

doi: 10.6046/zrzyg.2023007

引用格式: 刘稼丰, 张文凯, 杜晓敏, 等. 1976—2020 年黄河入海口滩区水体演变过程及淹没风险识别[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(2): 151–159. (Liu J F, Zhang W K, Du X M. Evolutionary process and inundation risk identification of water bodies in the beach area of the Yellow River estuary from 1976 to 2020[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2024, 36(2): 151–159.)

# 1976—2020 年黄河入海口滩区水体 演变过程及淹没风险识别

刘稼丰<sup>1,2</sup>, 张文凯<sup>1</sup>, 杜晓敏<sup>1</sup>, 冀欣阳<sup>1</sup>, 杨金中<sup>1</sup>, 范景辉<sup>1</sup>, 孙禧勇<sup>1</sup>, 佟 晶<sup>1</sup>

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 自然资源部数字制图与  
国土信息应用重点实验室, 武汉 430079)

**摘要:** 黄河流域生态保护和高质量发展已成为国家战略, 对黄河入海口滩区水体范围进行动态监测研究, 避免水体演变所衍生出的潜在淹没风险具有重要意义。通过获取长时序丰水期 Landsat 系列遥感卫星影像数据集, 采用基于决策树的多指数陆表水体提取方法, 获取黄河入海口滩区 1976—2020 年 10 个研究时点的最大水体范围, 并通过叠加分析计算各个区域历史淹没频次, 进而识别城镇村庄居民点和采矿用地淹没风险。研究结果表明, 10 个研究时点中被淹没 5 次以上的区域为 463.7 km<sup>2</sup>, 以 2015 年共 631 个城镇村庄居民点和采矿用地为例, 低淹没风险 413 个, 中淹没风险 52 个, 高淹没风险 20 个。黄河入海口滩区城镇村庄居民点等建设用地应明确迁建需求, 科学迁建选址, 完善基础设施。

**关键词:** 黄河入海口; 黄河滩区; 遥感技术; 水体范围; 淹没风险

**中图法分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)02-0151-09

## 0 引言

黄河是我国第二长河流, 横跨东中西部, 是我国重要的生态安全屏障, 也是人口活动和经济发展的重要区域, 承载着全国 12% 的人口和 15% 的耕地<sup>[1]</sup>。习近平总书记于 2022 年前往黄河入海口进行考察, 并在之后指出要加快构建抵御自然灾害防线, 补好灾害预警监测短板, 加强下游河道和滩区环境综合治理, 高度重视黄河滩区居民迁建工作。因此, 开展黄河入海口滩区水体范围的动态监测研究, 综合已有研究提出并应用定量刻画滩区淹没风险的方法, 对降低滩区生产生活空间淹没风险、保障当地居民生命财产安全具有重要意义。

黄河入海口滩区是黄河河道的重要组成部分, 滩区生产生活用地承担汛期排洪泄洪的功能, 面临被淹没的风险, 这种风险影响着当地居民生活和社会经济发展。近年来, 关于黄河水体动态监测的研究引起了广泛关注, 方梦阳等<sup>[2]</sup>通过 GEE (Google

Earth Engine) 平台对黄河流域 2000—2020 年间年均近景 Landsat 影像进行处理, 再通过随机森林分类方法进行监督分类, 制作了黄河流域 2000—2020 年 20 a 间逐年土地覆盖数据; 杨雯娜等<sup>[3]</sup>基于“分区-集成”的评价方法, 选取水资源、气候、土壤、植被及人类活动等指标建立评价体系, 对黄河流域的生态脆弱性进行了量化评价与空间异质性分析; 王薇等<sup>[4]</sup>以黄河三角洲中心城市东营市及所辖区县为研究区域, 发现地表水资源短缺、地下淡水资源有限, 是导致黄河三角洲水土资源空间匹配程度差的主要限制因子; 李云龙等<sup>[5]</sup>以黄河三角洲地表水体为研究对象, 采用轨迹分析法和 Logistic 回归模型, 分析了地表水体演化特征及驱动机制; 王集宁等<sup>[6]</sup>基于 MSS, TM 及 OLI 等遥感图像数据, 在面向对象分类技术的支持下, 完成了 1973—2014 年黄河口海岸线遥感动态监测与变迁分析。然而, 现有研究缺乏对黄河入海口滩区长时序丰水期水体范围识别, 同时, 对黄河滩区内水体演变与居民生产生活空间受淹没风险之间关系的探究也较少。

收稿日期: 2023-01-16; 修订日期: 2023-08-04

基金项目: 自然资源部数字制图与国土信息应用重点实验室开放研究基金项目“基于多源地理空间信息的乡村地域演变特征测度与分析”(编号: ZRZYBWD202207) 和中国地质调查局项目“全国矿山开发及重点地区生态空间监测评估”(编号: DD20230100) 共同资助。

第一作者: 刘稼丰 (1992-), 男, 博士, 工程师, 主要从事土地资源管理研究。Email: liujiafeng@mail.cgs.goc.cn。

通信作者: 张文凯 (1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事土地资源管理研究。Email: zhangwenkai@mail.cgs.goc.cn。

遥感技术的不断发展和数据积累为长时序水体范围监测提供了技术支撑,中高空间分辨率卫星影像数据在水体范围识别方面具有良好的应用效果<sup>[7-8]</sup>。Long 等<sup>[9]</sup>利用自动水体提取指数(automatic water extraction index, AWEI)与 MODIS 影像推导出多时相水域面积,并根据水位与湖面积之间的关系估计洞庭湖的实时水域范围;Yang 等<sup>[10]</sup>利用支持向量机方法提取了洞庭湖长时序水体范围,证实三峡大坝具备良好洪水调节作用;Pekel 等<sup>[11]</sup>利用 GEE 平台,得出 1984—2015 年全球地表水的变化状况;Peng 等<sup>[12]</sup>应用基于决策树的多指数陆表水体提取方法对洞庭湖水体范围进行了识别,取得了较好的效果。上述研究表明,借助遥感卫星影像可以有效获取长时序水体范围,为揭示黄河入海口滩区水体演变过程从而识别淹没风险提供技术支撑。

针对已有研究对黄河入海口滩区(下称黄河滩区)淹没风险评估的不足,本研究拟获取长时序 Landsat 系列遥感卫星影像数据,采用基于决策树的多指数陆表水体提取方法,提取黄河滩区 1976—2020 年间丰水期水体范围,并通过叠加分析各个区

域历史淹没频次,获取淹没风险等级。此外,研究拟采用国产高分影像,应用专家知识解译方法对黄河滩区土地利用类型进行分类,获取城、镇、村庄居民点和采矿用地等滩区生产生活区域,并基于长时序水体范围监测结果对城镇村庄居民点和采矿用地等建设用地的淹没风险和迁建效果进行评估。

## 1 研究区概况及数据源

### 1.1 研究区概况

黄河滩区是指黄河主河槽与防汛大堤之间广阔的滩地<sup>[13]</sup>。本研究所指黄河下游滩区空间范围西起滨州市滨城区;在黄河北岸以遥感影像可明确分辨的黄河防汛“临黄堤、利黄堤、北大堤”为边界(图 1(a)—(c));南岸界线分为 2 段,“滨城区—利津县”段以目视可见的黄河防汛“临黄堤”为界限(图 1(d)),第二段以临黄堤与南方大堤交界处起,为关注更广阔的河口冲积平原,以目视解译可见的河流作为界线(图 1(e)),形成“喇叭口”型(图 1(f))动态监测区域。本研究最终所划定的黄河滩区空间范围如图 2 所示,总面积约为 1 654. 16 km<sup>2</sup>。

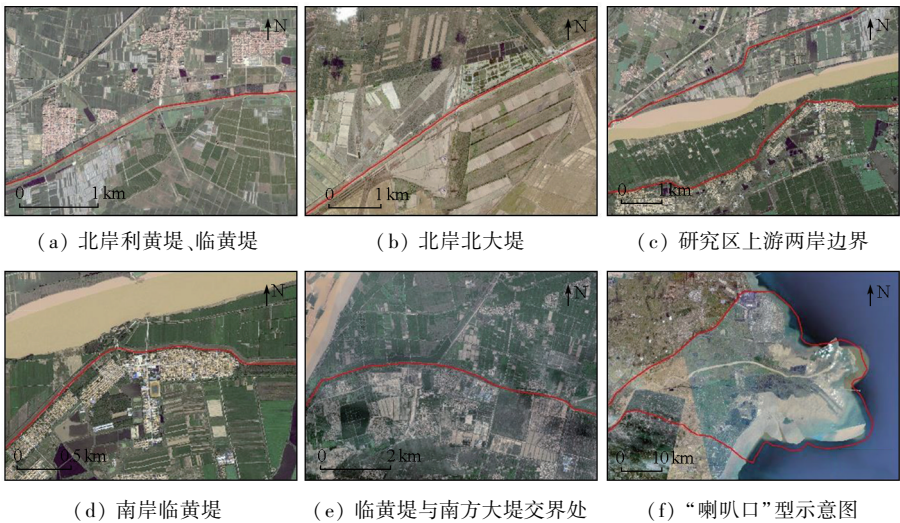


图 1 黄河滩区监测范围划定依据

Fig. 1 Basis for delineating the monitoring area of the Yellow River beach area



图 2 黄河滩区监测范围

Fig. 2 Monitoring coverage of the Yellow River beach area

本次研究中主要对研究区丰水期的水体演变过程及淹没风险进行识别,丰水期通常指河流流量较高的时期,这个时期可能因为季节性降水、融雪等因素导致河流水位上升。不同地区的丰水期可能出现在不同的时段,研究区的丰水期通常在每年 6—9 月,这个时期受季风气候影响,降雨量较高,黄河下游河道的径流集中,黄河水位上升,可能导致洪水和淹没<sup>[14]</sup>。

### 1.2 长时序 Landsat 系列卫星遥感数据及其预处理

长时序水体范围识别与分析需要以连续时点的遥感卫星影像数据为基础,自 1972 年起开始运行的

Landsat 系列卫星可提供有效的数据支撑,本次研究从地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>) 和美国地质勘探局 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) 获取了公开的 Landsat 系列卫星遥感影像数据集。按

照每 5 a 为监测时点,筛选 1976—2020 年间研究区范围内少云 (云量<20%)、无条带的丰水期 (6—9 月) 的 Landsat 遥感影像数据 (表 1)。

表 1 黄河滩区长时序水体范围监测所选用遥感影像数据信息

Tab. 1 Remote sensing image data information selected for long time series water body extent monitoring in the Yellow River beach area

| 年份     | 卫星型号     | 传感器   | 空间分辨率/m | 年份     | 卫星型号       | 传感器     | 空间分辨率/m |
|--------|----------|-------|---------|--------|------------|---------|---------|
| 1976 年 | Landsat2 | MSS02 | 60      | 2000 年 | Landsat5/7 | TM/ETM+ | 30      |
| 1980 年 | Landsat3 | MSS03 | 60      | 2005 年 | Landsat5   | TM      | 30      |
| 1985 年 | Landsat5 | TM    | 30      | 2010 年 | Landsat5   | TM      | 30      |
| 1990 年 | Landsat5 | TM    | 30      | 2015 年 | Landsat8   | OLI     | 30      |
| 1995 年 | Landsat5 | TM    | 30      | 2020 年 | Landsat8   | OLI     | 30      |

各个时年丰水期包含多幅 Landsat 影像,基于 ArcGIS10.6 和 ENVI5.1 软件对遥感影像进行投影转换、按边界裁剪以及镶嵌等预处理,针对预处理后

的各个时年丰水期多幅 Landsat 遥感影像,各时年挑选其中一幅作为样例如图 3 所示。

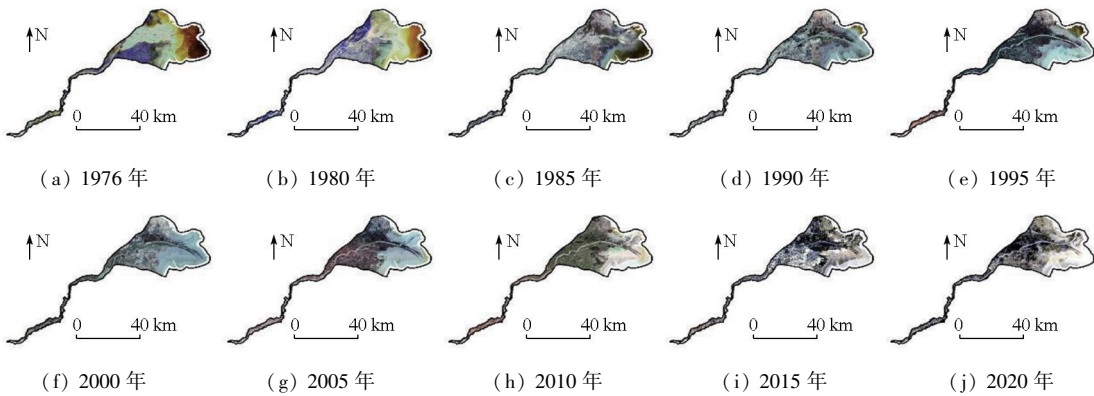


图 3 黄河滩区 1976—2020 年间遥感影像图样例

Fig. 3 Remote sensing images of the Yellow River beach area between 1976 to 2020

1.3 基于国产高分影像的土地利用类型解译

由于土地空间是人类生产生活行为的重要载体,探究黄河滩区水体演变过程对当地居民的影响,首先需要获取详细且精确的土地利用类型。由于某些土地利用类型在遥感影像上没有明显的区分特征,因此,为保证解译结果的准确性,提高后续数据

分析的可靠性,本次研究基于 2015 年和 2020 年国产卫星遥感影像 (高分 2 号、高分 7 号、北京 2 号和资源 3 号) 开展人机交互目视解译工作,基于专家解译经验和实地勘测,精确揭示了 2015 年和 2020 年 2 期黄河滩区土地利用现状。2015 年和 2020 年黄河滩区土地利用类型解译结果如图 4 所示。

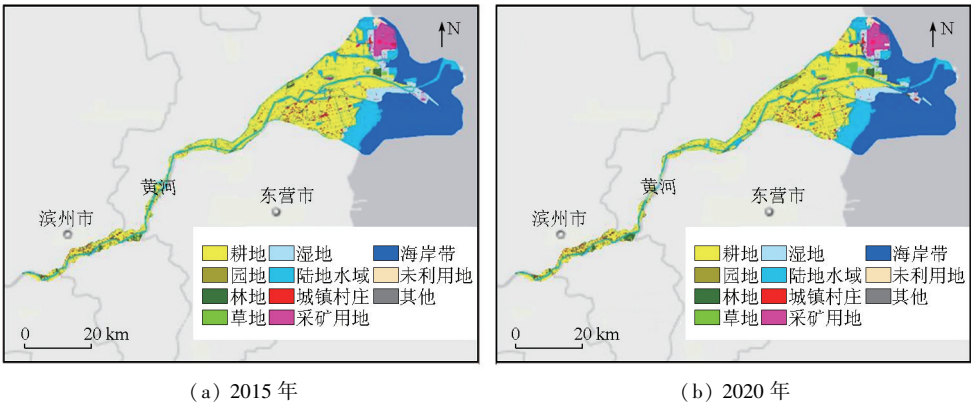


图 4 2015 年和 2020 年黄河滩区土地利用类型解译结果

Fig. 4 Interpretation results of land use types in the Yellow River beach area in 2015 and 2020

解译结果表明黄河滩区内水域广泛,包含着陆地水域、湿地和海域等利用类型。同时,黄河滩区中分布着大规模耕地和城镇村庄建设用地,是周围城镇居民的生产生活区域,承载着重要的居住和农业功能,表明滩区居民易受水体演变影响。

2 研究方法

本次研究采用基于决策树的多指数陆表水体提取方法来提取黄河滩区水体范围信息,技术路线如图 5 所示<sup>[12]</sup>。该方法是利用已有的 2000 年的 GLCF-GIW (the global land cover facility global inland water) 水体产品作为先验知识,分别分层随机选取水体和非水体样本作为训练样本,同时采用地形指数、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、改进归一化水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)、AWEI 以及归一化建筑指数(normalized difference building index, NDBI)等优化训练样本,并作为决策树模型的特征输入,进行样本训练,自适应确定分类规则,从而根据该分类规则可快速得到每幅黄河滩区水体范围提取结果。

NDVI 一般被用于表征植被覆盖和土壤,在一定程度上可用于区分水体和其他土地覆盖类型。NDVI 的计算公式为:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red}), \quad (1)$$

式中:  $\rho_{NIR}$  和  $\rho_{red}$  分别为近红外波段和红光波段的表面反射率。

MNDWI 利用短波红外和近红外之间的差异比来增加水和其他暗目标之间的差异,尤其是高建筑物阴影。MNDWI 的计算公式为:

$$MNDWI = (\rho_{green} - \rho_{SWIR1}) / (\rho_{green} + \rho_{SWIR1}), \quad (2)$$

式中:  $\rho_{green}$  和  $\rho_{SWIR1}$  分别为绿光波段和短波红外 1 波段的表面反射率。

当针对更早的 Landsat MSS 影像时,本文采用归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)利用绿光和近红外的差异比,增强水体的表达信息,弱化植被、土壤、建筑物等地物的信息。NDWI 的计算公式为:

$$NDWI = (\rho_{green} - \rho_{NIR}) / (\rho_{green} + \rho_{NIR}). \quad (3)$$

AWEI 使用 Landsat 数据的 5 个光谱带来增强水和其他暗物体之间的对比度,本次研究使用的 AWEI 计算公式为:

$$AWEI = \rho_{blue} + 2.5\rho_{green} - 1.5(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}) - 0.25\rho_{SWIR2}, \quad (4)$$

式中:  $\rho_{blue}$  和  $\rho_{SWIR2}$  分别为蓝光波段和短波红外 2 波段的表面反射率。

NDBI 使用近红外和短波红外波段来突出生产建筑用地面积,以避免城市对水体提取的影响, NDBI 计算公式为:

$$NDBI = (\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR}) / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}). \quad (5)$$

综合多指数的方法能很好地去掉云和云阴影、城市等地物类别的影响,极大地简化了计算的复杂程度,能有效地提高算法的计算速度,具有较高的精度和普适性。

本次研究采用的决策树模型是由 Breiman 等开发的分类回归树模型(classification and regression tree, CART)<sup>[15]</sup>。CART 模型既可以用于回归也可以用于分类,其核心方法是计算基尼系数,根据杂质找到最纯粹的划分方法,形成二叉树。由于 CART 模型具备清晰易懂的分类规则和大型数据库的高效计算,被广泛应用于遥感图像分类<sup>[16-17]</sup>。本文采用 GEE 提供的 CART 算法训练决策分类规则,选择 NDVI, MNDWI, AWEI 和 NDBI 作为 Landsat TM/ETM/OLI 数据集算法的输入特征,而选择 NDVI 和

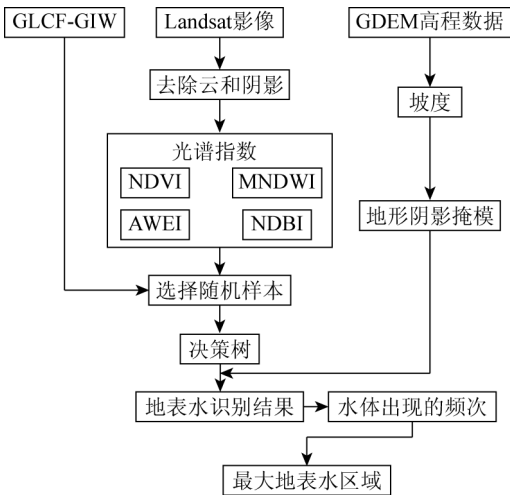


图 5 黄河滩区水体范围提取的技术路线  
Fig. 5 Technical route for water body extent extraction in the Yellow River beach area

为解决水体与山体阴影、城区和云阴影等地物混淆的难点问题,基于决策树的多指数陆表水体提取方法综合采用了地形、水体、植被和建筑物等归一化指数。本次研究首先基于 GDEM 数据集计算了研究区的坡度,用于构建山体阴影掩模。坡度被计算为每个像素与相邻像素之间的最大高程差异率。地形指数的阈值设置为山体阴影坡度大于 10°,从而对地形阴影掩模进行识别,以减弱甚至消除地形阴影对水体提取的影响。

NDWI 作为 Landsat MSS 数据集的输入特征,最后根据训练好的分类模型获取地表水覆盖结果。

由于各个时年丰水期包含多幅遥感影像,同一时年丰水期内具有多个水体范围识别结果,因此,本次研究采用各个时年丰水期最大地表水区域作为黄河滩区水体范围。最大地表水区域的识别是汇总当年丰水期内所有水体提取结果,水体出现的频次大于 2 的区域则为当年丰水期的最大地表水区域,即丰水期黄河滩区水体范围。

3 结果与分析

3.1 黄河滩区水体提取结果精度验证

本次研究基于获取的 1976—2020 年间长时序 Landsat 系列遥感影像数据集,采用基于决策树的多指数陆表水体提取方法,以 5 a 为时间间隔,识别出了各个时年黄河滩区丰水期水体覆盖最大范围。挑选每个研究时年中的一幅遥感影像水体提取结果进行精度检验。首先,使用分层随机方法选择大约 50 个水体样本点和 50 个水体样本点;其次,利用原始图像结合 Google Earth 高空间分辨率遥感图像作为

参考图像进行精度验证。汇总 10 个时点黄河滩区丰水期水体提取结果的精度验证混淆矩阵如表 2 所示,水体提取的用户精度、制图精度、综合精度均大于 94%,Kappa 系数大于 0.9,表明基于决策树的多指数陆表水体提取方法所识别的水体范围可用于后续分析。

表 2 黄河滩区水体提取结果精度验证混淆矩阵  
Tab. 2 Confusion matrix for accuracy verification of water body extraction results in the Yellow River beach area

| 地类       | 水体       | 非水体   | 用户精度/% | 制图精度/% |
|----------|----------|-------|--------|--------|
| 水体       | 9 486    | 514   | 94. 86 | 95. 17 |
| 非水体      | 481      | 9 519 | 95. 19 | 94. 88 |
| 总体精度/%   | 95. 02   |       |        |        |
| Kappa 系数 | 0. 900 5 |       |        |        |

3.2 长时序黄河滩区水体范围识别

基于 1976—2020 年 44 a 来黄河滩区丰水期水体范围识别结果如图 6 所示,可用以刻画黄河滩区丰水期水体覆盖空间范围长期演变过程趋势,本研究通过统计各个区域历史被淹没次数以计算被淹没风险。

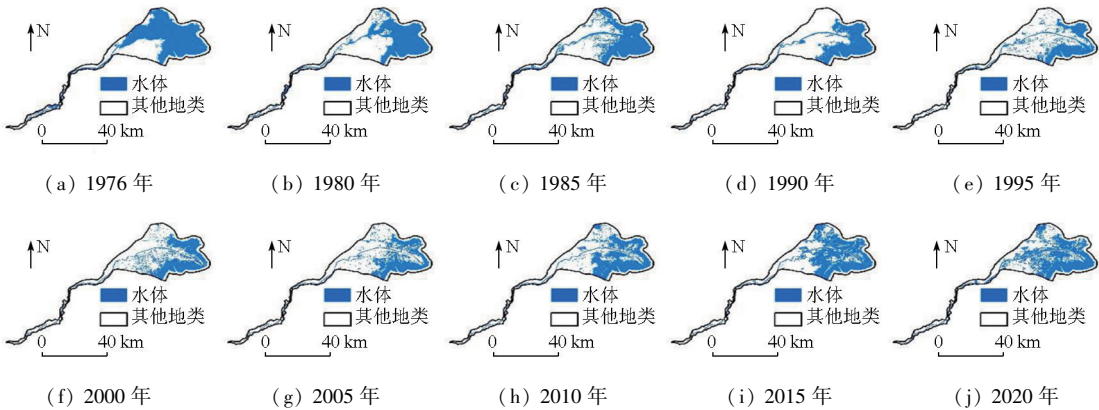


图 6 1976—2020 年间黄河滩区丰水期水体范围识别结果

Fig. 6 Identification results of water body extents in the Yellow River beach area during the wet seasons from 1976 to 2020

对黄河滩区水体范围提取结果进行统计(图 7),黄河滩区丰水期水体范围 1976—2020 年 44 a 来总体经历了先减小后增大的变化趋势,1976 年水体面积最大,达到 1 051. 14 km<sup>2</sup>,然后逐年递减至 1995 年达到最小值 539 km<sup>2</sup>,而从 1995—2020 年间水体范围又经历了波浪式上升过程。统计结果表明,44 a 来黄河滩区水体范围一直呈变化趋势,发生了明显的人为或自然影响水体范围情况,例如 1976 年和 1996 年的黄河入海口改道,1976 年之后黄河滩区水体范围逐渐缩小,1996 年之后黄河滩区水体范围逐渐增加,黄河滩区丰水期水体范围有长期增长趋势,因此应加强对黄河滩区水体范围的动态监测,避免滩区居民遭受淹没风险。

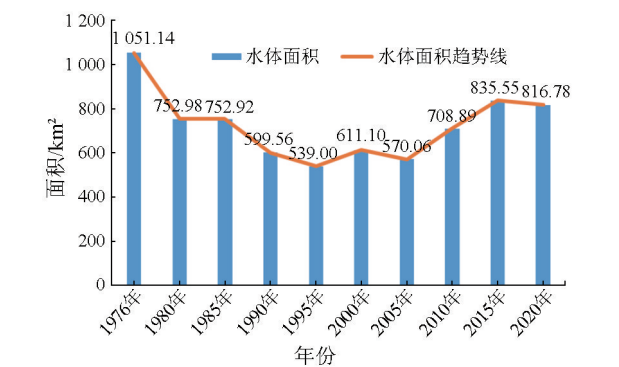


图 7 历年黄河滩区丰水期水淹范围面积统计  
Fig. 7 Statistics of the flooded area of the Yellow River beach area during the wet seasons in previous years

本次研究基于长时序丰水期水体范围监测结

果,将 1976—2020 年间黄河滩区内水体提取的空间范围进行叠加,识别 10 个时点各个区域在被淹没次数,根据历史数据推断各个区域淹没概率,并在此基础上提出淹没风险分级,淹没次数、淹没概率和淹没风险分级对应关系如表 3 所示。

在实际应用中,淹没次数最大值为 10 的区域主要为河道中心地区和沿海海域,最小值为 0 的区域主要为内陆陆地无水覆盖范围,在对黄河滩区淹没风险的分析中将其排除,1976—2020 年间黄河滩区淹没次数及其程度分级如图 8(a)所示。直观上,靠近黄河和海域的区域淹没风险较高,远离海域和黄河河道的地区淹没风险较低,但淹没风险在区域上也存在较强异质性。基于淹没次数空间结果可以得到黄河滩区淹没风险分级情况(图 8(b)),该空间信息可以用于分析微观尺度上淹没风险对城镇村

庄的影响,对于经常淹没地区来说,一旦丰水期来临,面临发生洪水风险的概率较大。

表 3 淹没次数、淹没概率、淹没风险分级对应关系  
Tab. 3 Correspondence table of inundation number, inundation probability and inundation risk classification

| 淹没次数 | 淹没概率/% | 淹没风险分级 |
|------|--------|--------|
| 10   | 100    | 经常淹没   |
| 9    | 90     |        |
| 8    | 80     |        |
| 7    | 70     |        |
| 6    | 60     |        |
| 5    | 50     | 偶尔被淹没  |
| 4    | 40     |        |
| 3    | 30     |        |
| 2    | 20     | 不经常淹没  |
| 1    | 10     |        |
| 0    | 0      |        |

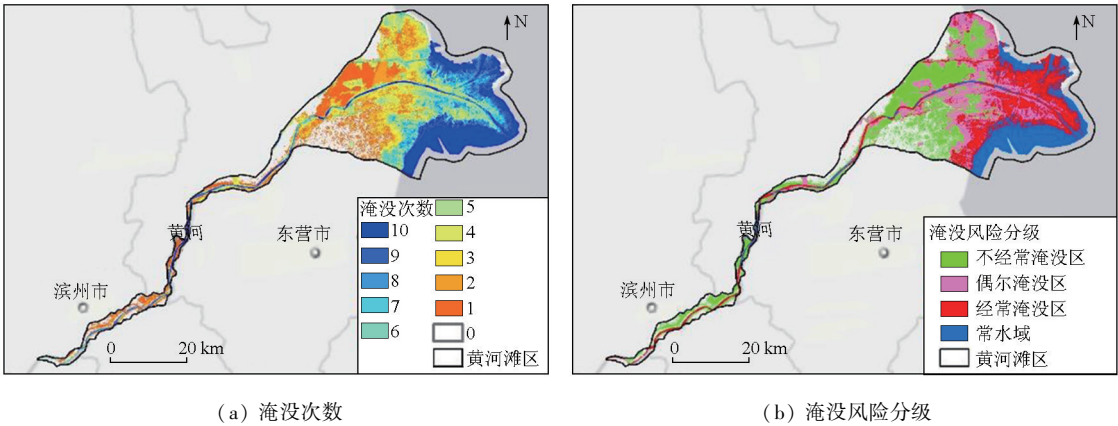


图 8 1976—2020 年黄河滩区水体淹没次数及风险分级

Fig. 8 Number and risk of inundation of water bodies in the Yellow River beach area from 1976 to 2020

淹没次数 1~9 次的范围面积统计结果如图 9 所示,除常水域外,1976—2020 年间黄河滩区内被淹没过的总面积为 1 366. 17 km<sup>2</sup>,淹没次数从 1~7 次的面积逐渐减少,然而淹没 8~9 次的区域面积逐渐增大。淹没次数在 5 次及以上的区域面积总和为 4 63. 7km<sup>2</sup>,占黄河滩区总面积的 28. 03%,占 44a

间被淹没过区域总面积的 33. 94%,表明有较大范围的区域面临着较高的被淹没风险。对于淹没次数在 5 次及以上的潜在风险区域,要严格控制土地用途,对存在农村居民点的地区要应迁尽迁,控制区域内工业活动等用地数量,最大限度减少潜在的危险和经济损失。

3.3 滩区内居民点及采矿建设用地淹没风险分析

依据黄河滩区内目视解译的土地利用分类结果提取 2015 年黄河滩区范围内面积大于 1 hm<sup>2</sup> 的城镇居民点和采矿用地等建设用地类型点位 631 个,总面积为 22. 88 km<sup>2</sup>。叠加淹没风险分级分布情况,可以得出城镇村庄居民点及采矿用地等建设用地被淹没风险(图 10)。

从图 10 中可以看出,2015 年城镇村庄居民点和采矿用地中位于不经常淹没区地块有 413 个,占总点位比例为 65. 45%,此区域为低淹没风险区,迁建迫切程度为低;位于偶尔淹没区的有 52 个,占比 8. 24%,采矿用地 46 个,居民点 6 个。此区域为中

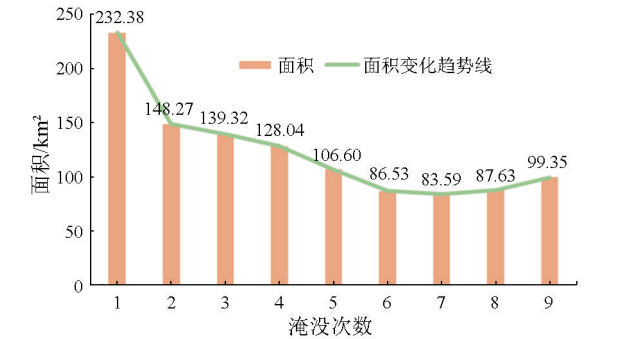


图 9 1976—2020 年间黄河滩区淹没次数面积统计分析  
Fig. 9 Statistical analysis of the area of inundation numbers in the Yellow River beach area between 1976 and 2020

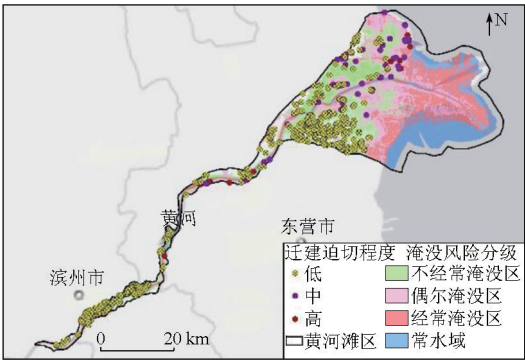


图 10 黄河滩区城镇居民点及工矿用地淹没概率及迁建迫切程度空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of inundation potential and urgency of relocation of urban settlements and industrial and mining sites in the Yellow River beach area

度淹没风险区,迁建迫切程度为中等,要注意加强交通、防汛堤坝、地下水排水性系统等防汛体系等基础设施建设;位于经常淹没区的地块有 20 个,占比 3.17%,其中采矿用地 14 个,居民点 6 个,此区域为高度淹没风险区,迁建迫切程度为高,此部分区域要加强迁建及退出工作,已经废弃的工矿用地加紧退出工作,仍在利用的工矿设施要加强防洪能力建设,水利设施也要注重牢固性建设。

2015 年黄河滩区不同淹没风险的居民点及采矿用地面积的统计结果如图 11 所示。淹没风险低(无淹没区和不经常淹没区)的面积为 19.94 km<sup>2</sup>,占总面积的 87%,其中,不经常淹没区的面积为 17.43 km<sup>2</sup>,占居民点总面积的 76%,表明虽然黄河滩区内大部分城镇村庄居民点和采矿用地等建设用地被淹没的概率较低,但是根据历史数据来看,1976—2020 年 44 a 来未被淹没过的建设用地较少,大部分建设用地依然存在被淹没的概率,政府应考虑其规避淹没风险的措施及适宜的迁建方案。中高淹没风险的

居民点总共有 2.94 km<sup>2</sup>,占总面积的 13%,其中中风险(位于偶尔淹没区)的建设用地面积为 2.79 km<sup>2</sup>,占总面积的 12%,高风险区域(位于经常淹没区)的建设用地面积为 0.16 km<sup>2</sup>,占总面积的 1%。这些居民点受淹没灾害的威胁较大,迁建迫切程度较高,应尽快开展迁建工作,防止由于水体淹没造成的人民群众生命财产损失。基于以上统计结果,按照 2020 年 6 月 1 日起执行的《山东省征地区片综合地价》,按照最高补偿标准为 129 万元/hm<sup>2</sup>,可以初步估算出黄河滩区中风险淹没区的建设用地征地补偿款成本为 3.59 亿元,高风险淹没区的建设用地征地补偿款成本约为 0.20 亿元。

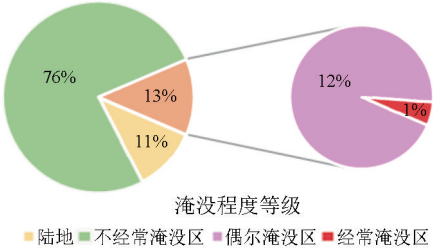


图 11 黄河滩区不同迁建迫切程度的居民点面积与比例  
Fig. 11 Proportion of the area of settlements in the Yellow River beach area with different degrees of urgency to relocate

基于 2015 年建设用地信息提取结果,对比 2020 年遥感影像,针对高淹没风险建设用地的迁建状况进行动态监测,部分居民点监测结果如表 4 所示。通过对比分析发现,2015 年存在的高淹没风险居民点在 2020 年遥感影像上已经拆除,地方政府已经认识到部分地块的潜在风险,并采取了相应的迁建等措施,统计得出高淹没风险区内无亟需搬迁的城镇村庄居民点,但仍然存在部分采矿用地位于高淹没风险区,需加强防洪设施建设。

表 4 高淹没风险居民点 2 期遥感影像监测对比

| Tab. 4 Comparison of 2 phases of remote sensing image monitoring of high inundation risk settlements |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| 年份                                                                                                   | 区域 1 | 区域 2 | 区域 3 | 区域 4 | 区域 5 |
| 2015 年                                                                                               |      |      |      |      |      |
| 2020 年                                                                                               |      |      |      |      |      |
| 图例                                                                                                   |      |      |      |      |      |
| ● 高淹没风险居民点    □ 居民点范围                                                                                |      |      |      |      |      |

4 结论与展望

黄河流域生态保护和高质量发展已成为国家战略,本次研究通过获取长时序丰水期 Landsat 遥感卫星影像,采用基于决策树的多指数陆表水体提取方法,对黄河入海口滩区 1976—2020 年间丰水期的水体范围进行识别,并通过叠加分析获取各个区域淹没风险。除常水域外,1976—2020 年间黄河滩区内被淹没过的总面积为 1 366. 17 km<sup>2</sup>,淹没次数从 1~7 次的面积逐渐减少,然而淹没 8~9 次的区域面积逐渐增大。淹没次数在 5 次及以上的区域面积总和为 463. 7 km<sup>2</sup>,占黄河滩区总面积的 28. 03%,占 1976—2020 年 44 a 间被淹没过区域总面积的 33. 94%,表明有较大范围的区域面临着较高的被淹没风险。至 2020 年,高淹没风险居民点已经拆除,但仍然存在部分采矿用地位于高淹没风险区。根据上述结果,黄河入海口滩区建设用地应明确迁建需求,科学迁建选址,完善防洪设施建设。

本次研究通过遥感技术对黄河入海口滩区水体演变过程及淹没风险进行识别,为降低滩区生产生活空间淹没风险、保障当地居民生命财产安全等现实问题的解决提供了思路。然而,受限于长时序遥感影像的获取,对暴雨和洪涝等原因造成的水体异常扩大范围识别还不清晰,下一步研究应结合地面监测数据更为精确地识别黄河滩区淹没风险。

参考文献 (References) :

[1] 赵彦伟,杨志峰,姚长青. 黄河健康评价与修复基本框架[J]. 水土保持学报,2005,19(5):131-134,173.  
Zhao Y W, Yang Z F, Yao C Q. Basic frameworks of health assessment and restoration of Yellow River[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(5): 131-134, 173.

[2] 方梦阳,刘晓煌,孔凡全,等. 一种基于 GEE 平台制作逐年土地覆盖数据的方法——以黄河流域为例[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 135-141. doi: 10. 6046/zrzyyg. 2021088.  
Fang M Y, Liu X H, Kong F Q, et al. A method for creating annual land cover data based on Google Earth Engine: A case study of the Yellow River Basin[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 135-141. doi: 10. 6046/zrzyyg. 2021088.

[3] 杨雯娜,周亮,孙东琪. 基于分区-集成的黄河流域生态脆弱性评价[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 211-218. doi: 10. 6046/zrzyyg. 2020286.  
Yang W N, Zhou L, Sun D Q. Ecological vulnerability assessment of the Yellow River Basin based on partition-integration concept[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3): 211-218. doi: 10. 6046/zrzyyg. 2020286.

[4] 王薇,吕宁江,王昕,等. 黄河三角洲水土资源空间匹配格局探析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(2): 66-70.

Wang W, Lyu N J, Wang X, et al. Study on spatial matching pattern of water and soil resources in Yellow River delta[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(2): 66-70.

[5] 李云龙,孔祥伦,韩美,等. 1986—2016 年黄河三角洲地表水体变化及其驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 105-113.  
Li Y L, Kong X L, Han M, et al. Analysis of surface water changes and driving force in Yellow River Delta from 1986 to 2016[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 105-113.

[6] 王集宁,蒙永辉,张丽霞. 近 42 年黄河口岸线遥感监测与变迁分析[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(3): 188-193. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2016. 03. 29.  
Wang J N, Meng Y H, Zhang L X. Remote sensing monitoring and change analysis of Yellow River Estuary coastline in the past 42 years[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(3): 188-193. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2016. 03. 29.

[7] Peng D, Xiong L, Guo S, et al. Study of Dongting Lake area variation and its influence on water level using MODIS data/Etude de la variation de la surface du Lac Dongting et de son influence sur le niveau d'eau, grâce à des données MODIS[J]. Hydrological Sciences Journal, 2005, 50(1): 31-44.

[8] Huang S, Li J, Xu M. Water surface variations monitoring and flood hazard analysis in Dongting Lake area using long-term Terra/MODIS data time series[J]. Natural Hazards, 2012, 62(1): 93-100.

[9] Long Y, Tang R, Wu C, et al. Estimating real-time water area of Dongting Lake using water level information[J]. Water, 2019, 11(6): 1240.

[10] Yang L, Wang L, Yu D, et al. Four decades of wetland changes in Dongting Lake using Landsat observations during 1978-2018[J]. Journal of Hydrology, 2020, 587: 124954.

[11] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. Nature, 2016, 540(7633): 418-422.

[12] Peng Y, He G, Wang G, et al. Surface water changes in Dongting Lake from 1975 to 2019 based on multisource remote-sensing images[J]. Remote Sensing, 2021, 13(9): 1827.

[13] 强海洋,崔耀平. 黄河滩区综合治理与高质量管护研究[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(5): 39-43.  
Qiang H Y, Cui Y P. Research on comprehensive management and high quality management and protection of the Yellow River beach area[J]. Natural Resource Economics of China, 2020, 33(5): 39-43.

[14] 孙煜航,杜鹏举,程舒鹏,等. 黄河下游宽滩区荒草湿地生境分布与时空变化研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(3): 85-90.  
Sun Y H, Du P J, Cheng S P, et al. Study on distribution and spatial-temporal variation of grass wetland habitats along the wide floodplain of the lower Yellow River[J]. Yellow River, 2022, 44(3): 85-90.

[15] Olshen R A, Breiman L, Friedman J, et al. Classification and regression trees[M]. New York: Chapman and Hall, 1984.

[16] Hansen M C, Reed B. A comparison of the IGBP DISCover and University of Maryland 1 km global land cover products[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(6/7): 1365-1373.

[17] Feng M, Sexton J O, Channan S, et al. A global, high-resolution

(30-m) inland water body dataset for 2000; First results of a topographic - spectral classification algorithm[J]. International Journal of Digital Earth, 2016, 9(2): 113-133.

## Evolutionary process and inundation risk identification of water bodies in the beach area of the Yellow River estuary from 1976 to 2020

LIU Jiafeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Wenkai<sup>1</sup>, DU Xiaomin<sup>1</sup>, JI Xinyang<sup>1</sup>, YANG Jinzhong<sup>1</sup>,  
FAN Jinghui<sup>1</sup>, SUN Xiyong<sup>1</sup>, TONG Jing<sup>1</sup>

- (1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China;  
2. Open Research Fund Program of Key Laboratory of Digital Mapping and Land Information  
Application, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin has become a national strategy. Hence, conducting dynamic monitoring research on the extent of water bodies in the beach area of the Yellow River estuary to avoid potential inundation risks from the evolution of water bodies holds critical significance. Based on the Landsat remote sensing image dataset for wet seasons in the long term, this study extracted the maximum water body extents in the beach area of the Yellow River estuary at 10 time points from 1976 to 2020 using the decision tree-based multi-index land surface water body extraction method. Moreover, this study calculated the historical inundation frequency of each zone through overlay analysis, further identifying the inundation risks of urban and rural settlements and mining land. The findings reveal an area of 463.7 km<sup>2</sup> inundated over five times at 10 time points. Among 631 urban and rural settlements and mining land in 2015, 413, 52, and 20 exhibited low, medium, and high inundation risks, respectively. Overall, it is necessary to specify the relocation requirements, scientifically select relocation sites, and improve the infrastructure targeting construction land like urban and rural settlements in the beach area of the Yellow River estuary.

**Keywords:** Yellow River estuary; Yellow River beach area; remote sensing technology; water body extent; inundation risk

(责任编辑: 陈昊旻)