



中国学术精品文库 · 经济学



中国海洋大学一流大学建设专项经费资助

教育部人文社会科学重点研究基地中国海洋大学海洋发展研究院资助

FengBaoChao ZaiHai FengXian PingGu Ji
YingDui JiZhi YanJiu

FengBaoChao ZaiHai FengXian PingGu Ji
YingDui JiZhi YanJiu

FengBaoChao ZaiHai FengXian PingGu Ji
YingDui JiZhi YanJiu

赵 昕 徐伟呈 郭 晶 郑 慧 / 著

风暴潮灾害风险评估及 应对机制研究

FengBaoChao ZaiHai FengXian PingGu Ji
YingDui JiZhi YanJiu

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press

国家社会科学基金重大项目资助：突发性海洋灾害
恢复力评估及市场化提升路径研究（15ZDB171）

风暴潮灾害风险评估 及应对机制研究

赵 昕 徐伟呈 郭 晶 郑 慧 著

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press

图书在版编目 (CIP) 数据

风暴潮灾害风险评估及应对机制研究/赵昕等著. —北京:
经济科学出版社, 2019. 1

ISBN 978 - 7 - 5218 - 0138 - 5

I. ①风… II. ①赵… III. ①风暴潮 - 灾害防治 - 研究
IV. ①P731.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 011895 号

责任编辑: 周国强

责任校对: 蒋子明

责任印制: 邱 天

风暴潮灾害风险评估及应对机制研究

赵 昕 徐伟呈 郭 晶 郑 慧 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编部电话: 010 - 88191217 发行部电话: 010 - 88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http: //jjkxcs. tmall. com](http://jjkxcs.tmall.com)

固安华明印业有限公司印装

710 × 1000 16 开 13.75 印张 240000 字

2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5218 - 0138 - 5 定价: 68.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010 - 88191510)

(版权所有 侵权必究 打击盗版 举报热线: 010 - 88191661)

QQ: 2242791300 营销中心电话: 010 - 88191537

电子邮箱: [dbts@ esp. com. cn](mailto:dbts@esp.com.cn))

第1章

导论 / 1

- 1.1 灾害损失的经济学分析 / 2
- 1.2 风暴潮灾害系统分析 / 7
- 1.3 风暴潮灾害致灾非线性路径 / 10
- 1.4 风暴潮灾害致灾经济后果分析 / 15

第2章

风暴潮灾害脆弱性评估 / 23

- 2.1 风暴潮灾害脆弱性的评估方法导入 / 24
- 2.2 风暴潮灾害脆弱性评估体系的构建 / 32
- 2.3 风暴潮灾害脆弱性测度 / 44

第3章

风暴潮灾害经济损失评估 / 57

- 3.1 风暴潮灾害损失等级评估指标选取 / 58
- 3.2 支持向量机 (SVM) 模型的应用机理及参数优化 / 67
- 3.3 基于 ACMP SO-SVM 模型的风暴潮灾害损失等级评估 / 75

第4章

风暴潮灾害风险区划 / 87

- 4.1 风暴潮灾害风险区划理论框架 / 88
- 4.2 风暴潮灾害风险区划模型构建 / 91
- 4.3 风暴潮灾害风险区划指标体系设计 / 101
- 4.4 风暴潮灾害风险等级划分 / 109

第5章

基于债券市场的风险应对策略设计 / 125

- 5.1 风暴潮灾害债券定价模型构建 / 126
- 5.2 风暴潮灾害债券定价 / 134

第6章

基于保险市场的风险应对策略设计 / 149

- 6.1 国内外灾害保险模式分析 / 150
- 6.2 中国海洋灾害保险运行环境分析 / 157

第7章

基于再保险市场的风险应对策略设计 / 165

- 7.1 我国风暴潮灾害再保险定价的约束
条件及影响因素 / 166
- 7.2 风暴潮灾害再保险保费厘定 / 173

第8章

结论与展望 / 191

- 8.1 研究结论 / 192
- 8.2 展望 / 193

参考文献 / 195

后记 / 215

风暴潮灾害风险评估
及应对机制研究

Chapter 1

第1章 导 论

1.1 灾害损失的经济学分析

1.1.1 灾害的基本属性

灾害之所以称为灾害，是因为灾害与人、财产及人的生存环境密切相关，必定以大量的人群伤亡和物质财富的损失为后果，以致严重破坏人类的生存环境。因此，衡量是否成灾、灾情的轻重，不仅要看致灾力源的强弱，更主要的是看对生命财产的破坏程度、破坏范围。

1.1.1.1 灾害过程的基本属性

灾害过程的基本属性主要体现在如下几个方面。

(1) 灾害形成的动力。灾害形成的动力，一是系统内部能量不断累积，由量变到质变，直到突然爆发，致使系统的结构功能遭到破坏，在系统形成新的平衡过程中，必然会引发灾害发生；二是系统外部能量和物质的异常变化，导致系统已有平衡失调，造成系统功能结构的部分或全部破坏，导致灾害的发生。

(2) 灾害作用的受体。灾害作用的受体是人和人类社会，离开这一受体就不存在灾害的概念。例如，同一强度的地震，发生在人烟稀少地区与发生在经济发达、人口密集地区所造成的灾害差异很大。也可能在人烟稀少地区就不会有灾害发生，而在经济发达、人口密集地区所造成的灾害却非常严重。

(3) 承灾能力。承灾能力是指某地区对一种或多种灾害的抗御能力、救助能力与恢复能力的综合，它反映了该地区抗御灾害的综合水平。如同一强度、同一类型的灾害发生在承灾能力不同的地区，就会出现不同的灾情。承灾能力强的地区可能不会对当地的功能结构造成危害，就不称其为灾害；而发生在承灾能力弱的地区，就可能会造成巨大的人员伤亡和财产损失，形成比较大的灾害。

由此可见，灾害形成的力源是自然因素、社会经济因素以及二者的交互

协同作用；灾害产生的环境是自然生态环境和社会经济环境。

1.1.1.2 灾害后果的基本属性

灾害的后果具有双重性：一是指灾害给人类及其社会产生危害性后果的社会属性；二是指灾害对自然生态与环境功能结构的破坏，进而又反作用于人类和社会。灾害后果的这种双重属性相互联系、重叠，并交织在一起产生更严重的影响。例如，人类活动产生大量的二氧化碳气体，这些气体通过各种途径进入大气层，产生温室效应，温室效应进而又改变全球气候状态，产生并加剧各类气象灾害，加重对人类及社会的影响。

1.1.1.3 灾害的分类

灾害分类是根据不同分类标准，将具有相同特征的灾害现象归为一类，以便研究灾害的特性，发生、发展与演变规律和致灾过程；针对不同类型灾害的特点，制定防灾、减灾与抗灾策略。灾害分类是灾害学研究的基础。

1. 二元分类体系

灾害按其形成原因可分为自然灾害和人为灾害，见图 1.1。

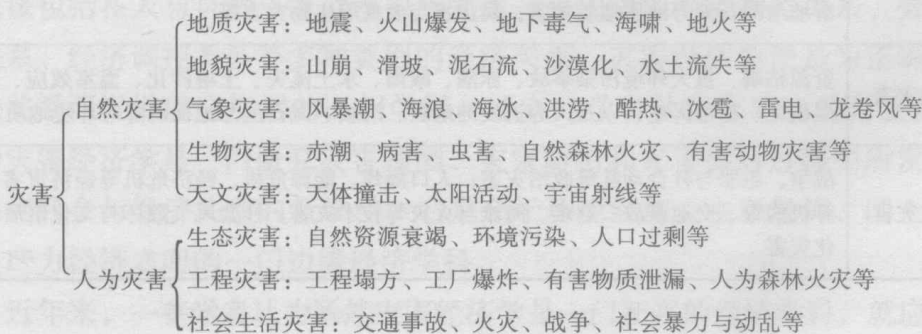


图 1.1 灾害成因分类体系

(1) 自然灾害。是人力不能或难以支配和操纵的各种自然物质和自然能量聚集、爆发所致的灾害。其特点是：爆发频率低、周期长、灾害损失大、人员伤亡严重、难以控制。

(2) 人为灾害。是指那些在社会经济建设和生产活动中各种不合理、失误或故意破坏性行为所致的灾害。其特点是：爆发频率高、周期短、灾害损

失大、人员伤亡严重，但可以控制。

从图 1.1 分析可发现，自然灾害与人为灾害之间并没有绝对的界限，有些灾害起因可能是自然的，也可以是人为的，或两者同时兼有。如水土流失、滑坡、泥石流、火灾等。不同类型的灾害常互为因果，引起次生灾害。例如：地震导致库坝崩塌，引发洪水灾害；海啸灾害后，爆发的瘟疫、流行疾病灾害等。

2. 三元分类体系

由于二元分类体系中，有许多灾害并非绝对是人为的或是自然的，可能出现原因是人为的，结果却使自然环境遭到了破坏，被破坏的自然环境又反作用于人类，形成了一个灾害循环链。基于此，一些学者按照灾害发生的主要诱发因素的属性，提出了灾害的三元分类体系，即自然灾害、环境灾害、人为灾害。然而，进一步分析发现，环境灾害成因隶属于人为灾害概念的范围，应将纯人为灾害命名为人文灾害，以区别于环境灾害，见表 1.1。

表 1.1 灾害成因三元分类体系

灾害类型	灾种
自然灾害	陨石与太阳风等天文灾害；旱灾、飓风、暴雨、风暴潮、龙卷风、寒潮、热带风暴与暴风雪、霜冻等气象灾害；海浪、海冰、洪水与海侵等水文灾害；地震、火山爆发、滑坡与泥石流等地质地貌灾害；病虫害与瘟疫等生物灾害等
环境灾害	资源枯竭、重大环境污染事故、赤潮、酸雨、水土流失、土壤沙化、温室效应、臭氧层破坏、物种灭绝，以及人为诱发的地震、滑坡、泥石流与地面沉降等环境地质灾害
人文灾害	战争、犯罪与社会动乱等政治灾害；人口爆炸、能源危机、经济危机等经济灾害；计算机病毒、交通事故、空难、海难与火灾等技术灾害；社会风气败坏与文化落后等文化灾害

关于环境灾害的命名，有的学者称准自然灾害，有的学者称自然—人为生态灾害，有的学者称自然人为灾害，也有的学者称混合型灾害。

3. 其他分类体系

有时，为了部门研究方便，还将灾害按其发生的生态、环境和危害国民经济的部门进行分类。如山地灾害、海洋灾害、陆地灾害、城市灾害、乡村灾害、工业灾害、农业灾害、交通灾害等。这种分类方法称为综合分类法。

还有的学者根据灾害持续期的长短，将灾害分为突变型灾害、暂变型灾

害和缓变型灾害等。

总之，对灾害进行分类是为了研究方便。不同的部门研究侧重点不同，分类方法不同，因此，绝对的分类是不存在的，只有相对的分类体系。但这种分类体系的个性化，并不是赞成分类的无规范化，而是强调在基本分类体系基础上体现个性化。

1.1.2 灾害的经济学含义

不同的人从不同的角度对灾害经济学有不同的理解。有的人认为灾害经济学研究的是灾害问题的经济方面的一门学科；也有的人认为灾害经济学是从经济学的角度，应用经济学的方法研究灾害问题的一门学科。我国灾害经济学研究的倡导者于光远先生曾从灾害经济学的研究内容方面对灾害经济学下了一个初步的定义：“关于灾害经济学，无非是研究灾害所造成的经济损失，救灾、防灾的费用和投资、防治灾害的经济效益，历史上灾害损失的计算方法，对灾害的保险等。”

之后，有的学者指出，灾害经济学不应该局限于经济效益关系的研究，还应该包括在人与自然斗争过程中所发生一系列诸如经济利益关系、分工协作关系、经济调控关系等多种类别的经济关系，灾害经济学便是为正确处理这些关系而提供理论依据的一门学科。还有的学者从防灾减灾的角度出发，认为灾害经济学是一门研究灾害预测、灾害防治和灾害善后过程中所发生的一系列社会与经济关系的新学科，它是介于环境经济、生态经济、国土经济和生产力经济之间的一门边缘经济学科。

近年来，一些学者认为既然灾害经济学是一门新兴的经济学科，就应该作为经济学的一个应用分支得到重视和研究，应该从现代经济学（或称西方经济学）的原理出发，运用经济学的方法对灾害进行深入研究。还有的学者将灾害经济学纳入发展经济学的范畴，认为灾害经济学在某种程度上弥补了发展经济学的不足，丰富和完善了发展经济学的学科体系，有非常重要的理论意义。

因为灾害是与人类社会的产生与发展进程始终相存的异常现象，灾害是可以计量的经济损失；经济因素是决定灾害问题的基本因素，所以灾害问题的实质即是经济问题。灾害经济学是一门边缘经济学科，区别于其他经济学

分支的一个显著特点是，它是一门“守业”经济学。所谓“守业”，是指保护已有的自然资源和物化劳动免遭损失。灾害经济学不研究价值形成和价值增值，而是研究已有资源和已创造价值的保护。于光远先生在他的一篇文章中对灾害经济学与一般经济学的区别有着精辟的论述：“一般的经济学，都是从社会效益的获得与提高着眼的，它们的研究的基本出发点和归宿都是积极的、‘正’的经济效益，而灾害经济学研究的是已经获得的社会经济效益的破坏和损害，它研究的基本出发点和归宿都是如何减少不可抵抗的灾害给社会效益带来的破坏和损害，如何在灾害发生的损害已经造成之后，努力去谋取补偿。”

灾害经济学研究的内容是消极的，但追求的目标（即“灾害损失最小化”）和所起的客观作用却是积极的，它能够指导人们通过自己的努力来主动防止、避免灾害的发生及减轻灾害造成的损失，而不是被动地等待着灾害损失的发生；它还能够指导具体的各种减轻灾害损失的活动，来避免减灾活动中损失的扩大化。

灾害经济和环境经济都部分地包含着有关灾害经济方面的内容，如生态经济中对生态问题的研究，环境经济对防治环境污染问题的研究，水利经济学中对防洪问题的研究，农业经济学中对农业灾害问题的研究，保险经济学对保险利益损失赔偿问题的研究等，都属于有别于常规经济学中“积极的”或“正”的经济效益的内容。不过，上述经济学科对灾害问题的研究主题仍然是积极的经济增长问题，如农业经济学以农业的发展问题为主题，保险经济学以保险经济的增长和保险企业的盈利为主题等，环境经济学与生态经济学亦都有积极的产出与积极的效益。因此，他们仍然不能划作灾害经济学的同类。

如上所述，灾害经济学是一门相对独立的、肩负特殊使命的经济学科，在研究中不宜与一般经济学相混同，但需要吸收政治经济学、现代经济学的一般原理和理论经济学中的经济地理学、区域经济学等内容，还要汲取技术经济学、生态经济学、资源经济学、环境经济学、农业经济学、工业经济学、财政经济学、保险经济学、统计学等学科的知识。从这一点出发，灾害经济学的确是一门多个学科交叉的边缘经济学科。

另外，灾害经济学与灾害学很相近，相互之间的联系很密切。然而灾害经济学仍然不同于灾害学。灾害学涉及的是某种灾害的发生会对人类造成多大的

经济损失，而灾害经济学则是研究怎样防止或减少这种经济损失以及在防止和减少灾害损失过程中各类不同的个人或经济实体之间的利益关系，这显然是两种不同的经济关系，前者是人与自然之间的关系，后者是人与人之间的关系。

灾害与灾害经济的发生发展过程中存在着一些基本规律和原理，它们从根本上决定着小到一个家庭、大到一个国家的灾害经济关系。尊重这些规律，对于我们在实践中妥善处理好人类与灾害、灾害与经济之间的关系具有非常重大的指导意义。

1.1.3 海洋灾害的内涵

海洋灾害，顾名思义，就是指在人类社会生产发展过程中，发生在海域和滨海地区，由于海水激烈运动，海洋自然环境异常变化，且这种运动和变化超过人们的适应能力而发生的人员伤亡及财产损失的事件和现象。广义上讲，海洋灾害大致可以分为海洋自然灾害和海洋人为灾害。海洋自然灾害是海洋自身的因素而导致的，可以分为风暴潮灾害、海啸灾害、海浪灾害、海冰灾害、海雾灾害、海岸侵蚀灾害等；而海洋人为灾害则是人类在生存和发展过程中由于可抗力和不可抗力等因素对海洋环境资源等的破坏而导致的，海洋人为灾害中，对人类经济生活影响严重的当属赤潮灾害、溢油灾害及海水入侵灾害（见图 1.2）。

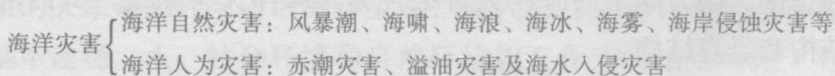


图 1.2 海洋灾害分类

1.2 风暴潮灾害系统分析

1.2.1 海洋灾害系统的构成

海洋灾害的含义表明，海洋灾害的形成是人、社会环境、自然环境综合

作用的产物。人—社会环境—自然环境构成了海洋灾害孕育、发生、发展的海洋系统。这一系统是既有人又有社会环境，还有自然生态与环境的复杂系统。“人”是人—社会环境—自然环境系统的主体，泛指生存于人文环境中的人类群体；“社会环境”是人类社会在长期发展中，为了不断提高人类的物质和文化生活水平而创造出来的，是对自然环境的改造，常常根据人类对环境的利用或环境的功能再进行下一级的分类。“自然环境”是人类目前赖以生存、生活和生产所必需的自然条件和自然资源的总称，即阳光、温度、气候、地磁、空气、水、岩石、土壤、动植物、微生物以及地壳的稳定性等自然因素的总和。用一句话概括就是“直接或间接影响到人类的一切自然形成的物质、能量和自然现象的总体”，有时简称为环境。

在人—社会环境—自然环境组成的综合系统中，自然环境和社会经济环境是海洋灾害形成的环境条件。一般情况，人—社会环境—自然环境系统处于相对稳定状态，维持正常功能的发挥。但是，这一稳定是相对的，一旦系统的某个或某些要素处于异常状态，或发生异常运动时，海洋系统也将出现异常。当这种异常达到或超过一定阈值时，就会改变人—社会环境—自然环境系统的功能结构，进而影响其正常功能的发挥，于是就爆发了海洋灾害。

各种海洋灾害都不是孤立的，由于人类与自然环境相互作用强度的时空分布极不均匀，海洋灾害往往是在某一地区或某一时段集中爆发，而且可以诱发一系列的次生灾害和衍生灾害，形成各种形式的灾害组织结构，把这种具有结构特征、动力联系的海洋灾害组合称为海洋灾害系统。其内部结构包括水平结构和竖直结构。

1. 水平结构

任何一个系统都是由各种相互关联、相互作用的要素和成分组成的，如果它们之间的信息传递过程是左右平等、无先后次序之分的，可以认为其结构关系是水平的。在海洋灾害系统中，各种海洋灾害并不是孤立的，而是互相联系、互相影响的，并在其作用和影响的基础上，进行了系统综合和升级，构成了一个有机的整体。

2. 竖直结构

系统的竖直结构是指由海洋灾害的孕灾环境—承灾环境—致灾过程—灾害强度共同组成的海洋灾害系统结构。孕灾环境是指灾害发生、发展、演化

的区域,其范围大小差异明显,大到地球的四大圈层,小到一个城市、工业区、社区等。在这些区域内的各种自然、社会要素共同构成了孕灾环境。承灾环境则是指孕灾环境区域内的抗灾自救环境,包括城镇、道路、农田与工厂等固定设备、经济财力、居民的文化素质、应急机构的设立等的有机组合环境。致灾过程是指孕灾环境中的变异因子作用于承灾体的过程。灾害强度是指在一定孕灾环境和承灾体条件下,因海洋灾害导致的生命财产损失和生存环境破坏的强度,是孕灾环境、承灾环境和致灾过程综合作用的结果。

1.2.2 风暴潮灾害系统的演变规律

风暴潮是发生在海洋沿岸的一种严重自然灾害,在中国历史文献中称为海啸、海溢、大海潮等,现在又称为风暴增水、气象海啸、风暴海啸等。这种灾害主要是由于剧烈的大气扰动,如台风和温带气旋等灾害性天气系统所引起的海水异常升降现象,如果强烈的低气压风暴涌浪形成的高涌浪正好遇到天文潮的高潮阶段,就会形成更强的破坏力,常常会使得在其影响范围内的海域的水位暴涨,进而引起海水浸溢内陆,造成巨大的自然灾害。

风暴潮灾害系统各要素相互作用的结果有正反两个方面。正的方面可以相互促进,使系统向有序稳态方向发展;反的方面导致系统向无序方向发展,是产生海洋灾害的根源。由此可知,正确处理好人—社会环境—自然环境系统各要素的关系是减轻与防治海洋灾害,使人类社会和自然生态环境可持续发展的基本途径。人、社会环境和自然环境相互作用的结果可用下列指标表示:第一,海洋稳定度,是指外界环境在不超过一定变化允许限度内海洋的自我维持和调节特性。第二,海洋环境弹性,是指海洋环境在外部作用下在一定限度内保持自身状态,并在外部作用停止后即可恢复原态的特性。

在外部作用(主要是人类活动)影响下,自然生态与环境状态发生一系列变化,表现为环境扰动、环境异常,以致海洋灾害发生。第一,环境扰动,是指自然生态与环境状态参量临时的、偶然的或周期的可逆变化。有规律扰动的积累可以导致海洋环境平衡状态的改变,引起环境异常。第二,环境异常,是指一个或几个环境状态参量偏离背景值,海洋环境稳定度与环境弹性遭到破坏,但外部作用尚未超过海洋承载力,海洋环境系统的完整性尚未丧

失,但有害作用已经显现,如不采取措施减缓这一有害过程,必将对人类产生极大影响。

当系统外部作用超过海洋的环境承载力时,致使海洋环境系统的稳定性、结构功能发生了质的变化,引起系统稳定性的丧失和系统结构的破坏,进而对人类生命财产构成严重威胁。

在风暴潮灾害系统中,人—社会环境—自然环境系统的持续发展能力(k)是风暴潮灾害系统演变的决定性因素。

$$\frac{dS}{dt} = k \times S \times (S_0 - S)$$

式中, S 为人—社会环境系统所处的状态; S_0 为人—社会环境系统的最佳运转状态。 S 值的大小主要取决于人—社会环境系统的状态参量:人口分布、产业结构、工业布局、技术水平。 S 值又取决于 k 值的大小。在不同的 k 值范围内,人—社会环境—自然环境系统的演变历程不同:

(1) 系统趋于死亡。在 $0 < k < 1$ 情况下,随着 k 的增加,人—社会环境系统的状态参量逐渐趋于零,一旦达到零点,就再也不动,该点称为稳定不动点。它说明当系统可持续发展能力较低的情况下,系统将趋于死亡。

(2) 系统可持续发展。当系统可持续发展因子在 $1 < k < 3$ 情况下时,第一稳定不动点将稳定性交给了第二稳定不动点。随着 k 的增加,人—社会环境系统的状态参量最终趋于第二稳定不动点。这说明 k 值的提高意味着人类生存环境不断改善,人—社会环境系统内部产业结构与工业布局更趋合理,能源与资源利用率随之提高,进而保证人—社会环境—自然环境系统协调、稳定与持续发展,最终人—社会系统稳定在自然生态与环境承载力允许的某一极限状态,即第二个稳定点。同时,第二个稳定点随着可持续发展因子的增加而不断增加,但这种增加趋势不会永远持续下去。

(3) 系统趋于混沌状态。当系统可持续发展因子 k 取值超过3,系统进入不稳定状态,向周期倍增演化,最终系统进入混沌状态。

1.3 风暴潮灾害致灾非线性路径

无论是突发型还是迟缓型,风暴潮灾害的形成都是由量变到质变积累过

程的结果,其中隐含着由量变到质变的非线性过程,只是突变的时间段长短不同、放大的程度有差别而已。风暴潮灾害的发生与漫长的历史长河相比,即使是迟缓型环境灾害的突变过程也可理解为是在瞬间发生;另外,迟缓型海洋灾害的不断累积和放大过程,最终也将导致突发型环境灾害。

1.3.1 风暴潮灾害致灾突变方式分析

突发型海洋灾害是指人类活动与自然生态、海洋环境相互作用,致使海洋环境的稳定程度遭到破坏,产生异变,并逐渐积累,在外界的小扰动作用下,突然爆发,短时间内自然生态与海洋环境系统的结构与功能崩溃,进而对人类生命财产造成严重威胁与损害的环境灾害现象。而风暴潮灾害正是一种极具代表性的突发型海洋灾害。

由此可见,在海洋灾害系统中,突变现象表现出的一个共同特点是:外界条件的微变将导致系统宏观状态的剧变。假如向河流排放污水,如果污染程度增加10%,我们可以简单的预料鱼类会减少10%,然而假如污染程度达到临界点时,污染稍有增加就会引起鱼类全部死亡。即外界条件的连续变化可以导致系统状态的不连续的剧变。

1.3.2 风暴潮灾害致灾影响放大过程

风暴潮灾害发生过程中的放大机制主要如下:

(1) 共振放大作用。共振放大是周期性外力作用在具有相同周期的固有振动系统中的放大作用。共振的实质是振动系统接收到第一个外力后,系统本身把接受的能量一部分传给后面的系统,其本身保留了大部分,即随后持续的固有振动能量。然后,后继外力又给振动系统供能,使该能量与前一外力给后留的振动能量同方向叠加,于是振动就放大了。依此叠加下去,振动系统的振动幅度越来越大,这就是共振放大。假如外力作用的周期与振动系统的固有周期不一致,则第一个外力使振动系统留给后面的振动能量,因与后来作用的外力方向不一致而对后来的外力有抵消作用,因而不能放大振幅。共振放大在自然界是很多的,在灾害物理学中把它作为致灾因素之一,即所

谓共振致灾。

(2) 正反馈放大作用。所谓正反馈放大是指过程的后果反过来又加强该过程的一类放大。这种放大在自然界中很多。例如，天气冷时海上会结冰，由于冰反射太阳光的能力强，于是冰区边缘的气温变得更低，这样冰区范围就要扩大，如此正反馈继续下去，就会使冰区越来越大，气温越来越低。地球史上的冰河期形成就与上述正反馈过程有关。

(3) 非线性放大。非线性放大是与系统的不稳定性有关的。从能量角度来说，当一个系统处于非线性状态时就意味着它本身存在有向某一方向或某些方向变化的潜在势能，如果外力有小的作用，则此势能得以释放，这样外力就被放大了；从相变的观点来说，非线性放大就是系统原相态快要变为新相态时系统内有涨落的加剧，如果此时有外因重合于某个涨落，就可引起系统相态的突变。

1.3.3 风暴潮灾害致灾熵增变化轨迹

熵是描述复杂系统状态的一个常用的物理量，熵的大小是无序度的一种度量。熵的概念起源于经典物理学，是指系统热量转变为功的本领，用公式表示为：

$$\Delta E = Q - W$$

对一微变化过程可以写为：

$$dE = dQ - dW$$

$$dE = dQ - PdV$$

式中， ΔE 为系统初态到终态的内能增量； Q 为外界传递给系统的热量； W 为系统对外界做的功； P 为系统内部的压强； V 为系统的体积。

根据热力学第二定律，任何不可逆过程都是沿着单向进行的。在这单向进行过程中，不可能把热从低温物体传到高温物体而不产生其他影响。克劳修斯（Clausius）找到了一个适当的态函数来描述这一不可逆过程的单向性，这个态函数称为熵，用 S 表示：

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

对于一个微过程的熵变满足：