

气候变化 风险评估及治理 (2021)

——来自中英合作研究的洞见

巢清尘、郭江汶、Nigel Arnell、齐绍洲、田展、王文涛、冯爱青、王珂英、张继宏



气候变化风险评估和治理（2021）

— 来自中英合作研究的洞见

2021 年 11 月

编写组成员

本报告由中国国家气候中心、英国皇家国际事务研究所（Chatham House）、英国雷丁大学、湖北经济学院、南方科技大学、中国 21 世纪议程管理中心、武汉大学、深圳气象局以及中国疾病预防控制中心等单位的专家团队负责研究和撰写。

执行摘要

巢清尘（中国国家气候中心）

郭江汶（英国皇家国际事务研究所（Chatham House））

第一章 气候变化对英国的风险

郭江汶（英国皇家国际事务研究所（Chatham House））

Nigel Arnell（英国雷丁大学）

第二章 气候变化对中国的直接风险

主要作者：

巢清尘（国家气候中心）

冯爱青（国家气候中心）

田展（南方科技大学）

王文涛（中国 21 世纪议程管理中心）

徐影（国家气候中心）

韩振宇（国家气候中心）

杨红龙（深圳国家气候观象台）

张丽（深圳国家气候观象台）

郑惠泽（中国 21 世纪议程管理中心）

李宇航（中国 21 世纪议程管理中心）

贡献作者：

刘敏（武汉区域气候中心）

董文杰（中山大学）

王雪梅（暨南大学）

第三章 气候变化对中国的系统性风险

主要作者：

齐绍洲（碳排放权交易湖北省协同创新中心；武汉大学气候变化与能源经济研究中心）

王珂英（湖北经济学院低碳经济学院，碳排放权交易湖北省协同创新中心）

张继宏（武汉大学气候变化与能源环境研究中心）

孙永平（湖北经济学院低碳经济学院，碳排放权交易湖北省协同创新中心）

刘起勇（中国疾病预防控制中心传染病预防控制所）

刘威（武汉大学气候变化与能源经济研究中心）

郭亚菲（中国疾病预防控制中心传染病预防控制所）

贡献作者：

孙铖（湖北经济学院低碳经济学院，碳排放权交易湖北省协同创新中心）

彭莎（湖北经济学院低碳经济学院，碳排放权交易湖北省协同创新中心）

王鹤樟（武汉大学气候变化与能源经济研究中心）

刘禹（武汉大学气候变化与能源经济研究中心）

牛彦麟（中国疾病预防控制中心传染病预防控制所）

岳玉娟（中国疾病预防控制中心传染病预防控制所）

鸣谢

非常感谢英国外交和联邦事务部通过繁荣基金资助该项目。

还要感谢以下组织为此项工作提供了直接支持：英国皇家国际事务研究所（Chatham House）、中国国家气候变化专家委员会、英国气候变化委员会。

前 言

2015 年，来自英国、中国、印度和美国的专家共同发表了《气候变化：风险评估》报告，提出了气候变化风险评估的新模式。同年，中国国家气候变化专家委员会和英国气候变化委员会签署《气候变化风险评估和研究双边合作协议》，由此就全球温室气体排放的未来途径、全球气候对温室气体排放的响应带来的直接风险、以及气候变化与复杂人类系统相互作用产生的间接风险开展合作研究，并于 2018 年完成《中英合作气候变化风险评估 - 气候风险指标研究》。

在中国气候变化专家委员会和英国气候变化委员会的指导下，在以中英合作的第一阶段和第二阶段（2013-2019 年）开展的风险指标和风险评估工作的基础上，该项目目前进入第三阶段。第三阶段项目(2019-2021 年)包括四个相互关联的工作组，分别研究排放风险，直接气候风险，系统性气候风险以及将气候风险纳入中国和国际治理框架中。第三阶段项目汇集了来自中国和英国的科学家和政策研究团队，其中包括英国皇家国际事务研究所（Chatham House），清华大学，牛津大学，中国国家气候中心，英国雷丁大学，湖北经济学院和英国第三代环保组织（E3G）等英国和中国的十多个机构。在气候变化的直接风险和系统性风险研究，此次合作侧重于对中国次区域和城市的气候风险，包括长江经济带、粤港澳大湾区等，以及深圳、武汉等城市。国际部分主要侧重在对英国的风险研究。

报告发布之时正值在英国召开的联合国第 26 次缔约方大会刚刚结束，大会最终通过了《格拉斯哥气候协议》，也让被称作“人类扭转气候变化最后机会”的大会取得了一定进展。本报告所提供的更多信息将有助于让决策者更好地了解人类所面临的气候风险，更好地为增强自然系统和社会经济系统的气候韧性而努力。

目录

执行摘要	1
第一章 气候变化对英国的风险	5
1.1 英国直接风险评估简介	5
1.2 英国的气候变化风险	7
1.3 英国直接风险概述	11
1.3.1 洪水	12
1.3.2 极端高温	12
1.3.3 干旱	13
1.3.4 风暴	13
1.3.5 野火	13
1.3.6 气候资源变化	13
1.4 英国直接风险概述	14
1.5 关键信息和结论	18
参考文献	20
第二章 气候变化对中国的直接风险	21
2.1 引言	21
2.2 中国的气候变化风险	22
2.3 重点区域气候变化风险	23
2.3.1 长江经济带	23
2.3.2 粤港澳大湾区	28
2.3.3 青藏高原	33
2.3.4 黄河流域	36
2.4 典型城市的气候变化风险：以深圳为例	39
2.5 政策和实践	44
2.5.1 政策颁布与实施	44
2.5.2 典型实践案例：深圳气候风险的应对模式	45
2.6 关键信息和建言	46
2.6.1 关键信息	46
2.6.2 中国和重点区域的气候风险应对建议	46
2.6.3 典型城市 - 深圳的气候风险应对建议	47
参考文献	49

第三章 气候变化对中国的系统性风险	51
3.1 引言	51
3.2 长江经济带和武汉市气候变化系统性风险	52
3.2.1 长江经济带气候变化系统性风险评估	52
3.2.2 武汉市气候变化系统性风险	54
3.3 关键信息和建言	65
3.3.1 关键信息	65
3.3.2 建言	65
参考文献	67

执行摘要

一、 引言

气候变化是当今人类面临的最严重的全球性环境问题，也是最具挑战的风险管理问题。气候系统的变化首先对自然生态系统产生广泛影响，进而影响到社会经济系统，导致人类社会发展面临更大的风险。根据世界经济论坛近期发布的2021年《全球风险报告》，从未来十年风险发生的概率和影响看，以气候变化为代表的的环境风险是首要风险。

2019年12月-2021年11月，来自中国和英国的专家学者共同合作，重点研究和评估了三类气候风险：温室气体排放路径及其风险、气候变化导致的直接风险，以及对复杂人类系统的系统性风险，并就气候风险如何纳入国家和国际治理框架进行了探讨。排放风险将单独编制报告，本报告主要针对后两类风险所述的研究结论，为决策者认识英国和中国的气候风险提供信息，以便更好地加强适应气候变化政策制定和行动开展。

二、 关键研究成果

根据IPCC第六次评估报告第一工作组报告，到本世纪末，全球地表温度将比工业革命前上升 $1.0^{\circ}\text{C}\sim 5.7^{\circ}\text{C}$ 。未来20年，全球温升将达到或超过 1.5°C 。过去和未来温室气体排放造成的许多气候系统变化，特别是海洋、冰盖和全球海平面发生的变化，在世纪到千年尺度上是不可逆的。全球许多区域出现极端事件并发的概率将进一步增加，高温热浪和干旱并发，极端海平面和强降水叠加造成的复合型洪涝事件将加剧。在研究所涉及的35个气候影响因子中，全球几乎所有区域未来都将经历至少10个以上因子的变化。到2100年，一半以上的沿海地区所遭遇的百年一遇极端海平面事件将会每年都发生，叠加极端降水将造成洪水更为频繁。特别是，不排除发生类似南极冰盖崩塌、海洋环流突变、森林枯死等气候系统临界要素的引爆，一旦发生将对地球生存环境带来重大灾难。

越来越多的证据表明，未来在英国各种极端天气气候事件将进一步增加增强。到2050年代伴随着高排放，英国北部和西部30年的日降雨量增加了30%以上。极端高温的风险在英格兰比其他地方更大。尤其是在东南部，影响涉及到健康、基础设施和自然环境。水资源稀缺和沉降的可能性也在恶化。沿海和内陆的洪水、风暴、雷电和大风将是整个英格兰面临的较为严重的气候风险。北爱尔兰地区除了自然生态系统面临的风险外，由于气候变化导致的对基础设施网络、运输、健康、文化遗产的影响都是重要风险。洪水对民众、社区和建筑物的影响是苏格兰最严重的风险之一，对企业造成的经济损失也最高。同时，夏季缺水尤其是民用供水的问题日趋严重也是苏格兰面临的重要气候风险。威尔士除面临各种极端天气气候事件外，海平面上升、沿海洪水和侵蚀对沿海企业的影响不容小觑。

中国是全球气候变化的高影响地区，进一步的温升将使高温热浪、暴雨洪涝、干旱等极端灾害发生的时间、强度、频率、区域特征呈显著变化，中等排放情景下，平均高温热浪发生天数在本世纪中期将增加7-15天，平均极端降水在2030

年左右将从目前 50 年一遇变为 20 年一遇。未来长江经济带的四川盆地、中游和下游流域都可能面临严重的高温和极端降水灾害风险，将导致重大人员和经济损失。粤港澳大湾区亦可能成为我国未来高温致死率增加幅度最大的地区之一，同时会加剧大湾区登革热与疟疾等虫媒传染病的流行传播。暴雨内涝的风险增加，在中等排放情景下，到 2100 年左右南海海平面将上升 34-79cm，比全球平均高出 20%~30%。在海平面上升和降水分布改变的共同作用下，珠江口咸潮风险增加，威胁澳门和珠海等地区枯水期的供水安全。中国的青藏高原地区是气候变化最为敏感的地区，在中等排放情景下，2050 年，青藏高原年平均气温将升高约 1.5°C，极端降水明显增加，横断山区强降水日数将增加 2-4 天。冰冻圈在本世纪都将呈持续退缩状态，特大灾害和巨灾发生的频率增大，加剧气候与生态环境灾害复合风险。2050 年前后，黄河流域年平均气温升温幅度在整个区域大体呈由东向西逐渐增大的趋势，降水总体增加。流域内积雪的减少将使得春季融雪径流减少或消失，对河川径流的调节能力将显著减弱，春旱将日趋严重，生态环境将面临严峻风险。深圳到 2050 年，高温日数将增加 26 天，强降水量和极端强降水量的变化呈现年代际波动。

对于系统性风险，在长江经济带，高温热浪的中高到高风险地区在下游地区，暴雨洪涝的中到高风险在中游和下游地区。武汉市健康脆弱性整体空间分布表现为中心城区高，周边城区低；在周边城区中，西南部要高于东北部。预计到本世纪末，高排放情景下的热相关死亡率预计为中等排放情景下的 2 倍左右，其中，呼吸系统疾病患者、女性和老年人对温度升高最为脆弱。在中等排放情景和高排放情景下，2030 年、2050 年、2100 年由于高温导致电力短缺引起的平均损失分别是 9.05 亿元与 14.42 亿元，21.03 亿元与 34.17 亿元，66.49 亿元与 110.7 亿元。如果维持在 2020 年武汉排水能力不变的前提下，2100 年强降水情景下的淹没区域面积将比 2020 年扩大 76.64%。武汉市的间接风险最大的经济部门分别为交通设备运输业、金融业、建筑业、公路交通运输业、批发和零售业、租赁和商务服务业。由于不同社会群体暴露于气候风险存在差异，气候变化可能会导致某些群体暴露于气候变化风险的强度较大，从而产生气候脆弱人群，引发基于气候风险的社会不平等、社会排斥和应对气候变化的包容性问题，导致气候变化的社会性风险。

三、 政策建言

（一）高度重视气候变化风险，将其纳入国家总体安全和风险评估中

政府需要更加重视应对气候变化风险。作为非常规安全风险，直接和系统性的气候变化影响应纳入国家风险评估。应对气候变化影响和实施低碳发展应被视为经济和社会发展战略的重要组成部分。决策者需要充分考虑应对未来在所有排放情景下不断增加的直接风险和系统风险，有针对性地开展不同区域和领域的气候变化风险评估，将应对极端气候灾害和气候风险作为适应气候变化的核心内容，强化极端气候灾害风险防范措施。开展重点区域、特色产业的气候变化影响评估，加强与极端气候事件和灾害相关的农业、水资源、生态，以及健康、基础

设施、社会发展等方面的风险应对，提高社会经济系统韧性。

（二）提高气候风险的综合治理能力

完善工作机制，加强长远统筹。颁布国家、地区和行业的适应气候变化战略规划，气象、农业、水资源、生态、健康、交通以及经济等部门按各自职责分工合作。加强气候风险监测、预警和评估，重点关注与极端气候事件和灾害相关的农业、水资源风险加剧、生态和生物多样性安全风险升级、健康安全风险加大等问题的应对，保障国家粮食安全、水资源安全、人民健康安全。加强气候变化适应型社会建设，提高社会经济系统韧性。加强气候变化对金融市场、全球和国家粮食系统及其供应链、卫生系统、重要基础设施系统的风险评估，充分了解气候引发的不同系统风险的特征，开发风险管理平台。

（三）加强国际合作，提高决策者掌控长期和小概率高风险的把控能力

即使全球提出碳中和目标的国家都能兑现承诺，本世纪末的全球平均温度仍有可能上升 2°C 以上，长期的风险仍将持续。同时一些小概率高风险的事件，如格陵兰冰盖加速融化导致海平面更快速上升并减缓大西洋温盐环流，给全球带来深远影响。决策者需要立足最坏的可能性去做打算，以确保其决策可以最终抵御不利影响。风险虽然有局地的特征，但气候适应行动需要全球的共同合作，世界需要通过确保公共部门的直接投资以及克服或消除私营部门的参与障碍，来扩大气候适应融资的规模。

（四）建立气候风险的定期监测和评估框架

开发和完善标准化的气候风险指标体，可以更新风险指标，以反映科学知识和专家判断的重大变化，这些变化涉及气候敏感性以及一般气候变量（如温度或海平面上升）与特定影响和极端事件发生概率之间的关系。可以更新风险指标以反映人口暴露和脆弱性的变化。这些趋势将显示适应挑战是增加还是减少，这可能会为发展优先事项和投资决策提供信息。获取气候、气候相关风险和损失数据的设施，开发地球系统模型和气候变化影响和风险评估工具，构建适用于气候影响和风险评估的指标，加强气候变化对社会经济系统和系统风险影响的认识。

第一章 气候变化对英国的风险

1.1 英国直接风险评估简介

英国面临着广泛的天气和气候风险，近年来洪水、热浪、干旱、风暴和野火频繁发生，同时也发生了一些极端寒冷事件，特别是在 2018 年。

英国具有以气候变化法案（2008 年）为基础的评估气候变化风险和适应的立法框架。该法案的主要目的是通过制定法定碳预算和目标来减少温室气体排放，同时也对政府规划和适应气候变化提出要求。政府于 2013 年制定了第一个国家适应计划 (NAP)，2018 年制定了第二个，第三个目前正在制定中。NAP 确定了政府为推进适应和复原力需要采取的一些行动，还包括一些《气候变化法》要求私营部门组织报告他们适应进展的行动。这些组织主要关注公共服务和基础设施的提供。

NAP 计划由气候变化风险评估 (CCRA) 提供信息，气候变化法案也要求政府承担评估(Warren 等,2018)。第一次 CCRA 于 2012 年发布,第二次于 2017 年发布,用于支持第三个评估的证据报告于 2021 年发布,作为政府发布正式风险评估的支持文件。尽管 CCRA 被称为“风险评估”，实际上它更多是对适应状态和优先级的评估。包括对一些已识别风险的规模和严重性的评估，以及对适应这些风险的进展情况的评估。图 1.1 总结了第三个 CCRA 中使用的方法。

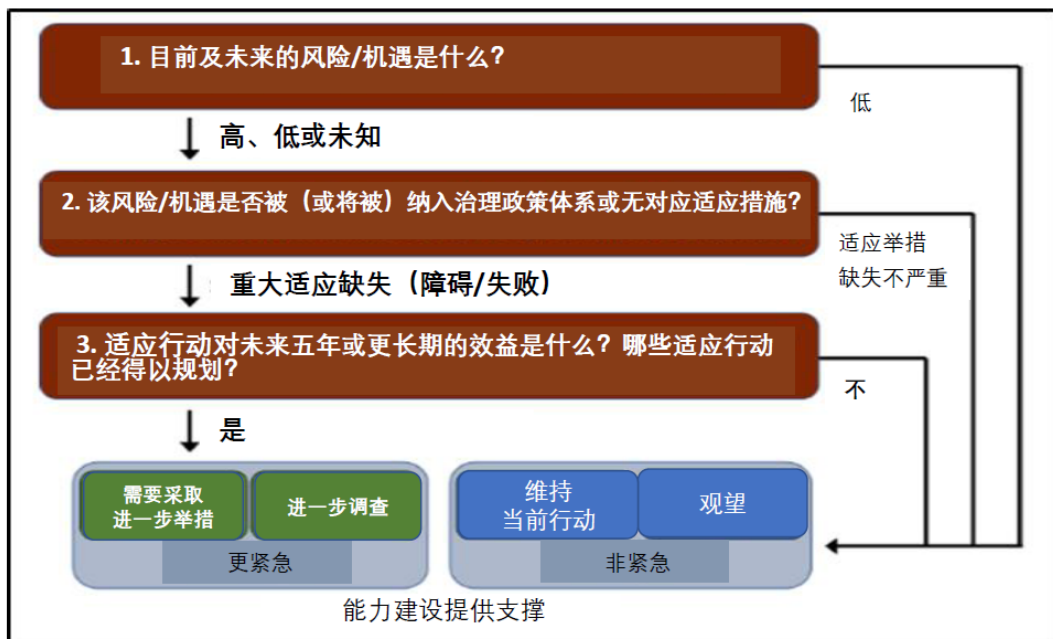


图 1.1 第三次英国气候变化风险评估 (CCC, 2021) 证据报告中使用的框架

该过程的第一阶段侧重于“风险”的识别及其规模的表征。利益相关者共确定了 61 项具体风险，分为五个领域，涵盖自然环境、基础设施、健康和社区、商业和工业以及国际层面。风险被定义为“在某些有价值的事物受到威胁且结果不确定的情况下可能产生的后果” (Betts & Brown, 2021 年; Watkiss & Betts, 2021 年)。这些风险主要被描述为“对.....的风险”，而不是“来自.....风

险”（例如对公共供水的风险），并映射到特定的政策领域。因此，个体气候驱动因素（如高温）会影响多种风险，而个体风险可能会受到多种气候驱动因素的影响。评估中的这一步骤涉及评估每个风险的程度，在三个不同的时间段（现在、世纪中叶和世纪末），以及到本世纪末气温升高 2°C和 4°C的情况下。根据定量和定性标准，“幅度”被定义为低、中、高或未知（表 1.1: Watkiss & Betts, 2021）。在实践中，几乎所有风险的估计量级都是基于专家判断，在某些情况下通过定量评估提供信息。

该过程中的第 2 步和第 3 步建立在第一步的基础上，以评估当前或计划中的适应措施在多大程度上解决了每个风险，以及未来五年内采取额外行动的收益。这是风险的紧迫性评分的依据。

表 1.1 第三次英国 CCRA 的量级分类（Watkiss & Betts, 2021）

定性依据	高幅度	中等幅度	低幅度
	重大年度灾害、破坏或者失去的机遇： - 数以亿计英镑的经济损失或失去的机遇 - 数百例的死亡，数以千记的重大健康影响，数十万人受到影响/微小的健康影响，和/或	中等年度灾害、破坏或者失去的机遇： - 数以千万计的经济损失或丢掉的机会，和/或； - 几十例死亡，数以百计的重大健康影响，几万人受到影响/微小的健康影响，和/或	较低程度的年度灾害、破坏或者失去的机遇： - 经济损失少于一千万或失去的机遇，和/或； - 几例死亡，十余人重大健康影响，几千人受到影响/微小的健康影响，和/或
	- 数万英亩计的土地丧失或受到严重破坏，和/或数千公里的河水水体受到影响，和/或	- 几千英亩的土地丧失或受到严重破坏，和/或数千公里的河水水体受到影响，和/或	- 几百英亩的土地丧失或受到严重破坏，和/或数千公里的河水水体受到影响，和/或
	- 重大影响（在国家层面为 10% 或以上） - 对有价值的栖息地或各类景观（如 BAP 生境、SSSI）的重大影响	- 对有价值的栖息地或各类景观（如 BAP 生境、SSSI）的中等影响（在国家层面为~5%或以上），和/或	- 对有价值的栖息地或各类景观（如 BAP 生境、SSSI）的较低影响（在国家层面为~1%或以上），和/或
	- 对物种群的重大影响或损失，和/或	- 对物种群的中等影响或损失，和/或	- 对物种群的较低影响或损失，和/或
	- 对单个自然资本资产及相关产品和服务的重大影响（在国家层面为 10%或以上），和/或 - 对单一国家标志性遗产资产（如巨石阵、巨人堤）的重大损失或不可逆转的损害	- 对单个自然资本资产及相关产品和服务的中等影响（在国家层面为 1-10%或以上），和/或 - 对单一国家标志性遗产资产（如巨石阵、巨人堤）的重大损失或不可逆转的损害	- 对单个自然资本资产及相关产品和服务的较低影响（在国家层面为~1-10%或更少），和/或 - 对单一国家标志性遗产资产（如巨石阵、巨人堤）的重大损失或不可逆转的损害
定量证据	本章作者的专家判断，并经作者、英国气候变化委员会和同行评审员的确认，表明有可能产生上述规模的影响。		

组织可能想要评估气候风险的原因还有很多。虽然 CCRA 旨在为国家适应政策提供信息，但有关气候风险的高级别国家级信息可用于告知政府和其他机构

对气候和减缓政策的总体优先级 (Arnell 等, 2021)。在更多地方层面, 议会和社区将受益于更多针对潜在气候风险的本地化信息。具体的适应策略或计划需要与设计参数直接相关的风险信息。就空间尺度和使用的场景而言, 风险评估的这些不同目标意味着在不同情况下可能需要不同的方法。

在英国, 迄今为止还没有对当前和未来气候风险进行正式协调的定量评估。然而, 已经有大量的单一部门研究, 最重要的是, 英国多年来制定了一系列“官方”气候预测。第一个日期可以追溯到 1998 年 (UKCIP98), 最近一次 (UKCP18) 于 2018 年发布 (Lowe 等人, 2018 年)。UKCP18 预测基于 RCP 气候自然力, 由四部分组成, 全球、区域和本地链主要基于使用具有 RCP8.5 排放的哈德雷中心 HadGEM3.05 气候模型进行的大量模拟 (12 到 15 之间, 取决于链), 从模型分辨率的选取和使用来看它们日趋精细。这些模拟的范围表明气候模型参数的不确定性。全球链还包含另外 12 个基于 CMIP5 气候模型的模拟, 这增加了气候模型结构的不确定性。概率链由 3000 个对四个 RCP 场景 (RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5) 中的每一个的同样合理的预测组成。概率预测是使用从 HadGEM3.05 和 CMIP5 模拟构建的统计仿真器生成的。

这些 UKCP18 预测已用于一系列评估气候变化的若干潜在直接影响的研究。这些研究主要关注气候危害和资源指标, 涉及人类和经济影响方面的风险鲜有涉及。

1.2 英国的气候变化风险

自英国气候变化法案 (2008) 颁布以来, 英国气候变化委员会每五年应于议会就英国气候变化评估 (UK Climate Change Risk Assessment (CCRA)) 事宜进行商议前的六个月向政府提交评估意见。继 2012 年和 2017 年发布第一次 (CCRA1)、第二次评估 (CCRA2) 后, 第三份报告 (CCRA3) 将于 2022 年发布, 详述至 2100 年之前英国所面临的气候变化风险和机遇, 并对未来五年气候适应工作的优先事项提出建议。英国气候变化委员会于 2021 年 6 月就此发布《英国气候风险独立评估 – 对英国第三次气候风险评估的建议》(下文简称“独立评估”)。

在本次评估中, 对当前和未来气候变化的理解发生了一些变化。自第一次的风险评估以来, 对未来气候变化的可能水平的科学理解有所发展, 到 2100 年世界可能经历的超过 1850-1900 年水平的全球变暖的范围已经缩小, 从 CCRA1 中考虑的 1°C 到 6°C 之间, 到 CCRA3 中使用的 2°C 到 4°C 之间。

与五年前的评估不同, 新冠疫情、脱欧和净零排放的承诺对本次气候风险评估的社会经济背景带来巨大变化。这些都使对未来风险的预测比以往更具挑战性。

新冠疫情的蔓延敲响了全球性复杂性级联风险的警钟, 并对各部门、各级政府和各国之间的风险治理运作体系做了一次测试。就此, 本次评估意见对未来气候变化背景下的风险治理规划提出了建议。

2020 年英国脱欧。这对气候风险风险和机遇相关的适应政策带来深远的影响, 涉及自然环境、商业和国际关系等多个领域, 未来地缘政治条件的不确定性

进一步加大，从而加剧了未来政策走向的不确定性。

2019年，英国通过了到2050年实现净零的法案，脱碳进程涉及部门大多在风险评估之列。这将对未来气候变化风险和机遇的假设发生重大转变，例如，至2050年英国的能源生产和分配将会有很大不同。因此本次评估更多地侧重于减缓和适应措施之间的权衡和协同增效。

“独立评估”指出，《气候变化风险评估》(CCRA3)技术报告中收集的大量新证据及所确定的涉及包括自然环境、健康、居所、基础设施和社会经济等在内的61个风险和机会中，有56%获得了最高紧迫性，而这一数据在2016年的评估中只有36%。与2016年的评估相比，14项可比较风险在未来有规模性增加，没有一项减少。风险的严重程度也高于早期的评估预测，第三次评估报告中有15类风险的规模高于比2012年第一次CCRA中对2020年所作的预测。如果不采取进一步适应性措施，及时全球温升成功控制在2°C的范围内，到2080年代，每年造成数十亿英镑经济损失的风险种类将是目前的三倍。

“独立评估”认为，面对不断增长的气候变化风险，尽管英国有能力和资源来有效应对这些风险，但目前在气候适应性方面所作的工作落后于形势，所面临的风险水平和现有的适应水平之间的差距进一步扩大，并且新的证据显示风险将进一步增大；在过去的五年里，对气候适应性新增的需求，明显多出之前的计划和预想。

对此，“独立评估”进一步识别并确定了八个需要在未来两年采取最紧急行动的风险领域，包括：

1. 多种对陆地和淡水栖息地和物种的生存能力和多样性的危害所造成的风险
2. 洪水和干旱的加剧对土壤健康的风险
3. 多种灾害对自然碳储存和固存的影响及其导致排放增加的风险
4. 多种气候灾害对农作物、牲畜和商业林木的风险
5. 由于与气候有关的供应链和分销网络的崩溃，对食品、货物和重要服务供应的风险
6. 与气候有关的电力系统故障对生命、财产造成的风险
7. 民用和其他建筑室内高温曝露度的增加对人类健康、福祉和生产力的风险
8. 域外气候变化影响对英国造成的多重风险

图 1.2 未来两年需采取最紧急行动的风险领域



来源: 英国气候变化委员会
 备注: 图中显示了需要在未来两年内采取最紧急行动的风险领域随时间变化的幅度。在技术报告中, 显示了相关风险评估在最高情景下, 至2100年的变化幅度。详细情况见英国气候变化委员会相关报告。

本次独立评估发现, 回顾英国风险评估及其治理的进程, 以往的建议并没有能够引起足够重视、采纳并落实, 在过去的十年里, 适应性治理被削弱了, 同时越来越多的证据表明气候风险在日益加剧。因此第三次独立评估强调这一现状必须立即改变的同时, 提出十项原则并建议将其纳入国家适应计划, 以加强风险评估和适应举措。如图 1.3。

1. 设定一个适应性良好的英国的愿景

新的国家适应计划应对具备良好适应性的英国提出清晰愿景, 将适应性作为标准纳入政策决策和商业运作, 并明确对全体英国民众、地方政府和各部门的影响。新的计划必须明确下一个报告期(2023-2029)结束时具有可行性的、可衡量的目标。

2. 将气候适应性纳入包括“净零”政策在内的政策体系

在与政府和社会的一系列目标相关的政策、投资和决策中, 必须对气候风险进行评估。同时, 整合适应和减排的措施尤为重要, 特别是在基础设施、建筑和自然环境等领域中, 应对气候变化和避免意外后果的最佳方式是确保将适应和减

缓同步考虑。

3. 对 2°C 情景采取适应性措施；评估温升 4°C 下的风险

即使温升可以控制在 2°C，英国的气候仍将发生重大改变。如果气候对排放的反应处于目前不确定范围的高端，2080 年至 2100 年之间可能温升将高达 4°C。这对适应性规划带来根本性的影响。这一水平的变暖将大大限制适应措施的有效性，对生命和福祉造成广泛威胁、导致经济损失和自然环境的系统性变化。英国必须适应 2050-2100 年期间全球平均温度最低上升 1.5-2°C 的情况，并考虑到 4°C 的升温情景的风险。

4. 避免被锁定

如果不能在可不逆转的变化发生前采取适应措施，就会导致“锁定效应”，增加气候变化带来的损害，或需要更大的投入以付出更大努力。这就比如现在建造新房而不设计能适应未来条件（如极端高温）的窗户，相比在设计阶段就把它包括在内，后期改造来建造窗户、安装百叶窗的成本要贵四倍左右。

5. 为不可预知的极端情况做准备

目前开展的风险评估识别并确定了评估中使用的“可能范围”之外的低可能性、高影响变化的依据，包括 2100 年全球变暖高于 4°C，及在一系列变暖水平下可能导致的地球系统的不稳定性，如喷气流的显著变化及其对更极端天气的影响。然而，目前英国缺少针对这些变化的早期预警系统，也没有评估可以采取哪些适应行动来减少由此产生的影响。这些应纳入国家风险规划。

6. 对风险之间的相互关联进行评估

在评估气候风险时，相互作用的风险构成了最大的挑战之一。单一的危险往往会对一系列部门产生连锁影响，放大了所产生的影响和危害。同时，风险还会在不同的部门之间相互影响。在对相互关联或级联风险的治理中，多部门协同仍面临困难。

鉴于电力故障对整个社会可能产生的深远影响，以及在向净零经济转型过程中电力部门在整个基础设施系统中的重要性日益增加，与气候有关的电力系统故障对生命和财产带来的风险列为政府的首要任务之一。

7. 加强对阈值效应的认识

阈值是指由于气候变量（如温度）的变化而在一个系统中发生“非线性”变化的点。例如，当水温超过 17°C 时，藻类水华就开始出现了。了解这些阈值存在的位置以及它们在未来可能出现的频率，对于了解特定风险的大小以及在什么时候可能需要采取新的行动或不同的适应方法非常重要从而实现更针对性的行动非常重要。目前关于气候适应的文献中，普遍缺乏对阈值的考虑。国家适应规划应强调如何将阈值效应纳入考量。

8. 解决不平等问题

气候变化可能会因其对弱势群体的影响进一步扩大社会不平等。在英国，低收入家庭面临的洪水风险相对较高。生活在苏格兰、威尔士和北爱尔兰的人也比生活在英格兰的人面临着更高的人均年度洪灾损失。如果规划不够缜密，应对气候变化的行动也可能加剧现有的不平等现象。风险评估发现与居住地、收入水平

和资产以及年龄和种族背景等特征有关的不平等现象，可能与当前的脆弱性和适应气候变化的能力相关。新的国家适应规划应根据财政部绿皮书的最新指导意见，绘制影响分布图，并明确行动实现正向分配效应；同时也应降低对环境破坏和气候变化的重大和不可逆转的影响相关经济评估的贴现率，以降低或避免代际不公。

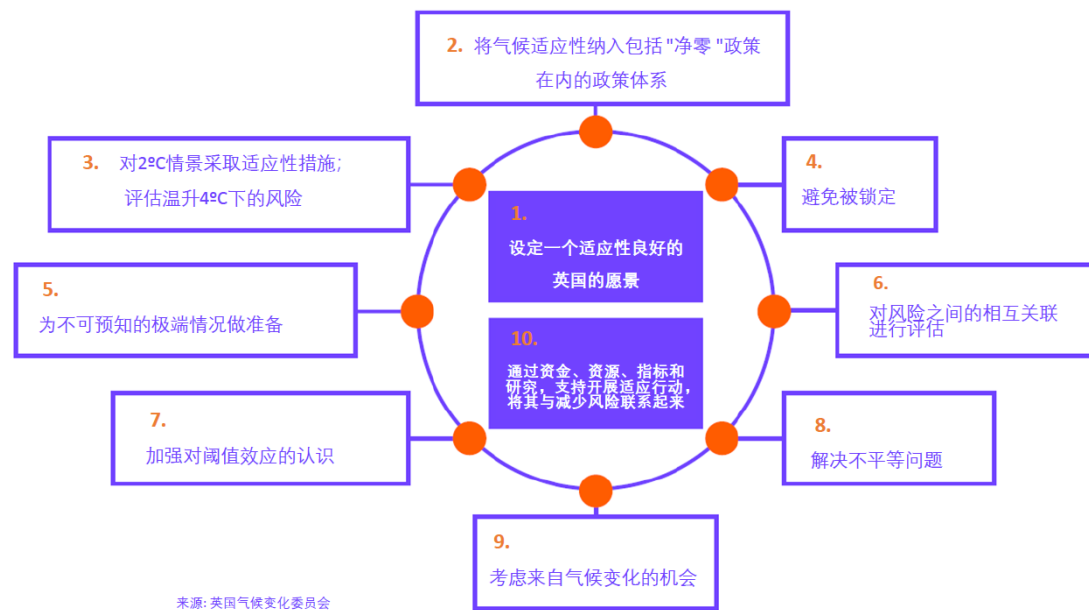
9. 考虑来自气候变化的机会

气候变化会给英国带来一些潜在的好处，如更长的生长季节、新物种到达英国或冬季温度升高对健康的好处。但目前仍缺乏大量证据来评估这些机会的程度。

10. 通过资金、资源、指标和研究，支持开展适应行动，将其与减少风险联系起来

充足的资金和资源是有效适应的先决条件。在将适应性和复原力纳入金融系统和现有的经济规划过程中，政府应发挥主要作用，如为净零排放和绿色复苏提供资金，减少政策的不确定性，并鼓励私人部门对此投资。支持更多适应投资的最大障碍之一是对不同环境下不同适应行动的有效性缺乏了解，迫切需要提高对适应行动带来的正面影响的认识。同时，遵循英国政府 **Magenta Book**（评估指南）中规定的方法，通过指标体系进行监测。

图 1.3 良好适应的十项原则



1.3 英国直接风险概述

尽管没有使用一致指标进行明确比较，但英国最重要的直接风险被认为是洪水（来自降雨、河流和沿海洪水）、极端高温、干旱和风暴。野火越来越被认为是一种潜在的重大风险，气候资源的变化有可能影响农业和风能生产。

UKCP18 气候预测（Lowe 等人，2018 年）推测英国各地气温升高，与全球平均升高相似（夏季升高幅度略大）。预计北部和西部以及冬季的降雨量增加最多。在夏季，英格兰南部和东部的降雨量预计会减少。春季或秋季降雨量变化

相对较小，但在所有季节，未来降雨量将如何变化都存在很大的不确定性。

1.3.1 洪水

气候变化将导致强降雨频率增加，这是一个公认的结论，因为温暖的大气可以容纳更多的水。在英国已经发现这种情况。降雨量高于高降雨阈值的天数随着变暖水平而增加（Hanlon 等，2021），并且整个英国的 T 年次日和日降雨量增加（Dale，2021）。到 2050 年代随着高排放，英国北部和西部 30 年的日降雨量增加了 30% 以上。

由于集水区地质和蓄水的影响，短期降雨的变化不一定直接转化为河流洪水风险的变化。英国的河流在全球范围内都很短，但集水区地质的巨大多样性意味着它们对降雨变化的反应非常不同。具有高渗透性地质的集水区对长时间累积的降雨做出反应，而具有更高响应性地质的集水区对降雨做出快速反应。因此，英国洪水风险变化的不同反映了降雨量变化和集水区地质变化的不同。根据大多数气候预测，英国北部和西部的降雨量增加最为显著，并且这里的洪水频率增加最多（图 2：Arnell 等人，2021 年；Kay 等人，2021 年）。再向南和向东，由于降雨量的增加较少，增加量较小，但由于地质的变化，这种模式变得复杂。

英国周围的海平面上升略低于全球平均变化（Lowe 等人，2018 年），南部和东部的上升幅度更大，由于均衡过程，陆地水平正在下沉。到 2100 年，海平面将比现在高 0.53 至 1.15m，且排放量较高，这既意味着 T 年事件的强度增加，也意味着当前 T 年事件的重现期缩短。在某些情况下，当前的 1000 年事件在最极端的情况下可能会在 2100 年之前每十年发生一次（Lowe 等人，2018 年），尽管在大多数地方和大多数情况下，增加的幅度要小得多。

1.3.2 极端高温

随着全球变暖，高温极端事件明显增加。炎热天数（高于特定阈值）增加（Hanlon 等人，2021 年），热浪或公共卫生高温警报的次数增加（Arnell 等人，2021 年；Arnell & Freeman，2021a） - 尤其是在南部和东部（图 2）。低温极端事件发生的频率较低，但仍然足够频繁，足以继续构成危害（Arnell & Freeman，2021a）。在英格兰南部和东部较温暖的地区，降幅最大。

采暖度天数随着变暖而减少 - 导致供暖能源需求降低 - 但制冷度天数从一个非常低的基数开始增加（图 2）。

极端高温影响许多部门，包括卫生、交通和农业。例如，图 2 显示了温度高于阈值会导致公路和铁路基础设施出现问题的天数大幅增加，尤其是在英格兰南部。目前，温度足以导致作物受损的情况极为罕见，但在英格兰南部，排放量高的地区可能会变得更加严重（图 2；Arnell & Freeman，2021b）。导致奶牛压力增加和产奶量减少的炎热和潮湿的日子预计将大幅增加（Garry 等，2021；Arnell & Freeman，2021b）。

1.3.3 干旱

在英国，干旱具有三个主要影响：影响农业生产力、影响供水的可靠性以及影响自然环境。它还在高温下影响野火风险 (1.3.5)。

干旱的不同影响具有不同的指标。农业和生态系统干旱的最佳特征是基于降水和蒸发的指标。夏季降雨量减少意味着 SPI (Arnell & Freeman, 2021b) 和降雨不足指标 (Hanlon 等, 2021) 等基于降水的指标显示干旱发生率增加。当包括潜在蒸发量时 - 例如在标准化降水和蒸发指数 (图 2) 中 - 那么干旱风险的增加会更大。

水资源干旱的最佳特征是基于地下水位或河流流量的指标。这些将降雨和蒸发随时间累积的影响与流域地质和储存的影响结合起来。这些指标还显示干旱频率增加 (图 2)，尤其是在英格兰南部和东部，河流径流减少幅度最大。

1.3.4 风暴

影响英国的风暴通常是由横跨大西洋的压力梯度产生的，每年的数量和强度随急流的位置而变化。尽管预计整个北欧的风暴频率将增加，但对影响英国的风暴变化的预测非常不确定。

1.3.5 野火

直到最近，野火还没有被认为是英国的重大危害，但近年来发生的一系列潜在的严重火灾提高了人们的认识。虽然到目前为止，这些野火对基础设施或财产造成的损害很小，但存在巨大影响的可能性，而且火灾已经造成了环境破坏。

野火风险是环境条件和着火机会的函数。在英国，大多数野火是人为行为的结果，通常是意外或无意的。因此，火灾数量最多的地方是着火风险最大的地方，而不是环境条件最合适的地方。气候变化会影响环境条件，但不一定会影响起火地点。因此，气候变化对野火的影响是用野火危险指标评估的，这些指标被广泛用于限制土地使用或发布警告。

较高的温度导致野火危险指数超过警告阈值的频率增加 (Arnell 等, 2021b)，特别是在南部和东部。预计湿度降低会增加温度升高的影响，但干旱的变化似乎对未来野火危险的影响较小 - 尽管这确实取决于所使用的指标。

1.3.6 气候资源变化

气候不仅会造成危害，还会提供资源。经济上可行的农业生产类型受到气候的限制：例如，低温意味着英国的大部分高地只适合放牧。生长季长度和生长期天数的增加 (图 2; Arnell & Freeman, 2021a) 为种植新的一年生作物和提高草地系统的生产力提供了机会。然而，较高的温度也可能意味着作物生长更快，导致产量下降 - 除非这被重要的种子灌浆期间日照增加所抵消。干旱频率的增加会导致生产力下降，尽管较早的气温可能意味着作物在本季较早种植，从而避免水资源短缺。因此，气候变化对作物生产的影响取决于影响产量的不同气候因素

变化之间的平衡，而这种平衡可能非常不确定。它还取决于农民和农业系统如何适应变化。

农业生产力也受到操作变化的影响。例如，更潮湿的冬天可能意味着农民无法进入田地准备种植，牲畜也无法转移到牧场。

风电对英国能源供应系统的贡献越来越大，风况的变化会影响供应的可靠性。然而，英国各地风况的变化是不确定的，因此影响是未知的。克拉登等人 (2012) 使用早期的气候情景预测风电潜力几乎没有变化。

表 1.2 英国的气候变化

变量	观测数据			
	英格兰	北爱尔兰	苏格兰	威尔士
年平均气温	1970年代中期到2010年中期上升0.9°C	1970年代中期到2010年中期，上升0.7°C	--	1970年代中期到2010年中期上升0.9°C
年平均降雨	1970年代中期到2010年中期增加4.5%	1970年代中期到2010年中期，增加6.4%	--	1970年代中期到2010年中期，增加2.0%
日照	1970年代中期到2010年中期增加9.2%	--	--	1970年代中期到2010年中期，增加6.1%
极端天气	英国范围内极端高温天气增加关于极端降雨量的变化尚缺乏证据	英国范围内极端高温天气增加关于极端降雨量的变化尚缺乏证据	--	英国范围内极端高温事件增加关于极端降雨量的变化尚缺乏证据
海平面上升	自1901年以来，全英国每年增加约1.4毫米（迄今为止为16厘米）	自1901年以来，全英国每年增加约1.4毫米（迄今为止为16厘米）	--	自1901年以来，全英国每年增加约1.4毫米（迄今为止为16厘米）

1.4 英国直接风险概述

第三次英国气候变化风险评估 (CCRA3) 的独立评估，就气候变化对英格兰、北爱尔兰、苏格兰和威尔士带来的风险和机遇进行了评估，涉及商业、基础设施、住房、自然环境、健康以及国际气候变化等方面共 61 项，并按紧迫性从低到高分为“观望”、“维持当前行动”、“进一步调查”和“需要采取进一步举措”。

表 1.3 英国未来气候变化的趋势

未来气候如何变化	2050s				2050s				2080s				2080s			
	RCP2.6 (50th 百分位)				RCP6.0 (50th 百分位)				RCP2.6 (50th 百分位)				RCP6.0 (50th 百分位)			
	英格兰	北爱尔兰	苏格兰	威尔士	英格兰	北爱尔兰	苏格兰	威尔士	英格兰	北爱尔兰	苏格兰	威尔士	英格兰	北爱尔兰	苏格兰	威尔士
实际温度	+1.3°C	+1.1°C	+1.1°C	+1.2°C	+1.2°C	+1.2°C	+1.0°C	+1.1°C	+1.4°C	+1.2°C	+1.1°C	+1.3°C	+2.4°C	+2.1°C	+2.0°C	+2.3°C
夏季雨水	-0.15	-11%	-7%	-15%	-14%	-11%	-6%	-15%	-15%	-10%	-12%	-18%	-22%	-15%	-16%	-26%
冬季雨水	+6%	+3%	+7%	+6%	+6%	+3%	+7%	+5%	+8%	+7%	+7%	+7%	+13%	+10%	+13%	+13%
海平面上升 (伦敦)	+23cm	+14cm	+12cm	22cm	+29cm	+16cm	+18cm	28cm	+45cm	+27cm	+23cm	43cm	+78cm	+58cm	+54cm	76cm

数据来源：英国第三次气候风险评估（CCRA3）所附证据文件

与五年前的第二次评估相比，英格兰共有 23 项风险紧迫性加剧，只有一项风险的紧迫性有所趋缓，还有一些新的风险是在本次评估中首次出现。

英国与其他国家相比，越来越多的证据表明，极端高温的风险在英格兰比其他地方更大。尤其是在东南部，影响涉及到健康、基础设施和自然环境。水资源稀缺和沉降的可能性也在恶化。洪水（沿海和内陆）、风暴、雷电和大风也是整个英格兰面临的较为严重的气候风险。

在北爱尔兰地区，现在需要采取更多的行动的风险有 31 项，19 项为需要进行进一步的调查，可以维持目前适应举措的风险或机会有 5 项，6 项被归类为“观望”。这其中，有 6 项被认为既是风险又是机会，其中 4 项与自然环境有关，每项均为“需要采取进一步举措”或“进一步调查”。还有 8 项被认为可能是气候变化给北爱尔兰地区带来的机遇，其中 4 项与自然环境相关。

虽然许多风险和机遇与英国其他地区面临的紧迫性和严重性相似，但高质量证据的缺乏是北爱尔兰地区比较突出的问题，有些部门与气候有关的现行政策相对有限，这些都增加了未来气候变化影响的不确定性（尽管有许多政策正在制定中，基线研究也正在进行）。由于自然环境的退化及其与污染、过度捕捞和土地使用等外部因素的相互作用，不断变化的气候条件和极端天气事件对北爱尔兰地区的影响可能在未来加剧。

与上一次评估相比，苏格兰地区共有 25 项风险紧迫性提高，只有一项风险紧迫性有所趋缓。此外，还有一些新出现的风险。

洪水对民众、社区和建筑物的影响仍然是苏格兰最严重的风险之一，对企业造成的经济损失也最高。同时，夏季缺水尤其是民用供水的问题日趋严重。气候变化对整个苏格兰地区的影响还包括自然和海洋环境，以及其农业和林业、景观和授粉等生态服务。高温热浪对健康和社会经济的广泛影响也不容忽视。

威尔士地区在这次评估中共有 26 项风险的紧迫性加剧，只有一项风险的紧迫性有所趋缓。还有一些新的风险是在本次评估中首次出现。

在将现有的所有适应举措纳入考量的基础上，本次评估中英国各地区紧迫性较高且现在需要采取更多适应举措的风险主要为：

表 1.4 英国各地区高紧迫性且需采取进一步举措的风险

英格兰	北爱尔兰	苏格兰	威尔士
气候变化对自然环境的影响，包括陆生、淡水、沿海和海洋物种	变化的气候条件和极端事件对陆地物种和栖息地的风险，包括温度变化、缺水、野火、洪	气候变化对自然环境的影响，包括陆生、淡水、沿海和海洋物种、森林和农业。	气候变化对自然环境的影响，包括陆生、淡水、沿海和海洋物种、森林和农业。

种、森林和农业。物种、森林和农业。	水、风和水文的改变（包括缺水、洪水和盐水入侵）。		
虫害、病原体和入侵物种的范围、数量和后果的增加，对陆地、淡水和海洋物种、森林和农业产生负面影响。影响陆地、淡水和海洋栖息地优先物种、林业和农业。	虫害、病原体和入侵物种对陆地物种和栖息地的风险。	虫害、病原体和入侵物种的范围、数量和后果的增加，对陆生、淡水和海洋优先栖息地物种、林业和农业产生负面影响。	虫害、病原体和入侵物种的范围、数量和后果的增加，对陆生、淡水和海洋栖息地优先物种、林业和农业产生负面影响。
气候变化影响的风险，特别是更频繁的洪水和海岸侵蚀，对基础设施服务造成损害。基础设施服务，包括能源、运输、水以及信息和通信技术。	气候条件变化对土壤的风险，包括季节性干旱和潮湿。	气候变化影响的风险，特别是更频繁的洪水和海岸侵蚀，对基础设施服务造成损害，包括能源、运输、水和信息技术。	气候变化影响的风险，特别是更频繁的洪水和海岸侵蚀，对基础设施服务造成损害，包括能源、运输、水以及信息和通信技术。
日益频繁的缺水期，供水减少。	气候条件变化（包括温度变化和缺水）对天然碳储存和封存的风险。	极端温度、大风和雷电对运输网络的影响	极端温度、大风和雷电对运输网络的影响。
极端气温、大风和雷电对运输网络的影响。	极端事件和不断变化的气候条件（包括温度变化、缺水、野火、洪水、海岸侵蚀、风和盐水入侵）对农业和林业生产力的风险和机遇。	越来越高的温度对人们的健康和福祉的影响，以及季节性温度变化导致的家庭能源需求的变化。	日益增长的高温对人们的健康和福祉的影响。
高温对健康和福祉的影响，以及季节性温度变化对民用能源需求的变化。	病虫害、病原体和入侵物种对农业的风险。	住宅、社区和企业遭受洪灾的严重程度和频率增加。	住宅、社区和企业遭受洪灾的严重程度和频率增加。
住宅、社区和企业遭受洪灾的严重程度和频率增加。	虫害、病原体和入侵物种对林业的风险。	沿海社区的生存能力以及由于海平面上升、沿海洪水和侵蚀对沿海企业的影响。	由于海平面上升、沿海洪水和侵蚀对沿海企业的影响。
沿海社区的生存能力以及由于海平面上升、沿海洪水和侵蚀对沿海企业的影响。	气候条件变化和极端事件对淡水物种和栖息地的风险，包括水温升高、洪水、缺水和物候变化。	由于温度、降水、地下水和景观变化文化遗产资产造成的损害。	更频繁的极端天气对健康和社会护理服务带来干扰。

更频繁的极端天气对健康和社会护理服务带来干扰。	气候条件变化对海洋物种、栖息地和渔业的风险，包括海洋酸化和水温升高。	可能对英国造成影响的国际影响，如对粮食供应、安全和保障的风险，以及气候变化对国际法和治理的风险及其对英国的影响、国际贸易路径、公共健康以及跨行业和跨地域的风险倍增	由于温度、降水、地下水和景观变化对我们的文化遗产资产的损害。
由于气温、降水、地下水和景观的变化而对文化遗产资产造成的损害。	虫害、病原体和入侵物种对海洋物种和栖息地的风险。	--	可能对英国造成影响的国际影响，如对粮食供应、安全和保障的风险，以及气候变化对国际法和治理的风险及其对英国的影响、国际贸易路径、公共健康以及跨行业和跨地域的风险倍增
可能对英国造成影响的国际影响，如对粮食供应、安全和保障的风险，以及气候变化对国际法和治理的风险及其对英国的影响、国际贸易路径、公共健康以及跨行业和跨地域的风险倍增。	沿海洪水、侵蚀和气候因素对沿海物种和栖息地的风险和机会。	--	--
--	基础设施网络（水、能源、运输、信息和通信技术）因连带故障而面临的风险。	--	--
--	河流、地表水和地下水洪水对基础设施服务的风险。	--	--
--	高温和低温、大风、雷电对运输的风险。	--	--
--	高温对健康和福利的风险。	--	--
--	洪水对人、社区和建筑物的风险	--	--
--	文化遗产所面临的风险。	--	--

--	洪水对商业场所的风险。	--	--
----	-------------	----	----

Box 1 英国洪水治理案例

英国是受城市内涝等地表水泛滥影响较大的国家之一，为此英国政府以立法为基础，不断探索和优化洪灾预防与管理手段，建立以及时预警和科学排水为主要特征的城市内涝预防体系。

英国于 2001 年成立了水务全国级工作组，该工作组于 2003 年颁布了《英格兰及威尔士地区可持续性城市排水系统框架》，并于 2004 年发布了《可持续性城市排水系统实践暂行规定》，制定了预防措施、源头控制、场地控制和区域控制的有等级优先次序的一体化管理链条，并通过将“可持续性城市排水系统”与城市规划体系结合，将达到保护生态与城市建设“双赢”的理念融入不同等级的规划中，确保相关理念与技术的应用。2009 年 4 月 11 日，英国成立了“洪水预报中心”。综合利用气象局的预报技术和环境署的水文知识，就强降雨可能引发地表水泛滥风险发布预警，把强降雨预警向郡一级发布，并帮助地方相关部门和机构应对洪灾。2010 年 4 月英国议会通过《洪水与水管理法案》，英国环保署规定凡新建设项目都必须使用“可持续性城市排水系统”，并由环境、食品和农村事务部负责制定关于系统设计、建造、运行和维护的“国家标准”。

“可持续性城市排水系统”（SUDS: Sustainable Urban Drainage System）包括对地表水和地下水进行可持续性管理的一系列管理方法和技术。主要通过四种途径“消化”雨水、减轻城市排水系统的压力：一是对雨水进行收集，将从屋顶、停车场等流下来的雨水就地或在附近用水箱储存起来再利用；二是通过铺装可渗透性路面进行源头控制，建设渗水坑、可渗水步道以及屋顶绿化等；三是指定地点管理，即把从屋顶等地方流下来的雨水引入水池或洼地；四是生物滞留。利用一系列景观特征，如芦苇窗、过滤排水管等，用于过滤和处理地表水，通常用于污染风险较低的地区。

以伦敦为例。伦敦面临着泰晤士河的潮汐性洪水和其他河流如 Ravensbourne 或 Quaggy 河的洪水风险。另一方面伦敦年降雨量达 1100mm，有很高比例的不透水路面，阻碍雨水深入地下。而且，伦敦部分地区的粘土土壤降低了渗透速率，从而易导致地表水泛滥，增加城市内涝发生的可能性。伦敦极易受到地表水洪水的影响。日益加剧的气候变化导致暴雨的频率和强度都在进一步增强，伦敦面临着更多的人、财产和基础设施受到危害和损失的风险。

为了有效利用现有和规划的排水基础设施并避免增加洪水发生的风险，2016 年，大伦敦地区政府发布了《伦敦可持续排水行动计划》，对现有建筑、土地和基础设施进行可持续排水系统的改造。提高现有的排水管和下水道所提供的服务效能。

同时，伦敦 33 个地方政府作为负责地方防洪工作主管部门（LLFA）从 2019 年 4 月起开始实施伦敦可持续排水概况表。他们与环境局、泰晤士水务公司和其他利益相关者合作，管理洪水风险。LLFA 必须对本地区的洪水风险进行定期识别及更新，确认可以帮助减轻这些风险的干预措施，并为有成功运作案例的措施申请资金。

伦敦议会任命成立了泰晤士河地区洪水和海岸委员会。伦敦议会交通和环境委员会主席和泰晤士河区域防洪和沿海委员会主席就大伦敦区洪水治理开展联席工作，并通过泰晤士河洪水顾问团队为伦敦各区提供洪水防治的建议。

1.5 关键信息和结论

英国有一个强大的气候风险评估框架，但该框架专门用于评估适应的优先事

项。尽管对潜在风险程度的评估是该评估的一部分，但迄今为止，还没有对英国直接气候风险的程度进行一致的多部门定量评估。然而，英国所具备的连贯的气候预测（最近的 UKCP18），为此类评估提供了基础。

本章简要概述了气候变化对英国的潜在直接影响，尤其是使用最新的 UKCP18 气候预测的一系列研究。主要结论如下。

首先，跨学科使用一套统一的气候预测为不同部门的研究提供了比较和综合的机会。然而，这些气候预测的特征也可能对评估有所限制。UKCP18 预测优先考虑非常高的 RCP8.5 排放，因此往往会导致气候风险大幅增加。这种排放情景可能高得不切实际。概率链则使用更广泛的预测，然而这些预测却不一定是政策决策方最感兴趣的预测领域及内容。例如，CCRA3 关注与到 2100 年温度升高 2°C 和 4°C 一致的情景，但这些并不直接对应于 RCP 情景。

其次，这些研究强调了英国气候变化直接影响的预测幅度存在相当大的不确定性。这对于基于降水变化的指标尤为重要。这凸显了使用尽可能广泛的气候预测来定义潜在的直接风险和变化的重要性。

第三，研究表明英国各地的影响存在很大差异。对于基于温度的指标，由于目前的气候在英国各地有所不同，从相对温暖的南部到相对凉爽的北部，预测的温度变化在英国各地变化不大。对于基于降雨量的指标的情况，主要是因为预测的降雨量变化在英国各地会有所不同，北部和西部的增幅最大，南部和东部的降幅最大。这突出了在最适当的空间尺度上进行评估的重要性，即大面积的平均值可能掩盖了显著的局部变化。

参考文献

- [1]. Arnell, N.W., Kay, A.L., Freeman, A., Rudd, A.C. & Lowe, J.A. (2021a) Changing climate risk in the UK: a multi-sectoral analysis using policy-relevant indicators. *Climate Risk Management* 31, 100265 10.1016/j.crm.2020.100265
- [2]. Arnell, N.W., Freeman, A., & Gazzard, R. (2021b) The effect of climate change on indicators of fire danger in the UK. *Environmental Research Letters* 16, 044027 10.1088/1748-9326/abd9f2
- [3]. Arnell, N.W & Freeman, A. (2021a) The effect of climate change on agro-climatic indicators in the UK. *Climatic Change* 165, 40. 10.1007/s10584-021-0305408
- [4]. Arnell, N.W. & Freeman, A. (2021b) The impact of climate change on policy-relevant indicators of temperature extremes in the United Kingdom. *Climate Resilience and Sustainability* doi. 10.1002/cli2.12
- [5]. Betts, R.A. and Brown, K. (2021) Introduction. In: *The Third UK Climate Change Risk Assessment Technical Report* [Betts, R.A., Haward, A.B. and Pearson, K.V. (eds.)]. Prepared for the Climate Change Committee, London
- [6]. Cradden, L.C. et al. (2012) Will climate change impact on wind power development in the UK? *Climatic Change* 115, 837-852.
- [7]. Dale, M. (2021) *Future Drainage. Guidance for water and sewerage companies and flood risk management authorities: recommended uplifts for applying to design storms*. JBA Consulting.
- [8]. Garry, F.K. et al., (2021) Future climate risk to UK agriculture from compound events. *Climate Risk Management* 32, 100282
- [9]. Hanlon, H.M. et al. (2021) Future changes to high impact weather in the UK. *Climatic Change* 166:50
- [10]. Kay, A.L., Griffin, A., Rudd, A.C., Chapman, R.M., Bell, V.A. & Arnell, N.W. (2021) Climate change effects on indicators of high and low river flows across Great Britain. *Advances in Water Resources*.151, 103909 10.1016/j.advwatres.2021.103909
- [11]. Lowe, J.A. et al. (2018) *UKCP18 Science Overview Report*. Met Office Hadley Centre, version 2.0
- [12]. Watkiss, P. and Betts, R.A. (2021) Method. In: *The Third UK Climate Change Risk Assessment Technical Report* [Betts, R.A., Haward, A.B. and Pearson, K.V. (eds.)]. Prepared for the Climate Change Committee, London
- [13]. *Independent Assessment of UK Climate Risk Advice to Govt for CCAR3 and Evidence Reports*

第二章 气候变化对中国的直接风险

2.1 引言

近百年来,以变暖为主要特征的全球气候变化已成为科学事实,全球气候变化对自然生态系统和人类社会发展带来重大风险。据《IPCC 第六次评估报告》中第一工作组《气候变化 2021: 自然科学基础》(IPCC, 2021) 公布的最新成果表明: 气候变化已经在通过不同方式影响着全球各个区域,未来将随着增暖而增强。全球气温每升高 0.5°C 都会造成极端高温、极端降水和部分地区极端干旱事件频率增多、强度增大。当全球增温 2°C 时, 极端高温更容易超过农作物生长和人体健康的临界阈值。当全球增温 2°C 较之 1.5°C 增温, 将造成诸多因地区而异的变化, 这包括热带气旋和热带外风暴的增强、径流洪水增多、部分地区平均降水减少和变干、以及火险天气增加等风险。类似热浪和干旱同时出现这种复合型极端事件的发生概率更高。全球气候变暖对自然生态系统、人类管理和社会经济产生了广泛影响, 随着人口和经济的气候变化影响暴露度持续增加, 未来人类面临的气候变化风险挑战更为严峻。本章概述了中国及长江经济带、粤港澳大湾区、青藏高原及黄河流域等重点区域的气候变化风险; 同时以深圳为例, 深入研究了重点城市的气候风险及其应对。

重点区域和城市的风险研究中, 采用的数据是由 5 个 CMIP5 全球气候模式驱动高分辨率区域气候模式的区域统计降尺度数据。未来预估的参考时段为 1986-2005 年, 分为三个时段 2026-2045 年、2046-2065 年和 2080-2099 年 (分别代表 21 世纪近期、中期和末期)。极端事件的指标汇总如下:

表 2.1 极端事件指数定义

指数缩写	指数名称	定义	单位
SU35	炎热天数	每日最高气温 (TX) > 35°C 时的年度天数	天
TR25	炎热夜数	每日最低气温 (TN) > 25°C 时的年度天数	天
HWDI	热浪持续时间指数	TX > 35°C TX > 35°C 时至少连续三天的年度总天数	天
TXx	日最高气温最大值	TX 的年度最大值	°C
TNx	日最低气温最大值	TN 年最大值	°C
DTR	昼夜温差	TX 和 TN 之间的年平均差异	°C
R25	强降水日数	年日降水量 (PR) ≥ 25 mm 的天数	天
R50	强降水日数	PR ≥ 50 mm 时的年度天数	天

R95p	极端降水总量	当 PR > 参考期内潮湿天降水量的第 95 个百分位时的年总降水量	mm
Rx1day	最大 1 天降水量	1 天间隔的年降水量最大值	mm
Rx5day	最大连续 5 天降水量	5 天间隔的年降水量最大值	mm

2.2 中国的气候变化风险

中国对气候变化敏感性高，气候变化对中国重点领域和关键地区的影响程度有所差异。综合大量研究结果表明，气候变化的影响弊大于利。从气候系统的变化看，未来温度和降水的极端性趋势将会更明显，高气候变率状态下中国高温热浪、暴雨洪涝、干旱等极端灾害发生的时间、强度、频率、区域特征呈显著变化（秦大河等，2015）。水资源安全风险明显上升、冰冻圈严重萎缩、海平面上升加剧海岸带的淹没风险，气候变暖伴随的火灾和病虫害也将严重制约中国生态系统服务。随着全球气候变化，中国农业作物布局发生变化，适宜种植区面积扩大（Ye et al., 2015）。未来极端气候事件（降水、雪灾、大风等）增多、增强将对交通运输产生风险，尤其是路网脆弱性较强的区域。气候变化将影响能源的供给和需求以及整个系统的运行状况，极端事件将增加能源消耗，城市用能需求将普遍提高（陈莎等，2017）。中国各领域及重点工程的气候变化风险格局如图 2.1 所示（Feng and Chao, 2020）。在生态系统方面，在未来几十年中，西北和华北的水资源风险将处于高风险，而西北的生态系统和冰冻圈将受到更大的关注。在社会经济系统方面，华南地区由于极端事件增加使其整体风险较高，而华北地区由于水资源短缺造成其农业风险偏高。未来强降雨和高温热浪的增加趋势将使华东地区的交通和能源风险更高，而西南地区的交通和旅游业将受高温的影响较为严重。整体而言，极端气候事件的频繁发生将显著影响能源、交通及旅游等行业。重大工程中，生态工程和冻土工程受气候影响的风险较高，公路/铁路工程和水利工程次之。

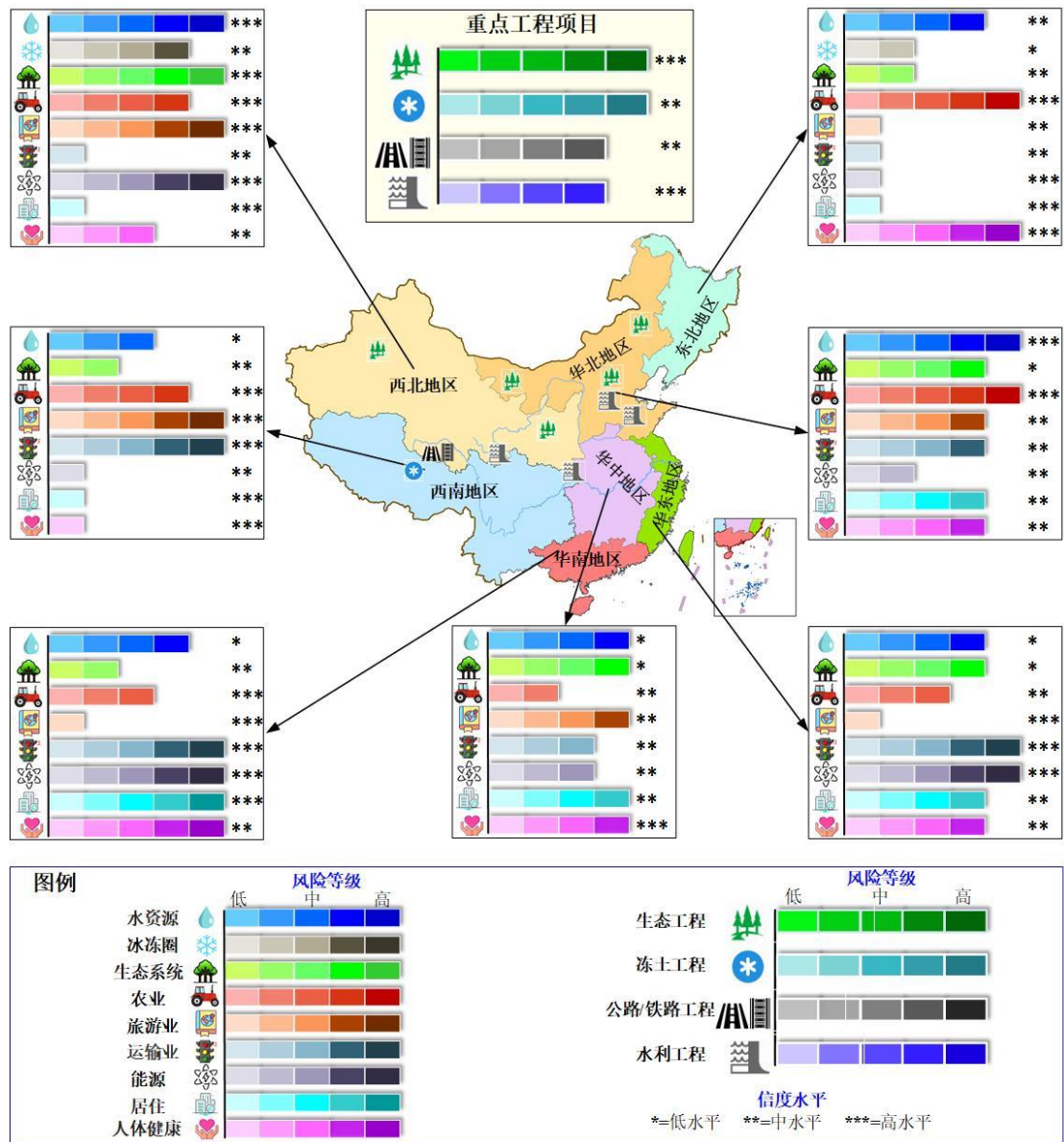


图 2.1 中国各领域及重点工程的气候变化风险格局（引自 Feng and Chao, 2020）

2.3 重点区域气候变化风险

2.3.1 长江经济带

基于 RCP4.5 情景下由 5 个 GCM 模式驱动的高分辨率动力和统计联合降尺度预估数据，在评估模式对长江经济带极端气候模拟能力的基础上，预估了 21 世纪三个时段（近期 2026-2045 年、中期 2046-2065 年和后期 2080-2099 年）的极端事件变化特征，主要结论如下：

（1）对 21 世纪的预估如图 2.2 和 2.3 所示，未来长江经济带的高温日数（HD）、日最高气温最高值（TXx）和日最低气温最低值（TNn）将大幅增加，在 21 世纪后期分别增加 13.9 d/2.6°C/2.4°C，霜冻日数（FD）显著下降，21 世纪后期减少 16.1 天。未来长江经济带的最大 5 日降水量（RX5day）、大雨日数（R20mm）、降水强度（SDII）和雨日降水总量（PRCPTOT）均呈增加趋势，到

21 世纪后期分别增加 13.7 mm/0.7 d/0.5 mm/d/39.3 mm。

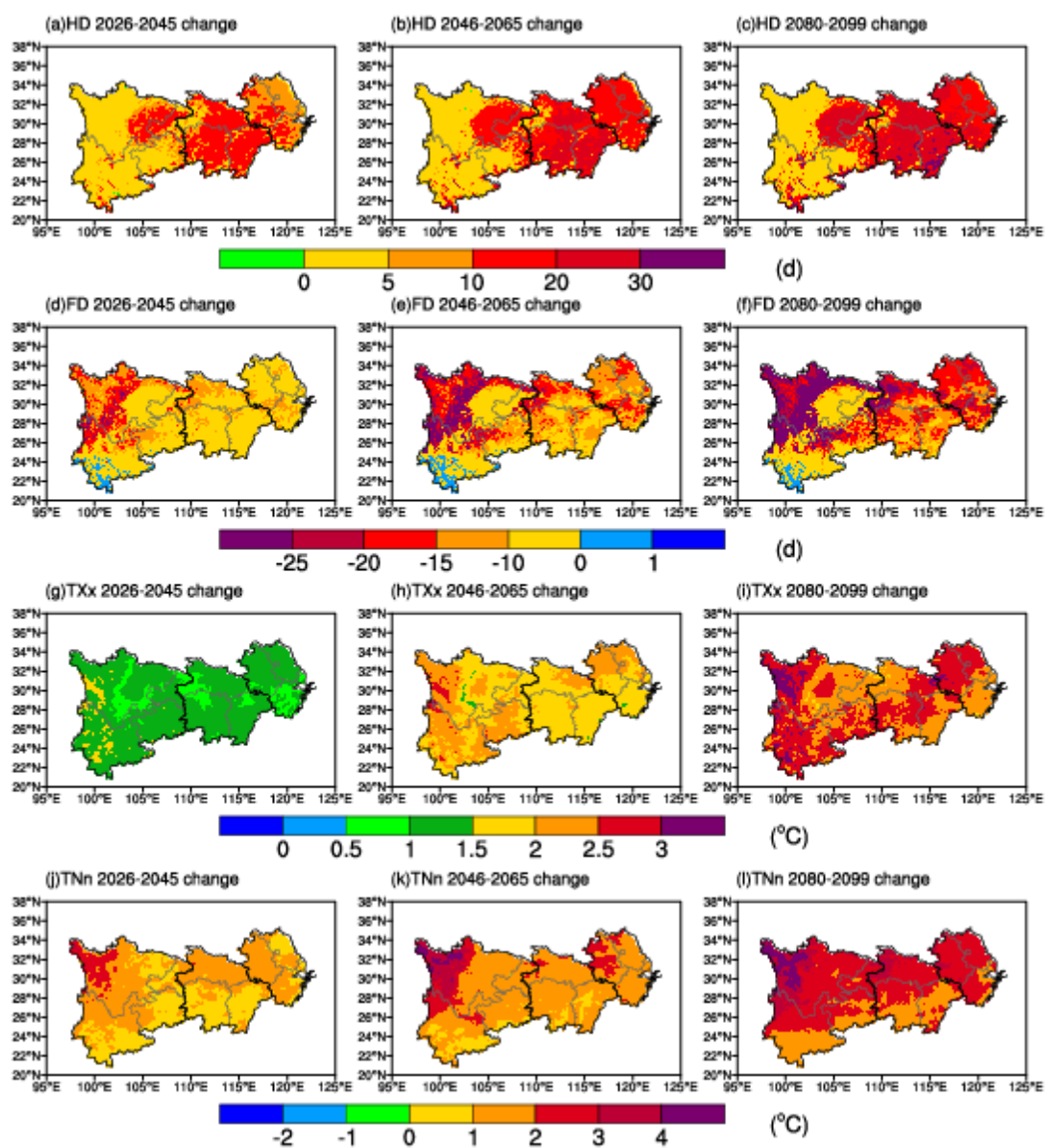


图 2.2 世纪长江经济带与气温有关的极端事件的变化（相对于 1986-2005 年）（a~c: HT, d~f: FD, d; g~i: TXx, °C; j~l: TNn, °C）

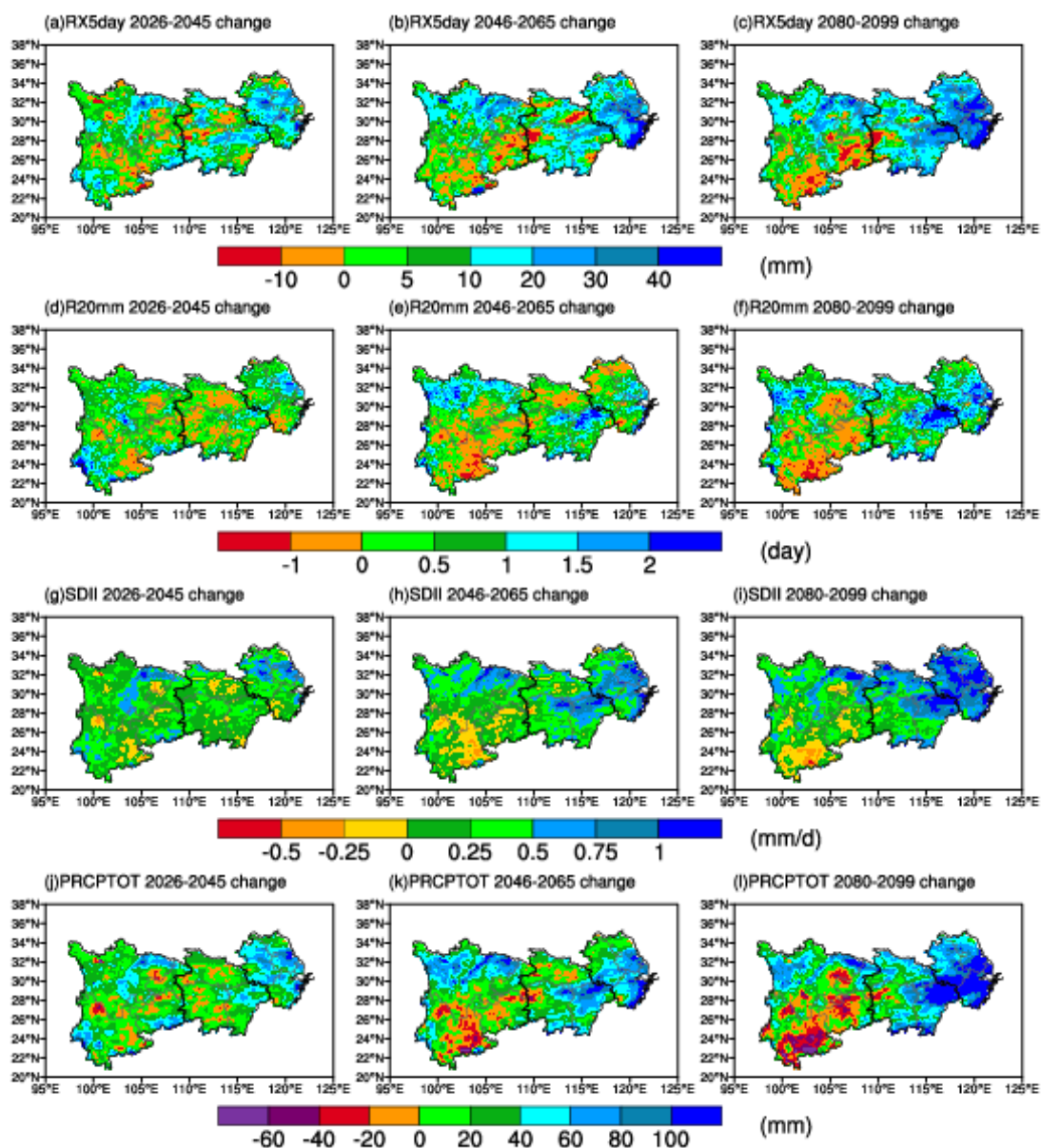


图 2.3 世纪长江经济带与降水有关的极端事件的变化（相对于 1986-2005 年）（a~c: RX5day,mm; d~f: R20mm, d; g~i: SDII, mm/d; j~l: PRCPTOT,mm）

(2) 如图 2.4 和 2.5 所示, 21 世纪长江经济带和三个子流域的高温事件和强降水事件的 GDP 暴露度都呈增加趋势, 其中下游流域增幅最大; 人口密度 (POP) 暴露度都呈先增后降的变化趋势, 高温人口暴露度峰值出现在 21 世纪中期, 强降水人口暴露度在 21 世纪近期, 下游流域变幅最大。高温事件的人口密度暴露度事件主要取决于人口分布因子, GDP 暴露度的分布因子和非线性因子同样重要。强降水事件的暴露度主要取决于 GDP (POP) 分布因子。

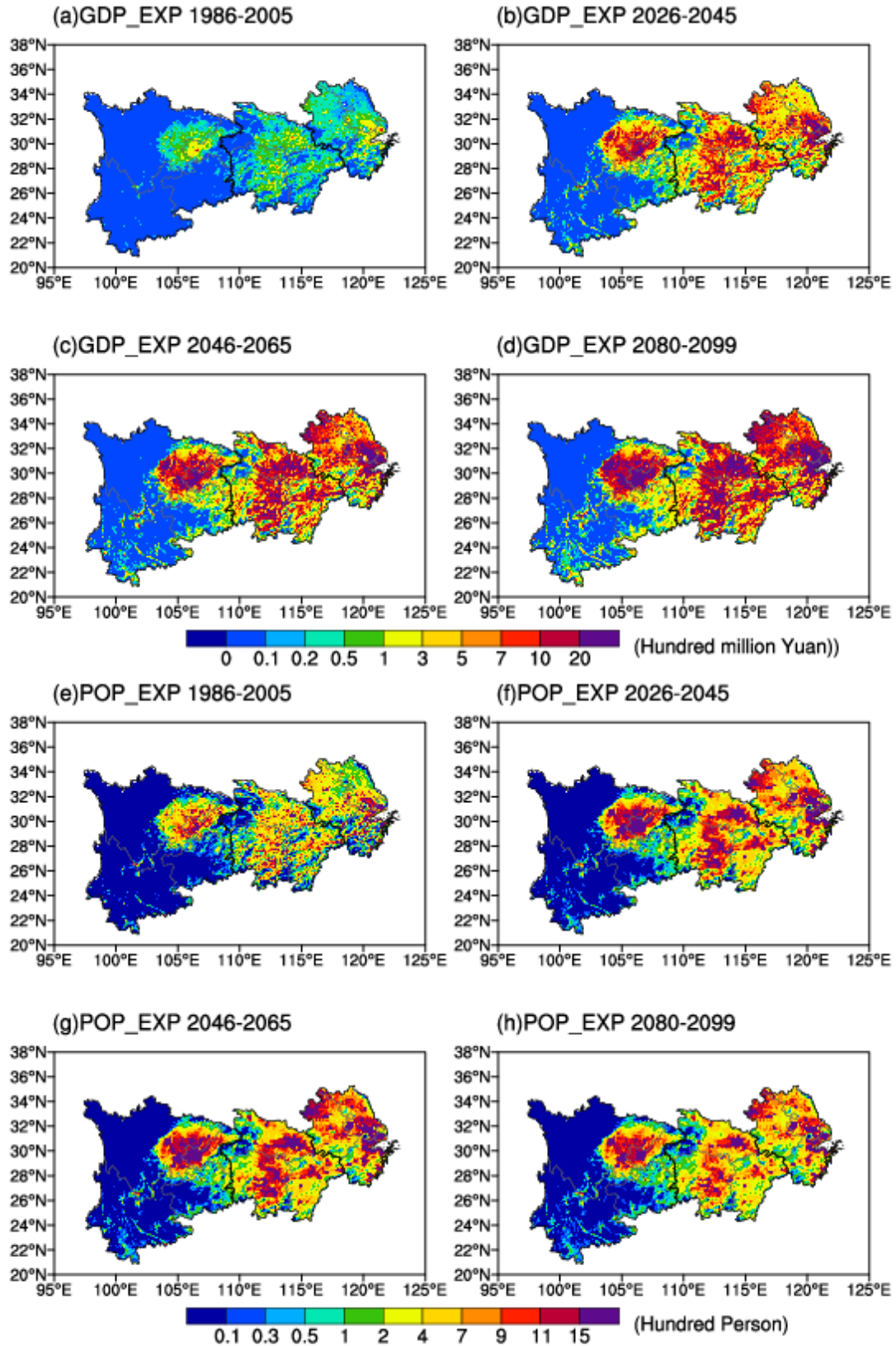


图 2.4 参照时段（1986-2005 年）和 21 世纪不同时期长江经济带高温事件 GDP 和人口密度暴露度的空间分布（a~d: GDP，单位： 亿元；e~h: 人口密度，单位： 百人）

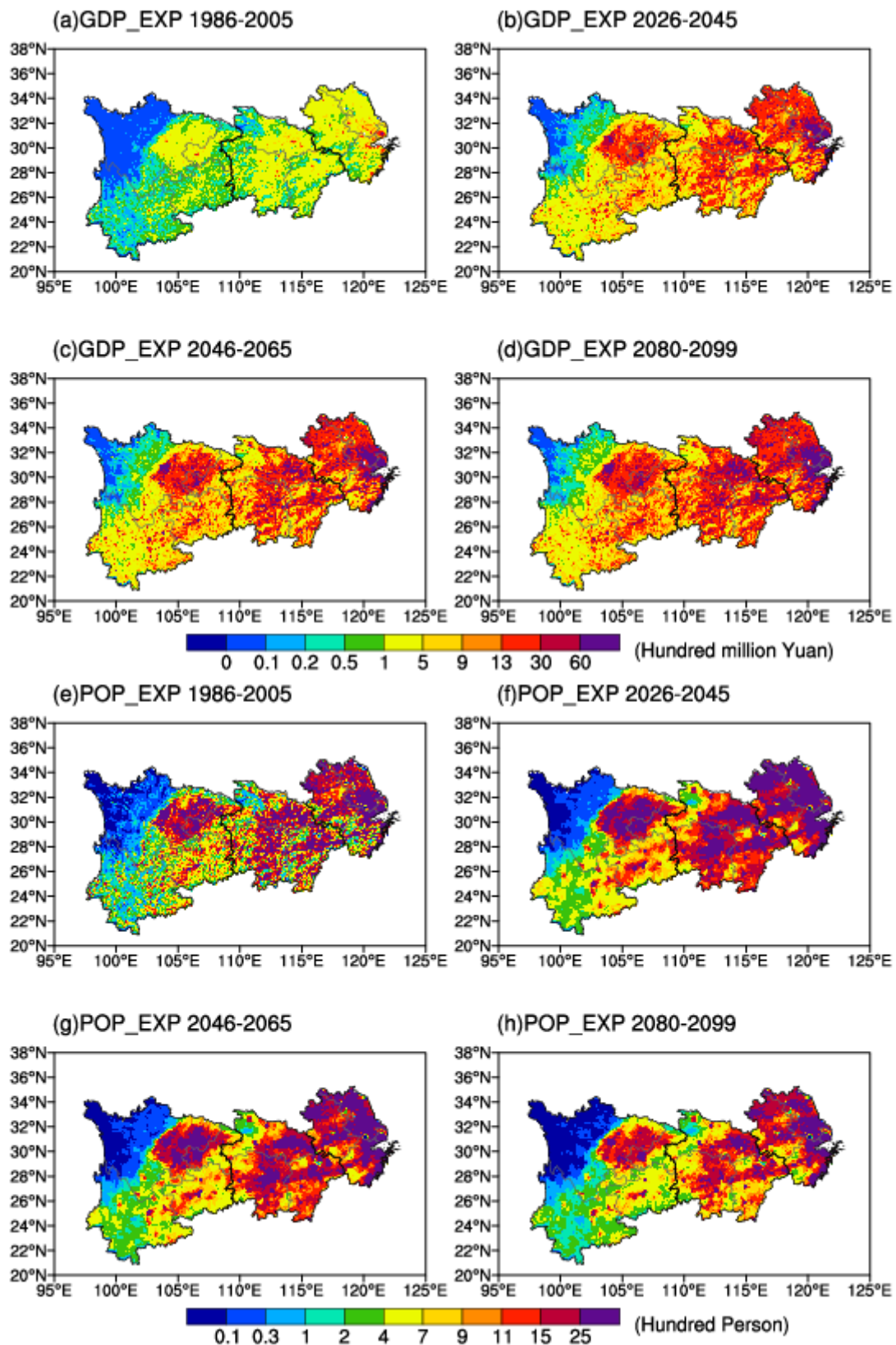


图 2.5 21 世纪长江经济带强降水事件 GDP 和人口暴露度的变化 (a~d: GDP, 单位: 亿元; e~h: 人口密度, 单位: 百人)

本文使用多模式集合平均的方法可以有效减少区域模式的不确定性, 但仅使

用 5 个模式进行不确定性分析也存在一定的局限性；其次，未来的研究中需要进一步综合多个指数、尤其是多要素指数，结合灾害脆弱性精细化预估未来灾害风险，以减少预估的不确定性。

2.3.2 粤港澳大湾区

粤港澳大湾区（Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, GBA）城市热岛逐年增强，21 世纪以来大幅增加，多个热岛中心形成一个大范围分布的半环状“U”形热岛群。

（1）高温热浪与热岛未来风险

观测和预测模拟均显示大湾区从过去 60 年到 21 世纪末呈现变暖和润湿趋势以及较大的年代际变化。过去（1961-2019）和未来（2021-2099）年气温的线性趋势分别为 $0.22[0.17-0.30]^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.19[0.17-0.21]^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，年降水量分别为 29 毫米/10 年（微不足道）和 20 [6-32] 毫米/10 年。无论在何种温室气体浓度情景下，未来粤港澳大湾区及其所在的华南地区的极端高温热浪事件将明显增多增强（高信度）（Wang et al., 2015; Zhu et al., 2019）。如图 2.6 和 2.7 所示，预计到 21 世纪末，SU35、TR25、HWDI、TXx 和 TNx 以 $3.6[3.2-3.8]\text{d}/10\text{a}$ 、 $6.8[6.3-7.4]\text{d}/10\text{a}$ 、 2.9 的速度显著增长 $[2.6-3.1] \text{d}/10\text{a}$ 、 $0.24 [0.21-0.27]^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.20 [0.18-0.22]^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，到 2050 年增加幅度分别为 15 天、50 天、12 天、 1.6°C 和 1.5°C 分别相对于参考期。DTR 在 21 世纪的大部分时期都显示出下降趋势，但趋势很小且不显著。极端高温事件增加最明显的地区位于大湾区的中部，包括广州和东莞。这些地区在 21 世纪中叶（2046-2065 年）的值将比参考期 SU35 增加 3 倍，HWDI 增加 6 倍。届时 IV 级和 V 级高温风险区域占比将高达 65.9%，其中 V 级风险值主要分布在大湾区中部的比例将高达 41.5%。与基准期相比，21 世纪中叶热灾害风险最高的地区增加了 11 倍。

如果考虑未来城市化及土地利用变化的协同影响，粤港澳大湾区内高温热浪风险还将增大。

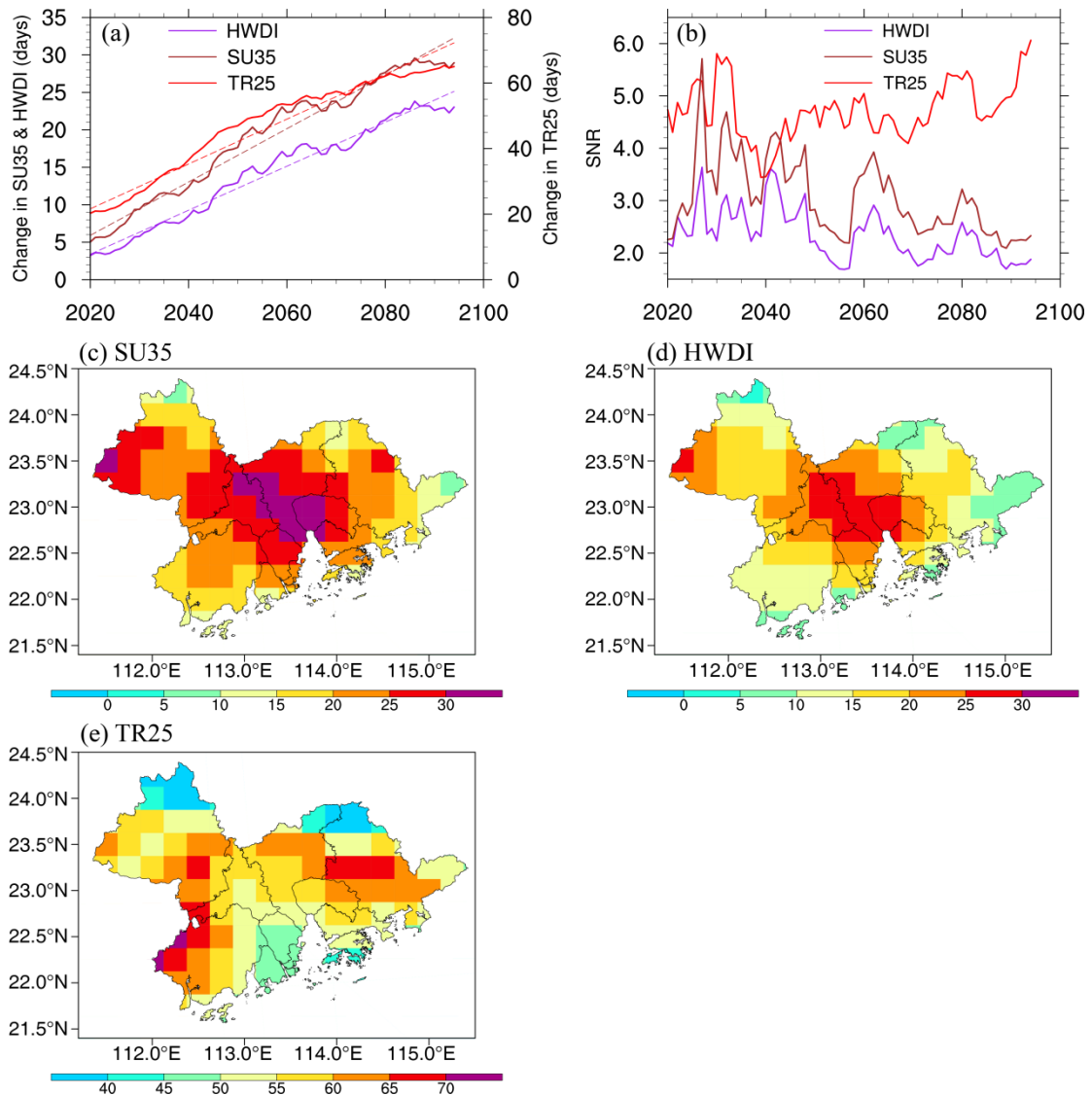


图 2.6 (a) 2021-2099 年区域平均变化的时间序列和 (b) 其 SNR 和 (c-e) 2046-2065 年极端温度变化的空间分布: (c) SU35 (单位: d), (d) HWDI (单位: d), (e) TR25 (单位: d)

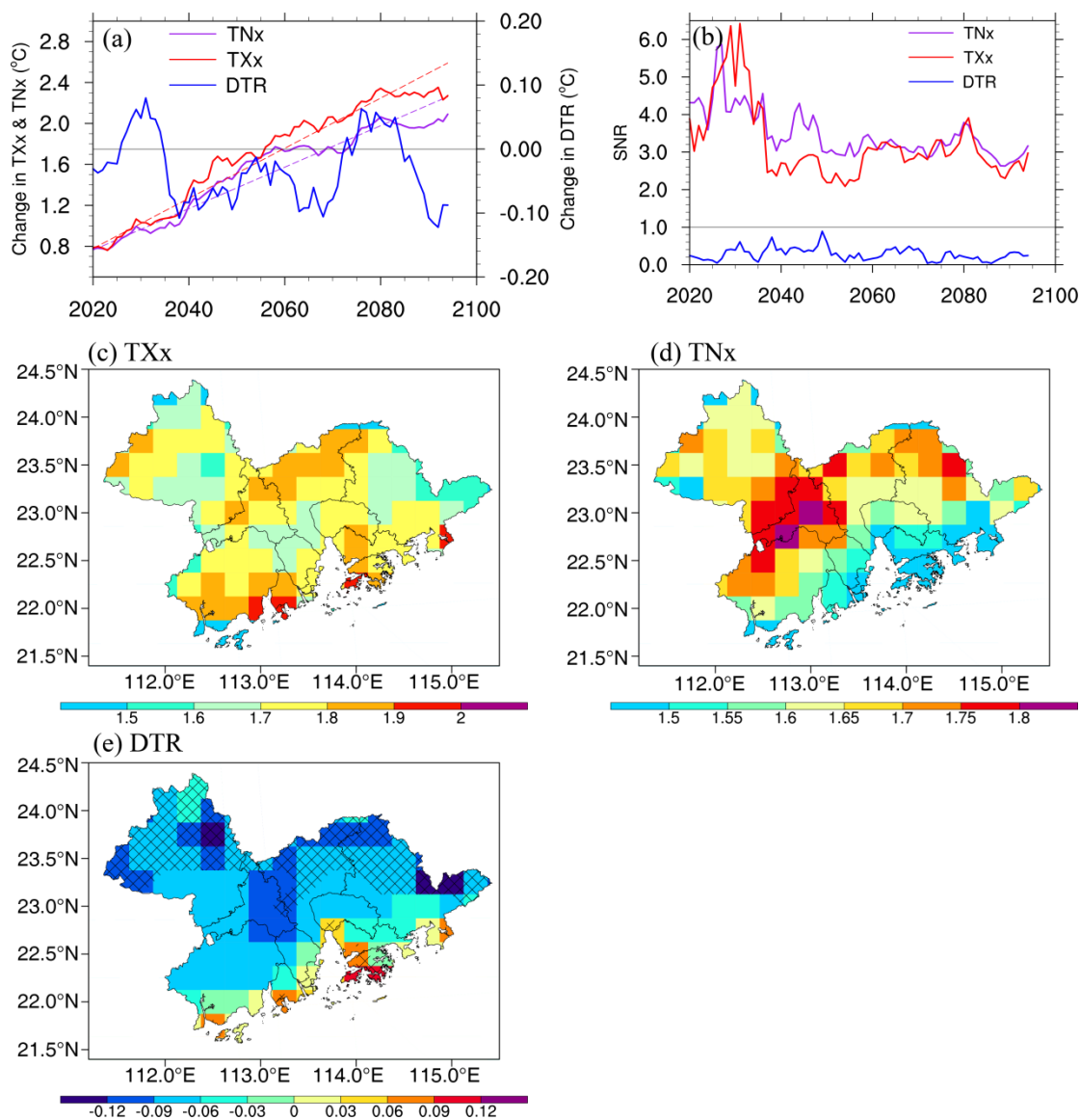


图 2.7 (a) 2021-2099 年区域平均变化的时间序列和 (b) 它们的 SNR 和 (c-e) 2046-2065 年极端温度变化的空间分布: (c) TXx(单位: °C), (d) TNx(单位: °C), (e)DTR(单位: °C)

未来不断增强的极端高温与热岛效应也加剧了大湾区内人群健康风险。与 1985~2014 年相比, 到 2080 年间日疟原虫和恶性疟原虫疟疾两种疟疾发病率在 RCP4.5 情景将分别增加 34.3%和 47.1%, 而在 RCP8.5 情景下将分别增加 49.8%与 79.6%, 其中华南地区的预估结果与全国基本一致(Hundessa et al., 2018)。

(2) 暴雨洪涝与水资源安全未来风险

随着全球变暖, 粤港澳大湾区未来极端降水事件的频率与强度进一步发生改变。如图 2.8 所示, 预计到 21 世纪末, R25、R50、R95p、Rx1day 和 Rx5day 显著增加, 幅度为 0.2[0.0-0.4]d/10a、0.1[0.0-0.2]d/10a、11.7[3.2-19.1] mm/10a、1.9 [0.7-3.2] mm/10a 和 3.3 [1.1-5.1] mm/10a, 21 世纪中叶增长幅度较大的区域位于大湾区沿海地区。基于 CMIP5 全球气候模式输出驱动的多个水文模型的河道径流量模拟指出, 由于未来极端降水增强, 珠江干流 5 年一遇、30 年一遇和 50 年一遇的河道洪水强度在 RCP8.5 和 RCP2.6 情景下均增强, 而且不同模型间的输

出具有较高的一致性 (Li et al., 2016)。未来珠江流域干旱强度和历时增加, 同时需水可能进一步增加, 水资源供需矛盾进一步加剧。因此, 大湾区未来的总降水和水资源量变化可能较少, 但是相关未来预估具有较大不确定性, 干旱风险增加的机会较大, 如果未来的需水同时增加, 水资源供需矛盾将加剧。

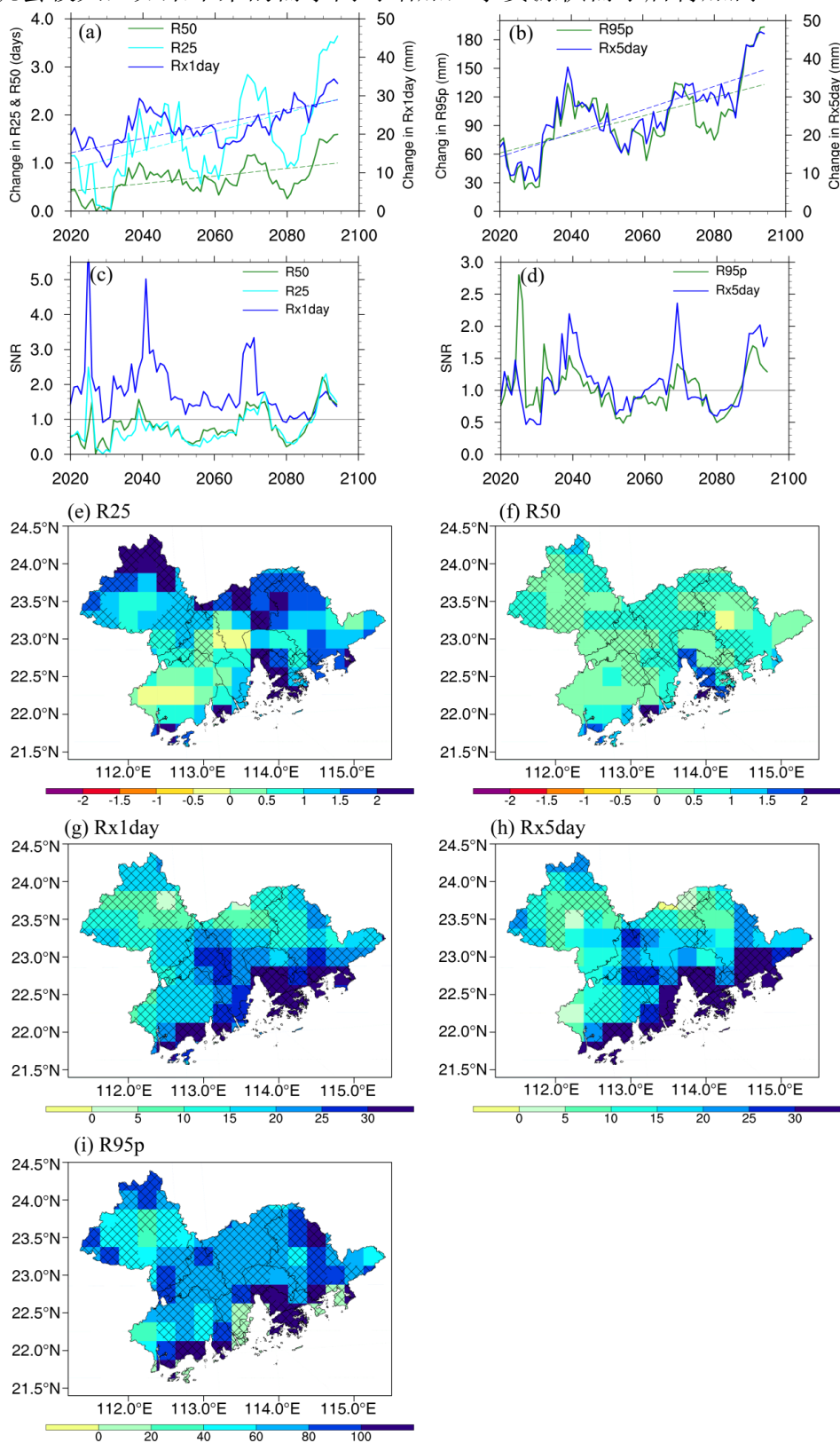


图 2.8 (a-b) 2021-2099 年区域平均变化的时间序列和 (c-d) 它们的 SNR 和 (e-i) 2046-2065 年降水极端变化的空间分布: (e) R25 (单位: 天), (f) R50 (单位: 天), (g) Rx1day (单位: mm), (h) Rx5day (单位: mm), (i) R95p (单位: mm)

(3) 台风、风暴潮与海平面上升未来风险

粤港澳大湾区处于广东中部沿海, 台风灾害风险评估显示, 大湾区相比粤西和粤东沿海的风险较小, 台风灾害风险最大的广东城市是粤西的湛江, 最小的是大湾区内的东莞 (尚志海和李晓雁, 2015)。但台风灾害造成的经济损失风险则有所不同, 大湾区内的广州、东莞、深圳、中山和珠海的风险较高, 从珠江入海口地区向内地风险呈辐射状减弱 (Yin et al., 2013)。这主要是由于粤港澳大湾区所处的地势较低, 而且人口相对密集、经济高度发达。

风暴潮风险评估主要是对未来风暴潮增水规模与频次的评估。广东沿海地区面临百年一遇风暴潮灾害风险最高的市 (区) 都在粤港澳大湾区内, 分别是珠海和中山, 其中中山由低风险区上升为极高风险区, 广州番禺 (包括南沙) 和台山 (江门下辖县级市) 由极高风险区下降为高风险区, 珠海风暴潮风险始终处于极高水平 (李阔和李国胜, 2017)。

在 IPCC 未来排放情景下对粤港澳大湾区登陆台风的强度和海平面上升的幅度进行了预估。在 RCP8.5 情景下, 登陆台风的峰值强度 (生命周期内最大的地面风速) 在不久的将来 (2015~2039 年) 预计增加 3.1%, 风暴潮在长远的将来 (2075~2099 年) 预计增加约 8.5% (Chen et al., 2020)。全球平均与珠三角海平面变化之间的关系估算指出, 全球平均海平面增加 1.0m 将对应于珠三角增加 1.3m (不确定性为 1.25~1.46m) (Xia et al., 2015)。粤港澳大湾区是中国沿海最易受海平面上升影响的地区之一。在 RCP8.5 情景下, 考虑地面沉降引起的相对海平面变化极值 (0.20m) 和月间变化极值 (0.33m), 预计到 2100 年珠三角海平面将上升 1.94m, 潜在淹没面积为 $8.57 \times 10^3 \text{km}^2$ 。研究指出, 海平面上升 1.0m 时, 珠江口东四口门虎门、蕉门、洪奇沥和横门的咸潮入侵长度将分别增加约 21.37km、9.64km、9.75km 和 4.82km (刘忠辉和宏波, 2019)。此外, 研究也预估了未来海平面上升造成的沿海红树林和海草生态系统的破坏程度以及湿地生态系统的侵蚀损失程度。未来情景下, 粤港澳大湾区被淹没农田的比例和农业生产的损失将逐渐增加, 大湾区内的阳江、佛山和东莞被淹没的农田明显增加, 而广州和珠海被淹没农田的增加速度相对缓慢 (Kang et al., 2016)。在农业损失中, 蔬菜将承受最大的生产损失, 其次是大米和花生 (康蕾等, 2015)。

(4) 气候变化的大气污染未来风险

空气污染受天气和气候条件的影响强烈, 因此其对气候变化很敏感。IPCC 预测, 未来城市的空气质量将会持续恶化, 并可能归因于反气旋天气条件的增加 (IPCC, 2014)。在近期未来 (2030~2039 年) 和远期未来 (2090~2099 年), 粤港澳大湾区多种空气污染物 (O_3 、 PM_{10} 及 SO_2) 在 RCP4.5 和 RCP8.5 排放情景下的变化指出, 6~8 月的污染物会减少, 但是其他季节的污染物水平都有所增加。

尤其在远期 RCP8.5 情景下, 预估的平均浓度变化更为显著。研究还发现, 12 月至次年 2 月及 3~5 月的高污染水平频率将会增加。污染事件发生比例预计将会增加 6.4%~9.6%。在未来, 仅气候变化这一个因素就将对粤港澳大湾区的空气质量产生持续性的重大影响 (Tong et al., 2018)。

空气质量模式也评估了未来气候变化和排放变化共同造成的臭氧污染风险 (Liu et al., 2013)。由气候变化引起的辐射和地面温度变化将导致 21 世纪初至 21 世纪 50 年代的异戊二烯和单萜排放量显著增加; 而地面温度高于 40°C 可能会抑制生物性排放事件的发生。由于气候变化, 预计下午的平均地面臭氧浓度将会增加 1.5ppb; 而由于人为排放的变化, 即使大湾区南部的臭氧会减少, 但大湾区整体臭氧的平均浓度将会增加 6.1ppb。在气候变化和人为排放的综合效应下, 大湾区下午的地面臭氧浓度将会增加 11.4ppb。目前的评估结果强调, 尽管人为排放变化的影响较大, 但气候变化对臭氧的影响仍然重要。

2.3.3 青藏高原

青藏高原是对全球气候变化响应最为敏感的地带之一, 也是生态环境脆弱地区, 是中国重要的水源地和生态屏障区。

(1) 青藏高原气候显著暖湿化, 极端天气气候事件增多

1961-2020 年, 青藏高原年平均气温呈显著上升趋势 (图 2.9), 达 0.35°C/10 年, 略低于同期北极地区的增温速率 (0.51°C/10 年), 超过同期全球增温速率 (0.16°C/10 年) 的 2 倍。青藏高原是中国气候变湿最为显著的区域。1961-2020 年, 青藏高原年降水量呈显著增多趋势, 平均每十年增加 7.9 毫米, 其中, 高原中部三江源等地变湿最为显著, 年降水量平均每十年增加 5-20 毫米。特别是 2016 年以来, 青藏高原地区降水量持续异常偏多, 2016-2020 年青藏高原平均降水量达 539.6 毫米, 较 1961-1990 年平均值 (478.6 毫米) 增加了 12.7% (图 2.10)。

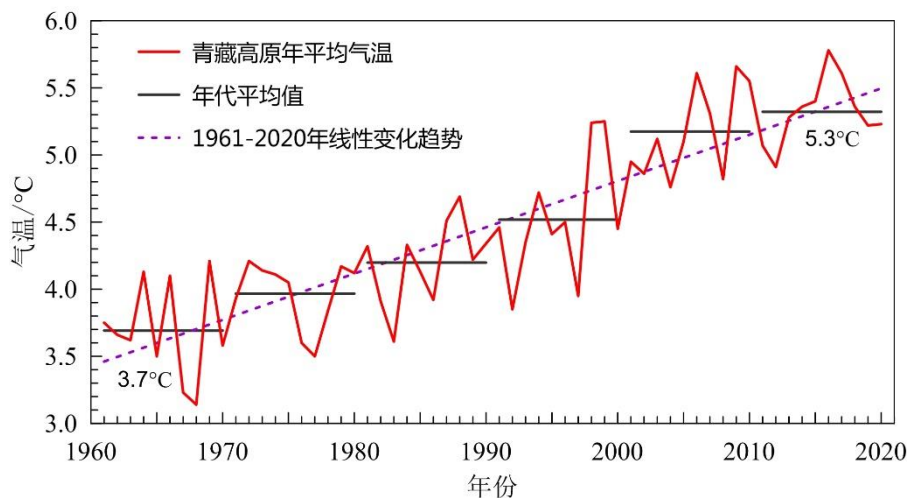


图 2.9 1961-2020 年青藏高原平均气温变化

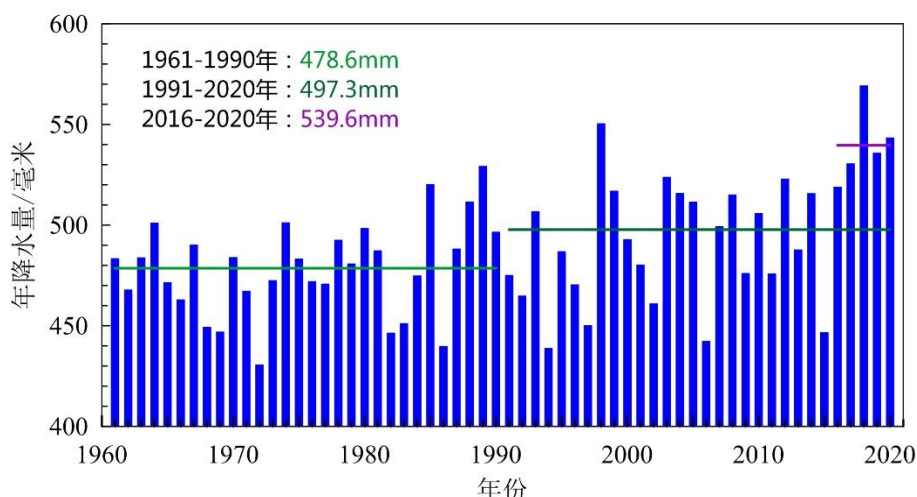


图 2.10 1961-2020 年青藏高原平均降水量变化

青藏高原气象灾害及衍生灾害增多。气候暖湿化背景下，近 40 年，高原大部分地区极端高温事件和极端降水事件发生频次显著增加，暴雨、暴雪、冰雹、雷电和大风等气象灾害增多，泥石流、滑坡、崩塌、冰湖溃决等衍生灾害加剧。1983 年以来，西藏共发生严重气象灾害 1244 起，发生频次呈增多趋势，增幅为 5.6 次/年。例如：2019 年 1 月下旬，西藏聂拉木县日最低气温 (-21.7℃) 突破低温历史极值；2019 年 7 月下旬西藏多个国家级气象站最高气温突破当地有气象记录以来的历史极值。

(2) 青藏高原气候变化显著影响水资源和生态环境

青藏高原冰川强烈退缩，“水塔”功能^①不稳定性加大。过去 50 年，冰川加速退缩，储量减少 15%，面积由 5.3 万平方公里缩减为 4.5 万平方公里。其中，喜马拉雅山、横断山、念青唐古拉山和祁连山冰川面积缩小 20%-30%，高于帕米尔高原、唐古拉山和喀喇昆仑山冰川面积减少 10%-20% 的比例。冰川的强烈退缩和冰川“固体水库”储存水资源的短期大量释放，会使大部分冰川补给河流径流量在近期和短期内增加；但随着冰川的不断退缩和冰川水资源储量的长期损失，会出现冰川径流达到峰值后转入逐渐减少的临界点，最终加剧冰川径流减少，“水塔”功能不稳定性加大，从而对区域及下游水资源的可持续利用产生重大影响。

青藏高原冻土加速消融，影响青藏铁路、青藏公路的安全运行。过去 50 年，高原多年冻土面积由 150 万平方公里缩减为 126 万平方公里，减少 16%。1981-2019 年，青藏公路沿线多年冻土区活动层厚度（最大融化深度）显著增加，平均每十年增厚 19.6 厘米（图 2.11）；2004-2019 年，活动层底部温度显著上升，多年冻土退化明显。冻土的加速消融，对青藏铁路、青藏公路的安全运行构成威胁。

^① 青藏高原因其特殊的地形、丰富的淡水资源和发源河流的重要水资源意义，称为“亚洲水塔”。

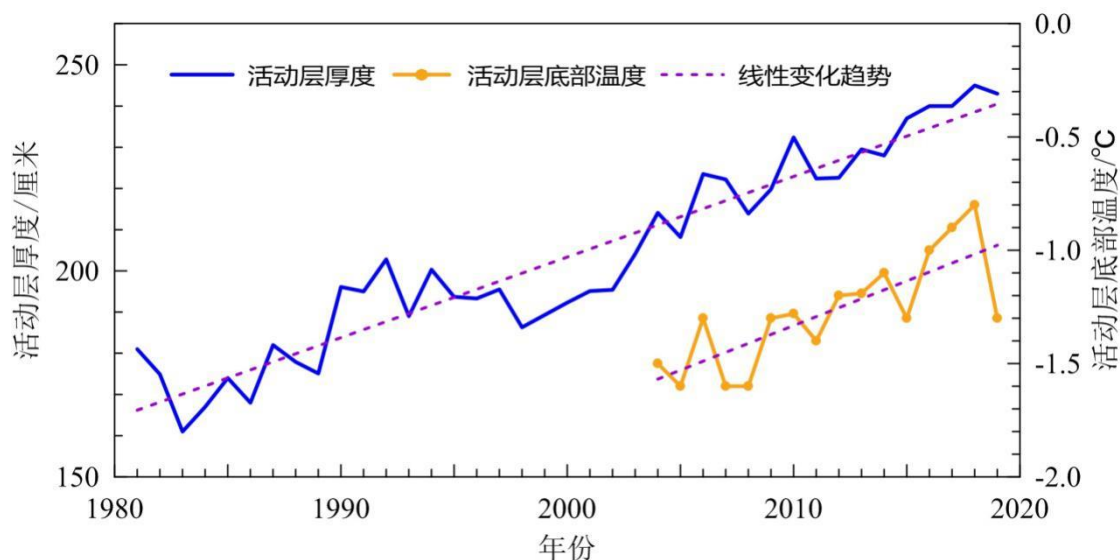


图 2.11 1981-2019 年青藏公路沿线多年冻土区活动层厚度和活动层底部温度变化

青藏高原湖泊数量增多、面积增大。受降水、蒸发以及区域升温引起的冰雪融水变化影响，青藏高原 80%以上的湖泊处于扩张状态。近 50 年湖泊面积增长了 5676 平方公里，大于 1 平方公里的湖泊数量，从 1081 个增加到 1236 个，增加了 14%。其中，1987-2019 年，色林错水域面积由 1634 平方公里扩张为 2413 平方公里；2005 年以来，受流域暖湿化影响，青海湖水位稳定回升，2020 年水位达到 3196.34 米，恢复至 20 世纪六十年代初期的水位。

青藏高原生态系统总体趋好。气候暖湿化背景下，高原生态系统发生显著变化，植被物候返青期提前，枯黄期推后，生长期延长，草地净初级生产力和生态系统碳汇呈总体增加态势，高寒草地生产力增加，从而改变了农区种植制度，两季作物适宜种植的潜在区域扩大，复种指数增加，无霜期延长，拓展了农牧业结构调整空间，增加了农牧民收入；森林资源变化显著，上世纪九十年代末以前森林面积和蓄积量呈下降态势，之后均呈持续增加趋势，森林碳汇增加。

(3) 未来青藏高原将继续变暖，气候与环境灾害风险进一步加剧

青藏高原未来仍将继续变暖。国家气候中心气候模式预估表明，在未来温室气体中等排放情景下，相对于基准期（1986-2005 年），到 2050 年，青藏高原年平均气温将升高约 1.5°C，冬季升温最大值可超过 2.2°C；年降水量将增加，但增幅低于 10%，青藏高原地区极端降水也将明显增加，横断山区强降水日数将增加 2-4 天。

青藏高原地区冰冻圈在本世纪都将呈持续退缩状态，加剧气候与生态环境灾害复合风险。冰川消融退缩和多年冻土退化将降低山坡稳定性并增加冰湖的数量和面积，从而导致滑坡和洪水事件多发；多年冻土退化将增大青藏铁路、公路路基工程的失稳风险；同时，伴随区域大幅升温 and 人类活动加强，青藏高原冰湖溃决灾害增多，冰川泥石流趋于活跃，特大灾害和巨灾发生的频率增大。

由于缺乏历史观测资料和相关技术指标，青藏高原地区的自然灾害评估工作

十分有限。团队在多次开展实地调研的基础上，构建了青藏高原主要气象灾害危险性评估的指标体系，系统性识别了青藏高原干旱、暴雨、雪灾和风雹四类气象灾害高危险区的历史演变过程，绘制了气象灾害综合致灾强度分布图(图 2.12)，并结合人口暴露度指标分析了各类灾害的潜在风险水平。

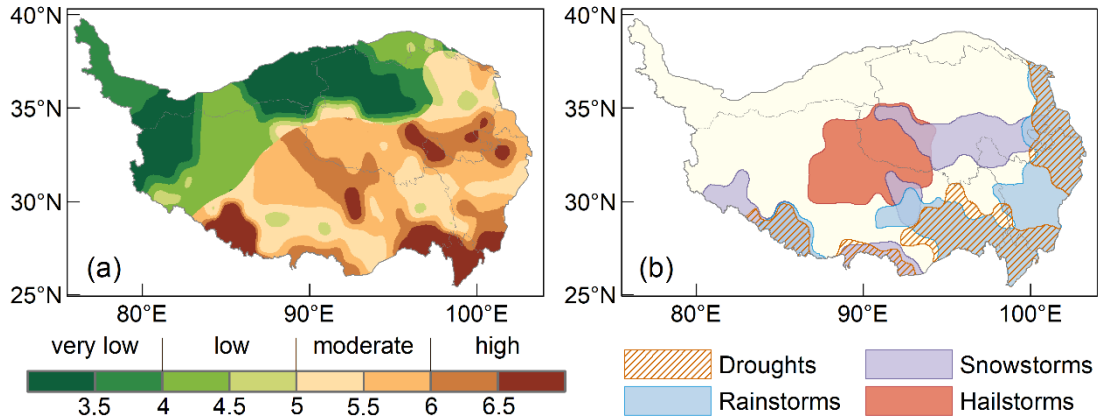


图 2.12 青藏高原主要气象灾害综合致灾强度分布图 (a) 及高危险区示意图 (b)

2.3.4 黄河流域

黄河流域大部分地区位于中国南北气候过渡带，降水年际、年代际变化大特征明显。

(1) 极端性与气候变化趋势

1961-2018 年，流域内极端最高气温出现在河南伊川 44.4℃（1966 年），极端最低气温青海玛多-48.1℃（1978 年）。1961 年以来，黄河流域年平均气温、平均最高气温和平均最低气温均呈上升趋势，升温幅度分别为每 10 年 0.28℃（图 2.13）。其中，黄河上游平均每 10 年升高 0.36℃，中游和下游每 10 年分别升高 0.35℃和 0.25℃。黄河流域高温日数呈增加趋势，常年平均高温日数 5.6d，最多年 14.4d（1997 年），最少年 1.2d（1984 年）。1961 年以来，黄河流域高温日数总体呈增加趋势，增加幅度为每 10 年 0.4d。

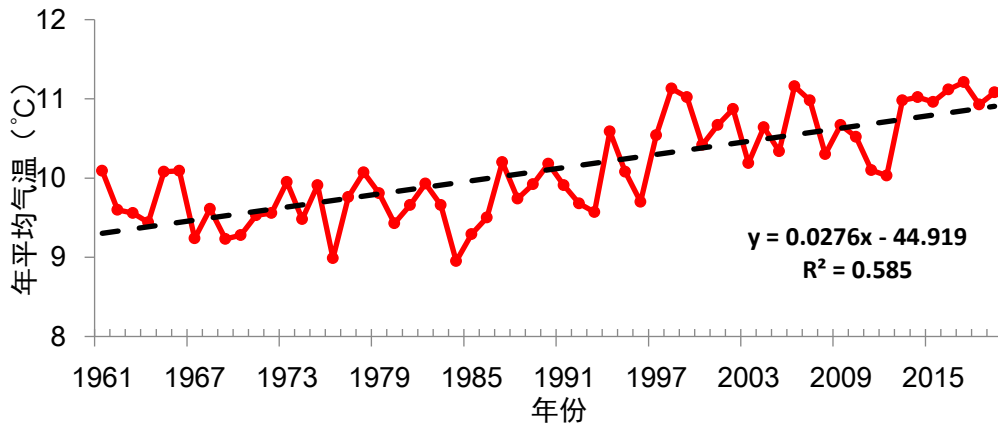


图 2.13 黄河流域年平均气温线性变化趋势

黄河流域降水变化为北部增多,南部减少,极端降水强度增强、年际变率大。年平均值为 465.6mm,最多年降水量 697.8mm(1964 年),最少年 336.8mm(1997 年)。1961 年以来,流域降水量降水年际变化大,总体呈减少趋势。流域降水量呈减少趋势,减少幅度为每 10 年 5.4mm(图 2.14)。21 世纪以来降水快速增加,2003-2019 年平均降水量比上世纪 90 年代偏多 10.8%。尽管黄河中游地区总降水量呈减少趋势,但是极端降水强度增强。黄河流域降水日数总体呈减少趋势,减少幅度为每 10 年 2.5d。黄河流域年平均相对湿度 60.7%,呈弱减小趋势。最大年 69.2%(1964 年),最小年 56.2%(2013 年)。

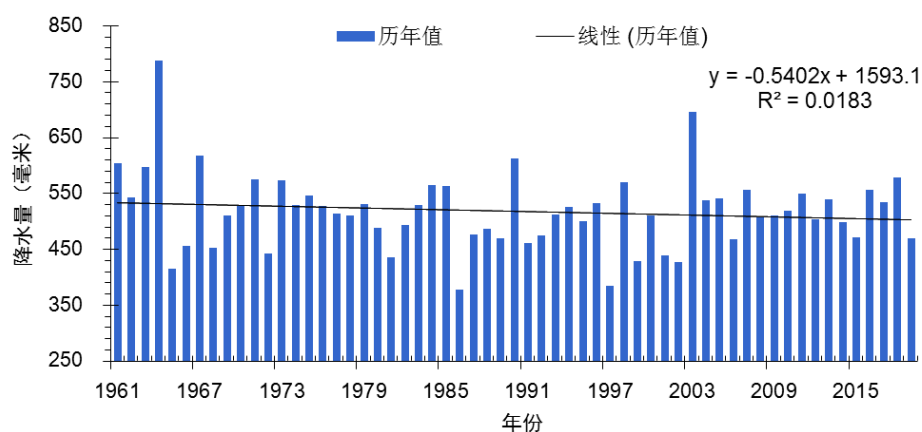


图 2.14 1961 年以来黄河流域年平均降水变化特征 (单位: mm)

(2) 冰川面积与水资源变化趋势

受区域升温的影响,黄河上游地区冰川面积表现为一致性的退缩趋势,积雪日数总体呈减少趋势。各主体冰川面积均呈现显著退缩,退缩减少幅度在 8%~13%之间。三江源标志性冰川之一小冬克玛底冰川,在 1989-2015 年,累积物质平衡亏损 7.615mm;在青海祁连山区,近 50 年来冰川面积减少 198.44km²(减少了 19.17%)。1961 年以来,黄河流域地表水资源量总体呈现微弱下降趋势,年代际丰枯变化明显(图 2.15),上世纪 60 年代到 80 年代以偏多为主,其中 60 年代最多,较常年偏多 9.6%;90 年代为枯水时段,较常年偏少 5.2%;本世纪以来地表水资源呈回升态势,2011 年以来明显偏多 8.2%。2003 年和 1964 年为水资源最为丰富的 2 年,分别较常年偏多 38.6%、49.9%。

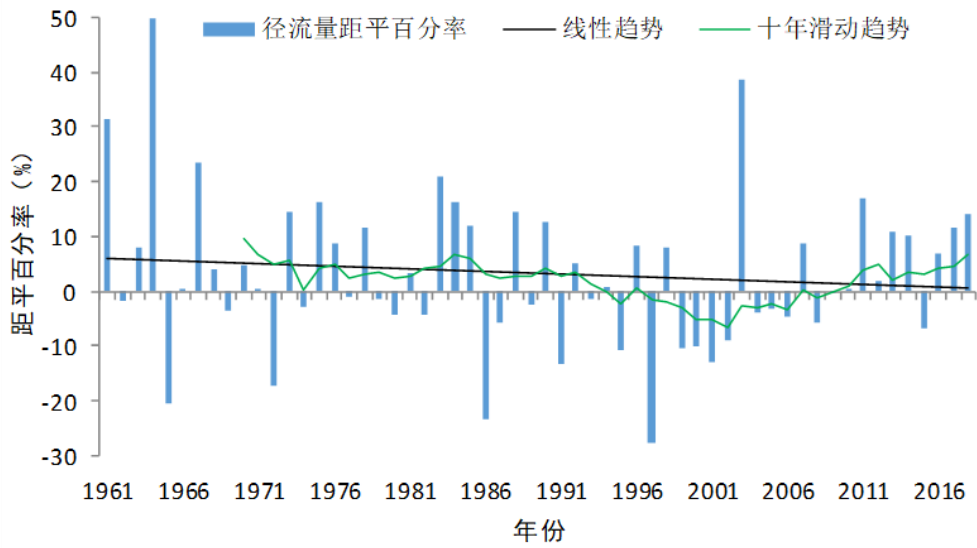


图 2.15 黄河流域地表水资源距平百分率历年变化 (单位: %)

(3) 未来气候变化预估与气候风险

在全球变暖背景下,未来黄河流域气温继续升高、降水增多。黄河中游降水和强降水增多,水土流失防治任务依然艰巨;黄河上游气温继续升高、降水增多,将对冰川、积雪、冻土等产生重要影响,并将进一步影响径流、水资源及生态环境的变化。

未来黄河流域气温继续升高。如图 2.16 所示,在 2021-2035 年时段内,区域平均的夏季增幅高于年平均,而冬季增幅年代际波动大;年、冬季、夏季的多年平均升温值分别为 1.01°C、1.09°C和 1.12°C;升温幅度在整个区域大体呈由东向西逐渐增大的趋势,一般在 0.9~1.2°C之间。2050 年前后,黄河流域年平均气温呈一致升高趋势,升温幅度在整个区域大体呈由东向西逐渐增大的趋势,一般在 1.4~2.0°C之间。

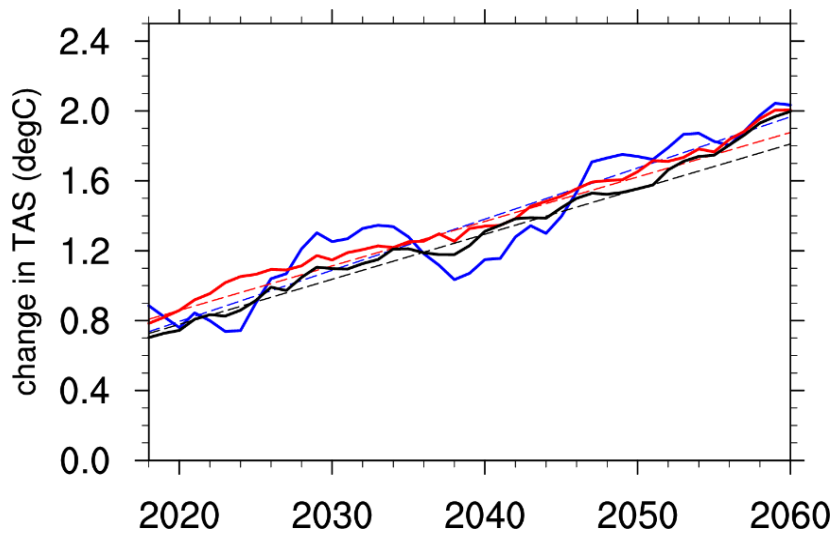


图 2.16 黄河流域 2050 年前后年平均气温变化趋势预估

(黑色是年滑动平均, 蓝色是冬季, 红色是夏季)

未来黄河流域降水总体增加。中等排放情景下, 未来年、冬季、夏季降水都以增加为主, 增幅有明显年代际变化特征且随时间增加, 年降水增加速率为 0.9%/10 年。如图 2.17 所示, 在 2021-2035 年时段内, 夏季降水增幅与年降水的变化特征较为一致, 但增幅略小, 冬季降水量本身较少, 因此增幅百分比相对较大; 年、冬季、夏季的多年平均增幅分别为 3.9%、8.4%和 3.4%。2050 年前后, 黄河流域年平均降水量以增加为主区域平均增加幅度为 5.5%; 冬、夏季区域平均降水增幅分别为 15.9%和 3.9%。2050 年前后, 黄河流域大雨日数整体增加幅度较小, 大部分地区不超过 2d。增幅大值区主要分布在中游地区, 增幅在 0.5~1.5d; 而上游和下游地区多不超过 0.5d。

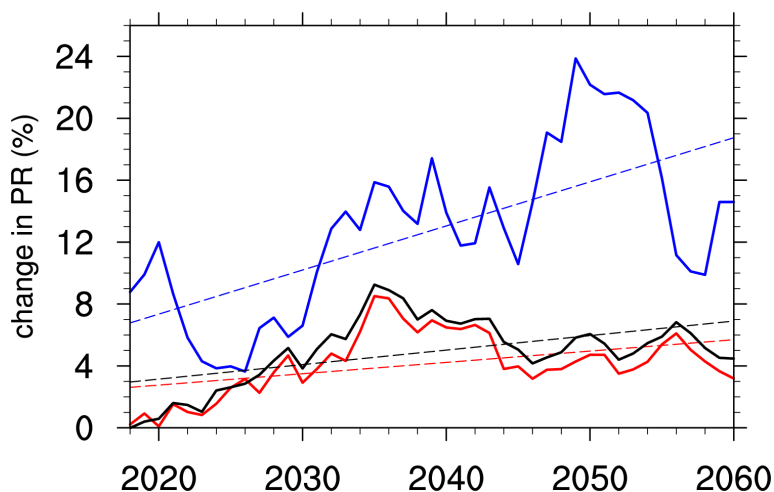


图 2.17 黄河流域 2050 年前后年平均降水变化趋势预估

未来流域干旱风险增加、径流变化显著。中等排放情景下, 2021-2035 多年平均, 黄河流域内各地的连续无降水日数以减少为主; 上游地区减少值多数可超过 4d, 中下游的少数地区为增加, 但其增幅一般不超过 2d。未来黄河上游特别是黄河源头显著的增温, 将对冰川、积雪、冻土等产生重要影响, 并将进一步影响径流、水资源及生态环境的变化。未来处于青藏高原的黄河源积雪日数和雪水当量均将减少, 最大减少幅度分别在 25d 和 10mm 水当量以上; 未来气温升高还将可能会使黄河源区冻土环境发生显著的变化, 若气温平均升高 1.1°C, 多年冻土的消失比例为 19%。如果气候变暖趋势继续, 黄河流域内冰川、积雪和冻土在未来几十年里可能会继续发生变化。其中积雪的减少将使得春季融雪径流减少或消失, 积雪对河川径流的调节能力将显著减弱, 春旱将日趋严重, 干旱形势加剧, 生态环境将面临严峻风险。

2.4 典型城市的气候变化风险：以深圳为例

在全球气候变暖和本地快速城市化进程的双重影响下, 深圳将成为全球超大城市中气候风险最大的城市之一。

(1) 台风风暴潮风险增加

近 10 年来影响深圳的台风数量增多、台风影响季节逐渐拉长、影响深圳台风的强度越来越强。2017 年 8 月底至 9 月初，台风十天内三连击珠三角，给深圳带来严重影响。其中“天鸽”影响期间，海上石油平台最大浪高 10.5 米，台风增水引起宝安西部排涝河、衙边涌局部河段出现漫堤，大鹏新区土洋上洞村海水倒灌。2018 年超强台风“山竹”造成全市 14 万棵树木倒伏，最大浪高达 14.2 米，沿海大量设施遭冲毁；2018 年台风“艾云尼”与季风叠加，带来持续性强降水，深圳单站记录到的最大过程雨量达到了 568.9 毫米，2019 年台风“韦帕”对深圳造成了严重风雨影响，台风综合降雨影响位居 2008 年以来第 6 位强。

(2) 暴雨冲击越来越大

极端（或异常）降水事件频率有所增加。统计表明，日雨量极值增加趋势明显。1992 年以来日雨量极值超过 300 毫米的年份有 8 次，其中 6 次出现在 2008 年以后，近 3 年每年日雨量极值都超过了 300 毫米。

同时短历时暴雨越来越多发，2007 年以来平均小时雨强 113.8 毫米/小时，比 90 年代平均值增加了 54%。短历时降水的雨强也不断刷新历史极值，2019 年记录到的 1 小时雨量极值 136.5 和 2 小时雨量极值 189.8 都已创造了历史记录。

(3) 强对流天气越来越多发

强对流天气已成为深圳致灾风险最高的灾害性天气。飊线、下击暴流、龙卷等强对流天气引发的瞬时风力往往可达到 10 级以上，并通常伴有冰雹和短时极端强降水，极容易造成严重破坏。特别是强对流天气局地性强、突发性高、来去迅猛、预警时效短。深圳 2019 年 4 月记录到了 4 次飊线过程，其频繁程度近 10 年最高，与 2008 年持平。

(4) 高温热浪频繁、冬季冷暖突变

自上世纪 80 年代开始深圳市气温明显增高，近 10 年平均气温比 60 年代增加了 1.6℃，超过全球近百年平均增幅（0.85℃）一倍。深圳市当前平均每年约 39 个 33℃以上的高温日，远高于上世纪 60 年代的平均每年的 25 天。夏季高温热浪的频发对城市电力负荷提出了越来越高的要求，2019 年 7 月深圳电网统调负荷首次突破 1900 万千瓦大关，年内第 4 次创历史新高。冬季季节平均气温总体呈升高趋势，暖冬已成为常态，2000 年至今共出现了 10 个暖冬，50-70 年代仅出现 1 个暖冬。尽管如此，深圳冬季却变得冷暖无常，极端或异常冷空气过程时常出现。

(5) 海平面上升加剧了台风的致灾风险

1980 至 2016 年，粤港澳大湾区海平面总体呈波动上升趋势，香港维多

利亚港和大埔窖吐露港海面平均每年分别上升 6.8 毫米和 4.8 毫米，均明显高于同期中国沿海海平面平均水平（3.2 毫米/年），这将加剧台风风暴潮的影响，沿海电力、道路、地下管网等基础设施安全运行面临的风险加大。除此之外，海岸侵蚀、咸潮出现几率加大，2016 年 10 月珠江口咸潮入侵，持续时间达 45 天，最大上溯距离超过 33 千米，严重影响大湾区城市供水。

（6）城市化发展加剧了气候风险

在气候风险逐渐增加的背景下，深圳城市自身发展的特点也值得关注。一是地表大面积硬化，近年来建成区不断扩大，道路面积也逐年增加，2017 年道路面积比 2012 年增加了 14%，使得强降水难以下渗，会快速变成径流汇集到低洼处，非常容易形成城市内涝。二是地下空间增幅快，深圳大量修建地铁、地下通道和地下综合商业体，2000 年至 2012 年间，福田全区平均每年增加 34.5 万平方米地下空间开发量，年均增幅达 10.7%。这些地下空间与深圳已有的大量暗河水渠交织，密布于深圳地下。然而对于这些地下空间在气候变化背景下的安全风险，却缺乏综合的、全面的、系统的评估。今年的 4.11 短时极端强降水导致的灾害就是在这种背景下发生的。三是高层楼宇增多，深圳目前在建及封顶的 300 米以上超高层项目达 15 个之多，居全国首位。这么多高层楼宇在台风强度逐渐增加的大背景下，其建筑结构抗风能力和玻璃幕墙的耐用性、安全性问题值得关注。四是存在大量削坡建房，受地形影响，深圳有大量城中村依山而建或存在削坡建房现象，这些地区人口密集，地质灾害风险高。强对流、暴雨、台风将成为未来长期威胁深圳城市公共安全的重要因素。除此之外，气候变暖和极端高温天气增加将使制冷能耗明显增加，对深圳市用电总量带来更大压力。对于上述特点必须高度重视，若疏忽则气候变化对我市产生的风险不可估量。

（7）未来气候风险预估

受人为温室气体排放等外强迫的影响，未来深圳气温将持续上升，夏季气温上升的幅度比冬季略大。以 1986-2005 年为基准期，到 2050 年附近，年平均、夏季和冬季气温将分别升高接近 1.2°C、1.4°C 和 1.3°C，到 2100 年附近，升高接近 1.7°C、2.0°C 和 1.8°C（图 2.18 左）。未来冬、夏季和年平均降水的年代际变化波动显著，到 2100 年以增加为主，并且冬季降水的相对变化值高于夏季。到 2050 年附近年平均、夏季和冬季降水分别增加约 10%、7% 和 15%；到 2100 年附近，分别增加 15%、10% 和 35% 以上（图 2.18 右）。

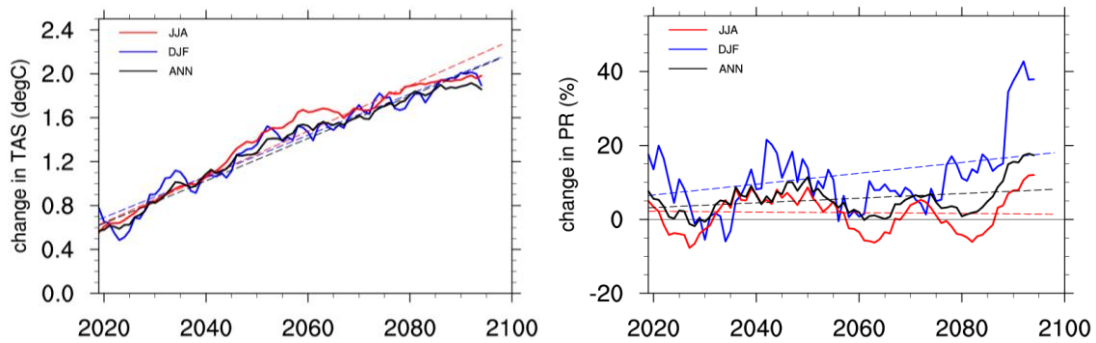


图 2.18 未来深圳年平均、夏季和冬季平均气温（左图，单位：°C）和平均降水（右图，单位：%）的变化（相对于 1986-2005 年）

未来极端高温事件增加，日最高气温极值增加，大雨日数小幅增加，5 日最大降水量和极端强降水量增幅显著，强降水量增幅十分显著。

未来极端高温事件呈增加趋势。到 2050 年，高温日数（每年日最高气温大于 35°C 的全部天数）增加 26 天，而日最高气温最高值（每年日最高气温的最大值）增加 1.7°C。到 2100 年，高温日数增加近 36 天，而日最高气温最高值增加 2.3°C（图 2.19）。

5 日最大降水量的变化在未来呈现年代际波动，但总体以增加为主，其中 2025-2050 年、2065 后主要呈增加趋势，2020-2025、2050-2065 呈显著下降趋势；到 2050 年，5 日最大降水量增加约 50mm，到 2100 年，增加约 80mm（图 2.20）。大雨日数的变化呈现显著的年代际波动。与降水量的相对变化趋势类似，2020-2030 年、2050-2060 年、2075-2080 年均呈下降趋势，在 2030 年前达到最低值，减少值约为 2 天；2030-2050 年、2060-2075 年、2080 年后呈增加趋势；2050 年前后增加约 3.4 天，2100 年前后达到峰值，增加值约为 3.6 天（图 2.20）。

强降水量和极端强降水量的变化也呈现年代际波动，二者变化趋势类似，均在 2020-2025、2050-2065、2070-2080 年呈下降趋势，在 2025-2050、2065-2070、2080 年后呈增加趋势。到 2050 年，强降水量增加约 170mm，极端强降水量增加约 140mm。到 2100 年，强降水量增加约 260mm，极端强降水量增加约 190mm（图 2.21）。

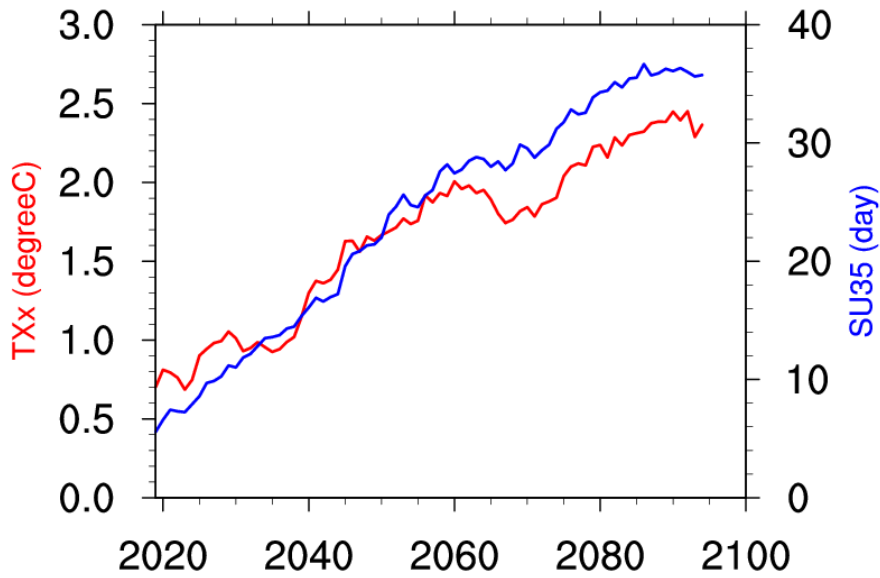


图 2.19 未来深圳极端气温的变化（相对于 1986-2005 年。蓝色和红色分别是夏季日数（单位：天）和日最高温度（单位： $^{\circ}\text{C}$ ））

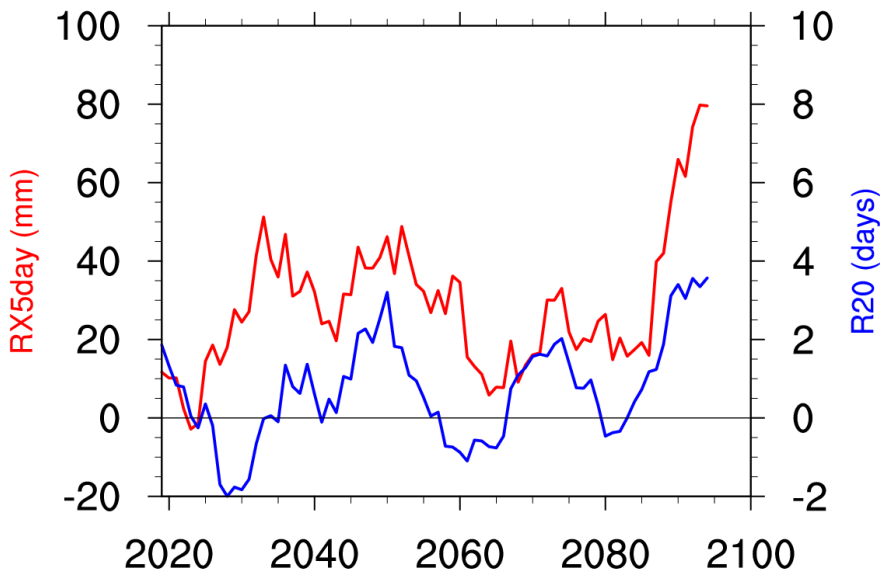


图 2.20 未来深圳极端降水的变化（相对于 1986-2005 年。蓝色和红色分别是大雨日数（单位：天）和 5 日最大降水量（单位：毫米））

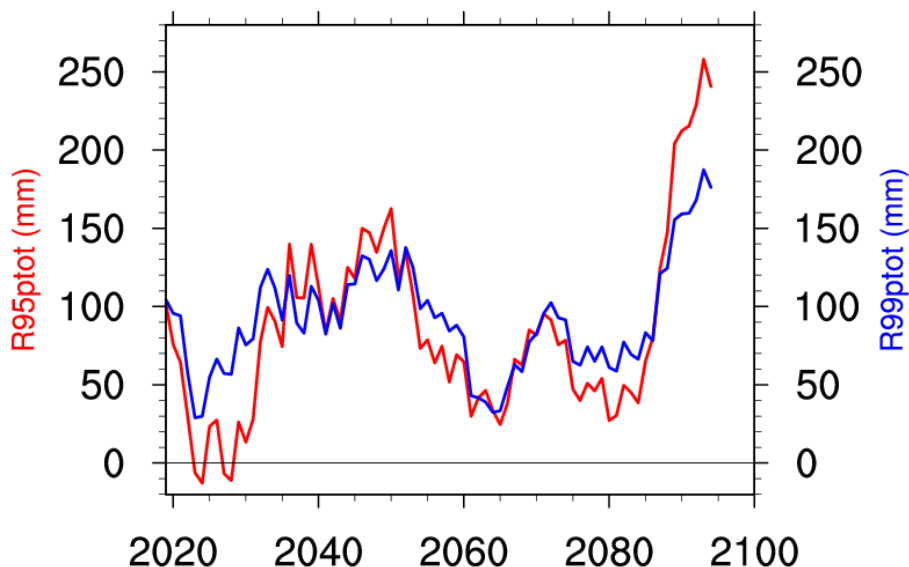


图 2.21 未来深圳极端降水的变化（单位：毫米，相对于 1986-2005 年。蓝色和红色分别是极端强降水量和强降水量）

2.5 政策和实践

2.5.1 政策颁布与实施

中国是一个发展中国家，人口众多、经济发展水平低、气候条件复杂、生态环境脆弱，易受气候变化的不利影响。气候变化对中国自然生态系统和经济社会发展带来了现实的威胁，主要体现在农牧业、林业、自然生态系统、水资源等领域以及沿海和生态脆弱地区，适应气候变化已成为中国的迫切任务。同时，中国正处于经济快速发展阶段，面临着发展经济、消除贫困和减缓温室气体排放的多重压力，应对气候变化的形势严峻，任务繁重。

作为一个负责任的发展中国家，中国高度重视应对气候变化。中国充分认识应对气候变化的重要性和紧迫性，按照科学发展观的要求，统筹考虑经济发展和生态建设、国内与国际、当前与长远，制定并实施应对气候变化国家方案，采取了一系列应对气候变化的政策和措施。近 10 年来主要政策方案与行动如下：

- (1) 2007 年《节能减排综合性工作方案》
- (2) 2007 年《中国应对气候变化国家方案》
- (3) 2008 年《中国应对气候变化的政策与行动》
- (4) 2011 年《“十二五”节能减排综合性工作方案》
- (5) 2011 年《“十二五”控制温室气体排放工作方案》
- (6) 2012 年《“十二五”节能环保产业发展规划》
- (7) 2012 年《节能减排“十二五”规划》
- (8) 2013 年《国家适应气候变化战略》
- (9) 2016 年《“十三五”节能减排综合工作方案》
- (10) 2021 年《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的

指导意见》

(11) 2021 年《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》

(12) 2021 年《关于 2030 年前碳达峰行动方案的通知》

中国通过制定应对气候变化的相关政策和措施,把应对气候变化与实施可持续发展战略、加快建设资源节约型、环境友好型社会和创新型国家结合起来,纳入国民经济和社会发展规划和地区规划;一方面抓减缓温室气体排放,一方面抓提高适应气候变化的能力。中国将采取一系列法律、经济、行政及技术等手段,大力节约能源,优化能源结构,改善生态环境,提高适应能力,加强科技开发和研究能力,提高公众的气候变化意识,完善气候变化管理机制,逐渐形成气候变化风险治理与应对的“中国方案”。

2.5.2 典型实践案例：深圳气候风险的应对模式

深圳在气候变化风险应对的政策及措施实施等方面积极探索,形成了比较成熟的落地模式。

(1) 2021 年 6 月 29 日深圳市第七届人民代表大会常务委员会第二次会议通过了《深圳经济特区生态环境保护条例》,将应对气候变化作为主要章节之一,对应对气候变化一般性工作、碳达峰和碳中和、碳排放权交易等进行了规定。其中提出:“市、区人民政府应当完善气候变化监测系统和气候灾害监测、预测、预警体系,制定气候灾害应急预案,建立数据共享平台,定期评估气候变化对生态系统、基础设施、重点经济领域以及居民健康和财产安全的影响(第一百条)”和“市、区人民政府应当建立完善气候风险管理机制,提高防洪排涝、公共交通等重大基础设施以及重要产业和重点区域抵御气候风险的能力(第一百零一条)”。在推进碳达峰、碳中和工作和完善碳排放权交易机制等方面制定了实现方案、管控机制、标准与指标等,保障碳减排工作、推进绿色高质量发展。

(2) 2021 年 8 月,国家发改委发布《关于推广借鉴深圳经济特区创新举措和经验做法的通知》,推广党的十八大以来深圳经济特区 5 方面 47 条创新举措和经验做法。其中,在创新推动城市治理体系和治理能力现代化方面,深圳气象部门“创建‘31631’服务模式”作为“强化防灾减灾救灾体系建设”的经验被纳入其中。即,在台风、暴雨等重大天气来临前,气象部门提前 3 天加密区域天气会商,发布(重大)气象信息快报,给出过程风雨预测、风险预估、预警信号发布节奏及防御建议;提前 1 天预报精细到区的风雨落区、具体量级和重点影响时段,加密与应急管理、三防、水务、海洋等多部门联合会商;提前 6 小时进入临灾精细化气象预警状态,定位高风险区;提前 3 小时发布分区预警和分区风险提示,滚动更新落区、过程累计雨量、最大雨强、最大风速等风情雨情信息;提前 1 小时发布精细到街道的定量预报。该“‘31631’服务模式”提高了深圳应对极端气候事件的风险防范能力。

2.6 关键信息和建言

2.6.1 关键信息

随着全球气候变化，未来温度和降水的极端性趋势将会更明显，高气候变率状态下中国高温热浪、暴雨洪涝、干旱等极端灾害发生的时间、强度、频率、区域特征呈显著变化，重点区域和关键领域的未来复合灾害风险日益加剧。气候变化对中国关键社会经济系统的风险主要表现在农业、交通、能源、旅游等关键行业和城市人居环境、人群健康以及重大工程等方面，并存在极大的空间差异性。通过对重点区域的风险研究表明，各区域的气候风险特点突出，东西部差异较大。东部长江经济带和粤港澳大湾区主要以极端高温、降水及海平面上升等风险为主，西部青藏高原地区以暖湿化及冰川融化引起的水资源风险为主，中部黄土高原地区的极端降水和干旱风险突出。因此，在碳达峰/碳中和目标下，国家和地方政府在气候变化应对相关政策制定中要根据区域特点，兼具环境、气候、健康、能源、经济和社会发展协同效益。

2.6.2 中国和重点区域的气候风险应对建议

气候变化的风险是全球面临的共同挑战，中国遭受的气候变化风险等级处于全球较高水平，气候变化不利影响已深入经济社会系统。中国积极推动全球绿色、低碳、可持续发展，推动构建人类命运共同体。近年来围绕《国家适应气候变化战略》，在多个领域开展气候变化适应工作并取得积极进展。建议提高气候变化的应对能力从以下方面继续发力：

(1) 重视并提高适应气候变化特别是应对极端天气和高影响气候事件能力。近年来中国适应气候变化特别是应对极端灾害的能力得到明显提高，因灾死亡人数和直接经济损失占国内生产总值的比例呈明显下降趋势。但是，由于目前中国正处于快速城市化进程中，人口和财富的进一步集中以及一定程度上存在的无序建设等情况，将加剧极端气候灾害的风险。为进一步提升应对极端天气和高影响气候事件能力，需制定新时期的《国家适应气候变化战略》，将应对极端气候灾害作为适应气候变化的核心内容，强化极端气候灾害风险防范措施，进一步提升极端天气气候事件的精密监测和精准预测能力，加强气象灾害风险管理。开展生态和环境气象服务，开展重点区域、特色产业的气候变化影响评估，加强与极端气候事件和灾害相关的农业、水资源、生态和健康等方面的风险应对，研究提出适应气候变化的相关措施，提高社会经济系统韧性。

(2) 提升气候变化风险应对能力，开展重点区域防灾减灾应用示范、技术推广。发挥多部门联动机制，根据防灾减灾救灾日常业务需求，开展灾害风险应对中的关键技术研究，持续推动最新技术成果应用于日常自然灾害应对业务系统，强化服务领域拓展，提升精细服务能力；利用多学科交叉和综合研究手段和方法，进一步开展灾害变化的状态、过程和驱动因子研究，评估气候变化对区域生态环境和重大工程建设的影响和风险，提高对灾害风险的防御能力；在自然灾害高发

区和高风险区、连片贫困地区、重大战略实施区等开展自然灾害风险评估及风险区划，推动灾害风险评估及区划标准化、制度化，并应用示范、技术推广。

(3) 创新机制、模式和内容，完善灾害损失分担和适应气候变化的金融体系。将气候变化相关风险纳入金融机构的宏观审慎管理与微观审慎监管，完善绿色金融考核制度和信息披露机制。强化金融服务的环境风险和社会风险防范意识，全方位提升绿色金融的科技支撑，推进大数据、人工智能、云计算等前沿科技助力绿色金融发展的应用，加快金融风险分析模型自主创新研发，以支撑气候变化各场景下的风险模拟和压力测试，防范气候变化风险应对过程中系统性金融风险的发生。极端天气之下，充分发挥气象灾害保险的“兜底”作用，成为亟待探索实践的一项重要课题。气象部门与保险行业应基于气象灾害预警信息，结合保险保障和风险管理措施，进一步在精细化防灾防损、人员疏导、财产转移等环节加强合作。特别是研究全球气候变暖对于自然灾害发生、生物多样性、经济增长的影响，前瞻性地开展模型预测及解决方案设计。中国巨灾保险尚处在探索阶段，风险证券化和其他有关衍生工具的尝试与应用尚未成熟。应积极在巨灾保险分担机制、模式及内容创新上进一步探索。加强能源设施适应能力提升，包括输变电设施抗风、抗压、抗冰冻改造等应对气候变化的针对性措施，以及人群健康领域适应能力提升的金融工具设计。

(4) 注重气候变化风险管理制度建设和保障措施

注重开展气候变化风险管理的制度建设，将气候变化对极端事件和灾害风险管理纳入法制化管理的轨道。其中，国家应急减灾部联合推动国家、省、地市、区县、乡镇五级自然灾害应急救援预案体系建设，对自然灾害救助启动条件、组织指挥体系及职责任务、应急准备、预警预报与信息管理等、应急响应、灾后救助与恢复重建等内容，做出明确规定；气象部门制定各级气象灾害应急预案，对气象灾害监测预警、应急处置、恢复与重建、应急保障等内容做出详细规定。针对气候变化下灾害风险管理过程中的预警预报、应急响应、恢复重建、减灾救灾等关键环节存在的问题，加强顶层设计、统筹布局、强化薄弱环节，逐步建立和完善国家灾害风险管理科技支撑体系。加强科技应急机制建设，建立国家突发公共事件科技应急机制；加强灾害风险管理人才培养体系建设，国民教育体系和培训平台逐步建立，对各类群体针对性的开展应急救援能力培训；加强灾害风险管理宣传教育体系建设，提高全民防灾减灾意识。

2.6.3 典型城市 - 深圳的气候风险应对建议

(1) 建立气候风险持续研判和评估机制

建议进一步强调多部门协同提升适应气候变化风险意识的重要性，建立城市气候风险的跟踪分析、滚动研判和动态评价的工作机制，以持续跟踪深圳市情的变化。同时按照多灾种灾害链综合监测要求，进一步完善深圳气象、水文、海洋等灾害监测体系。

(2) 组织对气候风险隐患做系统研究和防御规划

建议组织规划、水务和气象部门共同对气候风险隐患进行系统研究并从宏观上统筹制定防御规划，尤其是针对地下空间及高层楼宇不断增多的实际情况，提出气候风险防御措施，以做到放眼长远、防患未然。

（3）提升城市自然灾害防御标准

建议统筹开展城市自然灾害防御标准的编制或修订工作，针对城市发展向天空和地下要空间的特点，编制自然灾害尤其是气象灾害的防御标准，提升气候变化背景下的城市韧性。

（4）深圳适应气候变化工作亟需加强

深圳市“十三五”应对气候变化规划实施以来，在减缓气候变化方面提出了“双达标”创新理念。一方面满足空气质量的标准，另一方面实现碳排放的目标。但深圳在适应气候变化研究工作需继续加强。

参考文献

- [1]. Aiqing Feng, Qingchen Chao. An overview of assessment methods and analysis for climate change risk in China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2020, 117: 102861. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102861>.
- [2]. Chen J,Wang Z,Tam C Y,et al.2020.Impacts of climate change on tropical cyclones and induced storm surges in the Pearl River Delta region using pseudo-global warming method. *Scientific Reports*,10: 1965.
- [3]. Hundessa S,Li S,Li Liu D,et al.2018. Projecting environmental suitable areas for malaria transmission in China under climate change scenarios. *Environmental research*,162: 203-210.
- [4]. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L.Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield,O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [5]. Li Q,Yi J.2016.Monitoring of dynamic behaviour of super-tall buildings during typhoons. *Structure and Infrastructure Engineering*,12(3): 289-311.
- [6]. Liu Q,Lam K S,Jiang F,et al.2013.A numerical study of the impact of climate and emission changes on surface ozone over South China in autumn time in 2000-2050. *Atmospheric Environment*,76:227-237.
- [7]. Tong C H M,Yim S H L,Rothenberg D,et al.2018.Projecting the impacts of atmospheric conditions under climate change on air quality over the Pearl River Delta region. *Atmospheric Environment*,193: 79-87.
- [8]. Wang W,Zhou W,Li Y,et al.2015.Statistical modeling and CMIP5 simulations of hot spell changes in China. *Climate Dynamics*,44(9-10): 2859-2872.
- [9]. Xia J,Yan Z,Zhou W,et al.2015.Projection of the Zhujiang (Pearl) River Delta's potential submerged area due to sea level rise during the 21st century based on CMIP5 simulations. *Acta Oceanologica Sinica*,34(9): 78-84.
- [10]. Ye Q., Yang X.G., Dai S.W., et al. 2015. Effects of climate change on suitable rice cropping areas, cropping systems and crop water requirements in southern China[J]. *Agr. Water Manage*, 159: 35-44.
- [11]. Yin J,Yin Z,Xu S.2013.Composite risk assessment of typhoon-induced disaster for China's coastal area. *Natural Hazards*,69(3): 1423-1434.
- [12]. Zhu J,Huang G,Baetz B,et al.2019.Climate warming will not decrease perceived low-temperature extremes in China. *Climate Dynamics*,52(9-10): 5641-5656.
- [13]. 陈莎,向翩翩,姜克隽等. 北京市能源系统气候变化脆弱性分析与适应建议[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13: 614-622.
- [14]. 康蕾,马丽,刘毅. 2015. 珠江三角洲地区未来海平面上升及风暴潮增水的耕地损失预测. *地理学报*,70(9): 1375-1389.
- [15]. 李阔,李国胜.2017. 气候变化影响下 2050 年广东沿海地区风暴潮风险评估. *科技导报*,35(5): 89-95.
- [16]. 刘忠辉,宏波.2019. 海平面上升对珠江河口东四口门盐水入侵的影响. *人民珠*

江,40(5): 43-49,81.

- [17]. 秦大河等. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015.

第三章 气候变化对中国的系统性风险

3.1 引言

城市是经济和人群集聚的主要场所，2020 年中国城镇化率为 63.9%，城镇常住人口已达 9.02 亿。在高温热浪和城市内涝等极端天气的冲击下，城市人群的公共健康面临严重威胁，电力和交通等基础设施受到极大的破坏，并进一步传递到家庭、企业和金融系统，气候变化背景下灾害的连锁、放大、聚集效应将更加明显，从而给城市运行、城市安全以及城市经济发展带来巨大的损失。此外，不同群体面对气候变化的脆弱性水平差异性较大，引发了社会不平等与社会排斥等问题。气候变化引发的系统性风险给应对和适应气候变化的政策实施和行动带来了严峻的挑战。

对于气候变化的系统性风险，鉴于社会经济系统本身的复杂性，我们的研究并未完全涵盖气候变化及连锁效应所带来的影响。首先，研究基于脆弱性评估框架，即从危害度 (Hazard)、暴露度 (Exposure) 和脆弱度 (Vulnerability) 三方面，运用多个指标，以定性的方式综合评估长江经济带高温热浪和洪涝灾害导致的气候变化系统性风险。其次，研究重点以中国气候适应型试点城市 - 武汉为例，从高温热浪对公众健康的影响、高温热浪对电力设施的影响、城市内涝对交通设施的影响三个渠道，分析了城市层面高温热浪下健康热脆弱性和人群死亡风险、轮片停电和交通可达性受损导致整个经济系统的损失。特别地，研究重点区分了高温热浪对心肺疾病患者、老年人、女性与低教育程度者等脆弱群体的影响，并根据空间单元内的淹没面积、人口暴露度、脆弱群体分布、经济发展水平等四个方面对城市内涝导致的武汉市社会系统风险进行了详细的区划与分级。最后，研究提出了应对和适应气候变化系统性风险的政策建议。研究有助于地方政府的决策者更加了解气候变化系统性风险的重要性，并将其纳入政府的政策和决策，以采取有效措施来应对和适应气候变化系统性风险，并促进城市的包容性，减少气候变化所产生的社会不公平和社会排斥。研究思路如图 3.1 所示。

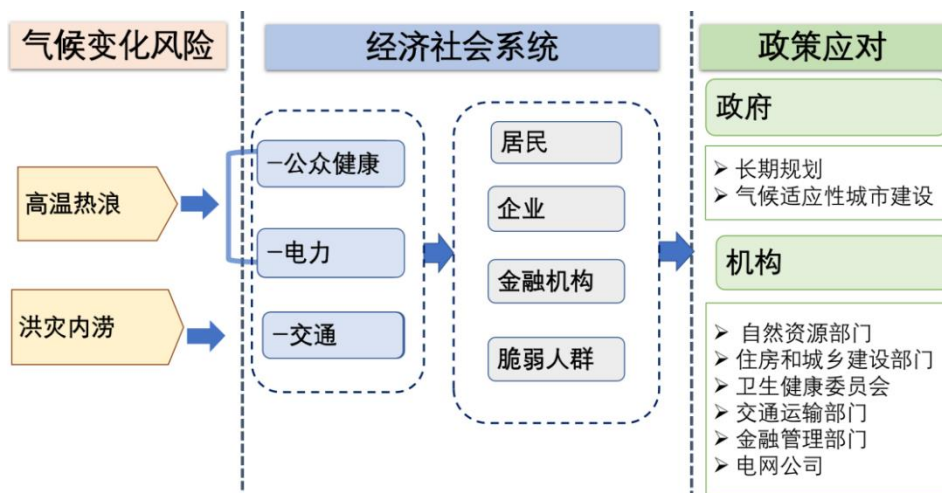


图 3.1 城市气候变化系统性风险分析框架

3.2 长江经济带和武汉市气候变化系统性风险

3.2.1 长江经济带气候变化系统性风险评估

长江经济带横跨中国大陆三级阶梯，以长江干流和支流为纽带，联结上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州等 11 个省市，面积约 205.23 万平方公里，占全国总面积的 21.4%，人口、粮食产量和生产总值均超过全国的 40%。

长江经济带的气候变化风险主要体现在两个领域：一是地区气温上升日益明显，《中国气象年鉴》显示，1961 年以来长江经济带温度普遍高涨。二是长江上、中、下游的降水呈现非均衡增长。1956 年以来，长江上游地区的降水总体呈现下降趋势，但中下游地区的降水则呈现增加趋势。2020 年长江流域整体降水量达到 1961 年以来的最高水平，遭受了自 1998 年以来最严重的汛情，暴雨洪涝灾害严重。湖北省 2004-2018 年期间基本每 3 年左右出现一次较大洪涝灾害，2016 年是湖北省洪涝受灾人口和死亡人口的峰值，约 2080 万人受灾，110 人死亡；2013 年则是历年干旱受灾情况最严重的一年，受灾人口达到 1579 万人，因干旱饮水困难人口达到 367 万人。

在温度和降水的共同影响下，水资源、人体健康、农业发展以及城市经济发展成为这长江经济带气候变化直接风险和系统性风险的主要领域。研究在脆弱性评估框架下，选择 9 个指标定性评估了高温热浪和洪灾内涝下长江经济带气候变化的系统性风险。指标和评估结果如表 3.1 和 3.2 所示。

表 3.1 长江经济带气候变化系统性风险评估指标

指标	高温热浪	洪灾内涝
危害度	高温日数、年平均温度	全年降水量
	高温极端事件发生数	极端日降水量事件数
	年极端最高气温	极端连续降水日数事件数
暴露度	城市建设用地面积	排水管长度
	人口密度	人口密度
	人均 GDP	人均 GDP
脆弱度	卫生机构密度	
	卫生机构人员密度	
	公共财政支出	

从高温热浪导致的气候变化系统性风险来看，长江上游地区高温热浪的总体

危害性不高，人口密度、经济发展水平以及城市建设用地面积均低于中下游地区，城市化水平较低，政府支出和医疗卫生条件较差，因此总体呈现危害度低、暴露度低和脆弱度高的特征。长江中游地区高温危害度大，人口密度与经济发展水平处于中等水平，政府财政支持力度与卫生医疗条件同样处于中游水平，这就使这一地区承受高温的特点表现为危害度高、暴露度与脆弱度处于中等水平的特征。长江下游高温危害度相对较低，辅之以更高的经济发展水平、更高的人口密度、更优质的政府服务以及更优越的卫生医疗条件，呈现危害度低、暴露度高、脆弱度低的特征。

从洪涝灾害导致的气候变化系统性风险来看，长江上游地区全年降水量比中下游少，极端降水发生情况较为平均，内涝灾害的危害度不大，而且山地丘陵相比平原更利于排水，内涝灾害整体危害度较小，总体呈现危害度低、暴露度低和脆弱度高的特征。但四川省地势低平，大部分位于盆地地区，在极端降水情况下排水条件极为不利。长江中游地区全年降水量最高，极端降水发生情况较为平均，经济发展情况较长江上游好，但城市排水管密度与全年降水量不匹配，尤其是湖北省平原面积广大，排水条件不利，面对极端降水的情况发生洪涝灾害的可能性大。对于洪涝灾害，长江中游地区呈现出危害度高、暴露度高、脆弱度处于中等水平的特点。长江下游地区全年降水量适中，极端事件发生概率较低，洪涝灾害的危害度小。但由于地势低平不利于排水，城市排水管道密度在极端情况下也无法做到及时应对，因此洪涝灾害的暴露度较大，总体呈现出危害度低、暴露度高、脆弱度低的特征。

总体来看长江经济带大部分属于亚热带季风气候区，雨热同期，气候条件相似。同时长江经济带人口密集，即使经济发达地区如上海，也面临着极端情况发生时医疗资源紧张的局面，因此长江经济带特别是中下游地区面对高温热浪和洪涝灾害时整体较为脆弱。

表 3.2 长江经济带气候变化系统性风险评估结果

区域	省市	高温热浪			洪涝灾害		
		危害度	暴露度	脆弱度	危害度	暴露度	脆弱度
长江上游	贵州	低	低	高	低	低	高
	云南	低	低	高	低	低	高
	四川	高	低	中	高	高	中
	重庆	高	中	高	低	中	高
长江中游	湖南	高	中	中	高	中	中
	湖北	高	中	中	高	高	中
	江西	高	中	高	高	中	高
长江下游	安徽	高	高	高	低	高	高
	浙江	高	高	中	低	高	中
	江苏	中	高	中	高	高	中
	上海	中	极高	高	低	高	高

3.2.2 武汉市气候变化系统性风险

(1) 武汉市主要气候变化情况

武汉市地处汉江平原东部,是长江中下游特大城市,2020年常住人口1232.65万人。属北亚热带季风性(湿润)气候,具有常年雨量丰沛、热量充足、雨热同季、光热同季、冬冷夏热、四季分明等特点。《中国气象年鉴》显示1910-2020年间,武汉市年平均气温呈显著上升趋势,平均每10年升温 0.06°C 。其中1910-1950年间,武汉市气温多低于常年均值,1950-2020年间,武汉市年平均气温每10年上升 0.3°C ,高于同期中国年平均气温的增速 $-0.25^{\circ}\text{C}/10$ 年。1950-2020年间,武汉市极端最高气温达到 39.6°C ,极端最低气温为 -18.1°C 。最高、最低气温均呈上升趋势,低温上升趋势更为明显(见图3.2和图3.3)。从城市内部来看,根据武汉市气象站数据分析,武汉市中心城区温度较周边区域偏高,气温高值区基本覆盖了武汉市三环线以内、中心城区中的汉口大部分、汉阳区、武昌区传统主城区,以及新建的武汉开发区、光谷地区、东西湖吴家山地区,这些都是武汉市目前人口数量多、国民生产总值相对较高或增速最快的地区。

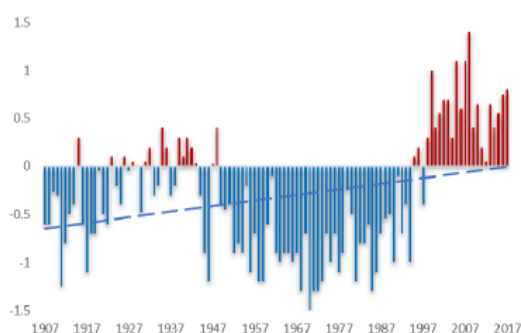


图 3.2 武汉市历史平均气温变化

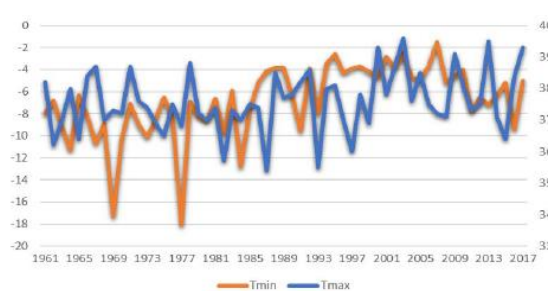


图 3.3 武汉市极端气温变化

武汉市城市地势较为低平,结合夏季短时强降雨天气事件,极易形成城市内涝。2016年6月30日-7月6日,超强厄尔尼诺事件结合副热带高压偏强、500hPa中高纬盛行经向环流、极涡强度指数偏小等因素,武汉市遭遇梅雨期持续强降雨,累计降水量580mm,为有气象记录以来的最高值,造成了严重的渍水和城市内涝。中国民政部国家减灾中心数据显示,2016年武汉市城市内涝导致106万人次受灾,城市交通受阻,直接经济损失达53亿元。

(2) 武汉市健康热脆弱性评估

从公共卫生的角度来看,热脆弱性指人体对高温所致不利影响的敏感或无法应对的程度。研究以年平均温度反映危害度,以人口密度反映暴露度,以归一化植被指数(NDVI)和GDP反映脆弱度。按照自然间断法将不同数据分为6级,级别越高,表示健康热脆弱性越强。然后,将各维度等级进行等权重加权求和,作为健康热脆弱性指数,指数范围为4-24,级别越高,表示健康热脆弱性越强。武汉热脆弱性评估结果如图3.4和图3.5所示。

从武汉健康热脆弱性的暴露度来看,呈现出西南高、东北低的空间分布特点,

蔡甸区和汉南区的年平均温度相对较高；而从武汉健康热脆弱性的暴露度来看，呈现中心高、周边低的空间分布特点，中心城区由于较高的人口密度和较低的植被覆盖度表现出对热较高的暴露度；脆弱度呈现与暴露度空间分布特点相反的特征，表现为中心低、周边高的特点，中心城区由于经济发展水平较高，其基础设施、人居环境、医疗条件等与周边地区相比，在同等热暴露度下表现出更高的适应能力和更低得脆弱度。因此，总体来看，武汉市健康热脆弱性整体空间分布特征表现为中心城区高，周边城区低；而在周边城区中，西南部又要高于东北部。

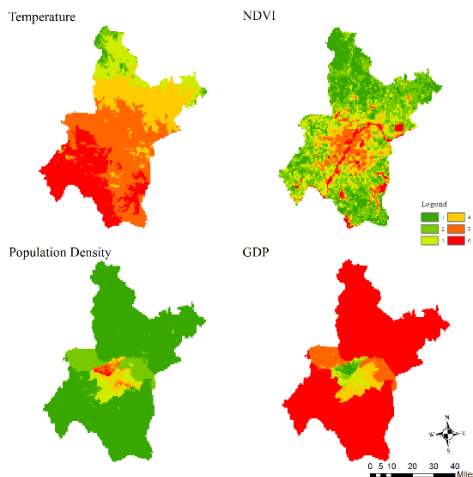


图 3.4 武汉市不同维度热脆弱性水平

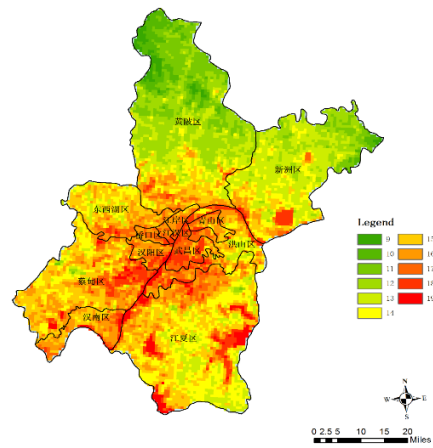


图 3.5 武汉市热脆弱性空间分布

(3) 武汉市热相关死亡率评估

研究采用分布滞后非线性模型以武汉市逐日死亡数据和气候数据建立温度与死亡率之间的暴露反应关系，结果显示两者呈现“U”型关系（见图 3.6）。

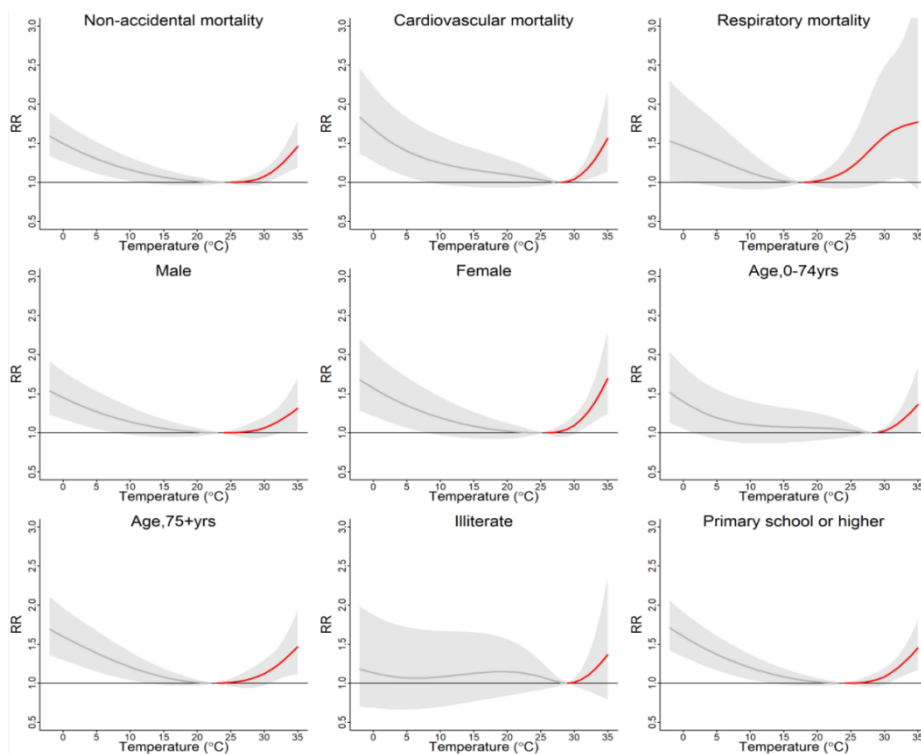


图 3.6 武汉市不同人群温度与死亡率暴露反应关系基线水平

最低死亡率所对应的温度即为该地区人群最适宜的温度，武汉市该温度范围在 19-28℃之间。在最低死亡率温度外，无论温度升高或者降低，均可增加人群死亡风险。同时，不同死因、性别、年龄组、教育程度等群体之间两者的暴露反应关系不同。

对武汉市未来温度进行预估，预计到 21 世纪末，在 RCP 4.5 情景下，武汉市平均温度将上升 2.08℃，而在 RCP 8.5 情景下，平均温度将上升 4.33℃。依此预估未来武汉市热相关死亡率，结果表明，在 RCP 8.5 情景下，当地热相关死亡率将由本世纪 2010 年代的 1.6% 增加至 2030 年代的 2.1%、2050 年代的 3.0% 和本世纪末的 5.6%。同时，在本世纪末，RCP 8.5 情景下的热相关死亡率预计为 RCP 4.5 情景下的 2 倍左右（见图 3.7、表 3.3 和表 3.4），其中，呼吸系统疾病患者、女性和老年人对温度升高最为脆弱。因此若不采取任何气候变化应对和适应政策，热相关死亡率将显著上升，对人群健康造成巨大威胁。

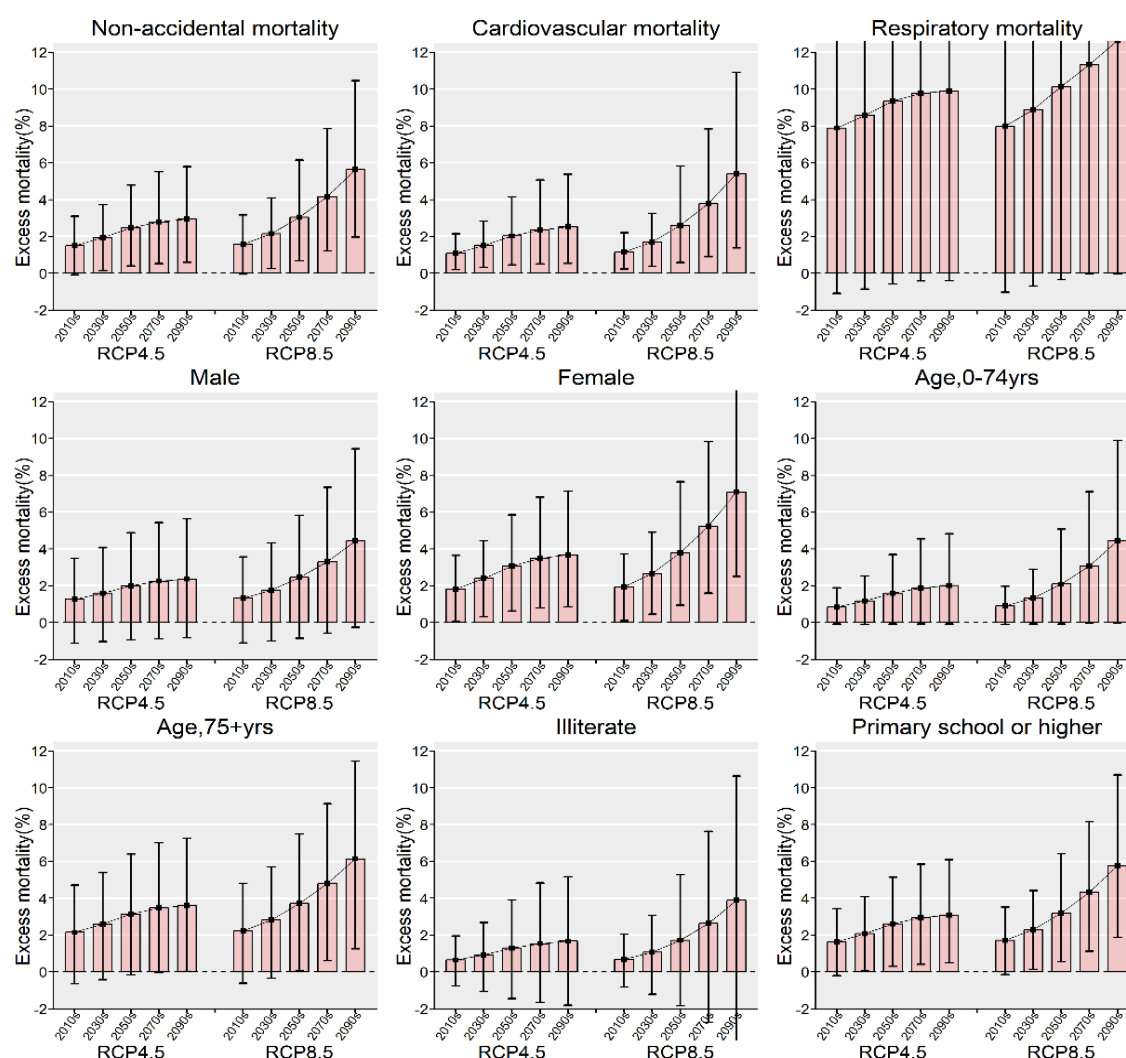


图 3.7 不同排放情景下武汉市未来热相关超额死亡预估

表 3.3 RCP 4.5 情景下武汉市不同人群热相关死亡预估

RCP4.5	2010s	2030s	2050s	2090s
原因				
非意外死亡	1605 (-94,3314)	2075 (159,3988)	2638 (426,5134)	3149 (638,6190)
心血管死亡率	506 (96,999)	702 (149,1319)	945 (209,1943)	1178 (253,2514)
呼吸系统死亡率	847 (-118,1540)	920 (-93,1634)	1004 (-62,1769)	1064 (-42,1871)
性别				
男性	786 (-697,2176)	997 (-638,2528)	1249 (-576,3038)	1475 (-519,3508)
女性	823 (23,1636)	1076 (148,1994)	1378 (285,2627)	1653 (388,3202)
年龄 (年)				
0-74	391 (-39,879)	548 (-43,1177)	745 (-38,1720)	939 (-36,2245)
75+	1194 (-355,2623)	1449 (-237,2995)	1749 (-91,3561)	2006 (15,4038)
教育水平				
文盲	102 (-122,309)	147 (-171,427)	206 (-229,621)	265 (-288,822)
小学及以上	1399 (-170,2950)	1783 (37,3497)	2241 (255,4403)	2652 (427,5222)

表 3.4 RCP 8.5 情景下武汉市不同人群热相关死亡预估

RCP8.5	2010s	2030s	2050s	2090s
原因				
非意外死亡	1695 (-52,3397)	2295 (274,4366)	3251 (711,6576)	6027 (2113,11200)
心血管死亡率	545 (107,1031)	795 (175,1518)	1217 (273,2720)	2525 (645,5092)
呼吸系统死亡率	858 (-110,1545)	955 (-75,1684)	1089 (-38,1906)	1357 (-4,2322)
性别				
男性	825 (-686,2217)	1095 (-620,2694)	1524 (-526,3618)	2755 (-157,5868)
女性	873 (50,1672)	1195 (206,2203)	1705 (427,3431)	3185 (1123,5851)
年龄 (年)				
0-74	422 (-41,920)	624 (-40,1349)	970 (-36,2368)	2070 (-2,4610)
75+	1240 (-338,2669)	1568 (-191,3178)	2067 (32,4161)	3420 (702,6368)
教育水平				
文盲	110 (-132,327)	170 (-194,487)	274 (-292,840)	619 (-632,1689)
小学及以上	1473 (-129,3016)	1962 (127,3784)	2737 (478,5492)	4952 (1599,9159)

(4) 武汉市高温热浪导致电力短缺引起的系统性风险

极端高温天气会导致电力需求短时间内急速上升而电力供应无法保障，在国家保民生的基本政策下，电网会对工业企业进行限电以保障居民用电需求。在连续高温天气时段，为了保障基本的公平，电网会采用轮片区停电的措施，这将会导致企业生产中断，从而造成经济损失。

为评估武汉市高温导致电力短缺引起的气候变化系统性风险，我们使用2017年NPP-VIIRS夜间灯光遥感数据匹配百度API的方法来分析武汉市第二产业增加值空间化问题，解析武汉市主要工业企业聚集区（见图3.8）。并进一步使用蒙特卡洛模拟方法，等概率进行一万次仿真，计算得到出现一次高温导致武汉市第二产业经济损失的概率分布（见图3.9）。计算结果显示武汉市单次高温导致的第二产业经济损失主要分布在11.49万元-29.49万元，最高损失在155.49万元-173万元。近年来武汉市每年超过35°C高温的天气保持在40天左右，而每次轮片区停电的区域约为15个。根据模拟结果可以发现，武汉市每年由于高温导致电力短缺而实施的轮片区停电措施将导致第二产业发生的经济损失最低约为1.2亿元，最高可达到12.8亿元。

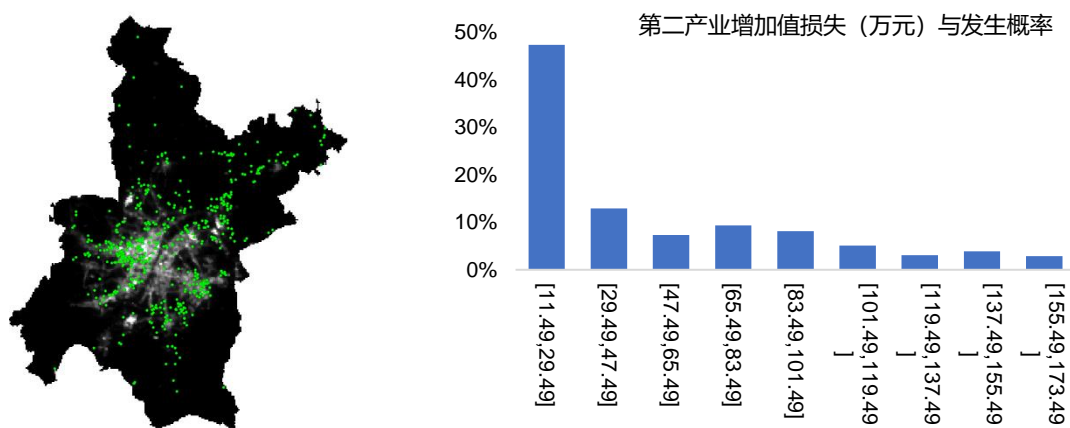


图 3.8 武汉市第二产业企业空间分布 图 3.9 武汉市高温停电带来损失及概率分布图

随着全球气候变暖，预计武汉市出现极端高温天气的天数日益增多，从而通过电力系统传导到经济系统的风险也将进一步加大。预计到21世纪末，在RCP4.5情景下，武汉市远期（2081年~2100年）高温日数和日最高气温将分别达到54.7天和40.7°C。在RCP8.5情景下，武汉市远期（2081年~2100年）高温日数和日最高气温将分别达到78.3天和43.1°C。根据武汉市中长期发展规划，按中高速发展情景，到2050年武汉市人均GDP将达到33.6万元/人（2020年不变价，下同），总人口将达到2000万人；2100年人均GDP将达到56万元/人，总人口将达到3000万人；武汉市作为中国的工业重镇，其第二产业比重始终稳定在40%上下，产业园区地理位置基本稳定，但是都实现了产业升级。基于上述情景，通过蒙特卡罗模拟，发现在RCP4.5与RCP8.5情景下，2030年、2050年、2100年由于高温导致电力短缺引起的平均损失分别是9.05亿元与14.42亿元，21.03亿元与34.17亿元，66.49亿元与110.7亿元（见图3.10）。

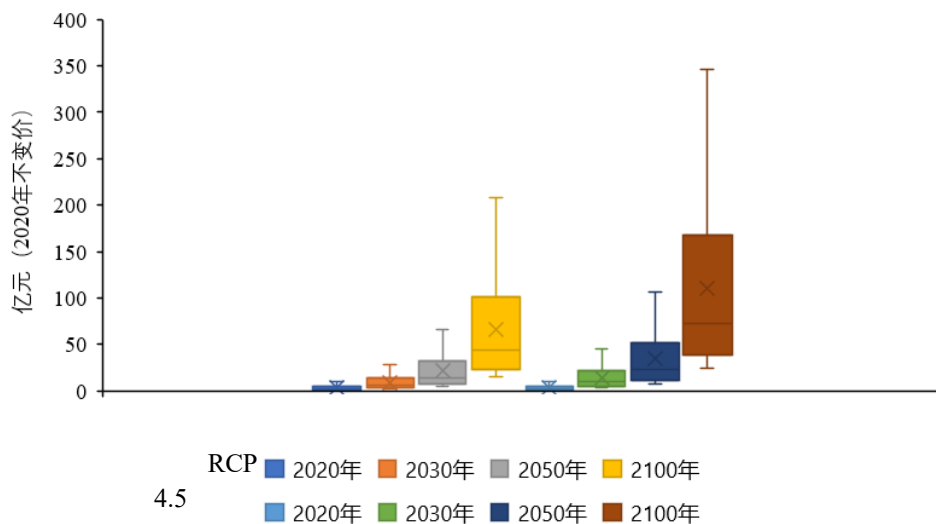


图 3.10 不同情景下武汉市电力短缺的系统损失及不确定区间

(5) 武汉市城市内涝导致交通延时引起的经济系统性风险

交通运输部门是经济系统正常运行的基础设施，短时强降水引起的城市内涝将造成交通基础设施受损，街道网络连通性和可达性降低，这不仅造成交通运输业的直接经济损失，而且还将通过产业关联对经济产生连锁反应和波及效应，进而导致间接经济损失，从而使城市内涝引起的直接风险发展成为整个经济的系统性风险。

研究以四种 24 小时强降水情景作为城市内涝的危害度指标，以武汉市交通设施作为暴露度指标，以武汉泵站的建设时间和排水能力作为脆弱度指标。综合利用 GIS 遥感影像、NPP-VIIRS 夜间灯光遥感年度合成影像和引力模型等工具分析，在四种 24 小时强降水情景下，首先，基于机动车道路网络的空间可达性对城市内涝引起的交通中断及其延时进行评估。其次，通过估算城市内涝造成出行时间增加，来估计公路交通运输业的直接经济损失；最后，运用投入产出模型模拟和计算城市内涝导致的产业关联损失，最终得到城市内涝导致交通中断引起的经济系统风险。

● 情景设置

研究以 2016 年、2020 年为现实情景，以 2100 年和 2021 年 7 月份郑州的极大暴雨事件为模拟情景。

- 2016 情景：2016 年 7 月武汉市 24 小时最大降水量 242mm，2016 年城市道路网络和各泵站排水能力。
- 2020 情景：2020 年 7 月武汉市 24 小时最大降水量 227mm，2020 年城市道路网络和各泵站排水能力。
- 2100 情景：24 小时降水量 384mm，2020 年城市道路网络和各泵站排水能力。
- 郑州情景：2021 年 7 月 24 小时降水量历史极值 553mm，2020 年城市道路网络和各泵站排水能力。

武汉市城市内涝适应能力大幅提升。为减缓和适应城市内涝问题、提升城市

抗灾能力，武汉市提出了防洪水、排涝水、治污水、保供水的“四水共治”理念，编制了《武汉市防洪应急预案》《武汉市海绵城市专项规划》《武汉市中心城区排水防涝专项规划（2012-2030）》等专项预案和规划文件，加大了泵站等城市排水设施建设，同时全面推进海绵城市建设，升级武汉的排水管网以及强化湖泊蓄水功能等。2010-2019年，武汉市人均公园绿地面积从8.89平方米增加到10.19平方米，城市绿化覆盖率从38.2%上升至40.02%，排水管道长度增加了3304公里，中心城区整体排水能力从2016年的958m³/s提升至2020年的1960m³/s。

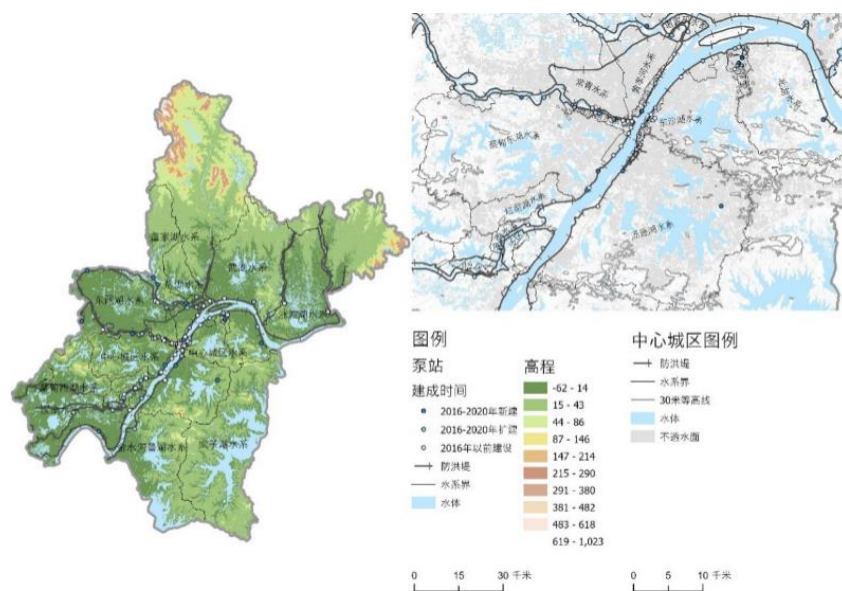


图 3.11 武汉市地形、水系和排水能力

● 不同情景下的武汉市淹没区域评估分析

如图 3.12 和图 3.13 所示，2016 年的强降水比 2020 年略高，但是以当年排水设施水平，导致武汉市淹没面积远高于 2020 年。而经过武汉市排水系统建设，2020 年武汉市有效应对了当年 7 月份的短时强降雨事件，虽然仍存在部分淹没区域，但总面积相比于 2016 年下降了 10.05%。然而，如果维持在 2020 年排水能力不变的前提下，2100 强降水情景下的淹没区域面积将扩大 76.64%，2021 郑州极端降水情景下，淹没区域将扩大 187.88%。

此外，武汉市交通设施的暴露度以及暴雨和城市内涝的适应能力存在明显的城乡差异、城区内差异，从而导致城市内涝的风险也出现差异。首先中心城区的交通活动强度高于远城区，短时强降雨的暴露度将更高。其次，2016-2020 年间，武汉市排水能力总体提升了 104.59%。但同期武汉市中心城区水系工程建设强度高于远城区水系，排水能力分别提升了 108.28%和 46.02%。因此从淹没区域的结果来看，相对比 2016 年，2020 年中心城区和远城区水系范围内淹没面积分别减少了 30.92%和 10.77%，中心城区中汉口、汉阳和武昌的内涝淹没面积相比于 2016 情景，分别减少了 72.55%、36.22%、26.46%，表明武汉三镇均受益于城市排水能力的提高，有效应对了 2020 年短时强降雨的挑战。

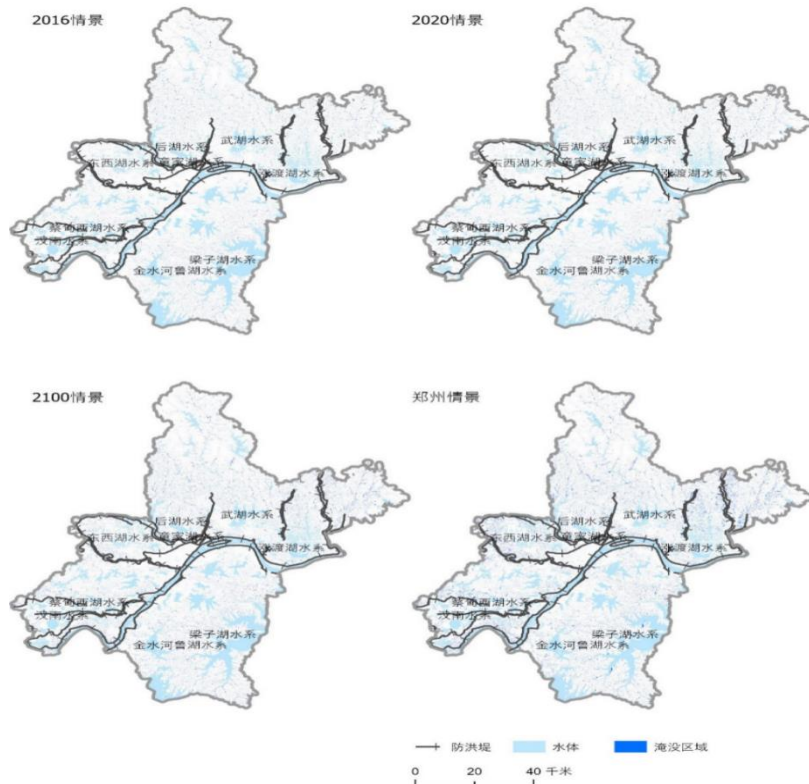


图 3.12 四种不同情景下武汉市淹没区域模拟结果

但是如果排水能力不进一步提高的话，2100 情景下中心城区和远城区水系范围内淹没面积分别将比 2020 年增加 119.67%和 84.20%，其中汉口、汉阳、武昌三镇内涝淹没面积将分别增加 608.62%、112.08%、119.37%。郑州情景下中心城区和远城区水系范围内淹没面积分别将比 2020 年增加 242.83%和 234.63%，其中汉口、汉阳、武昌三镇内涝淹没面积将分别增加 3464.89%、216.14%、227.79%，城市内涝严重的地区是汉口。

综合来看，虽然武汉市的城市排水工程提升了城市应对短时强降雨的能力，但基于当前的排水能力还难以更为有效地应对未来气候变化导致的更高强度降水。考虑到气候变化导致强降水频率上升和强度增大，内涝淹没范围将更大。

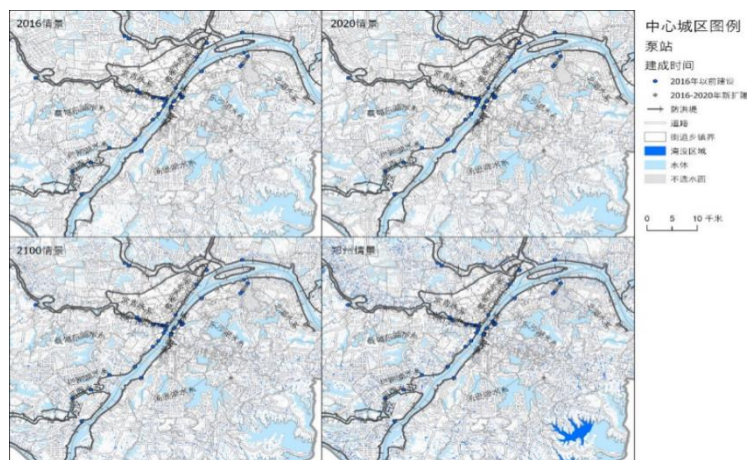


图 3.13 不同情景下武汉市中心城区淹没区域的模拟结果

● 不同情景下的武汉市交通延时评估分析

表 3.5 和图 3.14 显示了不同情景下武汉市交通延时的分布区域和延时情况。2016 年，武汉市交通延时均值为 668.9 分钟，2020 年为 621.9 分钟，相比于 2016 年降低了 7.03%。维持 2020 排水系统建设不变，2100 情景下的交通延时将达到 887.2 分钟，较 2020 年上升 42.66%，2021 郑州极端降水情景下的交通延时将达到 1040.9 分钟，较 2020 年上升 67.37%。若考虑城市各区域间的引力和联系，以加权平均延时表示单次出行的平均延时，2020 年相比于 2016 年下降了 58.57%，2100 和郑州情景将比 2020 年上升 1439.08%、2005.75%。交通系统的模拟和分析结果表明，短时降雨强度的增加、淹没区域的扩大导致了城市道路网络形态的变化，从而进一步产生了交通流动、路径变化和延时之间的关联。

表 3.5 不同情景下武汉市交通延时结果

	2016 情景	2020 情景	2100 情景	郑州情景
均值	668.9 分钟	621.9 分钟	887.2 分钟	1040.9 分钟
加权均值	21.0 分钟	8.7 分钟	133.9 分钟	183.2 分钟

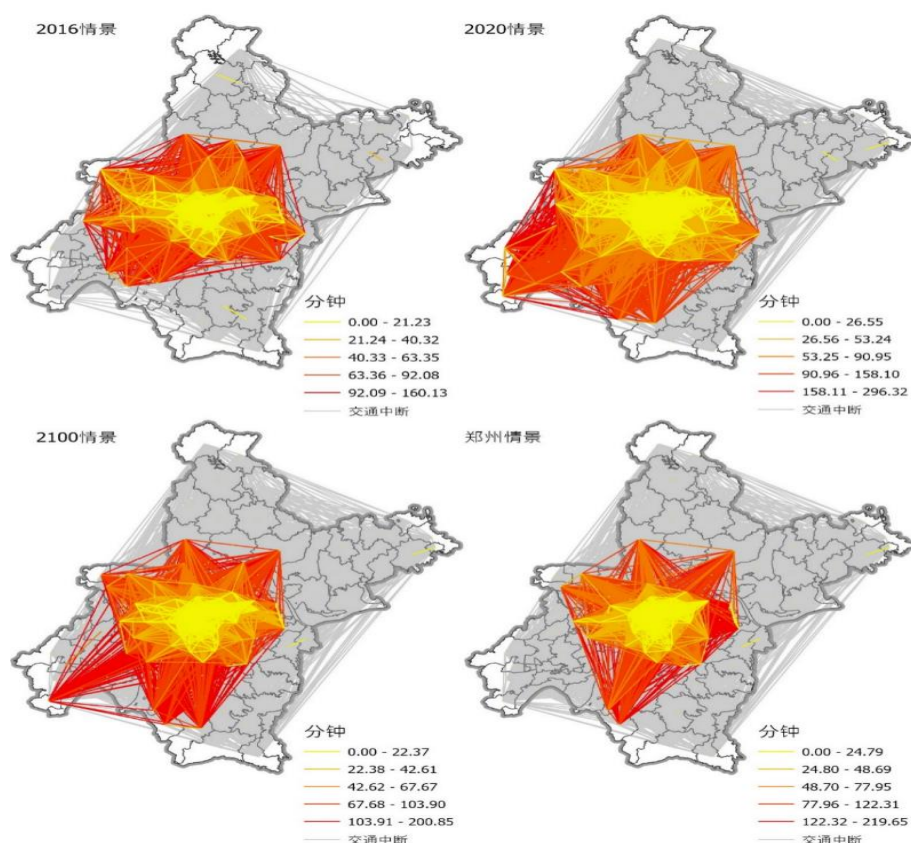


图 3.14 不同情景下武汉市交通延时结果

● 不同情景下的武汉市交通延时评估分析

城市内涝造成的道路延时，首先导致交通运输业基础设施的重大损失，这部分属于城市内涝引起的直接风险。而交通运输业由于基础设施受损，无法正常运营，停止运行或者交通延时带来的损失即为城市内涝给该行业带来的间接风险，而由于交通延时，人员和货物无法及时送达导致全社会各行业经济受损，这样城

市内涝就经交通运输业向整个城市经济系统传导风险，从而引起系统性风险。

研究基于 2016 情景，运用武汉市 2017 年投入产出表数据，计算了城市内涝导致交通延时给武汉市整个经济系统带来的损失（见表 3.6），可以发现，2016 年 7 月 24 小时最大降水量达到 242mm 时，给交通部门造成直接经济损失达到 12283.75 万元，交通延时导致交通部门的间接经济损失为 1496.12 万元，主要是公路交通运输业的损失，达 1251.06 万元，而经由公路交通运输业向城市各行业传导的间接损失总量达 19678.30 万元。从产业来看，第一产业的间接损失是 44.19 万元，第二产业的间接损失是 13929.77 万元，第三产业的间接损失是 5704.34 万元；从行业来看，间接风险最大的经济部门分别为交通设备运输业、金融业、建筑业、公路交通运输业、批发和零售业、租赁和商务服务业。

可以发现，在暴雨等极端天气事件的强度和频率不断上升的背景下，若风险传导的关键经济部门没有足够应对和预防措施，未能及时切断风险传播链条，气候变化风险将随之扩大至整个经济系统，并最终导致整个城市发生大规模的系统性风险。

表 3.6 武汉市城市内涝导致交通延时引起的各行业经济损失（单位：万元）

序号	行业	间接经济损失	序号	行业	间接经济损失
1	农林牧渔产品和服务	44.19	24	电力、热力的生产和供应	393.80
2	煤炭采选产品	0.18	25	燃气生产和供应	337.08
3	石油和天然气开采产品	0.00	26	水的生产和供应	17.76
4	金属矿采选产品	16.40	27	建筑	1253.43
5	非金属矿和其他矿采选产品	2.33	28	批发和零售	551.01
6	食品和烟草	208.85	29	铁路运输业	41.75
7	纺织品	17.19	30	公路交通运输业	1251.06
8	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	24.64	31	水上运输业	36.65
9	木材加工品和家具	16.62	32	航空运输业	51.16
10	造纸印刷和文教体育用品	125.87	33	其他运输业	115.50
11	石油、炼焦产品和核燃料加工品	459.79	34	住宿和餐饮	314.01
12	化学产品	242.78	35	信息传输、软件和信息技术服务	333.12
13	非金属矿物制品	40.39	36	金融	1719.75
14	金属冶炼和压延加工品	189.08	37	房地产	449.01
15	金属制品	128.26	38	租赁和商务服务	542.58
16	通用设备	363.25	39	研究和试验发展	0.00
17	专用设备	66.53	40	综合技术服务	38.55
18	交通运输设备	9031.75	41	水利、环境和公共设施管理	6.83
19	电气机械和器材	372.72	42	居民服务、修理和其他服务	121.63
20	通信设备、计算机和其他电子设备	401.67	43	教育	21.13
21	仪器仪表	54.30	44	卫生和社会工作	21.58
22	其他制造产品和废品废料	38.02	45	文化、体育和娱乐	63.47
23	金属制品、机械和设备修理服务	127.08	46	公共管理、社会保障和社会组织	25.55
总计：19678.3					

(6) 武汉市气候变化下的社会风险

不同情景下基于道路交通系统的模拟和分析结果进一步确认了气候变化的直接风险与交通系统的间接风险之间的相关关系。考虑到所有排放情景下的全球温升均至少达到 1.5°C (IPCC, 2021), 气候变化造成极端天气事件的频率和强度将不断提高。城市是一个复杂的非线性系统, 城市现有适应能力是否能够高效、包容地应对未来的气候变化及其系统性风险仍需要进一步的评估。因此, 以极端天气事件造成的内涝渍水及其对城市交通的延时效应, 可以模拟和评估气候变化造成的暴雨内涝对城市经济社会系统的影响。

城市气候风险和适应能力的空间异质性还将通过城市社会空间分异、城市经济结构产生的收入与住房空间分化等路径, 传导和扩散至城市社会系统。不同社会群体暴露于气候风险存在差异, 气候变化可能会导致某些群体暴露于气候变化风险的强度较大, 从而产生气候脆弱人群, 引发基于气候风险的社会不平等、社会排斥和应对气候变化的包容性问题, 导致气候变化的社会性风险。

考虑到中国社会面临的人口结构老龄化, 研究以老年群体为例, 基于脆弱性评估框架, 选择武汉市内涝淹没面积为危害度指标、以人口数量为暴露度指标、以 65 岁及以上的老年人口和人均 GDP 为脆弱度指标, 利用珞珈 1 号夜间灯光遥感数据 (130m 分辨率)、2018 年武汉市统计年鉴以及人口普查的数据, 基于街道尺度的分析, 将武汉市城市内涝带来的社会系统风险从灾害度、暴露度和脆弱度三个方面、高中低 (H-M-L) 三个等级进行了区域划分 (见图 3.15)。结果发现, 武汉市城市内涝的社会系统性风险存在显著的城乡和城市内部异质性的特点, 图 3.16 和 4-17 进一步显示其异质性主要表现为城市为高危害-高暴露-低脆弱区域, 乡村为中危害-低暴露-高脆弱区域; 城市内部异质性主要表现为老城区为低危害-高暴露-高脆弱区域, 新开发区则为中危害-高暴露-低脆弱区域。

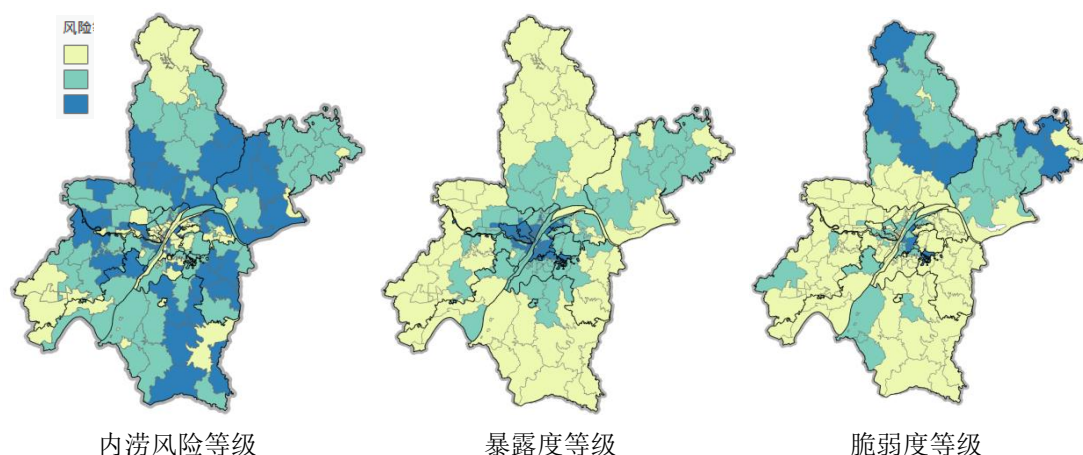


图 3.15 武汉市城市内涝带来的社会系统风险三维度表现

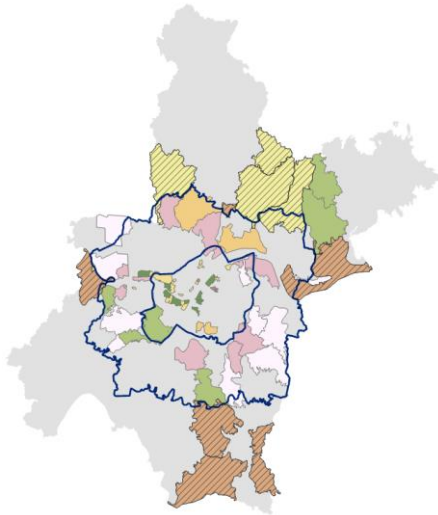


图 3.16 武汉城市内涝社会风险城乡差异

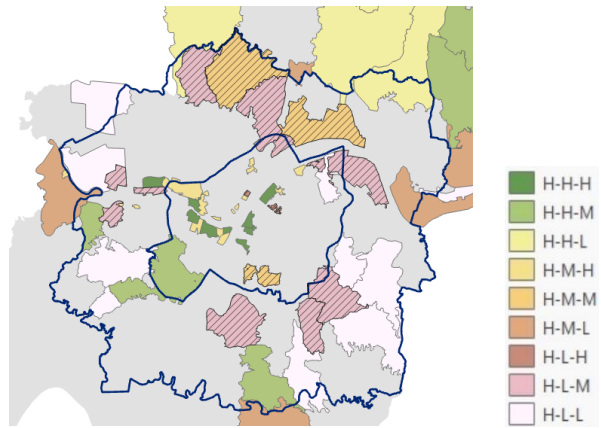


图 3.17 武汉城市内涝社会风险城市内部差异

3.3 关键信息和建言

3.3.1 关键信息

由于人口、产业和财富高度集聚，气候变化导致的极端灾害事件对城市人口的健康、生命、基础设施的影响愈加突出，气候变化与城市人居环境、生产环境交互影响，气候变化背景下灾害的连锁、放大、聚集效应将更加明显，城市成为最容易诱发气候变化系统风险的地区，城市复杂性也进一步加大了应对气候变化风险的难度。因此地方政府的决策者需要更加了解气候变化系统性风险的严重性，将其纳入政府的政策和决策中，加强系统性规划以应对气候变化的系统性风险，实施减小容易诱发系统脆弱性的政策行动，增强决策参与和包容性，坚持社会、环境、经济效应的协同。

3.3.2 建言

(1) 针对气候变化健康风险的建言

一是建立国家级和区域级气候变化健康风险评估体系。明确全国水平和不同地区面临的主要气候变化类型、健康风险以及脆弱地区和人群特征，进而因地、因时制宜地采取有针对性的适应策略及措施。二是建立国家级和区域级的气候变化健康风险适应体系，在气候变化健康风险评估结果的基础上，编制适应预案和行动指南，定期开展适应能力评估和适应计划落实情况评估，动态评估适应能力变化情况并更新适应能力行动计划。三是进一步提升医疗卫生服务系统对气候变化的韧性，制定医疗卫生服务系统对气候变化的脆弱性评估指南并开展评估，包括对医院、公共卫生机构、医护人员、救护车，以及药品、医疗器械和防护用品等相关产业链的脆弱性分析和风险评估。根据评估结果制定合理应对规划，逐步增强医疗卫生系统对气候变化特别是极端天气事件的韧性。

(2) 针对高温热浪下系统性风险的建言

一是统筹规划用电，区域要统筹好电力供应与需求两端的规划与建设，制定供应端电力供应的多样化路线，提高电力供应的韧性；二是需求端要提高能效，建立需求响应制度，加强沟通指导，摸清企业最低生产需求负荷，实时监测企业生产运行情况，定期统计企业的产量及用电情况，掌握企业生产动态；三是根据台区负荷特征，建立变压器大游行制度；四是建立工业尖峰电价制度，鼓励工业企业合理转移用电负荷，削峰填谷，降低峰谷时段的用电负荷率，提高系统设备容量的利用效率和节约能源；五是针对工业企业推荐综合能源诊断与服务制度，积极对接供电部门，了解降负荷要求，强化工业运行监测，严格落实区域有序错峰用电方案；六是建立居民侧的错峰平谷电力容量市场制度。

(3) 针对城市内涝下系统性风险的建言

一是全面提高城市对气候变化的适应能力。首先，在城市规划中充分考虑气候风险，将气候可行性论证作为城市规划和功能布局的前置条件；根据短历时暴雨的时空新分布规律和雨型，修编暴雨强度公式和排水管网标准。其次，进一步完善暴雨、高温灾害早期预警体系，提高暴雨、高温监测预警水平，健全完善城市突发暴雨灾害应急预案、防灾减灾工作机制、预警信息应急发布和应急处置工作等。最后，各项工程措施都应适应气候变化影响，通过规划控制开发强度并合理安排布局，通过工程措施有效控制地表径流和热岛效应等。

二是优先推广基于自然的解决方案（Nature based Solutions）。城市要加大湖泊、湿地保护力度，修复和改善湖泊生态蓄水能力；加快海绵城市的建设，严格控制不透水层面积增长；根据城市渍涝风险等级区划图，科学设计城市湖泊、草地、透水地面、蓄水池等城市雨水利用体系。

三是注重事权和财权的跨区划分。加快完善跨区域、跨行业、跨部门的河湖管理机制，切实落实河湖保护主体责任；严格落实湖长制，组织制定“一湖一策”方案，湖长责任精确到每一米湖岸线；探索跨地区生态补偿机制，共建长江生态环境监管平台，加强重点领域风险防控能力建设；建立重点区域环境风险应急统一管理平台，实现灾害应急信息互通共享；积极创新投融资机制，多渠道吸引各方面力量参与排水防涝设施投资、建设和专业化运营管理。

参考文献

- [1]. 黄存瑞,何依伶,马锐,苏亚男.2018. 高温热浪的健康效应:从影响评估到应对策略.山东大学学报(医学版),56(08):14-20.
- [2]. 黄焕春,周鑫辉,屈永超,刘起勇. 2020. 超大城市高温暴露剂量测度及公共健康危害风险评估.河南大学学报(自然科学版), 50(06):666-674.
- [3]. 李涪涪,杜艳君,莫杨,杜宗豪,黄蕾,程艳丽.2014.基于脆弱性的高温热浪人群健康风险评估研究进展.环境与健康杂志,31(06):547-550.
- [4]. 孙永平,李疑,李莹仪. 2021. 气候变化与企业运营:风险、机遇与策略.江南大学学报(人文社会科学版),20(01):92-101.
- [5]. 王鹤潼,齐天白,张继宏.2021.异质性气候政策如何影响银行贷款定价——来自欧美电力企业的证据.环境经济研究,6(01):53-76.
- [6]. 谢盼,王仰麟,彭建,刘焱序.2015. 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价——研究进展与框架.地理科学进展,34(02):165-174.
- [7]. 张冬冬,严登华,王义成,鲁帆,刘少华.2014.城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展.灾害学,29(01):144-149.
- [8]. 郑艳.气候变化引发的系统性风险及其应对策略.环境保护,2021,49(08):15-19.
- [9]. Chang Heejun,Pallathadka Arun,Sauer Jason,Grimm Nancy,Zimmerman Rae,Cheng Chingwen,Iwaniec David M.,Kim Yeowon,Lloyd Robert,McPhearson Timon,Rosenzweig Bernice,Troxler Tiffany,Welty Claire,Brenner Ryan,Herreros Cantis Pablo.2021. Assessment of Urban Flood Vulnerability Using the Social-Ecological-Technological Systems Framework in Six US cities. Sustainable Cities and Society,68(1):102786.
- [10].Gonzalez-Trevizo M.E.,Martinez-Torres K.E.,Armendariz-Lopez J.F.,Santamouris M.,Bojorquez-Morales G.,Luna-Leon A. 2021. Research trends on environmental, energy and vulnerability impacts of Urban Heat Islands: An overview. Energy & Buildings,246: 111051.
- [11].Jun Shao. Risk Assessment of Urban Waterlogging Based on GIS. 2019. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 376: 012034.
- [12].Jun Wang,Jinming Feng,Zhongwei Yan,Yang Chen. 2020. Future Risks of Unprecedented Compound Heat Waves Over Three Vast Urban Agglomerations in China. Earth's Future,8(12):1-17.
- [13].Liu Fan,Liu Xiaoding,Xu Tao,Yang Guang,Zhao Yaolong. 2021. Driving Factors and Risk Assessment of Rainstorm Waterlogging in Urban Agglomeration Areas: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China. Water, 13(6): 770-797.
- [14].Roy Subham,Bose Arghadeep,Singha Nimai,Basak Debanjan,Chowdhury Indrajit Roy. 2021. Urban waterlogging risk as an undervalued environmental challenge: An Integrated MCDA-GIS based modeling approach. Environmental Challenges, 4:100194
- [15].Rui-Song Quan. 2014. Rainstorm waterlogging risk assessment in central urban area of Shanghai based on multiple scenario simulation . Natural Hazards, 73(3): 1569-1585.
- [16].Savić Stevan,Marković Vladimir,Šećerov Ivan,Pavić Dragoslav,Arsenović Daniela,Milošević Dragan,Dolinaj Dragan,Nagy Imre,Pantelić Milana. 2018. Heat wave risk assessment and mapping in urban areas: case study for a mid-sized Central European city, Novi Sad (Serbia). Natural Hazards, 91(3): 1-21.

- [17].Tao Lin,Xiaofang Liu,Jinchao Song,Guoqin Zhang,Yuqiu Jia,Zhezhi Tu,Zehua Zheng,Chaolun Liu. 2018. Urban waterlogging risk assessment based on internet open data: A case study in China. *Habitat International*,71: 88-96.
- [18].Wen-li Lai,Hong-rui Wang,Cheng Wang,Jie Zhang,Yong Zhao. Waterlogging risk assessment based on self-organizing map (SOM) artificial neural networks: a case study of an urban storm in Beijing. 2017. *Journal of Mountain Science*,14(5): 898-905.
- [19].Xianzhe Tang,Yuqin Shu,Yanqing Lian,Yaolong Zhao,Yingchun Fu. 2018. A spatial assessment of urban waterlogging risk based on a Weighted Naïve Bayes classifier. *Science of the Total Environment*, 630: 264-274.
- [20].Yang Quntao,Zhang Shuliang,Dai Qiang,Yao Rui. 2020. Assessment of Community Vulnerability to Different Types of Urban Floods: A Case for Lishui City, China. *Sustainability*,12(19): 1-19.
- [21].Zaidi R Zehra,Pelling Mark. 2015. Institutionally configured risk: Assessing urban resilience and disaster risk reduction to heat wave risk in London . *Urban Studies*,52(7): 1218-1233.
- [22].Zhou Meiling,Feng Xiuli,Liu Kaikai,Zhang Chi,Xie Lijian,Wu Xiaohe. 2021. An Alternative Risk Assessment Model of Urban Waterlogging: A Case Study of Ningbo City. *Sustainability*, 13(2):826-845.



项目微信公众号