

与洪共存

—— 中国主要城市区域气候变化风险评估及未来情景预测

与洪共存

—— 中国主要城市区域气候变化
风险评估及未来情景预测

研究团队

任玉玉 | 博士 国家气候中心高级工程师

吴 萍 | 博士 国家气候中心高级工程师

石 英 | 博士 国家气候中心研究员

孙秀宝 | 博士 中国科学院南海海洋研究所副研究员

刘君言 | 博士 绿色和平气候与能源项目经理

李 朝 | 博士 绿色和平调研部研究员

报告首席科学家

任国玉 | 博士 国家气候中心首席专家

| 中国地质大学 (武汉) 教授

报告协调员

李 朝 | 博士 绿色和平调研部研究员

袁 媛 | 绿色和平气候与能源项目主任

致谢

我们对研究过程中来自各位专家和同事的技术指导及支持
深表感谢。（排名不分先后）

王香奕 | 中国国际民间组织合作促进会副理事长兼秘书长

张 硕 | 中国气象局华风创新总经理

王丽岩 | 中国气象局华风创新市场总监

王 珏 | 绿色和平多媒体部门经理

王 赫 | 绿色和平资深传播主任

韦 毅 | 绿色和平传播主任

郎希宇 | 绿色和平项目副总监

著作权及免责声明

本报告由绿色和平和中国国际民间组织合作促进会基于在北京取得的临时活动备案共同发布。

本报告为绿色和平于环保公益工作中形成的资料。阅读本报告即表示您已阅读、理解并接受下列著作权和免责声明条款的约束。请认真阅读。

1. 著作权声明

本报告由绿色和平发布，绿色和平和北京华风创新网络技术有限公司是本报告的合法著作权所有人。

2. 免责声明

绿色和平致力于以实际行动推进积极改变，保护地球环境并为创造绿色及和平的未来提出解决方案。绿色和平具有政治独立性，不介入关于领土争端议题的讨论。绿色和平发布的示意图均遵守当地法律、法规的要求，不代表绿色和平的政治立场。

与“洪”共存

——中国主要城市区域气候变化风险评估及未来情景预测

引言.....	1
1. 城市是应对气候变化风险的关键部门	3
1.1 高度集中的人口与经济让城市成为应对气候变化影响的前沿战场	3
1.2 气候变化已成为威胁城市可持续发展的非传统安全危机	4
2. 城市气候变化风险分析框架	8
2.1 城市气候变化灾害特征指标	9
2.2 城市气候风险暴露度及脆弱性指标选取	10
2.3 城市气候风险综合评估框架及计算方法论	12
2.4 研究区划	13
3. 各研究区域气候变化特征及风险分析	15
3.1 京津冀地区气候变化特征及高温灾害风险	15
3.1.1 京津冀地区1960-2019主要气候变化特征	15
3.1.2 京津冀地区高温热浪灾害风险分析（2000-2017）	17
3.2 长三角地区气候变化特征及高温、暴雨灾害风险	17
3.2.1 长三角地区1960-2019主要气候变化特征	17
3.2.2 长三角地区2000-2017高温及暴雨灾害风险分析	22

3.3 广东省气候变化特征及高温、暴雨灾害风险	24
3.3.1 广东省1960-2019主要气候变化特征	24
3.3.2 广东省2000-2017高温及暴雨灾害风险分析	28
3.4 本章小结	30
4. 研究区域面临气候灾害变化趋势	31
4.1 选取模式、数据及计算方法	31
4.2 京津冀地区未来气候变化预估	32
4.3 长三角地区未来气候变化预估	34
4.4 广东省未来气候变化预估	36
4.5 本章小结	38
5. 以系统性思维重塑城市发展	39
5.1 气候变化的系统性风险	39
5.2 风险管理应盯紧“木桶短板”	40
5.3 以系统性变革思维重塑城市发展	41
附录 数据来源列表.....	44
参考文献.....	45

图表目录

图1-1 世界各地人口城市化率（1950-2050年）3

图1-2 中国历次人口普查城镇人口比重4

图1-3 中国气候变化区划（1961-2010年）与三个主要城市群的空间位置关系6

图2-1 IPCC第五次评估报告AR5核心概念图8

图 2-2 城市气候风险评估框架12

图3-1 京津冀地区平均气温和平均最高气温历年变化15

图3-2 京津冀地区35℃及以上高温日数历年变化16

图3-3 北京站高温热浪频次和平均持续天数历年变化16

图3-4 京津冀地区高温灾害风险等级空间分布17

图3-5 长三角地区平均气温平均最高气温和极端最高气温历年变化18

图3-6 长三角地区35℃及以上高温日数历年变化19

图3-7 杭州站高温热浪频次及平均持续天数(a)和期间极端最高气温(b, °C)历年变化20

图3-8 长三角年累积降水量和暴雨日数历年变化21

图3-9 杭州站暴雨频次和暴雨过程平均累积降水量历年变化21

图3-10 长三角地区高温灾害风险指数历年变化22

图3-11 长三角地区高温灾害风险等级(a)和线性变化趋势(b)空间分布22

图3-12 长三角地区暴雨灾害风险等级(a)和线性变化趋势(b)空间分布23

图3-13 长三角地区暴雨风险指数历年变化23

图3-14 广东省平均气温、平均最高温和极端最高温历年变化24

图3-15 广东省35℃及以上和38℃及以上高温日数历年变化25

图3-16 广州站高温热浪频次和平均持续天数历年变化26

图3-17 广东省暴雨日数历年变化27

图3-18 广州站暴雨过程频次和暴雨过程平均累积降雨量历年变化27

图3-19 广东省高温灾害风险指数历年变化28

图3-20 广东省高温灾害风险等级(a)和线性变化趋势(b)空间分布28

图3-21 广东省暴雨灾害风险等级(a)和线性变化趋势(b)空间分布29

图3-22 广东省暴雨灾害风险指数历年变化29

图4-1 21世纪末期京津冀地区年平均气温（a, °C）和降水（b, %）的变化32

图4-2 21世纪末期京津冀地区TXx（a, °C）、TNn（b, °C）、SU（c, 天）的变化（相对于1986-2005年）33

图4-3 21世纪末期京津冀地区CDD（a, 天）、R20mm（b, 天）和R95p（c, %）的变化（相对于1986-2005年）33

图4-4 21世纪末期长三角地区年平均气温（a, °C）和降水（b, %）的变化34

图4-5 21世纪末期长三角地区TXx（a, °C）、TNn（b, °C）、SU（c, 天）的变化（相对于1986-2005年）35

图4-6 21世纪末期长三角地区CDD（a, 天）、R20mm（b, 天）和R95p（c, %）的变化（相对于1986-2005年）35

图4-7 21世纪末期广东省年平均气温（a, °C）和降水（b, %）的变化36

图4-8 21世纪末期广东省TXx（a, °C）、TNn（b, °C）、SU（c, 天）的变化（相对于1986-2005年）37

图4-9 21世纪末期广东省CDD（a, 天）、R20mm（b, 天）和R95p（c, %）的变化（相对于1986-2005年）37

图5-1 气候变化的系统性风险概念框架（根据UK-China Co-operation on Climate Change Risk Assessment报告绘制）39

图 5-2 系统性变革发生的6个条件（根据Moser et al. 2019 绘制）41

表2-1 各研究区域主要气候灾害类型9

表2-2 城市高温灾害特征指标9

表2-3 城市暴雨灾害特征指标10

表2-4 城市气候风险评估暴露度及脆弱性指标选取说明11

表2-5 本报告研究区域城市人口及经济指标14

表4-1 极端气候事件指数定义31

引言

气候变化已非遥不可及的隐患，而是当下正在发生的现实威胁。2020年，即便在全球疫情冲击之下，全球气候仍未停止加速变化，温室气体浓度再次创下历史新高，并且裹挟着一系列的灾难性事件，冲击全球人类安全及可持续发展¹。澳大利亚的山火熊熊燃烧，东亚地区洪水泛滥，东非蝗虫肆虐引发粮食危机。这些气候变化引发的灾害的频度和破坏力与日俱增，气候风险已然成为了当下政策制定者、管理者、产业和社会群体不容忽视的挑战。2020年同样也是全球应对气候浪潮风起云涌的一年，中国、日本、韩国相继宣布了“碳达峰”和“碳中和”目标，各项减碳政策正从纸面落到实处。

城市正处在这一系列变革的核心位置。一方面，城市发展贡献了全球超过70%化石燃料消费产生的温室气体排放²。另一方面，城市也是受到气候变化影响最为显著的区域。城市本身的局地气象条件，城市发展对土地利用的改变，高度集中的人口和社会经济，都使得城市成为承受气候变化带来负面影响最为显著的区域³。

2021年4月30日，联合国人类住区规划署（人居署，UN-Habitat）将2021年世界城市日（World Cities Day，10月31日）的主题确定为“让城市更有气候韧性”（Adapting Cities for Climate Resilience）⁴。与此同时，联合国人居署还启动了“城市气候行动运动”（#ClimateAction4Cities Campaign⁵），呼吁全球各国政府在大幅降低城市碳排放的同时，要重塑城市韧性来管理气候变化的风险以及新冠疫情后的重重挑战，保护城市脆弱群体，建立更平等的社会体制。这项倡议给城市应对气候行动提出了更新、更系统性的要求：即减碳与风险管理（适应）并进，应对与发展福祉相连接。这一要求，应当成为城市政策制定者、基层管理者、规划设计部门等放上案头考量的关键要事。

气候变化不仅仅是全球性问题，更是本地化问题。气候变化在不同气候地理条件、经济结构以及社会文化中的表现和影响迥异。不同的气候变化影响，对不同部门、领域、人群，造成的影响和损失也千差万别。特别是落到城市区域，小尺度数据缺乏、系统分析模型不可得都成为阻碍其进一步发展应对策略的关键障碍。对于城市，以及更小的行政单元的政策制定者及管理者来说，系统、全面、小尺度，且能够指导实际工作的评估分析是最为基础的科学支撑和治理工具。

1 WMO. (2021). State of the Global Climate 2020. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618

2 UN-Habitat. (2011). Global Report on Human Settlements 2011: Cities and Climate Change. <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Cities%20and%20Climate%20Change%20Global%20Report%20on%20Human%20Settlements%202011.pdf>

3 IPCC. (2014). Urban Areas. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap8_FINAL.pdf

4 UN-Habitat. (2021). UN-Habitat announces climate crisis themes for World Habitat Day and World Cities Day 2021. <https://unhabitat.org/un-habitat-announces-climate-crisis-themes-for-world-habitat-day-and-world-cities-day-2021>

5 UN-Habitat. (2021). #CLIMATEACTION4CITIES CAMPAIGN. <https://cpi.unhabitat.org/document/climateaction4cities-campaign>

本报告旨在以IPCC风险框架为基础，针对中国东部沿海主要城市群区域——京津冀地区，长三角地区和华南地区的广东省面临的主要气候变化影响——暴雨灾害和高温灾害进行系统性评估。针对城市人口、经济高集中度，老龄人口比重增加，城市区域扩张导致不透水面积增加等社会经济和环境特征，选取城市气候风险暴露度和脆弱性指标，构建城市气候风险分析框架。

报告结论揭示出，中国主要城市区域气候灾害的发生频次和强度正发生显著变化，已经给社会经济稳定发展带来负面冲击。如果不能快速回到1.5°C目标路径上，到本世纪末，这些城市群面临的灾害影响将进一步增加。与此同时，气候变化的直接风险和城市本身存在的社会结构性问题相结合，可能引发更为严峻的系统性危机。经济发展并不必然和城市应对能力正相关，高度集中的经济产业和人口也导致更高的风险暴露度。而对于一、二线城市外的区域和小城镇，财政支撑欠缺，公共服务供给较少，风险管理能力不足等都将导致其面对灾害冲击的脆弱性高企，成为加剧系统性崩溃的木桶短板。

面对气候变化带来的系统性风险，城市既是承受风险影响主体，更是积极行动让改变发生的核心领域。在后疫情时代，加强气候风险治理，协调各部门机制，整合资源，合作创新，重塑城市韧性，成为全球能否回到可持续发展轨道上的关键。

1. 城市是应对气候变化风险的关键部门

1.1 高度集中的人口与经济让城市成为应对气候变化影响的前沿战场

城市化是二十世纪以来全球发展的大趋势之一。城市是全球人口、经济发展和社会公共服务集聚的重心，是资源利用和知识创造的载体，更是经济增长的引擎，其对全球国内生产总值的贡献达到80%⁶。特别是近几十年来，世界城市化进程加速推进。根据世界银行数据显示，1960年全世界只有10.19亿人居住在城市地区，约占全球总人口的33.2%；而到2019年，全球有超过42亿人居住在城市地区，占比达到55.7%⁷。联合国发布的《2018年版世界城镇化展望》报告显示，到2050年，预计全世界大约有68%的人口将居住在城市地区（如图1-1所示）⁸。这意味着在未来的30余年里，将有逾25亿人将涌入城市区域，并且其中90%的城镇人口增长贡献来自于亚洲和非洲的几个高速发展的国家，如中国、印度、尼日利亚等。

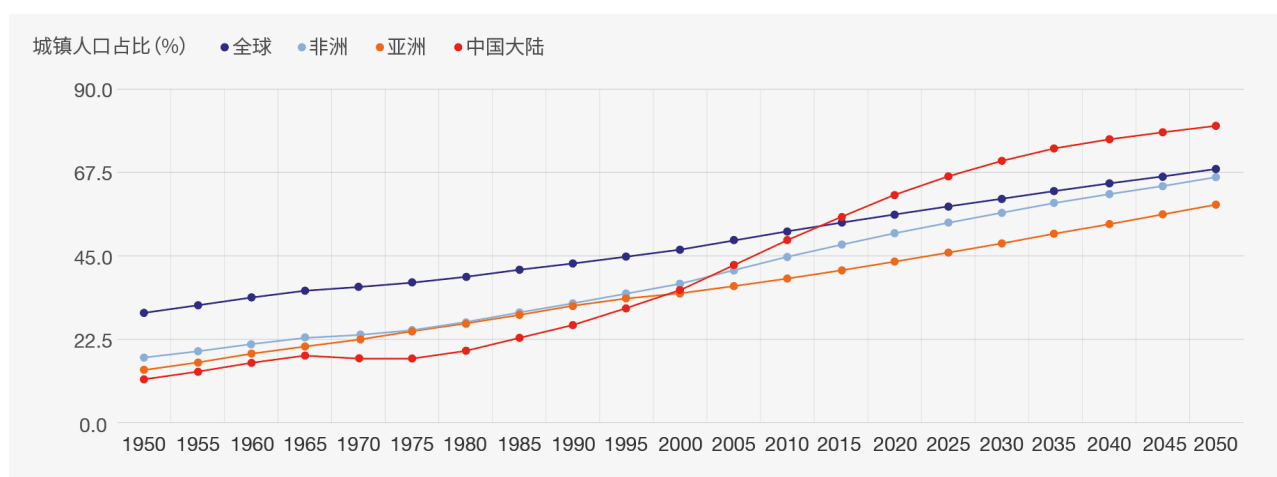


图1-1 世界各地人口城市化率（1950-2050年）⁹

中国是全球城市化发展最为迅速的区域之一，2021年5月公布的第七次全国人口普查数据显示，截止2020年11月1日，中国¹⁰居住在城镇的常住人口已经超过9亿人，占人口总数的63.89%¹¹。尽管自第六次人口普查

⁶ The World Bank. (2020). Urban Development. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview>

⁷ The World Bank. (2018). Urban population. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL>

⁸ UN Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics. (2018). The 2018 Revision of World Urbanization Prospects. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>

⁹ 绿色和平根据UN Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics. The 2018 Revision of World Urbanization Prospects数据绘制。

¹⁰ 此处及以下中国人口数据指中国大陆31个省、自治区、直辖市和现役军人人口。

¹¹ 国家统计局. (2021). 第七次全国人口普查主要数据情况. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202105/t20210510_1817176.html

（2010年）以来，中国人口增长率维持在每年0.53%的低速增长态势，但是城镇人口增长迅速，与六普数据相比，城镇人口比重上升了14.21个百分点，远超过人口总量增速（如图1-2所示）¹²。而根据《中国第十四个国民经济和社会发展五年规划和2035远景目标纲要》，十四五期间，中国常住人口城镇化率将提高到65%，可以预见在未来几年，中国的城镇化率仍将保持在快速增长区间¹³。

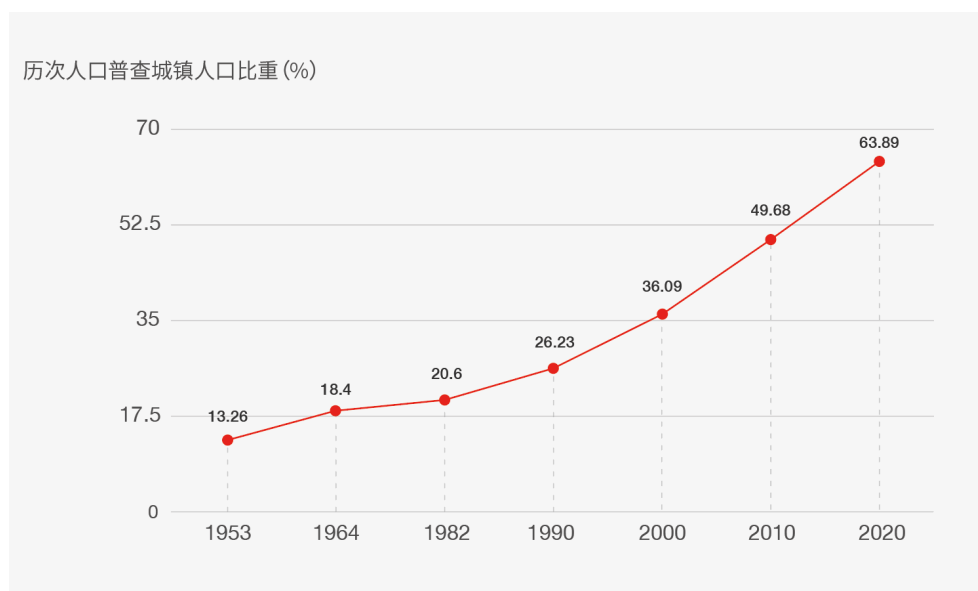


图1-2 中国历次人口普查城镇人口比重¹⁴

城市不仅仅是主要的人口聚集区，更是社会经济发展的关键动力引擎。随着城镇化的进一步深化，城市经济对经济增加的贡献率不断提高，经济和产业集聚化程度进一步增强¹⁵。城市经济的繁荣发展已成为国家能够向着可持续发展目标稳定前行的基础。然而，城市发展不仅依赖于整体宏观经济政策，更依赖于自身的合理规划、有效治理，以及能够应对外部冲击的能力。而以气候变化为代表的非传统安全威胁已经成为影响城市可持续发展的重要障碍¹⁶。

1.2 气候变化已成为威胁城市可持续发展的非传统安全危机

在人口快速涌入城市的同时，城市人居环境和可持续社会经济发展也在面临严峻挑战。交通拥堵、环境污染、土地无序利用、能源供应紧张、基本公共服务缺失等问题正在威胁城市的可持续发展。城市区域人口和经济活

¹² 同上

¹³ 中国政府网. (2021). 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm

¹⁴ 绿色和平根据国家统计局全国人口普查公报数据绘制

¹⁵ 郑鑫. (2014). 城镇化对中国经济增长的贡献及其实现途径. 中国农村经济, 6(4).

¹⁶ 汤伟. (2015). 非传统安全的“城市化”. 社会科学, 4.

动的高度聚集，使得大量居民、基础设施及产业经济更易受到包括气候变化引发的极端事件在内的自然灾害冲击。

联合国《2018年可持续发展目标报告》评估显示，城市遭受自然灾害的频率和损失正在逐年增长，在应对气候变化方面变得更加脆弱。预计到2050年，全世界受到飓风和地震影响的人口将分别从2000年的3.1亿和3.7亿增加到6.8亿和8.7亿¹⁷。

对于仍处在经济社会高速发展的中国城市区域而言，应对气候变化已成为保障自身可持续发展的必然需求。在不断加速的气候变化影响下，这些城市集群的气候安全将决定中国未来能否实现可持续发展目标，能否守住安全发展底线的决定性因素。

● 气候变化背景下，近60年来极端天气气候事件的频度和强度增加，且城市自身发展对局地小气候造成影响

中国是受全球气候变化影响的敏感区和脆弱区，也是极端天气气候事件最为频发的国家之一¹⁸。《中国气候变化蓝皮书（2020）》指出，1961-2019年，中国极端强降水事件呈现增多趋势，极端高温事件自20世纪90年代中期以来明显增多¹⁹。一方面，气候变化是这类极端事件频次和强度变化的关键推手；另一方面，城市地区本身的环境和气候特征也导致这类灾害影响在城市区域被放大。

城市地区下垫面性质的剧烈变化，人为热、粉尘和废气的排放增加，使得城市区域气温、相对湿度、能见度和降水量等气候要素与背景气候有较大的差异^{20,21}。对极端高温事件的研究一致认为城市效应会增加高温事件的频率和强度^{22,23}，特大城市中心区域极端高温事件的发生频次可能比远郊地区多50%以上^{24,25}。部分对极端降水的研究也发现，城市效应增加了城区的大气辐合对流，结合城市地表粗糙度增加产生的滞留作用，使得城区及其下风方降水频率和强度增加²⁶。受所在地气候影响，中国不同区域大城市极端降水变化有所不同，但长江下游、东南沿海地区大城市极端降水强度和频数增加的趋势均比周边地区要大²⁷。

17 联合国. (2018). 2018年可持续发展目标报告. <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2018/TheSustainableDevelopmentGoalsReport2018-ZN.pdf>

18 秦大河, 张建云, 闪淳昌, 宋连春. (2015). 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. 科学出版社

19 中国气象局气候变化中心. (2020). 中国气候变化蓝皮书 (2020). 科学出版社

20 Murphy, D. J., Hall, M. H., Hall, C. A., Heisler, G. M., Stehman, S. V., & Anselmi-Molina, C. (2011). The relationship between land cover and the urban heat island in northeastern Puerto Rico. *International Journal of Climatology*, 31(8), 1222-1239.

21 Authority, G. L. (2010). The draft climate change adaptation strategy for london: Public consultation draft. In *The draft climate change adaptation strategy for London: Public consultation draft*. Greater London Authority.

22 Xia, J., Tu, K., Yan, Z., & Qi, Y. (2016). The super-heat wave in eastern China during July–August 2013: a perspective of climate change. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1291-1298.

23 Zhao, P., Jones, P., Cao, L., Yan, Z., Zha, S., Zhu, Y., ... & Tang, G. (2014). Trend of surface air temperature in eastern china and associated large-scale climate variability over the last 100 years. *Journal of Climate*, 27(12), 4693-4703.

24 张雷, 任国玉, 刘江, 周雅清, 任玉玉, 张爱英, & 冯亚文. (2011). 城市化对北京气象站极端气温指数趋势变化的影响. *地球物理学报*, 54(5), 1150-1159.

25 Ren, Y., Ren, G., Allan, R., & Zhang, S. (2021). Extreme temperature of the mid-eighteenth century as compared to today's in Beijing. *Climatic Change*, 165(3), 1-19.

26 Lin, C. Y., Chen, W. C., Liu, S. C., Liou, Y. A., Liu, G. R., & Lin, T. H. (2008). Numerical study of the impact of urbanization on the precipitation over Taiwan. *Atmospheric Environment*, 42(13), 2934-2947.

27 王萃萃, & 翟盘茂. (2009). 中国大城市极端强降水事件变化的初步分析. *气候与环境研究*, 14(5), 553-560.

● 中国城市群主要分布在易受气候变化影响的区域，高度集中的人口和经济暴露在高气候风险中

中国城市群及人口、经济分布呈现显著的区域分化特征。大多数城市群集中在中东部区域，特别是沿海区域。在五个国家级城市群中京津冀城市群、长江三角洲城市群和珠江三角洲城市群均分布在东部沿海地区，而这三个城市群的人口和产业集中度已经远远超过其他区域。

对当前中国气候变化区划的历史分析²⁸和未来情景预测²⁹显示，华北地区、长江中下游地区和华南地区处在气候变化影响的中高风险区。其中华北地区和长江中下游地区的气温上升速率处在高位，是热浪的中高风险区。而长江中下游地区和华南地区的降水波动幅度和降水量均呈现上升趋势，是洪涝高危险区。由此可见，以京津冀、长三角和珠三角为代表的中国主要城市群和中国气候变化高风险区重叠。高度集聚的人口、产业和基础设施暴露在气候变化带来严峻的安全危机中。

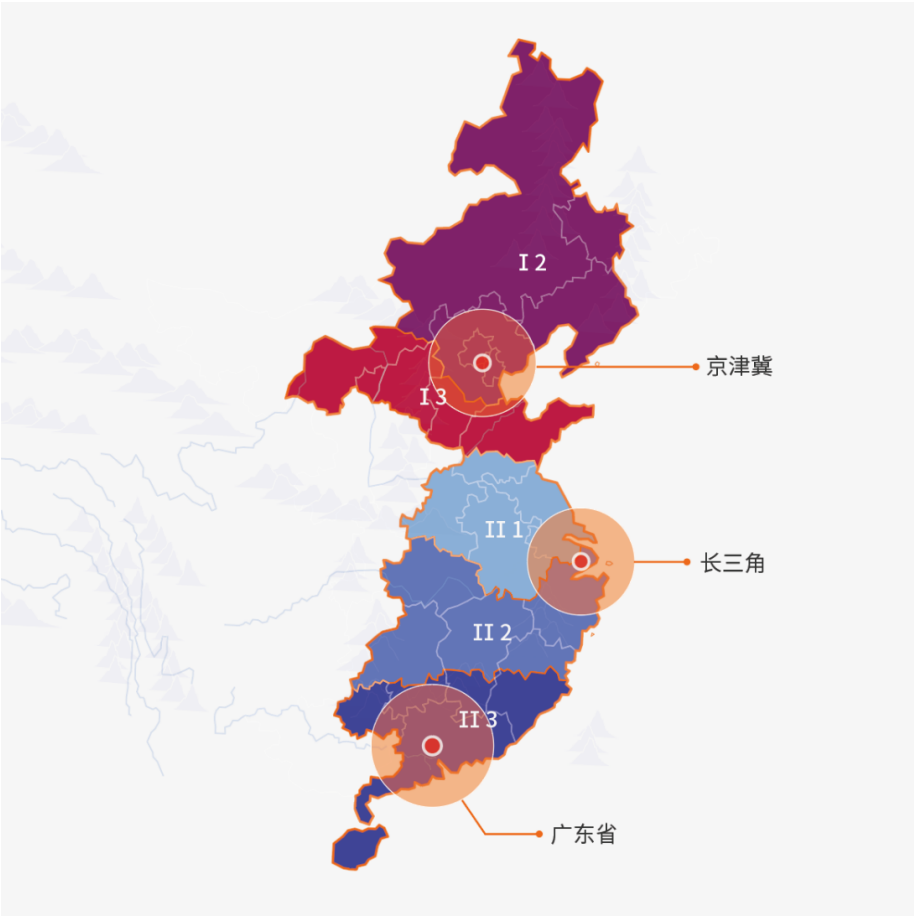


图1-3 中国气候变化区划（1961-2010年）与三个主要城市群的空间位置关系

28 史培军, 孙劭, 汪明, 李宁, 王静爱, 金赟赟, ... & 尹卫霞. (2014). 中国气候变化区划 (1961~ 2010 年). 中国科学: 地球科学, 44(10), 2294-2306.

29 吴绍洪, 潘韬, 刘燕华, 邓浩宇, 焦珂伟, 陆晴, ... & 高江波. (2017). 中国综合气候变化风险区划. 地理学报, 72(1), 3-17.

- 城市应对气候变化的能力有待加强

尽管气候变化已经为全球安全危机的关键推手，但是从全球来看，城市与气候变化应对的交叉科学研究尚在探索阶段。城市空间规划、交通、电力系统、供水、住宅等不同部门如何与气候变化发生交互关系？城市治理体系如何应对不断扩大的气候风险和不确定性？城市基础数据如何更好地响应气候变化影响，并为应对风险指明方向？对这些科学问题的探索刚刚开始。

从中国来看，中国的城镇化进程从90年代后才进入快速扩张期，而中国城镇化发展进入高质量发展阶段还不到10年的时间。在前期快速扩张过程中，城镇化发展依赖于土地城镇化，城市空间发展失衡，与产业结构优化、环境改善、公共服务供给充分等城市发展目标不匹配，社会公共资源不充足、分配不均都成为积累的问题³⁰。而气候变化风险的加剧，有可能进一步恶化这些积弊，阻碍中国高质量城镇化推进。

中国气候适应性城市建设则启动得更晚。2017年，国家发改委、住房城乡建设部印发《气候适应型城市建设试点工作的通知》，共有28个城市被列为试点名单³¹。该文件从提高预警监测能力和信息服务，提升城市基础设施应对灾害能力，增强城市生态系统韧性和功能，加强灾害管理和健全管理体系等多个方面对试点地区提出要求。目前，28个试点城市正在对各自试点情况进行评估总结。其经验与成果能否复制到其他城市和区域仍有待研究。

综上所述，城市已经成为应对气候变化危机最关键的领域之一。城市在气候变化减缓和适应行动方面的领导作用，以及其基础设施建设、城市规划、政策机制、以及执行和监管等措施，都将决定着气候变化治理进程和全球可持续发展目标的实现。

³⁰ 刘秉镰, 朱俊丰. (2019). 新中国70年城镇化发展: 历程、问题与展望. 经济与管理研究, 40(11), 3-14.

³¹ 中国政府网. (2017). 我国启动气候适应型城市建设28个城市试点. http://www.gov.cn/xinwen/2017-03/02/content_5172504.htm

2. 城市气候变化风险分析框架

中国作为世界上极端天气气候事件最多、影响范围最广、发生频率最高的区域之一，气候灾害风险一直高于全球绝大多数国家。城市是灾害风险的高发地区，也是适应气候变化的热点地区。由于城市的快速发展和扩张，大城市、特大城市 and 城市群不断增加，人口增长和经济活动密集，气候灾害风险的暴露度也在不断加大。气候灾害风险的升高不仅取决于极端天气气候事件致灾危险性的特征，人口、社会经济、市政设施、建筑道路桥梁等承灾体的暴露度和脆弱性亦同样重要。

IPCC第五次评估报告确定了气候变化风险评估的基础框架（如图2-1所示）。气候变化风险是指自然和人为干扰（人类活动）所形成气候系统的变化，对自然环境系统和社会经济系统造成不利影响的可能性及其程度的结合³²。气候变化的风险来自于气候相关危害（Hazard，即灾害性事件及其趋势）与人类和自然系统的暴露度和脆弱性之间的相互作用。气候变化风险水平的科学和定量化评估，对于城市应对气候风险，减少灾害损失，提升城市适应气候变化能力等具有重要的意义。

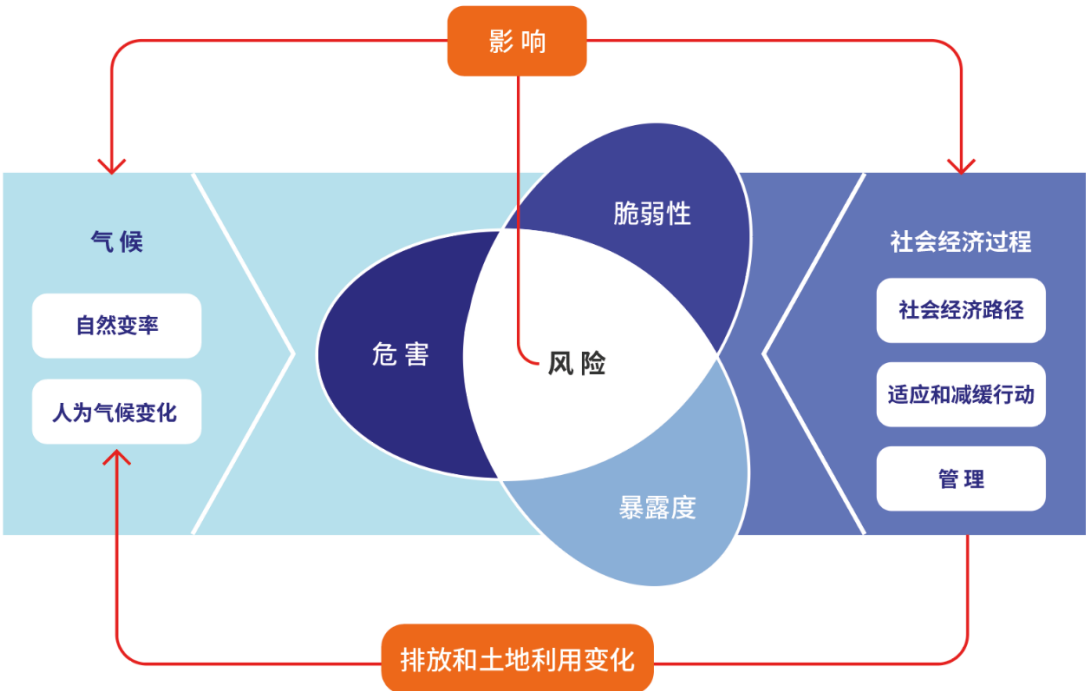


图2-1 IPCC第五次评估报告AR5核心概念图

32 IPCC. (2014). Summary for policymakers. In: Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability.

2.1 城市气候变化灾害特征指标

依据《中国气候变化蓝皮书（2020）》³³及中国气候变化区划研究³⁴，本报告针对研究区域主要气候变化特征，选取高温和暴雨两类灾害进行风险评估。

表2-1 各研究区域主要气候灾害类型

研究区域	高温灾害	暴雨灾害
京津冀地区	√	
长三角地区	√	√
广东省	√	√

● 高温灾害致灾因子

气象上将当日最高气温达到或超过35℃时称为一个高温日，为了突出持续时间对高温过程影响，将连续3天及以上最高气温≥35℃作为一个高温过程。本报告根据评估区域高温灾害特点，基于高温灾害事件的发生强度、持续时间、影响范围等，根据高温致灾机理，确定高温的致灾因子（如极端最高气温、高温日数、高温过程等），评估其高温灾害危险性水平。

表2-2 城市高温灾害特征指标

高温指标	单位	指标界定
年平均最高气温	℃	某年的日最高气温平均值
年极端最高气温	℃	某年的最高气温
高温日数	天	日最高气温≥35℃的日数
热浪频次	次	高温天气（连续3天日最高气温≥35℃）发生次数

33 中国气象局气候变化中心. (2020). 中国气候变化蓝皮书 (2020). 科学出版社.

34 史培军, 孙劭, 汪明, 李宁, 王静爱, 金赞赞, ... & 尹卫霞. (2014). 中国气候变化区划 (1961~2010 年). 中国科学: 地球科学, 44(10), 2294-2306.

● 暴雨灾害致灾因子

一般情况下，以单站24小时内降雨量 $\geq 50\text{mm}$ 的降雨日为单站暴雨日，单站暴雨日持续天数 ≥ 1 天为暴雨日降水过程。雨涝指数可以反映某个地区的雨涝情况，将某区域降水量从低到高分四个等级，并考虑连续降雨的累加影响及强降水的时空连续性等进行等级赋予权重，得到雨涝指数。本报告选用雨涝指数进行暴雨致灾危险及风险的评估与区划。

表2-3 城市暴雨灾害特征指标

暴雨指标	单位	指标界定
暴雨日	天	单站24小时内降雨量 $\geq 50\text{mm}$ 的降雨日为单站暴雨日
暴雨频次	次	单站暴雨日持续天数 ≥ 1 天发生的频次

气象数据来源于京津冀、长三角及广东省地区国家级地面气象观测站1961-2019年逐日观测资料，要素包括：日平均气温、日最高气温、日极端最高气温、日降水量等。

2.2 城市气候风险暴露度及脆弱性指标选取

本报告将城市作为一个有机整体，拆分为人、经济和生态系统三个组成成分，分析城市对灾害的暴露度和脆弱性。选择总人口、人口密度、脆弱人口数量、地区国民生产总值、不透水面积等指标来量化人、经济和生态系统对气象灾害的暴露度和脆弱性。数据来源于各地区2000-2017《统计年鉴》、《城市统计年鉴》、《城建统计年鉴》等公开数据³⁵。

承灾体是致灾因子作用的对象，是蒙受灾害损失的实体。暴露度是承灾体暴露于致灾因子的程度，受到灾害不利影响的范围或者数量³⁶。脆弱性是承灾体受到灾害影响造成损失的程度。一般承灾体的脆弱性越低，灾害的损失越小。

35 所有指标及指标数据来源请见附录详细说明

36 IPCC. (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.

表2-4 城市气候风险评估暴露度及脆弱性指标选取说明

指标类型	指标要素	指标说明	已有研究
暴露度	总人口	暴露在气候风险中的人口数量。人口是高温灾害和洪涝灾害直接的承受体，其健康和生命安全均受到两类灾害的直接影响。人口越多，在灾害来临时，作为承灾体的人口，暴露性也相应较高。	张蕾 等, 2016 李柔珂 等, 2020
	人口密度		
	经济总量（地区生产总值）	反映出在研究时段内，暴露在气候风险中的经济规模。高温热浪和洪涝灾害都将对城市基础设施和经济发展造成显著影响，甚至降低城市生产力水平。	李柔珂 等, 2020 Xia et.al., 2017
	生态用地面积（建成区绿化覆盖面积）	城市生态系统可能暴露再气候变化导致的高温热浪和城市洪水中，生态系统结构和功能都可能因为相应灾害导致损失，进而影响生态系统服务供给。	IPCC, 2014
脆弱性指标	人均医疗床位数（每千户籍人口病床数）	城市应对高温热浪/洪涝灾害造成的健康影响的保障水平的替代指标。人均医疗设施保有量高，意味着城市应对气候灾害影响的脆弱性低。	杨秀 等, 2020 Cai et al., 2021 黄晓军 等, 2021
	65岁以上老年人口占比	城市老龄人口是面对高温热浪和城市暴雨洪涝灾害敏感人群，其占比能够有反映城市居民面对不同灾害类型的脆弱程度	郭禹慧 等, 2021 杨秀 等, 2020 Cai et.al., 2021
	14岁以下少年儿童人口占比	少年儿童的情况与老年人类似，少年儿童面对灾害的恢复、逃脱能力和识别灾害危险性的能力都偏弱。少年儿童占比高，人口的脆弱性也偏高。	杨秀 等, 2020 Cai et.al., 2021
	单位面积地区生产总值	反映一个地区地方财政收入水平的替代指标。财政收入高的地区，在应对灾害时能有效应对灾害对当地经济的冲击，有足够的财力支持恢复重建。	杨秀 等, 2020 黄晓军 等, 2021 Zhao et al., 2021
	人均地区生产总值	反映当地民众的收入水平的替代指标。较高的收入水平对应应对灾害较为充足的资金供应，可以采取使用各种措施方法降低灾害的危险，及灾害后复原能力较强。	杨秀 等, 2020 黄晓军 等, 2021 Zhao et al., 2021
	不透水面积占比	不透水面会隔断城市地表与地下水文的联系，对地表径流、水体质量、能量平衡等产生重要影响。不透水面积占比高，城市应对气候变化的脆弱性高。	徐宗学 等, 2020 Sohn et al., 2020

2.3 城市气候风险综合评估框架及计算方法论

气候灾害风险评估是定量的对灾害发生的可能性、强度和影响进行评估，IPCC第五次评估报告将气候灾害风险拆分为灾害的危险性、承灾体对灾害的暴露度和脆弱性三个方面。因此，灾害风险指数可以表达如下：

$$F = WH \text{ 危险性指数} + WE \text{ 暴露度指数} + WV \text{ 脆弱性指数}$$

F为气候灾害风险指数，表征某地灾害风险的指数，介于0~1之间，越接近1则该地灾害风险程度越高，越接近0则灾害风险程度越低。WH，WE和WV分别为致灾因子危险性、承灾体暴露度和脆弱性指数的权重。

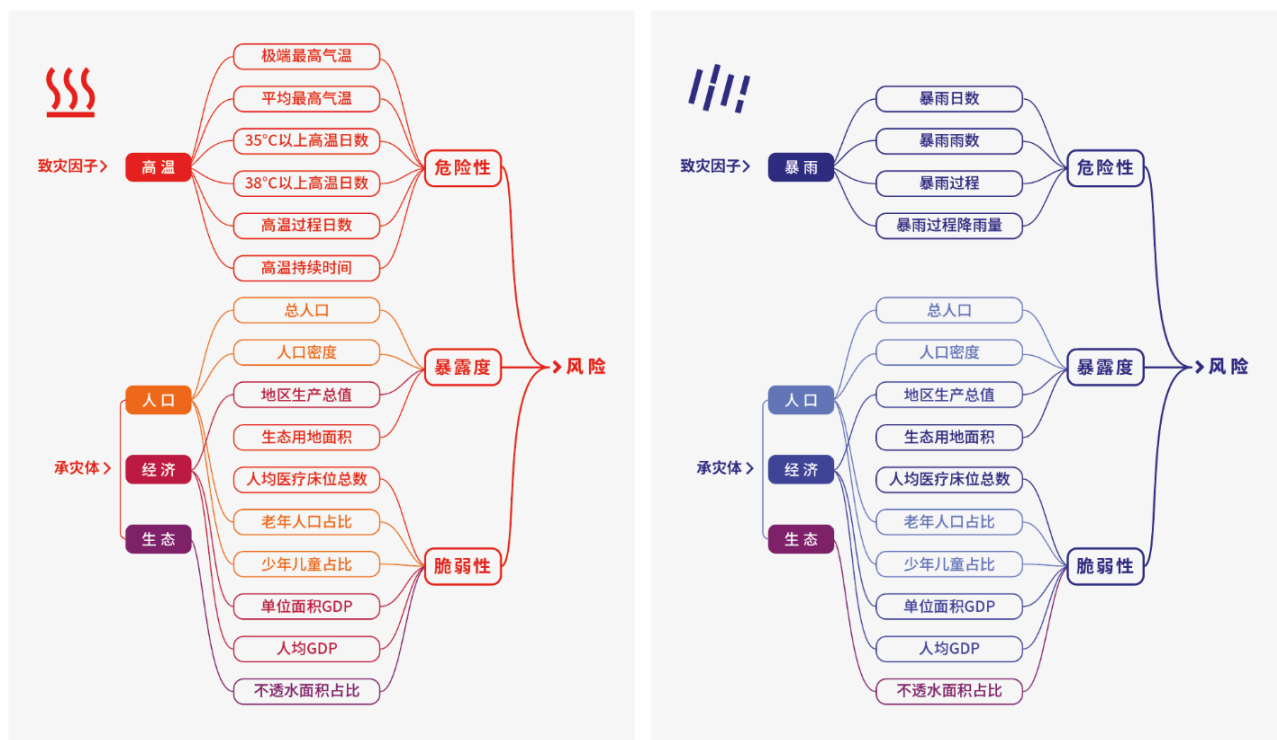


图 2-2 城市气候风险评估框架

灾害风险评估涉及气候和社会经济的多个因子，用于量化这些因子的各个指标的量纲不同，数量级也有较大的差异，无法直接进行比较和分析，为消除各指标见的量纲差异，对每个指标进行归一化处理。

归一化方法:

$$r_{ij} = \frac{V_{ij} - \min_i}{\max_i - \min_i}$$

式中, Vr_{ij} 为第j个目标在第i个指标的值, max_i 为第i个指标在统计范围的最大值, min_i 为其最小值。 r_{ij} 为第j个目标在第i个指标的归一化值, $r_{ij} \in [0,1]$ 。

暴雨灾害风险是暴雨致灾因子危险性、暴雨承灾体暴露度和脆弱性三个因子综合作用的结果, 将前述三个因子使用信息熵赋权法确定权重, 叠加得到研究区域暴雨灾害综合风险区划, 并采用百分位数法, 将各区作为划分为高风险区 (I 级)、次高风险区 (II 级)、中等风险区 (III 级)、次低风险区 (IV 级) 和低风险区 (V 级)。

高温灾害风险指数是高温致灾因子危险性, 高温灾害承灾体暴露度和脆弱性三个因子加权综合的结果, 同样使用百分位数法进行等级的划分。

信息熵赋权法:

$$H_i = -\frac{1}{\ln \ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}$$

式中, $f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}$, 当 $f_{ij} = 0$ 时, 令 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$, 其中 r_{ij} 为第j个目标在第i个指标的归一化值, $r_{ij} \in [0,1]$ 。

第i个指标的权重为, $w_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i}$

式中, $0 \leq w_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^m w_i = 1$

2.4 研究区划

城市群是在地理区位聚合的多个城市体系共同组成的城市地域, 是城市的网络集聚发展形成的庞大的、蔓延的城市地域景观³⁷。城市群内部往往具有显著的功能内聚力, 发达且相互关联的基础设施网络, 相互协调的功能分工和经济联系, 以及密集的人口流动和交换。在面对气候变化的不利影响时, 城市群空间分布上的集聚特征, 意味着其所面临的的气候变化灾害特征相似。而其内部联系紧密的社会经济结构和相互关联的基础设施网络使得其所面临的的气候风险具有可比性, 其风险应对策略与落地措施也更能达成相互协调一致。因此本报

37 陈伟, 修春亮. (2021). 新时期城市群理论内涵的再认知. 地理科学进展, 40(5), 848-857

告将前述气候变化趋势带与中国目前主要城市群分布进行叠加，选取其中三个一级城市群：京津冀城市群，长三角城市群及珠三角城市群进行系统评估与分析。

由于目前国家对城市群的规划设计主要是以产业结构的协调互补等为基础，与省级行政边界并不完全一致。三个一级城市群中，除珠三角城市群以外，京津冀城市群和长三角城市群都跨越省级边界。如按照《长江三角洲城市群发展规划》，长三角城市群主要包括上海全市，江苏省除徐州、淮安、宿迁、连云港以外的9城，浙江省除温州、丽水、衢州以外8城，及安徽省除蚌埠、淮南、黄山、阜阳、宿州、六安以外的8城。这种区划界定方法导致与实际省级行政边界并不一致。为实现气候变化风险评估为区域政府在风险管理和系统应对策略中提供的决策支持及科学指导目标，本报告在划定风险评估的基础评估单元时，以各区域省级边界为基准，确保与各级行政单位（省、市、区/县）边界相一致，以满足未来风险管理工作条线一致性的需求。

对珠三角城市群而言，尽管粤北地区不在珠三角城市群区域划分范围内，但是考虑到对省级风险评估与应对工作的指导意义，本报告将研究区域扩大到广东省全域进行分析。

表2-5 本报告研究区域城市人口及经济指标³⁸

研究区域	区划包含省、市区域	2020年人口（万人）及占比	2020年经济总量（亿元）及占比	城镇化率
京津冀地区	北京市、天津市、河北省全域	11036.92 (7.82%)	86393.23 (8.50%)	68.61%
长三角地区	上海市、江苏省、浙江省、安徽省全域	23521.36 (16.66%)	244713.18 (24.09%)	70.85%
广东省	广东省全域	12601.25 (8.93%)	110760.94 (10.90%)	74.15%
合计		47159.53 (33.4%)	441867.35 (43.49%)	71.21%

38 绿色和平根据国家统计局《2020年第七次全国人口普查主要数据公报》、《2020年国民经济和社会发展统计公报》数据整理

3. 各研究区域气候变化特征及风险分析

3.1 京津冀地区气候变化特征及高温灾害风险

3.1.1 京津冀地区1960-2019主要气候变化特征

1960-2019年，京津冀地区气温和平均最高气温增加趋势较为明显，20世纪90年代中期以来高温特征越发显著，高温日数明显增加。

- 平均气温和平均最高气温增加

1961-2019年，京津冀地区年平均气温为11.7℃，总体呈上升趋势，**增温速率达到0.32℃/10年**。年平均最高气温为18.0℃，与平均气温变化趋势一致，也呈线性增加趋势，增加速率为0.23℃/10年。2019年平均最高气温达到最大，为19.4℃。

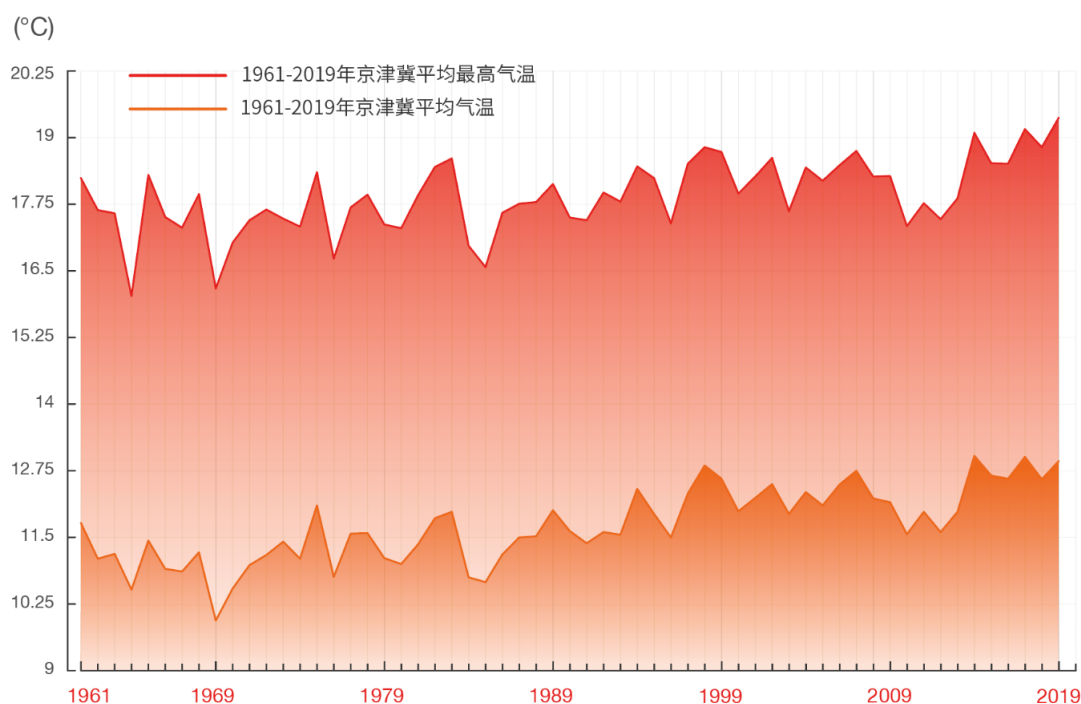


图3-1 京津冀地区平均气温和平均最高气温历年变化

● 90年代中期以来，京津冀地区高温日数显著增加

近60年京津冀地区35℃及以上高温日数平均为9.5天/年，并呈现明显的增加趋势，20世纪60-70年代初高温日数较多（年平均12.1天），20世纪70年代初至90年代中期高温日数明显回落（年平均7.0天），而20世纪90年代以来高温日数明显增多。

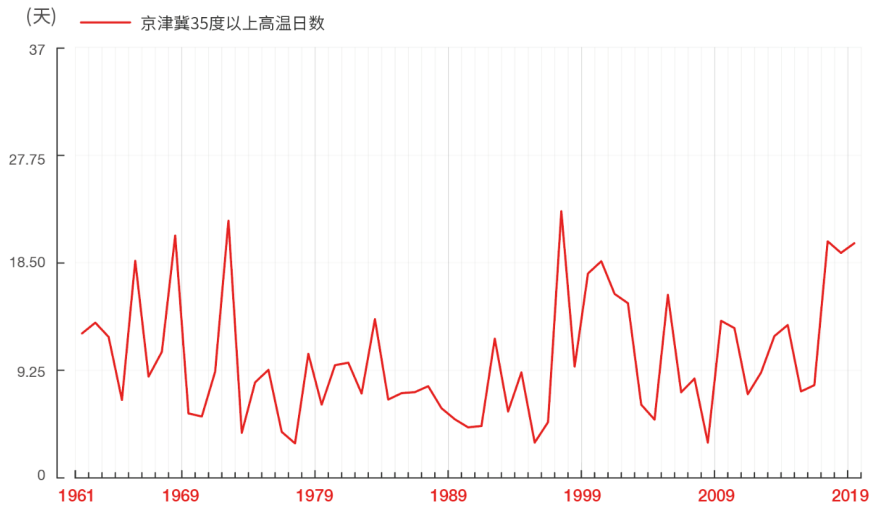


图3-2 京津冀地区35℃及以上高温日数历年变化

● 北京站高温热浪的频次和持续日数增加

以北京站作为代表站来看，近60年北京地区共出现高温过程50次。高温热浪发生频次呈上升趋势，尤其20世纪末以来高温热浪频发明显。高温热浪次数最多一年出现在2000年，共有6次。高温热浪平均持续时间也在增加，平均持续时间最长出现在1997年（8天），其后依次是：1999年（6.3天）、2002年（6天）、2018年（5天）。

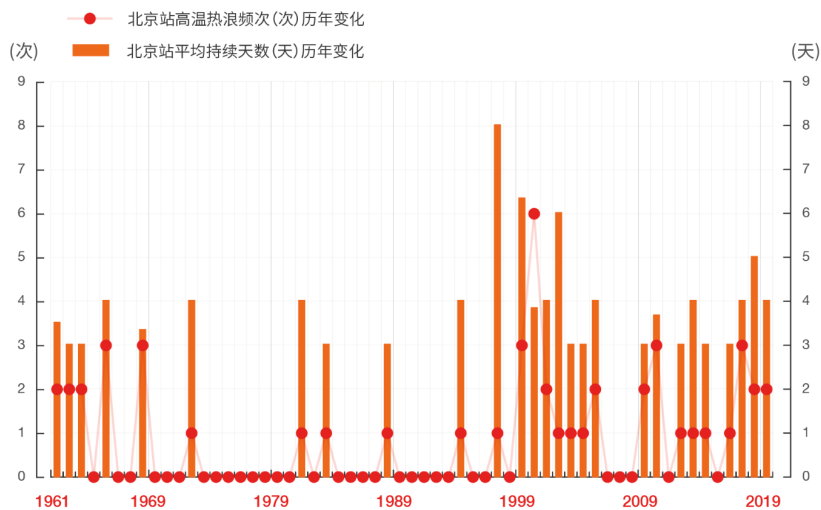


图3-3 北京站高温热浪频次和平均持续天数历年变化

3.1.2 京津冀地区高温热浪灾害风险分析（2000-2017）

通过叠加运算京津冀2000-2017年高温灾害致灾因子危险性、承灾体暴露度和承灾体危险性3个因子，得到京津冀地区高温灾害综合风险区划，从低到高依次划分为5个风险区。可以看到，高风险区位于北京及天津地区，该地区多为大城市地区，人口稠密，夏季高温过程时有发生，较容易受高温灾害的影响。石家庄、邢台、邯郸以及北京、天津周边地区多为次高风险区和中等风险区，这些地区中小城镇较多，或者分布于京津核心区的边缘及拓展地带，而河北东北部、西北部及北部部分地区则分布于山区，人口稀少，平均气温较低，较少出现高温过程，受高温灾害的影响程度较小。

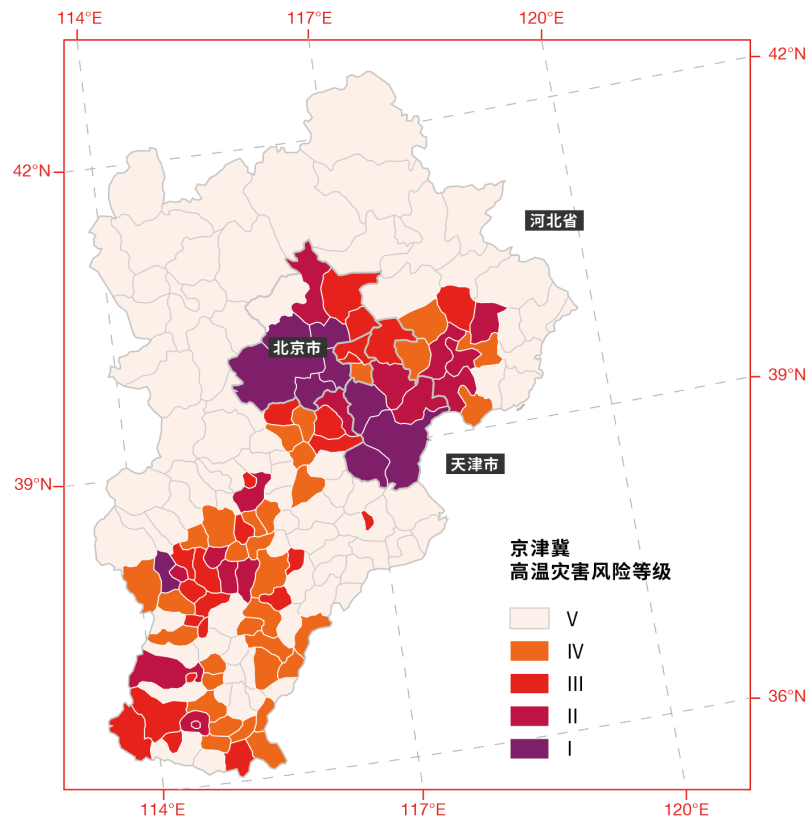


图3-4 京津冀地区高温灾害风险等级空间分布

3.2 长三角地区气候变化特征及高温、暴雨灾害风险

3.2.1 长三角地区1960-2019主要气候变化特征

1960-2019年，长三角地区年平均气温显著升高。21世纪初以来，长三角地区**高温日数较多，高温过程发生频次显著增加**。同时该区域**年降水量也呈增加趋势**，暴雨日数和暴雨过程发生频次年际变化较大，但都呈波动增加趋势。

● 平均气温、平均最高气温、年极端最高气温上升

1961-2019年，长三角地区年平均气温为16.0℃，呈波动上升趋势，**线性增温速率达到0.28℃/10年**。1990年以来气温增加趋势更为明显，绝大多数年份气温都在平均值以上。年平均最高气温为20.7℃，与平均气温变化趋势一致，也呈线性增加趋势，**增加速率为0.25℃/10年**，2007年平均最高气温达到最大，为22℃。**年极端最高气温上升速率为0.21℃/10年**，历史极端最高气温为39.5℃，出现在2013年，其后依次为2017年（39.4℃）、2003年（39.2℃）、1966年（39.0℃）、1988年（38.6℃）。

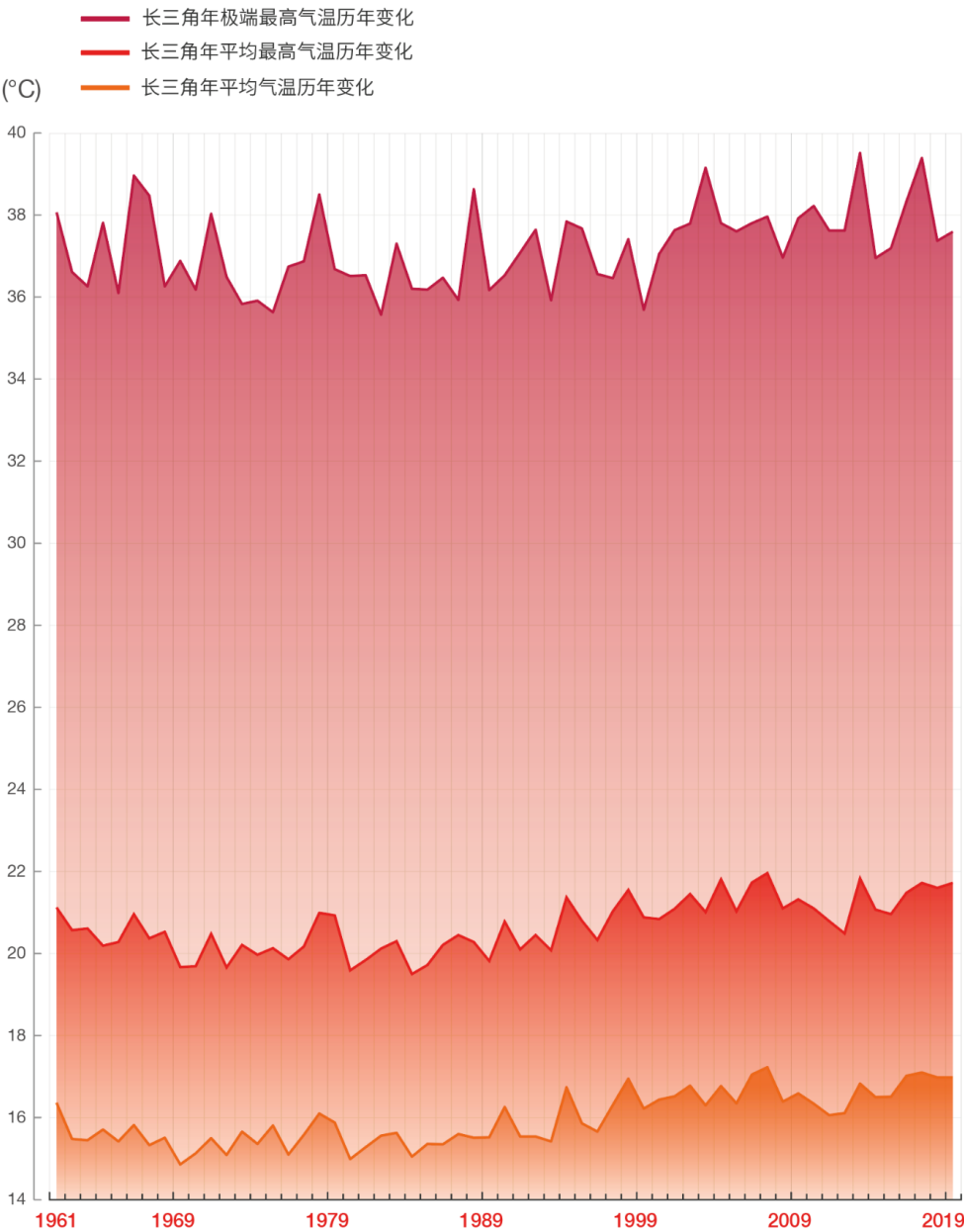


图3-5 长三角地区平均气温平均最高气温和极端最高气温历年变化

● 21世纪初以来高温日数较多，高温热浪频发

近60年长三角地区35℃及以上高温日数平均为15.3天/年，并呈现明显的增加趋势，线性增加速率为1.3天/10年，20世纪60-70年代初高温日数较多（平均16.9天/年），20世纪70年代初至90年代中期高温日数明显回落（平均10.6天/年），而20世纪90年代以来高温日数明显增多（18.2天/年）。35℃及以上年高温日数高值年份分别为2013年（36.4天）、1967年（31.5天）、1971年（27.0天）、2017年（26.7天）、2003年（25.7天）。

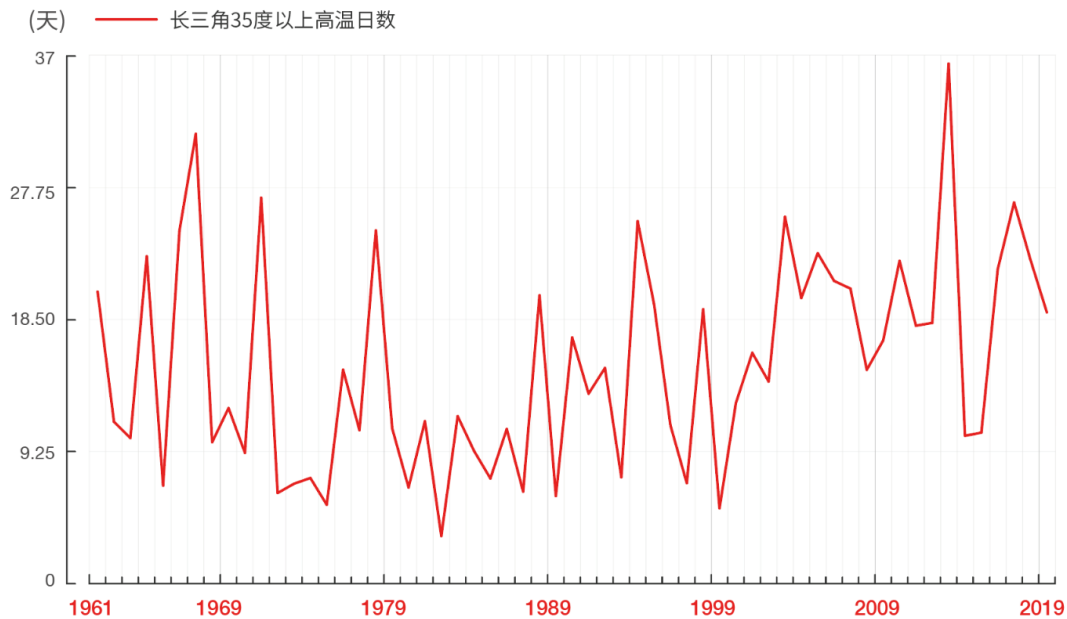


图3-6 长三角地区35℃及以上高温日数历年变化

● 杭州站高温热浪的频次和持续日数增加，高温热浪过程中的极端最高气温上升

以杭州站为代表站，近60年杭州地区共出现高温过程429次，2001年以来高温共发生177次，占总次数的41%，是高温发生频次较高的阶段。高温热浪次数发生最多年份2011年（14次），其次为1981和2017，均发生13次。高温热浪平均持续时间呈增加趋势，增加速率为0.2天/10年，平均持续时间最长出现在2012年（9天），其后依次是：2001年（7.7天）、1994年（7天）、1966年（6.5天）和1971年（6.25天）。高温热浪极端最高气温以0.4℃/10年的速率在增加，最高值出现在2013年，达到41.6℃，其后依次是：2017年（41.3℃）、2003年和2016年（40.3℃）、1978年（39.9℃）。



图3-7 杭州站高温热浪频次及平均持续天数(a)和期间极端最高气温(b, °C)历年变化

- **暴雨日数和暴雨过程发生频次年际变化较大，但都呈波动增加趋势**

1961-2019年，长三角年累积降水量平均为1225.6mm，呈波动增加趋势，增加速率为34.6mm/10年，累积降水量的年际变化现象比较明显，阶段性波动特征明显，依次经历了“少（20世纪60年代）-多（20世纪70-80年代）-少（20世纪90年代中期-21世纪初）-多（21世纪初以来）”的变化，2016年累积降水量最多，为1666.9mm。近59年共出现暴雨日数219天，暴雨日数也呈现明显的增加趋势，增加速率为0.2天/10年。暴雨的年际差异大，最多的年份达6.3天（2016年），其后依次为1991年（5.9天）、1999年和1983年（5.3天）、1989年（4.9天）。

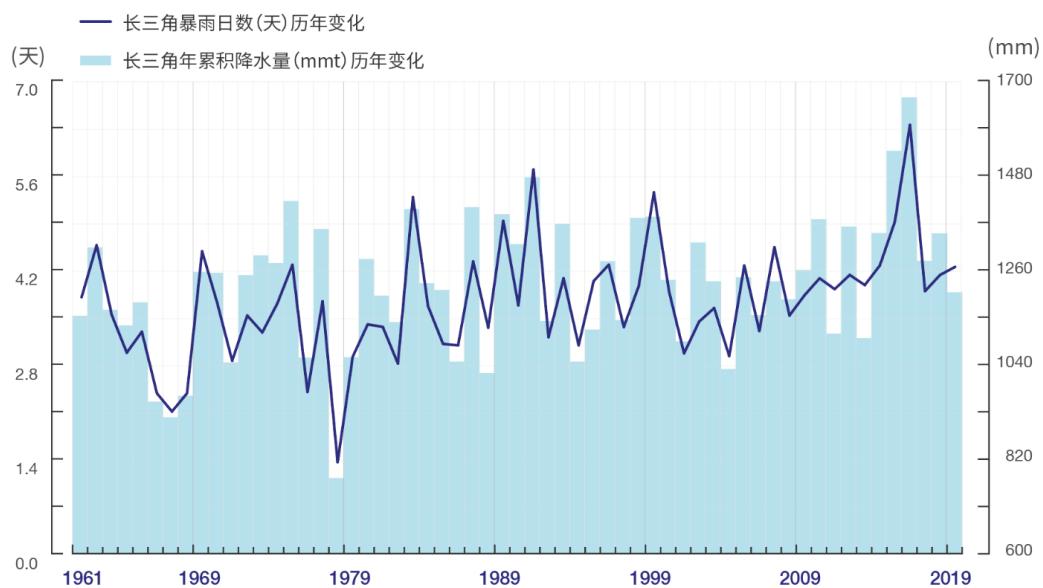


图3-8 长三角年累积降水量和暴雨日数历年变化

以杭州站作为代表站来看，近59年杭州地区共出现暴雨过程176次，呈现上升趋势。暴雨过程发生频次年际差异较大，发生频次较多的年份分别为1973和2015年（7次）、1988、1999和2013年（6次）。暴雨过程平均累积降水量也呈弱的上升趋势，上升速率为0.6mm/10年。累积降水量较多的年份分别为2008年（154.2mm）、1962年（153.5mm）、1963年（145.8mm）、1996年（116.4mm）和1997年（112.9mm）。

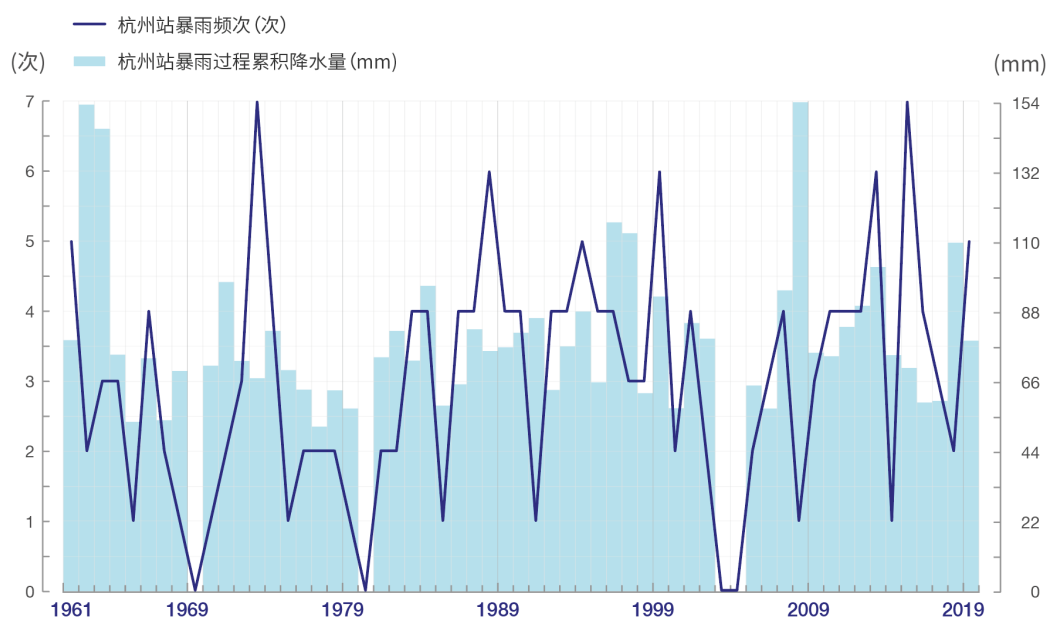


图3-9 杭州站暴雨频次和暴雨过程平均累积降水量历年变化

3.2.2 长三角地区2000-2017高温及暴雨灾害风险分析

• 长三角地区2000-2017高温灾害风险分析

2000年来，长三角地区高温灾害风险指数总体呈上升趋势，尤其是2010年以后有明显的上升。从空间分布来看，高温灾害风险性由南向北呈递减分布，浙江省为高风险区，其次是江苏省和安徽省南部，江苏省和安徽省北部风险性较低。

从高温灾害风险指数线性变化趋势分布来看，长三角地区高温灾害风险指数均呈上升趋势，上升最为明显的是江苏省，其次是安徽省。

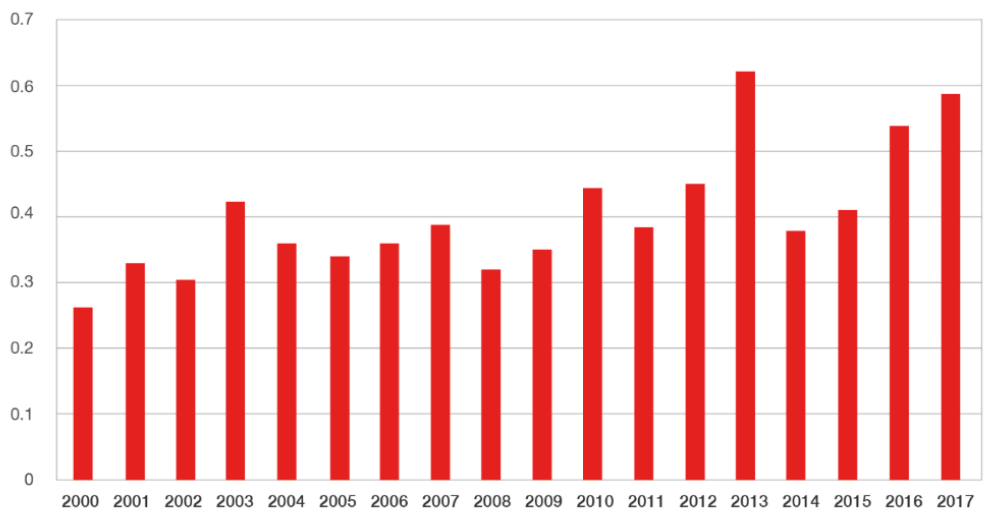


图3-10 长三角地区高温灾害风险指数历年变化

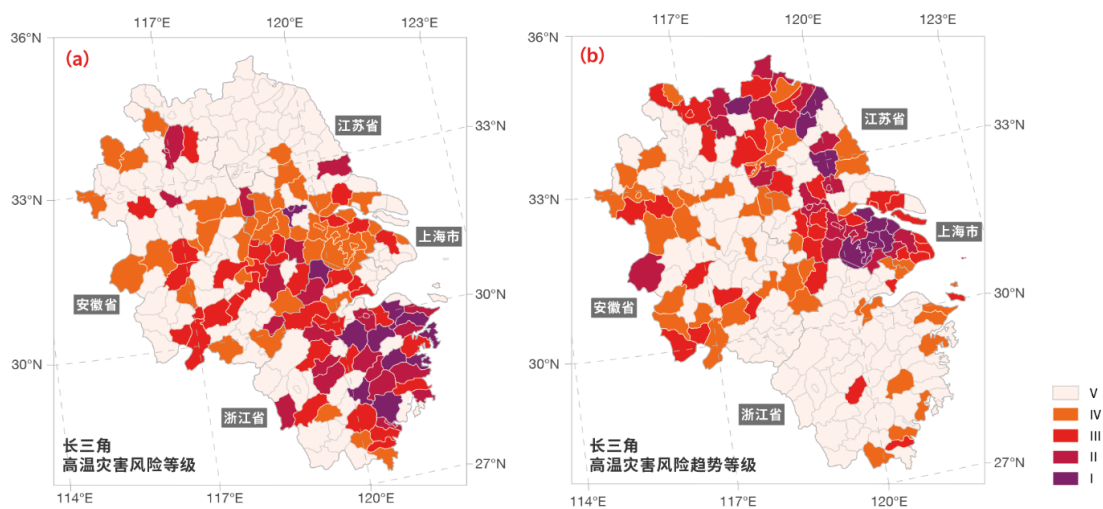


图3-11 长三角地区高温灾害风险等级(a)和线性变化趋势(b)空间分布

• 长三角地区2000-2017暴雨灾害风险分析

从长三角地区暴雨灾害风险综合区划图上可以看出，**强风险区**主要分布在长江的**上海、苏州、无锡、常州等地**和**浙江的宁波、杭州市**。这些地区是长江三角洲城市群的核心区，人口稠密、经济发达，极端强降水过程时有发生，易受到强降水灾害的影响。次高风险区和中等风险区主要以长江和钱塘江两岸的核心区边缘扩展带，安徽合肥、马鞍山等次一级的中心城市和浙江东部沿海强降水危险性较高的温岭和温州等地为主；而浙江西部、安徽南部地区风险等级相对较小。

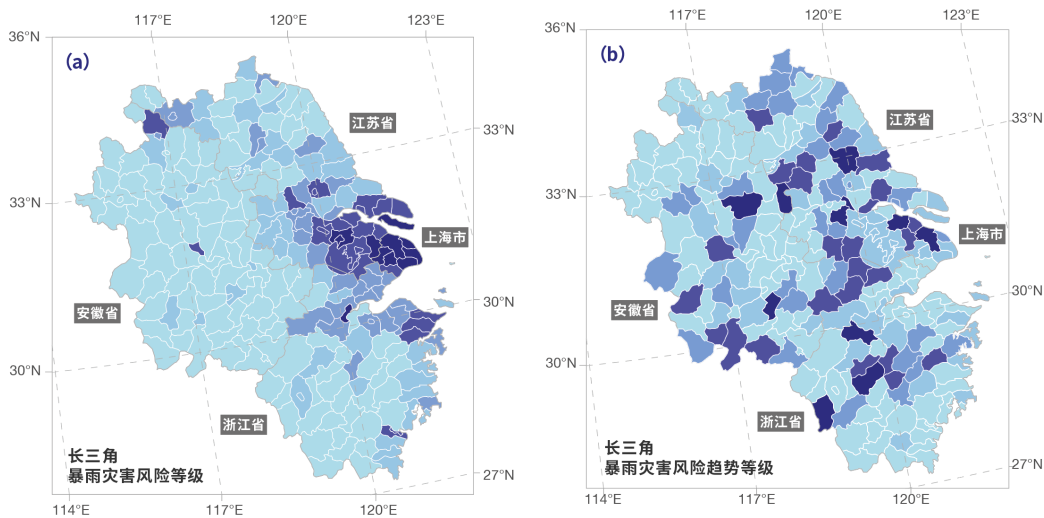


图3-12 长三角地区暴雨灾害风险等级(a)和线性变化趋势(b)空间分布

2000-2017年长三角地区暴雨灾害风险指数有明显的上升趋势，特别是在2009年以后，指数的上升趋势明显。从空间分布来看，长三角地区风险指数均呈上升趋势，特别是长江口两岸高风险区，风险指数仍然呈现较快的上升速度。

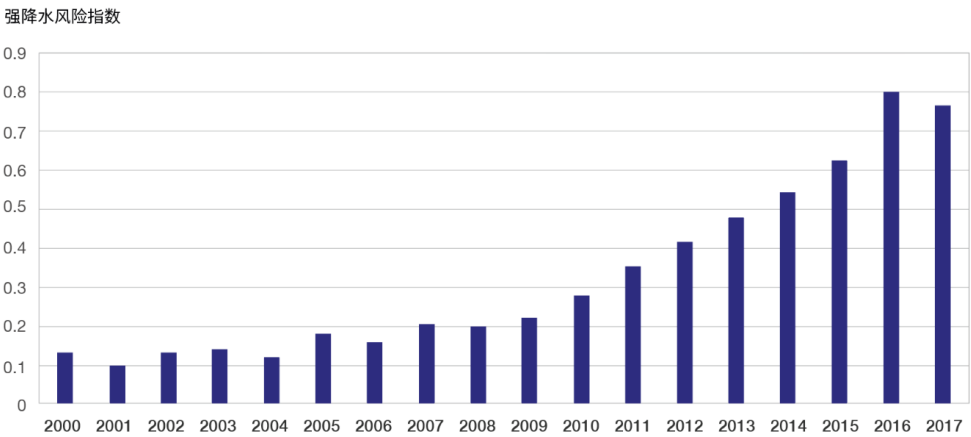


图3-13 长三角地区暴雨风险指数历年变化

3.3 广东省气候变化特征及高温、暴雨灾害风险

3.3.1 广东省1960-2019主要气候变化特征

1961年-2019年广东省平均气温、平均最高气温和极端最高气温均线性增加趋势，高温日数和高温过程发生频次及强度都明显增加或增强，尤其21世纪初以来高温过程多发特征显著。年降水量呈波动增加趋势，暴雨日数和暴雨过程发生频次年际变化较大，但都波动增加，尤其20世纪90年代以来暴雨发生频次明显增多。

● 广东省平均气温、平均最高气温和年极端最高气温均呈上升趋势

1961-2019年，广东省年平均气温为21.8℃，总体呈上升趋势，平均增温速率达到0.19℃/10年。1990年以来气温增加趋势更为明显，绝大多数年份气温都在平均值以上。年平均最高气温为26.3℃，与平均气温变化趋势一致，也呈线性增加趋势，增加速率为0.19℃/10年。2019年平均最高气温达到最大，为27.5℃。年极端最高气温上升速率为0.17℃/10年，历史极端最高气温为38.4℃，出现在2005年，其后依次为2004年（38.1℃）、2003年（38.1℃）、1990年（37.8℃）、2017年（37.8℃）。

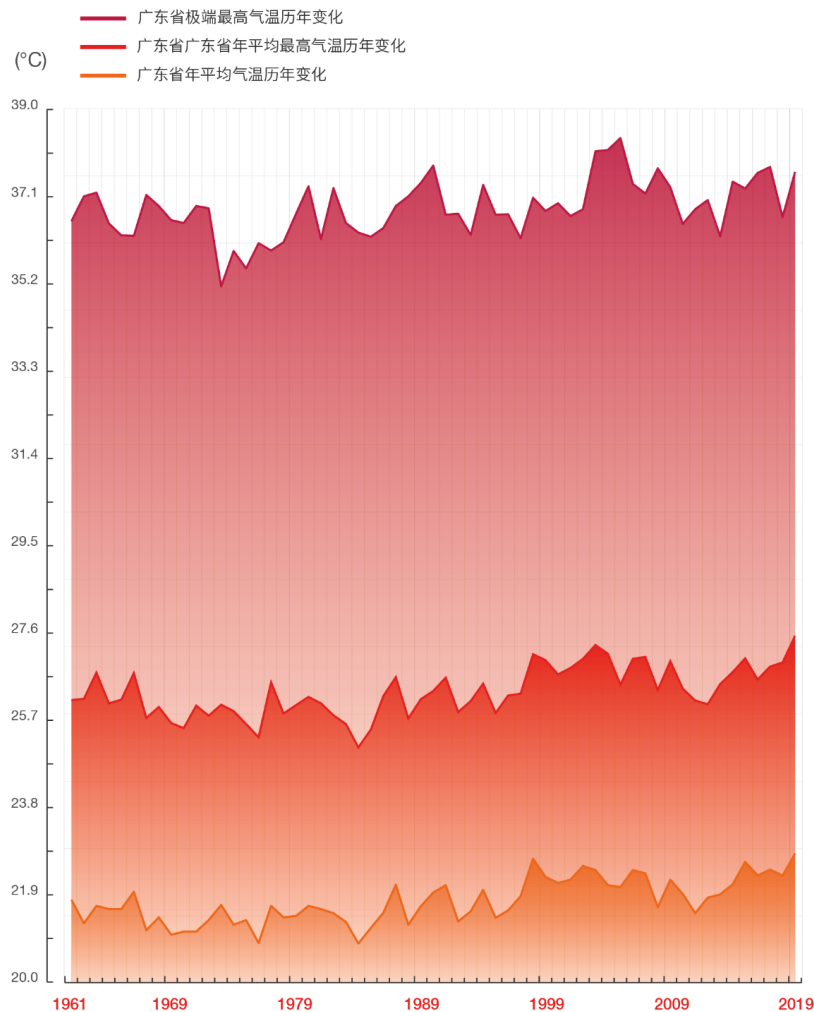


图3-14 广东省平均气温、平均最高温和极端最高温历年变化

• 广东省高温日数和高温热浪发生的频次和强度显著增加

近60年广东省35°C及以上高温日数平均为16.5天/年，并呈现明显的增加趋势，增加速率为0.3天/10年，1998年至今高温日数明显增多，平均23.7天/年。35°C及以上年高温日数高值年份分别为2014年（31.5天）、2019年（29.4天）、2016年（28.0天）、2003年（27.8天）、2009年（27.6天）。

38°C及以上高温日数平均为0.37天/年，并呈增加趋势。21世纪初之前高温日数整体偏少，之后明显增多。38°C及以上年高温日数高值年份分别为2003年（2.3天）、2004年（1.5天）、2005年（1.4天）、2008年（1.2天）。

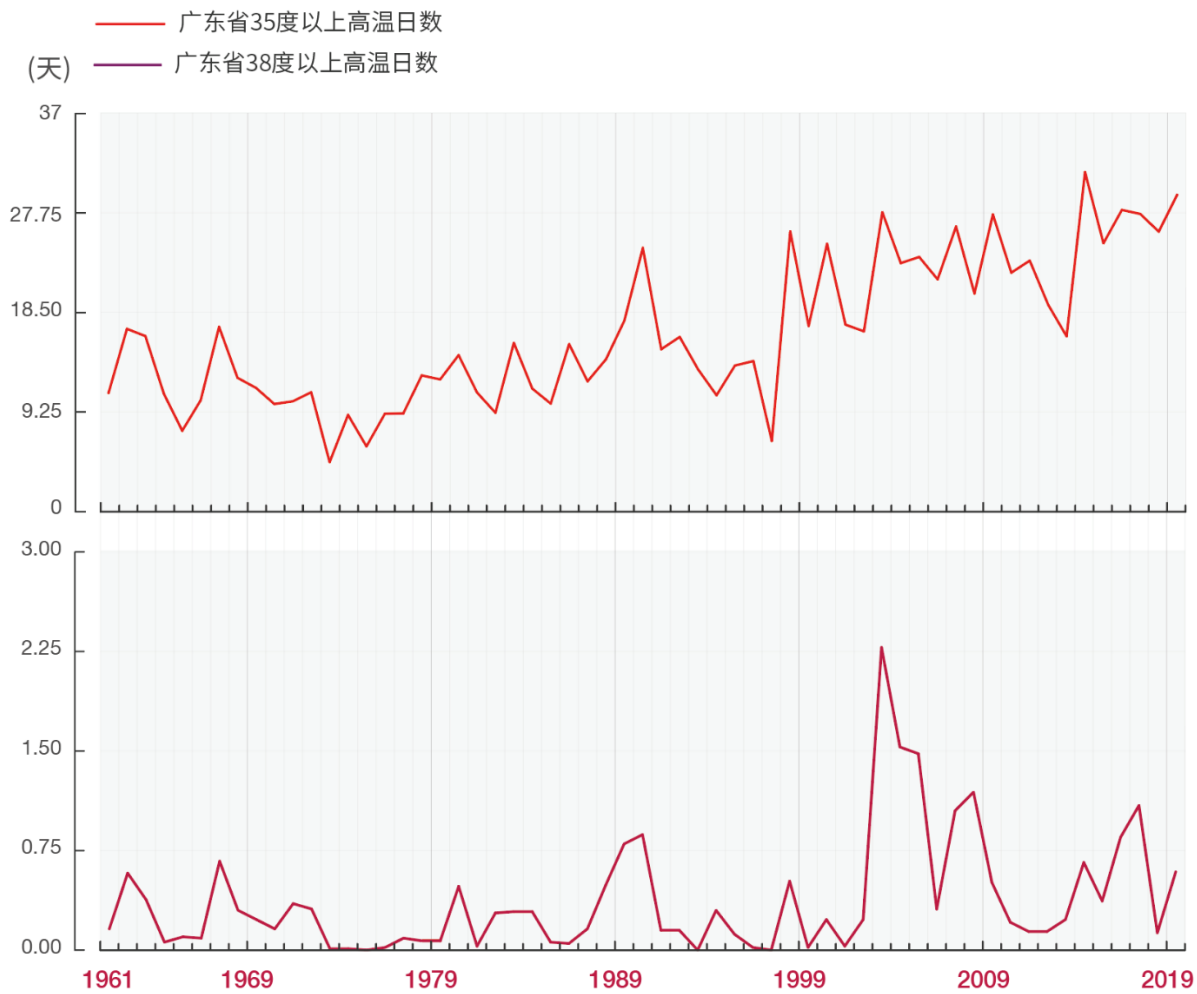


图3-15 广东省35°C及以上和38°C及以上高温日数历年变化

● 广州站高温热浪的频次和持续日数增加

以广州站作为代表站来看，近60年广州地区共出现高温热浪98次。高温热浪发生频次呈明显的上升趋势，尤其20世纪80年代末期以来高温热浪频发明显，1998年以来共发生高温热浪73次，占总发生频次的74%。高温热浪次数最多一年出现在2016年，共有6次。高温热浪平均持续时间也在增加。平均持续时间最长出现在1997年（8天），其后依次是：2007年（7.3天）、2005年（6天）、2003年（5.7天）。

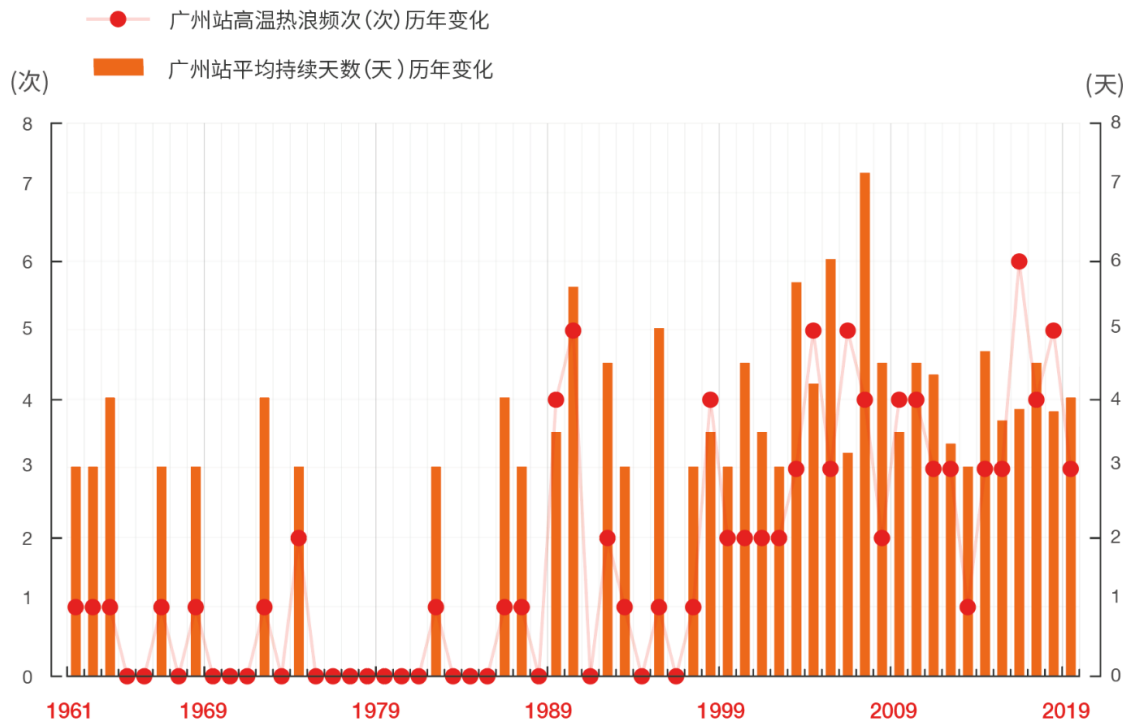


图3-16 广州站高温热浪频次和平均持续天数历年变化

● 暴雨日数和发生频次波动增加

1961-2019年，广东省年累积降水量平均为1774.1mm，呈线性增加趋势，增加速率为23.2mm/10年，20世纪60年代和80年代累积降水量较少，20世纪70年代和90年代以来累积降水量都较多。1973年累积降水量最多，为2278.7mm。近60年共出现暴雨日数434天，暴雨日数也呈现增加趋势，增加速率为0.2天/10年。暴雨日数的年际差异大，最多的年份达10.3天（2001年），其后依次为2008年和2013年（10天）、2016年（9.9）和1973年（9.7天）、2006年（9.6天），可以看到暴雨发生频次较多的年份基本都在21世纪初以来的阶段。

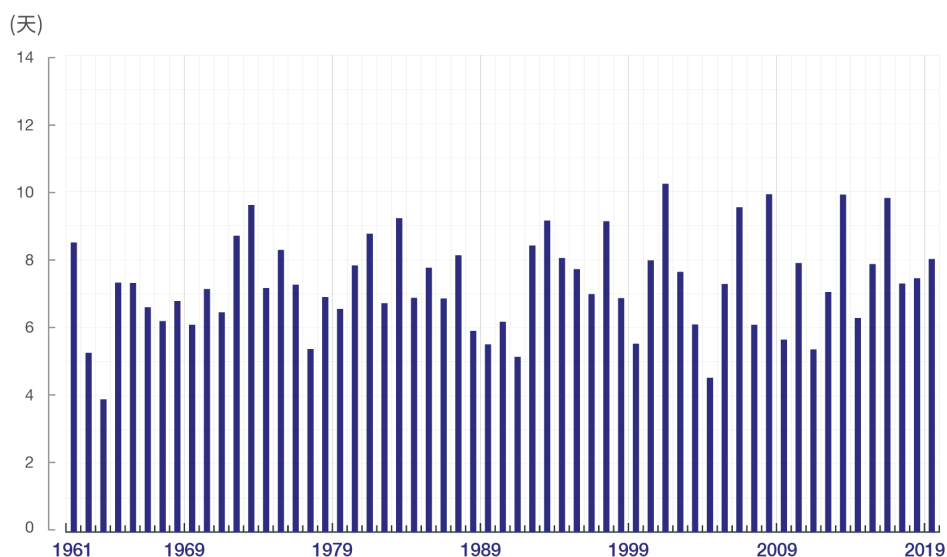


图3-17 广东省暴雨日数历年变化

以广州站作为代表站来看，近60年广州地区共出现暴雨过程403次，并表现出增加趋势，增加速率为0.44次/10年，尤其20世纪90年代以来暴雨频次明显增多。暴雨过程发生频次前5多的年份分别为1993年和2001年（13）、1975年和2019年（12次）、2016年（11次）。暴雨过程平均累积降水量也呈上升趋势，上升速率为0.97mm/10年。从各年代来看，1961-1979年累积降水量平均为84.2mm，1980-1999年为86.0mm，2000-2019年为87.6mm。累积降水量前5多的年份分别为1989年（146.3mm）、1961年（126.1mm）、1964年（125.9mm）和1999年（121.4mm）。

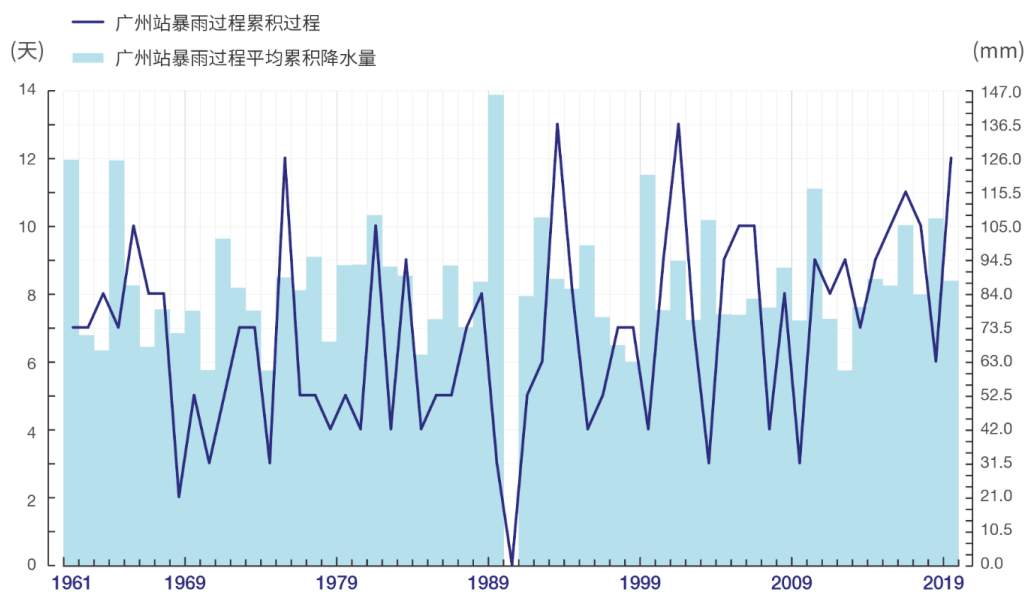


图3-18 广州站暴雨过程频次和暴雨过程平均累积降雨量历年变化

3.3.2 广东省2000-2017高温及暴雨灾害风险分析

• 广东省2000-2017高温灾害风险分析

2000年来，广东省高温灾害风险指数呈线性上升趋势，尤其是2014年以后风险性明显较高。从空间分布来看，高温灾害风险性位于广东省非沿海区，并以梅州市、河源市、韶关市等地方风险性最高。从高温灾害风险指数线性变化趋势分布来看，广东省高温灾害风险指数均呈上升趋势，上升最为明显的是湛江市、梅州市、肇庆市等地区。

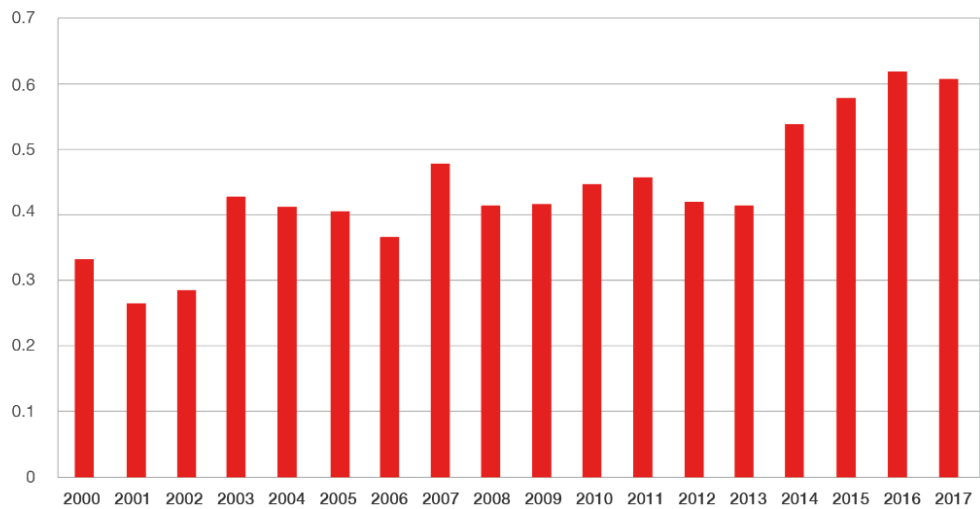


图3-19 广东省高温灾害风险指数历年变化

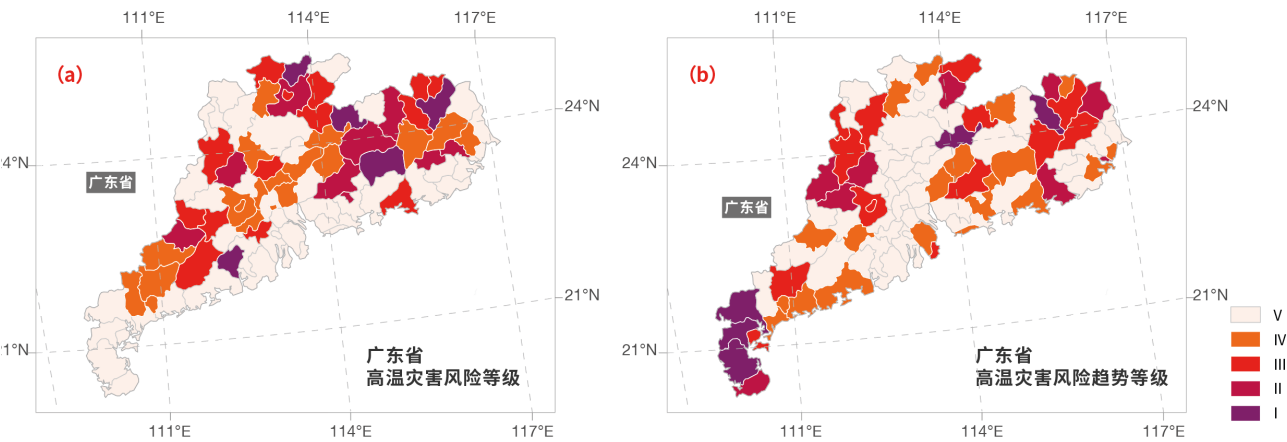


图3-20 广东省高温灾害风险等级(a)和线性变化趋势(b)空间分布

• 广东省2000-2017暴雨灾害风险分析

从广东省暴雨灾害风险综合区划图上可以看出，暴雨灾害风险有较为明显的南高北低特征。**高风险区主要分布在珠江口的广州、佛山、东莞、深圳，这一地区是珠江三角洲城市群的核心区，人口和经济密集，同时强降水危险度也较高，易受到暴雨灾害的影响。次高风险区和中等风险区分布在核心区向外的扩展带和南部沿海强降水危险性较高的汕尾、湛江等地为主；而广东的北部地区风险等级相对较小。**

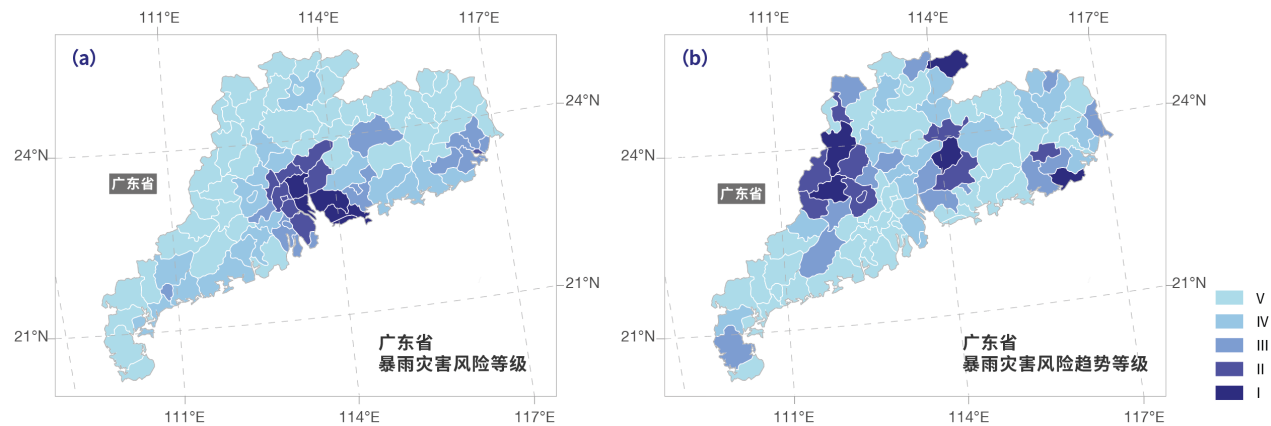


图3-21 广东省暴雨灾害风险等级(a)和线性变化趋势(b)空间分布

在2000-2010年，广东省暴雨灾害风险波动起伏，但整体变化不大，在2010年以后，风险指数迅速上升。从空间分布来看，中部地区的指数上升最为迅速，珠江口的核心地区、东南部沿海地区的暴雨灾害风险指数也有明显的上升。

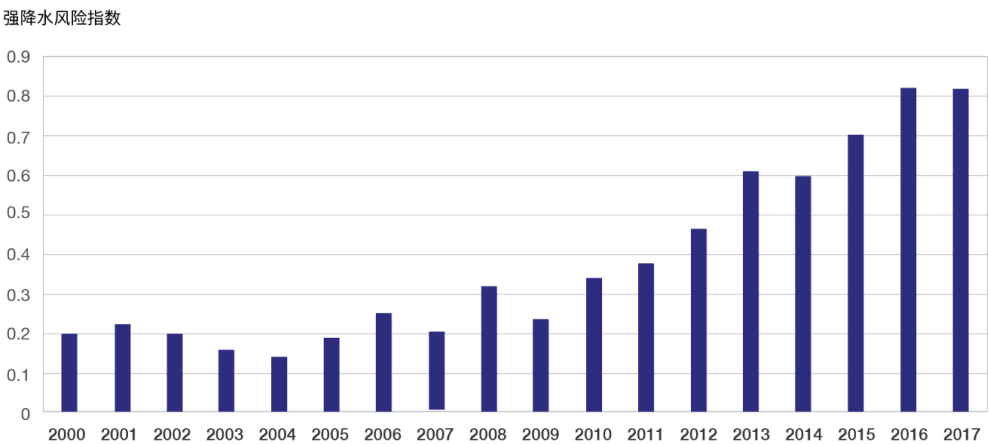


图3-22 广东省暴雨灾害风险指数历年变化

3.4 本章小结

- 1961-2019年，三个研究区域在气候变化的影响下，致灾因子（高温和暴雨）均呈现上升趋势，特别是20世纪90年代以来，上升趋势愈加显著。京津冀地区、长三角地区和广东省近60年来高温日数和高温热浪的频次及持续时间都有明显增加，特别是2000年以后增加速率超过历史平均水平。其中**京津冀地区的平均增温速率最高，达到0.32°C/10年**，长三角地区及高温日数增加速率最高，**达到1.3天/10年**。长三角地区和广东省的极端降水（暴雨日数和暴雨过程发生频次）年际变化较大，但都呈现出**波动上升的趋势**。
- 对三个研究区域的代表站（北京市、杭州市、广州市）高温过程及发生频次的分析显示，近60年来（1961-2019）这些城市区域的高温热浪发生频次和持续时间都在显著增加。特别是21世纪以来，高温热浪频发明显。2001年以来，杭州市经历的高温过程占过去近60年内总次数的41%，而广州市自1998年以来的高温热浪频次占总发生频次的74%。
- 三个研究区域中极端事件的风险指数分布存在较大的差异化，导致风险指数变化的原因多样，既有因致灾因子变化的原因，也有研究区域内脆弱性及暴露度指数变化的因素。但总体而言，**三个区域的气候变化风险指数均呈上升趋势**。京津冀地区高温灾害高风险区集中在北京、天津人口稠密的中心城区。长三角地区人口高度稠密的长江口附近城市群仍然是高温风险指数较高区域，但是江苏省北部，安徽省西部等区域风险指数升高趋势明显。广东省高温热浪高风险区位于**非沿海区**，以梅州市、河源市、韶关市等地方风险性最高。**长三角地区和广东省极端降水高风险区和两个区域内城市群核心区高度重叠，并且其风险指数仍在不断升高。**

4. 研究区域面临气候灾害变化趋势

4.1 选取模式、数据及计算方法

本报告选用意大利国际理论物理研究中心ICTP（The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics）所发展的区域气候模式RegCM4，嵌套CMIP5中4个全球气候模式，即欧洲中期天气预报中心的EC-EARTH、澳大利亚的CSIRO-Mk3-6-0、德国马普研究所的MPI-ESM-MR和英国哈德莱中心的HadGEM2-ES进行的RCP4.5排放情景下³⁹、水平分辨率为25 km的CORDEX-EA区域（区域气候降尺度协同试验-东亚区域）21世纪气候变化的模拟结果。

根据国际上通用的气温和降水相关极端气候指数的定义，对未来气候变化预估结果进行计算，得到了极端气候事件的未来变化。这里主要给出其中6个极端气候事件指数的模拟和预估结果，包括3个与气温相关的极端气候事件指数（日最高气温最高值、日最低气温最低值、夏季日数）和3个与降水相关的极端气候事件指数（连续干旱日数、大雨日数、强降水量）（具体定义见表4-1）。

表4-1 极端气候事件指数定义

指数	定义	单位
日最高气温最高值（TXx）	每年日最高气温的最大值	℃
日最低气温最低值（TNn）	每年日最低气温的最小值	℃
夏季日数（SU）	每年日最高气温大于25℃的全部天数	d
连续干旱日数（CDD）	每年最长连续无降水日数	d
大雨日数（R20mm）	每年日降水量大于等于20mm/d的天数	d
强降水量（R95p）	每年大于基准期内95%分位点的日降水量的综合	mm

³⁹ RCP是一系列综合的全球温室气体排放情景，用作21世纪人类活动影响下气候变化预测模型的输入参数，以描述未来人口、社会经济、科学技术、能源消耗和土地利用等方面发生变化时，温室气体、反应性气体、气溶胶的排放量，以及大气成分的浓度。RCP4.5是一种政府干预下的中等稳定化情景，代表辐射强迫在2100年后稳定在4.5W/m²左右，与二氧化碳浓度达到650 ppm相似。相对于1850-1900年，在RCP4.5情景下到2100年全球升温多半可能超过2℃。IPCC. (2018). 气候变化2014 综合报告 决策者摘要. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM_zh.pdf

4.2 京津冀地区未来气候变化预估

21世纪末期，相对于1986~2005年，京津冀地区年平均气温呈一致升高趋势，且升温值大都在2.2~2.4℃之间（图4-1a）。具体到四个季节来看，京津冀地区四个季节平均气温都将升高，其中夏季气温升高较为明显，升温值基本在2.5℃以上，春季升温相对较小，数值大都在1.8~2.1℃之间；冬季升温趋势分布和春季相反，表现为由东南向西北逐渐增加，冬季升温值升温梯度变化也较大，在2.0~2.7℃之间。

未来年平均降水以变化不大为主，大部分地区变化值在±5%之间，其中河北南部增加相对明显，增加值一般在5~10%之间（图4-1b）。具体到四个季节来看，秋、冬季降水以增加为主，增加最大值分别在15%和30%以上，夏季降水减少较为显著，减少值一般在-15%~-5%之间（图略）。从空间分布上来看，春季降水增加的大值区位于河北南部地区；夏季降水除河北南部部分地区外，其他地区基本都是减少的，其中北京北部至河北北部一带降水减少较为明显；冬季降水在整个区域都将增加，最大增加值在30%以上；秋季降水的变化除河北南部为微弱减少外，其他大部分地区都将增加，最大增加值在15%以上。

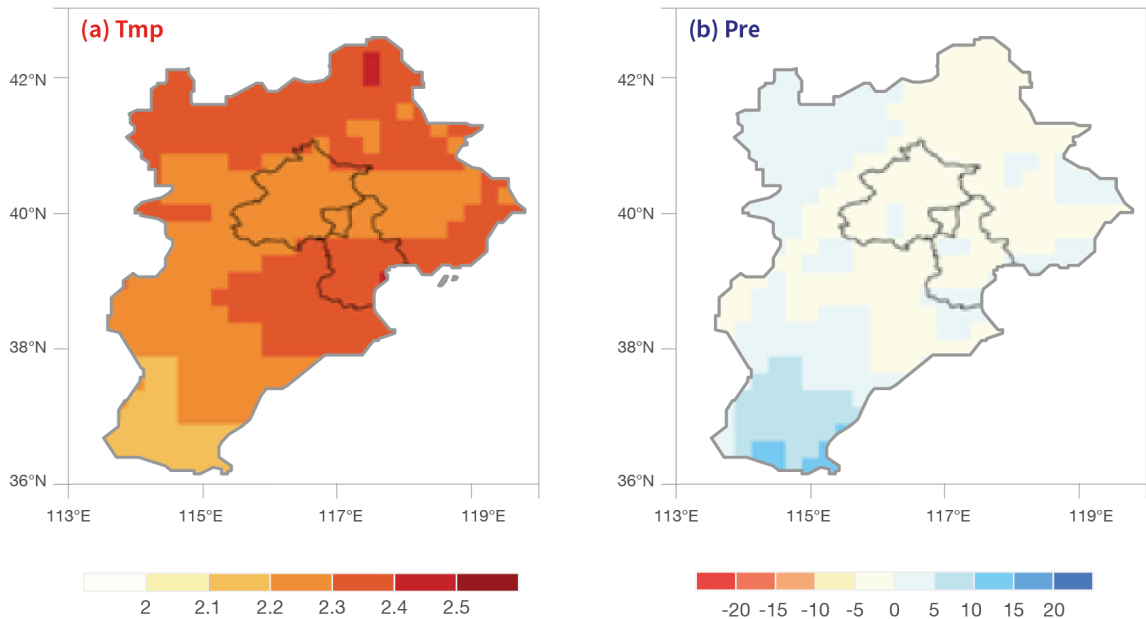


图4-1 21世纪末期京津冀地区年平均气温（a, °C）和降水（b, %）的变化

21世纪末期与气温有关的3个极端气候事件指数的变化结果显示，日最高气温最高值（TXx）、日最低气温最低值（TNn）在整个区域都表现为升高，且日最低气温最低值（TNn）的升温较日最高气温最高值（TXx）更为显著；夏季日数（SU）将增加（图4-2）。具体到空间分布来看，日最高气温最高值（TXx）的升温除在区域北部略低于2.6℃以下外，其他区域升温值大都在2.6℃以上；日最低气温最低值（TNn）在整个区域升温值基本都在 2.9℃以上，且区域北部、中部和东部是升温的大值区，最大升温值在4.1℃以上；结合京津冀区域地

形分布来看，SU的增加基本为山区增加幅度大，平原地区增加幅度小，数值由平原地区的24天以下增加到北部山区的28天以上。

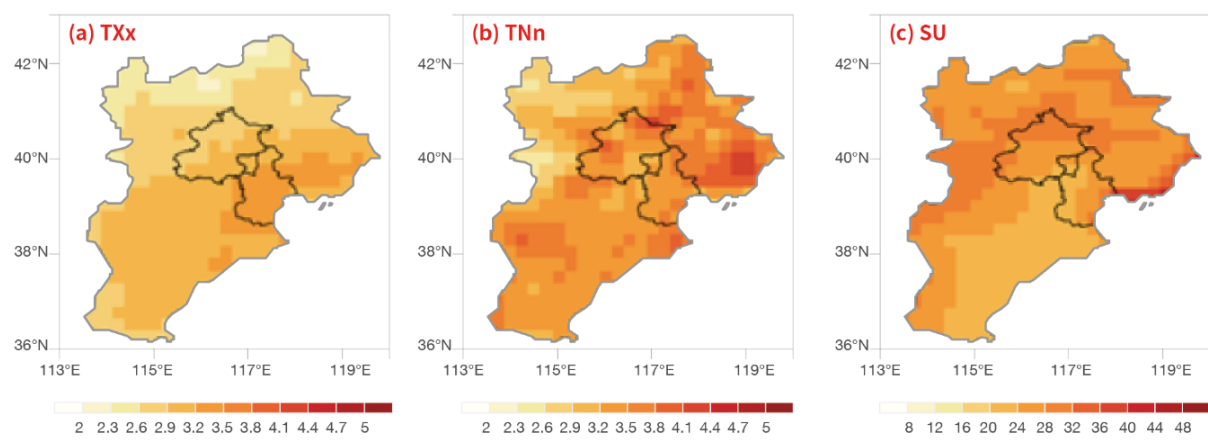


图4-2 21世纪末期京津冀地区TXx (a, °C)、TNn (b, °C)、SU (c, 天) 的变化 (相对于1986-2005年)

21世纪末期与降水有关的3个极端气候事件指数的变化结果表明，总体来看，CDD以减少为主，R20mm变化不大，R95p则主要以增加为主（图3）。具体到空间分布来看，CDD除区域北部部分地区表现为增加外，其他大部分地区都将减少，减少值一般在0~5天之间；R20mm在整个京津冀区域变化幅度较小，大部分地区增加和减少值均不超过2天；R95p的变化分布与CDD基本是相反的，其中区域南部是增加的大值区，最大增加值在25%以上。

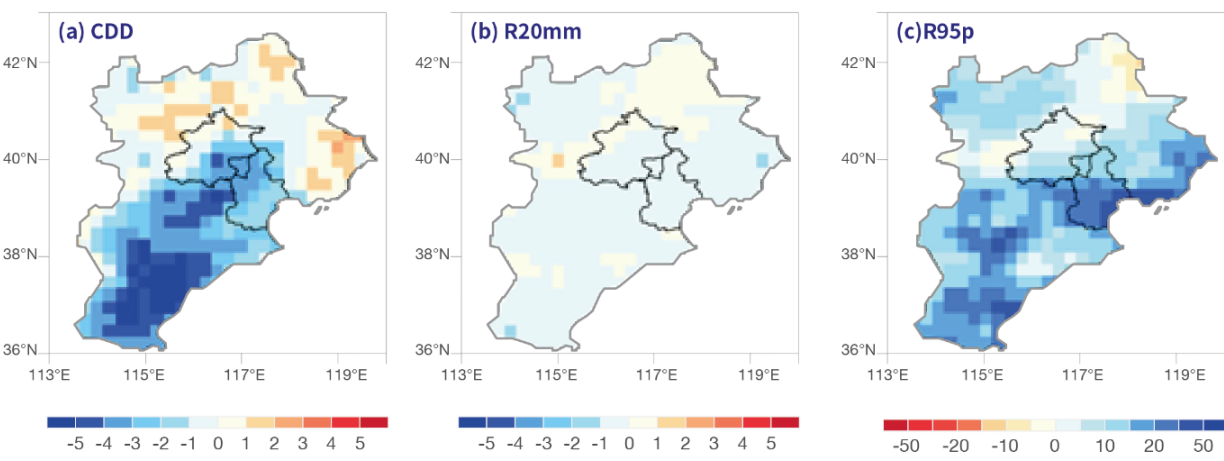


图4-3 21世纪末期京津冀地区CDD (a, 天)、R20mm (b, 天) 和R95p (c, %) 的变化 (相对于1986-2005年)

4.3 长三角地区未来气候变化预估

21世纪末期长三角地区年平均气温呈一致升高趋势，且升温值大都在2.0~2.2℃之间（图4-4a）。具体到四个季节来看，长三角地区四个季节平均气温都将升高，其中夏季气温升高较为明显，升温值基本在2.1℃以上，春、秋季升温相对较小，数值大都在1.9~2.1℃之间；冬季升温趋势与春季分布相反，表现为由西北向东南逐渐增加，升温大值区位于区域南部，数值一般在2.2℃以上。

21世纪末期，长三角地区年平均降水以增加为主，大部分地区变化值在5%以上，其中区域北部是增加的大值区，增加值一般在10~15%之间（图4-4b）。四个季节平均降水也以增加为主，其中冬季降水增加较为显著，增加值一般在10%以上，区域北部和东南部部分地区增加值在20%以上，夏、秋季降水增加值较小，数值一般在10%以内；春季降水增加的大值区位于区域西北部地区，最大增加值在20%以上。

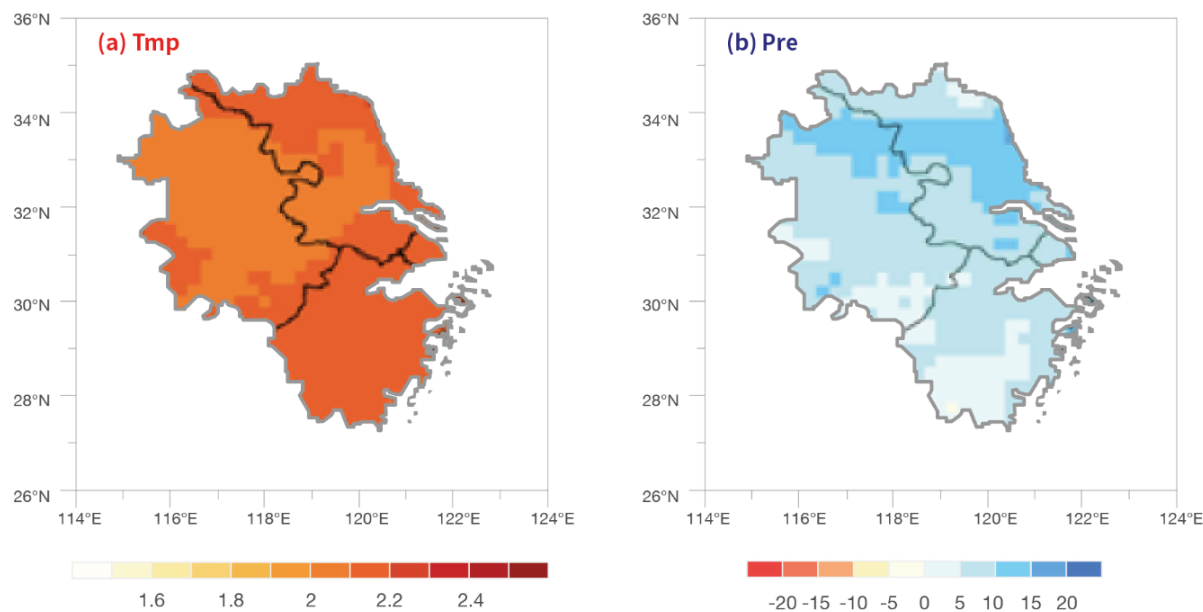


图4-4 21世纪末期长三角地区年平均气温（a, °C）和降水（b, %）的变化

21世纪末期与气温有关的3个极端气候事件指数的变化结果显示，日最高气温最高值（TXx）、日最低气温最低值（TNn）在整个区域都表现为升高，夏季日数（SU）将增加（图4-5）。具体到空间分布来看，日最高气温最高值（TXx）的升温除在区域南部略低于2.3℃以下外，其他区域升温值大都在2.3~2.9℃之间；与日最高气温最高值（TXx）的变化分布不同，日最高气温最高值（TXx）在区域东南部升温值相对较低，在2.6℃以下，安徽中部部分地区升温最为显著，最大升温值在3.5℃以上；夏季日数（SU）的增加在整个区域内差异不大，变化值大都在24~28天之间，东南沿海为增加的大值区，增加值一般在28天以上。

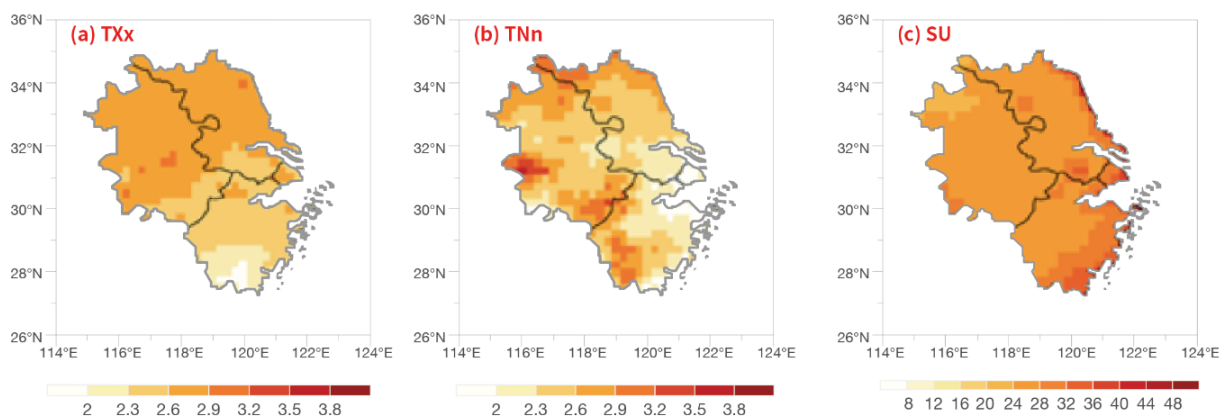


图4-5 21世纪末期长三角地区TXx (a, °C)、TNn (b, °C)、SU (c, 天) 的变化 (相对于1986-2005年)

21世纪末期与降水有关的3个极端气候事件指数的变化结果表明, 总体来看, 连续干旱日数CDD以减少为主, 大雨日数R20mm变化不大, 强降雨量R95p则主要是增加的 (图4-6)。具体到空间分布来看, 连续干旱日数CDD除区域西北部部分地区表现为增加外, 其他大部分地区都将减少, 减少值一般在0~4天之间; 大雨日数R20mm在整个长三角地区变化幅度较小, 大部分地区增加和减少值均不超过2天; 强降雨量R95p在大部分地区增加值都在10%以上, 区域中部是增加的大值区, 最大增加值在25%以上。

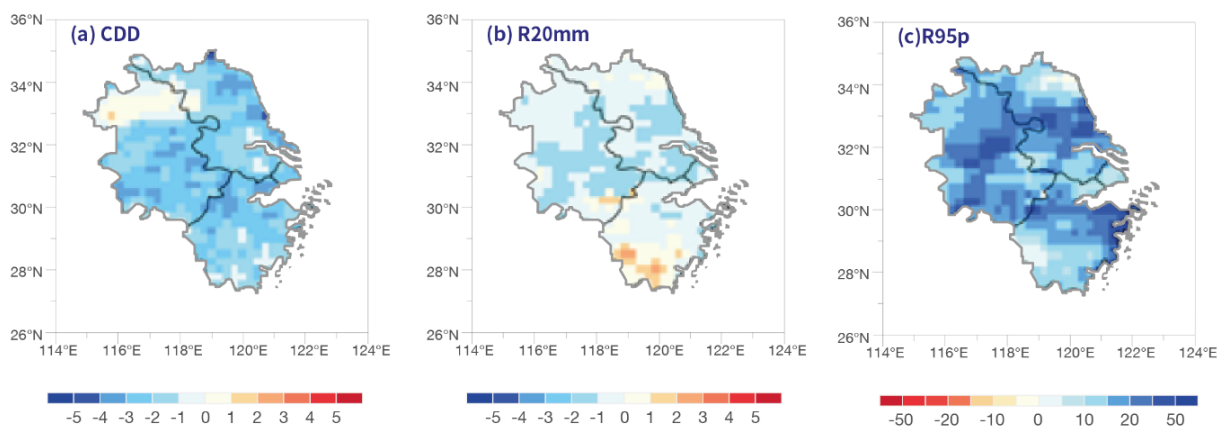


图4-6 21世纪末期长三角地区CDD (a, 天)、R20mm (b, 天) 和R95p (c, %) 的变化 (相对于1986-2005年)

4.4 广东省未来气候变化预估

在全球变暖背景下，21世纪末期整个广东省气温都将升高，升温值基本都在1.9~2.0℃之间（图4-7a）。具体到四个季节来看，广东省四个季节平均气温都将升高，其中冬季气温升高最为明显，升温值除南部沿海部分地区外基本在2.0℃以上，春、秋季升温相对较小，数值大都在1.8~2.0℃之间；夏季升温值大都在1.9~2.1℃之间，中部是升温的大值区。

广东省未来年平均降水以增加为主，但增加值较小，大部分地区变化值在0~10%之间（图4-7b）。具体到四个季节来看，春、冬季降水将增加，增加最大值分别在15%和30%以上；秋季降水减少较为明显，减少值一般在-15%~-5%之间；夏季降水在东北部增加，西南部减少，但增加和减少值相对较小，基本都在±10%以内（图略）。从空间分布上来看，春、冬季降水增加的大值区位于区域西北至东南一带；夏季降水减少区域集中在区域西南部；秋季降水除东南沿海部分区域为增加外，其他大部分地区都是减少的。

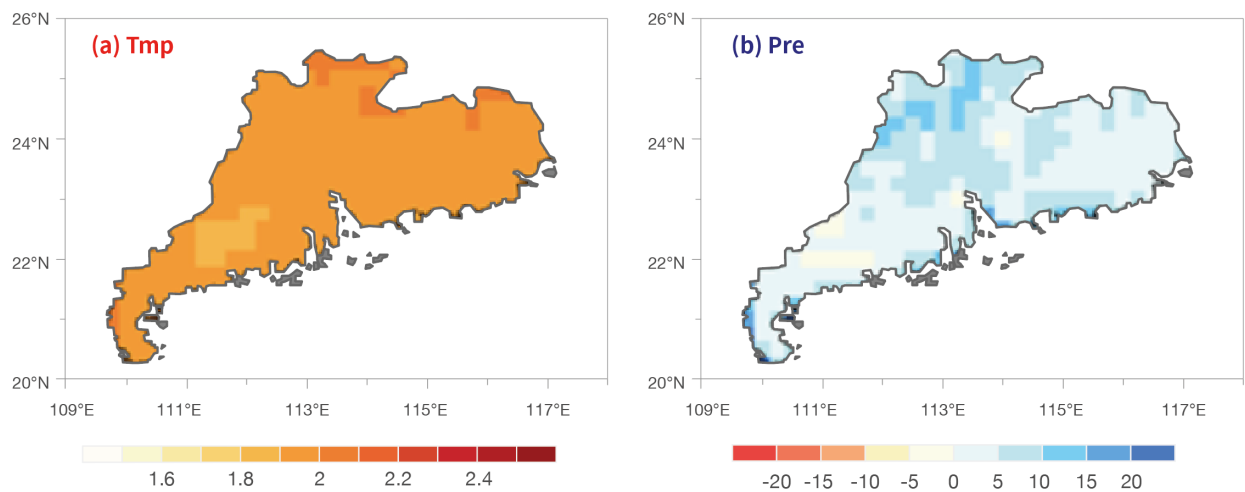


图4-7 21世纪末期广东省年平均气温（a, °C）和降水（b, %）的变化

选取日最高气温最高值（TXx）、日最低气温最低值（TNn）和夏季日数（SU）三个与气温有关的极端事件指数，对21世纪末期广东省的分析结果表明，未来整个区域日最高气温最高值（TXx）、日最低气温最低值（TNn）将升高，夏季日数（SU）将增多。具体来看，日最高气温最高值（TXx）的升温值大都在2.1~2.7℃之间；TNn的升温值大都在1.5~2.1℃之间，较TXx要低；SU的增加值大都在20天以上，东南沿海为增加的大值区，最大值在40天以上（图4-8）。

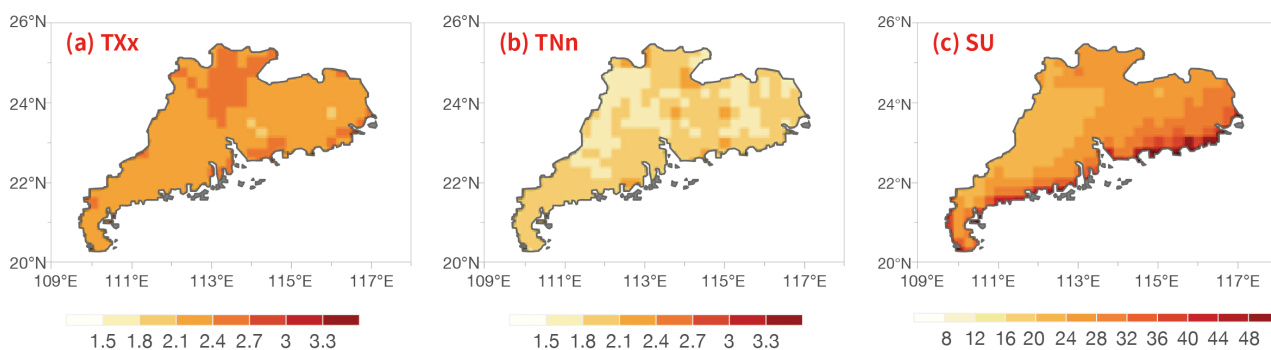


图4-8 21世纪末期广东省TXx (a, °C)、TNn (b, °C)、SU (c, 天) 的变化 (相对于1986-2005年)

选取CDD、R20mm和R95p三个与降水有关的极端事件指数，对21世纪末期广东省的变化情况进行了分析，结果表明，总体来看，连续干旱日数CDD、大雨日数R20mm以减少为主，R95p以增加为主（图4-9）。具体来看，CDD在区域西北部的部分地区增加值在1~3天之间，其他大部分地区或变化不大或为减少，最大减少值位于东南沿海，数值在4天以上；R20mm的空间分布与CDD类似，除西北部分地区外，其他大部分地区都是减少的，减少值一般在3天以内；R95p分布与CDD和R20mm表现不同，其在东部大部分地区为增加的，西南部大部分地区为减少的，最大增加值在25%以上，最大减少值在-10%以上。

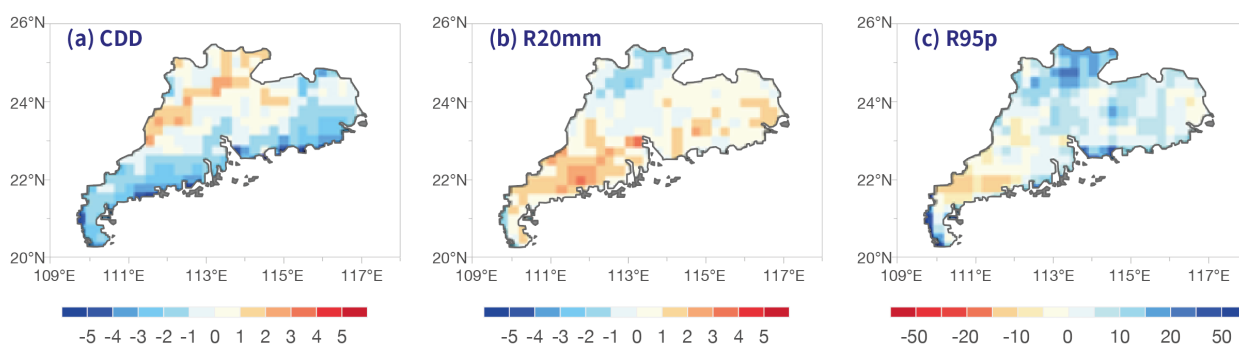


图4-9 21世纪末期广东省CDD (a, 天)、R20mm (b, 天)和R95p (c, %) 的变化 (相对于1986-2005年)

4.5 本章小结

- 在RCP4.5情境下，三个研究区域到本世纪末平均气温呈一致升高趋势，其中京津冀地区平均升温速率最高将达到**2.2-2.4°C**；长三角地区次之达到2.0-2.2°C，最后是广东省达到1.9-2.0°C。
- 三个地区的日最高气温最高值和日最低气温最低值都有显著升高，夏季日数显著增加。特别是京津冀地区日最高气温最高值的升高更为显著。京津冀地区日最高气温最高值升温在**2.6°C左右**，将成为威胁京津冀地区脆弱人群健康的“隐秘杀手”。三个研究区域的夏季日数增加都将达到20天以上，广东省东南沿海的夏季日数将可能增加40天以上。
- 极端强降水可能成为影响三个区域城市安全的重要气象灾害，到21世纪末每年大于基准期内的95%分位点的降水在京津冀地区，长三角地区和广东省部分地区都有显著增加。增加范围在10%-25%以上。

5. 以系统性思维重塑城市发展

5.1 气候变化的系统性风险

对中国主要城市群的气候变化风险分析，显示出全球气候变化和城市化已经在城市区域造成了显著的灾害影响。在过去的几十年里，中国城市群所在区域的气候已经发生显而易见的变化，高温热浪和极端强降水的发生频次和强度都在显著上升。而对本世纪末城市区域气候灾害趋势预测，进一步揭示出未来城市区域将面临更为严峻的安全挑战。

中-英气候变化风险评估工作组提出，气候变化的系统性风险最具有不确定性，甚至可能产生严重社会系统崩溃，即某一直接风险可能会造成经济、社会、文化、生态系统和政治层面的级联效应，进而导致风险的不不断放大，也就是气候变化的系统性风险的形成⁴⁰。

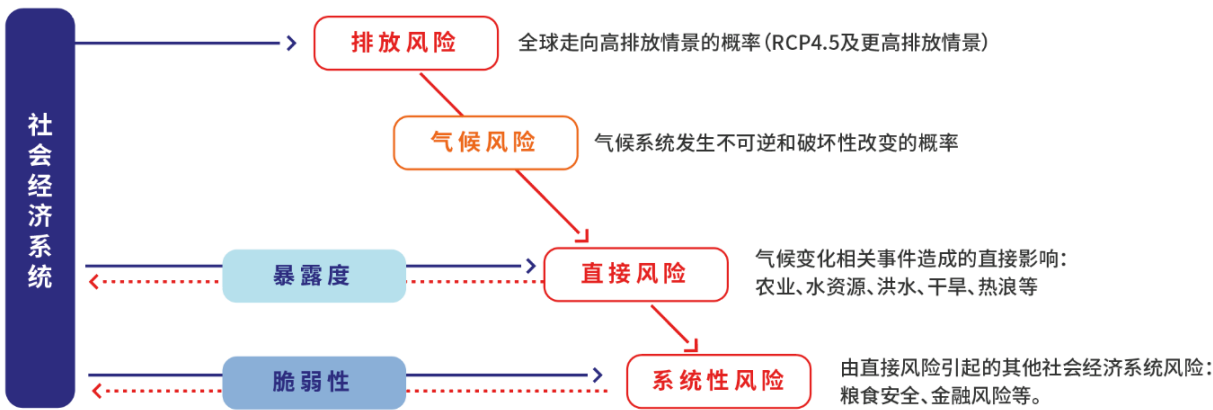


图5-1 气候变化的系统性风险概念框架（根据UK-China Co-operation on Climate Change Risk Assessment⁴¹报告绘制）

对系统性风险的认识和评估在城市区域尤为关键。城市是一个开放的，复杂的，并处在不断变革和进化中的系统。气候变化对城市的风险指数不仅取决于城市区域内的气候脆弱性和暴露度，也与城市所处的外部社会经济结构密切相关。这意味着城市在多个维度上和气候变化发生交互作用。在城市中，气候变化可能产生复合的、系统性的风险冲击。

40、41 Committee on Climate Change and China Expert Panel on Climate Change. (2018.10). UK-China Co-operation on Climate Change Risk Assessment: Developing Indicators of Climate Risk.

2020年爆发的全球新冠疫情与高温热浪等极端事件的叠加，正是气候变化系统性风险的典型例证。2020年5月，来自世界卫生组织、世界气象组织、美国国家海洋与大气管理局等机构共同支持的全球高温健康信息平台（Global Heat Health Information Network）呼吁全球应尽快行动，应对破纪录的高温热浪与新冠疫情叠加导致的更为严峻的健康危机⁴²。高温热浪让长期佩戴口罩和居家隔离措施变得更为艰难，可能导致本就有基础疾病的老年人群，不具备良好通风和纳凉条件的贫困人群，重体力劳动的户外工作者等群体暴露在病毒风险中。并且，高温热浪导致的中暑和心脑血管疾病显著增加⁴³，让本就负担累累的医疗系统更雪上加霜。

IPCC的1.5°C特别报告为全球城市政策制定者提供的决策者摘要中指出，城市的复杂结构，叠加气候变化带来的系统性风险，使得原先相互割裂，仅仅聚焦于某一特定问题研究方法或应对策略已不再适用⁴⁴。

5.2 风险管理应盯紧“木桶短板”

在系统性风险的框架下，暴露度和脆弱性是导致级联风险效应的关键因素。暴露度和脆弱性不仅与气候灾害有关，更与社会经济系统的风险预警能力，政策及市场体系，应对措施等密切相关。⁴⁵在这样一个相互关联的系统中，“木桶短板”效应变得尤为突出，即系统中最弱的环节，成为系统安全的决定性因素。在经济和基础设施密切链接，人口流动密切的城市集群中，脆弱性最大的区域、部门、群体、设施，即成为了系统性危机中，对不确定性贡献最大的方面。

对中国主要城市集群的气候变化风险分析揭示了，风险不仅集中在经济社会高度发达的一线和二线城市，中小城市、小城镇区域的气候变化风险也在快速上升。特别是长三角地区和广东省非核心城市群的区域，如江苏省北部、安徽省西部和惠州、梅州等非沿海地区的气候风险上升速度正不断加快。

一线和二线城市中的发达区域往往是气候变化相关政策关注的焦点。这些城市经济发展速度较快，城市基础设施建设和公共服务供给充足，使得其有充分的能力和资金协调各方资源，加速推进城市气候治理工作。然而，对于三、四、五线城市，以及核心城区周边的小城镇而言，面临这样的问题：本已匮乏的财政资金，相对落后的基础设施建设，由于人口流动导致的老龄人口等脆弱人群比重上升——这都将导致这些区域脆弱性增加，成为气候变化影响的高风险区，和风险管理工作的难点，进而成为引发系统性危机的“木桶短板”。

42 WMO. (2020). Global partnership urges stronger preparation for hot weather during COVID-19. <https://public.wmo.int/en/media/news/global-partnership-urges-stronger-preparation-hot-weather-during-covid-19>

43 Cai, W., Zhang, C., Suen, H. P., Ai, S., Bai, Y., Bao, J., ... & Gong, P. (2021). The 2020 China report of the Lancet Countdown on health and climate change. *The Lancet Public Health*, 6(1), e64-e81.

44 Bazaz, A., Bertoldi, P., Buckeridge, M., Cartwright, A., de Coninck, H., Engelbrecht, F., Jacob, D., Hourcade, J.-C., Klaus, I., de Klein, K., Lwasa, S., Markgraf, C., Newman, P., Revi, A., Rogelj, J., Schultz, S., Shindell, D., Singh, C., Solecki, W., ... Waisman, H. (2018). Summary for urban policymakers: What the IPCC Special Report on global warming of 1.5°C means for cities. IHHS Indian Institute for Human Settlements, Bengaluru, India. <https://doi.org/10.24943/SCPM.2018>

45 Committee on Climate Change and China Expert Panel on Climate Change. (2018.10). UK-China Co-operation on Climate Change Risk Assessment: Developing Indicators of Climate Risk.

5.3 以系统性变革思维重塑城市发展

2019年延续至今的新冠疫情，让全球重新认识了系统性风险的挑战。像新冠疫情和气候变化这样的系统性风险已经成为影响社会经济发展和人类安全的严峻威胁⁴⁶。气候变化系统性风险发生的根本原因是外界冲击（类似新冠疫情和 气候变化这样的物理冲击（Physical Shock））与社会长期以来存在的结构性失衡——脆弱人群的保障措施缺失，收入差异悬殊，预警与应对能力发展不均，公共服务供给不足，社会治理能力欠缺等问题，相互耦合⁴⁷。正因如此，重塑城市发展不仅在于增强城市系统对特定风险的管理能力，更需要系统性的变革，整合应对气候风险，解决结构性积弊，推进经济繁荣，保障社会福祉等多项议程的协同发展。

大量对变革理论（Transformation Science）的研究^{48 49}，为城市应对气候变化工作指出了新的目标及路径。系统性变革发生的第一层级是政策设计，实施机制和资源分配的变化，也是最直接推动变革发生的条件。与此同时，将之前看似不相干的领域间建立联系，形成新的跨领域思维，并推动社会结构的调整，能够推动更广维度的变化发生。而最重要，也是深层次的变革来自于认知改变，也是推动以上一系列变化发生的根本动力。

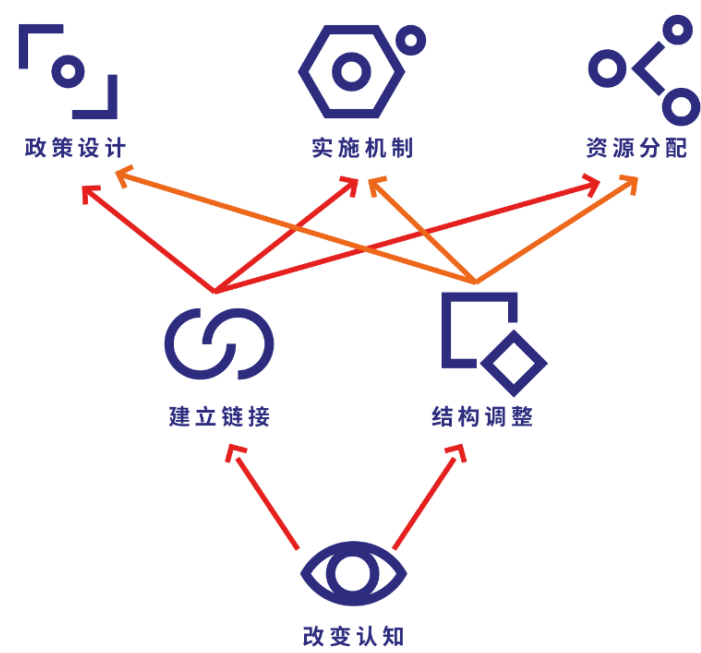


图 5-2 系统性变革发生的6个条件（根据Moser et al. 2019 绘制）⁵⁰

46 王珏, 刘君言, & 袁媛. (2021.1). 当“紧急”成为新常态——新冠疫情给气候风险的警示和启示. 世界环境.

47 McKinsey. (2020). Addressing climate change in a post-pandemic world. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/addressing-climate-change-in-a-post-pandemic-world>

48 Shi, L., & Moser, S. (2021). Transformative climate adaptation in the United States: Trends and prospects. *Science*.

49 Chu, E., Brown, A., Michael, K., Du, J., Lwasa, S., & Mahendra, A. (2019). Unlocking the potential for transformative climate adaptation in cities. Background Paper prepared for the Global Commission on Adaptation, World Resources Institute, Washington, DC and Rotterdam.

50 Moser, S.C., Aldunce, P., Rudnick, A., Rojas, M. & Muñoz, L. (2019). Transformation from Science to decision-making. Policy Brief to COP25. <https://t2research.org/wp-content/uploads/2019/12/Moser-S.-et-al-2019-Policy-brief-Transformation.pdf>

对应到中国城市区域的多重风险挑战，中国的城市政策制定者和管理者可以率先从以下领域，着手推动系统性改变的发生。

（1）整合各部门数据，推进跨学科跨领域研究，构建系统性风险评估框架，打通科学与政策接口。

气候变化的系统性风险特征，以及气候影响与城市区域多个部门和领域的交叉互动，意味着跨领域、跨学科、综合性的研究分析成为制定有效应对方案的科学保障。其中整合各部门数据是实现系统分析气候变化风险的首要任务。城市各部门数据接口不一致，数据颗粒度差异，以及数据获取壁垒都成为了跨学科研究的障碍。目前已有城市启动了城市大数据平台，整合多部门数据，形成集成分析能力，为有效分析城市气候风险，识别和建立系统分析框架奠定基础。

在科学和系统分析及研究的基础上，城市气候变化科学研究应当充分考虑科学——政策接口，面向政策制定者、管理者以及各利益相关方，让科学研究为政策制定和实施机制设计提供更有力的支撑。

（2）加强国家层面政策框架的灵活性和指导性，加速推进气候风险评估和适应的本地化进程

2013年，中国印发了首份《国家适应气候变化战略》⁵¹。这份文件首次从国家层面对气候变化适应工作提出指导意见。然而这样大而全的纲领性文件，落实到地方层面，必然受到地方部门的自身意识、应对能力、财政状况、当前工作重点等一系列因素的影响，从顶层设计到本地化工作推进差异较大。气候变化在各个区域的影响，以及不同区域暴露度和脆弱性的差异，意味着需要加快开展因时因地的气候风险评估，并制定本土化，针对性的应对策略。

如何将国家层面政策框架进一步细化灵活化，为地方政策制定行动方向和政策重点提供策略指导的同时，推进气候变化风险评估和应对工作因地制宜，分类分区的开展可以成为正在编制中的《国家适应气候变化战略2035》进一步改善的要点。

（3）加强城市气候变化减缓和适应工作协同，统筹各部门工作条线，完善治理机制

目前，城市减缓与适应被割裂在不同的管理框架体系和政策条线下，气候变化应对的各项工作被分配到不同的部门执行。然而，气候变化应对各相关部门工作机制及条线整合度、协调度差异较大。面对气候变化变化的系统性风险，相互割裂的政策体系将难以形成合力，甚至导致事倍功半。

在城市区域，气候变化减缓和适应工作的协同尤为重要。一方面，减缓是解决气候变化问题的根本路径。碳达峰和碳中和目标的提出进一步明确了减缓工作的重要性。另一方面，气候变化的灾害性后果已经发生，在当前

⁵¹ 中国政府网. (2013). 关于印发国家适应气候变化战略的通知. http://www.gov.cn/jzwgk/2013-12/09/content_2544880.htm

和未来的一段时间内，气候变化风险进一步增大，已经对城市安全和可持续发展造成显著影响，造成的经济财产和生命损失将威胁减缓工作的加速推进。加强城市气候变化减缓和适应工作的协同，有效统筹各部门工作条线，完善风险管理机制是保障城市发展多元目标实现的关键。

(4) 提升认知，凝聚共识，建立开放、多元、包容的合作机制

气候变化风险应对不仅需要科学技术创新发展和政策机制的有力推进，更需要社会的各利益相关方凝聚共识，通力合作。个人，企业，社会组织，政府各部门应当破除“筒仓”（silo）思维，摆脱孤岛行动，通过不同实体合作，推动务实的气候变化应对行动开展。

面向社区、企业、公众进行气候变化风险的普及教育，应灾防灾的社会动员，减排实践的有效推广，是建立有效合作机制的基础。我们能够看到，在本报告所涉及的三大城市群中，有极大的潜力去做广泛的合作动员，并且有些城市、社区、企业，已经率先开启了类似的工作，这样的积极案例也应该被传播、被鼓励。在可见的未来，应对气候变化风险的工作推进，依赖于城市各利益相关方的共识形成。建立开放、多元、包容的合作机制将为鼓励协作与创变，赋能系统性变革奠定基础。

附录 数据来源列表

指标要素	数据名	单位	数据来源
高温灾害特征指标	年平均最高气温	°C	国家级地面气象观测站1961-2019年逐日观测资料
	年极端最高气温	°C	
	日最高温≥35°C的日数	天	
	日最高温≥38°C的日数	天	
	连续3天日最高气温≥35°C发生次数	次	
暴雨灾害特征指标	单站24小时内降雨量≥50mm的降雨日	天	
	单站内暴雨日持续天数≥1天发生的频次	次	
人口暴露度	(区域) 常住人口	万人	区/县人口及经济数据来源于北京统计年鉴 2001-2018 北京区域统计年鉴 2008-2018 河北经济年鉴 2001-2018 天津统计年鉴 2001-2018 江苏统计年鉴 2001-2018 安徽统计年鉴 2001-2018 浙江统计年鉴 2001-2018 上海统计年鉴 2001-2018 广东统计年鉴 2001-2018 各省统计年鉴中缺失数据依据各市/县统计年鉴查漏补缺。
	人口密度 (常住人口/区域总面积)	人/平方公里	
经济暴露度	(区域) 地区生产总值	亿元	
生态暴露度	建成区绿化覆盖面积	公顷	
社会经济脆弱性	平均每千户籍人口拥有床位数	个	
	65岁以上老年人口占比	%	建成区绿化覆盖面积来源于中国城市建设统计年鉴2001-2018 中国县域建设统计年鉴2015-2017
	14岁以下少年儿童人口占比	%	
	单位面积地区生产总值 (GDP/区域总面积)	亿元/平方公里	
	人均GDP	元	
	不透水面积占比	%	Finer resolution observation and monitoring - Global Land Cover Gong P, Li X C, Zhang W. 40-Year(1978-2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing. Science Bulletin, 2019, 64, https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.04.024

参考文献

- Authority, G. L. (2010). *The draft climate change adaptation strategy for london: Public consultation draft*. In *The draft climate change adaptation strategy for London: Public consultation draft*. Greater London Authority.
- Bazaz, A., Bertoldi, P., Buckeridge, M., Cartwright, A., de Coninck, H., Engelbrecht, F., Jacob, D., Hourcade, J-C., Klaus, I., de Kleijne, K., Lwasa, S., Markgraf, C., Newman, P., Revi, A., Rogelj, J., Schultz, S., Shindell, D., Singh, C., Solecki, W., ... Waisman, H. (2018). *Summary for urban policymakers: What the IPCC Special Report on global warming of 1.5°C means for cities*. IHHS Indian Institute for Human Settlements. <https://doi.org/10.24943/SCPM.2018>
- Cai, W., Zhang, C., Suen, H. P., Ai, S., Bai, Y., Bao, J., ... & Gong, P. (2021). *The 2020 China report of the Lancet Countdown on health and climate change*. *The Lancet Public Health*, 6(1), e64-e81.
- Cengiz, C., Cengiz, B., & Boz, A. (2018). *Urban Green Space Design-Climate Relationship: Bartın Case*.
- Chu, E., Brown, A., Michael, K., Du, J., Lwasa, S., & Mahendra, A. (2019). *Unlocking the potential for transformative climate adaptation in cities*. Background Paper prepared for the Global Commission on Adaptation, World Resources Institute, Washington, DC and Rotterdam.
- Committee on Climate Change and China Expert Panel on Climate Change. (2018.10). *UK-China Co-operation on Climate Change Risk Assessment: Developing Indicators of Climate Risk*.
- Hui-Min, L., Xue-Chun, W., Xiao-Fan, Z., & Ye, Q. I. (2021). *Understanding systemic risk induced by climate change*. *Advances in Climate Change Research*. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.05.006>.
- IPCC. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Urban Areas*. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap8_FINAL.pdf
- IPCC. (2014). *Summary for policymakers*. In: *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar5_wgII_spm_en.pdf
- Lin, C. Y., Chen, W. C., Liu, S. C., Liou, Y. A., Liu, G. R., & Lin, T. H. (2008). *Numerical study of the impact of urbanization on the precipitation over Taiwan*. *Atmospheric Environment*, 42(13), 2934-2947.
- Mckinsey. (2020). *Addressing climate change in a post-pandemic world*. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/addressing-climate-change-in-a-post-pandemic-world>
- Moser, S.C., Aldunce, P., Rudnick, A., Rojas, M. & Muñoz, L. (2019). *Transformation from Science to decision-making*. Policy Brief to COP25. <https://t2sresearch.org/wp-content/uploads/2019/12/Moser-S.-et-al-2019-Policy-brief-Transformation.pdf>
- Murphy, D. J., Hall, M. H., Hall, C. A., Heisler, G. M., Stehman, S. V., & Anselmi-Molina, C. (2011). *The relationship between land cover and the urban heat island in northeastern Puerto Rico*. *International Journal of Climatology*, 31(8), 1222-1239.
- Ren, Y., Ren, G., Allan, R., & Zhang, S. (2021). *Extreme temperature of the mid-eighteenth century as compared to today's in Beijing*. *Climatic Change*, 165(3), 1-19.
- Shi, L., & Moser, S. (2021). *Transformative climate adaptation in the United States: Trends and prospects*. *Science*.
- Sohn, W., Kim, J. H., Li, M. H., Brown, R. D., & Jaber, F. H. (2020). *How does increasing impervious surfaces affect urban flooding in response to climate variability?*. *Ecological Indicators*, 118, 106774.
- Tauhid, F. A. (2018). *Urban green infrastructure for climate resilience: A Review*. *Nature: National Academic Journal of Architecture*, 5(1), 58-65.
- The World Bank. (2018). *Urban population*. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL>
- The World Bank. (2020). *Urban Development*. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview>
- UN Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics. (2018). *The 2018 Revision of World Urbanization Prospects*. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>
- UN-Habitat. (2011). *Global Report on Human Settlements 2011: Cities and Climate Change*. <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Cities%20and%20Climate%20Change%20Global%20Report%20on%20Human%20Settlements%202011.pdf>

- UN-Habitat. (2021). #CLIMATEACTION4CITIES CAMPAIGN. <https://cpi.unhabitat.org/document/climateaction4cities-campaign>
- UN-Habitat. (2021). UN-Habitat announces climate crisis themes for World Habitat Day and World Cities Day 2021. <https://unhabitat.org/un-habitat-announces-climate-crisis-themes-for-world-habitat-day-and-world-cities-day-2021>
- WMO. (2020). Global partnership urges stronger preparation for hot weather during COVID-19. <https://public.wmo.int/en/media/news/global-partnership-urges-stronger-preparation-hot-weather-during-covid-19>
- WMO. (2021). State of the Global Climate 2020. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618
- Xia, Y., Li, Y., Guan, D., Tinoco, D. M., Xia, J., Yan, Z., ... & Huo, H. (2018). Assessment of the economic impacts of heat waves: a case study of Nanjing, China. *Journal of Cleaner Production*, 171, 811-819.
- Xia, J., Tu, K., Yan, Z., & Qi, Y. (2016). The super-heat wave in eastern China during July–August 2013: a perspective of climate change. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1291-1298.
- Zhao, P., Jones, P., Cao, L., Yan, Z., Zha, S., Zhu, Y., ... & Tang, G. (2014). Trend of surface air temperature in eastern china and associated large-scale climate variability over the last 100 years. *Journal of Climate*, 27(12), 4693-4703.
- 国家统计局. (2021). 第七次全国人口普查主要数据情况. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202105/t20210510_1817176.html
- 黄晓军, 王博, 刘萌萌, 郭禹慧, & 李艳雨. (2020). 中国城市高温特征及社会脆弱性评价. *地理研究*, 39(7), 1534-1547.
- 李柔珂, 韩振宇, 徐影, 石英, & 吴佳. (2020). 高分辨率区域气候变化降尺度数据对京津冀地区高温 GDP 和人口暴露度的集合预估. *气候变化研究进展*, 16(4), 491.
- 联合国. (2018). 2018年可持续发展目标报告. <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2018/TheSustainableDevelopmentGoalsReport2018-ZN.pdf>
- 刘秉镰, 朱俊丰. (2019). 新中国70年城镇化发展: 历程、问题与展望. *经济与管理研究*, 40(11), 3-14.
- 秦大河, 张建云, 闪淳昌, 宋连春. (2015). 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: 科学出版社
- 史培军, 孙劭, 汪明, 李宁, 王静爱, 金赟赟, ... & 尹卫霞. (2014). 中国气候变化区划 (1961~ 2010 年). *中国科学: 地球科学*, 44(10), 2294-2306.
- 汤伟. (2015). 非传统安全的“城市化”. *社会科学*, 4.
- 王萃萃, & 翟盘茂. (2009). 中国大城市极端强降水事件变化的初步分析. *气候与环境研究*, 14(5), 553-560.
- 王珏, 刘君言, & 袁媛. (2021. 1). 当“紧急”成为新常态——新冠疫情给气候风险的警示和启示. *世界环境*.
- 吴绍洪, 潘韬, 刘燕华, 邓浩宇, 焦珂伟, 陆晴, ... & 高江波. (2017). 中国综合气候变化风险区划. *地理学报*, 72(1), 3-17.
- 徐宗学, 陈浩, 任梅芳, & 程涛. (2020). 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展. *水科学进展*, 31(5), 713-724.
- 杨秀, 付琳, & 张东雨. (2020). 适应气候变化评价指标体系构建与应用. *阅江学刊*, 12(2), 83-98.
- 张蕾, 黄大鹏, & 杨冰韵. (2016). RCP4. 5 情景下中国人口对高温暴露度预估研究. *地理研究*, 12.
- 张雷, 任国玉, 刘江, 周雅清, 任玉玉, 张爱英, & 冯亚文. (2011). 城市化对北京气象站极端气温指数趋势变化的影响. *地球物理学报*, 54(5), 1150-1159.
- 郑鑫. (2014). 城镇化对中国经济增长的贡献及其实现途径. *中国农村经济*, 6(4).
- 中国气象局气候变化中心. (2020). 中国气候变化蓝皮书 (2020). 科学出版社.
- 中国政府网. (2013). 关于印发国家适应气候变化战略的通知. http://www.gov.cn/zwggk/2013-12/09/content_2544880.htm
- 中国政府网. (2017). 我国启动气候适应型城市建设28个城市试点. http://www.gov.cn/xinwen/2017-03/02/content_5172504.htm
- 中国政府网. (2021). 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm

GREENPEACE 绿色和平

绿色和平是一个全球性环保组织，致力于以实际行动推动积极的改变，保护地球环境。



地址 | 北京东城区东四十条 94 号亮点文创园 A 座 201 室

邮编 | 100007

电话 | 86 (10) 65546931

传真 | 86 (10) 64087851

www.greenpeace.org.cn



中国国际民间组织合作促进会
China Association for NGO Cooperation

中国国际民间组织合作促进会是一家全国性社会团体，通过支持基层民间组织的能力建设，提供技术支持服务和咨询，促进社会和生态环境的可持续发展。



地址 | 北京东城区安定门东大街 28 号，雍和大厦东楼 C 座 601

邮编 | 100007

电话 | 86 (10) 6409 7888

传真 | 86 (10) 6409 7607

www.cango.org