

本书的主要研究对象为中国和美国。这两个国家不仅具有广泛且多样的地理环境，而且拥有复杂而庞大的关键基础设施系统，可以比较和分析其在不同气候、地理和经济背景下洪水对关键基础设施系统的影响。

### 3.1 基本原理

本书提出一种失效模型来研究洪水灾害对路网的影响。为了验证该模型的结果，第5章对飓风“哈维”造成的美国休斯敦和得克萨斯州东南部地区的灾难性洪水进行了案例分析。飓风“哈维”造成1250亿美元的损失，主要在休斯敦都会区引发灾难性降雨。由于得克萨斯州的休斯敦都会区人口密集，公路网发达，许多公路被报告为关闭，此外，根据居民报告，事件发生后有多条街道（路段）被洪水淹没（Barron et al., 2017）。利用上述洪水数据 [来自达特茅斯洪水观测站数据集（Brakenridge et al., 2017）]，本书通过对比失效模型计算的失效路段与实际报道的失效路段来验证失效模型。

洪水作为一种特殊而现实的扰动类型，威胁着基础设施系统的鲁棒性（Serre et al., 2018）。洪水具有局部破坏性，在这种视角下这与局部攻击相似。但它与随机攻击也有相似之处。洪水可以影响整个公路网，原因在于：第一，洪水通过河道可以进行广泛的空间扩散；第二，公路网具有三维属性，如高度。为了找出洪水引发失效的独特特征，本研究利用已经被验证的失效模型将洪水对公路系统的影响与随机攻击

和局部攻击进行比较。选取中国大陆和美国的公路网作为案例，原因如下。

### 1) 两者均遭受过极端洪水并造成巨大的灾害损失

全球气候变化导致自然灾害对我国关键基础设施系统的影响越来越大，特别是中国是世界上洪水灾害发生频率最高、受灾人口最多、洪水灾害损失最严重的国家之一（Ouyang et al., 2014）。2008—2010年，洪水灾害影响了中国 2/3 的城市。然而，在 280 个受影响较大的城市中，只有 11% 的城市具备中等到较高的韧性水平，其他城市均为低水平（Committee on Climate Change and China Expert Panel on Climate Change, 2018）。洪水在中国广阔的土地上愈发频繁，且已成为影响交通系统的主要自然灾害之一（Ouyang et al., 2014）。

美国是世界上遭受自然灾害经济损失最大的国家，在 1998—2017 年这 20 年间的直接经济损失总额为 9450 亿美元。洪水灾害在美国各地以高频率发生（van der Vink et al., 1998）。约 4100 万美国居民面临严重的洪水风险（年发生概率为 1%），这一数字是美国联邦应急事务管理署（Federal Emergency Management Agency, FEMA）发布的洪水地图先前估计值的 2.6~3.1 倍（Johnson et al., 2018）。

### 2) 两者的研究区内有不断增加的承灾体

随着市场化改革和对外开放，中国在过去 40 年实现了奇迹般的经济增长，成为世界第二大单一经济体。中国的经济增长可能会降低脆弱性，但也可能由于暴露度的增加而放大灾害损失的风险（Committee on Climate Change and China Expert Panel on Climate Change, 2018）。中国是世界上人口最多的国家之一，人口空间分布极不均衡。黑河—腾冲线即人口地理的分界线（Yue et al., 2003）。该线以东的国土面积不到全国国土面积的 45%，却承载了 96% 以上的人口（Yang et al., 2015）。此外，中国东西部经济发展水平也存在差异。在宜人的自然环境的推动下，中国的

经济中心主要集中于东部地区。此外，中国自 1992 年开始的快速城市化进程导致东西部经济水平、人口和区域关键基础设施发展水平的差异扩大，发展不平衡加剧了中国关键基础设施系统的脆弱性。

2022 年美国的国内生产总值（gross domestic product, GDP）达到了 25.46 万亿美元，相比 2021 年的 23.32 万亿美元，增长了 2.15 万亿美元，增长率接近 9.2%，由于美国人口在 3.3 亿左右，全美 GDP 的大幅增长也使得美国人均 GDP 大幅提升至 7.64 万美元的水平。同时，越来越多的人和社会基础设施集中在灾害多发地区（van der Vink et al., 1998）。

### 3) 区域间关系

在新的国际格局下，尽管中美两国已从合作竞争转向战略博弈，但两国经济仍相互深度依赖，双方在气候变化等非传统安全领域仍保持一定合作。

因此，考虑到气候变化背景下洪水灾害的重大且日益增加的影响和风险，研究中国和美国洪水灾害对关键基础设施系统（公路网）的影响十分迫切，不仅有助于国家的长期可持续发展，还能更好地适应全球气候变化。

## 3.2 研究区概况

### ▶ 3.2.1 中国

#### 1) 地理和行政区划

中国，即中华人民共和国，位于太平洋西岸的东亚地区。中国位于  $3^{\circ}51'N \sim 53^{\circ}33'N$ ， $73^{\circ}33'E \sim 135^{\circ}05'E$ ，国土面积约为 960 万  $\text{km}^2$ ，海岸线长为 1.8 万多  $\text{km}$ ，是世界上国土面积位列第三的国家。中国是一个由 23 个省（河北省、山西省、辽宁省、吉林省、黑龙江省、江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省、山东省、河南省、湖北省、湖南省、

广东省、海南省、四川省、贵州省、云南省、陕西省、甘肃省、青海省、台湾省)、5个自治区(内蒙古自治区、广西壮族自治区、西藏自治区、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区)、4个直辖市(北京市、天津市、上海市、重庆市)和2个特别行政区(香港特别行政区、澳门特别行政区)组成的国家。

## 2) 自然灾害的特点

中国在1998—2017年(共20年)因自然灾害遭受的直接经济损失总额为4922亿美元,位居全球第二位(United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2018)。中国位于环太平洋地震带和地中海—喜马拉雅地震带的交汇处,并且由于构造板块(菲律宾海板块、印度洋板块和太平洋板块)的相对运动活跃,地质活动频繁,加之地形多样、气候条件复杂,是世界上自然灾害多发的国家之一。

自然灾害的形成是自然环境与社会系统共同作用的结果。不同的地理环境诱发了不同的自然灾害,例如,山区地质灾害频繁,如山体滑坡和泥石流。洪水经常发生在平原和盆地。地震等地质灾害多发于山地与平原交界处。海陆交汇处易产生热带气旋和暴雨等气象灾害。从空间分布上看,受季风气候影响,热带气旋多发于东南沿海地区,西南高原地区易发生地质灾害。中国北方是受干旱影响最严重的地区。

中国自然灾害造成的损失具有显著的空间差异。沿海地区自然灾害类型多,灾害损失大,相对损失小;中部地区无论是绝对灾害损失还是相对灾害损失都比较严重;而西部地区的自然灾害损失相对较低,但自然资源破坏严重(Gao, 2003)。

## 3) 经济

改革开放政策促进了中国经济的快速发展,中国国内生产总值从1978年的约1495.5亿美元增长到2017年的12238亿美元,居世界第2位。但2017年的人均GDP仅为8826.99美元,仍处于中下水平(数据

来自世界银行)。受自然环境的影响,中国的经济发展不平衡,产生了较大的区域差异。具体而言,东部地区历史基础深厚,区位条件优越,资源丰富,交通便利,为经济发展奠定了良好基础。在这种情况下,东部地区的经济水平比西部地区发达得多。另外,国家经济政策的执行也存在显著的地区差异。改革开放后,中国的经济政策向东部沿海地区倾斜。新中国成立以来,整体经济发展战略从均衡发展转向非均衡发展,优先发展东部沿海地区。此类政策进一步拉大了东西部地区的差距,不仅使东部和西部地区经济发展差距较大,也使各省之间的经济发展存在显著差异。位于中国东南部的广东 GDP 最高,而位于中国西部的西藏、青海、宁夏等地的 GDP 较低。

#### 4) 交通运输

交通作为典型的关键基础设施类型,是影响国家安全、经济、公共卫生和公共安全的重要物理和虚拟系统或资产。交通基础设施及其空间网络在区域发展中发挥着重要作用,特别是塑造了土地规划和土地利用(Feng et al., 2004)。交通基础设施对区域发展具有积极影响的观点已被广泛接受。

35 个世纪以来,传统的公路和水路运输是我国主要的运输方式,对我国的经济发展和社会进步产生了深远的影响。秦直道在秦代(公元前 221—前 207 年)修建,公路网在汉代(公元前 202—公元 220 年)拓展至西域。自唐代(公元 618—907 年)起,全国各地都建有邮局(Wang et al., 2015)。中国当代交通系统的大部分设施建于 1949 年以后。近年来,中国交通基础设施得到了快速发展,经历了重大的增长和扩张,特别是特大城市区域(Hou et al., 2011)。自 20 世纪 50 年代以来,中国的长途货运和客运严重依赖铁路系统。铁路在经济发展中发挥了重要作用,为市民的福祉做出了贡献(Ouyang et al., 2015),它的发展曾经成为交通枢纽、城市乃至区域经济圈形成的主要驱动力(Wang et al., 2009)。随

着铁路基础设施的快速发展，中国铁路的总长度迅速增加，截至 2022 年底，全国铁路营业里程已达 15.5 万 km。特别是，世界上最长的高速铁路网正在中国建设和部署。公路系统也经历了快速扩张。沪嘉高速公路是中国第一条高速公路，于 1998 年通车。自 20 世纪 90 年代中期以来，积极的财政政策加速了中国高速公路的发展 (Hou et al., 2011)。截至 2022 年底，中国高速公路系统总里程达到 17.7 万 km，稳居世界第一 (中华人民共和国交通运输部，2023)。

### ▶ 3.2.2 美国

#### 1) 地理和行政区划

美国是美洲地区领土面积位列第二的国家，其领土包括美国本土、北美洲西北部的阿拉斯加和太平洋中部的夏威夷群岛。美国本土位于  $24.52^{\circ}\text{N} \sim 49.38^{\circ}\text{N}$ ， $66.95^{\circ}\text{W} \sim 124.77^{\circ}\text{W}$ 。阿拉斯加位于  $52.59^{\circ}\text{N} \sim 71.52^{\circ}\text{N}$ ， $129.99^{\circ}\text{W} \sim 169.91^{\circ}\text{E}$ 。夏威夷群岛位于  $21.3^{\circ}\text{N}$ 、 $157.8^{\circ}\text{E}$  附近。美国是一个由 50 个州 (亚拉巴马州、阿拉斯加州、亚利桑那州、阿肯色州、加利福尼亚州、科罗拉多州、康涅狄格州、特拉华州、佛罗里达州、佐治亚州、夏威夷州、爱达荷州、伊利诺伊州、印第安纳州、艾奥瓦州、堪萨斯州、肯塔基州、路易斯安那州、缅因州、马里兰州、马萨诸塞州、密歇根州、明尼苏达州、密西西比州、密苏里州、蒙大拿州、内布拉斯加州、内华达州、新罕布什尔州、新泽西州、新墨西哥州、纽约州、北卡罗来纳州、北达科他州、俄亥俄州、俄克拉荷马州、俄勒冈州、宾夕法尼亚州、罗得岛州、南卡罗来纳州、南达科他州、田纳西州、得克萨斯州、犹他州、佛蒙特州、弗吉尼亚州、华盛顿州、西弗吉尼亚州、威斯康星州、怀俄明州)、1 个联邦特区 (哥伦比亚特区)、5 个主要自治领土 (美属萨摩亚、关岛、北马里亚纳群岛、波多黎各、美属维尔京群岛) 和各种属地组成的国家。

## 2) 自然灾害的特点

越来越多的人和社会基础设施集中在灾害易发地区 (van der Vink et al., 1998), 使得美国成为世界上遭受自然灾害损失最大的国家, 在 1998—2017 年 (共 20 年), 美国的直接经济损失总额为 9450 亿美元 (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2018)。美国的地形包括山地、沙漠、森林、草原和冻原。由大气、水、火及地表下的力量引发的多种自然灾害在美国时有发生, 其领土上有世界上第二多的活火山。由于各种天气和地质原因, 许多自然灾害包括地震、洪水、飓风、火山、暴风雪、龙卷风、强风暴、野火、山体滑坡、雪崩、干旱、热浪、落水洞 (地表下的水流经过岩石或土壤时, 侵蚀出的洞穴。这种地貌也被称为喀斯特地貌) 等, 都可能对美国构成威胁。

美国不同地区面临不同类型的自然灾害。火山事件的热点地区在阿拉斯加州、加利福尼亚州和夏威夷州; 野火在西部各州较为常见; 暴风雪在中西部和东北部最为频繁; 而飓风和热带风暴则主要影响美国东海岸和墨西哥湾沿岸地区, 洪水则在美国各地均有发生 (Baggaley, 2017)。自 1980 年以来, 登陆飓风造成的损失占美国本土全球灾难损失的 2/3 以上 (Weinkle et al., 2018), 佛罗里达州是飓风多发地区。

## 3) 经济

2007 年, 美国经济陷入低迷, 次贷危机爆发。随着 2008 年雷曼兄弟 (Lehman Brothers) 等多家金融机构破产、合并或被政府接管, 美国次贷危机迅速升级为 1929 年大萧条以来最严重的国际金融危机。实施大规模刺激计划后, 美国的经济和金融形势开始好转, GDP 从 2009 年下半年开始持续增长。2010 年, 美国经济继续复苏, 国内生产总值同比增长 2.9%, 经济总量基本恢复到危机前水平。到 2018 年, 美国经济延续了此前的复苏趋势。国际货币基金组织 (International Monetary

Fund, IMF) 估计, 美国经济增长率达到 2.9%, 预计第二年将达到 2.5% (International Monetary Fund, 2018)。失业率已经连续 20 多个月下降, 低于国会预算办公室预测的自然失业率, 并持续处于充分就业状态。2018 年 9 月, 美国失业率降至 3.7%。根据美国劳工统计局的估计, 到 2019 年底, 美国的月平均失业率降至 3.5%, 为 1969 年以来的最低水平。2022 年美国的 GDP 总额达到了 25.47 万亿美元, 相比 2021 年的 23.32 万亿美元, 增长了 2.15 万亿美元, 增长率接近 9.2%, 由于美国人口为 3.3 亿左右, 全美 GDP 的大幅增长也使得美国人均 GDP 大幅提升至 7.72 万美元的水平, 经济发展显著。

#### 4) 交通运输

在交通运输体系发展初期, 水路运输是美国的主要运输方式。南北战争后, 美国的铁路系统迅速扩展到全国各地, 服务于工业的快速发展。由于汽车的发明和美国汽车工业的不断发展, 汽车成为主要的交通工具。美国幅员辽阔, 建成了高容量、高速度的高速公路网, 是世界上最长的高速公路系统之一。美国国家交通运输体系主要依托于这一公路网络体系。

## 3.3 数据源

### ▶ 3.3.1 致灾因子

洪水事件。为了模拟未来的洪水事件, 本书通过输入 3 个 RCP (RCP2.5、RCP4.5、RCP8.5) 下 5 个全球气候模式模拟的全球日径流情景来获得 2030 年、2050 年和 2100 年的日洪水情景。全球气候模式为 CNRM-CM5、CSIRO-Mk3-6-0、GFDL-ESM2M、MPI-ESM-MR 和 MRI-CGCM3。全球日径流数据可从 CMIP5 试验下载 (<https://esgf-data.dkrz.de/>)

search/cmip5-dkrz/)。通过输入这些径流，CaMa-Flood 模型可以模拟未来的洪水情景，如 2030 年、2050 年或 2100 年的洪水情景。

### ► 3.3.2 基础设施暴露度

公路。对于失效模型，从 OpenStreetMap 数据集 (<https://www.openstreetmap.org>) 中选择 5 种主要公路和 4 种公路连接作为原始公路数据集。用网络来表示中国和美国的公路系统，将交叉口表示为节点，路段表示为边。中国公路网包含 1143837 个节点和 944600 条主要边，其最大连通子图有 329802 个节点；美国公路网包含 2231327 个节点和 2191289 条边，其最大连通子图有 1590077 个节点。最大连通子图具有关键的网络功能，本节考虑在最大连通子图中的所有节点。对于单个系统中的集成模型，使用 World Map (<https://worldmap.harvard.edu/chinamap/>) 2009 年的中国地理公路信息，抽象得到的中国公路网由 22613 个节点和 43230 条边组成。对于交互式系统中的集成模型，公路的 GIS 数据来自中国国家基础地理信息中心 (<http://www.ngcc.cn/>)，该数据集中有 1742 条主要公路段。

火车站：本书从谷歌地图收集了中国各省省会城市主要火车站的经纬度坐标。

### ► 3.3.3 其他数据

为了估计区域间的起讫点 (origin-destination, OD) 矩阵，本书从 2016 年公路客运量报告 (中华人民共和国交通运输部综合规划处, 2017) 中收集了 2016 年各省的客运量，从 2017 年中国统计年鉴中收集了 2016 年各省的人口和人均 GDP 数据 (中国国家统计局, 2017)。

中美两国研究区边界分别来自中国国家基础地理信息中心 (<http://www.ngcc.cn/>) 和美国人口普查局 (<https://www.census.gov/>)。研

究区域的数字高程模型（digital elevation model, DEM）和河网提取自 HydroSHEDS（<https://www.hydrosheds.org/products>）。人口密度取自世界网格人口第四版（GPWv4）（<https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-population-density-rev11>）。由飓风“哈维”造成的最大洪水淹没范围的观测数据采集自达特茅斯洪水观测站的数据集（<http://floodobservatory.colorado.edu/Events/2017USA4510/2017USA4510.html>）。本书收集了 TranStar 通过公共媒体（Barron et al., 2017）报道的休斯敦公路关闭和被淹街道（路段）的信息，来源为 <https://www.chron.com/news/houstonweather/hurricaneharvey/article/These-are-the-roads-that-are-closed-in-Houston-12003482.php>。