

# 河流环境保护与灾害防御

曹志先

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072

**[摘要]** 结合我国河流环境保护与灾害防御的现实背景, 提出亟待研究的 3 个问题, 即溃坝洪水灾害、山洪灾害和修建水库所诱发的水华等河流环境问题。建议尽快组织实施相关科学问题的研究, 为有效地防御洪水灾害、维护河流健康提供科学基础。

**[关键词]** 河流; 洪水灾害; 水环境

**[中图分类号]** TV122, X52

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1000-7857(2007)14-0038-08

## River Environment Protection and Disaster Defense

CAO Zhixian

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China

**Abstract:** With respect to the current state of river environment protection and disaster defense in China, this paper presents a brief review of research on three major themes, i.e., dam-break flooding, flash flooding, and phytoplankton bloom in reservoirs due to large dams. The identified issues highlight the need for concerted and substantially extended investigations, which should provide the scientific base for more effective fluvial flood defense and environmental rehabilitation.

**Key Words:** river; flooding disaster; water environment

**CLC Numbers:** TV122, X52

**Document Code:** A

**Article ID:** 1000-7857(2007)14-0038-08

### 0 前言

全球气候变化、重大工程建设及人类活动等显著地改变了河流水文、水动力过程和河流形态, 不可避免地对河流环境健康造成影响, 并可诱发严重水灾害, 对公共安全和社会经济可持续发展构成潜在威胁。水灾害可能难以避免, 但其危害可最小化, 人类需要学会更好地与河流和谐相处<sup>[1]</sup>。本文提出了亟待研究解决的溃坝洪水灾害、山洪灾害和修建水库所诱发的水华等河流环境问题, 简要论述了所涉及的关键科学问题。

### 1 溃坝洪水灾害

全球气候变化可能导致极值洪水发生的概率显著增加<sup>[2]</sup>, 加之地震、人为破坏 (如恐怖袭击) 等潜在因素的影响以及病险水库众多这一现实背景, 我国若干流域大中型水库和梯级水库群等重大工程发生灾变的可能性持续存在, 从而对公共安全和社会经济可持续发

展构成严重威胁。历史上, 国内外都曾经发生过许多重大溃坝洪水灾害, 如我国 758 特大暴雨诱发板桥水库、石漫滩水库等一系列大中型水库坝体接连溃决 (见图 1); 1928 年 3 月 12 日美国 St. Francis 大坝溃决 (见图 2, 取自文献[3]); 1943 年 5 月 17 日德国 Möhne 大坝受炸弹袭击溃决 (见图 3, 取自文献[3]); 1959 年法国 Malpasset 大坝溃决 (见图 4, 取自文献[3]); 1996 年加拿大 Quebec Ha! Ha! 湖坝体溃决等。

从科学意义上说, 大坝溃决往往引发急变水沙运动与快速河床变形, 水流、泥沙与河床三者之间存在强烈的相互作用, 构成一类典型的强冲积河流过程。大坝溃决洪水所诱发的泥沙输送总量可能与洪水总量为同一个数量级<sup>[4]</sup>。深入理解这类冲积河流过程, 涉及多尺度、多过程耦合作用机理、强非恒定流输沙、激波及接触不连续性的数值捕捉技术等水沙动力学领域的前沿问题, 必须突破传统的、针对弱冲积河流过程建立的河

收稿日期: 2007-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50459001)

作者简介: 曹志先, 武汉市东湖南路 8 号武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 教授, 研究方向为水沙动力学基本理论、河流环境数学模拟理论与技术等; E-mail: zxcao@whu.edu.cn



图 1 1975 年 8 月板桥水库和石漫滩水库等水库坝体溃决洪水淹没范围  
Fig. 1 Flood inundation due to dam failure of Banqiao and Shimantan Reservoirs in August 1975 (picture source unknown)



图 2 美国 65 m 高的 St. Francis 混凝土大坝于 1928 年 3 月 12 日溃决后的残留  
Fig. 2 Remnant of the 65 m high concrete St. Francis Dam after failure on 12 March 1928, USA (source: Chanson, 2005)



图 3 1943 年 5 月 17 日德国 Möhne 大坝受炸弹袭击溃决  
Fig. 3 Möhne Dam break (Germany, 17 May 1943), after RAF bomber attack—view from right bank (source: Chanson, 2005)

流动力学理论框架。不论是从国家重大需求还是科学价值上说,研究大坝溃决水沙动力学具有重要意义。

关于溃坝洪水的早期研究集中于对单相水流运动的数学模拟技术,如美国国家气象局水文实验室 (Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service) 开发的溃坝洪水计算模式,它局限于一维和河床不可冲刷情形<sup>[5]</sup>。欧盟框架计划在近 10 余年连续资助溃坝洪水研究,包括 CADAM (Concerted Action on Dam Break Modelling) 和 IMPACT (Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty) 项目等。欧盟通过研究计划积累了一定的小尺度试验与野外观测数据资源<sup>[6]</sup>,促进了溃坝洪水数值模拟发展。但就基础理论而言,国际上依旧沿用只考虑单相水流运动的定床

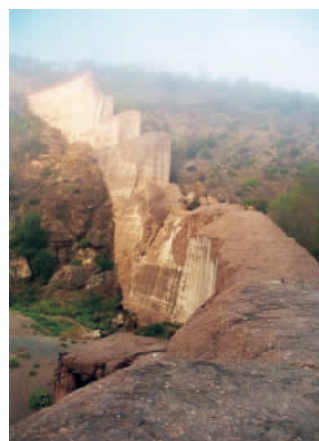
数学模型<sup>[7]</sup>,基于简化控制方程的非耦合水沙数学模型<sup>[8]</sup>,或者物理上可能严重偏离实际的饱和输沙数学模型<sup>[9-10]</sup>,只能粗略地适用于低水头坝体或堤岸溃决水沙过程(近似为弱冲积河流过程)。我国学者建立了非耦合数学模型以研究低水头堤岸溃决水沙过程<sup>[11-12]</sup>,近年还发展了适用于高坝溃决的一、二维水沙耦合数学模型理论框架<sup>[13-14]</sup>。

研究溃坝洪水涉及的一个核心问题是坝体溃决过程,这对下游洪水传播、灾害风险度起控制作用。人为因素(如恐怖袭击或战争)引起的大坝溃决过程是难以预测的(如图 3)。对洪水灾害风险进行评估时,最为现实可行的方法是考虑最危险的情况,即设想坝体在瞬间全部溃决。但对于上游极值洪水诱发的、如土石坝的





(a) 1981



(b) 2004

图4 1959年12月2日法国 Malpasset 大坝溃决后图片

Fig. 4 Photographs of the Malpasset Dam that failed on 2 December 1959, taken in (a) 1981—view from the reservoir looking downstream at the right abutment; and (b) 2004—view from the left abutment of the dam wall ruins (source: Chanson, 2005)

渐进溃决过程(图5),则需要对水-土动力学耦合作用机理有深入的认识,并建立量化模式,以确定溃决发生的临界条件、溃口发展时间及其演化等,从而对溃坝洪水在下游的传播、演化过程及其灾害风险度做出尽可能准确的预测。传统的描述土石坝溃决过程的定量方法主要建立在基本物理关系和经验基础上<sup>[15-17]</sup>,但最近的研究初步发展了水-土动力学相互作用模式,适用于黏性、非黏性土坝溃决过程<sup>[18-21]</sup>,基本上代表了当前研究的现实水平。



图5 无黏性土坝溃决

Fig. 5 Failure of non-cohesive soil dam (source: Morris, 2002)

进一步研究需要解决的核心科学问题是:土石坝渐进溃决的水动力-土动力学机制;强非恒定急变溃坝洪水、泥沙与可冲积河床之间的相互作用机理;水-土耦合及水-沙耦合数学模型理论,以及高分辨率、高计算效率(以应用于流域尺度空间区域)数值模拟方法;梯级水库群大坝依次溃决洪水过程的渐进增强机制。

## 2 山洪灾害

山洪灾害一般是指发生在小面积(通常数百平方公里以内)山丘区、由强降雨诱发的急涨急落(几十分钟至几小时)的洪水灾害<sup>[23-26]</sup>,在适当条件下可能伴随泥石流和滑坡发生。广义而言,在山丘区由于水库坝体溃决、冰湖溃决等诱发的急涨急落的洪水也称为山洪。本文主要论述由强降雨诱发的山洪灾害(见图6)。山丘区地形复杂、山高坡陡、溪河坡降大、降水损失小、径流系数大、山洪陡涨、水流湍急,致使发布山洪警报的时间很短,往往造成严重的灾害,对社会和经济发展及人民生命安全构成威胁。

近年来,我国山洪灾害问题日益突出,防御山洪灾害已经成为防汛工作的重点和难点。我国山洪灾害区域差异性比较明显,尤其是南北差异显著。四川、湖南、陕西和甘肃等省是我国山洪灾害比较严重的省份<sup>[26]</sup>。其中,以四川省为首的西南山区是我国泥石流灾害的主要发生区域;四川、陕西、甘肃省3种类型的山洪灾害(洪水、泥石流和滑坡)均比较发育;湖南省的山洪灾害主要是溪河洪水灾害和滑坡灾害,其分布范围与湖南暴雨中心的分布范围基本一致。我国山洪灾害主要集中在汛期,尤其主汛期更是山洪灾害的多发期。《全国山洪灾害防治规划》已经于2005年通过审查,但是对山洪灾害形成机理的认识仍处于相对粗浅的水平,迄今尚无可靠的山洪灾害预报技术。其核心问题是对局部强降雨的预报精度还不够高,对山洪灾害的发生与发展的预测还不够准确。实质上,这正是我国实施山洪灾害防治规划的关键性技术障碍。水利部门明确指出需要探索规律、科学地确定山洪灾害特征雨量<sup>[27]</sup>,并认为科学确定山洪灾害特征雨量是防御山洪灾害,特别是制定山洪灾害防御方案的关键依据。山洪灾害对世



图 6 强降雨诱发山洪

Fig. 6 Heavy rain-generated flash flooding  
(photograph by local resident)

界许多国家的公共安全和社会经济发展都构成了威胁<sup>[28]</sup>,例如 1997 年 7 月发生在美国 Fort Collins, Colorado 的山洪灾害<sup>[29]</sup>,1996 年 8 月发生在西班牙中部的山洪灾害<sup>[30]</sup>,1999 年 11 月<sup>[31]</sup>和 2002 年 9 月<sup>[32-33]</sup>发生在法国的山洪灾害,2004 年 8 月发生在英国威尔士西南部 Boscastle 和 Cornwall 北部的山洪灾害<sup>[34]</sup>(见图 6),以及 1995 年 11 月发生在土耳其的山洪灾害<sup>[35]</sup>等都造成了重大损失。日本山洪灾害多发,其河流坡降大,洪水大多具有山洪性质,洪水损失是世界上最高的<sup>[36]</sup>。毫无疑问,在对研究山洪灾害形成机理进行深入研究的基础上,建立可靠的山洪预报技术、发展有效的山洪灾害风险评估方法具有重要的应用价值。

纵观国内外的典型山洪灾害可以发现,诱发山洪的暴雨强度大,强降雨是诱发山洪的必要条件,但并不一定是充分条件。在强降雨前提下,流域的地形、地貌、地质、植被以及土地利用等条件是形成山洪的关键因素。这就决定了山洪预报不可避免地要求对中小尺度暴雨(特别是移动缓慢的暴雨)和暴雨作用下流域的反应机理与过程有深入的理解和预测。这两者是气象学和水文水动力学等学科领域亟待研究解决的重大科学问题<sup>[25]</sup>。从科学上说,迄今对过去山洪灾害的气象、水文水动力学特征及灾害损失缺乏完整一致的描述;需要对山洪灾害事件进行分析,以增进对其内在时间和空间尺度、水文气象学和水动力学机理的理解;需要发展合适的方法,以对已经建立的水文-气象观测站数据及在山洪发生后获得的补充信息进行收集和整理;需要发展一套相容的技术,以支持适时山洪预报预警。

科技部组织实施的国家重点基础研究计划(973 计划)在 2004 年启动了对“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究”项目,其主要研究对象为空间尺度为几十公里乃至上百公里(中  $\beta$  尺度)的强对流系统

的三维结构与形成机理,以及有效地监测与预测引发暴雨的强对流系统的理论和方法。这样的中尺度基本上与我国典型山洪灾害流域的空间尺度相当。这项正在进行的研究对我国山洪灾害的气象预报有积极意义,但还不足以为山洪预报直接提供气象学数据来源。

欧盟第六框架计划(EU 6th Framework Program)于 2006 年正式启动 FLASH 项目“Observations, analysis and modeling of lightning activity in thunderstorms, for use in short term forecasting of flash floods (用于山洪短期预报的雷雨闪电活动的观测、分析与模拟)”,其科学目标是以闪电数据为关键性参数,改善山洪预报的可靠度;核心是通过建立闪电与降雨之间的关系,为未来实时预报提供基础。与雷雨的雷达观测不同,通过闪电观测可以在数千公里之外对区域雷雨活动进行连续监测,并且可以确定降雨往往最为强烈的雷雨对流中心,从而对山洪预报具有重大意义。2006 年,欧盟第六框架计划还启动了 HYDRATE 项目“Hydrometeorological data resources and technologies for effective flash flood forecasting(山洪预报的水文气象数据资源与技术)”,目标在于发展可以有效地对山洪做出早期预报的技术(武汉大学作为我国唯一参与该研究计划的学术机构)。需要明确的是,欧盟第六框架计划的 FLASH 项目和 HYDRATE 项目的科学目标集中于诱发山洪的降雨过程的预报、山洪灾害水文气象数据资源的积累以及基于水文学方法的流域产汇流过程预报,但忽略了给定降雨条件下山洪形成的多尺度、多过程相互作用的复杂力学机理,而这在本质上是目前对暴雨诱发山洪灾害的水文学预报可靠性很低的根源。1996 年 Woolhiser<sup>[37]</sup>在对流域降雨-径流模型进行评述时明确指出,对于小流域过程(如山洪形成过程),具有健全物理基础的数学模型是可以具有预报意义的。

山洪通常发生在小流域,没有或很少有观测资料。对无资料地区进行水文预报的可靠性低,这是目前国际水文学界尚未解决的重大科学问题<sup>[38]</sup>。并且,诱发山洪的暴雨历时往往很短,降雨与径流之间不一定能在短时间内达到线性关系<sup>[39-40]</sup>。因此,基于单位线(或瞬时单位线)的水文学方法并不适用。

在陡峭坡面上流动可能呈现滚波结构<sup>[41]</sup>,这对山洪的形成与演化过程具有重要意义。遗憾的是,基于运动波和扩散波近似(或其变异形式)的分布式水文模型<sup>[42-43]</sup>,由于忽略了流动的力学因子,不能描述滚波的发生与发展,而需要应用完整的水动力学模型。但目前的研究局限于一维情形<sup>[41,44-45]</sup>,难以描述不规则坡面或河床上的水流结构。并且,坡面上泥沙侵蚀对滚波的形成与演化必然产生影响,但尚未见到这方面的研究。

山洪往往伴随非常活跃的泥沙运动,特别是干旱



和半干旱地区,从而显著地影响山洪传播;但迄今的研究局限于实际观测、统计分析等<sup>[46-48]</sup>,尚无具备健全物理基础的完整数学模型可以揭示山洪演化与泥沙之间的相互作用过程<sup>[49-50]</sup>。

基于上述论述,欲对山洪形成与演化进行可靠的预报,需要发展可以准确预报小尺度暴雨的气象学方法。同时,需要突破传统的水文学方法,从水沙动力学层面出发,揭示暴雨作用下坡面产流产沙及山区河流泥沙动力学机理,建立基于流域全场完整水沙动力学耦合数学模型的山洪数值预报技术。这是有效地防御山洪灾害所迫切需要研究解决的关键科学问题。

### 3 河流环境

我国经济持续发展,能源供需矛盾日益显现,在西部建设大型水库以开发利用水能对我国经济和社会的可持续发展具有战略意义。然而,修建大型水库显著地改变了河流水文、水动力学过程,库区水位抬高,水流流速减小,污染物质(如氮、磷等)的迁移速度减缓、在库区的滞留时间相对于建库前显著地延长、逐步积累、形成富营养化甚至重度富营养化。在光度合适等条件下,就会在库区暴发藻类水华。藻类的快速繁殖能力很强,并可随水流迁移、扩散而大范围蔓延,对水质安全造成严重威胁。这是实施水能开发计划所亟待解决的关键性环境问题之一。

一个典型的实例是长江三峡水库(见图7,源自文献<sup>[51]</sup>)。自2003年蓄水至今,大部分入库支流的库湾已经出现富营养化(甚至重度富营养化),并在春季暴发了数次藻类水华现象<sup>[51]</sup>。三峡水库抬高水位运行时,水库影响范围进一步加大,可能暴发藻类水华的区域不可避免地扩大,将对长江水质安全构成严重威胁。这类生态环境问题并非局限于三峡水库,在我国西部其他大型水库中可能会逐步显现。



图7 三峡水库某支流库湾藻类水华(2006年3月5日)

Fig. 7 Occurrence of phytoplankton bloom in a tributary bay, Three-Gorges Reservoir  
(5 March 2006; source: Cai Q H, 2006)

已有的关于藻类水华的研究主要是针对湖泊、河口和海洋环境的,对水库藻类水华的研究相对较少。对于湖泊、河口及海洋环境藻类水华现象,除现场监测和定性分析外,最近的研究试图发展水动力学和生态学耦合数学模型,以从定量的角度研究藻类水华的形成与时间、空间演化规律<sup>[52-64]</sup>。国际上百年来形成了以水生生物为主要研究对象的湖沼学体系,对深水湖泊的水文、水动力、营养循环、水生生物演替和生产力等均有较深入的研究。有关大型浅水湖泊富营养化的基础理论研究相对薄弱,从国际上对仅有的几个浅水湖泊富营养化治理看,由于富营养化的形成机理尚未清楚,对蓝藻水华还没有有效的控制对策。

水库的水动力学条件不同于湖泊、河口与海洋环境。一个最显著的特点是水库库区的水动力学条件(水深、流速等)在丰水和枯水季节交替变化显著,并且可能通过水库调度而得到控制。这样的水库水动力学特征预示,已有的关于湖泊、河口及海洋环境藻类水华的研究成果可能不能简单地移植应用于水库藻类水华问题。另一方面,尽管关于湖泊藻类水华的机理尚不清楚,也没有有效的控制对策,但水库水动力学特性有可能为库区藻类水华的控制提供机遇。

近年来,中国在水库藻类水华研究方面取得了长足的进步。2006年3月,由中德科学基金交流中心资助的中德重大水利工程的环境生态影响学术研讨会显示,我国学者对长江三峡水库藻类水华进行了有益的现场观测与基本特性分析;与此相关的工作还有 Zhao 等<sup>[65]</sup>, Tang 等<sup>[66-67]</sup>, Qu 等<sup>[68]</sup>, Shao 等<sup>[69]</sup>, Ye 等<sup>[70-71]</sup>。另外,我国学者还结合南水北调中线工程对汉江中下游水华问题进行了有意义的分析<sup>[72-73]</sup>。国际上对河流环境(包括水库)水华的影响因素等也进行了一定的研究<sup>[74-78]</sup>。

迄今为止,水库藻类水华的复杂水动力学与生态学耦合作用机制远未清楚;还没有可靠的量化方法或模型预测其发生的临界条件、演化过程以及对未来环境变化(如污染物控制工程等引起的流域污染源变化等)的响应规律;水库蓄水位变化、水库调度方案改变(如实施水库防洪-发电-航运-环境综合调度)等对藻类水华形成与演化的调控作用尚无研究报道。这些正是对水库藻类水华进行有效控制所亟待研究、解决的关键科学问题。

### 4 结论

溃坝洪水灾害、山洪灾害和修建水库诱发的水华问题是河流环境保护和灾害防御的重大问题,对公共安全和社会经济可持续发展构成潜在威胁。由于这些问题的多学科性质,应进行相关学科领域联合研究,为维护河流健康、有效地防灾减灾提供科学技术支持。

## 参考文献 (References)

- [1] Institution of Civil Engineers. Learning to live with rivers [R]. Final report of the Institution of Civil Engineers' Presidential Commission to review the technical aspects of flood risk management in England and Wales. UK: Institution of Civil Engineers, 2001.
- [2] MILLY P C D, *et al.* Increasing risk of great floods in a changing climate[J]. *Nature*, 2002, 415(6871): 514–517.
- [3] CHANSON H. Applications of the St–Venant equations and method of characteristics to the dam break wave problem [R]. Report No. CH 55/05, ISBN 1864997966, Australia: Department of Civil Engineering, University of Queensland, 2005.
- [4] ZECH Y, SPINEWINE B. Dam–break induced floods and sediment movement –State of the art and need for research [C]//First Workshop of EU Project IMPACT, HR Wallingford, 2002.
- [5] JIN M, FREAD D L. Dynamic flood routing with explicit and implicit numerical solution schemes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 1997, 123(3): 166–173.
- [6] GARCIA M H, ZECH Y, ed. A Database from the European IMPACT research program [J]. *Journal of Hydraulic Research*, Extra Issue Dam–Break Flow Experiments and Real–Case Data, 2007, vol. 45.
- [7] VALIANI A, *et al.* Case study: Malpasset dam–break simulation using a two–dimensional finite volume method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 2002, 128(5): 460–472.
- [8] FRACCAROLLO L, CAPART H. Riemann wave description of erosional dam–break flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 461: 183–228.
- [9] FRACCAROLLO L, *et al.* A Godunov method for the computation of erosional shallow water transient [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2003, 41(9): 951–976.
- [10] ROSATTI G, FRACCAROLLO L. A well–balanced approach for flows over mobile–bed with high sediment–transport[J]. *Journal of Computational Physics*, 2006, 220: 312–338.
- [11] 梁林, 倪晋仁, BORTHWICK A G L, 等. 黄河溃堤过程数学模型及其模拟方法 [J]. *中国科学, E 辑*, 2002, 32(5): 618–627.  
Liang Lin, Ni Jinren, Borthwick A G L, *et al.* Mathematical model and numerical method for dike –break of the Yellow River [J]. *Sci China, Series E*, 2002, 32(5): 618–627.
- [12] 张修忠, 王光谦. 堤防溃决的流动分析及冲刷坑计算 [J]. *泥沙研究*, 2002, 1: 18–24.  
ZHANG Xiuzhong, WANG Guangqian. Analysis of flood due to dike failure and computation of scour [J]. *Sediment Research*, 2002, 1: 18–24.
- [13] CAO Z X, *et al.* Computational dam–break hydraulics over erodible sediment bed [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 2004, 130(7): 689–703.
- [14] CAO Z X, *et al.* Two–dimensional mathematical modelling of flooding over erodible sediment bed [C]//Proc. 32nd IAHR Congress, Venice, Italy, 1–6 July, 2007.
- [15] WAHL T L. Prediction of embankment dam breach parameters: a literature review and needs assessment [R]. Dam Safety Research Report DSO –98 –004, US Bureau of Reclamation, 1998: 67.
- [16] FRANCA M J, ALMEIDA A B. A computational model of rockfill dam breaching caused by overtopping [J]. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 2004, 42: 197–206.
- [17] WANG Z G, BOWLES D S. Three–dimensional non–cohesive earthen dam breach model. Part 1: Theory and methodology [J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29: 1528–1545.
- [18] MOHAMED M A A, SAMUELS P G, MORRIS M W. Improving the accuracy of prediction of breach formation through embankment dams and flood embankments[C]//BOUSMAR D, ZECH Y, ed. *River Flow 2002*, Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, The Netherlands: Swets & Zeitlinger, 2002.
- [19] WANG Z G, BOWLES D S. Three–dimensional non–cohesive earthen dam breach model. Part 2: Validation and application[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29: 1490–1503.
- [20] WANG Z G, BOWLES D S. Dam breach simulations with multiple breach locations under wind and wave actions [J]. *Adv Water Res*, 2006, 29: 1222–1237.
- [21] WANG Z G, BOWLES D S. A numerical method for simulating one –dimensional headcut migration and overtopping breaching in cohesive and zoned embankments [J]. *Water Resources Research*, AGU, 2007, 43: W05411, doi: 10.1029/2005WR004650.
- [22] MORRIS M. Physical model 2: Video [C]// 2nd IMPACT Project Workshop, Mo –i –Rana, Norway, 12–13 September, 2002.
- [23] CRETUTIN J D, BORGA M. Radar hydrology modifies the monitoring of flash flood hazard [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(7): 1453–1456.
- [24] O'CONNOR J E, COSTA J E. Spatial distribution of the largest rainfall –runoff floods from basins between 2.6 and 26,000 km<sup>2</sup> in the United States and Puerto Rico[J]. *Water Resources Research*, AGU, 2004, 40(1): W01107, doi: 10.1029/2003WR002247.
- [25] BORGA M, *et al.* Hydrometeorological data resources and technologies for effective flash flood forecasting[R]. Research Proposal for EU 6th Framework Program, Italy, 2005: 123.
- [26] 全国山洪灾害防治规划编写组. 全国山洪灾害防治规划[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2005.  
National Flash Flood Defense Planning Committee.

- National flash flood defense planning [R]. Wuhan: Changjiang Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, 2005.
- [27] 张硕辅. 湖南省山洪灾害防治的基本思路 [J]. 中国水利, 2003, 6(11): 33–34.  
ZHANG Shuofu. Strategy for flash flood defense in Hunan Province[J]. China Water Resources, 2003, 6(11): 33–34.
- [28] MILLER J B. Floods, people at risk, strategies for prevention[R]. DHA/97/107, Department of Humanitarian Affairs, United Nations Publication, 1997.
- [29] OGDEN F L, *et al.* Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997 [J]. Journal of Hydrology, Elsevier, 2000, 228: 82–100.
- [30] WHITE S, *et al.* The 1996 Biescas campsite disaster in the central Spanish pyrenees, and its temporal and spatial context[J]. Hydrological Processes, 1997, 11(14): 1797–1812.
- [31] GAUME E, *et al.* Hydrologic analysis of the Aude, France, flash flood 12 and 13 November 1999 [J]. Journal of Hydrology, Elsevier, 2004, 286: 135–154.
- [32] ANQUETIN S, *et al.* The 8 and 9 September 2002 flash flood event in France: a model intercomparison [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005, 5(5): 741–754.
- [33] DELRIEU G, *et al.* The catastrophic flash flood event of 8–9 September 2002 in the Gard region, France: A first case study for the Cevennes–Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory [J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(1): 34–52.
- [34] WALLINGFORD H R. Flooding in Boscawen and North Cornwall–Phase 2 Studies report [R]. Report EX5160, 2005: 244.
- [35] KOMUSCU A, *et al.* Analysis of meteorological and terrain features leading to the Izmir flash flood, 3–4 November 1995[J]. Natural Hazards, 1998, 18(1): 1–25.
- [36] YOSHIMURA C, *et al.* Present state of rivers and streams in Japan [J]. River Research and Applications, 2005, 21(2–3): 93–112.
- [37] WOOLHISER D A. Search for physical based runoff model–A hydrologic el dorado [J] Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1996, 122(3): 122–129.
- [38] SIVAPALAN M, *et al.* IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences [J]. Hydrological Sciences Journal, IAHS, 2003, 48 (6): 857–880.
- [39] SAGHAFIAN B. Nonlinear transformation of unit hydrograph [J]. Journal of Hydrology, Elsevier, 2006, 330: 596–603.
- [40] SAGHAFIAN B, JULIEN P Y. Time to equilibrium for spatially variable watersheds [J]. Journal of Hydrology, Elsevier, 1995, 172: 231–245.
- [41] LIU Q Q, CHEN L, LI J C, *et al.* Roll waves in overland flow [J]. Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 2005, 10(2): 110–117.
- [42] JAIN M K, *et al.* A GIS based distributed rainfall–runoff model [J]. Journal of Hydrology, Elsevier, 2004, 299: 107–135.
- [43] JAIN M K, *et al.* GIS based distributed model for soil erosion and rate of sediment out flow from catchments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2005, 131 (9): 755–769.
- [44] ZANUTTIGH B, LAMBERTI A. Roll waves simulation using shallow water equations and weighted average flux method [J]. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 2002, 40(5): 610–622.
- [45] QUE Y T, XU K. The numerical study of roll–waves in inclined open channels and solitary wave run–up [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2006, 50: 1003–1027.
- [46] LARONNE J B, REID I. Very high rates of bed load sediment transport in ephemeral desert rivers[J]. Nature, 1993, 366: 148–50.
- [47] REID I, *et al.* Flash–flood and bedload dynamics of desert gravel–bed streams [J]. Hydrological Processes, 1998, 12: 543–557.
- [48] COHEN H, LARONNE J B. High rates of sediment transport by flash floods in the Southern Judean Desert, Israel[J]. Hydrological Process, 2005, 19: 1687–1702.
- [49] 刘青泉, 李家春, 陈力, 等. 坡面流及土壤侵蚀动力学 I. 坡面流[J]. 力学进展, 2004, 34(3): 360–372.  
LIU Qingquan, LI Jiachun, CHEN Li, *et al.* Dynamics of overland flow and soil erosion (I) Overland flow [J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(3): 360–372.
- [50] 刘青泉, 李家春, 陈力, 等. 坡面流及土壤侵蚀动力学 II. 土壤侵蚀[J]. 力学进展, 2004, 34(4): 493–506.  
LIU Qingquan, LI Jiachun, CHEN Li, *et al.* Dynamics of overland flow and soil erosion (II) Soil erosion [J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(4): 493–506.
- [51] CAI Qinghua. Temporal–spatial dynamics of phytoplankton bloom and its response to hydrodynamic processes: Case of the Three–Gorges Reservoir [C]// NSFC–JST Bilateral Workshop on Environmental Impact Assessments and Protection Technologies for Watershed and Ecosystems Sustainability, Beijing, 2006.
- [52] LUCAS L, *et al.* Processes governing phytoplankton blooms in estuaries I: The local production–loss balance [J]. Marine Ecology–Progress Series, 1999, 187: 1–15.
- [53] LUCAS L, *et al.* Processes governing phytoplankton blooms in estuaries II: The role of horizontal transport[J]. Marine Ecology–Progress Series, 1999, 187: 17–30.
- [54] TRIGUEROS J, ORIVE E. Tidally driven distribution of phytoplankton blooms in a shallow, macrotidal estuary [J]. J Plankton Research, 2000, 22 (5): 969–986.
- [55] ALLEN J, *et al.* A highly spatially resolved ecosystem



- model for the North West European Continental Shelf[J]. *Sarsia*, 2001, 86 (6): 423–440.
- [56] CHAN T, HAMILTON P. Effect of freshwater flow on the succession and biomass of phytoplankton in a seasonal estuary [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2001, 52 (6): 869–884.
- [57] GOFFART A, *et al.* Changes in the development of the winter–spring phytoplankton bloom in the Bay of Calvi (NW Mediterranean) over the last two decades: A response to changing climate[J]. *Marine Ecology–Progress Series*, 2002, 236: 45–60.
- [58] MAY C, *et al.* Effects of spatial and temporal variability of turbidity on phytoplankton blooms [J]. *Marine Ecology–Progress Series*, 2003, 254: 111–128.
- [59] WANIEK J. The role of physical forcing in initiation of spring blooms in the northeast Atlantic [J]. *Journal of Marine Systems*, 2003, 39(1–2): 57–82.
- [60] IRIARTE A, PURDIE D. Factors controlling the timing of major spring bloom events in an UK south coast estuary [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2004, 61 (4): 679–690.
- [61] PINAZO C, *et al.* Impact of wind and freshwater inputs on phytoplankton biomass in the coral reef lagoon of New Caledonia during the summer cyclonic period: A coupled three–dimensional biogeochemical modeling approach[J]. *Coral Reefs*, 2004, 23(2): 281–296.
- [62] O’HIGGINS T, WILSON J. Impact of the river Liffey discharge on nutrient and chlorophyll concentrations in the Liffey estuary and Dublin Bay (Irish Sea) [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2005, 64 (2–3): 323–334.
- [63] VINAYACHANDRAN P N, McCreary J P, Hood R R, *et al.* A numerical investigation of the phytoplankton bloom in the Bay of Bengal during Northeast Monsoon [J]. *J Geophysical Research–Oceans*, 2005, 110(C12): 12001.
- [64] WANIEK J, HOLLIDAY N. Large–scale physical controls on phytoplankton growth in the Irminger Sea, Part II: Model study of the physical and meteorological preconditioning [J]. *Journal of Marine Systems*, 2006, 59 (3–4): 219–237.
- [65] ZHAO B, *et al.* Geostatistical analysis of chlorophyll a in freshwater ecosystems[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, 19(4): 613–621.
- [66] TANG T, *et al.* Benthic algae of the Xiangxi River, China [J]. *J Freshwater Ecology*, 2004, 19(4): 597–604.
- [67] TANG T, *et al.* Using epilithic diatom communities to assess ecological condition of Xiangxi River system[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 112 (1–3): 347–361.
- [68] QU X D, *et al.* Distribution of the macroinvertebrate communities in the Xiangxi River system and relationships with environmental factors [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, 20(2): 233–238.
- [69] SHAO M L, *et al.* Changes in the benthic macroinvertebrates in Xiangxi Bay following dam closure to form the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2006, 21(4): 717–719.
- [70] YE L, *et al.* Daily dynamics of nutrients and chlorophyll a during a spring phytoplankton bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2006, 21(2): 315–321.
- [71] YE L, *et al.* Spatial analysis for spring bloom and nutrient limitation in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 127 (1–3): 135–145.
- [72] 谢平, 夏军, 窦明, 等. 南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响及对策研究——汉江水华发生的关键因子分析[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(4): 418–423.
- XIE Ping, XIA Jun, DOU Ming, *et al.* Research into the effects of the middle route of China’s south–to–north water transfer project on water bloom in the middle downstream of Hanjiang River and the countermeasures, Part I: An analysis of the key factors generating water bloom in Hanjiang River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(4): 418–423.
- [73] 谢平, 夏军, 窦明, 等. 南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响及对策研究——汉江水华发生的概率分析与防治对策[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(5): 545–549.
- XIE Ping, XIA Jun, DOU Ming, *et al.* Research into the effects of the middle route of China’s south–to–north water transfer project on water bloom in the middle downstream of Hanjiang River and the countermeasures, Part II: A probability analysis of the water bloom in Hanjiang River and countermeasures [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(5): 545–549.
- [74] KORNEVA L G, SOLOVYOVA V V. Spatial organization of phytoplankton in reservoirs of the Volga River [J]. *International Review of Hydrobiology*, 1998, 83: 163–166.
- [75] HA K, *et al.* Microcystis bloom formation in the lower Nakdong River, South Korea: Importance of hydrodynamics and nutrient loading [J]. *Marine and Freshwater Research*, 1999, 50(1): 89–94.
- [76] GARBAN B, *et al.* The role of phytoplankton in pollutant transfer processes in rivers. Example of River Marne (France)[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 44(1): 1–27.
- [77] KIRSCHNER A, *et al.* Material fluxes through the procaryotic compartment in a eutrophic backwater branch of the River Danube [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1999, 17(3): 211–230.
- [78] BAKER P, *et al.* Advection, growth and nutrient status of phytoplankton populations in the lower River Murray, South Australia [J]. *Regulated Rivers –Research & Management*, 2000, 16(4): 327–344.

(责任编辑 朱宇)