

抵御风暴： 科学如何通过适应提高全球气候抵御能力

概要

即便是能将全球气温升幅控制在 1.5°C 以内，适应气候变化的影响也同样至关重要。今天所感受到的全球升温已经对世界各地的社会和环境产生了严重影响。适应气候变化必须与减少温室气体排放实现净零排放同步进行。因为二者紧密相关。例如，精心修复自然生态系统有助于封存二氧化碳，而若无法减缓气候变化则将导致未来的适应成本增加。虽然减排已确立了明确的目标（到 2050 年实现净零

排放），但各国的适应目标各有不同，而且往往无证据依据，从而导致所需行动的规模和性质不够明确。成功的适应工作需要多种能力，从以科学为基础的模拟到当地社区储备的知识都要具备，而且还要采取从工程结构到基于自然的解决方案和混合方法等诸多类型的干预措施。本简报重点关注基础设施、基于自然的解决方案和模拟在适应气候变化影响方面的作用。

思路

- 即使采取最为严格的温室气体减排行动，适应工作也十分必要，而且适应成本也将随着气温的升高而增加。我们从研究中可以得出一条关键信息，现在是坚定适应决心和大力增加投资的关键时刻。
- 为了抵御气候变化，未来 20 年估计需要建设 94 万亿美元的基础设施，锁定可以最可靠地降低气候风险的投资，而科学研究和专业知识有助于这些工作的完成¹。
- 基于自然的解决方案 (NbS)（保护、恢复和可持续管理生态系统）可以保护社区和基础设施免受气候变化的影响，提高人类适应进一步变化的能力，并有助于减缓气候变化。
- 新一代气候和天气模型提供的当地气候影响相关信息将达到前所未有的精确程度。这些都有助于完善早期预警系统，而且可以纳入备灾和长期适应工作之中。为了改善预报的初始条件，并为预报和模型预测提供“地面真实值”，必须对现场观测平台进行投资。
- 在估计目前尚未准确量化的跨尺度适应成本以及评估替代适应战略的效力方面，新一代模型和跨学科研究同样发挥着举足轻重的作用²。
- 适应项目可以带来多方面的共赢，还可以在实现可持续发展目标方面取得进展³。深入研究将有助于实现适应工作优势的最大化。
- 根据联合国的要求，气候资金总额的 50% 应用于建设复原力和适应全球变暖的影响⁴。

1. 气候变化与适应

气候适应可以减少对气候灾害的暴露和敏感性，从而最大限度降低世界各地社会的脆弱性。

即便是实现了《巴黎协定》的目标，对于最大限度减少气候变化的影响而言，适应同样至关重要。例如，即使气温上升 1.5°C，本世纪也可能有超过 5 亿人面临威胁生命的高温条件，导致大规模流离失所⁵。目前，根据目前的气候缓解承诺，预计到本世纪末，全球升温将超过 3°C⁶。这种影响已经凸显出来，据报道，世界许多地区因气候和天气相关的灾害而发生大规模流离失所⁷。我们要创建具有复原力的社区，让人们可以居有定所繁衍生息，对此，科学稳健的适应战略尤为关键。

气候适应和气候抵御能力是什么？适应的常用定义是，为了响应气候刺激及其影响（或者在预期气候刺激及其影响的情况下）而对生态、社会、基础设施或经济系统进行的调整⁸。从本质上讲，适应是指有助于我们应对气候变化所产生的不可避免的影响而实施的战略以及启动的项目。适应策略在不同的地方表现形式各有不同；在某些地区适用的策略在其他地区则可能行不通。成功的适应工作可以建立抵御气候影响的能力。抵御能力这条术语用于描述应对不良冲击和压力的能力，包括预测、承受、应对以及从气候影响中恢复的能力⁹。

减少对气候灾害的暴露和敏感性，提高社区主动适应不断变化的气候风险的能力，从这些方面着手开展适应工作，有助于最大限度地降低世界各地社会的脆弱性。目前已经开始了适应工作：联合国报告称，近四分之三的国家已经制定了一些适应计划⁸。然而，为适应战略的筹资和实施远远达不到产生积极变化所需的水平¹⁰。在持续努力制定和实施有效、适合的当地适应战略过程中，自然与社会科学，以及工程学发挥着关键作用。

现在是时候采取行动了。气候变化已影响到了世界各地的社区和环境。这些影响还会随着气候变化的进展而恶化。

1.1 适应与科学的作用

适应工作可以采用各种各样的方法。具体方法通常包括在沿海干旱频发地区建立海水淡化厂等与基础设施相关的措施、天气预报等数据收集和模拟工作，以及利用自然系统来应对社会挑战，例如恢复和保护天然的洪水防御屏障红树林（统称为基于自然的解决方案）。这些方法的每一种都结合了自然科学、社会科学与工程科学。

这些技术方法与更为广泛的抵御能力建设战略可以实现最佳结合。例如，改善极端天气预报需要稳健的社区响应计划，将风险预警转化为有意义的实际行动。同样，对于工程结构，也越来越多地辅以在更为系统的水平上提高社区和生态系统适应能力的措施，从而有助于减少社区的脆弱性。这方面的例子包括提高农业抵御能力（通过耕种抗旱作物、丰富作物和牲畜的种类以及节水灌溉），以及通过经济多样化降低民生的脆弱性。跨学科研究有助于开发适当的适应系统，将其有效地融入到社区中。

适应气候变化的解决方案可以带来多重共同优势，包括在实现联合国可持续发展目标 (SOD) 方面取得进展。跨学科研究的重要意义还体现在有助于确定适应策略的共同利益和权衡交易，从而优化设计与实施。



研究可以在许多方面推动适应过程。具体包括对良好典范、发展与实施的研究；建立天气和气候模型，预测未来风险，提供灾害早期预警，并评估不同适应战略的成本和效力；在不确定的情况下做出决策的工具；衡量绩效的标准；以及对共同利益和权衡交易的整体评估。同时，还必须结合当地知识进行研究，因地制宜，制定有效适当的适应战略。

在获得科学指导情况下而采取的适应措施中，威尼斯的 MOSE 防洪屏障¹¹和孟加拉国的飓风抵御计划¹²这两个项目备受瞩目。后者配合改进的数值天气预测系统，大大减少了孟加拉国飓风造成的死亡人数，1970 年的飓风博拉 (Bhola) 造成了 30 万人死亡，而 2020 年的飓风安潘 (Amphan) 造成的死亡人数则不到 30 人¹³。孟加拉国通过教育宣传以及利用志愿者，将信息系统和基础设施与建立社区适应能力的工作进行了整合¹⁴。

上图
孟加拉国库尔纳区 – 飓风安潘引发的洪水。
© HABIBUR RAHMAN。

2. 基于证据的适应工作取得进展的机会

尤为重要的一点是对现有基础设施进行保护和升级，这样也可以在最大限度上减少气候影响的破坏。

跨学科研究潜力十足，可能在适应工作的逐步改变中，起到具体而实质性的推动作用。本文主要介绍了三大主要领域：气候适应性基础设施；基于自然的解决方案；模拟地球系统。NbS 和基础设施均可以直接限制气候变化对社区的影响，而模拟当地条件可以为适应战略的设计提供参考，评估计划适应方案的效力，还可以发布气候灾害的预警。

2.1 具备气候抵御能力的基础设施

基础设施是保证社会运作的基础。基于基础设施的适应战略是降低社会对气候变化脆弱性的基石。为具备气候抵御能力的基础设施提供管理和规划支持的专业知识和技术取得了长足的发展，目前已经可以大力协助公营和私营部门进行决策。

据估计，到2040年，全球大约需要94万亿美元的基础设施投资，包括能源和运输资产，而这些对于实现净零未来都至关重要¹。根据全球气候适应委员会 (Global Commission on Adaptation) 2019 年的建议，由于现在所做出的选择会在未来几十年锁定脆弱性，抵御气候的能力建设需要从一开始就纳入新的投资规划。

与此同时，尤为重要的一点是对现有基础设施进行保护和升级，这样也可以在最大限度上减少气候影响的破坏，而且，对于许多领域而言，这往往是切实减少气候风险暴露与敏感性最可行的方法。例如，荷兰已有几乎三分之一的陆地表面低于海平面，荷兰防洪计划 (Dutch Flood Protection Plan) 希望通过投资和升级三角洲工程减轻海平面上升的影响，而这项三角洲工程便是世界上最大的防洪基础设施网络¹⁵。同样，加勒比地区实施了保护电网策略，通过选择性地将能源输电线进行地下接地、加强地上电线杆以及分布式发电，这一战略将降低社会对飓风的敏感性^{16, 17}。

低收入和中等收入国家遭受的一些气候影响十分严重，基础设施中断所造成的损失估计已高达每年 3900 亿美元，所以，一项尤为突出的重点工作就是保护和升级低收入和中等收入国家的基础设施。在这类国家进行谨慎的基础设施投资，每投资 1 美元便可产生 4 美元的净收益，从而避免未来成本¹⁸。模拟有助于更好地了解未来的气候风险，评估计划中的基础设施改进在建设抵御灾害能力方面的效果，从而支持此类投资决策的制定（第 2.3 节）。基础设施的适应工作还需要通过设计可以减少能源足迹的新型建筑和升级建筑来解决减排问题。

气候适应行动的重点工作包括绘制城市等区域的地图，指明容易受到当前和预期未来极端事件影响的地点，以及基础设施的所在位置或计划所在位置。这样才能针对性地对现有结构设计适应措施，并在新建筑中纳入气候变化因素。同样重要的一点是，了解相互作用风险的潜在级联影响，例如变电站洪水泛滥会导致通信网络故障。

近年来，抗灾能力相关数据取得了迅猛发展，包括先进的洪水风险模拟¹⁹；OpenStreetMap 等全球基础设施数据库²⁰；以及全球洪水伙伴关系组织 (Global Flood Partnership) 等专家社区²¹。例如，为了确定地球上所有地点运输网络的风险，牛津大学 (University of Oxford) 和世界银行 (World Bank) 的科学家将超过 5000 万公里交通网络数据的大数据分析与全球气候灾害数据进行了结合²²。这种类型的分析有助于政府和发展组织有针对性地采取适应行动。

2.2 基于自然的解决方案

基于自然的解决方案 (NbS) 需要与自然合作，共同应对社会挑战。具体包括保护、恢复和可持续性管理森林、湿地和沿海生境等自然生态系统，可持续管理农地，以及利用城市中的自然过程。越来越多的政策制定者认识到，NbS 可以实现多种政策效益，因此便越来越多地采用 NbS²³。

NbS 可以根据地方知识和专业知识以及跨学科研究，在地方层面建立气候抵御能力²⁴。例如，在城市地区，增加绿地可以减少城市热岛效应，可以改善排水系统，将洪灾风险降至最低，造福人类，与此同时，研究发现一些灌木物种可以减少颗粒物空气污染^{25, 26}。同样，研究发现，在墨西哥湾沿岸的孟加拉国和美国，恢复的牡蛎养殖场可以降低海浪高度、减少侵蚀、促进沿海生态系统扩张、保护生物多样性、支持当地人民的生计，从而提高沿海保护力度²⁷。这类战略可以最大限度地减少直

接接触气候危害的可能，但也可能有助于实现人民生计的多样化（保证财政和营养安全），同时还能增强社区应对快速变化的适应能力，进而降低对气候冲击的敏感性²⁸。

NbS 可以与基础设施配合使用，作为一种混合气候适应方法。例如，爪哇的 EcoShape（一个由企业、研究人员和非政府组织组成的联盟，专注于水利工程与自然的联合）与政府合作，以一种以社区为导向的方法，利用工程和水管理的独特结合，恢复受到侵蚀的红树林海岸。该项目正在建造透水的竹坝，通过捕获沉积物来减弱海浪并提高海拔，同时修复水产养殖池塘，进而改善生物多样性、增加鱼类资源，并提供其他收入来源²⁹。同样，在美国新泽西州的霍博肯，在遭受到飓风桑迪的袭击后，实施了“设计重建”项目，目前，该项目已提出混合组合硬、软、绿色基础设施，抵御洪水和风暴潮的影响³⁰。

下图：
热带浅水域的红树林。
© apomares。



基于自然的解决方案可以根据地方知识和专业知识以及跨学科研究，在地方层面建立气候抵御能力。

NbS 在多个方面都可谓有百利而无一害，包括生计、地方经济、生物多样性，以及一系列SDG（可持续发展目标）的实现。而且，NbS还有助于减缓气候变化。然而，要释放这些共同利益并避免权衡交易，需要仔细进行设计和实现。NbS 的核心是必须由当地社区（或与当地社区共同）设计、实施和管理，利用和保护当地生态系统，从而满足当地需求。这种战略的长期效力取决于对社区的适当管理、治理和赋权³¹（参见简报 9：气候变化与土地）。

2.3 模拟地球系统

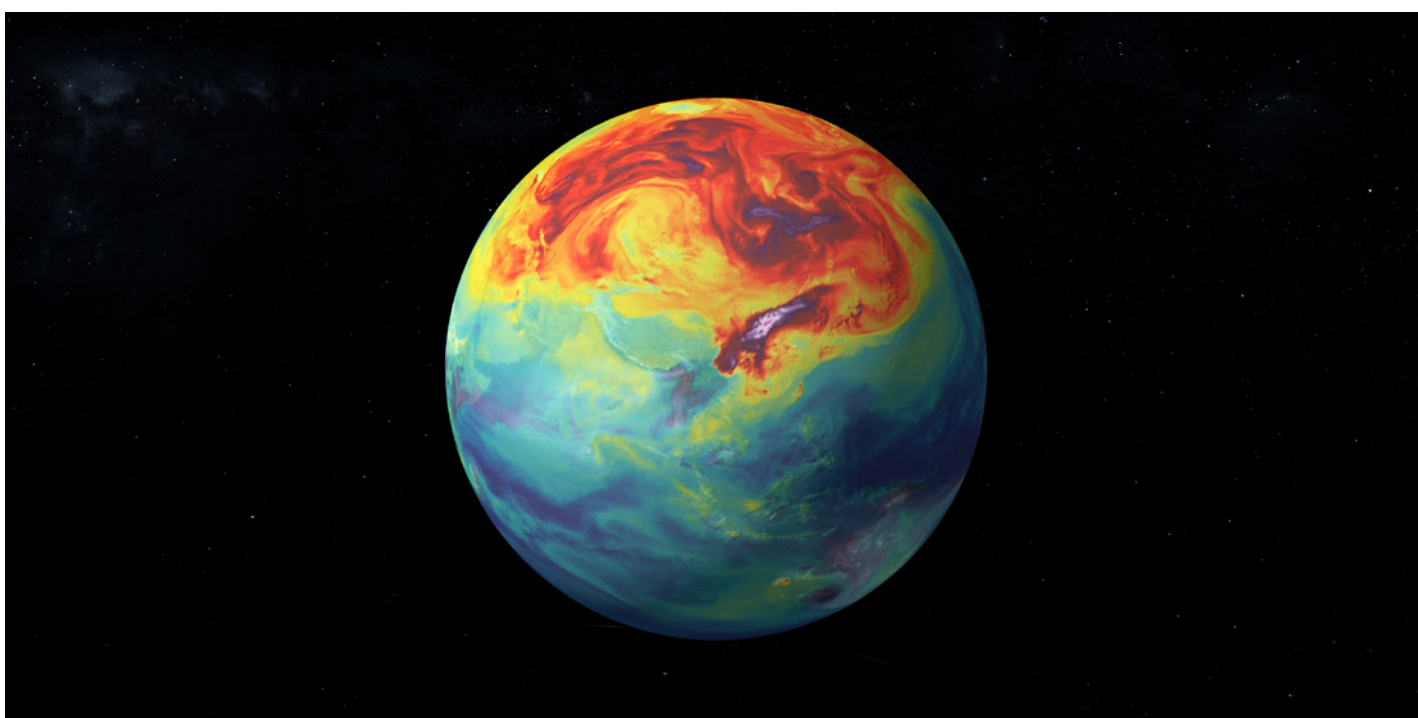
模拟地球系统对于气候适应工作的支持形式表现在三方面：通过气候风险评估（量化灾害发生的概率及潜在影响）；对临近的危险提供早期预警，以便能够迅速作出反应；通过评估替代适应策略的有效性，为设计和实施提供信息。至于这几个方面在支持气候适应战略方面的具体有效性则取决于模型的准确性，以及呈现及估计预报及预测中不确定性的能力。模型

必须配以实地测量和遥感的实际观测数据加以补充：这些数据既可以为早期预警系统提供初始条件，也可以为评估预报及预测可靠性和结果提供“地面真实值”。

目前一代的气候模式存在一大不足，即由于空间分辨率不足，无法准确呈现极端天气和气候。如果将这些模型的空间分辨率（包括海洋、陆地和大气过程的信息）（从目前的 10 公里或以上）提高到 1 公里左右，便可以实现物理定律在更加精细的尺度上进行应用，从而可以大大提高可靠性和概率预报结果^{32, 33}。新一代百万兆级计算机将有可能实现分辨率更高的模拟，专门用于天气和气候模拟，每秒可进行 10^{18} （或十亿乘十亿）计算³⁴（参见简报 1：新一代气候模型）。高分辨率气候模型目前已在欧盟的“目的地地球”项目等计划中初具雏形³⁵，这个项目旨在开发一个超高分辨率的地球数字模型，并将物理过程和社会经济数据融入其中（参见简报 2：净零计算）。

下图：

地球二氧化碳排放
直观图。© janiecbros。



采用模拟地球系统的方法，可以融入更加详细的海洋、大气、生物圈、陆地和生物地球化学过程，这样便可进一步改进气候风险评估以及对临近灾害及其影响的预测。机器学习和人工智能方法可以在气候模型中以计算有效的方式表示地球系统过程³⁶。对于将模型输出缩小到 1 公里范围内的尺度而言，AI（人工智能）同样必不可少³²。

对模型预测中的不确定性做出可靠估计，对于决策的制定至关重要。集成学习方法是量化不确定性的核心。在集成学习方法中，会多次运行气候模型，用随机噪声扰动不确定的初始条件和模型过程³⁷。例如，救灾机构已经开始越来越多地使用基于此类集成学习的概率触发器为预防行动提供信息（参见专栏 1）。

要提高模型的可靠性和准确性，必须在全球范围内开展合作；物理定律在世界各地都是一成不变的。除此之外，必须在全球范围共享数据。建立数据共享和国际协作系统不仅可以改善模型产出的实际情况，而且还可以为没有能力模拟自己风险的国家提供支持。

专栏 1

基于影响的预测

在“基于影响的预测”领域，先进的气候和天气模型开始越来越多地与其他模型和数据（例如卫生和经济模型以及人口数据）进行结合，例如，这种预测不会简单地预报一般地区会有大雨，而是预报某条河流 30 米内会出现洪水，导致特定估计数量的人流离失所⁴⁴。这有助于针对性地为所需地区提供人道主义援助。在这一领域中有一项倡议计划，提出要建立基于预测的筹资机制，根据计划规定，需要实现商定为某个地点的行动提供人道主义资金，并在超过给定的概率阈值时触发该项资金⁴⁵。例如，2020 年 7 月 4 日，欧盟委员会的全球洪水预警系统（Global Flood Awareness System）预测，孟加拉国发生严重洪水的可能性很大，这一预测触发了联合国中央应急基金（CERF），发放了 520 万美元的援助基金，包括现金、牲畜饲料、储存桶和卫生工具包。这是首次在洪峰发生之前进行基金分配。最终，这次预先行动让 20 万人受益其中⁴⁶。至于这类方法的有效性，则取决于不同模型和数据的整合、对不确定性的量化以及与地方政府和援助机构的

将气候模型的空间分辨率提高到 1 公里左右将显著提高其可靠性和概率结果。

3. 研发重点工作

在建立气候抵御能力的基础设施和 NbS 相关气候适应方面，以及为了更加深入地了解气候风险，进而更好地为气候适应战略提供信息而进行模拟方面，存在大量的机会。而要充分利用这些机会，只有通过进一步的研究和开发才能完全实现。

要充分发挥气候与天气预报模拟技术的全部潜力，一种可行的方法就是创建一个专门的国际百万兆级计算设施，即“气候变化 CERN”，可以让世界各国汇集人力和计算资源，实现任何一个国家都无法独立实现的目标³³（参见简报 1：新一代气候模型）。为了了解未来的极端气候，一种实用的方法就是开发一个地球及其系统的数字孪生系统，而且在天气尺度上与真实的气候系统难以区分。要进行这种创新，需要与实地行动相结合，才能确保正确传达预测并采取行动。

目前，基于自然的解决方案已经在减少气候影响方面表现出了优势，但仍有必要探索其带来更广泛的社会经济和生态效益的时间框架和空间尺度³⁸。此外，还必须更深入地了解 and 规划 NbS 生态系统对气候变化影响的抵御能力。对于发展中国家 NbS 的有效性，目前尚缺乏证据；加强证据基础对于建立全世界脆弱社区抵御能力而言至关重要。最后，探索 NbS 与工程结构进行配合的多种方式，有助于在当地范围内设计出新的气候适应方法。

目前，基础设施系统风险评估科学的发展已走向成熟，足以将专业知识汇集到一个全球地理空间计算设施中，绘制风险和预见适应反应。在全球范围内使用这种设施，可以为政府、公用事业运营商、投资者和保险公司的决策者提供所需信息，增强基础设施系统抵御气候影响的能力。

人们普遍认为，目前在适应气候变化方面工作的支出太少。

对于重新启动的工作而言，研究也可以发挥重大作用，有助于了解气候适应解决方案所需的成本，为投资提供依据。例如，模拟有助于预测未来气候影响的成本，而且，在基础设施和 NbS 方面专家的配合下，有助于对各种不同的气候适应方案进行评估。然而，由于很难实现对适应气候变化资金需求的量化，了解投资必要与否实属困难。许多国家都在努力进行评估，估计其脆弱性以及当地的气候适应需求³⁹。此外，必要投资的评估工作需要在世界各地开展多种规模的适应活动，其中部分活动已“转入”基础设施投资等其他预算。最后，虽然减排措施现在已经明确了净零排放的目标，但对于气候适应行动的“恰当”数量，并没有确立明确的目标，因此没有进行成本估计的参照点。

人们普遍认为，目前在适应气候变化方面工作的支出太少。2018 年，在为发展中国家筹集的近 800 亿美元气候资金中，气候适应专项项目的占比仅为 20% 左右⁴⁰。为了满足全球气候适应需求，特别是低收入国家的气候适应需求，已有提议建议，将捐助方和多边银行相当于当前减排支出 25-100% 的投资用于气候适应战略^{4, 41}。

至关重要的一点是，要汇集研究人员、组织、社区和政府的专业知识和经验，共同确定脆弱性和研究需求，以及设计、成本和实施有效的气候适应战略。协调统一计划倡议、利益相关方以及研究活动，还有助于利用共同利益，最

大限度地减少气候适应措施的权衡交易，更好地协调气候适应和减排战略⁴²。例如，精心设计河流修复项目可以最大限度降低洪水风险，提高农业产量，同时还能实现碳的封存⁴³。

4. 总结

在应对气候变化的行动中，必须将气候适应工作作为核心要素，确立明确的目标和研究目标，保障全球人民安全，免受气候变化带来的影响。在未来基础设施的设计与 NbS 气候适应战略中，必须引入弹性思维，利用跨尺度跨学科的研究和高级模拟作为支持。为了做好对最脆弱社区的保护工作，需要在全球范围内对

现有基础设施进行投资升级，确定适当的 NbS 和混合系统，并推进和整合模拟工作。本简报中所涉及的领域并非相互独立；先进的模拟、工程和 NbS 可以在设计和应用上相互补充。要最大限度充分发挥全球气候适应战略的诸多好处，必须进行协调、合作和跨学科研究。

本简报只是探讨科学技术在全球实现净零排放和适应气候变化中作用的系列简报中的一篇。世界各国都在制定各自在 2050 年之前实现净零的路线图，该系列简报旨在就科学所能有助于理解和采取行动的 12 个方面，为各国决策者献计献策。

要观看完整系列内容，请访问 royalsociety.org/climate-science-solutions

要查看简报编著人，请访问 royalsociety.org/climate-solutions-contributors

本文中的文本根据《创作共用署名许可协议》(Creative Commons Attribution License) 条款授权使用，该协议允许在注明原作者和出处来源的前提下，进行无限制使用。许可协议访问网址：creativecommons.org/licenses/by/4.0 图片不在本许可授权范围内。

发布日期：2021 年 6 月 DES7639_8 © The Royal Society

参考文献

1. Global Infrastructure Hub and Oxford Economics. 2017. Global Infrastructure Outlook. 参见: <https://outlook.gihub.org/>
2. Watkiss P *et al.* 2015 The costs and benefits of adaptation: results from the ECONADAPT project. Policy report. (doi:10.13140/RG.2.1.2061.7443)
3. Climate Adaptation Summit. 2021 Delivering an Adaptation Action Agenda. 参见: <https://www.cas2021.com/climate-adaptation/documents/publications/2020/12/12/delivering-an-adaptation-action-agenda>
4. United Nations. 2021 António Guterres: 50% of All Climate Finance Needed for Adaptation. 参见: <https://unfccc.int/news/antonio-guterres-50-of-all-climate-finance-needed-for-adaptation>
5. Li D, Yuan J, Kopp RE. 2020 Escalating global exposure to compound heat-humidity extremes with warming. *Environ. Res. Lett.* 15, 064003. (doi:10.1088/1748-9326/ab7d04)
6. United Nations Environment Programme. 2020 Emissions Gap Report 2020. 参见: <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>
7. International Organization for Migration. 2019 World Migration Report 2020. Geneva. 参见: https://publications.iom.int/system/files/pdf/wmr_2020.pdf
8. United Nations. 2021 What do adaptation to climate change and climate resilience mean?. 参见: <https://unfccc.int/topics/adaptation-and-resilience/the-big-picture/what-do-adaptation-to-climate-change-and-climate-resilience-mean>
9. Environmental and Energy Study Institute. No date. Resilience and Adaptation. 参见: <https://www.eesi.org/topics/adaptation-resilience/description>
10. United Nations Environment Programme. 2021 Adaptation Gap Report 2020. Nairobi. 参见: <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2020>
11. MOSE. 2021 MOSE System: The mobile barriers for the protection of Venice from high tides. 参见: <https://www.mosevenezia.eu/project/?lang=en>
12. Ahmed B, Kelman I, Fehr H, Saha M. 2016 Community Resilience to Cyclone Disasters in Coastal Bangladesh. *Sustainability* 8, 805. (doi:10.3390/su8080805)
13. Islam, T *et al.* 2021 Revisiting disaster preparedness in coastal communities since 1970s in Bangladesh with an emphasis on the case of tropical cyclone Amphan in May 2020. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 58 (<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102175>).
14. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf
15. Jonkman SN, Voortman HG, Klerk WJ, van Vuren S. 2018 Developments in the management of flood defences and hydraulic infrastructure in the Netherlands. *Structure and Infrastructure Engineering.* 14(7):895-910.
16. Der Sarkissian R *et al.* 2021 Evaluating the Implementation of the "Build-Back-Better" Concept for Critical Infrastructure Systems: Lessons from Saint-Martin's Island Following Hurricane Irma. *Sustainability.* 12;13(6):3133
17. The Government of the United States Virgin Islands. U.S Virgin Islands will have a much stronger power grid. 参见: <https://www.vi.gov/u-s-virgin-islands-will-have-a-much-stronger-power-grid/>
18. Hallegatte S, Rentschler J, Rozenberg J. 2019 Lifelines: the resilient infrastructure opportunity. The World Bank. Washington DC.
19. Fathom Global. No date. Fathom-Global 2.0 A step-change in your ability to understand global flood risk. 参见: <https://www.fathom.global/fathom-global>
20. OpenStreetMap contributors. 2021 OpenStreetMap. 参见: <https://www.openstreetmap.org>
21. European Commission. 2021 Global Flood Partnership. 参见: <https://gfp.jrc.ec.europa.eu/>
22. Koks EE, Rozenberg J, Zorn C, Tariverdi M, Vousdoukas M, Fraser SA, Hall JW, Hallegatte S. 2019 A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets. *Nat Commun* 10. (doi:10.1038/s41467-019-10442-3)
23. Chausson A *et al.* 2020 Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. *Glob Change Biol* 26, 6134–6155. (doi:10.1111/gcb.15310)
24. Seddon N, Smith A, Smith P, Key I, Chausson A, Girardin C, House J, Srivastava S, Turner B. 2021 Getting the message right on nature-based solutions to climate change. *Glob. Change Biol.* 27, 1518–1546. (doi:10.1111/gcb.15513)
25. Alves A, Gersonius B, Kapelan Z, Vojinovic Z, Sanchez A. 2019 Assessing the Co-Benefits of green-blue-grey infrastructure for sustainable urban flood risk management. *Journal of Environmental Management* 239, 244–254. (doi:10.1016/j.jenvman.2019.03.036)
26. Blanuša T, Qadir ZJ, Kaur A, Hadley J, Gush MB. 2020 Evaluating the Effectiveness of Urban Hedges as Air Pollution Barriers: Importance of Sampling Method, Species Characteristics and Site Location. *Environments* 7, 81. (doi:10.3390/environments7100081)
27. University of Oxford Nature-based Solutions Initiative. 2020 Oyster reefs in Bangladesh and the Gulf of Mexico. 参见: <https://www.naturebasedsolutionsinitiative.org/news/oyster-reefs-in-bangladesh-and-the-gulf-of-mexico/>
28. Seddon N, Chausson A, Berry P, Girardin CAJ, Smith A, Turner B. 2020 Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Phil. Trans. R. Soc. B* 375, 20190120. (doi:10.1098/rstb.2019.0120)
29. Tonneijck H, Winterwerp H, Weesenbeeck B, Bosma RH, Debrot AO, Rusila NY, Wilms T. 2015 Building with Nature Indonesia: securing eroding delta coastlines: Design and Engineering Plan. 参见: <https://www.wetlands.org/publications/building-with-nature-indonesia-design-and-engineering-plan/>
30. Rebuild by Design. Hurricane Sandy Design Competition. 参见: <http://www.rebuildbydesign.org/our-work/sandy-projects>
31. Seddon N *et al.* 2020 Global recognition of the importance of nature-based solutions to the impacts of climate change. *Glob. Sustain.* 3. (doi:10.1017/sus.2020.8)
32. Palmer, T.N., 2020: A vision for numerical weather prediction in 2030. arXiv:2007.04830. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2007/2007.04830.pdf>
33. Palmer T, Stevens B. 2019 The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proc Natl Acad Sci USA.* 116(49): 24390-5 (doi:10.1073/pnas.1906691116)

34. Neumann P *et al.* 2019 Assessing the scales in numerical weather and climate predictions: will exascale be the rescue? *Phil. Trans. R. Soc. A.* 377, 20180148. (doi:10.1098/rsta.2018.0148)
35. European Commission. 2021 Destination Earth (DestinE). 参见: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/destination-earth-destine>
36. Chantry M *et al.* 2021 Opportunities and challenges for machine learning in weather and climate modelling: hard, medium and soft AI. *Phil. Trans. R. Soc. A* 379, 20200083 (doi: doi.org/10.1098/rsta.2020.0083)
37. Palmer, T. 2000 Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate. *Rep. Prog. Phys.* 63 71. (doi:10.1088/0034-4885/63/2/201)
38. Chausson A *et al.* 2020 Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. *Glob Change Biol* 26, 6134–6155. (doi:10.1111/gcb.15310)
39. African Development Bank. 2019 Analysis of Adaptation Components of Africa's Nationally Determined Contributions (NDCs). 参见: https://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Generic-Documents/Analysis_of_Adaptation_Components_in_African_NDCs_2019.pdf
40. OECD. 2020 Climate Finance Provided and Mobilised by Developed Countries in 2013-18. OECD. (doi:10.1787/f0773d55-en)
41. Palmer T. 2020 Resilience in the developing world benefits everyone. *Nat. Clim. Chang.* 10, 794–795. (doi:10.1038/s41558-020-0888-8)
42. Raymond, C *et al.* 2017 A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Env. Sci. Pol.* 77, 15-24 (<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.008>)
43. Vermaat, J *et al.* 2016 Assessing the societal benefits of river restoration using the ecosystem services approach. *Hydrobiologia* 769, 121-135 (<https://doi.org/10.1007/s10750-015-2482-z>)
44. Forecast based financing. 2020 The Future of Forecasts: Impact-based forecasting for early action. 参见: <https://www.forecast-based-financing.org/wp-content/uploads/2020/09/Impact-based-forecasting-guide-2020.pdf>
45. Forecast based financing. No date. What is Forecast-based Financing? 参见: <https://www.forecast-based-financing.org/about/>
46. United Nations, 2020 Anticipatory action in Bangladesh before peak monsoon flooding. 参见: <https://www.un.org/en/delegate/anticipatory-action-bangladesh-peak-monsoon-flooding>