

洪水灾害风险分析的系统理论<sup>①</sup>魏一鸣<sup>1</sup>, 范英<sup>1</sup>, 金菊良<sup>2</sup>

(1. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100080; 2. 四川大学, 成都 610065)

**摘要:**从系统论的观点出发,提出了洪水灾害复杂大系统的概念,并以这一概念为基础,探讨了洪水灾害风险特征及洪水灾害风险评价的基本内容,提出并系统地阐述了以洪水危险性分析、承灾体易损性分析和洪水灾害灾情评估为核心内容的洪水灾害风险分析的系统理论。

**关键词:**洪水灾害; 风险管理; 复杂系统

**中图分类号:** P333.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-9807(2001)02-0007-05

## 0 引言

洪水灾害风险分析是洪水灾害风险管理的基础性工作,是制定各项防洪减灾措施,尤其是非工程防洪减灾措施的重要依据,因此,洪水灾害风险分析对于减轻洪水灾害的损失具有重要意义,已引起人们的高度重视。美、日等发达国家早在五六十年代就已开展洪水灾害风险分析研究<sup>[1]</sup>,制作并发布了国家级的洪水灾害风险图<sup>[2]</sup>,我国则从80年代中期开始开展洪水灾害风险分析研究<sup>[3]</sup>。尽管如此,目前国内外关于洪水灾害风险的定义也未能统一<sup>[4-7]</sup>。纵观国内外的研究工作,洪水灾害的风险分析仍停留在单一学科内探讨,没有建立具有系统性的洪水灾害风险分析的体系,对于洪水灾害风险分析的内容和分析方法没有统一的可供参考的标准<sup>[10,11]</sup>。因此,本文首先从系统论的观点出发,建立了洪水灾害复杂系统的概念,以这一概念为基础,探讨了洪水灾害风险分析的基本内容,构建了洪水灾害风险分析的理论框架。

## 1 洪水灾害复杂系统

洪水灾害的发生、发展及消亡的整个演化过程

都是人与自然关系的一种表现。由于洪水灾害的最终承受体是人类及人类社会中的集合体(承灾体),因而,只有对承灾体的部分或整体造成直接或间接损害的洪水称之为灾害性洪水。一般而言,形成洪水灾害必须具有两个条件:一是存在诱发洪水的因素(致灾因素)及其形成洪水灾害的环境(孕灾环境);二是洪水影响区有人类居住或分布有社会财产(承灾体)。致灾因素、孕灾环境、承灾体三者之间相互作用的结果形成了通常所说的灾情。从系统论的观点来看,孕灾环境、致灾因子、承灾体及灾情之间相互作用,相互影响,相互联系,形成了一个具有一定结构、功能及特征的复杂体系,这就是洪水灾害系统<sup>[12,13]</sup>。图1描述了该系统的组成特征。概括起来,洪水灾害系统具有以下几个方面的突出特点。

## 1) 系统组成的高维特性

洪水灾害系统是由孕灾环境子系统、致灾因子子系统、承灾体子系统及灾情子系统四个子系统组成,而每一个子系统又包括其各自的子系统。例如:承灾体子系统又包括人类子系统、建筑群子系统、工业子系统、农业子系统等子系统。如此逐层分解,形成了洪水灾害的庞大的层次结构。显然,洪水灾害系统是一个“人—自然—社会”系统,它具有极高的维数。

① 收稿日期:1999-09-28;修订日期:2000-09-18。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(79900002);国家自然科学基金与长江水利委员会联合资助项目(50099620)。

作者简介:魏一鸣(1968-),男,江西人,博士,副研究员。

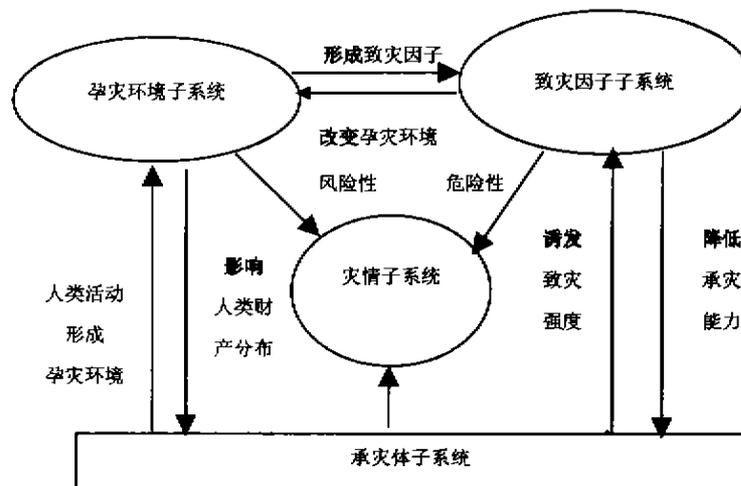


图1 洪水灾害系统

### 2) 子系统之间关联复杂

洪水灾害系统内各个子系统或局部子系统之间相互作用、相互联系,形成了复杂的关联。这种关联的复杂性不仅表现在结构上,而且可以表现在内容上,例如,它们可以是物质、能量或信息的关联,也就是说各子系统之间的关联的形成是多样的。

### 3) 影响因素繁多、层次不明确

洪水灾害的形成受多种因素的影响,每一种因素又包含众多的表现形式,形成了洪水灾害系统内各因素之间复杂的因果表达关系,从而使得系统内部因素间因果层次关系不明确。例如,降雨作为直接影响径流的重要因素之一,由于其时空分布的不同对经济的影响作用也不同。

### 4) 洪水灾害系统的不确定性

洪水灾害系统的不确定性概括起来,包括随机性、模糊性、灰色性与混沌性等方面的内容。

### 5) 系统的开放性

洪水灾害系统是一个“人—自然—社会”系统,这一系统不断地与其环境发生着物质能量和信息的交换,体现了这一系统的开放性。一方面,洪水灾害的形成,需要一定的条件。例如,需要从其外部环境系统中得到能量、物质或信息。没有外部环境系统的作用,洪水灾害就不可能发生。另一方面,由于洪水灾害的发生,又对其外部环境系统产生影响,甚至产生或引起其他灾害。例如,大气环流的变化,可以引起地面的洪水灾害,同时由于洪水灾害,可能导致泥石流、滑坡等灾害的发生。

洪水灾害系统是一个开放系统。

### 6) 洪水灾害系统的动态性

洪水灾害系统随时间而不断地发生变化,这是由于它的周围环境系统不断地发生变化,引起了洪水灾害系统的输入输出强度与性质不断地变化,并进一步引起洪水灾害系统的结构与功能的变化,从而使洪水灾害系统呈现出显著的动态性。

### 7) 洪水灾害系统的非线性

这就是指洪水灾害系统的输出特征,对于输入特征的响应不具备线性叠加性质。例如,相同强度的洪水,在经济发展水平相近的地域,其规模量级大小与损害数量程度方面具有一定的对应关系,但其由于不同地域的背景条件、人口密度、经济发展水平等方面有差异,所以自然事件的规模和造成的损失之间不可能构成线性函数关系。

综上所述的七个特点,突出了反映了洪水灾害系统的高维性、复杂性、开放性以及动态性。因此,从系统科学的观点来看,洪水灾害系统是一个动态复杂大系统<sup>[4]</sup>。针对这一复杂大系统的控制与管理,无论是采用经典的控制理论,还是采用传统的运筹学技术,都将遇到困难。因此,必须应用现代科学理论,并采用综合分析的方法,将各学科有机地结合起来,以研究洪水灾害行为的时空分布规律、成灾机理,从而形成洪水灾害预测与模拟、分析与决策的综合集成方法<sup>[11]</sup>。

## 2 洪水灾害风险分析

### 2.1 洪水灾害风险

根据前述所建立的洪水灾害复杂大系统的概念,洪水灾害风险可定义为不同强度洪水发生的概率及其可能造成的洪水灾害损失。显然,这一定义确切地反映洪水灾害本身的自然属性和社会属性。基于这一定义,洪水灾害风险概括起来具有以下特征:

#### 2.1.1 洪水灾害风险的客观性

洪水灾害发生既有随机性,又具有可预测性。随机性包括洪水的不确定性、资产分布的不确定性、防洪措施运用的不确定性等多方面,其中又以洪水的不确定性为主。洪水的发生受地貌、气象、下垫面状况等多种因素的控制,而后者的随机性决定了洪水在时空分布上的随机性;可预测性是指洪水灾害发生发展的过程是有规律性的,如洪水(灾害)等级——频率分布符合某些概率曲线。洪水灾害这种“可测定的不确定”,反映着洪水灾害风险的存在。由于洪水灾害发生不可避免,人类尚无法完全控制洪水的发生,任何防洪工程的设计标准也都有可能被超出,洪水灾害风险是客观存在的。

#### 2.1.2 洪水灾害风险既是经济风险又是非经济风险

洪水灾害对人口、经济、社会、生态诸多方面造成危害或产生不利影响,洪水灾害后果有些是可以经济指标来反映,如财产损失、房屋倒塌、生命线工程的中断等,但有许多影响是不能或难以用经济指标来反映的,如洪水灾害造成的人员伤亡、心理恐惧、社会混乱及生态环境的恶化等。洪水灾害风险既是经济风险又是非经济风险,在某些情况下,非经济风险更令人关注。

#### 2.1.3 洪水灾害风险是纯风险

风险可分为纯风险和投机风险两种。只有损失机会而没有收益机会时,就是纯风险,而投机风险是既有收益机会又有损失机会的风险。洪水灾害带来的收益与其带来的损失相比是微不足道的,因此,它是纯风险。

#### 2.1.4 洪水灾害风险的空间性

洪水灾害同其它自然灾害一样,具有明显的空间分异特征。具体表现在两个方面:一是不同地区面临不同类型的、不同强度的洪水威胁;二是不同地区财产密度和易损失性差异也很大。即使同样强度的洪水出现在不同地区,造成的灾情也会有很大的不同。总之,不同地区面临的洪水灾害风险是不一样的,洪水灾害风险具有空间性。

#### 2.1.5 洪水灾害风险是可测算性

洪水灾害风险的可测算性主要是指:洪水灾害致灾因子——洪水发生概率可以测算;承灾体价值及易损性可以测算;洪水对承灾体的损害程度可以测算,从而可以综合确定洪水灾害的风险。当然,洪水灾害风险的可测算性主要是指经济风险,洪水灾害风险的非经济风险大多是难以测算的。

#### 2.1.6 洪水灾害风险具有动态性

洪水灾害的灾情是致灾因子(洪水)、孕灾环境、承灾体三者相互作用的结果,而致灾因子、孕灾环境、承灾体三要素都是在变化的。如经济发展导致财产密度增大,但同时抗灾能力也在提高。洪水灾害风险总处于动态之中。洪水灾害风险的动态性表明通过人们的努力是可以在一定程度降低洪水灾害风险度的。

### 2.2 洪水灾害风险分析的内容

洪水灾害风险管理主要包括洪水灾害风险分析、洪水灾害风险评价及洪水灾害风险管理与决策三个部分。图 2 描述了洪水灾害风险管理的三个主要内容之间的关系。从图 2 中可以知道,洪水灾害风险分析是洪水灾害风险评价的前提,而洪水灾害风险评价又是洪水灾害风险管理和决策的依据。因此,洪水灾害的风险分析是洪水灾害风险管理的核心和基础,以下将重点讨论洪水灾害风险分析的内容。

洪水灾害风险分析即分析不同强度的洪水发生的概率及其可能造成的洪水灾害损失。图 3 是洪水灾害风险分析系统的结构框图,可以看出洪水灾害风险分析系统包括三个方面的内容:危险性分析、易损性分析和洪水灾害损失评估,其中危险性分析主要针对孕灾环境和致灾因子,是系统的输入,易损性分析主要针对承灾体,是系统的转

换,洪水灾害灾情评估是系统的输出.

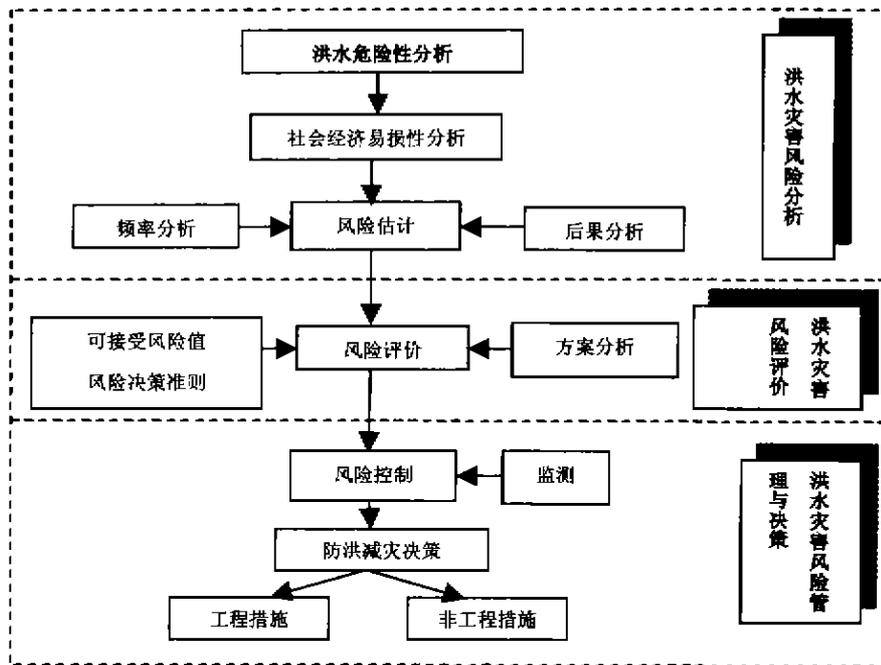


图2 洪水灾害风险管理

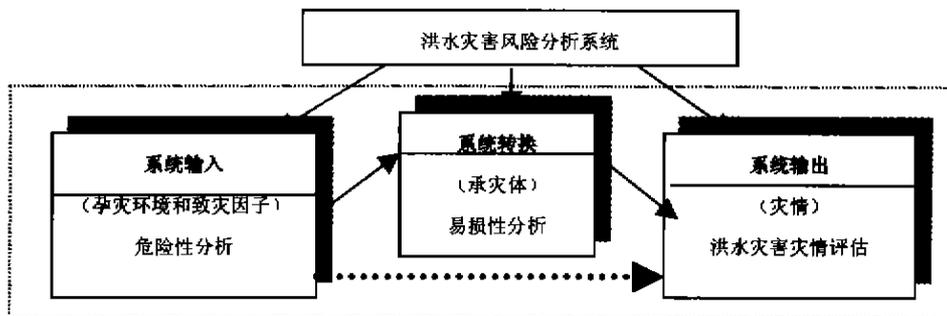


图3 洪水灾害风险分析系统

### 2.2.1 洪水危险性分析

“洪水危险性”有文献亦称为“洪水风险”，为避免与洪水灾害风险相混淆，本文采用“洪水危险性”这一概念。危险性(Hazard)是指不利事件发生的可能性，洪水灾害的危险性是指洪水灾害系统中孕灾环境和致灾因子的各种自然属性特征，可用洪水过程强度或规模(如洪峰流量、洪峰水位、洪水总量、洪水历时、洪峰流速)、洪水频率(洪水重视期)、洪水灾害影响区域及其影响程度、洪水灾害危害强度等危险性指标来刻画。洪水灾害的危险性分析就是在洪水灾害系统观点的框架下，

从风险诱发因素出发，研究不利事件发生的可能性，即概率。洪水危险性分析就是研究受洪水威胁地区可能遭受洪水影响的强度和频度，强度可用淹没范围<sup>[18]</sup>、深度、历时等指标来表示，频度即概率，可以用重现期(多少年一遇)来表达。具体地说洪水危险性分析即研究不同频率的洪水淹没范围、水深、历时的时空分布，即研究洪水发生频率与洪水强度的关系。

### 2.2.2 洪水灾害易损性分析

不同承灾体遭受同一强度的洪水，损失程度会不一样，同一承灾体遭受不同强度洪水损失程

度也不一样,即易损性(Vulnerability)不同。所谓洪水灾害易损性是指承灾体遭受不同强度洪水可能损失程度,常常可用损失率来表示<sup>[17]</sup>。洪水灾害损失率是描述洪水灾害直接经济损失的一个相对指标,通常指各类承灾体遭洪水灾害损失的价值量与灾前或正常年份各类承灾体原有价值量之比,简称洪水灾害损失率。洪水灾害损失率是洪水灾害经济损失评估的重要指标,分为各类承灾体分项洪水灾害损失率(如农作物洪水灾害损失率、工商企业财产洪水灾害损失率、城乡居民财产洪水灾害损失率等)和各类承灾体综合洪水灾害损失率两种。

洪水灾害易损性分析是研究区域承灾体易于受到致灾洪水的破坏、伤害或损伤的特征。为此,首先识别洪水可能威胁和损害的对象并估算其价值,其次估算这些对象可能损失的程 度。概括地说,洪水灾害易损性分析是研究洪水强度与损失率的关系<sup>[18]</sup>。

### 2.2.3 洪水灾害灾情评估

洪水灾害灾情评估是在危险性分析和易损性分析的基础上计算不同强度洪水可能造成的损失

大小。对于某一具体的承灾体,在一指定频率洪水下可能受到的损失可采用如下方法进行计算:①从洪水危险性分析结果中找出该承灾体所处位置可能遭受的洪水强度(如水深);②从易损性分析结果中,找出该类承灾体在该洪水强度下可能的损失率;③利用上步计算的损失率乘以承灾体的价值,即得到该承灾体可能损失值。

按上述步骤对研究区内所有承灾体计算损失值,累加即可得该频率洪水可能带来的总损失值;对所有频率,分别计算可能损失,就可以得到洪水灾害损失的 概率分布,即洪水灾害风险。

限于篇幅,本研究的应用将另文论述。

## 3 结束语

洪水灾害系统是一个涉及“人—自然—社会”的复杂大系统,从系统科学的观点出发,采用“四结合”<sup>[19]</sup>,即定性判断与定量计算相结合、微观分析与宏观综合相结合、还原论与整体论相结合、科学推理与哲学思辩相结合思想是建立洪水灾害风险分析理论体系的有效途径。

## 参 考 文 献:

- [1] Richards B D. 洪水的估算与控制[M]. 北京:水利电力出版社,1958
- [2] Bowers N L. 风险理论[M]. 上海:上海科学技术出版社,1995
- [3] 孙桂华. 洪水风险分析制图实用指南[M]. 北京:水利电力出版社,1992
- [4] 周寅康. 洪水灾害风险评估[J]. 大自然探索,1995,14(2):48-52
- [5] 罗祖德. 防灾减灾预测[J]. 科技导报,1997,117(3):53-54
- [6] 国家科委全国重大自然灾害综合研究组. 中国重大自然灾害及减灾对策(总论)[M]. 中国自然灾害丛书. 北京:科学出版社,1994
- [7] 闵赛. 洪险度及其灾害学意义[J]. 灾害学,1996,11(2):80-85
- [8] 魏一鸣,金菊良. 洪水灾害研究进展[J]. 大自然探索,1998,17(3):1-6
- [9] 汪寿阳. 关于建立灾害管理学的思考[J]. 国际技术经济研究,1999,2(2):9-12
- [10] 虞立红. 国内外自然灾害研究概况[M]. 北京师范大学地理系编. 区域·环境·自然灾害地理研究. 北京:科学出版社,1990,115-120
- [11] 郑远长. 防灾减灾的基础研究及应用研究进展概况[J]. 自然灾害学报,1996,5(4):1-5
- [12] 魏一鸣,金菊良. 洪水灾害评估体系研究[J]. 灾害学,1997,12(3):1-5
- [13] WEI Y M, JIN J L. The general system for flood disaster evaluation and analysis[C]. Proceedings of IWGIS'97. 1997,7:841-947
- [14] 魏一鸣. 洪水灾害研究的复杂性理论[J]. 自然杂志,1999,21(3):139-142
- [15] 魏一鸣,杨存建. 洪水灾害分析与评估的综合集成方法[J]. 水科学进展,1999,10(1):25-30
- [16] 杨存建,魏一鸣. 基于星载雷达的洪水灾害淹没范围获取方法探讨[J]. 自然灾害学报,1998,7(3):45-50

(下转至第 44 页)

$[S(x) - c_3 y'] > 0$  成立的顶点集合, 及

$$\begin{aligned} \emptyset_1 &= \min_y [S(x) - c_3 y'] & \emptyset_2 &= \min_y c_2 y' \\ \text{s. t. } y' &\in V_{EX}, & \text{s. t. } y' &\in E_x. \end{aligned}$$

设定  $K_2^* = [c_2 y^{*'}(x) - \emptyset_2] / \emptyset_1$ , 选择  $K_2 > K_2^*$ , 考察目标函数  $c_2 y'(x) + K_2 [S(x) - c_3 y'(x)]$  的实现值.

假设  $[S(x) - c_3 y'(x)] > 0$ , 则有

$$\begin{aligned} c_2 y'(x) + K_2 [S(x) - c_3 y'(x)] &> c_2 y^{*'}(x) + K_2^* [S(x) - c_3 y^{*'}(x)] \\ &= c_2 y^{*'}(x) + [S(x) - c_3 y^{*'}(x)] [c_2 y^{*'}(x) - \emptyset_2] / \emptyset_1 \end{aligned}$$

由于  $[S(x) - c_3 y^{*'}(x)] / \emptyset_1 \geq 1$ , 可得

$$c_2 y'(x) + K_2 [S(x) - c_3 y'(x)] > c_2 y^{*'}(x) + [c_2 y^{*'}(x) - \emptyset_2]$$

最终由于  $c_2 y^{*'}(x) \geq \emptyset_2$ , 下不等式成立:

$$c_2 y'(x) + K_2 [S(x) - c_3 y'(x)] > c_2 y^{*'}(x)$$

上不等式与 (R.1) 矛盾, 也即假设  $[S(x) - c_3 y'(x)] > 0$  不成立. 由  $S(x)$  的定义可知  $[S(x) - c_3 y^{*'}(x)] \geq 0$ , 所以, 当  $K_2 > K_2^*$  时, 惩罚项  $[S(x) - c_3 y^{*'}(x)]$  必为 0.

以上确定的  $K_2^*$  值取决于领导者决策  $x$ , 但注意到可行域  $\{x \in \mathfrak{R}^m : x \in \mathfrak{X} \text{ 及 } E_x \neq \emptyset\}$  有界, 因此必存在某一正实数  $K_2^*$ , 使得对任意  $x \in \{x \in \mathfrak{R}^m : x \in \mathfrak{X} \text{ 及 } E_x \neq \emptyset\}$ , 当  $K_2 > K_2^*$  时, 问题(8)中的惩罚项必为 0.

3) 注意到当  $K_1 > K_2$  时, 问题(7)为在一有界多面体上求连续凸函数最大, 据全局优化理论<sup>[10]</sup>, 其最优解可在多面体的某个顶点实现. 因此, 第三部分的证明与第二部分证明相类似.

因此, 设定  $K^* = \max\{K_1^*, K_2^*\}$ , 取  $K_1 > K_2 > K^*$ , 问题(7)与问题(6)有相同解.

#### 定理 2

**证明** 定理 2 的证明可由全局优化理论<sup>[10]</sup>得到.

(上接第11页)

[17] 金菊良, 魏一鸣. 基于遗传算法的神经网络及其在洪水灾害承灾体易损性建模中的应用[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(2): 653-660

[18] 金菊良, 魏一鸣. 基于遗传算法的洪水灾害灾情评估模型探讨[J]. 灾害学, 1998, 13(2): 6-11

[19] 成思危. 复杂科学与系统工程[J]. 管理科学学报, 1999, 2(2): 1-7

## System theory for risk analysis of flood disaster

WEI Yi-ming<sup>1</sup>, FAN Ying<sup>1</sup>, JIN Ju-liang<sup>2</sup>

1. Institute of Policy & Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

2. Sichuan University, Chengdu 610065, China

**Abstract:** From the viewpoint of system theory, the concept of large complex system of flood disaster is put forward, on which is based to investigate the characteristics and fundamental contents about the risk analysis for flood disaster. The hazard analysis of flood and vulnerability analysis of flood disaster-affected body as well as lose evaluation of flood disasters taken as the key contents are systematically described.

**Key words:** flood disaster; risk management; complex system