个区域/资源类别的技术潜力 ⁴⁰	<11 TW (可用土地) ⁴²
海上风能	\$2,401/kW ⁴⁴ + 互连 ⁴⁰	\$76.51 ⁴⁴	48-49% ⁴⁰	30 年 ^s	每个区域/资源类别的技术潜力 ⁴⁰ 只在东部区域可用的技术	<1 TW ^{43,45}
制氢	\$4,200/kW ⁴⁴ 至\$7,000/kW	\$61.41 ⁴⁴	无	100 年	152 GW 包含外部建设项目	<152 GW (河流流速) ⁴⁶
核能	\$10,500/kW ^t	\$127.35 ⁴¹	模型输出	<80 年	没有新的核能项目	无 (部署进度)
地热	\$5,616/kW ⁴⁴	\$99.32 ⁴⁴	>95% ⁴⁷	30 年 ⁴⁴	没有新建项目	<100 GW ^u

表5：发电技术评估

r. 内部估算。

s. 假设使用寿命延长。美国国家可再生能源实验室（NREL）《2019年风能成本评估》以25年的使用寿命作为参考，估算了风能成本，并以30年的使用寿命创建了敏感性数据。

t. 假设资本支出水平比美国能源信息署《新发电技术的成本及性能》中的资本支出水平高50%。

u. 不包括深层增强型地热系统资源

模型结果

满足新电气化需求——美国模型结果

对于美国来说，在模型涵盖的年份中，满足每小时电力需求的最佳发电和储能组合，如下表所示。

发电技术	装机容量 (GW)	年发电量 ^v (TWh)	年弃电量 ^w (TWh)
陆上风能	1,971	6,060	1,721
海上风能	64	212	62
太阳能光伏	3,052	4,046	2,431
核能 (现有)	99	699	无
制氢	152	620	无
合计	5,338	11,637	4,214

储能/其他技术	装机容量 (GW)	装机容量 (TWh)
8小时锂离子储能	815	6.5
工业储热	453	6.9
电解槽	418	无
储氢 ^x	无	107
合计	1,686	120

表6：仅含美国的模型结果

此外，除了家用和商用建筑屋顶太阳能，在分布式固定储能等增量部署的基础上，我们增加了1.2TWh的分布式固定电池。这包括1500万户带有屋顶太阳能的独栋住宅⁴⁸的储能部署，43GW^{49,50}的商用屋顶太阳能的工业储能，以及至少200GW⁵¹的现有备用发电机容量的储能替换^v。分布式储能部署是模型输出结果的外生因素，因为储能部署并非完全由最低成本模型框架中的因素驱动。比如，当与屋顶太阳能发电配对时，终端用户的用电量是弹性的且自给自足的。

v. 考虑到弃电之后。

w. 当电力供应高于电力需求，电池/储热/储氢已满时，该模型会限制风能/太阳能发电。被削减的风能/太阳能发电是指没有用于终端的发电量。

x. 目前的基础设施储存了从氢气中提取的17.8TWh的航空燃料。

y. 美国国家可再生能源实验室 (NREL) 指定的适用住宅建筑中，只有不到三分之一部署了太阳能和储能。假定有四个小时的储能供商业和工业 (C&I) 部署和备用发电机替代之用。

满足新电气化需求——全球模型结果

采用上述6个措施，将用66PWh/年的可持续发电取代每年应用于能源领域的125PWh的化石燃料^z。另外还需要新型工业每年额外提供4PWh，用于制造所需的电池、太阳能电池板和风力发电机（假设请参见附录：打造可持续能源经济——能源强度）。

通过将美国资源组合扩大6倍后，Tesla计算得出了满足电力需求的全球发电和储能组合。如前所述，这个明显简化的计算过程有待未来分析进一步优化，因为全球能源需求在构成上与美国不同，且预计会随着时间的推移而提高。由于能获取到的高保真小时数据有限，我们仅对美国进行了分析。

可持续能源经济【PWh/年】

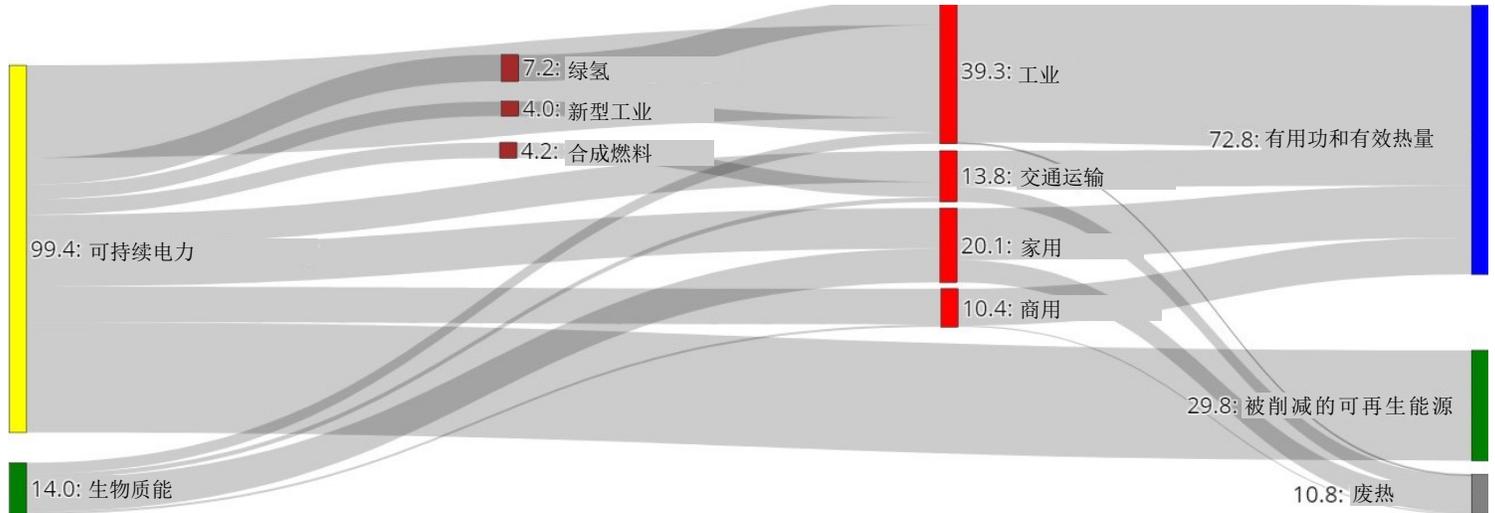


图15：可持续能源经济，各经济部门的全球能源流动，国际能源署和Tesla的分析

^z 剩余的每年约9PWh化石燃料使用量被非能源用途消耗

交通运输所需的电池

车辆

根据国际汽车制造商协会（OICA）的数据，如今全球有14亿台车辆，年产乘用车约8500万辆。基于电池包大小的假设，这些车辆将需要112TWh的电池^{aa}。自动驾驶技术能通过提高车辆利用率，减少全球车辆数量和所需的年产量。

标准续航里程的电动车可以使用低能量密度化学物质（磷酸铁锂），而长续航的电动车需要能量密度更高的化学物质（高镍）。不同类型电动车所匹配的正极如下表所示。高镍含量正极指的是目前Tesla、Tesla供应商和研究小组正在生产的低钴至零钴镍锰正极。

电动车类型	Tesla对应产品	正极	电池包大小（kWh）	电动车销售量（百万辆）	全球保有量（百万辆）	全球保有量（TWh）
紧凑型	【待定】	磷酸铁锂	53	42	686	36
中型	Model 3/Y	磷酸铁锂	75	24	380	28
商用/ 乘用车	【待定】	高镍	100	10	163	16
大型轿车、SUV和卡车	Model S/X, Cybertruck	高镍	100	9	149	15
客车	【待定】	磷酸铁锂	300	1	5	2
短程重型卡车	Semi（轻型）	磷酸铁锂	500	1	6.7	3
远程重型卡车	Semi（重型）	高镍	800	2	13.3	11
合计	-	-	-	89	1,403	112

表7：电动车保有量细分表

^{aa} 为了大致估算出替换100%的道路车辆所需的电池储能，全球车辆保有量、电池包大小（千瓦时）、全球乘用车保有量规模和年产量（约8500万辆/年）均采用了国际汽车制造商协会提供的数据。不同分类的电动车数量是根据标普全球的销售数据估算的。由于没有针对客车和卡车的全球可用数据，Tesla将美国保有量作为标量放大了约5倍。

全球电动车保有量



船舶和飞机

如果按船舶平均每年充电70次、每次充电到75%计算，满足每年2.1PWh的需求需要40TWh的电池来为海运船队供电。假设33%的电池需要更高能量密度的镍锰基正极，那么67%的电池只需要低能量密度的磷酸铁锂（LFP）正极。对于空运来说，如果约15,000架窄体飞机中有20%使用7MWh的电池包来供电，那么总共需要0.02TWh的电池。

这些只是保守估计，实际需要的电池数量可能比这些数值要少。

	正极	全球保有量 (TWh)
远程船舶	镍锰基	12
短程船舶	磷酸铁锂	28
飞机	高镍	0.02
合计	-	40

表8：电动船舶和飞机保有量细分表

电气化和交通运输所需电池——全球模型结果

表9总结了可以满足全球电力需求的发电和储能组合，并基于对电动车、船舶和飞机的假设，总结了交通运输所需的储能。发电和储能组合具体如何分配到各种终端上，请参见附录：发电和储能的终端分配。

	电动车电池 (TWh)	飞机和船舶电池 (TWh)	固定型电化学电池 (TWh)	固定型热电池 (TWh)	太阳能发电 (TW)	风能发电 (TW)	太阳能 + 风能 (TW)	电解槽 (TW)	储氢 (TWh)
用可再生能源驱动现有电网	-	-	22.9	-	6.8	3.8	10.6	-	-
转向电动车	112	-	3.7	-	3.3	1.5	4.9	-	-
在家用、商用和工业领域使用热泵	-	-	6.7	-	2.7	2.1	4.8	-	-
高温储能	-	-	4.1	41.4	1.3	1.5	2.8	-	-
可持续制氢	-	-	4.4	-	2.1	1.6	3.7	2.5	642
在飞机和船舶上应用可持续能源	-	40	4.4	-	2.1	1.6	3.7	-	-
合计	112	40	46.2	41.4	18.3	12.1	30.3	2.5	642

表9：满足全球电力需求和交通运输用电池的发电和储能组合

车辆和固定电池 (TWh)

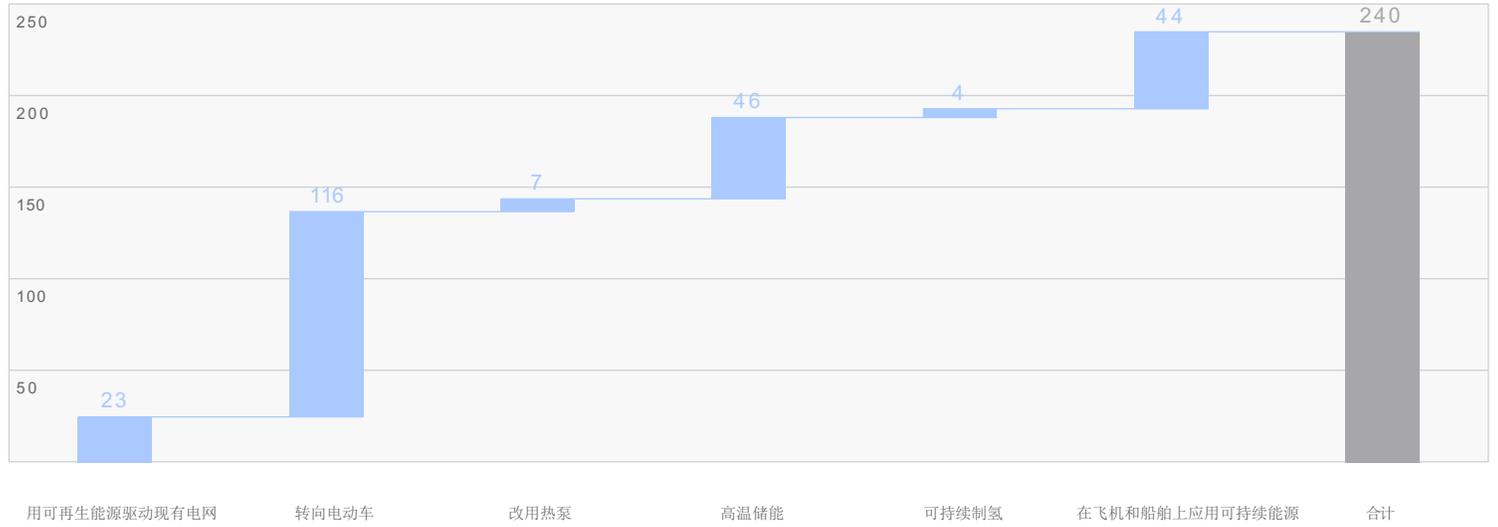


表10: 储能瀑布图

太阳能和风能电场 (TW)

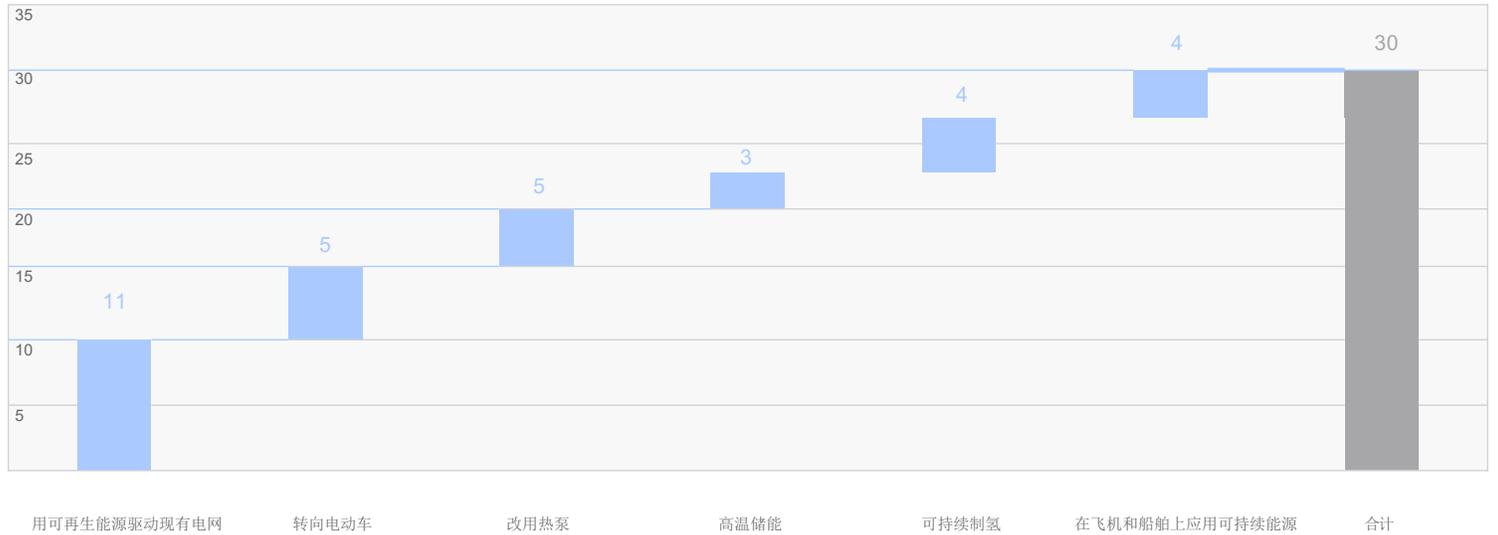


表11: 太阳能和风能瀑布图

投资需求

本报告中列出的投资包括制造设施、需要显著增长的原材料采矿和精炼业务，以及储氢盐穴的安装设施。制造设施的规模取决于每项资产的重置比率，上游业务（如采矿）的规模也是如此^{bb}。需要显著提高产能的原材料包括：

采矿方面：镍、锂、石墨和铜。

精炼方面：镍、锂、石墨、钴、铜、电池级铁和锰。

除了一开始的资本支出外，投资估算中还包括20年间每年5%的维护性资本支出。根据这些假设，预计在可持续能源经济所需的制造业基础设施上需要投入10万亿美元^{cc}。相比之下，按照2022年的投资率，20年间对化石燃料的预计投资支出将达到14万亿美元⁵²。

可持续能源经济的投资成本只有继续使用化石燃料的投资成本的60%

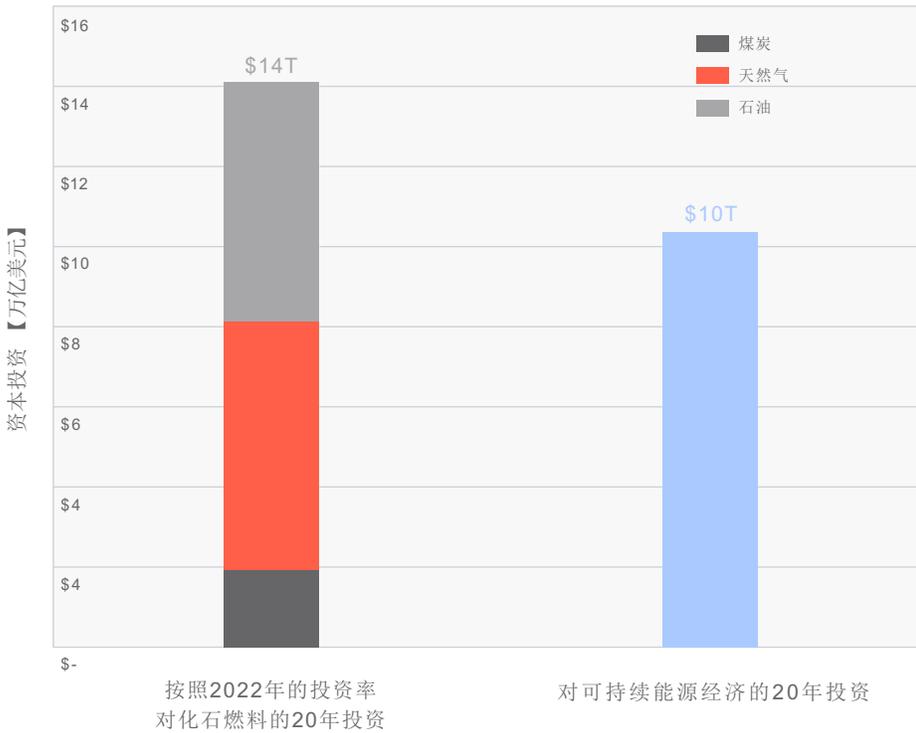


图16：投资情况对比

^{bb} 例如，如果总共需要46TWh的固定型磷酸铁锂（LFP）电池储能，而电池的寿命为20年，那么所需的制造能力的规模为每年2.3TWh。

^{cc} 范围内的制造能力投资：风力发电机、太阳能电池板、电池、上游电池输入、采矿、精炼、电动车、热泵以及电解槽、碳捕获和费托合成。还包括盐穴储氢。

投资需求

类别	单位	年产能（单位）	资本密集度/单位	初始投资	总投资 (包括20年5%的维持 资本支出)	注释/来源
太阳能电池板工厂	GW/年	610	\$347.3M	\$212B	\$424B	根据First Solar 的阿拉巴马工厂估算，加上太阳能回收的内部估算
风力发电机厂	GW/年	402	\$26.5M	\$11B	\$21B	内部估算
整车厂	辆/年	89M	\$10K	\$890B	\$1,780B	内部估算的行业平均值
电化学电池厂	GWh/年	11,488	\$95M	\$1,091B	\$2,183B	内部估算的行业平均值，包括回收
固定型电化学电池工厂 (例如Megapack)	GWh/年	2,310	\$10M	\$23B	\$46B	内部估算的行业平均值
固定型热电池工厂	GWh/年	2,070	\$24M	\$50B	\$99B	内部估算
运输-采矿/精炼	GWh/年	9,178	\$91.2M	\$837B	\$1,674B	基于公开行业报告的内部估算的行业平均值
固定-采矿/精炼	GWh/年	2,310	\$81.9M	\$189B	\$378B	基于公开行业报告的内部估算的行业平均值
发电-采矿/精炼	GW/年	1,013	\$136.6M	\$138B	\$277B	基于公开行业报告的内部估算的行业平均值
电动车电池上游电化学	GWh/年	9,178	\$24.1M	\$221B	\$443B	内部估算
固定型电池用上游电化学	GWh/年	2,070	\$16.2M	\$34B	\$67B	内部估算
热泵	合计	无	无	\$30B	\$60B	假设30亿美元的制造资本支出于更换家用热泵；保守估计 所有热泵300亿美元
电解槽	kW/年	2.5B	\$230	\$577B	\$1,155B	采用质子交换膜（PEM）技术；成本将取决于实际的学习曲线 ⁵³
碳捕获（合成燃料）	吨CO ₂ /年	800M	\$200	\$160B	\$320B	尚待大规模演示；成本将取决于实际的学习曲线 ⁵⁴⁻⁵⁵
费托合成（合成燃料）	桶/日	5.5M	\$70K	\$385B	\$770B	假设项目规模增加时的效率曲线 ⁵⁶
氢储存	kg	无	\$19	\$362B	\$725B	19美元/kg ³⁹
合计	-	-	-	\$5,211B	\$10,421B	-

表12：投资概要

投资需求

关于采矿、精炼、整车厂、电池厂和回收的假设的更多详细信息见表13。关于采矿和精炼的假设是基于公开行业报告对行业平均值的内部估算：

采矿

	单位	资本密集度/单位	所需kt/年	所需资本支出
镍	kt/年	\$51M	2,850	\$145B
单水氢氧化锂（锂）	kt/年	\$25M	6,785	\$170B
铬	kt/年	\$10M	10,446	\$104B
铜	kt/年	\$12.5M	6,600	\$83B
采矿资本支出总计				\$502B

表13A：额外的投资假设细节

精炼

	单位	资本密集度/单位	所需kt/年	所需资本支出
镍	kt/年	\$20M	2,850	\$57B
钴	kt/年	\$30M	16	\$0
单水氢氧化锂（锂）	kt/年	\$30M	6,785	\$204B
铁	kt/年	\$14M	6,025	\$84B
铬	kt/年	\$17M	10,446	\$178B
铜	kt/年	\$20M	6,600	\$132B
锰	kt/年	\$14M	530	\$7B
采矿资本支出总计				\$662B

表13B：额外的投资假设细节

投资需求

整车厂和电池厂

	单位	资本密集度/单位	所需年产能	所需资本支出	注释/来源
整车厂	辆/年	\$10K	89M	\$890B	内部估算的行业平均值
电化学电池厂	GWh/年	\$80M	11,488	\$919B	内部估算的行业平均值
热电池厂	GWh/年	\$10M	2,070	\$21B	内部估算
电池包工厂	GWh/年	\$10M	2,310	\$23B	内部估算
上游电池材料	GWh/年	\$24.9M	9,178	\$229B	内部估算
采矿资本支出总计				\$2,082B	

表13C：额外的投资假设细节

回收利用

	单位	资本密集度/单位	所需年产能	所需资本支出	注释/来源
电化学电池回收	GWh/年	\$15M	11,488	\$172B	内部估算
热电池回收	GWh/年	\$14M	2,070	\$29B	内部估算
太阳能电池板回收	GW/年	\$14M	610	\$9B	内部估算
风能发电机回收	GW/年	\$14M	402	\$6B	内部估算
采矿资本支出总计				\$215B	

表13D：额外的投资假设细节

占地面积需求

太阳能设施的占地面积需求是根据美国劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）对美国实际项目的实证评估估算出来的。该实证评估发现，2011-2019年安装的固定倾斜光伏系统的中位功率密度为2.8英亩/MWdc²⁷，使用1.4的转换比率将MWdc转换为MWac，大概在3.9英亩/MWac左右。因此，18.3TW的全球太阳能电池板保有量将需要大约7140万英亩，占全球土地总面积368亿英亩的0.19%。

风能设施的占地面积需求是根据美国国家可再生能源实验室（NREL）的一项研究估算的。该研究发现，每MW风能设施的直接土地使用量为0.75英亩²⁸。因此，全球12.2TW的风力发电机保有量将需要大约920万英亩，即土地总面积的0.02%。

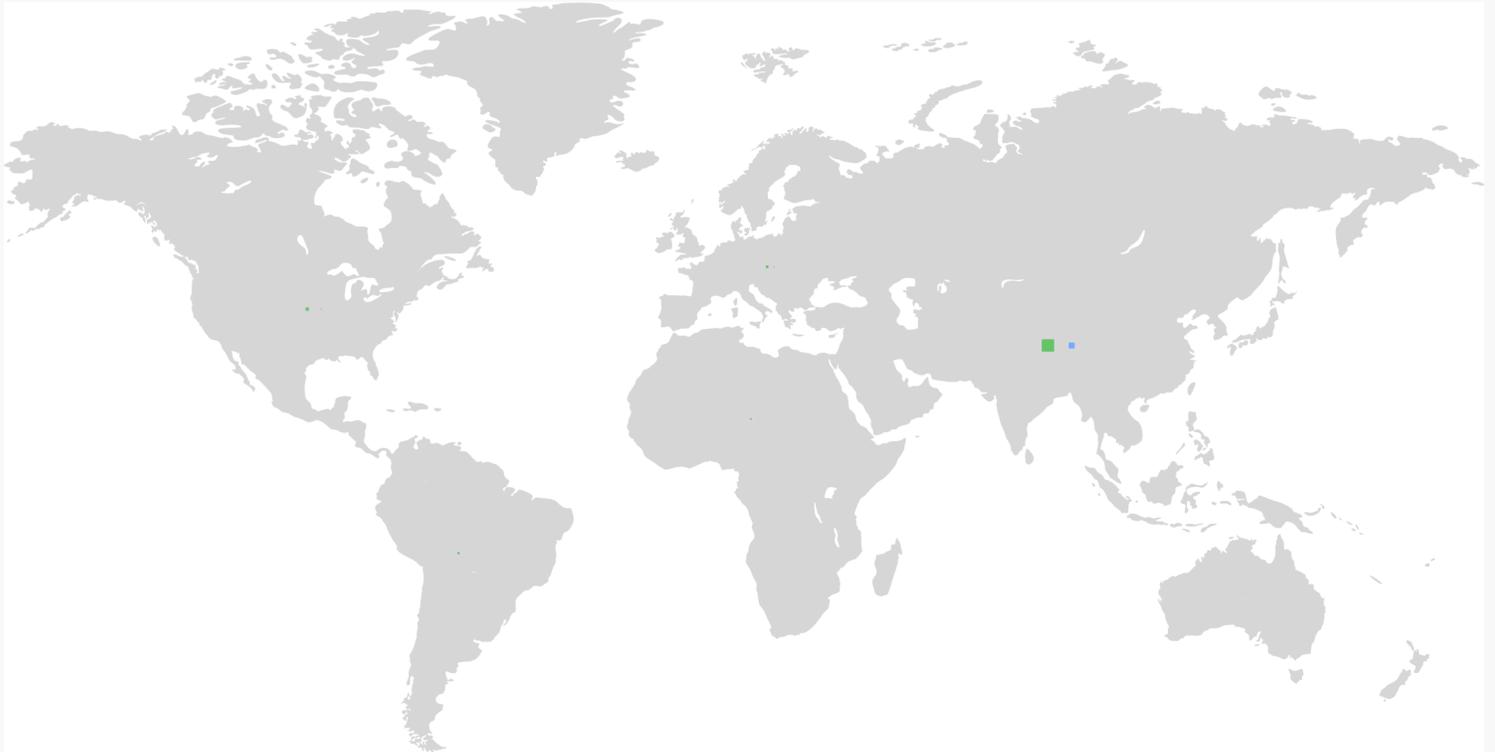


表14：太阳能和风能设施的直接占地面积，按大陆划分

■	太阳能设施的直接占地面积，占土地总面积的0.19%
■	风能设施的直接占地面积，占土地总面积的0.02%

材料需求

假设

太阳能电池板、风力发电机和电路长度所需的材料总量，根据第三方材料强度假设计算所得。电池的材料强度基于内部估算。太阳能电池板和风力发电机的材料强度假设出自欧盟委员会的报告。太阳能电池是基于晶圆的晶体硅，考虑到开发技术的进步，稀土矿物会从风力发电机的所需材料中淘汰掉⁵⁹。

根据国际能源署《2050年净零排放路线图》的研究，全球需要增加或改造约6000万英里的电路，以实现全面可持续、电气化的全球经济。配电容量的提升将主要通过改造现有线路和扩大变电站容量来实现，以适应终端用户需求峰值和平均值的迅猛增长。高压输电方面，将主要通过扩大地理覆盖范围，将大型风能和太阳能发电连接到人口密集地区。为了估计材料需求，6000万英里的电路中的90%将用于现有低压配电系统的再传导，10%将是高压输电的新电路，这也符合美国当前高压输电和低压配电之间的电路长度比^{60,61}。

吨/GW	太阳能	风	注释
混凝土	56,200	328,250	-
钢	62,800	119,500	-
玻璃	42,900	8,050	-
塑料	7,900	-	-
铝	7,500	1,050	-
铜	4,300	2,975	-
铁	-	19,400	-
硅	2,000	-	-
锌	-	5,500	-
聚合物	-	4,600	-
锰	-	790	-
铬	-	525	-
镍	-	340	-
钼	-	109	不包含，设计时排除掉
钨	-	96	不包含，设计时排除掉
银	4	-	-
镨	-	18	不包含，设计时排除掉
镱	-	8	不包含，设计时排除掉
铽	-	4	不包含，设计时排除掉
硼	-	3	不包含，设计时排除掉

表15：发电材料：每GW的吨数⁶²

材料需求

kg/kWh	高镍电池	磷酸铁锂电池	镍锰基电池	热电池
镍	0.75	-	0.40	-
钴	-	-	0.06	-
铝	0.09	0.33	0.12	-
锰	-	-	0.73	-
铁	-	0.78	-	-
磷	-	0.42	-	-
铜	0.17	0.27	0.23	-
铬	0.59	1.05	0.89	4.00
硅	0.04	-	-	-
单水氢氧化锂（锂）*	0.54	0.61	0.63	-

表16：电池材料：每kWh的千克数

kg/km	混凝土	钢	铝	铜	玻璃	铅
高压架空电缆	209,138	52,266	12,883	-	1,100	-
高压地下电缆	17,500	-	-	11,650	-	14,100
中压架空电缆	-	802	-	1,488	-	-
中压地下电缆	-	-	824	663	-	-
低压架空电缆	-	-	981	-	-	-
低压地下电缆	-	177	531	-	-	-

表17：输电材料：每千米的千克数⁶³

使用上述假设，共计需要128.15亿吨（每年4.44亿吨）来达到30TW发电、240TWh电池储能和6000万英里输电距离的目标。

* LHM（单水氢氧化锂）相当于LiOH-H₂O，其质量大约是锂的6倍。

材料需求

材料总需求量

材料	发电	电池	输电	合计
镍	4	36	-	40
钴	-	1	-	1
铝	150	52	210	412
锰	10	8	-	18
铁	2,826	113	495	3,434
铜	115	49	-	164
石墨	-	353	-	353
单水氢氧化锂 (锂)	-	118	-	118
银	0.07	-	-	0.07
锌	66	-	-	66
磷	-	61	-	61
混凝土	4,991	-	2,019	7,010
塑料	145	-	-	145
玻璃	883	-	11	893
硅	37	2	-	38
聚合物	56	-	-	56
铬	6	-	-	6
合计	9,288	793	2,734	12,815

材料年需求量

材料	发电	电池	输电	合计
镍	0	3	-	3
钴	-	0	-	0
铝	5	3	7	15
锰	0	0	-	1
铁	94	6	16	117
铜	4	3	-	7
石墨	-	19	-	19
单水氢氧化锂 (锂)	-	7	-	7
银	0.002	-	-	0.002
锌	2	-	-	3
磷	-	3	-	3
混凝土	166	-	67	234
塑料	5	-	-	5
玻璃	29	-	0.4	30
硅	1	-	-	1
聚合物	2	-	-	2
铬	0.2	-	-	0.2
合计	310	43	91	444

表18：材料强度总计【Mt】

材料开采

与这些材料相关的质量流量（即移动的土量）取决于矿石品位和全过程产出率。根据公开行业报告中提及的行业平均水平内部估算（见表19），所需的年度质量流动估计为3.3Gt。如果用铝（50%矿石品位）代替铜（1%矿石品位），质量流动会有所减少。实际上，用铝替代铜的情况很常见。我们假设50%的锂都是从矿石品位为100%的卤水中提取出来的，否则，与锂相关的质量流动将增加0.8Gt。

根据《2023年循环度差值报告》，每年从地球上开采的材料（不包括生物质）有68Gt，其中化石燃料占15.5Gt⁶⁴。在可持续能源经济中，材料开采量将减少10.8Gt，大部分化石燃料的开采，将被3.3Gt的可再生材料开采所取代。根据国际能源署的数据，假设与非能源终端（即塑料和其他化学品）相关的化石燃料开采仍会继续，这只占化石燃料供应的9%。

材料需求

	矿石品位	全过程产出率	采矿峰值 (Mt)
镍	1.0%	79%	370
钴	0.4%	77%	5
铝	44.9%	90%	37
锰	41.9%	75%	2
铁	61.5%	65%	293
铜	0.9%	81%	955
石墨	16.9%	86%	128
单水氢氧化锂 (锂)	0.7%	58%	860
银	0.002%	75%	185
锌	5.6%	82%	48
磷	12.5%	50%	52
混凝土	100%	65%	360
塑料	100%	100%	5
玻璃	100%	100%	30
硅	80%	38%	4
聚合物	100%	100%	2
铬	34.5%	65%	0
总计			3,335

表19：年度材料开采的需求量^{dd}

材料可用性

对比2023年美国地质勘探局 (USGS) 的资源数据，Tesla对表18中的开采材料的总量进行了估计，以评估各种材料的可行性。对于银，美国地质勘探局没有公布资源估算量，因此用储量来代替。分析表明，太阳能电池板将需要美国地质勘探局2023年银储量的13%，但银可以用铜代替，因为铜更便宜，资源也更丰富。石墨需求可以用天然石墨和人工石墨来满足——前者是开采和精炼的，后者是从石油焦中提炼出来的。因此，将从石油产品中人工生产出来的石墨也算在内，石墨资源基础就会增加。只要能将全球石油资源的一小部分用于人工石墨生产，石墨资源就不会成为约束⁶⁷。正在进行的开发工作旨在评估其他含碳产品作为人造石墨生产的原料，包括二氧化碳和各种形式的生物质⁶⁸。

总而言之，在我们依据2023年美国地质勘探局的数据作估算时，没有根本性的材料约束。此外，资源和储量在历史上一直是增加的，也就是说，当对一种矿物的需求旺盛时，人们就会有更大动力去寻找它，而且也会发现更多⁶⁹。相关金属矿石的年度开采量、选矿和精炼量必须增长，以满足可再生能源经济的需求，其中根本制约因素在于人力资本和许可/监管时间表。

dd 假设50%的锂是从卤水中提取的。这部分锂供应100%来源于矿石开采。

达到30TW发电、240TWh储电和6000万英里输电距离的目标所需要的材料（按照2023年美国地质勘探局的资源估算量）

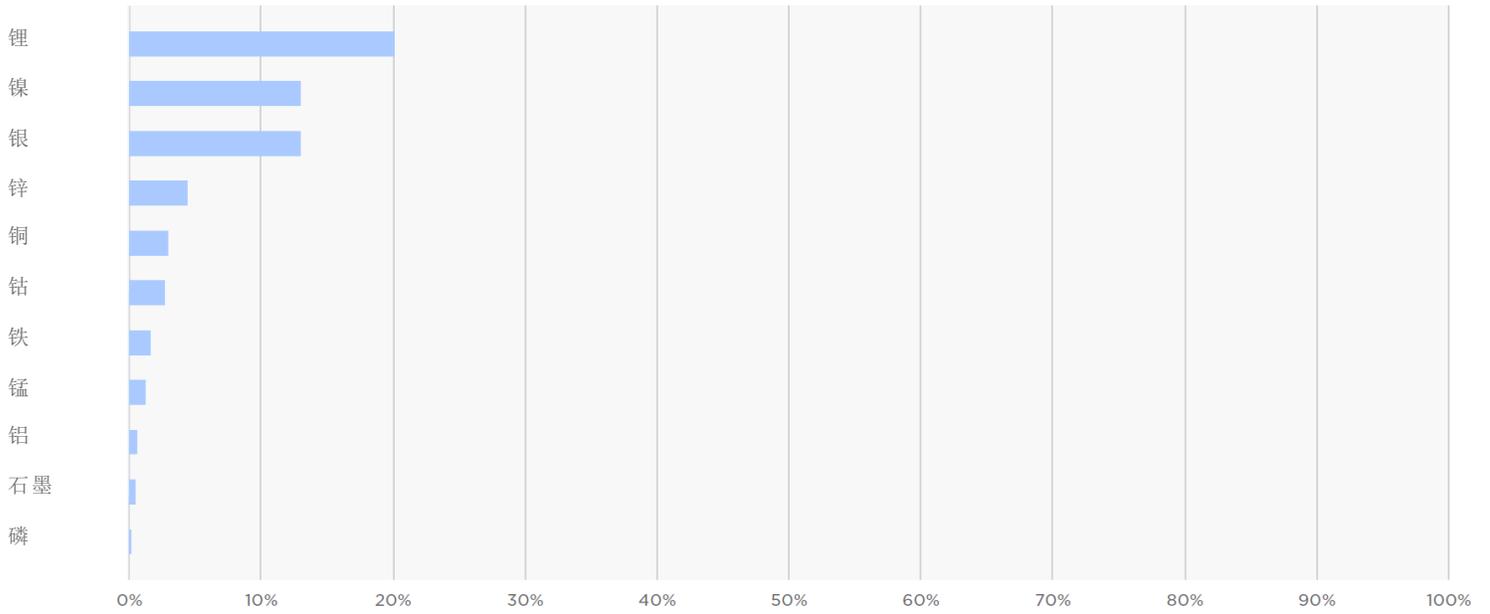


图17：按照2023年美国地质勘探局资源估算量计算的所需材料

全球矿产储量/资源基础——纠正公众认知

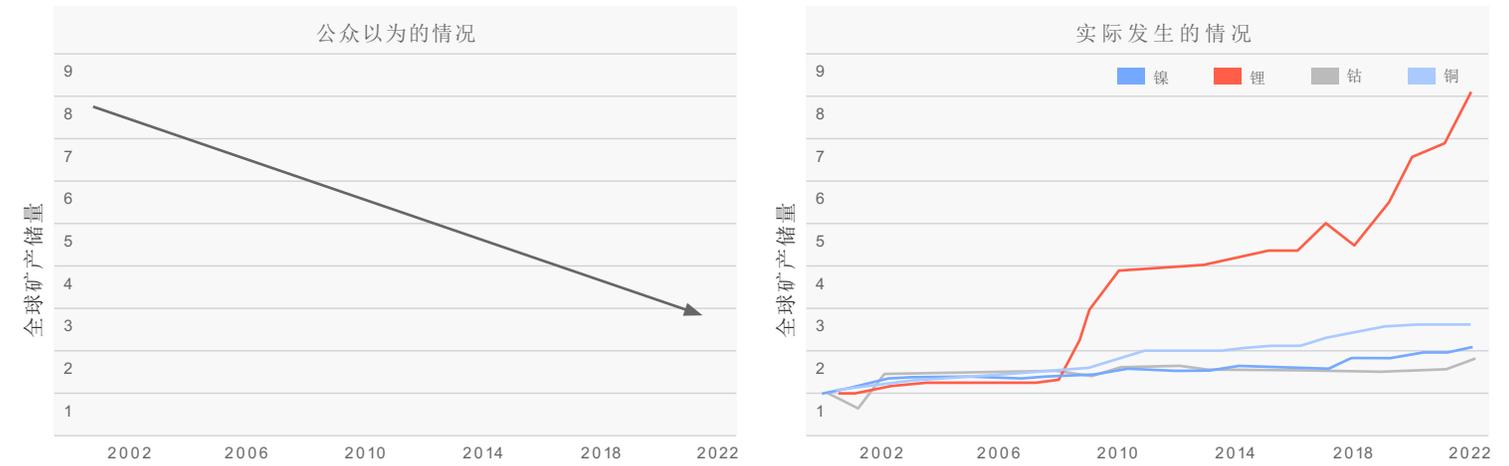


图18 全球矿产储量/资源基础——纠正公众认知

回收利用

为了支持这一计划，原材料的需求必须要有显著的增长，以促进可持续能源经济的制造业增长。一旦制造设施增加，原材料需求就会趋于平稳。到2040年，随着电池、太阳能电池板和风力发电机寿命到期，有价值的材料被回收利用，对原材料的需求将开始显著下降。尽管采矿需求将减少，但精炼产能不会下降。

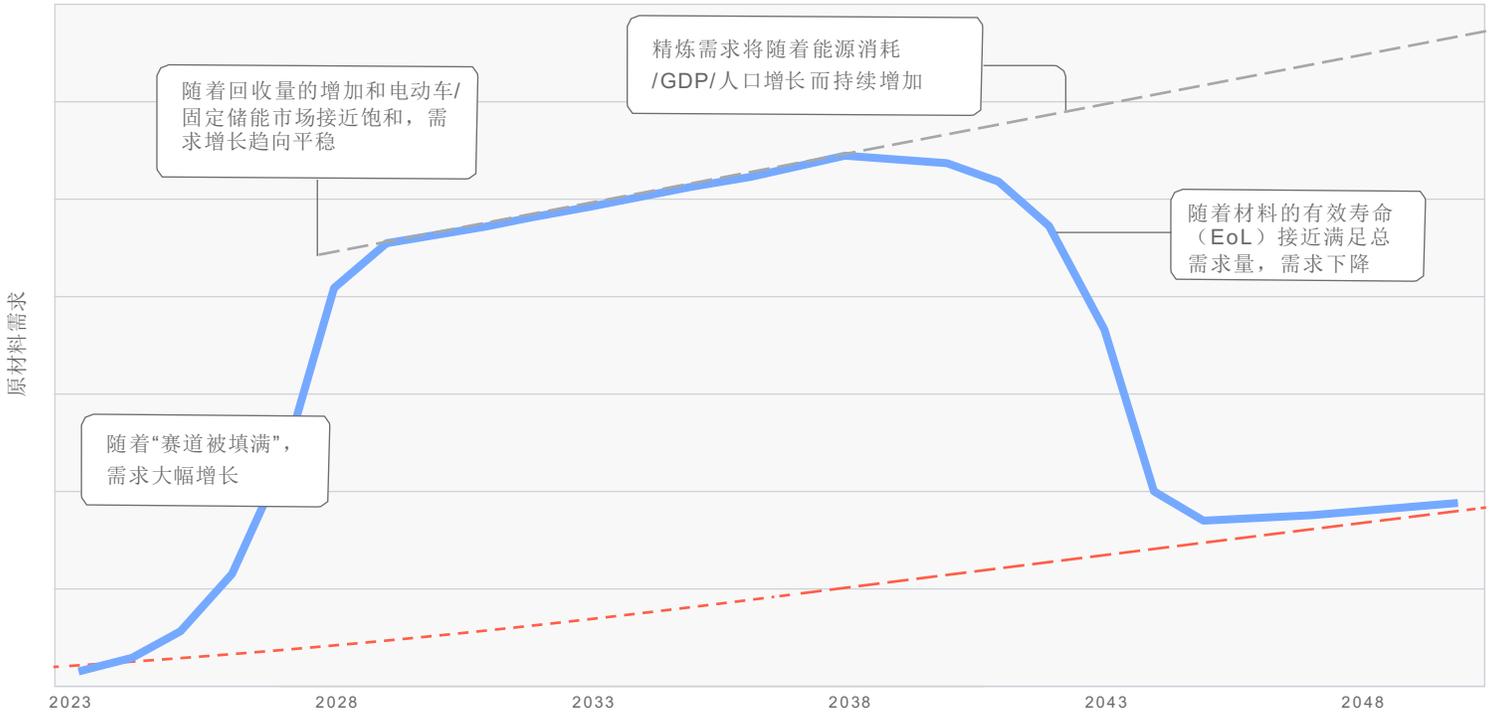
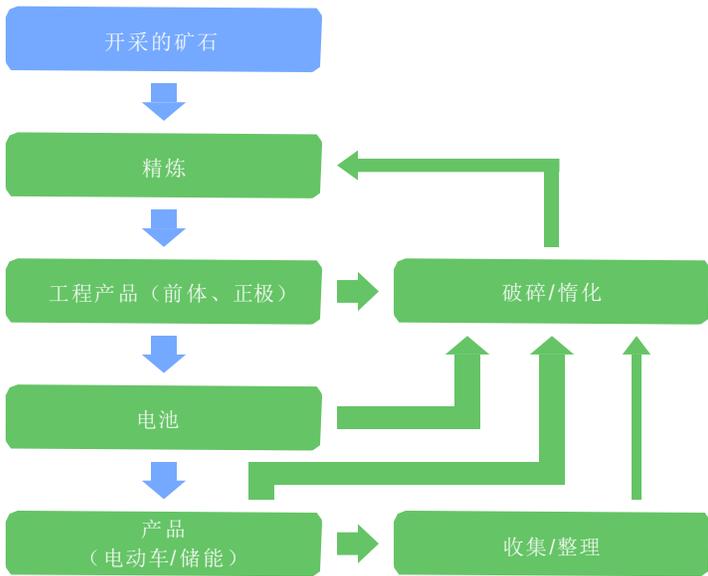


图20 假设关键材料回收率为80%，回收利用对工艺流程的影响示意图

2030年代



2050年代

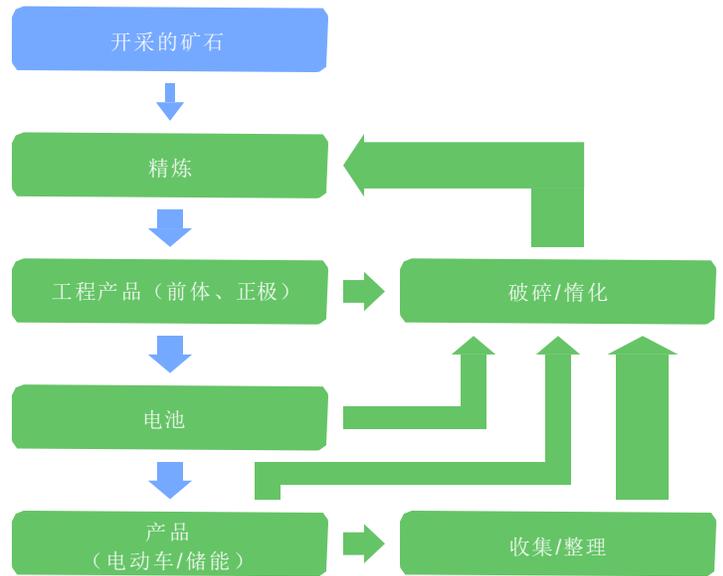


图19：假设关键材料回收率为80%，回收利用对工艺流程的影响示意图

结论

从本报告来看，实现全面电气化且可持续的经济并非遥不可及，只需要采取以下措施：

1. 用可再生能源驱动现有电网
2. 转向电动车
3. 在家用、商用和工业领域使用热泵
4. 高温储能及可持续制氢
5. 在飞机和船舶上应用可持续能源
6. 制造可持续能源经济

建模表明，缔造一个电气化且可持续的将来在技术上是可行的，与保持现有的非可持续能源经济相比，需要的投资更少，需要开采的材料也更少。



图2：秘密宏图第三篇章的资源和投资需求预估

附录：发电和储能的终端分配

本分析从系统层面对发电和储能的需求进行了估算，即回答了这样一个问题：实现可持续能源经济需要多少风能/太阳能和储能。该模型没有明确计算出各种终端用途分别电气化所需的发电量和储能量。具体来说，从总系统需求中分配到各种终端用途的容量，是使用扩能模型的输出结果来计算的。

为此，基于各种终端用途每小时的需求曲线，以及弃电后太阳能和风能的发电量，本文计算出了二者之间的重合量。再根据风能和太阳能装机容量的年度加权平均重合系数，将这些容量分配给各终端用途。例如，每年12%的风力发电量与电动车充电需求相吻合，由于模型输出结果表明，需要15.2TW的风能，其中12%分配给电动车充电，约1.9TW。通过将储能放电与终端的需求相匹配，我们采用相同的方法将电池储能容量分配给每种终端。一般来说，需求变动弹性最低的终端，如住宅供暖，就比工业高级供热（假定有可用的储热）等终端分配到的储能要多。

这种分配方法是一种具有指向和说明性质的估算方法，用于估计每种终端对太阳能/风能和储能总需求的影响，而各种终端的需求之间是相互关联的，彼此之间并不能完全分开。

终端	全球电力需求 (TWh)	太阳能 (TW)	风能 (TW)	固定型储能 (TWh)
用可再生能源驱动现有电网	22,538	6.8	3.8	22.9
转向电动车	9,314	3.3	1.5	3.7
在家用、商用和工业领域使用热泵	11,486	2.7	2.1	6.7
高温储能及可持续制氢	17,472	3.4	3.1	49.5 ^{ee}
在飞机和船舶上应用可持续能源	9,028	2.1	1.6	4.4

^{ee} 包括8TWh的固定型储能，不包括储氢。

附录：能源强度

在可持续能源经济中，制造电池、太阳能电池板和风力发电机本身就需要每年4PWh的可持续电力。为了满足这一电力需求，Tesla对制造业的能源强度进行了估算，如下图所示：

	风力发电机 ^{zz}	太阳能 ^{zz}
每生产1GW消耗的能源（GWh）	1,052	1,072
产量 （GW/年）	402	610
消耗合计（PWh）	0.42	0.65

表20：风能发电机和太阳能电池板生产的年度能源强度

	高镍电池 ^{gg}	磷酸铁锂电池 ^{gg}	镍锰基电池 ^{gg}	热电池 ^{ff}
每生产1GW消耗的能源（GWh）	312	190	342	125
产量 （GW/年）	3,481	7,715	292	2,070
消耗合计（PWh）	1.09	1.47	0.10	0.26

表21：电池生产的年度能源强度

ff 热电池中用石墨作为替代时的能源强度

gg 内部估算

1 <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>

2 <https://flowcharts.llnl.gov/>

3 <http://www.departmentofenergy/>

4 https://www.eia.gov/electricity/gridmonitor/dashboard/electric_overview/US48/US48

5 <https://afdc.energy.gov/data/10310>

6 <https://www.fueleconomv.gov/feq/noframes/45011.shtml>

7 https://www.fueleconomv.gov/feq/bymodel/2022_Toyota_Corolla.shtml

8 <https://www.eia.gov/opendata/browser/>

9 <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4713780d-c0ae-4686-8c9b-29e782452695/TheFutureofHeatPumps.pdf>

10 <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps/how-a-heat-pump-works>

11 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116309418>

12 <https://www.energy.gov/energysaver/furnaces-and-boilers>

13 <https://www.iea.org/commentaries/clean-and-efficient-heat-for-industry>

14 https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/149827036/Contribution_1380_final.pdf

15 https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/151965635/MAIN_Final.pdf

16 <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/industrial-heat-demand-by-temperature-range-2018>

17 https://www.sandia.gov/ess-ssl/wp-content/uploads/2020/12/ESHB_Ch12_Thermal_Ho.pdf

18 <https://medium.com/antora-energy/turning-sunshine-and-wind-into-24-7-industrial-heat-and-power-cheaper-than-fossil-fuels-69355cdcd04>

19 <https://www.bostonmetal.com/green-steel-solution/>

20 <https://www.iea.org/reports/hydrogen>

21 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7712718/>

22 <https://aquapubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022GL101420>

23 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920331426>

24 <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/natural-gas-consumption-for-non-energy-use-by-application-2019-2025>

25 <https://www.nature.com/articles/s41560-022-01065-y>

26 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenerylett.9b02574>

27 <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/articles/sustainable-aviation-fuel-review-technical-pathways-report>

28 <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>

29 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2516-1083/abf1ce>

30 https://www.serc1.org/docs/default-source/committee/resource-adequacy-working-group/2020-serc-probabilistic-assessment-report-redacted.pdf?sfvrsn=58904e0c_2

31 https://www.wecc.org/Reliability/TAS_PathReports_Combined_FINAL.pdf

32 https://www.ercot.com/files/docs/2020/07/30/ERCOT_DC_Tie_Operations_Document.docx

33 <https://netzeroamerica.princeton.edu/img/NZA%20Annex%20A3%20-%20Inputs%20catalog%20for%20EER%20modeling.xlsx>

34 <https://www.ref.org.uk/ref-blog/371-constraint-payments-to-wind-power-in-2020-and-2021>

35 http://www.caiso.com/Documents/ProductionAndCurtailmentsData_2022.xlsx

36 <https://www.nrel.gov/gis/psh-supply-curves.html>

37 <https://aquapubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022WR032210?af=R>

38 <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2022/05/The-Future-of-Energy-Storage.pdf>

39 <https://www.osti.gov/pages/biblio/1840539#:~:text=Unlike%20underground%20pipes%2C%20the%20installed,3%2Fkg-H2>

40 <https://netzeroamerica.princeton.edu/the-report>

41 https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table_8.2.pdf

42 <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51946.pdf>

43 <https://www.nrel.gov/wind/offshore-resource.html>

44 <https://atb.nrel.gov/electricity/2022/technologies>

45 <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83650.pdf>

46 <https://www.energy.gov/eere/water/articles/hydropower-vision-report-full-report>

47 <https://www.nrel.gov/analysis/tech-cap-factor.html>

48 <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70901.pdf>

49 <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65938.pdf>

50 <https://www.greentechmedia.com/articles/read/the-us-has-145-gigawatts-of-untapped-commercial-solar-potential>

51 <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2009%20Smart%20Grid%20System%20Report.pdf>

52 <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2022/overview-and-key-findings>

53 <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72740.pdf>

54 https://iea.blob.core.windows.net/assets/78633715-15c0-44e1-81df-41123c556d57/DirectAirCapture_Akeytechnologyfornetzero.pdf

55 https://carbonengineering.com/wp-content/uploads/2019/11/APS_DAC_Report-FINAL_Original.pdf

56 https://www.researchgate.net/publication/271200536_Establishing_a_European_renewable_jet_fuel_supply_chain_the techno-economic_potential_of_biomass_conversion_technologies

57 <https://emp.lbl.gov/publications/land-requirements-utility-scale-pv>

58 <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45834.pdf>

59 <https://www.energy.gov/eere/articles/advanced-wind-turbine-drivetrain-trends-and-opportunities>

60 <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/net-zero-by-2050-scenario#>

61 <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-05/Next%20Generation%20Grid%20Technologies%20Report%20051222.pdf>

62 https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2020/04/rms_for_wind_and_solar_published_v2.pdf

63 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920305176?via%3DIihub>

64 <https://www.circularity-gap.world/2023#download>

65 <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2022/september-2022/out-with-the-silver-in-with-the-copper-a-new-boost-for-solar-cells.html>

66 <https://asbury.com/media/1225/syntheticgraphiteparti.pdf>

67 https://www.opec.org/opec_web/en/data_graphs/330.htm

68 <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/qc/d0qc02286a>

69 <https://www.nature.com/articles/s41560-022-01129-z>

70 <https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/LCA%20of%20Electricity%20Production%20from%20an%20onshore%20EnVentus%20V162-6.2.pdf.coredownload.inline.pdf>

71 https://krichlab.physics.uottawa.ca/wp-content/uploads/2014/06/Peng2013_Review-LCA-EPBTGHG-SolarPV.pdf

72 https://static1.squarespace.com/static/6213f06671d00e605c9eea45/1/62ce206273cd8e10b634d6bb/1657675880422/TOWARD%20A%20BLIFE%20CYCLE%20INVENTORY%20FOR%20BGRAPHITE%20PRODUCTION_carbonscape.pdf