

引领全球应对气候变化：中国对策

施南德 (Kevin Sneader)

麦肯锡公司董事长兼全球总裁

概述

新冠疫情肆虐全球，严重威胁着人们的生命和生活。值此艰难时刻，我们更应谨记疫情带来的更宏大的启示——在袭击人类的新冠病毒背后，潜伏着一个更大的威胁：气候变化。疫情来势汹汹，却是不可持续的；气候变化的风险却是长期的、累积的。这意味着全球气候危机的持续时间与破坏力可能将远远超过此次疫情。与此同时，我们对疫情的应对又在很大程度上决定了可持续发展能否实现，以及如何实现。在全球市场遭受供需双重冲击的特殊时期，着眼于可持续发展，增强韧性，应当成为，且必须成为提振经济、保障民生的有机组成部分。

一万年以来，地球的气候一直保持着相对稳定，但近几个世纪却发生了显著变化。19世纪80年代以来，全球平均气温已上升约1.1摄氏度¹。气候科学家发现，全球所有国家的年均气温在此期间几乎均有升高。例如1980年之前，北半球夏季急剧升温的地区占比尚不足1%，到2015年已增至15%²。未来，受气候变化影响的地区范围将更广。

随着平均气温逐渐升高，热浪、洪水等“急性”自然灾害将日益频繁；干旱、海平面上升等“慢性”自然灾害也将不断加剧。只要人类还在向大气释放二氧化碳等长寿命温室气体，气候变化引发的自然风险就会持续增加。在历史排放以及地球物理系统热惯性的作用下，全球变暖已到了“积重难返”的程度，未来十年自然灾害的发生概率必将上升。

受此影响，中国将变得更加炎热和潮湿。如果排放量继续维持目前的增速³，未来可能会有1000万~4500万人遭受极端高温和致命热浪的侵袭。类似于1980年“五十年一遇”的强降水概率也会迅速上升，到2030年将增长2~3倍，到2050年将增长3~6倍。

为了稳定气候、防止有形风险的扩大，国际社会需要迅速减少温室气体排放，最终实现“净零排放”。虽然发展低碳经济将引发转型风险，比如某些企业的资产或将骤然减值，但社会拖延减排的时间越长，累积的风险就越大。然而，从另一方面来看，低碳转型对率先开始规划和投资的企业而言意味着巨大的机遇。

中国正在积极应对气候风险，探索气候变化机遇。其气候变化适应议程涵盖了适应性基础设施建设、灾害预警、应急救援计划以及其他措施。中国可再生能源投资已连续七年位居全球第一，风能和太阳能发电装机容量全球居首，能源密集型行业的碳强度也有显著降低。

长期来看，快速且有序地推进减排，可有效控制气候变化带来的自然灾害与转型风险，并且培育和开发新的经济增长点。同时，中国也有望为全球减排做出独特的贡献。若能直面气候

挑战、把握规律、果敢应对，中国将成为有力示范，带动其他国家与地区更快走上低碳之路。中国面临着引领全球变革的历史性机遇，有望在国际舞台上发挥更重要的作用。

本文针对中国应对气候风险和低碳转型的问题提出了一些思考与建议，主要涵盖以下内容：

- 第一部分：提供适应和减缓气候变化风险的全球视角，以及与《巴黎协定》一致的减排路径；
- 第二部分：简述中国面临的气候变化风险敞口，并结合三个案例，剖析中国迄今为止采取的政策响应措施；
- 第三部分：针对具体的适应和减缓措施提出建议。

第一部分：气候变化风险的全球视角与政策响应

研究显示，历史排放已使气候变暖和风险累积到了“积重难返”的程度，因此遏制进一步升温至关重要。政策响应通常可分为两类：适应措施（用于管理短期自然气候风险）和减缓措施（用于减少温室气体排放，最终实现净零排放）。二者均为应对气候变化风险的必要手段。

自然气候风险

近日，麦肯锡公司的智库麦肯锡全球研究院（MGI）发布了《气候风险及应对：自然灾害和社会经济影响》（*Climate Risk and Response: Physical Hazards and Socioeconomic Impacts*）研究报告，分析了气候变化对社会经济系统的五大维度产生的影响⁴：

- 1. 宜居性与宜业性。**热浪等自然灾害将影响人们的户外工作能力，极端情形下甚至会威胁到人们的生命安全。高温会降低劳动生产率，因为工人为了避免中暑必须不时停工休息，而且身体也会本能地节省气力以防虚脱。气温升高也有利于疾病媒介的传播，进而影响人类健康（参见补充阅读，“气候变化是否会增加疾病暴发的可能？”）
- 2. 粮食系统。**干旱、洪水或极端气温将对土地和作物产生影响，进而干扰粮食生产。气候变化引起产量波动的同时，也会改善或破坏特定地区的粮食系统。有时将提高作物收成，有时却会突破某个阈值，使作物颗粒无收。
- 3. 实物资产。**极端降水、潮汐性洪水、森林火灾等自然灾害可能损毁建筑物等实物资产，甚至会对整个资产网络造成严重冲击，例如城市中央商务区。
- 4. 基础设施服务。**基础设施属于一种特殊的实物资产，其功能可能会在使用时遭到毁坏或干扰，进而破坏其服务能力或者推高其服务成本。举例而言，极端高温可能减弱电力设施的生产力；高温、大风、洪灾等自然灾害可能干扰基础设施服务，在依赖这些资产的相关领域中引发连锁效应。
- 5. 自然资本。**气候变化正在改变自然生态系统、毁坏某些对人类社会具有重要意义的自然资本，包括冰川、森林、海洋生态系统，从而危及人类的栖息地和经济活动。此类影响很难通过建模来衡量，但其发展可能是非线性的，并且在某些情况下与气温上升一样不可逆（如冰川融化）。某些影响可能由人类活动失当而引发，例如森林大火和水资源短缺，但气候变化会放大其影响范围和程度。

预计到 2030 年，在我们分析的全部 105 个国家中，上述社会经济系统中将至少有一个经历更严峻的考验。假设在 RCP8.5 排放情景下，2019–2050 年间，生活在可能发生致命热浪的地区的总人口将从零增至 7 亿~12 亿人（未考虑空调普及率的变化）。金融市场也将对受影响地区开展风险识别，进而影响资本配置和保险的模式。随着人们对气候风险理解的不断深入，长期借贷将更为困难，保险成本和普及率也将受到影响，其终值也将降低。这些现象都会触发资本再分配和资产再定价。

补充阅读：气候变化是否会增加疾病暴发的可能？

尽管并无证据表明气候变化与新冠疫情之间存在联系，但斯坦福大学等机构的研究显示，气候变化将在总体上提高疾病暴发的频率⁵。

随着全球变暖、气候更加炎热潮湿，蚊子、壁虱和苍蝇开始在全球肆虐，这些昆虫都是莱姆病、登革热、西尼罗河病毒等疾病的病媒⁶。气候变化对粮食和水安全的影响（包括更频繁的降水和洪水）可能加剧食源性疾病和水传播疾病的扩散，例如腹泻⁷。不过，最令人担忧的也许是全球变暖导致永冻层融化，可能会使冰封上千年的古老病毒重现世间⁸。

研究显示，人类活动导致了新型传染病的增加，例如气候变化及气候变异性、毁林及相关生物多样性的消失、生物入侵等⁹。例如在马来西亚，大规模的毁林迫使果蝠转移栖息地，寻找新的食物来源，从而为人与果蝠之间更频繁的传染性接触创造了条件。科学家怀疑破坏森林与厄尔尼诺事件共同导致了尼帕病毒疫情的暴发¹⁰。

气候变化也会增加自然灾害风险，进而导致疾病暴发。例如 2018 年飓风过后，莫桑比克港口城市贝拉的霍乱病例就从 5 例激增至 138 例¹¹。

适应措施

我们的研究表明，应对气候变化需要四类适应措施，其发展步伐和规模也许亟待加强（见图 1）。第一类措施是保护人员和资产，具体包括加强应急准备、强化基础设施和实体资产、建造防波堤等防护结构。第二类措施是增强韧性，涉及到建设额外产能或推动基础设施体系多样化，例如提高物资储备水平、设置备用电源。第三类措施是减少暴露，也即针对灾害可能恶化的区域降低人员和资产的暴露。某些情况下，资产和社区所在地难以保护或者保护成本太高，这时不妨考虑对其重新安置。最后一类措施是保险和金融措施。保险是风险管控的重要缓冲，有助于提升社会经济系统的韧性，以便尽快摆脱灾害的影响或减少连锁效应。

图1

应对气候变化，需要采取四类适应措施

1

保护人员和资产

- 加强应急准备
- 强化基础设施和实体资产
- 建造防波堤等防护结构

2

构建韧性

- 提高物资储备水平
- 设置备用电源

3

减少暴露

- 重新安置保护难度过大的资产和社区
- 根据实体资产的整个生命周期重新设计资产布局

4

保险和金融

- 为弱势群体提供保费补贴
- 鼓励参数化保险和巨灾债券
- 为适应措施提供资金支持

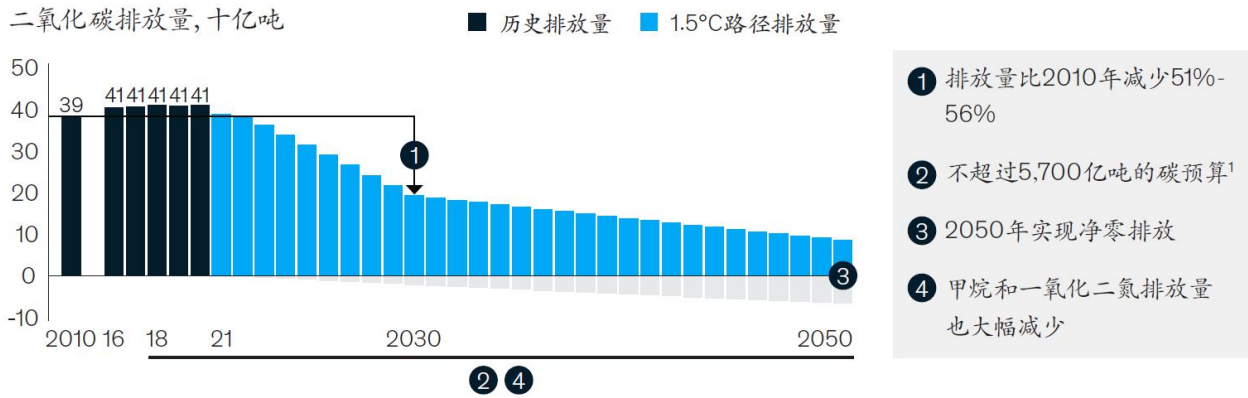
资料来源：麦肯锡分析

减缓措施

中国于 2016 年签署了《巴黎协定》，该协定旨在将本世纪的全球平均气温上升幅度控制在比前工业化时期高 2 摄氏度以内，并努力将升温幅度进一步限制在 1.5 摄氏度。1.5 摄氏度的目标意味着全球“碳预算”不得超过 5700 亿吨（见图 2）。

图2

1.5°C的目标意味着全球“碳预算”不得超过5,700亿吨



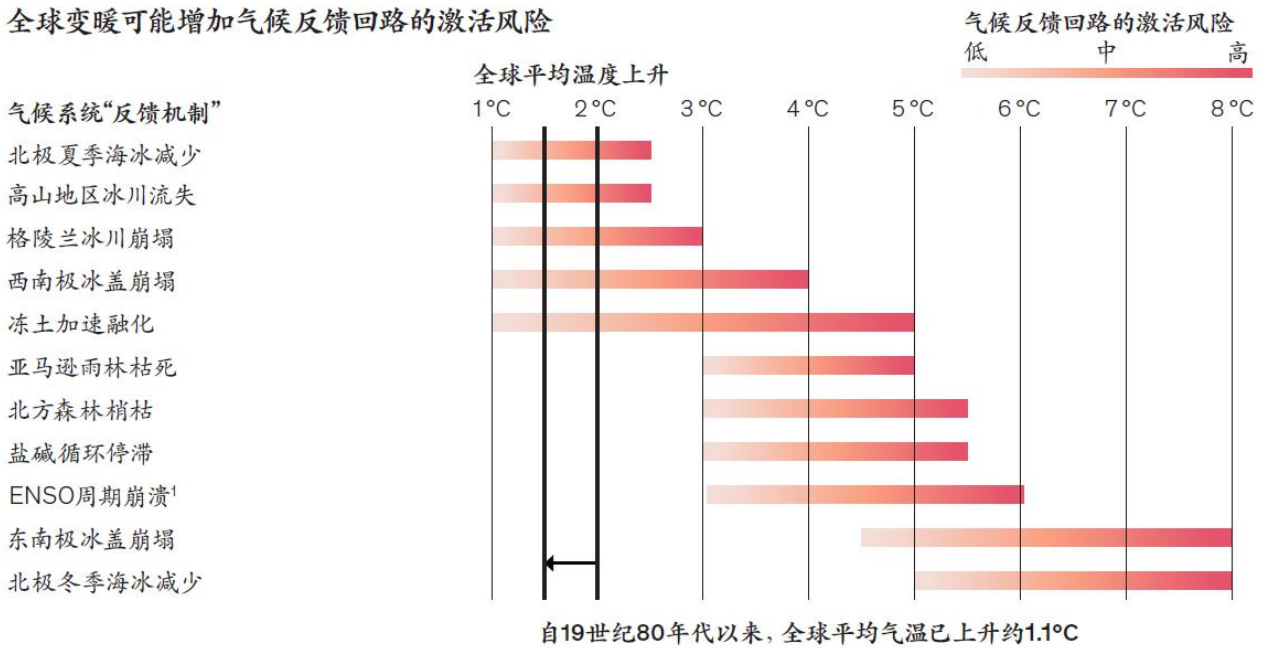
¹ 如果从2018年开始的全球二氧化碳排放量累计不超过5,700亿吨，那么将有66%的几率可将全球平均表面温度 (GMST) 的升幅控制在1.5°C之内；如果要将气温升高控制在1.5°C之内，那么“碳预算”应为4,200亿吨。之内，那么“碳预算”应为4,200亿吨

资料来源：麦肯锡1.5°C情景分析；联合国政府间气候变化专门委员会；Le Quéré等 (2018)

气候系统中存在大量反馈回路，一旦激活便可能导致全球变暖显著加剧（见图 3）。举例而言，北极永冻层融化或将释放大量温室气体；森林梢枯不仅会排放温室气体，也会削减甚至摧毁主要的碳汇；全球冰盖消融会降低地球对太阳能的反射能力。

图3

全球变暖可能增加气候反馈回路的激活风险



¹厄尔尼诺-南方涛动现象

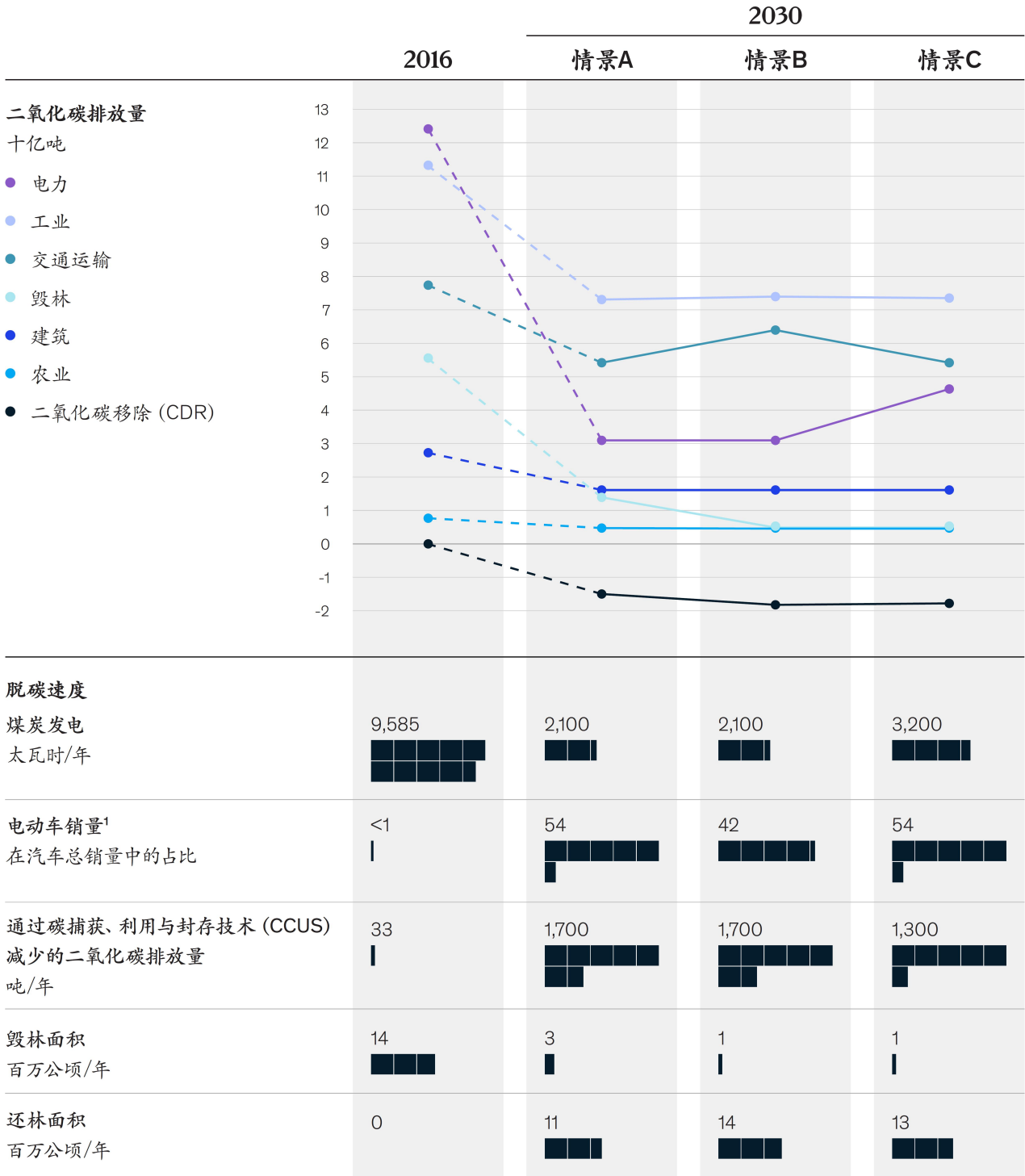
资料来源: Steffan等 (2011); Frieler, K (2013); IPCC (2014); Robinson, Cavlov和Ganopolski (2012); Lenton, T. (2012); Levermann等 (2012); Rockstrom等 (2018); IPCC第五次评估报告, 第2章; 麦肯锡1.5°C情景分析

麦肯锡最近的一项研究探究了 1.5 摄氏度控温目标下全球脱碳在技术上可行的三种情景（见图 4）¹²。研究发现，不管在何种情景下，国际社会都需要携手努力、果敢行动，大幅减少温室气体排放。第一种情景下，各行各业都需要开展深入而彻底地减排。第二种情景下，假设石油和其他化石燃料在一段时间内仍然是运输业的主要资源，则全球需要通过大力植树造林来吸收多余排放量。第三种情景下，假设全球在较长时间内（与第一种情景相比）仍然需要依赖煤炭和天然气发电，则应通过更加积极的植树造林弥补“碳预算赤字”。

在所有情景下，都需要大幅减少全球燃煤发电量（比目前水平降低 70%~80%），到 2030 年实现电力系统脱碳，进而通过电气化推动其他行业脱碳。同时，碳捕集技术的应用规模应比目前扩大 40 倍以上。鉴于中国约占全球燃煤发电量的 45%，中国有望在全球电力系统脱碳方面发挥积极作用。

图4

1.5°C控温目标下全球“脱碳”的三种可行情景——虽然艰巨,但并非无望



¹ 包括电池电动汽车、燃料电池电动汽车、插电式混合动力汽车和混合动力汽车的销量

资料来源:《全球能源视角2019: 参考案例》; 麦肯锡1.5°C情景分析

第二部分：中国的气候变化敞口以及迄今为止的政策响应

受气候变化影响，中国将变得更加炎热和潮湿，风暴、洪水等自然灾害有可能频发和加剧。这是我们在高排放、低减缓情景下分析得出的中国气候风险演变结果。

中国面临的自然灾害风险

气候变化已经对中国产生了某些影响。中国科技部、中国气象局、中国科学院和中国工程院联合牵头发布的《第三次气候变化国家评估报告》指出¹³，1909年以来，中国的平均气温增幅已达1.5摄氏度，高于全球平均水平。1980-2012年间，中国东部沿海地区海平面上升了93毫米；20世纪70年代至21世纪初，中国的冰川面积萎缩了10%。

由于中国幅员辽阔、纬度跨度较大，气候变化对各地区的影响差异显著。我们将中国分为七个地区。预计到2050年，气候变化对各地区的影响将各有不同（见图5）。其中一些地区将更加潮湿，一些地区将更加干燥，还有许多地区将更为炎热（详情参见附录。我们将结合三个案例，剖析高排放、低减缓情景下中国气候风险的演变趋势）。

具体而言，中国的夏季将变得更加漫长和炎热。居住在可能遭遇致命热浪侵袭的人口占比将会升高¹⁴，从而降低劳动生产率和户外工作时长。到2030年，中国可能将有1000万~4500万人面临极端炎热和致命热浪的威胁。每年因极端炎热和潮湿而损失的户外工作时长平均占比将从目前的4%增至2030年的6.5%与2050年的9%，相当于到2050年，年均GDP损失可高达1万亿~1.5万亿美元（折合人民币约7万亿~10.6万亿元）。预计华东地区发生致命热浪的概率最高，户外工作时长的减少幅度相对较大（参见附录：案例研究一）。

此外，预计中国出现极端降水事件的概率也将升高，从而推高与江河泛滥风险相关的资本储备比例¹⁵。2020-2050年间，预计中国每年受江河泛滥影响的人数将从6750万人增加到8300万人左右¹⁶。统计数据显示，每年因江河泛滥和山洪暴发造成的平均损失可能从目前的350亿美元（折合人民币约2,500亿元）增加到2050年的510亿美元（折合人民币约3,600亿元）¹⁷。中国西北地区面临的洪灾风险是最高的（参见附录：案例研究二）。

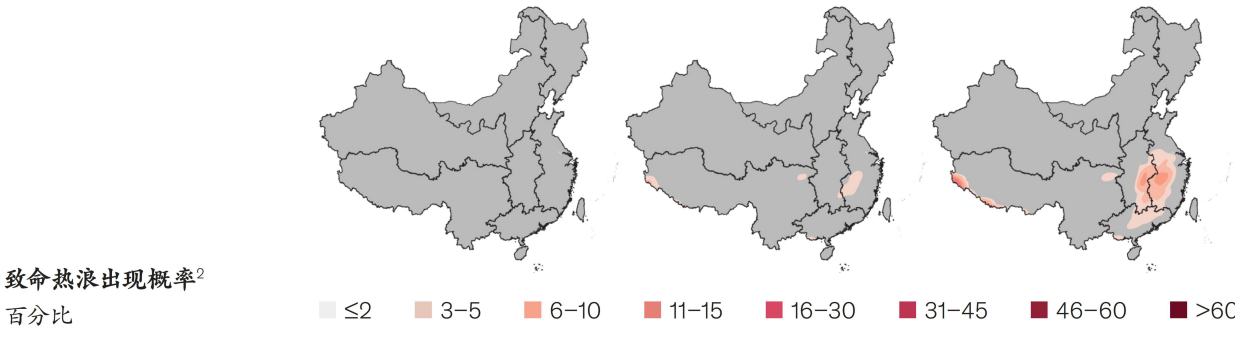
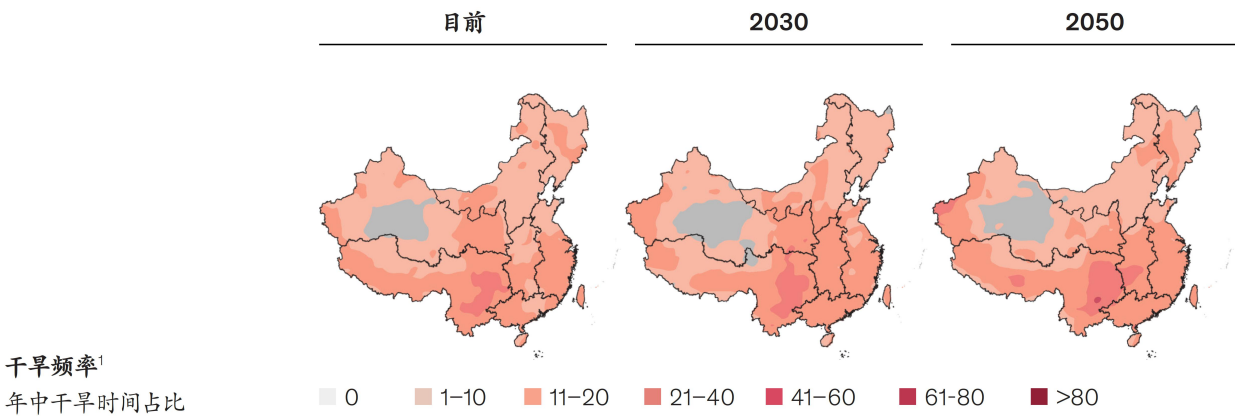
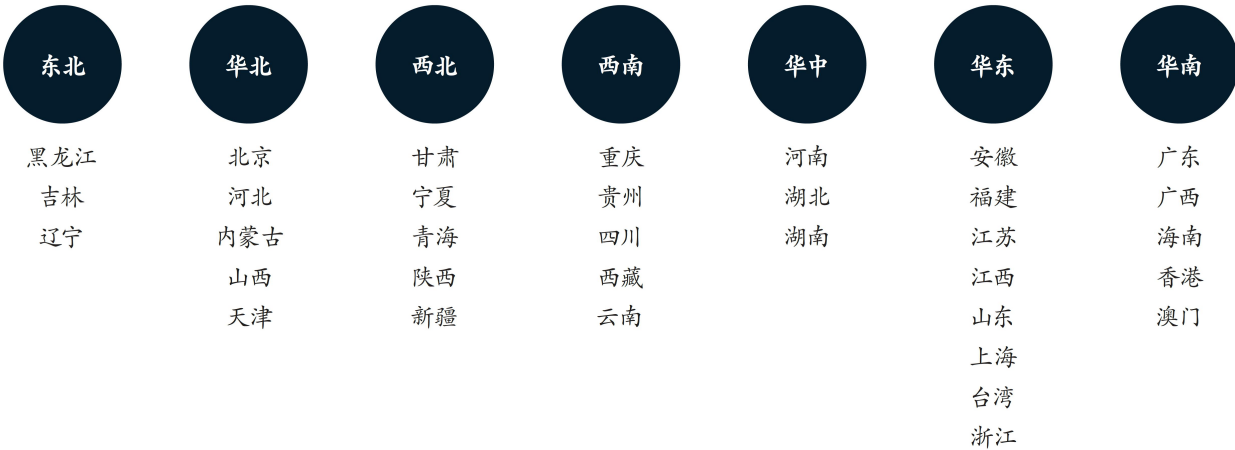
未来十年间，中国面临干旱威胁的时间将有所拉长，而缺水风险将有所降低¹⁸。与1998-2017年的基准数据相比，到2050年，中国的农作物总产量预计将增加约2%，但各地区之间将存在一定差异，局部地区产量可能下降（参见附录：案例研究三）。

图5

预计中国面临的气候灾害将会加剧

基于RCP8.5情景

中国七大气候地区



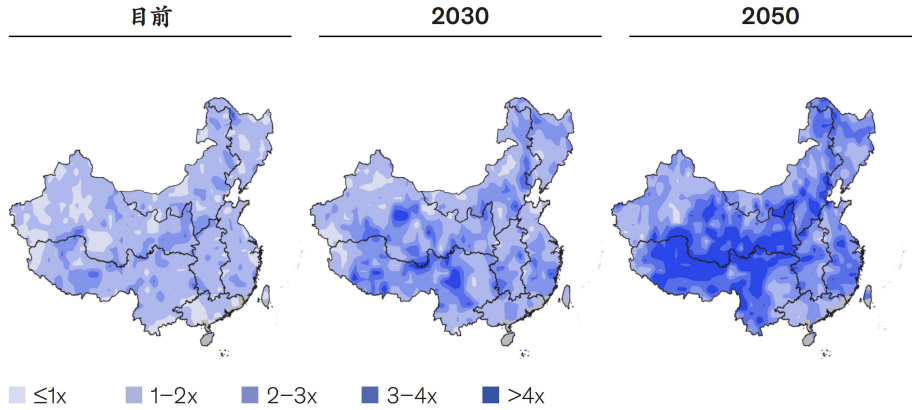
¹ 测量时采用三个月滚动平均值。“干旱”定义为滚动三个月期间平均帕尔默干旱指数(PDSI)<-2。PDSI是一个基于气温和降水数据的干旱指数，计算时以历史均值的偏差为基础。数值一般介于+4(极度湿润)和-4(极度干旱)之间

² 致命热浪定义为连续三日每日最高湿球温度高于34摄氏度。湿球温度是指在恒压下一团空气可通过蒸发冷却的最低温度。选择这一阈值的理由在于：在通常的定义下，人类可生存热度的阈值为35°C湿球温度，而热岛效应强烈的大城市可使34°C湿球温度的热浪超过35°C的阈值。在这种条件下，在阴凉处水分保持良好且健康的人体在曝晒四五个小时后，躯干温度将上升到致命水平。这些预测受制于未来大气气溶胶表现和城市热岛或冷岛效应相关的不确定性

资料来源：伍兹霍尔研究中心；世界资源研究所水源风险地图(2018)；世界资源研究所洪水分析；麦肯锡全球研究院分析

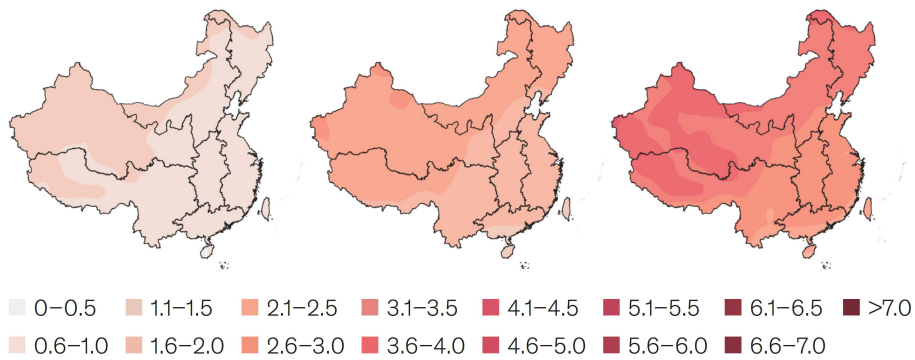
极端降水

与1950-1981年间“50年一遇”降水事件的概率变化对比



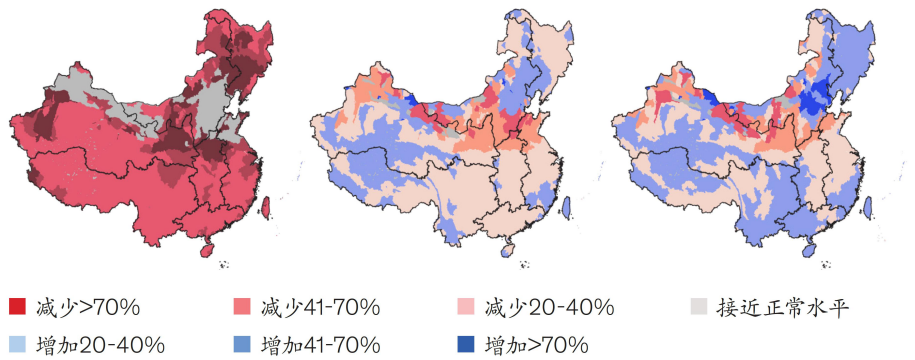
年均气温上升

较工业化之前全球平均气温变化, 摄氏度



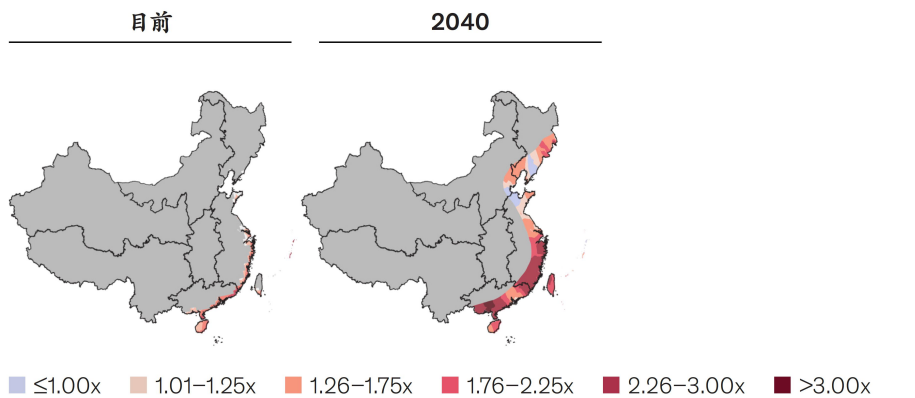
水资源

与2018年相比地表水占比变化, 百分比



台风(降水)

2040年与1981-2000年间“百年一遇”台风发生概率变化的对比



中国迄今为止的政策响应

中国的适应措施对于其管理自身风险至关重要。同时，中国的体量和影响力也足以推动全球减排事业，引领世界走向更加稳定的气候环境。在许多关键领域，中国已经展开了行动（见图6）。

在适应措施方面，中国于2013年发布了《国家适应气候变化战略》；“十二五”规划期间（2011-2015年），中国为适应措施支出3.9万亿元人民币¹⁹，相当于2015年GDP的1%。

在减缓措施方面，中国也已采取了一系列措施来推进脱碳转型、发展绿色经济。在可再生能源方面，中国的投资连续七年位居全球第一²⁰；电动汽车市场规模现已超过欧洲与美国的总和²¹；中国也在积极开展技术驱动型“能源革命”，大力发展可再生能源，改革能源市场，以显著提升采矿、纺织制造等能源密集型行业的能效。

中国向国际社会做出了重要承诺。2018年，中国与其他16个国家共同发起了全球气候适应委员会。该委员会提出了气候适应解决方案的八大领域，并将2019年定为行动元年，向全球推广这些解决方案²²。此外，中国于2016年签署了《巴黎协定》，承诺为减缓未来气候风险做出贡献。

图6

2013年以来，中国已采取一系列重要措施来应对气候变化

2013

发布《国家适应气候变化战略》

发布《大气污染防治行动计划》，禁止沿海各省新建煤电厂

2014

发布《中国应对气候变化国家方案（2014-2020年）》，制定了2020年实现700吉瓦可再生能源发电的目标

2015

中国在“国家自主贡献方案”（INDC）中承诺，将于2030年使二氧化碳排放达到峰值，并将非化石能源在一次能源供应总量中的比例提高到20%左右

2016

中国承诺，将提供51亿美元援助发展中国家解决气候变化和发展问题

中国签署《巴黎协定》；各签署国共同制定了将本世纪全球平均气温上升幅度控制在2°C以内的目标

2017

非化石燃料在中国一次能源消费中的占比从12%上升到14.3%

中国为发展可持续能源投资1,266亿美元

2018

中国宣布碳排放强度比2005年下降了45.8%，提前两年完成目标

资料来源：新闻检索

尽管如此，中国的排放量仍约占全球总量的20%，净排放量达160亿吨二氧化碳当量（见图7）²³。但从人均排放量看，中国不到美国和加拿大的一半²⁴。煤炭约占中国2018年总发电量的70%；在截至2019年6月的18个月中，中国的煤电容量增加了42.9吉瓦，超过同

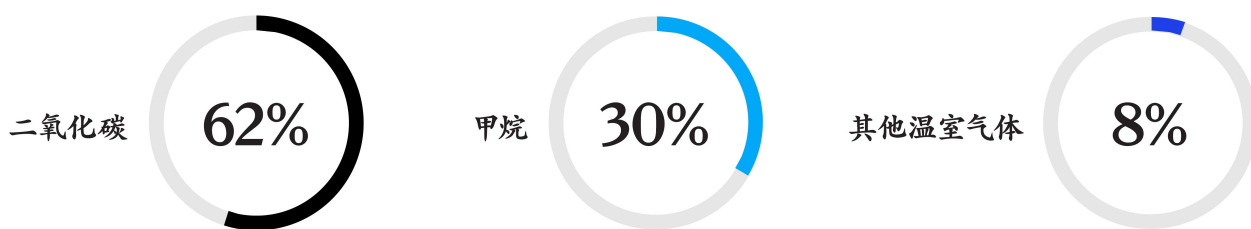
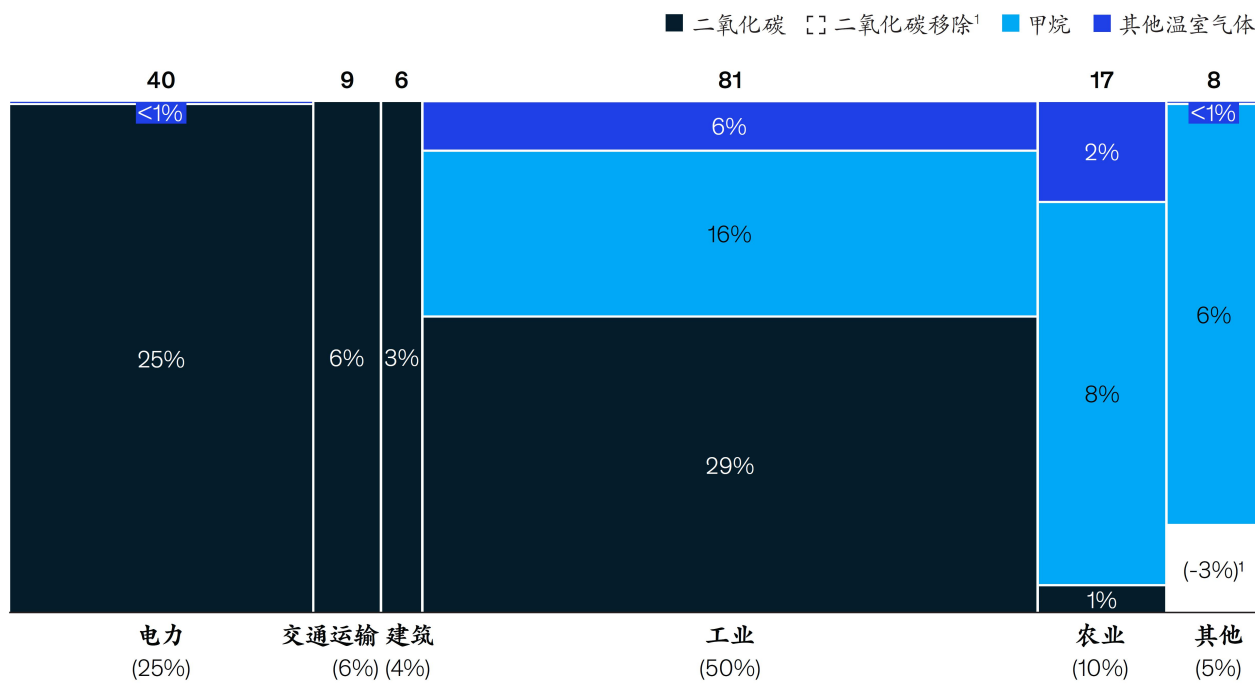
期其他国家和地区关停的煤电厂总容量²⁵。此外，甲烷（CH₄）贡献了中国净排放量的约30%，这种强效温室气体主要来自化石燃料价值链（包括煤炭开采）与粮农系统（牛肉与大米）。

图7

中国的净排放量达160亿吨二氧化碳当量

二氧化碳占温室气体总排放量的60%以上，甲烷占1/3

2016人为温室气体净排放量，按气体类型与来源产业划分（亿吨）



¹2亿吨的净负排放包括土地利用、土地利用变更与林业 (LULUCF) 产生的3亿吨负排放和其他来源 (废物及其他) 产生的1亿吨排放。

注1: 除与能源有关的二氧化碳排放外, 还包括来自生产工艺 (例如水泥生产)、森林砍伐、农业、废物的排放和负排放, 但不包括生物反馈产生的排放 (例如永久冻土融化、野火)

注2: 不包括全氟化碳 (PFC) 和六氟化硫 (SF₆)

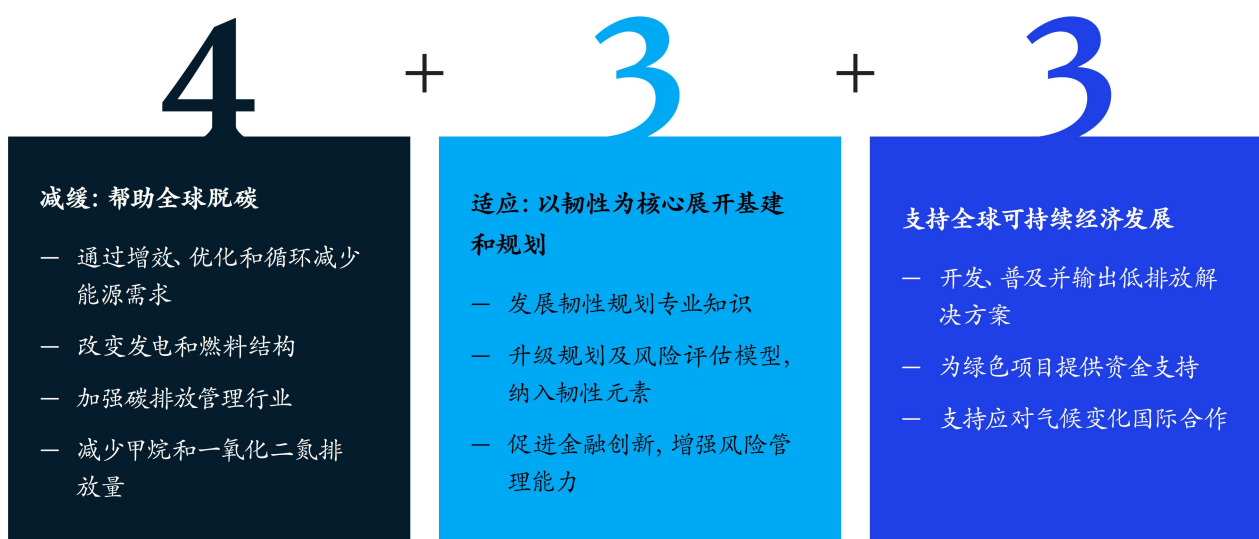
资料来源: 粮农组织; EDGAR; 《全球能源视角2019:参考案例》; 麦肯锡1.5°C情景分析

第三部分：中国“4+3+3”气候变化应对方案

中国为应对气候变化所采取的措施令人称赞，尤其是在汽车等行业的减排措施可为其他国家和地区提供借鉴。然而，考虑到其可观的经济体量和影响力，中国可以有更大作为。积极引领应对全球气候变化也有利于中国自身的经济发展和环境保护。中国可以考虑实施侧重于减缓措施的“4+3+3”气候变化应对方案，在提升自身适应能力的同时，为全球经济的可持续发展做出贡献（见图8）。

图8

中国可实施“4+3+3”气候变化应对方案



资料来源：麦肯锡分析

减缓：帮助全球脱碳的4类措施

麦肯锡将减缓措施分为4类，如能达到这些要求，将有望帮助全球经济脱碳，进而稳定全球气候。这些要求又可以进一步分解成一套可持续性衡量指标。它可帮助中国国有企业和其他企业将可持续发展逐步纳入战略议程。

通过增效、优化和循环来减少能源需求

从需求侧来看，如采用以下4种方法可显著减少排放：

- 1，提高能效。**中国可成为全球节能增效的标杆，在电器、照明、电气设备、建筑规范等领域提出新的节能标准。以运输业为例，中国可通过规范卡车轮胎设计、优化船舶推进力和船体形状、减少飞机摩擦阻力等手段来提高内燃机热效率、改善空气动力学，从而降低每公里能耗。
- 2，优化工艺。**在工业领域，中国可通过采用最先进技术来减少能源消耗，例如干法水泥窑、石脑油催化裂化制塑料等。中国应当制定明确的政策路线图，通过补贴激励企业

采用低碳技术，追求规模经济的降本效应，最终转向市场化经营机制，实现规模化推广。在交通运输领域，中国可通过数据分析改善空中交通管理、减少卡车和船舶非满载行驶等措施提升物流和运营效率。中国在以客户为导向的物流优化方面拥有专长（例如利用数字化卡车承运平台匹配出入场物流需求），这些技术可以平移应用于公路运输以外的领域。此外也可以通过进一步优化算法提升效率。

- 3, 循环经济。**循环经济旨在消除浪费，最大程度地持续使用产品，为自然系统重新注入活力。据艾伦·麦克阿瑟基金会（Ellen MacArthur Foundation）估算，到2030年，中国有望通过循环经济大幅降低商品和服务的获取成本，可节省约5.1万亿美元左右（折合人民币约360万亿元），相当于2030年中国GDP预测值的14%²⁶。在此过程中，政府可发挥关键的引导作用，以公共资金加快推广循环业务解决方案，例如将相关标准纳入政府采购招标；各地市政府也应确保相关基础设施到位（例如废物收集系统、处理和回收设施、建材库等），以实现材料的有效再循环²⁷。此外，企业应当在循环经济原则的指导下重新设计业务实践，例如通过优化包装设计来减少对新塑料和石油原料的需求；通过利用废钢材来减少碳强度高的铁矿石加工等。
- 4, 转变消费模式。**新冠疫情的蔓延推动了许多有利于稳定气候的措施。在隔离封锁期间，远程通讯取代了面对面会议，被人们广泛采用。疫情过后，中国和其他国家和地区的政府也可以根据自身情况鼓励在一定范围内延用这些解决方案。远程办公、减少长途旅行、以高铁取代航班等做法都有利于降低交通运输带来的能源需求和排放。

除了这些全局性措施以外，改变个人行为对降低能源需求也很重要。消费者可以选择低碳出行方式——以火车代替汽车，以高铁代替飞机；减少食物浪费；减少牛羊肉消费；增加回收利用，选择电动汽车等环保产品。

若想改变消费者行为，政府不仅需要增强公众对气候变化的认识，也需要开展青少年教育。一些国家和地区已经率先行动起来。从2020年9月起，意大利政府将要求所有公立学校每年对各年级开展33个课时的气候变化和环​​境可持续性教学²⁸。美国加利福尼亚州政府也在与非政府教育组织“Ten Strands”合作，为所有K-12学生提供环保教育课程²⁹。

中国教育部可以考虑将可持续发展教育纳入课程和高考。中国青年应对气候变化行动网络（CYAN）等社区性的可持续发展教育计划也将发挥积极作用。

改变发电和燃料结构

发电和交通运输行业约占中国温室气体排放量的1/3。如果不对这些行业进行大刀阔斧的改革，中国就很难实现经济脱碳。

- 1, 增加可再生能源的利用。**中国的太阳能和风能发电技术领先全球，获得了令人瞩目的成就。但考虑到自身庞大的用电需求，中国在减少发电行业排放方面仍然大有可为。

煤炭仍然占中国发电量的近70%³⁰。中国应进一步淘汰效率低下的燃煤电厂，代之以可再生能源，否则全球气候目标难以实现。中国国家发改委能源研究所高级研究员姜克隽表示：“逐步淘汰燃煤发电并不像我们想象的那么难，实际上它是完全可行的³¹。”他

在研究中提出，中国 18% 的燃煤电厂只贡献了发电总产能的 10%，而且大多位于华北或东北地区。从技术特征、盈利能力和环境影响来看，应于近期淘汰³²。

中国可以考虑系统地、慎重地推动下游煤炭产业改革，这就意味着必须在区域经济发展需求、国家能源供给保障，以及环境影响三者之间取得平衡。随着原油价格在未来很长一段时间里保持低位，煤电行业的利润空间也会很有限。若不进行适当的改革，行业与区域都会面临重大的金融和经济风险。

- 2, **交通运输电气化。**中国的电动汽车保有量居世界之首，但电动车仅占道路车辆的 2%。目前中国大部分电动车销往大城市，因此需要加速推动电动汽车的普及销售³³。图 4 显示，为了达到理想的脱碳水平、实现 1.5 摄氏度的控温目标，电动汽车的总销量到 2030 年要占到全球汽车总销量的一半左右（此处的“电动汽车”包括电池电动汽车、燃料电池电动汽车、插电式混合动力汽车和混合动力汽车）。此外，为了进一步巩固全球电动汽车领导者的地位，中国也有必要制定更具雄心的目标，争取到 2030 年实现电动汽车占新车销售量的近 100%。这一点非常关键，因为 1.5 摄氏度意味着到 2030 年全球大部分新车销售都应来自电动汽车。不过，中国的电气化转型也不必局限于汽车行业。中国不妨以电力（或更理想的可再生能源，例如太阳能屋顶）取代化石燃料来满足建筑物的能源需求。此外，工业流程（例如采暖业）的电气化也可进一步减少化石燃料的直接消耗。
- 3, **增加生物质能、生物燃料和生物能源的利用。**某些行业（如航空业）很难摆脱对液态烃燃料的依赖，中国可通过两种方式扩大可持续航空燃料（SAF）的生产。首先，开设新厂或将现有精炼厂转换为生物精炼厂，扩大基于氢化植物油、酯和脂肪酸的可持续航空燃料的生产规模，以替代部分航空煤油喷气燃料（请务必留意生物燃料的原料来源，以避免出于无意而砍伐森林），并通过征收燃油税或直接补贴等支持政策促进可持续航空燃料的应用。第二，支持下一代生物燃料的开发。目前，生物燃料的其他生产路径仍处于起步阶段（例如生物乙醇制喷气燃料、生物质气化、电能转化液态燃料等），中国可通过投资基础研究、提供启动资金等方式来支持这些新兴技术的发展。
- 4, **发展氢能市场。**氢是一种取之不尽、用之不竭的能量载体，它能够产生热量和电能，而且唯一的副产品是水蒸气。氢能用途广泛、清洁安全，不仅有利于长途运输、工业能源、建筑采暖和电气等领域实现脱碳；也可以成为风能和太阳能等间歇性能源的有效补充；而且由于氢能可以储存，氢能发电将有利于增加电网的灵活性。理论上，预计到 2050 年氢能便可以满足全球最终能源需求的 18%，届时二氧化碳的年均排放量也将比现有技术下减少约 60 亿吨³⁴。

中国若要建立氢能生态系统，氢能的清洁生产转型至关重要。2017 年，中国生产了约 2100 万吨氢（占全球产量的 1/3）³⁵，其中绝大多数是“灰氢”，也即通过化石燃料生产，生产过程中有二氧化碳排放。因此，为了实现脱碳目标，中国需要转变制氢途径，其中一种途径就是生产“蓝氢”；“蓝氢”的生产基于现有工艺，但加强了碳捕集。“绿氢”则是由可再生能源电解生产而成。当前“绿氢”的生产成本仍然很高，但随着可再生能源和电解材料成本的下降，其成本正在迅速下降。

要想实现向“蓝氢”与“绿氢”的转型升级，政府的支持至关重要，具体可包括将工业生产纳入排放交易体系，促使相关企业淘汰“灰氢”。其他一些非财务措施也能发挥作

用，例如与行业领袖联手制定低碳氢生产目标。这些措施都有利于提高企业对氢能的重视，促进氢能作为优质替代能源广泛用于工业采暖。这可能会给钢铁、铝和水泥等产业的脱碳带来巨大机会。

为了促进氢能的普及，中国还必须迅速扩大其输送网络，包括燃料电池汽车的燃料管道和加油站。据中国氢能联盟预计，到 2020 年底，中国建成的“加氢站”为 100 个——考虑到中国幅员辽阔，这个数字并不算多³⁶。

鉴于中国未来对氢气输送管道将有庞大需求，氢的生产和输送基础设施建设应当由政府与民间共同出资，而且要以城市群为单位，在地区层面铺开，无须全国统一建设。各省应当联手确定氢气供应站和管道系统的分布，共同建立控制中心，并且负责监督生产和制定通用标准。中央政府可通过推行加氢喷嘴标准化，为各省之间的协同创造条件。

大力发展碳排放管理行业

1, 发展碳捕集、利用与封存 (CCUS)。目前，CCUS 技术的成本仍然较高、应用规模较小、存储和运输基础设施也很有限。中国不妨对工厂和燃煤电厂的碳捕集技术进行快速迭代和测试，力争成为全球 CCUS 领域领导者。

发电厂实施 CCUS 升级改造后，可捕集 90% 以上的二氧化碳，防止其进入大气；捕获的气体也可以封存起来，或者进一步用于生产。如果想真正发挥 CCUS 的作用，未来几年正是改进技术、建立支持性基础设施并降低成本的关键时期。最终目标是让具有 CCUS 能力的发电厂进一步结合生物能源，实现“负排放”发电。目前中国已有若干个 CCUS 项目，但远不能满足需求。此外，监管的不确定性和高昂的成本也影响了该技术在中国和其他国家与地区的发展³⁷。

从政策方面来看，中国现有的 CCUS 监管框架也不足以支持这一雄伟目标³⁸。中国没有与 CCUS 技术相关的法律（仅有指南和大纲），这导致法律责任缺位。大多数政策只关注 CCUS 技术的存储，忽略了捕集和运输环节。另外，CCUS 属于集成技术，无法由单一部门全权管理，因此审批流程较为复杂。中国政府可重点推进 CCUS 立法，覆盖 CCUS 技术各个环节，并简化审批流程以促进大规模推广。

不过，资本成本过高仍然是最大的瓶颈。如果缺乏直接的税收优惠政策或其他扶持政策，CCUS 项目的经济性很难保证。中国政府不妨设立 CCUS 研究推广专用资金，或者向采用 CCUS 技术的发电厂提供发电补贴，待规模经济形成后再削减财政支持。

2, 停止毁林，植树造林。毁林是一个全球性的严重问题。中国由于有禁止砍伐森林的规定和相应的监测计划，毁林情况相对不算严重。2000-2010 年间，中国的森林覆盖面积增加了 4.6 万平方英里³⁹。一方面，中国可以为全球停止毁林发挥关键推动作用。巴西和刚果民主共和国是 2018 年热带雨林破坏最严重的两个国家⁴⁰，恰好也是中国在拉美和非洲的主要投资目的地。2005-2017 年间，中国在这两个国家的投资规模分别达到 550 亿美元和 120 亿美元⁴¹（折合人民币约 3,900 亿元和 850 亿元）。中国可以利用与毁林热点地区的关系以及影响力发挥作用。另一方面，对中国来说，这也是输出绿化技术的绝佳机遇。中国已成功地将内蒙古自治区库布其沙漠的 1/3（合 6000 平方公里）变成了绿洲。

预计未来 50 年内该项目创造的经济价值可达 18 亿美元⁴²。沙特阿拉伯、巴基斯坦等国家慕名派出团队向中国学习沙漠绿化技术。这些技术有望为全球绿化事业做出贡献。

减少甲烷和一氧化二氮排放量

甲烷（CH₄）和一氧化二氮（N₂O）分别是全球第二和第三大温室气体。甲烷排放的短期影响极为恶劣。若要实现 1.5 摄氏度的目标，全球甲烷排放量到 2030 年必须下降 35% 左右，到 2050 年必须下降 65% 左右⁴³。虽然甲烷在大气中的寿命比二氧化碳短得多，但其产生的温室效应却远超二氧化碳。因此，只要减少甲烷排放量，就能事半功倍地遏制短期升温幅度，并且降低不可逆的气候反馈风险。

1, 改革农业和粮食系统。在过去 20 年，农业、林业和土地用途变更大约产生了全球温室气体排放量的 27%⁴⁴，几乎与工业相当。自 2000 年以来，中国农业生产排放量增加了 16%，成为世界最大的农业排放国⁴⁵。若想有所改观，就需要改变生产和消费系统。麦肯锡提出了 25 项低排放农业技术与实践建议⁴⁶，其中有两项尤其适用于中国。

第一，改善水稻种植的施肥方法。中国民众以大米为主食，这意味着中国占据了全球大米总消费量的 29%⁴⁷和总产量的 28%，而水稻田正是甲烷产生的理想环境⁴⁸。如果中国能够改善稻田施肥方式，优化稻田水分管理，普及旱直播法，就可将水稻种植过程中产生的甲烷排放量减少约 40%⁴⁹。以上变革可通过设备补贴或甲烷排放罚款来予以推行，这将极大地惠及中国乃至整个世界。

第二，减少氮肥使用。中国每公顷农田年均施氮 305 公斤，是全球平均水平的 4 倍以上⁵⁰。改变这一局面并不容易，因为中国 99% 的农场面积不足 5 公顷，该比例远高于亚洲其他地区和欧洲⁵¹，因此，要改变中国农民的行为，就意味着必须动员到每一家农户。但这些困难并非无法克服，而且很值得克服。如果中国能够将氮肥用量降至美国的水平，则农业排放将下降 24%，并在增产的同时为农民节约每公顷 22 美元成本（折合人民币约 160 元）。此外，中国政府也不妨进一步扩大有机肥补贴计划⁵²，鼓励农民弃用或减少使用传统氮肥。

另一个改善契机是食品消费。中国应增加在新型替代蛋白行业的竞争力，开始转向更清洁、更健康的食品消费。出栏前，反刍动物的蛋白，如牛羊肉产生的排放量约为家禽或鱼类的十倍。总体而言，中国未来十年预计将消费更多的肉类。到 2028 年，中国的人均牛肉消费量预计将达到 4.1 公斤，成为仅次于美国的第二大牛肉市场⁵³。鉴于目前中国的人均牛肉消费量远低于其他市场，中国政府可适时进行消费者教育、塑造消费者行为，以便在新消费习惯形成之前控制牛肉需求的增长。

2, 消除甲烷的逃逸性排放。中国约有 1/3 的逃逸排放来自煤炭行业⁵⁴，这是应当减少煤炭用量的另一个理由。石油和天然气行业也有减少逃逸性甲烷的潜力，而且实施起来相对更容易，从中获得的利润也更高。具体做法包括以电动泵代替，检测和修复分散的小型泄漏等。

适应：以韧性为核心开展城市规划和基建的 3 种方法

新冠疫情的暴发凸显了韧性（也即有能力消化冲击）的重要性。疫病的全球大流行以及气候灾害都会造成有形冲击，并随之引发一系列社会经济影响。后疫情时代，各国纷纷寻求重启经济，拯救生命，保障民生。在此过程中，大力提升经济与环境韧性应当成为复苏计划的关键内容。正如上文所述，历史排放导致全球变暖趋势不可逆转，未来发生气候危害的频率和强度都有可能增加。这就对中国管理自身风险、保护弱势群体提出了新的要求——环境韧性应当成为城市规划和基建项目的核心。这一原则以及下文提出的若干建议同样适用于农业与自然保护体系。

培养韧性规划的专业能力

为了增强中国城市的韧性，政府需要将自然灾害风险纳入各领域（住房、交通、水利、下水道等）的政策、战略和运营中。这就要求把韧性作为城市规划的核心。市政府需要系统评估本市的自然风险水平，并根据需求加强相应的保障，例如修筑防波堤与高架建筑物等防灾工事，分散电力系统和水网分布，提高保险覆盖率，发挥保险转移风险、提供及时救济的缓冲作用。

韧性思维必须成为城市规划的核心。国际社会已经开始推行这一理念。2013–2019 年间，洛克菲勒基金会（Rockefeller Foundation）推出了“全球 100 座韧性城市”计划，旨在帮助这些城市开展能力建设，并提供资金和技术助其应对气候风险等多种挑战⁵⁵。中国有两个城市（黄石和德阳）参与了该计划，各自制定了应对自然灾害风险的韧性战略。同时，开普敦、芝加哥、伦敦、纽约和鹿特丹等全球多个城市也已制定了韧性战略。例如下曼哈顿海岸防灾项目的目标便是在 2100 年之前降低风暴潮和海平面上升带来的洪水风险⁵⁶。

中国国家发改委可牵头制定防灾减灾指南，帮助各城市衡量自身的气候韧性，明确发展短板，以便帮助其制定相关举措，建立专家网络。国家发改委也可以为地方政府提供技术支持，帮助其加强能力建设。此外也可以与住建部及生态环境部合作遴选目标城市，开展试点项目，并组建防灾减灾理事会为其提供支持。

将韧性融入升级规划和风险评估模型之中

基建项目需要从持续的气候变化出发，针对资产的整个生命周期进行风险管理。这意味着从规划阶段融入韧性，以免灾害来袭或气候变化破坏资产。长远看来，预防成本将显著低于大灾之后的修复成本⁵⁷：每向韧性基础设施投资 1 美元，未来便可以收获约 6 美元的降本回报⁵⁸。

其中一种方法是在基础设施项目中引入前瞻性模型，用以评估自然灾害影响概率，辅助规划人员进行韧性设计。举例而言，南非政府制定德班港扩建规划时便进行了气候风险评估，规划人员为应对海平面上升风险而加高了港口，并针对更强的降水和狂风侵袭制定了应急计划⁵⁹。

评估气候风险对基础设施的影响时，需要同时兼顾洪水等“急性”灾害的冲击，以及气温上升等“慢性”灾害的影响（例如电力变压器和电网效率降低）。一旦完成此类评估，便可制定多种应对方法，例如加固加高防灾工事、建立物理屏障、增加储备物资、将资产转移至安全地区等。

中国要求新基建项目必须进行环境影响评估，包括水、空气、噪声和废物。但没有要求其追踪温室气体排放，也不评估其抗灾能力。中国不妨考虑修改环境影响评估法规，使其与国际最高标准接轨。举例而言，欧盟同类法规要求同时评估基建项目对气候变化的潜在影响，以及可能出现的伴生气候风险；并可勒令未达标项目进行整修，以加强其环境韧性⁶⁰。

考虑到气候风险评估的复杂性，中国或许应当从风险最高的地区展开试点。这有助于其他地方汲取试点地区的经验教训，厘清有待增强的能力领域（例如数据采集、风险建模等）⁶¹。

另一个重点是升级改造现有基础设施，以增强其抵御气候风险的能力。中国应仔细评估现有基础设施面临的主要风险，实施升级改造政策，并依据资产周转和维护周期思考具体措施与实施时机。

促进金融创新，增强风险管理能力

在打造韧性城市的过程中，中国应将保险纳入建设规划。极端天气事件会造成巨大的经济损失，影响社会的稳定。完全依赖国家提供风险保障是不可持续的做法——随着自然气候风险逐年增加，其潜在总风险甚至会超过中国的总 GDP。

保险可有效降低对政府灾后救济的依赖，转移部分风险敞口。气候风险保险能起到多方面作用。首先，它在为需要者提供现金流的同时也保护了政府财政。其次，它有助于政府应对意外危害。另外它也将激励地方政府更加重视基建项目的韧性，毕竟抗灾能力较强的资产缴纳的保费比较低⁶²。在发展气候风险保险时，政府部门和保险企业必须建立合理的监管和财务框架。

保障可从微观（个人和企业）、区域（省市）和国家这三个层面同时推进。中国可建立多样化的投资结构（包括计损赔付的传统保险，以及巨灾债券、天气衍生品等），将风险转移给金融市场中的机构投资者。这些替代方案的价值取决于天气指数，例如温度、风速、降水、降雪等。考虑到其复杂性，各国政府、监管机构和私营部门都需要掌握专业知识，展开系统性探索。对接全球保险市场对于分散气候风险至关重要。

中国在这方面有很长的路要走⁶³。以农业保险为例。中国的农业保险覆盖率（农业保费占农业 GDP 之比）仅为全球水平的 30%⁶⁴；单位承保额度（保险金额除以资产总价值）仅为美国的一半。从保险业整体来看，虽然中国保险业发展迅速，但覆盖率仅为 4%，仅为全球平均水平的一半⁶⁵，其中自然灾害保险的承保额度仍然很低。

促进全球可持续经济发展的 3 种路径

除了在国内实现脱碳和气候适应的目标之外，中国也有能力促进全球经济可持续发展。中国可通过开发低排放解决方案，为绿色项目提供资金支持，促进国际气候合作等 3 种路径提高自身的全球影响力。

开发、普及、输出低排放解决方案

随着全世界转向低碳经济，对相关出口和技术的需求有望急剧增加。中国已在全球太阳能光伏（PV）面板市场中占据主导地位，对风力涡轮机、电池和电动汽车的需求也日益增长。中国应放眼未来，致力于打造满足世界需求的产品和服务。具体而言，中国未来的出口机会可能有以下几种：

- 替代蛋白质和其他减少家畜甲烷排放的解决方案；
- 电解器、燃料电池以及可持续制氢技术的核心基础设施与组件；
- 工业脱碳所需的碳捕集、利用与封存（CCUS）技术；
- 可由有机废物或生物能源制成的可持续航空燃料；
- 依托电动汽车产业的电池和蓄电技术。

其中多数技术对中国自身减缓气候变化也有关键意义。在国内推广这些技术有助于中国降低自身经济风险，并为希望降低进口排放的国家，以及希望减少价值链上排放（即第三范畴排放）的企业提供支持。

随着国内低碳技术不断发展，中国不应止步于制造业大国的角色，而应当积极为海外客户提供金融和技术支持，促进低碳技术的普及。这样做既有利于中国企业“走出去”，也有利于中国加快实现自身的减排目标。

为绿色项目提供资金支持

目前，中国的引进外资和对外直接投资规模均排名全球第二⁶⁶，这表明中国已跻身世界有影响力的大国之列。中国不妨利用其影响力推动对气候变化适应和减缓进行投资。

中国有条件重点发展跨境绿色项目，投资绿色金融，并鼓励其他国家思考自身基础设施对气候的影响。在此背景下，中国于 2019 年 4 月成立了“一带一路”绿色发展国际联盟⁶⁷，提供了一个政策对话和知识共享的平台⁶⁸，旨在帮助参与国改善投资活动的环境可持续性。在“一带一路”沿线前十大温室气体排放国中，只有三个国家（意大利、伊朗和俄罗斯）加入了该联盟⁶⁹。中国可以鼓励其他排放大国（例如沙特阿拉伯、印度尼西亚和南非）也加入该联盟。

中国的四大国有银行和三大政策性银行均签署了《“一带一路”绿色投资原则》，该《原则》也有希望发挥一定指导作用⁷⁰。不过，这些原则均为自愿性的，无法提升东道国的低环境标准。因此中国可以考虑将更严格、具有法律约束力的环境要求纳入交易条款，并修改商务部

的“鼓励发展”和“负面清单”的具体内容，通过明确支持可再生能源等绿色产业、剔除煤炭生产等产业的行为，向东道国发出更加强烈的绿色发展信号。

支持应对气候变化国际合作

应对气候变化将是 21 世纪 20 年代的核心挑战。全球政治领导格局不断变迁之际，世界各国都需要迅速推进产业升级转型。对中国而言，这正是承担新使命、开创新局面的良好机遇。中国不妨做出更远大、更有雄心的承诺，向世界展示其低碳转型的决心与信心。这一行为既有利于中国自身发展，也将为其他国家与地区树立榜样。中国可通过多种形式提出远见卓识的全球气候倡议。

首先，中国可以推动国际讨论，制定有效的“碳机制”和定价标准。中国可以与国际社会共同设计相关机制，例如排放交易计划和碳税制度。如果中国的碳减排成本低于发达国家，那么形成碳定价体系对中国而言将是一大优势。这也意味着中国可能需要提高碳价⁷¹，并且要考虑将该体系推广至更多的行业和省份。同时，中国也应评估“税收中性”（tax neutral）计划的潜力，即用碳税代替一部分现行税制，这样如果企业减少碳排放，需缴纳的净税款也会相应减少。

其次，中国可通过制定开发性融资标准来支持全球低碳发展。举例而言，亚洲基础设施投资银行（AIIB）可作为推动多边开发银行彼此合作的重要工具。中国亦能在世界银行或其他投资银行中起到引领作用。亚投行秉持“精益、清洁、绿色”的精神，以投资可持续基础设施、促进绿色经济发展作为其中一项宗旨⁷²。各开发银行可根据《巴黎协定》共同梳理制定更严格的标准，随后制定并实施新的能源、交通和可持续城市投资战略。

第三，中国可以更积极地参与国际性的贸易组织和协会，以提升各相关行业对气候变化的重视。目前，已有多方呼吁业界调整各自贸易协会的气候政策主张，以实现 2050 年实现净零排放的目标⁷³。中国企业可在推动行业排放转型的过程中发挥主导作用。

最后，中国不妨对其国际影响力设定更有雄心的目标。也许净零排放承诺（即到 2050 年实现温室气体净排放量为零）值得考虑⁷⁴。截至 2019 年 12 月，全球约有 80 个国家（包括几乎所有欧盟国家）做出了这一承诺。通过引领应对气候变化和推动可持续发展，中国可进一步明确其在全球战略合作伙伴关系中的角色。



后疫情时代，各国都将经历衰退之后的艰难复苏。即将来临的全球经济秩序调整可能会成为“下一个新常态”⁷⁵。但我们不能因此忽视气候变化风险议程。气候变化及其引发的自然灾害风险是切实存在的。应对气候变化将继续作为全球首要议题，倒逼各行各业升级转型。未来十年将是各国信守应对全球气候承诺的关键时期，我们必须果断采取行动。拖延越久，积累的自然风险就越高，未来的脱碳路径也就越崎岖。

附录：至 2050 年中国气候变化的自然灾害风险案例研究

下文将通过三个案例研究，从五大社会经济系统（参见报告第一部分）的角度评估中国将面临的短期自然灾害风险，具体如下。

案例研究一：极端高温将降低中国的宜居性和宜业性。

极端高温和潮湿都会严重损害人们的健康与户外工作能力。人体核心温度最佳水平为 37 摄氏度，超过此温度，人体功能就会快速受损。核心温度升高 0.2 摄氏度可损害多任务能力，升高 0.9 摄氏度可损害神经肌肉协调能力，升高 3 摄氏度可引起中暑，升高 5 摄氏度即可致死⁷⁶。

炎热气候在中国并不罕见。但气候变化却可能带来更频繁、更致命的热浪。2019 年夏天，中国气象局对长江以南部分地区发布了“高温黄色预警”。这一地区的主要城市（包括上海和成都）的气温均超过了 40 摄氏度⁷⁷。在平均湿度为 50% 的情况下，气温高于 40 摄氏度相当于“湿球”温度（兼顾温度和湿度的度量标准）高于 31 摄氏度。人类可生存的热度阈值为 35 摄氏度湿球温度。在此温度下，身处阴凉处、水分保持良好且健康的人体在 4~5 个小时后，躯干温度将上升到致命水平⁷⁸。

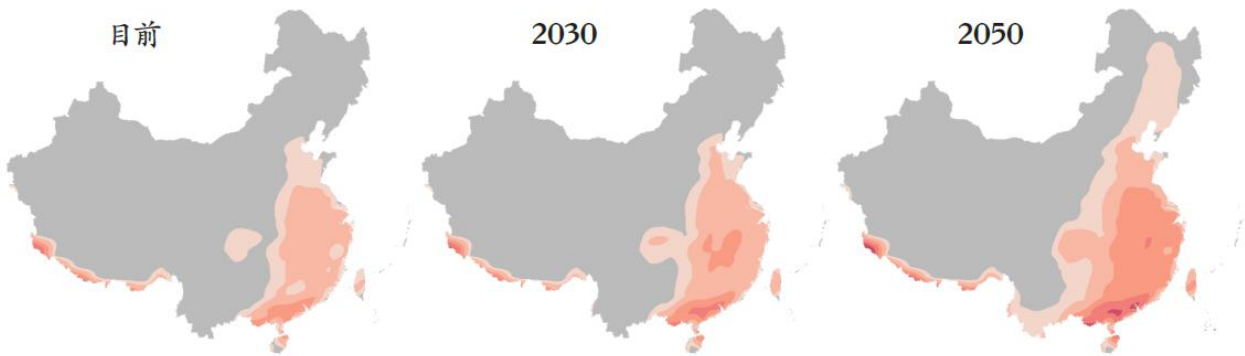
目前，中国尚无致命热浪易发地区，但气候变化或将显著增加致命热浪的发生概率。到 2030 年，中国可能有 1000 万~4500 万人面临极端高温和致命热浪的威胁。2025-2035 年间，这些人平均将有 25% 的几率至少经历一次致命热浪（未考虑空调普及因素）。到 2050 年，中国遭受极端高温和致命热浪侵袭的人数可能会攀升至 1.1 亿~2.5 亿。这些人在 2045-2055 年间至少经历一次致命热浪的概率或将增至 35%⁷⁹。温度升高自然会影影响宜居性。其中一种适应方法是提高空调普及率（目前中国的空调普及率为 60%⁸⁰），但如果无法以技术升级降低空调的排放强度，贸然增加空调装机量会适得其反。

极端高温和潮湿的环境也会损害劳动生产率和户外工作时长，因为工人必须经常休息以防中暑，并且更容易疲劳。气候变化可能影响到中国一半以上的劳动人口：中国有 26% 的农业劳动人口⁸¹ 和 28% 的工业劳动人口需要从事某种程度的户外工作。根据麦肯锡全球研究院（MGI）估计，中国每年因极端高温和潮湿而损失的户外工作时长平均比例将从目前的 4% 增至 2030 年的 6.5% 与 2050 年的 9%（见图 9）⁸²。这意味着到 2050 年，中国因此损失的 GDP 将比现在增加一倍（从 1.5% 增至 2~3%），相当于至 2050 年，平均每年有 1 万亿~1.5 万亿美元 GDP（折合人民币约 7 万亿~10.6 万亿元）面临风险⁸³。

图9

气温升高将导致工作时间损失

损失的工作时间占比¹, 百分比 ≤5 6-10 11-15 16-20 21-25 26-30 31-35 36-40 >40



¹ 工作时间损失包括劳动生产率的损失以及工时的中断, 基于一年中气候模型的系综均值计算

资料来源: 伍兹霍尔研究中心

案例研究二：洪水风险加剧，对人员、财产和基础设施造成威胁。

在民间传说中，大禹通过疏导河川、引洪灌溉，驯服了泛滥的河流。如今的中国对洪灾也不陌生。1990 年以来，洪水给中国造成了约 1 万亿美元的经济损失（折合人民币约 7 万亿元）⁸⁴。2008-2018 年间，中国每年因为洪水平均损失 900 万公顷耕地⁸⁵，760 人失去生命。

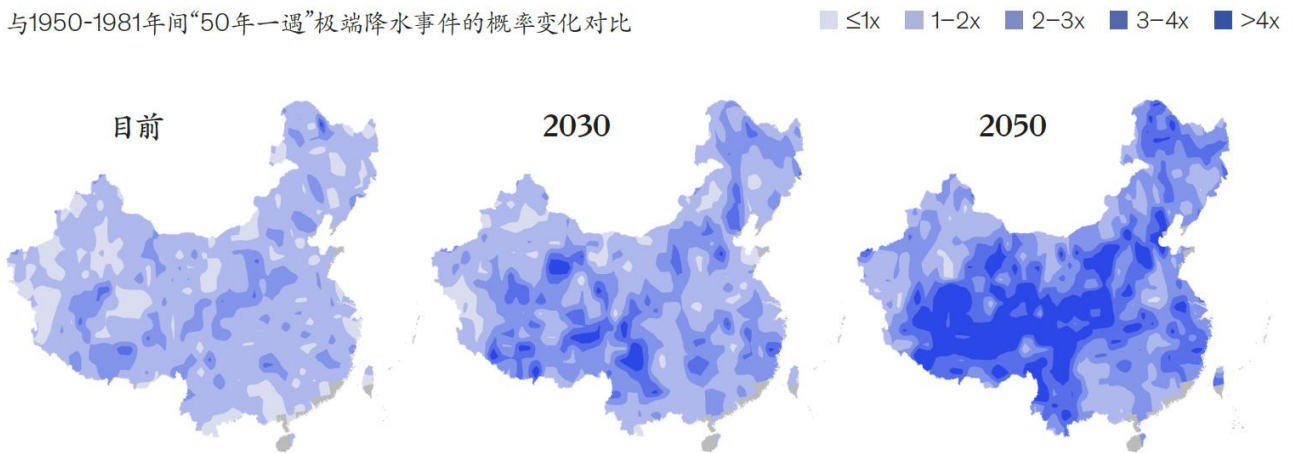
气候变化可能会使洪水泛滥更加频繁。研究估计，气候变化使 2017 年湖南洪灾的风险增加了一倍。最终导致 1160 万人的财产与生计遭到破坏，直接经济损失高达 72 亿美元⁸⁶（折合人民币约 510 亿元）。2018 年 7 月，四川盆地及西北部分地区连续遭受强降雨袭击，引发洪涝和泥石流。四川、陕西和甘肃等省份的受灾人数约达 610 万人（死亡 25 人），经济损失达 48 亿美元（折合人民币约 340 亿元）⁸⁷。

麦肯锡全球研究院（MGI）分析显示，气候变化或将进一步加剧中国的洪灾风险。中国西部某些地区的山洪暴发概率预计将增加 3~4 倍（见图 10）。到 2050 年，中国境内的五日平均降水量预计将增加 25%⁸⁸。降水增加将对长江流域和闽江流域产生显著影响⁸⁹。根据目前的防洪水平测算，2020-2050 年间，预计每年受到江河泛滥影响的人数将从 6750 万人增至 8300 万人左右⁹⁰，每年江河泛滥和山洪暴发造成的平均损失可能从目前的 350 亿美元（折合人民币约 2,500 亿元）增加到 2050 年的 510 亿美元（折合人民币约 3,600 亿元）⁹¹。

图10

“50年一遇”极端降水事件的发生概率可能上升

与1950-1981年间“50年一遇”极端降水事件的概率变化对比



资料来源：伍兹霍尔研究中心

与其他自然灾害一样，洪水也会引发严重的连锁反应。举例而言，中国的重稀土开采主要集中在东南地区，而强降水会迫使矿山和道路关闭，其发生概率将从目前的 2.5% 左右上升到 2030 年的 4% 和 2050 年的 6%⁹²。

案例研究三：气候变化可能会使农作物增产，但也会加剧产量的波动。

气候变化对农业系统的影响因地而异，但一般都会加剧农作物产量的波动。大米、小麦、玉米、大豆这 4 种作物占据了全球饮食卡路里的近一半。到 2030 年，中国的大米、小麦和玉米产量都将面临大幅下降的风险，只有大豆的减产风险相对较低（见图 11）。

由于中国的大米、玉米、小麦、大豆产量分别占全球总产量的 28%、24%、18% 和 4%，中国的产量波动可能会引发连锁反应。考虑到全球粮食储备的增加⁹³，中国的产量波动未必会引发粮食短缺，但很可能推高粮食价格。

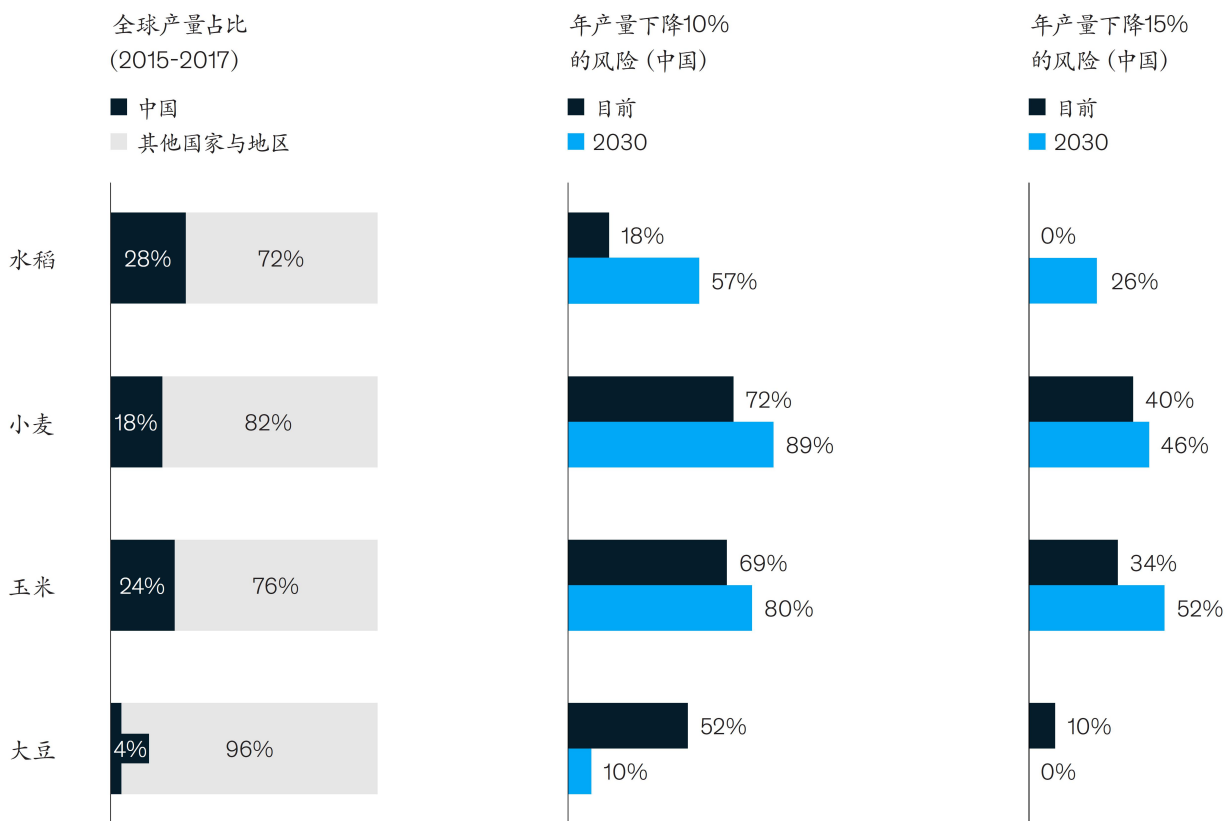
我们考察了气候条件长期变化对 4 种作物的潜在影响，发现尽管减产风险有所增加，但与 1998-2017 年相比，2050 年中国作物产量仍然有望增长 2% 左右，这将主要归功于大豆的增产⁹⁴。但大米、小麦、玉米的减产风险依然较高，此外也将面临热浪或洪水等“急性”灾害的威胁。

全国平均值并不能反映地区之间的差异。实际上，气候变化对各地区的不同影响可能会改变产粮区的分布格局。例如气温升高可能有利于华北部分地区农作物增产，而某些地区降雨增多则可能导致农作物减产。未来的农业活动将会逐渐适应新的气候格局，利用新产粮区种植条件的改善来降低产量波动加剧的影响。

图11

中国作为农业大国，未来或将面临更高的农作物减产风险

基于RCP8.5情景



资料来源: 伍兹霍尔研究中心;《南华早报》; 媒体检索

致谢

感谢国务院发展研究中心和中国发展研究基金会给予麦肯锡公司这一宝贵机会，使我们得以参与讨论气候变化及其对中国的影响。

我们在此感谢陈超、James Daniell、Paul Growald、郭瑶、卢迈、Helen Owers、王雪、余建拖与张耕田提供的深刻洞见。

我们也要感谢以下麦肯锡同仁对本研究的贡献：华强森（Jonathan Woetzel）、Hauke Engel、Ziad Haider、Doan Nguyen Hansen、Bernd Heid、Tom Hellstern、Kimberly Henderson、洪晟、阚茜、Bernhard Kotanko、Mekala Krishnan、林天惠、Glenn Leibowitz、梁敦临（Nick Leung）、Johanna von der Leyen、李晓韵、林琳、刘泰利、Linda Liu、刘猛、廖绪昌、马可荣（Connor Mangan）、Peter Mannion、Erwann Michel-Kerjan、Jean-Christophe Mieszala、Cait Murphy、倪以理（Joe Ngai）、Jesse Noffingser、Carter Powis、Josh Rosenfield、Keeton Ross、唐蓓、Daniela Vargas、汪小帆、吴昕、许浩、叶梅、张海濛，以及麦肯锡全球研究院（MGI）和可持续发展咨询业务团队。

¹ 美国国家航空航天局戈达德空间研究所表面温度分析 (NASA GISTEMP) (2019) 和 Nathan J. L. Lenssen 等, “Improvements in the GISTEMP uncertainty model,” *地球物理学研究期刊: 大气*, 2019 年 6 月, 第 124 卷, 第 12 期.

² Sippel 等 (2015), “Quantifying changes in climate variability and extremes: Pitfalls and their overcoming,” *地球物理研究快报*, 第 42 卷, 第 22 期; 麦肯锡全球研究院分析, 参考了牛津大学环境变化研究所的建议.

³ 气候科学领域的研究大量使用了跨越较低 (代表性浓度路径 2.6, 即 RCP2.6, 下同) 和较高 (RCP8.5) 二氧化碳浓度的假设情景。我们重点关注 RCP8.5 情景, 因为它描绘的高排放情景有利于我们在没有进一步脱碳举措的情况下评估自然风险。

⁴ 华强森 (Jonathan Woetzel), Dickon Pinner, Hamid Samandari, Hauke Engel, Mekala Krishnan, Brodie Boland 和 Carter Powis, “Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts” (《气候风险及应对: 自然灾害和社会经济影响》), 麦肯锡全球研究院, 2020 年 1 月。

⁵ Andrew Winston, “Is the COVID-19 outbreak a black swan or the new normal?,” *麻省理工学院史隆管理学院评论*, 2020 年 3 月 16 日; Rob Jordan, “How does climate change affect disease?,” *斯坦福地球能源与环境学院*, 2019 年 3 月 15 日。

⁶ Nick Watts, Markus Amann, Nigel Arnell, Sonja Ayeb-Karlsson, Kristine Belesova, Helen Berry 等, “The 2018 report of the Lancet Countdown on health and climate change: shaping the health of nations for centuries to come”, *柳叶刀*, 2018 年 12 月, 第 392 卷, 第 10163 期。

⁷ K. R. Smith, A. Woodward, D. Campbell-Lendrum, D. D. Chadee, Y. Honda, Q. Liu, J. M. Olwoch, B. Revich 和 R. Sauerborn, “Human health: Impacts, adaptation, and co-benefits,” 2014 年气候变化: 影响, 适应和脆弱性, 第一部分: 全球和行业影响, 政府间气候变化专门委员会第五次评估报告第二工作小组, C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea 和 L. L. White, 剑桥大学出版社, 英国剑桥, 美国纽约, 2014 年, 第 709-54 页。

-
- ⁸ Matthieu Legendre, Audrey Lartigue, Lionel Bertaux, Sandra Jeudy, Julia Bartoli, Magali Lescot, Jean-Marie Alempic, Claire Ramus, Christophe Bruley, Karine Labadie, Lyubov Shmakova, Elizaveta Rivkina, Yohann Couté, Chantal Abergel 和 Jean-Michel Claverie, “In-depth study of Mollivirus sibericum, a new 30,000-y-old giant virus infecting Acanthamoeba,” PNAS, 2015 年 9 月 112(38)E5325-5335.
- ⁹ Serge Morand, “Factors of emergence: climate change, biodiversity, land use and globalization,” *Emergence of Infectious Diseases – Risks and Issues for Societies*, 2018 年
- ¹⁰ Kaw Bing Chua, Beng Hui Chua and Chew Wen Wang, “Anthropogenic deforestation, El Niño and the emergence of Nipah virus in Malaysia,” *Malaysian J Pathol*, 2002; 24(1) : 15-21
- ¹¹ Stephen Eisenhammer, “Cholera cases jump to 138 in Mozambique’s Beira after cyclone,” 路透社, 2019 年 3 月 29 日, <https://www.reuters.com/article/us-africa-cyclone-cholera/mozambique-confirms-138-cholera-cases-after-cyclone-strikes-beira-idUSKCN1RA0UG>
- ¹² Kimberly Henderson, Matt Rogers, Bram Smeets 和 Christer Tryggestad, “Climate math: What a 1.5-degree pathway would take,” 麦肯锡季刊, 2020 年 4 月.
- ¹³ 李争粉, “《第三次气候变化国家评估报告》发布”, 中国气候变化信息网, 2015 年 11 月 23 日, <http://www.ccchina.org.cn/Detail.aspx?newsId=56949>
- ¹⁴ 致命热浪定义为连续三日每日最高湿球温度高于34摄氏度, 而湿球温度是指恒压条件下一团空气可通过蒸发冷却的最低温度。选择这一阈值的理由在于, 在通常的定义下, 人类可生存热度的阈值为35摄氏度湿球温度, 而热岛效应强烈的大城市可使34摄氏度湿球温度的热浪超过35摄氏度阈值。在这种条件下, 阴凉处水分保持良好且健康的人体在曝晒四五个小时后, 躯干温度将上升到致命水平。这些预测受制于未来大气气溶胶表现和城市热岛或冷岛效应相关的不确定性。
- ¹⁵ 风险值的计算基于“期望值”, 即面临风险的概率加权值。
- ¹⁶ 基于自然灾害风险工程师访谈。受影响人数是指因洪水而丧失生产力与生计的人数。2050 年的人数预估可能会上下浮动 2500 万。
- ¹⁷ 基于自然灾害风险工程师访谈。估算损失不包括抗洪损失。
- ¹⁸ 缺水度的计算基于年需水量占年供水量的比例。分析时为了单独衡量气候变化的影响, 我们假设需水量不随时间发生变化。出于对预测鲁棒性的考虑, 我们排除了干旱、低降水地区缺水度的预测。
- ¹⁹ Chai Qimin, Fusha 和 Wen Xinyuan 等, “Financial needs: Implementing China’s nationally determined contribution to address climate change by 2030,” 中国人口·资源与环境, 2019, 29(4): 1–9.
- ²⁰ 21 世纪可再生能源政策网络(REN 21), “第五章: 投资流向,” 2019 可再生能源全球现状报告, 2019 年 6 月, https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_05/chapter_05/
- ²¹ Patrick Hertzke, Nicolai Müller, Stephanie Schenk 和 Ting Wu, “The global electric-vehicle market is amped up and on the rise,” 麦肯锡公司, 2018 年 5 月.
- ²² “Our leadership,” 全球适应委员会, 2020 年.
- ²³ 温室气体可根据全球变暖潜能值 (GWP) 进行比较。GWP 衡量在给定时期内大气中一吨气体相对于一吨二氧化碳将吸收多少能量。GWP 是针对特定时间范围而计算的数据。由于每种温室气体都会在大气中保留特

定时间，因此其 GWP 将随着计算中使用的时间跨度而变化。一吨甲烷在 100 年内的 GWP 为 28，在 20 年内的 GWP 为 84。我们的分析基于 20 年 GWP 而计算。

- ²⁴ 中国的人均二氧化碳排放量为 7.5 吨，而加拿大为 15.2 吨，美国为 16.5 吨。根据美国田纳西州橡树岭国家实验室环境科学部二氧化碳信息分析中心提供的最新数据（2014 年）。
- ²⁵ Jillian Ambrose, “China's appetite for coal power returns despite climate pledge,” *卫报*, 2019 年 11 月 20 日, <https://www.theguardian.com/world/2019/nov/20/china-appetite-for-coal-power-stations-returns-despite-climate-pledge-capacity>.
- ²⁶ 艾伦·麦克阿瑟基金会, “The Circular Economy Opportunity for Urban & Industrial Innovation in China,” 2018 年, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/chinareport>
- ²⁷ 艾伦·麦克阿瑟基金会, “Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change,” 2019, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/completing-the-picture-climate-change>
- ²⁸ Jason Horowitz, “Italy's Students Will Get a Lesson in Climate Change: Many Lessons, in Fact,” *纽约时报*, 2019 年 11 月 5 日, www.nytimes.com/2019/11/05/world/europe/italy-schools-climate-change.html.
- ²⁹ “50 Climate solutions from cities in the People's Republic of China: Best practices from cities taking action on climate change,” 亚洲开发银行, 2018 年 11 月, adb.org.
- ³⁰ 麦肯锡能源洞见全球电力模型 2020 年预测。
- ³¹ Echo Xie, “Phasing out coal power and meeting climate goals by 2050 ‘totally doable’ for China,” 2020 年 1 月 8 日, <https://www.scmp.com/news/china/politics/article/3045078/phasing-out-coal-power-and-meeting-climate-goals-2050-totally>
- ³² Cui, R., N. Hultman, K. Jiang, H. McJeon, S. Yu, D. Cui, M. Edwards, A. Sen, K. Song, C. Bowman, L. Clarke, J. Kang, F. Yang, J. Yuan, W. Zhang, “A High Ambition Coal Phaseout in China: Feasible Strategies through a Comprehensive Plant-by-Plant Assessment,” 美国马里兰大学全球可持续发展中心, 第 37 页。
- ³³ Patrick Hertzke, Nicolai Müller, Stephanie Schenk 和 Ting Wu, “The global electric-vehicle market is amped up and on the rise,” 麦肯锡公司, 2018 年 5 月。
- ³⁴ Hydrogen Council, “Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition,” 2017 年 11 月。
- ³⁵ “我国成为世界第一产氢大国 氢能产业初具雏形,” *经济日报*, 2019 年 7 月 8 日, http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/08/content_5407075.htm
- ³⁶ 《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》, 中国氢能联盟, 2019 年 7 月。
- ³⁷ “我国碳捕集、利用和封存现状评估和发展建议,” *气候战略研究简报*, 2017 年 7 月, 第 24 卷, <http://www.ncsc.org.cn/yjcg/zlyj/201804/P020180920508768846809.pdf>
- ³⁸ Kai Jiang, Peta Ashworth, Shiyi Zhang, Xi Liang, Yan Sun 和 Daniel Angus, “China's carbon capture, utilization and storage (CCUS) policy: A critical review,” *可再生能源和可持续能源评论*, 第 119 卷, 2020 年 3 月, 109601, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109601>

-
- ³⁹ Andrés Viña, William J. McConnell, Hongbo Yang, Zhenci Xu 和 Jianguo Liu, “Effects of conservation policy on China’s forest recovery,” *科学进展*, 2020 年 3 月 18 日, 第二卷, 第三期, e1500965, DOI: 10.1126/sciadv.1500965.
- ⁴⁰ Mikaela Weisse 和 Elizabeth Dow Goldman, “The World Lost a Belgium-sized Area of Primary Rainforests Last Year,” *World Resources Institute Blog*, 2019 年 4 月 25 日, <https://www.wri.org/blog/2019/04/world-lost-belgium-sized-area-primary-rainforests-last-year>
- ⁴¹ 中国能源团队, “Does China dominate global investment?” *China Power*. 2016 年 9 月 26 日. 更新于 2020 年 1 月 27 日. <https://chinapower.csis.org/china-foreign-direct-investment/>
- ⁴² Charlie Campbell, “China’s Greening of the Vast Kubuqi Desert is a Model for Land Restoration Projects Everywhere,” *时代周刊*, 2017 年 7 月 27 日.
- ⁴³ 基于麦肯锡对非二氧化碳温室气体排放路径的分析。该分析采用了 20 年 GWP 值, 结合了来自 IPC AR5 的气候反馈信息, 并假设排放量呈线性轨迹降低。
- ⁴⁴ 该数字来自政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 于 2019 年提交的温室气体清单。该清单提出的排放量低于以前的清单。
- ⁴⁵ Aleksandra Arcipowska, Emily Mangan, You Lyu 和 Richard Waite, “5 Questions About Agricultural Emissions, Answered,” *世界资源研究所博客*, 2019 年 7 月 29 日, <https://www.wri.org/blog/2019/07/5-questions-about-agricultural-emissions-answered>.
- ⁴⁶ Justin Ahmed, Elaine Almeida, Daniel Aminetzah, Nicolas Denis, Kimberly Henderson, Joshua Katz, Hannah Kitchel 和 Peter Mannion, “Agriculture and climate change: reducing emissions through improved farming practices,” 麦肯锡公司, 2020 年 3 月.
- ⁴⁷ “Grain: World Markets and Trade,” 美国农业部, 2020 年 3 月, <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf>.
- ⁴⁸ Sass 等, “CH4 emissions from rice agriculture,” 2003 年, ipcc-nggip.iges.or.jp.
- ⁴⁹ Bruce Linquist 等, “Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis,” *Science Direct*, 第 135 卷, 2012 年 8 月 30 日, 第 10-21 页, sciencedirect.com.
- ⁵⁰ Briony Harris, “China cut fertilizer use and still increased crop yields. This is how they did it,” *世界经济论坛*, 2018 年 3 月 26 日, <https://www.weforum.org/agenda/2018/03/this-is-how-china-cut-fertilizer-use-and-boosted-crop-yields/>
- ⁵¹ V. Ricciardi 等, “How much of the world’s food do smallholders produce?,” *Global Food Security*, 第 17 卷, 2018 年; Sarah K. Lowder, Jakob Skoet 和 Terri Raney, “The number, size, and distribution of farms, smallholder farms, and family farms worldwide,” *World Development*, 87 (2016): 16-29.
- ⁵² “China takes a step closer to green agriculture,” 新华社, 2017 年 2 月 28 日, http://english.www.gov.cn/state_council/ministries/2017/02/28/content_281475580571930.htm.

-
- ⁵³ 《经合组织农业统计数据: 经合组织-粮农组织 2019 农业展望》, <https://data.oecd.org/agroutput/meat-consumption.htm>.
- ⁵⁴ G. Janssens-Maenhout 等, “EDGAR v4.3.2 global atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970–2012,” *Earth Syst. Sci. Data*, 2017 年, 第 1-55 页.
- ⁵⁵ Bryna Lipper, “How to Develop a Resilience Strategy,” 全球 100 座韧性城市, 2016 年 3 月 10 日, <http://www.100resilientcities.org/how-to-develop-a-resilience-strategy/>.
- ⁵⁶ “Lower Manhattan Coastal Resiliency,” 纽约市经济发展局 (New York City Economic Development Corporation), 2020 年, <https://edc.nyc/project/lower-manhattan-coastal-resiliency>
- ⁵⁷ Michael Della Rocca, Tim McManus 和 Chris Toomey, “Climate resilience: Asset owners need to get involved now,” 麦肯锡公司, 2019 年 1 月.
- ⁵⁸ “National Institute of Building Sciences issues new report on the value of mitigation,” National Institute of Building Sciences, 2018 年 1 月 11 日, nibs.org.
- ⁵⁹ Arend Kolhoff 和 Thijs van den Berg, “ESIA for port development in South Africa,” 2017 年, http://www.commissiener.nl/docs/mer/diversen/climate_case_4_-_esia_for_port_development_in_south_africa.pdf.
- ⁶⁰ “Directive 2014/52/EU of the European Parliament and of the Council,” 欧洲理事会, 2014 年 4 月 24 日.
- ⁶¹ “On the adaptation to climate change requirements into the environmental impact assessment of construction project,” <http://shkx.qks.cqut.edu.cn/newsinfo.aspx?id=298>.
- ⁶² H. Kunreuther 和 E. Michel-Kerjan, “At War with the Weather: Managing large-scale risks in a new era of catastrophes,” 麻省理工学院出版社, 2011 年.
- ⁶³ E. Michel-Kerjan 和 JB Taglioni, “Insuring hurricanes: Perspectives, gaps and opportunity after 2017,” 麦肯锡公司, 2017 年.
- ⁶⁴ 曲向军, 毕强, 黄志坚, 薛珏, 《广阔天地, 大有作为——布局中国农村保险市场》, 麦肯锡公司, 2018 年 5 月.
- ⁶⁵ “China Insurance Sector 2019 Q1,” *EMIS*, 2019 年.
- ⁶⁶ 联合国贸易和发展会议 (2019b). “World Investment Report 2019: Special Economic Zones. United Nations publication,” 销售编号. E.19.II.D.12.
- ⁶⁷ Hou Liqiang, “China officially launches green development coalition under BRI,” 中国日报, 2019 年 4 月 25 日, <https://www.chinadaily.com.cn/a/201904/25/WS5cc181c5a3104842260b8626.html>
- ⁶⁸ “The Belt and Road Initiative International Green Development Coalition (BRIGC),” 联合国环境规划署, <https://www.unenvironment.org/regions/asia-and-pacific/regional-initiatives/belt-and-road-initiative-international-green>
- ⁶⁹ Lachlan Carey 和 Sarah Ladislaw, “Chinese Multilateralism and the Promise of a Green Belt and Road,” 美国国际战略研究中心, 2019 年 11 月.

- ⁷⁰ Yichen Shi, Jie Bao 和 Yujie Ren, "BRI Cooperation: Mainstreaming ESG Investments," *Green Belt and Road Initiative Center*, 2019 年 7 月 2 日.
- ⁷¹ 与欧盟、韩国、新西兰等国家和地区相比, 中国碳排放交易计划下的碳定价仍处于较低水平(价格在 1.6-8.9 美元之间)。定价为名义价值, 基于 2018 年 4 月至 2019 年 4 月之间观察到的平均值计算。Sébastien Postic 和 Clément Métivier, "Global Carbon Account 2019", 气候经济研究所(Institute for Climate Economics), 2019 年 5 月.
- ⁷² Zhang Yue, "AIIB: 'lean, clean, green'," *中国日报*, 2015 年 10 月 22 日, https://www.chinadaily.com.cn/kindle/2015-10/22/content_22255236.htm
- ⁷³ Mike Scott, "Big Business Called Out For Using Trade Groups To Fight Climate Action," 2019 年 10 月 18 日, *福布斯*, <https://www.forbes.com/sites/mikescott/2019/10/18/big-business-called-out-for-using-trade-groups-to-fight-climate-action/>
- ⁷⁴ Energy Transition Commission, "China 2050 A Fully Developed Rich Zero-Carbon Economy," 美国落基山研究所.
- ⁷⁵ Kevin Sneader 和 Shubham Singhal, "Beyond coronavirus: The path to the next normal"(《疫情过后: 通往新常态之路》), 麦肯锡公司, 2020 年 3 月.
- ⁷⁶ P. A. Hancock 和 Ioannis Vasmatazidis, "Human occupational and performance limits under stress: The thermal environment as a prototypical example," *Ergonomics*, 1998 年, 第 41 卷, 第 8 期.
- ⁷⁷ Cappucci, M. (2019 年). *Exceptional heat wave on tap for China*, <https://www.washingtonpost.com/weather/2019/08/23/exceptional-heat-wave-tap-china/>
- ⁷⁸ Steven C. Sherwood 和 Matthew Huber, "An adaptability limit to climate change due to heat stress," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010 年 5 月 25 日, 第 107 卷, 第 21 期; 使用生理预测的热应变 (PHS) 模型, 假设衣服轻便、阈值确定; Jacques Malchaire 等, "Development and validation of the predicted heat strain model," *Annals of Occupational Hygiene*, 2001 年 3 月, 第 45 卷, 第 2 期.
- ⁷⁹ 三个时间段里的气候状态如下: "目前" 定义为 1998-2017 年之间的平均状况; "2030 年" 指 2021-2040 年的平均值; "2050 年" 指 2041-2060 年的平均值。2030 年和 2050 年暴露在极端高温和致命热浪环境下的人口数基于《联合国世界人口展望》和《联合国世界城市化展望》得出的人口预测范围, 并根据高低变量以及基于城市和总人口的增长率进行调整。计算方式大致如下: 假定 X 百分比的年度概率适用于以 2030 或 2050 年为中心的十年中的每一年。我们首先计算该十年中不发生热浪的累积概率, 即 $1 - X^{10}$ 。热浪在十年中至少发生一次的累积概率为 1 减去该数。请注意, 如果在接下来的十年中大气气溶胶浓度没有降低, 则致命热浪的发生概率也会降低, 因为目前在 CMIP5 总体全球气候模型中, 大气气溶胶数据并不准确(尤其是黑碳气溶胶的数据)。
- ⁸⁰ "The Future of Cooling in China," IEA, 巴黎, 2019 年.
- ⁸¹ MOHRSS, "Distribution of The Workforce across Economic Sectors in China from 2008 to 2018," *Statista*, <https://www.statista.com/statistics/270327/distribution-of-the-workforce-across-economic-sectors-in-china/>

⁸² 损失工时根据 John P. Dunne 等人的计算方式得出 (“Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming,” *自然气候变迁*, 2013 年 2 月, 第 3 卷), 并使用 Josh Foster 等人的数据 (“A new paradigm to quantify the reduction of physical work capacity in the heat,” *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2019 年 6 月, 第 51 卷, 第 6 册); 存在风险暴露的行业仅包括农业、采矿和采石业等户外行业, 以及空调普及率较低的室内行业, 包括制造业、酒店业和交通运输业。

⁸³ 该范围的下限假设目前的产业结构持续存在, 上限则基于 HIS 公司的 “Markit Economics and Country Risk” 预测对产业转型和 GDP 增长的预测数据。具体金额的计算是将户外行业损失的工时数乘以这些行业的 GDP (假设这种共识性预测未考虑气候变化对 GDP 造成的损失)。我们使用输入输出表中的后向乘法器计算了连锁效应。

⁸⁴ 指因洪水造成的农业、林业、畜牧业和渔业、工业、基础设施、运输以及水利设施损失。

⁸⁵ “受损” 指因洪水造成农作物减产 10% 或以上; “严重受损” 指因洪水造成农作物减产 30% 或以上。当同一地块的季节性农作物遭受了一次以上的洪灾时, 仅统计最严重的一次损失。

⁸⁶ 根据洪灾治理专家的访谈, 反映了中国政府对最终损害评估的最新信息。参考 Yin Sun 等, “Anthropogenic influence on the heaviest June precipitation in southeastern China since 1961,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019 年 1 月, 第 100 卷, 第 1 期。

⁸⁷ “Resilient City in China,” 城市中国计划, 2019 年。

⁸⁸ Peng, S., Ding, Y., Liu, W., 和 Li, Z., “1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017,” *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1931-1946, <https://doi.org/10.5194/essd-11-1931-2019>, 2019.

⁸⁹ 这些是主要的水利投资地区, 主要是由于地区降水量的大幅增加。

⁹⁰ 根据自然灾害风险工程师访谈。洪水模型将洪水标准设为 2019 年的水平 (假设该标准不发生变化), 并指洪水期间财产受损和丧失生计的人数 (实际数字与估测数字可能有 2500 万人的浮动差)。

⁹¹ 根据自然灾害风险工程师的访谈。该估测并未考虑额外减灾措施的影响。

⁹² 伍兹霍尔研究中心分析。需要指出的是, 评估发现, 对近期极端降水事件的区域性预测受自然变化影响极高, 尤其是低纬度地区。因此三十年的预测比十年的预测更精准。此外, 最近从观测记录中获得的证据表明, 许多地区的气候模型可能会低估降水量的变化。有关相关不确定性的更多信息, 参见 Ben Kirtman 等, “Near-term Climate Change: Projections and Predictability,” *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, 第一工作组对政府间气候变化专门委员会第五次评估报告的意见, Thomas F. Stocker 等编辑, 纽约: 剑桥大学出版社, 2014 年。

⁹³ 目前的库存周转率颇高, 大约在使用量的 30%。库存周转率是指某时间段的出库总金额 (总数量) 与该时间段库存平均金额 (或数量) 之比。

⁹⁴ 这些结果基于 AGMIP 模型计算得出, 纳入了对二氧化碳施肥效应的考虑。