

黄河下游不同洪水情景决溢风险评价

夏富强^{1,2,3}, 康相武⁴, 吴绍洪¹, 杨勤业¹, 马 欣^{1,2}, 杨佩国⁵, 李晓东³

(1 中国科学院地理科学与资源所, 北京 100001; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3 新疆大学资源环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 4 中国科学技术信息研究所, 北京 100038;

5 中国民政部国家减灾中心, 北京 100053)

摘要: 本文提出黄河下游悬河决溢风险的影响因素应当包含水沙运动、区域地壳稳定性、河势演变和堤防稳定性 4 个方面, 并据此建立了指标体系和基于 GIS 技术的多层次模糊综合评判模型, 对不同洪水情景下黄河下游的决溢风险进行了评价。结果表明: (1) 决溢风险随着洪水量的增大而增高; (2) 决溢风险随河型的沿程变化而降低; (3) 决溢风险较大的河段集中在游荡型河段, 游荡型河段南岸风险高于北岸; (4) 弯曲型河段北岸决溢风险高于南岸; 这些结论能够应用于黄河下游河道的治理与防汛抗洪的实践。研究表明: 本研究的评价指标体系和方法, 能够用于解决黄河下游的决溢风险问题; GIS 空间分析技术能够量化不同空间位置的决溢风险, 客观地反映不同空间位置决溢风险的差别, 对于指导防洪和河道治理的实践具有重要的现实意义。

关键词: 悬河; 影响因素; 决溢风险; 评价指标体系; GIS 技术; 多层次模糊综合评判

文章编号: 1000-0585(2008)01-0229-12

黄河下游是我国历史上洪水灾害最为频繁的地区^[1]。20 世纪 50 年代以来, 黄河下游未出大险, 但特大洪水的威胁仍然存在、工程体系还存在薄弱环节、泥沙大量淤积导致悬河情势不断加剧、不良河势依然危及河道安全、水沙变化导致河道萎缩并形成小水大灾的新情况、地质构造活动长期性与突变性并存^[2~8], 使黄河下游的决溢危险有不断加剧的趋势。黄河下游的危险情势, 也引起了广泛的关注^[9~11]。

由于洪水灾害对于区域社会经济发展的巨大危害, 国内外专家学者都非常关注洪水灾害的风险问题。国外对于洪水灾害的风险研究较少考虑哪些河段可能是风险较高的河段, 而主要集中于区域洪水灾害及其影响的模拟方面^[12~14]; 为对区域洪水灾害进行有效管理, 提出了决策洪水风险评估的框架 (Strategic Flood Risk Assessments, SFRA)^[15], 重点研究区域内洪水风险是否是一个重大问题、哪些区域的洪水风险可能是重要的、已有多大的区域被保护, 哪些区域的新发展可能增加风险、哪些区域的洪水风险应更详细地考虑等问题; 同时注重运用卫星遥感数据与 GIS 技术的结合进行监测和研究^[16~18]; Chen Shouyu 等^[19]运用模糊数学方法建立了包括水库、堤防、脆弱区域、湖泊和河流控导工程等 5 方面的风险因子评价体系, 并进行了相关研究。针对黄河河道的决溢风险, 我国学者进行了大量的研究工作, 叶青超等^[20]根据下游河道的工程地质环境背景、河床演变和堤防工程隐患等局部环境状况和未来 50 年内发展趋势的综合指标分析, 选择了构造单元、地貌单

收稿日期: 2007-03-21; 修订日期: 2007-11-27

基金项目: 国家科技攻关项目 (96-920-09-01)

作者简介: 夏富强 (1973-), 新疆乌鲁木齐人, 博士研究生。专业方向为自然地理综合研究。

E-mail: xiafq_06b@igsnr.ac.cn

元、河型等 15 项评价因子进行险情剖析, 确定武陟、封丘、长垣等 7 处部位可能决溢改道; 刘桂仪等^[21] 将下游河道带划分为游荡型河道、过渡型河道、弯曲型河道及尾间型河道 4 个地质环境质量区, 并将影响河道带稳定性的主因子确定为河道地壳稳定性、河道堤基堤身稳定性和河道地面稳定性 3 项, 确定了地震烈度、新构造运动、活动断裂、土体性质、堤基承载力等 15 个评价因子及其分值, 采用“因素叠置法”分区进行计算与评价, 最后按地质环境质量分区综合评价各分区的稳定性级别; 陈新民等^[22] 根据沿河的变化情况、决口的作用机制等原则, 以地质地貌因素为主, 选择了床滩比高、串沟相对长、漫滩横比降等 11 项因子作为评价决口的指标, 采用人为分级评定和灰色系统理论计算出各河段发生决口的可能性 (即概率); 皇甫行丰等^[23] 将影响悬河稳定性的因素划归为构造因素、堤基因素、河道地质地貌因素 3 个层次, 确定了地壳结构、地面升降率、活动断裂等 30 个影响因子, 根据各个层次对悬河稳定性的影响机理, 对第一层次采用指标分析法, 第二、三层次分别采用模糊数学综合评判法, 最后进行综合分析评判。

以上研究表明, 对于黄河下游决溢风险评价的研究正不断趋于深入, 指标体系、评价方法正在不断细化, 评价结果更加合理。由于没有考虑河道的来水来沙情况, 黄河下游决溢风险评价的指标体系需要调整; 科学技术的发展使许多新的技术方法可应用于评价方法, 从而提高评价结果的准确度、增强针对性和适用性。因此, 在以往研究的基础上, 本研究以 GIS 技术为支持, 建立评价指标体系和综合评价模型^[24], 对不同洪水情景下黄河下游决溢的风险进行分析, 寻找其规律性并确定决溢风险较大河段, 以服务于黄河下游的防洪治理实践。

1 黄河下游决溢的影响因素分析及评价指标体系的建立

河流决溢是水沙运动与河道边界条件相互作用的结果, 是河床演变的一种极端情况。河床演变的影响因素包含来水过程、来沙过程和河道边界条件^[25]。由于来水过程与来沙过程是密不可分的^[26], 可以把来水过程与来沙过程合并为水沙运动过程。河势变化是水沙作用下河床物质组成与河床形态调整演变的结果, 因此, 狭义的河道边界条件包含河道内部河势的变化、河道堤防的控制作用两个方面; 地质条件对于河道的决溢也起着重要的作用: 基底构造控制着河道地貌的形成, 活动断裂的运动也影响着堤防的稳定性, 因而, 河道所在的外部地质构造条件也是河道边界条件的内容。地质构造活动的作用通常用区域地壳稳定性方法进行研究。

因此, 影响黄河下游决溢风险的因素应当包含水沙运动 (A)、区域地壳稳定性 (B)、河势演变 (C) 和堤防稳定性 (D) 4 个方面。

1.1 水沙运动

水沙运动作为影响决溢风险诸因素中最为活跃、主动的因素, 对悬河的决溢起着重要的作用: 堤防隐患是出险的因变量, 而流量则是出险的自变量, 两者是因果关系, 相互作用的; 流量大即水位高, 水流动量大, 惯性力强, 对工程的破坏作用就大^[27]; 尤其随着河道的淤积抬高, 导致同流量水位抬升, 大堤偎水的压力和出险的几率更大^①。黄河下游洪水都是暴雨洪水, 具有猛涨猛落的特点, 尤其是涨势猛、峰量高、预见期短的洪水, 更

①叶青超, 王守春, 许殿元. 黄河下游河患规律及影响决溢的环境因素分析. 中国科学院、国家计委地理研究所, 1994 23

是下游河道行洪安全的极大威胁^[3]; 黄河多泥沙的特性导致泥沙大量在下游河道淤积, 河道不断抬升, 主槽的过洪能力不断下降; 近年来黄河水沙条件的变化及流域内用水量的不断增加导致黄河断流, 进一步加剧了河道内泥沙的淤积, 引起“二级悬河”、河床萎缩等一系列严重威胁下游河道行洪安全的问题^①, 更增加了黄河下游的决溢风险。

根据水沙运动对河道形态、堤防决溢影响的作用机理^[4, 20, 27, 28], 确定以洪峰流量 (A1)、最大洪水水位 (A2) 反映洪水的综合特征, 以洪水陡峻度 (A3)、日均洪量 (A4)、洪水历时 (A5) 反映洪水的强度特点, 以最大洪水流速 (A6)、纵比降 (A7) 反映洪水的能量作用, 以最大含沙量 (A8) 反映洪水携带泥沙的能力。

1.2 区域地壳稳定性

黄河下游河道流经的地区凹陷与隆起交错分布、大小断裂密布^[29~31], 这些构造单元和断裂在一定的时空范围内对黄河下游河道具有重要的影响作用。

地质构造活动具有长期性、渐变性和突变性的特点, 控制着黄河下游河道的发育。黄河下游河道的走向、行河范围和重大的决溢改道都与黄河下游地区的地质构造活动有着密切的关系^[5, 21, 32]; 泰山隆起对河道的行洪能力的影响、菏泽活动性凸起对河道输沙的阻滞作用、开封凹陷与东明断陷的沉降加剧了河道淤积而使悬河悬差更大^[3, 8], 这些都受到地质构造活动的影响, 断裂的渐变活动对于河道堤防的稳定性也有着重要的影响, 断裂的突变活动 (地震) 则更是对下游河道安全的严重威胁^[8, 21, 32]。

从区域地壳稳定性评价的角度, 地质构造环境背景影响决溢的指标包括: 以基本地震烈度 (B1)、断裂长度 (B2)、地壳垂直运动速率 (B3)、断裂最新活动年龄 (B4)、地壳厚度变化 (B5)、地壳均衡程度 (B6)、地壳垂直形变梯度 (B7)、历史地震烈度 (B8)、构造地裂缝 (B9) 等指标反映构造活动的影响; 以最大构造主应力 (B10)、弹性应变能积累值 (B11)、差应力值 (B12)、最大主压应力与主干断裂交角 (B13) 反映构造应力的作用; 以沙土液化 (B14) 反映外动力地质灾害的影响; 以地表物质组成 (B15) 反映地表的稳定状况; 以地壳表层结构 (B16) 反映块体发生运动的可能性。

1.3 河势演变

黄河下游孟津到高村河段属于游荡型河段, 由于泥沙淤积、滩地广布, 此河段内水流宽浅散乱, 河槽极不稳定, 河势变化剧烈, 主流瞬息万变, 经常发生“横河”、“斜河”, 造成重大险情, 甚至冲决大堤^[20]。

黄河多泥沙的特性、黄河流域工农业用水量增加和近年来黄河下游来水偏枯等情况, 使黄河下游河道输沙入海能力降低^[33]; 下游滩区的生产堤导致洪水不能漫滩, 泥沙只能在主槽淤积, 造成了黄河下游河道严重萎缩、同流量水位抬升、横比降加大, 逐渐形成了槽高滩低、“悬河中的悬河”的危险局面^[34]。

由于下游河道尚未得到有效控制、河道严重萎缩、滩地横比降加大、二级悬河进一步发展等一系列严重的问题^[35], 使黄河下游河势变化进一步加剧, “横河”、“斜河”形成的机会增多, 抗洪抢险任务增大, 中常洪水“冲决”和“溃决”大堤的机会加大; 河势变化还使部分已建工程脱溜, 未建工程的地方出险^[36], 降低工程对河势演变的控制作用; 同时, 生产堤的存在也改变了洪水正常的演进规律, 影响了洪水预报和测报的精度, 增加了防汛工作难度。

①水利部黄河水利委员会. 黄河下游治理方略研究背景材料. 2004 41, 42

根据河势演变引起水沙运行突变导致决溢的作用机理^[28, 37~39]①，选择河床综合稳定性 (C1)、宽深比 (C2)、堤距 (C3)、河道曲率 (C4) 等指标反映河道形态的总体特征；滩宽 (C5)、洪水角度 (C6) 反映洪水大溜的冲刷部位与角度；以横比降 (C7)、平滩流量悬差 (C8)、主槽淤积 (C9) 反映河床的发育状况；以左右岸滩差 (C10)、横河斜河发生次数 (C11) 反映河势可能变化的河段及以往的高危河段；以控导工程分布 (C12) 反映河势的控制情况；以科氏力 (C13) 反映地球自转偏向力对水流运动的影响。

1.4 堤防稳定性

堤防是下游行洪安全的最后屏障，河道堤防的稳定性也是决溢的重要影响因素。由于黄河下游堤防是在民埝基础上加高培厚修筑而成，虽经大量的工程加高、加固，还存在着土质不良、堤身断面不足、填筑不实、动物洞穴及空洞、堤防裂缝、堤身老化、老口门、地基渗透变形等堤防隐患，这些隐患是黄河下游河道决溢的重要潜在威胁^[2]。

堤防稳定性的评价往往采用堤基承载力、软土发育、液化砂土分布、土体干容重、堤防地层结构等作为评价指标，但以上各指标的作用通常表现为堤防裂缝、堤防沉降等堤防隐患，或者表现为渗水、管涌等渗透变形形式^[32, 34]，因而在本评价中采用以下指标进行评价：老口门位置及发育 (D1)、渗透变形位置及发育 (D2)、堤防隐患分布及发育 (D3)、堤防工程分布 (D4)、临背差 (D5)。

2 评价因素及指标权重的确定

由于决溢中的影响因子众多，不同因素和指标的作用大小不同，虽然通过综合分析知道水沙运动和河势演变的作用较大，但如何更加科学合理的确定评价指标的权重仍需要进一步的研究。本研究采用专家循环打分与决策分析方法 (AHP) 相结合，专家循环打分通过专家的反馈和再思考，可以减少分析中的主观性；AHP 方法是一种定性定量相结合的决策分析方法，是将决策者对复杂系统的决策思维过程模型化、数量化的过程，决策者可将复杂问题分解为若干层次和若干因素，在各因素之间进行简单的比较和计算，可确定不同因素的权重，为最佳方案的选择提供依据^[40]。它们是目前评价研究的重要方法^[41~43]。

本研究中，准则层判断矩阵如表 1 所示，根据计算，可得到最大特征值： $\lambda_{max} = 4.0439$ ，一致性指标： $CI = 0.0146$ ，平均随机一致性指标： $RI = 0.9$ ，判断矩阵的随机一致性比例 $CR = 0.0163 < 0.1$ ，可知，此次构造的判断矩阵一致性好，采用同样方法，得到各评价指标的权重 (表 2)。

表 1 准则层排序判断矩阵

Tab 1 Matrix of sorting on criteria hierarchy

准则层	A	B	C	D	权重
水沙运动 (A)	1	1	3	5	0.3889
河势演变 (B)	1	1	3	5	0.3889
堤防稳定性 (C)	1/3	1/3	1	3	0.1535
区域地壳稳定性 (D)	1/5	1/5	1/3	1	0.0687

①水利部黄河水利委员会. 黄河下游治理方略研究背景材料. 2004: 41, 42

表 2 决溢风险评价指标权重表

Tab 2 Index weight of dike breach evaluation

准则层	指标层	权重	准则层	指标层	权重	准则层	指标层	权重
水沙运动(A)	A1	0.2250	区域地壳稳定性(B)	B7	0.048	河势演变(C)	C5	0.2153
	A2	0.2250		B8	0.075		C6	0.1007
	A3	0.1298		B9	0.025		C7	0.0648
	A4	0.1298		B10	0.080		C8	0.0648
	A5	0.0773		B11	0.060		C9	0.0648
	A6	0.1298		B12	0.060		C10	0.1492
	A7	0.0496		B13	0.060		C11	0.0648
	A8	0.0338		B14	0.026		C12	0.0425
	B1	0.150		B15	0.052		C13	0.0146
	B2	0.080		B16	0.052		D1	0.2976
区域地壳稳定性(B)	B3	0.072	河势演变(C)	C1	0.1492	堤防稳定性(D)	D2	0.2976
	B4	0.060		C2	0.0291		D3	0.1579
	B5	0.050		C3	0.0201		D4	0.1579
	B5	0.050		C3	0.0201		D4	0.1579
	B6	0.050		C4	0.0201		D5	0.0890

3 评价指标的风险识别

3.1 洪水情景的选择

为全面反映当前河道条件下可能产生的决溢风险,本研究以洪水的流量、水位、滩区淹没状况和淹没损失为依据,在近 50 年来洪水资料中,甄选 1958、1982、1996 年洪水情况,作为大、较大和中常洪水的三种洪水情景,结合河势演变、堤防稳定性和区域地壳稳定性的情况进行综合评价,以确定黄河下游在不同洪水情景下决溢风险较大的河段。这三次洪水的基本情况是:1958 年 7 月花园口水文站发生有实测资料以来最大洪水,洪峰流量为 22300m³/s,最高洪水位 94.42m,淹没滩区耕地 20.3 万 hm²,这是 1949 年以来的最大洪水^[1];1982 年 8 月花园口水文站洪峰流量为 15300m³/s,最高洪水位 93.99m,淹没滩区耕地 14.5 万 hm²,损失约 4 亿元(1980 价),这是 1949 年以来的第二大洪水^[1];1996 年 8 月花园口水文站洪峰流量为 7860m³/s,最高洪水位 94.76m,是历史最高洪水位,河南、山东两省滩区几乎全部进水,淹没面积达 22.86 万 hm²,损失约 43.59 亿元^[4]。

由于黄河下游河道的持续淤积抬升,所选择的典型洪水的水位在目前的河床条件下都已发生了变化,为反映历史洪水在目前河道条件下的水位状况,根据相关资料^①,将 1958、1982 和 1996 年洪水水位转化为 2003 年河床条件下的相应水位,进行评价。

3.2 评价指数据的获取与空间化处理

影响黄河下游决溢风险的指标众多,评价指标中水沙运动有关数据由黄河下游各站水文数据整编或计算得到^②,其他数据由相关文献资料处理得到^[20,38,45~50]③④⑤⑥。

① 黄河防汛总指挥部办公室. 2003 年黄河下游洪水调度预案. 2003.

② 黄河水利委员会. 黄河水文资料. 1958、1982、1996.

③ 黄河水利委员会. 1:10 万黄河下游河道地形图. 1990.

④ 黄河水利委员会勘测规划设计研究院. 黄河下游现行河道大堤堤基老口门及堤基渗透稳定性专题报告. 1997.

⑤ 黄河水利委员会勘测规划设计研究院物探总队. 黄河下游堤防隐患探测资料分析研究. 2002.

⑥ 国家地震局. 中国地震烈度区划工作报告. 1978.

由于评价因子的性质不同,在完成基本数据的录入后,数据在 ARCGIS 中的处理方法各异,根据数据本身的特点,分别采取直接赋值或计算、点数据插值计算、等高线数据转化、制作线密度图、划分公里网格和数据叠加计算等不同方法实现空间化处理。

3.3 危险度的计算

评价因子危险度的空间分布(即计算隶属度)采用模糊变换计算得到^[41]:假设因子 P 数据表面中某点的坐标为 (i, j) , 该点的物理值为 P_{ij} , P 的值域范围为 (P_{\min}, P_{\max}) , 根据因子值与决溢风险为限度的关系,模糊变换可分为两类:

评价因子值是越大越险型的,则危险度:

$$\alpha_{ij} = [(p_{ij} - p_{\min}) / (p_{\max} - p_{\min})] \quad (1)$$

评价因子值是越小越险型的,则:

$$\alpha_{ij} = [(p_{\max} - p_{ij}) / (p_{\max} - p_{\min})] \quad (2)$$

在 ARCGIS 中运用地图代数计算 (Map Calculator) 进行模糊变换,就得到了不同因子在黄河下游河道上对应位置的危险度。

4 GIS 支持下的黄河下游决溢风险的模糊数学综合评价

4.1 决溢风险评价的定位

由于进行决溢风险评价的环境背景条件总是处在不断的变动中,而资料收集只能是某一时间或时段内的特定数据。因此,评价指标动态变化的特点与资料收集的时限性决定了进行决溢风险评价只能是建立在特定时段资料基础上的静态评价。

4.2 评价步骤

建立基于 GIS 的模糊数学综合评判模型的基本步骤是:

(1) 将各影响因素所对应的危险度进行空间矩阵的层叠 (Overlay), 就构造出模糊关系矩阵, 记为 R 。

(2) 将影响黄河下游稳定性因素的权重记为 W , 评价结果记为 S , 运用地图代数计算得到评价结果 S 。

$$S = W \times R \quad (3)$$

多层次模糊综合评判的过程就是以此为基础,在 ARCGIS 中逐级向上一层次运算的过程。通过上述模型计算的最终结果,即为黄河下游的决溢风险值。

(3) 评价结果分级。由于黄河下游的决溢风险是一个相对的概念,没有对应的标准,因此,在进行决溢风险级别划分时,根据评价的特点及 1996 年洪水在下游河道内所形成危害的实际情况,以 1996 年洪水所对应的风险级别为基准,将 1996 年型洪水综合评价结果对应的最小值 0.23 和 1958 年型洪水综合评价结果所对应的最大值为 0.71 作为综合评价的值域范围,划分为 6 级,标准为: $0 < 1 \text{ 级} \leq 0.31$; $0.31 < 2 \text{ 级} \leq 0.39$; $0.39 < 3 \text{ 级} \leq 0.47$; $0.47 < 4 \text{ 级} \leq 0.55$; $0.55 < 5 \text{ 级} \leq 0.63$; $0.63 < 6 \text{ 级} \leq 1$ 。

图 1 (见图版 4) 分别为 1958 年、1982 年和 1996 年洪水情景下黄河下游决溢风险的综合评价结果。

5 评价结果分析

5.1 黄河下游决溢风险的分布规律

不同洪水情景评价结果的数值分析(表 3) 和剖面分析(图 2, 见图版 4), 表明黄河下

表 3 评价结果统计

Tab 3 Statistics of synthetic evaluation result

洪水情景	河 段	南北岸	风险级别/ km					
			1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级
1958 年洪水	游荡段	北岸 (武陟—高村)	0	0	0	24 646	159 380	20 734
		南岸 (保合寨—高村)	0	0	0	13 258	161 293	32 743
	过渡段	北岸 (高村—陶城铺)	0	0	0	128 155	11 679	0
		南岸 (高村—陶城铺)	0	0	0	128 171	13 775	0
	弯曲段	北岸 (陶城铺—利津)	0	0	0	239 609	69 040	0 006
		南岸 (陶城铺—利津)	0	0	0	193 428	14 831	0
1982 年洪水	游荡段	北岸 (武陟—高村)	0	0	82 424	108 368	13 967	0
		南岸 (保合寨—高村)	0	0	73 947	118 415	14 932	0
	过渡段	北岸 (高村—陶城铺)	0	32 858	101 641	5 335	0	0
		南岸 (高村—陶城铺)	0	39 777	99 657	2 512	0	0
	弯曲段	北岸 (陶城铺—利津)	0	294 530	14 121	0	0	0
		南岸 (陶城铺—利津)	0	204 967	3 292	0	0	0
1996 年洪水	游荡段	北岸 (武陟—高村)	0	134 448	70 102	0 208	0	0
		南岸 (保合寨—高村)	4 347	110 234	90 104	2 609	0	0
	过渡段	北岸 (高村—陶城铺)	33 201	106 608	0 024	0	0	0
		南岸 (高村—陶城铺)	45 565	96 124	0 257	0	0	0
	弯曲段	北岸 (陶城铺—利津)	245 388	63 257	0 006	0	0	0
		南岸 (陶城铺—利津)	182 539	25 719	0	0	0	0

游的决溢风险有以下规律:

- (1) 决溢风险随着洪水量的增大而增高。1958 年型洪水情景下黄河下游的决溢风险最高, 都在 4 级以上; 1982 年型洪水情景下决溢风险在 2~ 5 级之间; 1996 年型洪水情景下决溢风险在 1~ 4 级之间。下游的决溢风险与洪水量呈明显的正相关关系。
- (2) 决溢风险随沿程河型的变化而降低。在 3 种洪水情景下, 决溢风险都表现出随河型的沿程变化而降低的明显趋势 (表 3)。而 1958 年洪水情景下弯曲型河段的决溢风险高于过渡型河段, 则表明在特大型洪水情况下, 窄河道由于过水能力的限制, 决溢风险呈增高趋势这一变化规律, 与决溢风险沿程递减这一规律并不矛盾。因此, 在大型、特大型洪水情景下, 弯曲型河道也是洪水防御的重点河段。
- (3) 决溢风险较大的河段集中在游荡型河段, 游荡型河段南岸的决溢风险相对较高。从表 3 可以看出, 黄河下游决溢风险最高的河段主要集中在游荡型河段, 而通过游荡型河段两岸的对比可以看出, 游荡型河段南岸的决溢风险高于北岸。因此, 游荡型河段是黄河下游防洪治理的重点, 加强游荡型河段, 尤其是游荡型河段南岸的治理, 对于有效防范可能发生的洪水决溢具有重要的作用。
- (4) 弯曲型河段北岸决溢风险高于南岸。通过弯曲型河段两岸的对比 (表 3), 可以看出弯曲型河段北岸的决溢风险高于南岸, 北岸治理是弯曲型河段的治理重点。

5 2 不同洪水情景下决溢风险的主要影响因素、因子及其变化趋势

为研究黄河下游决溢风险的主要影响因素及因子的变化规律, 我们将不同洪水情景下, 决溢风险较大河段的评价因子按照其贡献率的大小进行排序, 并列出资献率较大的主要影响因素及因子 (表 4)。

表 4 决溢风险较大河段的主要影响因素及因子

Tab 4 Main influencing factors and indexes of greater dike breach risk reaches			
项 目	1958 型洪水	1982 型洪水	1996 型洪水
主要影响因素	水沙运动	河势演变或水沙运动	河势演变
	洪峰流量	滩宽	滩宽
主要影响因子	最大洪水位	河床综合稳定性	河床综合稳定性
	滩宽	最大洪水位	左右岸滩差
	河床综合稳定性	最大流速	最大流速
	洪水陡峻度	洪峰流量	老口门分布
	日均洪量	左右岸滩差	渗透变型
	左右岸滩差	老口门分布	最大洪水位
	最大流速	洪水陡峻度	堤防工程分布
	老口门分布	堤防工程分布	控导工程长度
	堤防工程分布	渗透变型	纵比降

在大型、特大型洪水情景下，水沙运动是决溢风险较大河段的最主要影响因素，反映洪水特征的洪峰流量、最大洪水位、洪水陡峻度、日均洪量、最大流速等因子是主要影响因子；此外，反映河势演变影响的滩宽、河床综合稳定性、左右岸滩差，反映堤防稳定性的老口门分布、堤防工程分布也是主要的影响因子。这表明，在部署特大洪水防御战略时，首要的任务是加强洪水的调控，减小洪峰流量、降低洪水水位，尽量避免高强度、短历时洪水直接威胁下游河道。另外，加强洪水控导、防止洪水顶冲大堤或顺堤行洪、提高堤防质量也是防止特大型洪水造成决溢的重要措施。

在较大洪水情景下，河势演变是决溢风险较大河段的主要影响因素，少数河段水沙运动为主要影响因素，同时，主要影响因子也发生了一些变化，反映河势演进影响的因子作用加强，反映水沙运动的因子作用稍有减弱，而反映堤防稳定性的因子作用也有所加强。这表明较大洪水的防御应以控制河势的演变为主，同时应当加强洪水调控、提高堤防的质量。

在中常洪水情景下，河势演变成为决溢风险较大河段的最主要影响因素，反映河势演变影响因素的因子作用进一步所加强，反映堤防稳定性的因子作用也得到加强，而反映水沙运动的因子成为主要因子中的相对次要因子。这表明中常洪水的防御应以控制河势的演变为主，同时注重提高堤防的质量。

5 3 黄河下游决溢风险较大的河段

不同洪水情景下决溢风险的综合评价结果，都表明黄河下游决溢风险较大的河段在游荡型河段，花园口—高村段是其中决溢风险最高的河段，南北两岸决溢风险较高的河段具体为：

- (1) 南岸：来潼寨、三刘寨—九堡、柳园口、狼城岗—黑岗口、古城—曹岗、老君塘等河段。
- (2) 北岸：荆隆宫、柳园口、古城附近的河段和曹岗—堤湾闸河段。

综合分析以上河段决溢风险较大的原因，主要是由于这些河段洪水的尚未得到有效控制，水流散乱、河道横比降增大、二级悬河发育、横斜河高发，导致这些河段河势变化剧烈，洪水顶冲大堤可能性较大；此外，河道的严重淤积萎缩也是导致这些河段决溢风险较大的重要原因。因此，在河道治理和防洪工作中，应当重点考虑这些河段，防止可能发生

的洪水灾害对人民生活和社会经济发展造成的损失。

6 结论与讨论

进行决溢风险评价是进行黄河下游防洪治理决策的重要依据, 本研究在 GIS 技术支持下运用多层次模糊综合评价方法, 实现了不同洪水情景下的决溢风险综合评价, 客观地反映了不同空间位置决溢风险的差别, 得出了以下对于黄河下游河道治理研究与防洪实践具有一定的指导作用的结论:

(1) 黄河下游防洪治理的重点河段

黄河下游决溢风险较大的河段集中在游荡型河段, 且南岸的决溢风险较北岸大。在河道北岸, 决溢风险较大的河段为荆隆宫、柳园口、古城附近的河段和曹岗—堤湾闸河段; 河道南岸为来潼寨、三刘寨—九堡、柳园口、狼城岗—黑岗口、古城—曹岗、老君塘等河段, 下游洪水尚未得到有效控制、水流散乱、河道横比降增大、二级悬河发育、横斜河高发、河道淤积萎缩严重, 是风险较高的主要原因。

(2) 加强洪水调控是黄河下游防洪的根本措施

黄河下游的决溢风险及其主要影响因素随洪水强度而变化的规律表明, 控制河势的演变、防止洪水顶冲大堤或顺堤行洪是防洪和河道治理工作的中心; 加强堤防维护、提高堤防质量是提高下游抗御风险能力的有效措施; 有效调控洪水, 防止大流量、高水位、超强度洪水的直接威胁, 则是抗御大型、特大型洪水的關鍵所在。在大型、特大型洪水情况下, 下游窄河道决溢风险增高的趋势, 进一步表明在黄河下游加强洪水调控、降低洪水洪峰流量的重要性。

(3) 促使游荡型河段河型转变是黄河下游河道治理的重要途径

决溢风险随沿程河型的变化而降低的规律表明促使游荡型河段向过渡型河段、弯曲型河段转变是游荡型河段治理的重要手段。

(4) 弯曲型河段北岸治理为该河段治理重点

弯曲型河段的决溢风险较低, 然而在大洪水情景下, 呈现增大的趋势。因此, 在大型、特大型洪水情景下, 弯曲型河段也是洪水防御的重点河段。弯曲型河段北岸决溢风险高于南岸, 是该河段治理重点。

本研究由于评价指标动态变化的特点与资料收集的时限性, 仅实现了特定时段资料基础上的静态评价, 在今后的研究中, 应进一步加强河流决溢影响因子的作用机理、研究方法的改进, 结合新技术的发展, 为制定河流的防洪治理措施提供科学的依据。

参考文献:

- [1] 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 54
- [2] 陈效国, 邓盛明. 黄河流域防洪减灾对策研究. 见: 徐乾清. 中国防洪减灾对策研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2002 59
- [3] 胡一三. 黄河防洪. 郑州: 黄河水利出版社, 1997 32~ 278
- [4] 史宗伟, 刘天才, 杨玲. 黄河洪水特点分析. 泥沙研究, 2001, (3): 62~ 67
- [5] 叶青超, 尤联元, 许炯心, 等. 黄河下游地上河发展趋势与环境后效. 郑州: 黄河水利出版社, 1997 137~ 153
- [6] 齐璞. 对黄河下游河道认识的突破. 科技导报, 2000, (11): 22~ 25
- [7] 陈志清. 50 年代以来黄河下游河道的萎缩及其原因. 地理研究, 1995, 14(3): 74~ 81
- [8] 李莲花, 龚晓洁, 张连胜. 河南省黄河下游重大生态环境地质问题及对策研究. 河南地质, 2001, 19(1): 71~ 78

- [9] 黄秉维. 发展华北平原农业的途径. 见: 黄秉维. 自然地理工作六十年. 北京: 科学出版社, 1993 340
- [10] 任美镔. 黄河下游断流引起的环境问题及其防治措施. 第四纪研究, 1999, (2): 1~ 2
- [11] 张光斗. 对“关于黄河断流与决口的思考”一文之我见. 中国科学院院刊, 1997, (4): 4~ 5
- [12] Tawatchai Tingsanchali, Mohammed Fazlul Karim. Flood hazard and risk analysis in the southwest region of Bangladesh. Hydrological Processes, 2005, 19: 2055~ 2069
- [13] Heiko Apel, Annegret H Thieken, Bruno Merz, *et al*. A probabilistic modelling system for assessing flood risks. Natural Hazards, 2006, 38: 79~ 100
- [14] Jim W Hall, Paul B Sayers, Richard J Dawson. National-scale assessment of current and future flood risk in England and Wales. Natural Hazards, 2005, 36: 147~ 164
- [15] Eastleight Bourouge Council Strategic flood risk assessment. www. eastleigh. gov. uk/ PDF/ SFRA220107% 20. pdf, 2006, 1~ 42
- [16] Seiler R A, Hayes M, Bressan L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring. International Journal of Climatology, 2002, 22: 1365~ 1376
- [17] Wheeler H S, Chandler R E, Onof C J, *et al*. Spatial-temporal rainfall modelling for flood risk estimation. Stoch Environ Res Risk Assess, 2005, 19: 403~ 416
- [18] Michael Stephen Chubey, Salah Hathout. Integration of RADARSAT and GIS modelling for estimating future Red River flood risk. GeoJournal, 2004, 59: 237~ 246
- [19] Chen Shouyu, Guo Yu. Variable fuzzy sets and its application in comprehensive risk evaluation for flood-control engineering system. Fuzzy Optim Decis. Making, 2006, (5): 153~ 162
- [20] 叶青超, 尤联元, 许炯心, 等. 黄河下游地上河发展趋势与环境后效. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. 73~ 84
- [21] 刘桂仪, 董上茂. 黄河下游山东段河道带稳定性的地质环境评价. 山东地质, 1998, 14(3): 37~ 44
- [22] 陈新民, 夏佳, 罗国煜. 黄河下游悬河决口灾害的风险分析与评价. 水利学报, 2000, 10(1): 66~ 70
- [23] 皇甫行丰, 张晨霞, 刘新号, 等. 黄河河南段悬河稳定性评价. 人民黄河, 2003, 25(4): 12~ 14
- [24] 夏富强, 康相武, 吴绍洪, 等. 黄河下游悬河决溢风险评价指标体系的构建. 地理科学进展, 2004, 23(5): 17~ 24
- [25] 钱宁, 周文浩. 黄河下游河床演变. 北京: 科学出版社, 1965 8
- [26] 张欧阳, 许炯心, 张红武. 不同来源区洪水对黄河下游游荡河段河床横断面形态调整过程的影响. 泥沙研究, 2002, (6): 1~ 7
- [27] 宾光楣. 黄河下游防洪工程防险刍议. 人民黄河, 1989, 11(3): 10~ 15
- [28] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学, 北京: 科学出版社, 1987. 195
- [29] 吴忱. 华北平原古河道研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. 1~ 4
- [30] 马国彦. 黄河下游河道演变及其预测. 见: 安芷生. 黄土、黄河、黄河文化. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. 96~ 101
- [31] 王学潮, 向宏发, 等. 聊城—兰考断裂综合研究及黄河下游河道稳定性分析. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. 20~ 25
- [32] 皇甫行丰, 田良河, 刘新号. 黄河下游悬河稳定性因素分析. 世界地质, 2003, 22(1): 64~ 68
- [33] 李文家. 小浪底水库建成后的黄河下游防洪形势. 人民黄河, 1998, 20(1): 6~ 8
- [34] 刘红宾. 黄河防洪问题的讨论. 人民黄河, 1997, 19(6): 4~ 8
- [35] 吴凯, 谢贤群, 刘恩民. 黄河断流概况、变化规律及其预测. 地理研究, 1998, 17(2): 125~ 130
- [36] 许炯心. 论黄河下游河道两次历史性大转折及其意义. 水利学报, 2001, (7): 1~ 7
- [37] 张红武, 王恺忱. 黄河下游荡性河段整治. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. 25~ 47
- [38] 黄河水利委员会. 黄河下游二级悬河成因及治理对策. 郑州: 黄河水利出版社, 2003. 17~ 61.
- [39] 叶青超, 陆中臣, 杨毅芬, 等. 黄河下游河道地貌. 北京: 科学出版社, 1990. 21~ 251.
- [40] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 2004. 115~ 128, 305~ 337
- [41] 丛青威, 潘懋, 李铁锋, 等. 基于 GIS 的滑坡、泥石流灾害危险区划关键问题研究. 地学前缘, 2006, 13(1): 185~ 190.
- [42] 王伟, 杨晓东, 曾辉, 等. 土地整合综合效益评价指标与方法. 农业工程学报, 2005, 21(10): 71~ 73
- [43] 武兰芳, 欧阳竹, 唐登银. 区域农业生态系统健康定量评价. 生态学报, 2004, 24(12): 2740~ 2748
- [44] 胡一三, 曹常胜. 黄河下游 96• 8 洪水及河势工情. 人民黄河, 1997, 19(5): 1~ 8
- [45] 黄河水利委员会. 黄河下游二级悬河成因及治理对策. 郑州: 黄河水利出版社, 2003. 17~ 61.
- [46] 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社, 1989

- [47] 杨国华, 韩月萍. 中国近期垂直陆地运动的几个主要特征. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 6(7): 37~44
- [48] 谢富仁, 陈群策, 崔效锋, 等. 中国大陆地壳应力环境研究. 北京: 地质出版社, 2003 3~30
- [49] 国家地震局. 1: 400 万中国地震烈度区划图. 北京: 地质出版社, 1991
- [50] 邵时雄, 王明德, 等. 中国黄淮海平原地貌图. 北京: 地质出版社, 1989

Research on dike breach risk of the hanging reach under different flood conditions in the Lower Yellow River

XIA Fu-qiang^{1,2,3}, KANG Xiang-wu⁴, WU Shao-hong¹, YANG Qin-ye¹, MA Xin^{1,2}
 YANG Pei-guo⁵, LI Xiao-dong³

(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100001, China;

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

3 The College of Resource and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

4 Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038, China;

5 National Disaster Reduction Center of China, Beijing 100053, China)

Abstract: The influencing factors of dike beach risk of the hanging reach in the lower Yellow River should involve four aspects, the locomotion of incoming water and sediment load, the regional crustal stability, the evolvement of river regime and the stability of river dikes. The evaluation indexes system of dike breach risk and synthetic model are established from the four aspects. With the support of GIS technology, the evaluation indexes system and the model of multi-hierarchical fuzzy synthetic judgment are applied to estimating the dike breach risk in the lower Yellow River under different flood conditions. The evaluation results show the following distributing regularities: (1) The dike breach risk increases with the increase of flood discharge. (2) Dike breach risk decreases with the channel pattern changes along the river. (3) The reaches with greater dike breach risk are mainly distributed in wandering reaches where the south bank is relatively high. (4) The dike breach risk of the north bank is higher than the south bank in winding reaches. These conclusions can be applied to the practice of flood control and channel regulation in the lower Yellow River. Simultaneously, the evaluation results manifest that the evaluation indexes system and the method can preferably resolve the problem of dike breach risk evaluation. The spatial analysis functions of GIS technology make the dike beach risk in different spatial locations qualified, and reflect the difference of dike beach risk in different spatial locations in the lower Yellow River. It has important practical meaning to direct the practice of flood control and channel regulation.

Key words: hanging river; influencing factors; dike breach risk; indexes system of evaluation; GIS technology; fuzzy synthetic judgment

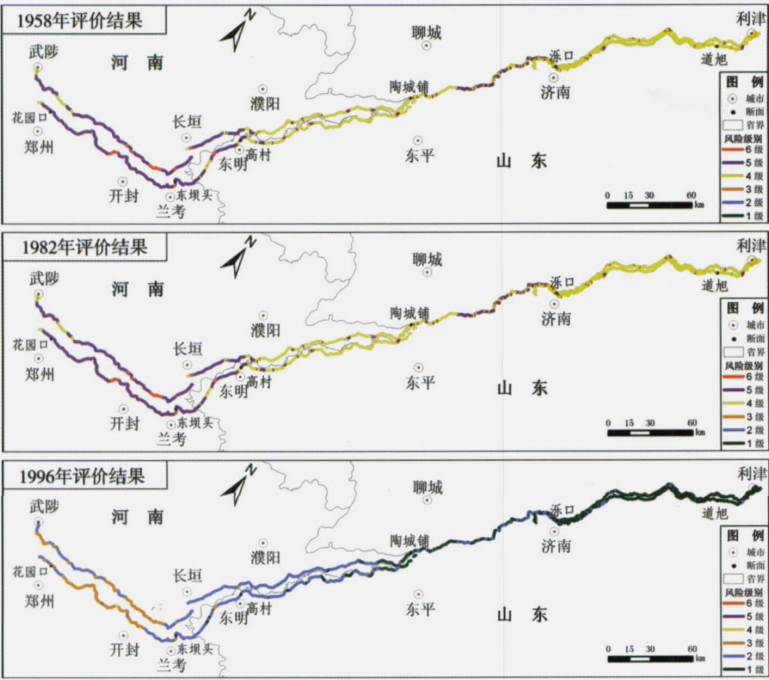


图 1 黄河下游不同洪水情景决溢风险的综合评价结果

Fig.1 Synthetic evaluation result of dike breach risk in the lower Yellow River under different flood conditions

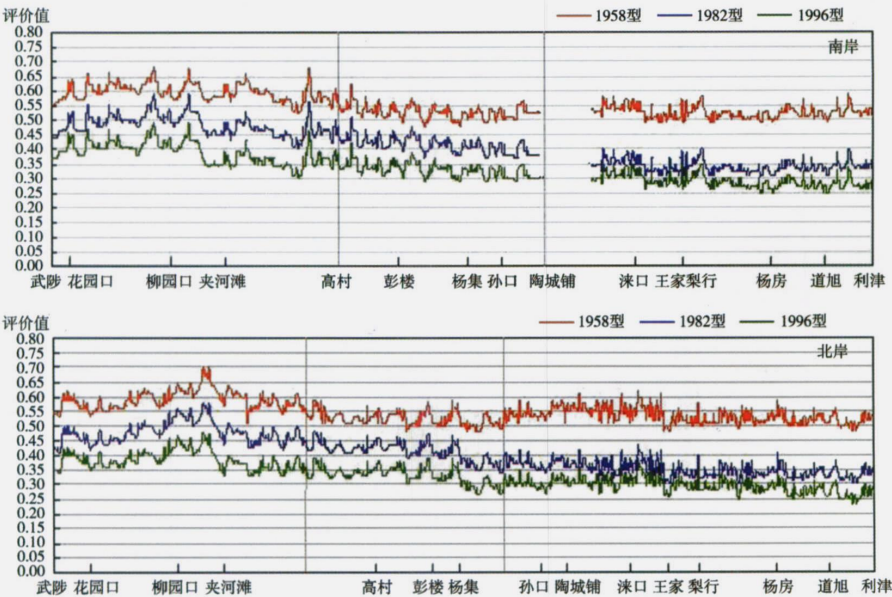


图 2 不同洪水情景综合评价结果剖面分析

Fig.2 Profile analysis of synthetic evaluation results under different flood conditions