

The logo for RethinkX, featuring the word "Rethink" in white and "X" in red, with a stylized double arrow pointing right.

颠覆、影响和抉择

气候变化再思考

人类如何能够利用现有技术，通过颠覆能源、交通运输和食品，选择在 2035 年之前减少 90% 的排放

RethinkX 颠覆影响报告

2021 年 8 月

James Arbib、Adam Dorr、Tony Seba

RethinkX

颠覆、影响和抉择

气候变化再思考

人类如何能够利用现有技术，通过颠覆
能源、交通运输和食品，选择在2035年之前
减少90%的排放

RethinkX 颠覆影响报告

2021年8月

James Arbib、Adam Dorr、Tony Seba

气候变化再思考

人类如何能够利用现有技术，通过颠覆能源、交通运输和食品，选择在2035年之前减少90%的排放

RethinkX 计划	4	减排 (按部门)	17
RethinkX 团队	5	脱碳就绪——决策指南.....	19
前言	6	最后的碳问题.....	22
免责声明	6	方框3：进入负排放阶段	23
执行摘要	7	第2部分：对能源、交通运输和食品的颠覆	24
方框1：主要结论	9	对能源部门的颠覆	26
第1部分：RethinkX 温室气体排放情景	10	对交通运输部门的颠覆	28
传统思维的限制.....	11	对食品部门的颠覆	29
从颠覆的角度进行排放路径再思考		方框4：颠覆以惊人速度发生	32
.....	11	同步颠覆和技术融合.....	34
方框2：常规预测的错误	12	方框5：颠覆的级联效应导致巨大惊奇	35
RethinkX 排放情景.....	14		
RethinkX 核心颠覆情景：“保持理智”	14		
RethinkX 加速颠覆情景：“严肃对待”	15		
RethinkX 延迟颠覆情景：“停滞不前”	16		

第3部分：对温室气体排放和气候变化的影响.....	37
关键影响	38
1. 通过部署和推广已有技术，我们实现净零排放的速度可以比普遍想象的快得多	38
2. 我们能够实现净零排放，同时无需对社会或经济造成附带损害	38
3. 市场能够、而且必须在减排方面发挥主导作用	39
4. 全球经济去碳化的代价不会很高，反而会节省数万亿美元	39
5. 重点明确的减排方略优于遍地开花的“打地鼠”方略	40
6. 我们不再需要在环境 and 经济之间进行权衡	40
7. 能源、交通运输和食品的清洁颠覆将缩小富裕社区和贫困社区以及发达国家和欠发达国家之间的差距	40
8. 有助于减少排放的技术也将使我们能够以经济适用的方式从大气中提取二氧化碳	41
9. 社会选择很重要，单靠技术不足以实现净零排放	41
方框6：颠覆使所有形式的生态恢复成为可能.....	42

附录A	
气候挑战	44
非线性.....	45
地球是一个复杂的系统	46
实现净零排放.....	48
附录B	
Seba 技术颠覆框架	49
理解技术颠覆	50
颠覆的跨部门级联效应	51
颠覆如何变革各经济部门.....	52
颠覆如何变革整个社会	54
创造时代.....	56
附录C	
数据和方法	57
数据	58
方法	58
减排	59
参考资料	67
注释	70

RethinkX 计划

RethinkX 是一家独立智库组织，其对技术驱动颠覆的速度的规模及其对全社会的意义做出分析和预测。我们能够基于数据提供公正的分析结果，为投资者、企业、决策人及民间领袖甄别最关键的决策依据。

我们对各个经济部门的颠覆影响进行分析。我们的目标是制作准确的分析结果，反映快节奏的技术颠覆 S 曲线的真实情况。主流分析家的预测是线性、机械、孤立的，他们忽略了系统的复杂性，因此始终低估了技术颠覆的速度和程度——例如太阳能光伏、电动汽车和智能手机的采用。如果依靠这些主流预测，政策制定者、投资者和企业就有可能制定不充分或被误导的政策、作出不足或错误的投资、不当配置资源、遭遇负面反馈，进而导致巨大的财富、资源和就业岗位流失，增加社会不稳定和脆弱性。

我们采用系统的方法来分析个人、企业、投资者和政策制定者在促进颠覆方面的复杂相互作用，以及这种颠覆对社会其他部分的影响。我们的方法主要关注由技术融合、商业模式创新、产品创新以及成本和能力的指数级提升所引发的市场力量。

我们的目标是就技术驱动颠覆所带来的威胁和机遇，激发全球范围内的讨论对话，并聚力于如何通过正确的抉择，打造一个更加公平、健康、有韧性且更稳定的社会。



RethinkX 团队

报告编制者

James Arbib、Adam Dorr 和 Tony Seba

贡献者

Bradd Libby (研究员)

Taylor Hinds (研究分析师)

Nafeez Ahmed (编辑)

团队成员

Uzair Niazi (主任)

联系人

RethinkX: info@rethinkx.com

媒体: media@rethinkx.com

关注我们:

 [/rethink_x](https://twitter.com/rethink_x)

 [/JoinRethinkX](https://www.facebook.com/JoinRethinkX)

 [/company/rethinkx](https://www.linkedin.com/company/rethinkx)

诚邀大家加入我们的社区。

更多信息, 请访问 www.rethinkx.com

鸣谢

还要感谢 Cater Communications 的 Morry Cater 及公司团队, 以及 Lokate Design 的设计团队。

本鸣谢并不表示他们认同我们所作出的全部 (或部分) 假设和结论。

我们对一切可能错误自行承担 responsibility。

前言

RethinkX使用Seba技术颠覆框架对技术颠覆进行建模和预测。本报告中的分析对市场、消费者和监管动态等的相关数据进行了详细评估，这些动态共同推动能源部门的颠覆。我们根据成本曲线已经确立的太阳能光伏、陆上风能和锂离子电池技术以及现有的商业模式进行了经济分析。我们对于能够可靠预测成本曲线近年走势的情况进行了数据推断。如果成本曲线加速、底层技术突破或业务模式创新使颠覆提前，则我们在本报告中分析的颠覆将会比预计的时间更早发生。

我们的研究结果以及结果可能产生的影响，是基于对数据的长期关注，运用我们的金融、经济、技术采纳和人类行为知识所得出的。我们的研究结果显示了我们预期在理性背景下会出现的颠覆将具有的速度、规模和影响。各种情景都有一定的发生概率。我们认为，我们在本报告中提出的情景，实际出现的可能性要比其他人目前预测的情景大得多。我们的目标是向决策者提出见解，供他们用于造福社会。

免责声明

本报告内所有结论、预测、推论、暗示、判断、观念、观点、建议、意见及其他类似内容均为作者个人的表述意见，并非事实陈述。请勿将其视为事实陈述，并请依据自己的调研做出自己的结论。本报告所含内容不构成任何形式的建议，请勿依据本报告或本报告所含内容采取或不采取任何行动。

本报告含有作者所选定的可能预测场景。这些场景预测并不全面，也不一定能够代表所有情景。本报告所含的所有场景预测或表述均基于作者自身选用的特定假设和方法。除此之外有可能存在其他假设及/或方法能够形成其他结果和/或意见。

本报告的作者及其发布方，以及其各自的关联方、主管方、公务人员、雇员、合作伙伴、许可方、代理方及代表人均未通过此报告的发布和/或分发提供任何财务或投资意见。报告中的所有内容均不得被视为构成任何形式的财务或投资意见。本报告的作者及其发布方，以及其各自的关联方、主管方、公务人员、雇员、合作伙伴、许可方、代理方及代表人并未对任何资产、财产和/或业务的收购和投资可行性提供任何建议或陈述，也未作出任何相关财务承诺。本报告中的所有内容也均不得视为具有此类作用。一切有关于此类资产、财产/或业务的收购、投资或财务承诺决策均不得以本报告或其中所含信息为依据做出。在没有向有资质专业人员寻求特定的法律、税务和/或投资意见的情况下，不得以本报告中所含的一般信息作为行动依据。

本报告内的所有内容均不构成《2000年金融服务与市场法》第21节中所规定的投资活动参与邀请或投资活动参与诱导作用。

本报告及其所含信息均不构成任何明示或暗示或者其他形式的保证或担保。对于涉及本报告及其内容的所有明示或暗示或其他形式的保证或担保，本报告的作者及发布方将在法律允许的最大限度内免除相关责任。

在法律允许的最大限度下，本报告的作者及其发布方，以及其各自的关联方、主管方、公务人员、雇员、合作伙伴、许可方、代理方及代表人将对下列事项免除相关责任：

- » 您或其他个人或实体，依据本报告或其中所含信息所采取的、或放弃采取的任何行动所给您或其他个人或实体造成的一切损失或损害；
- » 您依据本报告或其中所含信息与第三方达成的一切交易
- » 您或其他个人或实体因使用本报告或其中所含信息而可能遭受的或者可能给您或其他个人或实体造成的一切损失或损害。

在本免责声明中提到的“本报告”包括本报告作者或发布方及其各自的关联方、主管方、公务人员、雇员、合作伙伴、许可方、代理方及代表人所提供的一切信息，其中包括但不限于所有有关本报告的总结、新闻通讯社社交媒体帖子、新闻采访及文章。

执行摘要

能源、交通运输和食品部门方兴未艾的技术颠覆对气候变化有着非同寻常的影响。尽管只是三个部门的颠覆，尽管仅仅由八种技术驱动，但这轮颠覆能在15年内直接消除全球90%以上的温室气体(GHG)净排放量。人类可以利用市场力量来推动全球大部分温室气体减排，因为减排所需的技术要么今天已经商业化并具有竞争力，要么可以在2025年前通过正确的社会选择部署到市场。同样的技术也将使碳回收的成本变得易于负担，这意味着从2035年开始，解决“最后的碳问题”和进入净零排放阶段不需要登月式的突破性技术。

我们之前的研究表明，能源、交通运输和食品部门的颠覆是必然的。太阳能、风能和电池(以下简称SWB)将颠覆煤炭、石油和天然气。提供“运输即服务”(以下简称TaaS)的无人驾驶电动汽车将颠覆内燃机和私家车。精密发酵和细胞农业(以下简称PFCA)将颠覆肉类、牛奶和其他动物产品。这三个部门的颠覆已经同时展开，它们将对气候变化产生深远影响。然而，是否在全球范围内迅速部署这些技术，以避免危险的气候变化，将由人类决定。

因此，应对气候变化的最大障碍是人类的思维。传统思维通过线性的、简化的角度来看待减排，因此无法理解自然系统和人类系统中的变化特征、变化速度和变化动态。由于未能充分认识到这些系统动态，传统模型往往不仅低估了气候变化本身的威胁，还低估了技术解决这一问题的潜力。因此，随着时间的推移，我们已经看到一种一贯的出错和修正模式，每年被低估的气候变化威胁都“比我们最初想象的更糟”，而技术解决这一问题的被低估潜力则“比我们最初想象的更好”。因此，传统思维通过一系列折衷的“贴膏药”方法来解决气候变化问题，如补贴和税收、生物燃料、清洁煤炭、清洁柴油等等治标不治本的方案，浪费了大量时间、注意力和资源。

而专注于少数关键技术，以此改变经济的整个基础，才是更简单、更有效的方略。但简单并不意味着容易。说这个方略简单，是因为我们已经理解了重大系统性变化所需的关键驱动力和杠杆。然而，我们还有许多障碍需要克服，决不能自满。尽管能源、交通运输和食品部门的清洁颠覆将带来巨大的机遇，但仅靠技术是远远不够。全球社会必须做出正确的选择。我们可以开创一个清洁繁荣的新时代，加速颠覆、解决气候危机，也可以白白浪费宝贵的时间和数万亿美元，用低效的“遍地开花”方略来支撑现有系统，使人类面临气候变化影响的额外风险。

在本报告中，我们按照下列三个缓解准备阶段对排放源进行分类，帮助决策者理解这些选择：研究、部署和推广。全球超过四分之三的温室气体排放量可以通过八项关键技术来缓解，而这些技术要么已经上市并能够立即推广，要么已经可以开始投入市场。我们可以依此决定如何安排工作，以尽快实现最大的缓解效益。如果没有这样一个指导框架，决策者在应对气候变化时就只有采取草率、无重点的方式，从而有可能造成财政、物质和政治资源分配不当。

为了最大限度地扩大这些颠覆带来的气候利益，投资者、政策制定者、公民领袖和其他决策者应该将注意力和资源放到可以最快、最有效地减缓排放的机会上。由于这些机会中的绝大多数已经处于部署和推广阶段，我们应主要致力于确保市场的开放性、竞争性和透明性，让经济学原理发挥力量。这意味着消除有利于既得利益者的壁垒，如能源部门的公用事业垄断，消除交通运输部门对电动汽车和自动驾驶汽车的监管障碍，取消畜牧业补贴和对食品部门的保护。

选择接纳并引领（而不是抵制）这些颠覆的地区、国家、城市、社区、企业和投资者将获得巨大的经济和社会回报以及环境利益。一些人可能是为了获取非凡的经济利益或减轻对进口脆弱食品和能源供应的依赖，还有一些人则可能是为了获得政治资本。随着不同的行动者寻求在自己的环境中加速颠覆，以避免风险或锁定优势，随之而来的激烈竞争将进一步产生有加速作用的强大反馈，加剧全球颠覆的速度和规模。此外，清洁技术具有去集中化和民主化的本质，因此通过利用清洁技术，欠发达地区可以跨越先前的人类发展障碍，使其弱势群体走向繁荣发展，并在富裕和贫穷经济体之间构建公平的竞争环境。

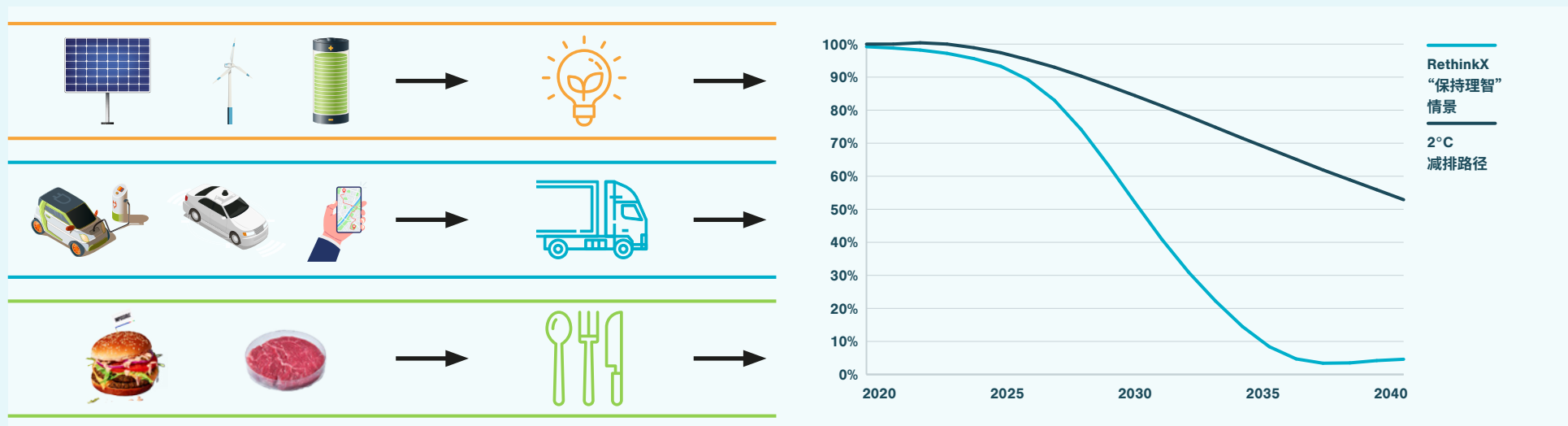
尽管仅仅实现净零排放并不会完全解决气候变化问题，但这代表着我们在正确方向上的巨大进步。为大幅减排提供条件的这些技术也将为千兆吨规模的碳回收提供条件。如果清洁能源、电动无人驾驶车辆及自动设备达到过剩的水平，数十亿公顷的土地能够摆脱畜牧业，就可以从重新造林和技术两方面改善碳回收的经济性。因此，上述三个部门的颠覆对于实现全面的气候变化解决方案变得更加重要。

通过支持能源、交通运输和食品的清洁颠覆，社会可以加快全球温室气体减排，在2040年前实现净零排放，并为彻底解决气候变化奠定基础，同时节省数万亿美元、促进全球繁荣、改善生活质量。但要做到这一点，我们必须摆脱传统思维模式的束缚，通过更全面的视角了解颠覆的所有复杂性、进行可能性再思考。



方框 1：主要结论

图 1：八项技术，三种颠覆，到 2035 年减排 90%



资料来源: RethinkX.

能源、交通运输和食品部门的颠覆对气候变化的关键影响

1. 通过部署和推广已有技术，我们实现净零排放的速度可以比普遍想象的快得多。
2. 我们能够实现净零排放，同时无需对社会或经济造成附带损害
3. 市场能够、而且必须在减排方面发挥主导作用。
4. 全球经济去碳化的代价不会很高，反而会节省数万亿美元。
5. 重点明确的减排方略优于遍地开花的“打地鼠”方略。
6. 我们不再需要在环境和经济之间进行权衡。
7. 能源、交通运输和食品的清洁颠覆将缩小富裕社区和贫困社区以及发达国家和欠发达国家之间的差距。
8. 有助于减少排放的技术也将使我们能够以经济适用的方式从大气中提取二氧化碳。
9. 社会选择很重要，单靠技术不足以实现净零排放。



» 第1部分:

RethinkX 温室气体
排放情景

我们在本次分析中提出了三种情景：核心颠覆情景（“保持理智”）、加速颠覆情景（“严肃对待”）和延迟颠覆情景（“停滞不前”）。这些情景代表了由我们制定的社会选择所决定的温室气体减排途径可能合理出现的情况。尽管从纯粹经济原因出发，能源、交通运输和食品部门就不免会发生颠覆，但我们做出的选择，或可取、或糟糕，都有可能加速或推迟颠覆及其相关的减排进程。

传统思维的限制

关于减排和基于减排的情景的传统思维缺乏对地球系统和人类系统变化的性质、速度和动态的充分理解。因此，传统的分析通常从狭窄的线性角度审视问题和解决方案，忽略了驱动变化的系统复杂性（见方框2：常规预测的错误）。由于未能充分认识到这些系统动态，这些分析往往不仅低估了气候变化本身的威胁，还低估了技术解决这一问题的潜力。因此，随着时间的推移，我们已经看到一种一贯的修正模式，每年估计的气候变化威胁都“比我们最初想象的更糟”，而技术解决这一问题的估计潜力则“比我们最初想象的更好”。^a

汽车颠覆马匹、数码相机颠覆胶片相机、智能手机颠覆座机...历史上数十次颠覆表明，颠覆性技术并不是缓慢、渐进式的发展，而是由于经济力量中内嵌的反馈回路而呈指数级爆发（见方框4：颠覆以惊人速度发生）。新技术的成本下降和能力提升将使现有产业在经济上失去竞争力，陷入成本增加、收益缩水的死亡螺旋。历史表明，颠覆往往会使以前的技术在短短10-15年内完全过时。

传统的减排方略忽略了这些动态，试图通过各种各样的技艺、政策和技术来逐步使全球经济脱碳。¹ 这种没有重点的“打地鼠”方略孤立看待每一种排放源，头痛医头，脚痛医脚，而不是寻找根本原因。这种方略经历了近30年的失败，仍未控制住排放量上升，因此结果令人气馁。将重点放在全球经济中三个基础部门的技术颠覆上要好得多——能源、交通运输和食品三个部门共同造成了超过90%的温室气体排放。

由此可见，传统的情景是不可信的，因为它们对技术和颠覆存在根本上的误解（见方框2：常规预测的错误）。因此，我们在本报告中提出的情景无法与“照常”途径或其他常规减排途径直接对比。

从颠覆的角度进行排放路径再思考

在预测技术变革方面，RethinkX一直比传统分析公司更准确。我们的团队准确预测了以下技术的显著非线性成本改善和市场增长：能源部门的太阳能、风能和电池(SWB)；交通运输部门的无人驾驶电动汽车(A-EV)和运输即服务(TaaS)；食品部门的精密发酵和细胞农业(PFCA)。^{2,3,4} 我们的研究表明，能源、交通运输和食品部门目前都在经历一场技术颠覆，这场颠覆将在15年内使现有行业过时——比大多数传统分析预测的结果要快得多（详见第2部分：能源、交通运输和食品部门的颠覆）。

能源、交通运输和食品颠覆共同产生的影响将为减少碳排放和空气碳捕获提供前所未有的机会。然而，尽管这些颠覆现在不可避免，但它们的确切时间表——以及我们面临的气候变化风险——仍取决于我们的社会选择。在本报告中，我们提出了不同选择可能导致的三种情景。

方框 2：常规预测的错误

心态问题

人类气候变化挑战的核心是一个心态问题，该问题忽略了地球系统和人类系统变化的非线性本质、速度和动态。因此，我们经常通过一个线性的、简化的角度来考察问题和解决方案，而这个角度没有认识到驱动变化的复杂系统动力学。

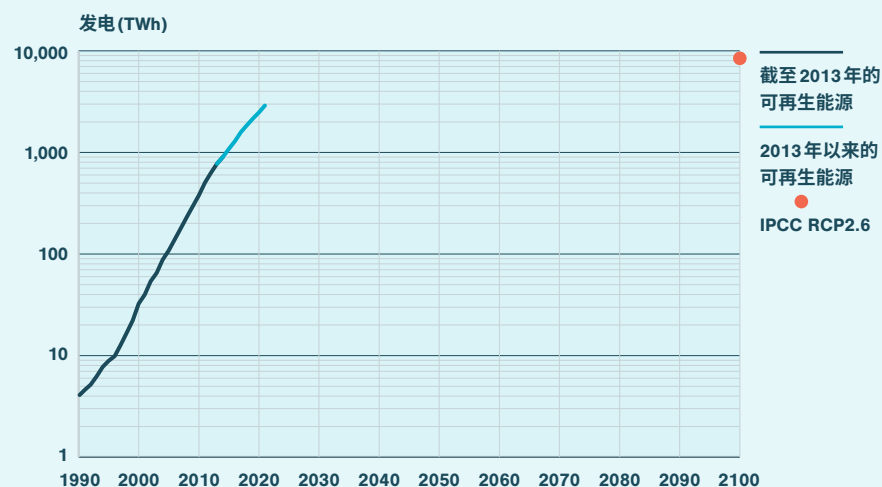
在历史上的技术颠覆浪潮中，长期的技术稳定被突然的系统性转变打断，并经常引发迅速的经济和社会转型。⁵ 当新的替代性技术达到同等能力或更大能力，并且成本远低于现有技术时，就会发生颠覆，在发生颠覆后，现有技术会被迅速取代，新技术的市场份额会从 10% 快速增长到 90% 及以上，并且这一增长往往会在短短 15 年内完成。历史上所有部门和行业发生的数十次颠覆都符合这一模式。

传统的分析和假设情景还往往忽略波及整个经济和社会的二阶效应，因此无法预测社会影响的范围。成本更低、能力相同或更强的技术往往会扩大市场规模、创造新的商业模式，在许多情况下还会产生全新的市场。因此，技术颠覆的速度、规模和影响被普遍低估了。只有摒弃线性思维，通过新的视角认识真正的风险和机遇，我们才能发现，目前正在展开的技术颠覆创造了巨大的可能性，将为解决气候挑战提供一条在速度和全面性上都超出传统想象的路径（有关 RethinkX 颠覆框架的更多细节，请参见附录 B）。

严重后果

2014 年，也就是 RethinkX 联合创始人 Tony Seba 首次发表太阳能指数级增长分析报告的 5 年之后，联合国政府间气候变化专门委员会第五次评估 RCP2.6 这个“最好情况”情景时仍然假设，到 2100 年，太阳能、风能和地热能加起来只能提供全球 4% 的能源。RCP2.6 和其他常规情景完全忽略了当时可用数据中已经明显呈现的指数级增长趋势，并且没有提供任何解释或理由。自那时以来，指数级增长趋势就一直持续，并有望在 2030 年之前超过 RCP2.6 对 2100 年的估计值，比传统预测结果提前 70 年（图 2）。⁶

图 2：政府间气候变化专门委员会 RCP2.6 可再生能源与现实（对数图）*



资料来源：英国石油公司，政府间气候变化专门委员会，van Vuuren 等人，2011a，van Vuuren 等人，2011b。^{7,8,9,10}
* 太阳能、风能和地热能的总和，不包括水力发电。

政府间气候变化专门委员会针对第六次评估开发的新的气候情景称为“共享社会经济路径”（简称SSP），该情景仍然在根本上错误理解了技术变革，重复了同样的错误。唯一以技术为中心的情景，即SSP5，被命名为“化石燃料开发”，被描述为“快速的技术进步伴随对丰富化石燃料资源的开发”。¹¹这种“照常”假设未能理解到，技术进步越快（例如导致能源、交通运输和食品颠覆的技术进步），21世纪的化石燃料用量就会越少。

虚假解决方案

气候变化领域的主流叙事认为，我们必须在现有的能源、交通运输和食品系统内减少排放——即使单从理论角度而言，这种方略也无法解决问题，因为破坏环境的污染正是现有的生产模式所造成的。这种被误导的方略强调行为改变和表面的技术解决方案，比如清洁煤炭，但这些方法治标不治本，纯粹是“贴膏药”。就像中世纪医生对症状采取“放血”处理一样，这些治疗方法不会解决问题，只会让真正解决问题变得更加困难，同时还会产生新的问题。

我们不可能完全停止生产和消费活动，即使减半也会对人类造成难以想象的恶果，对贫困社区和欠发达国家造成不成比例的影响，并断绝建立基于清洁技术的真正可持续能源、交通运输和食品体系所需的金融、社会和政治资本来源。传统方略注重症状而非根本原因，通过紧缩来应对气候变化，这不仅仅将徒劳无功，而且还会适得其反。要解决气候变化问题，我们不能仅仅让现有系统变得“不那么糟糕”，而是必须颠覆和改造系统本身。

错觉

- » 我们不需要等待几十年、或花费数千亿美元来孤注一掷地开发未经证实的突破性技术——我们已经拥有在20年内实现净零排放所需的技术，这将为结合自然和技术解决方案来削减现有大气碳储量奠定基础，但这些解决方案只有在颠覆后才变得可行。
- » 我们不需要为减少排放而付出夸张代价——投资于颠覆将为社会节省数万亿美元，因为颠覆性的技术将比旧技术便宜得多，而且大部分部署可以通过为市场力量消除障碍而不是繁琐的国家干预来推动。
- » 我们不需要对现有产业征收严厉的碳税来迫使它们变得清洁——如果市场进入和竞争的壁垒被消除，新技术将在经济上击败旧技术，并消灭任何无法仅靠市场力量适应新局面的行业。
- » 我们不需要对个人消费施加限制，从经济发展的角度来讲，此举十分荒谬，并将导致有害的社会经济后果——而通过颠覆，我们既能消除碳足迹，又能为地球上的每个人带来高质量的生活。
- » 我们不需要选择牺牲哪些国家、保护哪些国家——通过颠覆，低收入国家将能够越过之前由资源造成的人类发展障碍，而无需在经济和环境之间进行零和权衡。
- » 我们不需要在现有体系的限制下解决公平挑战——技术的颠覆将使能源、交通运输和食品的生产分散化，而不是集中化。这可以增强地方社区自下而上建设经济、社会和治理能力的的能力，而不是依赖国家进行自上而下的决策和资源分配。与此同时，现有的地理劣势可能会被推翻，因为热带和赤道地区全年充足的阳光可以为每个行业的价值链降低成本、创造竞争优势。

RethinkX 排放情景

我们的每一个情景都呈现出从现在到2040年的一条减排途径。我们通过估计每种颠覆性技术对所有主要温室气体排放源的总体影响来构建这些路径，排放源按全球经济的分部门分类，如表1所示。因此，每个分部门都有自己的减排S曲线，如附录C中的表3所示。我们还根据生物群系估计了主动和被动重新造林碳回收量，如附录C中的表4和表5所示。减排和回收量以2020年作为初始年份计算，我们假设2020年净二氧化碳当量为500亿吨，并以百分比报告减排和回收量。然后，我们将所有分部门的二氧化碳减排与碳回收（负排放）相加，得出我们每一种情景的最终减排途径。2040年后剩余的任何二氧化碳排放量都将来自于小众行业和市场，对于这些行业和市场，目前没有任何可预见的技术能够提供完全脱碳途径。

对于每一种情景，预计的减排途径是我们预计能源、交通运输和食品颠覆转化为温室气体排放减少的速度结合我们预计将发生的碳回收量所组成的函数。我们假设被动和主动重新造林只发生在因食品颠覆而腾出的土地上，而不会发生在任何其他也可能可用于重新造林或植树造林的土地上。我们还假设，商业渔业的颠覆和海洋生态系统的恢复不会给海洋带来额外的碳回收。^b

有关本报告假设方法的更多细节，请参见附录C。

RethinkX 核心颠覆情景：“保持理智”

在这种情景下，社会选择接纳而非抵制21世纪20年代的能源、交通运输和食品部门颠覆。这意味着对经济激励做出理性反应，并消除SWB、A-EV和TaaS，以及PFCA技术的部署和推广障碍。但这仍然需要关键的社会选择，尤其是政府，它们可以通过简化市场设计；打破旨在寻租的公用事业垄断、确保个人有权生产能源、交通运输和

食品服务；停止对将因颠覆陷入困境、注定走向末路的现有化石燃料、传统道路运输、畜牧业和渔业提供进一步补贴和公共投资来为这三大颠覆消除障碍。

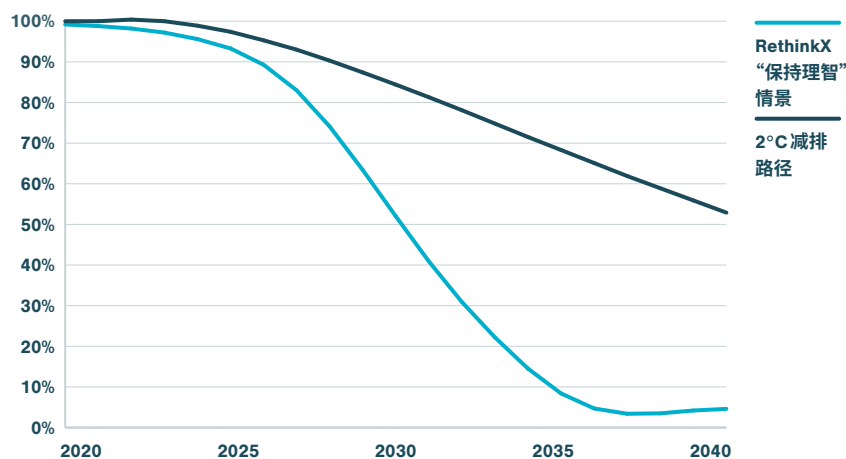
这一情景只需要进行具有正向经济回报的投资，因此不包括用于主动重新造林或其他碳回收技术的公共支出，如海洋碱度增强(OAE)和直接空气碳捕获和存储(见方框3：进入负排放阶段)。这个情景包括了因为食品颠覆而从畜牧业中解放出来的27亿公顷土地在自然恢复过程中的被动重新造林所导致的碳回收，因为这些排放没有成本，并且不可避免，除非这些土地主动退化。

图3显示了RethinkX的“明智”情景与到2040年升温2摄氏度的中位路径的对比情况。^c该场景反映了我们之前对能源、交通运输和食品部门的颠覆轨迹及其对温室气体排放之影响的研究所造成的直接影响。

这种情景的主要特征包括：

- » 到2035年，全球净排放量将下降90%以上，这是三个部门颠覆带来的直接缓解加上被动重新造林带来的抵消的组合效果。
- » 到2030年，能源、交通运输和食品的颠覆将直接减少40%的全球排放量，到2035年减少70%以上，到2040年减少80%以上。
- » 到2030年，因食品颠覆而从畜牧业中腾出的27亿公顷土地每年将抵消近10%的全球排放量，到2035年，通过被动重新造林的自然（无成本）恢复过程，还将抵消20%的全球排放量。
- » 不依赖需要政府支持的非市场排放抵消（即主动重新造林或基于技术的碳回收）。
- » 在整个时间段内，排放量保持在2°C中位路径以下，这意味着不需要碳回收来弥补因过度投入而损失的碳预算。

图 3：RethinkX 核心颠覆情景：“保持理智”



资料来源：IPCC, Our World in Data (用数据看世界), 全球碳项目, RethinkX。^{12,13,14,15}

RethinkX 加速颠覆情景：“严肃对待”

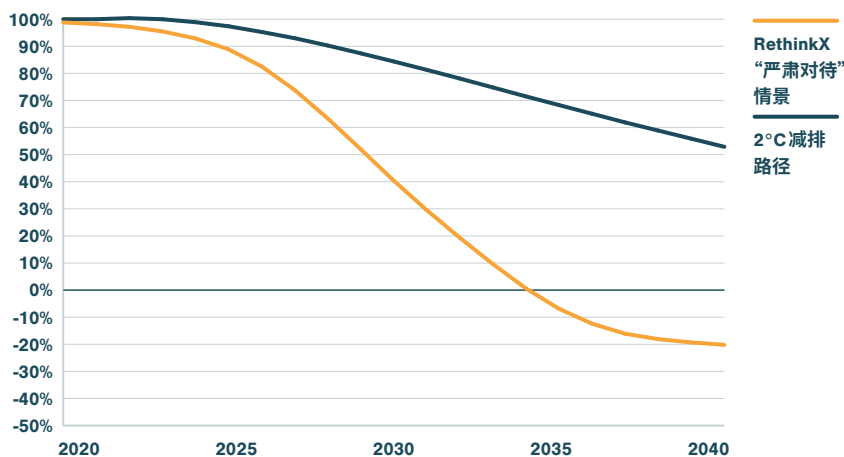
在这种情景下，社会选择严肃对待并积极主动地加速 21 世纪 20 年代的能源、交通运输和食品部门颠覆。在这个情景中，社会将作出与“保持理智”情景类似的社会选择来部署和推广 SWB、A-EV 和 TaaS 以及 PFCA 技术，由于实施更积极，时间表提前了 1 年。此外，社会还将投资于主动重新造林，利用因食品颠覆而从畜牧业中腾出的 20% 的土地（剩余 80% 的腾出土地因自然恢复而被动重新造林），以及投资于其他碳回收技术，如海洋碱度增强 (OAE) 和直接空气碳捕获和存储 (DACCS)（见方框 3：进入负排放阶段）。

这种情景的主要特征包括：

- » 到 2030 年，全球排放量将下降 60% 以上，在 2035 年前下降 100%。
- » 2040 年后，全球排放量为 -20%，即每年因颠覆、重新造林和基于技术的碳回收而净减少 100 亿吨二氧化碳当量。
- » 全球减排是能源、交通运输和食品颠覆加上主动重新造林和基于技术的碳回收的抵消效应的共同结果。
- » 市场力量和公共投资都被用于降低排放。
- » 在因食品颠覆而腾出的 20% 的土地上进行主动重新造林，而其余 80% 的土地进行被动重新造林。
- » 主动重新造林的成本因生物群系而异，从每公顷 500 美元到每公顷 2,500 美元不等，按 25 年的时间框架计算，每吨二氧化碳当量的收回成本平均略高于 10 美元。
- » 在 25 年的时间框架内，重新造林碳回收总成本为 517 万亿美元，即平均每年 210 亿美元。
- » 从 2035 年开始，主动和被动重新造林一共将抵消大约 20% 的排放量，即每年 100 亿吨二氧化碳当量。
- » 基于技术的碳回收呈 S 型曲线上升，最终将达到相当于 2020 年排放量 20% 的年排放率，即每年 100 亿吨二氧化碳当量（从 2040 年开始）。
- » 基于技术的碳回收成本最初将为每吨二氧化碳当量 100 美元，但在颠覆和规模扩展的推动下，到 2040 年将下降至 10 美元。
- » 在 25 年的时间框架内，基于技术的碳回收总成本为 1.1 万亿美元，即平均每年 440 亿美元。

这一情景如图 4 所示。

图 4：RethinkX 加速颠覆情景：“严肃对待”



资料来源：IPCC, Our World in Data (用数据看世界), 全球碳项目, RethinkX。^{12,13,14,15}

RethinkX 延迟颠覆情景：“停滞不前”

在这种情景下，社会通过试图保护现有的化石燃料公司、公用事业垄断企业、传统汽车制造商以及畜牧业和渔业免受颠覆，积极抵制采用 SWB、A-EV 和 TaaS 以及 PFCA 技术。这种努力最终是徒劳的，但会将能源、交通运输和食品部门的颠覆推迟 5 年。

虽然这三个部门的颠覆仍将摧毁基于旧技术的现有产业并相应减少排放，但这一情景说明了糟糕的社会选择（即抵制新技术并支持现有产业）导致的延迟会如何导致我们暂时超过 2 摄氏度的中位路径，使地球面临严重的气候变化风险。

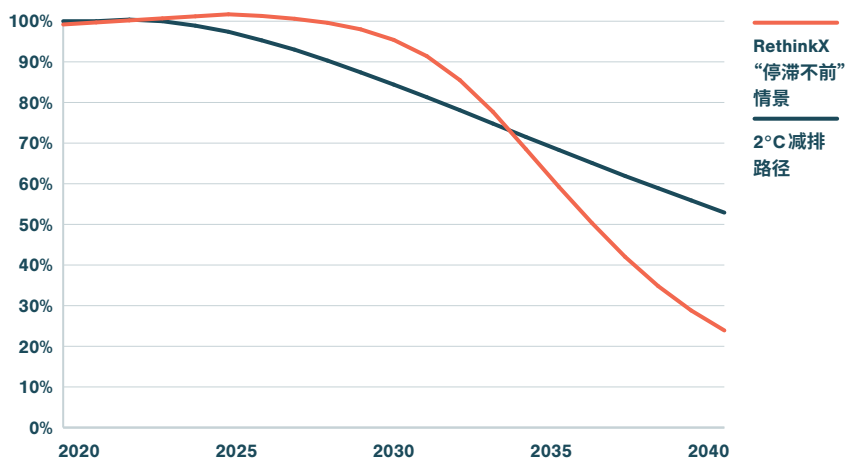
重要的是，这种情景并不是相当于“照常”情景或任何其他常规情景。这种情景表明，假设现有的碳密集型能源、交通运输和食品行业将持续存在到 2100 年的这种传统预测是不可信的，因为其没有认识到颠覆的不可避免性。

这种情景的主要特征包括：

- » 排放量在 2026 年之前持续上升，到 2030 年仍处于 2020 年水平的 95%，也就是说在本世纪 20 年代将暂时超过 2 摄氏度中位路径，将人类置于气候危险范围。
- » 随着现有产业崩溃，排放量到 2035 年将减少 40%，到 2040 年将减少 75%，但这可能不足以避免严重的气候变化风险。
- » 在 21 世纪 30 年代中期之前，排放量将超过 2° C 的中位路径，这意味着通过碳排放削减实现的净负排放量将需要弥补因过度投入而损失的碳预算。

这一情景如图 5 所示。

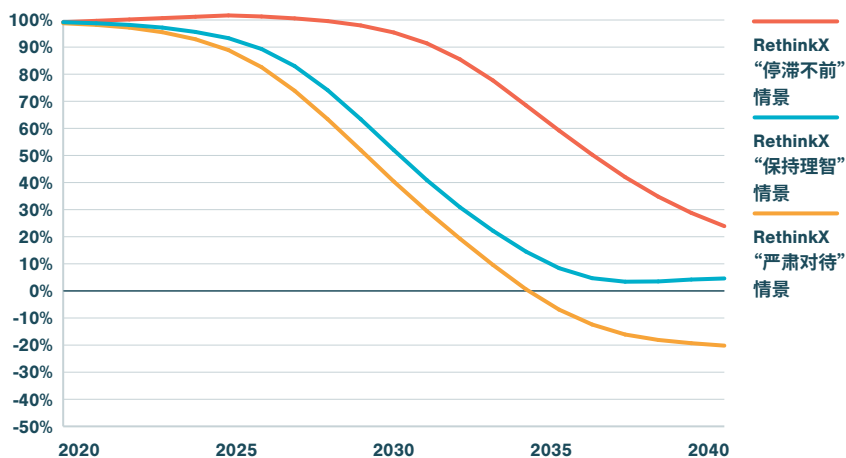
图 5：RethinkX 延迟颠覆情景：“停滞不前”



资料来源: IPCC, Our World in Data (用数据看世界), 全球碳项目, RethinkX。^{12,13,14,15}

图 6 显示了三个 RethinkX 情景。

图 6：RethinkX 颠覆情景



资料来源: RethinkX.

减排 (按部门)

表 1 基于牛津大学在“用数据看世界”项目中收集的数据，显示当今全球大多数温室气体排放(56.7%)与能源使用有关，主要是化石燃料燃烧产生的二氧化碳(CO₂)。食品部门的排放主要是甲烷(CH₄)和一氧化二氮(N₂O)，占全球排放量的 18%。交通运输部门所占份额较小，为 16.2%，但道路运输这一分部门是最大的单一排放源，为 11.9%。这三个部门以外的其他来源占全球排放量的 8.4%，其中最大的来源是水泥生产，占 3%。这些数据显示，全球 90% 以上的排放来自于将在未来 15 年面临颠覆的三个部门。¹³

表 1：按部门和分部门分列的排放量

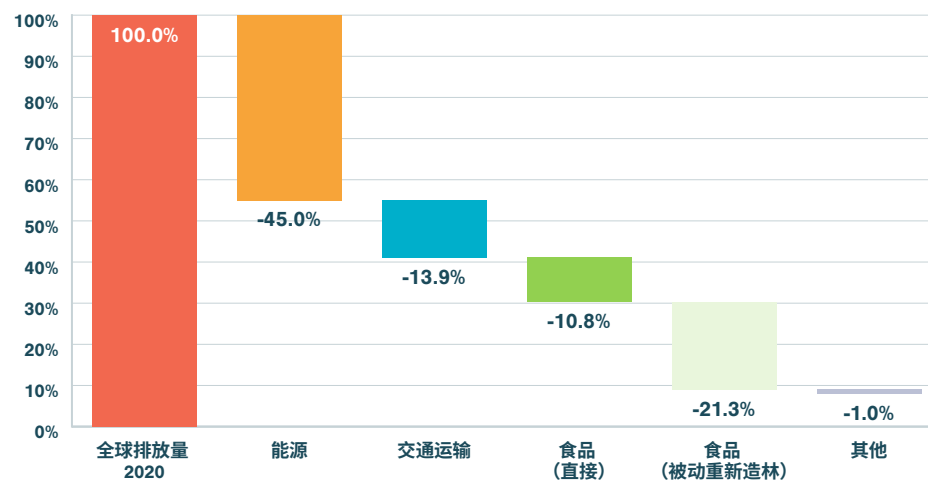
部门	子部门	2020年全球温室气体排放量的比例 (以2016年为基线)
能源	住宅建筑物	10.9%
	其他行业	10.5%
	未分配的燃料燃烧	7.8%
	钢铁	7.1%
	商业建筑物	6.6%
	散逸性石油和天然气	3.9%
	化学和石化 (能源)	3.5%
	散煤	1.9%
	农业和渔业中的能源	1.7%
	食品和烟草	1.0%
	非铁金属	0.7%
	纸张和纸浆	0.6%
	机械设备	0.5%
	小计	56.7%
交通运输	公路运输	11.9%
	航空	1.9%
	航运	1.7%
	铁路	0.4%
	管道	0.3%
	小计	16.2%
食品	畜牧和粪肥	5.8%
	农业土壤	4.1%
	庄稼焚烧	3.5%
	毁林	2.2%
	耕地	1.4%
	水稻种植	1.3%
	草地	0.1%
	小计	18.0%
其他	水泥	3.0%
	化学和石化 (工业)	2.2%
	垃圾填埋	1.9%
	废水	1.3%
	小计	8.4%

注：表 1 中的分部门百分比总和不完全为 100%，因为这些数据是 2020 年相对于数据集基准年 2016 年的百分比。

资料来源：IPCC, Our World in Data (用数据看世界，以 2016 年为基线)，全球碳项目。^{13,14,15}

图 7 显示，到 2035 年，在我们的“保持理智”情景中，SWB 带来的能源颠覆将消除 45% 的全球排放，A-EV 和 TaaS 带来的交通运输颠覆将消除 13.9% 的全球排放，PFCA 带来的食品颠覆将消除 32.1% 的全球排放。重要的是，食品颠覆能够消除的排放超过该部门目前的排放量，因为从畜牧业中腾出的 27 亿公顷土地即使不经历任何主动重新造林工作，也能通过被动重新造林以自然方式捕获和储存大量碳。因此，这三个部门的颠覆可以在 15 年内减少全球 90% 以上的温室气体排放。

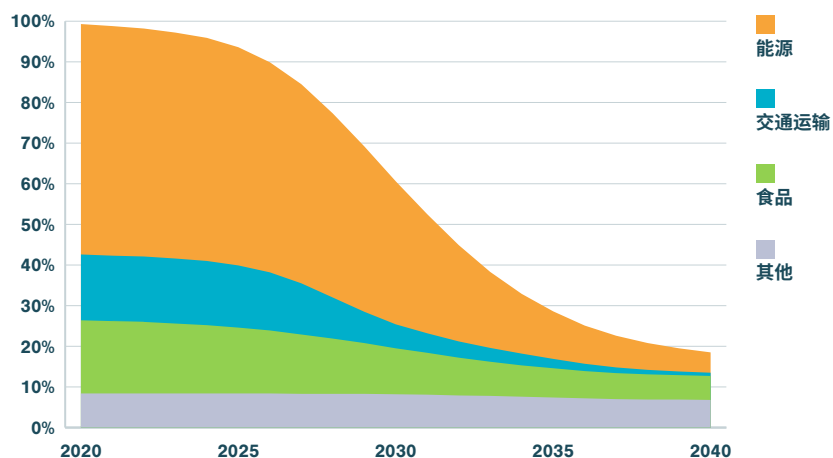
图 7：“保持理智”情景下到 2035 年的减排和抵消，按部门划分



资料来源：RethinkX。

图8显示了我们的“保持理智”情景中三个部门颠覆导致的直接减排，不包括因食品颠覆而腾出的27亿公顷土地上被动重新造林导致的碳回收。能源排放将减少到目前数量的一个零头。交通运输排放几乎会完全消除，只有难以电气化的应用会继续产生少量排放，如长途航空和航运。食品排放减少了一半以上。水泥生产和垃圾填埋场等其他排放源的排放仅略有下降，因为它们不会受到这三个部门颠覆的直接影响（见“最后的碳问题”）。

图 8：“保持理智”情景下的减排，按部门划分（不包括被动重新造林）



注：表1中的分部门百分比总和并不完全是100%，因为这些数据是2020年相对于数据集基准年2016年的百分比。

资料来源：RethinkX。

脱碳就绪——决策指南

能源、交通运输和食品的颠覆将对全球经济的各个分部门产生不同的影响。在公路运输等一些分部门，脱碳将与颠覆直接并行，因为除了造成三次颠覆的SWB、A-EV和TaaS以及PFCA之外，这些分部门不需要其他技术即可脱碳。但在航空等其他能源，脱碳可能会滞后，因为电动飞机和储能领域仍然需要技术进步。因此，每个分部门可以按缓解准备的三个阶段分类，即“研究”、“部署”或“推广”。从阶段本身就可以看出，在每个准备阶段，投资者、政策制定者、公民领袖和其他决策者必须采取的最佳选择和行动都有所不同。表2概括了这些选择和行动。

**Table 2: 按脱碳就绪阶段划分的选择和行动——
决策指南**

脱碳就绪阶段	选择和行动
研究	<ul style="list-style-type: none"> » 该分部门脱碳的技术潜力已经确定，但要实现商业可行性，仍需取得实质性进展 » 支持研发的政府资金 » 支持研发的私人投资
部署	<ul style="list-style-type: none"> » 该分部门脱碳所需的技术已经过验证，可以进行商业部署，但必须通过经验加以完善，才能具有竞争力 » 需要政府出台政策，以通过明智运用法规、标准、指令和禁令来设计有效的市场 » 需要临时的政府支持和补贴来逐步推广新技术 » 需要更长期的投资来资助初始部署
推广	<ul style="list-style-type: none"> » 该分部门脱碳所需的技术已经得到验证，并准备推广 » 需要政府出台政策，以消除市场壁垒，打破现有垄断，保障使用新技术进行生产和贸易的权利，并终止对基于旧技术的现有产业的保护 » 公共和私人投资可以为部署提供资金

资料来源: RethinkX.

脱碳就绪阶段与减少该分部门排放所需技术的成熟相对应。这些技术不仅包括SWB、A-EV和TaaS以及PFCA，还包括脱碳所需的任何其他技术。

例如，几乎所有散逸性石油和天然气的排放都将被能源和交通运输颠覆直接消除，而不需要额外的技术，因此我们将这一分部门归类为“推广”阶段，因为脱碳所需的技术——SWB、A-EV和TaaS——已经投入市场。

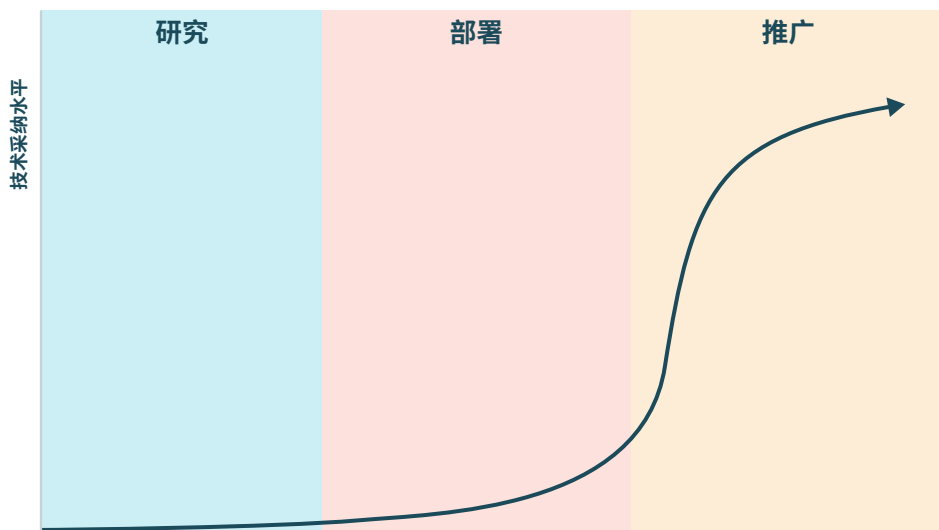
以住宅供暖为例，我们将这一分部门分类为“部署”阶段，因为它不仅需要SWB提供清洁能源，还需要额外的技术，例如用感应炉灶取代燃气灶，用电热水器取代燃气热水器，用电热泵取代燃气炉和燃油锅炉。同样，除了SWB之外，钢铁分部门的脱碳还需要工业加热过程电气化，需要其他还原剂来取代焦炭中的碳。应用这些附加技术不需要进一步的研究，但是它们将因为表2中描述的选择和行动获得巨大推力，帮助它们部署到市场上。

最后，我们将废水或水稻种植等分部门归类为处于研究阶段，因为目前几乎没有任何技术可以实现这些分部门的完全脱碳，这意味着需要进一步的研发支持。

根据脱碳就绪程度对分部门排放源进行分类，为决策提供了强有力的指导，方便在决策时考虑我们的工作优先重点，以尽快最大限度地减少排放。如果没有这样一个指导框架，决策者在应对气候变化时就只有采取无重点的“打地鼠”方式，从而有可能造成财政、物质和政治资源分配不当。此外，该指南显示了清洁技术可以在哪些方面影响经济、社会和环境激励和目标，因此说明了我们可以在何处利用市场的力量和效率来推动减排，而不是仅仅依靠政府来完成重任。

图9显示，准备阶段往往与相关技术采用所处的S曲线阶段相对应。

图 9：脱碳就绪阶段



资料来源：RethinkX。

这一分析的关键意义之一在于，目前全球87%的排放来自处于推广或部署阶段的分部门，因此这些排放的缓解在很大程度上可以由市场力量推动。

社会需要作出正确的选择、采取正确的行动，政府、投资者和其他决策者才能帮助分部门从部署阶段进入推广阶段，并确保规模尽快扩大。目前，全球只有13%的排放来自那些在脱碳技术具备商业可行性之前仍需要更多研发的子行业。

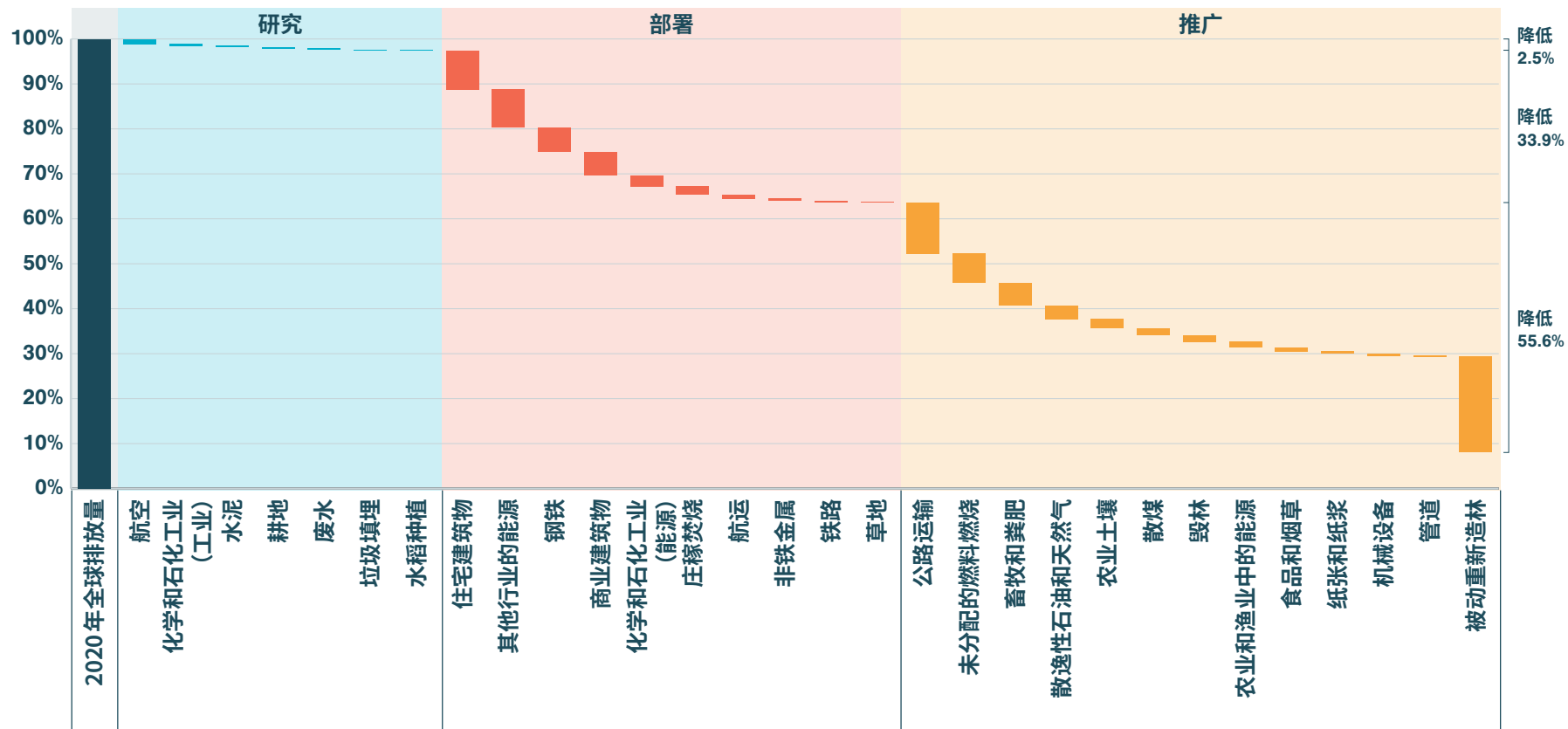
图10和图11显示，在我们的“保持理智”情景中，未来15年可实现的绝大多数减排来自那些准备好通过推广SWB、A-EV和TaaS以及PFCA来直接脱碳的分部门，或者那些准备好部署到市场并能够在政府、投资者和其他决策者的正确选择和行动的支持下迅速升级到推广阶段的分部门。

图 10：按脱碳就绪阶段划分的全球排放份额



资料来源：IPCC, Our World in Data (用数据看世界, 以2016年为基线), 全球碳项目, Andrews等人, 2018年。^{13,14,16}

图 11：“保持理智”情景下到2035年的减排情况，按脱碳就绪阶段划分



资料来源: RethinkX.

最后的碳问题

对于几个分部门(即化学和石化工业、水泥、耕地、废水、水稻种植、作物燃烧、农业土壤和散煤)的一些排放源,用任何现有技术或可预见的技术都不可能完全脱碳。解决这个“最后的碳问题”的方法有三类:1)限制这些利基市场的消费;2)使这些利基市场去碳化;或者3)抵消这些利基市场的排放。传统分析高估了“最后的碳问题”的规模,低估了技术解决该问题的潜力,导致他们将注意力集中在第一类解决方案上。

幸而,“最后的碳问题”比传统分析假设的要小,因此也更容易控制。在我们的“保持理智”情景中,到2035年将只剩下2020年10%的排放量。我们当然可以针对这些利基市场研究脱碳技术,但在许多情况下,这不太可能是最具成本效益的选择。相反,能源、交通运输和食品本身的颠覆将通过降低清洁能源和机械的成本,提供大量土地用于主动重新造林,使碳回收变得更加经济、更加可行(见方框3:进入负排放阶段)。

方框3：进入负排放阶段

实现净零排放只是解决气候变化的第一步。我们还必须使大气中二氧化碳的浓度恢复到安全水平，因为二氧化碳会在大气中长时间驻留，这意味着除非我们采取行动消除二氧化碳，否则以往的排放将在未来几个世纪内继续推动全球变暖。目前的研究表明，即使我们成功将大气中的碳含量保持在450ppm，我们把平均全球气温上升限制在基线以上、2°C以下并避免气候变化的最严重影响的可能性只有66%。⁹对于这样一种蕴藏着严重后果的风险来说，这个胜算太低。因此我们也有必要从大气中提取大量碳，以确保人类免于灾难。

打个比方，人类就像泡在溢水的浴缸里的孩童。为了保护孩子，第一步是关掉水龙头，让水不再溢出。第二步是对浴缸排水，使水位回到对孩童安全的水平。正如关闭水龙头不能排空浴缸一样，仅仅减少新的排放量并不能减少大气中现有的二氧化碳存量，而等待水自然蒸发又太危险了。按照这个比喻，气候变化最终不能通过个人或集体厉行节俭来解决，因为减少消费（关闭水龙头）不会从大气中吸收任何碳。



由于目前科学界对于避免气候变化的最严重影响需要回收多少碳还没有达成明确的共识，最明智的预防方法是将大气成分完全恢复到工业化前的状态。这需要去除数百亿吨的碳。这似乎是一个巨大的挑战，但颠覆能源、交通运输和食品的共同技术将使通过碳回收来恢复大气在技术和经济上首次变得可行。

来自A-EV和其他机器劳动力的清洁、廉价的能源和生产将大大降低主动重新造林和基于技术的碳回收方法的成本，比如海洋碱度增强(OAE)和直接空气碳捕获和存储(DACCS)。与此同时，27亿公顷土地将因食品颠覆而脱离畜牧业，这相当于美国、中国和澳大利亚三国面积的总和，比联合国环境规划署根据将全球平均气温增幅保持在2°C以下这一目标建议恢复的10亿公顷土地多出近两倍。¹⁷我们估计，到2040年，能源、交通运输和食品的颠覆将使碳回收成本降至每吨10美元以下。





» **第2部分：**
**对能源、交通运输和
食品的颠覆**

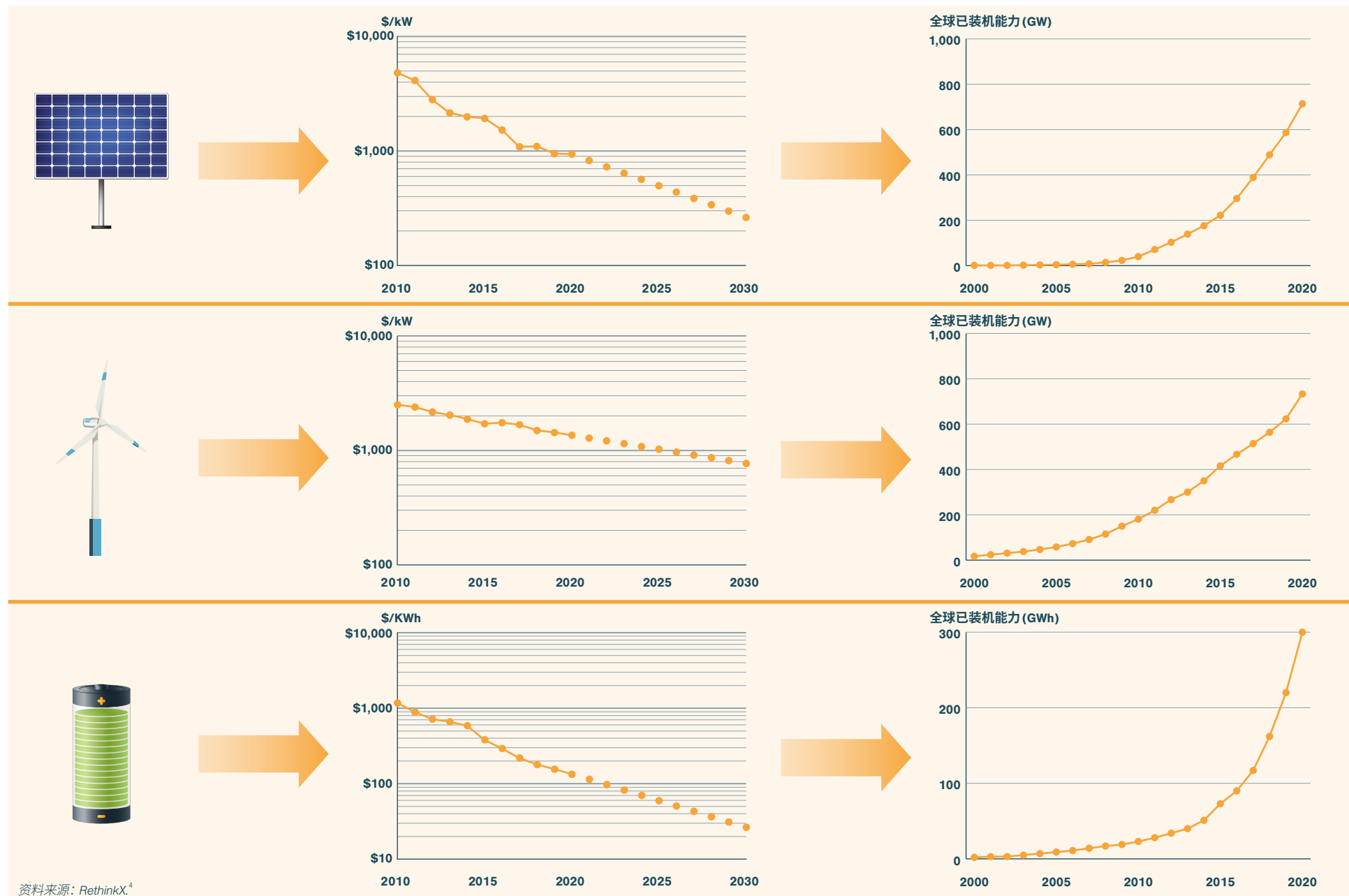
我们的三个情景以**能源**、**交通运输**和**食品**部门的可预测颠覆轨迹为基础。

十多年以来，RethinkX团队预测了以下领域的显著成本改善和市场增长：能源部门的太阳能、风能和电池；交通运输部门的无人驾驶、电动汽车、运输即服务；食品部门的精密发酵和细胞农业。RethinkX使用的方法基于Seba技术颠覆框架，并根据自19世纪以来的数十次历史颠覆进行了经验验证，提供了一个全面了解技术颠覆之复杂性的强大视角。（参见附录B了解更多信息）。



对能源部门的颠覆

图 12：对能源的颠覆



资料来源: RethinkX⁴

太阳能光伏发电、陆上风力发电和锂离子电池(SWB)的经济性将推动能源部门的颠覆，SWB技术的能力已经超过了传统发电，并将在本世纪20年代取代化石燃料和传统核能。⁴几十年来，这些技术的成本和能力一直在不断改善(见附录B)。仅2010年至今，太阳能光伏产能成本降幅就超过80%，陆上风电产能成本降幅超过45%，锂离子电池产能成本降幅近90%。^{18,19,20,21}这些成本改进具有一致性，属于可预测范围，并且每项技术都将在本世纪整个20年代继续呈现值得注意的经验曲线。

现有的火电厂、燃气电厂和核电厂的发电能力已经不如新的太阳能和风力发电装置。⁷到2030年，还将出现新的蓄电技术，使来自太阳能和风力发电的电力全年随时可用。这意味着传统能源技术必将走向颠覆。

政策制定者、投资者、公民领袖和公众都误认为，即如果没有能够持续几周的电池储能，太阳能光伏和风能就无法提供100%的电力。这是因为传统模型无法理解未来的太阳能和风力发电能力将大大超过如今已装机的总发电能力。我们的研究揭示了发电容量和储能容量之间的基本折衷关系，我们称之为清洁能源U型曲线。当两者之间的成本得到正确优化时，完全使用SWB系统不仅是可以实现，而且是到2030年最便宜的选择，对于新的电力供应和与现有的传统发电厂相比均是如此。

随着SWB采用的加速，这些技术将以接近零的边际成本产生越来越多的剩余能源，我们称之为清洁能源超级电力(或超级电力)。因为SWB系统的容量必须设计为能够完全满足一年中最难发电的时期的电力需求，例如白昼时间最短的冬季阴天时期，所以它们能够在一年的其他时间产生更多的电力。就像互联网能够以接近零的边际成本满足信息和通信的需求一样，由于SWB系统冗余能力产生的大量清洁能源将为社会、经济和环境创造全新的非凡可能。与电气化相

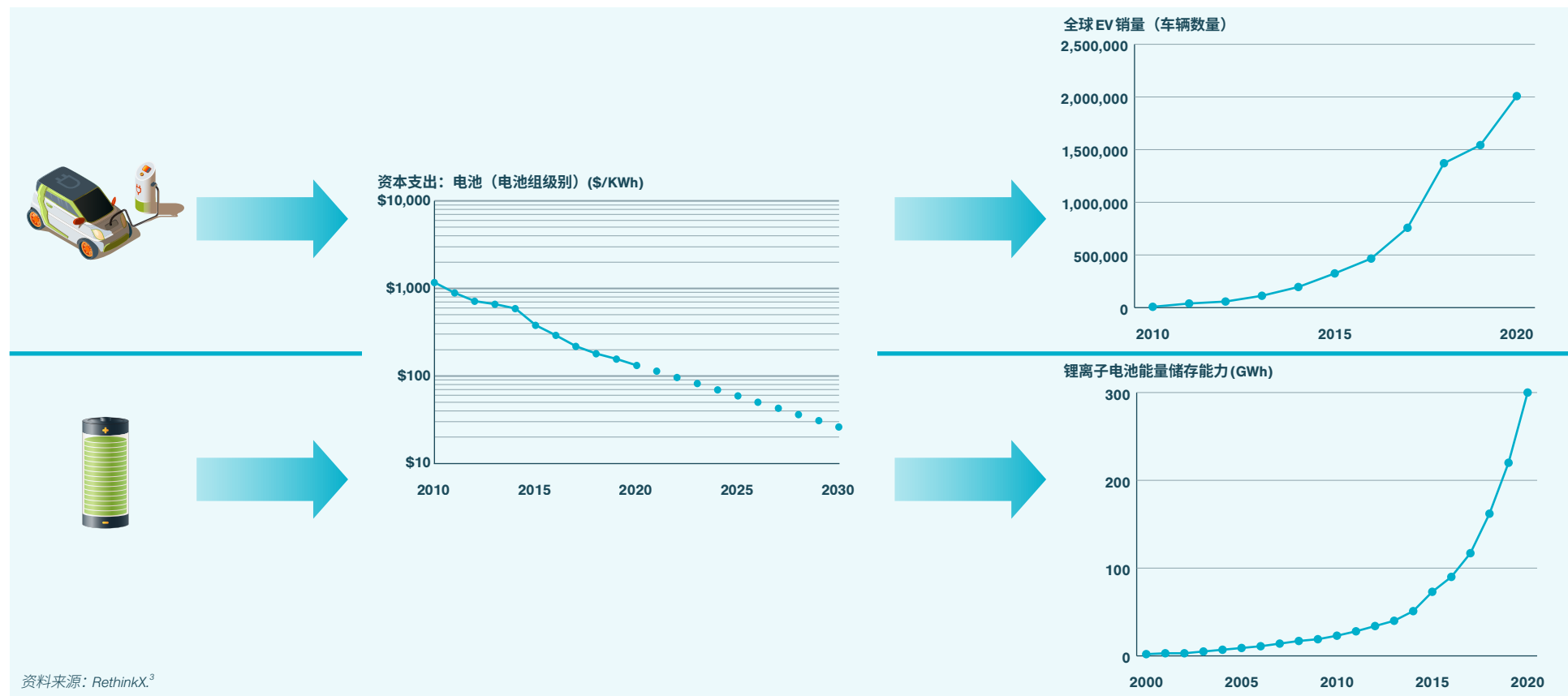
结合，超级电力将能够为以前的各种碳密集型服务提供清洁能源，如海水淡化和过滤、道路运输、住宅和商业供暖、废物管理以及工业和化学过程。

与化石燃料、核能甚至水电不同，如果能够在任何地方以任何规模部署太阳能光伏和电池，就能够使能源生产本地化、分散化、民主化。这种新的能源生产系统更稳定、更有弹性，将使欠发达国家和社区能够跨越以往的人类发展障碍，缩小贫困和公平差距。



对交通运输部门的颠覆

图 13：交通运输颠覆



我们之前的研究表明，交通运输颠覆将分两个阶段展开。在第一阶段，电动汽车将因为可快速降低成本而取代内燃机汽车。到本世纪20年代末，这种颠覆将导致所有新生产的汽车都是电动汽车，因为强大的反馈回路将迫使内燃机汽车制造走向末路。然而，第一阶段本身也将被第二阶段颠覆，第二阶段的颠覆将来自于提供交通即服务(TaaS)的无

人驾驶电动汽车(A-EV)的经济性。在本世纪20年代末，内燃机汽车和私家车将被TaaS车队(而非个人)拥有的按需无人驾驶电动汽车取代。与其他颠覆一样，这些技术的成本和能力在几十年来不断改善，将成为客运和货运车辆运输颠覆的主要驱动力。

电动汽车的运营成本已经低于内燃机车辆，它们的初始成本也在迅速接近平价。因为

在高利用率模式(货运和打车)下，车辆大部分时间都在使用，那么使用可以坚持超过100万英里(比内燃机车长7倍)的电气传动系，将使每英里的运输成本大幅下降——因为使用寿命大幅延长了。即使没有无人驾驶技术，电动汽车也有望使按需运输比内燃机车型更便宜，因此将扩大按需运输市场。无人驾驶技术成熟后，将消除乘车服务的人力

成本，导致TaaS的每英里成本比现在的私家车便宜十倍，并导致快速的交通运输颠覆。

随着依赖化石燃料和人类司机的旧汽车的效用迅速趋近于零，大多数人将不再购置汽车，而是在需要时使用汽车，通过无人驾驶交付货物，并在方便时使用更小的载具——这将大大减少道路上的汽车数量。优步和Lyft等网

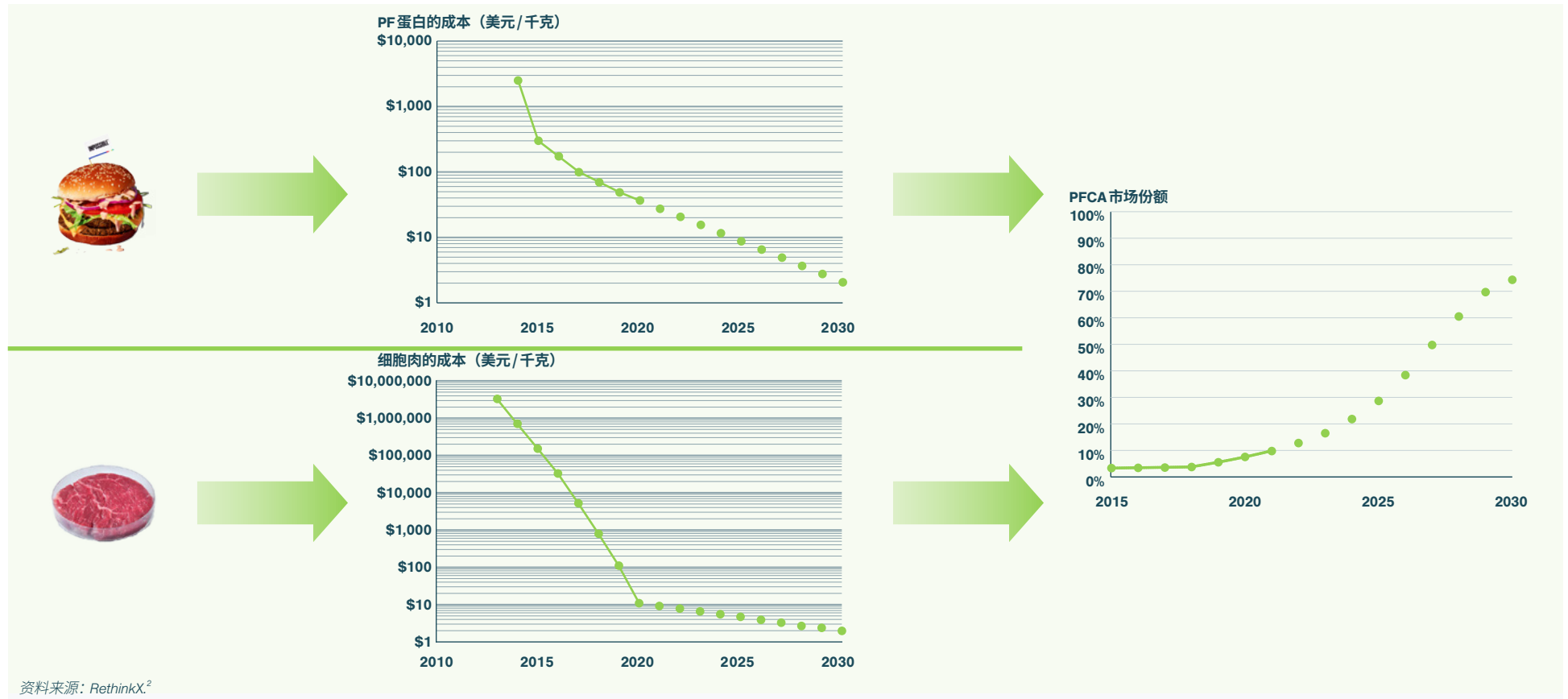
约车公司预测了TaaS将产生的影响。私家车将不再是主要的道路运输模式，随着车主转向使用TaaS，新车销售和现有车队将被电动汽车以及后来的无人驾驶电动汽车所取代。

除了公路运输之外，短途航空（约占商业航空排放的三分之一）将被电动飞机和乘用电动汽车进行夜间公路旅行的组合所颠覆。²²

航运排放也将被船舶电气化和商品需求变化所颠覆：最大的货运类别，包括原油、石油产品、煤炭、天然气、铁矿石、钢铁、汽车、谷物和牲畜，都将因这三种颠覆而需求骤降（见方框5：颠覆的级联效应导致巨大惊奇）。

对食品部门的颠覆

图 14：对食品的颠覆



精密发酵(PF)和细胞农业(CA)将与各种动物产品竞争，其经济效应将推动食品的颠覆。我们之前的研究发现，到2030年，精密发酵将使蛋白质的成本比现有的动物蛋白便宜5倍，到2035年将便宜10倍。蛋白质和其他复杂有机分子的生产精确度也意味着产出的食品将比它们取代的动物源产品更优质、更安全、更稳定、种类更丰富。这种颠覆对工业化动物养殖的影响将十足深远。

用精确发酵技术制造的食品将具有压倒性的经济竞争力。作为这一工业化食品系统中效率最低、从经济角度而言最脆弱的部分，奶牛产品将首先感受到食品颠覆的全部力量。新的精密发酵(PF)食品的土地效率将提高100倍、原料效率提高10-25倍、时间效率提高20倍、水资源利用效率提高10倍。它们产生的浪费也会降低一个数量级。到2030年，美国的奶牛数量将下降50%，养牛业将几乎破产。全世界所有其他商用畜牧业将很快踏入同样的命运，商业渔业和水产养殖业也是如此。

碎牛肉市场的颠覆已经开始，一旦替代技术达到成本平价，其采用率将呈指数级加速。但这不仅仅依赖于终端产品的直接一对一替代。在一些市场上，只需要替换一小部分成分，就会颠覆整个产品。例如，一旦PF技术取代牛奶中仅含3.3%的蛋白质，整个牛奶行业就会开始崩塌。我们从动物身上提取的各种产品将逐一被更好、更便宜、更好吃的替代品所取代，引发牲畜和海鲜行业的价格上涨、需求下降和规模经济逆转的死亡螺旋。

一种称为“食品即软件”的全新生产模式正随PFCA一同涌现——在这种模式下，科学家设计的分子被上传到数据库，形成分子食谱，而世界各地的食品工程师可以将之用于设计产品，就像软件开发者设计应用程序一样。这个模式可以保证不断的迭代，因此产品改进很快，并且每个版本都比上一个版本更好、更便宜。这也意味着，PFCA视频系统将去中心化，因而比工业化畜牧业更加稳定、更有弹性（发酵农场可在城镇或靠近城镇的位置定址，就像今天酿造业那样）。

如今，畜牧业占用了33亿公顷耕地，用于作为牧场和种植饲料。²³食品颠覆将解放80%的土地——相当于美国、中国和澳大利亚面积的总和。这一惊人的转变将为环境保护、再野生化和重新造林提供前所未有的机会。即使没有主动重新造林，这些土地通过自然恢复过程发生的被动重新造林也将捕获和储存相当于今天全球排放量20%的碳（详情见附录C）。[°]

图 15：到2040年因食品颠覆而不再用于畜牧业的土地面积



出于比较：

美国土地面积 – 9.3 亿公顷

中国土地面积 – 9.2 亿公顷

澳大利亚土地面积 – 7.6 亿公顷

三国总和 –

26 亿公顷



到2040年腾出的土地 = 美国、中国和澳大利亚的面积总和

食品颠覆还将终结商业渔业和水产养殖业，这些行业的利润已经非常微薄，无法以低得多的成本与优质替代品竞争。因此，食品颠覆将开启海洋生态系统前所未有的恢复。尽管海洋生物量中储存的碳量与陆地生物量相比较少，但全球海洋的复原也将带来气候效益和其他生态效益。²⁴

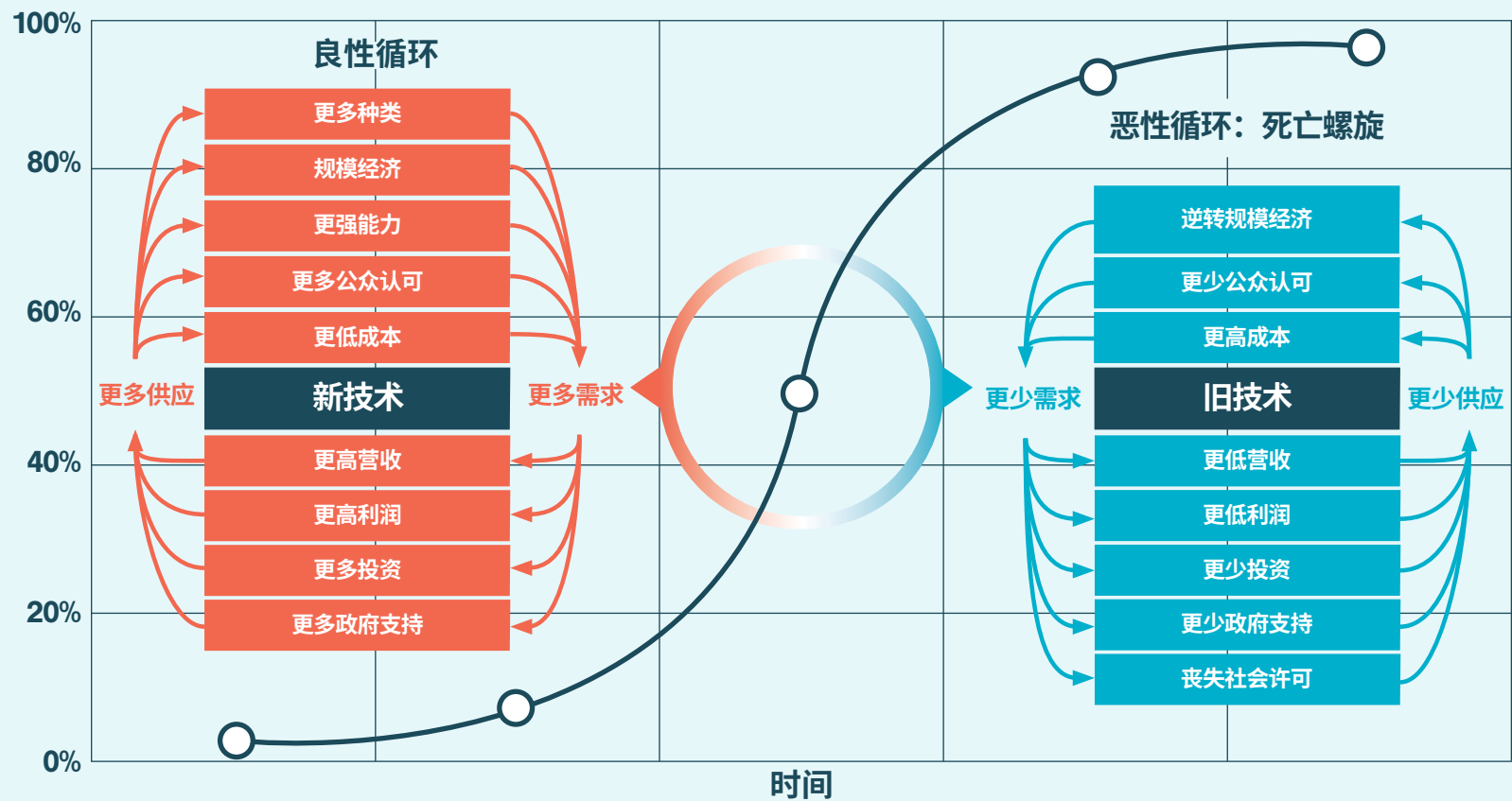
资料来源：RethinkX, Hayek 等人，2020年。²³

方框 4：颠覆以惊人速度发生

新技术的融合将引发市场和部门内部和之间的因果反馈回路,从而推动颠覆。历史表明,这些循环相互作用,相互放大,在良性循环中加速采用新技术,在恶性循环中加速抛弃旧技术。由于效应相互叠加,这些系统动态将最终导致颠覆以惊人的速度展开。各种技术和行业中都反复出现这种基本模式。

图 16：因果反馈回路驱动颠覆

市场份额

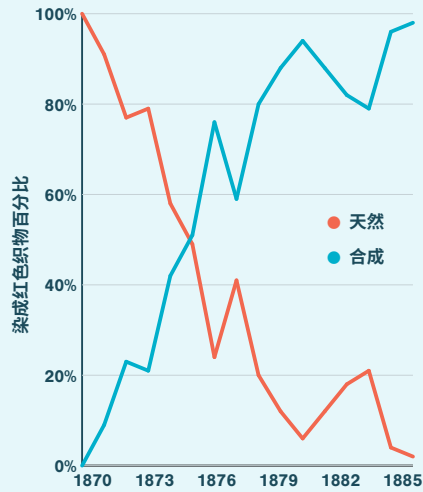


资料来源: RethinkX.

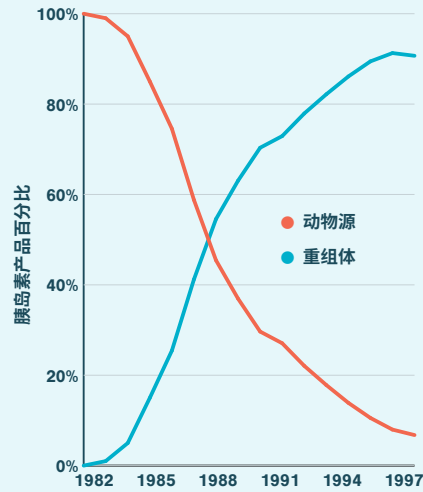
已经有迹象表明,能源、交通运输和食品部门的现有行业已经进入了颠覆的死亡螺旋,因为它们已经开始丧失“社会许可”。例如,许多政府现在已经承诺逐步淘汰能源和交通运输部门的化石燃料使用,随着埃克森美孚、雪佛龙、英国石油和壳牌等公司的股价开始缩水,股东们要求这些公司做出改变。^{25,26,27,28}

X形颠覆 - 历史案例

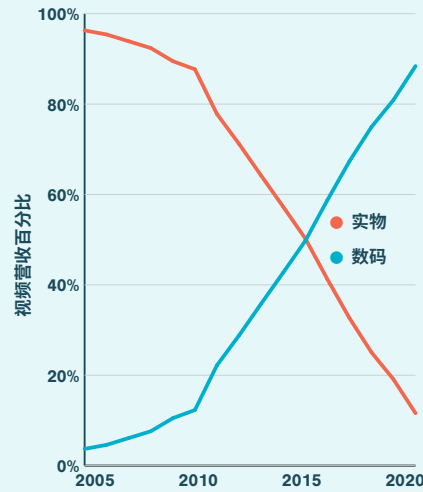
红色织物染料



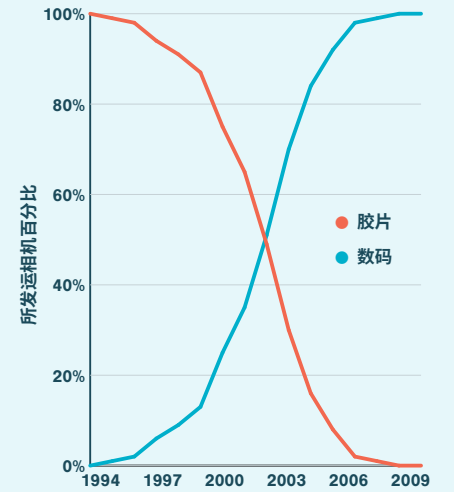
胰岛素



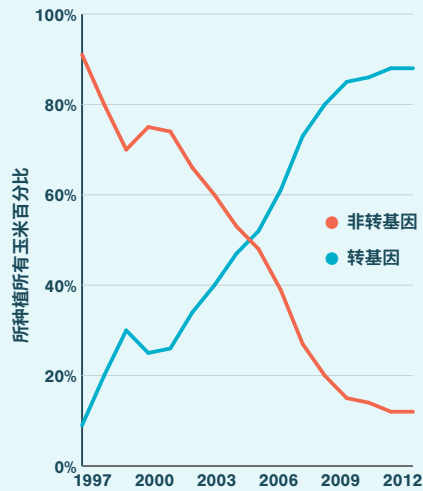
视频



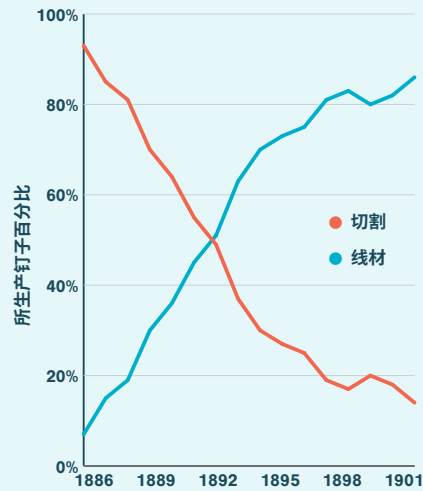
照相机



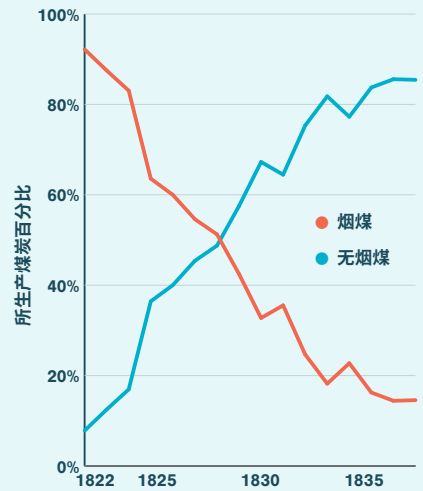
玉米



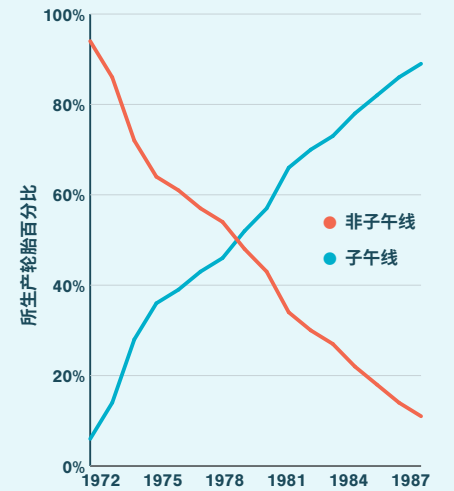
钉子



煤炭



汽车轮胎



资料来源: RethinkX, Lopez, 1989年; 国际监测系统健康; DEG; Widescreen Review; CIPA; 美国农业部, Adams, 2002年; NBER; 美国人口普查局, Rajan 等人, 2000年。 29,30,31,32,33,34,35,36,37,38

同步颠覆和技术融合

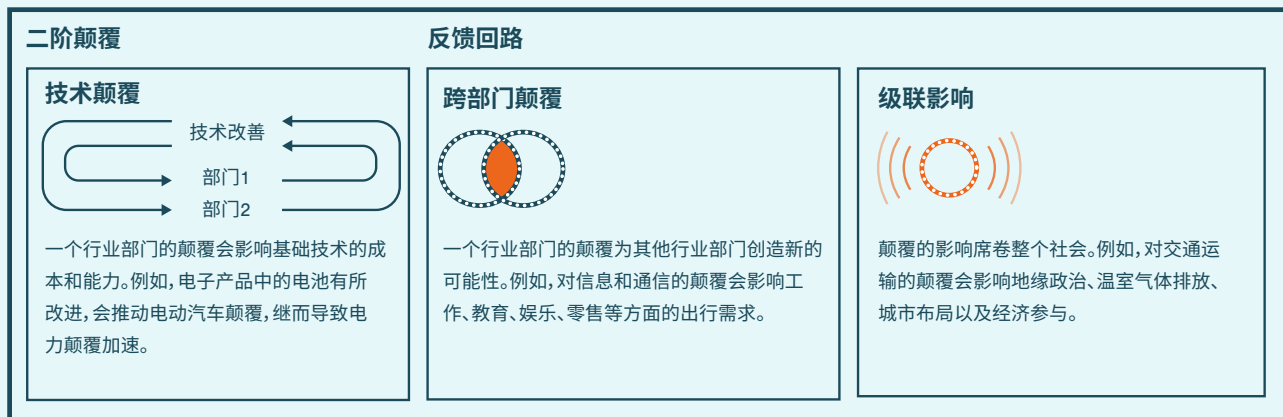
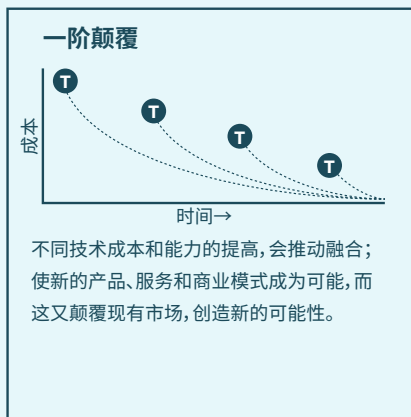
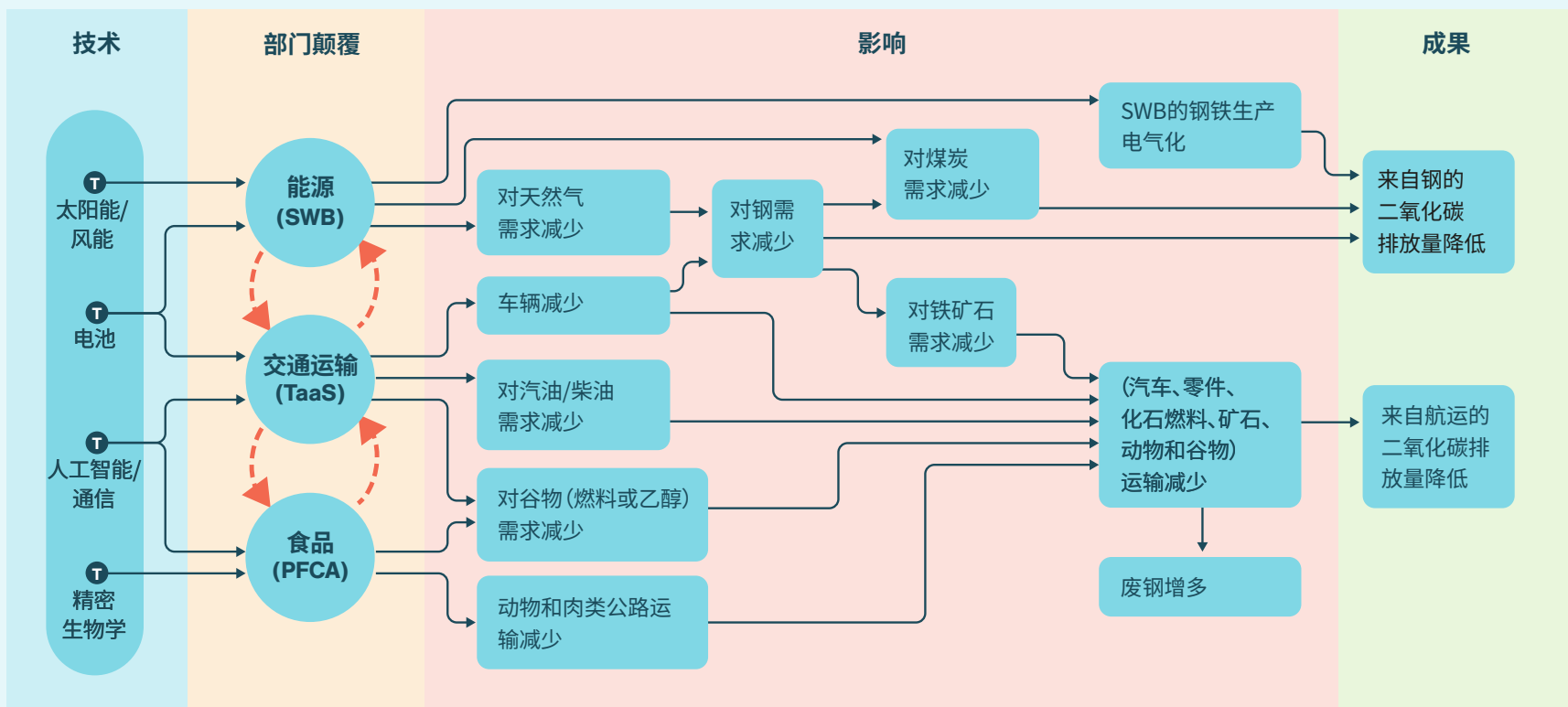
因为能源、交通运输和食品属于基础部门，所以这三个部门的颠覆将在全球经济的所有其他部门产生连锁的二阶和三阶效应，为进一步减排和环境恢复创造大量不同寻常的直接利益和机会。像历史上其他技术颠覆一样，这些技术并不是对现有技术的一对一取代，而是提供额外功能和属性，并开发出全新用途。例如，汽车不仅仅是马的替代品。汽车的能力强大得多，汽车本身也比马匹多样化得多，这就创造了基于新颖商业模式的全新市场，为以前未被满足的需求提供服务，因此产生了数万亿美元的额外价值。电力、互联网、个人电脑和智能手机也是这方面的范例，说明颠覆导致的比例失调将创造出具有突现属性的新系统，既可以带来意想不到的好处，也有意想不到的坏处（如温室气体排放）。

因此，几乎每一个经济分部门都将受到直接或间接的影响。在许多情况下，这些影响不仅仅是附加的，而是复杂的、有违直觉的、成倍增加的。例如，就公路运输而言，不仅可以通过车辆电气化脱碳，还可以通过能源颠覆导致电力本身脱碳，而食品颠覆还让牲畜、谷物和动物产品变得过时，因为其运输需求也大量降低，又可以进一步减少车辆里程，降低排放。由于交通运输颠覆大大减少了道路上的车辆数量，这也将减少运输部门对镍等电池材料的需求。其他28个分部门中的每一个分部门都可能表现出类似情况。



方框 5：颠覆的级联效应导致巨大惊奇

图 17：颠覆对钢铁的级联效应



资料来源: RethinkX.

颠覆的跨部门连锁效应和级联影响意味着它们会产生令人惊讶、有违直觉的结果。钢铁行业的例子很好地说明了这一现象与温室气体排放和气候变化之间的关系。

钢铁行业占全球排放量的7%以上，是普遍认为最难脱碳的部门之一。^{39,40} 这是因为生产精炼钢需要大量的能量来熔化铁矿石，并且还要通过使用碳来去除铁矿石中的氧气，因此会产生二氧化碳。但能源、交通运输和食品的颠覆不仅仅会使钢铁生产所需的能源脱碳，还会大幅减少对精炼钢的总体需求，并产生大量可重复利用的废钢。


石油钻塔、石油管道和天然气管道对钢（以及许多其他材料，如铜和镍）的需求将会消失。油轮占全球大约30%的船舶吨位，而其中大约40%是运输煤炭、铁矿石、汽车、卡车、牲畜和谷物的干散货船。⁴¹ 随着经济对这些产品以及运输船只的需求骤降，全球货船船队将大幅萎缩，这将消除钢铁需求的另一个来源，造成废钢过剩。与此同时，全球超过450万艘商业渔船的船队将因食品颠覆而完全覆灭，这将进一步减少用于制造新船的钢铁需求，并让废钢进一步过剩。⁴²

同样，化石燃料、牲畜、饲料用谷物和汽车本身也是地面运输需求的主要来源。在美国，仅煤一项就占运输货物总吨英里数的20%。⁴³ 随着三个部门颠覆的展开，这一需求将大幅下降。与2020年相比，交通运输颠覆本身将减少2030年道路上的汽车和卡车数量，因为我们将转向A-EV和TaaS。由于不需要发动机，电动汽车将比内燃机汽车使用更少的钢。与此同时，全球不具备无人驾驶能力的汽油和柴油车辆的使用价值将骤降至零，其中绝大多数将被送往废品站，进一步导致二手钢铁、铝、铜和其他材料过剩。

钢铁几乎100%可回收。废弃的船只、石油钻塔和炼油厂、管道、汽车和卡车将提供大量可回收废钢和其他金属。这些废钢将足以满足能源部门太阳能光伏和风力发电装置以及食品部门生物反应器等新行业新增的钢材需求。

随着能源、交通运输和食品颠覆使我们更接近钢铁生产与回收脱碳的目标，它们也会通过减少需求使目标向我们主动靠拢。





» **第3部分：**
**对温室气体排放和
气候变化的影响**

能源、交通运输和食品部门的颠覆对气候变化的影响是非同寻常的。只需这三个部门的颠覆，我们就能够在2035年前消除全球90%的温室气体(GHG)净排放量。可以利用市场力量来完成大部分部署和扩展工作，因为所需的技术要么今天已经在商业上可用并具有竞争力，要么可以在2025年前通过正确的社会选择部署到市场。对于剩余的10%，这三次颠覆也将使主动重新造林和基于技术的碳回收首次在技术上可行、经济上负担得起。



关键影响

1. 通过部署和推广已有技术，我们实现净零排放的速度可以比普遍想象的快得多

我们的分析表明，推动全球能源、交通运输和食品部门颠覆的清洁技术可以在2035年前将全球温室气体排放量减少90%。这是因为我们推动这些颠覆所需的技术如今已经存在，要么已经准备好部署到市场上，要么已经部署并可以立即推广。由于我们已经拥有解决气候危机所需的技术，我们不需要聚变能或其他未经验证的重大突破来实现净零排放。我们只需尽快部署和扩展太阳能光伏、风力发电和电池(SWB)、电动汽车(EV)和无人驾驶汽车(A-EV)，提供“运输即服务”(TaaS)和精准发酵和细胞农业(PFCA)（见方框4：颠覆以惊人速度发生）。

2. 我们能够实现净零排放，同时无需对社会或经济造成附带损害

我们之前的研究表明，SWB、A-EV、TaaS和PF天生优于现有技术。因此，这些清洁的新技术将会很快通过市场力量来跑赢和颠覆旧的、不那么环保的工业。这意味着我们不需要依赖政府对经济的供需双方实施严厉的限制，也就是说，我们可以避免降低生活水平和阻碍人类发展的紧缩政策所造成社会危害（这些政策的负担将不成比例地落在那些已经处于不利地位的社区和国家之上）。事实上，经济收缩只会减缓能源、交通运输和食品部门的颠覆，并推迟净零排放的实现时间。因此，希望减少排放的政府、公司、组织和个人应该将重点放在加快采用SWB、A-EV、TaaS和PFCA上，而不是放在紧缩上（见方框2：常规预测的错误）。

3. 市场能够、而且必须在减排方面发挥主导作用

我们的分析表明，42%的排放可以通过可立即推广的技术消除，另外45%的排放可以通过已经存在的技术消除，这些技术只需要适度的额外改进，变得更具成本竞争力，并在2025年之前开始推广。这意味着我们可以立即利用市场力量来减少全球87%的排放。因为运转良好的市场会调整激励机制、优化资源配置和对高效率给予奖励，我们可以利用这些经济效益，节省数万亿美元，而不是让这些资金将因为错误投资于旧技术而流失，同时降低现有行业的社会和环境成本。因此，政府的一个关键作用必须是消除采用SWB、A-EV、TaaS和PF的障碍（如公用事业垄断和牲畜补贴），扶持运作良好的市场，以避免现有行业受到的颠覆超出维持公共产品和服务连续性所绝对必要的程度。

4. 全球经济去碳化的代价不会很高，反而会节省数万亿美元

一个普遍的误解是，除非将排放的环境成本纳入计算，否则从直接经济角度来看，减少温室气体排放的成本将会十分高昂。事实上，情况恰恰相反：保护能源、交通运输和食品部门造成污染的行业免遭颠覆，才将是一个代价高达数万亿美元的错误。如果SWB、A-EV、TaaS和PF在经济上没有竞争力，我们就无法依靠市场力量来推动颠覆。幸运的是，这些技术要么已经具备竞争力，要么将在几年内

具备竞争力，并且随着采用速度加快以及成本和功能随着规模的扩大而改善，它们将变得更便宜。现在投资于旧有技术将是一个代价极其高昂的错误，因为花钱购置的资产将不可避免地在未来十年内因为颠覆而泥足深陷。例如，我们的研究表明，在过去十年对煤炭、天然气和核电资产的整个价值链的投资中，至少有2万亿美元将因SWB对能源部门的颠覆而搁浅。⁴政策制定者不应保护资产将在15年内过时的现有行业，而应着眼于保护这些行业的从业人员，以便社会能够在颠覆加速时最好地利用这些颠覆。

通过利用市场力量，减少温室气体排放可以从费用昂贵的进程转变为各个层面上都有利可图的投资，惠及地方和全球。选择接纳并引领（而不是抵制）这些颠覆的地区、国家、社区、城市、企业和投资者将获得巨大的经济和社会回报以及环境利益。随着这些颠覆带来的经济、地缘政治和社会机会日益明显，以及忽视这些机会将导致的风险不断凸显，各方行动者都将寻求加快自身的转型，而不仅仅是出于缓解气候变化的目的。一些人这样做可能是为了减轻对进口脆弱食品和能源供应的依赖，而另一些人可能认识到，领导这些颠覆可以获得政治资本和其他好处。随着不同的行动者寻求在自己的环境中加速颠覆，以避免风险或获得先占者优势，随之而来的激烈竞争将进一步产生有加速作用的强大反馈，加剧全球颠覆的速度和规模。

5. 重点明确的减排方略优于遍地开花的“打地鼠”方略

迄今为止的证据表明，社会将时间、注意力和资源分配给多种减排战略，将会适得其反。这种遍地开花的“打地鼠”方略既没有获得广泛的社会或政治支持，也没有产生有意义的结果。

我们的分析表明，最有效的方略是专注于单一战略：尽快部署和推广现有技术，颠覆能源、交通运输和食品部门，这将迅速减少大部分排放，同时通过主动重新造林和基于技术的碳回收大幅降低碳回收成本（见方框3：进入负排放阶段）。除了解决气候变化问题之外，基础部门颠覆的二阶和三阶阶联效应还将为环境恢复提供之前无法想象的机会，包括解决土壤和水污染、空气污染、水资源短缺、森林砍伐、生物多样性丧失和物种灭绝以及许多其他问题（见方框6：颠覆使所有形式的生态恢复成为可能）。

6. 我们不再需要在环境 and 经济之间进行权衡

迄今为止，经济增长及其在人类发展方面带来的惊人进步是以环境为代价的。但这种零和游戏，或有输有赢的关系，并不是不可改变的自然法则，而是原始提取技术产生的意外结果。能源、交通运输和食品部门技术取得切实的成本和能力改善，在生产体系的基本架构中实现范式转变，将有史以来首次提供用更少的资源做更多事情的能力。尽管存在反弹效应，但SWB、A-EV、TaaS和PFCA的清洁新技术代表我们朝着可持续满足人类需求的最终目标大步迈进。就温室气体排放而言，这些技术通过完全消除排放循环、防止杰文斯悖论发生，将环境和经济之间的关系转变为非零和博弈或双赢关系（见方框2：常规预测的错误）。[†]

7. 能源、交通运输和食品的清洁颠覆将缩小富裕社区和贫困社区以及发达国家和欠发达国家之间的差距

在现有工业模式下通过限制经济活动来减少排放的传统方略将会扩大贫富差距，因为人类发展几乎完全依赖于经济繁荣。SWB、A-EV、TaaS和PFCA技术将通过大幅降低生活成本来加速人类发展，提高贫困社区和欠发达国家的生活水平，而不是依靠政府来控制供需，或者实现公平分配结果。

因为能源、交通运输和食品是全球经济的基础部门，几乎在每个行业的价值链中都占据了巨大的成本份额。这些新技术将消除过去的地理优势和劣势，例如化石燃料的稀缺储量、食品和农业的冬季储存挑战等，进而改变地缘政治关系。它们还将实现更激进的本地化，因为基于丰富本地资源创造的全新去中心化生产系统将取代旧的集中系统。

通过作出正确的选择，社会可以确保SWB、A-EV、TaaS和PFCA的好处使较贫穷的社区和欠发达国家与富裕和发达国家一起扩张和融合，同时对正在衰落的现有产业进行规划，以减轻其在被取代时造成的影响。此外，这种巨大的价值创造本身不会导致排放量显著增加，因为几乎所有新增的需求都将通过使用新的清洁技术来满足。

8. 有助于减少排放的技术也将使我们能够以经济适用的方式从大气中提取二氧化碳

实现净零排放只是解决气候变化的第一步。在阻止新的排放物进入大气之后，我们必须进一步解决大气中已经存在的二氧化碳，使浓度回到安全水平。如今，脱碳的范围和成本似乎令人难以承受。但颠覆能源和交通运输部门的SWB和A-EV技术也会大幅降低碳回收的成本。主动重新造林、提高海洋碱度(OAE)、直接空气碳捕获和存储(DACCS)以及其他碳回收方法都成本高昂，因为它们需要能源、车辆(机械)和劳动力。但由于市面上已经出现SWB超级电力、使用清洁电力的电动汽车和机械，以及不需要人工操作的自动化汽车和机械，这些方法将变得更加经济。

我们估计，到2040年，通过主动重新造林和基于技术的方法来进行碳回收的成本可以降至每吨10美元以下，这将使我们以负担得起的方式实现负排放，将大气中的二氧化碳浓度恢复到安全水平，并全面解决气候变化问题(见方框3：进入负排放阶段)。

9. 社会选择很重要，单靠技术不足以实现净零排放

尽管新技术与市场力量相结合是我们尽快实现净零排放的最现实选择，但我们不能止步于此。除非社会做出正确的选择，否则我们可能会显著减缓能源、交通运输和食品部门的颠覆，而这反过来又会推迟净零排放这一目标的实现，造成危险。即使我们可以通过负排放在更长的时间内保持不超出给定的碳预算范围，但超越行星系统的阈值和临界点仍可能导致灾难性后果，因此即使只将颠覆推迟短短数年，也会使风险变得十分严重。⁴⁴因此，我们必须在今天做出正确的选择，加速能源、交通运输和食品的颠覆。

对于减排技术仍需研究才能达到商业可行性的经济分部门，政府和私人投资者应为研发提供资金。

对于缓解技术已准备好投入使用、但必须通过实践加以完善、经过规模扩展才能具备竞争力的经济分部门，政府需要明智地运用法规、标准、指令和禁令来帮助设计有效的市场，并提供临时支持和补贴，以加快新技术的推广。风险容忍型私人投资者应该为早期增长和改进提供资金，以帮助将技术推向市场。

对于已经部署缓解技术并准备推广的经济分部门，政府应消除市场壁垒，打破现有垄断，保障消费者使用新技术进行生产和贸易的权利，不再保护基于旧技术的现有产业，同时保护这些产业的从业人员，使之有机会向颠覆性产业过渡。随着颠覆开始，私人投资者应该为部署提供资金。

方框 6：颠覆使所有形式的生态恢复成为可能

能源、交通运输和食品颠覆不但使我们能够应对气候变化，也将使我们能够解决许多根深蒂固的环境问题。到目前为止，我们之所以没有采取更多措施来防止新的环境破坏或修复过去的破坏，主要原因是成本太高。污染行业的清洁替代方案、清理污染区域、恢复生态系统以及保护大面积土地和海洋，成本都极其高昂。而这即将发生变化。如今，这三种颠覆将大幅削减成本，为环境保护和生态恢复创造以前不可想象的机会。

减少我们的生态足迹

能源、交通运输和食品的颠覆将引发人类历史上最大规模的生态足迹削减。

SWB、A-EV 和 TaaS 以及 PFCA 技术具备压倒性的经济竞争力，将摧毁全球的化石燃料行业、畜牧业和商业渔业，从而消除导致空气和水污染、土壤污染和流失、森林砍伐、海洋塑料污染以及陆地和水生生物多样性丧失的一些核心驱动因素。

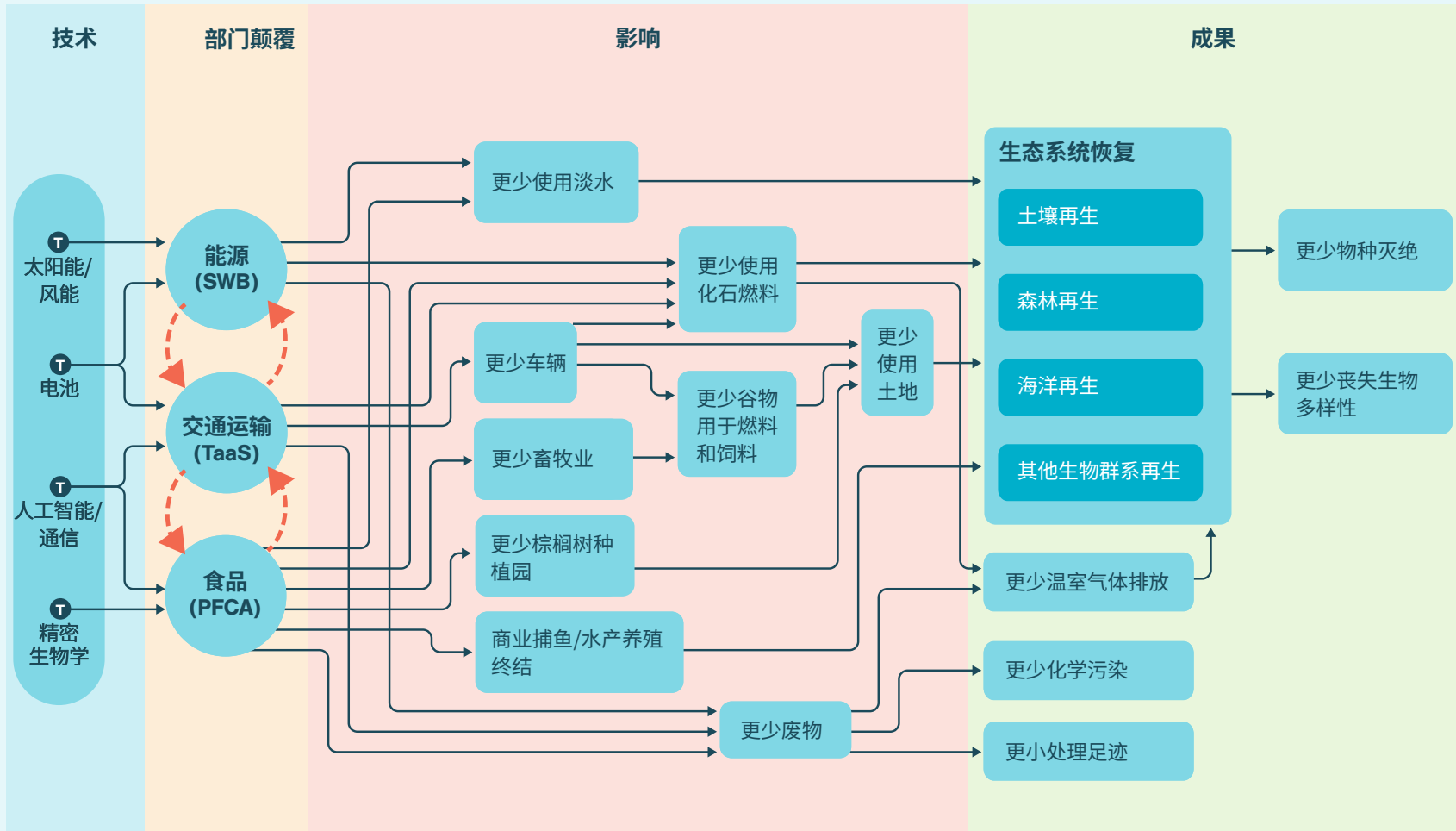
- » SWB 将降低能源行业的资源强度，减少生态足迹，将生产模式从每年需要持续开采和燃烧数十亿吨化石燃料的模式转变为一种持续资产存量直接从太阳能和风能中获取能源的模式。
- » A-EV 和 TaaS 将直接利用清洁能源，单位里程行驶效率将比私家内燃机车高 5-10 倍。

- » PFCA 将消灭畜牧业，腾出相当于美国、中国和澳大利亚三国面积大小的耕地，并消除森林砍伐和生态系统破坏的潜在驱动因素，包括牧场、动物饲料或棕榈油等产品。它还将摧毁破坏全球沿海和海洋生态系统的商业渔业和水产养殖业。
- » 转移能源、交通运输和食品部门的大宗商品——煤炭、石油、天然气、钢铁、汽车、牲畜、谷物和海鲜——所造成的生态足迹将大幅缩减。

生态恢复面临前所未有的机遇

能源、交通运输和食品的颠覆将大幅降低成本，并扩大环境保护和恢复的机会。尽管随着人类文明的生态足迹不断扩大，生态系统承受的压力在数百年来一直在不断增加，但我们即将抵达一个前所未有的转折点——这三次同时发生的颠覆将首次在全球范围内引发生态系统压力的大幅骤降。因此，政府、社区和利益集团必须从今天开始规划，以利用本世纪 20 年代和 30 年代将出现的保护、重建和恢复生态的巨大机会。

图 18：颠覆支持生态恢复



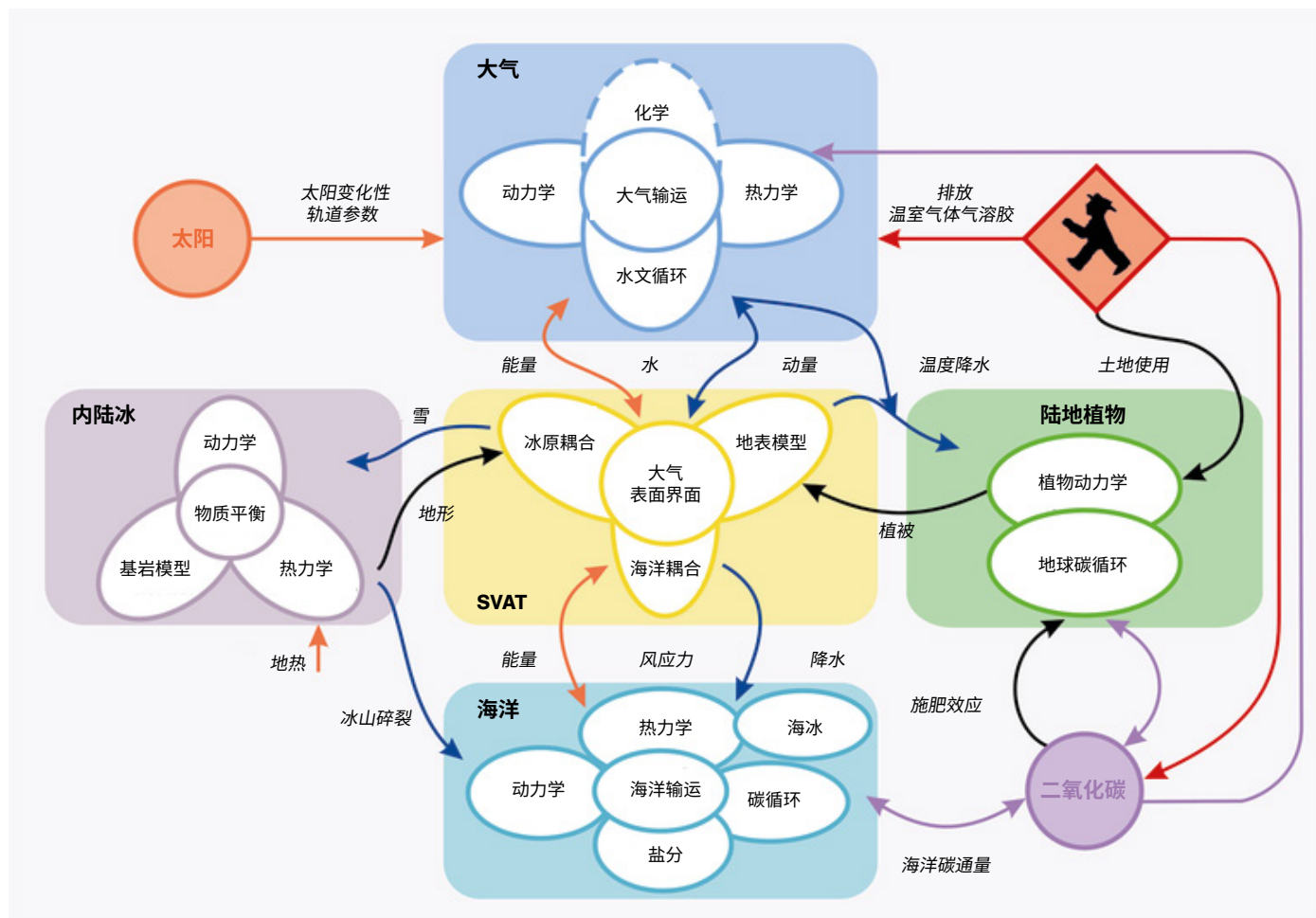
资料来源: RethinkX.



》附录A
气候挑战

大多数政策制定者对气候变化的反应都受限於一种假设，即气候变化是一个缓慢而渐进的过程。自200多年前的工业革命以来，由於碳氢化合物能源（或“化石燃料”）的日益开发，二氧化碳(CO₂)排放量不断增加，导致全球平均气温上升。

图 19：气候变化的系统动力学



资料来源：来自 Postdam 气候影响研究所的图表。⁴⁷

非线性

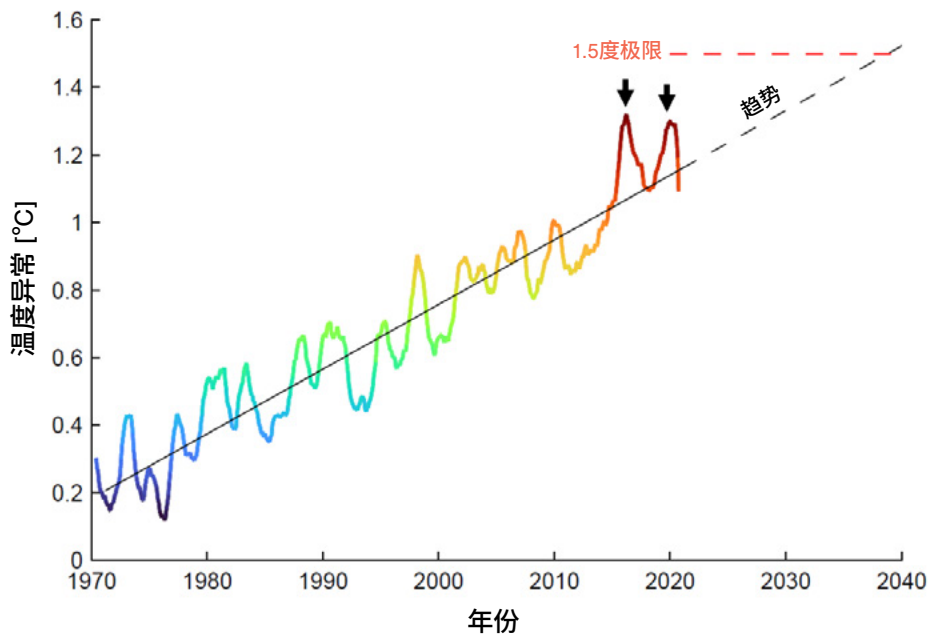
虽然大多数气候变化研究都假设升温趋势是线性的，但实际上，在二十世纪的大部分时间里，全球变暖的加速都是非线性的，在1980年之后还进一步提速了。⁴⁵ 现在，人们虽然仍然对此一知半解，但已经普遍认识到，地球的气候系统是高度非线性的，由处于平衡状态的多个子系统组成，这些子系统可能会经历短暂、突然、快速的变化。气候变化不是缓慢而渐进的，而是主要通过突然而迅速的事件发生，并确保这些事件会打破长时间的平衡。⁴⁶

虽然线性系统通常在空间和时间上表现出平滑的、可预测的、规则的运动，但是当某个推力使系统超过特定临界阈值、打破平衡状态时，非线性系统会经历不成比例的急剧转变。当多股力量汇聚，触发超过这些阈值的临界点时，由此产生的指数变化会导致气候系统的完全转变或相变，最终达到新的平衡。⁴⁴

地球是一个复杂的系统

人们日益认识到地球系统中的非线性动态，也说明了评估气候风险方面的不确定性。2016年，大气中的二氧化碳浓度超过百万分之400，之后继续增加，如今已达到百万分之414。⁴⁸ 其结果是全球气温每十年上升约0.2摄氏度，导致地表温度比工业化前上升约1.0摄氏度（1.8华氏度）。⁴⁹

图 20：1970年以来的全球气温上升情况



资料来源：图表来自 Rahmstorf, 2021年。⁵⁰

《巴黎气候协定》下的科学共识表明，人类有必要在平均30年的时间内将全球平均温度增幅限制在2°C以下——最好是1.5°C，才能避免气候系统陷入更危险的状态。如果目前的变暖趋势继续下去，到2040年，地球将突破升温1.5摄氏度的阈值。

然而，越来越多的关于气候临界点的研究表明，即使保持目前的变暖水平，到2040年也有可能已经跨越了几个临界点，带来潜在的不可逆转的后果。而在气候子系统中，全球温度的微小变化可能会触发放大的反馈回路，从而导致自我强化的变更，进而创造更危险的新平衡。

例如，在北极出现了冰反照率效应，上升的温度使冰盖和积雪变薄，反射回大气的太阳辐射减少，增加了对辐射的吸收，因此加强了变暖效应。这意味着全球变暖正在推动北极地区温度非线性上升，这又反过来影响全球变暖的总体趋势。⁵¹ 许多气候模型没有充分说明，当温度上升引发生态和化学反应时，这种放大的反馈会导致额外释放多少二氧化碳和甲烷，例如海洋变暖会释放更多的二氧化碳，或者土壤变暖会更快地分解，释放越来越多的二氧化碳和甲烷。因此，未来变暖的潜在水平可能被低估了。⁵²

考虑到这些复杂的不确定性，科学家们确定了十个最重要的气候临界点：永久冻土融化、海底甲烷水合物流失、陆地和海洋碳汇减弱、海洋细菌呼吸增加、亚马逊雨林消亡、北方森林消亡、北半球积雪减少、北极夏季海冰流失以及南极海冰和极地冰盖缩小。即使人类排放减少，即使全球变暖被限制在1.5-2摄氏度的范围内，也可能推动自我强化的反馈，将这些临界点推向一个行星阈值，导致最坏的“温室地球”情景，James Hansen的著名警告，即大气中温室气体的浓度不应超过百万分之350，也表达了相同意见。截至2020年，该值在409.8ppm的高风险区内。⁵³

实现净零排放

为了减轻这些风险，需要在大约30年的时间内将全球平均升温保持在2摄氏度以下。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)认为，实现这一目标，需要全球到2030年将碳排放量减少50%左右，并通过“负排放”从大气中提取二氧化碳，抵消无法将排放降至零的行业的排放，以期在2050年达到净零。¹²人们普遍认为，这将需要对全球经济体系进行彻底的、从上到下的转变，特别是我们的能源、交通运输和农业实践，⁵⁵这三个部门合计约占全球碳排放量的91.6%。¹³

然而，实现净零并不足以确保完全解决气候问题。“温室地球”的情景表明，即使保持目前的大气温室气体浓度水平，也已经存在发生危险气候变化的不可接受的风险，可能关乎人类存亡。因此，一个完整的气候解决方案不仅需要停止现有的排放，还需要将大气中现有的碳存量降至百万分之350以下的安全水平。

而最近的研究表明，IPCC的所有2050年净零脱碳情景都太慢了，全球升温有40-80%的可能性会暂时超过1.5摄氏度，这使情况变得更加复杂。⁵⁶

然而，IPCC和国际能源机构(IEA)对碳排放路径做出的传统预测认为，到2100年，构成现有生产系统的现有碳密集型产业将在很大程度上继续存在，只会经历缓慢的逐步淘汰，而淘汰会受到政府决策官僚惰性的限制。但这些情景以及它们所蕴含的净零路径对于由技术驱动的社会颠覆进行了根本上错误的假设，实际上，这些颠覆已经在一些最关键的经济部门发生了。尽管这些颠覆表明，我们可以实现的减排成果比传统设想要大得多，但如果没有正确的社会选择，它们将无法消除出现危险气候变化的风险。

人们之所以未能认识到这些技术颠覆的非线性动态及其能够从根本上改变我们当前的工业体系基础，是因为人们普遍缺乏对人类系统如何发生变化的理解——在人类对气候变化的传统理解中导致局限的过时假设也是这个道理。

地球系统的历史由长期平衡和突然转变组成，同样，人类系统也会经历突然的快速变化时期，破坏长期的稳定性。对这些稳定时期的增量条件习以为常，是传统分析师经常忽视快速变化之信号的一个关键原因。





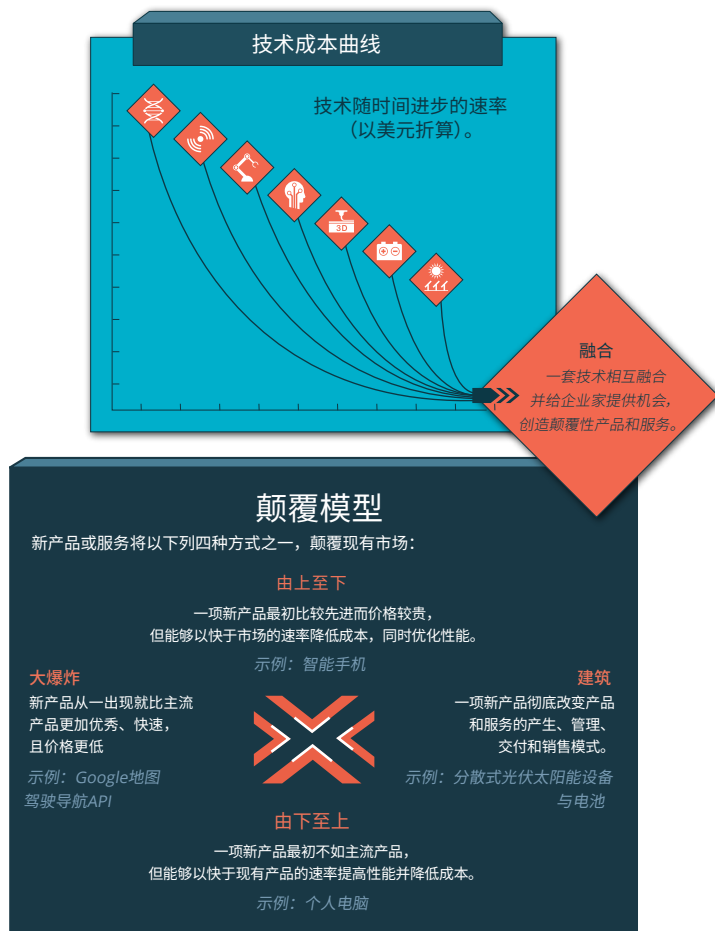
》附录 B

Seba 技术颠覆框架

理解技术颠覆

传统的分析师在考察风险和机会时，往往会以直线方式推测未来。因此，他们很大程度上未能预见社会和技术变革的全面影响。RethinkX使用由RethinkX联合创始人Tony Seba开发的Seba技术颠覆框架来理解技术颠覆。

图 22：Seba 技术颠覆框架要素



资料来源：RethinkX。

颠覆是指新产品和服务面世时，会营造出新的市场环境，并且在这个过程中，显著削弱、改变或破坏已有的产品类型、市场或行业。当几项改进速度各不相同的技术在某个时间点聚合在一起，为开发比现有产品更优秀、更具竞争力的新产品或服务提供条件时，就会出现颠覆性技术。

颠覆性技术的成本缩减和能力增长呈指数变化，而不是线性变化。随着成本降低，市场对新技术的采用呈S形曲线增长。技术成本改进曲线显示，特定技术随着时间的推移而改进的速度由多种因素驱动，包括投资增加、研发、制造规模、经验和学习效果、开放性、竞争、标准、生态系统集成、跨行业应用和市场规模。通过理解颠覆性产品的技术成本曲线，可以预测颠覆何时发生。

颠覆性技术带来的更大价值可以超越并颠覆任何利用旧技术的产品、服务、市场和行业。颠覆性产品往往不仅仅是旧产品的一对一替代品。相反，新技术常常通过支持新的商业模式和价值创造形式来扩大现有市场并创造全新的市场。这就是为什么颠覆往往会让传统分析师和行业专家感到困惑，因为他们的预测误解了颠覆的速度、规模和变革动力。

颠覆的跨部门级联效应

能源、交通运输和食品等基础部门的颠覆将不仅限于部门之内，由于这些部门的基础本质，颠覆会在其他部门产生阶联的二阶和三阶效应。⁵专门研究一个部门的传统分析师往往会误认为，颠覆的基本动态源自往往来自不同部门的技术融合，并且由于所有这些部门之间复杂的相互联系而通过跨部门互动发生演变。从有据可查的历史案例中，可以了解这些颠覆的基本动态，比如汽车对马匹的颠覆，或者印刷书籍对手抄本的颠覆。

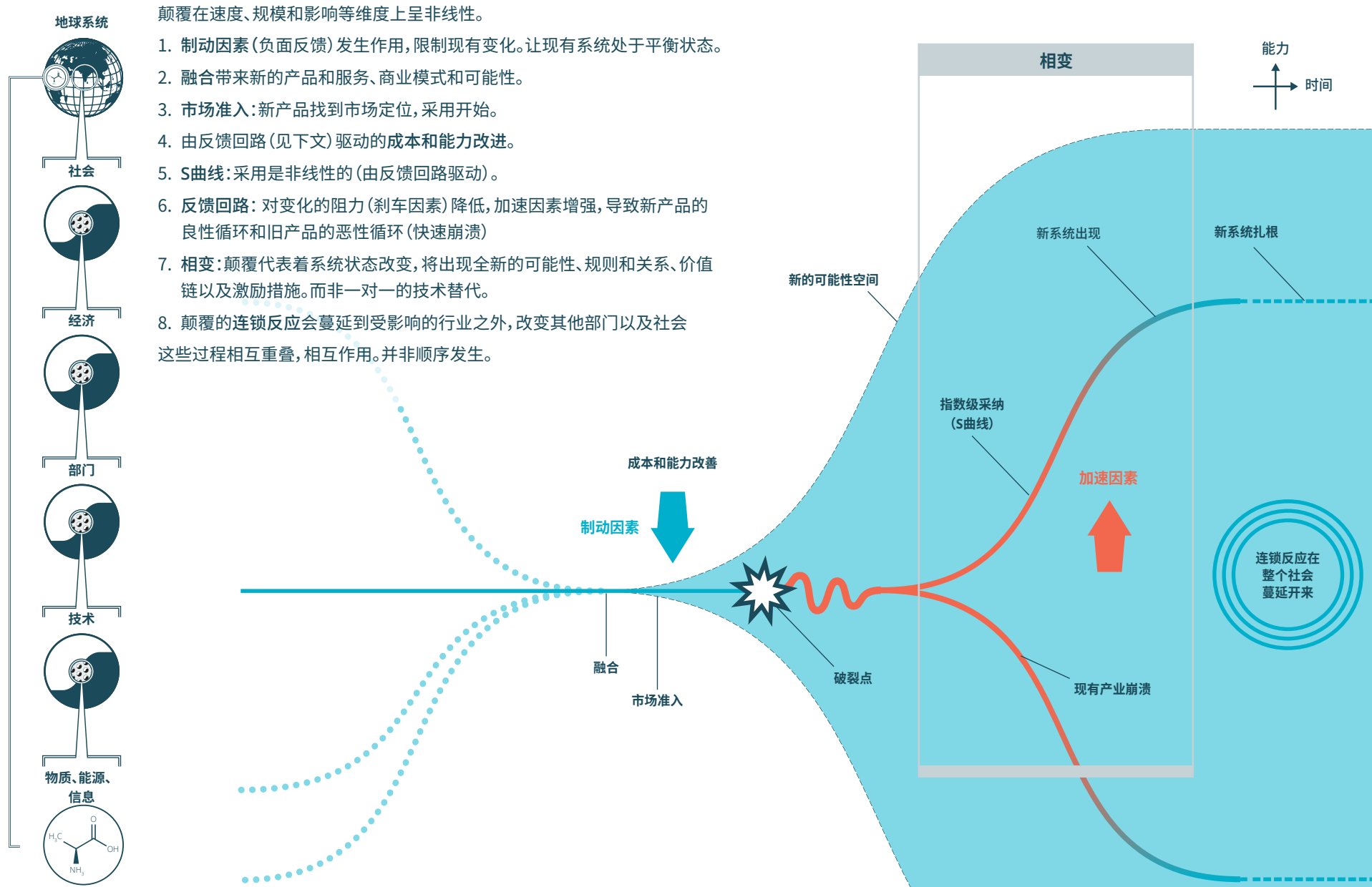
尽管在几千年的时间里，马一直是主要的交通工具，但在20世纪初，技术融合导致曾经无处不在的马车行业在大约13年内突然崩塌殆尽。技术融合将钢铁和橡胶生产、充气轮胎、内燃机和装配线等不同的跨部门创新结合在一起，最终为大规模生产价格合理、运转通畅的汽车提供条件。尽管汽车采用存在巨大障碍——缺乏铺面公路、供应链或机械、制造能力以及油井或炼油厂——但成本和能力的指数级改善导致原本属于小众的利基市场迅速扩张。最终，马车行业进入了需求减少、成本上升、投资骤降、规模经济逆转死亡螺旋，最终导致彻底崩溃。然而，最重要的是，汽车不仅仅替代了马匹，还创造了交通运输系统的相移规模转型，对食品、能源、信息和材料产生了级联的跨部门影响。出行变得经济实惠，并且速度更快、可以走得更远、携带更多负重，这样的新能力带来了无尽的全新市场机遇，改变了农业、零售业和采矿业；居住和通勤模式；整个建成环境的设计和结构；冲突的方法；地缘政治；当然，还有环境。

无独有偶，尽管手抄本是几千年来书面交流的主要方式，但15世纪印刷书籍的发明导致它们在短短几十年内就过时了。印刷机的面世是多部门技术融合的结果：金属、活字印刷术、纸张、新油墨和经过改造的酒榨机。它导致图书生产成本比以前降低了十倍，在人类历史上，大众首次得以以低廉成本获取信息。印刷书籍并不是简单地替代手抄本，而是创造了信息部门的相移规模转型，这种转型波及其他部门，促成了巨大的社会变革。教会和国家失去对信息流的控制，为思想的大规模传播铺平了道路，最终导致了宗教改革、政教分离，以及科学革命和启蒙运动。思想的革命极大地推动了人们对现实的新理解，随后，人们又围绕民主和自由市场资本主义的社会组织产生了新愿景，这反过来又与工业革命的加速相互衔接。

这些史实表明，如今发生的能源、交通运输和食品颠覆并不是什么全新现象，而仅仅是技术驱动社会变革历史中一个更广泛现象的最新例证。它们表明，颠覆不仅远比传统分析师预期的更快、更具变革性，而且很少仅限于单独一个部门，往往会产生二阶和三阶影响，波及多个部门。反过来，这些跨部门的级联效应产生了更广泛的系统动力，可以推动不同部门的进一步创新、融合和颠覆，进而创造全新的商业模式、价值链、文化和意识形态前景以及社会、政治和经济体系。这些更广泛的系统动力可以进一步催化或抑制进一步的技术颠覆。

颠覆如何变革各经济部门

图 23：理解颠覆



资料来源: RethinkX.

正如这些案例所示，与传统假设相反，技术颠覆并不遵循递增变化的线性轨迹，而是在速度、规模和影响等维度上呈非线性。随着成本和能力的改善，技术颠覆将推动一系列反馈回路和连锁反应，导致采用速度加快，进而迅速超越现有行业。下文列出了不同颠覆阶段的一些关键流程。

- » **制动因素** (负面反馈) 发生作用，限制现有系统内的变化。制动因素包括占主导地位的结构、力量、信念和行为，它们共同作用，以使系统保持平衡状态，因此会抵制变化。受这些制动因素影响的现有系统内的变化是线性和增量的。
- » 一个部门中多种技术的**融合**能够催生新产品和服务、商业模式和制造方法，为现有产品和行业提供全新的动力和可能性。
- » **市场准入**：当新产品找到满足特定需求的市场定位，并能够以更好的方式满足需求时，采用就循序渐进地开始了。新产品颠覆现有市场的方式有四种：“由上至下”——优质产品在开始时价格更贵，但在提高性能的同时变得比市场平均水平更便宜；“由下至上”——劣质产品提高了性能，比现有产品更快地变得更便宜；“大爆炸”——性能优越、比主流产品更快、更便宜的新产品面世；“架构式”——新产品从根本上改变产品和服务的生产、管理、交付和销售方式。

- » 颠覆性技术会经历由反馈回路 (见下文) 驱动的**成本和能力改进**，其中包括生产质量和性能同时提高，成本降低，使得产品相比现有行业的竞争优势越来越强。
- » 随着新产品开始占领市场，颠覆达到**破裂点**，随后，与现有行业和市场相关的现有系统开始崩溃。然而，在这时，新的系统还没有出现。当新产品及其带来的商业模式的竞争动态对现有产品和行业的财务和商业模式产生不成比例的早期影响时，就会发生市场创伤。在破裂点之后，用于衡量现有行业绩效和效率的旧指标变得越来越过时、越来越不相关，因为它们是为正在崩溃的系统和市场设计的。新的行业 and 系统需要新的指标和度量类别。例如，与传统发电厂相关的LCOE (均化发电成本) 指标之前的确派上了用场，但却是基于对这些系统的片面、狭隘的假设，忽略了太阳能、风能和电池的动态。纠正这些不足之后，传统发电厂的LCOE系数远高于此前主要机构的假设。⁵⁷
- » **S曲线**：随着新产品成本和能力的改善，以及与现有产品和行业的竞争越来越激烈，并最终超越现有产品和行业，它们的大规模采用会不断加速，呈非线性的增长模式。在反馈回路的驱动下，这个过程开始时很慢，然后逐渐加快速度，然后指数级加速，并随着市场接近饱和而趋于平稳。

- » **反馈回路**：随着新产品和新产业的竞争加速，与现有产业相关的、阻挠变化的结构和力量（制动因素）变得更弱。这进一步推动了新产品成本和能力改善的**良性循环**加速，以及现有行业成本上升、能力下降、收益递减或**经济死亡螺旋**的**恶性循环**。因此，随着颠覆性技术的大规模采用经历非线性加速，这将反馈到正在经历崩溃轨迹非线性加速的现有行业。然后，现有行业的加速崩溃又反过来导致对新技术的加速采用。简而言之，在因果**反馈回路**的破裂点之后，新技术的采用和旧行业的崩溃都会迅速发生。
- » **相变**：随着新产品和服务的大量采用，一套与旧系统不同的全新相关规则和行为将成为主导。因此，颠覆代表着系统状态的根本改变，将出现全新的可能性、成功指标、规则和关系、价值链以及激励措施。颠覆不仅仅是技术的一对一替代，而是一个全新的体系完全取代旧的平衡，因此，新的体系将在自身和其他部门产生二阶和三阶效应。
- » 随着定义特定部门的系统发生相变，颠覆的**连锁反应**不会局限于一种技术或行业，而是会不可避免地蔓延到受影响的行业之外，改变其他部门以及社会。根据这些转变的性质和受影响的部门，这可能导致一个社会或文明的整个生产和组织系统发生更广泛的变化（见下一节）。

颠覆如何变革整个社会

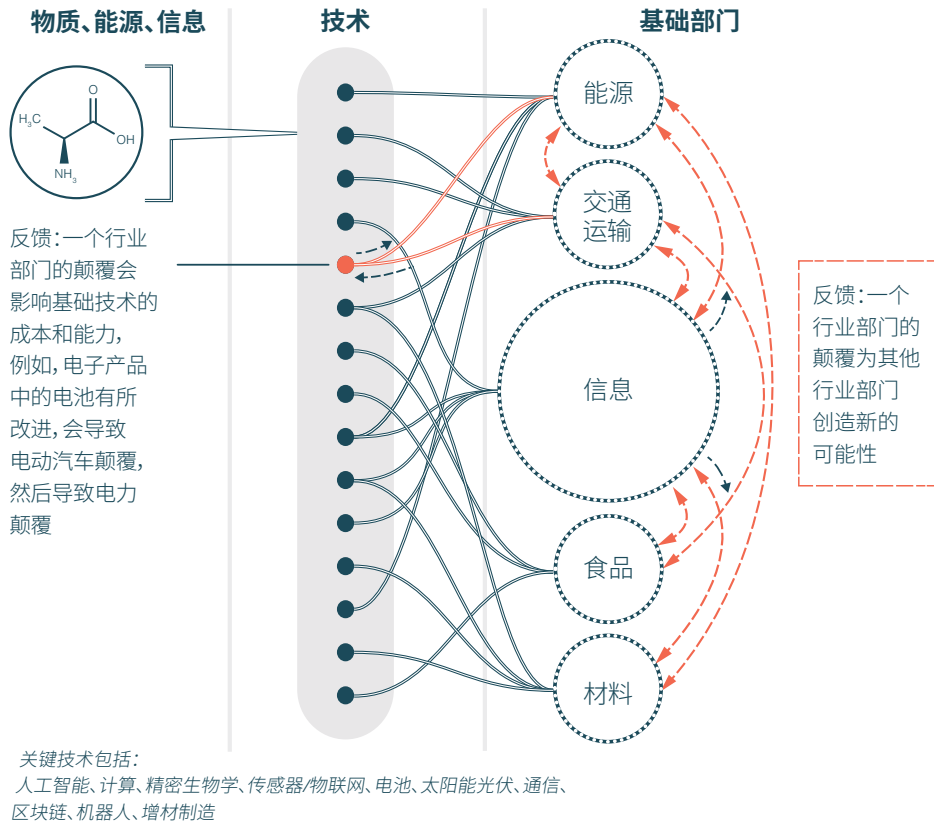
在一定程度的影响下，跨多个部门的颠覆会造成多部门的相变，这可能会重塑它们所属的整个上阶系统。因此，跨互联系统的多重相变可以在整个系统中产生更高阶的变革。这对于颠覆可能产生的更广泛的社会和文明影响具有深远的意义。

任何人类文明都可以由两个更高层次的子系统来定义，即生产系统和组织系统。

每个文明都是从一个由五个基本部门组成的生产系统中建立起来的：我们如何创造和分享知识（信息）、我们吃什么（食品）、如何四处走动（运输）、如何给自己提供动力（能源），以及如何提取和制造东西（材料）。生产系统满足一个社会的物质需求。这些部门是基础性的，因为它们位于社会所有其他部门的核心，而其他部门实际上是它们的分部门。

如果一个文明在其所有五个基本生产部门同时经历变化，这些部门内部和之间的相变、连锁反应和反馈回路相结合，会导致整个生产系统的变革。因此，在所有五个部门中，多个同时发生的相互关联的技术颠覆会导致一个全新生产系统迅速出现，并让整个现有生产系统崩溃。这还会导致一个社会的生产和组织系统之间的相变、连锁反应和反馈回路。

图 24：关键技术、融合和行业间互动



资料来源: RethinkX.

RethinkX绘制了五个基础生产部门中的三个部门(能源、交通运输和食品)同时颠覆的图表，按照目前的成本和能力改进速度，这些部门最终将在未来10-20年内实现比现在的提取时代行业低10倍的成本，使后者失去竞争力并最终过时。这些颠覆与另外两个基础生产部门——信息和材料——正在发生的颠覆密切相关，后者的连锁反应

已经蔓延到这些部门。因此，人类文明已经进入了一个前所未有的时期，所有五个基础生产部门都在经历颠覆，这意味着能源、交通运输、食品、信息和材料领域大量采用全新的“创造时代”产品和服务。

这些产品和服务的新规则、可能性和动态意味着这些部门之内和之间将发生根本相变。新兴的生产体系将不再依赖于对煤炭、石油、钢铁和牲畜等稀缺自然资源的分解和开采，而是以光子、电子、分子、基因和比特等无限构件的积累和创造为前提。

一个社会的组织系统与其生产系统共同进化，并决定了社会如何理解世界，如何治理行为，包括思维模式、信仰体系、社会体系、政治体系、经济体系和治理结构，这些因素会影响个人、机构和集体层面的思维方式、观察和决策。生产系统的最终设计将牢牢地基于我们在设计组织系统的不同元素所做的选择和决定。我们目前的组织系统是围绕工业开采时代生产系统的需求构建的，因此没有针对不同生产系统的动态性和可能性进行优化。因此，我们在组织系统层面做出的决策对于决定当前由技术驱动的社会颠覆的最终设计和可能性至关重要。

这些颠覆的非线性轨迹意味着，人类文明已经进入了一个前所未有的深刻变革时代，这将导致提取时代的迅速消亡，为社会所有领域带来蕴含巨大影响的新机遇。然而，针对这些机遇进行优化也需要我们组织系统的根本转变。因此，我们在未来十年做出的社会选择，以及我们组织系统的设计和结构，将有助于决定文明的规则、可能性和机遇。

创造时代

人类即将步入历史上最深刻的生产体系变革；过去，我们的开采型系统需要利用稀缺投入（资源和劳动力），需要规模、范围和集中化；将来，我们将过渡到一个创造型系统；这个系统呈现生成式模式，利用随处可得且极为丰富的投入创造人类所需，并且是去中心化、互联、网络化的。

从气候变化到冲突和不平等，社会中的复杂问题是这种以提取为基础的生产体系的必然结果。在提取系统中，“增长的必要性”是关键的潜在进化驱动力。发展能力并达到最快速度的文明会通过征服或模仿来进行扩张。零和竞争迫使社会剥削或被剥削，导致环境退化和不平等成为系统的本性。未能剥削人类和地球的社会放缓了脚步，最终成为历史的注脚。因此，所有这些问题的根源都是因为我们的生产系统基于提取。

然而，社会对这种批判性的见解和替代路线的可能性视而不见。我们简化、狭隘、线性的思维方式意味着我们无法理解推动生产系统颠覆的复杂变革过程，因此无法认识到这一变革的速度、规模和影响。也因此，我们将这些问题视为“没救了”的棘手问题，无法提出良好的解决方案。在现有体系的框架内可能是这样，因为零和交易意味着解决气候变化等问题会影响经济增长；但在新兴体系中，情况并非如此，新兴体系将让我们得以快刀斩乱麻，一次性解决所有问题，而无需权衡取舍。

不幸的是，人们长期以来一直对这个机会视而不见，迫使我们精力集中在解决过去的问题上，通过治标不治本的“贴膏药”解决方案来修补旧系统。虽然其中一些“膏药”在新系统出现之前能将当前系统保持在一起，防止崩溃，但决不能将它们误认为是“灵药”。然而，其他“膏药”可能会占用宝贵的资源（时间、注意力和资本），使之无法用于最佳干预措施，甚至有可能阻断突破的路线。

由文明五大基础部门的颠覆驱动的生产系统转变是一种相变：系统状态发生根本变化，所有的条件、规则和关系都将重置。因此，这个系统不能通过我们现有的思维方式来理解，也不能由我们现有的组织系统来管理。这就是为什么颠覆来自边缘。当前系统所掌握的专业知识越多，需要跳脱的条条框框就越多。现有行业的优势将成为现有行业的包袱。只有放弃我们的简化主义思维模式，基于复杂性和整体性建立视角，我们才有希望找到问题的根源，抓住正在兴现的非凡机遇，避免灾难性风险。

我们希望这篇报告将有助于重构整个社会的辩论，并帮助我们认识到新系统的可能性。如果我们能从更广阔、更清晰的视角来看待世界，我们就能正确判断我们的问题，拿出正确的解决方案，避免做出错误决定，将宝贵资源浪费在错误干预上。



» 附录 C
数据和方法

数据

我们采用了“用数据看世界”项目所使用的温室气体排放源模式。¹³ 该项目由牛津大学管理，汇集了来自Global Carbon Project、Climate Watch Portal、Climate Data Explorer（前称CAIT）、《BP世界能源统计》、世界银行世界发展指标、联合国、Gapminder和Maddison Project Database的数据。这一模式按全球经济的部门和分部门对排放加以组织，反映其最终用途（表1）。

数据的基准年是2016年，我们的分析时间表从2020年开始。我们的建模和情景与2020年排放量成比例，因此按百分比(%)值报告，而不是二氧化碳当量(CO₂e)值。这是因为能源、交通运输和食品部门将按一定比例颠覆，而不是完全颠覆。

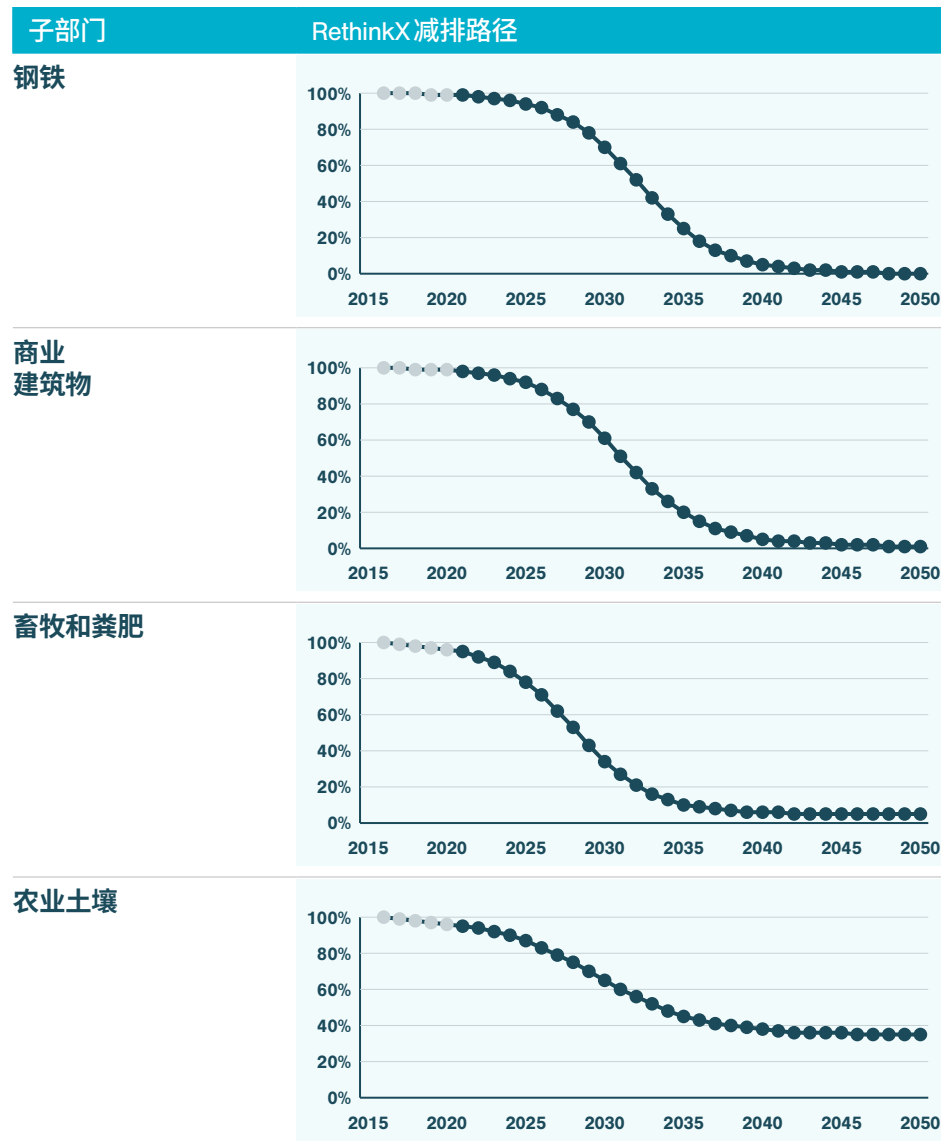
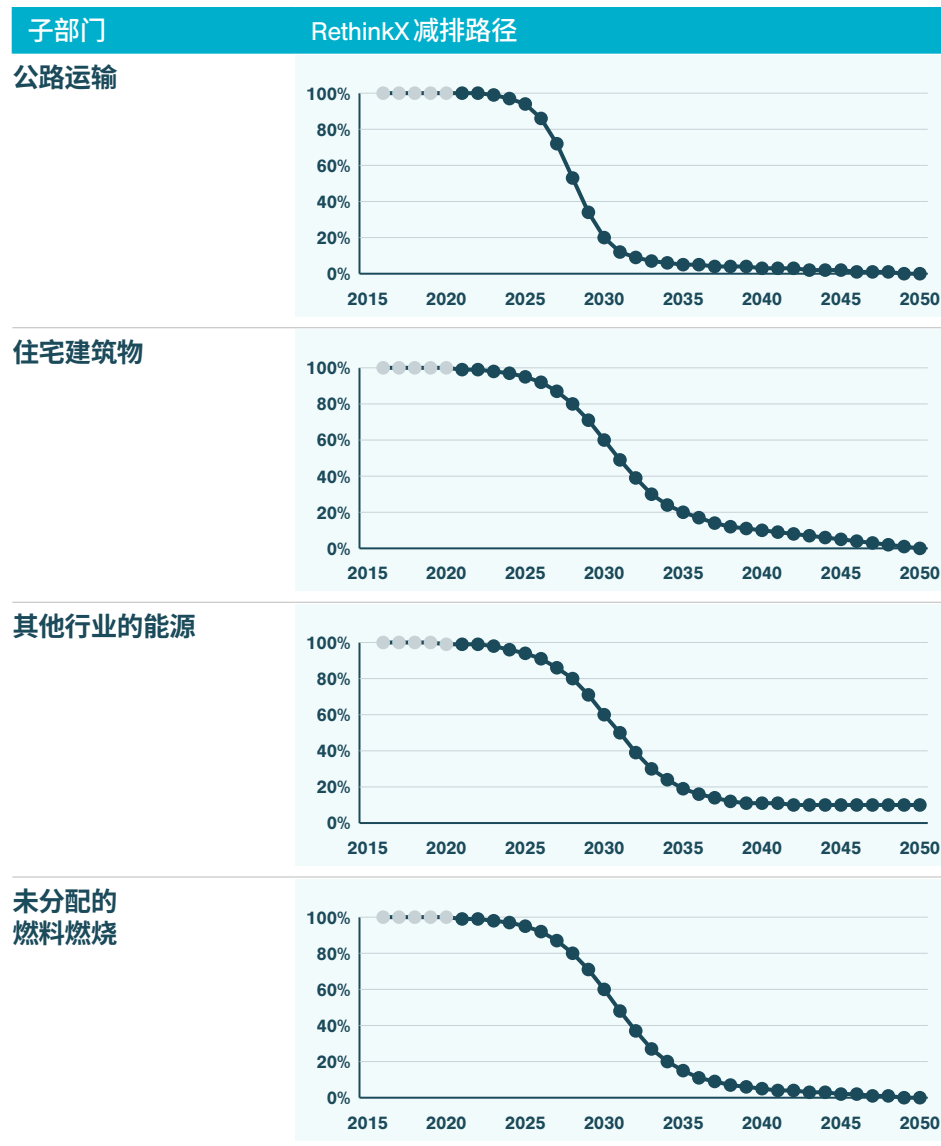
方法

我们对每个分部门假设一条减排路径，由SWB、A-EV和TaaS以及PFCA技术分别对能源、交通运输和食品行业的颠覆驱动。这些路径是衰减S曲线，如表3所示。

每个分部门的缓解路径的具体S曲线由以下假设决定：颠覆将在何时开始，颠覆展开的速度有多快，现有技术将被颠覆得多彻底，以及颠覆结束后是否会剩下重要的利基市场。

减排

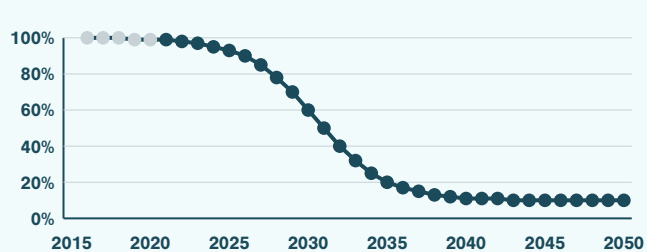
Table 3: 减排 (按分部门)



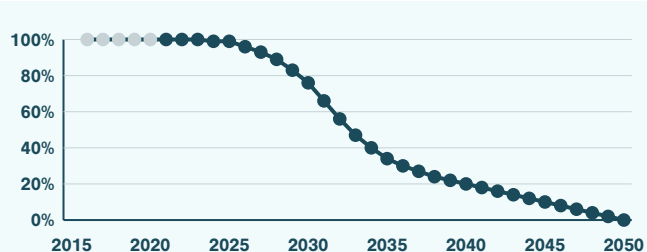
子部门

RethinkX 减排路径

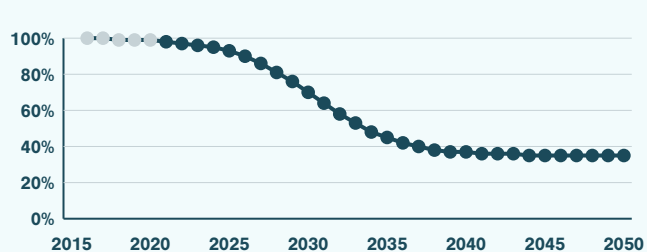
散逸性石油和天然气



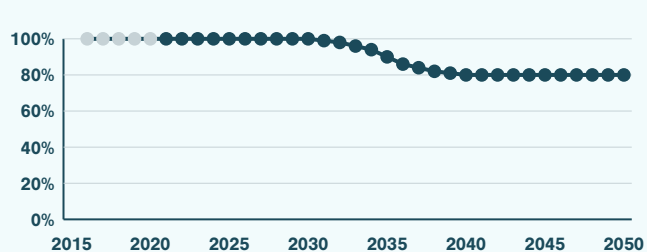
化学和石化(能源)



庄稼焚烧



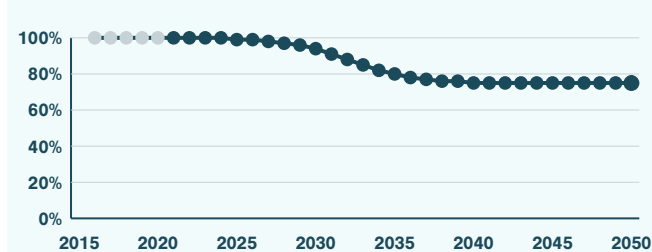
水泥



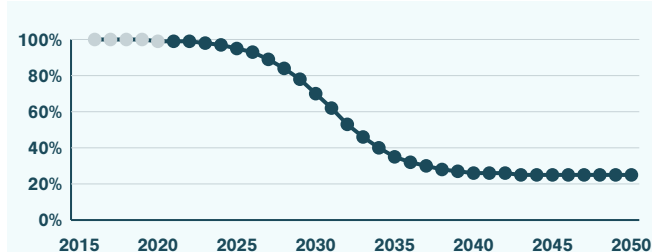
子部门

RethinkX 减排路径

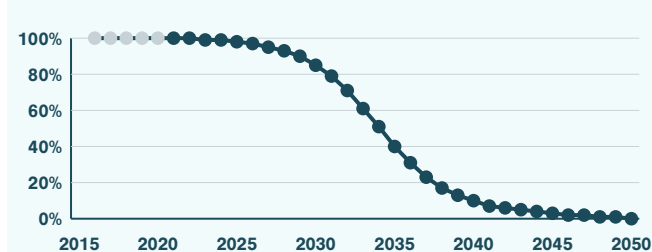
化学和石化(工业)



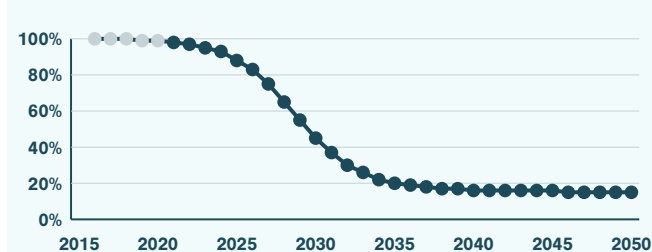
毁林



航空

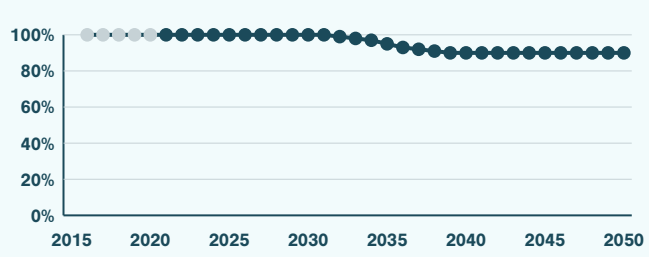


散煤

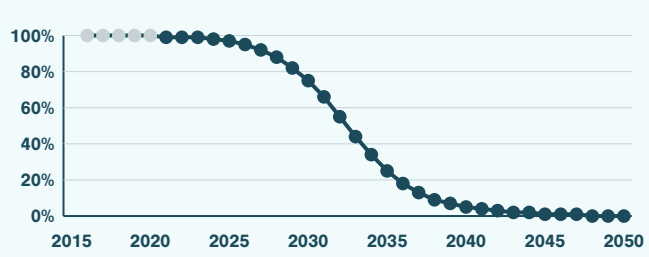


子部门 RethinkX 减排路径

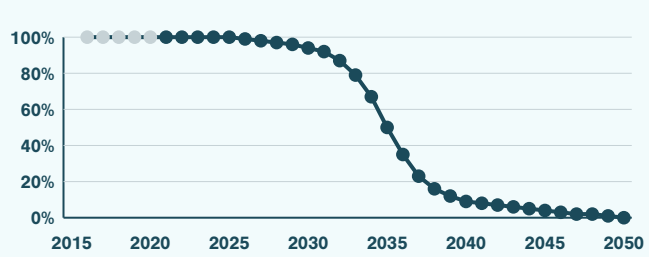
垃圾填埋



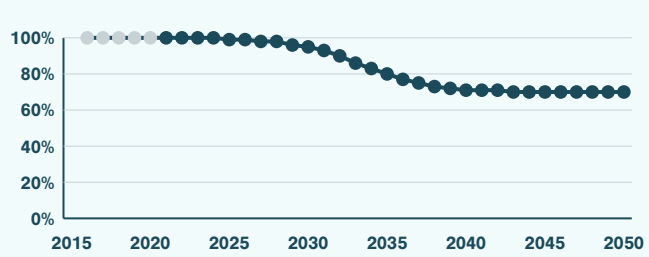
农业和渔业中的能源使用



航运

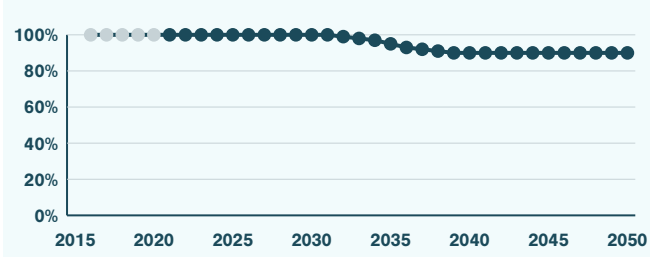


耕地

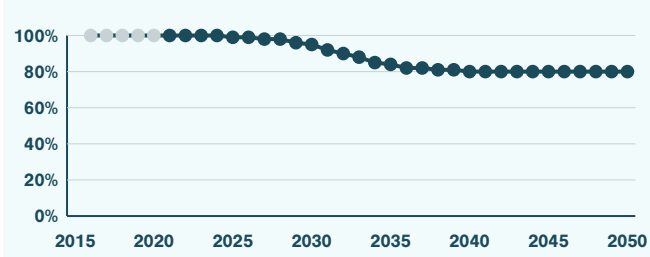


子部门 RethinkX 减排路径

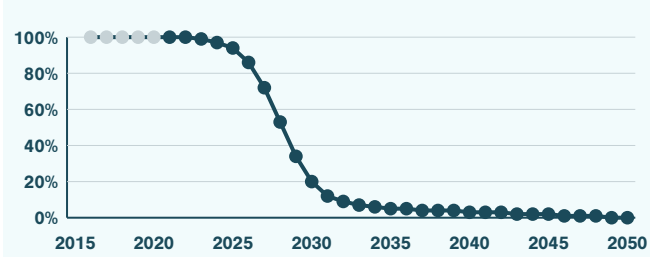
水稻种植



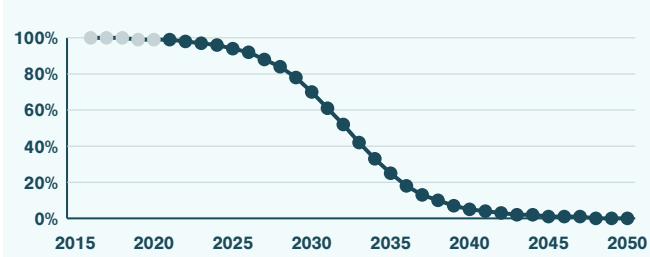
废水

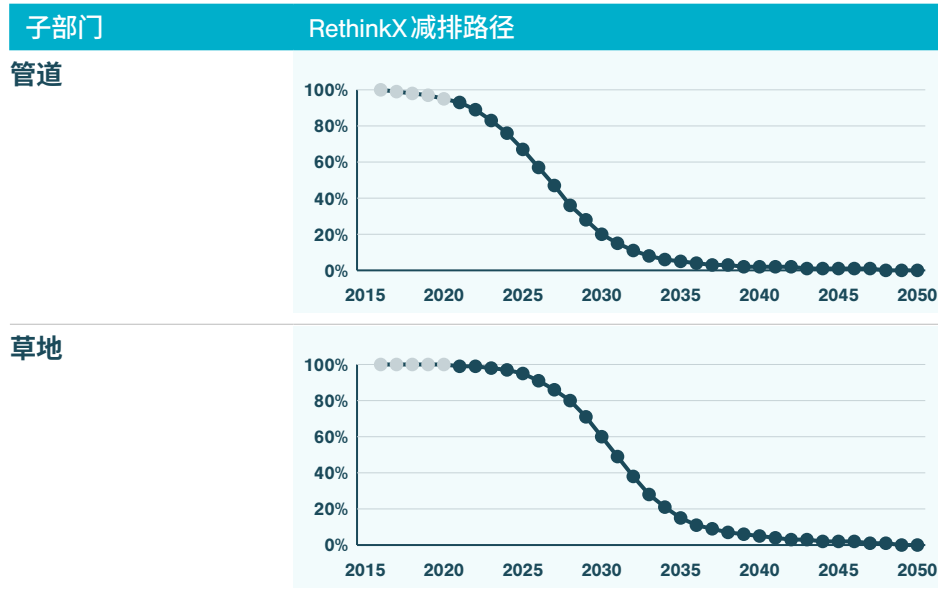
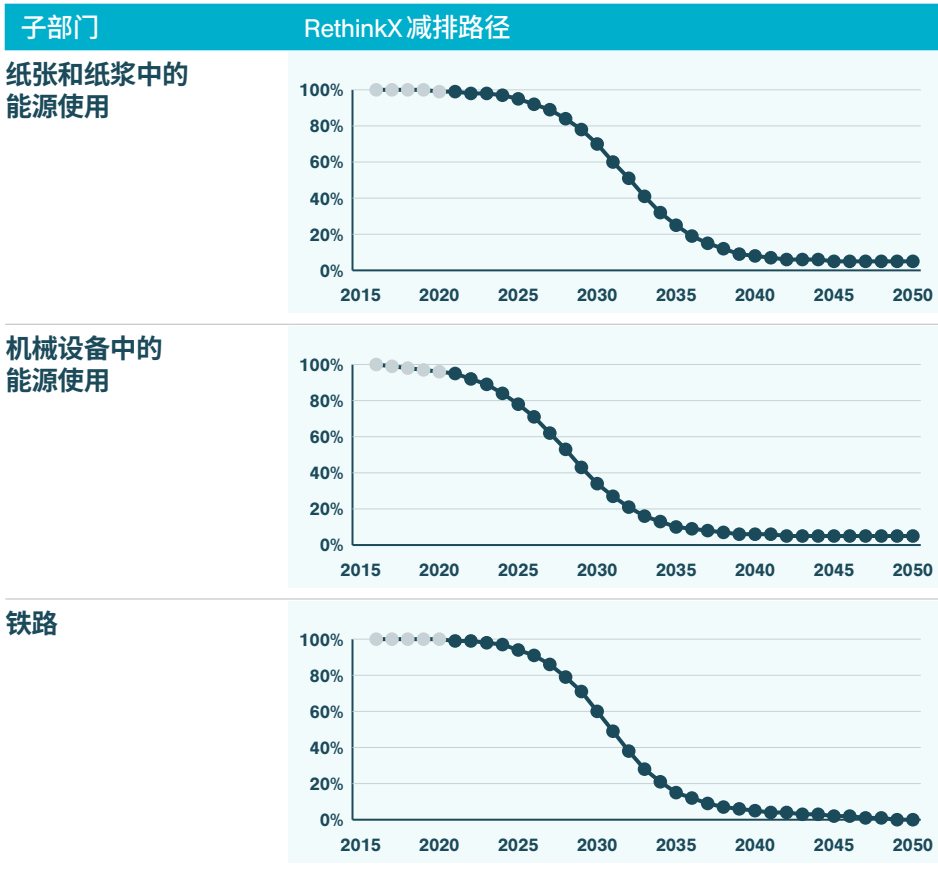


食品和烟草中的能源使用



非铁金属





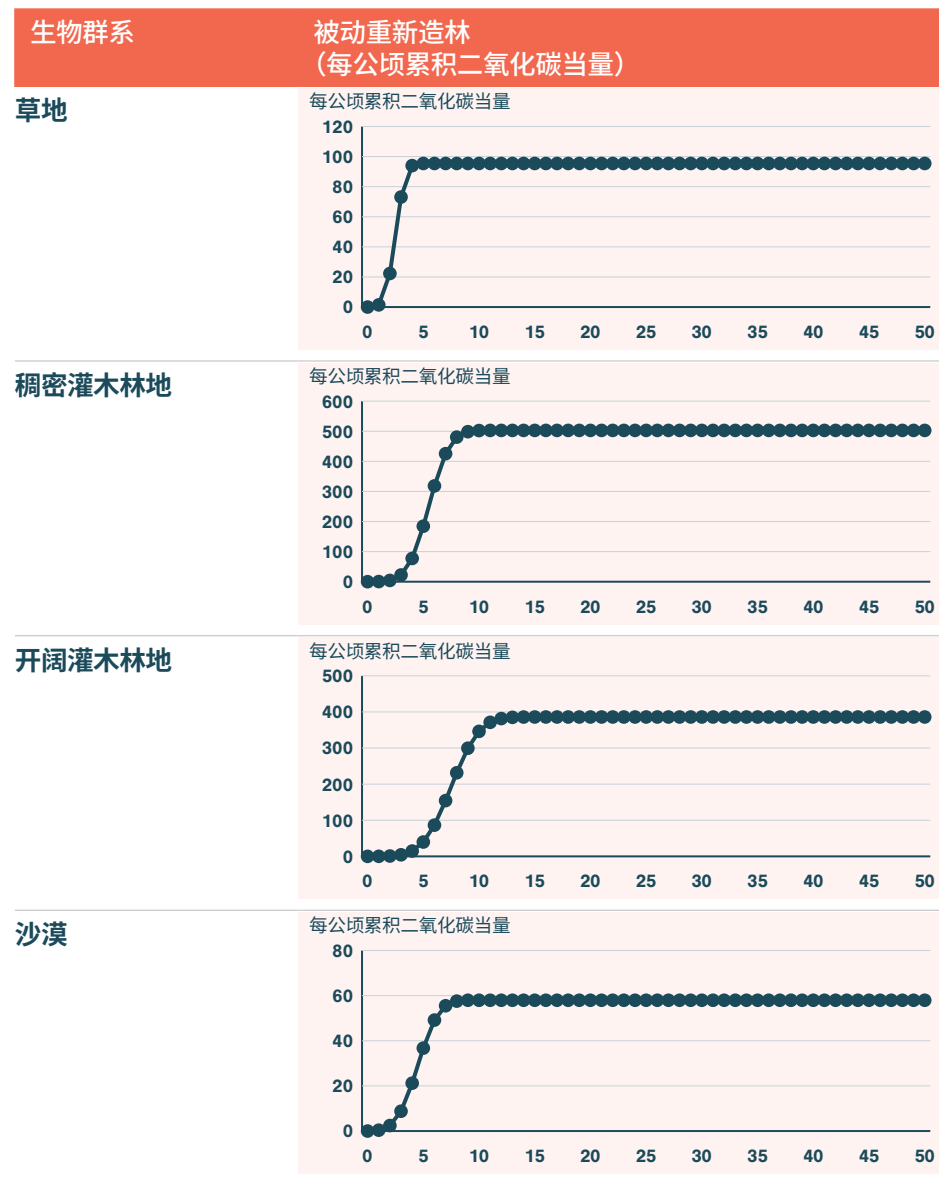
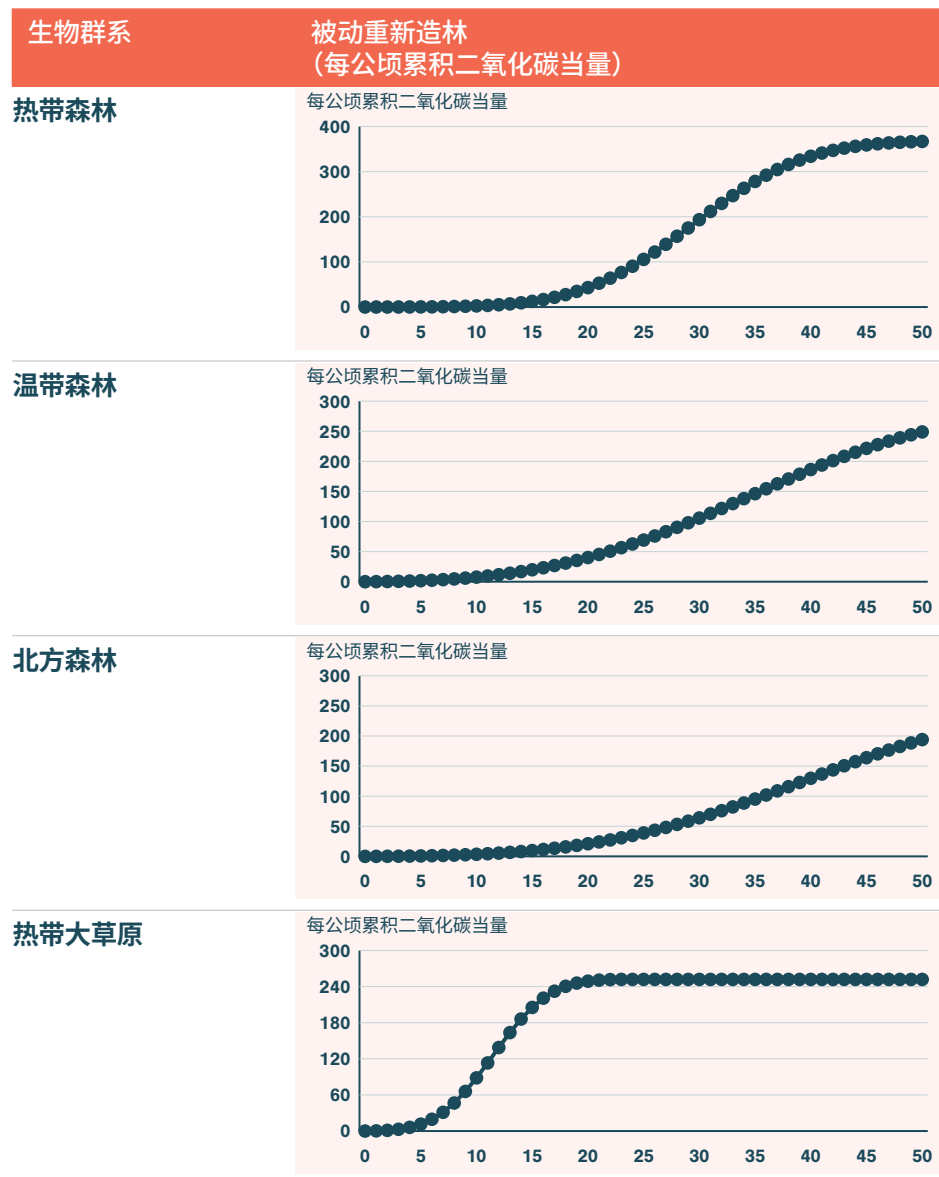
资料来源: RethinkX.

重新造林

重新造林在我们的情景中扮演着重要的角色。目前，全球用于动物农业的土地供给为 33 亿公顷，我们估计，精密发酵和细胞农业 (PFCA) 技术对食品的颠覆将腾出其中 80%，即 27 亿公顷——相当于美国、中国和澳大利亚三国面积的总和。即使没有采取积极措施在这片土地上重新造林，其自然恢复仍将导致地上和地下生物量的大量碳封存。如果采取积极的措施，则碳封存的速度会大大加快。我们分别称之为被动重新造林和主动重新造林。

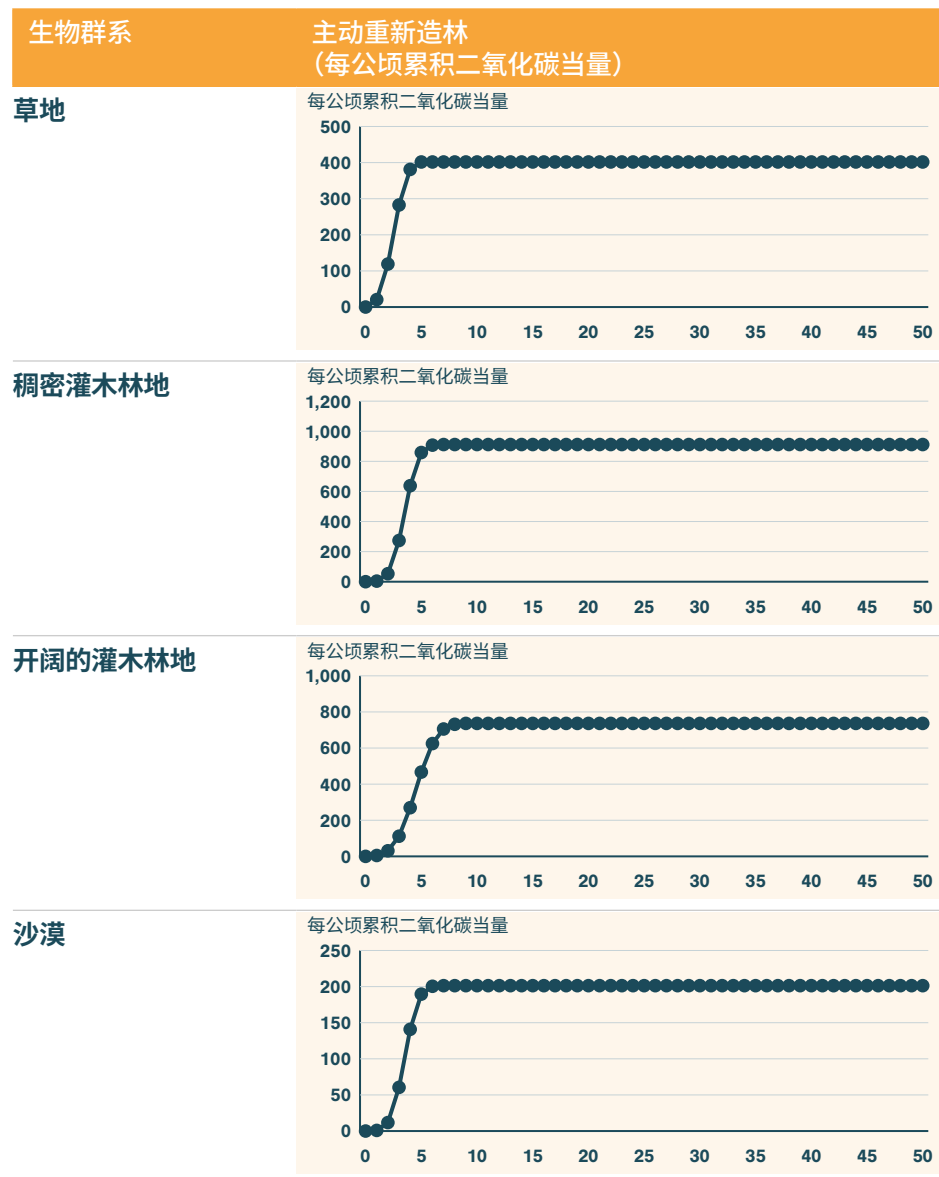
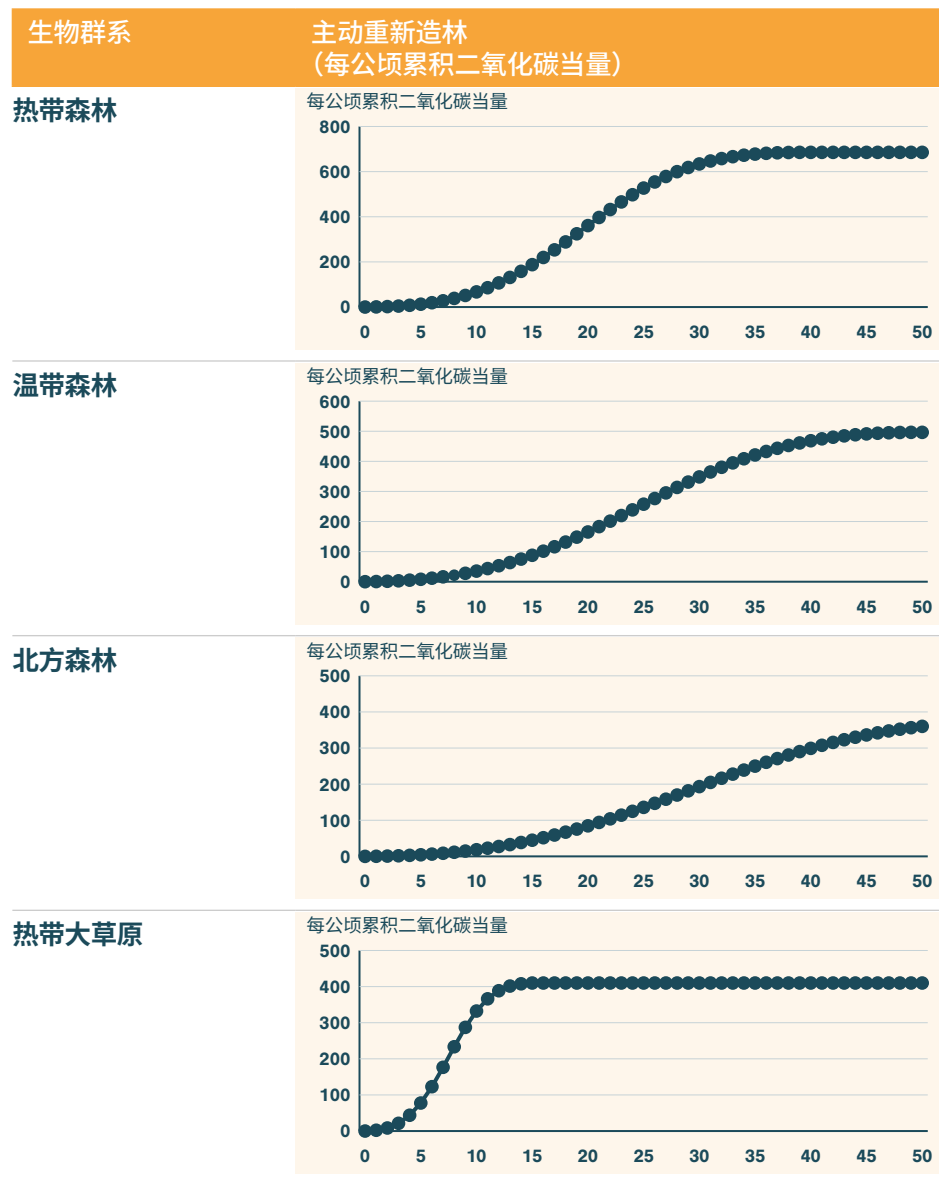
我们用生物群系模拟了腾出土地的被动重新造林和主动重新造林。请注意，碳封存率随时间的变化并不恒定，这导致累积碳封存的 S 曲线因生物群系而异 (表 4 和表 5)。

**Table 4: 被动重新造林碳回收，按生物群系划分
(每公顷累积二氧化碳当量)**



资料来源: RethinkX.

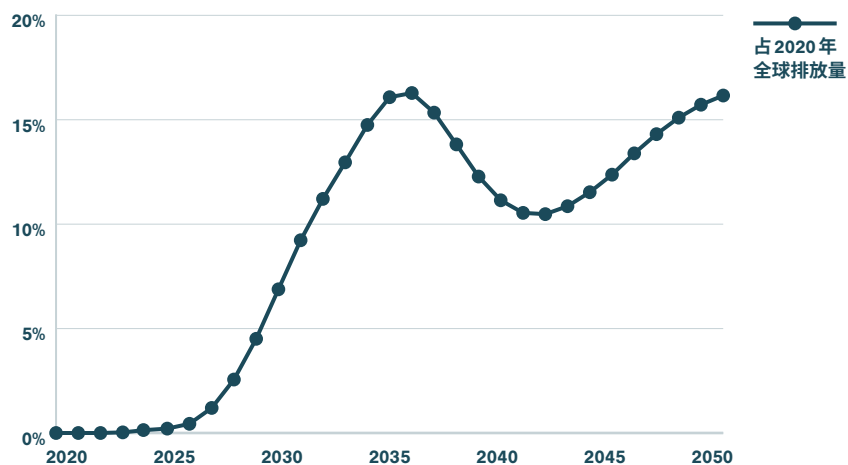
**Table 5: 主动重新造林碳回收，按生物群系划分
(每公顷累积二氧化碳当量)**



资料来源: RethinkX.

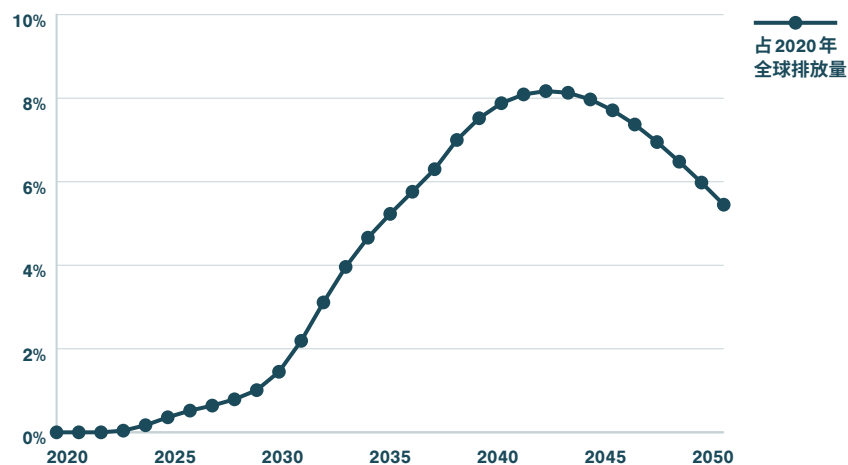
图 25 和图 26 显示了所有生物群系的固碳总量，图 25 显示被动重新造林的效果，图 26 显示主动重新造林的效果。请注意，因为草地、灌木林地和沙漠比森林更早达到最大固存水平，总固存率有一个初始峰值，随后会下降，然后再次上升。这在被动重新造林中尤其明显，因为如果没有主动的管理，森林可能需要几十年才能达到其最高固存率，超过一个世纪才能达到其最大固存水平。

图 25：被动重新造林碳回收，按年划分——“严肃对待”情景



资料来源: RethinkX.

图 26：主动重新造林碳回收——“严肃对待”情景

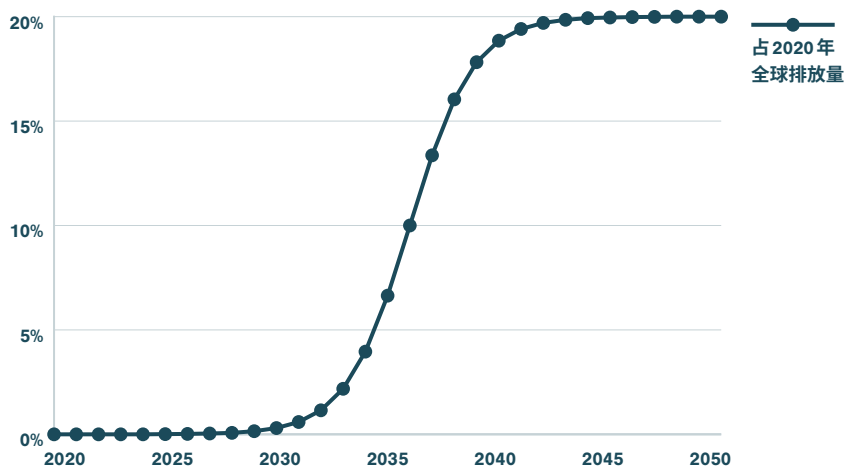


资料来源: RethinkX.

基于技术的碳回收

基于技术的碳回收是我们“严肃对待”情景的一部分。碳回收量将呈S曲线上升，辅以能源和交通运输方面的潜在颠覆（图27）。

图 27：基于技术的碳回收，按年划分——“严肃对待”情景

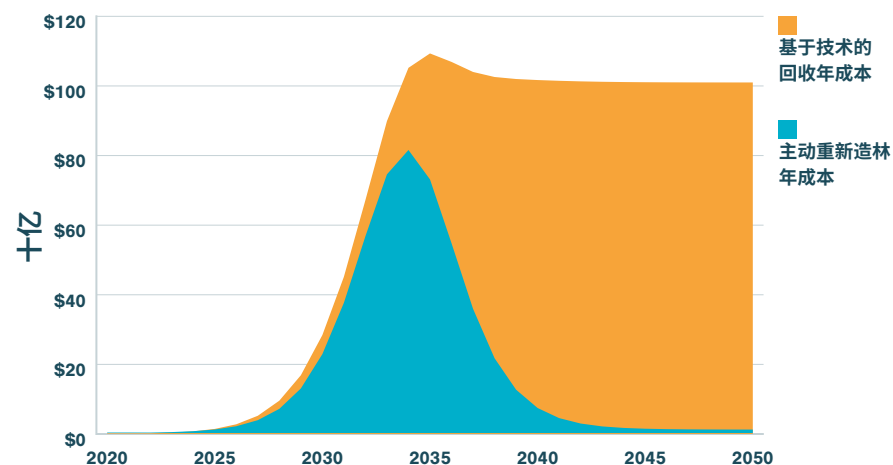


资料来源: RethinkX.

碳回收成本

我们估计，到2040年，无论是使用主动重新造林还是基于技术的方法，脱碳的成本都将降至平均每吨10美元以下。碳回收的总成本最初主要来自主动重新造林，后来将让位于基于技术的方法，这些方法可以根据需要无限期地持续下去（我们假设每年的总成本约为1,000亿美元，如图28所示）。

图 28：年碳回收成本——“严肃对待”情景



资料来源: RethinkX.

参考资料

- 1 Pacala, S., & Socolow, R. (2004). Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies. *Science*, 305(5686), 968–972. 读取自[这里](#)。
- 2 Tubb, C., & Seba, T. (2019). 《食品行业与农业再思考》。RethinkX. 读取自[这里](#)。
- 3 Arbib, J., & Seba, T. (2017). *Rethinking Transportation*. RethinkX. 读取自[这里](#)。
- 4 Dorr, A., & Seba, T. (2020). *Rethinking Energy: Solar, Wind and Batteries is Just the Beginning*. RethinkX. 读取自[这里](#)。
- 5 Arbib, J., & Seba, T. (2020). 人类再思考：五个基础部门的颠覆、文明的生命周期和即将到来的自由时代。RethinkX. 读取自[这里](#)。
- 6 Seba, T. (2010). *Solar Trillions: 7 Market and Investment Opportunities in the Emerging Clean-Energy Economy*. 读取自[这里](#)。
- 7 Statistical Review of World Energy 2020 (No. 69). (2020). BP. 读取自[这里](#)。
- 8 *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (2014). IPCC. 读取自[这里](#)。
- 9 van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011a). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5. 读取自[这里](#)。
- 10 van Vuuren, D. P., Stehfest, E., den Elzen, M. G. J., Kram, T., van Vliet, J., Deetman, S., Isaac, M., Klein Goldewijk, K., Hof, A., Mendoza Beltran, A., Oostenrijk, R., & van Ruijven, B. (2011b). RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2° C. *Climatic Change*, 109(1), 95. 读取自[这里](#)。
- 11 Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O' Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. 读取自[这里](#)。
- 12 《全球升温 1.5 °C：气专委关于全球升温超过工业化前 1.5 °C 的影响及相关全球温室气体排放路径，同时联系加强对气候变化威胁的全球应对、可持续发展和消除贫困的努力问题的特别报告》。(2019). Intergovernmental Panel on Climate Change. 读取自[这里](#)。
- 13 Ritchie, H., & Roser, M. (n.d.). *Emissions by sector*. Our World in Data. 读取自[这里](#)。
- 14 *Global Carbon Project*. (2021). Global Carbon Project (GCP). 读取自[这里](#)。
- 15 Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P. A., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Arneeth, A., Arora, V. K., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Doney, S. C., ... Zheng, B. (2018). Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data*, 10(4), 2141–2194. 读取自[这里](#)。
- 16 Andrews, T., Gregory, J. M., Paynter, D., Silvers, L. G., Zhou, C., Mauritsen, T., Webb, M. J., Armour, K. C., Forster, P. M., & Titchner, H. (2018). Accounting for Changing Temperature Patterns Increases Historical Estimates of Climate Sensitivity. *Geophysical Research Letters*, 45(16), 8490–8499. 读取自[这里](#)。
- 17 United Nations Environment Program. (2021). *Becoming #GenerationRestoration: Ecosystem Restoration for People, Nature and Climate*. United Nations Environment Program. 读取自[这里](#)。
- 18 Fu, R., Feldman, D., & Margolis, R. (2019). *U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark Q1 2018* [Data set]. National Renewable Energy Laboratory. 读取自[这里](#)。
- 19 Feldman, D., Ramasamy, V., Fu, R., Ramdas, A., Desai, J., & Margolis, R. (2021). *U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmark: Q1 2020*. National Renewable Energy Laboratory. 读取自[这里](#)。

参考资料

- 20 *2020 Battery Price Survey*. (2020). BloombergNEF. 读取自[这里](#)。
- 21 *Wind Technologies Market Report*. (2020). Berkeley Labs. 读取自[这里](#)。
- 22 Graver, B., Zhang, K., & Rutherford, D. (2019, September 19). *CO2 emissions from commercial aviation, 2018*. International Council on Clean Transportation. 读取自[这里](#)。
- 23 Hayek, M. N., Harwatt, H., Ripple, W. J., & Mueller, N. D. (2020). The carbon opportunity cost of animal-sourced food production on land. *Nature Sustainability*, 4, 21–24. 读取自[这里](#)。
- 24 Sala, E., Mayorga, J., Bradley, D., Cabral, R. B., Atwood, T. B., Auber, A., Cheung, W., Costello, C., Ferretti, F., Friedlander, A. M., Gaines, S. D., Garilao, C., Goodell, W., Halpern, B. S., Hinson, A., Kaschner, K., Kesner-Reyes, K., Leprieux, F., McGowan, J., ... Lubchenco, J. (2021). Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate. *Nature*, 592(7854), 397–402. 读取自[这里](#)。
- 25 Wheeler, E. (2020, October 7). *Top oil and gas companies see market cap spiral lower in Q3*. S&P Global. 读取自[这里](#)。
- 26 McFarlane, S. (2021, June 9). *Shell Vows to Speed Up Emissions Cuts in Wake of Court Ruling*. Wall Street Journal. 读取自[这里](#)。
- 27 *Chevron investors back proposal for more emissions cuts*. (2021, May 26). Reuters. 读取自[这里](#)。
- 28 Burch, I., & Gilchrist, J. (2020). *Survey of Global Activity to Phase Out Internal Combustion Engine Vehicles*. The Climate Center. 读取自[这里](#)。
- 29 Lopez, J. (1989). *The transition from natural madder to synthetic alizarine in the American textile industry 1870-1890. 9070*. 读取自[这里](#)。
- 30 IMS Health. (2010). IMS Health MIDAS.
- 31 *The Digital Entertainment Group today released its Year-End 2018 Home Entertainment Report compiled by DEG members, tracking sources and retail input*. (2019). Digital Entertainment Group. 读取自[这里](#)。
- 32 Reber, G. (2010, January 7). *DEG YEAR-END 2009 HOME ENTERTAINMENT REPORT*. Widescreen Review. 读取自[这里](#)。
- 33 Camera & Imaging Products Association. (2019). *Total Shipments of Film Cameras*. Camera & Imaging Products Association. 读取自[这里](#)。
- 34 Camera & Imaging Products Association. (2019). *Total Shipments of Digital Still Cameras*. Camera & Imaging Products Association. 读取自[这里](#)。
- 35 *Adoption of Genetically Engineered Crops in the U.S.* (2020). [Data File]. United States Department of Agriculture. 读取自[这里](#)。
- 36 Adams, W. H. (2002). Machine Cut Nails and Wire Nails: American Production and Use for Dating 19th-Century and Early-20th-Century Sites. *Historical Archaeology*, 36(4), 66–88. 读取自[这里](#)。
- 37 U.S. Census Bureau. (1949, June). Historical Statistics of the United States, 1789–1945. The United States Census Bureau. 读取自[这里](#)。
- 38 Rajan, R., Volpin, P., & Zingales, L. (2000). The Eclipse of the U.S. Tire Industry. In *Mergers and Productivity* (pp. 51–92). University of Chicago Press. 读取自[这里](#)。
- 39 Vaughan, A. (2019, November 13). *Steel and concrete are climate change's hard problem. Can we solve it?* New Scientist. 读取自[这里](#)。
- 40 Esparza, R. (2020, July 10). *Decarbonizing industry is difficult but possible*. Environmental Defense Fund. 读取自[这里](#)。
- 41 United Nations Conference on Trade and Development. (2020). *Review of Maritime Transport 2020*. United Nations. 读取自[这里](#)。

参考资料

- 42 *The State of the World Fisheries and Agriculture 2020 (Sustainability in Action)*. (2020). Food and Agriculture Organization of the United Nations. 取自[这里](#)。
- 43 U.S. Bureau of Transportation Statistics. (n.d.). *Commodity Flow Survey 2017*. U.S. Bureau of Transportation Statistics. 取自[这里](#)。
- 44 Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H. J. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1786–1793. 取自[这里](#)。
- 45 Franzke, C. L. E. (2014). Nonlinear climate change. *Nature Climate Change*, 4(6), 423–424. 取自[这里](#)。
- 46 Rial, J. A., Pielke, R. A., Beniston, M., Claussen, M., Canadell, J., Cox, P., Held, H., de Noblet-Ducoudré, N., Prinn, R., Reynolds, J. F., & Salas, J. D. (2004). Nonlinearities, Feedbacks and Critical Thresholds within the Earth's Climate System. *Climatic Change*, 65(1), 11–38. 取自[这里](#)。
- 47 *Earth system model of intermediate complexity CLIMBER-2 (retired)*. (n.d.). Postdam Institute for Climate Impact Research. 2021年6月24日取自[这里](#)。
- 48 Jones, N. (n.d.). *How the World Passed a Carbon Threshold and Why It Matters*. Yale E360. 取自[这里](#)。
- 49 NOAA National Centers for Environmental Information. (2021, June). *Climate at a Glance: Global Time Series*. NOAA National Centers for Environmental Information. 取自[这里](#)。
- 50 Rahmstorf, S. (2021, April 21). *Two graphs show the path to 1.5 degrees*. RealClimate. 取自[这里](#)。
- 51 Huang, J., Zhang, X., Zhang, Q., Lin, Y., Hao, M., Luo, Y., Zhao, Z., Yao, Y., Chen, X., Wang, L., Nie, S., Yin, Y., Xu, Y., & Zhang, J. (2017). Recently amplified arctic warming has contributed to a continual global warming trend. *Nature Climate Change*, 7(12), 875–879. 取自[这里](#)。
- 52 Torn, M. S., & Harte, J. (2006). Missing feedbacks, asymmetric uncertainties, and the underestimation of future warming. *Geophysical Research Letters*, 33(10). 取自[这里](#)。
- 53 Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C. P., Barnosky, A. D., Cornell, S. E., Crucifix, M., Donges, J. F., Fetzer, I., Lade, S. J., Scheffer, M., Winkelmann, R., & Schellnhuber, H. J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252–8259. 取自[这里](#)。
- 54 Postdam Institute for Climate Impact Research. (n.d.). *Tipping Elements—The Achilles Heels of the Earth System*. Postdam Institute for Climate Impact Research. 取自[这里](#)。
- 55 Sullivan, K., Tanger, K., Bachir, M., & Novak, D. R. (2021, January 6). *Climate Change 101 for business leaders: Key questions and essential knowledge*. Deloitte Insights. 取自[这里](#)。
- 56 Desing, H., & Widmer, R. (2021). *Reducing climate risks with fast and complete energy transitions: Applying the precautionary principle to the Paris agreement*. OSF Preprints. 取自[这里](#)。
- 57 Dorr, A., & Seba, T. (2021). The Great Stranding: *How Inaccurate Mainstream LCOE Estimates are Creating a Trillion-Dollar Bubble in Conventional Energy Assets* (p. 30). RethinkX. 取自[这里](#)。
- 58 IEA. (2021). *Global EV Outlook 2021: Accelerating ambitions despite the pandemic*. 取自[这里](#)。
- 59 FAO. (n.d.). FAOSTAT - Land Use [Data File]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 取自[这里](#)。
- 60 IRENA. (2021). *Renewable Capacity Statistics 2021*. International Renewable Energy Agency. 取自[这里](#)。

注释

- a 这些预测导数，即预测本身的变化方式，是非常具有启发性的指标，传统分析很少涉及。
- b 我们无法找到工业化前海洋生物量或在商业渔业停止的情况下恢复到基线的速度的可靠估计结果。科学文献中似乎完全没有这样的估计，我们与知名海洋学和海洋生物学专家进行了讨论，证实这部分存在明显的知识空白。然而，基于行星碳循环的其他已知方面，我们可以推断，相对于重新造林或其他基于技术的机制，在食品部门颠覆摧毁商业渔业后，海洋生物量中的碳封存不会成为碳回收的重要来源。
- c 这个2摄氏度中位路径符合IPCC的“2摄氏度以下”路径类别，该路径类别将整个21世纪的峰变暖值限制在2摄氏度以下，避免严重影响的可能性大于66%。¹²
- d 历史表明，气候预测导数，即预测本身的变化方式，几乎总是朝着“更糟”的方向发展。因此，尽管目前的研究表明，将升温保持在2°C以下有66%的概率可以避免气候变化的最严重影响，但随着新数据的收集和评估，这一估计结果可能只会朝更坏的方向发展。¹²
- e 被动重新造林碳回收率随着时间和生物群系的变化而变化。
- f 杰文斯悖论，或称杰文斯效应，是被称为反弹效应的广泛经济现象在特定环境下的表现，即由于需求的价格弹性较高，随着价格下降，消费不成比例地大幅增加。需求价格弹性的概念是由Alfred Marshall于1890年提出的，因此在1865年William Stanley Jevons第一次注意到能源(煤)技术的反弹效应时还不存在。杰文斯效应是真实的，但不是不可避免的。例如，数码相机(以及现在的智能手机)尽管引发了照片生产和消费的百万倍增长，但并没有对赛璐珞胶片产生杰文斯效应。实际上，数码相机中断了赛璐珞胶片的环路，彻底颠覆了旧技术。同样，汽车并没有对马粪产生杰文斯效应，尽管它引发了行驶里程的千倍增长。数码相机和汽车本身也造成了环境影响，但随着时间的推移，随着新的颠覆发生和技术的不断进步，这些影响能够并将被消除。

Adam Dorr



Adam Dorr 是一名环境社会科学家和技术理论家，他目前在 RethinkX 的研究重点是新能源发电和存储技术对全球能源部门的颠覆，以及这场颠覆与将在整个经济中展开的类似颠覆的交叉。他在密歇根大学环境与可持续发展学院攻读了硕士学位，在加州大学洛杉矶分校拉斯金公共事务学院攻读了博士学位，研究项目为有关颠覆性技术的环境政治、政策和规划。他拥有十年的教学、授课和演讲经验。

Tony Seba



Tony Seba 是全球知名的思想领袖、作家、演说家、教育家、天使投资人和硅谷企业家。他是亚马逊畅销书《Clean Disruption of Energy and Transportation》、《Solar Trillions》和《Winners Take All》的作者，也是《2020-2030 年交通运输行业再思考》、《2020-2030 年食品行业与农业再思考》和《人类再思考》的合著者。

他曾出演过几部电影和纪录片，包括彭博社的《Forward Thinking: A Sustainable World》、《2040》和《SunGanges》。他获得了许多奖项，包括 Savvy Awards (2019年)、Solar Future Today 的 Visionary Influencer Award (2018年) 和 Clean Energy Action 的 2017 Sunshine Award。他是 Seba Technology Disruption Framework™ (Seba 技术颠覆

框架) 的创造者。他的工作重点包括导致世界主要产业颠覆的技术颠覆、技术融合、商业模式创新和产品创新。他曾在数百个全球活动和组织中担任主旨发言人，包括谷歌、欧盟委员会、达沃斯论坛、第 21 届联合国气候变化大会、CLSA、摩根大通、野村证券、全国州长协会、世界事务会议、全球领袖论坛、Intersolar 和中国电动汽车百人会。他在斯坦福大学继续研究学院执教授课，学员包括数千名企业家和企业领导人。他持有斯坦福大学工商管理硕士学位和麻省理工学院计算机科学与工程学位。

James Arbib



James Arbib 在一家总部位于英国的家族投资公司任董事长，该公司拥有涵盖所有资产类别的多元化投资组合，侧重于技术颠覆的风险和机遇。他是独立慈善基金会 Tellus Mater 的创始人，该基金会致力于探索技术的影响及其解决世界上一些最困难的问题的潜力。

他是 RethinkX 的联合创始人，曾在包括 BlackRock、Goldman Sachs、政府和企业在内的数十场活动中发表主旨演讲。

他毕业于剑桥大学三一学院历史专业，还持有剑桥大学可持续发展领导力专业硕士学位。他是一名持照特许会计师，曾担任公用事业投资分析师。

RethinkX 计划

RethinkX 是一家独立智库组织，其对技术驱动颠覆的速度的规模及其对全社会的意义做出分析和预测。我们能够基于数据提供公正的分析结果，为投资者、企业、决策人及民间领袖甄别最关键的决策依据。

气候变化再思考

能源、交通运输和食品部门方兴未艾的技术颠覆对气候变化有着非同寻常的影响。尽管只是三个部门的颠覆，尽管仅仅由八种技术驱动，但这轮颠覆能在 15 年内直接消除全球 90% 以上的温室气体 (GHG) 净排放量。人类可以利用市场力量来推动全球大部分温室气体减排，因为所需的技术要么今天已经商业化并具有竞争力，要么可以在 2025 年前通过正确的社会选择部署到市场。同样的技术也将使碳回收的成本变得易于负担，这意味着从 2035 年开始，解决“最后的碳问题”和进入净零排放阶段不需要登月式的突破性技术。

我们之前的研究表明，能源、交通运输和食品部门的颠覆是必然的。太阳能、风能和电池 (以下简称 SWB) 将颠覆煤炭、石油和天然气。提供“运输即服务” (以下简称 TaaS) 的无人驾驶电动汽车将颠覆内燃机和私家车。精密发酵和细胞农业 (以下简称 PFCA) 将颠覆肉类、牛奶和其他动物产品。这三个部门的颠覆已经同时展开，它们将对气候变化产生深远影响。然而，是否在全球范围内迅速部署这些技术，以避免危险的气候变化，将由人类决定。