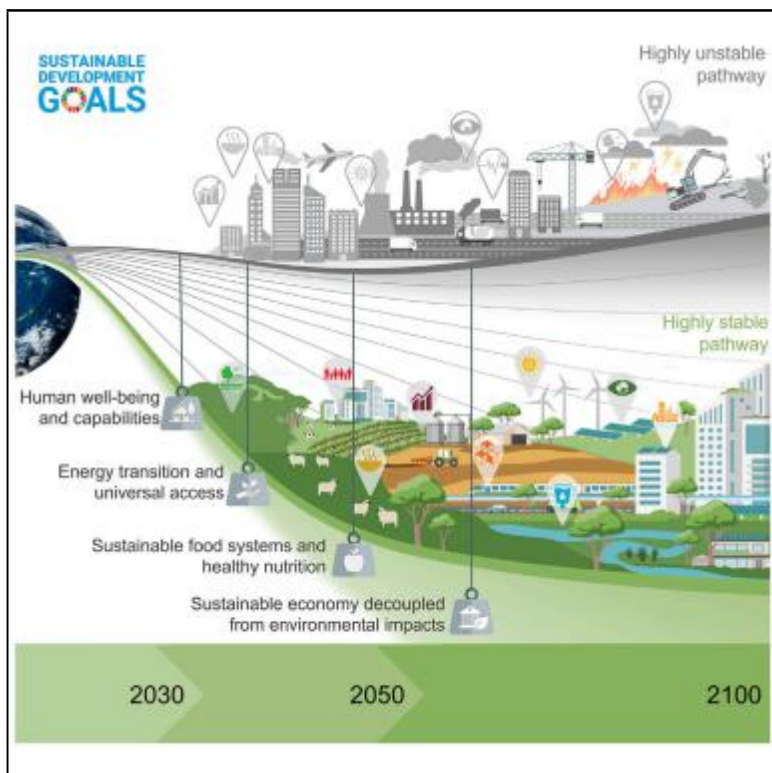


# 在2030年后的议程中，为促进长期可持续性所必需的早期系统变革

图形抽象



作者

Enayat. Moallemi, Sibel Eker  
高雷, ..., 迈克尔·奥伯斯泰纳,  
郭兆霞, 布雷特A. 布赖恩

函件

e.moallemi@deakin.edu.au

简言之

我们对可持续发展目标进展情况的模型预测显示，实现《2030年议程》近期成功的机会有限。然而，复杂的系统互动和反馈意味着，对系统变革的早期规划和行动可以加速朝着比2030年更雄心勃勃的2050年和2100年目标迈进的进展。这一长期分析对于提高对条件的理解非常重要，这些条件似乎对2030年里程碑之前的初步进展贡献有限，但在本世纪后期可能变得越来越有影响力。

亮点

d使用一个系统分析了到2100年的可持续性进展  
动态模型

d大多数国家实现2030年目标的进展有限  
路径

d早期干预对加速治疗进展很重要  
到2050年实现日益雄心勃勃的可持续发展目标  
和2100



文章

# 在2030年后的议程中，为促进长期可持续性所必需的早期系统变革

Enayat. Moallemi, <sup>1, 10</sup>, Sibel Eker, <sup>2, 3</sup> 高雷, <sup>4</sup> Michalis Hadjikakou, <sup>1</sup> 刘奇, <sup>3, 5</sup> 扬·克瓦克尔, <sup>6</sup> 帕特里克M. 芦苇<sup>7</sup>  
迈克尔奥伯斯坦<sup>8</sup> 郭兆霞<sup>5, 9</sup> 和布雷特A. 布赖恩<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 迪肯大学生命与环境科学学院综合生态学中心, 墨尔本, 澳大利亚维克

<sup>2</sup> 荷兰奈梅亨大学奈梅亨大学奈梅亨管理学院

<sup>3</sup> 国际应用系统分析研究所, 拉克森堡, 奥地利

<sup>4</sup> 联邦科学和工业研究组织 (CSIRO), 韦特校区, 厄布雷, 南澳大利亚, 澳大利亚

<sup>5</sup> 四川大学商学院, 成都610065, P. R. 中国

<sup>6</sup> 荷兰代尔夫特理工大学技术、政策和管理学院

<sup>7</sup> 美国康奈尔大学土木与环境工程系, 纽约伊萨卡

<sup>8</sup> 牛津大学环境变化研究所, 英国, 牛津

<sup>9</sup> 四川大学软科学研究所, 成都610065, P. R. 中国

<sup>10</sup> 引线接触

\*Correspondence: e.moallemi@deakin.edu.au

<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.06.003>

社会科学面向社会，世界面临着多种全球挑战，包括气候变化、环境退化、贫困和不平等。联合国可持续发展目标（SDGs）代表了各国克服这些挑战，到2030年为所有人实现更繁荣和可持续的未来的集体雄心。然而，剩下不到8年，评估得出的结论是，不太可能，可持续发展目标将完全实现这十年的结束，减缓和逆转的负面趋势的关键挑战，如气候变化在2030年之后不太可能发生。尽管对这些组成部分的挑战进行了长期分析，但现在迫切需要对整个21世纪加速和实现可持续性的现有机会会有更深入和更全面的理解。这项新的研究，基于可持续发展目标的模拟未来，描述了必要的系统变革的规模和可行性，并为在可持续性方面的长期进展提供了指导。

## 总结

迄今为止，实现可持续发展目标（SDGs）的进展还没有达到预期，也不太可能完全实现2030年的目标。过去的评估主要集中在短期和中期评价上，因此限制了探索具有时间滞后和延迟的系统相互作用的长期影响的能力。在这里，我们采用了比以往评估更长期的全球系统建模，以探索可持续发展进展的驱动因素，以及它们如何在2030年、2050年和2100年之前在不同的发展途径和定量目标下发挥作用。我们发现，早期规划系统变革，从正常商业转向更可持续的路径，对于加速到2030年、2050年和2100年实现日益雄心勃勃的目标非常重要。这些调查结果表明，必须采取更长期的时间框架和途径，以确保在当前的2030年议程之后，为可持续性具备必要的先决条件。

## 介绍

《联合国2030年议程》（也称为可持续发展目标-可持续发展目标）通过一套补充的目标为全球边界内的人类发展提供了一个框架。e., 广泛的雄心壮志，目标(i. e., 定义成功的具体阈值)，和指标(i. e., 判断目标进展的指标)。1 进展到

实现可持续发展目标的日期是有限的。<sup>2, 3</sup> 在未来还有不到8年的时间里，科学界已经通过不同的方法来理解和规划可持续发展目标，比如未来的路径建模，<sup>4 - 7</sup> 科学目标设置，<sup>8</sup> 和SDG交互分析。<sup>9 - 11</sup> 可持续发展目标也在全球上进行了研究，<sup>6, 12</sup> 国家的<sup>13, 14</sup> and local scales.<sup>10, 15</sup> 尽管作出了重要努力，但过去的可持续发展目标评估仍然主要集中在短期内(i. e., 2030)和



中期 (i. e., 2050) 评估。许多这些评估发现, (即使是最雄心勃勃的) 途径也不太可能在2030年之前完全实现所有的可持续发展目标<sup>4, 7, 14</sup> 在某些情况下, 甚至到2050年都不会发生。<sup>12</sup> 虽然这种短期/中期评估在某些情况下是合理的(e. g., 对于与和平、机构和实施相关的具有重大未来不确定性的可持续发展目标), 它们可以限制对长期进展的理解, 并忽视延迟效应和缓慢可持续发展趋势的非线性行为的作用, 这是由整个2100年出现的系统反馈互动驱动的。鉴于对邻近领域的长期分析, 这种知识差距已变得越来越重要。g., 保护科学,<sup>16</sup> 气候变化<sup>17</sup> 和人口统计学研究<sup>18</sup>) 和共同的发现, 关键可持续因素的负面趋势放缓和最终逆转(e. g., 生物多样性的丧失、温室气体的排放和人口的增长) 很可能发生在2030年之后和整个世纪。

在这里, 我们通过可持续发展目标到2030年、2050年和2100年的可持续发展目标视角, 通过合理的社会经济和环境发展轨迹, 以及通过人类自然系统中相互联系的内生建模, 分析了长期的全球可持续性进展。短期、中期和长期的时间框架分别与《2030年议程》、《巴黎协定》(2050年) 和政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的气候变化里程碑 (2100年) 相一致。我们利用这一长期分析来显示, 在2030年议程之外, 随着时间的推移, 实现日益雄心勃勃的目标的非线性进展, 并确定对本世纪后期加速可持续发展进展很重要的系统变化。了解所需的系统变化、启动和维持它的机会以及实现它的潜在障碍是未来规划的先决条件, 以便在以后实现和超过2030年的目标, 并确保早期的成就不会因自满和绝望而丧失。

## 结果

### 路径的全局系统动力学建模

#### 模仿

我们的分析是基于一个已建立的模型, 称为功能环境-经济链接集成 Nexus (FeliX)。它是基于系统动力学方法而开发的<sup>19</sup> 并模拟了全球范围内的社会、经济和环境之间的相互作用和反馈<sup>20</sup> (图1, 表S5, 实验程序)。FeliX支持对与可持续粮食 (可持续发展目标2)、健康和福祉 (可持续发展目标3)、质量教育 (可持续发展目标4)、清洁能源 (可持续发展目标7)、经济增长 (可持续发展目标8)、负责任的消费和生产 (可持续发展目标12)、气候行动 (可持续发展目标13) 和陆地生活 (可持续发展目标15) 相关的8个可持续发展目标的指标进行建模。通过相对简单但透明的结构和快速的模拟运行, 它可以在一个集成的建模框架中覆盖多个可持续性维度, 这是支持模拟不断发展的权衡和人类活动之间的协同效应的理想选择 (i. e., 人口统计学、经济、能源、土地和粮食) 和环境变化 (i. e., 生物多样性、碳循环和气候系统) 随时间的变化。在少数几个系统动力学模型中,<sup>12, 14, 21</sup> FeliX被选为其透明度<sup>20, 22</sup> 以及在分析多种可持续性方面的可信度

诸如排放途径等维度,<sup>23</sup> 可持续的饮食转变,<sup>24</sup> 以及在人类和地球系统中的社会环境影响<sup>25</sup> (关于该模型的优点和局限性, 请见讨论和结论)。

已经评估了广泛的长期发展途径, 包括跨系统的不同缓解政策, 与《巴黎协定》和可持续发展的兼容程度也不同。<sup>7, 26</sup> 我们评估了一组五种说明性途径, 符合共享的社会经济途径 (SSPs)<sup>27</sup> 以及具有代表性的浓度途径 (rcp),<sup>28</sup> 作为长期全球发展轨迹的基准。在我们的分析中, 所选择的途径并不是为了涵盖所有可能的未来, 而是为了展示一些未来的选择对社会经济和环境发展的影响。这五种途径与常用的SSP-RCP组合相结合,<sup>26</sup> 包括正常业务 (SSP2-4.5; 参考途径)、绿色恢复 (SSP1-2.6)、碎片化世界 (SSP3-7.0)、不平等 (SSP4-6.0) 和化石燃料开发 (SSP5-8.5) (所选途径的局限性和机会见讨论和结论)。

我们遵循了一种“故事和模拟”的方法, 其中使用SSP-RCP路径叙述 (表S1) 来指定模型的初始条件, 然后使用该模型来定量模拟路径 (表S2)。使用FeliX模型, 我们模拟了5个路径 (总共50000个路径实现) 的10000个模型评估 (称为路径实现), 以考虑模型参数的不确定性 (e. g., 自然变异和量化误差), 并探索五种主要途径周围的变化, 以获得更可靠的见解 (实验程序)。

在评估的5个路径中 (图2和S1), 我们对2100的参考路径使用当前轨迹的延续作为输入假设, 因此其社会经济和环境行为遵循SSP2-4.5的预测。与业务相比, 绿色复苏改善社会经济轨迹 (由低人口增长、经济增长, 更好的教育获取假设), 快速过渡到可再生能源 (由低生产成本, 更高的投资和技术改进假设), 和有限的土地利用变化 (因为食品需求降低, 肉类消费, 和更高的农业生产率假设)。这些积极的社会经济趋势对环境的影响, 加上雄心勃勃的气候政策, 导致了到2100年的低森林砍伐和低范围的温室气体 (GHG) 排放。与正常商业相比, 破碎的世界预计社会经济繁荣下降 (由人口增长和经济增长放缓驱动)、化石燃料产生的大量能源生产、高土地使用变化和显著的环境足迹 (由于高森林砍伐和排放水平)。与一切照旧和支离破碎的世界相比, 发展轨迹稍好的不平等导致社会经济预测适度改善, 清洁能源转型相对缓慢, 以及相对较高的粮食生产和土地利用变化轨迹。化石燃料的发展预示了一个未来的社会经济的改善 (类似于绿色复苏) 但以不可持续的环境轨迹为代价

一个地球5792-811, 2022 793年7月15日



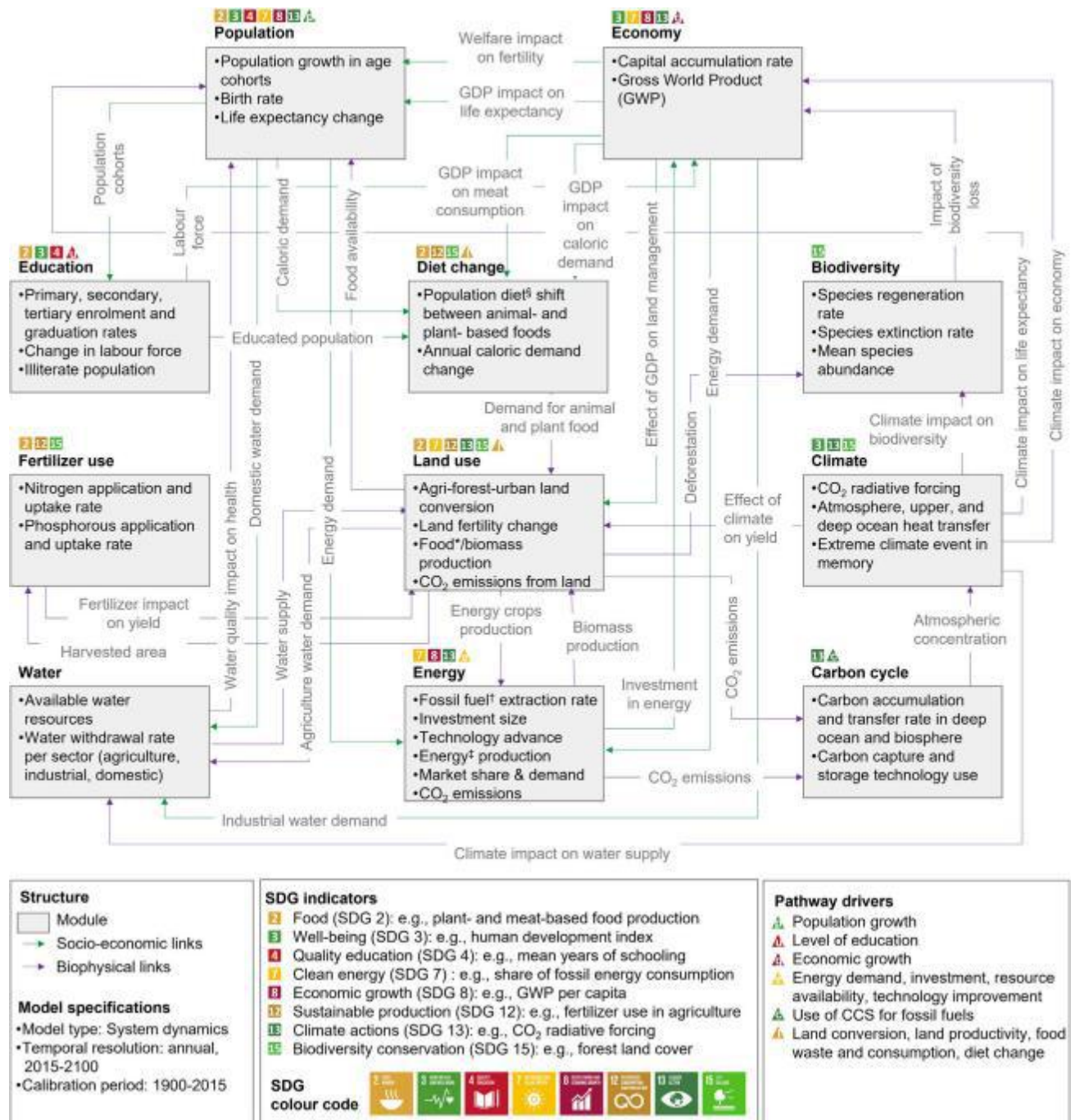


图1. Felix模型的概述

灰色阴影的盒子代表Felix中不同的部门模块。正方形和三角形标记显示了模型中可持续发展目标指标和路径驱动因素的实施位置。标记颜色与其对应的可持续发展目标颜色一致，其标注的数字/字母对应于可持续发展目标和路径驱动程序的名称。\*食品类别包括动物产品，包括以作物为基础的肉类（家禽和猪肉）、牧场性肉类（牛肉、绵羊和山羊）、乳制品和鸡蛋，以及植物性产品的供应，包括谷物、豆类、油作物、蔬菜、根和水果。y的化石燃料包括煤炭、天然气和石油。x能源包括化石能源和可再生能源（太阳能、风能和生物质能）。?饮食类别包括五种高到低的肉类和蔬菜消费的饮食组成。中国化学会，化石燃料的碳捕获和储存。关于该模型的更多细节，请参见实验步骤和表S5。

(e.g., 缓慢的清洁能源转型和高排放量)  
因为人们对化石燃料的依赖性和假设  
资源密集型发展。

结果表明，这与输入假设的行为一致  
在每个路径的跨系统（表S1）和在har-  
与其他综合评估的2100年的预测相一致



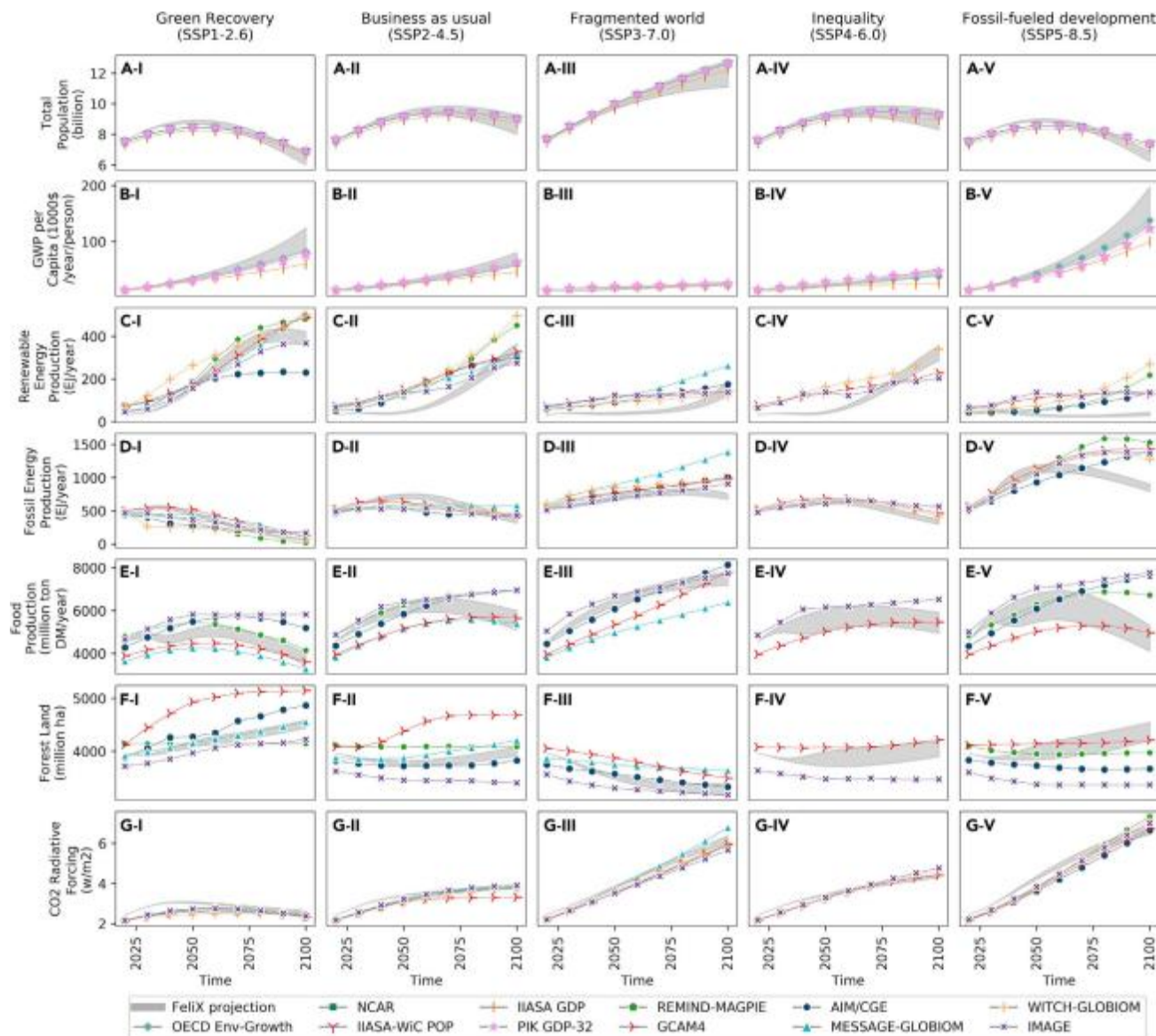


图2. 路径模拟结果与一套七个社会经济和环境模型的输出和比较  
主要模型的类似仿真输出

Felix模拟涵盖了2015-2100年期间，每年的时间步长（实验程序）。所有面板中的它们的轴表示我们用于与其他模型交叉验证Felix投影的控制变量。GWP，全球生产总值。

模型<sup>29</sup> 然而，由于Felix的模型结构和场景参数设置的不同，路径通常在数量上往往与其他模型的输出不同（有时有不同的轨迹模式）。Felix在结构上不同于大多数综合评估模型，因为它是一个描述性模型，而不是规定成本最优选择，而且它不假设市场均衡（更多信息见讨论和结论）。在其他模型中也观察到未来预测中类似的变化<sup>29</sup>（见图2和S1中的其他模型预测），这强调了多样化模型的重要性，以获得更广泛的未来可能性，以进行稳健的评估，并更好地理解未来预测中的深度不确定性。<sup>30-32</sup>

我们的产出与其他模型的不同，主要是在两个主要领域。首先，Felix预计化石能源生产会更快地下降。g.，这是由于对化石燃料和可再生能源生产成本的更大胆的假设。其次，由于Felix的内源性饮食变化假设，在绿色恢复中预测牲畜产量和作物需求会下降。与其他模型相比，由行为改变和消费模式的模型驱动的Felix向可持续饮食转变的更明确的假设，与某些途径的产出相比，导致较低的肉类消费和有限的耕地扩张（图2和S1）。

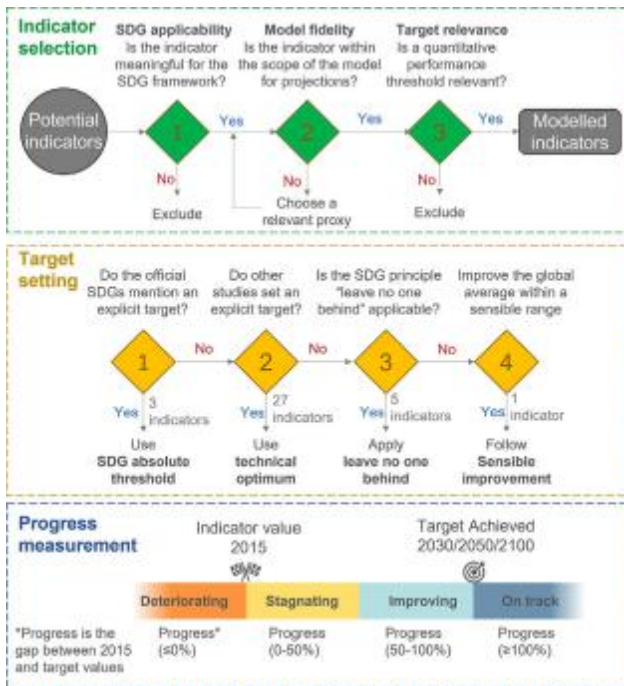


图3。指标选择、目标设置和进度测量过程  
详见实验步骤。

### 加速SDG进展

我们指定了一套明确定义的社会经济和环境指标和目标，以衡量可持续发展目标在预测途径中的长期进展。虽然目前的《2030年议程》有169个目标和232个指标，但许多指标都很复杂，而且还有一些缺乏支持定量预测的特异性。<sup>8</sup>因此我们定义了36互补可持续发展指标和设置定量目标相关八个可持续发展目标的建模范围内也足以覆盖大多数的关键领域的可持续发展相关的人（可持续发展目标3和4），繁荣（可持续发展目标8），可持续资源管理（可持续发展目标2、7和12），和地球完整性（可持续发展目标13和15），由凡维伦等定义。<sup>8</sup>（所选可持续发展目标的优势和局限性见讨论和结论）。

指标的选择是基于考虑可持续发展目标的适用性和测量可行性的选择过程（图3；实验程序）。我们在2030年、2050年和2100年设定了短期、中期和长期可测量的目标值，以表明所选指标随时间变化的性能阈值的变化（表S3和S4）。这些目标是根据当前文献中评估替代方案的适用性的标准来设定的（图3；实验程序）。从2015年的基准年开始（i.e.，可持续发展目标启动），根据标准的可持续发展目标进展监测方法和术语，以百分比来衡量每个指标朝着目标的进展情况，<sup>3,3</sup> 在0%或更小的范围内（表示没有或反向进展；i.e.，不断恶化），0%-50%（i.e.，停滞不前），50%-100%（有所改善），

和100%或以上（表示已达到或超过目标；i.e.，在正道上短期进展不足

到2030年，尽管大多数可持续发展目标在模型路径下仍然无法实现，但个别目标的实现不同途径上有所不同，一些目标比其他途径稍好，但不足以完全实现可持续发展目标（图4A和5）。为了说明这一点，我们讨论了到2030年的一些可持续发展目标和途径，分别是进展的改善、停滞和恶化。

在2030年的目标中，健康和福利（SDG 3）、质量教育（SDG 4）和经济增长（SDG 8）在绿色复苏方面的进展最大（分别为82%、89%和97%；图5）和化石燃料发展（分别为83%、89%和99%；图S6B）。在这两条途径中至少50%的实现中，可持续发展目标3、4和8下的进展到2030年进展（5个目标）或改善（3个目标）（图4A）。结合对人力资本投资和低人口增长的假设（图2A-I、2A-V、S1C-I和S1C-V），使绿色复苏和化石燃料发展有望在2030年实现这些目标。到2030年，碎片化世界（然后是照常商业和不平等）进展最慢，与可持续发展目标3、4和8下的大多数社会经济目标相比停滞不前，甚至恶化（图4A、S4B和S5B）。

可持续粮食（可持续发展目标2）和清洁能源（可持续发展目标7）是两个目标，到2030年，在所有途径上的进展相对较缓慢。就可持续发展目标2而言，化石燃料发展比其他途径好74%，在2030年的7个粮食生产和农业生产力目标中，有6个进展顺利或改善（图S6B和4A）。相反，破碎世界下的进展只有36%，到2030年只能实现三个与食物有关的目标（图S4B和4A）。对于可持续发展目标7而言，绿色复苏的进展最大（47%），主要是因为经济增长，高效最终用途技术的采用更多，以及向可再生能源的快速过渡（图2C-I）。化石燃料的发展和碎片化世界的发展进展最慢，分别为31%和17%（图S6B和S4B），因为整个世纪都严重依赖化石燃料（图S1E-V、S1F-V和S1G-V）。

2030年在生物多样性保护（SDG 15）、负责任生产（SDG 11）和气候行动（SDG 13）方面的进展在所有途径中都是最低的。到2030年，所有途径中这些目标的预计进展要么停滞要么停滞或恶化（图4A）。绿色复苏，这可怜的环境性能很大程度上是由于食品生产的需求增加，高肉类消费，和能源密集型经济模型输入假设这些途径，风险环境目标如农业土地扩张和氮肥使用（表S1和S2）。在绿色复苏研究中，尽管模型假设预计将抵消环境损害，但可持续发展目标11、13和15的低进展是由负面趋势的势头驱动的（e.g.，持续的生态系统损失、森林砍伐和全球温室气体排放）以及系统变化而延迟的可持续性改进。



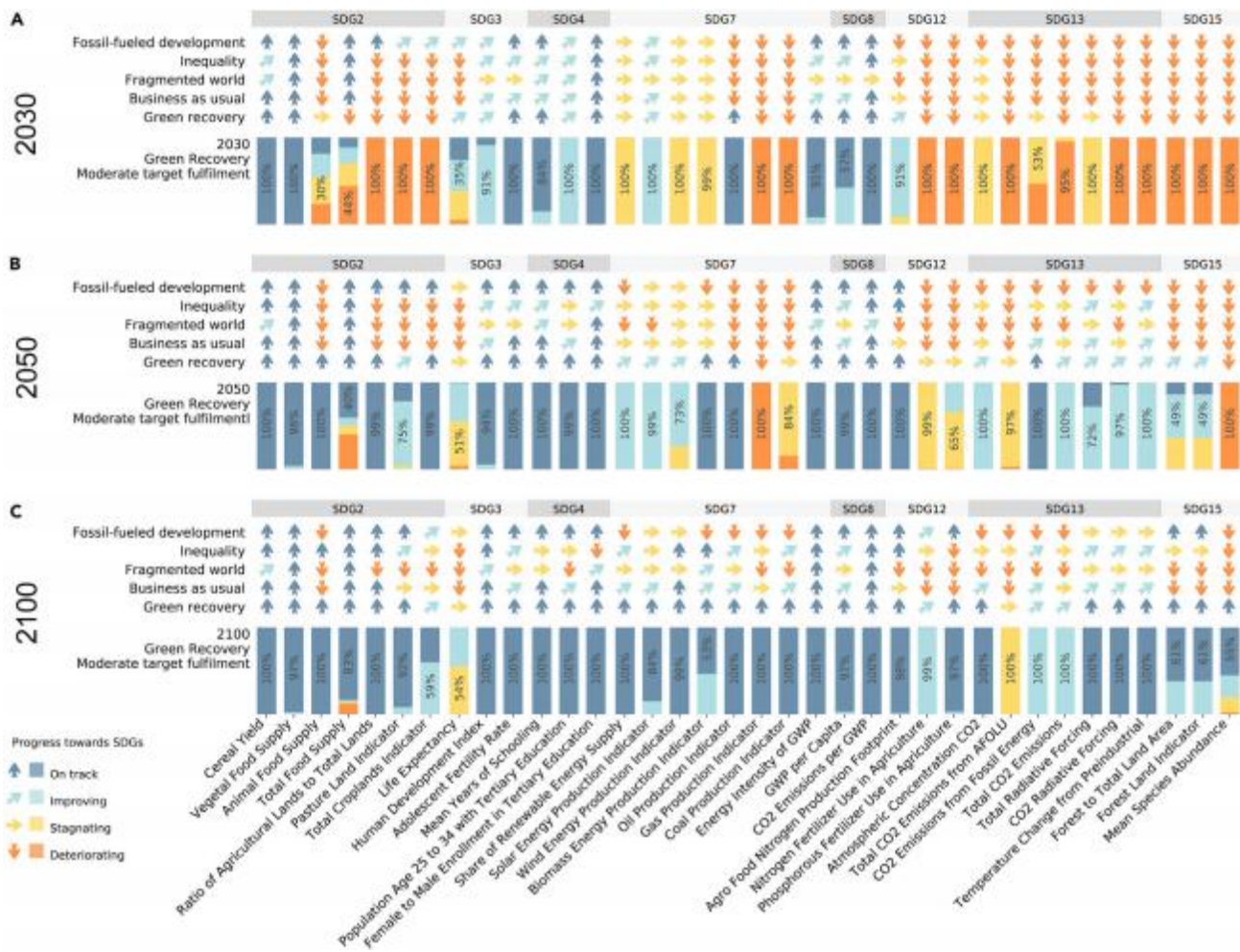


图4. 随着时间的推移和在5个模型途径下实现适度可持续发展目标的预测进展

(A–C) 到2030年(A)、2050年(B)和2100年(C). 的进展每一列代表一个指标。相关指标按可持续发展目标的标题分组。每个指标的进展水平(恶化、停滞、改善和在轨道上)在堆叠的柱状图中用颜色编码, 也用所有五种路径的箭头表示(实验程序)。箭头表示每个路径在其10,000个实现中最有可能的进展。堆叠柱状图只关注绿色复苏作为最可持续的途径。每个条形图中注释的百分比表示对应进度级别的10,000个绿色恢复实现的份额。例如, 在(C)中, “总食品供应”栏显示, 在10000种可能实现中, 83%的进展顺利, 而17%的进展停滞或恶化。

### 2030年后加速

在所有途径下, 实现日益雄心勃勃的2050年和2100年目标的进展都加速超过2030年。为了说明这一点, 将绿色复苏视为长期进展最高的途径, 到2030年结果最差的可可持续发展目标在2050年和2100年朝着新目标取得了更快的进展(图4B、4C和I5)。

到2050年, 在绿色复苏条件下, 负责任生产(SDG 12)、气候行动(SDG 13)和生物多样性(SDG 15)的进展分别增加到54%、74%和42%(图5)。展望比2030年和2050年更雄心勃勃的2100年目标(表S3和表S4), 绿色复苏在这三个目标上的进展分别进一步上升到94%、84%和90%(图5)。绿色复苏的加速速度较小, 但在其他目标方面也很重要。例如, 在粮食安全(SDG 2)和清洁方面的进展

到2100年, 能量(达到所有途径中SDG7)的最高水平, 分别达到97%和99%(图5)。即使在可持续发展目标中, 绿色复苏似乎没有随时间取得多大进展(e.g., 健康和福祉; 图5), 2100年相关指标的绝对值的变化是显著的(图S8B–I至S8B–III)。这可以用我们的方法来解释, 该方法衡量了2030年后的进展, 使目标能够进一步转向2050年和2100年的目标, 而不是与2030年相同的目标值(实验程序)。

在化石燃料的Devel-中也观察到类似的加速到2100年的选择, 但主要是跨社会经济目标的比环境的。g., 可持续发展目标12、13和15; 图S6C)。其他的途径, 如碎片化的世界, 也显示出非线性的长期进展, 但方向相反, 正在逆转他们在2030年取得的成就, 甚至比2015年开始恶化



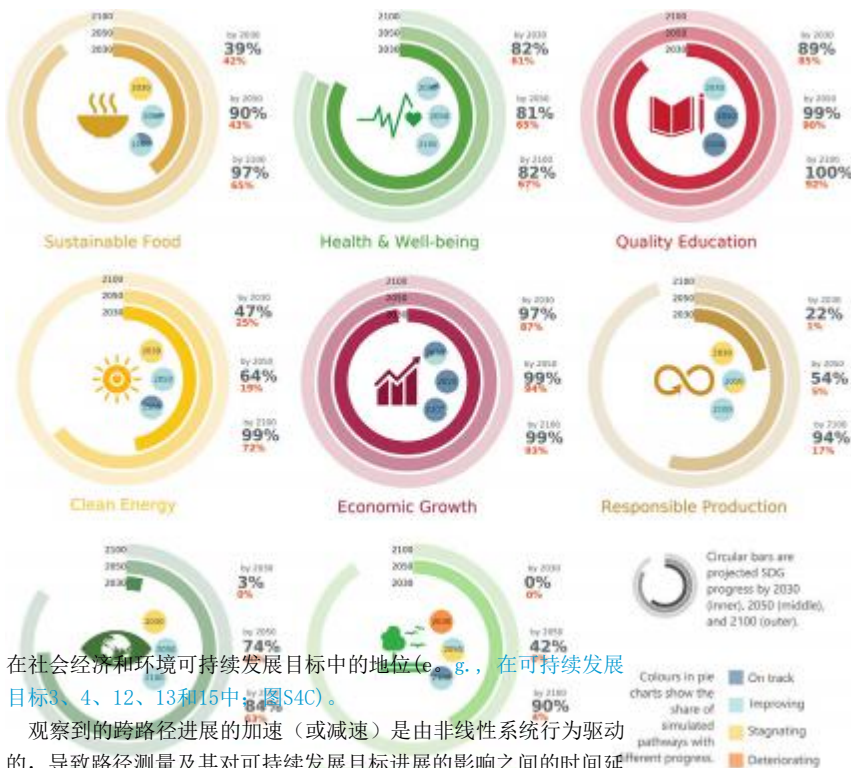


图5. 全球绿色复苏朝着8个中等目标的进展

其他途径的结果(i. e., 碎片化的世界、不等式和化石燃料的发展)如图S4-S6所示。每个面板都显示了迈向一个可持续发展目标的进展情况。每个可持续发展目标的进展百分比是在该目标下的所有指标的平均进展情况。在每个面板中, 三个条形图和注释的灰色文本表示在绿色复苏下的2030、2050和2100个目标的进展。2100年的目标比2050年的目标更雄心勃勃, 比2030年的目标更雄心勃勃。注释的红色文本是正常业务下的进展, 用于比较。饼状图显示了到2030年、2050年和2100年的10, 000个绿色恢复模拟路径实现的四个进展的份额。

陆地上的农业(图S1M-I和S1N-I), 减缓或逆转森林损失(图2F-I), 并提供了显著的气候变化缓解(图S1O-I)。

### 系统变化的长期可持续性

最新的全球可持续发展计划-该报告为长期可持续性提出了不同的切入点

点实现长期进展加速是复杂的, 需要早期规划跨目标的补充系统变革; 应该一致地追求的转变<sup>36</sup>会经济和环境体系到新兴的(以及更可持续的)

社会经济和环境体系(图6)。<sup>35</sup>我们从四个入口的角度来描述长期可持续性的系统变化: (1)人类的福祉和能力, (2)可持续的食品系统和健康的营养, (3)能源转型和普遍获取, 以及(4)与环境影响脱钩的可持续经济(实验程序)。在每个入口点上, 跨模型系统的变化规模根据与当前参考轨迹的延续的偏差进行量化(i. e., 一切如既往)到最高的长期进展的途径(i. e., 绿色复苏), 在2030年、2050年和2100年的三个时间步长。随着人们对建模研究中可行性的日益关注,<sup>37</sup>我们还利用最近的研究来讨论一些实地的机遇和挑战(e. g., 新技术、行为改变和草根支持)和在更广泛的领域(e. g., 重大的社会经济变化、权力转移和政策支持), 以加深对如何促进系统变革以及什么可能阻止“理想化”实施的理解。<sup>36</sup>

### 人类的福祉和能力

改善教育是一项必要的制度变革, 不仅有利于促进人类物质健康和福祉, 而且有利于提高人力资本的知识、技能和能力, 以推动长期可持续发展。<sup>35</sup>这也是我们建模中绿色复苏的核心, 反映出来了

在社会经济和环境可持续发展目标中的地位(e. g., 在可持续发展目标3、4、12、13和15中, 图S4C)。

观察到的跨路径进展的加速(或减速)是由非线性系统行为驱动的, 导致路径测量及其对可持续发展目标进展的影响之间的时间延迟。举例来说, 在绿色复苏的条件下, 人口增长和化石能源生产在2050年左右达到峰值, 然后出现下降(图2A-I和2D-I)。这种非线性行为支撑了与人口持续发展和能源系统有关的一些可持续发展目标(到2050年和2100年)最初缓慢和后来加速的进展, 如可持续发展目标7, 较低的人口和较少的化石能源生产可以直接促进其进展。

以路径之间的延迟加速及其影响为特征的非线性系统行为是由构成可持续发展目标基础的一个复杂的系统相互作用链所驱动的。其中一个例子是初始的(i. e., 慢而晚。e., 在绿色复苏条件下加速可持续发展目标13的进展(图5)。原因是多方面的。较低的人口增长(图2A-I)加上更可持续的生活方式可以减少能源需求的增加(图S1D-I)和对能源生产的长期影响, 从而减少能源部门的排放。在类似的相互作用中, 如Eker等人所示, 低人口以及整个世纪以来受教育机会的指数级增长(图S1C-I)可以逐渐导致更具环境意识的消费模式和更高的更健康 and 更可持续饮食的吸收。<sup>24</sup>随着时间的推移, 健康的植物性饮食和减少高动物性食物的消费(图S1L-I), 是土地利用和气候变化的关键驱动因素, 能减少……的影响吗

和气候变化的关键驱动因素, 能减少……的影响吗

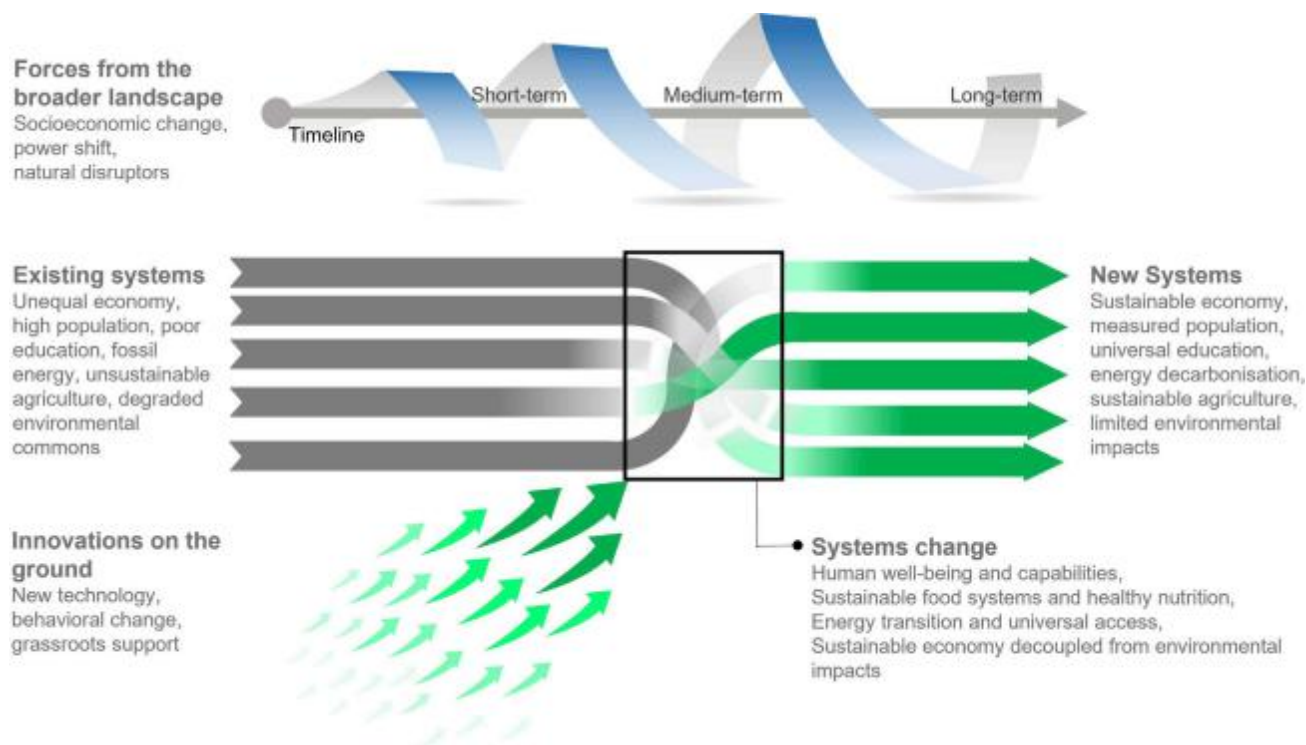


图6. 将长期可持续性的概念化定义为通过互补的系统变化而实现的转变  
系统变化可以被地面或更广阔的机遇和挑战促进或阻碍 (改编自Geels等人。<sup>36</sup>)。

与2050年和2100年的正常业务轨迹相比，将获得高质量教育的机会提高了10%（一个标准偏差范围：5%–14%）和40%（23%–53%）（图7）。

实现教育体制变革很难不易实现，需要大量的技术和政治支持。

<sup>38</sup> 在不同的情况下证明有效的支持机会包括消除学费普及中小学教育，改善当地的学校和结束社会和法律歧视，以确保性别平等，并建立系统性改进通过持续学习评估和加强教师培训。<sup>39</sup> 这些措施的长期成功取决于克服当前的挑战，例如建立一个稳定的教育体系，可以逐步改善和改变人们对欠发达地区全纳教育的作用和好处的心态。<sup>40</sup>

另一个促进人类福祉和能力的重要制度变革与人口统计和对全球人口快速增长采取行动有关。<sup>35</sup> 在绿色复苏的情况下，与2050年和2100年相比，人口增长减少了5%（3%–8%）和26%（16%–35%），同时提高了预期寿命（图7）。在社会规范方面取得进展，并采取更大胆的计划生育行动，对发展中地区的生育率和死亡率下降产生积极影响，这是衡量人口增长的机会之一。<sup>41</sup> 对有效的医疗保健和新生儿保健服务的投资是促进繁荣的其他日益增长的机会。<sup>42</sup> 然而，这些举措的成功可能会受到挑战

新兴经济体人口增长的中产阶级（预计到2030年将达到50亿）渴望与消费增长相关的生活方式。<sup>43</sup> 这突出了较低的人口增长率和更好的财富再分配之间的重要协同作用，以及解决收入和性别不平等问题政策如何能够提高长期的可持续性。<sup>38</sup>

#### 可持续的食品系统和健康的营养

全球粮食系统的商业轨迹和现行做法的延续不能可持续和公平地满足未来人口的需要，改变变革对可持续粮食和健康营养的重要性是不可否认的。<sup>44</sup> 这一制度变化的一个重要方面与土地利用和通过更高产量和生产力的粮食生产来限制农业土地扩张（这也与作为全球环境公地的土地密切相关）有关。与2050年和2100年相比（图8），在保持充足和高产量的同时，农田和牧场面积分别减少了7%（5%–10%）和10%（7%–13%）（图S8A-I和S8A-II）。这些类型的变化有助于限制森林砍伐和扭转生物多样性的丧失<sup>16</sup>（图S8H-II和S8H-III）。

为了控制农业活动造成的土地利用变化，存在着多样化和新兴的机会，<sup>45</sup> 例如，提高作物产量，更有效地利用投入资源（e. g., 水、营养物质和杀虫剂）通过自动化和精准农业，<sup>46</sup> 提高牲畜的生产力（e. g., 通过更好的喂养方式和减少肠道发酵的补充剂），<sup>47</sup>

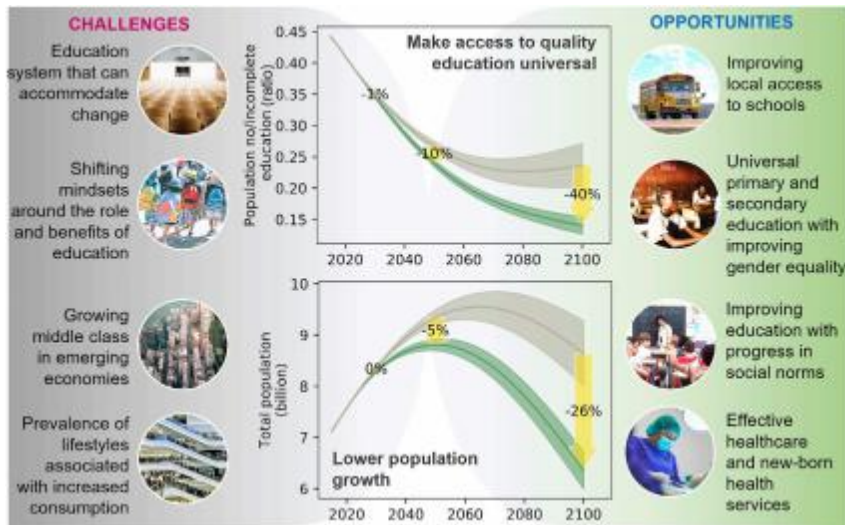


图7. 教育和人口统计学的基本系统发生了变化，从照常商业转向绿色复苏

在中心图中，包络线显示了结果中的一个标准偏差带宽。中线是平均值。黄色箭头表示偏离2030年、2050年和2100年正常业务包络的平均值到绿色恢复包络的平均值所需的变化百分比。改善的平均估计百分比（i.e., 两个信封的平均值之间的距离）被标注为2030、2050和2100。左边的挑战说明了两个潜在障碍的例子，它们可能会在正常业务中创建闭锁，并阻碍系统的改变。右边的机会说明了已经存在的许多潜在行动的两个例子，它们的吸收可以促进系统的变化。

。g., 间作和农林复合经营）。<sup>49</sup>然而，这些限制土地使用变化的努力可能面临多种挑战，例如使小农能够获得支助和财政资源方面的体制障碍<sup>50</sup>土地所有权集中在工业农场，这可能更容易对外部冲击和适应。<sup>35</sup>

可持续食品系统的另一个重要方面是消费实践和在食品选择方面的合作行动。在绿色恢复过程中，这被转化为39%（31%–46%）和50%（43%–57%）的减少。e.g., 反刍动物肉类和乳制品）与2050年和2100年的商业惯例相比，健康饮食中的热量摄入轨迹（图8）。更可持续的植物性饮食可以改善社区的健康和福祉，也可以通过帮助那些受到食品供应链分配影响的人来缓解不平等。<sup>51</sup>

技术创新、经济激励和制度变革是促进健康饮食的一些新机会，其中包括对公共卫生信息的投资、通过激励措施指导食品选择以及促进更有营养的食品的教育指南。<sup>44, 52</sup>然而，这些机会依赖于数十亿消费者在不同环境下当前饮食习惯的显著和快速的行为改变。<sup>53</sup>这是极具挑战性的，因为在饮食中有强烈的文化和社会规范，比如肉类与财富和男子气概等方面之间的紧密联系。<sup>54, 55</sup>类似地，许多有前途的技术机会的成功，如新的替代蛋白质（e.g., 植物性肉类和牛奶或细胞肉或微生物蛋白质的前景）不仅从根本上依赖于美味和负担得起的肉类替代品的开发，还依赖于提高公众意识并使其消费正常化。<sup>45</sup>人口向较低、受教育程度较高和繁荣的人口转变是行为和社会规范迅速转变以及改变人口状况的关键因素之一

800一个地球5, 792–811, 2022年7月15日

中的个人选择的潜在影响的态度（e.g., 减少肉类消费对健康的风险）。<sup>24</sup>

#### 能源转型和普遍获取

能源转型是经济发展和人与社会福祉的关键。它还可以缓解当前令人担忧的环境趋势，如排放量增加和气温上升。<sup>17</sup>在绿色恢复过程中，这一变化反映在化石能源总量分别下降了36%（29%–42%）和80%（75%–84%）。e.g., 煤炭、石油和天然气）的生产情况分别与2050年和2100年的正常业务轨迹相比（图9）。

有一些新出现的机会可能为这一体系的变革铺平道路。<sup>56, 57</sup>其中包括努力通过全球碳价格计划增加可再生能源的份额，包括国际负担分担和收入的逐步再分配，以避免高昂的缓解成本与与贫困的权衡，<sup>53, 58</sup>由私人 and 公共金融参与者为可再生能源领域的创新提供融资，<sup>59</sup>通过补贴实现更便宜的可再生能源技术，以及具有碳捕获和存储的生物能源的空间优化部署，<sup>60</sup>以及建筑、交通和工业部门的其他能源转型措施。<sup>57</sup>尽管存在这些机会，但技术、政策和可行性方面的挑战仍然存在，如长期储存可再生能源和智能电网网络管理，潜在的社会和环境权衡（e.g., 生物质能和生物燃料扩张对土地利用变化的副作用），以及不成比例的政府支持（e.g., 与可再生能源相比）。<sup>35</sup>

生产系统的变化需要进一步得到可持续消费实践的支持，以确保可靠、廉价和清洁的能源。这反映在绿色复苏中，与2050年和2100年同期相比，能源消耗模式分别降低了13%（3%–22%）和32%（20%–43%）（图9）。需要克服一些关键的技术和与消费相关的挑战，以加快系统变革到所需的步伐。其中包括大量需要改造供暖和制冷的旧建筑



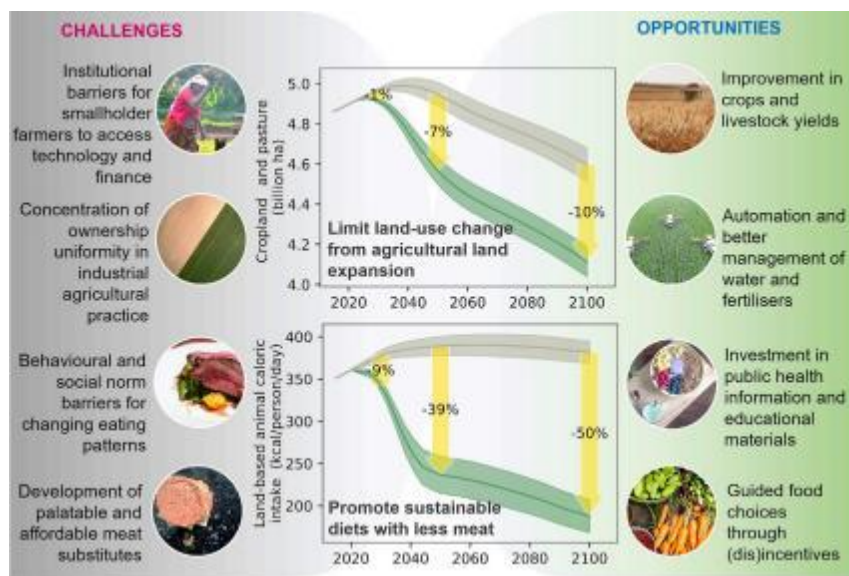


图8. 食品生产和消费的基本系统发生了变化，从照常商业转向绿色复苏

两种技术都是大多数消费者无法获得的。<sup>61</sup> 同样，在没有强有力的经济激励和国际合作与协调的情况下，改变发展中国家日益生产的能源密集型、依赖化石燃料和高污染的工业过程也具有挑战性。<sup>62</sup> 消费者补贴存在关键机会，以改善住宅特征，并鼓励使用更密集的住宅和节能电器实现更大的家庭规模。<sup>63</sup> 也有机会通过能源使用和监测的数字和人工智能技术等创新来实现低能源消费实践，<sup>64</sup> 现代城市具有节能的公共基础设施、移动系统、住房部门和智能电网管理，用于远程电力传输和更少的能源损失。<sup>56</sup>

#### 可持续经济与环境影响脱钩

一个可持续的途径需要将其经济效益与环境成本脱钩。<sup>35, 65</sup> 促进人类的福祉和能力，转向可持续的食品系统和健康的营养，以及能源转型，可以有机地导致更广泛经济的系统变化，以更少的环境权衡实现可持续增长。在绿色复苏和经济发展方面，到2050年和2100年，可持续和脱碳增长分别高出32%（7%–61%）和52%（5%–118%）（图10）。

促进创新和研究可能是经济增长的一个关键贡献者。然而，这种增长可能是严重不平等的，因此是不可持续的，由于在较不发达地区过度使用自然资源，导致贫困-恶化螺旋式恶化。<sup>66</sup> 可持续的经济增长还需要鼓励剥离当前业务的正常惯例，并促进能够铺平道路的创新

长期可持续发展途径（绿色增长），改善人类和环境效益。<sup>67</sup> 存在着大量可以支持这种变革的机会，其中包括支持政府科学资助机制，以有效地指导努力，并为人人享有平等的机会，<sup>68</sup> 形成创新创业孵化器，培育和发展新兴思想，并支持国有投资银行<sup>69</sup> 和public-private financing facilities for improved access公司的财政资源。<sup>70</sup> 实现这些机会的挑战包括政策、制度和政策的不成熟

有时，以更有效地利用资源来促进经济的技术增加有关的与物质和地位有关的消费的根深蒂固

的态度。<sup>71</sup>

具有转型（食品 and 能源）生产和消费系统的可持续经济也可以将对环境的影响最小化，其中包括温室气体排放导致的气候系统退化，这可能会对海洋和陆地生态系统的健康产生重大影响。<sup>35</sup> 在绿色恢复计划下，减缓气候变化努力的规模，以由此产生的大气二氧化碳为代表2 与2050年和2100年的正常业务轨迹相比，其浓度分别降低了6%（5%–7%）和20%（18%–21%）（图10）。气候系统与以前的系统变化密切相关，其排放的减少是人口统计学、食品和能源系统变化的结果。例如，碳定价、碳捕获和储存的生物能源、重新造林以及肉类需求减少都是其他系统变化的机会，这些变化也可能产生重大影响并扭转当前的气候趋势。对污染行业撤资、增加绿色投资以及将气候变化影响纳入金融风险管理的新支持，是支持所有系统减排的重要补充机会之一。<sup>72</sup> 除此之外，通过目前建立的框架，利用国际治理和全球伙伴关系（e.g., 《巴黎协定》）和建立新兴的对气候变化采取行动的公共和政治意愿，是确保以协调的方式执行系统变化和在相互冲突的情况下有效管理努力的其他机会。<sup>73</sup>

然而，雄心勃勃的减排机会可能会受到与其技术可行性和与其他系统的重大权衡相关的挑战的限制。例如，更快的脱碳（e.g., 1.5°C 通路<sup>74</sup>），它依赖于非常高水平的负排放技术的部署，如带有碳捕获和储存的生物能源，这引起了人们对地质储存的区域可用性、资源限制（土地或水）和/或获得社会许可证的关注

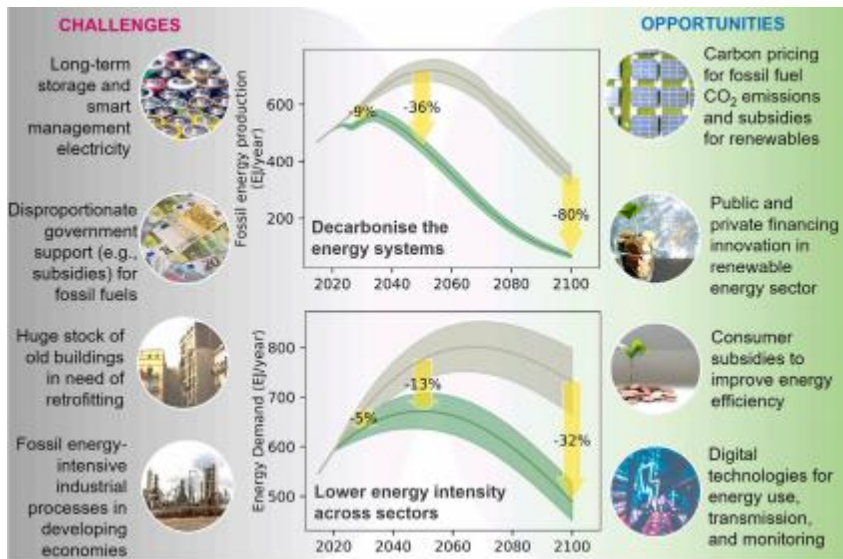


图9. 能源生产和消费的基础系统发生了变化，从照常商业转向绿色复苏

的生产和使用粮食安全和生物多样性处于危险之中。<sup>10</sup>因此，在实施之前，需要进一步评估雄心勃勃的减排机会的政策成本、可行性以及与其他非环境可持续发展目标的权衡。<sup>37, 77</sup>

## 讨论和结论

### 可持续发展目标目标空间的长期评估

目前可持续发展目标进展缓慢，对人类-自然系统的稳定性提出了挑战。<sup>78</sup>有人呼吁修订可持续发展目标，并进行新的评估，以指导如何引导可持续发展，以促进经济、社会 and 环境的繁荣。<sup>79</sup>作为回应，我们的研究旨在通过采用一个世纪的新镜头来重新考虑可持续发展目标的选择。较长的时间框架（i.e., 2100）允许模拟延迟（2030年后）进展加速的反馈交互的影响，这在可持续发展目标中没有讨论过。这种长期分析很重要，因为它可以确定，似乎对2030年里程碑的初步进展贡献有限的条件，在本世纪后期可能变得重要。这长期的角度也可以帮助规划可持续发展目标的优先符合未来可能的社会经济和环境发展轨迹，更好地理解潜在的挑战和机遇远远超过2030年的里程碑，并强烈保持对这些挑战的进展减少信心和绝望。

Any research focusing on a quantitative analysis of longer-term途径还需要透明和明确地制定指标和所期望的目标，以揭示差距并指导填补空白的行动。<sup>8</sup>根据最近的科学数据，并与2030年议程相一致，我们的研究是新颖的，并补充了最近的类似努力<sup>7, 8</sup>在系统地定义一套平衡的社会经济和环境指标时，并在整个21世纪设定明确的定量目标和不断提高的雄心水平方面。我们使用了eval-的目标

逐步调整可持续发展进程。除此之外，我们还指定了对加速长期可持续性很重要的关键系统变化。这为在未来一个世纪如何从照常商业转变为更可持续的途径以及未来可能面临哪些挑战和机遇提供了见解。

然而，这种对可持续发展目标空间的长期分析在某些方面是有限的，因此需要未来的发展。首先，tel-term analysis（我.e., 到2100年）受到未来深度联合国的挑战

所有可持续发展目标的确定性，特别是那些变化的国家（e.g., 与和平、制度和执行有关的目标不是确定预测2100世界的特异性途径。

相反，我们希望建设性地使用和学习以前的途径和场景开发，为长期的未来创建说明性的途径，并探索可持续发展目标的这些不同途径的“如果”结果。为了进一步推进深度不确定性的处理，未来的研究可以使用新的场景发现技术<sup>80, 81</sup>以便对未来的途径及其对可持续发展目标的长期影响产生更有力的见解。未来的研究还可以检查更多的

systematically the delayed emergence of ambitious pathways to better

understand different outcomes for sustainability progress in the medium and long term (e.g., food systems remain Business As Usual 在未来的几十年，但一个重大的变化发生在大约上世纪中叶)。

其次，我们的研究也受到了我们模型的范围的限制。尽管Felix的全球体系足够多样化，足以涵盖可持续发展的大部分关键领域<sup>8</sup>关于36个指标，它们并不涵盖所有系统（e.g., 交通、金融和医疗保健），并没有涵盖整个17个可持续发展目标的清单（e.g., 那些与管理良好的和平社会有关的，难以量化），或所有可能的制度变化<sup>35</sup>（e.g., 城市和城市周边的发展与空气、土壤和水污染相关的环境方面，这些都不包括在Felix模型中）。未来的研究可以扩展模型范围，明确地表示缺失的部门，更好地检验特定部门具体措施的影响（e.g., 补贴和其他加速能源转型的激励措施），并探讨它们对可持续发展目标进展的直接贡献。

### 用于综合评估的系统动力学建模

我们使用Felix系统动力学模型来分析可持续发展目标的相互作用。系统动力学作为一种已建立的方法<sup>19</sup>已被用于建模气候和可持续性背景下的反馈交互作用、延迟响应和非线性行为<sup>23, 24, 82</sup>特别是可持续发展目标。<sup>12, 14, 83, 84</sup>系统动力学模型（包括Felix）的一个有用特性

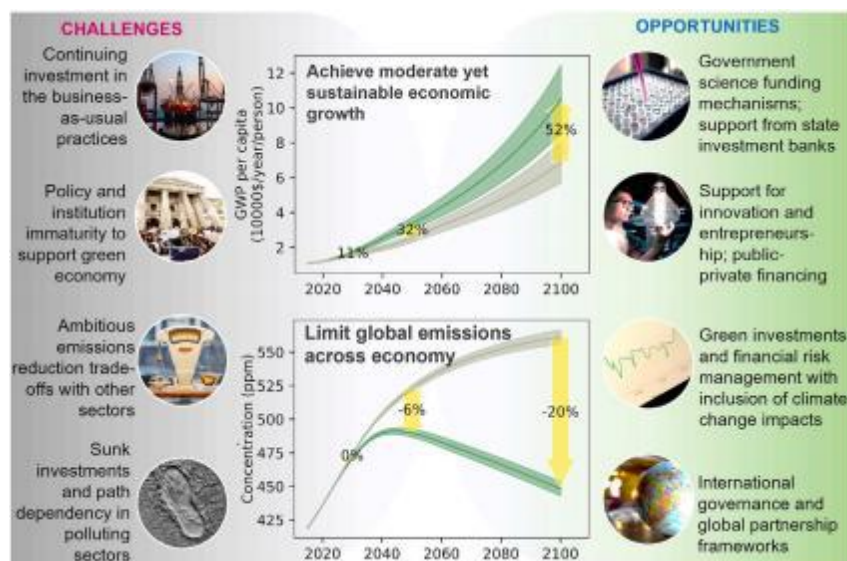


图10。在从照常商业转向绿色复苏的过程中，整体经济的基本体系变化及其对环境减排的影响

植被和作物生长、土地利用。g., 长期降水对土地管理决策的影响)、能源(e. g., 温度上升对能源需求的影响)和人类行为(感知到的气候极端事件风险会改变人类的排放)。

89, 90

### 为本地上下文共同设计路径

我们的建模主要集中在全球层面上。全球范围的研究<sup>12, 23, 24</sup>对于它们在捕获交互式ac

系统之间的关系，监测其总体成果，并指导也，以确保在2030年议程及以后取得普遍进展。

果和建模假设之间的关系相对容易理解。鉴于最近的一项研究，这对可持续发展目标的分析很重要<sup>85</sup> 这表明决策者不太关心准确性或精确性，而是优先考虑社会和政策过程中的简单性和易于理解。虽然这种相对简单的方法可能会限制预测能力，但模型的准确性和复杂性之间的联系仍然很薄弱。<sup>86, 87</sup> 根据过去的趋势验证我们的建模<sup>22</sup> 与更复杂模型的输出相比(图2和S1)也显示出高度的一致性。

像Felix这样的系统动力学模型的另一个优点是在一个集成的框架中对社会、经济和环境系统之间的反馈交互作用的内生建模(图1; 实验程序)。正如本研究中所强调的那样，这些模型非常适合于捕获短期和长期路径中的非线性。反馈交互的建模有助于提高对可持续发展目标的相互联系和复杂性的理解。g., 非线性、临界点和延迟)。<sup>12</sup> 理解复杂的相互作用可以通过确定障碍或政策阻力的潜在机制，并设计可转化为可持续发展更成功结果的协同解决方案，从而深入了解可持续发展目标的协同作用和权衡。<sup>88</sup> 综合和描述性系统动力学模型可以用来补充来自其他综合评估模型的见解(e. g., 地球系统和部分或一般平衡)，它们更多关注生物物理和社会经济系统的详细观点，而不是系统之间的反馈。<sup>89, 90</sup>

虽然Felix代表了几个关键的系统元素及其反馈，但它并没有捕获所有重要的交互作用。未来的研究可以通过识别和合并其他目前在现有的综合评估模型中没有体现出来的反馈互动，包括Felix。例子可以包括与其他在可持续性背景下很重要的系统建模的气候反馈交互作用，如农业(e. g., 哥伦比亚2受精对自然的影响

<sup>91</sup>所解决的一些环境挑战在世界范围内都是普遍存在的(e. g., 温度升高和生物地球化学流动)，而管理则依赖于对它们的总体效应和支撑它们的全球连接系统的理解。尽管存在这种全球联系，但不同的地点面临独特的、特定的问题，有自己的需求和可持续性优先事项，为许多可持续发展目标创造了强大的地理空间联系。<sup>92</sup> 例如，尽管不可持续的饮食是一个共同的挑战影响全球排放共享，他们对粮食需求的影响，粮食生产和土地利用的变化，取决于每个地区的独特的社会经济和环境特征，包括社会规范、教育水平、资源和每个社区的占主导地位的食品系统。<sup>53</sup> 这需要未来的研究翻译和降低全球路径和可持续发展目标的理解在地方层面，更好地承认本土价值观、文化差异，可用资源和技术，和地方政治和治理框架，也更好地理解进步的分布效应和变化。<sup>15</sup>

然而，由于理解地面上的异质性的挑战，在局部尺度上建模和转换其影响方面往往存在重大的限制<sup>93</sup> 并解决利益相关者之间的根本分歧。<sup>91</sup> 先前的研究提出了通过跨学科方法来解决这些挑战的框架，可以超越与研究人员的合作，促进公共社区参与途径开发过程。<sup>94, 95</sup> 虽然仍是一个利基领域，但应用范围仍在不断增长<sup>96, 97</sup> 各种跨学科的方法，如知识的共同生产(包括当地、实际和本土知识)和与利益攸关方的参与过程(i. e., 共同设计路径，地方优先事项，<sup>10</sup> 和计划<sup>98</sup>)为促进当地对可持续发展目标的理解提供了机会。



## 为更大胆的可持续发展行动发展道路

尽管最初是为气候预测而开发的，<sup>26</sup> 符合SSP-RCP的路径及其变体已被广泛用作更广泛的可持续性科学的基准<sup>5, 7, 14</sup> 及其相关领域(e.g., 水<sup>99</sup> 农业<sup>100</sup> 和生物多样性<sup>101</sup>)。他们在当前研究中的适应，部分动机是由于他们对可持续发展目标分析所需的全球规模的社会经济和环境假设的广泛覆盖。符合SSP-RCP的途径也为产生具有根本不同可持续性结果的替代未来提供了基础，适合本研究，重点是展示替代未来的范围（从高到低进展）到本世纪末。然而，本研究选择的5条通路仅作为说明性原型，以突出最常用的SSP-RCP通路组合中的特定变异<sup>26</sup> 并不是打算涵盖未来的所有可能性。例如，我们没有包括更高层次的缓解气候变化的途径<sup>17</sup> 因为与其他可持续发展目标的权衡。来自SSP-RCP框架的路径也不包括与一些可持续发展目标相关的明确驱动力，如性别不平等或伙伴关系，这些可能会与Felix中其他目标的权衡而影响预测。这些问题将受益于未来的研究，这些研究超越了目前在SSP-RCP框架中的雄心，为更大胆的行动，

不仅是为2030年议程<sup>7</sup> 但也为较长期的时间框架(i.e., 2100)这可以在本世纪后期加速实现可持续发展。<sup>53</sup>

## 实验程序

### 资源可用性

#### 引线接触

关于资源和试剂的进一步信息和要求应直接联系E，并将由E。

A. M. (e. moallemi@deakin. edu. au)

### 材料可用性

所有生成的新材料都通过“数据和代码可用性”下的链接提供。’

#### 数据和代码可用性

使用和生成的完整代码、结果和数据集可以在Zenodo: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6459874> 补充信息中的表S2和表S4可以在Zenodo:

<https://doi.org/10.5281/zenodo.6609917> 本研究中使用的模拟模型Felix，可以在Zenodo: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6459874> 和来自IAMC的网站: <https://www.iamc.org/resources/model-resources/felix/>.

## Felix系统动力学模型

Felix是一个系统动力学模型，它模拟了10个全球系统之间的复杂相互作用：人口、教育、经济、能源、水、土地、食物（包括饮食变化）、碳循环、气候和生物多样性。Felix最初是为了预测人类-自然系统中的社会环境影响而开发的<sup>25</sup> 后来又被用来探索排放途径<sup>23 102</sup>，并评估可持续的饮食转变。<sup>24</sup> Felix是为数不多的人机交互系统模型之一，它涵盖了社会、经济和环境方面（及其反馈交互）的广度，包含在一个适合可持续发展目标分析的集成框架中。该模型以年为运行，旨在预测全球范围至2100年的未来社会经济发展和环境条件。它是在Vensim软件中实现的，并己根据1900-2015年的历史数据进行了校准(见Rydzak等人。<sup>22</sup> 为校准结果和图表)。

系统动力学和其他预测未来路径的建模方法中的一个关键验证方法是基于它们与历史路径的比较

数据（显示该模型是否至少对重现过去可靠）以及其他模型的未来投影，如果可用的话（为了显示新模型产生合理的结果，也称为交叉验证）。Felix已经在这两方面都得到了验证。有关历史数据的验证，请参考Felix的扩展技术报告，<sup>22</sup> 其中包括根据历史数据对每个Felix的子模型进行详细验证。有关对其他模型的验证，请参见全局系统建模和图2和图S1。

使用系统动力学作为一种方法有着悠久的历史。系统动力学的第一个也是最持久的应用之一是1972年《增长的极限》对全球工业化的环境和社会影响的建模，<sup>103</sup> 他指出，如果及早采取行动，生态和经济的稳定将不会无法实现。<sup>104</sup> 从那时起，系统动力学已被广泛应用于可持续性科学中的一种既定方法(关于综述，见Moallemi等人。<sup>83</sup> Allen等人。<sup>105</sup>)。系统动力学模型可以（而且经常）基于一个共同设计的过程来开发，使研究人员和利益相关者之间的互动，并支持学科和跨学科知识的综合。<sup>106</sup> Allen等人的评论中也强调了正文中提到的其他特征。<sup>105</sup> 这表明，与其他建模方法相比，系统动力学模型可以更加透明和合法。

尽管在方法上有优势，但Felix错过了一些部门，需要未来的改进。例如，运输领域的主要能源需求(占2019年全球温室气体排放量的15%)<sup>53</sup> 预计到2050年，业务照常经营(BAU)将增长25%，<sup>107</sup> 导致全球初级能源需求增长约25%，<sup>108</sup> 但是在Felix中缺少了一个关于运输部门的明确模型。虽然我们对能源需求预测的不确定性探索(到2050年全球一次能源需求增长17%-33%，比2020年增长33%；图5)可以间接涵盖运输系统的影响，但未来需要进一步改进运输部门（以及其他缺失的部门，如治理），以进行更好的预测。

图1提供了Felix中的部门模块的摘要，下面还提供了详细的描述。在Felix中建模的八个可持续发展目标之间的重要相互作用见表S5。读者也可以参考原始的Felix文档<sup>22</sup> 以及之前使用Felix的论文<sup>23, 24</sup> 对历史数据的扩展描述和验证，并与其他场景进行交叉比较。该模型及其支持数据可以在网上公开获得（数据和代码可用性）。模型中每个可持续发展目标指标背后的方程可在补充信息中获得。关于在模型中计算指标值的方法的信息可在补充实验程序中获得。

## 人口与教育

人口模块描述了基于老龄化链的人口增长，并计算了0-100+之间的5岁年龄队列的男性和女性人口规模。出生率是受教育程度和人均国内生产总值(GDP)驱动的，而出生率是影响人口动态(增长或下降)的主要因素，以及模型中以性别和年龄队列细分为代表的生殖女性人口。模型中的链结构代表了新生儿随着年龄的增长通过年龄队列的转变，这意味着除了“0-5”队列外，每个年龄队列都有一个流入（前一个队列的成熟）和两个流出（到下一个队列的成熟和死亡率）。在人口部门，在两个方面考虑到性别差异：新生儿的性别比例，代表女婴杀婴，以及教育入学和毕业差异。人口模块还计算了预期寿命的变化以及对卫生服务、食物和气候风险的影响。人口是Felix的核心模块，它直接或间接地影响着所有其他部门，如能源需求、用水、对化肥使用的影响和食品消费。不同年龄组的人口规模纳入教育模块，通过入学率、毕业率和最终达到每个教育水平最后一年的反馈循环，计算小学、中学和高等教育毕业生的数量。在15-64岁之间的所有年龄队列中，受教育程度人口的积累，乘以劳动力参与率，计算出经济模块的劳动力输入。人口和教育是根据历史来校准的

来自联合国（联合国）经济和社会事务部的人口统计数据。<sup>109</sup>

#### 经济

经济模块被建模为科布-道格拉斯生产函数，其中总世界生产总值（GWP）根据劳动力投入、能源和非能源部门的总资本投入以及能源和非能源技术的总要素生产率计算。Felix进一步发展了科布-道格拉斯功能，以纳入生态系统变化和气候变化对经济产出的影响。鉴于人类发展应该包括经济进步之外的措施，Felix还计算了另一种措施，称为人类发展指数，它是健康（预期寿命）、受教育程度和收入的指标。经济模块采用世界经济的历史统计数据进行了校准<sup>110</sup>以及联合国开发计划署（开发计划署）的数据。<sup>111</sup>

#### 能量

能源模块将能源需求建模为GDP和人口的函数。通过捕捉三种化石能源（煤炭、石油和天然气）和三种可再生能源（太阳能、风能和生物质能）之间的价格竞争机制，通过不同能源的市场份额来模拟能源消耗。每个化石能源的能源生产被建模为能源需求、能源来源的市场份额、投资对能源生产的影响以及已确定的化石能源资源的函数。Felix模拟了化石资源发现和勘探投资方面的技术进步，以解释未来可以发现的未发现的资源。Felix还模拟了回收化石资源的技术改进模型。可再生能源的基本模型结构与化石燃料类似，由可用可再生能源的五个关键子模块（e.g., 平均太阳辐射和可用面积）、装机容量供应链及其老化过程、生产的单位成本（e.g., 风能和太阳能技术学习曲线的影响）、可用投资、技术效率和生产力（e.g., 太阳能转换效率和风容量系数）。能源模块根据国际能源机构（IEA）的数据进行了校准。

<sup>112</sup>

#### 水

Felix通过水资源短缺来模拟水部门；也就是说，供水和退出之间的平衡。供水是可用水资源的一个功能，是气候变化影响的干旱率，是不同部门的撤水率，以及这些部门使用的水的恢复率。取水是用于农业、工业和国内部门。农业取水依赖于灌溉和雨养的农业用地，工业取水依赖于GWP（经济活动），生活用水取水依赖于人口和GWP。参见水模块是根据来自政府水文方案（IHP）、联合国教育、科学及文化组织（教科文组织）的历史数据进行校准的。<sup>113</sup>

#### 陆地

Felix的土地部门分为四类土地使用：农业、森林、城市/工业和“其他”。‘土地’利用可以重新利用，并根据对更多农业用地的需求在不同类型之间切换。通过通过施肥来增加作物产量，对农业用地的需求得到了平衡。农业用地分为可耕地、永久作物和永久草地和牧场。可收获的土地和永久作物可以收获生产粮食和饲料，以及能源作物的生物质。永久的草地和牧场只能用于饲料生产。收获的可耕地面积直接由粮食、饲料和能源作物生产驱动，也间接由粮食需求和生物质需求驱动。作物和牲畜的产量被建模为输入中性的技术进步、土地管理实践（经济的影响）、水资源的可利用性（干旱的影响）、氮和磷肥的使用以及气候变化（碳浓度的影响）的函数。农业中的氮肥和磷肥的使用，从商业来源或由牧场和以作物为基础的动物生产的粪便，在Felix中有明确的模型。然而，钾肥在全球肥料使用量中所占的比例最小（20%），由于吸收效率高，泄漏率低，其环境影响比氮磷低得多。<sup>114</sup>森林土地覆盖的变化是通过与其他土地用途以及生物质能生产所需的收获森林面积的转换来模拟的。森林土地肥力被内源性地建模为

生物多样性、土地管理实践、气候变化和一氧化碳的影响的功能<sup>2</sup> 全神贯注Felix的土地模块是根据粮食及农业组织统计（FAOSTAT）的全球规模历史数据校准的。<sup>115</sup>

#### 食物和饮食的变化

Felix中的食物模块包括食物需求和供应（包括废物部分）以及人口食物消费中的饮食变化。食物需求是食物和饲料需求比例的函数，每一个都是根据动物和蔬菜食物饮食的人口规模决定的。食品供应是动物性产品供应的总和，包括作物肉类（家禽和猪肉）、牧场肉类（牛肉、绵羊、山羊）、乳制品、鸡蛋，以及植物性产品的供应，包括谷物、豆类、石油作物、蔬菜、根和水果。粮食生产（与粮食供应有关）取决于收获土地的面积（从农田获得）和作物和牲畜产量（已在土地模块中讨论）。食物消费（与食物需求相关）是通过连接到一个将人类行为和饮食选择与不同的人口群体联系起来的模型来确定的。g., 男性和女性，受教育程度）。饮食变化模型<sup>24</sup>基于两种反馈机制解释各种环境行动，以走向更可持续（更少的肉类）饮食：社会规范导致的饮食变化和威胁和应对评估的饮食变化。后者与来自气候事件的威胁有关，是物理系统和人类系统之间的一个重要反馈结构。食品和饮食变化模块是根据来自食品统计数据集和全球疾病负担数据集的历史数据进行校准的。

#### 碳循环

Felix模型公司<sup>2</sup> 内生排放是基于大气中能源和土地部门的碳排放的积累。哥伦比亚<sup>2</sup> 土地的排放包括农业活动的排放。e., 粮食生产和土地利用转变为农业土地），以及森林砍伐和森林转变为管理森林和种植园。哥伦比亚<sup>2</sup> 能源部门的排放量是根据化石能源和可再生能源生产的碳强度明确地计算出来的。能源部门的排放也内源性地反映了碳捕获和存储技术的改进以及化石燃料的预期排放水平。碳通过陆地水库循环，逐渐吸收到生物圈、岩土圈或海洋中，<sup>116</sup> 《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）也用于气候影响分析的气候模型。碳溶解到海洋是通过混合海洋层（深度，0-100米），然后通过四个模拟的深层层（100-400、400-700、700-2000和2000-2800米）。见沃尔什等人。<sup>23</sup> 为不同储层间碳通量的模型方程。该碳循环模块是根据来自二氧化碳信息分析中心的历史排放数据进行校准的。<sup>117</sup>

#### 气候

气候模块模型为CO<sub>2</sub> 与工业前水平相比，大气中积累的碳（来自土地和能量）的内源性辐射强迫。其他气体的辐射强迫<sup>4</sup>, N<sub>2</sub>通过将Felix与RCP场景连接起来，并使用SSPs的标记模型从预测的强迫水平中读取数据（i.e., 图像、GCAM、AIM和消息）。总辐射强迫的影响与温度异常有关，如c路模型。表面温度的变化也受到负（冷却）反馈的影响，这是由于向外的长波辐射以及从大气和混合海洋层向四个深海层的传热作用造成的影响。

#### 生物多样性

Felix捕捉了土地覆盖、土地利用和气候变化对物种承载力（全球平均水平）的影响。生物多样性模块利用这种承载力从物种再生和灭绝率中计算出平均物种丰度。生物多样性模块根据生物多样性公约秘书处数据库秘书处的历史数据进行校准。

<sup>118</sup>

#### 路径模拟

从当前的路径预测文献中确定了一组互补的社会经济和环境假设，并将其用作未来路径预测的Felix输入。这些假设是由ssp和rcp作为广泛使用的科学框架提供的

长期的不确定性和数量可管理的替代未来。<sup>26</sup> 这些框架也在以前的几次可持续性评估中经常被使用。<sup>7, 14, 100, 101</sup>

在不同的SSP-RCP组合中，我们选择了SSP1-RCP2.6、SSP2-RCP4.5、SSP3-RCP7.0、SSP4-RCP6.0和SSP5-RCP8.5等5个基准路径，用Felix模型进行投影。路径假设spaceincludedtheglobaltrendsofdifferentsocioeconomic和环境驱动力到2100。它们包括社会经济（生育率、死亡率、移民、教育程度和经济增长）、能源和气候（能源需求、技术进步、化石资源开采和生产成本）、土地（土地利用变化、作物和牲畜产量和土地生产力）、粮食和饮食（废物、消费和饮食变化）、排放轨迹（1.9、2.6至4.5至6.0和8.5 W m<sup>-2</sup>及其相关的气候政策（表S1）。使用Vensim的内置函数，将定义的路径假设空间转换为Felix参数设置的相关定量值（表S2）。e.，这通常用于量化系统动力学模型参数。

Felix有许多参数，因此在参数假设中评估不确定性的影响是必要的。为了评估不确定性的影响，我们进行了全局敏感性分析，以确定其不确定性可能对路径预测有重要影响的影响参数。在全局敏感性分析方法中，Morris基本效应是具有大量输入参数、需要生成可靠、高计算效率的结果的综合评估模型的理想选择<sup>119</sup>（图S7A）。当确定了有影响的参数后，为了了解路径性能对这些不确定性的全面变化范围，我们使用拉丁超立方抽样进行了一系列的模型运行。每次运行都是一个计算实验，显示了每个路径的实现。我们模拟了每个路径的10000次运行（实现）（在所有路径上总共有50000次）。

将所得到的预测及其不确定性范围在社会经济和环境输出变量之间与其他模型的预测进行了比较，包括图像、信息-全球生物、AIM、GCAM和提醒-喜鹊<sup>29</sup> 评估路径预测中与其他模型的（不）一致性水平（图2和S1）。

#### SDG进度测量

可持续发展目标框架包括17个目标和231个指标，以衡量实现169个目标的进展情况，但这些指标过于广泛和复杂，无法支持定量评估。<sup>8</sup> 因此，我们通过选择指标子集，为所选指标设置科学指标，并衡量目标的进展，在Felix中实现了可持续发展目标。

#### 指标选择

从联合国统计委员会（联合国安理会）和其他来源（e. g.，经济合作与发展组织[经合组织]、世界卫生组织[世卫组织]、联合国粮食及农业组织[粮农组织]和世界银行），基于三个标准（图3）。首先，我们研究了衡量可持续发展目标进展的潜在指标（可持续发展目标的适用性）的全球相关性。其次，我们评估了Felix量化可持续发展目标指标（模型保真度）的能力。对于Felix中不存在的指标，我们要么在结构上推进模型，要么选择代理（i. e.，一个最接近可持续发展目标指标的变量）。例如，我们没有包括生物多样性保护的官方指标，如红色列表指数，因为所需的数据没有在Felix中产生。相反，我们将平均物种丰度作为生物多样性的代理指标。<sup>16</sup> 第三，我们确保所选的指标符合定量绩效阈值的规定，以衡量可持续发展目标的进展（目标相关性）。所有通过这三个标准的指标都被纳入分析。

#### 目标设置

成功评估可持续发展目标的进展需要科学驱动指标作为每个指标的定量阈值。我们使用四步决策树为每个指标定义了目标（图3）。首先，我们使用在官方可持续发展目标框架中明确反映的可行的定量阈值来设定目标（可持续发展目标的绝对阈值；3个指标）。例如，可持续发展目标8表明“至少7%的GDP增长”，这可以转化为“人均GDP”指标的增长率的具体目标。

其次，如果在可持续发展目标框架中没有提到一个明确的目标，那么我们就使用一个技术最优方案来设定目标（技术最优方案；27个指标）。我们使用了在其他科学期刊文章、全球报告、<sup>33, 120</sup> 和在线数据库。<sup>121</sup> 例如，我们使用IPCC的辐射强迫水平来将全球温度保持在1.5以下°C作为“辐射强迫”指标的目标水平。

第三，在可持续发展目标的绝对阈值和技术最优不适用的地方，我们遵循2030年议程的“不留人”原则，利用历史记录数据根据基准年表现最好的国家的平均状态设定目标（不留人；5个指标）。在这里，根据Felix计算的全球平均水平预计将达到目前表现最好的国家的水平。在选择表现最好的国家时，我们从列表中删除了异常值，以减少我们计算中的偏差。例如，一个耕地有限的小国的化肥水平通常很低。因此，将中国作为计算“粮食和农业磷平衡”指标目标的最佳国家，可能会对全球粮食生产贡献较大的大国产生误导。在国家一级没有性能数据的情况下，我们使用了区域数据（e. g.，经合组织和大陆）。

第四，在没有任何相关目标的情况下，我们名义上在历史数据指导的基础年内设定了一个合理的改善目标（合理的改善；1个指标）。例如，“总CO<sub>2</sub>农业排放是最初的可持续发展目标中没有提到绝对阈值的指标，在其他研究中没有提到技术最优。这个指标的价值也对一个国家的农业部门的规模很敏感。因此，没有人落后，表现最好的平均值并不会导致一个有意义的目标。在这种情况下，我们使用了一个全球改进水平作为指标的目标。

对于每个指标，为选定的指标（弱、中等和雄心勃勃）设置了三个目标水平，以承认目标设置中的不同目标水平和路径性能对目标规范的高敏感性。在每个级别，根据全球主要可持续发展里程碑制定了2030年、2050年和2100年的目标。正文中的所有结果都是基于中等目标的。雄心勃勃和弱目标的结果在补充信息中。目标值及其合理性见表S3和表S4。

#### 进度量化

为了衡量每个指标朝着目标的进展，我们对指标值进行了归一化，每个指标值都有不同的尺度和测量单位，以确保可比性和一致的解读。对于每个目标，我们将指标值进行标准化，以表示与目标实现相比的表现，范围在0%（没有进展或偏离目标）和100%（达到或超过目标）之间。值越高表示性能越好，与100之间的间隙表示达到目标需要采取的距离。低于0分和高于100分的分数分别被解释为世界正在从现状开始恶化和超过目标水平。指标值根据公式1中的重新缩放公式进行归一化，

$$I_{ij} = \frac{x_i - w_i}{t_i - w_i} \quad (\text{公式1})$$

我在哪里  $i$  是指标  $i$  在目标  $j$ ， $x_i$  下计算出的归一化值吗  $i$  指标  $i$  在单一预测中的模型估计是  $w_i$  是2015年的基准年（Felix）值，和  $t_i$  是某一年的指标目标水平。然后，我们将标准化的指标值聚合为一个索引得分，以表示朝着每个可持续发展目标的全球进展（公式2），

$$I_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} I_{ij} \quad (\text{方程2})$$

其中我是可持续发展目标和  $N_j$  为目标  $j$  下的建模指标的数量。该指数及其方法采用于全球监测可持续发展目标进展的类似指标。<sup>33</sup> 我们使用算术平均值，并假设每个目标的指标权重相等，以配合全球努力，平等对待所有指标，并只在进展滞后时优先考虑指标。这也假定不太可能存在一个



就可可持续发展目标的指标优先事项达成共识。基于指标水平的标准化值和目标水平的综合指标，我们从四个水平衡量了世界向目标发展的进展。“步入正轨”表示很有可能实现（或超过）全球可持续发展目标的进展。e.，指标和目标水平的目标实现R 100%。“改善”表明了朝着目标和指标水平目标发展的积极趋势，但不太可能实现这些目标，因此挑战仍然存在。e.，目标实现率在50%到100%之间)。“停滞不前”表示表现遵循当前的趋势，实现目标的机会很少，并且仍然存在重大挑战(i. e.，目标实现率在0%到50%之间)。“恶化”表示一种逆转的趋势。e.，目标成就% 0%)。

#### 系统变化表征

我们描述了确保可持续发展目标长期进展的先决条件所需的系统变化的性质和规模，并讨论了它们未来面临的挑战和机遇。我们对最初在《全球可持续发展报告》中讨论的模型范围内的四个入口点指定了系统变化：<sup>35</sup> (1) 人类的福祉和能力，(2) 可持续的食品系统和健康的营养，(3) 能源转型和普遍获取，以及(4) 与环境影响脱钩的可持续经济。为了描述每个入口点中的系统变化，我们首先从模型输出中选择一个可以最好地表示每个系统及其相关入口点的变量。它们包括第一个入口点的总人口（十亿公顷）和没有/不完全教育的人口（比率）、耕地和牧场面积（十亿公顷）和陆地动物热量摄入量（千卡人<sup>-1</sup>天<sup>-1</sup>）的第二个切入点，能源需求(EJ年<sup>-1</sup>)和化石能源生产(EJ年<sup>-1</sup>)的第三个切入点，以及人均GWP(1万美元<sup>-1</sup>年<sup>-1</sup>)和大气CO<sub>2</sub>第四个入口点的排放量(ppm)。

其次，我们在2030年、2050年和2100年，根据参考路径与绿色恢复之间的距离，测量了每个选择的输出变量的变化尺度。考虑到未来的不确定性，我们测量了一个范围，包括两个路径之间的距离的平均值和一个标准差。值得注意的是，在所有的输出变量中(i. e.，系统变化)，取决于参考路径是什么，转向绿色恢复所需的变化规模可能会有所不同。这里的量化变化规模是基于与正常业务途径(SSP2-4.5)的偏差，而假设其他途径作为参考(e. g.，SSP3和SSP5)会导致更大的偏差。

为了确定系统变化的驱动因素，我们首先根据Felix的敏感性分析结果（见路径预测图），确定了可以驱动人口、教育、经济、土地、食品、能源和气候系统变化的高影响模型参数。其目标是找到最能预测系统变化的高影响参数的组合。这些高影响的组合（图S7A）是根据每个入口点下的系统变化的影响进行分类的（图S7B）。对于每个系统的变化及其与驱动因素之间的关系，我们根据之前在其他研究中已经确定的内容，定性地讨论了一些挑战和机遇。其目标是使我们能够更深入地理解我们的建模的可行性。

#### 补充信息

补充信息可以在<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.06.003>网站上找到。

#### 确认

B. A. B. 和E. A. M. 这项研究获得了伊恩·波特基金会和迪肯大学的资助。E. A. M. 也承认了来自4TU的资助。荷兰四所科技大学的HTSF实习项目。图形摘要由Ooid科学公司设计。图7、8、9和10中的图片分别由丹尼斯莱昂、道格·林斯泰特、内森·邓劳、注塔农、阿图尔图马斯詹、阮、金、路易斯里德、英格、玛丽亚卢潘、凯蒂罗德里格斯、梅里金枪鱼、埃尔万赫里、南杜库马尔、朱尔斯·布斯、詹尼斯·勃兰特、梅根·托马斯、梁杰英、安德斯、米歇尔·罗伯托·索林、易卜拉欣·博兰、马克斯·本德、杰西卡·帕普、帕特里克创作。

亨德利、马库斯·温克勒、凯尔·格伦、皮雷特·伊尔弗和乔治·埃文斯都在免费许可下工作。

#### 作者贡献

概念化，E. A. M.；方法，E. A. M.，S. E.，和L. G.；调查，E. A. M.，S. E.，L. G.，B. A. B.，M. H.，J. K.，P. M. R.，M. O. 和Z. G.；可视化，E. A. M.；写作-原稿，E. A. M.，B. A. B.，S. E.，和M. H.；写作-评论和编辑，E. A. M.，B. A. B.，S. E.，L. G.，M. H.，Q. L.，J. K.，P. M. R.，M. O. 和Z. G.

#### 利益声明

作者声明没有任何相互竞争的利益。

收稿日期：2021年8月11日

修订日期：2022年4月18日

接受：2022年6月14日

出版：2022年7月7日

#### 参考文献

1. un. (2015). 改变我们的世界：2030年可持续发展议程（联合国（UN））。  
[https://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E).
2. 联合国环境规划署(2019). 全球环境展望-GEO-6：健康地球，健康人（联合国环境规划署）。<https://www.unenvironment.org/zh/资源/全球环境展望-6>.
3. IPBES. (2019). 关于生物多样性和生态系统服务的政府间科学政策平台（IPBES）的关于生物多样性和生态系统服务的全球评估报告。  
<https://www.ipbes.net/global-assessment-report-biodiversity-ecosystem-services>.
4. 高和布莱恩. A. (2017). 寻找国家范围内土地部门可持续性的途径。自然544217. <https://doi.org/10.1038/nature21694>.
5. 2050年twi. (2018). 2050年的世界：实现可持续发展目标的转变（国际应用系统分析研究所（IIASA））。<https://previous.iiasa.ac.at/web/home/research/twi/Report2018.html>.
6. 奥伯斯坦纳，沃尔什，B.，弗兰克，S.，哈夫尔克，坎泰尔，M.，刘，宫殿，A.，埃雷罗，卢，Y.，莫斯尼耶，A.，以及其他(2016). 评估可持续发展目标之间的土地资源-粮食价格关系。科学。Adv. 2, e1501499. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501499>.
7. 泽格尔 B.，克里格勒，温德尔，我，劳纳，德尔纳克纳，A.，鲁 C.，霍夫曼，M.，鲍尔，伯特伦，C.，Bodirsky，B. L. 等人。(2021). 联合国2030年议程中气候行动的可持续发展途径。Nat. 客户端。改变11、656-664。  
<https://doi.org/10.1038/s41558-021-01098-3>.
8. 范维伦，D. P.，Zimm，C.，布希，克里格勒，莱宁格，梅斯纳，D.，纳基切诺维奇，罗克斯特罗姆，J.，里亚希，K.，斯珀林，F.，等人。(2022). 确定2030年和2050年的可持续发展目标空间。一个地球上5个，142-156个。  
<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.003>.
9. 普拉丹，科斯塔，雷布斯基，卢赫特，W.，和克罗普，J. P. (2017). 对可持续发展目标（SDG）相互作用的系统研究。地球的未来5, 1169-1179。  
<https://doi.org/10.1002/2017ef000632>.
10. 班达里，R.，莫阿莱米，E. A.，莱斯特，E.，唐尼盖尔语姓氏的英语形式 D.，和布莱恩，B. A. (2022). 优先确定可持续发展目标，确定互动，并确定当地可持续性的解决方案。环境。科学。政策127、325-336。  
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.09.016>.
11. 尼尔森，格里格斯博士和维斯贝克斯博士。(2016). 政策：绘制可持续发展目标之间的相互作用。自然534、320-322。  
<https://doi.org/10.1038/534320a>.
12. 兰德斯，罗克斯特罗姆，斯托克内斯，体育.，科尔斯特，D.，康奈尔大学。E.，和东，J. (2019). 在9个行星边界内实现17个可持续发展目标。一滴维持。2, e24. <https://doi.org/10.1017/sus.2019.22>.

13. 徐, Z., 赵, S. N., 陈, X., 张, J., 李, Y., 迪茨, T., 王, J., 温克勒, J. A., 范, 黄 B., 以及其他 (2020). 评估在空间和时间上实现可持续发展的进展情况。自然577, 74–78. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1846-3>.
14. 艾伦, 梅特涅特, 威德曼, T., 和佩德奇尼, M. (2019). 通过解决所有可持续发展目标, 澳大利亚将取得更大的进展, 但最后的步骤将是最具挑战性的。Nat. 维持. 2, 1041 – 1050. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0409-9>.
15. Moallemi, E. A., 马勒克普尔, 哈吉卡库, 雷文, 谢泰, 宁格鲁姆, D., Dhiaulhaq, A., 和布莱恩, B. A. (2020). 实现可持续发展目标需要地方规模的跨学科创新。一个地球3300–313. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.08.006>.
16. 莱克尔博士, 博士, 奥伯斯坦纳博士, 巴雷特博士, 布查特博士, 博士。H. M., 乔杜里, A., 德帕尔马 A., 德克, F. A. J., Di Marco, M., 多尔曼, J. C. M., Drauer, M., 等人。 (2020). 陆地生物多样性的弯曲曲线需要一个综合策略。自然585, 551–556. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2705-y>.
17. 罗杰尔杰, 波普, 卡尔文, K. V., 卢德尔, G., 埃默林, J., 格尔纳特, D. 藤森, S., 斯特雷弗勒, 长谷川, 马兰戈尼, G. 等。 (2018). 将全球平均气温上升幅度控制在以下的情景  
1.5 C. Nat. 客户端. 改变8325–332. <https://doi.org/10.1038/s41558018-0091-3>.
18. 萨米尔, K. C., 和卢茨, W. (2017). 共同社会经济途径的人类核心: 所有国家按年龄、性别和教育水平划分的人口情景到2100年的人口情景。一滴环境. 改变42, 181–192.
19. 斯特曼, J. D. (2001). 系统动力学建模: 在一个复杂的世界中学习的工具。加州. 管理发动机的旋转43, 8 – 25. <https://doi.org/10.2307/41166098>.
20. 埃克尔, S., 奥伯斯坦纳, M., 和里扎克, F. (2020). 充满经济环境的链接和集成dX/dt (Felix) (IIASA). <https://iiasa.ac.at/models-and-data/full-of-economic-environment-linkages-和-集成-dxdt>.
21. 佩德奇尼, 阿基特, 科尔斯特, D. 和赫伦。 (2019). 从可持续发展目标的互动中获得协同作用。过程Nat1. 阿卡德. 科学. 美国116, 23021. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817276116>
22. 里扎克, 奥伯斯坦纳, 克拉克斯纳, 弗里茨, S., 和麦卡勒姆, 我。 (2013). Felix3-在全球地球观测以外的跨社会效益领域的影响评估模型系统观点 (模型报告和技术文件) (国际应用系统分析研究所 (IIASA))。 <https://bit.ly/30cXwLQ>.
23. 沃尔什, B., 蔡斯, P., 詹森斯, 我。 A., 皮埃拉斯, 里亚希, 里扎克, 范维伦, D. P. 和奥伯斯坦纳, M. (2017). 平衡二氧化碳排放和下沉的途径。Nat. 通勤. 8, 14856. <https://doi.org/10.1038/ncomms14856>.
24. 埃克, 里斯, G. 和奥伯斯坦纳, M. (2019). 模拟了一种广泛转向可持续饮食的驱动因素。Nat. 维持. 2, 725 – 735. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0331-1>.
25. 里扎克, 奥伯斯坦纳和克拉克斯纳。 (2010). 全球地球观测系统的观点对整个GEOS社会效益领域的影响。Int. J. 痉挛. 数据基础设施. 物品5, 216 – 243.
26. O'Neill, B. C., 卡特, T. R., Ebi, K., 哈里森, P. A., 肯普-本尼迪克特, Kok, K., 克里格勒, E., 普雷斯顿, B. L., Riahi, K., 西尔曼, J., 等人。 (2020). 对气候变化情景框架所取得的成就和需求。Nat. 客户端. 改变10, 1074–1084. <https://doi.org/10.1038/s41558020-00952-0>.
27. O'Neill, B. C., Kriegl, E., Ebi, K. L., 肯普-本尼迪克特, E., Riahi, 罗斯曼, D. S. van Ruijven B. J., van Vuuren, D. P., 伯克曼, J., Kok, K., 等人。 (2017). 未来的道路: 对描述21世纪世界未来的共同社会经济路径的叙述。一滴环境. 改变42, 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
28. 范维伦, D. P., 埃德蒙兹, J., P., 里亚希, K., 汤姆森, A., 希巴德, K., 赫特, G. C., Kram, T., Krey, V., 拉马克, JF., 等。 (2011). 具有代表性的浓度途径: 一个概述。客户端. 改变109, 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.

808一个地球5, 792–811, 2022年7月15日

29. 里亚希, K., 范维伦, D. P., 克里格勒, E., 埃德蒙兹, J., 奥尼尔, B. C., 藤森, S., 鲍尔, N., 加尔文, 德林克, R., 弗里科, O. 等。(2017). 共享的社会经济途径及其能源、土地利用和温室气体排放的影响: 概述。一滴环境。改变42、153-168。  
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
30. Moallem, E. A., 高, 埃克, S. 和布莱恩, B. A. (2022). 分析全球变化情景和可持续性路径的多样化模式。一滴维持。5, e7. <https://doi.org/10.1017/sus.2022.7>
31. 贾克萨-罗森, M., 和特鲁特涅维特, E. (2021). 太阳能光伏技术在长期全球情景中的不确定性来源。Nat. 客户端。改变11、266-273。 <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00998-8>.
32. 藤森, S., 长谷川, T., 李亚日, K., 伯特伦, C., Bodirsky, B. L., 博塞蒂, veti, V., 卡伦, J., 德斯普雷, 多尔曼, J. 等。(2019). 关于缓解气候变化对粮食安全的影响的多模型评估。Nat. 维持。2, 386 - 396. <https://doi.org/10.1038/s41893-0190286-2>.
33. 萨克斯, 施密特-特劳布, 克罗尔, 拉万恩, 和富勒。  
(2019). 2019年可持续发展报告《贝塔斯曼基金会和可持续发展解决方案网络 (SDSN)》。 <https://www.sdindex.org/reports/sustainable-development-report-2019/>.
34. 亚历山大·罗维奇, 格林, R., 乔伊, E. J. M., Smith, 和Haines。  
(2016). 饮食变化对温室气体排放、土地利用、水利用和健康的影响: 系统回顾。PLoS11, e0165797. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165797>
35. GSDR. (2019). 《2019年全球可持续发展报告: 未来就是现在——实现可持续发展的科学》(联合国)。 <https://go.自然com/2jScAoW>.
36. 格尔斯, F. W. Sovacool, B. K., 施瓦宁, T., 和索雷尔, S. (2017). 深度脱碳的社会技术转型。科学357、1242-1244. <https://doi.org/10.1126/science.aao3760>.
37. 尼尔森, K. S., 斯特恩, P. C., 迪茨, T., 吉利根, J. M., van Vuuren, D. P., 菲格罗亚, M. J., 福尔克, C., 格沃兹兹, 伊瓦诺娃, D., 莱L. A., 以及其他  
(2020). 改进气候变化缓解分析: 一个审查可行性的框架。一个地球3325-336。  
<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.08.007>.
38. 陈志明, 陈志明, 爱德华多, 陈志明, 陈志明, 陈志明, Arneth, A., 巴尔瓦内拉, 布鲁曼·凯特, A., 但图表, 斯图尔特, H. M. 陈凯, M. A., 以及其他 (2019). 人类在地球上普遍驱动的生命衰落表明了变革的必要性。科学366, eaax3100. <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>.
39. 弗里德曼, 约克, 格雷茨, 沃伊辛斯基, 威斯南特, 海伊, S. I. 和Gakidou. (2020). 衡量和预测实现与教育有关的可持续发展目标的进展情况。自然580、636-639。 <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2198-8>.
40. 联合国教科文组织(2019). 论纳入之路: 儿童基金会和IIEP残疾全纳教育部门规划技术圆桌会议的重点(教科文组织IIEP和联合国儿童基金会)。 <https://unesdoc.联合国教科文组织.org/ark:/48223/pf0000372193>.
41. 基比德, E., 古洪, A., 和卢兹, W. (2019). 非洲生育率下降的停滞, 部分原因是女性教育的中断。过程Nat1. 阿卡德。科学。美国116. 8, 2891-2896。
42. 克鲁克, M. E., 仪表, A. D., 阿瑟诺 C., 乔丹, K., 莱斯利, H. H., 罗德德万, S., H., 巴克, P., 戴尔曼斯, B., B., 杜博瓦, S. V. 等人。  
(2018). 可持续发展目标时代的高质量卫生系统: 进行革命的时候了。《柳叶刀》杂志。健康6, e1196-e1252. [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(18\)30386-3](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(18)30386-3).
43. 克里斯特, 莫拉, C. 和恩格尔曼, R. (2017). 人口、粮食生产和生物多样性保护之间的相互作用。科学356、260-264。 <https://doi.org/10.1126/science.aal2011>.
44. 威利特, 罗克斯特姆, 洛肯, B., 斯普林曼, M., 朗, 维默伦, 加内特, 蒂尔曼, D., DeClerck, F., 伍德, A., 以及其他  
(2019). 人类世中的食物: 可持续食物系统健康饮食的柳叶刀委员会。柳叶刀393, 447-492。  
[https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(18)31788-4).



- 一个地球5792-811, 2022 809年7月15日

- 不确定性。软件145, 105177。  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105177>.
81. Hadjimichael, A., 奎因, 威尔逊, 里德, P., 巴斯德卡斯, 耶茨, D., 和加里森, M. (2020). 为制度上复杂的流域中不同利益相关者利益定义健壮性、脆弱性和结果情景。地球未来8, e2020EF001503。  
<https://doi.org/10.1029/2020ef001503>.
82. 霍尔兹, 西格尔, L. S., 约翰斯顿, E., 琼斯, A. P. 和斯特曼, J. (2018). 将气候暖限制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ -在减排和二氧化碳去除之间的权衡。环境。物品拉脱维亚的13, 064028. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac0c1>.
83. Moallemi, E. A., 贝尔托内, E., 埃克, S., 高, 高, 泰勒, N. 和布莱恩, B. A. (2021). 对地方可持续性的系统模型的回顾。环境。物品拉脱维亚的16, 113004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2f62>.
84. 佩德奇尼, 阿基特和陈. (2020). 2030年当天的综合模拟。西斯特。戴恩。发动机的旋转36, 333 - 357. <https://doi.org/10.1002/sdr.1665>
85. 迪卢西亚, 斯莱德, R和可汗. (2021). 理解可持续发展目标相互作用的方法的决策适用性。Nat. 维持. 5, 131 - 138. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00819-y>.
86. 绿色, K. C., 和阿姆斯特朗J. S. (2015). 简单与复杂的预测: 证据。J. 公共汽车. 物品68, 1678 - 1685. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2015.03.026>
87. 克洛斯特曼, R. E. (2012). 简单而复杂的模型。环境。普兰。B. 普兰。设计39, 1 - 6. <https://doi.org/10.1068/b38155>.
88. Moallemi, E. A., 何塞尼, S. H., Eker, S., 高, L., 伯托内, E., Szetey, K., 和布莱恩, B. A. (2022). 实现可持续发展目标 (SDG) 的协同效应和权衡需要以政策为重点的系统工具。在地球Xiv预印本。  
<https://doi.org/10.31223/X5P913>.
89. 范维伦, D. P., 拜耳, L., 楚瓦, C., 甘泽维尔德, 哈兹莱格尔, W., 范登赫克, B., 范诺耶, T., 奥尼尔, B., 和力量, B. J. (2012). 关于气候变化的综合观点: 地球系统与综合评估模型的耦合。环境。物品拉脱维亚的7, 024012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024012>.
90. 加尔文和邦德兰伯蒂. (2018). 综合人地系统建模-科学现状和未来发展方向。环境。物品拉脱维亚的13, 063006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac642>.
91. 梅塞利, P., 金, E. -M., Lutz, W., Moatti, JP. 理查森, 柴达姆, M., 史密斯, D., 福力, 福力, 格拉斯曼, A., 以及其他 (2019). 可持续发展目标需要扩大可持续发展科学。Nat. 维持2892-894。  
<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0394-z>.
92. Moallemi, E. A., 马勒克普, 南, 哈吉卡库, 乌鸦, 南, 斯凯特, 莫加达姆。M., 班达里, R., 莱斯特, R., 和布莱恩, B. A. (2019). 2030年可持续发展的地方议程。柳叶刀星球。健康3240-241。  
[https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(19\)30087-7](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(19)30087-7).
93. 范索斯特, H. L., van Vuuren, D. P., Hilaire, J., Minx, J. C., 哈姆森。J. H. M., Krey, V., Riahi, K., 卢德尔, G. (2019). 用综合评估模型分析可持续发展目标之间的相互作用。一滴运输. 1, 210 - 225. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2019.10.004>
94. Moallemi, E. A., 德Haan, F. J., 哈吉卡库, 哈塔米, 哈塔米, 马莱克普尔。S., Smajgl, A., 斯塔福德·史密斯, M., 沃伊诺夫, A., 班达里, 拉米奇汉, P. 以及其他 (2021). 评估共同创造可持续性路径的参与式建模方法。地球未来3, e2020EF001843。  
<https://doi.org/10.1029/2020EF001843>.
95. Szetey, K., Moallemi, E. A., 阿什顿, 布彻, 斯普伦特, B., 和布莱恩, B. A. (2021). 共同创造实现可持续发展目标的地方社会经济途径。维持。科学. 16, 1251 - 1268. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-00921-2>.
96. 诺斯特姆, O. V., Cvitanovic, C., Lf, M. O. F., 西部, 南州, 怀伯恩, C., 巴尔瓦纳拉, 贝德纳雷克, A. T., 贝内特, E. M., 比格斯, R., 德·布雷蒙德, A., 等人. (2020). 可持续性中知识协同生产的原则

810一个地球5, 792-811, 2022年7月15日

- 研究Nat. 维持。3, 182–190. <https://doi.org/10.1038/s41893-0190448-2>.
97. 查尔默斯, 吉宾斯, 格罗斯, 哈泽尔丁、赫斯顿斯托尔、克恩、马库森、皮尔森和温斯凯尔, M. (2013). 分析中国化学会的不确定性: 从历史类似物到英国未来的部署途径。能源收益37, 7668–7679. <https://doi.org/10.1016/j.egypro..2013.06.712>
98. Szetey, K., Moallemi, E. A., 阿什顿, 布彻, 斯普伦特, B., 和布莱恩, B. A. (2021). 以可持续发展目标为指导的地方可持续性的参与性规划。协议。社会26, 16. <https://doi.org/10.5751/ES-12566-260316>.
99. Mirdashtvan, M., Najafinejad, A., Malekian, A., 还有萨多丁, A. (2021). 半干旱地区可持续的水资源供需管理: 基于rcp情景优化水资源配置。水的共振。马纳格。35, 5307–5324. <https://doi.org/10.1007/s11269021-03004-0>.
100. 鲍瑞利, P., 罗宾逊, D. A., 潘纳戈斯, 卢加托, 东, 杨, J. 等。E., Alewell, C., Wuepper, D., 蒙塔纳雷拉, L., 和巴拉比奥, C. (2020). 土地利用和气候变化对全球水分对土壤侵蚀的影响 (2015–2070年)。过程Nat1. 阿卡德。科学。美国117, 21994–22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>.
101. 努涅斯、阿尔克梅德和利曼斯。(2020). 中亚草原潜在的生物多样性变化: 气候和土地利用变化的影响情景。注册。环境。改变20, 39. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01619-4>.
102. 沃尔什, B. J., Rydzak, 宫殿, A., 克拉克斯纳, 埃雷罗, M., 申克, P. M., Ciais, P., 詹森斯, 我, A., Peuelas, J., Niederl-Schmidinger, A., 和奥伯斯坦纳, M. (2015). 新的饲料来源是雄心勃勃的气候目标的关键。碳平衡管理。10, 26. <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0040-7>.
103. 草地, D. H., 梅多斯, D. L., 兰德斯, J., 和贝伦斯, W. W. (1972). 《增长的限制》, 第102页 (纽约: 波多马克协会-宇宙书籍), 第p页。27.
104. 编辑。(2022). 经济增长是否有限制? 是时候讨论50年的时间了。自然603, 361. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00723-1>.
105. 艾伦, 梅特涅特, G., 和威德曼, T. (2016). 可持续发展目标 (SDGs): 对情景建模工具的比较回顾。环境。科学。政策66、199–207. <https://doi.org/10.1016/j.envsci..2016.09.008>
106. 埃克, 齐默尔曼, 卡诺汉和戴维斯。(2018). 住房、能源和幸福相互作用的参与式系统动力学模型。构建。物品影响46, 738–754. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1362919>.
107. bp。(2020). 能源展望 (BP)。 <https://www.bp.全球、企业、能源经济、能源展望.html>.
108. IEA。(2021). 2021年世界能源展望 (IEA)。 <https://www.iea.2021年世界能源展望>。
109. un。(2005). 世界人口前景。在联合国秘书处经济和社会事务部人口司。 [un.org/wpp/](http://un.org/wpp/).
110. 麦迪逊。(2006). 关于世界人口、GDP和人均GDP的统计数据, 公元1–2008年 (格罗宁根大学)。 <http://www.ggd.net/MADDISON/oriindex.htm>.
111. 联合国开发计划署 (2020). 人类发展报告 (联合国开发计划署)。 <http://hdr.undp.org/en/data>.
112. IEA。(2007). 2007年关键世界能源统计数据 (IEA)。 <https://www.iea.2020年, 关键世界能源统计数据>。
113. IPH. 世界上各种经济活动的用水动态 (总计)。政府间水文方案 (IHP)。 <https://en.联合国教科文组织.org/themes/water-security/hydrology>
114. 全面精加工 (2022). 肥料的营养。 <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFN>.



115. 法斯塔特。(2020). 食物和土地利用数据。<http://www.fao.org/faostat/en/#home>.
116. 斯特曼, 菲德达曼, 弗兰克, 琼斯, 麦考利, 赖斯, 萨文, E. 和西格尔。(2012). 气候互动: 气候互动: c路气候政策模式。西斯特。戴恩。发动机的旋转28, 295 - 305. <https://doi.org/10.1002/sdr.1474>.
117. 二氧化碳信息分析中心(2008). 趋势: 全球变化数据纲要(二氧化碳信息分析中心, 橡树岭国家实验室, U. S. 能源部<https://cdiac.ess.llnl.gov/trends/trends.htm>.
118. 刻度。(2007). 地球上生命探索的交叉途径  
2010年生物多样性目标: 全球生物多样性展望的面向解决方案的方案2(生物多样性公约秘书处)。 <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-31.pdf>.
119. 高和布莱恩。A. (2016). 将深度不确定性纳入基本效应方法, 以进行稳健的全局灵敏度分析。协议。莫德尔321, 1 - 9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.10.016>
120. 罗杰尔杰, 辛德尔, D., 姜, 菲菲塔, S., 福斯特, 金兹堡, V., 汉达, C., 小林, 小林, 和克里格勒, E. (2018). 在可持续发展的背景下, 与1.5 C相兼容的缓解途径。全球变暖指数为1.5倍<sup>0</sup>政府间气候变化专门委员会能否特别报告全球变暖的影响为1.5<sup>0</sup>在加强全球应对气候变化威胁的背景下, (政府间气候变化专门委员会 (IPCC)) <https://www.ipcc.ch/report/sr15/>.
121. 国际应用系统分析协会(2018). SSP (共享的社会经济路径) 数据库 (国际应用系统分析研究所)。 <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>.