



灾害系统与灾变动力学

张我华 王 军
孙林柱 王亚军 编著



科学出版社

灾害系统与灾变动力学

张我华 王 军 孙林柱 王亚军 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从大系统的角度,在总结不同学科中大量的各种灾害研究资料的基础上,应用耗散结构论、协同论、突变论、混沌理论等现代非线性理论,结合信息论、模糊理论、灰色理论和复杂性理论去认识、研究灾害系统发生、演化的普遍规律,提出了“灾害系统和灾变动力学”的研究内容和方法。书中通过大量的实例讨论了如何研究灾害孕育、演化、发生、传播、影响,评定、预测和防止的普遍规律和方法。本书从写作意图和写作内容上体现了基于上述新学科的交叉与创新。本书的内容将对灾害研究中灾害现象的认识、灾害规律的描述、灾害演化过程的分析、灾害发生的预测、灾害后果的评价以及防灾减灾技术与管理等问题提供新思路。

本书可供防灾减灾的工程技术人员和管理人员以及相关专业的高等院校老师和研究生或高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

灾害系统与灾变动力学/张我华等编著. —北京:科学出版社, 2011
ISBN 978-7-03-031752-0

I. ①灾… II. ①张… III. ①灾害系统-系统工程 IV. ①X4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 123367 号

责任编辑:沈 建 / 责任校对:朱光兰
责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 7 月第 一 版 开本: 16(787×1092)

2011 年 7 月第一次印刷 印张: 37 1/2

印数: 1—1 500 字数: 822 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

灾害系统是一个极其复杂的巨系统,它的发生、演化都具有相当复杂的特征,如有序化、突跳性、不可逆性、长期不可预测性以及模糊性、灰色特性等,这些特征都是传统的牛顿力学所不能描述的。然而,耗散结构、协同、突变论、混沌理论等非线性理论和复杂性科学的出现,使得从总体上研究系统灾变的非线性动力学发生、演化过程及控制因素成为可能。以耗散结构、协同、突变论、混沌理论的非线性理论强调了系统发生、演化的方向,亦即系统演化的不可逆性。

开放的灾害系统吸收负熵流,系统的各个组成部分之间存在非线性作用,并在涨落作用下通过自组织和突变形成新的有序的结构——耗散结构。本书从耗散结构和自组织的角度研究整理了实际工程中的滑坡、围岩系统演化、水土流失、生物湮灭等灾变过程的发生、演化,总结了复杂性科学在煤矿安全管理中的指导作用,并介绍了耗散理论在社会经济、证券市场、气象、水文循环中的应用。

突变理论是研究系统的状态随外界控制参数连续改变而发生不连续变化的数学理论,是研究灾变系统突跳特性的重要工具。本书介绍了尖点突变模型在系统危险性评价、预测和采矿、水利工程中灾害分析的应用,以及在隧道、地下洞室施工中防灾的指导作用;介绍了含软弱夹层岩体边坡失稳问题和建筑火灾的燕尾突变模型的应用。

针对灾害系统的模糊性和灰色特性,本书介绍了利用模糊理论和灰色预测理论,为灾害系统的分级、综合评价、聚类分析和灾害的预测等问题整理出了较系统的解决办法。此外,灾害链理论是近几年才发展起来的灾害理论,本书介绍了基于灾害链式发生机理的防灾减灾新方法的当前有关成果。

信息熵是热力学熵的推广,是系统混乱程度的测度。灾害系统的发生就是降维、有序化的过程,因此,用信息熵的演化来描述灾害系统的发生、演化特征是可行的。本书在修正一些既有灾害熵表述的不足之处基础上,构造灾变信息熵基本量的特征,并提出了基于损伤张量第一不变量构造损伤信息熵的观念。介绍了信息熵应用于系统的安全评价以及水文循环等实际问题中。

混沌论是 20 世纪 60 年代才建立起来的科学,混沌是指在确定性系统中出现的无规则性或不规则性,灾害的混沌特征主要表现在短期可预测而长期不可预测的特征。用 Lyapunov 指数、Kolmogorov 熵、分数维等研究、预测灾害系统的演化,以达到防灾的目的。本文介绍了滑坡、基坑的非线性混沌预测以及基于混沌理论的冲击地压预测的具体方法。

本书总结大量的灾害研究的资料,并以此为基础探索、总结了灾害系统的非线性与灾变动力学的研究内容和方法,从大系统角度讨论了如何研究灾害孕育、演化、发生、传播、影响,评定、预测和防止的普遍规律和方法。提出了建立灾害系统和灾变动力学的思想和理论框架体系,为灾害研究以及防灾减灾提供了新思路。

本书是在温州大学土木建筑工程学院的大力赞助和精心培育、扶持下撰稿完成的,在此表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,文中不当之处敬请批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 灾害的含义和类型	1
1.1.1 灾害的分类	1
1.1.2 灾害的分级	2
1.2 研究目的与意义	2
1.2.1 我国的自然灾害	2
1.2.2 自然灾害对社会的影响	3
1.2.3 我国防灾减灾工作的开展	4
1.3 灾害系统与灾变动力学	5
1.3.1 灾害系统的复杂性与变异性	5
1.3.2 灾害系统研究的基本理论问题	7
1.3.3 自然界灾害系统的规律	9
1.3.4 灾害系统研究的要领	10
1.4 灾变动力学研究方法 with 主要结果	10
1.4.1 灾变动力学的观念	10
1.4.2 灾变动力学中的非线性科学研究	12
1.4.3 灾变的灾害链研究	15
1.4.4 灾害等级评价和灾害区划	15
1.4.5 灾害的预测预报方法研究	17
1.4.6 灾害的信息熵理论	20
1.4.7 灾害研究与其他科学的交叉研究	21
参考文献	23
第 2 章 灾变与耗散结构理论	25
2.1 灾变系统耗散结构与非线性系统科学的复杂性概述	25
2.2 复杂开放系统的耗散特征	26
2.2.1 复杂开放系统与耗散结构	26
2.2.2 系统的耗散特征	27
2.2.3 复杂非线性系统建模方法概论	30
2.3 耗散系统的非平衡热力学理论	35
2.3.1 不可逆过程热力学中第二定律的数学式和熵的导出	35

2.3.2	不可逆过程的例子——体系内热传导过程	36
2.3.3	局部平衡假设	38
2.3.4	唯象关系和唯象方程	38
2.3.5	昂色格倒易关系	39
2.3.6	最小熵产生原理和定态稳定性	39
2.3.7	非线性区熵产生的时间变化率	40
2.3.8	非平衡定态的稳定性和耗散结构出现的可能性	41
2.4	现代非线性理论基础	42
2.4.1	线性和非线性的数学描述	42
2.4.2	非线性系统稳定性与分岔	44
2.4.3	协同学概述	47
2.4.4	突变理论(Catastrophe Theory)概述	48
2.4.5	混沌理论(Chaotic Theory)概述	51
2.4.6	开放体系及复杂系统动力学系统方程	52
2.4.7	几种典型的非线性系统及工程应用	57
2.5	工程结构系统非线性动力学方程推导工具	66
2.5.1	系统的广义坐标系	66
2.5.2	相对变形场的描述	67
2.5.3	变形体上任一点的位移、速度和加速度	68
2.5.4	变形体的动能	68
2.5.5	广义力及其功	68
2.5.6	运动约束方程	69
2.5.7	哈密顿原理和拉格朗日方程	70
2.5.8	系统方程	71
2.5.9	耗散系统的一般运动方程	72
2.6	耗散结构系统的动力学灾变特征分析	73
2.6.1	相空间特征及其吸引子	73
2.6.2	滑坡灾变的非线性动力学模型分析与预测	74
2.6.3	岩土体变形特征的耗散结构认识	77
2.6.4	围岩系统的耗散性及其演化的灾变特征	83
2.6.5	耗散结构论用于水土流失地区灾情分析	88
2.6.6	复杂性科学在煤矿灾变行为问题研究中的作用	90
2.6.7	耗散结构论在社会经济安全中的指导作用	93
2.6.8	证券市场的信息耗散分析	96
2.6.9	生物种群湮灭的非线性动力学分析规律	98

2.6.10 气象灾害的耗散结构特征分析与臆测	99
2.6.11 河型转化的耗散结构理论分析	101
参考文献	102
第3章 系统灾变行为的协同学理论基础	104
3.1 协同学的基本理论	104
3.1.1 协同学的基本概念	104
3.1.2 一些典型系统的协同学数学描述	106
3.1.3 动力学方程的朗之万描述	111
3.1.4 动力稳定性与平衡相变的类比	113
3.1.5 系统的组织与自组织功能	113
3.1.6 快弛豫参量绝热消元算法	117
3.2 灾害发生的自组织特性	119
3.2.1 自组织系统特征简介	119
3.2.2 灾害发生的自组织分形特征	120
3.2.3 灾变过程的自组织临界性及其判据	122
3.3 灾害自组织的幂分布律	123
3.3.1 幂律分布的普遍存在形式	123
3.3.2 复杂性问题中幂律分布的网络特征	125
3.3.3 幂律分布的形成机制	126
3.3.4 幂律分布的动力学影响	128
3.4 灾变过程的随机扩散特征	129
3.4.1 布朗运动的扩散模型	129
3.4.2 灾变过程的布朗扩散模型	130
3.5 灾害系统演化的沙堆动力学模型	132
3.5.1 理论基础简介	132
3.5.2 临界单面坡沙堆模型实验	132
3.5.3 基于沙堆模型的灾害预测方法	136
3.6 工程系统灾变的自组织理论应用	139
3.6.1 洪涝灾害的自组织结构的分形研究	139
3.6.2 泥石流灾变暴发的自组织临界特性分析	143
3.6.3 森林火灾的自组织临界性分析	149
3.7 岩石-岩体工程系统灾变的协同、分岔分析应用	154
3.7.1 岩体工程系统失稳的统计力学模型	154
3.7.2 岩爆系统的协同演化过程分析	155
3.7.3 岩石边坡演化的协同-分岔模型	158

3.7.4 煤矿顶板活动过程的自组织-协同演化分析	161
3.8 电力系统大停电事故的协同学分析与预测	166
3.8.1 大停电事故的灾害性	166
3.8.2 大停电事故的自组织临界特征与可预测性	167
3.8.3 大停电事故中的序参量演化方程	168
3.8.4 大停电故障时间的协同预测	169
3.8.5 实例的验证	169
参考文献	171
第4章 系统灾变行为的突变论特征	175
4.1 突变论的基本概念	175
4.1.1 突变理论的产生	175
4.1.2 系统稳定性与突变论	176
4.1.3 突变论与分叉论	176
4.2 突变论理论基础与基本分析方法	177
4.2.1 突变理论基础	177
4.2.2 基本突变类型	181
4.2.3 突变模型的几何表示	184
4.2.4 基于突变理论的系统评价方法	187
4.2.5 基于突变理论的系统预测方法	189
4.3 事故和灾害的突变论预测与评价	191
4.3.1 事故和灾害的特征、发生过程的形式及原因	191
4.3.2 事故与灾害的突变论预测	192
4.3.3 灾害危险性的尖点突变评价模型	195
4.4 突变理论在岩土工程灾变分析中的应用	199
4.4.1 隧道工程结构灾变问题的突变论分析	199
4.4.2 地下洞室岩爆灾变的突变论分析	204
4.4.3 突变模型在施工中的指导意义	208
4.4.4 岩体工程系统失稳的能量突变模型	208
4.4.5 节理岩体渗流耦合突变模型	211
4.5 突变理论在采矿工程灾变分析中的应用	216
4.5.1 采矿动力灾变现象的突变机理及其应用	217
4.5.2 矿山冒落诱发矿震灾害的突变论分析	220
4.5.3 煤/瓦斯突出的灾变特征突变论分析	223
4.5.4 矿井瓦斯爆炸灾变的突变论模型	231
4.5.5 煤层底板突水灾变的突变论预测模型研究	234

4.6	突变理论在水利工程灾变分析中的应用	238
4.6.1	泥沙起动的突变模型	239
4.6.2	大坝裂缝失稳的尖点突变论分析	242
4.6.3	坝基及岩基边坡位移监测的突变论分析	245
4.6.4	工程实例分析	246
4.7	降雨裂缝渗透影响下山体边坡失稳灾变分析	248
4.7.1	问题提出	248
4.7.2	边坡失稳灾变的尖点突变分析	248
4.7.3	滑坡灾变条件的分析与讨论	253
4.8	灾变分析的燕尾型突变动力学模型	256
4.8.1	含软弱夹层岩体边坡失稳问题的燕尾型突变模型	256
4.8.2	建筑火灾的燕尾型突变动力学研究	261
	参考文献	266
第5章	灾变行为的模糊理论描述	268
5.1	模糊数学基础	268
5.1.1	模糊子集与隶属函数	268
5.1.2	模糊集的 λ 截集	269
5.1.3	模糊关系	270
5.1.4	模糊模型的识别原理	271
5.1.5	模糊距离	272
5.1.6	模糊等价关系和模糊相似关系	273
5.1.7	模糊聚类分析	273
5.1.8	模糊综合评价	274
5.2	灾害评估研究内容与方法	275
5.2.1	灾害风险的评估	275
5.2.2	灾害的损失评估	278
5.2.3	灾害的生态环境评估	279
5.2.4	防灾工程的减灾效益评估	280
5.3	灾变问题的模糊分析及隶属度函数	280
5.4	灾变特征的模糊识别评价	281
5.4.1	基于模糊模式识别理论的基础	281
5.4.2	自然灾害危害度的模糊模式识别评价	283
5.4.3	灾害模糊模式识别评价的应用实例	283
5.5	灾变状态的模糊综合分析与评定	284
5.5.1	灾害等级的主成分分析法	284

5.5.2	用模糊直方图分析自然灾害风险	287
5.5.3	灾害的灰色模糊综合性分析	291
5.6	灾变信息熵的模糊性	297
5.6.1	灾害信息熵思想和灾变熵权的概念	297
5.6.2	灾变信息熵的模糊性	298
5.6.3	地下工程风险的灾变熵模糊评估分析	299
5.7	基于模糊马尔可夫链状原理的灾害预测	302
5.7.1	模糊马尔科夫链的基本原理与算法	302
5.7.2	模糊马尔可夫链的灾害预测原理	304
5.7.3	工程应用实例分析	304
5.8	工程系统灾变的多理论综合模糊分析应用	306
5.8.1	沙土地地震液化灾害的模糊聚类分析	306
5.8.2	堤坝下软土地基塑性失稳的模糊综合评定	311
5.8.3	公路安全事故的模糊预测模型	313
5.8.4	基于熵权重与多级模糊综合评价相结合的核动力装置安全分析	316
5.8.5	基于统计方法与模糊风险评估结合的台风灾害模型	318
5.8.6	基于 AHP 一致矩阵理论与模糊评价结合的边坡稳定性分析	323
5.8.7	围岩稳定性分类的可变模糊模型	327
	参考文献	331
第 6 章	系统生态环境灾变的链式的理论	335
6.1	自然灾害链式的理论体系	335
6.1.1	灾害链的定义与内涵	335
6.1.2	灾害链式规律的描述	335
6.1.3	灾害链式阶段的划分	342
6.1.4	孕源断链的减灾观念	342
6.2	灾害链式结构的数学关系与模型分析	343
6.2.1	灾害的链式关系的结构	343
6.2.2	灾害链式效应结构的数学模型	346
6.2.3	自然灾害链式效应复杂性规律及其本质	348
6.3	自然灾害链断链减灾模式分析	350
6.3.1	源头断链减灾模式与机制的形成	351
6.3.2	灾害链减灾模式分析	352
6.4	自然灾害链式理论的工程分析算例	354
6.4.1	斜坡岩崩的动力冲击灾害链模式分析	354
6.4.2	滑坡的二维灾变链式尖点突变力学模型	358

6.4.3 土地沙化的断链减应用分析示例	360
6.4.4 冻融灾变链式理论分析与应用范例	362
参考文献	366
第7章 系统灾变的灰色预测	368
7.1 灰色分析的基本数学原理	368
7.1.1 灰色动态系统建模	368
7.1.2 灰色预测基本原理	371
7.1.3 GM(1,1)模型的预测方法和算例	373
7.2 灾害的灰预测	379
7.2.1 灾变灰色预测的概念与数学原理	379
7.2.2 灾变灰预测的算法与步骤	381
7.2.3 季节灾变灰预测与步骤	384
7.2.4 拓扑灰预测	387
7.3 灰色预测理论的应用	390
7.3.1 灰预测在岩土工程中的应用	390
7.3.2 灰理论在气象灾害预测中的应用	395
7.3.3 灰预测在社会和经济活动中的应用	400
7.4 灰色理论与其他理论的结合应用	403
7.4.1 灰色马尔可夫链在道路交通事故预测中的应用	403
7.4.2 岩土动态开挖的灰色突变论建模	407
7.4.3 z 指数与灰色理论在降雨灾害预测中的应用	410
7.4.4 基于耗散理论的灰色关联熵应用于水资源系统演化分析	412
7.5 灰色多维评估理论与应用	415
7.5.1 灰色多维评估理论基础	415
7.5.2 灰色评估理论的应用	419
参考文献	424
第8章 系统灾变特征的信息熵表示	426
8.1 熵的概念与基础	426
8.1.1 熵的世界	426
8.1.2 热力学熵(热熵)	429
8.1.3 信息熵(信熵)	430
8.1.4 灾变熵(灾熵)	432
8.2 各种熵间的关系与应用	434
8.2.1 热力学熵与信息熵的发展与联系	434
8.2.2 信息熵与灾变熵的关系	435

8.2.3 灾害描述中熵概念的应用案例·····	435
8.3 最大熵原理及其在灾害分析中的应用·····	440
8.3.1 最大熵原理的数学描述·····	440
8.3.2 最大熵的谱估计方法·····	441
8.3.3 基于最大熵原理的灾害损失分析·····	442
8.3.4 最大熵原理的应用·····	444
8.4 工程结构分析中灾变信息熵应用·····	447
8.4.1 围岩系统灾变中的耗散信息熵·····	447
8.4.2 结构系统失稳的耗散信息熵突变判据·····	448
8.4.3 有限元分析中的耗散信息熵模型·····	449
8.4.4 结构耗散信息熵的构造·····	452
8.5 灾变信息熵的非确定性描述·····	458
8.5.1 统计意义下信息熵的描述·····	458
8.5.2 模糊意义下的广义信息熵描述·····	459
8.5.3 基于熵权的灰色关联分析模型及其应用·····	460
8.6 信息熵在系统安全、风险、灾变分析中的应用·····	463
8.6.1 基于信息熵的生产过程安全评价·····	463
8.6.2 基于信息熵的泥石流危险评价·····	465
8.6.3 信息熵在水文循环演化中的应用·····	467
8.6.4 最大熵原理与复合形法对边坡稳定分析的应用·····	469
8.6.5 地质灾害熵的概念和应用·····	471
8.6.6 熵权理论在灾害评价决策中的应用实例·····	476
8.6.7 灾害分析中的信息矩阵与信息扩散理论·····	485
参考文献·····	490
第9章 灾变演化的非线性动力学综合分析·····	493
9.1 工程灾变问题中的非线性动力学混沌分析·····	493
9.1.1 混沌的定义与灾变的混沌特征·····	493
9.1.2 混沌的主要特征·····	501
9.1.3 混沌的定义·····	502
9.1.4 混沌的产生·····	504
9.2 混沌的识别与预测·····	510
9.2.1 混沌的解析预测·····	510
9.2.2 混沌特征的数值识别·····	512
9.2.3 混沌识别综合分析方法·····	523
9.3 非线性动力系统的相空间重构技术与应用·····	524

9.3.1 非线性动力系统方程的相空间重构技术	524
9.3.2 基于相空间重构技术的滑坡灾害的非线性混沌预测	528
9.3.3 基于相空间重构技术的冲击地压混沌时序预测	532
9.4 基于机理模型的工程灾变综合分析	536
9.4.1 油罐沸腾流体膨胀蒸气爆炸的能量释放度量	536
9.4.2 基于声发射协同效应的混凝土损伤破坏评估	541
9.5 工程灾变问题中的综合分析方法与模型	546
9.5.1 堤坝和基础系统非线性动力失稳灾变的分叉-突变-混沌分析	546
9.5.2 积雨裂缝山体边坡动力失稳的混沌效应	560
9.5.3 灾害评估的危险性系统综合分析	577
参考文献	582
结论与展望	585

第 1 章 绪 论

1.1 灾害的含义和类型

灾害在不同的学科中有不同的含义,联合国“国际减灾十年”专家组对灾害的定义为:一切对自然生态环境、人类社会的物质和精神文明建设,尤其是人们的生命财产等造成危害的天然事件和社会事件,如地震、火山爆发、风灾、火灾、水灾、旱灾、雹灾、雪灾、泥石流、疫病等。有些自然灾害在比较短的时间里给人类造成灾难性的后果(如地震),而另外的一些则是比较缓慢地给人类带来同样(甚至更大)的影响(如干旱)。但是,并不是所有的地震、火山爆发等自然现象都是灾害,只有这些自然现象的发生影响到人类的生活时,它才成为灾害^[1]。

1.1.1 灾害的分类

灾害可按不同的标准进行分类,按灾害源地与人类活动的关系进行的,可分为地质灾害(如地震、火山爆发、滑坡、洪水等)、生态灾害(如干旱、沙漠化、水土流失、森林破坏等)。几乎所有的灾害都伴随着某种形式的损失,像财产、建筑、人的生命等,其损失程度依灾害类型、强度和发生区域不同而不同。另一种分类是按灾害的成因可将灾害分成:自然灾害和人为灾害。

自然灾害是以自然变异为主因而产生并表现为自然态的灾害。自然灾害主要有:

- (1) 气象灾害:由气象的变异而导致的灾害,如干旱、雨涝、寒潮冰雹、飓风等。
- (2) 海洋灾害:由于海洋变异而导致的在海洋或海岸造成的灾害,如风暴潮、赤潮等。
- (3) 洪水灾害:由于超出水道的天然或人工限制界限的异常高水位水流危及人民生命财产安全形成的灾害称为洪水灾害。根据洪水发生的原因,又可以分为暴雨洪水、山洪、融雪洪水、冰凌洪水、溃坝洪水、泥石流与水泥流洪水等。
- (4) 地质灾害:自然变异和人为作用导致的地质环境或地质发生变化所引起的灾害,如滑坡、崩塌、泥石流、矿山地质灾害、环境地质灾害、地震、火山、地热害等。
- (5) 地震:根据震源的类型,可分构造地震、火山地震、水库地震、塌陷地震等;根据震害的类型,可分建筑物震损、地震火灾、砂土液化、地震断裂等。
- (6) 农作物生物灾害:危害农作物的病、虫、草、鼠等有害生物在一定环境条件下暴发或流行,造成农作物大面积、大幅度减产,甚至完全失收,或者导致农产品大批量损坏变质,由此而造成的损失,统称农作物生物灾害。

人为灾害是由人为因素所引起的灾害,如交通事故、生产或工程事故、火灾、环境污染等。人为灾害主要有:

- (1) 生态灾害:自然资源衰竭、环境污染、人口过剩。
- (2) 工程经济灾害:工程塌方、爆炸、工厂火灾、有害物质失控。
- (3) 社会生活灾害:交通事故灾害、火灾、战争、社会暴力与动乱。

1.1.2 灾害的分级

对灾害的分级,不同的灾害形式其标准也不一样,但是所有的灾害都会造成人员伤亡和经济损失。因此可以按灾害造成的人员伤亡和经济损失来划分等级。我国一般将灾害分成巨灾、大灾、中灾、小灾、微灾 5 个等级(表 1.1)。

表 1.1 灾害的分级标准

级别	A(巨灾)	B(大灾)	C(中灾)	D(小灾)	E(微灾)
灾害 损失	死亡 1 万人以上; 损失大于 1 亿元	死亡 1 千到 1 万 人;损失 1 千万到 1 亿元	死亡 1 百到 1 千 人,或损失 1 百万 到 1 千万元	死亡 10 到 1 百人, 或损失 10 万到 1 百万元	死亡小于 10 人, 或损失小于 10 万元

1.2 研究目的与意义

1.2.1 我国的自然灾害

我国是个多灾的国家,近 40 年来,每年由气象、海洋、洪涝、地震、地质、农业、林业等七大类灾害造成的直接经济损失达一千亿元以上,约占国民生产总值的 3%~6%,平均每年因灾死亡数万人(表 1.2)。此外,经济发展、人口增长和生态恶化,尤其是灾害高风险区内人口、资产密度迅速提高,使自然灾害的发生频率、影响范围与危害程度均在增长,成为一些地区长期难以摆脱贫困的重要制约因素。

中国自然灾害的多发性与严重性是由其特有的自然地理环境决定的,并与社会、经济发展状况密切相关。中国大陆东濒太平洋,面临世界上最大的台风源,西部为世界地势最高的青藏高原,陆海大气系统相互作用,关系复杂,天气形势异常多变,各种气象与海洋灾害时有发生;中国地势西高东低,降雨时空分布不均,易形成大范围的洪、涝、旱灾害;中国约有 70% 以上的大城市、半数以上的人口和 75% 以上的工农业产值分布在气象灾害、海洋灾害、洪水灾害和地震灾害都十分严重的沿海及东部平原丘陵地区,灾害的损失程度较大;中国具有多种病、虫、鼠、草害滋生和繁殖的条件,随着近期气候温暖化与环境污染加重,生物灾害亦相当严重;中国位于环太平洋与欧亚两大地震带之间,地壳活动剧烈,是世界上大陆地震最多和地质灾害严重的地区。根据记录资料的统计,我国占全球大陆地震的 33%。我国平均每年发生 30 次 5 级以上地震,6 次 6 级以上强震,1 次 7 级以上大震。我国不仅地震频次高,而且地震强度极大。根据日本地震学家阿部胜征的研究,20 世纪全球发生的面波震级大于等于 8.5 级以上的特别巨大地震一共有 3 次,即 1920 年中国宁夏海原 8.6 级、1950 年中国西藏察隅 8.6 级和 1960 年智利南方省 8.5 级地震。我国地震分布广泛(除浙江和贵州两省之外,其余各省均有 6 级以上强震发生),震源很浅(一般

只有 10~20km),因而构成了我国地震活动频度高、强度大、分布广、震源浅的特征。另一方面,我国作为发展中国家,人口稠密、建筑物抗震能力低。20 世纪以来,全球因地震而死亡的人数为 110 万人,其中我国就占 55 万人之多,为全球的一半。

表 1.2 新中国成立后重大灾害损失简况^[2]

时间	重大灾害	经济损失 / 亿	人员伤亡
1954 年夏	长江暴雨洪涝	100 多	死亡 3 万余人
1963 .8	河北暴雨洪涝	60 多	死亡数万人
1975 .8	河南暴雨洪涝	100 多	死亡 24 .2 万人
1976 .7	唐山大地震	100 多	
1981 .8	四川暴雨洪涝	50 多	
1985 .8	辽宁暴雨洪涝	47	
1987 .5	大兴安岭森林火灾	约 50	
1991 .7	江淮暴雨洪涝	约 500	死亡 1163 人
1992 .8	16 号台风	92	
1994 .6	华南暴雨洪涝	约 300	
1994 .8	17 号台风	170	死亡 1000 人
1995 .6	江西、两湖暴雨洪涝	约 300	
1995 .7	辽宁、吉林暴雨洪涝	约 460	
1996 .6	皖、赣、两湖暴雨洪涝	300 多	
1996 .7	河北暴雨洪涝和 8 号台风	546	死亡 1000 余人
1998 年夏	长江洪水	2551	死亡 4150 余人
1999 .9	台湾集集地震	92(美元)	死亡 2392 人,失踪 39 人
2004 .8	14 号台风	181 .28	死亡 164 人,失踪 24 人
2005 .5	四川、湖南、贵州等地强降雨	24 .7	死亡 88 人,失踪 73 人

1.2.2 自然灾害对社会的影响

各种自然灾害对人类的危害和破坏方式是多种多样的,但概括起来主要表现在威胁人类生命和健康,威胁人类的正常生活;破坏公益设施和公共财产,造成严重的经济损失;破坏资源环境,威胁国民经济的可持续发展等三个方面。

1. 威胁人类生命和健康,威胁人类的正常生活

自然灾害直接危害人类生命和健康。一次严重的灾害会导致千百万乃至上亿的人受灾,并造成巨大的人员伤亡。例如 1556 年 1 月 23 日,陕西华县、潼关大地震造成 83 万人死亡;1976 年 7 月 28 日唐山大地震造成 24.2 万人死亡;1970 年 1 月 5 日云南通海地震造成约 1.6 万人死亡;1939 年 8 月 9 日,黄河花园口堤防决口,造成黄河泛滥,89 万人死于水淹和饥饿;1954 年夏季长江中下游地区特大洪水灾害造成 3.3 万人死亡。据资料统计,1949~1959 年,我国因灾害死亡 94914 人,年平均 8629 人;1960~1967 年因灾害死亡

43084 人,年平均 5386 人;1978~1997 年因灾害死亡 131511 人,年平均 6576 人。

2. 破坏公益设施和公共财产,造成严重的经济损失

自然灾害对房屋、公路、铁路、桥梁、隧道、水利工程设施、电力工程设施、通讯设施、城市公共设施以及机器设备、产品、材料、家庭财产、农作物等常常造成巨大破坏,其经济损失无疑是巨大的。

据统计,1980~1997 年的 18 年中,我国大陆发生的自然灾害,累计倒塌房屋 5752 万间,累计直接经济损失 13487 亿元,年均 749 亿元。

一些巨大的突发性灾害,可以在大范围内造成十分严重的破坏,有的甚至使一些城市被彻底摧毁。自然灾害还经常威胁生产活动,造成严重的间接经济损失,其中农业生产最为突出。我国因为干旱、洪涝以及风灾、雪灾、低温冻害、虫害等自然灾害导致农作物大量减产,造成经济损失,制约了农业的发展。1980~1997 年累计受灾面积 8.2 亿 m^2 , 平均每年因自然灾害损失粮食约 550 亿 kg ,相当于全国粮食总产量的 10% 以上。

除农业种植业外,林业生产、牧业生产、渔业生产也常常受到水灾、病虫害以及雪灾、寒潮、赤潮等多种自然灾害的威胁。

3. 破坏资源环境,威胁国民经济的可持续发展

灾害与环境具有密切的作用与反作用关系:环境恶化可以导致自然灾害,自然灾害又反过来促使环境的进一步恶化。灾害和环境变化除了直接影响人类生活与生产活动外,还对人类所必需的水土资源、矿产资源、生物资源、海洋资源等造成破坏,泥石流及与之密切相关的水土流失、土地沙化、土地盐碱化等自然灾害,严重破坏水土资源和生物资源;森林火灾、生物病虫害等直接破坏生物资源。在人类所需要的各种资源中,就有许多是有限的不可再生资源。因此,自然灾害对资源与环境的破坏,其后果是非常严重的。

近年来,随着世界人口的急剧增长和社会经济的迅速发展,资源危机和环境恶化问题日益突出,不仅对当代人构成直接危害,而且对后人的生存和发展也形成潜在的威胁。因此,协调人口、资源、环境关系,对实现人类可持续发展,已成为当今世界各国的共识。

1.2.3 我国防灾减灾工作的开展

1987 年的联合国第 42 届大会决定从 1990 年开始,开展世界范围的“减轻自然灾害十年”活动。为了了解我国的灾情总况,研究我国自然灾害的总体特点和规律,提出我国宏观减灾对策,国家科委各部门的专家对严重危害我国的地震、气象、海洋、洪涝、地质、农业及森林等重大自然灾害的灾情、特点、规律、对策进行了综合的、系统的、全面的调查研究。重点开展了五个方面的工作:

(1) 将自然灾害研究由单类推向综合。气象、海洋、洪水、地质、地震、农、林生物灾害是地球气、水、石、生诸圈层物质异常变动和相互影响的产物,彼此既具有特殊性,也有共性和联系性。

(2) 提出了自然灾害系统的观念,开展了自然灾害综合预报的探索。自然灾害不是孤立的,特别是巨大的自然灾害常诱导出一系列的次生灾害和衍生灾害形成灾害链;许多

自然灾害常同时或同地出现构成灾害群;灾害链、灾害群交织在一起构成自然灾害系统。

(3) 提出了自然灾害双重属性,加强了灾害社会属性的研究。自然灾害的形成既有自然因素,也有社会因素;自然灾害既影响自然环境,但更重要的是影响社会。

(4) 提出并推动减灾系统工程。减轻自然灾害是一项社会事业,需要社会方方面面协调行动,减轻自然灾害的各项措施,包括监测、预报、防灾、抗灾、救灾、灾后重建以及灾害管理、灾害保险、灾害教育等,都是环环紧扣,不可缺少的系统工作。

(5) 将减灾纳入可持续发展系列。人口过量增长,对资源过度开发,对环境任意的改造与破坏,是导致自然灾害发生的重要原因。同时,自然灾害又破坏了环境和资源,危害了人民生命财产的安全,阻碍了社会经济的发展。为了保障可持续发展必须减轻自然灾害。

不少科学家和管理专家提出了许多国家减灾对策。本书总结出以下几点供讨论:

(1) 要把减灾规划与计划列入各级人民政府的国民经济与社会发展规划与计划中。

(2) 要充分发挥现有减灾职能部门的作用,建立在国家保密法约束下的灾害信息共享系统,先期建立监测系统与数据库管理系统。

(3) 充分利用已有的灾害科学研究与观测的资料,制定国家自然灾害区划以及减轻灾害规划,促使我国减灾进一步地科学化与完善程序化。

(4) 加强减灾科学技术研究。强化减灾对策的职能部门协同攻关的组织体系,最终形成国家减灾系统工程。“八五”期间,国家计委与国家科委以及国家自然科学基金委员会给予减灾对策科学技术研究以不同程度的重视,但缺乏对区域综合灾害的研究。加强对灾害综合研究的人力、物力、财力的投入,这样才有可能使我国与世界减灾科学技术的差距减小,达到先进与领先水平。与此同时,促进职能部门在减灾工程(如防、抗、救灾工程)中拿出一定比例的经费,用于减灾工程建设中的科学技术研究。其获取的经济效益以及社会效益将远远大于这点经费在工程生效后的作用,建议在任何一项工程建设规划预算中,依据国家统一条例作出减灾工程预算,同时在这项预算中留出减灾科学技术研究的经费预算。

(5) 建立减灾示范区,形成区域减灾体系,从强灾重灾区入手,把区域农业开发示范区的建设与减轻区域灾害工程建设结合起来,把区域工业经济开发区的建设以及城镇、道路等建设同减轻灾害工程建设结合起来。

(6) 广泛宣传减灾基本知识,提高全民减灾意识,把减灾教育纳入国情教育。

1.3 灾害系统与灾变动力学

1.3.1 灾害系统的复杂性与变异性

1. 灾害系统的复杂性

人类所面临的主要灾害基本都发生在地球及其各圈层,因此形成了地球灾害系统,它们都是典型的复杂系统。它们不仅存在着多因子、多系统错综复杂的相互作用,而且具有

一些复杂的共同的基本特性:本质上的开放性和相对封闭性共存;稳定与不稳定、平衡与不平衡、连续与不连续、线性与非线性、渐变与突变(灾变)交替发生;灾害系统具有多种时空尺度系统的嵌套式的层次性;内因和外因的交互、耦合作用以及共振作用等。灾害系统科学面对这种如此庞杂、多态、多变的复杂巨系统必然带来研究问题的极端复杂性:一是涉及众多学科的大交叉,如何从中找出客观存在的关键性基本规律就相当困难。既需要发展一系列的新兴交叉学科,更迫切需要首先从方法论上寻求出路,以免陷于“瞎子摸象”和滑入不确定性甚至不可知论的泥潭。二是过去由简单系统得到的一些定律、规则和方程,在解决此类复杂系统问题时已面临很大困难,甚至显得无能为力。迄今仍然作为许多学科基础理论体系的牛顿质点动力学存在着两个根本性弱点:①不能描写不连续现象。灾害系统存在着大量的不连续,并且灾害系统的不连续往往具有本质性的特征。②方程中只剩下了力,没有了物本身的变化。而时空不均匀就可产生新的力。因此,对于作为复杂巨系统的灾害系统来说,仅仅依靠建立在牛顿质点动力学基础上的理论体系,难以全面、客观、准确地进行描写,需要在牛顿质点动力学的基础上,发展一种能够真实描写复杂系统尤其是其非线性突变过程的新型理论体系。

2. 灾害系统的组成

灾害系统是由孕灾环境、承灾体、致灾因子与灾情共同组成具有复杂特性的地球表层异变系统,它是地球表层系统的重要组成部分。由于灾害可以划分自然、自然-人文(环境或生态)、人文三种系列灾害,故灾害系统又可划分为三大子系统,灾情是孕灾环境、致灾因子、承灾体相互作用的产物。

灾害研究不应仅满足对致灾因子的研究,国内有学者把灾害分为气象灾害、地震灾害、地质灾害、海洋灾害、农业灾害、水利灾害、林业灾害等^[3],显然这强调了对灾害的管理,以及重视了致灾因子,而忽视了作为灾害系统的整体结构,这些研究的不足恰恰是系统科学开展灾害研究的重要方面。

(1) 孕灾环境:是由大气圈、岩石圈、水圈、物质文化圈所组成的综合地球表层环境,但不是这些要素的简单叠加,而体现在地球表层过程中一系列具有耗散特性的物质循环和能量流动以及信息与价值流动的过程——响应关系。从广义角度看,孕灾环境的稳定程度是标定区域孕灾环境的定量指标,这就是为什么要以全球变化、区域环境演变的研究才能够深入揭示灾害系统动态以及动力机制的根本原理^[4]。地球表层之孕灾环境对灾害系统的复杂程度、强度、灾情程度以及灾害系统的群聚与群发特征起着决定性的作用。

(2) 致灾因子:是指可能造成财产损失、人员伤亡、资源与环境破坏、社会系统混乱等孕灾环境中的异变因子。根据目前的认识,史培军曾提出了致灾因子的自组织体系^[4],把致灾因子系统划分为致灾因子亚系统、致灾因子类与灾种三级。

(3) 承灾体:是指包括人类本身在内的物质文化环境,主要有农田、森林、草场、道路、居民点、城镇、工厂等人类活动的财富集聚体。需要指出的是人类既是承灾体,同时又是致灾因子,如人为灾害、环境灾害中的人为过度利用等。

(4) 灾情:是指在一定的孕灾环境和承灾体条件下,因灾导致某个区域内、一定时期生命和财产损失的情况。灾情是孕灾环境、承灾体、致灾因子综合、相互作用的产物,研究

区域灾情是地理科学研究灾害系统的重要内容。

1.3.2 灾害系统研究的基本理论问题

灾害系统学是一门新的科学,其基本理论还有待于从大量研究实践中总结。下面根据前人的历史工作与近年的新的研究成果,提出如下基本理论问题,以资讨论。

1. 灾害链

一般把因一种灾害发生而引起的一系列灾害发生的现象称为灾害链。灾害链可进一步划分为串发性灾害链和共发性灾害链。前者是指因某一种原生灾害发生后,诱发产生的一系列的灾害现象;后者则是指某一原因或在某个地区同时所产生或发生的一系列的灾害现象。事实上,完全可以这样理解,串发性灾害链只是并发性灾害链的一种特例。

1965年5月22日智利接连发生的里氏7.7级、7.8级、8.5级三次大地震,在瑞尼赫湖区则引起了300万 m^3 、600万 m^3 、3000万 m^3 的三次大滑坡;滑坡坡入湖后,湖水外泄,淹没了湖东65km处的瓦尔的维亚城,使100万人无家可归。与此同时,这次地震还引起了巨大的海啸,结果使得1000多所住宅被冲走,2000多亩田被淹没,15万人无家可归。这次地震形成了两个串发性灾害链,它们共同构成并发性灾害链(图1.1)。2008年4月在我国四川省汶川发生的8.0级大地震的灾害链虽然没有海啸发生,但其余的灾害链远比图1.1复杂,造成了大小几十个堰塞湖和大规模桥梁、公路、隧道灾难,甚至火灾的发生等。

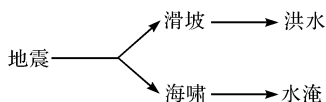


图 1.1 智利地震灾害链

2. 灾害群

灾害群是指灾害在空间上群聚与时间上群发的现象,亦是对灾害在时空两个方面集散程度的标识。由于致灾因子与承灾体在空间上分布的不均匀性,结果产生了灾害在空间上相对聚集与分散的现象,把这种现象称为灾害群聚。地球两个灾害带,以及我国沿海、北方农牧交错区、西南地区、华北平原等多灾地区均属灾害群聚带与群聚区。灾害群聚可用区域灾害类型多度指数(n/N)来表示。由于灾害在时间上出现的不均匀性,结果产生了灾害在时间上众灾丛生与少发的现象。把这种现象称为灾害群发。据研究,我国历史时期,如公元1581~1670年为一典型的灾害群发期,20世纪20年代末到30年代初为北方灾害群发期。灾害群发是对灾害类型在时间上频发性程度的表示,可用特定区域不同时期灾害类型频度来表示。对区域灾害类型多度与频度的研究,可以进一步揭示区域灾害类型的复杂程度;与此同时,还可以进行区域时空两个方面灾害的主导类型研究,这样就可重视多灾、群灾期同时,进一步重视主导灾害的防御。

3. 灾害机制

单一灾害的研究虽然也重视灾害机制的研究,但是只强调由致灾因子而产生的一系列动力学过程。对区域灾害系统的研究,所讨论的灾害机制则主要强调灾害系统的综合作用机制,即物质与能流耗散机制与生态机制。灾害系统是一类非平衡的耗散系统。就

逻辑概念来说,它表现出系统物质流与能量流的一系列扰动—涨落—相变—新态…的耗散机制。具体则表现为系统的波动、渐变与突变,波动与渐变目前可以利用时间序列分析的方法建立动态机制模型,突变则可利用突变论模型转换为灾害突变机制模型,目前需要认真研究灾害系统中孕灾环境、致灾因子、承灾体之间动力作用与反作用过程的定性模型,进而建立其耗散机制灾变动力学模型。在传统的灾害动力学机制研究中提出了一系列的灾变非线性动力学模型,如对称破缺、涨落加剧、长程关联、类比、共数等^[5]。东方灾异论则注重从灾害系统的整体考虑。如周易灾变说、灾位说、黑道说、相克说、跨时说等,这些都有待于进一步深入研究与分析。

灾害系统的物质与能量流的耗散机制,其核心是灾害时空变化的动力学过程,集中反映了灾害系统的致灾过程,灾害生态机制则主要揭示成灾过程。灾害生态机制是指灾害系统所具有的一系列共同或相似的生态学特征,包括三个方面的内容:

(1) 反馈机制:从致灾强度看环境灾害普遍具有正反馈机制,而自然灾害则常表现出负反馈机制,环境灾害的控制则体现出负反馈机制。正反馈机制可以看作灾害系统的放大过程,在这个意义上,当突发性自然灾害发生后,由于存在灾害链,结果逐级显示出灾害的正反馈作用,这样虽然能量的衰减对原生突发性自然灾害来讲出现负反馈,致灾过程得到抑制,但由于灾害链,使得次一级灾害加强,最终使成灾范围扩大,灾度加强,起到放大效果。

(2) 阈值机制:在致灾因子与承灾体的相互作用下,出现致灾的临界值(域)的机制,被称为灾害系统的阈值机制。由于致灾强度的变化,承灾体承受致灾能力的差异,使灾害系统的致灾临界值(域)变化很大。同一地区不同时期,或同一时期不同地区均表现出不同的阈值机制。一般来讲,环境演变敏感地带或孕灾环境的不稳定地带、社会-经济系统脆弱地区、减灾措施(防、抗、救灾能力)不强的地区,灾害系统的阈值超低,即易于减灾。反之,则阈值偏高,不易于成灾。

(3) 迟滞与综合加重机制:环境灾害、人为灾害均表现出明显的致灾与成灾的时间差,把这种时间差理解为灾害系统的迟滞机制。突发性自然灾害有时也表现出迟滞现象,但常常对孕灾环境与致灾发生的时间迟滞。因此,认识灾害系统的迟滞机制。对灾害系统致灾成灾的预报,进而进行减轻灾害有重要的指导价值。综合加重是灾害系统致灾群发与群聚在成灾过程中的集中表现,即通常所称之“1+1>2”的系统放大机制。一个地区某时期众灾群发,或一个时期某地区众灾群聚,其成灾结果均严重于某时或某地这些灾害单一作用的成灾累加程度。

4. 灾度

灾度是指对灾害系统致灾与成灾度表示的综合指标,复杂度通常可以多度、频度与优势度指标综合评定;灾害系统的强度,是对灾害系统致灾因子综合强度的表示。灾害系统的灾情程度,是对致灾因子造成人员伤亡与财产损失状况的表示。在这三度指标确定以后,即可利用三维坐标系确定一个地区灾害系统的强度。在实际应用中,只是(y_n)的确定需要在单因子强度基础上分级(g_n),并辅以优势度指标加权,即可获得等级绝对或相对值。复杂度(x_n)完全可以用比值确定。灾情程度(g_n)则可依据灾害损失量与承灾体的比值确定。因此,上述灾度模型较为简明地刻画了一个地区相对灾度的大小。另外,当灾情

程度(g_n)取为绝对值时,即可刻画一个地区的绝对灾度。

5. 灾害区划

灾害系统时空分布规律的认识是灾害区划的基础。灾害系统学中的区域灾害系统时空分布规律的研究,不仅是探讨区域灾害类型时空分布规律、演变趋势与空间相互作用与关联程度。而且更重要的是探讨区域灾害链、群机制及灾度等灾害系统若干特征的时空分布规律。因而,灾害区划就是在传统与现代对区域灾害时空分布研究的基础上,依据灾害系统时、空变化的地域组合类型,在一定的综合区划原则与体系下,建立灾害各级区域划分的指标体系,进而提出区域灾害系统区划方案,在此基础上,指出各区域的减灾对策。

1.3.3 自然界灾害系统的规律

从灾害系统等复杂性研究目前已有的成果来看,初步认为自然界灾害系统的整体联系的规则有:

(1) 形象思维是反映整体联系的一种重要形式。近代科学提出了“网络假设”,如卡普拉认为,新的世界观把宇宙看成是一个相互联系的事件的动态网络。它们相互之间联系的所有一致性确定了整个网络的结构。徐道一等^[6]认为,大地震的发生,在空间和时间上都存在明显的有序图像的网络信息。

(2) 自然界在不同时空层次之间,一个系统与其更大系统的关系,本质上属于子系统与母系统,即局部和整体的关系。如群体与个体,全球系统与某一圈层,太阳系、地月系与地球系统,银河系与太阳系等,无一不是整体与局部的关系。明确这种关系对于认识地球和人类本身的致灾特征和灾害发展演变规律极为重要。否则,容易滑入“只见树木,不见森林”和不确定性甚至不可知论的泥潭。

(3) 内外因耦合有可能是引起复杂系统重大变化、突变灾变的普遍性规律;天地耦合有可能成为灾害系统科学难点突破的根本出路。历史全球变化和地质时期的全球变化,都与灾害系统的天地耦合有密切联系。如地质代的分界和地质纪的分界,分别与巨型和大型陨击事件的大灾变有着相当好的对应关系。即使是当代全球气候的变化,也不可忽视灾害系统天地耦合的重要作用。特大暴雨是由于暴雨天气形势和引潮力共振减压相耦合的结果,两者均不可缺少;如果两者中缺少任一条件,均不会出现特大暴雨。

(4) 自然界灾害系统的天地联系在特定时空尺度上有着相应的特定的参数联系。然而反映此种联系的天文物理参数往往量级较小,但它通过地球系统内部反馈放大而引起。例如冰川期的形成,地球轨道参数变化引起高纬度太阳辐射减弱量较小,需要通过冰面反馈放大才行;地球自转减慢通过全球总角动量守恒条件下的角动量转换对大气、洋流的放大作用,方可导致厄尔尼诺的发生,这些都能在时间空间尺度上影响和控制地球自然灾害的发生。

(5) 自然界灾害系统还存在一种“严格准平衡态”和多级平衡的特殊平衡态,它是由两个或多个所组成。在此种条件下,推动物质运动的并非本身,而是其平衡后的微小偏差,从而为复杂系统的理论建设开辟了灾害系统理论研究的良好前景。

(6) 非线性问题不宜仅仅作为数学问题,而应首先视为一个物理问题。对灾害系统

的非线性问题,应当首先全力找出其特定的物理因素演化的致灾原因或环境因素演化的致灾原因,然后用某种数学形式加以描写。据此本书提出灾害系统和非线性灾变动力学相统一的灾害研究模式的设想。

(7) 宇宙中还有可能存在一种最大最广泛的整体联系,即在宇观、宏观、微观之间存在各自物理量自乘近似相等的大统一,也就是说宇宙中存在着时间空间质量能量连乘等于常数的总守恒。可见在宇宙中,既有极其丰富多彩的千变万化,又有在一定条件下存在着相当美妙的相互联系互相制约的规律。作为我们人类的家园的灾害问题——地球的灾变演化问题,当然也不会例外。

1.3.4 灾害系统研究的要领

首先,许多传统科学思维方式需要改变。需要由过去侧重考虑均匀、连续、平均、平衡、滤波和线性问题的处理,在此基础上逐步转变为侧重考虑非均匀、不连续、非平均、非平衡、演变、突变、灾变、奇异结构和非线性的处理问题。

在灾害成因研究时,必须全方位考虑各种可能的灾害影响因子,通过比较和筛选,全力从中找出最为关键的因子。否则,容易犯“瞎子摸象”的错误,真理多跨出一步,就变成谬误。其实,单因子、单学科的研究结论对所研究的局部来说都是对的。问题在于不能将局部当成整体,不可轻易地将它说成整体变化都由它引起。

在研究环境变化所引起的灾害后果时,同样必须将各种环境参数变化全部拿来比较分析,并讨论其间的连锁关系。否则容易限于片面、走向极端而误导他人。当前有关气候变暖后果的讨论,就存在某种片面性。

在提取与灾害相关的信息时,注重从原始信息和全局息中提取可用信息。如灾害新信息可公度性和浮动频率,弥补了目前周期频谱分析的缺陷。

从残差中大做文章,如北京天文台张国栋等在时纬残差中发现了邻近地区强震的短期信息。陈益惠、杨少峰分别将重力仪和地磁仪加密到一秒钟观测一次后,都测到了可贵的临震信号。

整体结构分析,包括质量、能量、时间、空间的结构异常以及更大系统的结构异常。在复杂系统变异的对策上,包括防灾减灾以及宏观经济调控、中医防病治病等,均需进行整体分析和整体研究。

1.4 灾变动力学研究方法 with 主要结果

1.4.1 灾变动力学的观念

人类生活在一个主要由工程介质支撑的环境中,工程介质的破坏、失效几乎涉及人类生活的一切方面、工程技术的各个领域。但是,由于工程介质破坏问题的复杂性,使之成为灾变动力学、灾害系统科学、地球物理学以及诸多相关学科的跨世纪难题。以工程介质破坏预测为例,其困难主要与它的两个特征相联系:一大类工程介质的破坏表现为突发性灾变,灾变前很难捕捉到明显的前兆;宏观上大体相同的系统其灾变行为可有显著差异,

即灾变呈现不确定性,只用宏观平均量不足以表征灾变行为。这类复杂特征的根源在于灾变的多尺度耦合效应。工程介质破坏的演化过程涉及很宽的空间和时间的尺度范围。因此,对工程介质破坏的研究也就从针对一条宏观裂纹的断裂力学,拓宽到对破坏过程的非平衡统计力学研究。破坏过程通常又是一种跨尺度演化的过程,即由大量微损伤的累积并通过跨尺度的非线性串级发展而诱发宏观灾变。在整个过程中,微小尺度上的某些无序结构的效应可能被强烈放大,上升为显著的大尺度效应,对系统的灾变行为产生重要的影响。由于不可能对各个尺度上的无序结构及其敏感效应作详尽无遗的描述,灾变行为呈现不确定性,跨尺度敏感性就是一个典型的案例。

实现灾变预测的一种可能的策略是寻找灾变的共性。为此,应在下述两个方面进行探索。统计细观损伤力学是描写非均匀介质损伤演化的一种连接细观与宏观尺度的统计理论。由统计细观损伤力学可导出描写宏观损伤演化规律的损伤动力学函数,其性质决定了系统中从随机损伤发展为损伤局部化的转变点。而损伤局部化正是灾变的前兆。在这个跨越宏观和细观尺度的认识里,将宏观尺度、细观尺度、宏观控制时间尺度和细观动力学时间尺度耦合起来的无量纲数,起着关键性的作用。

另一种具有共性的灾变前兆是临界敏感性,它是指当系统趋向灾变点时,系统对外界控制变量响应的敏感性显著提高。这种临界敏感性是在对一类细观动力学模型演化规律的统计分析中发现的,反映了损伤演化从细观尺度向宏观尺度跨尺度串级发展的特征。

损伤局部化与临界敏感性是典型的多尺度灾变现象,是在连接细观与宏观尺度的跨尺度耦合理论框架中得到的。它们可能是具有普适性的,并且是可监测的灾变前兆,因而可为灾变预测提供线索。这个案例表明进一步发展关于工程介质破坏的灾变动力学耦合的理论应是当前灾害问题最重要的研究方向之一。

社会经济系统的灾害和工程介质破坏的灾害从具体物理机制来看,似乎毫不相干。但是从灾害系统耦合的角度来看,无论是基本概念、研究方法还是理论框架,都有惊人的共同之处。例如:它们都涉及非平衡、非线性的演化,不同尺度之间存在强耦合,不能采用微扰方法或求相似解的方法,都存在跨尺度的敏感性,以致某些涨落会影响全局的突变等。因此,加强交叉学科的普遍灾害动力机制的研究,是灾变动力学必须面对的挑战。

由上可见,对灾变系统中强非线性动力学耦合的研究处理已有了一定的进展。看来,似乎可以找到对一般灾害系统问题的普适方法,在灾变过程的非平衡态统计物理取得突破之前,似乎难以对这个问题有满意的答案。但是,对于各类强耦合物理问题案例的处理也许会启发出一定程度上的统一处理方法。这个统一的处理方法多半会来自于学科的交叉,也就是说,灾害现象里看似毫不相关的物理现象的系统学相似处理思路,会给强耦合灾变动力学问题的研究带来新的发展机遇。就像19世纪电学和磁学的统一于具体的Maxwell方程和20世纪生物学与分子科学的结合导致分子生物学的蓬勃发展一样,灾害系统学多尺度现象研究中新的概念和方法的引入和融合统一会创造出灾变动力学学科发展的新增长点。除了上述统计力学与社会经济系统和工程介质破坏的结合之外,灾变动力学的新增长点也许还存在于:软物质和连续介质力学、统计力学的结合;生命现象,如基因序列、蛋白质功能的研究,可能萌生新的灾变动力学力学方法。实际上,灾变动力学必须处理大量复杂系统中的各种复杂演化现象,其复杂性的根源之一就是多观念、多物理、

多尺度的耦合效应。通常认为,复杂系统的本质在于“整体大于部分和”,这意味着应当认真处理灾变动力学的多尺度耦合问题,而不能简单地做解耦处理。因此,灾变动力学多尺度耦合问题已经成为广泛关注的一大难题。灾害系统中的各部分之间的相互作用具有复杂的非线性特征,而它所处的环境对其的外部影响也都是非线性的,因此,目前更倾向于用非线性科学中耗散结构、自组织、突变论、信息熵以及混沌等学科和灾害链理论对其描述研究。然而,灾害系统中各部分的非线性作用过于复杂,对于复杂的灾害巨系统,人们现在还没有完全掌握其发生的机理,这样,灾害的发生、演化等过程又具有一定的模糊和灰特征。因此,在预测灾害的评价中,模糊数学也是最有效的工具,而在灾害预测的过程中,灰色预测或混沌理论能发挥更有效的效果。

1.4.2 灾变动力学中的非线性科学研究

1. 耗散理论与自然灾害

耗散结构理论认为,远离平衡态的开放系统,在外界条件变化到一个特定临界状态时,某些扰动可能引起大的涨落出现,可能不被耗散,反而可能被放大,并进而导致系统发生宏观的变化(突变、灾害),可能从原来的某种混沌无序状态转变为一种新的相对稳定的结构。灾害系统就是一类非平衡的耗散系统。就逻辑概念来说,它表现出系统物质流与能量流的一系列扰动—涨落—相变—新态的耗散机制。例如地震,震源区为开放系统,孕震期间震源处一定范围内的地壳处于高度不稳定状态,在内外因的作用下,地壳内物质的运动使岩石应力逐渐积累临震状态,系统内部存在非线性的相互作用过程,外界条件有微小变化,就有可能产生放大作用,使系统突变而在瞬间发生地震。其他的灾害过程,如岩崩、水文循环等都具有耗散的特征。耗散结构在灾害系统中是广泛存在的。

1) 地质灾害的非线性动力学研究

地质灾害是典型的发生于地球的自然灾害。灾害地质体是一个具有复杂结构和行为特征的开放和耗散体系,其显著特征就是具有高度的复杂性、非线性和不可逆性。近年来发展起来的非线性科学理论,给地质灾害的研究注入了新的活力。因此,将现代非线性科学理论与传统的地质灾害评价预测理论相结合,研究地质灾害的非线性动力学演化过程及控制因素,也是灾变动力学重要研究内容之一。

研究滑坡发育的非线性动力学机制,分析控制性因素及演化过程,应用协同学的观点从多种影响因素中寻求系统演化的快变量与慢变量,获得了影响滑坡、崩塌发生的控制性因素;建立滑坡、崩塌发生的地质与物理力学模型,研究了其失稳机制,进一步探讨了地质灾害发展演化的动力学过程。

中国科学院武汉岩石力学研究所对几类典型的地质灾害,分析了其发生的控制性因素,初步建立了非线性动力学模型,研究了其发生的内在机制及发展演化过程,并将内外非线性动力耦合作用强度和静态环境条件进行叠加分析,提出了基于灾变动力学的 FCJ-GIS 内外动力区划模型的斜坡灾害危险性评价新方法(如图 1.2 所示)。

2) 灾害环境下重大工程安全性研究

三峡工程中的地质灾害问题是三峡工程建设安全的关键问题之一。中国科学院

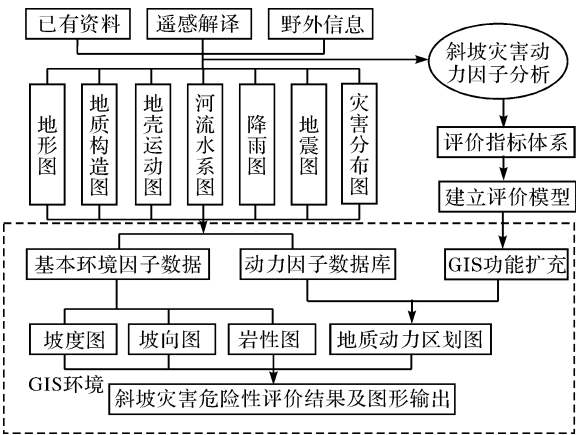


图 1.2 基于灾变动力学的斜坡灾害危险性评价程序

对三峡库区 64 个大型滑坡时空分布特征的研究表明,三峡库区大型滑坡的形成演化与长江河谷发育密切相关;15 万年以来,地壳快速抬升和气候冷暖变化的耦合作用是三峡库区发生多期大型滑坡的主要动因。这是内外动力耦合作用的灾变动力学引发大规模地质灾害的佐证之一。将三峡库区岸坡地质结构划分为五大类十五子类,给出了每一类别的三维模式图。这项工作对于应用灾变动力学方法指导库区岸坡稳定性评价、监测与加固,对于库区地质灾害危险性区划,对于相应的非线性力学预测模型的建立均具有重要意义。

图 1.3 是运用基于灾变动力学的动力区划的方法,对三峡库区虎跳峡地区河段内外斜坡灾害发生的动力强度区划图。鉴于动力因子的取值、分级界限及评价结果多为一些模糊信息,于是引入可以处理综合评判体系中的复杂性和不确定性的模糊综合评判法(FCJ)。在此基础上,建立了基于 FCJ-GIS 的内外动力区划模型,用之来表征内外动力耦合强度特征。

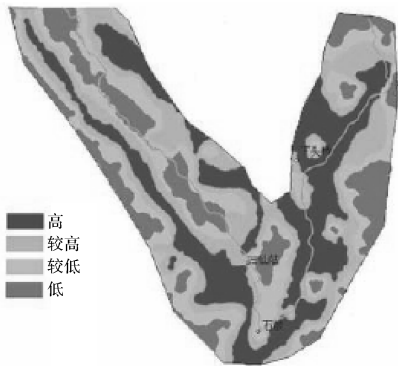


图 1.3 虎跳峡河段内外动力强度区划图^[7]

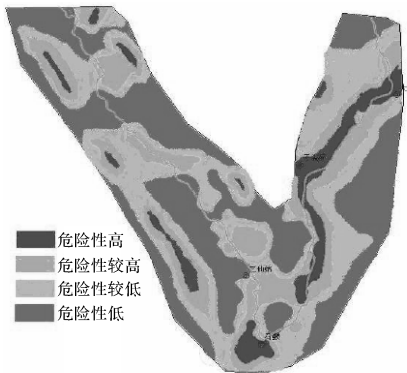


图 1.4 虎跳峡河段斜坡灾害危险性评价图^[7]

通过对虎跳峡河段斜坡灾害的实例研究表明(图 1.4),88% 的斜坡灾害体发育在内外动力耦合作用强度高~较高的区域,说明在内外动力耦合作用强度高的区域,斜坡失稳

破坏的几率较高。三峡库区已有的 61 个斜坡灾害均位于高~较高的危险性区划域内,空间预测的有效率为 95%,验证了该方法的可靠性、准确性和可操作性。这一方法可望为斜坡灾害危险性评价和空间预测开辟一新途径。

2. 灾变自组织临界理论

意大利经济学家 Pareto 研究了个人收入的统计分布,提出了 Pareto 定律,即个人收入不小于某个特定值 x 的概率与 x 的常数次幂存在简单的反比关系:

$$P(X \geq x) \sim x^{-k}$$

像 Pareto 定律这样的函数关系式,其通式可写成 $y = cx^{-r}$,这也就是著名的幂律分布。目前,幂律分布的动力学原因被认为是自组织临界理论。自组织临界理论认为,由大量相互作用的成分组成的系统会自然地 toward 自组织临界态发展;当系统达到这种状态时,即使是很小的干扰事件也可能引起系统发生一系列灾变。“沙堆模型”^[8]形象地说明了自组织临界态的形成和特点:设想在一平台上缓缓地添加沙粒,一个沙堆逐渐形成。开始时,由于沙堆平矮,新添加的沙粒落下后不会滑得很远。但是,随着沙堆高度的增加,其坡度也不断增加,沙崩的规模也相应增大,但这些沙崩仍然是局部性的。到一定时候,沙堆的坡度会达到一个临界值,这时,新添加一粒沙子(代表来自外界的微小干扰)就可能引起小到一粒或数粒沙子,大到涉及整个沙堆表面所有沙粒的沙崩。这时的沙堆系统处于“自组织临界态”,并且,临界态时沙崩的大小与其出现的频率呈幂律关系。这里所谓的“自组织”是指该状态的形成主要是由系统内部各组成部分间的相互作用产生,而不是由任何外界因素控制或主导所致,这是一个减熵有序化的过程;“临界态”是指系统处于一种特殊的敏感状态,微小的局部变化可以不断被放大、进而扩延至整个系统。

自组织临界理论在灾变的理论研究中,可以解释诸如火山爆发、山体滑坡、岩层形成、日辉耀斑、物种灭绝、交通阻塞以及金融市场中的幂律分布现象。这种理论的启示是小事件和大事件可能有相同的起因,这为地震、恐龙灭绝、森林火灾等复杂大系统的突变提供了合理的解释。

3. 灾变与突变理论

突变理论是由法国数学家雷勒·托姆于 1972 年创立的。突变理论是研究动态系统在连续发展变化过程中出现的不连续突然变化的现象、突然变化与连续变化因素之间关系的数学理论,其基础理论涉及拓扑学、群论、奇点理论、分叉理论等。耗散结构的演化具体可表现为系统的波动、渐变与突变,波动与渐变目前可以利用时间序列分析的方法建立动态机制模型,突变则需要用突变论模型转换为灾害突变机制模型。突变现象在实际工程中普遍存在,如建筑火灾的轰然现象、隧道围岩的塌方、煤与瓦斯突出、瓦斯煤尘爆炸等。

突变理论在很多的领域内都有重要成果。例如,在煤矿生产中,采矿活动以及地下大规模的开挖工程都是在多相、非均质各向异性的围岩(土)体中所进行的。因此,采矿活动中出现的许多动力现象都是与岩(土)体的结构特点和变形特点所分不开的。如采矿围岩中的应

力分布、岩层移动与破坏和地表沉陷是与岩(土)体的性质和结构有关;矿井瓦斯突出、冲击地压与岩体结构及气体赋存、运移规律有关;矿井突水与岩体性质、水的赋存、运移规律有关;井筒及地下构筑物的损坏与岩(土)体性质、水力作用等因素有关。由此可见,在孔隙、裂隙介质中的液、气多相流耦合作用下,岩(土)体稳定与非稳定变形、破坏与状态变化及致灾的突变动力学是采矿工程灾害与环境损伤领域中的重大基础理论问题^[9]。

1.4.3 灾变的灾害链研究

一般把因一种灾害发生而引起的一系列灾害发生的现象称为灾害链。灾害链可进一步划分为串发性灾害链和共发性灾害链。前者是指因某一种原生灾害发生后,诱发产生的一系列的灾害现象;后者则是指某一原因或在某个地区同时所产生或发生的一系列的灾害现象。事实上,完全可以这样理解:串发性灾害链只是并发性灾害链的一种特例。1965年5月22日智利接连发生的里氏7.7级、7.8级、8.5级三次大地震,在瑞尼赫湖区则引起了300万 m^3 、600万 m^3 、3000万 m^3 的三次大滑坡;滑坡坡入潮后,湖水外泄,淹没了湖东65km处的瓦尔的维亚城,使100万人无家可归。与此同时,这次地震还引起了巨大的海啸,结果使得1000多所住宅被冲走,2000多亩田被淹没,15万人无家可归。这次地震形成了两个串发性灾害链,它们共同构成并发性灾害链——滑坡-洪水-地震海啸-水淹(冲)智利地震灾害链。

灾害链的研究通过对灾害链划分不同阶段,提出了孕源断链减灾的观点。所谓“断链”,就是实现人与自然的和谐,因势利导地减轻灾害恶性循环,绝非是不平衡矛盾转移的顾此失彼做法,不能在此时此地实施了断链减灾,而又将灾害的损失转移或加倍在彼时彼地发生。例如,建造防护林带是防御沙漠化的断链途径,退耕还林是减少水土流失的宏观断链举措,构建海岸屏障是阻止风暴袭击的断链策略。灾害链研究在实际的防灾减灾中有着重要的指导作用。

1.4.4 灾害等级评价和灾害区划

灾害等级评价是指对灾害系统致灾与成灾度表示的综合指标。灾害的等级评价多具有模糊的特征,因此,目前灾害等级评价最通常的方法就是用模糊理论等对灾害进行综合评价,例如模糊聚类分析。这样做的好处就是能将模糊的、多属性的、定性的灾害根据其属性进行定量的评价分析,进行比较分类。灾害区划,则是在灾害等级评价的基础上,依据灾害系统时、空变化的地域组合类型,在一定的综合区划原则与体系下,建立灾害各级区域划分的指标体系,进而提出区域灾害系统区划方案,并指出各区域的减灾对策。下面通过文献^[10]对我国的城市洪水灾害的危险性进行的评估、灾害区划,说明城市防洪减灾的安全策略。

1. 中国城市水灾危险性评价

城市水灾是城市孕灾环境、致灾因子和承灾体综合作用的产物,三者的相互作用决定了灾情程度的大小。综合评价城市水灾危险性的指标体系是由孕灾环境危险指数、致灾因子危险指数和承灾体脆弱指数三部分组成。致灾因子危险指数是指诱发

城市水灾的因素的危险程度,城市水灾发生的次数体现了城市洪涝灾害的频发程度,通常灾次越多危险性越大。这里选用中国主要城市 1949~2000 年每年平均发生的水灾次数作为致灾因子危险指数,以此表征城市洪涝灾害致灾因子的危险性;人口和社会财产越密集的区域,洪水灾害的危险性也就越大。研究区域内的城市化水平表现出该地区人口和财产的集中程度,这在一定程度上能够反映城市遭遇洪水灾害时的潜在损失程度。因此,用综合城市化水平作为承灾体脆弱指数来表征城市承灾体的脆弱性;而孕灾环境是洪涝灾害发生的背景,城市水灾孕灾环境通常可以划分为天气因素和下垫面因素两部分。其中天气因素主要是指暴雨,这里选用多年平均暴雨日数(日)等级数和 3 日最大雨量(mm)等级数的算术平均值构成暴雨危险指数。下垫面因子相对复杂,是城市水灾危险性评价的重点。它一般由地形、河网、湖泊(包括水库)和防洪设施等组成,这些因素综合作用形成城市孕灾环境的特性(表 1.3)。其中,地形对洪水起着关键性的作用。承灾体脆弱指数危险性系数越高,其受洪水的危险程度就越大。由此,孕灾环境危险指数即为暴雨危险指数与下垫面危险指数的算术平均值。

表 1.3 孕灾环境各因子的危险系数划分

危险系数	地形因子 T	河网因子 D	湖泊因子 L	防洪因子 P
1	城市相对地势高	城市无主要河流经过	少湖泊且湖泊相对地势低	有护城河等,堤防标准高
2	城市绝对地势低,相对地势变化不大	城市有干流或一级支流通过	无湖泊或具有少量相对地势高的湖泊	防洪能力中等
3	城市相对地势低	河网密布或水域破碎或临海	相对地势高或地势低的湖泊众多	防洪标准低

根据以上的 3 个评价因子,针对我国 70 个城市,采用成因分析法提出中国城市水灾危险性评价模型:

$$D = \frac{D_H + D_X + D_S}{3} + r$$

式中, D 为城市水灾危险指数; D_H 、 D_X 、 D_S 分别为致灾因子危险指数等级、孕灾环境危险指数等级和承灾体脆弱指数; r 为修正系数。 D 值越高表明该评价区域受洪水灾害的危险性越大。

通过计算 70 个城市的水灾危险指数,得到中国城市水灾危险性评价图,如图 1.5 所示。结果表明:我国水灾高危城市主要分布于长江流域、海河流域、珠江流域和黑龙江流域。

2. 城市防洪减灾安全策略

防御洪水是实现城市减灾与可持续发展的基本保证,包括工程性措施和非工程性措施。工程性措施主要是“堵”和“导”。“堵”是通过筑河堤、建水坝等工程,堵住城内洪水漫溢和外来洪水入侵。“导”是疏导江河沟渠,完善城市排水系统,特别是城市地下排水系