

# 苏北废黄河三角洲海岸侵蚀脆弱性评估

刘小喜, 陈沈良, 蒋 超, 胡 进, 张 林

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 随着全球气候变化、海平面上升、人类活动加剧以及巨量泥沙来源断绝的影响, 苏北废黄河三角洲海岸正面临前所未有的侵蚀灾害风险。本文基于研究区特点和脆弱性指数法(CVI), 选取岸线变化速率、等深线变化速率、岸滩坡度、水下坡度、沉积动力环境、年平均含沙量、年平均高潮位、海岸利用类型、海岸开发适宜性等9个评估指标, 采用层次分析法(AHP)确定各评估指标权重, 结合遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术对废黄河三角洲海岸侵蚀脆弱性进行评估。结果表明废黄河三角洲整体表现为较高的侵蚀脆弱性, 其中较高以上脆弱性超过50%, 中度以上脆弱性超过75%。评估得出的海岸侵蚀脆弱性分布可为海岸带资源保护、防灾减灾、规划管理等提供重要的参考。

**关键词:** 海岸侵蚀; 脆弱性指标; 脆弱性评估; 废黄河三角洲

DOI: 10.11821/dlxb201405004

随着全球气候变化、海平面上升以及人类活动的影响, 海岸侵蚀日趋严重, 受到海岸科学家和政府部门的高度关注<sup>[1]</sup>。1855年黄河北归后, 由于巨量泥沙供应断绝, 苏北废黄河三角洲海岸和水下三角洲开始进入全面侵蚀改造过程<sup>[2]</sup>, 并持续至今, 已成为我国海岸侵蚀最严重的地区之一<sup>[3]</sup>。海岸脆弱性评估用以评估海岸带在遭受侵蚀等灾害时可能造成的损失程度, 在海岸带资源保护、规划管理决策等方面起着非常重要的作用<sup>[4]</sup>。1991年IPCC第一次评估报告以来, 海岸带脆弱性评估得到广泛开展。目前, 海岸脆弱性评估的方法主要有多判断决策分析法、指数法、决策矩阵法、分布式过程模型法、三角洲综合行为概念模型法、数值模型法、模糊决策分析法和单一影响评估法等<sup>[5]</sup>, 其中尤以Gronitz提出的综合考虑多种因子风险等级的海岸脆弱性指数法<sup>[6]</sup>(CVI, Coastal Vulnerability Index)应用最广<sup>[4, 7-10]</sup>。

不同学者在研究不同区域海岸脆弱性时采用的指标和方法往往不同, 如Gornitz等<sup>[7]</sup>选取平均高程、沉积构造、地貌类型、地面沉降速率、岸线变化速率、平均潮差、最大波高、热带风暴频率和强度指数、风浪增水高度等评估美国东南部海岸脆弱性; Thieler等<sup>[8]</sup>和Boruff等<sup>[9]</sup>采用岸滩坡度、地貌类型、相对海平面上升速率、岸线变化速率、平均潮差、平均波高等评估美国东海岸不同区域的脆弱性; Dominguez等<sup>[10]</sup>则利用海岸地貌类型、海岸演变速率以及海岸土地利用类型与结构来研究西班牙西南海岸侵蚀脆弱性; Abuodha等<sup>[11]</sup>基于澳大利亚东南海岸的特点选取基岩类型、岸滩坡度、地貌类型、屏障类型、岸线暴露度、岸线变化速率、相对海平面上升速率、平均波高、平均潮差等指标, 提

收稿日期: 2013-11-19; 修订日期: 2014-03-03

**基金项目:** 全球变化研究重大科学研究计划(2010CB951202); 河口海岸学国家重点实验室自主课题经费(SKLEC-2012KYYW06) [**Foundation:** Special Funding of Global Change Research Major Scientific Research Plan Project, No.2010CB951202; State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, ECNU, No.SKLEC-2012KYYW06]

**作者简介:** 刘小喜(1989-), 男, 湖南道县人, 硕士, 从事海岸动力地貌与遥感应用研究。

E-mail: liuxiaoxihunan@163.com

**通讯作者:** 陈沈良(1964-), 男, 浙江海盐人, 博士, 教授, 从事河口海岸地貌动力学与工程应用研究。

E-mail: slchen@sklec.ecnu.edu.cn

出海岸敏感指数 (coastal sensitivity index) 来评估海岸脆弱性; Kumar 等<sup>[12]</sup>利用岸线变化速率、海平面变化速率、岸滩坡度、平均有效波高、平均潮差、海岸带高程、海岸地貌类型、海啸增水高度等对印度奥里萨邦海岸脆弱性评估; 针对印度金奈海岸的特点, Kumar 等<sup>[4]</sup>利用岸线变化速率、海平面变化速率、有效波高、潮差、海岸带高程、近海水深、地貌类型、极端风暴潮及频率等, 结合 GIS 技术来评估海岸脆弱性; Jana 等<sup>[13]</sup>利用 RS 和 GIS 技术, 选取岸线变化速率、土地利用类型和人类活动、人口密度等评估印度巴拉索尔附近海岸侵蚀脆弱性。区域水平的海岸脆弱性评估指标和方法的选取往往受制于数据的可获得性和分析技术方法的适用性<sup>[14]</sup>, 因而研究者在不同区域开展海岸脆弱性评估时所选用的指标和方法有所差异。

国内学者在 20 世纪 90 年代主要集中在海平面上升对海岸带地区的可能影响研究<sup>[15-18]</sup>, 近年来开始关注海岸脆弱性综合评估研究<sup>[19-22]</sup>。本文利用 RS 和 GIS 技术, 基于废黄河三角洲海岸的特点, 从海岸形态特征、海岸动态特征、近岸水动力以及社会经济等要素选取适合的评估指标构建海岸侵蚀脆弱性评估体系, 采用层次分析法 (AHP, Analytical Hierarchy Process) 确定各评估指标权重, 通过计算研究区海岸脆弱性指数 (CVI) 对废黄河三角洲海岸侵蚀脆弱性进行综合评估。

1 研究区概况

废黄河三角洲位于江苏北部 (图 1), 由 1128-1855 年期间黄河南泛侵泗夺淮入海所带来的泥沙堆积形成。大致以响水县云梯关为顶点, 北起灌河口、南至射阳河口, 包括响水、滨海两县以及射阳、灌云、灌南的一部分, 整个三角洲面积约 7160 km<sup>2</sup><sup>[23]</sup>。废黄河三角洲海岸为典型的淤泥质海岸, 由于侵蚀, 目前滩面较窄, 一般宽 0.5~2.0 km, 坡度较陡, 剖面下凹特征突出<sup>[24]</sup>。海区受南黄海西北部旋转潮波系统控制, 沿岸地区为正规半日

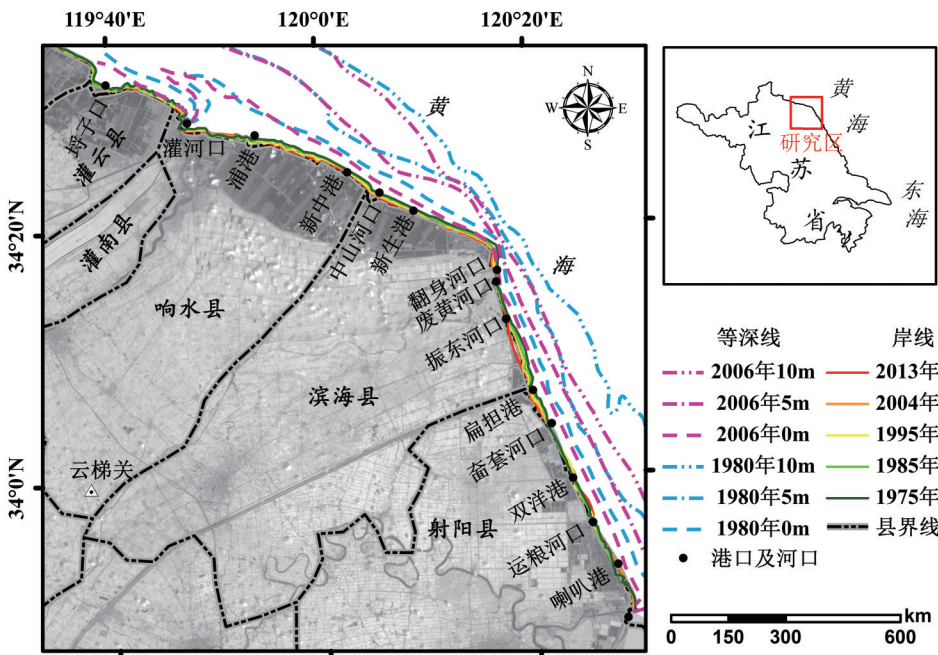


图 1 废黄河三角洲基础地理信息图

Fig. 1 Basic geographical information of the Abandoned Yellow River Delta

潮, 平均潮差在 1.5~2.9 m 之间<sup>[25]</sup>, 波浪受季风影响, 夏季以偏南浪为主, 冬季则以偏北浪为主<sup>[26]</sup>。

1855 年黄河北归后, 巨量泥沙供应断绝, 废黄河三角洲形成了以六合庄为中心的侵蚀岸段, 并呈现出四种地貌表现<sup>[27]</sup>: ① 河口迅速后退; ② 河口海岸潮下带的滩面侵蚀加剧; ③ 河口区两侧的三角洲前缘岸线后退; ④ 水下三角洲的夷平。近期, 随着防护工程的实施, 岸线后退基本得到控制, 但工程以外的岸滩和水下岸坡仍继续遭受侵蚀, 工程前沿的下蚀作用甚至有加强的趋势<sup>[24]</sup>。

2 评估方法及数据来源

2.1 评估指标体系构建

评估指标的选取需要遵循系统性、客观性、可操作性和主导性原则。海岸侵蚀脆弱性通常包括固有脆弱性和特殊脆弱性, 其中固有脆弱性指海岸的自然特征, 是海岸天然不稳定所导致的, 特殊脆弱性则主要指由人类活动的干扰所引起。对于淤泥质海岸来说, 海岸动态、海岸形态、近岸水动力 3 类指标可以全面反映海岸的自然特征<sup>[19]</sup>。岸线变化可以较为直观地表现出海岸的动态变化, 由于废黄河三角洲大部分岸段受海堤等人工防护措施的影响, 岸线变化并不能完全代表海岸的自然动态变化, 基于系统性和客观性原则, 必须同时考虑等深线的变化情况。海岸形态特征可供选取的指标较多, 基于可操作性原则选取岸滩坡度、水下坡度、沉积动力环境三个指标。近岸水动力则参照李恒鹏研究<sup>[19]</sup>中采用的 0~5 m 水深年平均含沙量和年平均高潮位数据两个指标。海岸开发利用类型和海岸开发适宜性作为社会经济因素考虑到海岸侵蚀脆弱性评估中。基于以上分析, 共选取了 9 个指标构建废黄河三角洲海岸侵蚀脆弱性评估体系(图 2)。

2.2 评估指标数据来源

(1) 岸线变化速率 多光谱遥感影像应用于岸线提取具有大范围和光谱特征丰富的优势<sup>[28]</sup>。Landsat 卫星遥感影像 (包括 MSS、TM、ETM+、OLI 等), 自 1972 年以来已经提供近 40 年的数据记录, 在大区域范围、中长时间尺度的岸线变化速率研究具有得天独厚的优势。为了减少季节变化和风暴潮过后对长时间尺度岸线变化速率的影响, 通常选取春季或夏季的遥感影像作为数据源<sup>[29]</sup>。本文选取 1975、1985、1995、2004、2013 年 5 景春季成像的影像作为数据源 (表 1)。以 2013 年遥感影像作为基准, 对其他影像进行几何校正统一投影为 WGS84 坐标 UTM 投影, 并重采样为 30m 分辨率。

废黄河三角洲岸线基本为人工岸线, 易于目视解译<sup>[30]</sup>, 采用人机交互的目视解译即可提取各年份海岸线 (图 1)。

岸线变化速率的计算方法较为常用的有 EPR (end point rate)、AOR (average of rates)、LR (linear regression) 等<sup>[31]</sup>。EPR 方法只计算初始和最终年份之间变化情况, 而不考虑中间年份的变化; AOR 方法通过计算多时段变化速率并求平均, 对于多个时段岸线

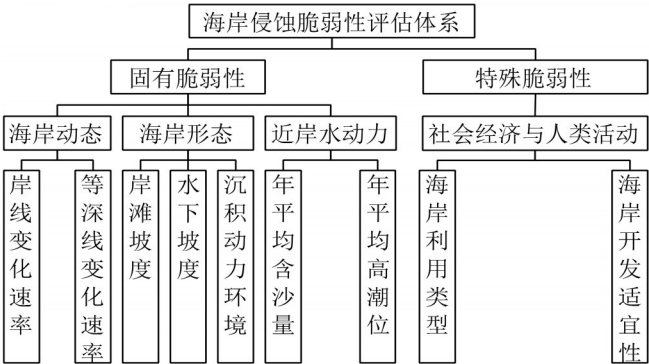


图2 海岸侵蚀脆弱性评估体系  
Fig. 2 Vulnerability assessment system of coastal erosion

表1 研究使用的Landsat数据			
Tab. 1 Landsat data used in the study			
卫星/传感器	成像日期	成像时间	空间分辨率 (m)
Landsat2/MSS	1975-05-02	-	60
Landsat5/MSS	1985-04-24	10:06:03	60
Landsat5/TM	1995-04-20	09:45:04	30
Landsat5/TM	2004-04-28	10:16:37	30
Landsat8/OLI	2013-04-21	10:38:22	30
Landsat8/OLI	2013-08-11	10:38:35	30



变化速率的计算比较有用; LR 方法可以最大限度地减少可能的随机误差和短期变化误差, 被证实为一种非常重要的岸线变化速率计算方法。本次研究采用美国地质调查局提供的数字海岸线分析系统 DSAS4.3 版本 (<http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/dsas/>) 提供的 LR 方法进行岸线变化速率计算。以埭子口为起始点, 数字化一条与岸线基本平行的线作为基准线, 每 100 m 间隔生成一个断面, 共计 1116 个断面对埭子口到射阳河口北侧的废黄河三角洲岸线变化情况进行分析。

(2) 等深线变化速率 根据王艳红等<sup>[24]</sup>研究的成果, 通过几何配准和数字化, 得到 1980 和 2006 年废黄河三角洲海域的 0 m、5 m 和 10 m 等深线 (图 1)。利用 DSAS 插件计算 1980-2006 年间 0 m、5 m、10 m 等深线变动的距离, 其中正值为向海推进, 负值为向陆后退。最后将三条等深线变化速率的平均值作为等深线变化速率值。

(3) 岸滩坡度 利用两个时间相近的卫片, 假定该时段内岸滩坡度没有变化, 由于两个时相的潮位不同, 提取得到的水边线位置也不同, 通过量取某一断面两条水边线的距离, 除以两时相潮位差就可以得到各断面的坡度值<sup>[32]</sup>。由于本文只需得到各岸段相对坡度的变化情况, 因此可以用两个时相水边线距离值的变化作为坡度值的变化。距离越大, 其坡度越小。选取 Landsat8 卫星 2013 年 4 月 21 日和 2013 年 8 月 11 日两景影像, 提取其水边线, 并用 DSAS 插件计算各断面的两水边线的距离值。

(4) 水下坡度 水下坡度数据通过数字化 2007 年灌河口到射阳河口的 1:15 万海图, 得到 5 m 和 10 m 等深线, 利用 DSAS 插件计算得到各断面 5 m 和 10 m 等深线的距离值, 并以此距离值的变化作为水下坡度的相对变化。距离越大, 坡度越小。

(5) 沉积动力环境 根据 2012 年 7 月研究区近岸海域采集的 140 个表层沉积物样品, 参照陆勤等的研究<sup>[33]</sup>, 利用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测得粒度值, 利用 Flemming 三角图示法<sup>[34]</sup>, 得到研究区沉积动力环境分区。

(6) 年平均含沙量和年平均高潮位 年平均含沙量和年平均高潮位参照李恒鹏的研究结果<sup>[19]</sup>。

(7) 海岸利用类型 海岸利用类型参照江苏近海海洋综合调查与评估总报告<sup>[35]</sup>。

(8) 海岸开发适宜性 海岸开发适宜性参照江苏省海岸带和海涂资源的综合调查报告<sup>[25]</sup>。将各岸段围海造田、土地农业利用、盐业生产、牧业生产、滩涂贝类养殖等适宜性等级分别打分, 最后求取平均值作为海岸开发适宜性综合分。

### 2.3 评估指标分级标准和权重

不同的评估指标数据具有不同的量纲, 在运用 CVI 评估海岸侵蚀脆弱性之前, 需要将各指标数据进行分级。自然断点法基于统计数值内部自然集群特征进行分级, 可使不同级别之间的差异最大化<sup>[36]</sup>。本研究采用自然断点法将所有指标分为 1~5 五等级进行量化, 分别为低脆弱性、较低脆弱性、中度脆弱性、较高脆弱性、高脆弱性。等级数值越小, 脆弱性越低; 等级数值越高, 脆弱性越高。在构建海岸侵蚀脆弱性评估体系基础上, 结合业内专家意见, 构造两两比较判断矩阵, 运用 AHP 方法, 得到各指标的权重。各指标的分级标准及权重 (表 2)。岸线变化速率和等深线变化速率作为海岸侵蚀的动态指标权重值最高, 分别为 0.321 和 0.202; 沉积动力环境反映区域的动力环境和沉积环境特征, 权重值为 0.147。年平均含沙量和年平均高潮位作为动力指标与海岸侵蚀脆弱性有因果关系, 但限于资料获取等因素经专家讨论在本次研究中权重值均被降低为 0.069; 经济指标海岸利用类型和海岸开发适宜性表征海岸侵蚀后可能造成经济影响的大小, 分别获得权重 0.042 和 0.048。

### 2.4 评估方法

脆弱指数法 (CVI) 是 Gornitz 在 1991 年提出的, 用来评估海岸带在海平面上升等背景下的脆弱程度。CVI 的数学表达式有两种, 一种为“积”的形式 (公式 1), 另一种为

表 2 海岸侵蚀脆弱性评估指标分级标准及权重

Tab. 2 Index grading and weighting of coastal erosion vulnerability assessment

评估指标	脆弱性大小					权重	排序
	低 (1)	较低 (2)	中度 (3)	较高 (4)	高 (5)		
岸线变化速率 (m/a)	> 4	-4~-4	-10~-4	-20~-10	< -20	0.321	1
等深线变化速率 (m/a)	> 0	-30~0	-30~-60	-80~-60	< -80	0.202	2
岸滩坡度 (水边线距离 m)	< 200	200~600	600~1000	1000~2000	> 2000	0.031	9
水下坡度 (等深线距离 km)	< 3	3~5	5~7	7~10	> 10	0.071	4
沉积动力环境	淤积	相对稳定	微侵蚀	侵蚀	强侵蚀	0.147	3
年平均含沙量 (g/L)	-	0.230	0.215	0.200	-	0.069	5
年平均高潮位 (cm)	-	321	339	357	-	0.069	5
海岸利用类型	-	渔业	工业	港口	-	0.042	8
海岸开发适宜性	1~1.8	1.8~2.6	2.6~3.4	3.4~4.2	4.2~5.0	0.048	7

注：年平均含沙量、年平均高潮位、海岸利用类型等数据由于研究区收集到的只有三个数值，因此只做三类划分。

“和”的形式 (公式 2)。当各指标的权重不能确定时可采用“积”的形式，当能确定各指标权重时“和”的评估结果更好<sup>[22]</sup>。本文采用“和”的形式。

$$CVI_{\text{乘积}} = \sqrt[n]{(\prod_{i=1}^n P_i)/n}$$

(1)

$$CVI_{\text{和}} = \sum_{i=1}^n P_i C_i$$

(2)

其中， $P_i$ 为单项指标的评分值， $C_i$ 为单项指标的权重。低脆弱性、较低脆弱性、中度脆弱性、较高脆弱性、高脆弱性的评分值分别为 1、2、3、4、5。

3 侵蚀脆弱性评估结果与讨论

3.1 岸线变化速率及面积变化

岸线的淤进与后退往往表现为海岸面积的增减。根据 1975-2013 年 5 期遥感影像监测研究区海岸面积变化结果 (表 3) 分析可知，研究区总体上四个时段均表现为侵蚀，但侵蚀速率呈下降趋势，净面积变化速率由 1975-1985 年间的-1.9313 km<sup>2</sup>/a 下降到 2004-2013 年间的-0.8762 km<sup>2</sup>/a，面积侵蚀主要是岸线后退所致，侵蚀速率减低则主要是岸堤和护岸工程对岸线的保护作用；此外，研究区部分岸段也表现出淤积现象，淤积速率大体上呈现出上升趋势，面积增加速率由 1975-1985 年间的 0.0262 km<sup>2</sup>/a，增长到 2004-2013 年间的 0.2612 km<sup>2</sup>/a，速率增长了近 10 倍，主要是近期滩涂围垦导致面积增加。自 1975 年以来侵蚀总面积为 52.840 km<sup>2</sup>，淤积总面积为 5.335 km<sup>2</sup>，净面积变化为-47.505 km<sup>2</sup>。不同岸段侵蚀淤积特征也有明显的不同。埭子口—灌河口岸段，侵蚀速率较小并呈下降趋势，淤积面积在 2004-2013 年间骤增，主要是这段时期港口建设围海所致；灌河口—中山河口岸段侵蚀速率呈现先增加后减少的趋势，淤积速率在 1995-2004 和 2004-2013 两个时段都保持在 0.05 km<sup>2</sup>/a 以上，淤积主要在灌河口—浦港岸段，主要为大米草等生物促淤作用；中山河口—废黄河口岸段主要表现为侵蚀，侵蚀速率呈下降趋势，淤积面积较小；废黄河口—扁担港口岸段侵蚀速率呈现先减后增趋势，淤积面积较小；扁担港口以南岸段侵蚀速率呈降低趋势，淤积速率升降往复，并且于 2004-2013 时段淤积面积超过了侵蚀面积，净增 0.485 km<sup>2</sup> 土地。

研究区岸线变化主要表现为岸线侵蚀后退，只有灌河口—浦港岸段以及扁担港口以南等少部分岸段表现为岸线向海推进。岸线侵蚀最严重的区域为断面号 775-802 岸段，1975

表3 1975–2013年间研究区海岸侵蚀淤积面积统计 (km<sup>2</sup>)

Tab. 3 Variations in coastal areas in the study area during 1975–2013 (km<sup>2</sup>)

时段	土地 变化	岸段					研究区 总变化	年均
		埭子口— 灌河口	灌河口— 中山河口	中山河口— 废黄河口	废黄河口— 扁担港口	扁担港口 以南		
1975-1985	减少	-2.629	-3.516	-5.314	-4.340	-3.776	-19.575	-1.9575
	增加	0.079	0.091	0.004	0.003	0.085	0.262	0.0262
	净增	-2.550	-3.425	-5.310	-4.337	-3.691	-19.313	-1.9313
	年均	-0.2550	-0.3425	-0.5310	-0.4337	-0.3691	-1.9313	
1985-1995	减少	-1.690	-4.883	-3.369	-1.909	-1.917	-13.768	-1.3768
	增加	0.005	0.025	0.094	0.075	1.581	1.78	0.1780
	净增	-1.685	-4.858	-3.275	-1.834	-0.336	-11.988	-1.1988
	年均	-0.1685	-0.4858	-0.3275	-0.1834	-0.0336	-1.1988	
1995-2004	减少	-0.726	-3.247	-2.885	-1.222	-1.180	-9.26	-1.0289
	增加	0.011	0.503	0.006	0.001	0.421	0.942	0.1047
	净增	-0.715	-2.744	-2.879	-1.221	-0.759	-8.318	-0.9242
	年均	-0.0794	-0.3049	-0.3199	-0.1357	-0.0843	-0.9242	
2004-2013	减少	-0.625	-2.150	-1.598	-5.058	-0.806	-10.237	-1.1374
	增加	0.406	0.651	0.003	0.000	1.291	2.351	0.2612
	净增	-0.219	-1.499	-1.595	-5.058	0.485	-7.886	-0.8762
	年均	-0.0243	-0.1666	-0.1772	-0.5620	0.0539	-0.8762	
1975-2013	减少	-5.670	-13.796	-13.166	-12.529	-7.679	-52.840	-1.3905
	增加	0.501	1.270	0.107	0.079	3.378	5.335	0.1404
	净增	-5.169	-12.526	-13.059	-12.450	-4.301	-47.505	-1.2501
	年均	-0.136	-0.330	-0.344	-0.328	-0.113	-1.2501	

注：负数代表侵蚀，正数代表淤积。

年以来累积岸线后退达到1400 m以上，运用LR方法计算的岸线变化速率均超过-30 m/a；断面680-720岸段基本平衡，岸线变化速率绝对值在4 m/a范围内；灌河口—浦港岸段以及扁担港口以南两个淤积岸段平均变化速率在6 m/a左右。按照岸线变化速率指标脆弱性标准（表2），得到研究区岸线侵蚀脆弱性分布图。研究区岸线侵蚀整体表现为较高的脆弱性，中度以上脆弱性占比72.85%，其中高脆弱性占16.31%、较高脆弱性占40.14%、中度脆弱性占16.40%，较低脆弱性和低脆弱性分别占比17.83%和9.32%。低脆弱性主要分布在灌河口南侧—浦港岸段以及双洋港—喇叭港岸段；高脆弱性主要分布废黄河口尖两侧岸段以及振东河口—岔套口岸段，此外浦港—中山河口岸段也有零星分布；岔套口—双洋港主要表现为较低脆弱性，该岸段基本上保持着冲淤平衡。

3.2 等深线变化速率

废黄河三角洲海域海底地形整体上呈现南冲北淤现象，尤以10 m等深线表现最为突出。10 m等深线在1980-2006年间，以灌河口以南1 km左右为界(图3)，北面表现为向海推进，南面表现为向陆侵蚀后退，振东河口—喇叭

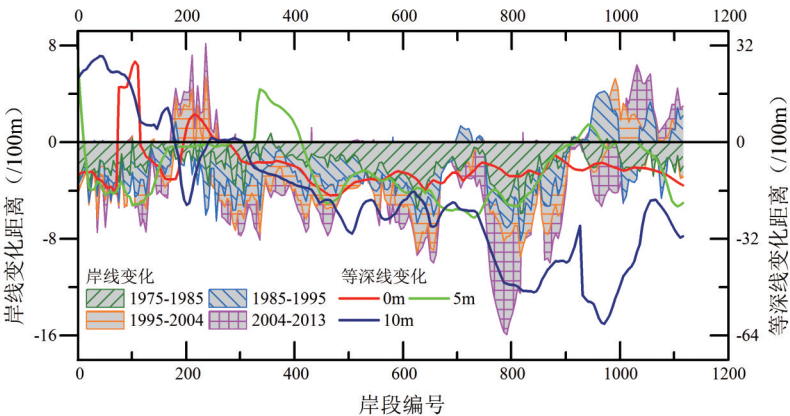


图3 废黄河三角洲1975-2013年岸线变化距离及1980-2006年等深线变化距离  
Fig. 3 The shoreline changing distance from 1975 to 2013 and the isobaths changing distance from 1980 to 2006 in the Abandoned Yellow River Delta

海岸段 10 m 等深线后退速率大都超过 100 m/a，侵蚀最严重区域达到 231 m/a，后退距离约 6 km；5 m 和 0 m 等深线变化速率相对较小，新中港以南区域也以 50 m/a 左右的速率向陆地后退。研究区等深线变化速率指标的脆弱性 (图 4b)，中度脆弱性以上的基本分布在中山河口以南区域；中山河口以北区域则主要表现为较低和低脆弱性。

3.3 岸滩及水下坡度

通过提取 2013 年成像时间较近且分别属于高低潮位的两景遥感影像的水边线，利用两期水边线的距离来表征岸滩坡度特征 (图 4c)。废黄河三角洲除了埭子口及以南、灌河口—新中港、中山河口—新生港、运粮河口—喇叭港等部分区域两期水边线的距离超过 1000 m 以外，大部分岸段小于 1000 m，翻身河口—振东河口甚至小于 100 m。

由 5~10 m 等深线的距离来表征水下 5~10 m 的坡度特征，废黄河三角洲海域从北到南表现出坡度由小变大再变小的趋势 (图 4d)。新生港—振东河口岸段，5~10 m 等深线距离基本上小于 3500 m，废黄河口尖处甚至小于 1000 m，对于淤泥质海岸来说，相对适合建深水港口，但要注意防范海岸侵蚀作用。

3.4 沉积动力环境

沉积物的组成和分布与水动力密切相关，利用沉积物的结构组成可以反演沉积环境的水动力条件。Flemming 三角图式法，利用沉积物组成及其反映的水动力强度将三角形分为 25 个分区，以区分不同沉积环境及其亚沉积环境<sup>[34]</sup>。如图 5 所示，从 S 到 E，越靠近砂端元沉积物越粗；从 I 到 VI，越靠近粉砂端元表示沉积物所处的动力条件越强。根据动力条件的不同以及泥沙来源情况，将研究区分为微侵蚀区、侵蚀区和相对稳定区三个亚环境 (图 6)。

微侵蚀区主要包括埭子口到中山河口岸段，自岸向海延伸到水深 10 m 左右。该区沉积物三角图式 (图 5a) 显示，数据点主要集中在 II、III 动力分区中，动力条件相对较强；沉积物粒径较粗，在 B、C、D、E 均有分布。该区域泥沙来源，不仅有灌河径流来沙、近岸水下侵蚀来沙，同时还有来自废黄河尖向灌河口运移的泥沙流输沙<sup>[37]</sup>，并且还可能来自东面水下台地侵蚀的泥沙转移来沙<sup>[38]</sup>，泥沙来源相对较为丰富。

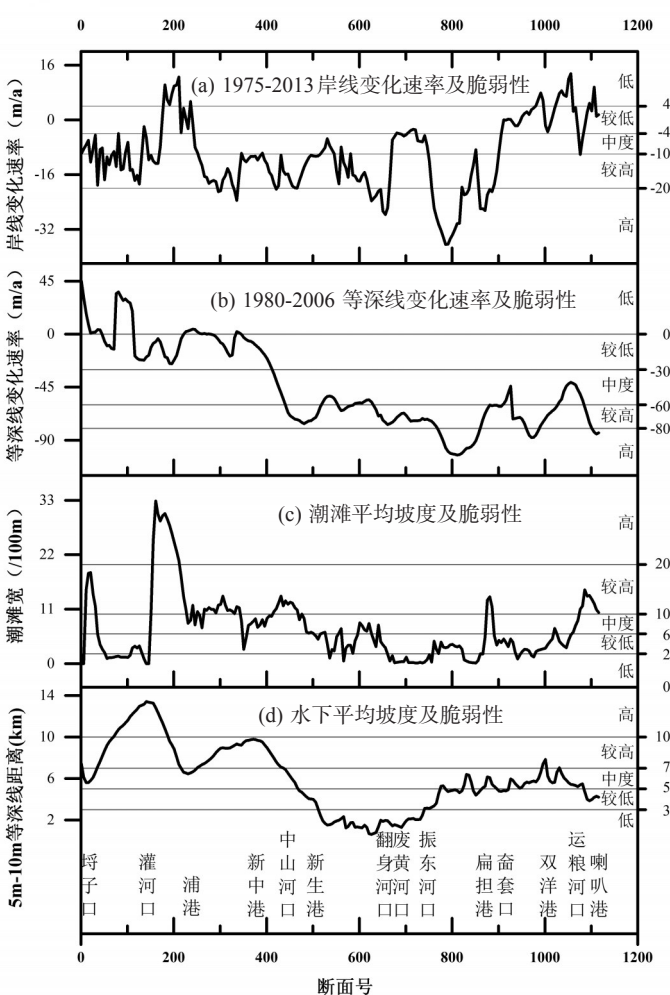


图4 废黄河三角洲部分评估指标大小及其脆弱性分布

Fig. 4 Some of the assessment index and vulnerability along the Abandoned Yellow River Delta

，但要注意防范海岸侵蚀作用。



侵蚀区主要包括中山河口—扁担港口岸段，自岸向海延伸到10 m等深线以外。该区沉积物三角图式(图5b)显示，数据点主要集中在第Ⅱ动力分区中，少量落在第Ⅰ分区，动力条件最强；沉积物粒径主要分布在D、E两区，在C区也有少量分布。该区域泥沙来源主要为近岸和水下侵蚀来沙，以及沿岸流带来的少量南部淤泥质海岸细颗粒物[陆勤]。近岸，由于岸滩变陡缩窄，波浪的破波带范围变窄，到达岸边时常形成较强的上冲流，波浪冲刷下来的细颗粒物随涨落潮流搬运，造成岸滩的强烈侵蚀；水下三角洲南侧较深海域(10~20 m水深)虽然不能被常浪作用，但却受到强潮流的冲刷作用。波浪和潮流的共同作用，造成该区的强烈侵蚀。

相对稳定区主要包括扁担港口以南岸段和埕子口至中山河口较深海域。该区沉积物三角图式(图5c)显示，数据点主要集中在Ⅱ、Ⅲ动力分区中，动力条件相对最弱；沉积物粒径较细，大都分布在D、E两区。扁担港口以南岸段发育有比较宽阔的潮滩沉积，潮滩呈现上淤下冲的现象，海岸显示出由淤积向侵蚀过渡的特征<sup>[38]</sup>。

年平均含沙量、年平均高潮位、海岸利用类型、海岸开发适宜性等四个指标数据主要参照相关文献<sup>[15, 25, 35]</sup>，本文不再赘述。

3.5 侵蚀脆弱性指数及风险等级

根据计算得到的9个指标的脆弱性及各自权重，代入公式2中得到各断面的CVI值，其值域分布在1.9~4.0之间，利用自然分割法进行脆弱性等级划分，将CVI值为1.9~2.4、2.4~2.7、2.7~3.2、3.2~3.6、3.6~4.0分别划为低脆弱性、较低脆弱性、中等脆弱性、较高脆弱性、高脆弱性，得到废黄河三角洲海岸侵蚀脆弱性分布图(图6)。整体而言，废黄河三角洲表现较高的海岸侵蚀脆弱性，其中高脆弱性岸线长28.44 km(占22.57%)、较高脆弱性36.49 km(占28.96%)、中度脆弱性30.82 km(占24.46%)、较低脆弱性19.27 km(占15.29%)、低脆弱性10.99 km(占8.72%)。中山河口—新生港、废黄河口尖两侧以及振东河口—扁担港口为高脆弱性分布区；埕子口—灌河口主要表现为中度及较高脆弱性，灌河口—浦港多为较低脆弱性，浦港—中山河口多为较高脆弱性，新生港附近部分岸段表现为中

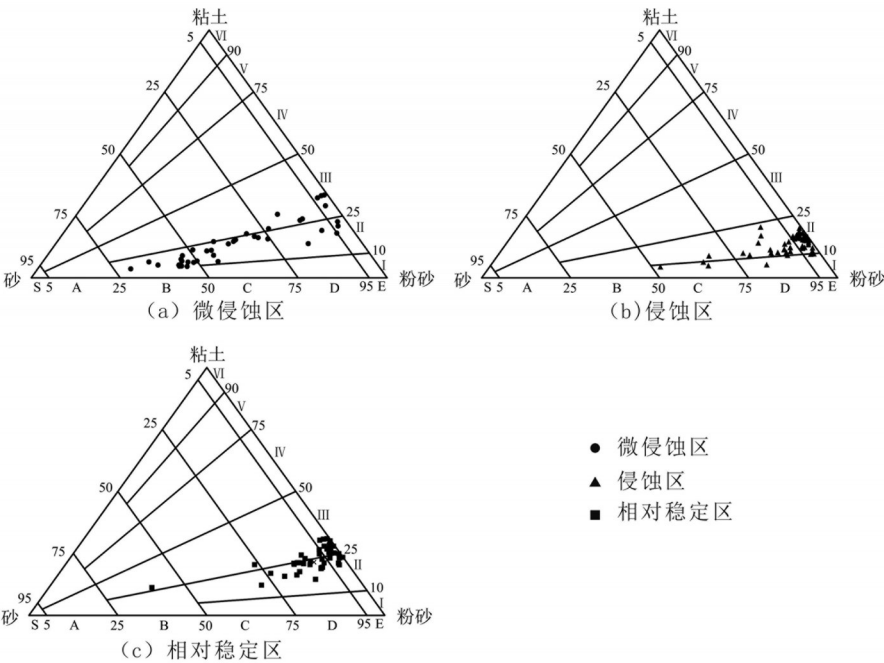


图5 废黄河三角洲海区沉积物三角图式

Fig. 5 Ternary diagrams on the basis of sand/silt/clay ratios in the Abandoned Yellow River Delta



度脆弱性, 废黄河口到振东河口为中度脆弱性, 岔套口—喇叭港则主要表现为中度以下脆弱性, 其中双洋港—运粮河口为低脆弱性。

评价结果显示, 海岸侵蚀脆弱性与岸线变化脆弱性表现为较大的相关性。岸线侵蚀后退严重的区域通常也表现为较高的侵蚀脆弱性, 而较低脆弱性则往往分布在岸线侵蚀后退速率较小或者淤积的区域。但是海岸侵蚀脆弱性综合评价结果与岸线变化脆弱性单一指标评价结果也存在一定的差异性。岸线变化单一指标和海岸侵蚀脆弱性综合指标评价的结果中度以上的脆弱性岸段占比基本相当, 分别为72.85和75.99%, 其中岸线变化单一指标中度以上脆弱性岸段主要集中在较高脆弱性, 而综合指标则在高脆弱性、较高脆弱性和中度脆弱性分布比较均衡。与岸线变化单一指标相比, 综合评价指标体系从自然、社会经济等方面来反映海岸侵蚀脆弱性, 指标更全面、广泛, 评价结果更合理。

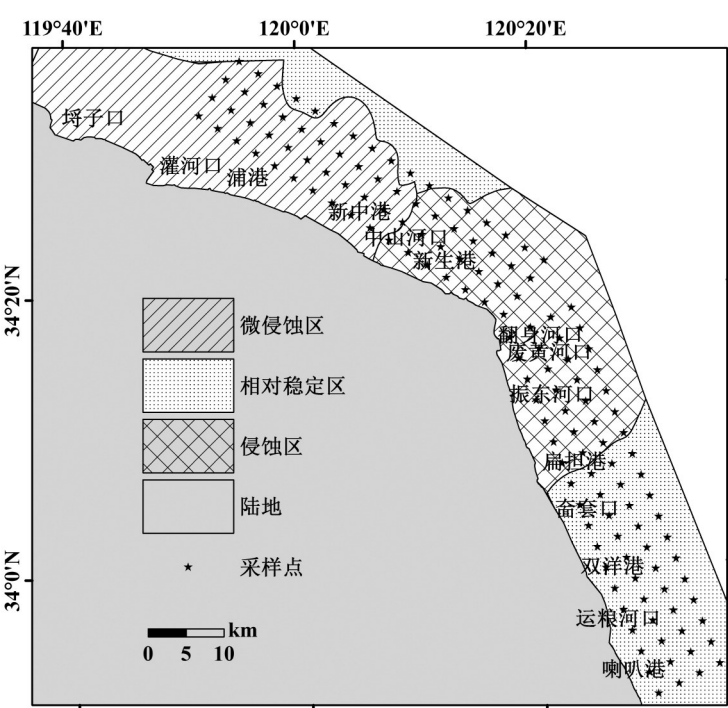


图6 废黄河三角洲沉积动力环境分区  
Fig. 6 The sedimentary dynamic environment of the Abandoned Yellow River Delta

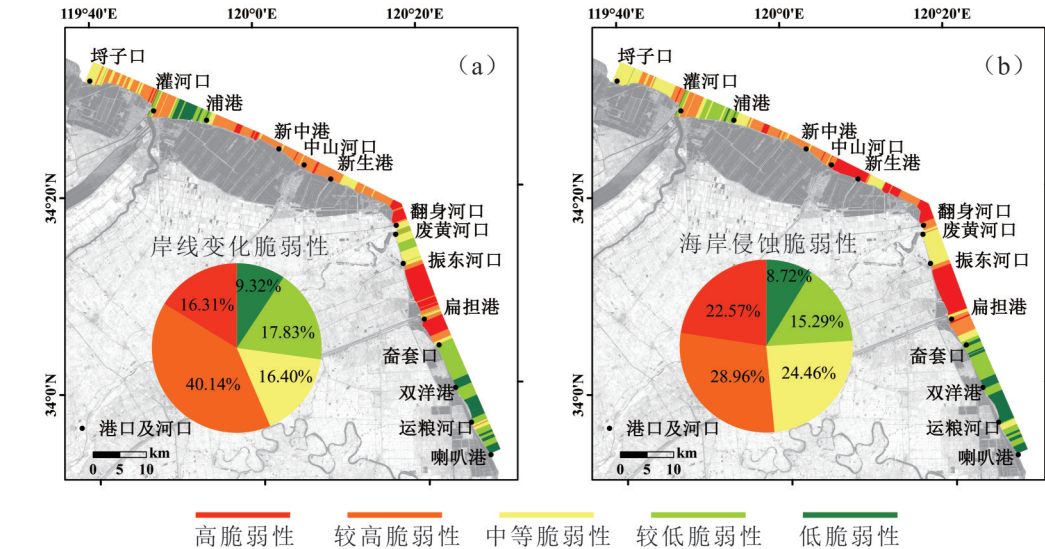


图7 废黄河三角洲海岸侵蚀脆弱性分布图  
Fig. 7 Vulnerability distribution of coastal erosion along the Abandoned Yellow River Delta

## 4 结语

废黄河三角洲海岸表现为较高侵蚀脆弱性的主要原因是泥沙来源的断绝；由松散沉积物组成的三角洲地形地貌特征使其本身即表现为易侵蚀性；海平面上升引起的风暴潮频率增加、潮流和波浪动力的加强，则加剧了海岸的侵蚀；近期，人类活动如滩涂围垦工程、港口工程、护岸工程等则越来越成为影响废黄河三角洲侵蚀脆弱性分布的主导因子。

利用1975-2013年近40年遥感影像对苏北废黄河三角洲岸线变化进行动态监测，监测结果显示废黄河三角洲大部分岸段表现为侵蚀，只有灌河口南侧一浦港以及双洋港以南少部分岸段表现为稳定或淤积；废黄河三角洲海岸仍然表现为较高的侵蚀速率，但侵蚀速率有减缓的趋势。

综合考虑海岸现状、海岸动态、近岸水动力以及社会经济等构建的海岸侵蚀脆弱性评价结果与岸线变化单一指标评价结果表现为较大的相关性，但综合指标脆弱性评价结果更加合理。

基于AHP和CVI方法得到了废黄河三角洲海岸侵蚀脆弱性分布图，总体显示研究区海岸表现为较高的侵蚀脆弱性，随着未来全球性增温和海平面上升持续，废黄河三角洲将面临更大的侵蚀风险，迫切需要进一步加强海岸侵蚀防护。

## 参考文献 (References)

- [1] Xia Dongxing, Wang Wenhai, Wu Guiqiu et al. Coastal erosion in China. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(5): 468-475. [夏东兴, 王文海, 武桂秋 等. 中国海岸侵蚀述要. *地理学报*, 1993, 48(5): 468-475.]
- [2] Yu Zhiying, Chen Dechang, Jin Liu. Formation and erosion of the abandoned Yellow River Delta in the northern Jiangsu. *Acta Oceanologica Sinica*, 1986, 8(2): 197-206. [虞志英, 陈德昌, 金镠. 江苏北部旧黄河水下三角洲的形成及其侵蚀改造. *海洋学报*, 1986, 8(2): 197-206.]
- [3] Zhang Yang, Chen Shenliang. Remote sensing analysis of spatial and temporal changes of the coastal area in the abandoned Huanghe River Delta in the northern Jiangsu Province. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(2): 166-175. [张阳, 陈沈良. 苏北废黄河三角洲海岸时空变化遥感分析. *海洋科学进展*, 2009, 27(2): 166-175.]
- [4] Kumar A A, Kunte P D. Coastal vulnerability assessment for Chennai, east coast of India using geospatial techniques. *Natural Hazards*, 2012, 64(1): 853-872.
- [5] Chu Jinlong, Gao Shu, Xu Jiangang. Risk and safety evaluation methodologies for coastal systems: A review. *Marine Science Bulletin*, 2005, 24(3): 80-87. [储金龙, 高抒, 徐建刚. 海岸带脆弱性评估方法研究进展. *海洋通报*, 2005, 24(3): 80-87.]
- [6] Gornitz V. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1991, 89(4): 379-398.
- [7] Gornitz V M, Daniels R C, White T W et al. The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea-level rise in the US Southeast. *Journal of Coastal Research*, 1994, SI 12: 327-338.
- [8] Thieler E R, Hammar-Klose E S. National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise, preliminary results for the US Atlantic Coast. *The Survey*, 2000.
- [9] Boruff B J, Emrich C, Cutter S L. Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. *Journal of Coastal Research*, 2005, 21(5): 932-942.
- [10] Dominguez L, Anfuso G, Gracia F J. Vulnerability assessment of a retreating coast in SW Spain. *Environmental Geology*, 2005, 47(8): 1037-1044.
- [11] Abuodha P A O, Woodroffe C D. Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: A case study from southeast Australia. *Journal of Coastal Conservation*, 2010, 14(3): 189-205.
- [12] Kumar T S, Mahendra R S, Nayak S et al. Coastal vulnerability assessment for Orissa State, east coast of India. *Journal of Coastal Research*, 2010, 26(3): 523-534.
- [13] Jana A, Bhattacharya A K. Assessment of coastal erosion vulnerability around Midnapur-Balasore coast, eastern India using integrated remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2013, 41(3): 675-686.

- [14] Cutter S L, Mitchell J T, Scott M S. Revealing the vulnerability of people and places: A case study of Georgetown County, South Carolina. *Annals of the Association of American Geographers*, 2000, 90(4): 713-737.
- [15] Ji Zixiu, Jiang Zixun, Zhu Jiwen et al. Impacts of sea level rise on coastal erosion in the Changjiang Delta and North Jiangsu Coastal Plain. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(6): 527-534. [季子修, 蒋自巽, 朱季文 等. 海平面上升对长江三角洲和苏北滨海平原海岸侵蚀的可能影响. *地理学报*, 1993, 48(6): 516-526.]
- [16] Li Pingri, Fang Guoxiang, Huang Guangqing. Impacts on sea level rising on the economic development of Zhujiang Delta and countermeasures. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(6): 527-534. [李平日, 方国祥, 黄光庆. 海平面上升对珠江三角洲经济建设的可能影响及对策. *地理学报*, 1993, 48(6): 527-534.]
- [17] Hang Mukang, Sancun Xinnan, Xichuang Gongshi et al. Vulnerability assessment of coastal plain west of Bohai Sea, North China, to sea level rise. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 14(2): 107-116. [韩慕康, 三村信男, 细川恭史 等. 渤海西岸平原海平面上升危害性评估. *地理学报*, 1994, 14(2): 107-116.]
- [18] Yang GuiShan, Shi Yafeng. Possible impacts of sea level rise on major projects and urban development in the coastal areas in China. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(4): 302-309. [杨桂山, 施雅风. 海平面上升对中国沿海重要工程设施与城市发展的可能影响. *地理学报*, 1995, 50(4): 302-309.]
- [19] Li Hengpeng, Yang Guishan. Determination of classification and risk in the coastal zone of Yangtze Delta and North Jiangsu. *Journal of Natural Disasters*, 2001, 10(4): 20-25. [李恒鹏, 杨桂山. 长江三角洲与苏北海岸动态类型划分及侵蚀危险度研究. *自然灾害学报*, 2001, 10(4): 20-25.]
- [20] Liu Xi, Shen Fang. Fuzzy comprehensive assessment on the Yangtze River Delta coastal erosion vulnerability. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(Suppl.1): 196-200. [刘曦, 沈芳. 长江三角洲海岸侵蚀脆弱性模糊综合评价. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(增刊1): 196-200.]
- [21] Yin J, Yin Z, Wang J et al. National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise for the Chinese coast. *Journal of Coastal Conservation*, 2012, 16(1): 123-133.
- [22] Liu Hongwei, Sun Xiaoming, Wen Dongguang et al. Vulnerability evaluation of the Caofeidian coastal area based on coastal vulnerability index method. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(3): 105-109. [刘宏伟, 孙晓明, 文冬光 等. 基于脆弱指数法的曹妃甸海岸带脆弱性评估. *水文地质工程地质*, 2013, 40(3): 105-109.]
- [23] Ren Mei'e, Zeng Zhaoxuan, Cui Gonghao et al. *Three Major Deltas in China*. Beijing: Higher Education Press, 1994. [任美镔, 曾昭璇, 崔功豪 等. 中国的三大三角洲. 北京: 高等教育出版社, 1994.]
- [24] Wang Yanhong. Study of variation features during coastal erosion processes on the abandoned Huanghe River Delta and integrated protection measures [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2006. [王艳红. 废黄河三角洲海岸侵蚀过程中的岸滩变异与整体防护研究. 南京: 南京师范大学, 2006.]
- [25] Ren Mei'e. Investigation Report of the Coastal Zone and Tidal Flat Resources in Jiangsu Province. Beijing: China Ocean Press, 1986. [任美镔. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告. 北京: 海洋出版社, 1986.]
- [26] Chen Hongyou. Recent trend and protection of delta coast of Old Yellow River estuary in northern Jiangsu. *Marine Science Bulletin*, 1991, 10(4): 59-65. [陈宏友. 近期苏北废黄河三角洲海滩动态及其防护. *海洋通报*, 1991, 10(4): 59-65.]
- [27] Zhang Renshun, Lu Liyun, Wang Yanhong. The mechanism and trend of coastal erosion of Jiangsu Province in China. *Geographical Research*, 2002, 21(4): 469-478. [张忍顺, 陆丽云, 王艳红. 江苏海岸侵蚀过程及其趋势. *地理研究*, 2002, 21(4): 469-478.]
- [28] Boak E H, Turner I L. Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, 2005, 21(4): 688-703.
- [29] Moore L J. Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 2000, 16(1): 111-124.
- [30] Yang Zhixiang. Monitoring coastline changes and tidal flat reclamation in Jiangsu using remote sensing technology. *Yellow River*, 2013, (1): 85-87. [杨智翔. 利用遥感技术监测江苏海岸线变迁与滩涂围垦. *人民黄河*, 2013, (1): 85-87.]
- [31] Deepika B, Avinash K, Jayappa K S. Shoreline change rate estimation and its forecast: remote sensing, geographical information system and statistics-based approach. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2013, Doi: 10.1007/s13762-013-0196-11-22.
- [32] Huang Haijun, Li Chengzhi, Guo Jianjun. Application of Landsat images to the studies of the shoreline changes of the Huanghe River Delta. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14(2): 29-37. [黄海军, 李成治, 郭建军. 卫星影像在黄河三角洲岸线变化研究中的应用. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(2): 29-37.]
- [33] Lu Qin, Chen Shenliang. Distribution of surface sediments on the subaqueous delta of the Abandoned Yellow River Delta. *Shanghai Land & Resources*, 2011, 32(1): 14-19. [陆勤, 陈沈良. 废黄河三角洲海域表层沉积物分布特征. *上海国土资源*, 2011, 32(1): 14-19.]
- [34] Flemming B W. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10): 1125-1137.



- [35] 908 Special Office of Jiangsu Province. Comprehensive Survey and Evaluation Report on Coastal Ocean of Jiangsu. Beijing: Science Press, 2012. [江苏省 908 专项办公室. 江苏近海海洋综合调查与评估总报告. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [36] Wang S Y, Liu J S, Yang C J. Eco-environmental vulnerability evaluation in the Yellow River Basin, China. *Pedosphere*, 2008, 18(2): 171-182.
- [37] Zhang Dongsheng, Zhang Changkuan. Dynamic analysis of estuarine deposition in Guanhe Estuary. *Journal of Hohai University*, 1993, 21(4): 29-37. [张东生, 张长宽. 灌河口沙咀成因分析及治理研究. 河海大学学报, 1993, 21(4): 29-37.]
- [38] Ha Changwei. Erosion processes and sedimentary features along the muddy coast in Jiangsu Province [D]. Beijing: East China Normal University, 2009. [哈长伟. 江苏淤泥质海岸侵蚀与沉积特征研究 [D]. 北京: 华东师范大学, 2009.]

## Vulnerability assessment of coastal erosion along the Abandoned Yellow River Delta of northern Jiangsu, China

LIU Xiaoxi, CHEN Shenliang, JIANG Chao, HU Jin, ZHANG Lin

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The Abandoned Yellow River Delta of northern Jiangsu faces serious erosion hazard due to global climate change, sea-level rise, human activities and shortage of sediments. In this present work, coastal erosion hazard and vulnerability level along the Abandoned Yellow River Delta have been assessed with the aid of RS and GIS. The coastal vulnerability index (CVI) is used to map the relative vulnerability in the study area. Shoreline change rate, depth contours change rate, coastal slope, subaqueous slope, sedimentary dynamic environment, suspended sediment concentration, mean high tidal height, utilization of coastal types and coastal development suitability are used as the evaluation indexes to assess the coastal erosion hazard and vulnerability level. Analytic hierarchy process (AHP) is used to calculate the weights of each evaluation index. The results show that the Abandoned Yellow River Delta presents a high coastal erosion vulnerability level. The vulnerability level indicates that over 50% of the study area presents a high and very high vulnerable level, and over 75% of coastal area presents above the moderate vulnerable level. The coastal erosion vulnerability map prepared from this study can provide reference for the coastal zone protection, disaster prevention and mitigation, proper planning and management of this coastal region.

**Key words:** coastal erosion; vulnerability index; vulnerability assessment; Abandoned Yellow River Delta