

海洋与气象防灾减灾体系中社区恢复力的评估与应用

谢立安¹ 管长龙² 谭骏³ 武文²

(1 北卡罗来纳州立大学海洋、大气与地球科学系, 罗利 27695; 2 中国海洋大学海洋与大气学院, 青岛 266100;
3 国家海洋局海洋减灾中心, 北京 100194)

摘要: 自然灾害对于人类所造成的危害和威胁正日益加剧。导致成千上万人死亡以及数万亿美元经济损失的超级灾害频发表明人类面对自然灾害的脆弱性。脆弱性和恢复力是防灾减灾研究中的两个相关的重要概念, 但迄今没有统一的定义。脆弱性是衡量一个系统受灾之后有可能受到的破坏程度, 而恢复力则是衡量一个系统抵御灾害和灾后恢复的能力。受自然灾害影响的系统可分为生态系统、工程系统(房屋设施)和社会系统。对于不同的系统, 恢复力有着不同的具体含义和评估方法。对于一个社区而言, 恢复力包含了抗灾和灾后重建、恢复的能力。恢复力既可以描述一个社区某一时刻的状态, 也可以认为是社区应对自然灾害的一个持续过程, 或者两者兼而有之。不同的定义决定评估方法和评估指标的选择不同。从实用角度讲, 人们更愿意将恢复力看成是一个社区应对自然灾害从灾前防御到灾后重建、应变, 到应对下一次灾害的整个过程。当一个自然灾害发生后, 一个社区应对灾害的脆弱性和恢复力决定是否进一步引发自然灾害以及灾难的程度。在灾害发生以前增强恢复力、降低灾害风险, 以及在灾后反思和改进今后的应对措施, 进一步增强恢复力, 对于社区重建的质量与速度都有着重要意义。

重点评述社区恢复力的评估及其在美国防灾减灾体系中的应用, 并通过飓风安德鲁(Andrew)和卡特里娜(Katrina)个例加以说明。

关键词: 脆弱性, 恢复力, 防灾减灾, 风险管理, 灾害管理

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.003

Community Resilience Assessment with Application to Marine and Meteorological Disaster Mitigation

Xie Lian¹ Guan Changlong² Tan Jun³ Wu Wen²

(1 Department of Marine, Earth and Atmospheric Sciences, North Carolina State University, Raleigh 27695
2 College of Ocean and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100
3 Marine Disaster Mitigation Center, China National Ocean Administration, Beijing 100194)

Abstract: The explosive growth of economic activities in the coastal zone and human exploration of marine resources led to rapid increases of the exposure of human life and property to the threat of marine disasters. As a result, marine disaster prevention, reduction and mitigation become an increasing challenge facing the human society. A risk is a vulnerable condition which may turn into a disaster. Understanding the vulnerability of a region and building resilience are steps that can be taken to prevent a risk from turning into a disaster or to minimize disaster impact. Risk management becomes disaster management when a disaster is eminent, occurring or has occurred. For an eminent disaster, such as those associated with a landfalling tropical cyclone, disaster management decisions depend on solid information from disaster prediction to social, economic, and geographic conditions. During and shortly after the occurrence of a disaster, search and rescue becomes the core of action, followed by recovery and resilience building measures.

In this article, marine and weather disaster management strategies and methods for vulnerability analysis and resilience building are discussed by using past cases as illustrations.

Keywords: risk management, hazard, marine disaster, vulnerability, resilience

收稿日期: 2017年3月23日; 修回日期: 2017年7月4日
第一作者: 谢立安(1961—), Email: lian.xie@yahoo.com
资助信息: 国家海洋局海洋减灾中心项目; 国家重点研发计划项目(2016YFC140140005)

0 引言

联合国世界气象组织(WMO)的调查报告显示^[1], 由于人口在海洋与气象灾害频发的沿海地区高速增长, 海洋与气象灾害对于人类生命财产与生态系统所造成的危害和威胁正在日益加剧。据统计,

2000—2012年各种海洋与气象灾害影响了超过27亿人口，死于灾害的人数超过110万，经济损失超过13000亿美元。根据国际政府间气候变化专门委员会（IPCC）的报告^[2]，由于气候变暖，极端天气灾害将更为频繁。人类将无法避免地面临更频繁的海洋与气象灾害。

当自然灾害发生后，是由社会的脆弱性和恢复力强弱决定是否进一步引发自然灾害、受灾程度及灾后重建的速度。无防御的灾害过程将破坏包括救灾体系在内的社会经济体系，从而削弱应对灾害的能力，使灾害持续发展，恢复过程缓慢，导致恶性循环；而主动的防灾减灾措施可以增强受灾社会体系的抗灾能力和恢复力，减少灾害损失，加速恢复过程。因此在灾害发生以前增强恢复力、降低灾害风险，对于社区的重建质量与恢复速度都有着直接作用。例如在2016年全球由于自然灾害所导致的经济损失就高达2098.6亿美元（<http://catastropheinsight.aonbenfield.com>），超过了全球GDP的2%，严重地消耗了社会可用于灾后重建的社会资源和个人资源，也减缓了社会经济的发展。全球范围内居高不下的灾害死亡率以及财产损失表明人类应对自然灾害的能力还不足，十分有必要采取有效的防灾减灾措施增强社区的恢复力来避免或降低损失。

防灾减灾是个复杂的系统工程，牵涉到灾前防御措施、灾害过程中的紧急应对措施和灾后恢复重建过程^[3-9]。本文旨在评述社区恢复力的评估及其在美国防灾减灾体系中的应用。文章重点介绍社区恢复力的概念，分析方法与计算模型，并通过安德鲁飓风和卡特里娜飓风个例加以说明。

1 恢复力的概念与评估

1.1 恢复力（Resilience）的概念

脆弱性和恢复力是防灾减灾研究中的两个相关的重要概念，但迄今在不同的应用领域这两个概念的定义仍存在极大的差异^[10-11]。比如，IPCC于2007年给出的脆弱性定义是衡量一个系统受气候变化和极端天气现象影响之后有可能受到的破坏程度^[12]。该定义显然将脆弱性与灾害现象本身相联系。IPCC在2012年对脆弱性进行了重新定义，强调了受灾系统本身抵御自然灾害能力的不足，不再与灾害现象本身的强弱挂钩^[13]。恢复力则是衡量一个系统能够抵御灾害和灾后恢复的能力。同样，恢复力在不同的领域有着不同的具体含义。对于一个社区，恢复力则包含了人与自然非线性相互作用状态下的抗灾能力和灾后重建、恢复的能力。

尽管恢复力的概念被广泛地使用，但是对它的理解仍存在一定的不足。例如如何定义并发展那些可以精确地测量恢复力的指标，恢复力的区划图如何定量绘制，又应该使用什么单位来量化恢复力等。只有恢复力的概念框架内包含的各类指标能够明确描述并定量测算，恢复力对于防灾减灾决策才是有益的。

在过去的10年中，已经有许多作者强调需要对调查研究和防灾减灾对策制定中使用的恢复力的概念进行调整^[5-6]。恢复力这一术语曾被描述为“bouncing back”（反弹）的能力，它来自于拉丁词根“resilere”，表示弹跳回来的意思。目前各文献中一致认为恢复力的概念发源于40年前的生态学领域。Holling首先在生态学领域使用并定义恢复力^[14]。Holling定义生态系统中的恢复力为：一个生态系统对于吸收灾害影响并仍然保持其功能的能力的程度。同时他还定义了稳定性（stability）：一个系统在受到短暂的扰动后，回到平均状态的能力。一个系统越是能快速回到平均状态，这个系统就越是稳定。随后他将恢复力和稳定性进行了比较：恢复力和稳定性是一个生态系统两个不同的重要的性质。一个系统可以具有很大的恢复力但却波动得很剧烈，也就是具有较低的稳定性。在Holling的工作之后，涌现出了很多恢复力生态学上的定义。20年后，Holling又重新审视了他的定义，并提出恢复力是受灾系统对灾害影响的缓冲能力或是系统吸收由灾害导致的系统扰动（比如灾害）的能力，亦或是多少量级的扰动可以在一个系统改变自身变量和结构之前被吸收。

总而言之，所有生态学定义都在强调系统不发生改变时可以吸收的扰动量。很明显可以看出当时人们更多地关注系统对扰动的响应以及压力的抵抗能力和恢复到平衡点的速度。尽管在社会系统和生态系统之间存在着明显的行为和结构不同，生态学理论中的恢复力概念还是可以扩展到社会系统。这意味着一个有恢复力（弹力）的社会系统应该能够吸收灾害冲击并且重建，以保证社区保持受灾之前的功能状态。有着高恢复力（弹力）的社会系统应该能够重新调整自身，在初级生产力和经济繁荣等重要功能方面没有明显的衰退。

目前恢复力的概念得到越来越多的关注和认可，并在防灾减灾中广泛使用。在人与自然存在复杂关联的系统灾害管理中，恢复力的重要性日益显著。Timmerman定义恢复力为一个系统或部分系统在灾害事件中吸收灾害影响并重建的能力^[15]。随着Timmerman的工作，越来越多灾害领域的恢复力定义

出现。尽管有了许多定义，但在理论研究和实践者之间却没有一致的概念。McEntire 等认为之所以无法形成一致的普遍适用的概念是因为在不同的社会体系与制度下，不同个人、组群、社区各自拥有着不同程度的恢复力和决定恢复力的要素^[6]。同时，在研究缓慢变化的气候变化问题时人们采用的恢复力概念也往往与研究剧烈的灾害问题时不同。

如图 1 所示，恢复力的概念与脆弱性（vulnerability）和应变力（adaptive capability）在不同的研究中存在差异和相似^[6]。在气候变化研究领域，人们更侧重脆弱性的研究，并将应变力和恢复力作为脆弱性的一部分。Adger^[17]和Birkman^[11]等将恢复力视为应变力的一部分（图1a），另一些人则会将应变力作为确定脆弱性的重要部分（图1b）^[18-19]；Gallopín^[20]和Turner等^[21]则将应变力嵌套在恢复力之中，并将后者嵌套在脆弱性之中（图1c）。在灾害研究领域，人们更重视恢复力的研究，并将灾前防御，灾期的救援和灾后重建等一系列防灾减灾措施作为增强恢复力的重要组成部分。Manyena^[10]将恢复力可以作为防灾减灾措施的结果，因而可视为减少脆弱性的途径（图1d）；更多学者将恢复力视为动态的过程，其中包含了系统对灾害的应变力建设（图1e）。Cutter等^[6]则将恢复力与脆弱性定义为两个部分重叠的独立概念（图1f）。

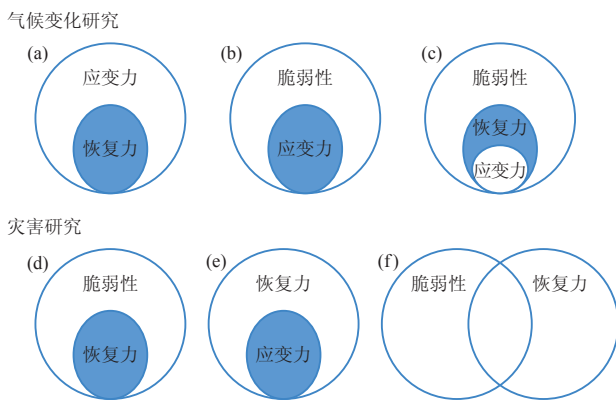


图1 恢复力的定义及其与脆弱性和应变力的关系(a—f)
(根据文献[6]绘制)

Fig. 1 The definition of resilience and relationships to vulnerability and adaptive capability (a-f)^[6]

综观各领域对恢复力的研究，一些作者采用了生态学的观点，并将他们的定义聚焦在一个系统的观点：一个系统的功能性与它自身的重建能力。Pendall 等指出一个系统具有内部和外部两种因素，都可以起到加强系统防灾减灾功能的作用^[22]。众多定义倾向于关注内部因素的改善，从而来加强系统的抗灾功能。此外，采用生态学观点的学者将灾害的恢复力作为一

个过程，而非一种结果或产物。这种观点的优点是，在灾难发生时，它可以对社区的重建过程起到促进作用。也有一些定义采取更长期的动态观点。例如有不少学者将灾害恢复力认为是灾后一个长期重建的过程，即恢复力可以通过其恢复到灾前状态所花费的时间来进行测量。在这种观点下，一个具有恢复力的社区应该能够快速恢复到之前的社会经济发展轨道。

有一些学者将应变力的概念放入在他们的定义中。当在恢复力定义中，应变力的概念起主要作用时，它将更多地考虑受灾和重建过程，这对政策有着重要的影响。这意味着社会系统可以自我重建，来维持基础的结构，并处理包括应对和应变的过程。因此这些学者们认为应变力的概念是合适的，因为它将通过学习与处理来增加社会的抗灾能力。

还有一些学者将灾害恢复力的概念与可持续性的概念联系起来。可持续性是指长期存在且不降低生活的质量。可持续性的一个重要特征就是高度依赖于自然资源。可持续性的观点也是合适的，因为它促进社区资源的可持续性使用。

在某些情况下，恢复力被理解成脆弱性的对立面。这意味着哪里的脆弱性高，哪里的恢复力就低，反之亦然。Klein等提出，按这种方法定义恢复力所引起的难题是它自身将进入一种循环论证中，社区容易受到伤害是因为它没有恢复力，它之所以没有恢复力是因为它易受伤害。这样概念化恢复力无法增加我们对恢复力的理解，因此是不恰当的^[23]。

由于灾害恢复力定义种类繁多并且被许多学科所共享，要有一个统一的定义非常困难。Cutter查阅了美国使用的评估恢复力的各种方法，认为至少有27种^[3]。Sharifi则发现在国际上至少有36种分析和评估社区恢复力的方法^[9]。这些方法从恢复力的定量表达方式可以分为三类：1) 指数法；2) 评分法；3) 工具（包括模型）法。因此在评估恢复力时，在不同的区域内、不同的条件下，需要根据当地的社会结构和灾害管理系统的特征形成一个最适合的定义，选择合适的特征指标来进行评估。

1.2 海岸地带社区恢复力

本节的内容主要取自Lam等的研究^[24]。海岸地区在百年以来已经成为人类发展的中心。海岸，特别是河流三角洲，为建筑、商业、渔业、水产养殖业、农业、林业提供了大量发展机会，还为物流提供了便利。世界人口的40%居住在海岸向内陆100 km的区域，而住在低海拔处的居民更占了世界人口的10%。

20世纪以来，从农村向城镇迁移的人口不断增

加,以2008年为例,美国有20个大城市,城镇区域人口超过1000万,而这20个城市中有14个位于海岸地带。根据USACE(美国规模最大、历史最悠久的水资源管理部门,The US Army Corps of Engineers)统计,到2010年,已经有超过50%的美国人口(1.64亿)居住在沿海地带;此外每年有1.8亿的人来旅游。全球GDP的944万亿美元来自于海平面至1 m海拔地区,1802万亿来自于其余平均海拔5 m的地区。在美国,2000年GDP的约75%来自于沿海地区;沿海州GDP的约50%来自于沿海郡;2004年,所有海岸线邻近郡的GDP为4.68万亿,美国国家海洋经济GDP为1383亿(www.oceaneconomics.org)。沿海地区经济和海洋经济对国家经济而言十分重要,而且占的比重相当大。

沿海地区经济大多是由于连接开阔水域以及商业贸易机会。然而与开阔海域相连,同样也会把社区、资源等暴露在海岸灾害中,例如风暴、洪水、飓风、海啸以及海水侵蚀。灾害事件可以造成人员损伤,摧毁建筑、商业、工业、损坏道路、社区服务,给人类带来极大威胁,但它又是海岸地区正常自然过程的一个部分:温和的海浪构建了沙滩、与海岸进行能量交换、营养物质交换;但强劲的海浪则会侵蚀沙滩、冲刷房屋地基、淹没桥梁与道路、摧毁建筑。

各类飓风、台风、洪水、冬季风暴和厄尔尼诺现象都可被看作是海岸带灾害。这使人们越来越关心海岸带地区灾害,以及如何建设海岸地区才能将未来的灾害最小化。灾害恢复力的概念得到越来越多的认可与使用。社区为人民提供了一系列服务,从供水、废物处理到民防、教育、路面清洁、土地使用规划、环境保护等。在海岸地区,社区还要承担防洪、沙滩保护、近岸水资源等服务。对于海岸地带社区,其恢复力可以从以下6个方面进行测量评估:交通、电力、

水资源、通信、紧急疏散和建筑。

1.3 社区灾害恢复力分析框架

由于人类、社区、社会和自然界存在相互作用,评估社区恢复力是一个复杂的过程。目前存在许多的概念框架用以测量恢复力。如果把恢复力当成一个过程,大多数学者认为恢复力应包括准备(prepare),抵御(resist),重建(recover),应变(adapt)4个阶段。

图2a将恢复力描述成在扰动的作用下,这4个关键过程的循环。准备环节是自然的过程或者是人为活动,是系统为应对下一次扰动所进行的准备。准备工作包括对社区成员的灾害教育、完善基础设施、增加森林或者湿地、维护防洪设施等;抵抗环节是抵抗并吸收扰动,以及维持一定程度的功能性的能力。在这里功能性是指由系统提供的服务,类似于栖息地、疏散路线、遏制洪水和波强度的减小等;如果功能性在一个扰动中有所下降,那么系统就会有重建的过程。如果时间足够长,重建可以是自然的过程,而人为干涉会加快恢复的过程;循环的最后一步即是应变,系统将会在下一次的扰动中有更强的抵抗力以及更快的恢复力。图2b描绘了恢复力概念随时间的一个演化。应变是一个很关键的过程,它使得在面对同样程度的灾害时,系统能有更强的抵抗力和更快的重建过程。对于系统的长期进化,像海平面的改变或者风暴频率、强度的增加,调整的程度将会随着时间变化。

其他许多研究将脆弱性和恢复力的概念联系在一起,一些认为脆弱性延伸的定义中包含着恢复力,而有的认为脆弱性是恢复性的一部分。美国国家研究委员会(National Research Council, NRC)报告中认为恢复力是由脆弱性和应变力共同组成的^[26]。其框架如图3所示。

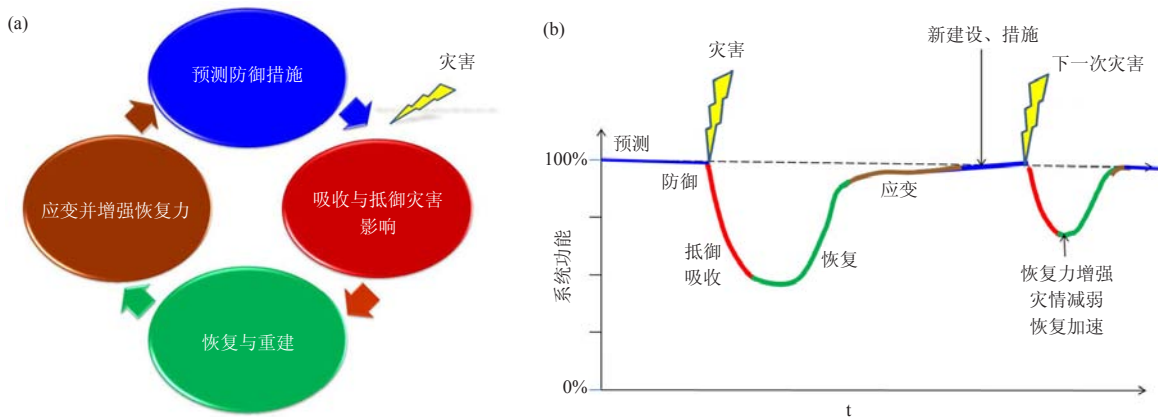
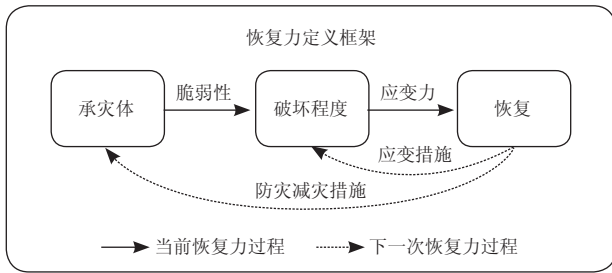


图2 恢复力4个阶段(a)以及恢复力概念随时间的一个演化示意图(b)(根据文献[25]绘制)
Fig. 2 Sketch maps of the 4 stages of resilience (a) and evolution of resilience with time^[25]

图3 NRC恢复力框架示意图^[26]Fig.3 Sketch map of the NRC resilience^[26]

总的来说,大多数框架都以类似的方法对灾害恢复力进行概念化,即都主要关注能够减小脆弱性、增加社区恢复力的因素,包括经济资源、设备与技能、信息与知识、网络支持等。但大部分的框架存在的问题是,往往只关注灾害恢复力的某些或者某一个维度,并没有采用更加广泛的观点。因此构建有效的、全面的、合理的恢复力框架对于恢复力的定义、恢复力的评估测量是一个重大挑战。

1.4 数据的获取以及处理

在确定恢复力的框架后,即可确定恢复力的指标,不同的框架所确定的指标当然是大相径庭的。像对于海岸地带社区的恢复力,指标包括交通、水利、沟通交流、建筑、电力、紧急疏散等几个方面。而在每个指标下,又可以根据当地的特征、实际情况,细分出更多的组成部分(elements)。

一般通过问卷调查或者实地考察获得相关数据,也可从历史资料中进行分析。问卷调查方法简单、成本低、范围广,被各个组织广泛使用,但是也存在缺陷。首先问卷调查存在很大的主观性,没有人能完全客观地回答问题,而更没法保证答案的真实性,不排除被调查者随意作答的情形。实地考察中会有相关专家参与,专业的知识背景使得客观性增强,数据更为精确;但其对人力、财力的需求很大,同时在现实中我们无法对所有地方进行实地调查,对于时间的耗费过大。从历史资料中分析不失为一种简便、客观的方法,但由于随着全球变暖、海平面上升等气候变化,历史的资料未必能反映出未来灾害的模式。

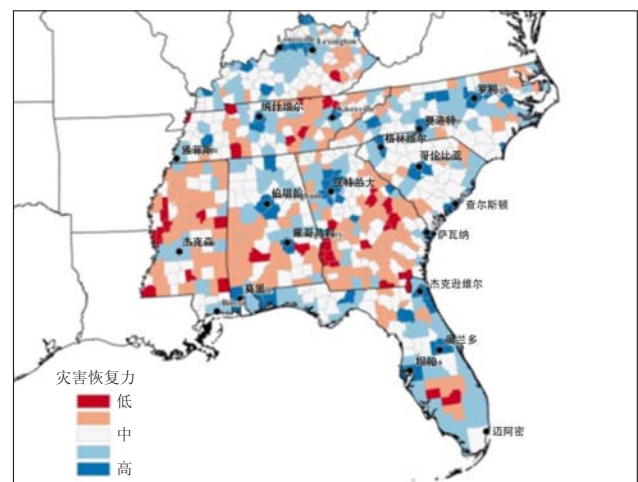
在搜集各类数据后,由于各个因素之间有着不同的尺度、不同的单位,且相互之间还可能存在着相互作用,如何进行汇总、如何将各因素合成一个指标是一个巨大挑战。通常将所有因素的单位都转换成百分比、人均或者无因次量,使得不同因素也可以进行比较或者计算。根据大量研究^[6, 8, 24-25, 27],可以归总为两大类方法。

1) 权重法。根据指标中各因素对指标影响的大

小,进行排序,留下重要因素,舍去次要因素,既可以使得数据处理变得简便,又保证了指标的科学性。根据确定因素权重方法的不同,又可以分成两种方法:主观法、客观法。主观法在筛选因素重要性时,是根据目前研究所达成的一致观点进行排序。此方法与现实能有较好的一致性,但却有着较大的人为主观因素,是人类根据自己的认识、理解,进行权重的分配;而客观法是通过数学方法来研究各因素与指标之间的相互关系,例如计算相关系数、回归分析等。根据数学计算进行权重排序,毋庸置疑排除了人的主观因素,但是却有可能引起偏差:可能存在着与指标的相关系数很大的因素,但现实中可能与指标并无对应关系。若是引入这样的因素,最后得到的恢复力指数不一定能反映真实情况。

2) 无权重法。一些学者认为由于自然界和社会系统存在着复杂的相互关系,并没有明确的证据可以说明哪些因素更为重要,因此认为各因素无权重。统一进行标准化,将每一个指标都转化成范围在0~1的数字,之后再相加。无权重法考虑了所有因素的影响,相比权重法更为全面,但可能存在着某些因素的影响被弱化或者被强化的可能。

在各个指标都计算完成并且标准化后,将其相加便可得到恢复力的指数(resilience index)。根据恢复力指数我们便可以将直观地看到各地区应对灾害的能力(图4)。也可以再进一步分析社会、经济、基础设施、政府资源、民间资源等分别对恢复力的贡献。通过各地区之间各因素的贡献对比,得知哪些地方、哪些方面不足,有待提高;哪些地方、哪些方面做得优秀,值得提倡。为日后灾害做好更充足的准备。

图4 美国东南地区社区恢复力分布(深蓝表示强恢复力,深红表示弱恢复力)^[6]Fig.4 Map of community resilience in the East South of USA (blue denote strong, red indicate weak one)^[6]

2 美国防灾减灾机构

美国灾情调查及防灾减灾主要由各级政府应急管理机构和 社会救灾机构共同承担。联邦政府由联邦应急管理局 (Federal Emergency Management Agency, FEMA) 牵头, 联合其他联邦政府部门 (交通部、中小企业局、美国陆军工程兵、国家海洋与大气管理局、国防部等) 及各级地方政府应急管理部门负责组织协调灾情应急管理^[28, 32]。非政府机构, 包括红十字会、教会、学校、医院等也都在政府应急管理部门指导下参与防灾减灾与救灾工作。本节重点介绍 FEMA 的功能。

为了更好地应对灾害, FEMA 需要做好以下几件事: 1) 增强州政府和当地政府应对灾害的能力; 2) 与其余 26 个为应对灾害提供资源的联邦机构相协调; 3) 直接给予灾害重建的居民援助; 4) 对州政府和当地政府授权财政援助; 5) 领导发放津贴、洪涝区域的管理以及其他能够减轻损害的活动。

大多数人了解 FEMA 是因为它有应对灾害并援助受灾人群的职能。FEMA 另一个重要贡献就是在灾后对于建筑物性能的研究, 从而更好地了解自然事件和人为事件是如何影响建筑环境的。这些研究出于减少灾害死亡数并且减少灾害对当地经济冲击的目的, 而且有助于在灾后重建对灾害有抵抗力的新建筑。

从 1980 年中期开始, FEMA 就派遣灾害减缓评定组 (Mitigation Assessment Team, MAT) 前往总统宣布的灾害区域去评估建筑性能。MAT 研究现行建筑标准的妥善性、其他施工要求, 以及建筑方法与材料。基于受灾地区灾害的潜在类型与严重程度事前资料和预期危险的量级, FEMA 确定潜在需要并派遣一个或者几个 MAT 去观测并评估对于建筑物的损害, 例如由风、降水、洪涝引起的损害。只有当 FEMA 认为来自于现场观测的发现与建议能够提供设计与施工指导, 不仅可以提高受影响州或地区建筑环境的灾害抵抗力, 对于所有灾害易发生区域还有着重大意义时, 才会派出 MAT 去评估。

然而飓风安德鲁和伊尼基带来的巨大损失, 以及之前的飓风雨果、洛马普列塔地震, 使 FEMA 受到了强烈的批评。FEMA 对于飓风安德鲁的应对措施使公众怀疑 FEMA 是否有能力应对巨大灾难, 是否从之前应对飓风雨果和洛马普列塔地震中吸取了教训。

应对严峻灾害的联邦战略之所以不充分, 是由于应对计划不能全面地评估灾害以及灾民的需要; 并且当灾民对于食物、避难所等基础服务的需求超过州或当地的资源时, 计划缺乏相应应对机制。此外包

含了 26 个不同联邦机构的联邦战略在发出灾难的提前预警时无法做出充足准备, 原因是准备活动只有在总统发布灾害宣布后才被明确授权。为了进一步提高 FEMA 应对灾害的能力, 认为 FEMA 需要一个专门的灾难单位, 其主要任务就是为巨大灾难做出计划并应对灾难。这个单位的任务可以是双重的: 首先当发出灾害预警或者灾害一发生时, 需要承担像是估计损害范围、救济需要这样的职责, 使得关键决策者能够有充足的信息来请求和指挥联邦援助; 其次在没有积极从事灾害应对时, 该单位需要对各种各样的巨大灾害持续的制定计划、预报灾害效应。该单位应该包含 FEMA 的核心员工以及其他参与的联邦机构员工。在日常准备工作和实际灾害过程中, 该灾害单位应当与白宫灾害管理办公室紧密联系。

对于强度不是很大的灾害, 红十字会以及众多的志愿者或许可以很好地提供大量服务并且协调其他联邦机构, 就像应对路易斯安那州的飓风安德鲁灾害。在南佛罗里达, 依旧响应飓风安德鲁受灾民众的需要, 为那些从南佛罗里达撤离的人提供庇护, 在灾害后提供庞大的服务。然而在南佛罗里达, 对于这样大量级的灾害, 在直接需求和可以调动的志愿者资源中间存在巨大缺口是不可避免的。对于这样的灾害, 美国国防部 (DOD) 是唯一有能力提供运输和分发充足必需品的部门。

DOD 拥有经过训练的医药、工程人员, 可移动的医疗单位, 食物仓库, 临时庇护所, 意外事故技巧以及指挥能力等。灾难救济活动可以反映出 DOD 战时支持任务: 士兵有着类似的训练经历, 而灾难救济又为士兵提供了额外的训练机会。巨大灾难响应, 类似于飓风安德鲁, 要比军事作战的强度小许多, 因此从短期而言并不会明显影响 DOD 的军队状态。由此可见, DOD 在灾害响应中扮演着非常重要的角色。但是并不提倡将全部的灾害应对、救济、重建工作交给军队。DOD 的首要任务是保卫国家安全, 专职应对灾害必然会妨害到首要任务; 其次如果将防灾减灾工作一味地交由军队处理, 那么军队就有可能插手或者管理国内政策, 这与美国军队不干预内政的指导原则是背离的。

3 美国灾害评估方法

3.1 灾害预评估

3.1.1 灾害应对计划

联邦紧急应对计划 (The Federal Response Plan) 是 FEMA 所设计的应对所有灾害和紧急事件的蓝图。为了在各类灾害、紧急事件发生时能有效提供联邦援助, 这个计划作为合作协定, 由 26 个联邦机构和美国

红十字会共同签署。随着灾害事件的发生,计划本身也在进行调整。1992年的飓风安德鲁事件第一次全面启动该计划。按照计划,当灾害一发生,红十字会主要承担向民众提供食物与避难所的工作,同时还要协调美国国防部、美国农业部以及其他自发组织的职责安排。

FEMA采取联邦应对计划以及州政府接收维持生命的服务和其他公共服务,都要求地方长官获得总统对于重大灾害或紧急事件出现的宣布。在总统宣布灾害出现后,FEMA才可以补充当地政府的资源,而这应该是灾害发生时所采取的第一响应措施。这样的制度也导致了应对计划实施的不及时、效果不如预期。

3.1.2 计划清单

为了促进有效且合适的应对飓风灾害计划以及实行相关措施,建议紧急灾害管理人员采取一系列计划清单措施,这些详细目录对于灾害管理部门事前安排、采取行动等提供了不可或缺的指导。清单包括:总体计划、疏散、培训、资源、设备和信息交互等方面,各政府或灾害应对组织可以根据清单内容来判断当地应对灾害工作是否到位、是否妥当,进而提高对飓风灾害的抵抗性。

这些清单同时也可以提供对于灾害响应措施始终应该理解的一些定义。虽然这些清单不能包含一切,但他们仍可为灾害的计划、评估提供一个总的框架结构以及相关的知识基础。清单对于经验丰富或是缺乏经验的灾害应对部门处理飓风危险的价值在于,清单上的信息都来自于那些对抗过飓风安德鲁的部门和组织。按照计划清单制定相应防灾减灾、评估灾害的相关活动,准备工作会更加充分,响应措施会更加及时。

3.2 恢复力的量化

正如前面所讨论的,目前研究已经意识到一个国家必须增强应对短期灾害和长期气候演变的恢复力,因此就需要有一种可重复的、合理的、易懂的方法来量化恢复力。目前美国有多达27种方法可用于定性和定量评估恢复力^[3],而国际上更有多达36种方法^[9]。本文着重介绍基于专家启发(expert elicitation, EE)的量化法和从数据中推导(data-driven, DD)方法。DD方法又可以分为根据历史资料进行分析的DD-H法和根据计算进行分析的DD-C法。EE是基于不断发展的科学上的一致结论,它更多地用在当存在大量不确定性的时候。当发生罕见事件时,其数据很难获得,时间、费用花费很大,此时多采用EE方法进行分析。当有各领域专家交流、工作透明度高时,EE确实是

一种有效的方法。基于历史数据和基于模拟数据的DD-H和DD-C方法更加有效、易懂,但是也更加耗费时间;如果是用历史数据进行分析,数据集可能因此受到限制,而且比过去扰动更加强烈的未来的扰动无法被考虑到。

3.2.1 EE 方法的应用

美国国家海洋与大气管理局(NOAA)、路易斯安那州海洋研究管理机构、密西西比—亚拉巴马海洋拨款机构对于墨西哥湾社区开发了一个基于EE方法的自测,用来评估社区在经历灾害后是否可以维持并重建其功能性。这个自测提供了相对的恢复力指数,分为低、中、高三级,依据历史风暴和未来更强的风暴会对社区的功能性造成怎样的影响。进行评估的功能性因素包括:关键基础设施、设备、交通运输。该评估对于发现社区薄弱之处有着重要作用,并能督促社区减小缺陷,使得恢复力提高。这个自测的方法优势在于能够简单的使用,并且已经在墨西哥湾北部的许多社区进行了测试,为测量恢复力提供了一种方法。其缺陷是:这种方法只能针对特定的社区,而对灾害的选取也是基于人的主观认识,获得的数据也是根据专家的一致意见,所有这些都可能会对结果造成偏差。

3.2.2 DD 方法的应用

1) BRIC(The baseline resilience indicator for communities)由Cutter等提出^[5],并在随后进行扩展^[27],提供了一种用DD方法去评估社区内在恢复力的指标,通过一种多层面的方法,将社会、经济、制度、社区、环境、基础设施6个子指标进行平均。该方法要求指标的选择、精准数据的采集、恢复力指数的结构、数据转化以及标准化。最终恢复力指标介于0~1,每一个郡的分数相对于其他区域的分数都有意义。

2) Schultz等将DD方法应用于计算海岸工程恢复力^[29]。对一个完整的海岸系统,考虑每一个成分的功能性能(是否稳健)以及恢复性(是否快速)。这个方法基于概率性的分析(DD-C)或者历史的数据(DD-H)。在他们的分析中,Schultz和其他人意识到工程系统其自身是没有应变能力的,在测试时将其从人类干预中隔绝开,只是唯一一种可能使工程系统产生应变的方法。然而他们还讨论认为这种方法能够被拓展应用到其他一些能够自我构建和应变的领域,包括社区系统、生态系统。计算的方法有着一系列的步骤:①定义一个完成海岸系统中的成分;②建立稳健性和快速性的目标,建立易损性曲线,确定每个成分之间的相关性;③确立在系统遭受一系列扰动时,实现稳健性和快速性的概率。研究者意识到这个方法

的概率性应用非常强，对于计算可能会要求大量的时间。一个非概率性的方法也能够被应用去测量系统的恢复力，即通过分析直接指标（例如在历史灾害发生时或之后的重建阶段，历史事件的数据）或者间接指标。这些非概率方法能够更加简单地运用且容易交流。但只能提供数量有限的历史事件的性能以及恢复力。

3.2.3 USACE 分层结构

美国陆军工程兵团（US Army Corps of Engineers, USACE）根据国会的批准进行了一系列的研究。利益相关者以及合作伙伴会提供一系列可能的备选因素，这些因素都遵循关于选项子集的基础分析。最初结果将会被应用于一个实验性的计划。一旦这个实验性计划表现良好，并且国会批准更进一步的研究，更多细节性的可实行验证的研究将展开。最终根据利益相关者和合作伙伴提供的支持以及实证分析，备选因素将有可能应用于最终的设计与施工中。USACE同样也负责海岸系统的使用和维护，包括沉淀物的疏浚和布置，海岸建筑物和项目的重建。

为了测量海岸地区的恢复力，提出了包含三个测量方法的分层结构。层级1基于Linkov等^[30]的工作，在文献[31]中被提出。其采用EE方法进行恢复力的计算，在确定输入项、优先顺序方面有较大优势。层级2是一种正在发展的评估方法，它基于经验数据、简单模型、社区评估（由层级1提供）、现场数据，因此是DD-C或者DD-H方法。若是考虑到未来的情形，可将EE方法用于对假设强迫条件的外推。基于层级1所提供的社区评估结果，层级2将被应用于可行性层级的评估，来量化系统尺度的恢复力，这与实验性计划和所有校正相关联。层级3是利用了基于Schultz等提出的概率性分析方法的一个严格评估^[29]。它对于可行性的研究、操作、工程设计是恰当的。

Rosati等初步研究了针对于层级1和层级3的适用性^[25]。研究区域选择了牙买加湾，其原因如下：①牙买加湾有着活跃的社区、生态学和设计的基础设施，能提供综合的测试；②那有着许多正在持续的针对飓风桑迪的评估和研究。这些研究为NGO和外部机构数据、建议的合作提供了可能。

层级1分析关注在牙买加湾的生态系统、建筑物、避难所的功能性。对于这些功能性，从4个系统特征进行评估：准备、抵抗和吸收损害、重建、应变。这4个特征包括了物理系统、数据分析方法、决策支持系统、交流和社会系统等方面。结果表明生态系统总体来说有着中到高的恢复力，但在应变相对海

平面高度时表现较差。建筑和庇护所被列入中到高恢复力，其决策支持系统和重建功能性被列入低标准，其原因是重建所需时间、信息沟通指导、分散的经济支持、用于安置被疏散人口的庇护所不充足，缺乏对于气候变化的指导计划。

层级3关注于对于人身安全、住宅、公共事业（饮用水、废水处理、电力）和交通的社区功能性评估。3个来增强恢复力的备选因素也被评估，包括广阔的海滩和沙丘系统、湿地的完整修复、顺从率95%的强制疏散规定。应用的数据来源于数值计算的海浪数据、十字形海岸侵蚀模型计算、人口普查、税收资料、关键基础设施等方面。对于每个功能性成分和风暴强度，开发了一个贝叶斯网络来评估满足功能性能（稳健性）和恢复性（快速性）的联合概率。数据在功能性成分如何响应和重建随不同风暴强度变化的方面存在一定局限性。最终结果表明，牙买加湾社区对于25~30年一遇的风暴有着较高的恢复力。公共设施是系统中最脆弱的部分，它阻碍了社区恢复正常运作。而3个备选因素并未明显地提高系统的整体恢复力，其原因是对于通过Rockaway Inlet的风暴潮和洪水，牙买加湾是最容易被影响的目标（图5）。由于大量关于系统性能、损害、重建的数据被综合起来，因此调查结果被当作是这一方法的范例。

基于初步研究的结果，CERB进一步渴望更加深入的研究，测试并且验证快速筛选功能的层级1和层级2评估的有效性，层级2只是被提到但还未经过检测。层级1方法之所以非常吸引CERB，是因为它能够通过一种快速、完善交流的方法来捕获社区的输入因



图5 Rockaway Inlet和Jamaica Bay地理位置^[25]
Fig.5 Locations of Rockaway Inlet and Jamaica Bay^[25]

素。然后，有人担心层级1方法中所包含的主观性会使结果偏差。因此关于这一方法还需要进一步的研究和论证。层级3被认为是合适设计需要的。但一致认为，为了更广泛的使用，层级3中的易损性函数库、损害、回复函数都需要进行公式化。

3.2.4 RIM 方法

RIM (Resilience Inference Measurement) 框架将认为恢复力是一个宽泛的概念(图3)，既包括脆弱性也包括随时间调整的能力。具体而言包含3个成分：暴露(exposure)、毁坏(damage)和恢复(recovery)，以及两个关系：脆弱性和应变力。暴露和毁坏当灾害发生时能够被显著观测到，而恢复却要间接通过人口或经济的增长才能体现。

脆弱性和应变力是3个成分之间的潜在关系。脆弱性是暴露和毁坏之间的潜在关系，而应变力是毁坏和恢复之间的潜在关系。如果一个社区(例如一个县)对于危险有着高暴露(high exposure)，但却遭受很少的损害，则认为社区有着较低的脆弱性；同样地，如果一个社区遭受严重的损害但重建非常快(例如人口返回很快)，则认为这个社区有着较高的应变力。恢复力就是通过这两种方法进行评估的。脆弱性除以应变力的值，越大说明社区恢复力越低，越小说明社区的恢复力越高。

将恢复力划分为4个程度：脆弱(susceptible)、可恢复(recovering)、防御性(resistant)、强恢复(usurper)。脆弱系统是指一个社区在一个扰动之后，如飓风或者大规模洪水，无法完全的重建；可恢复系统意味着社区会遭受破坏，但能够从灾害中完全恢复；一个社区若是其受到扰动较小的影响或者损失，则可以

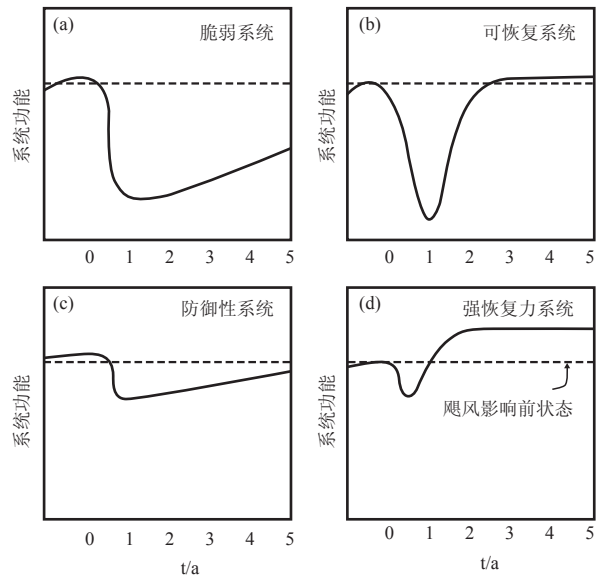


图6 恢复力的4个程度，即脆弱(a)、可恢复(b)、防御性(c)、强恢复力(d)系统与恢复时间的关系示意图(根据文献[24]绘制)

Fig.6 Four contents of resilience: susceptible (a), recovering (b), resistant (c), and usurper (d) systems evolution with time in years^[24]

称为防御性系统；强恢复力社区所受灾害小，并且灾后重建的程度甚至能超过灾前的水平(图6)。

图7表明了RIM中这4个状态之间的普遍关系。x轴包含3个成分：承灾度(exposure)、破坏度(damage)、恢复度(recovery)；y轴表示3个变量偏离平均(0值线)的程度。使社区将事件损害最小化的能力称之为脆弱性，通过承灾度与破坏度之间的斜率表示。当斜率很大且向上时，则表明高的脆弱性。类似的，社区恢复到原先水平的能力可以用破坏

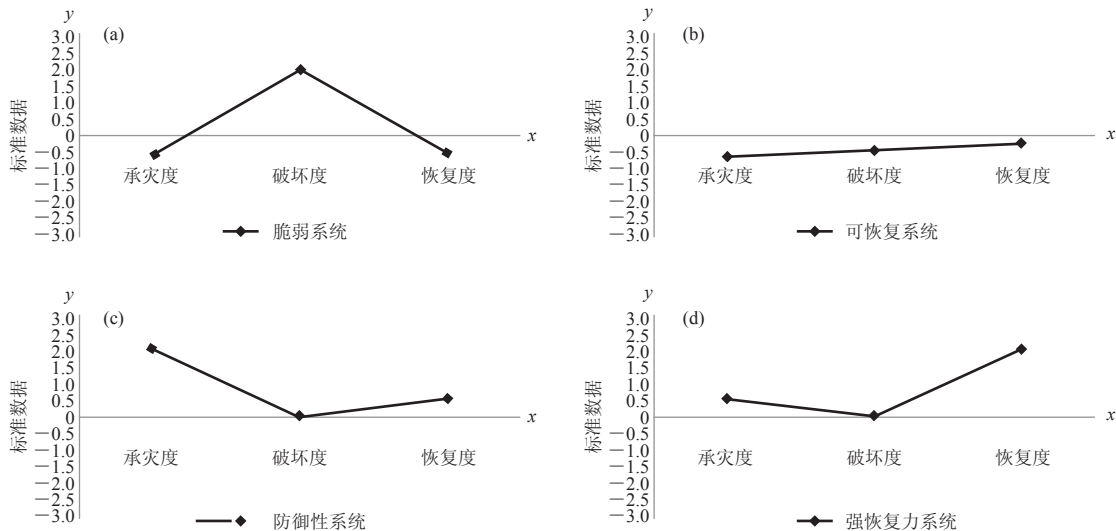


图7 RIM中四个状态之间的普遍关系(a—d)(根据文献[24]绘制)

Fig.7 Common relationships among the 4 statutes (a-d) in RIM^[24]

度与恢复度之间的斜率表示，也就是应变能力。斜率越大且朝着向上方向时，应变力越强。脆弱系统（如恢复力系统）被认为是恢复力最差的系统，因为它有着高脆弱性以及低应变力。可恢复系统有着差不多的脆弱性和应变力，总是接近0线（或高一些或低一些）。防御性系统有低脆弱性和平均的应变力，而强恢复力系统有着低脆弱性和非常高的应变力。从恢复力的这些分级来看，应变力显得更为重要。

RIM模型采用了K平均算法和判别分析来确定选取的恢复力指标是否能够被刻画，以及判定一个社区所处于的恢复力程度。因为其采用了统计的计算方法，该模型也可应用于其他的区域。对美国墨西哥湾北方的52个海岸郡县进行了恢复力的评估。这些郡县属于5个州：得克萨斯州、路易斯安那州、密西西比州、亚拉巴马州、佛罗里达州。数据的时间长度从1998—2008年。每个郡县有3个成分，分别定义为：①暴露在危险的程度，由社区被飓风或是气象相关灾害袭击的次数所表示；②暴露在危险中所引起的损害，由财产损失表示；③重建程度，由人口的增长来表示。

为了更加精确地体现暴露程度，需要对危险事件进行权重分析，从而对数量进行应变。因为像飓风卡特里娜这样的事件其严重程度要远大于一个雷暴事件。对于一个事件 i ，其权重 w_i 的定义为事件 i 所引起的全部损失与所有事件所引起的全部损失之比。在计算暴露程度时，每一个事件都乘以其权重。

每个郡县的损害变量是将这个郡县的全部损失除以在事件发生时郡县的人口，即转化为人均；恢复程度变量通过测量1998—2008年的人口增长率来表示。用人口的变化来作为表示恢复程度的指标是存在一定异议的。实际上，研究者对于扰动后恢复程度的各种资料进行了分析，却无法确定一个用来测量恢复程度最好的方法。恢复程度的指标一般可以分为4类：经济、环境、基础设施和社会。环境和基础设施指标包括建筑环境、道路、投入公共设施的能力。经济指标可以通过当地营业场所雇佣员工人数、返回的或者是新的商业数量、居民中等家庭平均收入等。返回受扰动影响社区的人口数能够表示社会的恢复程度。这4类恢复程度是相关联的，修复基础设施就有助于支持返回的人口和商业，社会的恢复鼓励基础设施的重建。因此恢复程度的指标是不同维度变量的联合。在这里采用人口随时间的变化作为恢复程度的指标，其基本原理是人口随时间的变化能大致反映出个人和商户所做的是继续留在灾区还是搬离的决定。这是恢复程度的一个大范围的指标，它将受灾区域居民和企

业的选择及合理行为都纳入了考虑范畴。因此人口变化可以反映出恢复过程的大致程度。从实际应用的角度而言，人口变化的数据是最有可能获得的，用它作为恢复程度的指标能够使恢复力测量在空间和尺度上进行对比时更加简便。

在获得暴露程度、损失、人口变化的数据后需要通过使用中值以及绝对平均误差（absolute average deviation, AAD）进行标准化。由于损失变量值的分布存在着极端值，而中值法对于极端值并不敏感，因此采用中值和AAD方法进行标准化要比传统的0~1标准化更加精确。最终确定的各类指标如文献[6]所示。随后对标准化进行K平均分析，分别将4, 20, 14, 14个郡县分入到4组中（susceptible, recovering, resistant, and usurper）。在对不同区域进行对比后发现，抵抗力高的社区，通常有着高的平均劳动力，以及较高的海拔；越高的人均劳动力会对重建和恢复过程带来更多的帮助，而海拔越高使得受到海岸灾害的可能性越小。分析恢复力的4组分级，高的恢复力地区总是伴随着高的人均劳动力以及高的海拔；低恢复力地区总是存在着财产多但教育低下，或以女性为户主的家庭所占比例高的情况。墨西哥湾东边郡县的恢复力要高于西边城市。

初步研究表明RIM方法还是值得发展的，同时也需要更多的研究来改善这个方法。RIM最主要的优点是它能够被应用于不同研究区域、不同时空尺度、不同灾害类型的社区恢复力的分析中。暴露、毁坏和恢复这三个成分的指标以及社会的生态承载力的指标都将随着不同研究区域发生变化。目前RIM方法运用在不同的区域，例如加勒比海、中国、荷兰，并针对各类灾害，包括美国西南的干旱、中国的地震等。

3.2.5 DROP 模型

为了量化恢复力，必须要应用一个理论框架，从而为变量的选择、权重、合成提供基础。局地内在灾害恢复力（disaster resilience of place, DROP）模型提出了脆弱性和恢复力之间的关系，并且服从经验的测试（图8）。而且，DROP框架主要关注前期状况，尤其是那些与内在恢复力有关的状况。前期状况是一个地区特殊的、多尺度过程的产物，通常存在于自然系统、建筑环境和社会系统之间。大多数研究认为恢复力是在自然系统之内的（例如保护湿地完整或控制自然界开发），然而社会的恢复力以及组织体系的恢复力也是同样显著的。与自然系统的改善减小灾害一样，灾害的影响可能通过增强社会和组织系统因素，如广泛的灾害保险、社交网络的改善、增强社区参与

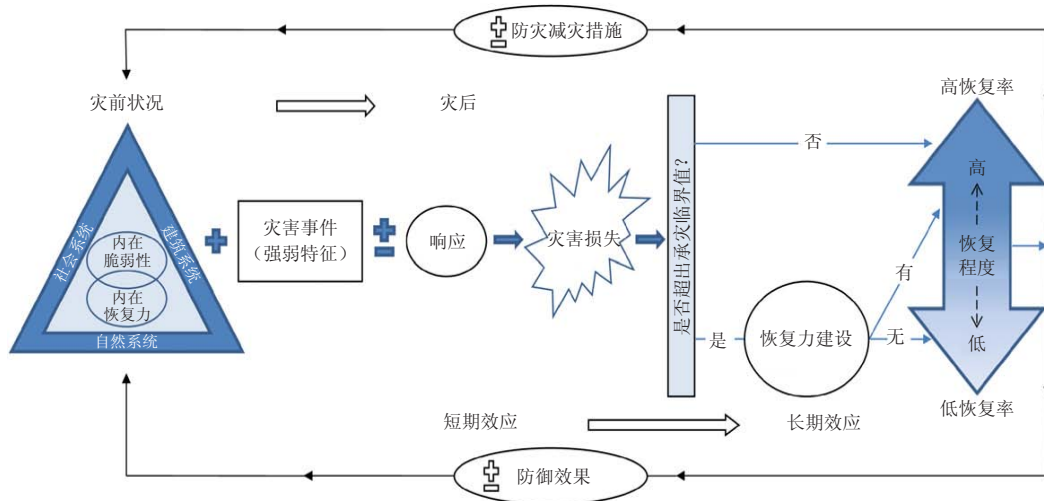


图8 DROP模型示意图(根据文献[6]绘制)
Fig. 8 Sketch map of the DROP^[6]

以及地方的风险认识而被减小。

变量选取的如何直接关系到最终复合指标质量的好坏,因此在选取恢复力相关变量时,要满足相关性、稳定性、有代表性。选取的标准在不同领域都有所不同,目前没有统一的选择标准,但是被广泛认可的要求是:变量必须要多层次。所有变量分为5个部分:社会、经济、制度、基础设施、社区能力。社区恢复力包括了人口统计等方面;经济恢复力包括合理收入、员工雇佣、贸易规模等;制度部分包括减轻损失措施、计划的特征、以前灾害经验等;基础设施类别包括庇护所、医疗设施、道路等;社区能力表达了个人和社区之间的存在关系,包括社区意识、场所依赖、公民参与等三方面。具体的各变量选取如文献[5]所示。

在研究中将生态系统的恢复力不予纳入考虑,其理由是若是把生态系统因素列入变量中,那么对于那些本身就不存在湿地、沙丘的地区而言,意味着恢复力必然减少,这是不准确的。因此生态系统因素应根据研究区域的特点进一步考虑。在选定各类变量后,将所有原始数据转化成可以进行比较的尺度,例如百分比、人均、密度函数等。将每一个变量通过Min-Max方法转换成0~1的值,再将每一类的变量进行聚合,得到每一类的恢复力值。由于这5类次指数所包含的变量数量不同,因此需要每一类次指标作平均(即除以该类中变量的个数)。最终将5个次指标相加,得到恢复力值(范围在0~5,越大恢复力越高)。

选取的研究区域是美国东南区域,其结果表明恢复力存在着明显的空间分布,尤其在农村和城市之间

区别显著:城市往往有着更高的恢复力。而社会、经济、制度、基础设施、社区能力这5个次指标差异就更为显著。

4 历史灾害分析

根据Cutter等提出的社区恢复力评估模型^[6],恢复力的评估可分别对社会系统、建筑系统和生态系统的恢复力进行评估。完整的灾情调查和恢复力评估可综合考虑诸如DROP模型所示的各领域及相关要素,由于篇幅所限,本节以飓风安德鲁和卡特里娜对建筑物的破坏为例介绍美国灾情调查方法和建筑系统的恢复力建设措施。

4.1 飓风安德鲁

4.1.1 灾情介绍

本节内容大多引自美国FEMA的灾情调查报告^[28]。1992年8月24日,飓风安德鲁给美国佛罗里达州南部的戴德县带来了毁灭性的灾害。安德鲁引起了巨风并伴随巨大的风暴潮,造成财产损失高达26.5亿美元,7.5万居民住宅受灾,8000个商业建筑受灾,使20万佛罗里达州居民流离失所,并对政府服务工作等社会正常机能产生严重持续性影响。安德鲁引起的洪水泛滥灾害,影响区域较小;而由风引发的损害影响区域更广,因此公众更为关注它所引起的实际风速。安德鲁在飓风上的级别划分为第四类,也就是中心风速在131~155 mph。

除了物理上的损害,对于经济的损害也是不可忽视的。到1992年9月24日,估计有8.6万人失业,7800个商铺长期或临时关闭。旅游业由于汽车旅馆、餐厅、公园、交通业的损害,受到重创。

为了应对飓风安德鲁，政府第一次全面使用了FEMA制定的联邦灾害应对计划，但却依旧造成了巨大损失。原因可以归结为如下几点：

①应对计划不能全面地评估灾害以及灾民的需要。

②当灾民对于食物、避难所等基础服务的需求超过州或当地的资源时，计划缺乏相应应对机制。

③未对提前的灾害预警做出充分准备，原因是只有当总统进行灾害宣布后，相关准备活动才能被授权，因此缺乏灵活性。

④各级政府信息传递错误、职责混淆。

正是这些原因使得灾害应对计划没有发挥其预期的效果。

4.1.2 调查方法

1992年9月，FEMA对受灾区域房屋毁损情况进行实地现场调查，组成一支房屋性能评测组。评测组包括FEMA指挥部与区域负责人、专家工程师与戴德县的建筑办公室。评测组的任务是调查在风暴路径上居民住宅的性能，从而为戴德县的建筑工程标准提供发现与建议。现场勘查、准备资料、评估损害投入时间超过1500个人工时。最终形成的资料包括野外记录、照片资料以及视频资料。

评测工作选取了受损房屋以及相似建筑类型的未受损房屋进行对比，从而研究确定房屋的缺陷。但评测工作没有进行房屋建筑材料测试以及房屋系统测试。为了支持评测组的工作，联邦灾害应对部门提供了地理信息系统（GIS），该系统包含着定义持续受到风与洪涝灾害地区的地图，从而形成FEMA与评测小组相互协调、相互辅助的模式。

4.1.3 结论与建议

房屋的负荷，也就是可以承担外界给予的强迫力，主要取决于承重墙、屋顶结构、地基等因素，不仅依赖它们各自的强度，还受到它们之间联接是否恰当的影响。大多数住宅建筑的损害最主要是由设计的不充分引起的，设计的不适当将会引起负载传递时的不稳定。当负荷传递路径存在较为明显的崩坏时，建筑物的受损程度就会大大增加。其次低标准的工艺以及各类建筑材料的滥用也会导致建筑的损害。而房屋的地势高度则对洪涝灾害有着关键影响，高地势或者第一层地势抬高都能有效减少洪涝损害。

总体来说，砌石墙（混凝土结构）和木制模块建筑在飓风中有着较好性能。1~2层轻木结构建筑损毁要比其他房屋结构更多，而木制三角结构房顶在飓风中存在脆弱性，具有被损毁的倾向。

具体建议：1）提高建筑工艺质量：提升有关正

确建筑技巧的知识，提高相关人员对灾害后果以及房屋负荷的认识并为通过学习的人颁发证书，从而使其制度化；2）对承包人提供关于传递负载的正确方法的必要指导；3）加强对建设施工的监管以及巡查；4）将GIS进一步完善，使获得的地理数据更为精确；5）提高建筑底层最低高度标准，从而减少洪涝损害；6）提高公众对房屋关键结构的认识，从而使民众能在灾害前或灾害中及时发现建筑隐患，并做出紧急处理或者及时撤离。

4.2 飓风卡特里娜

4.2.1 灾情介绍

卡特里娜飓风的灾情报告在FEMA文件^[30]里有详细记载。飓风卡特里娜是在过去100年中影响美国海岸的最强、最具破坏力的飓风之一。2005年8月25日，卡特里娜首次在佛罗里达东南海岸登陆，此时飓风等级为一级；随后卡特里娜穿过南佛罗里达向墨西哥湾移动，随之强度增强至五级飓风；在减弱并在路易斯安那州的东南方二次登陆之前，强度维持在三级飓风；在登陆路易斯安那州后，卡特里娜继续向北移动，将风暴潮带入亚拉巴马州、路易斯安那州、密西西比州的海岸地带。最终在密西西比州的Pearlington以三级飓风强度第三次登陆（图9）。卡特里娜给墨西哥湾海岸、路易斯安那州东南方以及亚拉巴马州与密西西比州的海岸都带来了普遍的毁灭性损害。

卡特里娜所引起的风暴潮导致庞恰特雷恩湖保护新奥尔良的堤坝系统损毁，因此估计新奥尔良80%的城区都被淹。对亚拉巴马州、路易斯安那州和密西西比州海岸地区造成的重大损害使得卡特里娜成为美国历史上最具毁灭性的自然灾害。

据估计超过1700人遇难，其中约有1500人在路易斯安那州遇难，约230人在密西西比州遇难。其他可直接或间接归因于卡特里娜的死亡事件在佛罗里达州、佐治亚州、肯塔基州和俄亥俄州都有所报道。因此卡特里娜成为美国第三致命的飓风，仅排在1900年得克萨斯州的飓风（6000人遇难）和1928年佛罗里达州的飓风（2500人遇难）之后。

卡特里娜造成总经济损失超过125亿美元，被保险的损失为40.6亿美元，远高于安德鲁的26.5亿美元、查理的15亿美元、伊凡的14.2亿美元、弗朗西丝的8.9亿美元损失以及雨果的7亿美元损失，使得卡特里娜成为美国历史上最昂贵的自然灾害。到2006年4月，亚拉巴马州、佛罗里达州、密西西比州和路易斯安那州总的洪水保险索赔超过21万件，总计超过17亿美元，其中超过17.5万件索赔来自于路易斯安那州。



图9 卡特里娜飓风路径(红线)及灾情察看飞机航线(蓝线)^[30]

Fig.9 Track of Hurricane Katrina (red line) and the flight line of disaster observation (blue lines)^[30]

初步估计卡特里娜导致如下损失：对基础设施（例如道路、桥梁）损害达5.5亿美元；30~35万辆交通工具被摧毁，约2400艘船只失事；45万名难民；80万名路易斯安那州的居民要求来自联邦的或者州政府的救济。根据美国红十字会的统计总共有352930个建筑被摧毁，139376个建筑受到较大损害，170452个建筑受损较小。

4.2.2 调查方法

由卡特里娜引起的洪水，水位远超过FEMA洪水保险费率图（Flood Insurance Rate Maps, FIRMs）阐述的现行设计洪水事件（也就是100年一遇的事件）。而卡特里娜的风速在大多数区域都要小于基于标准规则（International Building Code, IBC; International Residential Code, IRC）和工程标准（ASCE 7）所提及的建筑标准的设计风速。除了密西西比海岸的一些地区之外，卡特里娜是低于设计风速的。MAT希望通过调查能够确定根据新建筑标准建设的建筑物的性能，并且收集关于建筑损害的相关信息，能够使风速和建筑性能相互关联。

在新奥尔良，FEMA特别关注洪水对于建筑物的

结构性和非结构性成分的长期作用。因此FEMA派出一部分MAT前往新奥尔良，去观测和评估洪涝对居民建筑、重要设施、基础设施的损害。新奥尔良的MAT同样包含着来自洪水恢复工业的专家。

2006年9月11和12日，MAT执行了空中侦察，来估测受卡特里娜影响的区域里全部的建筑损害。从亚拉巴马州的多芬岛，顺着密西西比的墨西哥湾，越过新奥尔良，向内陆到达至路易斯安那州的斯莱德尔和曼德维尔以及密西西比的哈蒂斯堡（图9）。

用于评估受灾地区建筑条件的初步现场调查在9月17—21日开展。基于空中侦察和初步现场调查搜集的数据，对于MAT关注的区域被更完整地定义了。全部MAT调查从9月26号开展，持续两周，进行了广阔区域的观测。对于单个和多家建筑、制造完毕的住房、商业地产、历史建筑的损害都进行了观测。并且对重要设施与基础设施，包括消防站、派出所、医院、养老院等，都进行了评估，更好地说明建筑性能和由于卡特里娜所引起的功能缺失。

4.2.3 结论与建议

卡特里娜造成了巨大的风暴潮，强降水导致洪涝灾害。由洪水引发的建筑物损害可以分为结构性损害与非结构性损害。结构性损害是对建筑物关键结构的损害，导致建筑物坍塌或者不再适宜居住。在所有调查结果中这类损害占少数，原因是由于建筑物的阻碍，洪水水位的上涨得到抑制，使得洪水本身不会对建筑物有很大冲击，其次建筑物存在的通风口、车库门都使得房屋内外水压近似守恒，没有大的压强差，从而减少了负荷墙所承载的水压。而非结构性损害就要普遍得多，像是石灰脱落、金属生锈、地板浸泡，以及墙面装饰物损毁。此外，由于洪涝持续时间长，从而引起了建筑材料的恶化以及生物、化学污染，包括细菌污染、真菌污染、重金属污染、农药污染等。

对于洪水损害有以下建议：

- 1) 规范和标准：提高建筑的建设标准，推荐采用IBC、IRC以及NFPA5000标准。
- 2) 完善损害确定机制：
 - ① 评估现有的风暴潮模型，修正潮汐频率分析，运用模式来估计受影响区域的水位。
 - ② 重新定义损害概念，并且修正灾害分布图的绘制方法。
- 3) 设计与建筑：
 - ① 在设计中考虑进洪涝的影响。
 - ② 规范建设材料、地基、最底层高度。
- 4) 洪涝保险：要全面考虑保险规定以及保费。

由于卡特里娜的风速在绝大部分地区都小于设计风速，因此强风引起的损害要小一些。各种建筑设施残骸是诱发风损害的主要原因，在高风速下，房屋外面的装饰物、屋顶瓦片以及其他残骸会破坏门窗、伤及居民。对于风引起的损害，提出下列建议：

1) 房屋规范：按照现代的建筑规范建造，从而增强对风的抵抗性。

2) 设计与建筑：妥善设计屋顶、墙面包层、窗户、门等。

3) 已建成建筑物的减缓措施。

① 对房屋进行专业检测。

② 住户考虑重新安装金属的连接，升级屋顶的各种配件。

③ 加固窗户，或者替换成抗冲击的窗户。

对于政府与灾害应对部门而言，继续深入地研究，加强对设计和建筑施工的指导以及提供设计师、监督员的训练同样是不可或缺的。

4.3 小结

FEMA对于飓风安德鲁和卡特里娜建筑系统的灾情调查和分析，提出了建筑系统应对飓风灾害进行恢复力改进的相应对策。根据联合国环境项目的研究^[31]，提高建筑物的质量和制定建筑物防灾标准是增加社区系统恢复力的有效环节之一。如图10所示，各种应对飓风灾害的防御措施所投入的成本和能起到的社会与经济效益存在着较大差异。比如修建沿海防护堤对于减少飓风灾害的经济效益和社会效益都是首选措施，但成本也是最高的。避难所具有较高的社会效益，但对于减少灾害的经济损失作用不大。因此，各国家和地区应根据自身条件和灾害的主要类型采取恰当的防灾减灾措施。

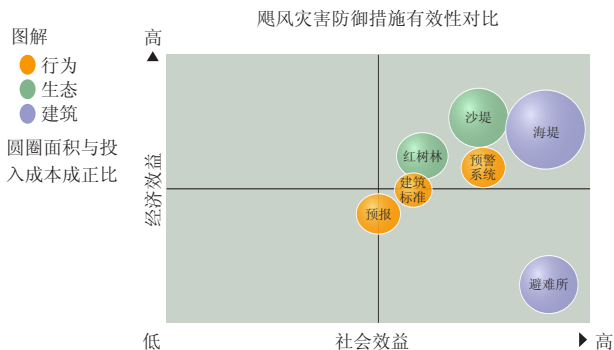


图10 不同飓风灾害防御措施社会及经济效益对比 (根据文献^[31]绘制)

Fig.10 Comparisons of prevention operations and social efficiency among different hurricanes^[31]

5 结语

恢复力的概念在各领域及不同国家和地区有着

不同的定义。根据Cutter最近的总结^[3]，至少存在27种不同的恢复力定量和定性评估方法。这些方法虽然各不相同，但大多考虑了社区的资产（经济、社会、环境、基础设施）和功能（社会资本、社区功能、交通与通信联系、规划）。恢复力在防灾减灾领域得到越来越多的关注和广泛使用。在防灾减灾工作中，我们不仅需要考虑到社区、企业、单位及家庭等为主的自发的、自下而上的恢复力建设措施，而且要加大自上而下的、以各级政府为主导的措施。各级政府部门在对社区应对自然灾害的脆弱性有了充分认识的基础上有必要采取有效措施在提高防灾减灾工程质量和社区恢复力建设上增加投入。众览各国，往往存在灾害前恢复力的投入与灾害后用于救济和重建花费的资金不平衡的现象。决策者往往在大灾难发生后，在民意的压力下才意识到需要增加防灾减灾救灾投入的“亡羊补牢”现象。在经济上，用于恢复力上的投入可以减少重建时的花费。据美国科学家估算，在社区恢复力建设上每投入一美元，在重建工作中就能节约4美元^[32]。因此，灾害发生之前进行恢复力建设和其他防灾减灾工作，无论是在经济效益还是社会效益上都可以获得正面的回报。

无论恢复力如何定义和定量估算，也无论科学家们提出多少恢复力建设的方案，这些方案本身并不能增强社区的抗灾能力。要真正起到防灾减灾的效果，不仅要加强防灾减灾的研究，提出切实可行的防灾减灾方案，而且要切切实实地既从上到下又从下到上落实这些方案，让政府制定出有科学依据的决策，同时社区和民众能够自发地执行这些与他们切身利益相关的政策和措施。

致谢：感谢国家海洋局减灾中心为本工作所提供的支持；感谢天津市气象局和天津市气象科学研究所在本文写作过程中给予的鼓励与支持。

参考文献

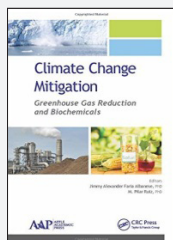
- [1] WMO. UN System Task Team on the Post-2015 Development Agenda: Disaster Risk and Resilience. Thematic Think Piece. UNISDR, WMO, 2012. <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/27462>.
- [2] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [3] Cutter S L. The landscape of disaster resilience indicators in the USA. *Nat Hazards*, 80: 741, doi:10.1007/s11069-015-1993-2.
- [4] Cutter S L. Resilience to what? For whom? *The Geographical Journal*, 2016, 182(2): 110-113, doi: 10.1111/geoj.12174.
- [5] Cutter S L, Burton C G, Enrich C T. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2010, 7 (1): 1271-1283, doi: 10.2202/1547-7355.1732.
- [6] Cutter S L, Barnes L, Berry M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global*

- Environmental Change, 2008, 18: 598-606.
- [7] Matyas D, Pelling M. Disaster Vulnerability and Resilience: Theory, Modelling and Prospective. Government Office of Science, 2012.
- [8] Benjamin B. A comparative analysis of disaster risk, vulnerability and resilience composite indicators. Plos Curr, 2016, doi: 10.1371 / currents.dis.453df025e34b682e9737f95070f9b970.
- [9] Sharifi A. A critical review of selected tools for assessing community Resilience. Ecological Indicators, 2016, 69: 629-647.
- [10] Manyena S B. The concept of resilience revisited. Disasters, 2006, 30(4): 433-450.
- [11] Birkmann J.. Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies. Tokyo: United Nations University Press, 2006.
- [12] Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [13] Field C B, Barros V, Stocker T F, et al. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [14] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [15] Timmerman P. Environmental Monograph No. 1, Institute for Environmental Studies. University of Toronto, 1981.
- [16] McEntire D A, Fuller C, Johnston C W, et al. A comparison of disaster paradigms: the search for a holistic policy guide. Public Administration Review, 2002, 62(3): 267-281.
- [17] Adger W N. Vulnerability. Global Environmental Change, 2006, 16:268-281.
- [18] Ian B, Saleemul H, Bo L, et al. From impacts assessment to adaptation priorities: the shaping of adaptation policy. Climate Policy, 2002, 2(2):145-159
- [19] O'Brien K, Leichenko R, Kelkar U, et al. Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India. Global Environmental Change, 2004, 14(4):303-313.
- [20] Gallopin G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. Global Environmental Change. 2006,16: 293-303.
- [21] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(14):8074-8079.
- [22] Pendall R, Foster KA, Cowell M. Resilience and Regions: Building Understanding of the Metaphor. University of California, 2007.
- [23] Klein R J T, Nichols R J, Thomalla F. Resilience to natural hazards: how useful is this concept? Environmental Hazards, 2003,5: 35-45.
- [24] Lam N S, Reams M, Li K, et al. Measuring community resilience to coastal hazards along the Northern Gulf of Mexico. Natural Hazards Review, 2016, 17(1):04015013.
- [25] Rosati J D, Touzinsky K F, Lillycrop W J. Quantifying coastal system resilience for the US Army Corps of Engineers. Environment Systems and Decisions, 2015, 35(2):196-208.
- [26] National Research Council. Disaster Resilience: A National Imperative. Washington, D C: National Academies Press, 2012.
- [27] Cutter S L, Ash K D, Emrich C T. The geographies of community disaster resilience. Global Environmental Change, 2014, 29: 65-77.
- [28] Federal Emergency Management Agency. Building Performance: Hurricane Andrew in Florida: Observations, Recommendations and Technical Guidance. FEMA, 1993.
- [29] Schultz M T, McKay S K, Hales L Z. The Quantification and Evolution of Resilience in Integrated Coastal Systems. US Army Corp of Engineers, 2012.
- [30] Federal Emergency Management Agency, 2006: Hurricane Katrina in the Gulf Coast: Mitigation Assessment Team Report. FEMA, 2006.
- [31] UN Environmental Program. Building Disaster-Resilient Communities and Economies: Part One of A Research Series by the UNEP FI Principles for Sustainable Insurance Initiative. UNEP Finance Initiative, 2014.
- [32] Multi-Hazard Mitigation Council. Natural Hazard Mitigation Saves: An Independent Study to Assess the Future Savings from Mitigation Activities. Multi-Hazard Mitigation Council, 2005.

新书架

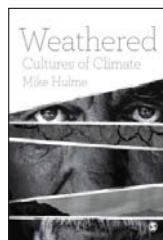
NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



Climate Change Mitigation: Greenhouse Gas Reduction and Biochemicals
《气候变化减缓：温室气体减排与生化制剂》

编著者：Jimmy Alexander Faria Albanese 等
出版者：Apple Academic Press
出版年：2016



Weathered: Cultures of Climate
《饱经风霜的气候文化》

编著者：Mike Hulme
出版者：SAGE Publications Ltd
出版年：2016



《公众气象服务效益评价理论与实践》

编著者：姚秀萍，吕明辉
出版者：气象出版社
出版年：2017



《观天测地话卫星》

编著者：李慧，等
出版者：气象出版社
出版年：2017