第 15 卷增刊　　湖　泊　科　学　　Vol. 15, Suppl
2003 年 12 月　　Journal of Lake Sciences　　Dec. , 2003

# 洪水风险 = 灾害事件×暴露程度×脆弱程度*

Wolfgang KRON

*(Geo Risks Research Department, Munich Reinsurance Company, Munich, Germany)*

**提　要**　世界上，洪水可能是造成损失最大的自然灾害. 世界上没有哪个地区不受到洪水的威胁. 由于洪灾风险是灾害事件、洪泛区财产遭遇风险的程度，以及它们的脆弱性的函数，所以灾害损失的增长与上述各个方面的变化都有关. 防洪措施可以减少灾害事件的频率，恰当的预防措施也能显著降低财产风险. 然而除了公共措施和私人措施外，在减少私人、企业、甚至整个社会的风险方面, 保险发挥着关键作用. 近年来，对洪水保险的需求日益增长，促使保险公司必须采取适当的解决方案. 与此同时，至关重要的是，保险公司应当清楚在极端情况下他们自己可能承担的最大损失.

**关键词**　洪水类型　洪灾　洪水风险　洪水预防　洪水保险

**分类号**　P331.1

在许多地区，洪水是造成灾害损失最严重的自然灾害之一. 因自然力量而发生的灾害损失大约 50%都是洪水造成的. 最近几十年来，洪水灾害极其严重. 有资料表明，洪水发生的频率和强度均呈增加趋势. 最近十年中，世界各地因洪水造成的损失多达 $2500\times10^8$ 美元以上. 在中国，洪水灾害相当频繁，基本上每年一次. 而在其他国家，如沙特阿拉伯，洪水虽然罕见，但破坏力却不容小视. 其实世界上凡是有人居住的地区均难逃洪水的威胁. 然而，洪灾脆弱地区十分广泛. 一些地区的人民（社区、市(州)、地区）已经学会与洪水共生存的方法，这些人对洪水灾害已经有所准备；而另一些地区的居民则在河面或海面上涨到从未经历过的高度时惊慌失措.

世界人口的增加，尤其是部分地区人口的激增，迫使人们不断地向灾害高风险地区扩展、定居[1]. 此外，政治、经济、社会以及其他原因导致的难民迁移、流动人口增加；某些自然风光、气候等宜人的自然环境，也使人们居住在那些他们并不了解的地区. 这些人并不知道当地隐藏着哪些危险，也对可能发生的自然灾害毫无戒备. 最近几十年来，大河流域的很多洪泛平原均已被居民区和工业区所占据，在堤防约束下河流在狭窄河道流动. 大河流域很多洪泛区廉价诱人的土地不断开发，大量新的城市和乡村落户于此，促使众多有潜力的投资者误以为这里不会有洪灾危险.

## 1 洪水类型

在保险领域，洪水被定义为：“由于地表水从原有河道中溢出或因大量降水所造成的土地被淹没的现象”. 洪水可分为三种基本类型，以及其他一些特殊种类[2]. 三种基本类型

* 2003-07-08 收稿;2003-11-21 收修改稿. Wolfgang KRON，male, Ph.D. email:wkron@munichre.com.

包括：风暴潮、河流泛滥、山洪暴发；特殊种类有海啸、涝灾、壅水、回水（如由于山体滑坡阻塞河道所引起的）、水坝决堤、冰川湖泛滥（GLOF）、地下水上涌、泥石流事件及其他所引起的洪灾等.

风暴潮发生在海洋和大湖沿岸，在与水有关的自然现象中，风暴潮造成的生命和财产损失的潜力最大.近年来，在发达地区，护岸工程的提高阻止了大量损失的发生，但风暴潮造成的可能损失仍然很高.

河流泛滥主要由强降水或数日甚至数周大面积连续降雨造成，有时伴有冰雪融化.这时土壤已完全饱和，降水损失减少，径流系数增加.河流泛滥是缓慢上涨的，但有时来得快，去的也很快.在平坦峡谷中、宽广的洪泛平原上，洪水影响的范围相当大.在狭窄的峡谷里，泛滥区域限于沿河流的带状区域，但水深、流速快，所形成的机械力和土沙流在灾害中起着关键的作用.虽然河流泛滥造成的蔓延，始自河道，而且基本限制在河谷内，但受其影响的地区却远远大于风暴潮的.

山洪暴发有时是河流泛滥开始的标志，但在大多数情况下山洪暴发只是局部事件，互不相干；发生的时间与地点也各不相同.山洪暴发是局部小范围内强降雨的结果.土壤通常并未完全饱和，但土壤渗透率比降水速度要低得多.在通常情况下，山洪暴发有一个相当突然的开始.水头可能从底部原本没有溪沟的山谷奔流而下.洪峰可迅速抵达数十公里以外，甚至那里没有丝毫暴风雨的痕迹.就这种现象而言，有句话十分恰当：即“沙漠里淹死的人比渴死的人多(in a desert more people drown than die of thirst)”.想预测山洪暴发几乎不太可能，早期预警最多能提前几分钟.虽然山洪暴发仅局限在相对较小的区域内发生，持续时间也仅数小时（有时数十分钟），但其有着令人难以置信的潜在破坏力.

山洪暴发的起因不仅仅限于地势陡峭的高速流水地区，在地势非常平坦的地区也可能发生，这是由于地面坡度过于平缓而降水无法迅速疏泄.骤发是指发生时间快，而不是水流的速度快.

平坦的平原地区还易受另一种涉及范围极广的洪灾威胁，称为内涝.在中国，这种情况司空见惯.长时间的大量降雨，在某些地区称为“梅雨”（因这种现象发生在梅子的成熟期，即六月到七月份），有时会使整个地区变为一片汪洋.

## 2 近期发生的洪水

由于再保险公司在全球范围内开展业务，他们成为自然灾害统计数据的最佳来源[3-4].他们最关心的主要集中在三个方面：受灾人数（死亡、受伤、无家可归的人数）、整个国家的经济损失和保险业赔付的损失.

造成成千上万人死亡的自然灾害基本上都发生在贫穷的国家，大多数是由地震引起.贫穷导致不发达国家脆弱性较高（建筑物质量较差，人口较多）.而且由于灾害预警能力差，地震往往突然袭来，引发灾难.在过去（10 多年以前），洪水曾造成大量人口死亡，但今天已不再重蹈覆辙，因为早期预警的可操作性更强、更可靠，因而也更有效了.

按照经济损失来统计，洪水占据了首要位置.目前为止，虽然两次地震（神户：$1000\times10^{8}$ 美元；Northridge：$4.4\times10^{10}$ 美元）仍然是损失最大的自然灾害事件，但比地震影响面积更大、发生频率更高的洪灾在造成损失方面毫不逊色.且不说大洪灾，就是每年数不胜数的中小洪灾也给各国带来几百亿美元的损失，给人民带来巨大悲痛.也许可以这样说，洪水造

成的损失比其他破坏性自然现象所造成损失的总和还要多.此外,世界各国在防洪方面所花的经费（海堤、防洪堤、水库等）是防止其他自然灾害所花费用的数倍.

表 1 给出了近年来洪水造成的最大损失情况.显而易见，中国因洪水造成的经济损失是最惨重的也是最有规律可循的.该表还清楚表明,严重的洪灾在世界上任何地区都有可能发生.在大型洪灾造成的损失中，保险公司所占的比例一般相对较小.就保险业而言，仅从风暴灾害投保比例最高可以看出，它无疑是最严重的灾害.但是，洪灾的投保率在世界范围内也呈上升趋势，尤其是因水灾造成的极端单个保险损失.其鲜明的例证是热带风暴“艾立逊”，它在 2001 年 6 月份，仅 5d 之内就给休斯顿、得克萨斯地区带来了逾 750 ㎜ 的降水，造成的保险损失高达 $35\times10^8$ 美元.该事件造成的总经济损失达 $60\times10^8$ 美元，在表 1 中居第 12 位，但投保率却是表上 13 起洪灾中份额最高的.

表 1 近十年损失最严重的洪灾（原值，未经通货膨胀率的调整）

Tab. 1The costliest floods of the past 10 years (original values, not adjusted for inflation)

| 排名 | 年份 | 国家（主要受灾地区） | 经济损失($\times10^8$美元) | 保险率(%) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1998 | 中国（长江流域、松花江流域） | 310 | 3 |
| 2 | 1996 | 中国（长江流域） | 240 | 2 |
| 3 | 1993 | 美国（密西西比河流域） | 210 | 6 |
| 4 | 1995 | 朝鲜 | 150 | 0 |
| 5 | 1991 | 中国（长江流域、淮河流域） | 110 | 0 |
| 6 | 1994 | 意大利（北部） | 93 | <1 |
| 7 | 1993 | 孟加拉、印度、尼泊尔 | 85 | 0 |
| 8 | 2000 | 意大利（北部）、瑞士（南部） | 85 | 6 |
| 9 | 1999 | 中国（长江流域） | 80 | 0 |
| 10 | 1994 | 中国（东南部） | 78 | 0 |
| 11 | 1995 | 中国（长江流域） | 67 | 1 |
| 12 | 2001 | 美国（得克萨斯州） | 60 | 58 |
| 13 | 1997 | 捷克、波兰、德国（奥得河流域） | 59 | 13 |

表 1 未能显示任何趋势.但在下面的图 1 中可以看出，随着时间的推移，洪灾损失发生了明显的变化.图 1 中，是自 1950 年以来的主要洪灾按照发生时间顺序绘制成图.1990 年以来洪灾造成的年平均损失已是此前数十年的数倍.

单凭受灾国或地区自己的力量已无法应付，需要跨地区和国际性援助的自然灾害，我们称之为“重大”的自然灾害.这种情况造成千上万人丧生，数万人无家可归，或经济遭受严重损失.重大的自然灾害可通过历史数据来分析，因为这种灾害的记录，即使过去了几十年仍然有案可查.由于近十多年来先进的通信技术的影响,如果统计资料主要来源于有缺失的信息（包括中小灾害事件），分析结果将会产生很大的偏差.过去的灾害事件构成了历史，而我们在预测未来的时候，一方面需要依据这些历史数据，另一方面也需要逐个分析损失事件，找出起主导作用的因素.从该分析中，我们可以算出预期的（未来）损失价值，这个我们称之为风险.

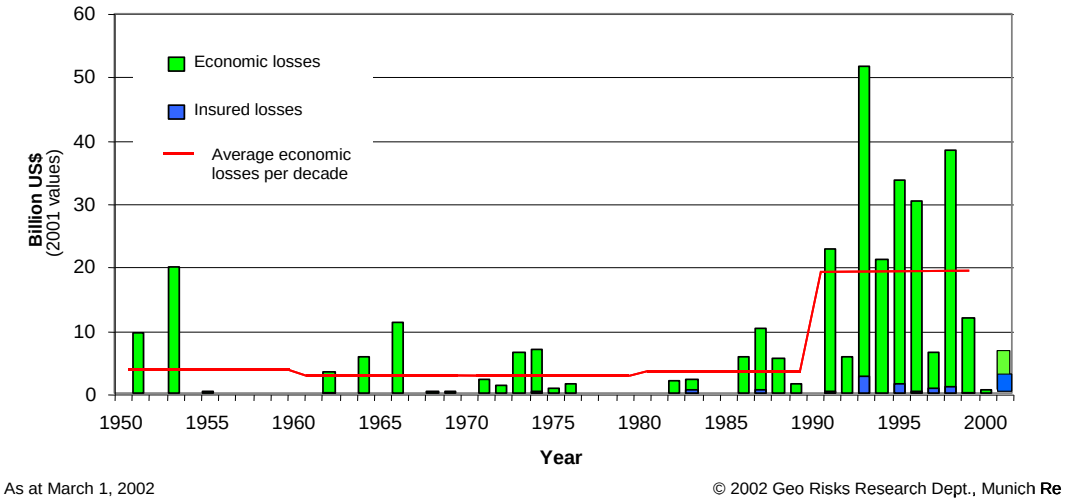


图 1 1950－2001 年世界重大洪灾 （Munich Re）

Fig.1 Great Flood Disasters 1950 - 2001

## 3 灾害风险的定义

不同的人对风险有不同的理解，但这种定义的多样性常常并不重要. 风险在用于科学研讨时，其定义应毫不含糊且前后一致. 在科研中，风险一般被定义为灾害及其后果的产物. 当自然现象不对人或财产发生影响时，风险就不存在. 类似，只有当人或人的财产受到损失时，灾难才会发生. 极强的地震如果发生在无人居住，也无人类财产的地区，就不会造成灾难. 同理，如果强震发生在事先准备充分的地区，也不会造成灾难性后果. 而在准备不足的地区，即便是中度的地震也会造成破坏性的灾难. 在第一个变量中，地震危害是最大的，但在第三个变量中，地震风险是最大的. 因此，风险由三大因素决定：

(1) 灾害事件：即具有威胁性的自然事件，包括事件发生的概率；

(2) 暴露程度：即生活在有关地区的人们及其直接面对灾害风险的财产；

(3) 脆弱程度：即对灾害或破坏性等力量缺乏抵抗能力.

在最简单形式下，风险可由这三个因素相乘得出. 如果我们将暴露系数和脆弱性相乘，得出变量 $C$，用于表示发生概率为 $P$ 的单个事件的后果，那么我们可将该单个事件的风险表达为：

$$R = C \cdot P \tag{1}$$

一般情况下，在单个事件中自然灾害不会以固定的概率出现，而是以多种形式或者几乎无止境的变化出现. 在假定灾害为洪峰流量 $Q$ 的情况下，公式（1）应写成如下积分的形式：

$$R = \int_{Q_a}^{\infty} C(Q) \cdot f(Q) \ dQ \tag{2}$$

其中 $C(Q)$是给定洪峰流量 $Q$ 造成的损失，$f(Q)$是该洪峰流量发生的概率密度函数. 积分域应从发生洪峰流量值 $Q_a$ 损失开始至正无穷.

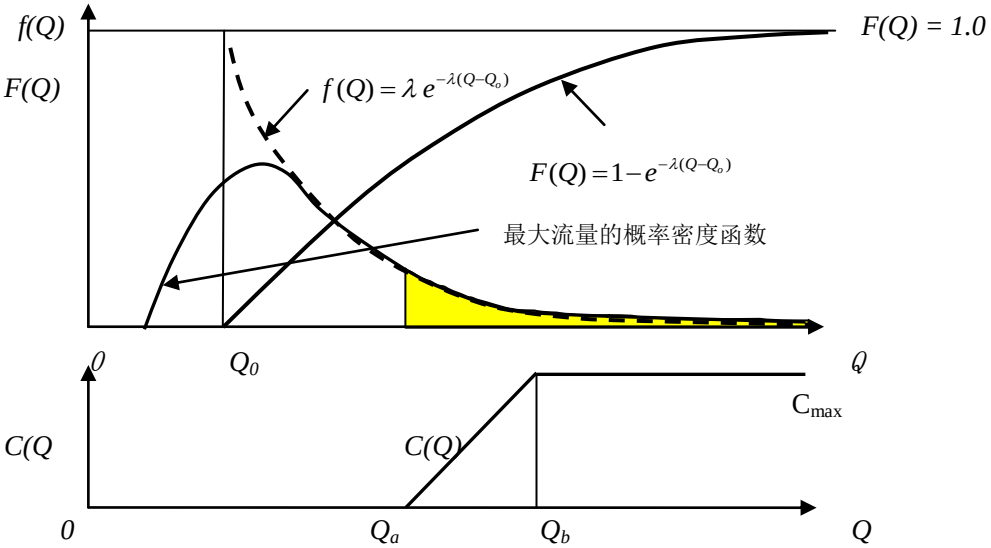


图 2 洪峰流量最大值的“真”概率密度函数，近似概率密度函数 *f(Q)*，累积分布函数 *F(Q)*，因果函数 *C(Q)*

Fig. 2 True probability density function of discharge maxima, approximated probability density function *f(Q)*, cumulative distribution function *F(Q)*, and consequence function *C(Q)*

一般而言，除了某些特定的 *C(Q)* 和 *f(Q)*组合，该积分不能以解析法求解. 例如，我们设 *C(Q)*为线性函数，$Q_a<Q<Q_b$ ，如果 $Q < Qa$ 时 $C(Q) = 0$，$Q > Q_b$，时，$C(Q) = C_{\max}$ = 常量，且具有概率密度函数的洪峰流量的单参数指数分布为：

$$f(Q)=\lambda\,\mathrm{e}^{-\lambda(Q-Q_o)} \tag{3}$$

（图 2），公式(2)可直接积分为：

$$R=\int_{Q_a}^{Q_b}\frac{C_{\max}}{(Q_b-Q_a)}\cdot(Q-Q_a)\cdot\lambda\,\mathrm{e}^{-\lambda(Q-Q_o)}\,\mathrm{d}Q+\int_{Q_b}^{\infty}C_{\max}\cdot\lambda\,\mathrm{e}^{-\lambda(Q-Q_o)}\,\mathrm{d}Q \tag{4}$$

经计算，得出[5]：

$$R=C_{\max}\cdot\frac{\mathrm{e}^{-\lambda Q_o}}{Q_\mathrm{b}-Q_a}\left[Q_a\mathrm{e}^{-\lambda Q_b}-Q_b\mathrm{e}^{-\lambda Q_b}+\frac{1}{\lambda}\left(\mathrm{e}^{-\lambda Q_a}-\mathrm{e}^{-\lambda Q_b}\right)\right]+C_{\max}\mathrm{e}^{-\lambda(Q_b-Q_o)} \tag{5}$$

在实际中，这种用于评估风险的解析计算往往不可行，主要是因为数据序列太少. 往往应用替代程序来简化计算[2].

## 4 洪灾增加的主要原因

尽管防洪措施和预报措施不断提高，但洪灾发生的频率和强度仍呈不断上升趋势，且带来了更大的风险. 接下来，我们重点讨论影响洪水风险的三个因素的某些特性.

### 4.1 灾害事件增加

过去十年中，各种情况都发生了的变化，引起洪水灾害也随之发生了很大的变化，具

体体现在洪水发生的频率和强度上.实际上，上述情况的发生都与人类活动密切相关，甚至气候变化引起的水文动态的变化也与此有关.

新居住区的土地开发直接导致了天然蓄洪区洪水储量的减少.洪泛平原被新的居民区所占据，或挪作它用.这往往是通过裁弯取直和加筑堤坝等措施实现的，有时这些措施还被用来防止农耕区受到洪水的威胁.但这些措施迫使洪峰增高，流速加快，从而增大了下游洪水的危害性.类似的措施还包括各种人为的覆盖地表，使不透水地面增加，例如部分流域被房屋、道路、停车场等无法渗透或渗透能力不佳的物体覆盖，使地表径流进一步增加，导致部分河流洪峰增大.但是，将洪灾增大的原因完全归咎于上述变化是不恰当的.虽然这些变化在部分地区（尤其是小流域）后果相当明显，但在流域面积较大，河流水网密集的地区，其影响通常相当微弱，甚至可以忽略不计.大河流的洪水不是由城市区不透水地面造成的，而农村地区地面的低渗透性却起着主要作用.这种“自然低渗透性”是由于前期的降雨使土壤饱和，径流系数变大所致.

把高流速与高洪峰联系在一起的假设也是不合理的.在树状河流系统中，问题的关键在于来自不同支流的洪水如何相互遭遇.如果来自主要支流的高流速洪峰能在干流洪峰到来之前汇入干流，将对减轻整个河流的洪水灾害起到有益的作用.

流速高的后果之一肯定是对河道和河床造成侵蚀.这将对桥墩、桥基、堤防构成威胁，而且淤积的沉积物将降低水库的蓄水量.但就受灾的影响因素而言，流域的侵蚀过程是更重要的因素.在许多地区，由于土地利用的变化（如草地和森林改为农业用地），河流砂土输送率和下游沉积率剧增.这种沉积现象不仅使河床抬高，而且使河流两侧的蓄洪区被沉积物所壅塞，逐渐失去效用.长江干流从宜昌到九江两侧的湖泊面积从 1949 年的 25000$km^2$下降到了 2000 年的 10000$km^2$.1000 多个总蓄水量为 $500\times10^8m^3$的湖泊已不复存在.洞庭湖湖床以每年 4.5cm 的速度上升.在 19 世纪，洞庭湖的面积是 6300$km^2$，目前只剩下 2700$km^2$，总容量从大约逾 $400\times10^8m^3$ 下降到 $170\times10^8m^3$ [6].在荆江段，长江的河床比两岸的洪泛平原高出 8-15m[7].但在降水量极大，例如达数百毫米时，滥伐森林所增加的水土流失对洪水的形成作用则并不显著.

最后，气候变化所起的作用也不可忽略.在大部分地区，气候变化导致水文情况的变化对洪水的影响不是体现在年总降水量的增加，而是体现在降水模式的季节性变化上.气象参数（如降水密度）的变化幅度均呈增强的趋势，导致更明显的极端气候事件，非旱即涝.就全球而言，到 21 世纪末，预计气温将上升 1.3-5.8℃，这将导致更多的降雨及更高的极端气候事件.

### 4.2 不断增大的暴露程度

世界人口的激增，尤其是部分地区人口的激增，成为了近几十年来自然灾害损失几乎成爆炸性增长的主要原因.自然灾害损失的增加量与被迫或自愿在可能遭受洪水威胁的地区居住的人口数量，以及有关财产价值的增加量及他们的脆弱性的增加量是直接相关的.

如果不考虑洪水的威胁，洪泛平原和沿岸平原地区确实是土地开发的好地方.因为这些地区地势平坦，加工和冷却用水便利，可采用船舶水运原材料和产品，易于修筑道路、发展供水网、供电网以及其他生活设施.一般情况下，人们认为河流已被堤坝“驯服”，特别是在占用这些土地数年后没有重大灾害事件发生的情况下，居民和土地所有者会感觉这里相当安全.这样，人们会大量投资，兴建建筑物，购买设备，储存货物.许多人的就业也

依赖于洪泛平原上的工商业.而一旦生产或工商业被洪水打断,人们无法工作或甚至无法前往工作地点时，就会造成很大问题.

一般来说，如今的人们拥有比过去更多的财产，价值也更大.通常情况下，中央供暖系统的锅炉、冰箱、高科技的洗衣机和许多其他类似的物品都放在建筑物的较低层，常常在地下室.这些物品或因其重量,或因固定在建筑物上,当洪水袭来时往往难于移动至高处.另外，许多家庭把他们的地下室从煤、木材、土豆、苹果、蜜饯和其他罕用物品的储藏室变为了聚会室、儿童娱乐室和装有电脑的家庭办公室.商务和工业建筑也基本如此.地下室放置着不少典型的高价值物品，包括各类电子电气设备，如电脑中心、空调控制中心、电梯设备、雇员和客户使用的地下停车场是大多数新办公大楼的标准组成部分.虽然轿车相对来说容易移动，但如果没有事先预警突发洪水，仍会有很高的潜在损失率.

### 4.3 脆弱性不断增加

在过去，大多数物品不怎么怕水.而那些怕水的物品通常能够被搬运到安全的地方，而且即使受到损失，金额通常也很小.而现在的物品在与水接触后往往全部损坏.尤其是电气和电子设备、家用电器和其他装置，对潮湿和潮气十分敏感，洪水不仅意味着潮湿和潮气，并且还带来污泥和其他污染物.

从火炉取暖到中央空调供暖可能是最大的差别.不仅仅是因为中央空调取暖装置被安装在地下室中，不能移动，而且它的油罐在被洪水淹没后会造成严重污染.这意味着在保护建筑物的下层部分免受洪水威胁方面应投入更多的努力.

此外，政治、社会和其他原因导致的难民迁移，便利的交通、秀丽的风光，以及气候宜人的自然环境的吸引,也使人们在不了解当地自然特征的情况下定居于某些地区.这些人不知道当地潜在有哪些危险，也对可能的自然灾害毫无戒备.

值得注意的是本文提到的许多沿河而居的人所拥有的安全感.即改良后的先进的洪水控制系统（由水库、蓄洪区和防洪堤构成），使高频率发生的洪水（平均几年一遇）很难造成任何损失.以致人们忽略了他们居住地仍然受到洪水威胁，甚至在亲身经历了洪水后，也在短时间内就“忘记”了他们身处险境，洪灾意识可能曾一度得以提高，但随后重新归于淡漠.

最近欧洲发生的大洪水揭示了影响洪灾损失程度的部分因素.在1993年12月和1995年1月,莱茵河中下游及其部分支流经历了两次50a一遇的特大洪水.第二次洪水造成的损失（$3.2\times10^8$美元）仅为第一次（$6\times10^8$美元）的一半，虽然这两次洪水的规模相似，但损失数额相差如此之大的主要原因之一在于人们对第一次洪水仍记忆犹新.他们知道如果河水再次上涨时应该怎么做，他们还吸取了某些教训并采取了恰当的措施（例如，将油炉和油罐换为气炉）.

与此形成鲜明对比的是，没有人从意大利北部1994年发生的洪灾中得到多少教训.在意大利，人们居住情况基本无人监督，也缺乏有效控制.房屋仍然在沿溪沟和河流修建.这些房屋在1994年的洪灾中被大量摧毁，2000年又重新上演了一次.洪水不仅淹没了许多地区，2000年10月的这次高强度降雨 （在某些地区四天内下了740mm ）还引发了不少灾难性的山体滑坡和泥石流.

意大利是个典型的例子，但其他国家的土地使用状况也不理想.在经历了2000年秋季的洪水后，英国采取了一系列政府措施，旨在更严格地限制土地使用.在1999年5月南巴

伐利亚遭遇洪灾后，德国也在讨论将采取类似措施. 在中国，数百万人占据了分蓄洪区，令其不能再用来分洪. 长江上的荆江分蓄洪区就是一个典型的例子. 如果发生大洪水的话，及时撤离其中 $50\times10^4$ 居民是不可能的，届时他们将面临深达 6-9m 的洪水.

## 5 降低风险的方法

任何地区灾害损失事件总会发生，只是迟早的问题. 这些事件发生的频率越低，受威胁的个人、公司把预防和防护责任转移给公共机构和组织（国家、省、当地政府，非政府灾难援助救济机构等等)的倾向越明显. 当然这个观点还得具体问题具体分析. 在某些国家，人们主要依靠政府来防范风险（并以“纳税”的形式来支付这种服务），而不太担心自然灾害. 在另一些国家，人们更多的是依靠自己. 两种极端做法都是不理想的. 对付自然界破坏力量的最有效途径是人民、政府和以及保险公司的合作机制. 为此，必须采取整合性的措施，以包容所有三者的力量（图 3）. 三者可以分担责任，制定出有效的最优战略，达到减少风险、降低损失和防止灾害的目的. 只有集三者之力于一身的政策、行动、意识、预防措施和对事件的合理反应等才能最大化地节省总体费用，防止和减轻洪水和其他自然事件的影响.

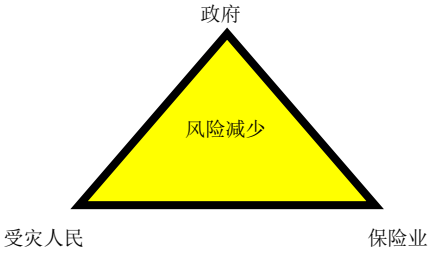


图 3 降低风险中的合作伙伴关系

Fig. 3 The partnership for risk reduction

最大程度节省费用并不意味着损失的最小化. 费用还包括提供一定标准的建筑物保护和维持基本灾害控制措施所需的支出. 工程和非工程的防护措施都耗资都很大，而且所耗费用与保护水平并不成线性关系. 因此，必须协调处理建设费用与预计损失之间的关系. 例如，如果建造 50a 一遇的洪水控制系统需花费 10 个货币单位，每年因维护、员工和利息需支出 0.5 个货币单位，则在系统使用年限 30a 内的总费用为 10+30×0.5=25 个货币单位. 如果一个能控制 100 年一遇的洪水系统的建造费用为 25 个货币单位，营运费用每年为 0.7 个货币单位，则总费用为 25+30×0.7 = 46 个货币单位. 进一步假定超过 50 年一遇的洪水造成的年均损失为 1 个货币单位，超过百年一遇的洪水造成的年均损失 0.6 个货币单位，则可计算出具有百年抗灾能力的系统和具有 50a 抗灾能力的系统相比，在 30a 期限内损失减少量为(1－0.6)×30 =12 个货币单位，大大少于成本差 46－25 =21 个货币单位. 在这种情况下，仅从经济的角度来分析，所提高的安全性是不合算的.

如果计入非经济性损失和收益，尤其是对人身安全的威胁，此类计算就难于进行. 其他既影响决策又妨碍决策者仅仅进行成本效益分析的因素还包括：受威胁的自然栖息地(根据具体情况不同，高安全性措施和低安全性措施都将对其产生消极影响)，对某些人造成的不便，甚至影响国家荣誉等方面.

总之，一个地区应在群体最基本洪灾防护上取得一致意见，并由整个群体（包括受洪水影响的人和不受洪水影响的人)共同来承担费用.虽然某个地区可能愿意提供高水平的防护，其他地区则选择让个人承担这种责任.个人在该情况下也必须决定自己能承受多大风险，并将多少风险通过保险的方式来转移.通过不同的方案，有关保护责任将被分摊给上图中的三个方面.

### 5.1 政府的作用

政府机构应对整个社会中非个人属性的基本需求负责.国家应该提供的措施包括：

(1) 防洪管理；
(2) 工程措施，包括：水坝、水库、蓄洪区、围圩、防洪堤、洪水旁道、泄洪道、分洪设施等；
(3) 非工程措施，包括：监测、预测、水土流失控制、早期预警系统；
(4) 预防措施；
(5) 通知和教育公众；
(6) 通信系统、警告传播、警报计划、撤离方案；
(7) 紧急事态处理人员的选拔和培训；
(8) 救济服务；
(9) 土地利用规划和限制土地使用的执行；
(10) 灾后立即重建重要线路和迅速重建被毁的基础设施；
(11) 对受灾严重的个人或公司给予赠款、低息贷款、税收减免.

### 5.2 受影响人群的作用

在得到了最基本保护的情况下，受影响的人群能最有效地减少物质损失.预防，也就是采取恰当的措施，保护建筑物，尤其要使建筑物内部物品不受洪水的破坏.工程措施能提供连续性保护，非工程措施能使人们更有效地应对洪水.预防措施包括在修筑建筑物下层（地下室和地平面部分）时采用防水水泥（例如，带防水层的水泥），准备好临时性的加强设备（例如，地下室窗户的钢百叶窗，关闭地下停车场门的叠梁闸门等），备好紧急用品，例如沙袋、沙、铲子和其他必需工具.减少损失最有效的方法是在洪水爆发之前就把物品搬运到高处，使其免受洪水的威胁.预防和应急行动需要人们对威胁有清醒的认识，以及具有减少损失的意愿.该意愿可能受到激励，也可能受到压抑.激励或压抑与国家洪水预警和洪水控制系统，以及发生损失后国家和保险公司提供的经济支持紧密相关.这明确地表示出上图三角形中的三个方面的关系是相互作用的，且拥有一个均衡的预防计划至关重要.

### 5.3 保险业的作用

除了公共和个人措施之外，保险在自然灾害中扮演着为个人、企业甚至整个社会减少灾害风险的重要角色.合理的保险能有效地降低极端事件对被保险人所造成的影响，并防止他们被灾害所毁灭.保险的目的是保护被保险人在出现重大损失时，生活或工作状况不会受到严重影响.保险的宗旨不在于补偿相对较小的损失，尽管这种情况常常发生.从多年缴纳保险费的被保险人的立场而言，在发生较小损失时也要求保险赔付是可以理解的，这恰恰是为什么保险费高于其应有水平的原因.保险公司在理赔小额赔付时，也通常不进行细致的调查，因为这种服务的灵活性是强有力的促销手段.

保险业在减少损失中的一大作用是激励家庭和工商业主保护其财产免受洪水危害的

自觉性.从表面上看，保险业的介入似乎并没有增强这种自觉性. 购买保险后，人们认为自己对抗灾害的能力增强了，因此减少了对灾害的关心程度，甚至不闻不问，有时还盼望灾害的到来.这种观点的持有者虽然不能说是比比皆是，也绝非罕见.然而，如能采用合理的保费结构，保险能够强有力地激励被保险人采取措施减少损失.问题的关键在于减少赔额，即被保险人在灾害中要承担一部分损失.

保险业提供的措施已经超越了仅仅在损失发生时提供货币支持.保险公司也开展了损失分析，并建立损失数据库.通过风险调查，保险公司协助设计出更好的建筑结构，使未来灾害事件中的损失减少.最后，保险公司通过出版物、学会和演讲，把研究成果贡献给教育界，并唤起公众、决策者和技术专家的灾害意识.

### 5.4 再保险公司的作用

一次灾害造成数十亿美元的巨灾损失如果全由当地保险公司来承担，则会对当地保险业造成严重损害.即使是在美国这样发达的保险市场，特大灾害也会掀起相当大的风波.“安德鲁” 飓风在 1992 年曾让美国东南部大约 10 多家直接保险公司被迫关门.索赔金额超过了这些保险公司的承受极限，公司只得破产.为防止此类事件再度发生，也为防止公司陷入破产，保险公司必须估算他们可能遇到的最大可能损失(Loss Potential)，并为此作好准备.准备的主要形式是购买再保险.再保险的简单定义就是保险公司的保险.

大多数保险公司的业务集中在某个特定的国家和地区（如美国、欧洲），而大多数再保险公司则在世界范围内开展业务.另一场飓风“吉尔伯特” 鲜明地表明了区域损失怎样通过再保险把损失转移到整个世界范围内.“吉尔伯特”于 1988 年袭击了加勒比地区，牙买加受创最重，经济损失高达 $10\times10^8$ 美元，其中 70％已投保.这 7 亿美元的赔付足以完全摧毁牙买加的保险业.但牙买加的保险业幸存了下来，因为其中的 99%，即 $6.9\times10^8$ 美元办理了再保险，因此由全世界的再保险业承担了.对当地保险公司而言，仅需承担 1 千万美元的损失.

在发展中国家， 95%以上的损失用来再保险是司空见惯的事情.在发达国家，根据当地直接保险公司的实力不同，再保险率在 50%至 90%之间变动.因为再保险需支付再保险费，大型保险公司倾向于由自身承担更大份额的风险.举两个例子：1990 年欧洲发生的冬季风暴导致保险公司赔付 $98\times10^8$ 美元，而其中由再保险公司赔付 $64\times10^8$ 美元（65%）；而在飓风“安德鲁”造成的 $170\times10^8$ 美元保险赔付中，有 50%由再保险公司承担.

## 6 洪水保险

洪水保险的基本问题是受洪水威胁的潜在客户对保险的需求和保险业所提供的保险产品之间的差异[8].大多数人对他们面对的洪灾的危害性有一定的认识，而且他们认为自己的认知是好的.经历过洪灾的人对洪水的威胁有清醒的认识，而其他人即使住在河边，也会忽视这种危害，或者认为不会受到任何影响.这些观点一般是错误的.大约 50% 的洪灾损失并不是由影响大面积地区和整个流域的主要河流泛滥或者主要灾害事件造成的.相反，这些灾害事件（山洪暴发）在相对较小的区域内发生，但潜在强度很大，而且发生频率很高（虽然不一定在同一地点）.即使房屋建筑位于峡谷上方的坡面上，大雨形成的地表水流也会对其造成破坏.如果这种情况能为多数人所了解，有效的推广洪灾保险的情况就会好起来.

对于河流泛滥而言，在任何的保险市场内，承保的建筑物和室内物品的保单中只有一

小部分会受到河流泛滥的影响.但是，河流泛滥所影响的区域总是同样的地区，而且特定河流的泛滥几乎是以固定时间间隔出现，因此这种河流泛滥不应被视作无法预测的事件.一方面仅是居住在这些受影响地区的人在寻求保险，而另一方面保险公司愿意为其提供保险服务的人却对这种保险不感兴趣，因为他们认为他们的风险很低.因此，如果保险公司在自愿的基础上向个人出售单独投保这种风险的保单，保险费将非常之高，以至于投保人一般认为不可接受.这种现象称为“逆选择”.

在风暴潮危险的情况下，逆选择更加明显.另外，这类单个事件的高潜在损失和其发生的低概率也使保费的计算困难重重（这是一个将非常低阶和非常高阶的数相乘的问题，或称“零次无穷级数”）.因此风暴潮在一般情况下无法保险.

与此相反，山洪爆发的时间和地点在概率上具有相对的稳定性.风险标的物的地理分布是一定的，而被保险人的群体规模较大，即某人被某次极端事件伤害的频率较低.因此，保费较低.顾客对此类保险的需求可在广阔的市场范围内开发，而且在计算保费时能保证相对较高的可靠性.因此，山洪爆发造成的洪灾损失是完全可以保险的.

总的来说，保险公司没有办法全部赔偿每次洪水可能造成的全部损失.因此，被保险人必须承担部分保险损失，即保险单中必须有免赔额.这种保险结构对保险公司和被保险人都有好处.一方面，保险公司不必花费资源去处理大量的小额损失，这样能减少赔款数目，更能节省大量保单管理费用.另一方面，只有在客户愿意承担部分损失的情况下，保险公司才可能提供保险保障.

### 6.1 灾害分区

洪水保险的保险费水平必须能够反映个体的风险特殊性.如果不考虑投保人的风险特殊性，而要求所有投保人向保险公司交纳同样的保险费用是不公平的，也难以得到客户的理解.在常规大宗业务中，如私人住宅和小工商户的保险，要想对某特定建筑物的风险做出评估必须要考虑这类客户每年交纳的保费.这种业务每个客户每年大约支付50到100美元的保费.由于每张保单保费较低，单独评估风险，并对特定标的物单独核算保险费的方式是不可行的.因此，保费必须有相对固定的参考依据，由此必须要建立能确认洪灾危害的分区系统，在一定区域内，保费是一致的.

德国保险业最近建立了一个保费计算系统.该系统根据各地河流泛滥的风险程度不同将德国划分为三个地区：

(1) 低风险暴露区：洪水的发生频率平均为 50a 一遇以上.该区域内的标的物可不受限制地承保.

(2) 中风险暴露区：洪水的发生频率为 10a 到 50a 一遇.该区域内的标的物基本可承保.

(3) 高风险暴露区：处于洪泛平原上，洪水发生的频率为10a一遇以下.该区域的标的物基本不可承保，但在某些情况下也可例外承保.

为构建出覆盖整个德国的灾害分区系统，所有主要河道附近的区域都必须考虑在内.这些河道由一个称为“ARC－德国”的数字河流网（比例尺 1:500000，包括的河流总长35110km）定义.需要完成的任务包括：(a) 提供不同年度间隔的洪水流量从而计算(b)每条选定河道在任何截面处的水面高度和淹没地区面积.在地理信息系统[9]的帮助下，水文和水力计算得以完成.图4是灾害分区的一个例子.

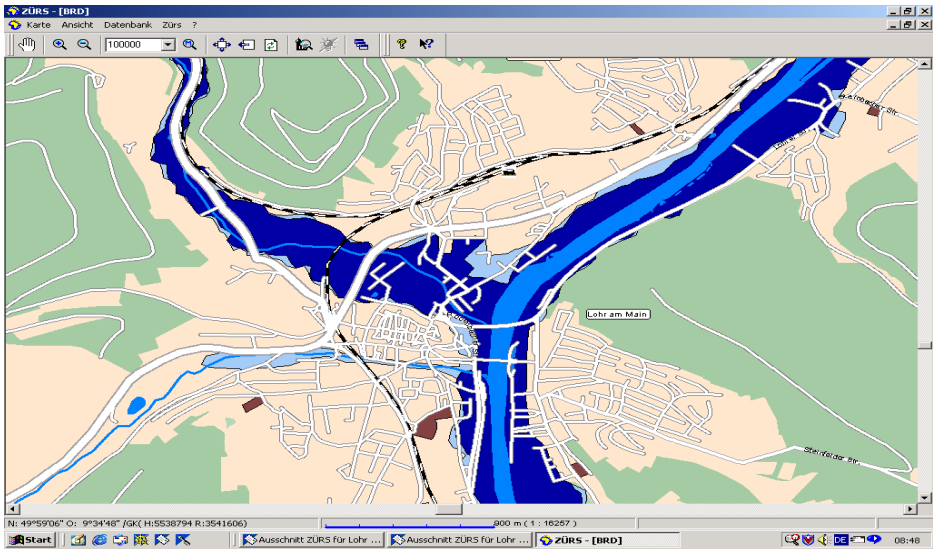


图 4　德国保险业洪灾分区的示例

Fig. 4 Example of the flood hazard zonation by the German insurance industry

### 6.2 估算洪灾最大可能损失（PML）

与被保险的客户一样，保险公司和再保险公司必须采取保护性措施以抵御高额损失，从而求得生存. 因此，保险公司和再保险公司必须实施累积风险控制，即估算在极端事件中的最大可能损失(PML). 每家保险公司都必须决定所需要的准备金数量和再保险的需求. PML 的计算基于如下假定条件，即假定一起重大灾害袭击了一个范围很大的区域或袭击了一个价值高度集中的区域. 对特定保险公司来说，事前难以确定哪种假定条件会造成最坏的结果，因为损失的预估与保险公司承保的业务结构有关，特别是与被保险标的物的空间分布有关. 对不同保险公司而言，PML 的假定条件是不同的.

作为计算地震和风暴风险的最大可能损失的方法，PML 已经存在很多年了. 但在对洪灾的分析中，这种工具是在最近才引入的. 洪灾事件更多地受小范围和局部特性的影响，包括土壤状况、地形、标的物的确切位置（海拔）和洪水控制方法的有效性. 因此，洪水的风险模型制作需要更多的细节和技巧.

由慕尼黑再保险公司和应用水资源与地理信息研究所[9] 共同开发的模型，第一次把德国境内洪灾事件的累积分析变为了现实. 模型选用了八个不同的假定累计条件，代表可能同时遭受特大洪水袭击的八个区域. 全国同时一次性遭受这种洪水袭击的可能性很小. PML 分析能确定某一个保险公司在该假定条件中所涉及的保险标的物数额，并虚拟估算出 10-200a 中洪水事件造成的可能损失.

计算分五步进行. 首先使用水文随机分区（水文分析）确定给定河流的洪峰流量. 然后使用数字河流网络和地形模型确定水面高度和淹没范围（水力分析）. 由于计算只涉及财产损失，所以接着只确定洪水淹没的居民区（空间分析）. 预计损失可通过受影响标的物的数量和损失平均值得出（组合分析）. 该分析以邮政编码分区，因为保险业务数据是采用这种方式汇总的. 最后一步是把相应的累积区域内所有邮政编码区的损失值求和，以获得最大可

能损失（累积）.

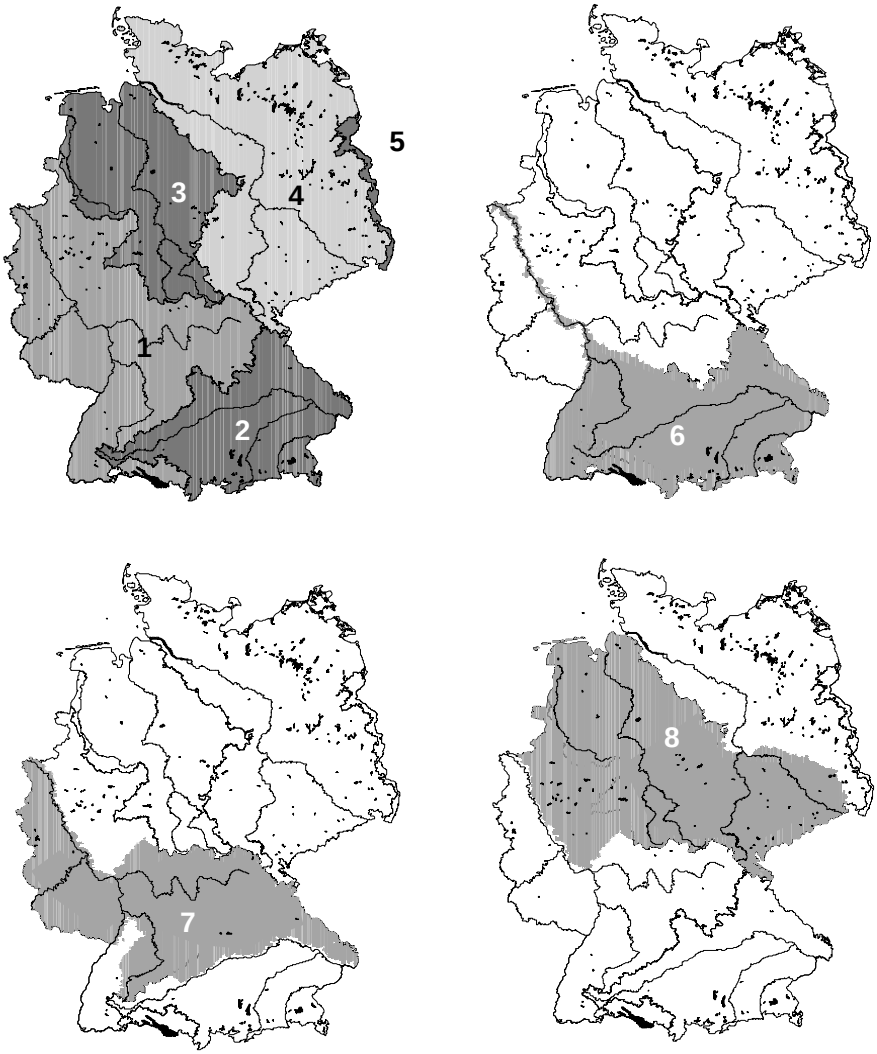


图 5 德国的洪水损失的风险累积（1:莱茵河，2:多瑙河，3:威悉－艾姆斯河，4:易北河，5:奥得河，6:南部，7:中部，8:北部）

Fig. 5 Accumulation scenarios for flood losses in Germany (1 = Rhine; 2 = Danube; 3 = Weser-Ems; 4 = Elbe; 5 = Odra; 6 = South; 7 = Centre; 8 = North)

## 7 结论

无庸置疑，洪水风险在世界范围内正在上升. 由于风险是灾害事件、财产暴露程度和脆弱程度的产物，如果要寻求洪水风险增加的原因，应考虑和分析上述三个因素中的每一个因素. 分析结果显示，促使洪水风险增加的主要原因，是人类在受洪水威胁的地区所安置的财富的爆炸式增长，而且这些财富在洪水威胁面前非常脆弱. 此外，不断增加的（有时是被迫的）人口流动使人们迁入他们并不熟悉的地区，以至出现极端情况时不知如何应对. 此外，气候变化导致的与水文事件相关的危害事件也在变化，因此在许多地区存在着极端事件增

加的趋势.

因此，降低风险不应局限于减少灾害事件（如通过建设洪灾防护设施），还应调动每个个体的力量. 保险作为第三种力量，完善的个人财务风险管理. 每个受洪灾影响的个人/企业可以根据对自身风险状况的判断，在“无保险－无保费”和“全保险－高保费”两个极限之间选择自己的保险方案.

洪灾已经成为保险业一个重要的话题，而且其重要性在未来还将继续增加. 对保险业务需求的增长，加之来自各方面对寻求恰当保险的压力，促使保险业去开发与洪水相关的保险解决方案. 不同国家已针对洪灾建立了多种保险计划，一些采取保险共同基金的形式，另一些则采取购买单独保险的形式. 保险合同的种类涉及从强制保险到完全自愿保险，从一切保险到单个洪水保险等不同类型. 这些各有优劣，也没有哪一个算得上是最优的. 然而，能提供多种风险的综合保险产品是个好办法，它可将洪灾风险与其他风险如地震、山体滑坡、暴风雨、冰雹、塌陷、雪灾等结合起来，从而避免被保险人的逆选择.

在德国，保险业目前正在推广洪水保险，并开始以划分洪灾危害区的办法来处理这个问题. 危害区的划分是通过合作来实现的，包括整个德国保险业（包括再保险公司）的参与，也包括负责公共水资源的政府机构的紧密合作. 虽然市场竞争异常激烈，但这次合作的目的在于建立适用于所有保险公司的洪灾分区系统，进而协助政府实施以防洪为目的的土地规划.

保险公司需要风险分区系统以销售保单、设计保费结构，相应的，为了向保险公司提供服务且出于自身利益的考虑，再保险公司也需要风险分区系统，以计算在出现能威胁再保险公司生存的极端情况时，保险业可预计的损失将有多少. 出于这个目的，慕尼黑再保险公司在世界上率先开发出能适用于整个国家的洪灾损失计算模型. 自 1999 年以来，这个模型已在德国投入使用. 一个应用于英国的类似模型刚刚完成，而为其他国家开发的模型也将很快到位.

致 谢 中国科学院南京地理与湖泊研究所的秦年秀硕士和姜彤博士对全文进行了修改，特此致谢.

## 参 考 文 献

1 Kron W. Reasons for the increase in natural catastrophes: The development of exposed areas. In: Topics 2000. Natural catastrophes – the current position. Munich Reinsurance Company, Munich,1999b:82-94

2 Munich Re.Flooding and insurance, Munich Reinsurance Company, Munich,1997:79 (in 8 languages)

3 Munich Re. Topics 2000: Natural catastrophes – the current position. Munich Reinsurance Company, Munich,2000:126

4 Kron W. Natural disasters: Lessons from the past – concerns for the future. The GENEVA Papers on Risk and Insurance. Geneva, 2000,25(4):570-581

5 Kron W. Reliability of hydraulic structures in rivers with unstable beds. In W. Kron (ed.): Contributions to non-stationary sediment transport. Publication series No. 42, Institute for Hydrology and Water Resources Planning, Karlsruhe University, Karlsruhe, 1993: A1-A19

6 Yu X. Wetland restoration and polder development in the context of flood alleviation in the Central Yangtze, China. In: L King et al. eds: Flood Risks and Land Use Conflicts in the Yangtze Catchment, China and at the Rhine River, Germany. Gießen, 2001:115-123

7 Wu J, Jiang T, King L. Floods in the Yangtze River: causes and climatic scenarios – analyzing the period between 1470 and 1990. In :L King. et al. eds. Flood Risks and Land Use Conflicts in the Yangtze Catchment, China and at the Rhine River, Germany. Gießen, 2001:107-114

8 Kron W. Insurance aspects of river floods. In: A. Bronstert et al. eds. Proceedings of the European Expert Meeting on the Oder-Flood 1997 – RIBAMOD concerted action. European Communities, Luxembourg ,1999:135-150

9 Kron W, Willems W. Flood risk zoning and loss accumulation analysis for Germany. In: Proc. of the First International Conference on Flood Estimation, March 6-8, 2002, Berne

# Flood Risk = Hazard x Exposure x Vulnerability

Wolfgang KRON

*(Geo Risks Research Department, Munich Reinsurance Company, Munich Germany)*

## Abstract

Worldwide, flooding is probably the number one cause of losses from natural events. No region in the world is safe from being flooded. As the flood risk is a function of the flood hazard, the exposed values and their vulnerability, the increase in flood losses must be attributed to changes in each of these aspects. While flood protection measures may reduce the frequency of inundation losses, appropriate preparedness measures lessen the residual financial risk considerably. Besides public and private measures, insurance is a key factor in reducing the risk for individuals, enterprises and even whole societies. In recent years, the demand for flood insurance has been growing. This is forcing the insurance industry to develop appropriate solutions. At the same time it is vital for the insurers to know the probable maximum losses they might face as the result of an extreme event.

Keywords: Flood types, flood disasters, flood risks, flood preparedness, flood insurance