

基于数值模拟的黄河下游 不同情景溃堤洪水特性

杨佩国^{1,2}, 杨勤业¹, 吴绍洪¹, 马 欣^{1,2},
康相武³, 夏富强^{1,2}, 戴尔阜¹

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3 中国科学技术信息研究所, 北京 100038)

摘要: 通过研究黄河下游地区的溃堤洪水特性, 为防洪减灾工作提供科学依据。本文以黄河下游地区的 DEM, 1958、1982、1996 年典型历史洪水和 2000 年土地利用数据为模型初始输入, 分 4 个模拟情景, 依据黄河溃堤水流的特性, 利用二维非恒定流模型对黄河下游不同位置决口情景下的洪水演进特性进行模拟。结果表明: 洪水在演进过程中都会侵夺沿途河流行洪, 进入下游后洪水会顺河归槽; 在同一河段, 同一年型洪水北岸不同位置溃口情景所淹没的面积大于南岸对应位置的淹没面积; 黄河两岸洪泛区地理位置的差异, 使两岸的洪灾程度具有区域差异; 水深且流速大的洪水淹没主流区面积相对较小, 水浅且流速小的非主流区面积相对较大。

关键词: 黄河下游; 溃决; 二维非恒定流模型; 洪水特性

文章编号: 1000-0585(2007)02-0328-10

随着全球气候变化引起的降水异常、黄河下游河道的不断淤积、河防工程的隐患、黄河流域来水来沙条件的变化以及人类生产活动引起的新问题, 黄河下游仍然面临较大洪水灾害的威胁。洪水灾害是影响范围大、发生次数频繁、损失非常严重的自然灾害之一。据统计, 自上世纪 50 年代以来, 中国每年因自然灾害而损失约为 500 亿~600 亿元, 其中洪水灾害损失占近 60%, 洪灾伤亡人口仅次于地震灾害^[1~4]。黄河下游因大量泥沙淤积而成为“地上悬河”, 如果发生洪水导致大堤出险发生决溢, 必然会给黄河下游地区造成严重破坏。因此, 研究黄河大堤在不同位置一旦决口所淹没的范围、水深和历时等洪水特性, 对于制定科学合理的防洪减灾对策非常必要。

目前, 洪水特性分析主要有地貌学方法、历史洪水法、试验模型法和水文水力学法。地貌学方法是根据区域地貌特征来定性或定量地确定洪水可能淹没范围, 仅在缺乏洪水资料的情况下才应用该方法^[5~10]。历史洪水法是假定未来洪水与历史上相同等级洪水的淹没范围、水深、历时等相类似, 通过调查确定洪水淹没范围、水深、历时, 由于环境条件不断发生变化, 故确定淹没范围和水深的精度不高, 应修正以符合当前的防护标准方可应用^[11~14]。如有学者利用历史洪水法, 结合当时地形条件, 估计出黄河下游不同堤段决口洪水流路和可能波及范围^[15]。试验模型法是把研究区内地形、河网和水利工程分布按一

收稿日期: 2006-08-21; 修订日期: 2007-01-24

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(96-920-09-01)资助

作者简介: 杨佩国(1977-), 男, 山东费县人, 博士研究生。主要从事环境整治、GIS 技术应用和水土资源开发与利用方面的研究。E-mail: yangpg_04b@igsnrr.ac.cn

定比例缩小，然后进行洪水水力学模型试验，考虑到比尺效应、试验场地和模拟费用等因素，大范围洪水一般不采用。水文水力学方法是依据水量守恒和水动量守恒原理，通过求解一组偏微分方程来模拟洪水的非恒定流演进过程，得到洪水淹没范围、水深、流速和历时，该方法所获取的洪水信息量最丰富^[16~19]。如有学者利用一维非恒定流模型模拟了黄河下游北岸可能决口地段溃决后的最大淹没范围，并提出了下游河道治理的对策^[20]；也有学者假定黄河在花园口发生溃口，分别模拟有无防洪工程的洪水淹没状况，对比淹没损失计算出防洪工程的效益^[21]；有研究利用二维水动力学模型模拟了对黄河济南段决口洪水的淹没范围，并计算了淹没范围内的经济损失^[22]。

黄河下游溃堤洪水计算模型的模拟范围大，涉及面积约为 12 万 km²，内部边界条件比较复杂。前人的研究最高空间分辨率分别为 1000m × 1000m，仅在南岸或北岸的局部位置模拟了黄河下游溃堤洪水特性，对模拟结果没有进行验证^[20~22]。本文在前人工作的基础上，较全面制定了黄河下游不同河段南北岸决口的情景，在 500m × 500m 高精度数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）支撑下，在数十万个网格单元上，利用二维非恒定流模型对整个黄河下游溃堤洪水进行比较精确的模拟，并应用历史资料对模拟结果进行了验证。得出了不同溃堤情景下洪水淹没范围、淹没水深和最大流速，并对模拟结果进行不同模拟情景的对比分析，在此基础上总结了黄河下游溃堤洪水特性。本研究可以为黄河下游地区的防洪减灾工作提供科学依据。

1 洪水演进模拟原理

1.1 基本控制方程

应用二维非恒定流方程模拟黄河下游溃堤洪水的演进特性，基本控制方程的建立基于矩形单元内水体质量的守恒和动量守恒。描述质量守恒的方程为：

∂H/∂t + ∂Qx/∂x + ∂Qy/∂y = q (1)

式中：H 为单元平均水深(m)；t 为时间(s)；x, y 为直角坐标系表征的距离(m)；q 为连续方程中的源汇项，本模型中代表有效降雨强度或渗流、蒸发强度，在不计降雨或渗流、蒸发情况下，q=0；Qx, Qy 为 x, y 方向流经单元边界的总流量(m³/s)。方程的物理意义为某一时段计算网格单元内水体质量的增加等于该时段内网格单元四面总流入水体的质量。描述动量守恒的方程为：

∂Qx/∂t + ∂(UQx)/∂x + ∂(VQx)/∂y + gH [∂Z/∂x + (n^2 U √(U^2 + V^2)) / H^(4/3)] = 0 (2)

∂Qy/∂t + ∂(UQy)/∂x + ∂(VQy)/∂y + gH [∂Z/∂y + (n^2 V √(U^2 + V^2)) / H^(4/3)] = 0 (3)

式中：U, V 分别为垂向平均流速在 x, y 方向的分量(m/s)；n 为曼宁糙率系数；g 为重力加速度；Z 为单元平均水位(m)。方程的物理意义为某一时段计算网格单元内 x, y 方向上水体动量的增加分别等于该时段内该方向上网格单元水体受水压力、重力和阻力而引起的动量变化与该方向两侧总流入动量之和。

1.2 计算网格与计算方法

本研究利用 DEM 数据采用正方形网格，网格单元的地面高程直接由 500m 空间分辨率 DEM 获取，通过地理信息系统实现网格剖分，以减少原始资料输入工作量。

计算方法采用控制体积法,基本状态变量的布置方式:在网格的中心计算水深与底高的冲淤变化,在网格周边通道上计算垂向平均单宽流量^[23~28]。

1.3 模型的验证

验证黄河下游大范围决堤洪水的模拟结果是比较困难的,实例验证是把模拟结果与历史上发生的洪水淹没状况进行对比,分析模拟结果的合理性与计算精度。

1938年8月黄河花园口人为决口发生洪灾,因连年战乱洪水泛滥了8年之久,1946年才堵住决口。1949年以后,罗来兴等对1938~1946年洪灾情况进行实地调查,编制了1938~1946年黄泛大溜图,为研究该时期黄泛区洪水淹没状况提供了历史资料^[23,33]。

为与历史洪水调查资料对比,考虑到模型使用地形资料与泥沙淤积后的地形状况最为接近,40年代,黄河下游防洪保护区内公路、铁路和河流堤防工程较少。因此,采用1946年花园口洪水数据,按无道路、无河堤进行洪水演进模拟。

模拟结果与历史洪水淹没状况对比分析:把水深大于1m且流速大于 0.2 m/s 的连续区域确定为模拟洪水的大溜范围,图1是模拟1946年洪水大溜范围与罗来兴等人实地调查大溜范围的叠加结果,可以看出:模拟结果和调查范围基本吻合,在黑岗口至淮阳、阜阳至淮河之间模拟结果与调查大溜范围几乎完全吻合,在淮阳至阜阳之间差异较大,原因可能是1946年以后人类生产活动,改变了当地自然地理条件,对模拟结果产生影响,导致了大溜范围差异。模拟大溜面积为 7302.97 km^2 ,调查大溜面积为 7132.96 km^2 ,大溜重合部分的面积为 3995.40 km^2 ,分别占模拟总面积和调查总面积的54.71%和56.01%。

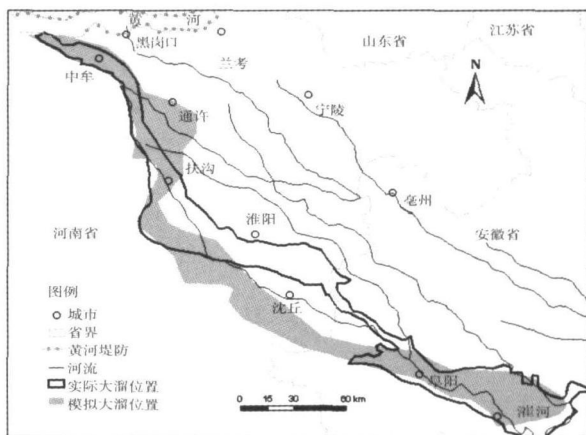


图1 模拟结果与调查结果对照图

Fig 1 Comparison of the simulated results and investigated flood

2 数据处理与参数确定

(1) 地形与水文数据处理和糙率系数确定 洪水演进模拟的地形资料是由国家测绘局基础地理信息中心提供的25m分辨率DEM数据,把该DEM数据应用ARC/GIS软件重采样成500m分辨率数据,地形网格单元大小为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 以保证模拟结果的精度。

水文数据来源于《黄河流域水文年鉴》,包括1958、1982、1996年黄河下游花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、冻口和利津7个水文观测站的监测资料。洪水模拟的入口边界条件应用洪水期间花园口、夹河滩和冻口等水文站的流量-时间过程资料。由于实测资料不是等时间距的,为了模型计算方便,把流量-时间过程资料的时间间距转换成2小时,即洪水演进模型输入等时段的洪水过程系列数据,其时段时间分辨率为120分钟。

利用计算区域内2000年土地利用图确定不同计算网格单元上的糙率系数。糙率系数反映了下垫面对洪水的阻力大小,直接影响模拟结果的精度。本文中土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心,根据研究区内土地利用分布图,同时参照以往经验和黄河

下游实际情况，来确定对应网格单元的糙率系数，计算中各土地利用类型的糙率系数设置为：旱田 0.06；水田 0.05；树林 0.065；村庄 0.07；空地 0.035；其他 0.055^[29~34]。

(2) 模拟技术流程 把 DEM 数据、水文数据和土地利用数据输入到模型的数据前处理模块，在数据前处理模块中对 DEM 数据进行单元编码，把根据土地利用数据确定出的糙率系数赋给对应的网格单元，根据水文数据确定模型的初值条件，同时设定模型计算区域入口处的空间位置、进水方向，最后生成洪水演进模型计算的初始文件，在模型计算时直接输入进行洪水演进模拟。模拟的技术流程如图 2：

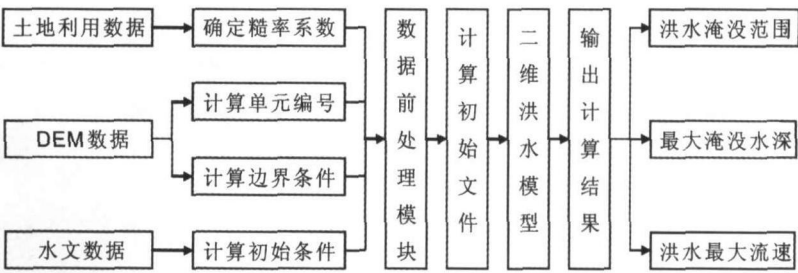


图 2 洪水演进模拟技术流程图
Fig 2 Technical route of simulating propelling flood

3 确定不同模拟情景

3.1 典型洪水介绍

为了分析不同水情下黄河下游溃堤洪水特性，本文选择 1958 年、1982 年和 1996 年型洪水分别代表特大洪水、大洪水和中常洪水对洪水演进模拟。

(1) 1958 年型洪水: 1958 年 7 月 14~18 日，黄河三门峡至花园口区间，普降暴雨。花园口站 7 月 15 日 12 时起涨，7 月 18 日 0 时出现最大洪峰流量 22300 m³/s，最大 5 天、12 天洪量分别为 56.3 亿和 86.7 亿 m³，这是 1949 年以来最大洪水^[35]。1958 年型洪水特点：属于特大型洪水；来源于三门峡以下，三花区间主要站的洪峰在同一天出现，洪水预报的预见期短；洪水来势猛、峰值高、涨落快、沙量小。

(2) 1982 年型洪水: 1982 年 7 月 29 日~8 月 4 日，花园口站 8 月 2 日 18 时洪峰流量达 15300 m³/s，为 1949 年以来黄河第二大洪水^[36]，属于大型洪水。1982 年型洪水特点：属于大型洪水；干流花园口断面的洪峰流量和 5 天洪水总量都小于 1958 年型洪水；洪水过程是双峰型，主峰在后，峰型肥胖。

(3) 1996 年型洪水: 1996 年 7 月 31 日~8 月 4 日，黄河晋陕区间、泾渭洛河及三花区间普降大到暴雨。8 月 4 日 14 时花园口站最大洪峰流量 7600m³/s，水位 94.73m，为该站有实测资料记载以来的最高水位^[37]。1996 年型洪水特点：属于中常洪水。水量小，高水位；洪水演进时间长，传播速度慢，传播总历时为 369 小时；漫滩范围广，淹没水深大，滩区平均水深 1.7m，最深达 6m。

3.2 模拟堤段的划分

黄河下游平原主要由桃花峪冲积扇、兰考冲积扇和花园口冲积扇构成^[38]。地貌格局控制着洪水流路，南岸花园口—兰考堤段保护区内地势西北高，东南低，控制着溃堤洪水从西北向东南演进，洪水西界不会超过桃花峪冲积扇的扇缘，东界不会超过地势较高的明

清黄河故道, 兰考- 东平南岸大堤保护区内地形呈簸箕形, 北、西、南三面地势较高, 为决口扇形地, 中间和东部地势低洼, 控制着溃堤洪水从西向东演进; 东平湖以下至济南田庄为山岭, 无堤防工程分布, 济南以下南面受泰山、鲁山和沂山山前平原的影响, 溃堤洪水向南不会超过小清河, 南岸大堤保护区内地势西南高、东北低, 溃堤洪水顺小清河从西南向东北方向演进; 北岸大堤保护区内地势西南高, 东北低, 黄河大堤与武陟- 庆云古河道高地之间地表起伏呈槽状, 两侧地势高, 中间低洼, 溃堤洪水大溜在黄河大堤与武陟- 庆云古河道高地之间由西南向东北方向演进。根据上述地形地貌特点, 把黄河下游两岸堤防分为花园口- 兰考、兰考- 东平、济南以下三个堤段模拟溃堤洪水演进过程。

3 3 确定模拟情景

根据各种历史决溢资料和前人的相关研究成果^[20], 认为 1958 年、1982 年和 1996 年型洪水最可能造成堤防溃决是南岸的开封黑岗口、东明徐集、济南杨庄和北岸的原阳朱庄。因此, 本文重点模拟以上 4 个位置堤防溃决情景的淹没情况。各情景的洪水量按 1958 年、1982 年和 1996 年型洪水全部出河计算。有关研究^[20]表明: 黄河下游决堤主要是冲决和溃决, 流量一般为 4000 ~ 6000m³/s。因此, 不同溃堤情景的决口时间选择在洪水流量达到 5000m³/s 时, 溃堤以后按洪水水量全部出河计算, 模拟的总时间由洪峰到达洪泛区出口或入海的时间控制。不同模拟情景基本情况见表 1。

表 1 不同模拟情景基本情况表

Tab 1 The basic conditions in the different scenarios

岸别	情景类型	决堤堤段	口门位置
南岸	情景一	郑州~ 兰考	开封附近的黑岗口
	情景二	兰考~ 东平	东明附近的徐集
北岸	情景三	济南以下	济南附近的杨庄
	情景四	郑州~ 兰考	原阳附近的朱庄

4 模拟结果

4 1 不同情景洪水淹没范围

在不同模拟情景中, 1958 年型洪水代表特大型洪水, 在同一决口位置, 1958 年型洪水的淹没范围大于 1982 年型和 1996 年型洪水的淹没范围, 因此, 以 1958 年型洪水为例分析淹没范围更具有现实意义(因篇幅所限, 文中仅给出 1958 年型洪水模拟结果图版 4 图 3)。

情景一淹没范围 (图版 4): 北以中牟- 兰考一线沿黄大堤为界; 西界沿贾鲁河、茨河, 向下游洪水归槽进入颍河, 顺颍河而下, 在正阳关进入淮河; 东界洪水到达大沙河, 东泛洪水到达亳州以后, 部分洪水向东进入浍河, 主要洪量向南归槽进入涡河, 顺涡河而下的洪水在怀远进入淮河; 南泛洪水全部汇入淮河干流, 并沿淮河干流一线向东排入洪泽湖。

情景二淹没范围 (图版 4): 北以兰考- 东平湖一线的黄河大堤为界; 丰县以上西到红卫河、黄白河, 丰县以下西到明清黄河故道; 东到京杭运河、南四湖地区; 南到骆马湖, 进入骆马湖的洪水直接经新沂河排入黄海。

情景三淹没范围 (图版 4): 溃堤洪水由西南向东北方向沿小清河及其两岸流入渤海, 淹没范围主要介于黄河大堤与小清河之间。

情景四淹没范围 (图版 4): 济南以上南以黄河大堤为界, 北泛洪水经过新乡进入卫河, 沿卫河穿过武陟- 庆云古河道高地向东北到达滑县、浚县, 到达浚县后折向东流; 济南以下, 南以徒骇河为界, 北抵马颊河, 很少一部分洪水最北到达漳卫新河。这与陆中臣等人的研究结果基本是吻合的。

4 2 不同情景洪水淹没面积对比分析

黄河下游一旦决口，洪水淹没面积大小一方面受地形地物影响，另一方面受洪水总量和峰值流量的控制。对于同一决口位置，不同年型洪水的淹没面积，由表 2 可以看出：总趋势是 1958 年型洪水的淹没面积最大，1982 年型洪水的淹没面积居中，1996 年型洪水的淹没面积最小。

对于同一年型洪水，在不同位置决口洪水所淹没的面积不同，淹没面积从大到小依次为原阳朱庄、东明徐集、开封黑岗口和济南杨庄。如果发生 1958 年型特大洪水，原阳朱庄决口的淹没面积是 34510km²，东明徐集决口的淹没面积是 20689km²，开封黑岗口决口的淹没面积是 19168km²，济南杨庄决口的淹没面积是 6589km²；若发生 1982 年型的大洪水，原阳朱庄决口的淹没面积是 32444km²，东明徐集决口的淹没面积是 17601km²，开封黑岗口决口的淹没面积是 16684km²，济南杨庄决口的淹没面积是 5965km²；若发生 1996 年型中常洪水，原阳朱庄决口的淹没面积是 28124km²，东明徐集决口的淹没面积是 9137km²，开封黑岗口决口的淹没面积是 12962km²，1996 年型的小洪水对兰考以下影响比较小，即使济南以下发生决口，所淹没的面积也较小。

4 3 不同情景洪水流速对比分析

三种年型洪水决口口门处的最大流速都可达 3~ 6m/ s，口门周围洪水的流速较大，在 1~ 3m/ s 之间；洪水主流区的最大流速在 0.3~ 0.5m/ s 之间，洪水主流内都有流速在 0.5~ 0.7m/ s 之间的急流区分布；非主流区内的洪水最大流速在 0.3m/ s 以下。1958 年型洪水大溜最宽，1982 年型洪水居中，1996 年型洪水大溜最窄。口门附近流速在 1~ 3m/ s 之间的面积以 1996 年型洪水最大，1958 年型洪水居中，1982 年型洪水最小。

4 4 不同情景洪水演进时间对比分析

对于同一位置不同年型洪水，在整个洪水演进过程中，1958 年型洪水的平均演进速度最大，1982 年型洪水居中，1996 年型洪水的平均演进速度最小。表 3 为不同位置决口淹没时间的对比，以开封黑岗口决口洪水演进为例，1958 年型洪水需 25 天到达淮河，1982 年型洪水需 28 天到达淮河，1996 年型洪水需 30 天才进入淮河；如果在东明徐集决口，1958 年型洪水需 32 天进入骆马湖，1982 年型洪水需 30 天进入骆马湖，1996 年型洪水因水量太小，第 60 天时，洪水才进入微山湖。如果在济南杨庄发生决口，1958 年型和 1982 年型洪水大约都需 13 天洪水到达莱州湾；如果在原阳朱庄决口，1958 年型洪水需 28 天进入渤海，1982 年型洪水需 30 天到达渤海，1996 年型洪水需 32 天入渤海。在局部淹没范围内，1982 年型和 1996 年型洪水演进速度甚至超过 1958 年型洪水演进速度。主要是由于从模拟开始到达洪峰的时间和峰型不同所导致的，1958 年型洪水属于尖瘦型洪水，从模拟开始到第 14 天出现洪峰；1982 年型洪水属于矮胖型洪水，从模拟开始洪水在第 4 天到达洪峰；1996 年型洪水属于矮胖型洪水，从模拟开始到达洪峰仅需要 2 天。

表 2 不同决口位置洪水淹没面积对比表 (km²)

Tab 2 The comparison of flood submerged area at different embankment-break locations (km²)

岸别	决口位置	1958 年型	1982 年型	1996 年型
南岸	开封黑岗口	19168	16684	12962
	东明徐集	20689	17601	9137
	济南杨庄	6589	5965	-
北岸	原阳朱庄	34510	32444	28124

表 3 不同位置决口淹没时间对比表 (d)

Tab 3 The comparison of flood arriving time at different embankment-break locations (d)

决口位置	1958 年型	1982 年型	1996 年型
开封黑岗口	25	28	30
东明徐集	28	30	32
济南杨庄	13	13	-
原阳朱庄	28	30	32

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 溃堤洪水侵夺沿途河流行洪, 进入下游后洪水会顺河归槽。溃堤洪水在演进过程中把沿途河流作为汇流和下泄的主要通道, 进入洪泛流域下游以后, 洪水顺河归槽行洪, 而不是任意泛滥, 不同情景下的模拟结果反映了溃堤洪水的这一特点。情景一洪水侵夺的河流主要有: 贾鲁河、铁底河、芡河、大沙河、浍河、淝河、颍河、涡河、惠济河、茨河、西淝河、淮河干流, 在亳州以下, 洪水逐渐归槽进入颍河、西淝河和涡河; 情景二洪水侵夺的河流主要有: 赵王河、洙赵新河、万福河、红卫河、京杭运河、新沂河, 洪水最后归槽进入新沂河; 情景三洪水侵夺的河流有脉沟和小清河; 情景四洪水侵夺的河流有: 卫河、金堤河、土马河、赵牛河、德惠新河、秦口河、徒骇河、马颊河、漳卫新河。

(2) 对于同一年型洪水, 北岸溃堤所淹没面积大于南岸溃堤所淹没面积。对于花园口—兰考河段假定分别发生 1958 年型特大洪水、1982 年型大洪水和 1996 年型中常洪水, 如果在北岸原阳决口, 洪水淹没面积分别为 34510km^2 、 32444km^2 和 28124km^2 ; 如果在南岸开封黑岗口决口, 洪水的淹没面积为 19168km^2 、 16684km^2 和 12962km^2 。在其他不同的模拟情景中, 北岸发生溃堤的淹没面积均大于南岸不同位置溃堤所淹没的面积。

(3) 黄河下游洪泛区地貌格局的变化, 导致洪灾程度具有区域差异。由于黄河下游溃堤洪水淹没区主要位于三大冲积扇上, 在靠近洪水决口口门位置洪水流速大于 1m/s 、水深大于 2.5m , 主流区流速也大于 0.5m/s 、水深大于 2m , 这些区域水量集中, 破坏力极强, 所造成的灾害损失较大。而在冲积扇的上部以分股泛流为主, 没有固定流路, 淹没范围广, 淹没水深多在 $1\sim 2\text{m}$ 左右, 在冲积扇的中下部泛流逐渐归槽并侵夺其他河流行洪, 洪水大溜大致沿所夺河道向下演进, 并漫溢于河道两侧, 以泄洪河道为中心, 由近及远淹没水深呈梯度递减, 灾害程度也是自河道向两侧逐渐减小。

(4) 水深且流速大的洪水主流区面积较小, 水浅且流速小的非主流区面积较大。由于黄河洪水峰高量小的特点, 主流区即水深大于 2m 、流速大于 0.5m/s 的区域面积较小, 水深小于 2m 、流速小于 0.5m/s 的非主流区面积相对较大。本文模拟结果也反映了这一特点, 对 1958 年型洪水花园口洪峰流量 $22300\text{m}^3/\text{s}$ 的 4 个模拟结果进行统计分析得出: 情景一淹没水深在 $0\sim 2.0\text{m}$ 的面积占 86.19% , 淹没水深在 2.0m 以上的面积占 13.81% ; 情景二淹没水深在 $0\sim 2.0\text{m}$ 的面积占 68.75% , 淹没水深在 2.0m 以上的占 31.25% ; 情景三淹没水深在 $0\sim 2.0\text{m}$ 的面积占 56.23% , 淹没水深在 2.0m 以上的占 43.77% ; 情景四淹没水深在 $0\sim 2.0\text{m}$ 的面积占 85.75% , 淹没水深在 2.0m 以上的占 14.25% 。

5.2 讨论

洪水演进过程错综复杂, 受到洪水自身属性和外界自然环境条件的影响, 用水力学模型进行模拟, 尽管符合洪水演进的客观规律, 但仅用数值模型模拟复杂的自然现象, 本身就具有一定的局限性。本文在进行溃堤洪水演进模拟时, 没有将泥沙、渗透和蒸发等因素考虑在内, 这对于研究黄河溃堤洪水的水力学特性是个不足, 另外, 本次模拟范围广, 网格精细, 网格单元以数十万计, 从而为进一步的超大规模洪水模拟及局部地物(阻水建筑物如高速公路、堤防, 泄水建筑物如涵洞、桥梁等)的处理积累了经验, 在今后的工作中, 应把泥沙要素考虑在内, 以研究其他河流由于泥沙引起的河道淤积对当地防洪环境的长期影响, 同时把模拟计算区域内的地物信息尽量接近客观实际。

参考文献:

- [1] 李观义,程晓陶. 北江大堤洪水风险信息管理系统研究. 水文, 2003, 23(3): 5~ 9
- [2] 许炯心. 黄河三角洲造陆过程中的陆域水沙临界条件研究. 地理研究, 2002, 21(2): 163~ 170.
- [3] 许炯心. 黄河下游河道输沙功能的时间变化及其原因. 地理研究, 2006, 25(2): 276~ 284
- [4] 陆中臣,周金星,陈浩. 黄河下游河床纵剖面形态及其地文学意义. 地理研究, 2003, 22(1): 30~ 38
- [5] 冯民权,周孝德,郑邦民,等. 大庆市多决口洪水的二维动态模拟. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(2): 22~ 26
- [6] 刘志雨,谢正辉. TOPKAPI 模型的改进及其在淮河流域洪水模拟中的应用研究. 水文, 2003, 23(6): 1~ 7
- [7] 李春红,任立良,左振鲁. 基于 DEM 的三峡区间洪水淹没范围模拟. 水文, 2005, 25(1): 1~ 4.
- [8] 许有鹏,葛小平,张立峰,等. 东南沿海中小流域平原区洪水淹没模拟. 地理研究, 2005, 24(1): 38~ 45
- [9] 姜红梅,任立良,安如. 基于土地利用与地表覆盖遥感信息的洪水过程模拟. 河海大学学报, 2004, 32(2): 131~ 135
- [10] 李天文,吴琳,曹颖. 基于渭河下游 DEM 的洪水淹没分析与模拟. 水土保持通报, 2005, 25(4): 53~ 56
- [11] Yang C R, Tsai C T. Development of A GIS-Based Flood Information System for Floodplain Modeling and Damage Calculation. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(3): 567~ 577.
- [12] Zhao D H, *et al.* Finite volume two-dimensional unsteady-flow model for river basin. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 120(7): 863~ 883
- [13] Ralph A, Wurbs. Dam-breach Flood Wave Models. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, 113(1): 29~ 46
- [14] Darby S E, Thorne C R. Numerical simulation of widening and bed deformation of straight sand-bed rivers I: Model Development. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(4): 184~ 193
- [15] 温善章,席家治. 黄河下游堤防经济防洪标准的初步分析. 黄委会设计院规划处, 1980
- [16] 周建军,林秉南,王连祥. 河道平面二维水流数值计算. 水利学报, 1991, (5): 8~ 18
- [17] 夏军强,王光谦,张红武. 黄河下游游荡型河段洪水演进与河床变形过程的数值模拟. 水动力学研究与进展, 2003, 18(3): 306~ 313
- [18] 万洪涛,周成虎,吴应湘,等. 黄河下游花园口- 夹河滩河段二维洪水模拟. 水科学进展, 2002, 13(2): 215~ 222
- [19] Zoppou C, Roberts S. Numerical solution of two dimensional unsteady dam break. Applied Mathematical Modelling, 2000, 24: 457~ 475
- [20] 陆中臣,贾亚非,曹银真,等. 试论黄河下游北岸可能决口地段及其最大淹没范围. 地理研究, 1987, 6(4): 15~ 25
- [21] 丁大发,石春先,宋红霞,等. 黄河下游防洪工程体系减灾效益计算模型研究. 水科学进展, 2002, 13(4): 450~ 455
- [22] 李娜. 基于 GIS 的洪灾风险管理系统. 北京: 中国水利水电科学研究院博士论文, 2002
- [23] 罗来兴. 1938—1947 年间的黄河南泛. 地理学报, 1953, 19(2): 234~ 243
- [24] 韦春霞,张永祥,陈景秋. 溃坝洪水的二维算子分裂——特征线模拟. 重庆大学学报, 2003, 26(9): 18~ 21.
- [25] Bellos C V, Sakkas J G. Experimental investigation of two-dimensional dam-break induced flows. Journal of Hydraulic Research, 1992, 30(1): 47~ 63
- [26] 王船海,李光炽. 流域洪水模拟. 水利学报, 1996, (3): 44~ 50
- [27] 李光炽. 流域洪水模拟通用模型结构研究. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(1): 14~ 17
- [28] 李光炽,王船海,周晶晏. 二维流场模拟的矩阵标识法. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 80~ 84.
- [29] 赵连军,韦直林,谈广鸣,等. 小浪底水库 2002 年调水调沙下游河道洪水演进跟踪模拟计算. 水动力学研究与进展, 2004, 19(5): 578~ 584
- [30] 王嘉松,倪汉根,金生,等. 用 TVD 显格式模拟一维溃坝洪水波的演进与反射. 水利学报, 1998, (5): 1~ 5
- [31] 谢作涛,张小峰,袁晶. 溃坝洪水数值模拟. 水利水电工程学报, 2005, (2): 9~ 17
- [32] 张红武,赵连军,王光谦,等. 黄河下游河道准二维水沙数学模型研究. 水利学报, 2003, (4): 1~ 6
- [33] 张红武,黄远东,赵连军,等. 黄河下游非恒定流水沙数学模型—II 模型验证. 水科学进展, 2002, 13(3): 271~ 277
- [34] 曹志芳,李义天. 蓄滞洪区平面二维干河床洪水演进数值模拟. 应用基础与工程科学学报, 2001, 9(1): 74~ 79
- [35] 黄河流域及西北片水旱灾害编委会. 黄河流域水旱灾害. 郑州: 黄河水利出版社, 1996
- [36] 胡明思,骆承政,等. 中国历史大洪水. 水利电力部, 全国暴雨洪水分析计算协调小组办公室, 南京水文水资源研究所编, 1988, 331~ 343.
- [37] 王震宇,程艳红. 黄河“96·8”洪水综述. 人民黄河, 1996, (11): 25~ 33
- [38] 苏人琼,杨勤业,关志华. 黄河流域灾害环境综合治理对策. 郑州: 黄河水利出版社, 1997

The analysis of embankment-break flood characteristics of the lower Yellow River based on the numerical simulation in different scenarios

YANG Pei-guo^{1,2}, YANG Qin-ye¹, WU Shao-hong¹, MA Xin^{1,2},
KANG Xiang-wu³, XIA Fu-qiang^{1,2}, DAI Er-fu¹

(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038, China)

Abstract: Flood disaster is still a threat in the lower Yellow River due to unusual precipitation caused by the deposit of channel, the hidden danger in the embankment and unfavorable riverbed in the lower Yellow River. Study on the embankment-break flood characteristics of the lower Yellow River can afford the scientific basis for flood disaster mitigation. According to the characteristics of the embankment-break flood in the Yellow River, flood routing characteristics of embankment-break is simulated at four different locations of the lower Yellow River by inputting terrain data, typical historical flood data and land use data of the study area to two-dimensional unsteady-state flow model. Simulated results show that: Firstly, routing flood encroach the rivers on the way and enter into the rivers after reaching the lower reaches; secondly, in the same river reach, flood submerged area of north band is bigger than the corresponding location of south bank towards the same historical flood; thirdly, it is different in flood submerged degree of different regions due to the different spatial locations of floodplain; and fourthly, the area of mainstream where flood depth is high and flood velocity is quick is relatively small, but the area of non-mainstream where flood depth is low and flood velocity is slow is relatively big.

Flood disaster risk in the protected zone of the embankment will be analyzed by using the results of the simulated flood in this paper, on the basis of the simulated results, the spatial pattern of the flood disaster risk in the protected zone will be analyzed in the lower Yellow River in the future. The attempt on the simulated methods and technique of the flood routing can serve as a reference to the researches in other similar regions.

In this study, some factors such as the sediment, infiltration and evaporation weren't considered, which is a limitation to research the hydraulic characteristic of the levee-breaking flood in the Yellow River. In the succeeding simulation, the sediment should be considered to research the long-term influence on the local environment of preventing flood due to the deposit of the sediment in the riverway. At the same time the surface features should the whole way be close to the reality.

Key words: the lower Yellow River; embankment-break; 2-dimensional unsteady-state flow model; the characteristics of flood

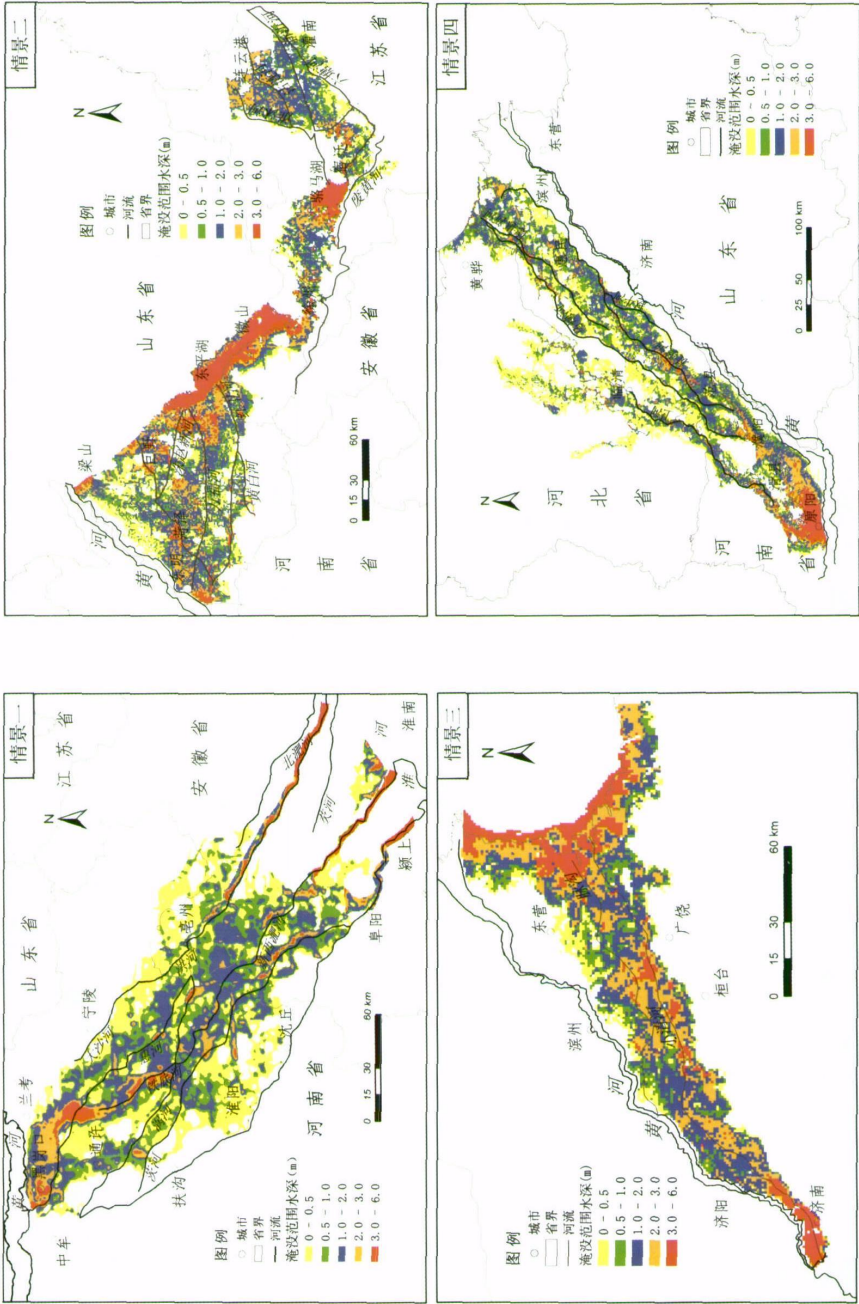


图 3 1958 年型洪水淹没范围情景图
Fig.3 The submerged range of 1958's flood in four scenarios