

# 黄河下游花园口至艾山河段滩区 洪水漫滩风险度评估研究

孙煜航<sup>1,2</sup> 程舒鹏<sup>2</sup> 张祺<sup>1,2</sup> 杜鹏举<sup>2</sup> 李振山<sup>2</sup> 赵志杰<sup>2,†</sup>

1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 国家环境保护  
河流全物质通量重点实验室, 北京 100871; † 通信作者, E-mail: zhaozhijie@pku.edu.cn

**摘要** 利用Delft3D模型, 模拟黄河下游滩区洪水漫滩过程, 获取漫滩范围和洪水淹没水深等洪水致灾参数。基于地形和防洪条件, 划分洪水漫滩淹没单元, 参考联合国灾害风险评价指标体系, 结合对各淹没单元的危险度和易损度评估, 得到不同洪水量级下各淹没单元的洪水漫滩风险度空间分布。结果表明, 占滩区总面积近50%的淹没单元的洪水漫滩风险等级随洪水量级的增加而稳步增加, 为“水险同期”类淹没单元; 39.7%的淹没单元在十年一遇洪水情景下呈现极高风险度状态, 即“小水大险”状态; 11.67%的淹没单元稳定地处于相对较低的风险度等级, 漫滩风险不受洪水量级影响, 为“稳定低险”类。因此, 对于黄河下游滩区洪水漫滩风险, 应当重点防范主要集中分布在高村至艾山河段的“小水大险”类淹没单元, 同时应以十年一遇, 甚至五年一遇的洪水情景作为洪水防范工程措施布设的参考依据。

**关键词** 黄河下游; 滩区; 洪水; 水动力模拟; 风险评价

## Research on Flood Risk Assessment of Floodplains from Huayuankou to Aishan Section in the Lower Yellow River

SUN Yuhang<sup>1,2</sup>, CHENG Shupeng<sup>2</sup>, ZHANG Qi<sup>1,2</sup>, DU Pengju<sup>2</sup>, LI Zhenshan<sup>2</sup>, ZHAO Zhijie<sup>2,†</sup>

1. School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of All Material Fluxes in River Ecosystems, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: zhaozhijie@pku.edu.cn

**Abstract** The Delft3D model was used to simulate the flooding process on floodplains of the Lower Yellow River, and the flood disaster parameters such as flooding range and flooding depth were statistically calculated from the model. The process of giving the flood risk's spatial distribution of the plains includes dividing the hazard-vulnerability units and calculating the hazard and vulnerability of each unit according to the topography and flood-control measures. The United Nations risk assessment index system is used to give out the spatial distribution of the flood risk for each inundation unit. The results show that the relationship between flood risk and flood scenarios response across the study area can be divided into three categories. About 50% of the plain are under “simultaneous flooding and risks”, which means the flood risk level generally varies with the flood scenario. 39.7% of the plains own the trait of “low flooding frequency leads to giant risks”, and for the unit of this category basically has the extreme risk even for the 10-year frequency floods. 11.67% of the plain are stable at a relatively low risk situation, and the flood risk is not affected by the magnitude of the flood, which is classified as “stable low risks”. In order to prevent the flood risk of the Lower Yellow River, the flooding unit of “low flooding frequency leads to giant risks” mainly distributed in Gaocun to Aishan section should give a priority to take the action, and the flood situation of once every ten years or even once every five years should be taken as the reference basis for building flood prevention measures.

**Key words** the Lower Yellow River; plains; flood; hydrodynamics simulation; risk assessment

黄河下游滩区是重要的蓄滞洪区。滩区有利于洪水快速疏导和洪水中泥沙的迅急沉积,对维护黄河下游主河道健康,避免更大的洪水灾害等具有重要意义。近年来,随着黄河上游来水来沙条件的改变,黄河下游河段“二级悬河”现象有所加剧,存在较大的洪水漫滩风险。20 世纪 50 年代以来开展了大量有关洪水风险评估的研究,形成较多的洪水风险评估评价体系。Terêncio 等<sup>[1]</sup>、Straatsma 等<sup>[2]</sup>、刘章君等<sup>[3]</sup>和张超等<sup>[4]</sup>基于历史数据,进行相关回归分析或构建相关模型研究未来洪水风险情况。刘光旭等<sup>[5]</sup>和王复生等<sup>[6]</sup>利用指标体系法,对相关区域洪水风险进行分析。潘汀超等<sup>[7]</sup>和赖成光等<sup>[8]</sup>采用神经网络法或灰色聚类,来减少指标体系的主观性。Sunar 等<sup>[9]</sup>和 Abdelkarim 等<sup>[10]</sup>利用遥感资料,获取洪水淹没范围和水深等数据,模拟评价洪水风险。黄河下游滩区因其悬河特征以及洪水发生时从堤坝向主流向反射、沿堤坝扩散等现象,很难精确预测模拟洪水淹没过程,加上黄河下游滩区为“漫溢式”洪水的特点,导致针对黄河下游滩区洪水漫滩风险的研究相对较少,已有的研究多集中于洪水的危险性层面,缺乏对易损性的考虑<sup>[11]</sup>。

本文基于 Delft3D 模型,模拟黄河下游宽滩区洪水漫滩过程的危险度,结合易损度分析,评估黄河下游滩区洪水漫滩的风险度,以期为黄河下游滩区良性综合治理提供一定的科学支撑。

## 1 研究区概况

### 1.1 自然地理概况

黄河下游河段指从河南省桃花峪以下至黄河汇入渤海的山东省垦利县的河段,该河段因具有“水少沙多、水沙关系不协调”的自然特性,造成黄河

下游持续淤积抬高,使河道高悬于两岸黄海淮平原之上,成为举世闻名的“地上悬河”。黄河下游主河道全长 800 余公里,一般将陶城铺以上的河段称为宽河段,陶城铺以下的河段称为窄河段。在宽河段内,河道沿程主要设花园口、夹河滩、高村、孙口和艾山等断面,用于监控防范洪水<sup>[12]</sup>。花园口断面以上河段,因大部分自然滩面积相对较小等原因,不宜设置滞洪区<sup>[13]</sup>,艾山断面以下河段则通过东平湖滞洪区等蓄滞洪水,因此花园口至艾山河段滩区是黄河下游重要的滞洪区,该河段滩区的洪水漫滩风险可以大体上代表黄河下游滩区洪水漫滩风险。考虑数据收集的完整性,本研究选取花园口至艾山河段作为黄河下游滩区洪水漫滩风险度评估的代表河段。

黄河下游滩区是由黄河南北两侧大堤围成的区域,是黄河下游的重要组成部分,具有行洪、滞洪和沉沙功能,也是滩区居民的生产生活空间。黄河下游滩区涉及河南和山东两省共计 190 余万人口,人河争地矛盾较为突出<sup>[14]</sup>。受限于滩区作为滞洪行洪空间的相关管理要求,目前仅以农业开发利用为主,严重影响经济发展。

### 1.2 历史洪灾事件概况

黄河下游地区历史上洪水灾害频发,自有文字记录以来,黄河下游共决口 1500 余次,给当地带来巨大损失。随着小浪底等水利工程投入使用,黄河上中游的水沙调节能力增强,减少了黄河下游发生特大洪水的可能性。尽管决口事件鲜有发生,但仍存在一些洪水漫滩事件。如表 1 所示,据不完全统计,1949—2018 年的 70 年间,黄河下游滩区共发生洪水漫滩 31 次,累计受灾人数达 919.43 万人次,174.97 万  $\text{hm}^2$  耕地受到洪水漫滩的影响。1988 年以

表 1 近 40 年典型年份黄河洪灾情况<sup>[15]</sup>及其影响<sup>[16]</sup>  
Table 1 Situation of floods in typical years in the past 40 years<sup>[15]</sup> and their impacts<sup>[16]</sup>

年份	花园口水文站		受灾情况				抢险消耗物资		
	洪峰/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	水位/m	土地/万亩	村庄/个	人口/万	出险次数	石料/ $\text{万 m}^3$	铅丝/t	软料/万 kg
1988	8000	93.72	130.77	390	96.53	1627	14.24	59.39	66.99
1989	6100	93.19	21.3	-	-	801	8.58	11.76	26.01
1992	6430	94.32	139.92	74	1	1317	13.07	55.43	29.85
1993	4360	93.84	98.66	9	1.35	1110	12.42	23.21	61.83
1996	7860	94.7	756.67	570	13.74	4369	51.7	300.15	1049.21
2002	3170	93.65	244.13	-	2.91	2584	28.53	98.63	168.69
2003	2780	93.42	277.46	171	18.96	5808	66.94	344.18	594.94

来发生过洪水漫滩7次。

近年来大型洪水发生较少,滩区居民防备意识有所松懈,在滩区内修建大量房屋、农田和鱼塘等,这些设施不断挤压黄河的行洪空间,不利于洪水的快速疏导。滩区群众为了保护财产安全,自发修建大量生产堤,将黄河限制在狭窄的河道内,加剧“二级悬河”的不利态势,小水大灾的情况更易发生,洪水漫滩成为滩区的最大安全隐患。为减少黄河下游滩区洪水漫滩风险,目前主要采用调控水库、引洪淤滩和修建避水设施等工程措施调控洪水,同时制定滩区漫滩洪水风险分布图、洪灾应急避难系统和居民外迁方案等非工程措施规避洪水。

## 2 资料与方法

### 2.1 模型简介

Delft3D 模型系统(<https://oss.deltares.nl/web/delft3d>)由荷兰代尔夫特理工大学和Deltares研究所共同开发,可以模拟洪水、风暴潮、飓风和海啸等情景,计算流量、水位、泥沙和水质等参数,并能够处理不同类型情景之间的相互作用。Delft3D模型系统开源免费,具有网格功能强大、用户界面友好以及求解速度快且稳定等特点<sup>[17-18]</sup>,适用于地表水模拟计算,在国内外河流水文泥沙模拟和风险预测等方面已有较多成功的应用<sup>[19-20]</sup>。

为模拟研究区不同位置受洪水事件影响的情况,本研究利用Delft3D模型,模拟不同水文条件下的洪水漫滩致灾参数。基于研究区历史洪水漫滩事件相关水文资料以及土地利用、水利工程设施布设情况等,以FLOW水动力模块为核心,构建黄河下游洪水演进水沙二维模型,得到不同洪水情景演进过程的模拟结果。

### 2.2 数据来源

本研究使用的资料包括水文数据、滩区土地利

用类型数据、地形高程数据和滩区洪灾损失数据。

#### 2.2.1 水文数据

主要对照“水库运用后黄河下游各级洪峰流量”花园口站流量数据<sup>[13]</sup>,综合考虑与地形信息的匹配以及典型情景洪水的选取,从《中华人民共和国水文年鉴—黄河流域水文资料》中“洪水水文要素摘录表”获取黄河下游各大断面对应年份的实测水位、流量和含沙量信息,分别用于表示不同重现期和水沙条件的洪水情景。典型洪水情景对应的水文条件如表2所示。

#### 2.2.2 土地利用/覆盖及地形高程数据

采用谢羽倩等<sup>[21]</sup>的黄河下游滩区土地利用/覆盖数据,包括包括自然村、工矿仓储地、鱼塘和耕地等在内的25种土地类型。滩地地形与主河槽水下地形数据主要来源于黄河下游花园口至艾山断面2013年汛前地形(<http://www.yrec.cn>),此数据以高程点的形式存储。研究区内各处高程点的间距有所不同:生产堤堤顶约为200m,河槽外滩地约为500m,河槽及嫩滩水流方向约为200m,垂直水流方向约为100m。结合2013年及以后的黄河下游汛期水文资料,由于黄河下游未发生大规模漫滩洪水,滩区地形未发生较大的变化,所以使用以上地形高程信息能够较好地体现黄河下游滩区的地形现状。

#### 2.2.3 洪灾损失率数据

洪水灾害损失是较难获取的参数,不同的致灾条件、受灾地区以及受灾区资产类型等均会导致不同的损失。洪水灾害损失的影响因素主要有受灾资产类型、洪水淹没水深和洪水淹没历时等。研究区洪水漫滩事件大多持续72小时以上,洪水淹没时长对洪水灾害损失的影响不作为本次研究的重点。本文主要梳理已有研究中关于研究区洪水淹没水深与漫滩灾害事件损失间的相互关系,基于模拟出的漫滩洪水淹没水深,间接地给出研究区洪水漫滩事件

表2 洪水过程数据特征值  
Table 2 Eigenvalues of hydrology and sediment data of floods

洪水情景	重现期	历时/天	洪峰流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	最高含沙量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	总来水量/ 亿 $\text{m}^3$	总来沙量/ 亿 t	平均流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	平均含沙量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
1973年8月和9月	常遇	19	5890	449.0	52.94	8.18	3223.73	154.65
1981年9月	五年一遇	13	8060	47.7	60.08	2.07	5345.87	34.44
1976年8月、9月	十年一遇	15	9210	51.9	88.64	3.12	6836.03	35.25
根据1982年设计	二十年一遇	11	12200	66.6	48.82	1.64	5645.90	33.65
1982年7月、8月	百年一遇	12	15300	66.6	61.63	2.01	6479.67	32.64
1958年7月	千年一遇	14	22300	146.0	89.72	6.62	7413.24	73.76

说明:二十年一遇重现期洪水情景根据1982年水文资料等进行概化设计。

的灾害损失。

综合“黄河洪水影响区社会经济财产洪灾损失率”、“黄河下游滩区农作物淹没等级与直接经济损失率关系”、“黄河下游农林牧渔业洪水淹没等级与损失率”等关系曲线<sup>[22-23]</sup>, 结合黄河下游滩区实际用地类型等情况, 确定不同淹没水深下的财产损失率, 如表 3 所示。

### 2.3 洪水漫滩风险评估体系

#### 2.3.1 洪水漫滩风险评估基本单元划分

掌握黄河下游滩区洪水漫滩风险的空间分布规律, 是面向黄河下游滩区制定管理措施的基础和前提。为便于分析研究区各处洪水漫滩风险, 本研究

表 3 不同淹没水深情况下财产损失率  
Table 3 Property loss rate under different water depths

用地类型	财产损失率/%				
	0~0.5 m	0.5~1 m	1~2 m	2~3 m	>3 m
种植业	77	85	95	100	100
林业	0	5	10	25	40
畜牧业	0	8	25	45	70
渔业	30	70	80	100	100
工业	10	15	25	25	25
集镇村	3	15	20	25	40
自然村	5	20	35	50	70
第三产业	12	16	23	32	38
水利设施	5	10	15	20	30

划分出洪水淹没单元。基于洪水淹没频率、地形和河道整治工程及生产堤空间分布等信息, 将花园口至艾山河段分为 55 个淹没单元。每个淹没单元可以理解为高程基本上一致, 其内部洪水漫滩事件影响程度基本上相同的区域。为便于标识, 分南北两岸, 按照从上游到下游的顺序, 对位于滩地的各淹没单元编号, 南岸第一片淹没单元为 S1, 北岸第一片淹没单元为 N1, 以依类推(图 1)。

#### 2.3.2 洪水漫滩风险评估指标与方法

参考联合国对自然灾害风险评价模型<sup>[24]</sup>, 本研究采用危险度和易损度来衡量风险的评价体系, 面向淹没单元, 评价黄河下游宽滩区洪水漫滩风险度。风险度的表达式为

$$R = H \times V, \quad (1)$$

其中,  $R$  为风险度, 是衡量各淹没单元风险程度的综合指标, 为危险度与易损度的乘积;  $H$  为危险度, 用于表征各淹没单元发生洪水淹没的危险程度, 用各淹没单元洪水漫滩面积占单元面积百分比来衡量;  $V$  为易损度, 反映不同承灾体对自然灾害的承受能力(即脆弱度), 以各淹没单元发生洪水漫滩事件后单元内地物综合损失率计。

1) 危险度  $H$  计算。为定量地区分不同淹没单元发生洪水漫滩的风险程度, 以洪水漫滩淹没面积占各淹没单元总面积的百分比作为危险程度的度量值:

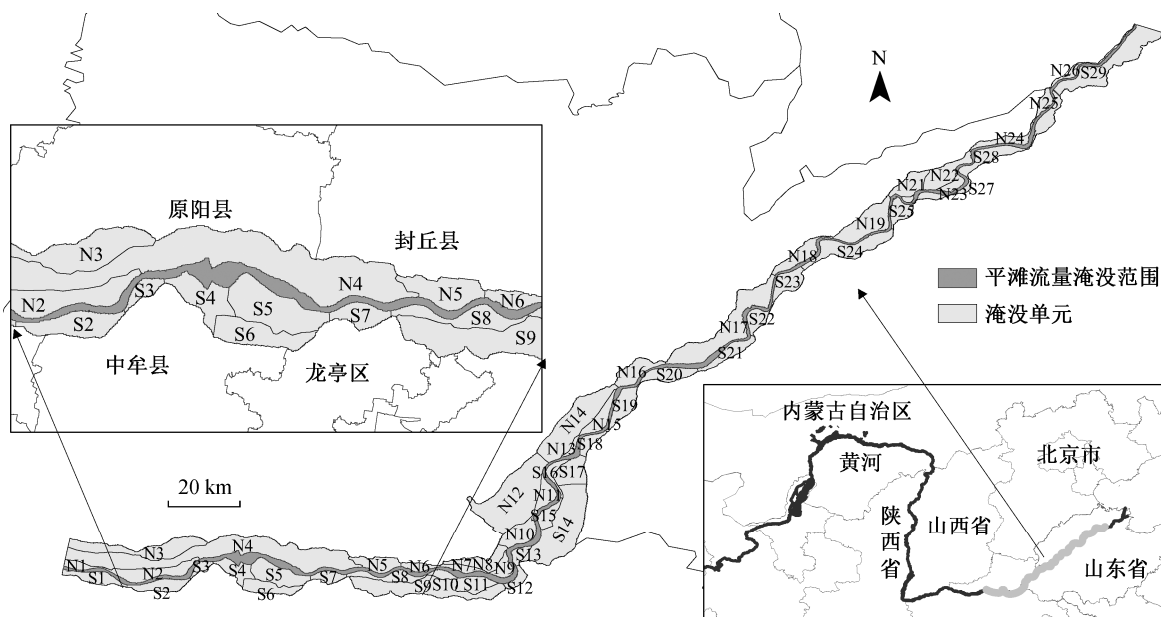


图 1 研究区位置和淹没单元分布  
Fig. 1 Classification of inundation units and the site of study area

$$H_i = \frac{S_i}{S_i} \times 100\%, \quad (2)$$

式中,  $H_i$  为第  $i$  淹没单元对应的危险度,  $s_i$  为模拟得到的第  $i$  淹没单元内洪水漫滩淹没的面积,  $S_i$  为第  $i$  块淹没单元对应的面积。

2) 易损度计算。基于直接经济损失评估洪水灾害损失时, 洪灾损失率是一个重要的指标, 指各种承灾体类型在经历灾害后的价值与原有价值的比值。各淹没单元的洪水漫滩易损度以各淹没单元的综合损失率表示, 即将该区域内所有用地类型对应的漫滩损失率进行面积加权平均:

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n S_j \times v_j}{\sum_{j=1}^n S_j}, \quad (3)$$

其中,  $V_i$  为第  $i$  个淹没单元的综合损失率,  $S_j$  为该淹没单元内第  $j$  种用地类型的面积,  $v_j$  为第  $j$  种用地类型对应淹没水深条件下的损失率,  $n$  为第  $i$  个淹没单元内所有用地类型总数量。

### 2.3.3 洪水演进模型的建立

黄河下游花园口至艾山河段为模型模拟河段, 河道两岸黄河大堤为模型外边界。河段总长 371 km, 面积为 2860 km<sup>2</sup>。结合研究区道路交通、控导工程等的实际规模, 本文将研究区域划分为 226776 个平

均宽度为 112 m 的结构化网格。

糙度系数是模型中主要参数之一, 同时也是影响模型模拟结果的重要参数。糙度系数主要结合文献[25–26]中“洪水水文要素摘录表”提供的主槽实测糙度系数, 再与土地利用/覆盖分类数据进行整合, 得到研究区域的糙度系数。各土地利用类型对应的糙率系数分别为水体 0.01、嫩滩 0.025、耕地/农业用地 0.03、险工/控导工程 0.045、林地/果园 0.05 以及建设用地 0.06。结合 Delft3D 模型中 QUICKIN 模块提供的柯朗数可视工具及 FLOW 模块, 率定得到模型相关参数。

选取与地形文件相匹配的 2013 年汛期水沙过程, 结合断面水沙过程对比分析来验证模型精度。验证时段为 2013 年 6 月 19 日—7 月 9 日, 共 20 天。进口边界条件为花园口断面实测流量过程和含沙量过程, 其中洪峰流量为 4200 m<sup>3</sup>/s, 最高含沙量为 32.2 kg/m<sup>3</sup>, 出口边界条件为艾山断面实测水位过程。对比分析模拟序列和实测序列, 计算相应的纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)和平均相对误差(mean relative error, MRE)来定量反映模拟精度。验证结果如图 2 和 3 以及表 4 所示。从各大断面纳什效率系数来看, 模拟序列与实测序列

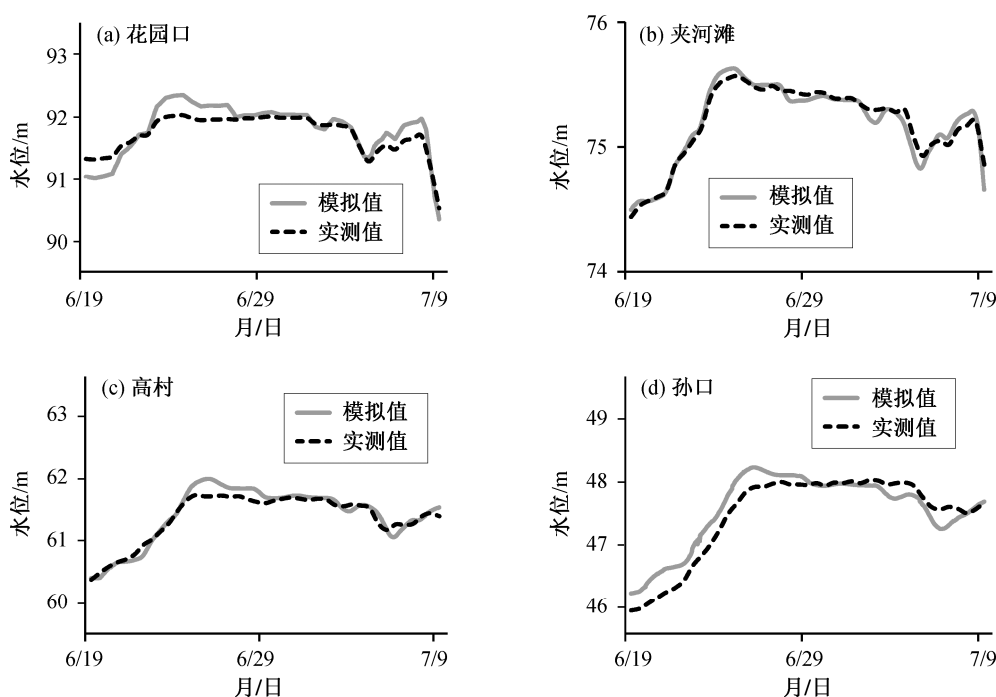


图 2 2013 年各大断面模拟水位与实测水位比较

Fig. 2 Comparison of simulated water level and measured water level in various sections in 2013

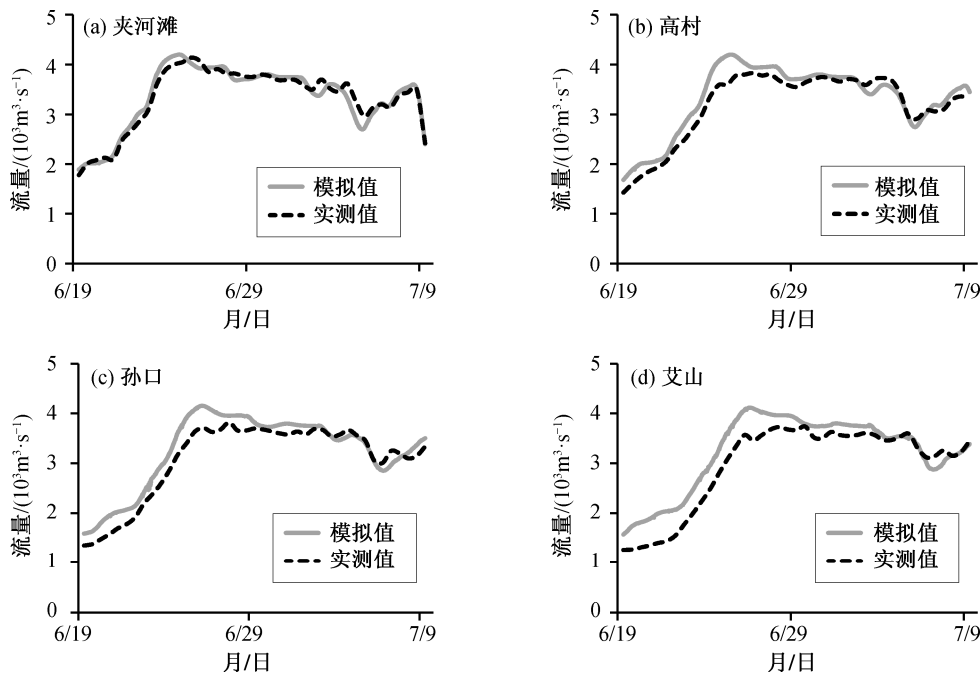


图 3 2013 年各大断面模拟流量与实测流量比较

Fig. 3 Simulated flow rate of each section compared with the measured flow rate in 2013

表 4 基于水位和流量的模型精度评价

Table 4 Model precision evaluation based on water level and flow rate

位置	水位			流量		
	NSE	MAE/m	MRE/%	NSE	MAE/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	MRE/%
花园口	0.768	0.123	0.134	—	—	—
夹河滩	0.956	0.048	0.064	0.955	107.246	3.269
高村	0.918	0.082	0.133	0.897	183.452	6.376
孙口	0.884	0.195	0.415	0.888	218.512	8.318
艾山	—	—	—	0.829	293.976	13.208

吻合较好。水位平均绝对误差基本上控制在 0.2 m 以内，流量平均相对误差大多在 10% 以内，具有较高的模拟精度，满足本次研究的要求。

### 2.3.4 致灾参数模拟结果

在 Delft3D FLOW 模块中输入常遇至千年一遇洪水情景(表 2)下的水文泥沙数据，得到不同洪峰流量情景下研究区洪水淹没范围和淹没水深结果。基于 ArcGIS 平台，得到洪水灾害的空间分布。为精确地度量研究区不同区域的洪水漫滩水深，参照水利行业标准《洪水风险图编制导则》(SL/T 483-2017)，可分为 0, 0~0.5, 0.5~1.0, 1.0~2.0, 2.0~3.0 和 >3.0 m 共 6 个等级来衡量不同洪水漫滩区域的覆水情况。不同区域淹没水深空间分布情况如图 4 所示。

## 3 结果与讨论

将模拟得到的致灾参数代入危险度、易损度和风险度的计算公式，可得到黄河下游滩区各淹没单元的风险等级。为便于直观地对比各淹没单元的危险度和易损度等，本文利用 ArcGIS 平台的分级制图功能，将漫滩危险度分为极低危险度、低危险度、中危险度、高危险度和极高危险度 5 个等级制图输出，易损度也采用相同制图模式。参考风险等级评价矩阵<sup>[27]</sup>(图 5)，得到各淹没单元在不同洪水情景下洪水漫滩风险度的空间分布。

### 3.1 洪水漫滩危险度分布

各洪水情景下各淹没单元洪水漫滩危险度的分布见图 6 和表 5。

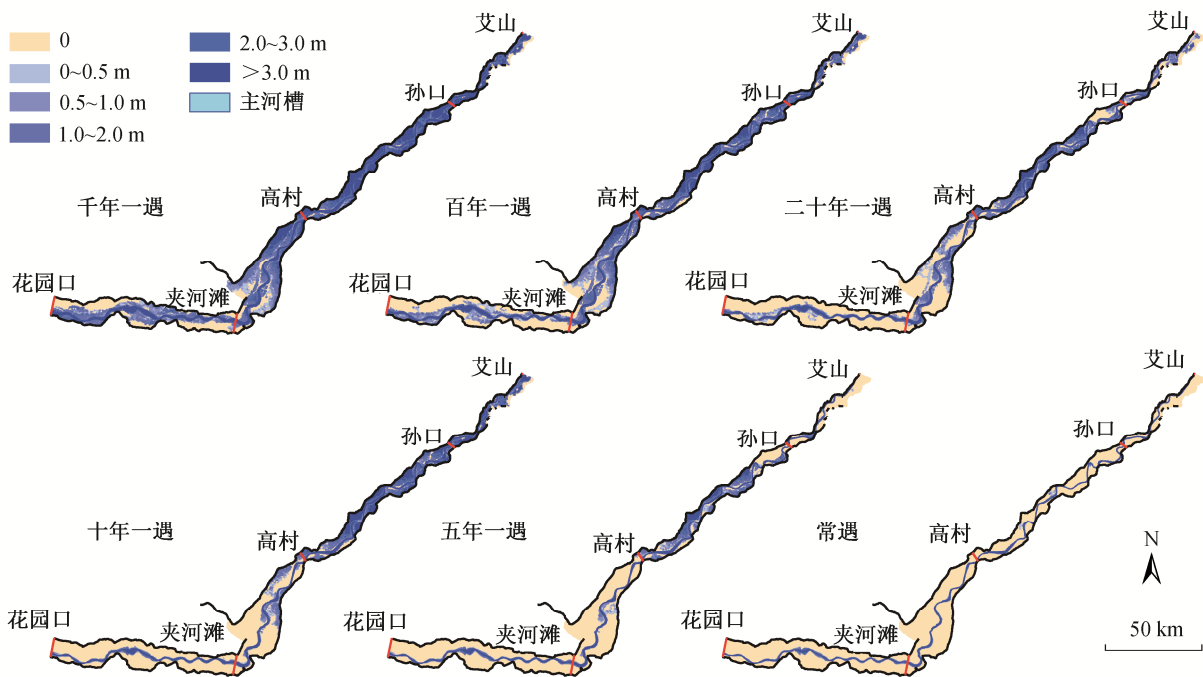


图 4 各洪水情景下洪水漫滩淹没水深

Fig. 4 Water depths in different areas of typical flood scenarios

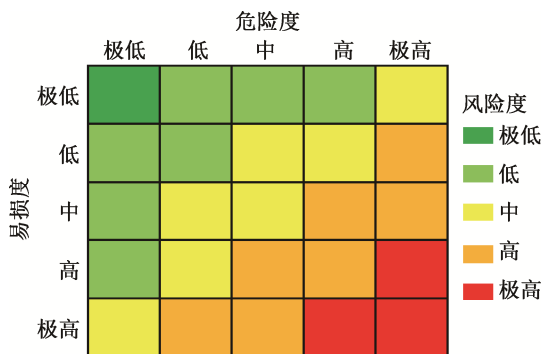


图 5 洪水灾害风险等级分级矩阵<sup>[27]</sup>

Fig. 5 Flood risk rating matrix<sup>[27]</sup>

在常遇洪水情景下，绝大部分淹没单元均为极低危险度。由常遇洪水情景转为五年一遇洪水情景时，高村至孙口河段大部分淹没单元直接由极低危险度转为中高危险度，部分淹没单元(N17~N19)甚至具有极高危险度，面积达 253 km<sup>2</sup>，约占滩区总面积的 10%。与五年一遇洪水情景相比，十年一遇洪水情景下高村至孙口段淹没单元的危险度加剧，孙口至艾山段大部分淹没单元由低危险度转为高危险度，夹河滩至高村段河段的部分淹没单元也呈现中危险度。尽管二十年一遇洪水情景的洪峰流量等比十年一遇高，但在上游滩区的滞洪作用下，孙口至艾山河段大部分淹没单元由十年一遇洪水情景下的

中高危险度转为中低危险度。十年一遇洪水情景下，1332 km<sup>2</sup>的区域处于极低危险度状态，占滩区总面积 53%；二十年一遇洪水情景下，花园口至高村河段各淹没单元与十年一遇情景相比，变化相对较小。二十年一遇洪水情景下，超 1/3 的滩区(面积近 779 km<sup>2</sup>)淹没单元处于低风险度状态。在百年和千年一遇洪水情景下，夹河滩至艾山河段大部分淹没单元呈现极高危险度。即使在千年一遇洪水情景下，仍有花园口至艾山河段的 N3, S6 和 S9 等淹没单元为极低危险度，占滩区总面积的 11%。

### 3.2 洪水漫滩易损度分布

各洪水情景下各淹没单元洪水漫滩易损度分布见图 7 和表 6。

从各洪水情景下各淹没单元洪水漫滩易损度空间分布结果来看，具有较高危险度的淹没单元大都具有相对较高的易损度。但是，与部分研究单元(N16~N18, S20~S23)相比，五年一遇洪水漫滩事件情景下高村至孙口段淹没单元同时具备相对较高的危险度和相对较低的易损度。这是由于五年一遇重现期下的洪水虽然淹没了较大的范围，但由于漫滩水深相对较小，所以未对研究区地物造成较大损害。五年一遇与常遇洪水情景下的淹没单元易损度

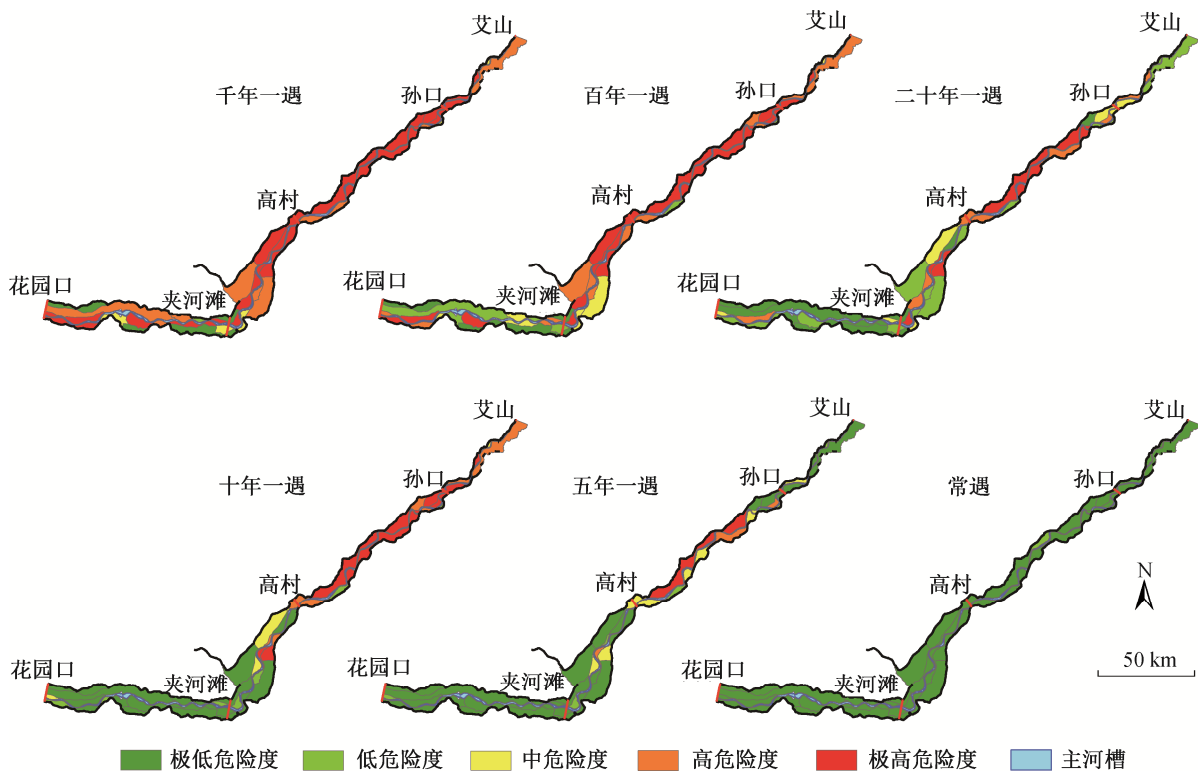


图 6 不同洪水情景下各淹没单元洪水漫滩危险度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the hazard of each inundation unit under different flood scenarios

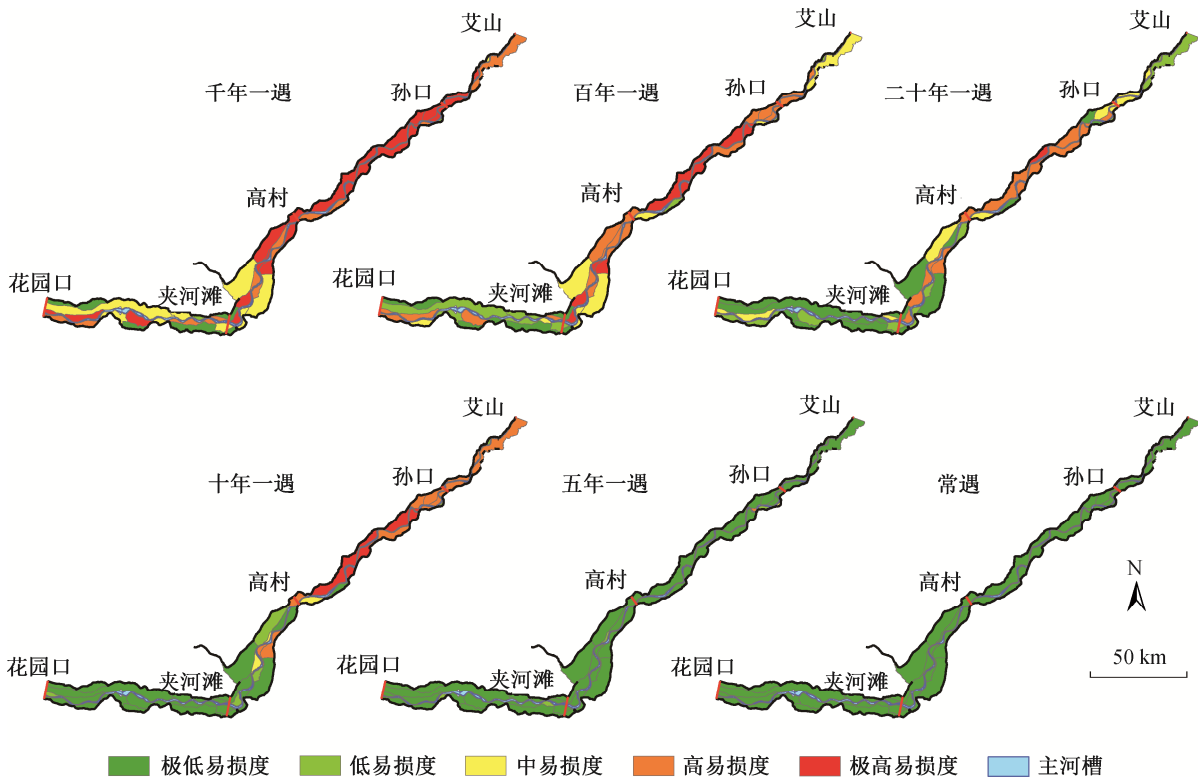


图 7 不同洪水情景下各淹没单元洪水漫滩易损度空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of the vulnerability of each inundation unit under different flood scenarios

表 5 各洪水情景下不同洪水漫滩危险度等级淹没单元数据统计  
Table 5 Statistics of inundation units at different hazard levels in each flood scenario

洪水情景	极低危险度			低危险度			中危险度			高危险度			极高危险度		
	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %
千年一遇	276.66	4	11	13.65	1	1	117.29	7	5	902.42	10	36	1223.36	33	48
百年一遇	294.46	5	12	380.30	6	15	270.92	7	11	583.94	13	23	1003.75	24	40
二十年一遇	745.46	13	29	778.66	15	31	254.81	6	10	313.08	9	12	441.38	12	17
十年一遇	1332.30	22	53	128.95	7	5	181.21	0	7	309.11	8	12	581.80	14	23
五年一遇	1841.85	34	73	87.28	6	3	256.05	9	10	94.79	3	4	253.41	3	10
常遇	2496.19	54	99	37.18	1	1									

表 6 各洪水情景下不同洪水漫滩易损度等级淹没单元数据统计  
Table 6 Statistics of inundation unit with different vulnerability levels in each flood scenario

洪水情景	极低易损度			低易损度			中易损度			高易损度			极高易损度		
	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %
千年一遇	276.66	4	11	19.01	2	1	776.02	11	31	425.71	13	17	1035.98	25	41
百年一遇	294.46	5	12	466.07	10	18	599.80	9	24	713.84	20	28	459.21	11	18
二十年一遇	1130.02	17	44	407.38	12	16	367.36	9	14	591.43	16	23	37.18	1	1
十年一遇	1416.25	26	56	201.20	6	8	66.56	3	3	509.08	13	20	340.28	7	13
五年一遇	2487.71	49	98	36.65	4	1	5.36	1	0	3.67	1				
常遇	2533.38	55	100												

分布基本上相同,洪水漫滩危险对研究区影响较小。由五年一遇洪水情景转为十年一遇洪水情景时,高村至艾山河段大部分淹没单元直接由极低易损度转为高易损度,部分淹没单元(N17~N19, S22和S23)甚至呈现极高易损度,面积达到340 km<sup>2</sup>,占滩区总面积的13%。与危险度类似,二十年一遇洪水情景下孙口至艾山河段大部分淹没单元由十年一遇洪水情景下的高易损度转为中低易损度。稀遇洪水情景下,花园口至夹河滩大部分淹没单元仍呈现中低易损度,达到滩区总面积的50%左右。

### 3.3 洪水漫滩风险度分布

基于各淹没单元的危险度与易损度统计结果,利用式(1)得到不同洪水情景下各淹没单元的风险度。参考风险等级评价矩阵,得到各淹没单元在不同洪水情景下洪水漫滩风险度的空间分布情况(表7和图8)。

可以看出,常遇洪水与五年一遇洪水情景下的淹没单元风险度分布基本上相同,绝大部分淹没单元呈现极低风险度。由五年一遇洪水情景转为十年一遇洪水情景时,高村至艾山河段大部分淹没单元

表 7 各洪水情景下不同洪水漫滩风险等级淹没单元数据统计  
Table 7 Statistics data of inundation units at different risk levels in each flood scenario

洪水情景	极低风险度			低风险度			中风险度			高风险度			极高风险度		
	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	数量/ 个	占比/ %
千年一遇	276.66	4	11	19.01	2	1	398.93	8.00	16	714.64	12	28	1124.14	29	44
百年一遇	294.46	5	12	466.07	10	18	554.36	7.00	22	539.36	17	21	679.13	16	27
二十年一遇	930.58	14	37	593.54	14	23	305.29	8.00	12	325.14	11	13	378.83	8	15
十年一遇	1341.97	23	53	131.78	7	5	204.05	4.00	8	400.31	10	16	455.26	11	18
五年一遇	2355.02	44	93	178.36	11	7									
常遇	2533.38	55	100												

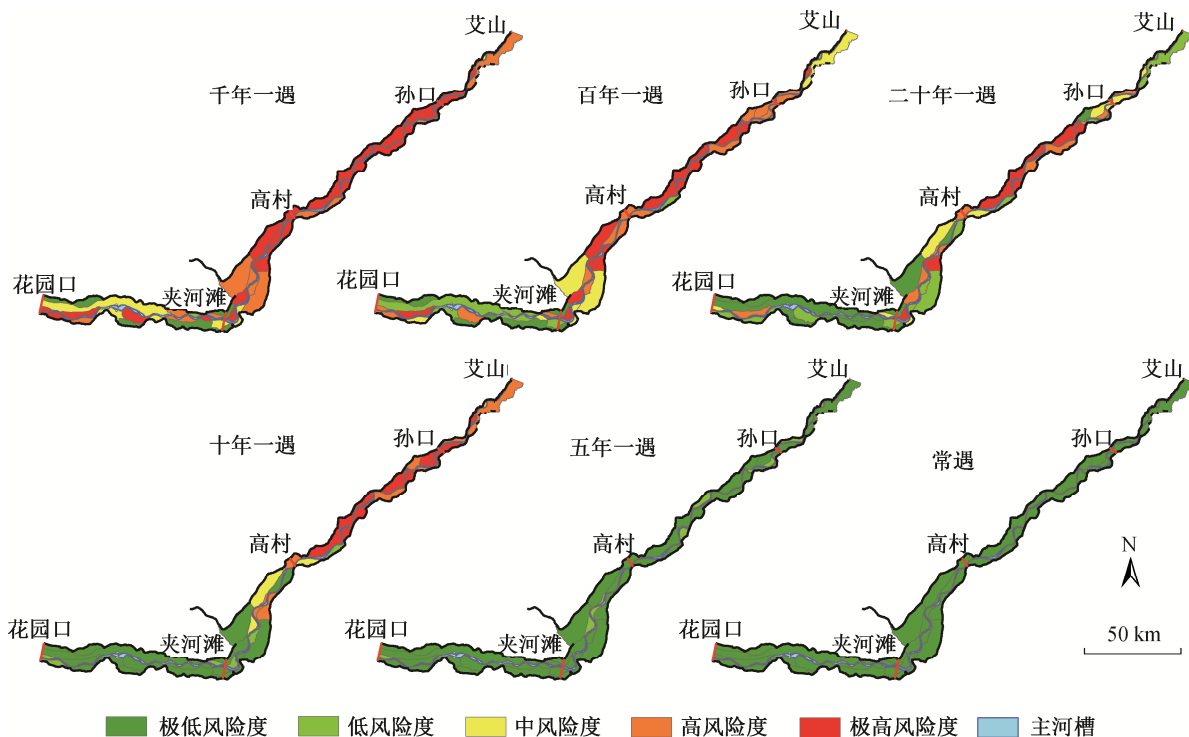


图 8 不同洪水情景下各淹没单元洪水漫滩风险度空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the risk of each inundation unit under different flood scenarios

直接由极低风险度转为极高风险度, 夹河滩至高村部分淹没单元由极低风险度转为中高风险度。该情景下, 处于高和极高风险度的淹没单元面积已超过 855 km<sup>2</sup>, 占滩区总面积的 34%。二十年一遇洪水情景下, 孙口至艾山河段大部分淹没单元由十年一遇洪水情景下的高风险度转为中低风险度, 花园口至高村河段大部分淹没单元呈现中低风险度。该种情景下, 仍有 60% 面积的淹没单元为极低和低风险度, 面积近 1525 km<sup>2</sup>。稀遇洪水情景下, 花园口至夹河滩大部分淹没单元仍呈现中低风险度, N3, S6 和 S9

等淹没单元甚至为极低风险度。百年一遇洪水情景下, 超过 1218 km<sup>2</sup> 区域呈现高和极高风险度状态, 占滩区总面积的 48%。在千年一遇洪水情景下, 处于高和极高风险度状态的淹没单元总面积为超过 1839 km<sup>2</sup>, 面积占比为 72%。

### 3.4 各淹没单元漫滩风险度对比分析

为对比各淹没单元的漫滩风险度情况, 将各淹没单元在不同洪水情景下的洪水漫滩风险度进行统计并汇总, 结果如图 9 所示。

根据图 9 中统计结果, 可以依据在不同洪水情

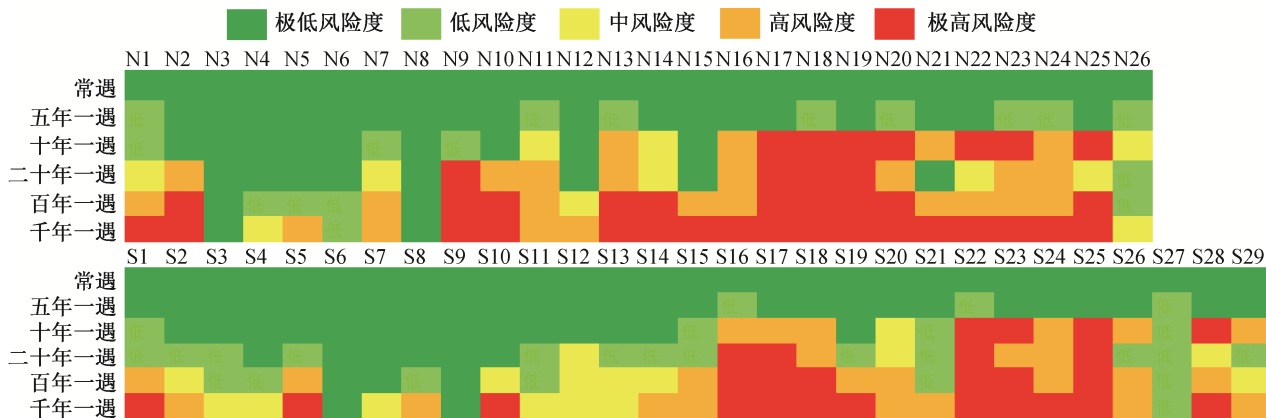


图 9 各淹没单元在不同洪水情景下洪水漫滩风险度对比

Fig. 9 Comparison of risks of each inundation unit in different flood scenarios

景下的洪水漫滩风险度等级,将全部淹没单元大体上分为3类:“水险同期”、“小水大险”和“稳定低险”。

“水险同期”:该类淹没单元的洪水漫滩风险等级一般随洪水量级的增加而增加。在常遇和五年一遇洪水情景下,一般呈现低风险度。随着洪水量级的增加,基本上保持低风险甚至极低风险度。洪水量级再增加,部分淹没单元过渡到中风险度。百年和千年一遇洪水情景下,绝大部分淹没单元呈现高风险度状态。该类淹没单元总面积达1231 km<sup>2</sup>,占滩区总面积的48.6%,共23个,主要分布在花园口至夹河滩河段以及夹河滩断面和高村断面附近,单元编号为N1, N4, N5, N7, N12, N14, N15, S1~S5, S7, S8, S10~S15和S19~S21。

“小水大险”:该类淹没单元处于十年一遇洪水情景时,就呈现高风险甚至极高风险度(五年一遇洪水情景下就呈现较高漫滩危险度)。常遇和五年一遇洪水情景下大都呈现极低风险度,但处于十年一遇洪水情景时,绝大部分淹没单元便呈现极高风险度。当洪水情景转为二十年一遇以及稀遇情景时,除孙口至艾山河段淹没单元因上游滞洪作用导致风险度略有降低外,其余淹没单元均保持极高风险度。该类淹没单元总面积达1006 km<sup>2</sup>,占滩区总面积的39.7%,共26个,主要分布在夹河滩断面和高村断面附近以及高村至艾山河段,单元编号为N2, N9~N11, N13, N16~N26, S16~S18, S22~S26, S28和S29。

“稳定低险”:淹没单元的风险度不随洪水量级增大而增大,且基本上呈现极低风险度。即使在百年一遇和千年一遇洪水情景下,大部分淹没单元仍然呈现极低风险度。该类单元数量较少,仅6个,总面积为296 km<sup>2</sup>,占滩区总面积的11.67%,主要分布在花园口至夹河滩河段,单元编号为N3, N6, N8, S6, S9和S27。

## 4 结论

本文利用Delft3D模型,模拟不同洪水情景下研究区洪水漫滩灾害致灾参数,得到各洪水漫滩淹没单元内部洪水漫滩事件的影响程度。通过构建洪水漫滩危险度和易损度计算方法,参考联合国灾害风险评价指标体系,得到研究区各淹没单元的洪水漫滩风险度。本文利用模型来模拟洪水漫滩致灾参数,可以避免常规指标评价方法的主观性和局限性。根据研究区地形、河道整治工程和生产堤等因

素划分的淹没单元,更能体现洪水漫滩时滩区各处的自然属性,可以避免常规的以地理行政区划来研判研究区各处风险的不足。此外,综合危险度和易损度两个维度,给出研究区洪水漫滩风险度,使得评价结果更加全面和客观。

研究区各淹没单元的洪水漫滩风险度与洪水情景响应关系可分为3类。“水险同期”类淹没单元对应的洪水漫滩风险度随洪水量级的增加而增加,逐步从常遇洪水情景下的极低风险度过渡到稀遇洪水情景下的极高风险度,呈现“水险同期”特点,该类淹没单元的总面积达到滩区总面积的近50%。滩区39.7%面积对应的淹没单元的洪水漫滩风险度不随洪水情景量级的增大而缓步增加,这类淹没单元在十年一遇洪水情景下就呈现极高风险度,具有“小水大险”的特征。滩区11.67%面积对应的淹没单元处于极低风险度状态,不受洪水情景的影响,长期处于“稳定低险”状态。

黄河下游滩区洪水漫滩风险集中分布于高村至艾山河段的“小水大险”类淹没单元,应当重点防范,同时应以十年一遇,甚至五年一遇洪水情景作为洪水防范工程措施布设的参考依据。“水险同期”类淹没单元因在百年一遇等稀遇洪水情景下才呈现较高风险度,因此可以考虑以将二十年一遇洪水情景作为洪水防范工程设施布设依据。对于花园口至夹河滩宽滩区内稳定地处于“极低风险”状态的淹没单元,可优先考虑开发利用。

## 参考文献

- [1] Terêncio D P S, Sanches Fernandes L F, Cortes R M V, et al. Flood risk attenuation in critical zones of continental Portugal using sustainable detention basins. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137727
- [2] Straatsma M W, Kleinhans M G. Flood hazard reduction from automatically applied landscaping measures in RiverScape, a Python package coupled to a two-dimensional flow model. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 101: 102-116
- [3] 刘章君, 许新发, 成静清, 等. 基于Copula函数的大坝洪水漫顶风险率计算. *水力发电学报*, 2019, 38(3): 75-82
- [4] 张超, 彭杨, 纪昌明, 等. 长江上游与洞庭湖洪水遭遇风险分析. *水力发电学报*, 2020, 39(8): 1-16
- [5] 刘光旭, 王小军, 徐新创, 等. 低山丘陵区暴雨洪

- 水特征与洪灾风险评估——以赣江上游为例. 水土保持通报, 2019, 39(5): 236–241
- [6] 王复生, 李传奇, 王焱炜, 等. 基于 GIS 的南水北调东线山东段区域洪灾风险区划. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 45–53
- [7] 潘汀超, 戚蓝, 田福昌, 等. 组合赋权-模糊聚类算法的改进及其在洪灾风险评价的应用. 南水北调与水利科技, 2020, 18(5): 38–56
- [8] 赖成光, 王兆礼, 宋海娟. 基于 BP 神经网络的北江流域洪灾风险评价. 水电能源科学, 2011, 29(3): 57–59
- [9] Sunar AF, Yagmur N, Dervisoglu A. Flood analysis with remote sensing data — a case study: Maritsa River, Edirne // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague, 2019: 497–502
- [10] Abdelkarim, Gaber, Alkadi, et al. Integrating remote sensing and hydrologic modeling to assess the impact of land-use changes on the increase of flood risk: a case study of the Riyadh–Dammam Train Track, Saudi Arabia. Sustainability, 2019, 11(21): 6003
- [11] 张向萍, 江恩慧, 李军华. 黄河下游宽滩区洪涝灾害物理暴露量研究. 人民黄河, 2020, 42(7): 1–6
- [12] 张敏, 黄河清, 张晓华. 黄河下游漫滩洪水冲淤规律. 水科学进展, 2016, 27(2): 165–175
- [13] 崔萌, 刘生云, 张瑞海, 等. 黄河下游河道改造方案初步研究. 人民黄河, 2018, 40(1): 36–39
- [14] 李肖男, 张红武, 钟德钰, 等. 黄河下游河道治理三维数值模拟研究. 水利学报, 2017, 48(11): 1280–1292
- [15] 胡一三. 中国江河防洪丛书—黄河卷. 北京: 中国水利水电出版社, 1996
- [16] 邵文杰. 河南省志. 郑州: 河南人民出版社, 1993
- [17] Teng J, Jakeman A J, Vaze J, et al. Flood inundation modelling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis. Environmental Modelling & Software, 2017, 90: 201–216
- [18] 廖庚强. 基于 Delft3D 的柳河水动力与泥沙数值模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2013
- [19] 谢谦城, 苗伟波, 戴文鸿, 等. 水沙变化条件下黄河下游连续弯段水流特性研究. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 157–161
- [20] Lee C, Hwang S, Do K, et al. Increasing flood risk due to river runoff in the estuarine area during a storm landfall. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, 221: 104–118
- [21] 谢羽倩, 程舒鹏, 张燕青, 等. 黄河下游滩地土地利用/覆盖现状及影响因素分析. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 489–500
- [22] 王延红, 丁大发, 韩侠. 黄河下游大堤保护区洪灾损失率分析. 水利经济, 2001(2): 42–46
- [23] 康相武, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 大尺度洪水灾害损失与影响预评估. 科学通报, 2006, 51(增刊 2): 155–164
- [24] UN. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management. Geneva: United Nations Department of Humanitarian Affairs, 1992
- [25] Werner M G F, Hunter N M, Bates P D. Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation. Journal of Hydrology, 2005, 314: 139–157
- [26] 郭凤清, 屈寒飞, 曾辉, 等. 基于 MIKE21 的滹江蓄滞洪区洪水危险性快速预测. 自然灾害学报, 2013, 22(3): 144–152
- [27] 杜鹃, 何飞, 史培军. 湘江流域洪水灾害综合风险评估. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 38–44