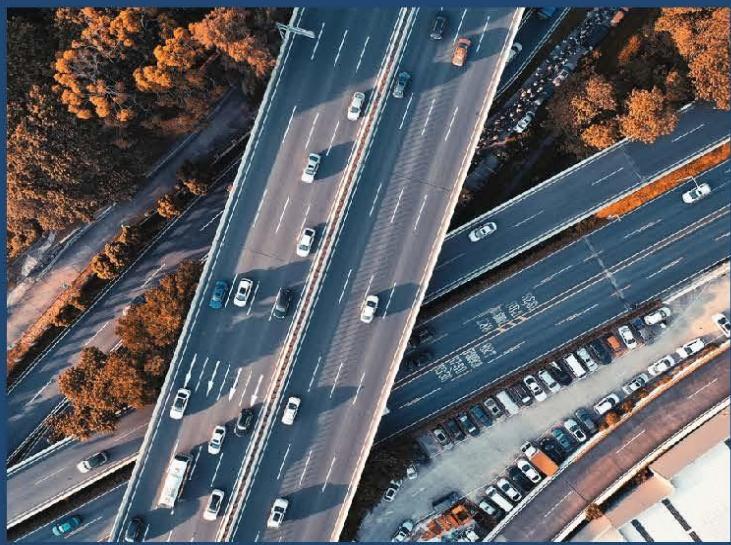


# 圣地亚哥区域脱碳框架

决策者摘要



# 项目团队

## 项目总监

Gordon C. McCord

副院长兼经济学副教授

可持续发展目标政策倡议项目主任

加州大学圣地亚哥分校全球政策与战略学院

## 项目经理

Elise Hanson, 圣地亚哥县土地利用和环境小组 (LUEG)

## 圣地亚哥县代表

Murtaza Baxamusa

Rebeca Appel

Sarah Aghassi

Yasamin Rasoulzadeh

Michael De La Rosa

Donna Durckel

Nicole Boghossian Ambrose

Jennifer Lawson

Renee Loewer

## 章节作者

### 引言

Murtaza H. Baxamusa, 圣地亚哥县土地利用和环境小组 (LUEG)

## 研究方法

Ryan A. Jones, Evolved Energy Research

## 可再生能源生产地理空间分析

Emily Leslie, 蒙塔拉山能源公司

Joseph Bettles, 加州大学圣地亚哥分校

## 加快交通领域深度脱碳

Katy Cole, Fehr & Peers

Chelsea Richer, Fehr & Peers

Eleanor Hunts, Fehr & Peers

## **建筑脱碳**

Philip Eash-Gates, 斯奈普斯能源经济学咨询公司

Jason Frost, 斯奈普斯能源经济学咨询公司

Shelley Kwok, 斯奈普斯能源经济学咨询公司

Jackie Litynski, 斯奈普斯能源经济学咨询公司

Kenji Takahashi, 斯奈普斯能源经济学咨询公司

Asa Hopkins, 斯奈普斯能源经济学咨询公司

## **自然气候解决方案和其他土地使用考量**

Elise Hanson, 加州大学圣地亚哥分校

Emily Leslie, 蒙塔拉山能源公司

## **圣地亚哥区域脱碳的就业影响**

Robert Pollin, 马萨诸塞大学阿默斯特分校政治经济研究所 (PERI)

Jeannette Wicks-Lim, 马萨诸塞大学阿默斯特分校政治经济研究所 (PERI)

Shouvik Chakraborty, 马萨诸塞大学阿默斯特分校政治经济研究所 (PERI)

Gregor Semieniuk, 马萨诸塞大学阿默斯特分校政治经济研究所 (PERI)

## **圣地亚哥地区主要政策考量**

Joseph Bettles, 加州大学圣地亚哥分校

Gordon C. McCord, 加州大学圣地亚哥分校

David G. Victor, 加州大学圣地亚哥分校

Emily Carlton, 加州大学圣地亚哥分校

## **地方政策机会分析**

Scott Anders, 圣地亚哥大学法学院能源政策倡议中心 (EPIC)

Nilmini Silva Send, 圣地亚哥大学法学院能源政策倡议中心 (EPIC)

Joe Kaatz, EPIC, 圣地亚哥大学法学院能源政策倡议中心 (EPIC)

Yichao Gu, 圣地亚哥大学法学院能源政策倡议中心 (EPIC)

Marc Steele, 圣地亚哥大学法学院能源政策倡议中心 (EPIC)

## **圣地亚哥地区模型**

Elena Crete, 联合国可持续发展解决方案网络 (SDSN)

Julie Topf, 联合国可持续发展解决方案网络 (SDSN)

## **附录 A: 全州能源系统建模总结**

Ryan Jones, Evolved Energy Research

## **附录 B: 审查地方辖区和机构的温室气体排放影响和监管权限**

Joe Kaatz, 圣地亚哥大学法学院能源政策倡议中心 (EPIC)

## 致谢

特别感谢圣地亚哥县监事会的Nathan Fletcher 主席、Nora Vargas 副主席、Joel Anderson 监事、Terra Lawson-Remer 监事和 Jim Desmond 监事在此框架建立过程中的指导和领导。

作者感谢 David Victor 在整个项目中发挥的顾问作用，并且感谢 Joseph Bettles、Tyler Spencer、Emily Carlton、Elissa Bozhkov 和 Jeffrey Myers 的研究和编辑支持，以及 Isaac Wang 的项目管理支持。

项目团队感谢以下个人为圣地亚哥县代表提供战略咨询：Elizabeth King（加州环境保护局）、Jamal Russell Black（圣地亚哥地区政策与创新中心）、Christiana DeBenedict（圣地亚哥基金会）、Everett Au（圣地亚哥基金会）、Amenah Gulamhusein（圣地亚哥基金会）和 Susan L. Guinn（圣地亚哥地区政策与创新中心）。

项目团队也要感谢技术工作组和通过递交书面/口头意见和参加会议以及研讨会贡献了时间和知识的所有参与者和评论者。

## 免责声明

本报告由圣地亚哥县资助。作者声明与圣地亚哥地区相关实体无利益竞争。

引用这份总结报告时应注明：

McCord, Gordon C., Elise Hanson, Murtaza H. Baxamusa, Emily Leslie, Joseph Bettles, Ryan A. Jones, Katy Cole, Chelsea Richer, Eleanor Hunts, Philip Eash-Gates, Jason Frost, Shelley Kwok, Jackie Litynski, Kenji Takahashi, Asa Hopkins, Robert Pollin, Jeannette Wicks-Lim, Shouvik Chakraborty, Gregor Semieniuk, David G. Victor, Emily Carlton, Scott Anders, Nilmini Silva Send, Joe Kaatz, Yichao Gu, Marc Steele, Elena Crete, 和 Julie Topf。圣地亚哥区域脱碳框架：决策者摘要。加利福尼亚州圣地亚哥县。2022 年。

## 引言

全球科学共识不容置疑：世界正在经历一场由人类引起的气候危机，能够有意义地减少温室气体 (GHG) 排放的窗口期即将关闭。<sup>1</sup>人类活动导致温室气体在大气和海洋中快速积累，使地球变暖，引发迅速而令人震惊的变化。《巴黎气候协定》等全球公约和来自立法和行政命令的加州政策均承认，有必要立即跨各行业开展脱碳行动。在过去的外交努力未能在气候变化方面取得足够进展的情况下，将全球承诺和本地需求纳入考量的地区问题解决模式代表着一种更有效的方法。

圣地亚哥区域脱碳框架 (RDF) 技术报告提供了脱碳的中期技术和政策途径，支持地区、县和市政府的近期政策制定。本报告包含圣地亚哥地区到 2045 年实现净零碳排放的科学路径建模，符合《巴黎气候协定》和加州强制令。这些途径为圣地亚哥地区提供了一个共同愿景，以共同减少温室气体净排放，遵循加州净零排放目标。本报告是对能源系统中不同部门可如何支持脱碳的技术分析，但并未确定“正确”的途径。相反，本报告展示了在多个部门实现区域排放目标的多种方法，以突出权衡、协同效应、决策点、风险以及协同作用。随着技术的发展或不确定性的解决或澄清，具体分析和路径应得到更新。为此，本报告探讨了政策流程，以帮助各区域辖区了解不确定性，并在获取信息时及时调整策略。

## 研究框架和主要政策考量

本报告探讨了如何实现圣地亚哥区域能源系统（定义为电力、交通和建筑板块能源生产和消耗总量）的深度脱碳，以符合加州和国家的净零排放实现路径。深度脱碳是指在整个经济中大幅减少二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 和其他温室气体排放的过程。本报告所提及的“净零”是指能源系统中人为造成的二氧化碳排放量等于二氧化碳的人为清除和储存，从而使能源系统的净排放量为零。<sup>2</sup>本区域脱碳框架技术报告不依赖本地区以外的抵消来实现净零目标。很重要的一点是，其他行业的排放（如废物）由于超出了定义的能源系统范围，排除在这项分析之外，后者占区域排放量的 80%。<sup>3</sup>尽管如此，大幅减少其他行业的排放量有许多相关协同效应，减排和/或协同效应也可能符合加州目标，例如，通过废物转移和堆肥减少垃圾填埋场的排放量。

区域脱碳框架技术报告的脱碳路径根据更大的国家和加州深度脱碳场景建模，以确保符

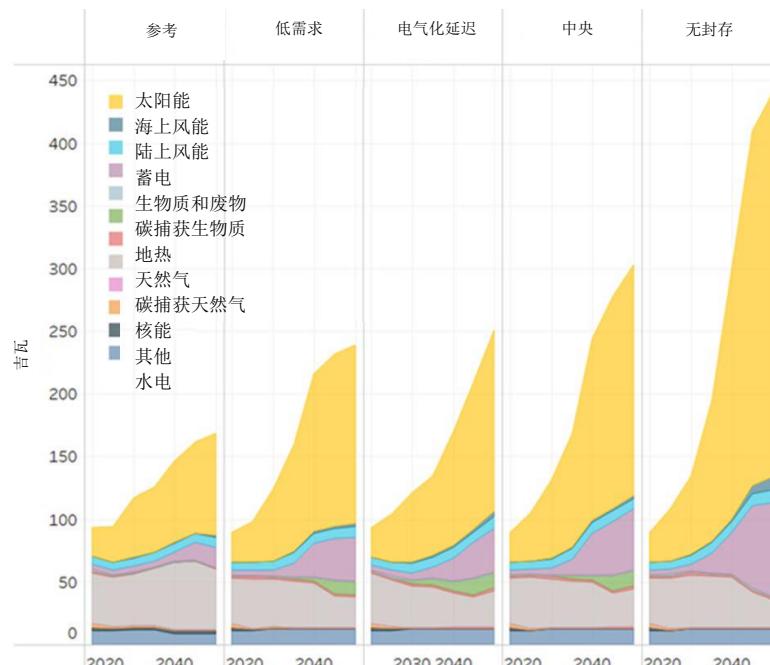
<sup>1</sup>政府间气候变化专门委员会 (IPCC) “气候变化2022：影响、适应和脆弱性。决策者摘要。”第二工作组第六次评估报告，2022年2月。报告访问网址：

[https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_FinalDraft\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_FullReport.pdf)

<sup>2</sup>请注意，能源系统建模仅考虑了二氧化碳排放，而自然气候解决方案和气候行动计划分析还考虑了其他温室气体，例如，甲烷、一氧化二氮等。为了便于比较，将这些温室气体转换为其“二氧化碳当量” (CO<sub>2</sub>e)。

<sup>3</sup>有关研究范围的更多详细信息，请查阅第 1 章和附录 A。有关行业板块对区域排放总量的贡献的更多详细信息，请查阅第 8 章和圣地亚哥政府协会 2021 年区域计划附录 X ([https://sdfoward.com/docs/default-source/2021-regional-plan/appendix-x---2016-greenhouse-gas-emissions-inventory-and-projections-for-the-san-diego-region.pdf?sfvrsn=8444fd65\\_2](https://sdfoward.com/docs/default-source/2021-regional-plan/appendix-x---2016-greenhouse-gas-emissions-inventory-and-projections-for-the-san-diego-region.pdf?sfvrsn=8444fd65_2))。

合全州脱碳路径。Evolved Energy Research (EER) 缩小了加州和国家模型的规模，以开发五种场景下的区域模型（也称为模型案例）。<sup>iv</sup>深度脱碳模型实现了对不同行业板块的区域政策选择和脱碳结果的定量比较分析。EER 的能源行业板块的一个建模输出示例显示了不同模型案例如何影响全州脱碳，包括所需的总电力装机容量（图 1）以及截至 2050 年的能源和工业过程二氧化碳排放量（图 2）。使用这些降尺度的模型的另一个重要原因是当地能源和交通系统与其他地区和州相互关联，因此，本地区辖区在脱碳过程中应与其他地区和州辖区合作。



<sup>iv</sup> 有关模型案例的更多详细信息，请查阅第 1 章和附录 A。

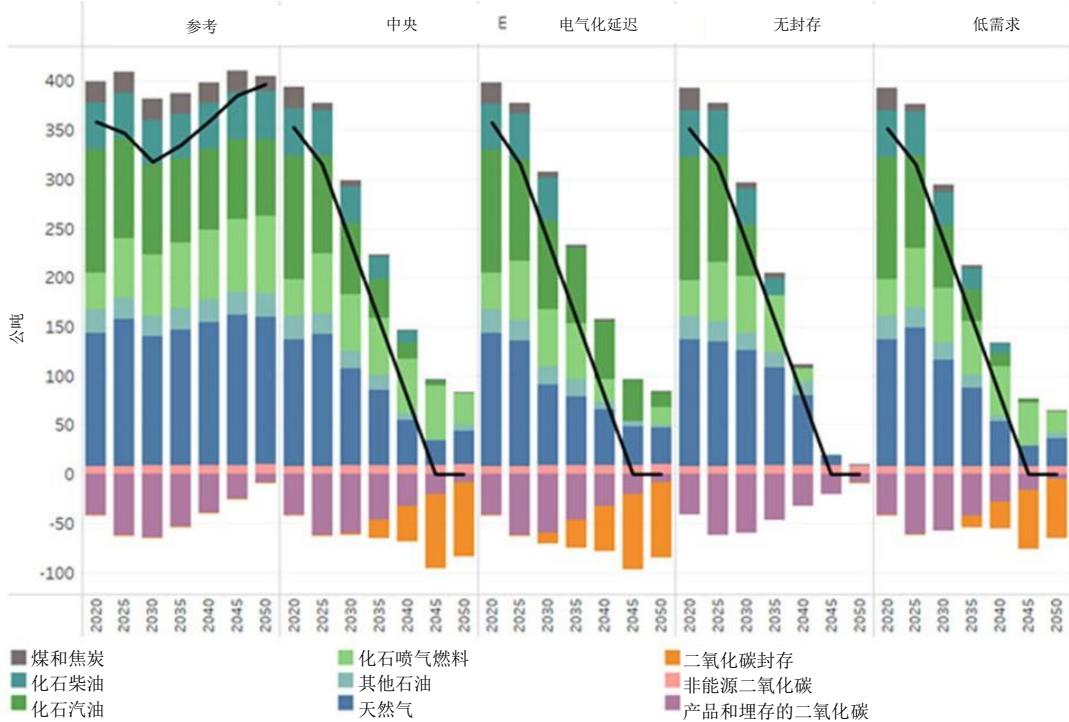
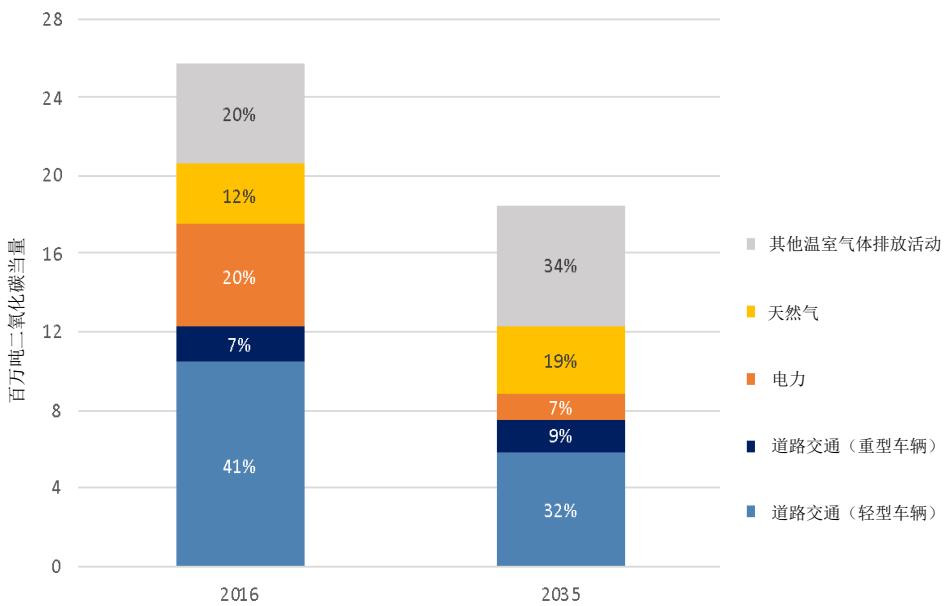


图 2 EER 模型中五种不同场景（或案例）下加州能源和工业过程中二氧化碳排放量的结果。x 轴上方的颜色代表正排放，下方的颜色代表抵消的负排放。黑线表示净二氧化碳排放量。“产品和埋存的二氧化碳”要么是最终被封存在材料中的二氧化碳（例如，沥青在其生产过程中封存二氧化碳），要么是未计入现用清单的二氧化碳减排量（例如，州际航空减排量未计入单个州的排放核算，但州内航空则计入）。

可再生能源生产、交通和建筑领域的专家建立了技术上可行的本地区脱碳路径模型，以创建在本世纪中叶实现净零排放的科学的区域脱碳路线图。这些模型侧重经过验证的可扩展技术，用于实现本地区地方政府和机构管辖范围内最大的温室气体排放者（图 3）的脱碳。这排除了处于实验或早期阶段的技术，因为区域当局无法立即大规模部署此类技术。同样，除了用于了解圣地亚哥地区的资源可用性背景之外，建模工作中并未包含加州和联邦水域的可再生能源开发。

此外，区域脱碳框架技术报告强调了脱碳过程中的不确定性以及可适应技术和政策环境发展的持续规划过程的必要性。例如，因皮里尔县或墨西哥可再生能源供应的增加可能会影响圣地亚哥地区的可再生能源组合，从而避免在当地建设成本更高的可再生能源基础设施。同样，加州和/或联邦海上风能开发也可减少圣地亚哥地区的陆上可再生基础设施开发需求。



**图 3** 以百万吨计的全地区二氧化碳排放当量估算。“其他”类别包括来自工业来源、非公路运输、废物、航空、水域等的排放，这些不计入区域脱碳框架技术报告。请注意，2035年的数字计入了某些州和联邦行动的影响。资料来源：圣地亚哥政府协会 (SANDAG) 2021年区域计划附录 X，访问网址：[https://sdforward.com/docs/default-source/2021-regional-plan/appendix-x---2016-greenhouse-gas-emissions-inventory-and-projections-for-the-san-diego-region.pdf?sfvrsn=8444fd65\\_2](https://sdforward.com/docs/default-source/2021-regional-plan/appendix-x---2016-greenhouse-gas-emissions-inventory-and-projections-for-the-san-diego-region.pdf?sfvrsn=8444fd65_2)

## 主要政策考量

区域脱碳框架技术报告确定了各种“低遗憾”策略，提供针对每个行业板块减少排放量的最低成本和最有效近期解决方案的最佳评估。这些策略代表了短期内的稳健脱碳行动，不考虑不确定因素的影响，其是否是长期最佳途径仍然未知（表 1）。

成功的脱碳有赖于能够适应科学知识和当地政治和经济条件变化的技术解决方案和政策战略。有效的学习和政策调整有赖于地方行动者（包括领导者和一线人员）首先实施最初的解决方案，然后对结果进行系统性持续审查，以推动有意义的学习，了解哪些有效，哪些无效。随着科学和技术的进步以及地方参与者了解在圣地亚哥地区的有效做法，“最佳”解决方案和途径可以而且应该逐渐发生变化。

表 1 四个行业板块路径中的“低遗憾”策略示例。

<p><b>可再生能源选址</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>支持分布式太阳能资源（包括屋顶太阳能和停车场等地方填充式太阳能），特别是在低收入社区。</li> <li>开始在大多数场景均识别的地区（例如，规划的杰卡姆巴山谷牧场 (Jacumba Valley Ranch, JVR) 地区）规划公用事业规模的开发项目。</li> </ul>	<p><b>交通</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>鼓励围绕现有和新的无轨电车站、交通走廊和交通枢纽进行更加密集和混合用途的开发。</li> <li>车队车辆电气化（辖区、机构、学区等）。</li> <li>在新建或扩建建筑中要求安设电动汽车 (EV) 充电设施；简化电动汽车改装的建筑许可要求。</li> </ul>
<p><b>建筑物</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>制定激励措施，鼓励用电动替代品替换报废空间和热水供暖设备。</li> <li>让新建筑“完全电气化”。</li> <li>注重低收入、弱势群体和出租住宅的电气化。</li> </ul>	<p><b>土地利用和自然气候解决方案</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>保护自然和农用地。</li> <li>加强全地区的碳农业。</li> <li>增加城市和郊区的树木、灌木和植物覆盖率。</li> </ul>

区域脱碳框架技术报告提议开展全地区制度化治理，以促进跨辖区持续合作和学习。<sup>v</sup>该结构由地区指导委员会、行业板块工作组和一线顾问组成，团结来自地区各个行业板块的政府官员、规划机构、监管机构、行业利益相关者、专家和一线工作人员，以开展测试、评估和策略调整。建立这种结构是有必要的，因为实现应对气候变化所需的巨大变化和快速学习是一项集体行动。就个体而言，圣地亚哥地区的地方辖区和机构对脱碳所需的一整套行动拥有的权限有限。全地区合作可以通过明确、可信和一致的政策信号、联合解决问题、有效经验汇集以及综合资源以获得更大的影响力和能力，来增加集体影响。正如第 7 章和第 8 章所讨论，区域合作的示例包括制定行动激励措施、收集数据、开展分析、支持政策制定和实施、召集利益相关者和工作组，以及监测进展。区域气候行动联合权力协议 (JPA) 或其他正式机制能够促进此类合作，从而扩大围绕脱碳的战略思维和决策范围。图 4 概述了一个制度化流程，借助在区域脱碳框架中提出的技术解决方案和利益相关者的持续参与，区域治理可以推动每个行业板块有意义的学习。

在这一制度化流程中，区域脱碳框架技术报告还提出了两种与圣地亚哥地区外的参与者和机构合作的策略，以最大限度地提高本地区内的影响。首先，区域脱碳领导者必须不断与外部机构合作，尤其包括州级合作，以影响左右当地工作的政策（例如，可再生能源法规）。其次，地方领导者应利用地区以技术为重点的私营部门和多所大学，将圣地亚哥地区建立为一个试点和示范项目试验台。虽然仅进行区域规模的创新投资不太可能对所有行业板块的技术就绪程度产生重大影响，但是，在其他地方所开发的技术的当地测试和部署能够支持推动最前沿气候解决方案科学发展的全球努力。外部参与不仅能支持当地减排，还能承诺带来外部资源和加州以及联邦政策制定者的关注，对当地经济产生潜在的积极影响。

<sup>v</sup> 有关跨辖区协作和学习的更多信息，请查阅第 7 章。

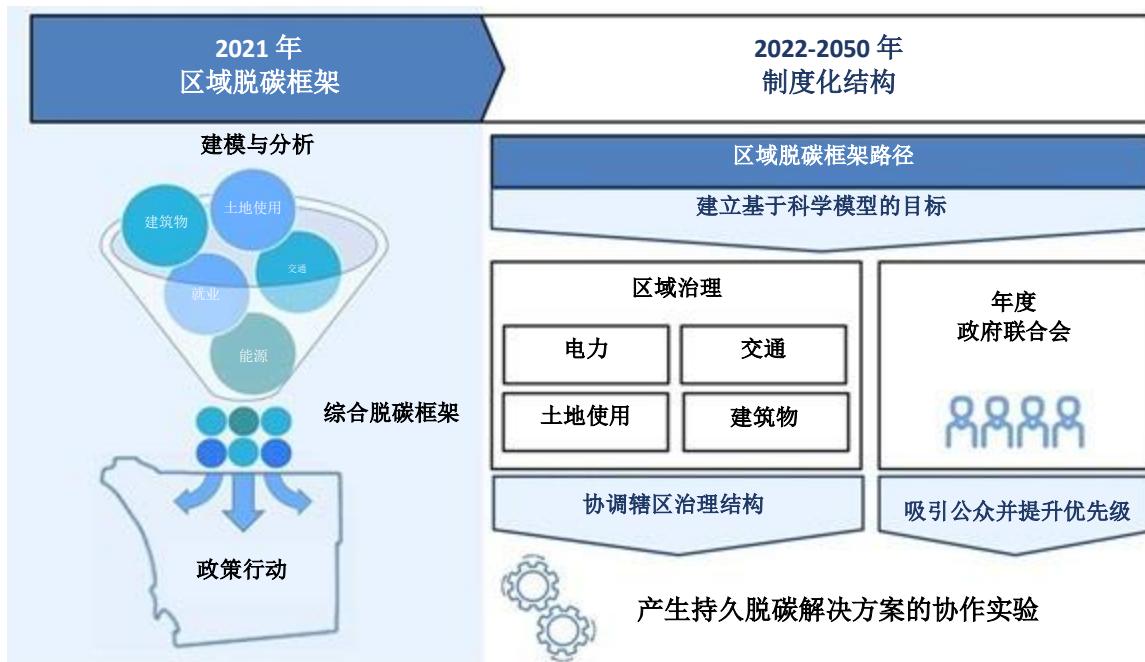


图 4 作为综合脱碳框架和制度化结构一部分的区域脱碳框架技术报告。例如，这种结构可包括圣地亚哥的区域治理机构和政府联合会。

总而言之，区域脱碳框架建议将高度透明的合作流程制度化，以获取有关深度脱碳“有效方法”的新信息，比较区域内最佳做法，并与地区外支持国家战略演变的政策制定者、行业利益相关者和其他专家合作。这些工作不仅能最大化当地减排量，而且有助于圣地亚哥区域对加州和联邦气候政策产生影响，成为其他辖区的有效领导者。圣地亚哥地区仅占全球排放量的 0.08%，因此，吸引追随者是本地区对缓解气候变化产生真正影响的最佳途径。

## 电力脱碳

区域脱碳框架技术报告识别了圣地亚哥地区和邻近因皮里尔县在可再生能源基础设施开发方面的低环境影响、优质以及技术可行性领域。电力排放约占圣地亚哥地区 2016 年区域温室气体排放清单的 20%，是本地区第二大排放源（图 3）。电力生产脱碳有赖于大量部署新的可再生资源。可再生能源基础设施和设施选址会对环境产生重大影响，需要新建以及升级输电基础设施。因此，区域脱碳框架包含了各种土地足迹的不同场景，旨在支持本地区各辖区关于土地使用和可再生能源成本权衡的政治讨论。

圣地亚哥地区有足够的土地可用于风能和太阳能发电，可按照全加州系统模型打建一个完全脱碳的能源系统。然而，要满足可靠性标准，需要各种额外资源的大量且不确定的投资，包括多余间歇性和灵活性发电、蓄电和需求侧管理。通过当地公用事业规模的陆上风能和太阳能开发，本地区预计能够满足 2050 年的能源需求——每年 49,979 吉瓦时

(GWh) (表 2)。然而，在给定时间（如夜间或阴天）的能源需求可能高于或低于可再生能源供应，因此，需要投资于更多蓄能基础设施来为本地区提供可靠的可再生能源。然而，这些额外资源的成本（如电池和抽水蓄能电站）仍有高度的不确定性。

**平准化度电成本 (LCOE)** 是调整后的每兆瓦时 (MWh) 发电成本，包含传输成本，是我们用来比较项目成本的指标。随着不确定性得到解决和基础设施（发电厂、输电线路、互连等）的建成，平准化度电成本既可用来直接比较项目，也提供了灵活性。利用平准化度电成本，可以估算公用事业规模项目的电力批发成本。平准化度电成本包括最初建造风能或太阳能发电厂的成本以及将项目与电网互连的成本，这些成本除以总能源产量即可得出单位能源输出成本。传输成本包含在项目资本成本中，并参照加州独立系统运营商 (CAISO) 传输规划流程文件。平准化度电成本是一种根据单位产能比较不同类别能源项目的方法。例如，可使用平准化度电成本指标，根据每兆瓦时 (MWh) 的成本比较太阳能发电厂与天然气发电厂。

**表 2** 圣地亚哥县和因皮里尔县的候选项目区 (CPA) 和年度总资源潜力。公用事业规模资源是指太阳能、风能和地热资源的大型项目。其他资源来自规模较小的项目，包括屋顶太阳能、填充式太阳能或风能，以及棕地太阳能或风能。地热候选项目区是离散的区域，列为潜在地点数量，而非按总面积列出。到 2050 年，圣地亚哥地区的年总需求估计为 49,979 吉瓦时 (GWh)。

调查结果	圣地亚哥县		圣地亚哥县 + 因皮里尔县	
	仅公用事业规模	包含屋顶、填充和棕地	仅公用事业规模	包含屋顶、填充和棕地
<b>太阳能</b>				
面积 (平方公里)	661	985	3,417	3,741
潜力 (GWh)	54,784	102,925	84,888	109,742
<b>陆上风能</b>				
面积 (平方公里)	86	86	3,712	3,749
潜力 (GWh)	730	730	22,540	22,572
<b>海上风能</b>				
面积 (平方公里)	1,660	1,660	1,660	1,660
潜力 (GWh)	9,869	9,869	9,869	9,869
<b>地热</b>				
场地数量	0	0	5	5
潜力 (GWh)	0	0	10,680	10,680
总可再生资源潜力 (GWh)	65,382	113,523	117,296	142,183
电力资源平衡 (GWh)	15,403	63,544	67,317	92,204

区域脱碳框架技术报告为可再生能源基础设施创建了多个选址场景供决策参考。其中包括成本最低的场景，包含因皮里尔县太阳能、风能和地热资源的场景，将对不同类别土地的影响降至最低的场景，以及包含城市、绿地和棕地场地的不同风能和太阳能资源组合（分布式和公用事业规模）的场景。成本最低的场景（场景 1 和 2）选择了从最低到最高平准化度电成本的公用事业规模的可再生能源场地。其他场景优先考虑不同的政策目标，例如，避开某些土地（场景 3-5）或优先开发某些土地（场景 6 和 7）。其他场景结合了

资源和政策优先事项（场景 8 和 9）。各种场景如下（如需了解数字，请查阅表 3）：<sup>vi</sup>

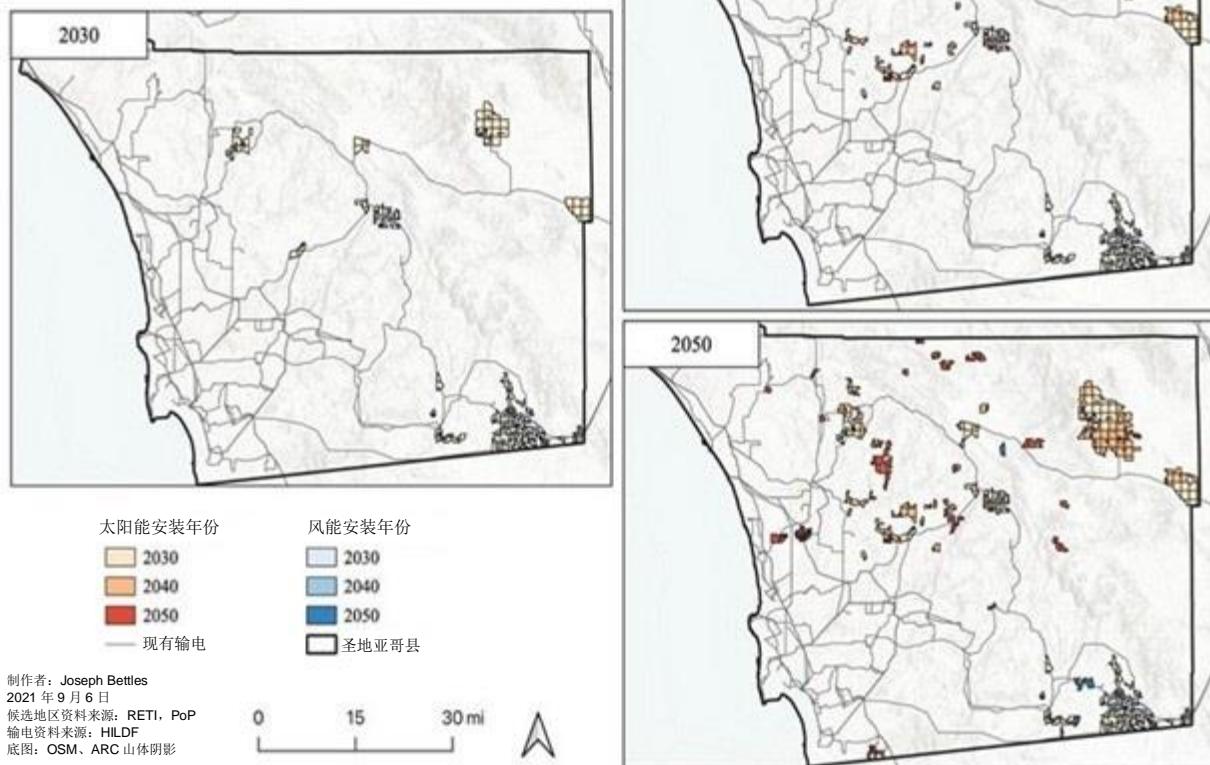
1. 成本最低的高当地容量（仅限圣地亚哥县）（图 5）；
2. 成本最低的高输电能力（圣地亚哥和因皮里尔县）（图 6）；
3. 高保护价值土地损失最低（图 7）；
4. 高货币价值土地损失最低；
5. 高碳封存潜力土地损失最低；
6. 仅使用可开发土地；
7. 填充式和屋顶太阳能场景；
8. 混合模式场景（包括本区域可开发地区和附近地区的输电升级、附近的地热、屋顶太阳能及棕地太阳能和风能，以及电池储存组合）（图 8）；以及
9. 最大限度地利用屋顶太阳能，最大限度地减少对保护区和农业用地的影响。

**表 3** 可再生能源资源潜力和能源短缺与预测需求场景摘要。所有数字均以吉瓦时 (GWh) 为单位。“需求短缺”值是基于 EER 模型中心案例的年度需求估值——到 2050 年圣地亚哥地区将达到 49,979 吉瓦时 (GWh)。

场景编号	场景描述	资源类别	资源潜力 (GWh)	需求过剩（短缺） (GWh)
场景 1	最低成本（仅限圣地亚哥县）	太阳能、风能	49,979	-
场景 2	最低成本（圣地亚哥县和因皮里尔县）	太阳能、风能、地热	49,979	-
场景 3	低环境影响	太阳能、风能	15,777	(34,202)
场景 4	低土地价值	太阳能、风能	52,394	2,415
场景 5	碳封存潜力	太阳能、风能	22,844	(27,135)
场景 6	可开发	太阳能、风能	13,894	(36,085)
场景 7	屋顶和填充式太阳能	太阳能	17,478	(32,501)
场景 8	混合模式资源组合（圣地亚哥和因皮里尔县）	太阳能、风能、地热	50,147	168
场景 9	高屋顶，对保护区影响小，避开高价值农业用地（圣地亚哥和因皮里尔县）	太阳能、风能	44,177	(5,802)

<sup>vi</sup> 有关选址和候选项目区选择数据和方法的描述，请查阅第 2.4.5 节和 2.4.6 节。有关场景结果、讨论和地图，请查阅第 2.5.1 节和第 2.5.2 节。

## 场景 1：圣地亚哥县内太阳能和风能



**图 5** 场景 1：仅限圣地亚哥地区的最低成本方案。这项分析选择了从成本最低到最高的公用事业规模太阳能和陆上风能，以满足预计的能源需求。这三个版图显示了使本地区到 2050 年实现全面的能源脱碳所需的每年的增建。较浅的颜色代表因为更便宜而较早建造的候选项目区。蓝色代表风能资源，橙色/红色代表太阳能资源。此场景的平均平准化度电成本为每兆瓦时 (MWh) 40.65 美元。

## 场景 2：圣地亚哥和因皮里尔县内的太阳能、风能和地热

太阳能安装年份

2030

2040

2050

风能安装年份

2030

2040

2050

地热场地

现有输电

圣地亚哥和因皮里尔县

2050 年圣地亚哥县东南部安装

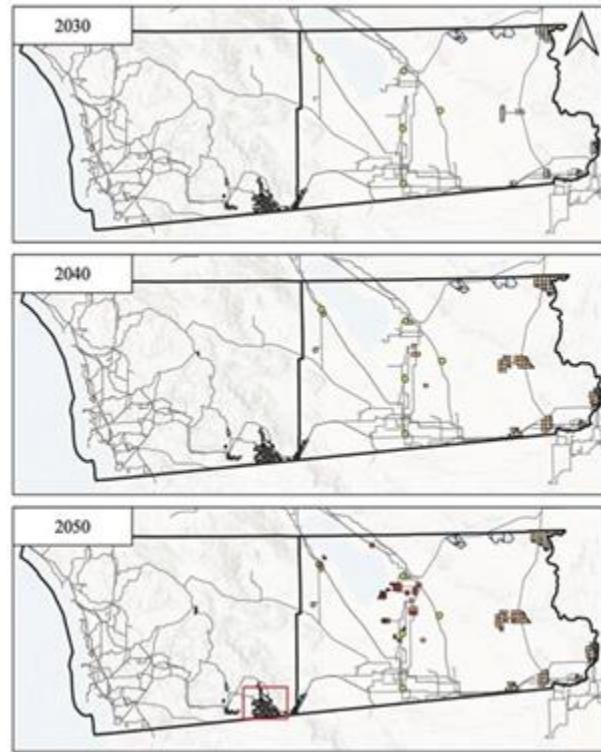
制作者: Joseph Bettles

2021 年 9 月 6 日

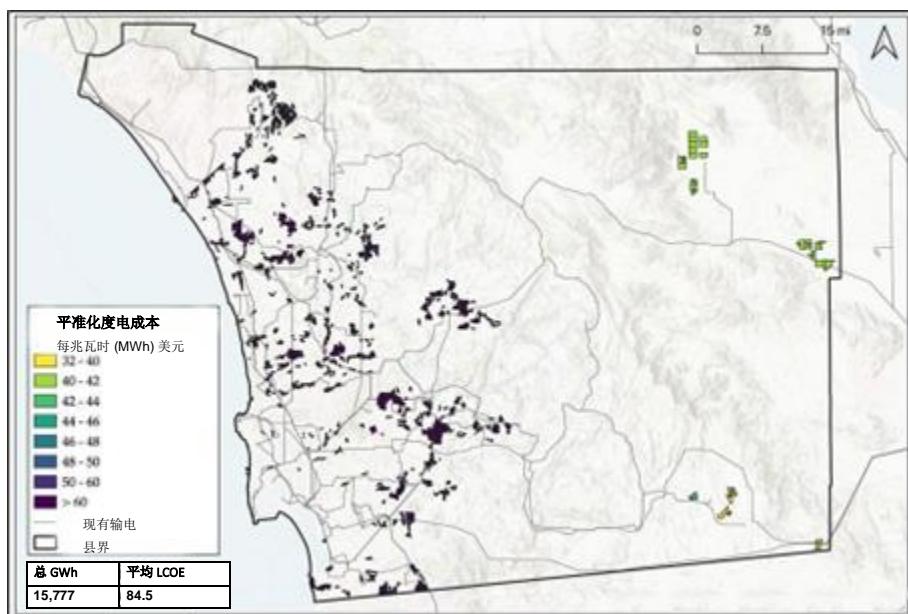
候选地区资料来源: RETI, PoP

输电资料来源: HLDf

底图: OSM, ARC 山体阴影



**图 6** 场景 2：圣地亚哥和因皮里尔县的最低成本方案。这项分析选择了满足预计的能源需求所需的从成本最低到最高的太阳能、陆上风能和地热资源。这些地图显示了三个时间段的增建情况，其中颜色代表增建年份（较浅的颜色较早）和资源（红色/橙色表示太阳能，蓝色表示风能，绿色表示地热）。插图显示了到 2050 年的杰卡姆巴温泉 (Jacumba Hot Springs) 地区选址以及包括在拟建/规划中的杰卡姆巴山谷牧场 (Jacumba Valley Ranch, JVR) 场址的地区。此场景的平准化度电成本为每兆瓦时 (MWh) 42.04 美元。



**图 7** 场景 3：排除保护价值高的土地。此场景将对保护价值高的地区和其他环境敏感或重要地区的影响最小化，但不能满足区域能源需求，而且相对昂贵（平均平准化度电成本为每兆瓦时 (MWh) 84.5 美元）。

混合模式场景利用圣地亚哥县、因皮里尔县或区域实体辖区范围内成熟的可扩展技术组合进行建设，以满足近期（2025 年）和到本世纪中叶的地区需求（如图 8 所示）。这些技术包括棕地基础设施开发（在目前或此前受污染的场地上建造的太阳能和风能基础设施），圣地亚哥和因皮里尔县公用事业规模的太阳能和风能，屋顶和填充式太阳能（其中“填充式太阳能”定义为在密集的城市环境中发展的太阳能项目）和地热（一种清洁的基本负荷电源，不依赖风能、太阳能或其他可变能源）。

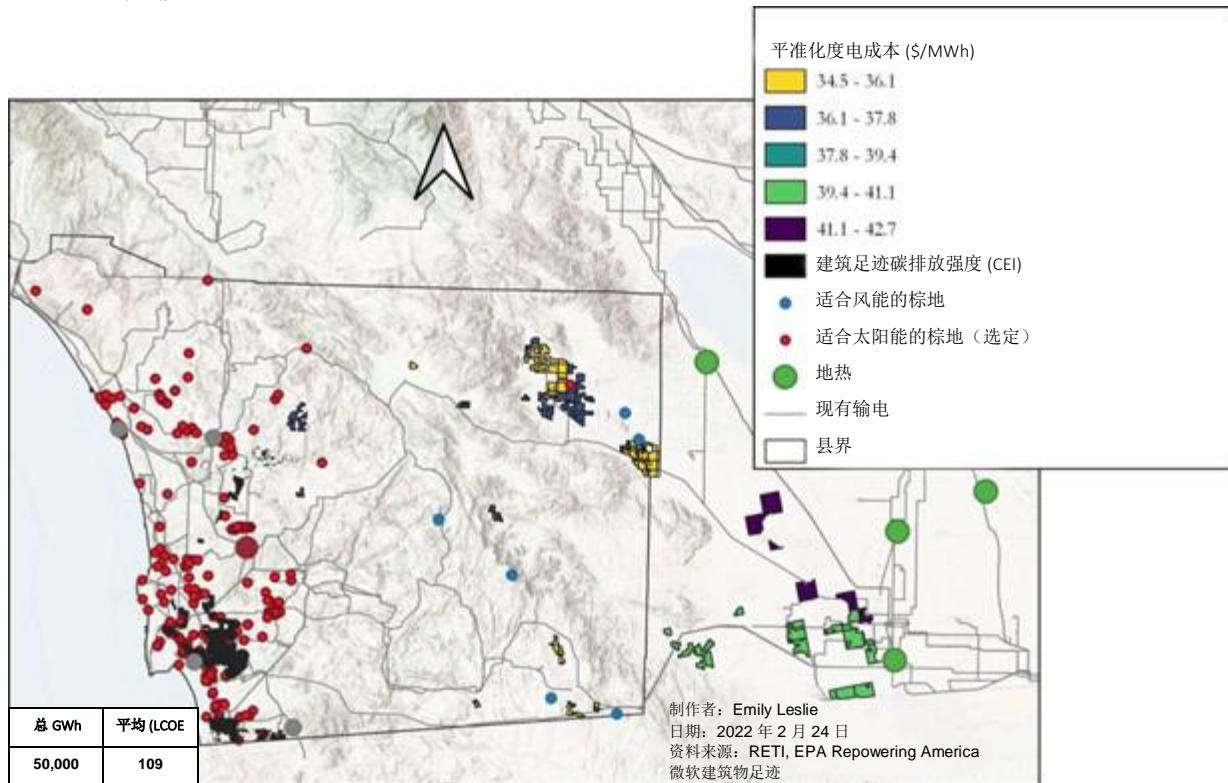


图 8 场景 8: 2050 年混合模式方案。此图显示了使用各种资源满足 2050 年电力需求的选址: 屋顶太阳能 12%、棕地太阳能 23%、棕地风能 0.1%、圣地亚哥县可开发土地上公用事业规模太阳能 6%、圣地亚哥县可开发土地上公用事业规模风能 0.4%、因皮里尔县太阳能 38%、因皮里尔县地热 21%。增加屋顶太阳能和棕地资源的共同结果为土地面积影响减少了 35%。这能满足区域能源需求，但平均成本高（平均平准化度电成本为每兆瓦时 (MWh) 109 美元），部分原因是屋顶和棕地开发以及地热的高成本。

结果中的不同场景存在一些共性，表明这些可能是“低遗憾”可再生能源基础设施选择。可再生能源选址的地理空间分析表明，屋顶太阳能、填充式太阳能和棕地开发减少了自然和农用地的整体土地利用变化。此外，这些资源可为社区带来协同效应，例如，污染降低和经济机会。因此，尽管与公用事业规模开发相比成本相对较高，建设分布式和城市可再生资源属于低遗憾策略，对栖息地、农业和农村社区的影响小，能提供有吸引力的就业培训机会，而目前公用事业规模开发的此类机会很少。<sup>vii</sup>

<sup>vii</sup> 请查阅来自 Inclusive Economics, Inc. 的补充劳动力发展报告，其中详细讨论了公用事业规模的可再生能源与分布式能源的工作质量和可获取度特征。本县网站上提供了这份题为“让圣地亚哥县走上捷径：2030 年和 2050 年气候劳动力建议”的报告：[https://www.sandiegocounty.gov/content/dam/sdc/lueg/regional-decarb-frameworkfiles/Putting%20San%20Diego%20County%20on%20the%20High%20Road\\_June%202022.pdf](https://www.sandiegocounty.gov/content/dam/sdc/lueg/regional-decarb-frameworkfiles/Putting%20San%20Diego%20County%20on%20the%20High%20Road_June%202022.pdf)。

鉴于较高的商业利益及靠近规划或现有可再生能源场地的相对位置，模型在大多数场景中均突出了杰卡姆巴山谷牧场 (JVR) 可再生能源地区。加州规划程序偏向这一地区，其中包括加州独立系统运营商 (CAISO) 和加州公共事业委员会 (CPUC) 的程序，而且该地区可能代表了公用事业规模基础设施扩展的一个低遗憾场景。这些场景都非强制性，而且任何政策决定都需要仔细考虑环境正义，并更深入地了解这些能源开发将对相关社区、低收入社区、农村社区和/或弱势社区产生何种影响。

因皮里尔县拥有大量太阳能和地热资源，可为圣地亚哥地区提供能源，但可能需要升级输电网络。随着在邻近地区（如因皮里尔县、墨西哥或海上）可再生能源基础设施的开发，选址场景将在能源供需迭代分析中发生变化。同样，随着新技术和许可带来额外的可再生能源（例如，海上风能、波浪能等），必须更新场景以考虑这些新资源的能源供应（请查阅表 3 的地热和海上风能数值）。这个框架足够灵活，能够在有额外的可再生能源供应可用时将其纳入考量。

**本地区应与各州政府机构协调，以确保系统的可靠性。**圣地亚哥地区是一个更大的能源系统网络的一部分，因此，跨机构协调必须能够支持未来可再生能源基础设施的决策、规划和实施。例如，加州公用事业委员会 (CPUC) 有州级综合资源计划 (IRP) 的制定流程。全州的负荷服务实体 (LSE) 都是这一流程的当事方，而当地负荷服务实体（例如，圣地亚哥天然气和电力公司 (SDG&E) 和社区选择聚合商 (CCA)）必须每年递交采购计划。这些递交的计划有助于加州预测潜在的可靠性问题，并帮助加州独立系统运营商 (CAISO) 规划适应负荷服务实体计划和气候目标可能需要的输电系统升级。负荷服务实体向加州公用事业委员会 (CPUC) 递交的文件应说明其预期的当地分布式发电、屋顶太阳能、社区太阳能、符合股权条件的承包商项目或其他规格。此外，区域政府官员经常在社区选择聚合商 (CCA) 董事会任职，并参与采购、规划和目标设定。董事会成员可帮助确保负荷服务实体计划的实施符合区域和加州温室气体减排目标。当地方目标比加州目标更高时，这一点尤其重要。

除了综合资源计划 (IRP)，还有其他可从当地参与者的意见中受益的州政府机构程序（例如，加州公用事业委员会 (CPUC) 资源充足性程序、加州独立系统运营商 (CAISO) 输电规划程序，以及加州独立系统运营商 (CAISO) 当地容量要求程序）。在资源充足性程序中，加州公用事业委员会 (CPUC) 的工作人员分析电网可靠性。在输电规划过程中，加州独立系统运营商 (CAISO) 分析计划的输电系统升级的可靠性、政策合规性和成本效益。在当地容量要求程序中，加州独立系统运营商 (CAISO) 开展比其他程序更加本地化的可靠性分析。例如，加州独立系统运营商 (CAISO) 2022 年当地容量技术研究第 3.3.10 节专门适用于圣地亚哥-因皮里尔谷地区。圣地亚哥天然气和电力公司 (SDG&E)、圣地亚哥社区电力公司 (SDCP) 和清洁能源联盟 (CEA) 等负荷服务实体应就采购、资源充足性和这些程序所涉其他问题进行协调。

许多加州目标会影响电力脱碳，包括对某些新建筑屋顶太阳能的要求，电力系统到 2045 年完全脱碳的要求，以及超出加州目标的额外脱碳工作的配额。电力脱碳是最常见的气候行动计划措施分析目标，平均而言对温室气体减排的贡献比任何其他措施都大。大多数气候行动计划都包含一项制定或加入社区选择聚合商 (CCA) 计划的措施，而且其他辖区可

增加社区选择聚合商 (CCA) 参与度或承诺在 2045 年截止日期之前实现 100% 的无碳能源。此外，地方工作可通过采用 *reach* 法规（超出州政府要求的法规）来增强或补充州政府的屋顶太阳能要求，并评估与屋顶太阳能配对蓄能系统的委任或激励措施，以减少电力系统温室气体排放高峰期的边际排放并提高可靠性。

要想提升无碳电力供应的可获取性，还需要做更多的工作。在过去，屋顶太阳能一般安装在收入较高的社区和房屋自有率更高的地区。可利用多种手段解决屋顶太阳能安装的不公平分布，包括有针对性的激励措施和融资。此外，社区选择聚合商 (CCA) 计划可将弱势社区绿色电价计划的参与最大化，补贴符合收入条件的折扣计划参与顾客，使其选择高达 100% 的无碳电力服务，并支持能源升级的包容性融资。

**监管能源生产的法定权限：**<sup>viii</sup> 圣地亚哥地区各辖区有权要求通过气候行动计划提供一定水平的无碳电力供应，并通过社区选择聚合商 (CCA) 采购无碳电力供应，因此可提供比州政府机构的要求更多的无碳能源。然而，州政府和/或联邦机构或实体仍对当地能源供应可靠性进行监管，因此令使用可再生能源实现完全脱碳电力供应变得复杂。此外，地方辖区也获授权支持可提供低排放或零排放电力以满足可靠性和空气品质要求的替代燃料热力发电厂和相关基础设施（例如，绿色氢气生产和/或发电厂）。地方辖区也获授权可简化许可流程，并通过社区选择聚合商 (CCA) 和 *reach* 法规增加分布式发电。鉴于现行州法规和联邦优先权的不确定性，进一步监管大多数化石燃料热力发电厂的排放面临一定的限制。

## 交通脱碳

交通部门是本地区温室气体排放的最大贡献者。2016 年，道路交通排放占区域排放量的近一半。到 2035 年，道路交通排放量预计将占总排放量的 41% 左右（图 3）。<sup>ix</sup> 为了解决这些排放问题，全州立法、行政命令和州政府机构目标均已设定温室气体减排目标。此外，圣地亚哥地区已采取措施减少区域交通温室气体排放，包括各种车辆行驶里程 (VMT) 的减少和车辆电气化策略。

本地区在减少交通相关排放方面有强大的政策基础。然而，通过气候行动计划和其他政策做出的现有承诺不符合加州行政命令要求的碳中和减排规模。即使是通过减少车辆行驶里程、采用电动汽车和燃油效率战略来减少道路交通排放的最佳气候行动计划承诺，如果应用于整个地区，预计也无法实现加州零排放目标。

根据现有的区域性政策和车辆拥有、出行行为和土地使用开发模式，仍有机会加速电动汽车采用和车辆行驶里程的减少。现行政策及消费者、驾驶员和开发商的行为已在增加电动汽车的采用率并降低车辆行驶里程。然而，还有其他机会可加速本地区的交通脱碳。为了减少车辆行驶里程 (VMT)，辖区可注重公共交通走廊、铁路和无轨电车站周围的高密

<sup>viii</sup> 有关法定权限的进一步讨论，请查阅第 8 章第 8.7 节“电力供应脱碳”和附录 B。

<sup>ix</sup> 有关交通气候行动计划承诺的详细分析，请查阅第 8 章第 8.5 节。请注意，此数值包括预计的电动汽车销售变化，但不包括气候行动计划措施。

度开发，并加强公共交通和主动交通（例如，骑自行车和步行）。采用“智能型增长”政策可改善城市和郊区的连通性，鼓励混合用途开发，通过改变区划缩短行程长度，并抑制免费停车。<sup>x</sup>为了进一步减少排放，辖区可以制定和执行现行反怠速要求（尤其是在学校周围），识别交通稳静化措施的执行区域，并提供驾驶员行为激励措施。此外，地方辖区可影响车辆退役，可在相关社区优先考虑，以迅速减少当地空气污染负担。最后，地方政府可在现有和未来车队中提供公共电动汽车充电站并使用替代性低碳燃料和电动汽车（特别是中型和重型车辆），以增加零排放车辆 (ZEV) 的采用率。图 9 显示了增加零排放车辆采用率的政策机会清单，说明了出于有效性（即政策对于增加零排放车辆采用率的有效性）和广度（即可影响多少人）考量的政策选择。

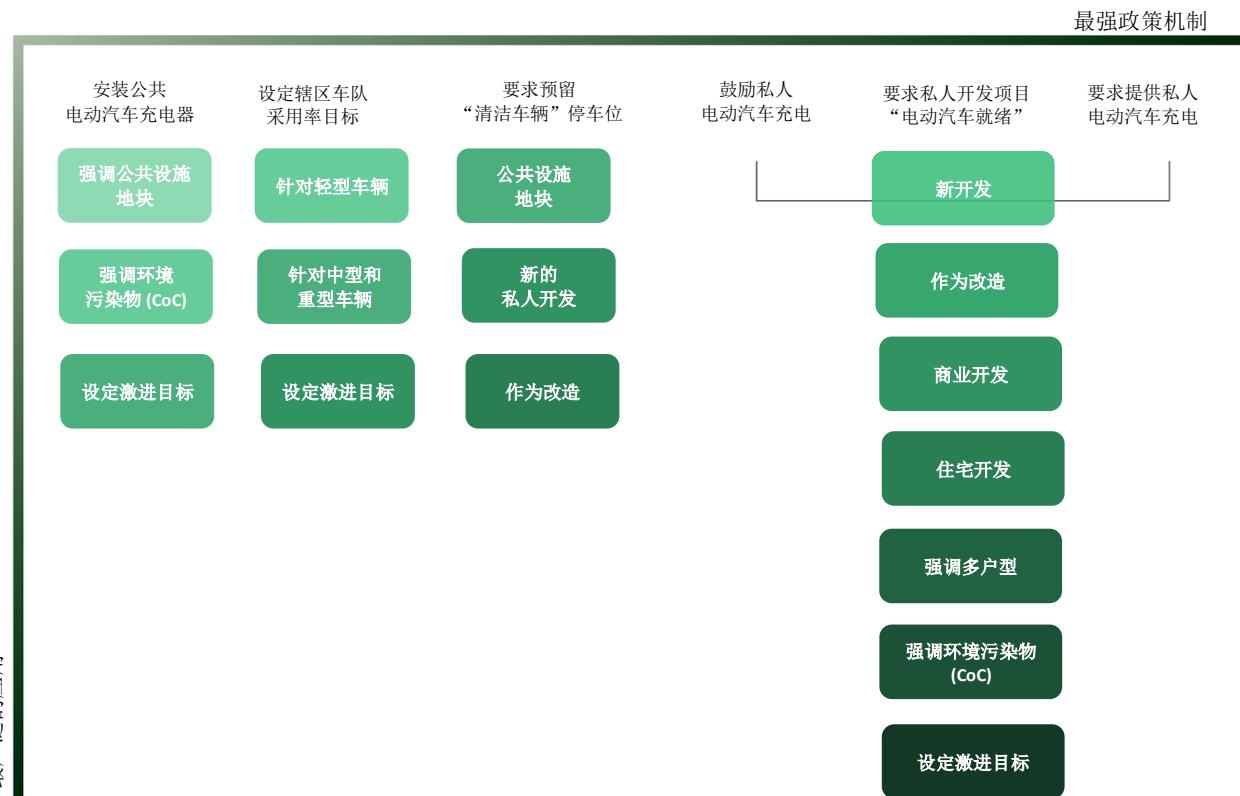


图 9. 加速零排放车辆采用的一系列政策选择。政策越向右可能会更有效，越向下可能应用会更广泛。因此，右下角预计最有效而且显示的政策措施的应用最广泛，左上角预计最不有效，且显示的政策措施的应用最狭窄。

存在多种区域性合作和协调机会。道路交通和协调交通决策的现有机构的性质表明，在交通脱碳方面的区域性合作将比单独的气候行动计划措施更有效。社区选择聚合商 (CCA) 提供了一个地方机制的范例，通常可通过联合权力协议 (JPA) 在加州和联邦计划之外发展本地电动汽车采用激励计划，支持交通电气化。与之类似，还可识别可促进将地方资金用于交通脱碳的其他区域协作。地方辖区可进一步合作，评估投资于电动汽车部署或增加各个社区公共交通的公平性和有效性，并将区域交通公平性分析（如圣地亚哥政府协会 (SANDAG) 公平性分析）与气候行动计划公平性分析（如圣地亚哥市公平性分析）相互统

<sup>x</sup> 第 3 章已经识别了在填充式地区增加密度的机会。第 8 章更详细地说明了如何降低车辆行驶里程 (VMT)。

一。

**监管交通脱碳的法定权限：**<sup>xii</sup>圣地亚哥地区的地方辖区和机构基于当地的规划和开发土地使用权以及加州和联邦政府授予的权限，拥有广泛的交通管辖权限。但是，此类授予权限会受到加州或联邦法律的限制或取代，燃料和尾气排放法规便是其中一例。地方辖区可根据其权限制定气候变化政策和法规，以在总体规划 (GP)、气候行动计划、区划或以公交为导向的发展法规中减少交通产生的温室气体。此外，地方辖区还可以要求在建筑中安装燃料转换基础设施（例如，电动汽车充电设备），建设公共通行权或公共土地配套基础设施，并支持替代燃料（如氢气）的生产和基础设施。地方辖区可通过购买、维护或更换车队来管理自己的车队，还有权监管间接交通排放，以使当地排放符合联邦和加州空气品质标准。加州法规和规章创造了一个通过将加州资助的项目带到本地区（尤其是关注社区）并部署由加州或联邦资助开发的技术，协调地方行动以降低实施成本的机会。最后，与气候行动计划中的承诺相比，辖区似乎拥有更多的法定权限，能通过土地使用、交通基础设施选址、授权和征税权力来减少交通温室气体。需要开展更多工作方可评估地方权限在增加道路交通温室气体减排方面的限制。

## 建筑脱碳

区域脱碳框架技术报告研究了本地区基础设施和建筑部门的建筑组合和相关排放。建筑直接排放来自现场化石燃料燃烧，会增加区域温室气体排放（图 3）。这项分析的重点是将造成最终用途排放的系统（如空间供暖和热水供暖）电气化，并在电气化尚不可行时使用低碳燃料（如生物甲烷和氢气）。本章考虑了到 2050 年实现无碳建筑行业的三种模拟路径：强调化石燃料系统高度电气化的路径，使用高效电热泵的路径，以及在电气化缓慢进展期间使用低碳燃料减少排放的路径。<sup>xii</sup>

**脱碳发展的低遗憾近期行动有数项。**首先，用电气系统替换报废的化石燃料供暖系统是近期的优先事项，因为一些现有化石燃料系统截至 2050 年只会更换一次。其次，通过建筑能源法规为新建筑和重大改造设置“电气化就绪”或“完全电气化”标准，降低从化石燃料过渡的相关成本。第三，改进数据收集是制定未来政策的低成本基础行动。在决策者制定政策、令建筑部门对净零碳地区目标做贡献之际，关于建筑物排放和脱碳的更多数据将为他们提供有力支持。

**用电力系统取代基于化石燃料的空间供暖和热水供暖系统应是建筑物减排的主要政策重点。**空间供暖和热水供暖能耗占供应给圣地亚哥天然气和电力公司 (SDG&E) 服务区住宅建筑天然气的绝大部分（图 10）。商业建筑的能源消耗更加多样化（图 11），但空间和热水供暖仍占总能耗的很大一部分，约三分之二的商业建筑空间供暖设备使用天然气。用电气系统取代空间和热水供暖系统及其他化石燃料系统（如烤箱和烘干机）将带来显著建筑脱碳效果。目前用于空间和热水供暖的热泵技术易于获取，而且每单位耗能供热优于天然气系统，因而特别适合电气化。针对建筑温度调节，电气热泵可从同一单元同时供暖和制冷，是未装空调住房的理想选择。

<sup>xii</sup> 有关法定权限的进一步讨论，请查阅第 8 章第 8.5 节“交通脱碳”和附录 B.

<sup>xiii</sup> 有关模拟路径的更多详细信息，请查阅第 4 章第 4.4 节和本章其他部分。

因此，区域性政策应支持在新建筑和现有建筑中越来越多地采用高效热泵空间供暖和热水供暖系统替换化石燃料系统。

此外，旨在替换化石燃料空间供暖和热水供暖系统的政策应注重为低收入居民和出租建筑业主提供援助以提高采用率。此类政策能解决室内空气污染和公用事业成本导致的住房品质、环境不公和健康差异等方面的历史性不平等。此外，还能确保建筑脱碳令低收入居民和租房者同意受益，而不是只能支付越来越高的天然气费。

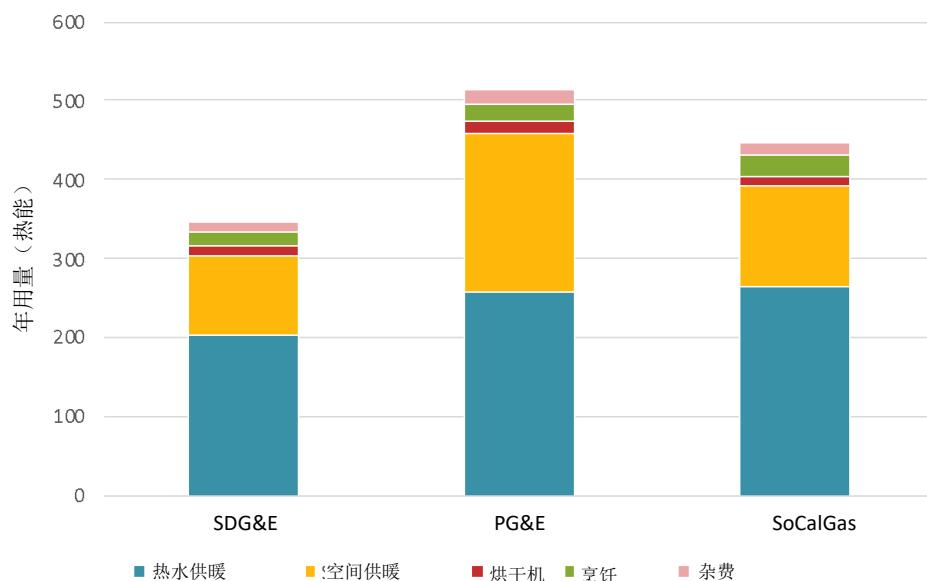


图 10 将天然气作为主要最终用途的主要燃料的家庭按最终用途和公用事业单位划分的年平均天然气用量（以热能为单位）。资料来源：DNV GL 能源洞察力 (DNV GL Energy Insights) (2021 年)。2019 年加州家用电器饱和度研究 (RASS)。

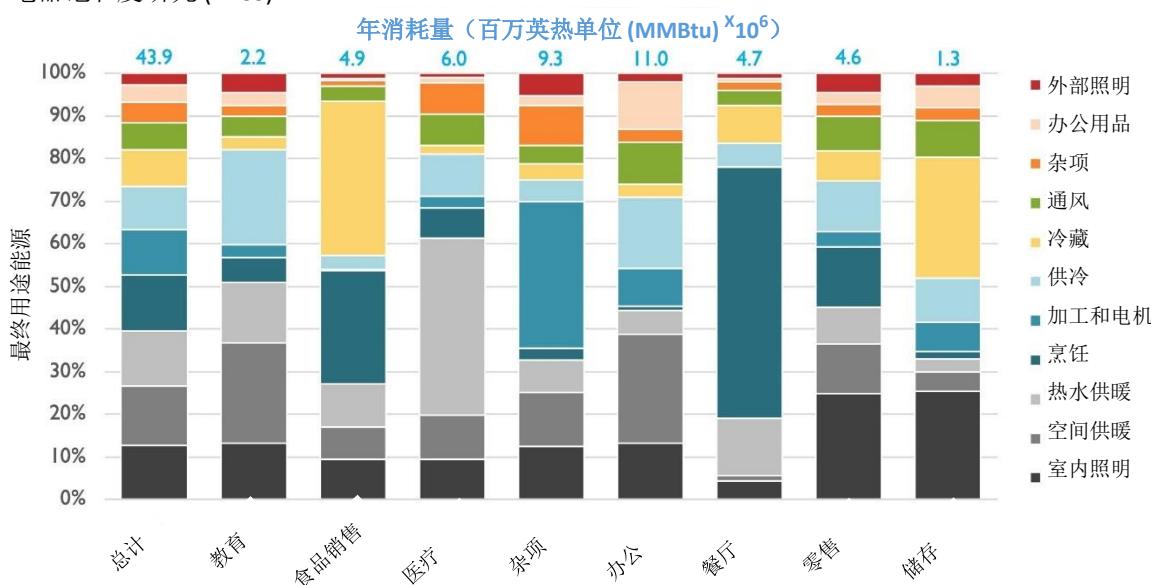


图 11 按商业建筑类别划分的圣地亚哥区域能源最终用途概况。比例是基于每个建筑行业板块的最终用途能源总量。图顶部以蓝色显示每种建筑类别年能耗，以百万英热单位 (MMBTU) 计。浅灰色（每条从底部倒

数第三个）是热水供暖，中灰色（每条从底部倒数第二个）是空间供暖。每个系统的天然气消耗量因商业建筑类别而异，但是，空间和热水供暖仍代表主要的天然气消耗，如最左边一列（“总计”）所示。资料来源：Synapse 模型。

**现有和新建建筑的脱碳政策至关重要。**到 2050 年将存在的建筑的 80% 现已建成，因此，建筑行业脱碳需要对现有建筑存量进行脱碳。虽然加州建筑法规（如第 24 篇）对某些现有建筑的改建和增建进行了规定，地方政策仍能进一步鼓励或要求许多其他方面的能源效率和电气化。<sup>xiii</sup>例如，通过高成本效益的电气化令市政建筑脱碳可以降低运营成本，并可能鼓励业主效仿，使之成为一项低遗憾政策。

为了使新建筑脱碳，辖区可为新建筑制定当地的“电气化就绪”或“完全电气化”标准。卡尔斯巴德、恩西尼塔斯和索拉纳海滩等市已采纳的本地完全电气化法规或条例超出了加州或联邦法规或条例要求的范围，政策制定者可从中吸取经验教训并获益。

**低碳气体燃料可用于难以电气化的最终用途，但需要开展研究和试点。**一些建筑系统难以完全电气化，因此，减少这些系统温室气体排放的一种方法就是使用不会产生大气温室气体净排放的燃料。<sup>xiv</sup>此类燃料同样也可在电气化之前用于这些或其他系统。低碳气体燃料可包括生物甲烷和/或氢气。然而，这些替代燃料中的每一种都有成本和效率的权衡及不确定性，因此在实施之前需要更多的研究和试点。

**最大限度地减少对天然气管道系统的不必要扩展或更换，并加速现有公用事业资产的折旧，降低天然气公用事业公司无法收回其资产投资的风险（即搁浅成本风险）。**逐步淘汰建筑内最终用途天然气消耗可能会导致资产搁浅，定义为在使用寿命结束之前关闭的基础设施。由于建造或更换天然气基础设施的资本成本很高，对于像圣地亚哥天然气和电力公司 (SDG&E) 这样的公司来说，搁浅资产代表着潜在的财务损失。减少此类搁浅资产将是一项重要的政策考量。<sup>xv</sup>其中一个步骤是尽量减少不必要的管线扩展或更换。要求新建筑全面电气化的政策能减轻新客户管道投资带来的搁浅资产损失，但不会影响老化基础设施的更换。探索和试验新的和替代基础设施的非管道替代方案或许有助于识别降低风险的机会（包括最终用途电气化，而非更换基础设施）。

**气候行动计划所包含的建筑电气化措施相对较少，而且这些措施对温室气体的影响也相对较小，尽管该行业板块对区域脱碳非常重要。**圣地亚哥只有七项气候行动计划包括与建筑电气化相关的措施，而且，气候行动计划中与效率和电气化相关的温室气体减排量较低。<sup>xvi</sup>与第 4 章所述新建和现有建筑所需电气化水平相比，气候行动计划措施未能达到区域脱碳框架技术报告所述建筑脱碳路径结果。

---

<sup>xiii</sup> 有关地方当局现有建筑脱碳行动示例的更多详细信息，请查阅第 8 章第 8.6 节。有关当地示例，另请查阅第 7 章第 7.3.1 节。

<sup>xiv</sup> 其中一个示例就是为地理建筑集群提供高温蒸汽或热水的地区能源工厂。圣地亚哥地区有几个此类系统，服务于军事基地、医院或大学。系统运营商应评估低碳燃料和电力供暖技术的相对成本和收益（例如，大容量热泵、热回收冷却器和电锅炉）。

<sup>xv</sup> 在撰写本报告时，公用事业委员会正在根据 R2001007 程序评估加州长期天然气规划的关键环节。

<sup>xvi</sup> 请查阅第 8 章图 8.33，详细了解与建筑电气化相关的气候行动计划承诺。

有机会也有必要评估制定脱碳政策的社会公平性考量。更换电器成本高昂，因此，建筑脱碳政策应考虑公平地激励电气化，特别是在关注社区、低收入社区、农村地区和针对租房者。需要开展更多工作开发相应能力和工具，以了解和解决圣地亚哥地区的建筑脱碳政策的公平性问题。

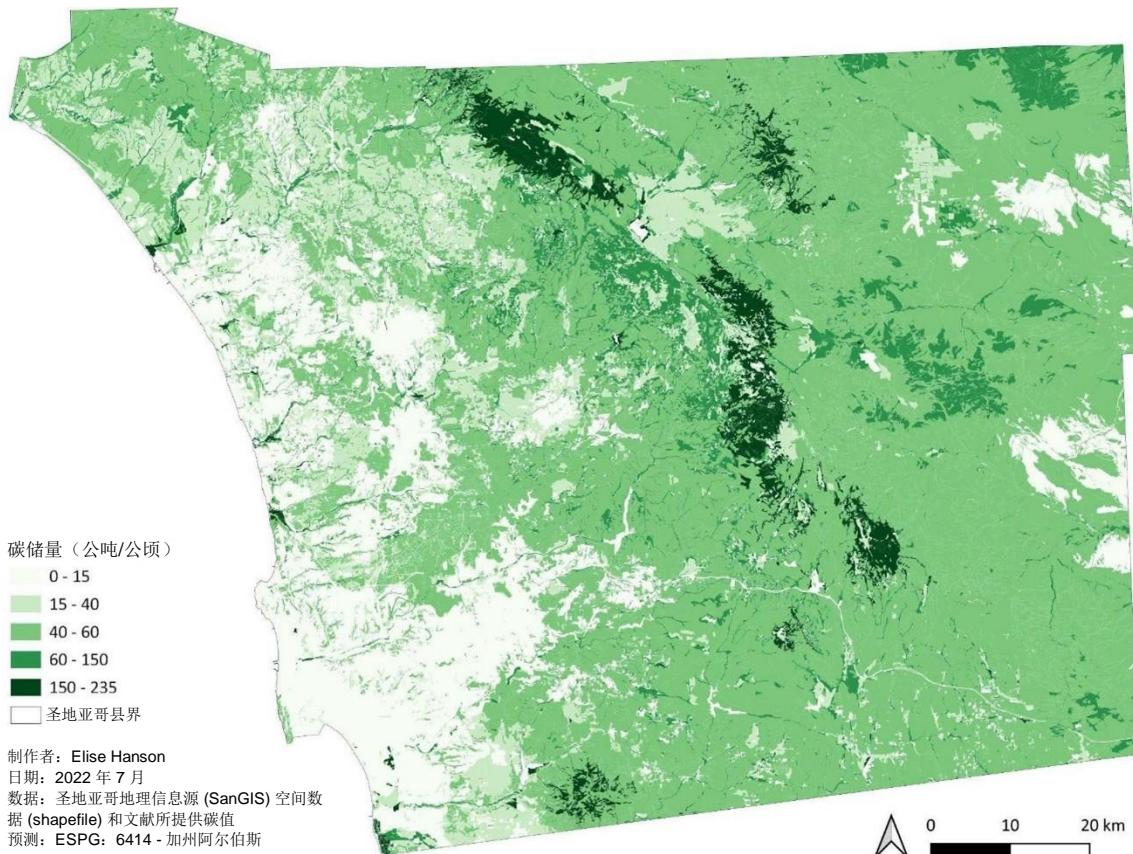
**监管建筑脱碳的法定权限：**<sup>xvii</sup>地方辖区有权监管建筑最终用途中化石燃料和其他能源产生的温室气体排放，这代表着建筑脱碳的主要手段。地方辖区还具备对建筑环境采取以下行动的授权：要求更严格的能源法规，直接监管建筑空气污染排放，并为公共建筑采购替代能源供应。《加州环境品质法》(CEQA) 还可能设置了更严格的阈值以确定环境影响。地方政府则无权制定能源效率电器标准，监管天然气供应、传输和储存以及全球变暖潜能值高的制冷剂（例如，氢氟碳化合物）。

## 自然气候解决方案

区域脱碳框架技术报告调查了圣地亚哥地区可用的自然气候解决方案 (NCS) 及其自然封存和储存二氧化碳和其他温室气体的潜力。自然气候解决方案是一些用来保护或增强自然和农用地 (NWL) 通过植物和土壤从大气中捕获和封存温室气体或减少其排放的能力的过程。“农用地”包括果园、葡萄园、草地、苗圃、牧场、农田等农业用地。“封存”是每年从大气中移除了多少温室气体的量度，而“储量”是已在植物和土壤中封存的温室气体总量。现有碳储量（图 11）通常稳定，如果不受干扰，可储碳数十年，因此，周密的区域规划可最大限度减少会排放这种储碳的土地利用变化。通过了解某个地形的碳储量和封存潜力，即可保留碳储量高的地区，并保护封存潜力高的地区。

---

<sup>xvii</sup> 有关法定权限的进一步讨论，请查阅第 8 章第 8.6 节“建筑脱碳”和附录 B。



**图 11** 圣地亚哥地区总储碳（以公吨计算的每公顷二氧化碳当量）估计值。较深的颜色代表较高的碳储量估算值，较浅的颜色代表较低的碳储量估算值。根据这些值，计算了每个植被类别的全区域碳储总量，列于表 5.2 中。请注意，由于不包含在圣地亚哥地理信息源 (SanGIS) 空间数据中，鳗草床并未包括在内。然而，鳗草床在米申湾和圣地亚哥湾都很普遍，是重要的蓝碳栖息地。

本地区自然和农用地能封存和储存大量二氧化碳，但数量不足以抵消人为排放。自然和农用地可成为比目前更强大的净汇，但这有赖于自然气候支持解决方案的投资和最大限度地减少土地和土地使用活动的碳排放。为了准确计算土地使用的净碳排放，需要收集当地数据并整合到地区碳计算中。本地区可通过以下行动来扩大年度碳封存和长期碳储存：投资增加自然封存和减少土地排放的自然气候解决方案（如保护自然和农用地），投资于“碳农业”，恢复和扩大“蓝碳”栖息地，在城市地区种植树木和其他植物，防止大规模毁坏性野火，并在自然和农用地植树或以其他方式恢复土地。收集当地数据并整合到自然气候解决方案政策、激励措施和管理技术中有助于增加区域封存量。

通过保护自然和农用地来避免土地使用变化是圣地亚哥地区最有效和最廉价的自然气候解决方案政策，除非其他脱碳行动致使有必要改变土地使用（例如，可再生能源基础设施选址）。现有自然和农用地是天然碳汇，因此，阻止这些土地的城市化可实现持续的年度封存，并防止因植被移除、土壤扰动等造成的一次性排放。本报告估计，在理想的情况下，自然和农用地的自然年度二氧化碳封存量可能高达 2 百万公吨 (MMT)，并可能有 58 MMT 的二氧化碳封存在植被、木屑、落叶和土壤中，其中一些会随土地使用变化而释放。

住房开发和可再生能源基础设施选址是重要活动，需要改变一些土地使用。实施这些改变以最大限度地减少对具有大量天然碳储存、高封存潜力和/或高协同效应（例如，改善空气和水质、保护生物多样性和支持公共卫生的栖息地）的自然和农用地影响将至关重要。

**尽管能产生重要的协同效应，区域脱碳框架技术报告考虑的其他重要区域自然气候解决方案的碳封存可能效果较差和/或成本较高，包括碳农业（增加碳封存和储存并最小化农田温室气体排放的农业实践）、增加湿地范围和品质（通过保护、恢复和扩大实现）以及城市林业和绿化。**出于排放和许多其他经济、生态和社会原因，野火预防也很重要。大规模栖息地恢复和重新造林成本高昂且可能无效，未在本报告中加以考虑。其他自然气候解决方案选择需要大量资本投资，而带来的短期封存回报一般较保护方案更小。

**除了脱碳之外，自然气候解决方案还提供可量化的协同效应。**每项得到分析的自然气候解决方案都提供了许多可量化的协同效应。这些协同效应包括但不限于改善空气和水质，改善公共卫生成果，保护生物多样性，保护生态系统功能，通过遮阴减少热岛效应，改善城市地区美化，减少农场和牧场的用水和用肥需求，以及增强环境正义的潜力。在制定和实施政策建立生态、经济和社会恢复力时，应考虑这些协同效应。

**所有自然气候解决方案决策都必须以公平性考虑为中心。**应从脱碳和公平性这两个角度看待自然气候解决方案。城市绿化、植树、气候农业和栖息地恢复项目应尽可能优先考虑关注社区，因为这些自然气候解决方案在改善空气和水质及公众健康方面可发挥超大协同效应。自然气候解决方案有助于解决历史上的不平等和环境不公正。

与这个路径相关的唯一量化气候行动计划措施就是城市植树，但也有机会以协作的方式实施更多自然气候解决方案。有可能根据当地土地使用权采取更多措施。植树措施对气候行动计划中当地温室气体减排的贡献平均略高于 1%。可以通过辖区合作进一步提升这一数字。在现有授权下，可采取更多的自然气候解决方案气候行动计划措施，支持自然和农用地的土地保护、保存和恢复。私人土地所有者和部落政府也能保存土地、测试和资助碳清除和储存试点项目，并与公共机构合作。通过集体努力，有机会扩大对自然和农用地的保护，以履行要求建立自然和农用地碳清除和储存项目的 2021 年新的加州第 27 号参议院法案 (SB) 强制令。

同时还有机会将当地数据纳入土地管理和规划以及气候行动计划。例如，气候行动计划可利用各机构和大学的公开数据以及加州空气资源委员会 (CARB) 等机构的公开碳核算方法，制定更强有力的目标和措施。此外，本地区可实施定期碳核算并长期跟踪自然和农用地碳储量，以了解土地使用决策带来的排放、保存和储存趋势。

**监管自然气候解决方案和土地使用产生的负排放的法定权限：**<sup>xviii</sup>目前尚不清楚地方辖区在土地使用、区划、土地保存和农业地役权方面的权限是否延伸到超出指定土地用途的私人自然和农土地上的活动，从而对温室气体排放或封存造成影响。由于本地区由联邦、州、

---

<sup>xviii</sup> 有关法定权限的进一步讨论，请查阅第 8 章第 8.8 节“自然气候解决方案”和附录 B。

部落和私人拥有的土地、水下土地和水域的组成，土地使用管辖权更加复杂。各种法规和机构负责监管不同的土地，但没有一个侧重与土地使用有关的温室气体排放或封存。州政府土地使用和监管机构还在工作中使用各种法规强制令，其适用于多方管辖的土地，并影响温室气体排放和核算。加州的法规和行政命令要求州政府土地使用机构对自然和农用地的温室气体排放进行核算。此外，这些州政府机构也开始评估和监管这些土地上的碳清除和储存，并制定了重要的 2030 年目标。地方辖区有机会与土地所有者和管理者合作，以实现与自然和农用地相关的州、地区和地方目标。

## 圣地亚哥地区脱碳的就业影响

区域脱碳框架技术报告计算了 EER 模型中模拟的脱碳路径中心案例带来的能源部门就业净变化。根据加州 2030 年就业和气候行动计划，分析注重 2021-2030 年的就业变化，为劳动力发展战略提供了信息。此外，本报告根据 EER 模型中的完整时间表，分析了 2020-2050 年的总体年均新增就业岗位。为了逐步淘汰化石燃料和建模相关的失业，这项分析侧重 EER 模型的中心案例估计基于化石燃料的活动将适度减少的 2021-2030 年这一时间段。这主要是由于该模型估计相对于目前水平会，到 2030 年天然气消耗呈稳定，而石油消耗会下降 20%。区域脱碳框架技术报告侧重能源、建筑和交通行业板块深度脱碳工作对就业的量化影响，并为关于劳动力发展战略的包容性经济学报告提供信息。<sup>xix</sup>

**2021 年至 2030 年期间，该中心案例脱碳路径将在圣地亚哥地区平均每年创造近 2.7 万个直接、间接和衍生就业岗位。**这些新的就业岗位将来自能源需求（表 4）和供应（表 5）方面的支出，对每年新增就业岗位总量的贡献大致相等。<sup>xx</sup>请注意，化石燃料行业带来的劳动力机会将持续到 2030 年。

---

<sup>xix</sup> 题为“让圣地亚哥县走上捷径：2030 年和 2050 年气候劳动力建议”的包容性经济学报告访问链接：

[https://www.sandiegocounty.gov/content/dam/sdc/lueg/regional-decarb-frameworkfiles/Putting%20San%20Diego%20County%20on%20the%20High%20Road\\_June%202022.pdf](https://www.sandiegocounty.gov/content/dam/sdc/lueg/regional-decarb-frameworkfiles/Putting%20San%20Diego%20County%20on%20the%20High%20Road_June%202022.pdf)。

<sup>xx</sup> 有关这些就业岗位的更详细说明，请查阅第 6 章第 6.3 节。

表 4 圣地亚哥地区 2021-2030 年能源需求支出每年平均创造的就业岗位数量, 按行业次级板块和技术分类。这些数字假设年均生产力增长 1%。

投资领域	平均年支出	直接就业岗位	间接就业岗位	直接就业岗位 + 间接就业岗位	衍生就业岗位	直接就业岗位 + 间接就业岗位 + 衍生就业岗位
车辆	77 亿美元	3,427	1,427	4,854	1,508	6,362
暖通空调 (HVAC)	8.97 亿美元	1,345	699	2,044	764	2,808
冷藏	7.619 亿美元	1,315	491	1,806	711	2,517
家电	1.886 亿美元	143	77	220	78	298
建筑	1.134 亿美元	263	149	412	146	558
照明	1.066 亿美元	177	95	272	100	372
制造	4,570 万美元	40	32	72	27	99
其他商业和住宅	3,890 万美元	59	30	89	33	122
农业	1,720 万美元	144	21	165	45	210
矿业	240 万美元	1	1	2	1	3
总计	99 亿美元	6,914	3,022	9,936	3,413	13,349

资料来源: IMPLAN 3.1

表 5 圣地亚哥地区 2021-2030 年能源供应投资每年平均创造的就业岗位数量, 按行业次级板块和技术分类。这些数字假设年均生产力增长 1%。

投资领域	平均年支出	直接就业岗位	间接就业岗位	直接就业岗位 + 间接就业岗位	衍生就业岗位	直接就业岗位 + 间接就业岗位 + 衍生就业岗位
化石燃料	44 亿美元	2,538	3,777	6,315	3,805	10,120
清洁可再生能源	6.295 亿美元	1,488	601	2,089	848	2,937
传输和储存	4,590 万美元	34	17	51	31	82
其他供应技术	4,510 万美元	118	35	153	57	210
其他投资	450 万美元	10	3	13	6	19
总计	51 亿美元	4,188	4,433	8,621	4,747	13,368

资料来源: IMPLAN 3.1

区域脱碳框架技术报告估计，即使化石燃料需求萎缩，本地区以化石燃料为基础的行业的就业岗位也不会在 **2030** 年之前被取代。EER 模型中的能源供应组合表明，在 2030 年之前，化石燃料消耗变化将很小，甚至为零，因此，在 2030 年之前，本地区化石燃料相关就业岗位变化将很小，甚至为零。<sup>xxi</sup>

对于将在 **2031-2050** 年间失业的工作人员，圣地亚哥县和地方政府应制定一套可行的公正过渡政策。EER 模型的中心案例估计，在 2030 年之后，石油和天然气都将出现大幅萎缩。该模型预测，到 2050 年，石油需求的萎缩将达到 95%，天然气需求的萎缩将达到 75%。地方政府必须立即开始为这些工作人员制定公平过渡政策，令他们逐渐过渡到清洁能源经济或其他领域的同等或更高品质的工作。

公正过渡如果稳定而不是断断续续进行，相应成本将大大降低。在稳定的过渡中，任何一年自愿退休的工作人员比例都将可预测，即可避免需要在任何特定时间为更大比例的工作人员提供支持。从化石燃料到可再生能源工作岗位的过渡速度会影响过渡的公平性和公正性。突然的变化和萎缩都更可能导致突然的失业，而稳定的变化和萎缩可能会导致更少的失业，因为工作人员有机会过渡到新工作或自愿退休。

在因皮里尔县识别的五个地点的地热能生产将在 **10** 年内，每年在南加州创造 **1,900** 个就业岗位。第 2 章识别了因皮里尔县的五个地热能生产地点。本章的分析结果是在 10 年内，南加州地区将为这五个地热能发电厂的开发和运营每年创造 1,900 个就业岗位，有一些可能在圣地亚哥地区。这些是在本章中估算的每年新增 2.7 万个就业岗位基础上的额外就业岗位。

## 地方政策机会

区域脱碳框架技术报告评估了气候行动计划中的现有二氧化碳减排承诺，以确定本地区是否需要开展更多活动方可步入实现脱碳目标的轨道。另外，报告还识别了本地区地方辖区可以采取进一步行动的机会，以支持能源生产、交通、建筑物和自然气候解决方案的脱碳路径。

一些新颖的分析为本章提供了信息。首先，报告分析了地方政府和机构影响和监管温室气体排放的权限，并总结了主要的联邦、州和地方机构的权限，以及联邦和州级的主要立法和法规，以阐明地方政府采取行动减少温室气体排放的能力。<sup>xxii</sup>其次，报告检视了本地区的所有气候行动计划，以确定特定措施被纳入气候行动计划的频率、气候行动计划承诺的相对温室气体影响以及社会公平性考量的整合。<sup>xxiii</sup>报告随后列出方案分析，以估计所有已采纳和待采纳气候行动计划承诺将导致的地区温室气体减排总量。然后估计了将最佳气候

---

<sup>xxi</sup> 有关此处使用的 EER 模型中心案例的详细信息，请查阅附录 A。

<sup>xxii</sup> 有关详细信息，请查阅附录 B。

<sup>xxiii</sup> 请查阅第 8 章第 8.3 节中的概述和第 8.5-8.8 节中的具体行业板块的调查结果。这些也用于说明第 2 章至第 5 章中的深度脱碳目标与地区气候行动计划承诺之间的差距。

行动计划承诺应用于所有辖区的一个场景的潜在温室气体影响。<sup>xxiv</sup>此场景分析采用了一个将产生最大相对温室气体减排量的给定气候行动计划政策类别的气候行动计划承诺（如植树目标），然后将该承诺应用于圣地亚哥地区的每个辖区，无论该类别中有哪些现有或规划承诺。可将此看作现有气候行动计划承诺的潜在温室气体减排上限。最后，本章应用这些方法和其他分析所得结果，识别了在四种脱碳路径每一种中进一步采取地方行动和区域合作的机会。<sup>xxv</sup>

**地方辖区有权影响和监管温室气体排放。**地方政府影响和监管温室气体排放的方法包括：加速本州的法定目标和政策进程，制定超越州法律的条例，利用独有的权限制定和实施政策。地方权限既来自宪法赋予的权限，包括促进公共卫生、安全或社区总体福祉的广泛权限，也来自州法规赋予的权限。地方辖区监管温室气体排放权限的全部范围目前未知。

<sup>xxvi</sup>

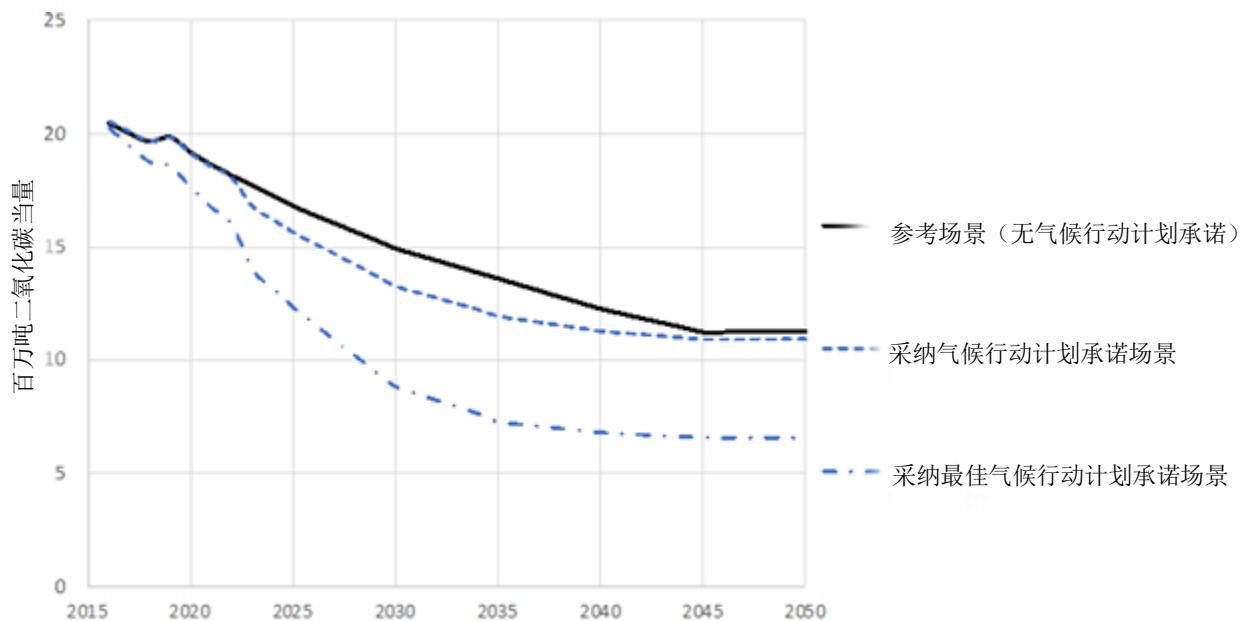
**采纳的气候行动计划承诺不足以实现脱碳目标。**采纳的气候行动计划的交通、电力和建筑温室气体减排承诺在 2045 年实现温室气体净零排放所需的总减排量中所占比例相对较小（图 12 虚线）。即使将所采纳的最激进的气候行动计划措施应用于本地区所有辖区，仍将存在大量排放，主要来自天然气建筑物最终用途和道路交通（图 12 虚点线）。本章还分析了圣地亚哥市即将进行的 2022 年气候行动计划的更新，但是，即使包括这些措施，仍会存在大量排放。

---

<sup>xxiv</sup> 请查阅第 8.4 节。

<sup>xxv</sup> 这些机会过去包含在本执行摘要的每个相关部分中，但现在包含在第 8 章的具体行业板块部分中。

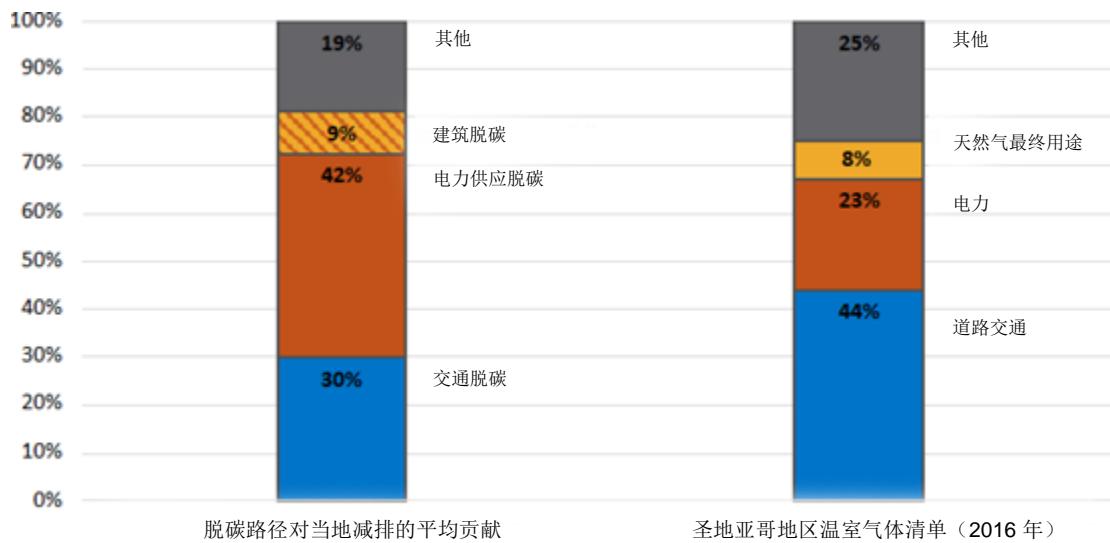
<sup>xxvi</sup> 有关权限的更详细讨论，请查阅第 8.2 节和附录 B。



此图不含圣地亚哥地区的所有温室气体排放活动或者未来可能采纳的新的地方、州和联邦行动。  
能源政策倡议中心, 2022 年

**图 12** 此图显示了圣地亚哥地区在每种分析场景中发电、建筑内天然气最终用途和道路交通的预计温室气体排放量。无气候行动计划承诺的参考场景（实线）仅显示基于加州和联邦法律、强制令、行动和目标的减排量。采纳气候行动计划承诺场景（虚线）显示假设所有目前气候行动计划均按成文规定全部应用情况下的总排放量减去剩余温室气体排放量。采纳最佳气候行动计划承诺场景（虚点线）显示假设每个政策类别的最佳气候行动计划承诺都应用于本地区的每个辖区的情况下的剩余温室气体排放量，而无论采纳了何种气候行动计划承诺。此图显示，任何分析场景都无法使本地区到 2050 年实现净零排放。请注意，这些分析假设没有新的州和联邦法律、强制令、行动和目标，而且现有州和联邦法律、强制令、行动和目标在此期间的任何时候都不会改变。此外，这些分析不包括本地区的所有温室气体排放量。

**各辖区可采纳额外的气候行动计划措施并加强现有措施。**基于对气候行动计划的检视，更多辖区可用其他区域辖区措施作为范例，采取更强有力的气候行动计划措施。同样，根据对气候行动计划措施的综合温室气体影响的场景分析，大多数辖区都能加强其现有气候行动计划措施，特别是在交通和建筑行业板块。这些行业板块产生大量的温室气体排放（图 13 右侧），但平均而言，代表 2035 年气候行动计划不成比例的低减排量（图 13 左侧）。



**图 13** 此图显示了 2035 年各脱碳路径对已采纳和待采纳当地气候行动计划措施的温室气体减排总量的平均贡献（左）和 2016 年各排放源的本地区排放分布（右）。此图显示，交通排放（蓝色，右侧）占本地区排放量的近一半，但平均而言，气候行动计划承诺对应的减排量仅略高于气候行动计划中当地温室气体减排量的四分之一（蓝色，左侧）。同样，电力约占本地区排放量的四分之一（深橙色，右侧），但是，相关的减排贡献平均不到气候行动计划承诺的温室气体减排量的一半（深橙色，左侧）。请注意，由于建筑相关排放来自现场天然气燃烧和电力生产，条形图的建筑脱碳部分用阴影显示为浅橙色和深橙色，以对应天然气建筑（浅橙色）和电力供应（深橙色）。

**将社会公平纳入气候规划有赖于更多努力。**初步审核发现，已采纳和待采纳气候行动计划中的社会公平性整合既有限又不一致，而且缺乏特异性。需要通过完成更多工作来开发能力和工具，以了解和解决圣地亚哥地区所有脱碳政策对公平性的影响，这些工作包括协调、建议、跟踪和监测气候规划中公平性问题解决方式的数据收集和分析、地区指导文件及地区工作组。

## 圣地亚哥地区模型

尽管圣地亚哥地区仅占全球排放量的 **0.08%**，但其区域脱碳工作可通过吸引追随者和分享持久、可扩展和可复制的创新等来影响全球排放量。圣地亚哥应积极彰显其所做的努力，并在全国和国际论坛上交流经验教训。圣地亚哥区域脱碳框架的创建可作为美国和全球其他辖区的研究案例，帮助这些辖区学习并调整自身的长期脱碳规划工作。除了在各种全国和国际论坛上展示这项工作外，联合国可持续发展解决方案网络 (SDSN) 制作了一份作为其他社区、治理机构、研究小组和可持续发展从业者的工具包的指南，帮助其在脱碳工作中遵循圣地亚哥县所采取的流程。<sup>xxvii</sup>

联合国可持续发展解决方案网络 (SDSN) 正努力在其网络的三个水平级别上共享区域脱碳框架，并将在美国、国际团体和共同体及联合国的国家会议和论坛上分享区域脱碳框架及其主要调查结果。例如，该项目在 2021 年 10 月的 Innovate4Cities 会议期间得到过演示，而此活动收获的各种反馈意见将为 2022 年政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 关于全球气候变化相关影响、适应和脆弱性的第六次评估报告提供信息。这些活动提供了一个展示此项目成果以及作为全世界典范的圣地亚哥地区的机会。通过接触这些受众，区域脱碳框架能够为以实现净零为目标的全球路线图和路径提供信息。

区域脱碳指南将帮助地方管辖区创建独特的脱碳框架。这份指南将提供背景信息以及有关物流、方法、利益相关者参与和长期规划等方面的具体步骤和建议。尽管这份指南中的资源对美国以外的脱碳框架项目团队而言相关且适用，在新兴经济体背景下创建的框架可能会在气候行动规划中使用不同的方法、观点和策略。这份指南将在加州大学圣地亚哥分校可持续发展目标政策倡议网站 (<http://sdgpolicyinitiative.org/guide/>) 上免费提供，作为促进创建区域脱碳框架的一种方式，并为各辖区努力实现净零碳目标提供一个实用路线图。

---

<sup>xxvii</sup> 第 9 章和附录 9.A 提供了广泛的美国和全球共同体清单，圣地亚哥县和其他有脱碳框架的辖区可与之进行联系、参与和加入其网络，以便在不同范围内传播其调查结果。