

极端水文气象灾害研究：成因与对策

李家春

中国科学院 力学研究所 北京 100190

摘要：针对极端自然灾害频发的严峻形势，国际科学联盟（ICSU）启动了灾害风险综合研究计划（IRDR）。本文用非平稳随机过程理论，研究气候变化条件下热带气旋活动长期发展趋势；用运动波和1+2维耦合动力波理论分析洪水产生与演进，启示流域中期治理策略；用水土相互作用模型获得滑坡、决堤灾害发生的条件，探讨临近预报途径。通过上述典型水文气象灾害案例分析，展示了环境力学的综合研究在减轻自然灾害风险中可能发挥的作用。

关键字：极端事件，水文气象灾害，热带气旋，洪水，滑坡

On Extreme Hydro-meteorological Hazards: Mechanism and Strategy

LI Jia-chun

Institute of mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

Abstract: ICSU has initiated a science plan on IRDR to cope with severe challenge of extreme natural disasters. In this study, we have explored TC's long term trends under climate change based on non-stationary stochastic process theory, shed light on the strategy of catchment harness by analyzing flooding mechanism using kinetic and dynamic wave theories and examined now-casting methodology with water-soil interaction taken into account. The integrated case studies of typical hydro-meteorological hazards have shown the roles of environment mechanics research in disaster risk mitigation.

Key words: extreme events, hydro-meteorological hazard, tropical cyclone, flood, landslide

1 引言

环境力学研究人类和生物生存必须的温、湿、风、气压、声、磁、辐射、组分、生物种群等环境

因素的变化规律和预报方法，涉及气候变化、环境污染、生态恶化和自然灾害等环境和灾害问题。实际上，环境问题是轻微和缓变的灾害，灾害是极端和突发的环境问题。环境流体力学的主要科学问题是自然环境，包括大气、水体和岩土体中的流动，质

量和能量运输,以及相伴的物理、化学和生物过程。根据我国的实际情况,环境力学的重点研究方向有:工业化/城镇化背景下的城市环境问题;大江流域环境灾害和大型工程影响;西部开发中的生态环境治理;气候变化及其影响;环境问题建模、观测和模拟,其中当务之急是如何应对极端环境事件和重大自然灾害^[1]。

鉴于频发的极端环境灾害事件导致严重人员伤亡和经济损失,引起了各国政府、科学界和公众的广泛关注。国际科学联盟(ICSU)继联合国国际减灾十年(IDNDR 1990-2000)活动以后,制定应对各种灾害,特别是重大灾害的战略计划 ISDR。据统计,20 世纪对人类社会有重大影响的自然灾害频次不断上升,从 1900~1940 年的 100 次/10 年,到 1960 年代的 650 次/10 年,1980 年代的 2000 次/10 年再到 1990 年代的 2800 次/10 年。在过去 40 年间,人员伤亡和财产损失每 7 年倍增,这些数字触目惊心。在未来,由于人口增长,城镇化加速,发展中国家贫困化,生态恶化,气候变化,这一趋势不会减缓。为此,国科联在制定战略研究计划时,通过领域重要性及其与可持续发展关系的评估,将自然和人为引起的灾害列入环境问题的优先主题,将人类活动的影响同时考虑在内。与此同时,进一步制定了更加具体的灾害风险综合研究计划(IRDR, Integrated Research on Disaster Risk)^[2]。该研究计划的目标是了解自然过程和人类活动所导致灾害风险程度;改进应对风险的决策方法以减轻灾害的影响程度;消除薄弱环节,提高顺应能力,增强人类社会应对灾害风险的调节和适应能力。尤其是进一步强调了开展不同灾种间,不同尺度间,自然、社会、健康、工程科学不同学科间的综合研究,并取代以往单独地、孤立地、各自地进行研究的传统模式的重要性。

从以上计划可以看出,国际社会已经从过去的教训中取得经验,将关注重点从被动应对、恢复重建转向主动减防、能力建设和降低风险上来。也就是说。在应对自然灾害方面,防灾工作应置于救灾工作之先,在数据采集、知识综合、工程措施、社会管理、上层决策等方方面面事先做好工作,才能真正达到减轻灾害风险的目标。针对我国国情,台风、风暴潮、洪水,溃坝、滑坡等气象水文灾害是发生十分频繁、影响极其严重的灾种。我们通过这

类重大灾害的若干案例分析,展示环境力学在减轻自然灾害的综合治理工作中可以发挥的作用,说明为减轻灾害风险开展长期发展趋势、中期治理策略和临近预报方法研究的必要性。

2 气候变化影响——长期发展趋势

2005 年卡特里娜和丽塔飓风导致了美国石油工业重创,墨西哥湾 4000 个石油平台中的 3050 个,3300 海里的 2200 海里的油气管线在飓风通过的影响范围,导致石油减产。这些油气生产设施均在设计寿命之内,因此,几十年一遇的极值环境参数的确定成为海洋石油装备设计的关键。

IPCC 的评估报告 AR4 确认,自 1860 年以来地球的平均气温确实在上升,其中人类活动的影响占主导地位。显然,全球变暖是温室气体效应使地球长波逆辐射减少所致。在大气升温的同时,SST 也相应上升,大气与海洋环流加剧,于是气候变化的影响问题提到议事日程。鉴于气候变化本身尚有不不确定因素,要预测某地域,某时段的定量影响十分困难,我们宜针对某个具体问题进行分析研究。

面向未来海洋工程的开发需求,需要了解西太平洋的热带气旋长期发展趋势。为此,我们应用中国气象局发布的《西北太平洋热带气旋检索系统》软件,收集了从 1945 到 2008 年经过西北太平洋区域(0° - 80° N, 100° - 180° E)的热带气旋数据。这些数据是通过中国台风网公布的,它记录了 64 年来每个热带气旋从起源到消亡过程中每隔 6 个小时观测记录到的底层中心附近最大风速、中心最低气压、移动速度、所在具体位置等详细信息,并且给出了台风过境时带来的降水分布和大风分布。

结果显示在气候变化的背景下,热带气旋活动增强。具体表现在为:热带气旋的年平均风速值随气温升高增大;以 PDI 为表征的热带气旋强度在 20 世纪末比 20 世纪 50 年代有显著增长;不同强度的热带气旋风速值随温度升高增强的趋势是不一致的,位于高分位数水平的台风、强台风风速值增长幅度比低分位数水平的热带气旋风速值增长幅度大;热带气旋年发生频次的增加主要表现为台风及强台风频次的增加。此外,热带气旋发生频次在空间分布是不均匀的,在 15° - 22° N, 115° - 120° E 即菲律宾以西的我国南海海域,是强台风多发区。

由此可见，在气候变化的背景下，热带气旋强度及发生频次的变化是非平稳过程^[3]。所谓非平稳过程，指的是随机过程的统计行为是随时间发生变化的，我们相应地提出了针对非平稳过程的极值风速估计方法：

1. 确认台风发生的频次符合Poisson分布，风的最大风速符合Weibull分布，即：

$$P_k = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (2.1)$$

$$G(V \leq \hat{V}) = 1 - \exp[-(\frac{\hat{V} - \beta}{\gamma})^\alpha] \quad (2.2)$$

其中， λ 为平均发生频次参数， α, β, γ 分别为风速分布函数的形状、位置和尺度参数。对于非平稳随机过程，它们均为时间的函数；

2. 将台风统计数据分为若干时段，可以获得每个时段的参数值，并将参数拟合为随时间变化的函数： $\alpha(t), \beta(t), \gamma(t), \lambda(t)$ ；

3. 由极值理论导出数十年一遇的极值风速如下：

$$V(t) = [-\ln(-\frac{1}{\lambda(t)} \ln(1-R))]^{\frac{1}{\alpha(t)}} \times \gamma(t) + \beta(t) \quad (2.3)$$

其中R是重现期的倒数1/T。

由此便可预测未来数十年一遇的极值风速，并进一步计算极值风浪、极值载荷等。在每个海域进行这样的分析可以得到数十年一遇极值风速的空间分布。结果表明，非平稳过程的极值风速要比常规平稳过程的计算结果要增大2.4~2.8 m/s。

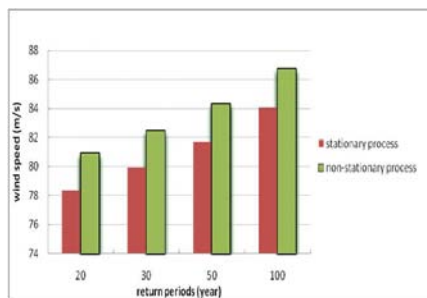


图1，西太平洋平稳、非平稳极值风速比较

3.洪水演进模型——中期治理策略

洪水灾害经常侵袭我国大江、大河流域。人们都认识到要减轻洪灾需要从宏观考虑，不能局部治理。98长江洪水以后，学术界分析原因，全流域长时间降水居于首位，总量可与1931，1954年相比。其他原因如：上游水土保持，中游河道淤塞，湖泊围垦萎缩，支流洪峰交汇等，各抒己见，缺乏定量分析依据。为此，发展全流域洪水形成和演进模型十分必要。我们建立的洪水产生、演进模型概述如下：

1) 洪水运动在通常的圣维南方程基础上，在不同参数范围，可采用不同的模型：

动力波模型： $Fr^2 \gg O(1)$

扩散波模型： $O(S_0L/h) = Fr^2 = O(1)$

运动波模型： $Fr^2 \ll O(S_0L/h)$

其中， $Fr=U^2/gh$ 为Froude数， S_0 为底坡，L为波长，h为水深。我们也可以用组合参数 $k=S_0L/hFr^2$ 来做判据， $k>10$ ，动力波已经很快衰减， $k>20$ 宜采用运动波理论。总之，当河道水深坡缓时，可用常规的动力波理论，在水浅坡陡时，采用运动波理论，介于两者之间则用扩散波理论。

2) 为了考虑洪水产生过程，坡面流是最基本的单元。考虑降雨入渗过程后，可获得运动波的分布源汇项，考虑植被覆盖后，可获得该运动波的阻力项，由此获得单元产流及其到流域出口的时间，从而导出汇流函数。在此基础上，可以合理分析，土壤质地、植被种类、坡长、坡陡、雨量、雨型等因素对于流域产流的影响。

3) 对于中、下游的洪水演进，首先将复杂的河网系统进行概化，使它仅由一维的河道和二维的湖泊构成。在此基础上，建立1+2维耦合动力波方程及其有限体积算法，特别关注在交汇与分流处的合理流量分配关系，保证结果符合工程实际。

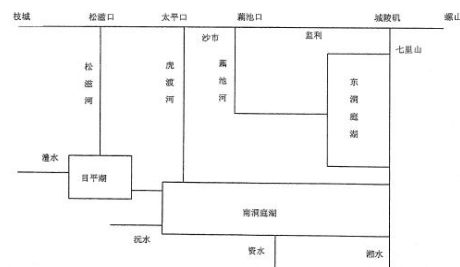


图2.荆江地区f复杂水系1+2维概化模型

将此洪水演进模型应用于长江98洪水演进过程，通过模拟荆江地区沙市、垦利、城陵矶水文站的水位数据与实测结果的比较，验证了我们建立的物理模型的合理性和可靠性。

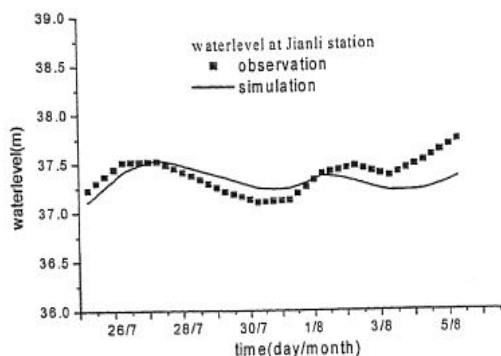


图3, 监利水位模拟与实测的比较

采用所建立的复杂水系洪水演进模型，分析了导致局地或全程高水位的原因，按照重要程度分别为：支流与干流洪峰交汇，分流河道淤塞，调蓄湖泊萎缩和上游水土保持等，并给出了定量比较的结果。由此，我们可以确定流域治理的策略：在易发干、支流洪水遭遇的河道修建有足够拦蓄能力的水库以便错峰调节；恢复分流河道的分流流量，提高湖泊调蓄功能；在上游植树造林进行水土保持，以削减洪峰峰值、延长洪峰历时、减少泥沙含量^[4]。

表1, 上游植被种类对下游水位的影响

阻力系数 (s)	3.43	5.44	7.98	10.23	13.38	15
	草坡	油松	栎树	落叶松	山杨	桦树
沙市水位峰值 (m)	47.32	45.97	45.16	44.68	44.32	44.16
城陵矶水位峰值 (m)	34.92	34.67	34.49	34.37	34.26	34.21

在三峡、小浪底水库建成以后，长江、黄河干流洪灾的压力减轻，但是，近年来，四川、湖南、湖北、江西、广西等省中、小河流沿程暴雨、山洪、泥石流灾害凸显，因此，减轻中小河流与山区洪灾风险的中期治理策略更具有挑战性。

4.水土相互作用——临近预报方法

针对决堤、滑坡灾害，改进临近预报时段和范围的可靠性、准确性，特别是能提前在灾害发生以前给出预警，可以避免人员伤亡，意义重大。

坡体是由土体或土石混合体构成，土壤本身就是一种复杂、多样的介质，含水土体更容易破坏的原因是：有效应力降低、容重增加和土体强度弱化。通常通过统计分析总结各种土壤在不同饱和度的情况下土壤粘聚强度和内摩擦角的经验公式，另一方面我们利用颗粒物质理论，提出了数值三轴仪的方法，基于分析颗粒之间及其与周围水介质的相互作用和离散元模拟 (DEM) 获得本构行为^[5]。在此基础

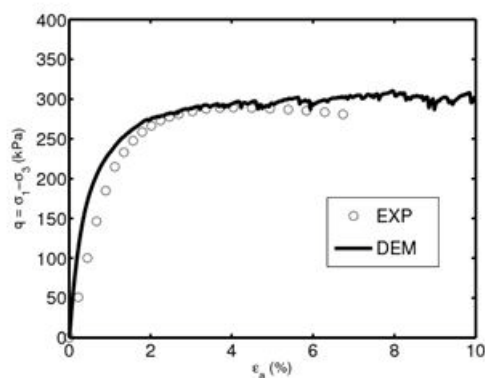


图4.承德砂应力应变关系DEM与实验比较，围压10kpa

上，发展了三种土壤强度软化模型，即：瞬时软化模型，延迟软化模型和混合软化模型，依靠FLAC软件模拟三种情况下的坡体变形和失稳的全过程，并分析了参数影响^[6]。

“千里之堤，毁于蚁穴”，渗透破坏是决堤的主要形式之一。渗透破坏产生的原因是：堤内长时间高水位，水力坡度增大、渗流流速增加；细颗粒泥沙含量较高，易于流失；堤坝存在局部的缺陷等。渗透破坏首先发生在堤坝基础下的砂土层，破坏过程分两个阶段：管涌阶段是在渗流驱动下，细颗粒泥沙通过粗颗粒孔隙流失，土体孔隙度增加，土骨架保持完整；流土阶段是在渗流过程中，构成土骨架的粗颗粒泥沙迁移，土体结构破坏直至不能支撑上层的大堤，洪水溃决^[7]。

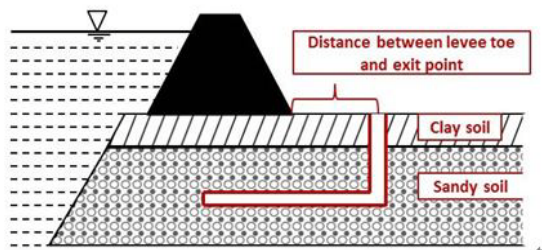


图5.堤坝地基渗透破坏示意图

渗透破坏的模拟是渗流力学问题，可以用 Richard 方程表述。由于水流和土体相互作用，泥沙颗粒的不断流失，因此需要用变孔隙度、变渗透率模型。

Vardoulakis 等人通过实验和理论研究，提出了计算管涌颗粒流失的公式

$$\dot{m} = \rho_s \lambda (1 - \varphi) c q \quad (4.1)$$

其中， \dot{m} 为单位时间单位体积流失的颗粒质量， ρ_s 为颗粒密度， φ 为孔隙度， c 为含沙水流中颗粒体积百分比， q 为流量。由此获得随时间变化的孔隙度和渗透率。

通过建立水与土体相互作用的耦合动力学模型研究渗透破坏，我们模拟了二元结构堤基破坏发展的过程，并得到如下结论：水位、细颗粒含量、初始破坏点位置分别是外在因素、内在因素、随机因素，它们对确定堤基内部实际水力坡降的时空变化，发生流土的参数阈值起到了决定性作用。三种因素的共同作用，将决定从破坏点到河道间基础的土体能否依次发生流土破坏，最终对堤防安全构成威胁。由此可见，渗透破坏具有较强的隐蔽性和一定的潜伏期。通过计算渗透破坏的临界条件，我们能够估算可能影响堤防安全的警戒水位、堤坝缺陷、重点监测范围，也就是判断堤基是否处于病险状态，给防灾减灾提供科学依据。

5 结束语

本文通过研究若干极端水文气象灾害的成因与对策的实例，获得了一些有益的结论：

发现气候变化对热带气旋活动的影响不可忽视，台风，特别是强台风和超强台风的强度和频次都在增加，用非平衡极值结果表明，西太平洋几十

年一遇极值台风风速增大3.8%，这一概念可望应用于其他极值环境参数如：降水、热浪等灾害的长期发展趋势研究，并应用于工程设计和区域规划；

针对减轻洪水灾害，考虑降雨入渗、坡面流动和汇流函数，分析产流过程，采用1+2维动力波模型模拟中游复杂水系洪水演进。结果表明洪峰交汇、分流河口淤塞、湖泊萎缩和水土保持是主要原因。期望这一方法应用于中小河流域的减轻灾害风险的中期治理策略；

对于滑坡、决堤灾害，必须研究水土耦合的渗透破坏过程，获得灾害发生的临界参数，提出预防措施，减少人员伤亡。这一工作需要进一步深入。

本文研究综合了不同灾种，不同尺度，不同学科的知识取得了一些进展，今后还要结合工程技术、信息系统、社会管理、决策机制等进行综合研究，以最大程度地减小灾害风险，这是减灾研究的重要方向和总体趋势。

致谢：本文工作得到国家科技部和国家自然科学基金会的长期资助。本文是环境流体力学研究组多年的研究成果，与本文相关的计算工作由王黎珍，范平，王晓亮、付振东。彭博完成，谨此致谢。

参考文献：

- [1] Li J.C et al., Environmental mechanics research in China, AAM, 2003, 39: 217-306
- [2] ICSU, A science plan on integrated research on disaster risk, 2006..
- [3] Wang LZ, Li JC, Non-stationary variation of tropical cyclones activities in the Northwest Pacific, China Ocean Engineering, 2010, 24(4) 725-733
- [4] Fan P., Li JC et al, Case study: Influence of morphological changes on flooding of in Jingjiang River, J Hydraulic Engineering, 2008, Dec: 1757-1766
- [5] Wang XL, Li JC, Numerical tri-axial apparatus and application, Appl. Mech. & Materials, 2013, 353-356: 3251-3255.
- [6] Fu ZD et al, Soil strength softening model and applications in rain-induced landslide simulation, TAML, 2013, 3(4).
- [7]. Peng B., Zhang Z., Numerical simulation of seepage failure of levee foundation, ACFM 14, Oct. 15-19, 2013, Hanoi.