

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.06.011

# 环渤海区域滩涂资源开发承载力时空演变特征

陆 彦, 杨元媛, 陆永军, 侯庆志

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 有效识别和评估各滩涂区域资源开发承载力时空变化的差异, 有利于滩涂资源的科学规划, 对实现沿海滩涂资源的高效利用与保护具有重要意义。本文针对渤海半封闭海湾滩涂特征的空间差异性, 基于“驱动力-状态-影响”模型, 构建了滩涂资源开发承载力评估体系, 对研究区域7个评价单元在4个代表年份的资源承载力进行了评估, 阐明了海湾滩涂资源开发承载力时空演变特征。结果表明: 围填工程减弱了渤海湾滩涂资源开发承载力, 工程大规模建设期间(2003—2012年)各评价单元承载力均呈下降趋势, 2012年后随着国家围填海管控措施的实施, 滩涂承载力有回升态势; 在空间上滩涂资源承载力表现为湾顶的降幅高于海湾南部区域, 滩涂开发前后天津港附近区域承载力较弱, 黄骅港以南滩涂养殖区承载力较强。

**关键词:** 滩涂资源; 承载力; 时空演变; 评价单元; 渤海湾

**中图分类号:** TV213.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2022)06-0967-11

滩涂是处于动态变化中的海陆过渡地带, 是城市发展的重要后备资源。为了缓解经济快速增长带来的土地供需矛盾, 滩涂以其优越的地理位置承载了人类众多的开发活动。不科学的开发将会导致滩涂功能退化、生态环境恶化等一系列问题<sup>[1]</sup>, 如近年来海岸线侵蚀、水质恶化、风暴潮频发、河口防洪纳潮能力减弱等<sup>[2-5]</sup>, 这些问题又进一步限制了沿海地区的发展。因此, 滩涂开发适宜性研究和承载力评估是当前发展阶段的迫切需要, 对沿海地区的可持续发展具有重要意义<sup>[6]</sup>。

目前国内外学者已针对滩涂演变过程、滩涂开发的影响等进行了大量研究, 主要从水动力条件、水质及海洋带生态环境等方面阐述了滩涂围垦的影响, 侧重于对其单一功能的定量分析<sup>[7]</sup>。然而, 滩涂作为多功能复合生态系统, 更具系统性和科学性的研究应该综合分析潮波系统、潮滩稳定、海堤防洪防灾等要素对滩涂开发的响应, 合理地评估各要素之间的互馈与累积效应, 从资源承载力的角度量化分析滩涂开发状况。目前对海岸滩涂承载能力的研究集中在海滩旅游承载力<sup>[8-10]</sup>和滩涂生物资源承载力<sup>[11-13]</sup>两方面, 而基于可持续发展理论, 综合社会、资源及环境等多方面因素的滩涂资源开发承载力研究尚处于起步阶段。潘桂娥<sup>[14]</sup>于2014年提出了滩涂资源承载力的概念, 即以维护生态环境可持续发展为前提, 以保证滩涂资源对社会经济、人口及生态等方面的支撑持续平衡增长为条件, 滩涂资源可以达到的最大支撑能力。郭巨海等<sup>[15]</sup>探讨了滩涂资源承载力的量化方法, 基于“驱动力-状态-影响-响应”框架模型, 初步构建了承载力评价指标体系, 但并未将其运用于具体滩涂的承载力计算。总体来说, 针对滩涂资源开发承载力的研究目前仍处于探索阶段, 尚未形成系统和完备的评估体系及评价方法, 缺少对滩涂功能识别、承载力约束条件和临界范围以及综合评价方法的系统研究。Zhang等<sup>[16]</sup>以环渤海滩涂为对象构建承载力评估体系, 定量评估了辽东湾、渤海湾和莱州湾三大环渤海海湾的滩涂资源承载能力, 分析了三大海湾滩涂资源承载力的变化趋势。鉴于整片海湾不同区域的自然条件和开发程度存在明显的空间差异, 在滩涂资源承载力评估中, 以整片海域的滩涂作为研究对象无法反映滩涂资源承载力的空间特征, 应对研究区域内滩涂进行科学合理的评价单元划分, 以有效识别各

**收稿日期:** 2022-06-02; **网络出版日期:** 2022-10-20

**网络出版地址:** <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20221020.1534.002.html>

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3106103)

**作者简介:** 陆彦(1970—), 男, 江苏姜堰人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水力学及河口海岸泥沙研究。

E-mail: ylu@nhri.cn

**通信作者:** 杨元媛, E-mail: 1223781034@qq.com

滩涂区域资源承载力关键制约因素的贡献,从而得到更科学的评估结果。

本研究以滩涂发育丰富且经历大规模开发的渤海湾为研究对象,综合海域与陆域划分,对海湾内滩涂资源进行评价单元划分,并分别评估不同单元在开发前后4个代表年份的承载力变化趋势,揭示典型海湾滩涂资源开发承载力的时空演变特征,识别同一海湾不同区域的滩涂承载开发能力的差异。研究成果对区域滩涂围垦模型的优化及提升具有重要意义,可为滩涂利用与保护的实施和管理规划提供科学参照。

## 1 研究区域

渤海湾北起河北省唐山市乐亭县大清河口,南至山东省利津县新黄河口,是位于渤海西部的半封闭海湾,湾内滩面稳定、岸坡平缓,沿岸发育有集中连片的海岸滩涂,约占中国滩涂资源的1/3<sup>[1]</sup>。丰富的滩涂资源也为围填海工程的建设提供了大量的空间,自2003年以来,渤海湾进行了大规模的海岸滩涂围垦工程,不到10 a时间渤海湾岸线形态发生了极大的变化<sup>[17]</sup>,工程范围主要包括北部曹妃甸工业区、西北部天津港的建设以及南部黄骅港的扩张和东营沿岸滩涂养殖的发展。曹妃甸围填工程于2003年启动水电等基础设施建设,2006年曹妃甸码头初步建成,2012年曹妃甸工业园基本建成,围填面积约250 km<sup>2</sup>;天津港于2006年开始建设东疆、北疆和南疆港区,2012年建成了临港工业区和南港工业区,港区总面积接近300 km<sup>2</sup>;黄骅港于2010年正式开航,建成面积近100 km<sup>2</sup>;东营市沿岸规划了近180 km<sup>2</sup>的滩涂围垦养殖用地。大规模工程建设使得当地资源环境受到了较大的破坏,渤海湾滩涂资源的最大开发承载能力研究直接关系到环渤海地区的可持续发展。

滩涂是处于动态变化中的海陆过渡地带,本研究综合陆域与海域特点对渤海湾滩涂进行评价单元的划分。陆域分区以行政区划为界,滩涂所属行政管辖范围不同,反映了各省市滩涂资源开发需求的差异。沿岸共包括唐山市、天津滨海新区、沧州市、滨州市、东营市等5个地区,陆域划分为5个评价单元(图1(a));海域分区结合渤海湾水动力场及水体自净能力,反映了不同区域潮滩水动力条件的差异,本研究将渤海湾划分为3个海域(图1(a))。海域一位于西北湾顶,是整个海湾的弱流区,渤海湾主要氮磷污染来源永定新河和海河均直接汇入该区域<sup>[18]</sup>,该区域水污染严重且污染物难以扩散;海域二位于渤海湾中部,天津港以南海域正对渤海中部,受外部潮波直接影响,潮流动力较强;海域三位于渤海湾西南部,包含整个黄骅港和东营沿岸滩涂养殖区域。

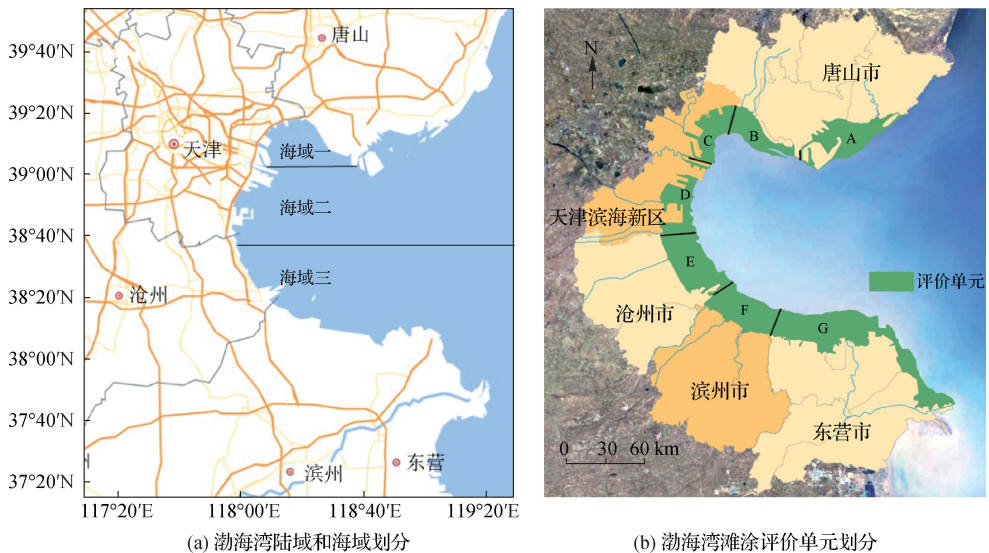


图1 渤海湾海陆划分及滩涂资源评价单元划分

Fig. 1 Sea-land division and tidal flat resource evaluation unit division of Bohai Bay

综合以上陆域和海域划分结果,海域一将唐山市划分为曹妃甸东部和西部2个研究区域,海域一将天津滨海新区划分为天津港南部和北部2个区域,海域三根据陆域行政单元不同划分为3个区域,分别为沧州、滨州和东营沿岸滩涂。综合海域与陆域的划分,本文以-5 m等深线以浅滩涂为研究对象,将研究区域划分为7个评价单元(评价单元A—G)(图1(b))。

评价单元A位于曹妃甸东部浅滩,该区域受老龙沟潮汐通道体系控制;评价单元B位于曹妃甸西部,为曹妃甸与天津港两大工程作用最明显的区域;评价单元C位于天津港北部;评价单元D位于天津港南部,渤海湾大部分围填海工程均集中于此;评价单元E位于黄骅港北部;评价单元F位于黄骅港南部;评价单元G为东营沿海,该区域近年来进行了大量的滩涂围垦养殖活动,没有大规模涉海工程。

## 2 资料与方法

### 2.1 评价指标体系的建立

构建科学合理的指标体系是评估滩涂开发承载力的关键<sup>[19]</sup>,本研究在前人研究<sup>[15-16]</sup>的基础上,针对同一海湾不同区域的差异性,构建“驱动力-状态-影响(Driving-State-Impact, DSI)”承载力评估体系。DSI模型包含滩涂开发的外部驱动因素、滩涂资源的自然开发条件以及滩涂围垦对周围环境的影响等3个方面,能够全面评估滩涂资源的开发承载能力。模型的评估体系包含目标层、准则层、要素层和指标层4个层次。目标层为滩涂开发承载力;准则层包括驱动力、状态、影响;每个准则层由1个或几个要素进行指示,驱动力层主要考虑社会经济条件,状态层包括水域污染状况和自然资源条件,影响层考虑潮波系统、风暴潮和防洪3个影响要素;最后用指标层的指标对每个要素进行量化。

(1) 驱动力指标。驱动力指标与区域社会经济状况有关,本研究选取单位面积GDP和人均土地面积2个指标反映区域的社会经济条件。单位面积GDP为地区生产总值GDP与土地面积的比值,反映了地区支持滩涂开发的经济实力,单位面积GDP越高,滩涂资源开发利用的驱动力越强,可更好地为滩涂开发提供经济支持;人均土地面积为常住人口与土地面积的比值,体现了地区对于土地的需求,人均土地面积越小,土地资源越紧张,对滩涂资源开发的需求程度越大。

(2) 状态指标。滩涂的围垦方式与开发程度取决于滩涂区域自身的资源条件,决定了滩涂资源开发的基础,选取水域污染状况与自然资源条件2个方面的指标来表征滩涂的自然资源条件。在水域污染状况方面,渤海湾大规模的涉海工程使得海域水交换能力降低,污染物难以扩散,水质污染更加严重,选取工业废水排放量与水质2个指标表征滩涂的水域污染状况,工业废水排放越多,水质越差,越不利于滩涂的进一步开发;在自然资源条件方面,大规模的围填海工程占用了大量的滩涂资源,使得自然岸线大量向人工岸线转变,选取自然岸线比例表征岸线的变化,可以较好地体现不同地区滩涂开发程度的差异性。

(3) 影响指标。高强度的滩涂开发破坏了原始的岸线形态和海域的自然属性,引起海洋动力条件与生态环境的连锁反应,甚至对海堤稳定、河口行洪能力造成巨大影响,本研究结合潮波系统、防洪和风暴潮灾害3个方面综合考虑开发给周围环境带来的影响。滩涂围垦将天然潮滩转换为人工岸线,使潮滩失去了对潮汐能的存储与耗散作用<sup>[20]</sup>,导致近岸潮流动力和沿岸潮差发生改变,选取潮差与涨落潮流速作为反映潮波系统变化的评价指标;风暴潮是影响滩涂短周期动力地貌过程的异常动力条件,高强度开发使得风暴潮灾害加重<sup>[21]</sup>,本文选取风暴潮增水反映滩涂开发对海堤安全稳定的影响;本文研究区域渤海湾入海河流众多,滩涂开发束窄了上游洪水泄入外海的通道,对河口行洪产生一定的影响,选取河口洪水位即主要河口闸下最高潮位变化表征滩涂资源开发对泄洪的影响<sup>[22]</sup>。具体评价指标体系见表1。

表 1 评价指标体系  
Table 1 Evaluation index system

目标层	准则层	要素层	指标层	单位	
滩涂资源 承载力	驱动力	社会经济条件	单位面积 GDP	万元/km <sup>2</sup>	
			人均土地面积	人/km <sup>2</sup>	
	状态	水域污染状况	工业废水排放量	万 t	
			水质	/	
			自然岸线比例	%	
	影响	自然资源条件	潮差	m	
			潮波系统	涨落潮流速	m/s
			风暴潮	风暴潮增水	cm
			防洪影响	河口洪水位	m

## 2.2 评价方法

(1) 指标标准化。在滩涂承载力指标体系中,因指标的特性、单位存在显著的差异,无法进行直接比较和统一的计算,首先需要对评价指标进行标准化计算。在本文的评价体系中,驱动力层和状态层指标统称为状态类指标,可根据指标数据与承载力变化的相关性分为正效应指标和负效应指标,运用标准的量纲一化公式对指标进行标准化计算。

影响层主要考虑指标相对于初始指标值的变化程度,实际评价中一般参考行业规范及专家经验对数据进行影响程度等级划分,据此进行标准化处理,影响类指标标准化评级如表 2 所示。

表 2 影响类指标标准化取值

Table 2 Standardized values of impact indicators

指标标准化评级	潮差/%	涨落潮流速/%	风暴潮增水/cm	河口洪水位/%
[0, 0.2)	> 10	> 80	> 12	> 10
[0.2, 0.4)	(8, 10]	(60, 80]	(9, 12]	(8, 10]
[0.4, 0.6)	(6, 8]	(40, 60]	(6, 9]	(6, 8]
[0.6, 0.8)	(4, 6]	(20, 40]	(3, 6]	(4, 6]
[0.8, 1.0]	≤ 4	≤ 20	≤ 3	≤ 4

(2) 熵权法确定权重。熵权法是客观权重法,根据各项指标提供的信息熵大小确定权重,可以消除确定权重时的人为主观影响,使结果更加合理。具体方法如下:

$$R_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^m x'_{ij} \quad (1)$$

$$e_j = - (\ln m)^{-1} \sum_{i=1}^m R_{ij} \ln R_{ij} \quad (2)$$

$$g_j = 1 - e_j \quad (3)$$

$$w_j = (1 - e_j) / \sum_{i=1}^n (1 - e_j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中:  $R_{ij}$  为计算指标  $x'_{ij}$  的比重,即各指标标准化处理之后的结果;  $m$  为每个指标的取值次数;  $n$  为指标个数;  $e_j$  为第  $j$  项指标的熵值;  $g_j$  为第  $j$  项指标的差异性系数,值越大表明相应指标在评价中的重要性越强;  $w_j$  为各指标的权重。

(3) 承载力计算。基于标准化数据和指标权重计算结果,可对滩涂资源承载力进行计算:

$$v_j = \sum_{j=1}^n w_j R_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中:  $v_j$  为综合承载力评价价值。综合评价价值越大, 表明评价区域内驱动力越强, 自身资源条件越好, 滩涂开发利用带来的影响越小, 可承载力开发的能力越强, 仍可对该滩涂区域进行合理的使用。

### 2.3 潮波数学模型

为了研究滩涂开发对近岸潮波的影响, 本文分别选取 2003 年(大规模开发起点)、2006 年(大规模开发初期)、2012 年(大规模开发结束)和 2018 年 4 个代表年份, 建立渤海湾潮波数学模型, 潮波计算采用半隐式非结构网格有限体积海洋模型, 模型控制方程及数值模拟离散方法等参见文献[23]。模型范围包括整个渤海, 开边界位于大连、烟台一线, 对研究区域内网格进行了局部加密。模型开边界潮位过程由中国海域潮汐预报得到, 底床边界考虑了摩阻, 基本糙率取 0.017; 模拟时间分别为 2003 年、2006 年、2012 年和 2018 年的 6 月 1—30 日。选用 2010 年实测数据与模型运行结果进行模型验证, 验证结果显示潮位均方差小于 9.24 cm, 流速均方差小于 0.15 m/s, 模型采用的计算参数基本合理, 能够较好地模拟该海域潮波系统及潮流运动过程。

## 3 结果与分析

### 3.1 指标数据计算与分析

#### 3.1.1 状态类指标

(1) 社会经济、环境指标。本研究中, 社会经济条件包括单位面积 GDP(图 2(a))和人均土地面积(图 2(b)), 数据来源于渤海湾 3 个省市(河北省唐山市、沧州市, 天津市滨海新区, 山东省滨州市、东营市) 2003 年、2006 年、2012 年和 2018 年统计年鉴; 工业废水排放量(图 2(c))数据来源于上述 4 个年份北海区海洋环境公报。

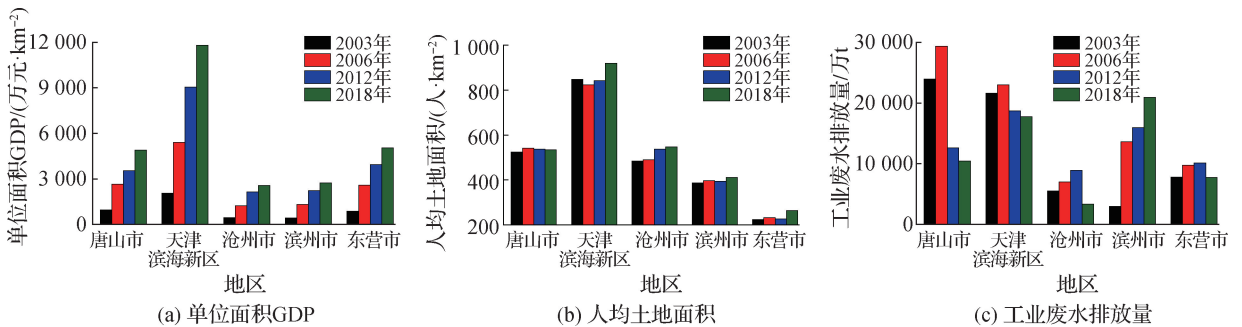


图2 研究区 4 个典型年份的社会经济、环境指标变化

Fig. 2 Changes of socio-economic and environmental indicators in four typical years in the study area

由图 2 可见, 各地区单位面积 GDP 逐年增加, 其中天津滨海新区的单位面积 GDP 高于其他地区, 有较强的经济实力支持滩涂开发; 人均土地面积逐年变化不明显但呈现明显的空间分布, 东营市的人均土地面积较少, 向海要地的需求较大; 工业废水排放量各地区基本呈现先增加后减小的趋势。

(2) 水质。为了便于水质指标的量化计算, 根据《海水水质标准: GB 3097—1997》<sup>[24]</sup> 将海域水质进行打分, 劣 IV 类水得分为 0 分, I 类水质得分为 1 分, 水质越好, 得分越高, 依次对各评价单元水质进行打分。

通过查阅各研究年份的《北海区海洋环境公报》《天津市海洋环境质量公报》《河北省海洋环境质量公报》《山东省海洋环境质量公报》等相关资料, 得到各评价单元海水水质的年际变化情况以及空间分布特征, 表 3 为各评价单元水质综合得分情况。

表 3 渤海湾各评价单元不同年份水质综合得分

Table 3 Water quality in cities along the Bohai Bay in different years

年份	评价单元 A	评价单元 B	评价单元 C	评价单元 D	评价单元 E	评价单元 F	评价单元 G
2003 年	0.90	0.90	0.50	0.64	0.90	0.90	0.90
2006 年	0.90	0.90	0.45	0.60	0.90	0.90	0.90
2012 年	0.90	0.60	0.20	0.46	0.50	0.60	0.70
2018 年	0.90	0.60	0.30	0.50	0.50	0.60	0.70

(3) 自然岸线比例。通过遥感影像得到与滩涂围垦有关的岸线变化情况, 渤海湾各代表年份岸线变化情况如图 3 所示。

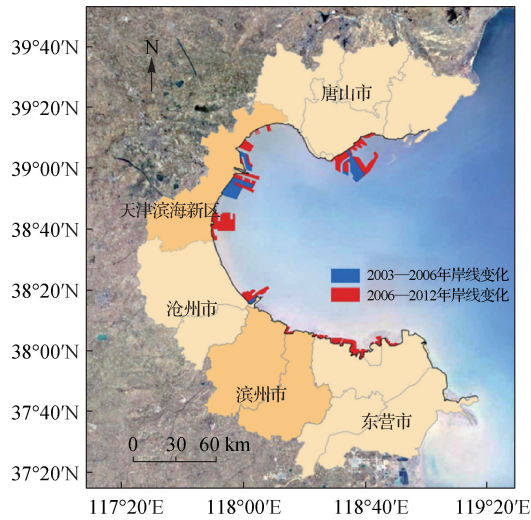


图 3 渤海湾岸线变化情况

Fig.3 Changes of coastline in Bohai Bay

统计各评价单元的初始自然岸线长度以及围填后剩余的自然岸线长度, 定义自然岸线比例为各评价单元现有岸线长度与初始自然岸线长度(2003 年)的比值, 具体指标数据如表 4 所示。

表 4 渤海湾各区段自然岸线比例

Table 4 Proportion of natural shoreline in each research area

评价单元	2003 年		2006 年		2012 年		2018 年	
	长度/km	长度/km	自然岸线比例/%	长度/km	自然岸线比例/%	长度/km	自然岸线比例/%	
A	54.6	54.6	100.0	30.2	55.2	30.2	55.2	
B	51.7	51.7	100.0	51.1	98.8	51.1	98.8	
C	57.9	52.9	91.4	14.1	24.4	14.1	24.4	
D	57.9	54.9	94.8	17.1	29.4	17.1	29.4	
E	47.8	47.8	100.0	40.8	85.4	40.8	85.4	
F	81.1	81.1	100.0	63.4	78.2	63.4	78.2	
G	97.9	97.9	100.0	69.5	71.0	69.5	71.0	

以 2003 年为起始年份, 2006 年呈现为曹妃甸、天津港及黄骅港小规模单点围填, 2012 年大规模开发基本成型, 2003—2012 年岸线形态发生了巨大的变化, 各年份自然岸线比例呈下降的趋势; 2012 年以后由于国家海洋局执行严格的围填海管控, 评价单元自然岸线比例与 2012 年保持一致。

### 3.1.2 影响类指标

(1) 潮波系统影响。本文影响层指标潮差及涨落潮流速来自 2.3 节中潮波模型的模拟结果, 渤海湾工程建设对潮流动力的影响主要集中在  $-5\text{ m}$  等深线以浅滩涂区域, 本研究沿  $-5\text{ m}$  等深线选取特征点 56 个(每个评价单元取 8 个特征点), 分析滩涂开发前后潮差及涨落潮流速的变化。

整个海湾的涨落潮流速空间分布呈现从外海至近岸逐渐减小的趋势(表 5)。从年际变化来看, 随着围填规模的增大, 工程附近涨落潮流速相对于 2003 年变化较为明显, 滩涂开发使得近岸潮流动力减弱, 其中曹妃甸、天津港北部以及黄骅港南部变化率约为 10%。

表 5 各评价单元不同开发阶段涨落潮流速变化

Table 5 Average tidal current changes at different development stages of each evaluation unit

评价单元	2003 年		2006 年		2012 年		2018 年	
	涨落潮流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	涨落潮流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	变化率/%	涨落潮流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	变化率/%	涨落潮流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	变化率/%	
A	0.571	0.562	-1.58	0.523	-8.41	0.513	-10.16	
B	0.492	0.490	-0.41	0.531	7.72	0.524	6.50	
C	0.485	0.492	1.44	0.522	7.63	0.523	7.84	
D	0.372	0.371	-0.27	0.362	-2.69	0.348	-6.45	
E	0.341	0.341	-0.29	0.294	-13.78	0.290	-14.96	
F	0.302	0.298	-1.32	0.290	-3.97	0.294	-2.65	
G	0.471	0.468	-0.64	0.460	-2.34	0.456	-3.18	

渤海湾的潮差分布表现为从湾口至湾顶逐渐增大(表 6)。港口工程的建设导致大量自然岸线向人工岸线转变, 高潮位升高、低潮位降低, 即近岸潮差与开发初期相比略有增高。潮差的增长幅度在空间上表现为外海至湾顶逐渐减小, 其中曹妃甸、黄骅港南部以及东营沿岸潮差增加率约为 3%。

表 6 各评价单元不同开发阶段潮差变化

Table 6 Tidal range changes at different development stages of each evaluation unit

评价单元	2003 年		2006 年		2012 年		2018 年	
	潮差/m	潮差/m	变化率/%	潮差/m	变化率/%	潮差/m	变化率/%	
A	1.47	1.46	-0.68	1.51	2.72	1.52	3.40	
B	2.15	2.17	0.93	2.21	2.79	2.23	3.72	
C	2.48	2.50	0.81	2.52	1.61	2.52	1.61	
D	2.69	2.71	0.74	2.73	1.49	2.74	1.86	
E	2.16	2.18	0.93	2.22	2.78	2.23	3.24	
F	1.95	1.94	-0.51	1.98	1.54	1.99	2.05	
G	1.54	1.56	1.30	1.59	3.25	1.59	3.25	

(2) 防洪和风暴潮灾害影响。在防洪影响和风暴潮灾害方面, 本研究分析了不同开发阶段各个评价单元在典型台风条件下的风暴潮最高水位的变化, 渤海湾主要的行洪河流为独流减河、永定新河和海河, 分别位于评价单元 C 天津港北部和评价单元 D 天津港南部, 因此在承载能力综合计算时, 只考虑评价单元 C 和评价单元 D 的行洪影响, 其他指标标准值取为 0。海岸工程建设束窄了河流入海通道, 使得泄洪情况和风暴潮灾害下的最高水位均有一定的抬升, 开发成型时(2012 年)独流减河闸下  $1\text{ km}$  处的洪水位较 2003 年增加  $0.17\text{ m}$ , 海河和永定新河增加  $0.10\text{ m}$ , 典型风暴潮条件下 2006 年最高水位较 2003 年增加了  $0.03\text{ m}$ ,

2012 年增长了 0.07 m, 风暴潮最高水位从湾口至西北湾顶逐渐增加, 其中以甸头至天津港北部为增水最明显的区域, 最高水位增长达 0.10 m。

### 3.2 渤海湾滩涂开发承载力年际变化

根据上述 2.2 节的计算方法, 得到了 4 个开发阶段 7 个评价单元滩涂开发承载力综合评估值, 计算结果见表 7。

表 7 各评价单元承载力评估值

Table 7 Evaluation value of carrying capacity of each evaluation unit

年份	评价单元 A	评价单元 B	评价单元 C	评价单元 D	评价单元 E	评价单元 F	评价单元 G	平均
2003 年	0.799	0.799	0.715	0.738	0.878	0.899	0.893	0.817
2006 年	0.737	0.721	0.642	0.673	0.811	0.808	0.846	0.748
2012 年	0.712	0.709	0.496	0.571	0.716	0.694	0.765	0.666
2018 年	0.734	0.724	0.520	0.580	0.751	0.675	0.774	0.680

2003—2012 年, 各评价单元承载能力均存在不同程度的下降, 体现出围填海工程对近岸滩涂资源的不利影响; 从大规模开发基本成型(2012 年)至 2018 年, 由于国家政策管控禁止渤海湾的进一步开发, 各个评价单元的滩涂开发承载力出现不同幅度的回升。对各评价单元承载力进行平均计算, 得到各年份的平均承载力值, 承载力从 2003 年的 0.817 下降至 2012 年的 0.666, 2018 年又回升至 0.680, 渤海湾滩涂开发承载力时空演变特征是各个评价指标综合表现的结果。

评价单元 C 和评价单元 D(位于天津港南部与北部)承载力下降是由于天津港附近大规模的港口及工业园建设影响, 而评价单元 C 主要与渤海湾的氮磷排污导致区域水质指标下降有关; 评价单元 B 和评价单元 C 承载力下降主要受风暴潮增水的影响, 湾顶区域受风暴潮灾害影响较大。

从经济社会层面来看, 围填海工程形成了沿海城市的高新产业聚集地, 推动了整个地区的经济发展, 评价单元 A 至评价单元 D 即天津市和唐山市单位面积 GDP 逐年上升, 天津港和曹妃甸工业园的建设显著提升了地区经济水平, 在驱动力层面提高了渤海湾的滩涂开发承载能力。大规模的围填海给渤海湾海域的资源和环境造成了严重的影响, 国家海洋局出台了一系列围填限批政策, 严禁进行改变岸线属性的建设开发活动, 改善了入海河流的水质, 减少了陆域的工业废水排放量<sup>[25]</sup>, 从驱动力和状态层提升了 2018 年滩涂资源的开发承载能力, 使得 2018 年各评价单元滩涂开发承载力出现不同程度的回升。

### 3.3 渤海湾滩涂开发承载力空间分布

从空间分布特征来看(图 4), 渤海湾 7 个评价单元承载力的分布规律在开发前后基本保持一致, 天津港附近湾顶承载力较弱, 黄骅港以南较强。渤海湾的氮磷主要污染源永定新河和海河位于天津港北部, 且湾顶本身潮流动力较弱, 污染物难以扩散, 因此该区域承载开发的能力本身较其他区域弱; 而黄骅港以南区域位于南部湾口, 受外部潮汐直接影响, 水动力条件较好, 扩散能力较强, 因此承载开发的能力也较强。对比开发前后承载力的变化情况, 天津港附近 2 个单元承载力下降程度最大, 整个海湾大部分围填海工程均集中于此, 大规模的围填海工程使纳潮面积减小, 水动力条件减弱, 承载力下降最为明显; 曹妃甸东部浅滩工业园的围填面积高达 200 km<sup>2</sup>, 但是工程布置格局考虑了潮汐通道的水动力条件, 使得该围填工程对承载力影响不大; 曹妃甸甸头以西虽没有进行任何围填海工程, 但其为天津港与曹妃甸两大工程作用最明显的海区, 由于甸头的阻隔作用, 水体污染物易集中在湾顶难以扩散, 后续开发容易出现水体污染等环境问题。

南部滩涂整体承载力较高, 开发后下降幅度不大, 黄骅港的建设使水体沿岸南下的通道受阻, 导致污染物在此滞留, 水质变差<sup>[26]</sup>, 但对其他指标的影响不大; 东营、滨州沿岸大部分滩涂被用来进行滩涂养殖, 对滩涂资源起到了保护作用, 该区域没有进行大规模涉海工程, 因此该区域滩涂资源还可进行合理的开发。



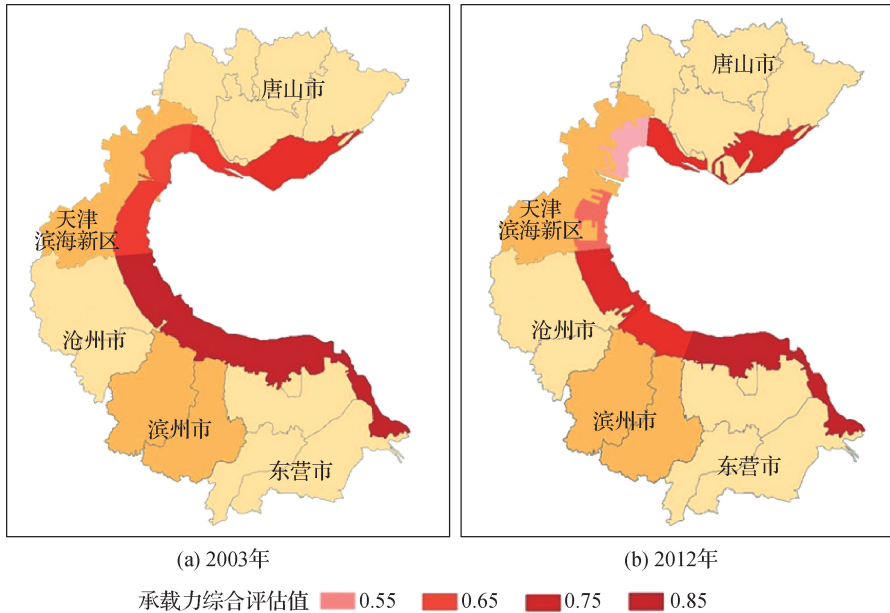


图4 2003年和2012年渤海湾滩涂承载力空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of tidal flat carrying capacity in Bohai Bay in 2003 and 2012

## 4 结 论

本文以中国滩涂资源丰富且经历大规模开发的渤海湾为例,通过实测资料收集、数值模拟等方法获取相关评价指标的数据,进而对渤海湾滩涂开发承载力的时空演变特征进行计算分析,研究结论如下:

(1) 从年际变化来看,滩涂开发降低了滩涂资源的开发承载力,2003—2012年承载力呈下降趋势,综合评估值从0.817下降至0.666,2012年后由于国家大力推进海洋生态保护政策,2018年承载力回升至0.680。

(2) 从空间分布来看,承载力变化趋势整体表现为湾顶下降幅度大于湾口区域,由于天津市兴建港口而东营市大力发展滩涂养殖,滩涂开发前后均表现为天津港附近区域承载力较弱,黄骅港以南滩涂养殖区承载力较强,开发承载力与区域围填规模和形式密切相关。

(3) 影响各评价单元滩涂资源开发的主导因素存在一定的差异,曹妃甸浅滩应考虑对潮波系统和滩潮稳定的影响,西北湾顶考虑区域本身水动力条件较弱,天津滨海新区至黄骅港应考虑氮磷污染以及港口、石化工程对生态环境的影响,南部大面积滩涂养殖区域应及时对滩涂养殖存在的问题提出解决方案,加强滩涂资源的保护意识。

### 参考文献:

- [1] 张长宽, 陈欣迪. 海岸带滩涂资源的开发利用与保护研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 25-33. (ZHANG C K, CHEN X D. Advances in development, utilization, and protection of coastal tidal flats[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(1): 25-33. (in Chinese))
- [2] BOYE C B, APPEANING ADDO K, WIAFE G, et al. Spatio-temporal analyses of shoreline change in the Western Region of Ghana[J]. Journal of Coastal Conservation, 2018, 22(4): 769-776.
- [3] JIA H, SHEN Y M, SU M R, et al. Numerical simulation of hydrodynamic and water quality effects of shoreline changes in Bohai Bay[J]. Frontiers of Earth Science, 2018, 12(3): 625-639.

- [4] DING Y M, WEI H. Modeling the impact of land reclamation on storm surges in Bohai Sea, China[J]. *Natural Hazards*, 2017, 85(1): 559-573.
- [5] 唐磊, 孙林云, 孙波, 等. 海河流域主要河口闸下通道风暴潮增水研究[J]. *海洋工程*, 2016, 34(4): 55-61. (TANG L, SUN L Y, SUN B, et al. Study on storm surge in downstream channels of tidal gates in the major estuaries of Haihe Revir basin [J]. *The Ocean Engineering*, 2016, 34(4): 55-61. (in Chinese))
- [6] 陆永军, 侯庆志, 陆彦, 等. 河口海岸滩涂开发治理与管理研究进展[J]. *水利水运工程学报*, 2011(4): 1-12. (LU Y J, HOU Q Z, LU Y, et al. Advances in development and management of estuarine and coastal mudflats[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2011(4): 1-12. (in Chinese))
- [7] 汤立群, 卢单, 赵慧明, 等. 河口滩涂围垦对水动力环境影响研究综述[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(6): 78-84. (TANG L Q, LU D, ZHAO H M, et al. Review of impacts of tideland reclamation on hydrodynamic environment near estuarine area[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(6): 78-84. (in Chinese))
- [8] HUAMANTINCO CISNEROS M A, REVOLLO SARMIENTO N V, DELRIEUX C A, et al. Beach carrying capacity assessment through image processing tools for coastal management[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 130: 138-147.
- [9] LÓPEZ-DÓRIGA U, JIMÉNEZ J A, VALDEMORO H I, et al. Impact of sea-level rise on the tourist-carrying capacity of Catalan beaches[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 170: 40-50.
- [10] da SILVA C P, FONSECA C, MENDES R N. 25 years of beach carrying capacity in Portugal: a place for everything and everything in its place? [J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 95(sp1): 920.
- [11] 杨山, 王玉婷. 基于生态足迹修正模型的江苏省海洋经济可持续发展分析[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 748-754. (YANG S, WANG Y T. Analysis on sustainable development of marine economy in Jiangsu Province based on marine ecological footprint correction model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 748-754. (in Chinese))
- [12] 魏虎进, 黄华梅, 张晓浩. 基于生态系统服务功能的海湾滩涂资源环境承载力研究: 以大亚湾为例[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(4): 579-585. (WEI H J, HUANG H M, ZHANG X H. Research on marine resource and environment carrying capacity based on marine ecosystem services: a case study of Daya Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(4): 579-585. (in Chinese))
- [13] 苏岫, 索安宁, 宋德瑞, 等. 基于遥感的长江经济带邻近海域滩涂生态承载力评估[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(4): 528-536. (SU X, SUO A N, SONG D R, et al. Ecological carrying capacity assessment of tidal flat in the Yangtze River Economic Belt by remote sensing[J]. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(4): 528-536. (in Chinese))
- [14] 潘桂娥. 滩涂资源承载力浅析[J]. *水利规划与设计*, 2009(1): 7-9, 35. (PAN G E. Analysis of carrying capacity of tidal flat resources[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2009(1): 7-9, 35. (in Chinese))
- [15] 郭巨海, 陆彦, 侯庆志, 等. 滩涂资源承载力指标及评价方法研究[J]. *人民黄河*, 2015, 37(6): 63-66. (GUO J H, LU Y, HOU Q Z, et al. Study on index and evaluation of tidal flat resources carrying capacity[J]. *Yellow River*, 2015, 37(6): 63-66. (in Chinese))
- [16] ZHANG T H, NIU X J. Analysis on the utilization and carrying capacity of coastal tidal flat in bays around the Bohai Sea[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 203: 105449.
- [17] 孙晓宇, 吕婷婷, 高义, 等. 2000—2010 年渤海湾岸线变迁及驱动力分析[J]. *资源科学*, 2014, 36(2): 413-419. (SUN X Y, LYU T T, GAO Y, et al. Driving force analysis of Bohai Bay coastline change from 2000 to 2010[J]. *Resources Science*, 2014, 36(2): 413-419. (in Chinese))
- [18] 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 渤海湾岸线变化(2003—2011 年)对近岸海域水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(9): 2149-2159. (QIN Y W, ZHANG L, ZHENG B H, et al. Impact of shoreline changes on the costal water quality of Bohai Bay(2003—2011)[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(9): 2149-2159. (in Chinese))
- [19] 左其亭, 郝明辉, 姜龙, 等. 幸福河评价体系及其应用[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 45-58. (ZUO Q T, HAO M H, JIANG L, et al. Happy River evaluation system and its application[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 45-58. (in Chinese))
- [20] 侯庆志, 陆永军, 王志力. 渤海湾高强度开发对潮波系统的累积影响机制[J]. *科学通报*, 2017, 62(30): 3479-3489. (HOU Q Z, LU Y J, WANG Z L. Cumulative impacts of high intensity reclamation in Bohai Bay on tidal wave system and its mechanism[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(30): 3479-3489. (in Chinese))

- [21] 侯庆志, 陆永军, 王建, 等. 河口与海岸滩涂动力地貌过程研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 286-294. (HOU Q Z, LU Y J, WANG J, et al. Advances in morphodynamics of estuarine and coastal mudflats[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 286-294. (in Chinese))
- [22] 南京水利科学研究院. 滨海新区及周边地区海岸带滩涂资源承载力研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2015. (Nanjing Hydraulic Research Institute. Study on carrying capacity of coastal beach resources in Binhai new area and its surrounding area[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2015. (in Chinese))
- [23] GENG Y F, WANG Z L. A coastal ocean model of semi-implicit finite volume unstructured grid[J]. China Ocean Engineering, 2012, 26(2): 277-290.
- [24] 海水水质标准: GB 3097—1997 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998. (Sea water quality standard: GB 3097—1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998. (in Chinese))
- [25] 2020年天津市生态环境状况公报[R]. 天津: 天津市生态环境局, 2021. (2020 Tianjin ecological environment status[R]. Tianjin: Bulletin Tianjin Bureau of Ecology and Environment, 2021. (in Chinese))
- [26] 靳玉丹, 张秋丰, 李希彬, 等. 天津海域围填海工程对渤海湾水交换的影响研究[J]. 海洋通报, 2017, 36(5): 578-584. (JIN Y D, ZHANG Q F, LI X B, et al. Effects of Tianjin reclamation projects on the Bohai Bay water exchange[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(5): 578-584. (in Chinese))

## Research on the temporal and spatial evolution of tidal flat resource development carrying capacity in Bohai Rim region\*

LU Yan, YANG Yuanyuan, LU Yongjun, HOU Qingzhi

(State key laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Effectively identifying and evaluating the differences in the temporal and spatial variation of resource carrying capacity in each tidal flat area is conducive to the scientific planning of tidal flat resources. This is of great significance to the realization of rational utilization and protection of coastal tidal flat resources. Based on the spatial variation of semi-closed gulf beaches' characteristics in Bohai Bay and the "driving force-state-impact" model, an evaluation system for the development carrying capacity of tidal flat resources is constructed. The resource carrying capacity of seven evaluation units during four typical years is evaluated, revealing the temporal and spatial evolution characteristics of the development carrying capacity of the tidal flat resources in the bay. The results indicate that the reclamation project weakens the development carrying capacity of the tidal flat in Bohai Bay. During the large-scale construction of the project (2003—2012), the carrying capacity of each evaluation unit has exhibited a downward trend. Due to the implementation of national reclamation control measures, the carrying capacity has demonstrated a recovery trend since 2012. Spatial analysis reveals that the carrying capacity of the bay roof decreased more than that of the southern part of the bay, the carrying capacity of the area near Tianjin Port is poor both before and after the development, and the carrying capacity of the tidal flat breeding area south of Huanghua Port is strong.

**Key words:** tidal flat resources; carrying capacity; temporal and spatial evolution; evaluation unit; Bohai Bay

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2022YFC3106103).