城市高温脆弱性评估

URBAN HEAT VULNERABILITY ASSESSMENT

理论、方法与实证

Theory, Methods, and Empirical Applications

蔡智 唐燕 陈恺 | 著

国家自然科学基金项目（51978363）资助

清華大學出版社
北京

版权所有，侵权必究。举报：010-62782989，beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目 (CIP) 数据

城市高温脆弱性评估 : 理论、方法与实证 / 蔡智, 唐燕, 陈恺著. -- 北京 : 清华大学出版社, 2026. 9. -- ISBN 978-7-302-72610-4

Ⅰ. P423-34

中国国家版本馆CIP数据核字第2026XS3834号

责任编辑：张　阳
封面设计：吴丹娜
责任校对：薄军霞
责任印制：张子璇

出版发行：清华大学出版社
网　　址：https://www.tup.com.cn, https://www.wqxuetang.com
地　　址：北京清华大学学研大厦A座　　**邮　　编：**100084
社 总 机：010-83470000　　**邮　　购：**010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质量反馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 装 者：北京博海升彩色印刷有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：185mm × 250mm　　**印　　张：**13.75　　**字　　数：**207千字
版　　次：2026年11月第1版　　**印　　次：**2026年11月第1次印刷
定　　价：119.00元

产品编号：105645-01　　审图号：京S（2026）042号

序

在全球气候变暖的背景下，我们正在进入一个视高温天气为日常的时代。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告已明确警示，全球地表温度升幅正以超出早期预估的速率逼近 1.5℃阈值。世界气象组织的数据也连续证实，近年来全球平均气温迭创历史极高值。当“有记录以来最热的一年”这一表述从偶然性的新闻标题变为日常性生活话题后，我们不得不直面一个事实——极端高温已从偶发的自然灾害蜕变为一种结构性的生存处境。高温不像台风裹挟着摧毁性的视觉冲击，也不会带来洪水退却后的泥泞情景，它是一种静默的紧急状态，它在每一次热浪中悄然作用于城乡的肌理与人民的生活，直到统计数据被汇总之后才被后知后觉地辨认出来。

然而，高温从来不是一种空间均等的威胁。自卢克·霍华德在 19 世纪初发现城市热岛效应以来，学界对城市热环境的认知经历了一个漫长而深刻的转向：从最初关注“城市比乡村热多少”，逐步推进到追问“城市内部哪里更热、哪些人更脆弱”。这一追问背后，是 1995 年芝加哥热浪中非裔社区居民与低收入群体远超平均比例的生命代价，是 2003 年欧洲热浪中巴黎独居老年女性异常偏高的死亡率，也是经全球各大城市反复验证的同一个冷酷事实——高温会沿着社会不平等的裂缝进一步渗透和累积。因此，一座城市的热环境地图绝非纯粹的自然地理图示，它更近似于一幅社会脆弱性的空间投影。也正是基于这一洞察，气候脆弱性评估在过去 20 年间从自然灾害研究的边缘，逐步走向城市气候治理的舞台中心，促使各界将对城市高温的讨论从温度计数据转向对人民处境的关切。

城乡规划学学科在这一认知转向中扮演着重要角色。过去 20 年间，我们见

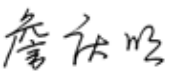
证了城乡规划对气候议题的逐步深化：从生态城市、低碳城市中对碳减排的侧重，到近年来韧性城市、气候适应性城市等理念对适应能力的强调，再到当前“减缓与适应协同”共识的逐步形成。然而，一个不容回避的事实是，多数城市的气候适应性规划迄今仍悬浮于政策文本与宏观愿景之间，未能真正嵌入空间治理的毛细血管。其症结之一，恰恰在于我们长期缺乏能够精准诊断“何处需要干预、以何种方式干预、按何种优先级配置资源”的空间化评估工具。在此意义上，将高温脆弱性评估系统性地引入城乡规划的核心技术工具箱，是学科回应时代命题的必然之举，更是规划实践从经验主义向证据驱动转型的关键一步。

本书正是在上述时代语境与学术脉络中应运而生的扎实之作。这部著作的价值首先体现在其理论建构的清醒与审慎：它对目前比较模糊的高温脆弱性概念进行了清晰界定，并对国际学界通行的“暴露度 – 敏感性 – 适应能力”脆弱性评估框架与中国高密度城市的特定语境进行了本土化对接，避免了理论移植中屡见不鲜的水土不服问题。在方法论层面，本书的贡献不止于多源数据的融合与熵权法等技术手段的娴熟运用，更在于它所构建的“区县—街道—形态分区”多尺度递进式评估逻辑，步步深入，将城乡规划学学科特有的空间思维优势发挥得淋漓尽致。另外，本书将局地气候分区与城市空间形态分区体系相结合，为建成环境特征与热环境效应的耦合分析提供了可操作的技术接口，为后续研究开辟了一条值得深耕的路径。然而，本书并未止步于传统的脆弱性格局空间制图与描述，而是进一步构建并形成了“脆弱性评估—减缓和适应规划—规划效力评估”的完整闭环，这一设计使脆弱性评估真正从学术研究走向规划决策。

诚然，气候变暖趋势在可预见的未来难以逆转。这意味着每座城市都不得不在一种更酷热的环境中学习生存与庇护的艺术，寻求与自然的和谐共存。高温脆弱性研究的终极目的，从来不是绘制一幅精致的风险地图，而是要让那些最无力承受高温的人群（如独居在老旧小区中的老年群体、蜗居于通风不畅的出租屋中的低收入人群、无法负担空调费用的困难家庭）在这个持续变暖的时代依然能够有尊严地、安全地栖居。三位作者以多年之功完成了这项兼具学术深度与人文温度的研究，不仅为北京的城市高温治理提供了科学决策依据，而且为中国更多

高密度城市的高温精准应对开辟了一条值得借鉴的路径。作为同道，我乐于见到此书的问世，并期待它能唤起更多学者与实践者对城市气候正义问题的关注和行动。毕竟，对脆弱生命的守护，正是城乡规划学学科最古老也是最恒久的伦理使命。

武汉大学城市设计学院二级教授、博士生导师
武汉大学数字城市研究中心主任
中国城市规划学会城市规划新技术应用专业委员会副主任委员



2026 年 6 月

前　言

在当前全球气候变化与快速城镇化双重叠加的宏观背景下，极端高温事件的频率、强度和持续时间显著增加，已成为威胁城市可持续发展与居民健康的主要灾害之一。这种持续的热胁迫不仅直接导致人群死亡率和相关疾病增加，还对城市能源、水资源及相关基础设施的正常运行构成严峻挑战。然而，高温对城市的影响并非均匀分布，而是表现出显著的空间差异性与社会不公平性，老年人、低收入群体及患病人群等脆弱群体往往因自身生理特征、所处空间位置及应对资源的匮乏，面临着更为严重的健康威胁。鉴于此，本书立足于城乡规划学，融合气象学、地理学、社会学及流行病学等多学科视角，旨在通过构建科学的城市高温脆弱性评估框架，精准识别脆弱空间与人群，并据此提出“减缓”与“适应”并重的规划应对策略，以增强城市的韧性与宜居性。

本书首先在理论层面重新审视高温脆弱性的内涵。通过辨析气候变化脆弱性、自然脆弱性与社会脆弱性等概念，明确指出城市高温脆弱性是城市系统在遭受高温胁迫时表现出的易受损程度，它由暴露度、敏感性和适应能力三个核心维度构成。其中，暴露度指城市面临的高温物理环境特征，如气温、热岛效应及持续时间；敏感性主要反映城市居民因年龄、性别、健康状况等生理特征对高温的易感程度；适应能力则体现了系统应对和恢复的能力，取决于经济水平、受教育程度、医疗资源及公共基础设施的可获得性。这一理论框架将传统的单一气象灾害风险评估拓展为自然环境与社会经济系统的综合评估，为理解高温致灾机理提供了更为全面的视角。

在方法论构建方面，本书遵循本地化、综合性、可操作性的原则，建立了一

套适用于中国高密度城市环境的定量评估指标体系。研究利用多源数据融合技术，整合了包括中分辨率成像光谱仪（MODIS）和陆地卫星（Landsat）遥感影像反演的地表温度与归一化植被指数（NDVI）、人口普查数据、气象站点监测数据，以及基于兴趣点（POI）和房价估算的社会经济数据。在评估模型方面，采用熵权法客观确定指标权重，并利用函数模型（脆弱性=暴露度 × 敏感性 ÷ 适应能力）对各维度进行综合集成。此外，为了突破传统行政区划评估的局限，本书引入了局地气候分区（LCZ）和城市空间形态分区的理念，结合机器学习算法，将城市复杂的建成环境划分为高密度高层、高密度中层、高密度低层等 10 种形态类型，从而实现了从宏观区到微观形态单元的多尺度精准评估。

基于上述框架，本书以北京市为实证案例，揭示了其高温脆弱性的空间分异规律。在区尺度上，脆弱性呈现“中心城区南部较高、周边区域较低”的特征，西城区因高暴露度和高敏感性成为全市唯一的极高脆弱区。在街道尺度上，中心城区的脆弱性呈现显著的“外低内高”和“南高北低”分布，核心区（特别是东城区和西城区）因人口老龄化严重、建筑密度极高且缺乏绿地，陷入了“高暴露度 – 高敏感性”的双重困境。而在形态分区尺度上的深入分析进一步表明，由老旧小区和胡同构成的高密度中层与高密度低层区域是高温脆弱性的主要承载空间。这些区域往往居住着大量老年人和低收入流动人口，由于缺乏空调等主动降温设施以及绿地等被动调节资源，其适应能力极低。相比之下，尽管中央商务区（CBD）等高密度高层区域物理热环境恶劣（暴露度高），但其凭借雄厚的经济基础和完善的现代化设施实现了较高的适应能力，从而降低了整体脆弱性。

针对评估识别出的问题，本书构建了一个闭环式的规划应对框架，涵盖脆弱性评估、减缓和适应规划、规划效力评估三个环节。规划策略强调减缓与适应的协同作用：减缓规划旨在通过改变城市物理属性“治本”，适应规划则侧重于管理风险“治标”。

在减缓方面，建议将城市热环境治理目标纳入城市总体规划等法定体系，设立分阶段的热岛缓解指标。针对高脆弱的老旧城区，提出分类施策的微更新行动，包括推广胡同绿化、垂直绿化，使用高反射率的凉爽路面和凉爽屋顶材料，以及

打通微观通风廊道，以降低物理环境的热暴露水平。

在适应规划方面，强调从气象预警向健康风险预警转型，建立分级响应机制。针对不同预警级别，明确政府、医疗机构及社区的具体行动预案。特别是在高脆弱区，建议构建“15 分钟纳凉圈”，利用社区中心、图书馆、人防工程等现有设施建设纳凉中心，并绘制纳凉地图向居民发放。同时，针对老年人“数字鸿沟”问题，提出利用广播、公告栏及入户走访等传统渠道进行精准的信息传播，加强对高风险人群的健康教育，普及中暑自救技能，并在公共场所配置自动体外除颤器（AED）等急救设备，以提升社区的自救互救能力。

最后，有效的规划应对离不开多元主体的共同参与和动态的效力评估。建议建立由政府引导、企业出资、非营利组织协同、居民参与的多元治理机制，如推行绿地“认建认养”模式。同时，应建立长期的规划效力评估机制，通过监测健康数据变化和公众满意度调查，不断修正脆弱性评估指标与规划策略，形成“评估—规划—实施—反馈”的良性循环。

综上所述，本书不仅揭示了北京城市高温脆弱性的空间和社会属性，更为我国城市应对气候变化、建设健康韧性城市提供了科学的理论依据与可操作的实践路径。

作者

2025 年 12 月

目　录

第 1 章　绪论 / 001

1.1　研究背景 ／ 002

1.1.1　城镇化与气候变化加剧了高温 / 003

1.1.2　高温严重威胁着城市发展和居民健康 / 005

1.1.3　城市规划开始关注如何应对气候变化和极端气候 / 009

1.2　脆弱性的概念及内涵 ／ 011

1.2.1　气候变化视角下的脆弱性内涵 / 011

1.2.2　高温视角下的脆弱性内涵 / 018

1.3　研究意义 ／ 024

1.3.1　提出跨学科的高温脆弱性研究视角 / 024

1.3.2　检验高温脆弱性评估的“本地”适用性 / 025

1.3.3　关注气候变化背景下的城市脆弱群体 / 025

1.3.4　构建减缓和适应高温影响的规划应对框架 / 025

1.4　研究内容 ／ 026

第 2 章　城市高温脆弱性评估的理论基础 / 029

2.1　城市高温脆弱性评估目的 ／ 030

2.1.1　气候变化脆弱性评估 / 030

2.1.2　高温脆弱性评估目的 / 034

2.2 高温脆弱性的评估框架 / 037
2.2.1 风险灾害导向的评估框架 / 038
2.2.2 脆弱性指数导向的评估框架 / 039
2.2.3 综合导向的评估框架 / 039
2.3 高温脆弱性的评估指标 / 042
2.3.1 人口特征指标 / 043
2.3.2 社会经济条件指标 / 047
2.3.3 建成环境指标 / 051
2.3.4 其他方面的指标 / 057
2.3.5 对高温脆弱性指标的综合评价 / 060

第 3 章 城市高温脆弱性评估方法 / 063

3.1 指标选择及数据来源 / 064
3.1.1 脆弱性指标选取原则 / 064
3.1.2 脆弱性指标数据来源 / 065
3.2 基于“暴露度 – 敏感性 – 适应能力”框架的高温脆弱性指标体系 / 076
3.3 高温脆弱性评估方法 / 079
3.3.1 数据归一化 / 080
3.3.2 地理信息系统（GIS）分析法 / 082
3.3.3 综合指数法 / 084
3.3.4 函数模型评估法 / 088

第 4 章 实证分析：基于行政单元的城市高温脆弱性评估 / 091

4.1 北京概况及数据来源 / 092

4.1.1 北京概况及气候条件 / 092
4.1.2 相关数据来源及预处理 / 093

4.2 北京高温脆弱性指标体系构建及评估方法 / 101
4.2.1 指标体系构建 / 101
4.2.2 指标确权与综合 / 105
4.2.3 评估结果检验 / 108

4.3 北京区层面的高温脆弱性结果分析 / 108
4.3.1 高温暴露度空间特征 / 108
4.3.2 居民敏感性空间特征 / 110
4.3.3 居民适应能力空间特征 / 112
4.3.4 高温脆弱性空间特征 / 115

4.4 北京街道（乡镇）层面的高温脆弱性结果分析 / 116
4.4.1 高温暴露度空间特征 / 116
4.4.2 居民敏感性空间特征 / 117
4.4.3 居民适应能力空间特征 / 119
4.4.4 高温脆弱性的空间格局 / 120
4.4.5 高脆弱区建成环境和居民行为特征 / 122

第 5 章 实证分析：基于形态分区的城市高温脆弱性评估 / 127

5.1 形态分区的概念及框架 / 128
5.1.1 形态分区的概念及历史渊源 / 128
5.1.2 局地气候分区 / 131
5.1.3 城市空间形态分区体系 / 136

5.2 形态分区下的城市高温脆弱性评估方法 / 138
5.2.1 研究区 / 138
5.2.2 相关数据来源 / 139

5.2.3 城市空间形态分区的识别流程及方法 / 140
5.2.4 高温脆弱性评估流程及方法 / 143

5.3 形态分区下的城市高温脆弱性评估结果分析 / 144
5.3.1 北京城市空间形态分区的构成 / 144
5.3.2 形态分区视角下的北京高温脆弱性特征 / 146
5.3.3 城市空间形态分区高温脆弱性差异的成因 / 149
5.3.4 小结 / 153

第 6 章 城市高温脆弱性的规划应对 / 155

6.1 城市高温脆弱性规划应对框架 / 156
6.1.1 “脆弱性评估—减缓和适应规划”：高脆弱区优先开展规划应对 / 156
6.1.2 “减缓规划—适应规划”：减缓与适应兼顾的规划应对 / 157
6.1.3 “规划效力评估—减缓和适应规划”：规划应对实施的反馈调整 / 158
6.1.4 “规划效力评估—脆弱性评估”：高温脆弱性评估的反馈调整 / 158

6.2 减缓规划：缓解城市热岛效应 / 159
6.2.1 规划目标：将热环境治理纳入城市规划分阶段目标 / 159
6.2.2 规划编制：多部门协同参与规划编制 / 160
6.2.3 减缓行动：减缓策略向减缓行动转变 / 162
6.2.4 实施机制：从政府主导走向多角色合作治理 / 165

6.3 适应规划：降低高温对居民健康的影响 / 167
6.3.1 高温预警：从气象预报向健康风险预警转型 / 167
6.3.2 筹备工作：基于脆弱性评估的精准靶向 / 169
6.3.3 信息传播：提高高脆弱群体的风险认知与自救能力 / 170
6.3.4 应急行动：根据预警等级执行角色分工，构建“15 分钟纳凉圈” / 171

6.4 规划效力评估 / 173

6.4.1 减缓规划的效力评估 / 173

6.4.2 适应规划的效力评估 / 173

6.5 近期重点建设项目与行动方案 / 174

6.5.1 减缓规划的近期建设项目 / 174

6.5.2 适应规划的近期行动方案 / 175

第 7 章 结语 / 177

7.1 主要结论 / 178

7.1.1 相关研究进展总结 / 178

7.1.2 城市高温脆弱性评估结果总结 / 179

7.1.3 高温脆弱性的规划应对总结 / 181

7.2 研究不足与展望 / 183

7.2.1 评估结果的不确定性有待解决 / 183

7.2.2 高温脆弱性的规划应对策略有待实践检验 / 183

参考文献 / 185

第 1 章

绪　论

1.1 研究背景

随着城市化进程的快速推进，至2050年底，全球将有70%左右的人口在城市聚居（United Nations，2014），而我国人口城镇化有望在2035年达到这一水平。城市作为人类最主要的栖息地，其空间形态及生态环境质量显著影响并决定了城市的宜居程度，进而影响城市的可持续发展和居民身心健康。近年来，随着城市规模的不断扩大，城市热环境恶化、环境污染加剧、景观质量下降等各类城市问题凸显，对城市发展造成了巨大冲击。其中一个主要成因在于城市空间形态、功能、环境之间关系的失衡，且这种失衡与城市自然发展规律不一致。

除了城市化，当前日益严峻的气候变化危机也给城市发展带来了重大挑战。在气候变暖的背景下，海平面温度升高、蒸发加速、空气湿度增加，导致台风产生的概率、强度和持续的时间显著增加，大幅增加了台风对沿海地区的破坏力。而地表水分蒸发速率的增加，一方面导致极端暴雨和高温发生的频率及强度不断上升（Qin et al.，2016），另一方面导致内陆地区近地表极度干旱，大幅增加了森林火灾的风险（Petoukhov et al.，2013）。较为明显的是，近年来频发的极端气候灾害已经严重威胁了人民的生命和财产安全（Corburn，2009；Vardoulakis et al.，2015）。美国疾病控制与预防中心在2013年的一份研究报告中指出，美国在1999—2010年因热浪而丧生的人数超过了地震、洪涝等其他自然灾害的总和。联合国政府间气候变化专门委员会指出，气候变化引发的极端高温天气将成为亚洲地区未来面临的主要风险之一（IPCC，2014）。《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》也预测高温将成为我国未来最主要的极端气候灾害之一（秦大河，2015）。

在此背景下，如何认识城市发展规律，减轻气候变化带来的影响，建设健康和谐城市，迈向可持续的未来？机遇与挑战并存。

1.1.1　城镇化与气候变化加剧了高温

（1）城镇化对高温的影响

城市是人类活动最密集的区域。一方面，人类活动过程中释放的大量二氧化碳、二氧化氮等温室气体，加剧了城市热岛（urban heat island，UHI）效应[①]，并导致全球气候变暖（图 1–1）。最近的一项研究结果表明，城市化放大的复合热浪加剧了全球 90% 以上城市的热暴露风险，且在高城市化地区更为强烈（Gao et al.，2024）。另一方面，城镇化作为最强烈的地表变化过程，迅速改变了原有地区的土地覆盖情况，导致绿地、水体等自然地表类型转变为建筑、铺装等建成

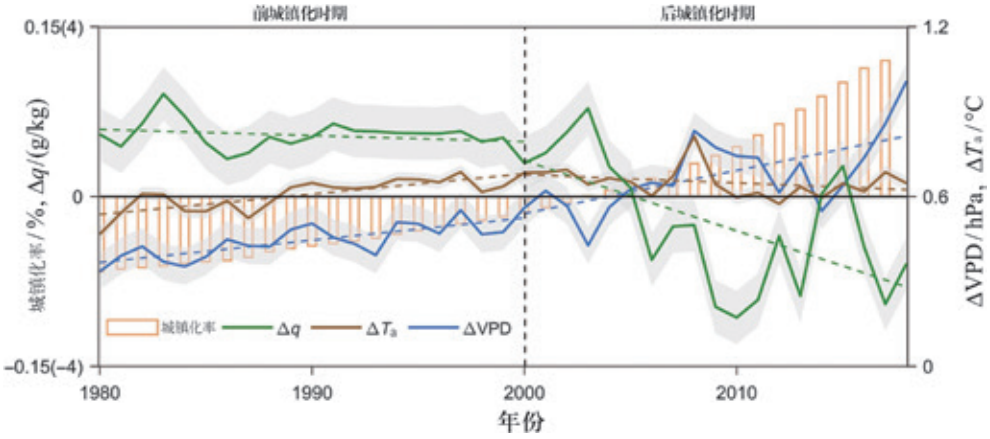


图 1–1　1980—2018 年中国五个城市群的城镇化率（U-rate）、城市干岛强度（Δq）、城市热岛强度（ΔT_a）、城乡饱和水汽压差的差值（ΔVPD）的变化

（来源：改绘自 Huang et al.，2022）

注：城市热岛强度（ΔT_a）指城市与相邻乡村之间的近地表气温差；城市干岛强度（Δq）指城市与相邻乡村之间的大气比湿差，Δq<0 时表示城市空气的绝对水分含量低于乡村；城乡饱和水汽压差的差值（ΔVPD）指城市与相邻乡村之间的饱和水汽压差的差值，用于衡量城市化对大气干旱程度的加剧作用。图中显示，随着城镇化率的增加，城市热岛强度也在不断上升，而城市干岛强度则在不断下降，即城市越来越干热。

① 城市热岛效应最早由卢克·霍德华（Luke Howard）发现，他在 1903 年出版的《伦敦的气候》一书中指出城市温度要高于它周边的乡村地区，这一现象后来被定义为城市热岛。随着研究的深入，后续的学者们根据数据来源和研究对象将城市热岛进一步细分为不同类型，如地表热岛、冠层热岛、层峡热岛等。

区类型，使得地表对太阳辐射的反射能力降低、吸收能力增强，从而打破了原有区域的地表能量传输平衡，产生地表热岛效应。相关研究表明，相比非高温日，极端高温期间的城市热岛效应更强，且城市热岛效应强度与环境气温呈现出显著的正相关关系。此外，城市热岛效应还延长了城区夜晚高温时间（杨续超 等，2015）。我国学者研究发现，长江三角洲地区城镇化水平与极端高温强度的相关性达到 0.65**（P<0.01），1971—2013 年期间，极端高温的增强有三成来自城市热岛效应（Yang et al.，2017）。极端高温事件的频发还与城镇的发展方式和空间结构有关，1956—2005 年期间，美国蔓延型都市区的极端高温事件增长率是紧凑型都市区的两倍（Stone et al.，2010）。因此，城镇化对极端高温事件的影响已是事实。由我国“三个一亿人”[①]的新型城镇化进程持续推进，以及人口老龄化的发展趋势，可以预见未来高温引发的居民健康风险将进一步增加。

（2）气候变化对高温的影响

全球气候变化是 21 世纪人类面临最主要的环境问题之一。《联合国气候变化框架公约》将气候变化定义为“经过相当一段时间的观察，在自然气候变化之外，由人类活动直接或间接地改变全球大气组成所导致的气候改变”，其中全球气候变暖是最重要的表现。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）第五次评估报告指出，1880—2012 年，全球地表温度升高了 0.85℃（IPCC，2014）。世界气象组织（World Meteorological Organization，WMO）对五大国际资料集进行的综合分析显示，2017 年的全球平均地表温度比前工业化时代高出了约 1.1℃。虽然厄尔尼诺现象促使全球气温上升，但是 2017 年却是无厄尔尼诺现象年中最暖的一年（WMO，2018）。作为城市自然灾害的重要类型，高温和极端高温天气在近几十年备受关注。据统计，1973—2012 年期间，全球 217 个城市地区发生的高温事件次数持续增长，将近一半的城市极端高温天数明显增加（Mishra et al.，2015）。英国伦敦帝国理工学院格兰

① “三个一亿人”指我国将在今后一个时期，促进约一亿农业转移人口落户城镇，改造约一亿人居住的城镇棚户区和城中村，引导约一亿人在中西部地区实现就近城镇化。

瑟姆研究所的一份研究报告指出，伦敦的高温事件由每 60 年一次上升为每 6 年一次（UCL，2015）。我国自 21 世纪初开始，高温强度也呈现陡增趋势，近五年高温强度平均值达到了 20 世纪 80 年代的近两倍(宋晨阳 等,2016)。空间分布上，华北的北部与西部、西北的中北部、华南中部、长江三角洲及四川盆地南部等地的增强趋势显著（叶殿秀 等，2013）。我国学者模拟未来气候变化情景，指出中国各地区的高温事件强度将会进一步增加，发生频率增幅将超过 100%，且持续时间将增加 30% 以上。目前高温强度较高的地区在未来可能会发生更严重的高温事件，其他地区在未来也面临高温强度增加的可能（杨红龙 等，2015）。

1.1.2　高温严重威胁着城市发展和居民健康

（1）高温对城市发展和全球气候的影响

城市高温的加强会对城市发展和全球气候产生显著影响，导致劳动生产率下降、工作时间缩短以及农业、物流和其他关键行业的经济放缓。在能源方面，随着高温天气趋于频繁，城市会在夏季因空调制冷增加而对能源产生更多的需求。Shen 等（2013）指出，在气候变化背景下，气温每升高 0.5℃，商业建筑的用电量会增加 10%。Akbari 等（2005）发现：气温升高会额外导致 5%～10% 的城市峰值电力消费；此外，当白天最高气温超过 15～20℃后，气温每上升 1℃，电力需求会增加 2%～4%。这些额外增加的电力需求给城市电网造成了巨大负担，导致电厂超负荷运行或城市部分区域停电。但 Roxon 等（2020）则进一步指出，城市热岛效应对能源消费的影响会因气候区差异而不同，热岛效应会显著增加温暖地区的能源消费，但会减少寒冷地区的能源消费和碳排放。Hong 等（2019）的模型模拟结果表明，在未来气候变暖的背景下，我国 PM2.5 浓度增加和臭氧层空洞扩大等情况会持续恶化，并将在 21 世纪中叶额外导致 2 万多人死亡。

国际劳工组织的一项研究报告表明，至 2100 年，热浪将会威胁 40 亿人的健康，并使得劳动生产率降低 2.2%，经济损失达 2.4 万亿元（Kjellstrom et al.，2019）。德

国安联保险集团估计仅 2025 年 5 月至 7 月中旬的欧洲热浪就直接导致了部分国家 1% GDP 的损失，一天的高温就足以造成相当于半天罢工的经济损失（Allianz，2023）。Parsons 等（2021）的研究进一步证实了这一结果，他们发现：受高温的影响，2001—2020 年，全球每年平均损失的劳动工时达 2280 亿时，并分别在 2016 年（2740 亿时）和 2019 年（2700 亿时）达到峰值，这些损失的工时主要集中在农业部门。在不采取有效缓解措施的情况下，至 21 世纪末，地球表面温度会大幅升高，部分区域升幅可达 9℃（图 1–2）。气候变暖还会改变海洋洋流的方向，使得全球气候再分布，导致未来部分区域不再宜居（Kang et al.，2018）。在全球升温的情景下，未来海平面的上升会给沿海居民带来巨大风险，预计约有 4207 万人面临洪水的威胁，我国最高约有 5.8 万 km^2 的陆地面积会被淹没，这些被淹没区域将主要集中在长江三角洲和江苏北部平原地区（Fang et al.，2021）。

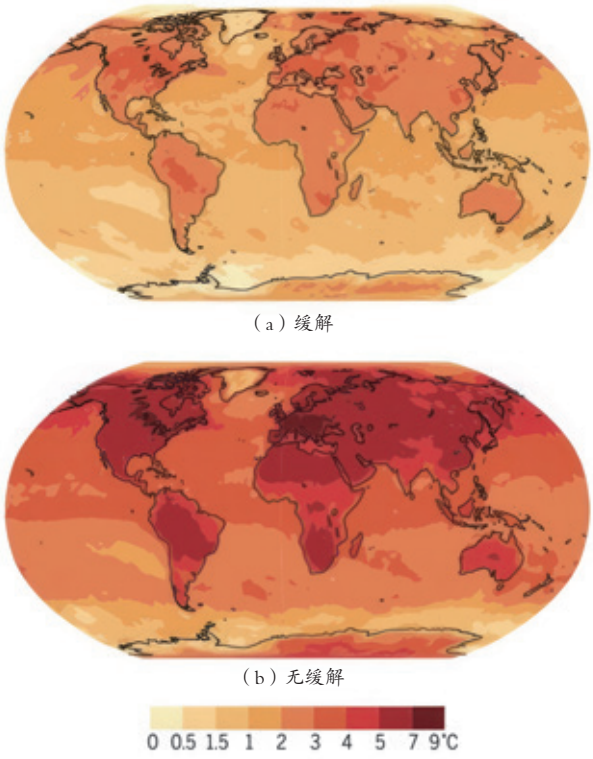


图 1–2　未来两种情景下的全球地表升温峰值预测

（来源：Sherwooduter，2020）

（2）高温对居民健康的影响

高温天气对人群健康的负面影响直至最近几十年才得到广泛关注，现阶段国内外研究普遍证实了高温还会导致额外死亡率（图 1–3）。



图 1–3　高温对城市和居民健康的影响

（来源：改绘自 WHO，2017）

相关研究表明，高温阈值每增加 1℃，人群死亡风险便增加 1.03 倍，气温和人群死亡的关系呈现 J 形或 U 形曲线，即在温度相对适宜的情况下，人口死亡率最低，随着温度的升高或降低，死亡人数呈现显著上升。Nori–Sarma 等（2019）研究发现，2000—2012 年气温超过 32.5℃的热浪期间，印度的人口死亡率上升了 18.1%。2003 年，欧洲有 7 万多人因热浪而丧生（Robine et al.，2008）。有研究进一步指出，该死亡人群中，数量最多的是老年人，尤其是先前有过健康问题（Gasparrini et al.，2012）、居住在缺乏隔热设施的平房顶层或房车内的老年人（Fouillet et al.，2006）。同样，美国疾病控制与预防中心的一项调查研究结果表明，1999—2010 年，美国因过热死亡的人数达到了 8081 人，其中超过 1/3 是 65 岁以上的老年人（Elizabeth，2020）。2009 年，澳大利亚的热浪直接导致了墨尔本

和阿德莱德 500 多人的死亡，并分别使这两个城市的人口死亡率上升了 62% 和 10%（Nitschke et al.，2011）。2010 年俄罗斯长达 44 天的高温天气导致了 5.6 万人死亡（WHO，2017）。Hong 等（2019）通过对气象、空气质量和流行病学模型的综合研究，预测我国未来因热浪导致的人口死亡率会增加 6%。《2023 中国版柳叶刀人群健康与气候变化倒计时报告》更指出，我国 2022 年因高温导致的死亡人数约为 50 900 人，是 2021 年的 2 倍（Zhang et al.，2023）。2018—2022 年这 5 年里的平均死亡率超过了历史平均线的 169%。其中，河南在 2022 年因热浪导致的死亡人数最多，占 2022 年总死亡人数的 15.5%，其次是山东（8.7%）、江苏（8.5%）和四川（8.1%）。

人口死亡率上升的主要原因是，在高温环境下，人体的核心温度较易突破大多数人安全耐受的 39℃，使得血液的输氧能力下降，继而导致肠道通透性增加，使某些与细菌相关的有毒分子渗入血液，从而触发次级炎症反应，引发凝血功能障碍和多器官衰竭，最终导致死亡。长期的血液低供氧量还会对肾脏等器官造成损伤，引发慢性疾病。此外，在高温环境下，人体的散热需求快速增加，迫使心脏超负荷工作，给心血管疾病患者带来了更高的风险（Ebi et al.，2021）。

除了会导致额外死亡，高温还会对居民健康造成其他不同程度的影响（图 1–4）。过热的室外环境会显著减少人们室外健身、步行等活动的频率（Huang et al.，2016），进而增加肥胖症、心血管疾病、糖尿病等疾病患病的风险（Dye，2008；Khalaj et al.，2010）。《2023 中国版柳叶刀人群健康与气候变化倒计时报告》指出，2022 年，受高温天气的影响，中国人均室外和体育健身活动减少了 2.32 小时，华南地区受影响最大，减少了 3.67 小时。美国疾病控制与预防中心指出，长期暴露在高温环境中，窒息、疲惫、抽筋、呕吐等症状发生的风险显著上升（CDC，2011）。

高温环境还为疟疾、登革热等疾病的传播与暴发创造了条件（Patz et al.，2005；Ostfeld et al.，2015；Wu et al.，2016），导致居住在较热地区的人具有更高死亡率（Schinasi et al.，2018）。《2023 中国版柳叶刀人群健康与气候变化倒计时报告》也指出，相比 2010—2015 年的平均水平，2016—2021 年间中国 17 个省

份对登革热的脆弱性均值增加了 10% 以上。高温环境甚至会影响人的认知能力，导致学习及思维能力下降（Yeganeh et al.，2018）。如 Yeganeh 等（2018）指出，气温在 22℃左右时，人会有最好的认知能力表现。在此基准温度上，当气温上升 4℃、10℃和 26℃时，人的认知能力分别会下降 0.4%、5.37% 和 7.97%。而舒适的室外热环境有利于人们出行活动（Huang et al.，2016），促进健康并增加社会交往的机会（Égerházi et al.，2013）。室外活动时间的增多也将显著减少因空调、照明带来的室内建筑能耗需求（Niu et al.，2015），有利于城市的低碳发展。



（a）受高温影响的老年人　　（b）在海边祛暑纳凉的游客

图 1–4　受高温影响的老年人和在海边祛暑纳凉的游客

［来源：图（a）引自 Shutterstock, Inc；图（b）为蔡智摄］

1.1.3　城市规划开始关注如何应对气候变化和极端气候

如何应对气候变化带来的影响已成为当今城市必须面对的问题。作为土地和空间资源配置的重要手段，城市规划在减缓和适应气候变化中扮演着重要角色。以低碳（low-carbon）理念为指导的城市规划框架强调在用地、交通、产业等方面，通过城市规划的手段减缓温室气体排放（顾朝林 等，2010）。但是，正如 IPCC 第四次报告（2007）所言，“如果不努力实现减缓计划，那么就不能在未来几十年内阻止气候变化的发生”，所以旨在缓解气候变化影响，提高城市应对极端天

气能力的适应性规划（adaptation planning）和适应性治理（adaptation governance）等概念在国内外受到普遍关注。西方国家对适应性规划进行了大量的研究和实践，如美国的《纽约2030适应性计划》（Plan NYC 2030）、澳大利亚的《维多利亚沿海战略》（Victorian Coastal Strategy）、欧盟环境署的《欧洲城市对气候变化的适应——城市的挑战和机遇以及支持性的国家和欧洲政策》（Urban Adaptation to Climate Change in Europe: Challenges and Opportunities for Cities Together With Supportive National and European Policies）等。针对高温等极端气候事件，美国环保署发布了《极端高温事件指导手册》（Excessive Heat Events Guidebook），强调高温行动规划应包含预警系统、风险评估与高脆弱人群识别、告知公众与应急响应、缓减措施四方面内容。伦敦市政府出台了《管理灾害风险和提高城市韧性：伦敦市气候适应战略规划》（Managing Risks and Increasing Resilience: London Climate Change Adaptation Strategy），将高温视作城市规划需要解决的主要气候灾害之一，提出划定高温灾害风险区、增加城市植被覆盖、降低城市区域内被动式制冷的应用、制定高温应急规划四项整体策略，并从城市、街区和建筑单体三个空间层面实施。

我国早在2007年就发布了《中国应对气候变化国家方案》，提出了减缓与适应并重的应对气候变化原则。随后，与气候变化相关的研究与政策条文呈现井喷式增长趋势，相关部门先后发布了《国家适应气候变化战略》（2013）、《国家应对气候变化规划（2014—2020年）》（2014）、《城市适应气候变化行动方案》（2016）、《气候适应型城市试点工作方案》（2016）、《关于印发气候适应型城市建设试点工作的通知》（2017）、《国家适应气候变化战略2035》（2022）、《关于深化气候适应型城市建设试点的通知》（2023）等文件，将缓解城市热岛效应列为城市规划应实现的重要目标，并要求在2020年普遍实现将气候变化相关指标纳入城乡规划体系，2030年城市应对高温等灾害能力显著增强。然而，到目前为止，上述行动计划及工作方案中的部分内容尚未落实，很重要的一部分原因在于我们对气候风险（尤其是高温）的认识还存在一定不足，使得相关具体的政策措施难以落实。

1.2　脆弱性的概念及内涵

脆弱性（vulnerability）是指个体、系统、组织或社会在面对外部冲击、压力或变化时，所表现出的易受损或难以抵抗的状态或特性。这一概念在许多学科都有所应用，如金融、安全、公共健康、经济发展、自然灾害、气候变化等；但是，脆弱性又是一个独立、复合的研究领域，不同学科的研究认知导致人们对脆弱性的内涵难以达成共识（Preston et al.，2011）。Romero-Lankao 等（2011）将不同学派对气候变化脆弱性的研究比喻成“盲人摸象”，甚至在同一研究领域，脆弱性的概念和内涵也在不断变化当中。例如，IPCC（联合国政府间气候变化专门委员会）在早期的评估报告中认为脆弱性主要取决于生态系统的敏感性和适应性，然而 IPCC 在后期的评估报告中将暴露度也纳入对脆弱性的考量当中。总体上来看，脆弱性研究维度的差异，直接导致不同学派对脆弱性的概念认知和对构成要素等方面的认识存在较大分歧。

1.2.1　气候变化视角下的脆弱性内涵

（1）自然脆弱性与社会脆弱性概念辨析

气候变化相关文献中的脆弱性定义通常分为两种。一种观点是将脆弱性视为某个特定气候相关事件或灾害对系统可能造成的（潜在）损害的程度（Jones et al.，2003）。这种观点来源于基于灾害及其影响评估的方法，往往忽视或弱化了人群在调节灾害事件结果中的作用。气候变化影响研究通常考察诸如海平面上升导致的受洪水威胁人口数量增加等因素（Nicholls et al.，1999；Muis et al.，2016），因此重点关注人群暴露于灾害的情况，而不是人们在灾害发生时应对灾害的能力。灾害和影响评估方法通常认为，人群的脆弱性是由其所暴露的物理灾害性质、灾害发生的可能性或频率、人群暴露于灾害的程度以及系统对灾害影响的敏感性所决定的。这种观点在 IPCC 第三次评估报告给出的主要脆弱性定义中

得以体现。综合起来，这种脆弱性是灾害、暴露度和敏感性的函数，可称为物理或生物物理脆弱性（biophysical vulnerability）[①]。使用“生物物理”这个术语，是因为它既暗示了与灾害性质及其一级物理影响相关的物理成分，也暗示了受影响系统的属性，这在一定程度上放大或减少了灾害带来的损害。生物物理脆弱性关注灾害事件的最终影响，通常以系统因遭遇灾害而经历的损害程度来衡量。

另一种观点则将脆弱性视为在系统遭遇灾害事件之前存在的一种状态，这来源于对使人类社会和社区易受外部灾害损害的结构性因素的研究（Allen，2003）。在这种表述中，脆弱性是系统内在的一种属性，独立于外部灾害存在。对于许多有人类参与的系统，脆弱性可以被视为一种由其内部特征产生的固有属性，这被称为“社会脆弱性”（social vulnerability）（Adger，1999；Adger et al.，1999）。社会脆弱性由贫困、不平等、边缘化、食物权利、保险水平和住房质量等因素决定（Blaikie et al.，1994；Adger et al.，1999；Cross，2001）。社会脆弱性一直是实地研究和脆弱性制图项目的主要关注点，这些研究通常致力于识别社会中最脆弱的人群，并考察在可能经历类似灾害的地理单位之间或内部的脆弱性差异（Downing et al.，2003）。在这种表述中，灾害与社会脆弱性的相互作用会产生一个结果，通常以物理、经济损失或人类死亡、疾病来衡量（Brooks，2003）。因此，社会脆弱性可以被视为生物物理脆弱性的决定因素之一。

社会脆弱性的性质取决于暴露于该人群的灾害性质。虽然社会脆弱性并非灾害严重程度或发生概率的函数，但人类的社会属性会使其对某些类型的灾害更加敏感。例如，住房质量将是社区（社会）脆弱性的重要决定因素之一，特别是在面临洪水或风暴时，但在面对干旱时则影响较小。因此，虽然社会脆弱性不是灾害的函数，但在某种程度上仍然与灾害相关，故仍需问：“谁或什么对什么脆弱？”尽管如此，某些因素，如贫困、不平等、健康、资源获取和社会地位等可能会决定社区和个人对一系列不同灾害（包括非气候灾害）的脆弱性。所以，可以将这些因素视为社会脆弱性的“通用”决定因素。而其他因素，如住所在河流泛滥的

① 国内有些学者将 biophysical vulnearbility 翻译成自然脆弱性。

平原或低洼沿海地区的位置，则可以被视为仅针对某些特定灾害（如洪水）的“特殊”决定因素。

综上所述，生物物理脆弱性（自然脆弱性）是特定类型灾害发生的频率和严重性（或发生概率）的函数，而社会脆弱性则不是。灾害如果发生在无人居住的地区或人类已经适应的地区，可能不会造成任何损害。当生物物理脆弱性（自然脆弱性）被视为结果（灾害与社会脆弱性相互作用导致的损害）时，一个未因灾害遭受净损害的系统可能会在事后被解释为对该灾害“无脆弱性”。对于这两者之间的区别与联系，国内学者周利敏（2015）有过更精简的辨析，她认为生物物理脆弱性（自然脆弱性）由极端事件本身决定，如灾害发生频率、灾害强度和空间影响范围等。社会脆弱性则取决于影响个人或团体受灾概率与灾后恢复能力的社会特征，体现了社会的不平等（表 1–1）。

表 1–1　自然脆弱性与社会脆弱性的概念辨析

脆弱性类别	评估方式	决定因素
自然脆弱性	一种特定类型灾害的频率与强度的函数	灾害本身、灾害的强度、灾害发生时暴露的人口
社会脆弱性	可以决定灾害事件强度或结果的所有因素	环境变量、暴露尺度、人群特质

来源：周利敏，2015。

（2）风险与脆弱性概念辨析

需要注意的是，气候变化视角下的脆弱性（vulnerability）概念与自然灾害（hazard）评估下的风险（risk）概念在很多情景下类似，不同文献有时也将这两者等同看待，甚至在 IPCC 定义中所描述的生物物理脆弱性（自然脆弱性）与自然灾害文献中详细阐述的风险概念也有许多共同点，这时常给研究人员和政府决策人员造成困扰。

针对风险的定义，其本质是概率性的，这涉及以下两种情况：①触发灾害或一系列具有不良后果灾害性事件发生的概率；②灾害或后果发生的概率，结合了灾害事件发生的概率与对灾害可能产生的后果的考虑。尽管在某些文献中，灾害是表示触发事件还是这种事件的结果尚有一些模糊之处。Jones 和 Boer（2003）

明确以物理术语定义灾害。Stenchion（1997）和 UNDHA（1992）则以类似方式定义灾害，即将其作为可能引发灾难的事件，它本身并不构成灾难。但当脆弱性被纳入风险定义时，它被视为与灾害不同的概念。在这种情景下，风险可以被定义为灾害（hazard）和社会脆弱性（social vulnerability）的函数。结果发生的概率取决于灾害发生的概率和暴露系统的社会脆弱性，而后者决定了灾害的后果。

而脆弱性则如前文所说的，通常在 IPCC 和气候变化研究中被简单地描述为某些变量的函数。自然灾害风险评估方法与 IPCC 生物物理脆弱性（自然脆弱性）方法的主要区别在于风险通常用概率来描述。但实际上，强调风险的自然灾害与强调脆弱性的气候变化本质上都是在研究相同的过程。然而，由于术语的不同，这一点并不总是显而易见。两者最终都关注威胁人类的物理灾害，以及这些灾害通过系统属性所调解的结果，这些属性以脆弱性、敏感性、恢复力、应对能力等不同术语描述。将脆弱性进一步分为社会脆弱性和生物物理脆弱性（自然脆弱性），可以使我们更好地理解基于风险的方法与基于脆弱性的方法两者之间的区别和联系。通常情况下，生物物理脆弱性（自然脆弱性）概念与风险概念更加相似，它们基本讨论相同的问题。

将社会脆弱性置于风险的背景下，并将生物物理脆弱性（自然脆弱性）和风险视为大致相等的概念，有助于减少与脆弱性定义相关的混淆，并促进不同背景研究人员之间的沟通。事实上，正如 Brooks（2003）所倡议的“我们可以建立一个新的术语惯例，用‘风险’代替生物物理脆弱性（自然脆弱性），并仅用‘脆弱性’一词指代社会脆弱性”。

（3）起点理论与终点理论概念辨析

为了进一步解释不同学派对脆弱性概念的认知差异，Kelly 等（2000）提出终点理论（end point theory）和起点理论（starting point theory）。终点理论认为，脆弱性是系统依靠自身适应能力或适应性政策来消除气候变化带来的不利影响的能力。例如，IPCC 第三次评估报告（TAR）和第四次评估报告（AR4）给出脆弱性的定义——系统容易遭受和是否有能力应对气候变化（包含气候变率和极端气候事件）产生的不利影响的程度（IPCC，2007；IPCC，2014）。所以，终点理论

将脆弱性看作一种影响（impact）或结果（outcome），具体体现为气候灾害致病致死率、对生态系统的破坏程度或消除不利影响所需的成本等替代指标（Füssel，2010）。起点理论则以脆弱性为出发点，认为脆弱性是由多种因素和过程导致的社会和生态系统易受损害的特征，是一种在不断变化的气候条件下呈现出的无法应对外部压力或变化的属性（梁恒谦 等，2015）。这两种理论之间的差异可以通过研究背景和目的来进一步解释（表 1–2）。部分学者以莫桑比克为研究对象，比较终点理论和起点理论指导下的两项脆弱性研究，发现遵循终点理论的脆弱性研究更倾向于以技术先行的适应性政策为最终解决手段，而遵循起点理论的脆弱性研究更强调促进社会公平、突破片区发展瓶颈等（Füssel，2010）。

表 1–2　终点理论和起点理论解释脆弱性认知差异

维度	终点理论	起点理论
问题起源	气候变化	社会脆弱性
政策背景	气候变化减缓、补偿、技术适应	社会适应、可持续发展
主要解决的政策问题	气候变化减缓政策带来哪些好处？	如何降低社会系统应对气候变化风险的脆弱性？
主要解决的研究问题	不同区域气候变化的预期净影响是什么？	为什么某些群体面对气候变化的脆弱性更高？
脆弱性和适应能力关系	适应能力决定脆弱性	脆弱性决定适应能力
适应能力的着力点	适应未来的气候变化	适应目前的气候变化
分析的出发点	未来的气候变化情景	目前气候变化的脆弱性
主要学科	自然科学	社会科学
分析手段	描述、实证	解释、规范
对脆弱性的理解	全球气候变化在一定水平下的预期净影响	由社会经济因素决定的气候变化脆弱性
脆弱性概念模型	综合模型、风险灾害模型	政治经济模型

来源：Füssel，2010。

（4）气候变化脆弱性评估

脆弱性评估是指评估一个地区、系统或社会群体在面对某一范围内现存灾害或在经过事前评估分析后确定将会发生灾害的脆弱性，并以此决定该地区、系统或社会群体将受到何种影响及该如何面对形成中的灾害。气候变化脆弱性评估研究尚未

形成统一的评估模式，出现了多元的维度构成和评估模型（周利敏，2015）。

不同的分析视角导致不同学派对脆弱性构成维度的认识存在差异（李鹤 等，2008）。德国波茨坦气候影响研究所（Potsdam Institute for Climate Impact Research）的 Füssel（2007）以“研究边界”（scope）和“知识范畴”（knowledge domain）为依据，对脆弱性的构成维度进行分类，识别出不同脆弱性概念模型构成的差异（图 1–5）。Preston 等（2011）针对气候变化领域广泛应用的 4 种概念模型，分析其构成维度的差异。传统的风险 – 灾害（risk–hazard）概念模型更强调危害、系统面对危害的暴露度及其敏感性，但忽略了系统改变敏感性的能力以及脆弱性在社会政治层面体现的内容。相对地，社会脆弱性（social vulnerability）概念模型认为脆弱性根植于社会系统的内部结构，更强调系统内部不同的适应能力。压力 – 释放（pressures and release）概念模型认为脆弱性是独立于气候危害存在的，但气候危害会凸显系统的脆弱性。从自然和社会经济的综合视角来看，脆弱性应包含危害、暴露度、敏感性和适应能力多个维度。扩展的脆弱性（expanded vulnerability）概念模型认为脆弱性应体现各维度之间复杂的相互关系，应包含多重时空维度的因素。

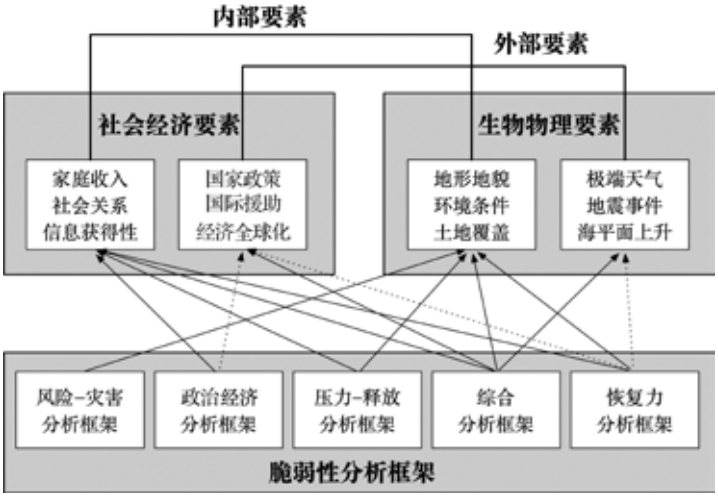


图 1–5　不同脆弱性概念模型的构成维度

（来源：Füssel，2007）

注：实线代表概念模型明确包含的构成维度，虚线代表概念模型可能包含的构成维度。

分析视角强调了评估构成维度的重要性，评估模型则提供了定量评估的方法。随着分析视角的多维度化，评估模型也愈加综合。例如，地方灾害（hazards of place，HOP）空间整合评估模型从三个层面对脆弱性进行评估：①自然层面的评估，强调由自然或灾害本身造成的影响；②响应层面的评估，强调社会结构，包括历史、文化、社会和经济等作用力，着重对灾前社会结构性条件进行评估；③地方层面的评估，认为灾害是特定区域在自然及社会结构层面运作下的产物，是特定社会对灾害的脆弱程度（Cutter et al.，2003；周利敏，2015）。这一模型弥补了以往脆弱性研究只关注自然环境或社会经济系统单一维度的欠缺，通过空间分析技术整合了两方面脆弱性。Turner 等（2003）提出函数关系评估模型，涵盖了暴露度（exposure）、敏感性（sensitivity）及适应能力（adaptive capacity）三大主要维度。其中，暴露度是指某一群体或个体与特定压力、干扰或灾害的接近程度；敏感性是指人类或社会群体在受到特定压力、干扰或灾害影响时，可以与之抗衡或从中复原的能力；适应能力是指人类社会群体对于特定压力、干扰或灾害的抵抗力或恢复力。在气候变化脆弱性评估中，这一涵盖暴露度、敏感性和适应能力三个维度的函数关系评估模型得到广泛使用（Füssel et al.，2006）（图 1–6）。

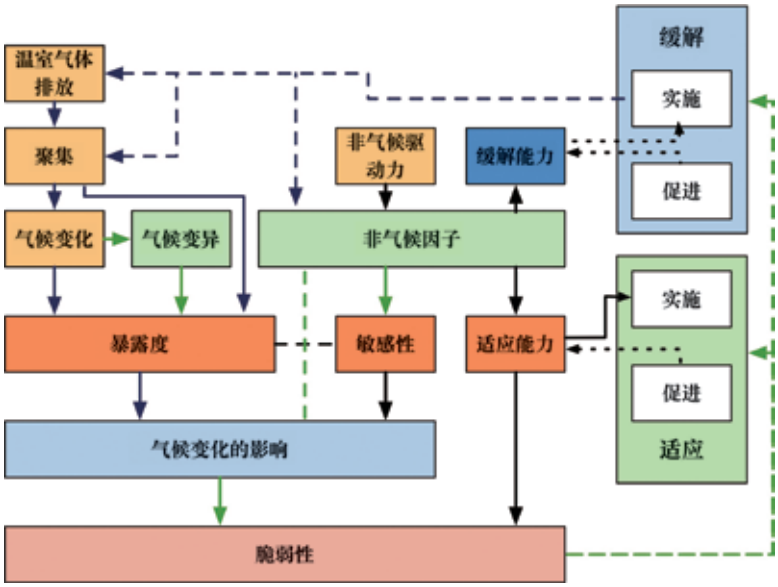


图 1–6　气候变化的脆弱性评估与应对框架

（来源：改绘自 Füssel et al.，2006）

1.2.2 高温视角下的脆弱性内涵

（1）高温的定义及内涵

高温是指持续性的高温引发人、动植物难以适应的一种天气过程。高温的标准主要参考它对人体产生影响或危害的量值制定。由于高温灾害的出现受地理、社会和经济等多方面的影响，加之世界各国和地区研究高温所采取的方法不同，因此现阶段国际上还没有就高温的标准达成共识。现有大部分研究使用气温指标作为基本参考，从持续时间（duration）、发生强度（intensity）两个方面来衡量高温（表 1–3）。

表 1–3 高温定义中所使用的指标及其阈值

定义方式	持续时间／天	强度	高温热浪定义	文献来源
使用最高温度来定义	2	35℃	最高气温超过 35℃，且持续时间在 2 天以上	Wang et al.，2012
	2	37℃	最高温度超过 37℃，且持续时间在 2 天以上	Tong et al.，2010
	3	30℃	最高温度超过 30℃，且持续时间在 3 天以上	Huth et al.，2007
	3	32℃	最高温度超过 32℃，且持续时间在 3 天以上	Hertel et al.，2009
	5 或 3	25℃或 30℃	最高温度超过 25℃，且持续时间在 5 天以上；或者最高温度超过 30℃，且持续时间在 3 天以上	Huynen et al.，2001
	6	30℃	最高温度超过 30℃，且持续时间在 6 天以上	Kovats et al.，2004
使用平均温度来定义	2	90%	超过夏季日均温度的 90%，且持续时间在 2 天以上	Tong et al.，2014
	2	95%	超过夏季日均温度的 95%，且持续时间在 2 天以上	Anderson et al.，2011
	2	97%	超过夏季日均温度的 97%，且持续时间在 2 天以上	Gasparrini et al.，2012
	2	99%	超过夏季日均温度的 99%，且持续时间在 2 天以上	Anderson et al.，2009
	4	97%	超过夏季日均温度的 97%，且持续时间在 4 天以上	Gasparrini et al.，2012
	5	97%	超过夏季日均温度的 97%，且持续时间在 5 天以上	Hajat et al.，2002

来源：整理自 Xu et al.，2016。

关于气温指标，它包括最高气温、最低气温、热指数（heat index）等。不同研究中的评估方法有较大差异，例如 Analitis 等（2014）在高温的研究中使用最高温度和最低温度两个参数，Yang 等（2013）则使用最高温度和平均温度两个参数。在实际应用中，尤其是评估高温对人群健康的影响中，哪些气温指标与人群死亡率关系更紧密尚存有争议。比如，有部分研究指出，平均温度比最高温度和最低温度更能精准预测人群死亡率，因为平均温度代表了 24 小时的温度水平（Chen et al.，2015）。然而，也有学者注意到，在城市的高温中，老年人在夜间暴露于较高的最低温度会显著增加死亡概率，而白天的最高温度则相对来说不太重要（Laaidi et al.，2012）。除此之外，还有学者采用热指数来评估气温对人体的影响，因为热指数同时结合了温度和湿度两个数据，与人体对环境的感受更直接（Budd，2008）。事实上，高温对人群健康的影响机制较为复杂，不仅受城市气候、季节等自然条件的影响，还会受到人群本身年龄、性别、经济等的制约，在没有排除掉这些影响要素前，尚很难评价不同气温指标的优劣性。在研究中，更多的是基于实际考虑，如数据的可获得性与可比性，进而选择最佳的气温指标（Barnett et al.，2010）。

关于持续时间，大部分研究将高温天气持续时间超过 2～3 天作为划定热浪的基本标准，少量研究甚至将其标准划定至 5～6 天以上（Xu et al.，2016）。部分研究者提出，可以结合每日环境温度和高温持续时间，进一步探讨热浪持续时间是否会改变热浪对死亡率的影响（Hajat et al.，2006）。受此启发，一些研究人员开始评估热浪事件是否对人群死亡率具有显著的附加效应，结果发现高温下人群的死亡率确实显著增加了，并且这种附加效应会随着热浪持续时间的延长而增加（Gasparrini et al.，2012）。但是，另外一些研究则发现，在高温的天气下，热浪持续的时间对人群死亡率的增加相对有限（Zeng et al.，2014）。这主要是因为在持续的高温天气中，人的生理机能和行为活动会做出相应的调整来适应高温，比如身体增加排汗、减少室外活动。

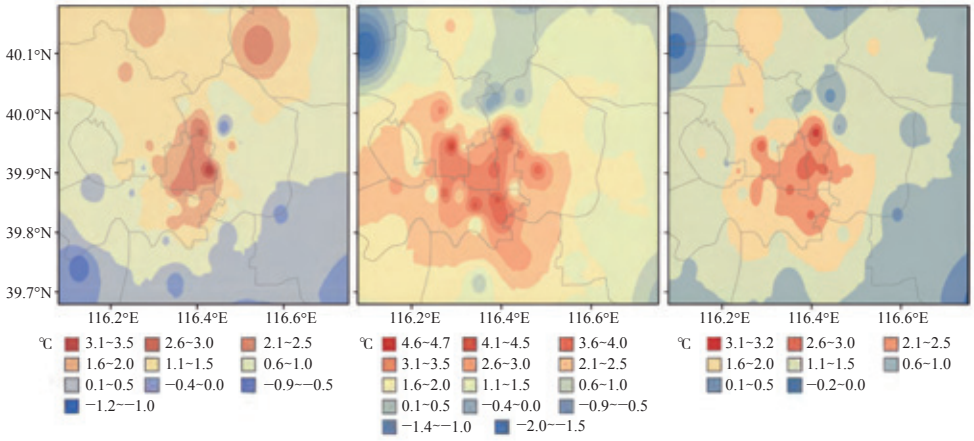
关于高温强度，目前主要使用温度的阈值来定义，它可以分为相对阈值（温度百分位数）和绝对阈值两种。相对阈值主要出现在使用平均气温作为热浪定义

指标的研究中，具体阈值包括超过夏季平均温度的 90%、95%、99% 等区间（Tong et al.，2014；Anderson et al.，2009）。而绝对阈值主要出现在使用最高气温作为热浪定义指标的研究中，具体阈值包括 30℃、32℃、35℃等（表 1–3）。部分研究也证实了随着温度阈值的升高，热浪对人群死亡率的影响也在增大（Tong et al.，2010；Anderson et al.，2009）。从生理角度而言，人体对高温的忍受程度存在一个极限，当气温超过某一阈值后，人体对外散热能力快速下降，进而导致窒息甚至死亡，这也是高温导致人群死亡的主要原因之一。

总体上，高温的定义较为多样，受此影响，不同定义下的高温研究结果会产生较大差异。例如 Xu 等（2017a）综合评估了不同高温定义下婴儿的入院情况，发现当高温的强度超过全年日平均温度分布的 97% 以上时，婴儿的入院率随高温持续时间的增加而上升。然而，他们在另一项研究中则发现，在使用相同热浪强度定义但不同的持续时间时，高温对人群死亡率的影响并没有呈现增加的趋势（Xu et al.，2016）。因此，为确保不同研究具有可比性，同时减少争议，可以在研究之初就统一高温的定义。就我国而言，通常使用中国气象局的定义，即将日最高气温达到或超过 35℃称为高温天气，高温天气持续时间在 3 天及以上则称为高温热浪。

（2）高温脆弱性缘起

由于夏季城市热岛效应会与极端高温产生叠加效应，城市相比乡村地区会受到更强且持续的高温威胁。我国学者对上海地区的研究发现，受到城市热岛效应的作用，相比郊区，城市中心区具有更高的极端最高气温、更多的高温天数、更长的高温持续时间（谈建国，2008）。同时，随着城市的扩张，城市中心区与近郊区的温差趋于稳定，城市中心区与远郊区的温差持续增大。北京地区的相关研究发现，在高温期间，最高气温和最低气温的空间分布均出现了以中心城区为核心的高值区（图 1–7），城市热岛效应对高温强度的放大作用在中心城区最为显著，且对最低气温的影响更大，使得中心城区的居民在白天和夜晚经历持续的高温胁迫（张雷 等，2015）。



（a）北京市高温期间最高气温的热岛强度空间分布　（b）北京市高温期间最低气温的热岛强度空间分布　（c）北京市高温期间平均气温的热岛强度空间分布

图 1–7　北京市高温期间最高气温、最低气温、平均气温的热岛强度空间分布

（来源：张雷 等，2015）

就居民的生理特征和社会经济条件而言，老年人、婴幼儿、患病病人、社会经济地位较低的居民通常属于高风险人群，就空间分布而言，这一群体往往身处或接近高温暴露的主要区域，这无疑加剧了其受高温影响的可能性，凸显了高温影响居民健康的不公平性。在对纽约、芝加哥、洛杉矶（Mitchell et al.，2015）、巴尔的摩（Huang et al.，2011）、香港（Wong et al.，2016）等多个城市的研究中，均得到了低收入、低学历和少数族裔聚集的社区高温期间气温（或地表温度）更高的结论。这一结论主要在美国的城市中得到验证，从侧面说明了美国社会的贫富差异和经济收入水平对居住环境的影响，高风险人群居住的社区通常建筑密度较高，缺少绿色植被、屋顶反光材料和水池等可降低局部气温的设施（Harlan et al.，2006）。同时，他们受自身的收入水平所限，无法负担绿地、草坪等的维护成本（Jenerette et al.，2011），造成绿色植被的调节气温的生态系统服务功能无法发挥，从而增加了这一地区的热岛强度。

系统内部的失衡主要表现在人类对环境的过度破坏、社会内部的权利缺失与不公平、资源配置不合理等人为因素导致的脆弱性增加（谢欣露 等，2016）。因此，从社会正义（social justice）的角度，有观点认为，在应对极端天气等气候变

化灾害的防灾、减灾和救灾的过程中，有限的资源应该向高风险人群倾斜，否则失配的资源供给方式会对他们造成“二次伤害”（Jabareen，2013）。关于2005年的卡特里娜飓风灾害，有研究显示，低收入人群和有色人群在临时住所中居留的时间更长，低收入群体聚居的区域重建进程缓慢，许多原住民甚至无法再回到自己的家园（Bullard et al.，2009）。就高温而言，城市公共绿地就是帮助居民减缓和适应高温影响的重要资源。一方面，绿地植被具有调节气温的生态系统服务功能，能降低周边一定范围内的气温，提高周边居民的热舒适度，同时还可作为高温期间的应急降温场所；另一方面，作为重要的城市公共服务设施，公共绿地还是城市规划配置防灾减灾资源的重要载体。因此，城市公共绿地的供给和空间分布与降低高温风险息息相关。有研究显示，在上海中心城区，老年人、失业者更难接近公共绿地，相反，高社会经济地位的群体享有更优的公共绿地可达性（Shen et al.，2017）。因此，城市公共绿地等降温资源的空间分布应当在惠及全体居民的基础上，适当地向社会弱势群体倾斜，以实现真正的空间匹配。

（3）城市高温脆弱性

高温脆弱性的定义大多参照IPCC提出的“暴露度－敏感性－适应能力”气候变化脆弱性评估框架，从构成维度对高温脆弱性作出定义。例如，杨红龙等（2010）将城市高温脆弱性理解为，高温对城市系统造成的危害程度、城市系统的敏感程度和适应能力的函数。Wilhelmi等（2010）将脆弱性定义为暴露度、敏感性和适应能力三者构成的函数。高温灾害风险的定义同样来自IPCC（2012）发布的报告——《管理极端事件和灾害风险，推进气候变化适应》，该报告认为脆弱性和暴露度是决定极端事件能否构成灾害及其严重程度的重要因素，其中脆弱性指受到不利影响的倾向或趋势。对此，郑菲等（2012）认为，相比IPCC之前的脆弱性定义，风险评估框架下的脆弱性更强调其社会内涵。然而，谢盼等（2015a）则根据“气候变化危害－暴露度－脆弱性”的评估框架对高温灾害风险作出定义，认为高温灾害风险可被理解为高温胁迫、社会脆弱性和人口暴露三者共同作用的结果。

前述脆弱性和风险的关系，实质上可被理解为“气候变化带来的不利影响应由脆弱性表征，还是由风险表征”的问题。例如，Preston 等（2009）对气候变化脆弱性与气候变化灾害风险的关系进行了辨析，认为脆弱性只表征气候变化导致的潜在不利影响，与发生概率（likelihood）相互作用后产生气候变化灾害风险。谢盼等（2015a）认为，高温灾害脆弱性强调特定区域人群健康受到高温灾害威胁的可能概率，高温灾害风险更强调灾害威胁时的可能损失。

总体上，现有对脆弱性定义的干扰主要来自“风险”，两者之间究竟是包含与被包含关系还是并列关系，目前尚无定论，这也是学者们的主要困惑之一。但如果我们撇开这些复杂的关系，采用 Brooks（2003）所提倡的方法，即“用‘风险’代替生物物理脆弱性（自然脆弱性），并仅用‘脆弱性’一词指代社会脆弱性”，那么所有的争论和困惑就都烟消云散了。很明显，高温脆弱性是一个复合的名词，即高温强调自然风险，而脆弱性则强调社会性。将高温脆弱性应用至城市语境时，其一方面是指城市物质空间形态要素受高温天气不利影响的程度，即城市系统的生物物理脆弱性（自然脆弱性），另一方面是指高温天气对人群、社会经济等非物质空间形态要素的不利影响，以及它们对高温的抵抗和适应能力，即城市系统的社会脆弱性。

基于以上认识，本研究将城市高温脆弱性定义为城市居民容易遭受或没有能力应对高温不利影响的程度，它包括城市居民所处的物质空间形态（自然脆弱性）和城市居民本身状况（社会脆弱性）两个维度（图 1–8）。进一步沿用 IPCC 暴露度、敏感性和适应能力框架的话，自然脆弱性主要指城市物质空间在高温中的暴露情况，既包括城市物质空间形态特征（地表覆盖、建筑空间等），也包括城市高温的特征、强度和频率等。社会脆弱性则是指城市居民对高温的敏感性和适应程度，其中敏感性是指城市居民面对高温的外部干扰，自身生理结构发生改变的程度，具体体现为城市居民生理条件的差异，如年龄、性别、种族等；适应能力是指城市居民对高温灾害的响应以及从灾害损失中恢复的能力，具体体现为居民的社会经济水平、认知程度、文化水平等自身能力。除此之外，城市医疗基础设施、信息传播、政府响应等外部条件也可以提高居民对高温天气的应对能力，故

这些外部要素也可以被划分为适应能力。关于城市高温脆弱性各维度指标的具体构成及计算方法，将在第 2 章详细说明。

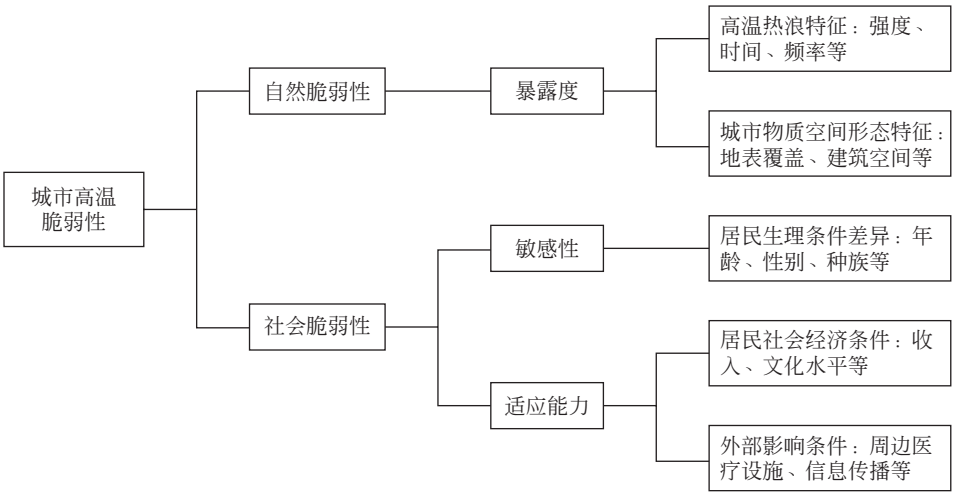


图 1–8　城市高温脆弱性的构成框架

1.3　研究意义

1.3.1　提出跨学科的高温脆弱性研究视角

气候变化不仅对传统的自然灾害风险管理提出了更大的挑战，还对当前的城市规划学科提出了更高的要求，如何应对极端天气灾害已经成为城市规划需要回应的主要问题之一。然而，高温涉及气候气象学、地理学、社会学、人口学、心理学等多个学科领域（祁新华 等，2017）。因此，突破传统城市规划学科的局限，借助其他学科的相关技术方法，成为应对气候变化的城市规划研究的必然要求，多学科的融合也必将促进城市规划学科朝着更为科学化的方向发展（洪亮平 等，2013）。所以本研究对多学科有关高温研究成果的梳理，有助于推进构建跨学科的高温脆弱性的研究视角。

1.3.2　检验高温脆弱性评估的“本地”适用性

面向城市高温的脆弱性评估最早由 Wilhelmi 等（2004）提出，他们总结并分析了高温致病致死的人群个体特征和社会经济因素，进而识别高脆弱人口空间分布的评估流程。随后，多位学者在社会脆弱性指数（social vulnerability index，SoVI）（Cutter et al.，2003）的构建方法和气候变化脆弱性的理论基础上引入城市高温脆弱性的评估研究，丰富了高温脆弱性的研究框架和科学依据。近年来，这一领域逐渐受到国内学者的重视。但需要注意的是，高温脆弱人口特征等因素存在地域差异，同时高温脆弱性的理论基础尚需进一步明确，所以本书将对西方“舶来”的高温脆弱性评估研究进行“本地化”的验证。

1.3.3　关注气候变化背景下的城市脆弱群体

对于不同社会群体对土地使用和管理提出的不同诉求，城市和区域规划的主要职责是从中寻求平衡及调解（Preston et al.，2011），因此关注社会脆弱群体一直是城市规划等学科的研究内容。气候变化作为一种强烈的外部扰动，会进一步凸显社会内部的不平衡。《国家适应气候变化战略》（国家发展改革委 等，2013）提出：“在战略规划制定和政策执行中充分考虑气候变化因素，重点针对脆弱领域、脆弱区域和脆弱人群开展适应行动。”所以，本书通过气候变化和极端天气灾害的视角，关注并刻画城市脆弱群体的个体特征、居住环境和社会经济条件，从而为防灾救灾的精准化实施提供基础依据。

1.3.4　构建减缓和适应高温影响的规划应对框架

城市规划在降低高温对居民健康的风险方面发挥着重要的作用（Milan et al.，2015）。然而，在我国的城市综合防灾规划中，高温等极端天气灾害通常不作为主要的规划研究对象（王昕宇 等，2017）。面对未来城市风险的不确定性，常规

的城市综合防灾规划已在技术方法、系统思维、管控传导等多个方面表现出不适应（石婷婷，2016）。同时，在我国新型城镇化的背景下，城市规划不仅要起到引导城市发展的作用，还承担着实现“以人为本”发展目标的重要角色。构建减缓和适应高温影响的城市规划框架，在一定程度上回答了“如何在城市经济发展和降低脆弱性间寻求平衡”的问题。因此，本书以高温为研究对象，以降低高温脆弱性和增强城市韧性为目标，探索构建减缓和适应高温影响的框架体系，并提出具体的规划设计策略和政策建议。

1.4 研究内容

本书以北京市高温脆弱性评估及规划应对策略为核心，构建了“理论解析—方法建构—实证评估—规划应对”的研究框架，全书共分为七章，各章具体内容构成如下。

第 1 章为绪论，主要阐述研究的选题背景、意义及整体框架。首先，从气候变化与城镇化协同作用的宏观背景出发，指出高温事件频发严重威胁城市可持续发展与居民健康，而城市规划在应对极端气候方面尚存在缺位。其次，明确了研究的理论与实践意义，包括提出跨学科的高温脆弱性研究视角、检验评估方法的本地适用性、关注气候变化背景下的脆弱群体以及构建减缓和适应高温影响的规划应对框架。

第 2 章为城市高温脆弱性评估的理论基础，重点构建研究的理论支撑体系。首先，综述了高温脆弱性评估的目的，包括识别脆弱人口与空间、确定减缓战略以及为规划应对提供支持。其次，梳理了风险灾害导向、脆弱性指数导向及综合导向三种主流评估框架，并确立了以“暴露度 – 敏感性 – 适应能力”为核心的综合评估框架。最后，详细分析了评估指标体系的构成，涵盖人口特征（年龄、健康状况）、社会经济条件（收入、受教育程度）以及建成环境（地表温度、建筑状况）等维度，为后续指标选取提供理论依据。

第 3 章致力于构建科学的定量评估方法论。首先，确立了指标选取的本地性、综合性与可操作性原则，并详细介绍了气象数据、遥感影像、人口普查及社会经济统计等多源数据的获取途径与预处理方式。其次，构建了基于“暴露度 – 敏感性 – 适应能力”框架的指标体系。最后，探讨了数据归一化、GIS 空间分析、综合指数法（如熵权法）及函数模型评估法等具体分析工具的应用。这一章解决了如何将抽象的脆弱性概念转化为可量化、可视化的空间数据的技术难题。

第 4 章以北京市为实证对象，从区和街道（乡镇）两个行政管理尺度展开评估。研究利用熵权法确定指标权重，通过函数模型计算各行政单元的脆弱性指数。结果显示，北京市高温脆弱性呈现“中心高、周边低”的分布特征，西城区和东城区因高暴露度与高敏感性成为极高脆弱区，而外围区则脆弱性相对较低。在更精细的街道尺度上，揭示了核心区，特别是老旧街区（如大栅栏）因人口老龄化和建成环境恶劣而陷入“高暴露 – 高敏感”的脆弱性陷阱，并通过实地调研验证了评估结果与居民实际感受的一致性。

第 5 章进一步引入局地气候分区（local climate zones，LCZ）理念，从更微观的形态单元视角深化评估。首先构建了包含 2 个大类、10 个小类（如高密度高层、高密度低层等）的城市空间形态分区体系，并利用机器学习与多源遥感数据完成了北京市形态分区的识别。随后，定量评估了不同形态分区的脆弱性特征，发现由老旧小区和胡同构成的高密度中层区域与高密度低层区域是高温脆弱性的主要承载空间，其致灾机理源于物理环境的高暴露与社会经济的低适应性双重叠加；而高密度高层区域（如 CBD）尽管物理环境恶劣，但凭借雄厚的经济基础实现了较低的脆弱性。

第 6 章基于评估结果提出了闭环式的规划应对框架。首先建立了包含“脆弱性评估—减缓和适应规划—规划效力评估”的整体应对体系。在减缓规划方面，主张将热环境治理纳入法定规划目标，实施胡同绿化、推广凉爽下垫面等空间干预行动，以降低热岛效应。在适应规划方面，强调建立高温健康风险预警系统，构建“15 分钟纳凉圈”，并通过加强信息传播和自救设备配置提升社区韧性。此外，还制定了规划效力评估机制，通过监测健康数据和公众反馈不断优化规划

策略。

第 7 章对全书进行总结并提出展望。首先，归纳了国内外研究演进历程，总结了北京市在行政单元与形态分区双重视角下的高温脆弱性空间分异规律，特别是中心城区高脆弱性的形成机制。其次，提炼了规划应对的核心策略，即“减缓与适应并重”及“多方参与治理”。最后，客观分析了因数据获取限制导致的评估结果不确定性，以及规划策略尚需实践检验等不足，并对未来深化研究方向提出了展望。

第 2 章

城市高温脆弱性评估的理论基础

城市高温脆弱性评估旨在系统分析城市在高温条件下的脆弱性和风险，帮助城市管理者和规划者识别潜在问题并制定应对策略。这一评估涉及多方面因素，包括人口脆弱性、基础设施的耐受性、环境因素的影响，以及城市应对高温的能力。通过科学和全面的脆弱性评估，城市可以优化规划和建设，提升应急响应能力，从而有效减轻高温带来的负面影响，保障居民的健康和生活质量，增强城市的可持续发展能力。

本章首先借鉴 Wolf 等（2015）对高温脆弱性评估相关文献的综述方法[①]，基于文献来源、研究区域、概念及评估框架、评估指标、是否检验、是否与决策相关等方面的信息，从评估目的、评估框架、评估指标 3 个方面介绍城市高温脆弱性研究的进展及相关理论基础。

2.1 城市高温脆弱性评估目的

2.1.1 气候变化脆弱性评估

《联合国气候变化框架公约》提出，在提高气候变化适应性方面，发达国家应当对发展中国家提供更多的财政支持，尤其是那些受到气候变化不利影响的脆弱国家。于是，气候变化脆弱性评估成为学术研究和公共政策领域的热点话题。德国波茨坦气候影响研究所的 Hinkel（2011）认为，脆弱性评估本质上是为公共政策或决策者服务，即通过指数或地图的方式直观地告诉决策者“哪一类群体属于气候变化不利因素影响下的脆弱人群，这一类人群处在城市的什么位置”。Adger 等（2005）认为，气候变化脆弱性评估可以帮助决策者针对社区或环

① Wolf 等（2015）基于 37 篇有关高温脆弱性评估的文献，从高温脆弱性指数（heat vulnerability index，HVI）的构建方法、指标数据、方法局限或问题、研究与政策的关系等方面进行综述，文章将已有文献按照构建方法分为 3 种类型：第一类是采用先验归纳方法，结果没有检验；第二类是采用先验归纳方法，结果有检验；第三类是对高温死亡数据进行空间化处理，并得到与高温死亡分布显著相关的指标。

境所需提出适应性措施。Hinkel（2011）认为气候变化脆弱性评估的目的主要可以分为以下六类：①确定减缓战略；②识别脆弱人口、地区和部门；③提高应对气候变化的意识；④向高脆弱的地区、部门或群体分配用于适应气候变化的资源；⑤评估适应性政策的实施效果；⑥开展科学研究。

（1）确定减缓战略

通过脆弱性评估来确定有效应对气候变化的减缓战略，其最终目的是减少二氧化碳和其他温室气体的排放，具体可以通过交通、住房、食品、能源、碳捕获及工程等五个领域实现（Lawler et al.，2013）。其中，交通领域的主要战略是提高通勤效率，改变人们的出行方式，以及建设适宜步行和骑行的街区；住房领域的主要战略包括使用可回收的建筑材料、紧凑型社区以及复合的景观；食品领域则主要通过改变人们的饮食结构实现；能源领域的主要战略包括提高能源利用效率、使用风能及水能等清洁能源；碳捕获及工程领域的主要战略包括增强森林固碳能力，以及通过大规模地球工程增加大气层对太阳辐射的反射率，从而降低到达地表的太阳辐射量。

（2）识别脆弱人口、地区和部门

气候脆弱性评估是应对气候变化的关键工具，其中的一个目的是识别那些在气候变化影响下最易受损害的人群、地理区域和经济部门。通过评估，可以深入了解气候变化对社会不同层面的多重影响，揭示哪些人群由于社会经济条件、健康状况或地理位置等因素，面临更大的风险。例如，低收入家庭、老年人、儿童和患有慢性病的人群往往因为缺乏足够的资源和适应能力，难以有效应对气候变化带来的极端天气、疾病传播和生活环境恶化等挑战（Benevolenza et al.，2019）。在地理层面上，气候脆弱性评估能够识别出那些受气候变化影响最大的区域。例如，沿海社区面临海平面上升和更频繁的风暴潮的威胁，洪泛区则更易受到暴雨和洪水的侵袭。而城市高温热岛区域由于密集的建筑和人口，在极端高温事件中可能面临更严重的健康风险（Kim et al.，2016）。在经济部门方面，气候脆弱性评估帮助揭示那些最易受气候变化冲击的行业（如农业、渔业、旅游业）和能源

部门（Schaeffer et al.，2012）[①]。这些行业由于依赖自然资源和环境条件，面对气候变化带来的气温上升、降水模式变化和极端天气事件，可能会出现产量下降、收入减少，甚至面临生存危机。

（3）提高应对气候变化的意识

提高社会各界对气候变化的认知和意识是气候变化脆弱性评估的另一主要目标。通过这些评估结果，社会各界可以更清楚地看到气候变化对人类生活产生的广泛影响，这有助于在公众之间增强紧迫感和责任感。增加公众对气候脆弱性的认识，促使更多人意识到他们在气候变化中的角色和责任，从而推动个人和集体采取更为积极的适应及减缓措施。另外，企业和经济部门也能够通过气候脆弱性评估，更好地认识到气候变化对其运营和供应链的潜在影响，从而采取必要的措施来降低风险。这不仅有助于增强企业的长期韧性，还可以推动更加可持续的商业实践和创新。

（4）向高脆弱的地区、部门或群体分配用于适应气候变化的资源

气候脆弱性评估的另一个核心目的在于通过科学的方法识别和量化高脆弱的地区、部门或群体，以便更有效地分配适应气候变化的资源。气候变化的影响并非均匀分布，不同的区域、行业和人群由于其地理位置、经济状况、社会结构和环境条件的不同，面对气候变化时所暴露的风险和承受的压力也存在显著差异。通过脆弱性评估，政府和相关机构可以识别出那些在未来气候变化情景下最易受到负面影响的区域和人群，比如沿海低洼地区、农业主导的经济体、低收入社区和健康状况较差的群体。基于这些评估结果，决策者可以制定更加精准的资源分配策略，将有限的资金、技术支持和政策干预优先分配给最需要帮助的区域和群体。例如，沿海社区可能需要更多的防洪设施和灾害应对计划，农业部门可能需要推广抗旱和抗病的作物品种，而低收入家庭可能需要获得更多的经济援助和健康服务。这种针对性资源分配不仅有助于增强这些高脆弱区域和群体的适应能

① Schaeffer R，Szklo A S，de Lucena A F，et al. Energy sector vulnerability to climate change：a review［J］. Energy，2012，38（1）：1–2.

力，减少气候变化带来的直接损失，还能够通过减少社会不平等、提高社会韧性，促进整体社会的公平与可持续发展。此外，通过优先支持那些最脆弱的区域和人群，气候脆弱性评估还能够帮助决策者和利益相关者制定更具包容性和长期可持续性的气候适应政策。这样的政策不仅关注当下的应急需求，还旨在通过系统性干预，提升整个社会在面对未来气候变化时的应对能力。这种战略性资源分配在全球范围内对实现气候适应目标、降低气候变化带来的损害以及推动社会进步至关重要。

（5）评估适应性政策的实施效果

评估适应性政策的实施效果同样是气候脆弱性评估的重要目的之一。通过定期进行脆弱性评估，决策者可以了解已采取的适应措施在应对气候变化带来的挑战方面是否达到了预期效果。这种评估能够揭示哪些政策和行动在增强社区、部门或区域的抗风险能力方面最为有效，哪些方面还需要进一步改进。例如，通过评估可以发现某一地区的防洪措施是否有效降低了洪灾风险，或者某一农业政策是否成功帮助农民应对了气候变化带来的干旱挑战。通过持续的脆弱性评估，政策制定者可以根据实际效果调整和优化适应策略，确保投入的资源和付出的努力能够最大限度地减少气候变化对社会和环境的负面影响，提升整体适应能力。

（6）开展科学研究

气候脆弱性评估的另一个重要目的是为开展科学研究提供数据和理论支持。通过对不同地区、群体和部门的脆弱性进行系统性分析，研究人员能够深入理解气候变化带来的具体风险和挑战。这些评估为科学研究奠定了坚实的基础，使研究者能够识别关键的脆弱环节，探索气候变化影响的多样性和复杂性，并开发出更加精确的模型和预测工具。此外，气候脆弱性评估还可以揭示研究中尚未被充分关注的问题，指导未来的科研方向，推动创新型解决方案的产生。通过这些评估，科学研究能够更加有针对性地为气候适应和减缓政策提供实证依据，促进全球应对气候变化的科学进步和实践应用。

2.1.2 高温脆弱性评估目的

在当前的气候背景下，气候变化大多是指气候变暖。气候变暖的直接后果是近地表温度升高，进而带来一系列额外的气候灾害，如极端暴雨、台风、干旱等。因而气候变化脆弱性评估所涉及的对象极其复杂，既包括高温事件，又包括洪涝灾害。从研究对象来看，高温脆弱性评估只聚焦高温事件本身，是对气候变化脆弱性评估的进一步细化，其最终愿景是推动相关政策的制定和实施，帮助人们更有效且公平地应对高温灾害事件，降低高温事件对人类的负面影响。基于以上认识，高温脆弱性评估目的主要也可以分为以下 6 类：①确定高温减缓战略；②识别高温脆弱人群及空间；③提高居民对高温风险的认识；④合理分配资源，以提高脆弱人群及空间对高温灾害的抵抗能力；⑤评估高温适应性政策的实施效果；⑥开展与高温相关的科学研究。

但从国内外文献来看，城市高温脆弱性的评估目的并没有完全覆盖以上 6 个方面，主要还是聚焦在以下两个方面：识别脆弱人群的空间分布、为规划应对方案提供支持。

（1）便捷且精准识别脆弱人群的空间分布

便捷指简化评估技术方法，便于决策者在公共政策中的应用；精准指城市高温脆弱性评估结果可以用于预测或验证未来或过去的高温对居民健康的影响，促使决策者提出针对性的策略及措施。因此，便捷和精准是高温脆弱性评估结果由学术研究引入公共政策领域的前提。

首先，是便捷的评估技术。这里需要重点关注制图方法的出现，尤其是基于 GIS 的可视化制图，已广泛应用于城市高温脆弱性评估当中。这不仅因为制图是探索数据和传达结果的重要工具，可以为应对气候变化的政策干预提供参考，而且可视化制图在检测一般空间模式和趋势方面被认为是最有效的。

例如，Smoyer（1998）首次对影响高温死亡的风险因素进行了空间化分析，这为后续研究奠定了基础。Wilhelmi 等（2004）进一步提出基于 GIS 平台评估高温脆弱性并进行高温风险制图，将空间数据分析技术应用于具体问题中。Lindley

等（2006）和 Tomlinson 等（2011）将评估洪水风险的概念框架引入高温风险评估，利用简单的等权重指标综合方法提高了高温风险制图的可复制性。Reid 等（2009）和 Wolf 等（2013）则通过将脆弱性评估结果简化为指数形式，使高温脆弱群体的分布判断变得更加直观。在国内研究中，谢盼等（2015a）将气候变化灾害风险评估框架拓展至高温灾害领域，完成了全国范围区县层级的高温灾害风险制图。Zhu 等（2014）遵循气候变化脆弱性评估框架，采用指数方式评估了区县层级的高温脆弱性。而 Dong 等（2014）基于 Tomlinson 等（2011）调整的风险三角形模型，首次评估了国内城市街道层级的高温灾害风险。Hu 等（2017）通过结合多源遥感数据，大幅提高了高温风险评估的粒度。

随着计算机硬件的进步和易用制图软件的普及，地图的性质正在经历显著变化。这一进展使得高度互动的地图成为数据探索与早期假设生成的有效工具。Monmonier（1989）、DiBiase（1990）和 MacEachren（1994）提出了地理可视化的概念，进一步丰富了数据分析的工具及其应用，使制图手段更加便捷。这不仅提升了高温脆弱性评估的效率，还助力政策制定者更有效地理解和应对气候变化带来的挑战。

其次，是精准的结果验证。国内外学者普遍用高温致病致死案例或高温期间的急救呼叫数据，检验评估结果的预测有效性。例如，Reid 等（2012）研究发现，在正常高温天气和非正常高温天气下，高温脆弱性指数都能较好地反映区域间热致病致死率的分布，但也指出个别地区指数的有效性不显著。Johnson 等（2012）研究发现极端高温脆弱性指数的空间分布，符合高值区实际死亡高于预期死亡、低值区实际死亡低于预期死亡的趋势。Harlan 等（2013）研究发现高温脆弱性指数的第一、第二主成分和地表温度变量构成的模型，能较好地反映 2000—2008 年美国亚利桑那州马里科帕县（Maricopa County）中心城区的热死亡人口分布。Wolf 等（2014）研究发现，高温脆弱性指数能较好地预测整个夏季伦敦市的高温急救呼叫和死亡人口分布。Maier 等（2014）研究发现，高温脆弱性指数与高温死亡率存在显著的正相关关系，随着脆弱性指数的增加，高温死亡人口总数和死亡率增长幅度明显增加。在国内研究中，由于检验数据来源的限制，少有学者对

高温脆弱性评估结果进行验证。Dong 等（2014）通过识别高温年份和非高温年份，大致估算了高温年份相对于非高温年份的额外死亡人数，并在区县层级验证了评估结果的有效性。

（2）为高温脆弱性规划应对方案提供支持

如果说高温脆弱性制图连接了学术研究与公共决策（Wolf et al.，2015），回答了应当在哪里采取应对措施的问题，那么提出基于脆弱性评估结果的规划应对方案，则实现了学术研究与公共决策的互通，回答了实行哪些有针对性的规划应对方案和如何实行的问题。具体分为行动指导框架、公共服务 / 基础设施规划、针对性规划策略三类。

建立行动指导框架，这也是将高温脆弱性评估结果应用于政府政策的途径之一。在具体操作实施层面，Wilhelmi 等（2004）以高温脆弱性和风险制图为核心，提出准备（preparing）、发起（initiating）、发展（developing）、实施（implementing）和总结适应（learning and adapting）5 个闭环式步骤，具体如下。①准备阶段：分析高温历史事件的影响，明确利益相关群体，制定减缓高温影响的规划目标和工作计划。②发起阶段：建立高温灾害风险和脆弱性评估的研究方法，提高利益相关者和公众的高温风险意识。③发展阶段：在利益相关者的参与下，完成高温灾害风险和脆弱性评估地图，设计减缓策略和实时监测系统。④实施阶段：以社区或组织结构为单位，培训防灾减灾等相关技能，调整土地利用规划，降低高温的暴露程度。⑤总结适应阶段：通过利益相关者评价、社会调查等方式，综合评估减缓规划的实施效果，以反馈的形式调整相应策略。Leal 等（2018）认为，高温应对策略应分别从社区和居民两个空间尺度、长期和短期两个时间跨度着手。就居民个体而言，短期的适应策略包括提供空调等降温设备的购买补贴等，长期策略包括培训高温防灾减灾相关知识等；就社区而言，短期适应策略包括保障高温期间纳凉中心（cooling center）的开放时间，长期策略包括实施增强韧性导向的规划设计等。

制定相应的公共服务 / 基础设施规划。Norton 等（2015）提出了旨在降低高

温脆弱性或风险的规划框架，优先在高温暴露和脆弱性双高的区域实施绿色基础设施规划，新增不同类型的绿色基础设施或提升现有绿色基础设施的生态系统服务功能。Bradford 等（2015）针对高脆弱地区，以公共纳凉中心为主要应对方式，从结构式和非结构式两种途径考虑纳凉中心的选址。Houghton 等（2012）和 Boumans 等（2014）相继构建了应对高温健康影响的决策支持平台，在线展示城市高温脆弱性的评估结果和植树等规划行动的成果。

提出针对性的规划策略。Depietri 等（2013）通过对指标的敏感性分析，发现建成环境是影响高脆弱性地区的主导因素，据此提出连接柏林市中心与郊野绿色空间的适应性策略。Boumans 等（2014）和 Vargo 等（2016）模拟了不同减缓措施的应用情景[①]，从减缓措施所需成本、不同群体的获益程度等角度评估了减缓措施对高温脆弱性的有效性。谢盼等（2015a）和陈倩等（2017）针对高温风险等级及其主导因子的差异，划分风险因子主导区并提出针对性的规划策略。

2.2　高温脆弱性的评估框架

城市高温脆弱性的评估框架旨在全面分析城市在高温条件下的脆弱性和风险因素，识别最易受影响的区域和人群，并制定相应的应对策略。通过整合 GIS、遥感数据和社会经济指标，该框架能够提供精细化的高温风险制图和脆弱性分析。该框架不仅关注高温对城市基础设施的影响，还评估高温对人口健康、环境质量和社会经济活动的综合影响。通过科学的评估和数据驱动的分析，城市管理者可以优化资源配置、改进基础设施设计，并制定有效的应急预案和长期适应措施，提升城市的抗高温能力，保障居民的健康和生活质量。受学科背景和评估重点的影响，不同研究中所建构的城市高温脆弱性评估框架存在一定差异，但总体

① Boumans 等（2014）模拟了两种城市植树情景下所需的耗水量，发现新增的耗水量可能会限制这一减缓措施的应用。Vargo 等（2016）发现在高温暴露和脆弱性“双高”区域增加植被、提高不透水面反照率等，会显著降低低收入群体的脆弱性。

上可以分为 3 类：风险灾害导向、脆弱性指数导向和综合导向（图 2–1）。

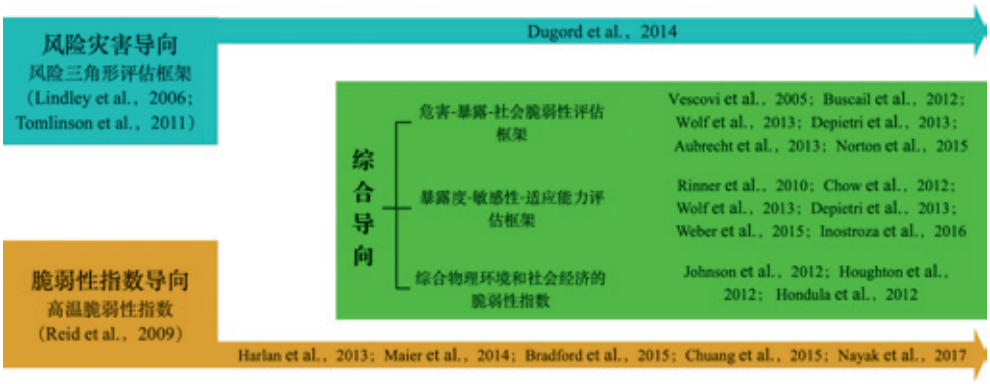


图 2–1　城市高温脆弱性评估框架的分类综述

注：有文献采用了多种综合导向评估内的分支框架，所以对这种文献进行了重复计类。

谢盼等（2015b）对国外的高温脆弱性评估框架，同样从构成维度进行分类综述，但不同的是，谢盼等认为收入、受教育程度、职业等社会经济特征属于敏感维度，本研究认为敏感维度描述的是居民的生理特征，不包含社会经济特征。因此，两者对分类综述的结果可能有所不同。

2.2.1　风险灾害导向的评估框架

传统的风险 – 灾害概念模型强调在外部致灾因子的干扰下承灾体的暴露程度和易感性，将脆弱性定义为承灾系统或个体是否受到致灾因子的外部干扰以及受到干扰的程度（梁恒谦 等，2015）。在该概念的影响下，英国城市环境气候变化适应策略项目（ASCCUE）首次提出将 Crichton 的洪水风险三角模型用于高温灾害风险评估。该模型认为，自然灾害风险产生于危害（hazard）、暴露度（exposure）和脆弱性（vulnerability）三者的相互作用。Lindley 等（2006）基于该模型评估了英国大曼彻斯特地区（Great Manchester）现状及未来的高温灾害风险，模型中的脆弱性由年龄、患病情况等表征。Tomlinson 等（2011）同样基于洪水风险三角模型，提出了针对城市热岛效应的空间风险评估流程，其中脆弱性被认为是“暴露的个体由于自身特征而更容易受到某种危害的影响”（由人口密度、年龄、患病情况、在公寓高层居住 4 个指标表征）。Dugord 等（2014）从暴露度（由人口密度表征）和敏感性（由老年人比例表征）两个维度评估了高温脆弱性。综上可

见，就定义和表征指标而言，上述研究中脆弱性的概念与敏感性更为接近，主要体现居民的生理特征（如年龄、患病情况等）差异，评估框架缺少对社会经济特征和居民适应能力的考虑。

2.2.2　脆弱性指数导向的评估框架

最具代表性的脆弱性指数是 Cutter 等（2003）提出的社会脆弱性指数。社会脆弱性指数综合考虑居民的社会经济等多个维度，通过指数的形式对社会脆弱性进行衡量。基于社会脆弱性指数的构建方法，Reid 等（2009）以高温影响居民健康的实证研究为佐证，筛选出了 10 项面向极端高温灾害的脆弱性指标，计算了全美国的高温脆弱性指数。依据高温脆弱性指数模型的指标构成和构建方法，Aubrecht 等（2013）、Maier 等（2014）、Bradford 等（2015）、Chuang 等（2015）和 Nayak 等（2018）分别在美国多个城市或区域尺度开展了城市高温脆弱性的制图，并提出高温脆弱性指数需要结合研究地区的特征及环境做出相应的调整。

综上可见，脆弱性指数导向的评估框架脱胎于社会脆弱性评估，虽然对脆弱性的内涵理解并不相同，但是构成维度和指标均强调居民的敏感程度及适应能力。这导致高温脆弱性指数容易忽略物理环境要素的影响及高温暴露程度的差异，有可能造成评估结果在管理与实施的过程中出现较大的局限性（谢盼 等，2015b）。例如，Cutter 等（2000）研究发现，高生物物理脆弱性地区和高社会脆弱性地区在空间上并不重合，这说明如果只依据社会脆弱性的评估结果，往往无法识别出真正高风险的地区，甚至可能误导防灾减灾策略的实施。Harlan 等（2013）检验了高温脆弱性指数的有效性，发现结合地表温度等环境变量的模型预测的有效水平更高。因此，综合导向的评估框架得到进一步应用。

2.2.3　综合导向的评估框架

综合导向的评估框架依托原有两类评估框架而来：基于脆弱性指数导向评估框架，高温脆弱性指数由仅刻画居民的生理敏感特征和适应能力，转向综合考虑

高温影响下的物理环境要素和社会经济要素。例如，Johnson 等（2009）研究发现，结合地表温度等遥感数据可以更好地解释极端高温风险在城市内部的分布差异。基于此，Johnson 等（2012a）指出极端高温脆弱性指数在刻画、研究地区环境特征方面的重要性，他们从居民生理、社会经济和环境特征方面选取了 19 项具有代表性的指标，计算得到芝加哥市的极端高温脆弱性指数。结果发现，极端高温脆弱性指数可以理想地体现高温实际死亡的空间分布趋势[①]。Houghton 等（2012）和 Hondula 等（2012）分别在美国其他城市开展了综合导向的高温脆弱性指数计算。基于风险灾害导向评估框架，高温灾害风险评估也由仅强调危害的外部作用和居民的生理敏感特征，转为同时考虑高温危害的外部干扰和居民内部的社会脆弱性。例如，Vescovi 等（2005）通过叠置加拿大魁北克省南部地区的高温危害和社会脆弱性（由年龄、贫困、受教育程度和社会隔离 4 个指标表征）图层，得到了该地区现状和未来高温影响下的居民健康风险分布图。Buscail 等（2012）和 Norton 等（2015）在危害 – 暴露 – 社会脆弱性的框架下，分别开展了法国雷恩市和澳大利亚墨尔本菲利普港的高温风险制图。Dong 等（2014）、谢盼等（2015a）、罗晓玲等（2016）、陈倩等（2017）和 Hu 等（2017）遵循气候变化灾害风险评估框架，从高温胁迫 – 暴露 – 脆弱性角度评估了我国不同地理尺度的高温灾害风险。Wolf 等（2013）、Depietri 等（2013）和 Aubrecht 等（2013）用高温脆弱性代替社会脆弱性，与高温危害整合或叠置，识别出同时处于高温暴露和高温脆弱性“双高”的区域。

在气候变化脆弱性概念的影响下，暴露度 – 敏感性 – 适应能力的综合维度为高温脆弱性评估提供了指标选取的理论依据（Rinner et al.，2010；Chow et al.，2012；Depietri et al.，2013；Weber et al.，2015；Wolf et al.，2013）。Inostroza 等（2016）对智利的圣地亚哥市开展高温脆弱性制图，结合各维度的空间分布差异，分别提

① Johnson 等（2012a）以极端高温期间死亡的 586 个居住人口（实际死亡人口）作为检验数据，分别从极端高温脆弱性指数、地表温度、人口密度和社会经济风险要素构成 4 个预测模型，对每个模型的数值以 2 个标准差进行分段，得到高 – 高风险、低 – 低风险等 6 个分区。根据高温期间总的死亡率得到预期死亡率，通过计算不同模型中相应分区的总人口，得到每个分区的预期死亡人口。分别比较每个分区的预期死亡人口与实际死亡人口的差异显著性，发现 EHVI 模型中有 5 个分区均体现出差异的显著性，并符合高 – 高风险实际死亡更多、低 – 低风险实际死亡更少的理想分布趋势。

出降低暴露度、降低敏感性和提高适应能力的策略。国内学者郑雪梅等（2016）、张明顺等（2015）、Zhu 等（2014）和税伟等（2017）遵循气候变化脆弱性评估框架，分别评估了国内部分城市、区县、街道层级的高温脆弱性。在理论拓展方面，Wilhelmi 等（2010）提出城市高温脆弱性评估框架（图 2–2），从暴露度、敏感性和适应能力 3 个维度构建极端高温脆弱性，强调 3 个维度的具体指标并非一成不变，而应根据高温致病致死案例进行实时调整，同时极端高温脆弱性还会受到外部社会经济环境的变动和适应性措施等多因素影响。

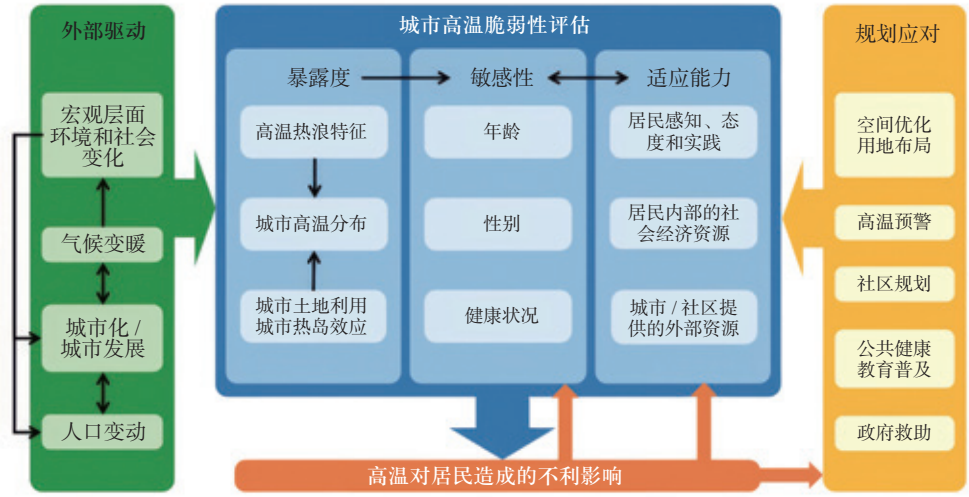


图 2–2　城市高温脆弱性的评估框架

（来源：改绘自 Wilhelmi et al.，2010）

暴露度、敏感性、适应能力和脆弱性存在相互影响和作用。高温暴露程度、城市居民的敏感性分别与脆弱性结果呈正相关关系，即高温暴露程度越高或居民的敏感性水平越高，居民整体的高温脆弱性就越高；居民的适应能力与脆弱性结果呈负相关关系，即适应能力越强，居民整体的高温脆弱性越低。此外，暴露度会影响敏感性和适应能力，从而影响整体脆弱性。例如，高温胁迫会加剧城市居民自身的不稳定性，抵消适应能力的正向作用，从而增加居民的高温脆弱性；相对地，适应能力会影响敏感性，从而影响整体脆弱性。例如，应对和适应高温影响的能力欠缺，加剧了居民自身的不稳定，从而提高居民整体的高温脆弱性水平。

城市高温脆弱性评估、高温的不利影响、外部驱动和规划应对四者同样是相互作用和影响的关系。例如，通过对高温不利影响（如高温致病致死案例）的分析，调整表征敏感性和适应能力的评估指标，从而提高评估结果对未来高温的不利影响预测水平。城市高温脆弱性不仅受到内部因素的影响，还会因外部条件而发生变化。例如，全球气候变暖、区域人口的变动、城市的发展模式等宏观层面的自然、社会、经济环境变化都是脆弱性的背后驱动因素，空间设计和用地布局的优化、高温预警、风险意识的教育普及、政府的补贴救助等规划应对措施，起到了降低区域整体脆弱性的作用。因此，城市高温脆弱性并不是某一时间点的评估结果，而是一个动态开放的评估过程。

2.3 高温脆弱性的评估指标

在气候变化脆弱性评估框架提出暴露度、敏感性和适应能力 3 个维度之前，国内外学者就已经基于高温死亡案例和社会调查进行了大量多角度的研究，并从气候条件、人口特征、行为选择、区域建成环境等方面[①]分别抽出了部分指标（US EPA，2016），识别出高温影响居民健康的关键因素。这也在一定程度上实现了脆弱性这一理论概念的可评估性，但是在“化繁为简”的过程中，脆弱性往往被过度简化（Hinkel，2011），导致替代指标（proxy index）难以刻画复杂的地方社会和文化现象（Preston et al.，2011）。

另外，城市高温脆弱性的构成维度较为复杂，不同领域学者关注的重点存在一定差异。例如地理学领域更关注城市高温脆弱性的时空分布特征，所建构的指标主要涉及建成环境和空间形态等方面。流行病学领域主要关注高温对人群健康

① 美国国家环境保护局发布的《极端高温应对指南》将影响极端高温风险的因素总结为 4 个方面：气候条件（温度升高、相对湿度升高、干燥热风）、人口特征（生理约束、疾病约束、认知障碍、经济约束、社会隔离）、行为选择（不合适衣物、饮水不足、饮酒、室外活动、不恰当饮食）和区域建成环境（地理位置、城市化与城市设计、居住在高层）。

的影响，并通过分析高温致死案例构建高温脆弱性评估指标。这些指标主要涉及人群特征，如种族、年龄、性别和受教育水平。这些指标多种多样，且没有单一通用的综合性指标用于热脆弱性评估。在实际应用中，研究者会根据自身对文献的回顾情况和对人类环境互动的直观理解进行主观选择（Brooks et al.，2005）。例如，Brooks 等（2005）在研究中使用了与气候有关灾害死亡率密切相关的 11 个关键指标：①有卫生设施的居民比例；② 15～24 岁人群的识字率；③孕产妇死亡率；④ 15 岁及以上人群的识字率；⑤热量摄入；⑥言论自由和问责制；⑦公民自由；⑧政治权利；⑨政府效能；⑩ 性别识字比率；⑪ 出生时的预期寿命。这些因素可以分为健康状况、治理能力和教育水平三个大类。Cutter 等（2000）列出了影响热脆弱性的多个因素，包括年龄、性别、种族、社会经济地位、特殊需要群体、居住环境质量和建成环境。此外，Reid 等（2012）在热脆弱性评估指标中使用非白人种族比例，以反映不同种族在热脆弱性上的区别。

总体上，人口特征、社会经济条件和建成环境这三个方面的指标在大部分相关研究中被采用（图 2–3），部分研究则纳入了与健康相关的指标，这也成为评估城市高温脆弱性的主要指标。

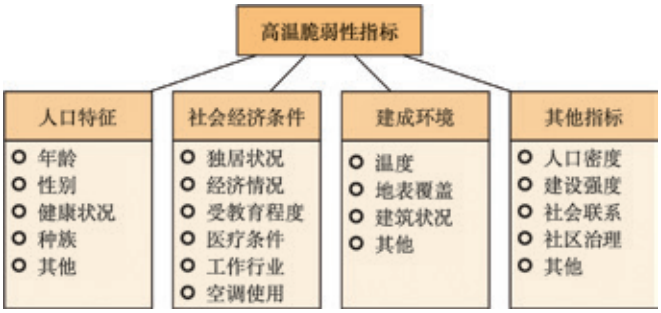


图 2–3　城市高温脆弱性指标涉及的维度及其构成

2.3.1　人口特征指标

居民的自身特征与高温的健康影响密切相关，具体包含居民的年龄、性别、健康状况、种族等特征。

（1）年龄

年龄是温度与健康关系中的关键因素（Hajat et al.，2007），并且影响着体温调节过程：老年人更易受到高温的影响，热死亡率随着年龄的增加而迅速上升（Whitman et al.，2004；Hajat et al.，2007；Hajat et al.，2010）。究其原因，一方面，老年人多受到各种疾病的困扰，如脑血管疾病、心脏病、呼吸系统疾病等会降低病人的自身热调节能力，从而加剧老年人对极端高温天气的敏感程度。一些药物还可能干扰体温调节系统（Hansen et al.，2011）。另一方面，独自居住、缺少必要的医疗保障也是增加老年人高温致病致死率的主要因素（Hajat et al.，2010）。无论人群年龄的大小，因患病、长期卧床、需要照顾的居民在高温期间的死亡率会明显增加（Semenza et al.，1996）。对于老年人来说，生活习惯的改变也可能加剧其脆弱性。在某些地方，许多老年居民由于害怕社区犯罪事件，不敢在晚上开窗通风。随着年龄的增长，老年人的口渴感和饱腹感发生了较大变化，这容易引发他们身体脱水（Farrell et al.，2008）。当这些与衰老过程中经历的生理和认知变化相结合时，老年人在紧急情况下可能有这些特殊需求。老年人的高温脆弱性不仅受生理问题影响，还受他们的心理因素和认知影响。有些老年人家里根本没有空调，有些老年人由于不愿负担高成本而不使用空调设备或不更换损坏的空调设备。即使老年人拥有空调，其使用效果有时难以保障，因为他们由于认知障碍或缺乏知识而错误地在夏天将空调系统设置为加热模式。

流行病学研究表明，除了老年人，孩童对热浪也具有很高的脆弱性（Xu et al.，2014），他们对高温高度敏感主要源于其生理发育未成熟和完全依赖照护者的特性。生理上，婴幼儿的体温调节系统尚未发育完善，汗腺功能弱导致散热能力差（Blum et al.，1998）。儿童（8～9岁）的身体表面积与身体质量比可能比普通成年人高出40%，导致更大的热交换。此外，孩童更高的基础代谢率又持续产生内热，加之心血管系统发育不全，心脏输出血量较低，限制了通过血液循环散热的能力（Turley et al.，1997）。行为上，婴儿及幼儿无法自主调节环境（如饮水、避暑），生存安全完全依赖监护人的意识，若照护疏忽，他们极易陷入险境。

大量实证研究也证实了孩童对高温的脆弱性。西班牙的一项研究发现，热

浪当天，婴儿因消化系统等疾病的死亡风险增加了 53%，其风险激增近 3 倍（Basagaña et al.，2011）。澳大利亚阿德莱德的热浪更导致 0～4 岁幼儿的死亡率上升超过两倍（Nitschke et al.，2011）。此外，婴幼儿在高温下的常见健康问题包括电解质紊乱（因脱水与散热机制失效）、发热（体温调节失控表现）及肾脏负担加重（Nitschke et al.，2011）。

（2）性别

高温对不同性别人群的影响也有所差异，但是国外研究尚未形成统一结论。尽管有研究在对 16 个欧洲国家的死亡率进行调查后发现，65 岁以上男性在夏季的死亡率是同龄女性的两倍（Robine et al.，2012）。西澳大利亚的研究也表明，夏季男性的热相关住院率几乎是女性的两倍（Xiao et al.，2017）。然而，在其他地区的一些研究中，热浪对女性的影响更大，特别是 75 岁及以上的女性（Achebak et al.，2019；Tong et al.，2014）。在芬兰赫尔辛基的一次采访中，有人指出，由于女性的汽车拥有率较低，她们更依赖公共交通服务出行，这可能会增加她们的热脆弱性，因此她们应该被纳入分析中（Räsänen et al.，2019）。此外，一项在瑞典的研究表明，在不同年龄组的研究中，65 岁及以上的男性和女性都会面临由于气温上升而导致的类似风险（Rocklöv et al.，2014）。

（3）健康状况

人群本身的健康状况也与热浪相关的疾病高度相关。常见的五种热病包括热水肿、热痉挛、热晕厥、热衰竭和热射病，其中热射病是最严重的形式（Coris et al.，2004）。当来自环境或代谢过程的热量无法通过体温调节过程有效散发时，就会发生这些疾病。许多研究表明，既往的健康状况和慢性疾病，包括心血管疾病、呼吸系统疾病、脑血管疾病、糖尿病、神经系统疾病和心理疾病，可能加重健康并发症（Josseran et al.，2009）。这些疾病及其相应的医疗反应可能导致更高的脆弱性，因为它们改变了身体调节热量的能力，或降低了患者对热量的意识和反应能力（Loughnan et al.，2013）。这些慢性疾病在老年人群中更为常见。一些热相关疾病研究会将既往疾病史视为一个独立变量，有时以综合指数的形式呈

现，如疾病负担或单一疾病指数。Chuang 等（2015）使用糖尿病住院率作为一个指标，在分析过程中，研究发现其与某些社会经济因素（如种族、低于贫困线的人口）存在正相关关系。部分研究还聚焦了特定的人群在高温环境下的不适情况，如透析患者、慢性健康问题人群（Jennifer et al.，2019）或高血压、心血管疾病人群（Buzási，2022）。然而，由于这些人群的数据通常难以获得，疾病史通常在年龄变量中间接考虑。

（4）种族

种族在高温的脆弱性评估中也可以作为一个重要指标，尤其是在多元文化和多语种的社区中。处于弱势地位的少数族裔可能在使用家用电器或理解热应对指南方面面临挑战（Loughnan et al.，2013）。已有研究表明，种族差异与极端高温脆弱性之间存在显著关联。例如，针对美国的一项实证研究发现，黑人群体在高温期间因肾脏、呼吸系统及热相关疾病导致的住院率显著上升。对此，研究者将其归因于种族间长期存在的健康不平等，即黑人群体的整体基础健康状况相对较差（Gronlund et al.，2016）。另一项针对美国纽约市 1991—2004 年的病例交叉研究亦得出了相似结论：黑人因高温引发肾衰竭而住院的风险是白人及非西班牙裔群体的 2 倍（Fletcher et al.，2012）。此外，在加利福尼亚的相关研究中，也发现黑人面临更高的热健康风险；然而，与白人相比，西班牙裔群体并未表现出明显的风险递增趋势（Hondula et al.，2012），这揭示了种族脆弱性在不同地域及文化背景下的复杂性。

语言障碍同样是高温脆弱性评价中不容忽视的维度，其往往与族裔特征及移民背景交织在一起。这涉及一系列指标，如英语表达能力差、沟通不顺畅以及非官方语言人口比例等（Aminipouri et al.，2016）。需要强调的是，此类变量的相关性及其测量的可行性，或者统计数据的可用性，在很大程度上取决于研究区域人口结构的异质性。若研究对象为单一族裔或单一语言社区，人口学层面的语言指标在热脆弱性评估中的统计解释力将显著受限，甚至失去评价意义。

2.3.2　社会经济条件指标

社会经济状况反映了受热浪影响人群是否能够获得足够的资源、信息和支持，深入探讨社会经济状况与高温密切相关的特征，有助于制定更有效的公共卫生策略（Harlan et al.，2006）。

（1）独居状况

独居群体及社会凝聚力较低的社区在极端高温事件中往往因缺乏有效支持而面临极高的热风险，这已成为评估热脆弱性的关键维度（Chen et al.，2016）。作为社会孤立的核心指标，单独居住显著提升了老年人群体的受灾风险，这一观点在对 1995 年芝加哥热浪和 2003 年欧洲热浪的分析中均得到了有力证实（Vandentorren et al.，2006a）。在指标构建方面，独居状况还可以通过邻里互助可及性或婚姻状况（如单身、丧偶或离异）等因素进行表征，从而识别出深陷社会孤立困境的高风险个体（Navarro-Estupiñan et al.，2020）。

（2）经济情况

经济情况也与高温风险高度相关。跨区域的实证研究一致表明，高收入群体在热浪冲击下的韧性显著高于低收入群体。针对巴黎、罗马及芝加哥等城市的研究证实，贫困、基础植被匮乏及高犯罪率往往与热相关死亡率呈正相关关系（Michelozzi et al.，2004；Klinenberg，2002）。以韩国为例，其低收入群体的热致死率比普通人群高出 1.3～1.7 倍（Kim et al.，2006）。这种脆弱性的非对称性主要源于资源可及性的差异：高收入人群通常居住在隔热性能更佳且配备空调系统的建筑中，并拥有更完善的医疗保障；而低收入人群则常受困于恶劣的居住环境与防暑设施的匮乏（Johnson et al.，2009）。

学者们还会使用多元化指标来刻画社会经济地位。除传统的收入水平外，房价、贫困指数以及特定文化背景下的社会阶层（如部落和种姓）均被纳入评价体系（Azhar et al.，2017）。同时，研究尺度也从个体转向社区，邻里贫困指数以及城市净收入（Estoque et al.，2020）成为识别空间脆弱区的重要变量。此外，

为了更全面地捕捉社会经济属性，诸如包含收入、教育和职业的社会经济指数有时也被用于复杂的人群高温脆弱性评估中（Loughnan et al.，2013；Xiao et al.，2017）。

（3）受教育程度

受教育程度是衡量居民社会经济地位的一个重要指标，常与收入水平和居住环境质量高度相关。在热相关疾病影响研究中，该指标常通过受教育年限、最高学历、未完成高中学业比例或文盲率来表征（Bai et al.，2016）。一般而言，教育水平显著影响个体对气候变化及高温的响应能力。受教育程度较高的人群往往对健康风险具备更高的认知水平，并更能坚持健康的生活方式（Stanforth et al.，2016）。既有研究表明，低教育水平会显著增加热相关脆弱性和死亡率。例如，Johnson 等（2009）指出，贫困水平（低教育水平为其构成要素之一）与热致死亡率的相关性最高。Michelozzi 等（2004）针对 2003 年罗马高温事件的研究显示，受教育程度较低的居民的额外死亡率高达 18%，而受教育程度较高的居民的额外死亡率仅为 6%。国内学者王爱红等（2017）在对宁波某地的研究中也发现，初中及以下学历居民的中暑发生率较高。Jun 等（2013）对广州高温死亡案例的分析亦得出相似结论，即初中以下学历人口和蓝领工人的高温死亡风险更高。

受教育程度也可以作为描述其他不易量化因素的代理变量，如认知水平、种群。具体表现为，居民对高温的风险认知与自发适应行为之间存在显著关联，认知水平较低的群体的自发适应行为较少，导致中暑等高温症状的发生率较高（王爱红 等，2017）。杜宗豪等（2015）在北京的研究中进一步证实，60 岁以上的老年人及受教育程度较高的人群对高温关注度更高。Harlan 等（2013）在美国菲尼克斯市（又名凤凰城）的研究中显示，空调设施的可获得性与社区贫困水平、受教育程度较低人口比例以及少数族裔（如拉丁裔）集聚程度呈显著负相关关系。

（4）医疗条件

医疗服务的空间可及性也在高温脆弱性中发挥关键作用。Ma 等（2012）的研究指出，高温诱发的死亡病例多发生于医院之外，这在一定程度上折射出医疗

保障体系的覆盖盲区或急救响应滞后对脆弱群体的致命影响。距离是制约就医行为的重要阻碍因素，Henneman 等（2011）针对急诊就诊模式的研究表明，地理位置对医疗服务的获取具有显著的门槛效应：绝大多数患者（90%）居住在距离医院 19.3km 的范围内，且随着就诊距离的增加，患者数量呈现明显的衰减趋势。尽管病情危重者往往对远距离就诊有更强的忍受度，但物理距离仍是制约高温急救效率的核心瓶颈。在现有高温脆弱性评估的相关论文中，医疗基础设施指标（如每万人卫生人员数、千人床位数、医疗机构数量 / 密度）已被广泛纳入，该类指标的使用率约为 14%。

除常规的医疗设施外，养老院及老年护理机构因聚集了老龄人群，成为热浪冲击下的重灾区。历史数据佐证了这一观点：2003 年的欧洲热浪期间，法国养老院的热相关死亡率和发病率迅速上升，其死亡率也翻倍（Fouillet et al.，2006）。针对德国养老院的研究进一步显示，一旦气温超过 26℃的阈值，死亡风险便随温度上升呈非线性激增：当最高气温分别处于 30.0～31.9℃、32.0～33.9℃和 34℃及以上时，人群死亡风险分别增加了 18%、26% 和 62%。Loughnan 等（2012）在墨尔本的研究中同样证实，炎热天气下老年人群不良健康结果（adverse health outcomes，AHO）约有 31% 是由护理设施不足所导致的。

（5）工作行业

工作行业也与高温脆弱性高度相关。相关研究表明，户外气温与职业伤害风险之间存在显著的耦合关系，且这种风险受到劳动者的年龄、性别、职业的调节（Varghese et al.，2018）。

建筑业是典型的高温暴露行业，其从业者长时间置身于室外高温环境，导致热相关死亡人数呈逐年上升趋势（Dong et al.，2019）。行业内部的脆弱性亦存在分异：相较于建筑服务业，土木工程子行业的工人面临更高的事故与受伤风险；且年龄具有明显的放大效应，年长工人在热浪期间遭受严重事故的概率显著高于年轻群体（Rameezdeen et al.，2017）。

农业领域同样是高温脆弱性的高发区。Sen 等（2019）的研究指出，鉴于常

规农作活动的高强度体力消耗与户外暴露特征，大量农业工人在作业期间表现出中度到高强度的热应激症状。统计数据显示，在 1997—2013 年的热浪相关死亡病例中，65～94 岁年龄段的农业从业者占比高达近 25%，凸显了职业暴露与老龄化叠加的双重风险。这一规律在中国的本土化研究中亦得到印证，胡梦珏等（2013）针对广东省的实证分析发现，居民中暑风险在职业、收入和地域上呈现显著的统计学差异，其中农林牧渔从业者、离退休人员及低收入群体是主要的高危人群。

综上所述，尽管工作行业并非高温脆弱性评估中一个通用的指标，具有一定的地域依赖性，但在特定情境下，其指示意义不可或缺。对于那些拥有大量户外作业人群或劳动密集型产业的地区，还是有必要将工作行业纳入考量范畴，以便开展精细化的高温脆弱性评估。

（6）空调使用

在夏季，空调的使用无疑有助于减少极端热浪带来的不利影响，进而降低脆弱人群的疾病发生率和死亡率（Braga et al.，2002；Chestnut et al.，1998）。然而，作为一种典型的适应性资源，空调的拥有率与社会经济地位呈现强相关性，这在种族与阶层之间构建了不平等的“热防御壕沟”。例如，O’Neill 等（2005）针对美国四个城市的研究发现，“白人 / 其他”家庭的中央空调普及率是“黑人”家庭的两倍以上。

值得注意的是，空调的大规模应用具有明显的二元悖论特征。一方面，它大幅提高了个体对于高温的适应性；另一方面，它在运行过程中释放的人为废热不仅会加剧局部城市热岛效应，激增的电力负荷还会间接推高化石能源消耗与碳排放，形成“制冷—增温”的恶性循环。此外，过度依赖电力制冷也潜藏着系统性风险：在高峰负荷引发的停电事故中，高度依赖空调的家庭往往因缺乏替代性降温手段而陷入更深的脆弱性陷阱（Maller et al.，2011）。

鉴于分散式空调在能效与公平性上的局限，公共纳凉设施作为一种集体适应策略日益受到重视。综合考虑能源消耗、经济成本及社会公平，集中的纳凉祛暑