

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20201111001

http://www.yykxjz.cn/

牛明香, 王俊, 王安东, 陈瑞盛, 张家旭, 赵亚杰. 黄河三角洲滩涂贝类栖息地的时空动态遥感监测. 渔业科学进展, 2022, 43(1): 77-85

NIU M X, WANG J, WANG A D, CHEN R S, ZHANG J X, ZHAO Y J. Remote sensing monitoring of the spatio-temporal dynamics of mudflat shellfish habitat in the Yellow River Delta. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(1): 77-85

## 黄河三角洲滩涂贝类栖息地的 时空动态遥感监测\*

牛明香<sup>1,2</sup> 王俊<sup>1,2①</sup> 王安东<sup>3</sup> 陈瑞盛<sup>1</sup> 张家旭<sup>4</sup> 赵亚杰<sup>3</sup>

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 山东省渔业资源与生态环境重点实验室 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室 山东 青岛 266071; 3. 山东黄河三角洲国家级自然保护区管理委员会 山东 东营 257091; 4. 中国海洋大学水产学院 山东 青岛 266003)

**摘要** 基于遥感和GIS(geographic information system)技术,以1986—2017年间潮位最低的6个时相的Landsat影像数据为数据源,以瞬时水边线为下边界,以围垦大堤、养殖池塘、平均高潮线和植被线为上边界,提取黄河三角洲滩涂贝类栖息地信息,分析30年来贝类栖息地的时空变动。结果显示,1986—2017年贝类栖息地面积呈持续下降趋势,由1986年的1188 km<sup>2</sup>减少为2017年的396 km<sup>2</sup>;1993—2001年和2008—2013年2个时段变化最为显著,年均减少面积均约为34 km<sup>2</sup>。空间上,以刁口段变化最为剧烈,除1986—1993年下边界略向海扩张外,其他时段上边界向海推进、下边界向陆蚀退,面积大幅减少。河口段上边界基本稳定,下边界由于黄河入海水沙变化和海洋动力侵蚀的双重作用,淤积和蚀退交替进行,但总体上面积变化不大。黄河三角洲滩涂贝类栖息地时空变动影响因素差异明显,刁口段和莱州湾段主要由于滩涂盐田、水产养殖池塘和工程建设占用,河口段主要因为黄河入海水沙变动和海洋动力侵蚀,由于港口和油田建设,东营港及邻近段栖息地功能全部丧失。

**关键词** 滩涂贝类; 栖息地; 时空动态; 遥感; 黄河三角洲

**中图分类号** S931.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)01-0077-09

滩涂是潮间带以内的区域,其生物多样性丰富,生态服务价值较高,也是高度脆弱的生态系统,易受气候变化和人类活动的影响。滩涂为鱼类提供了索饵、育幼和躲避捕食者的庇护所(Crinall *et al.*, 2004; Platell *et al.*, 2009),是贝类生长繁衍的天然场所(申保忠, 2006; Harris *et al.*, 2018)。同时,滩涂向外海输出营养

物质、有机物和活的生物体,提高了沿岸生产力(Odum, 2002; Kneib, 2003; Creighton *et al.*, 2019)。

黄河三角洲是我国暖温带最广阔、最完整和增长速度最快的河口新生湿地,沿岸滩涂属淤积型泥砂质,其地势平坦、水质肥沃、生物饵料丰富,是山东省主要的贝类生产区(刘强等, 2018),同时,分布螺、

\* 国家重点研发计划项目(2019YFD0901201)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2018HY-ZD0102)共同资助 [This work was supported by National Research and Development Program of China (2019YFD0901201), and the Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund (2018HY-ZD0102)]. 牛明香, E-mail: niuwx@ysfri.ac.cn

① 通讯作者: 王俊, 研究员, E-mail: wangjun@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2020-11-11, 收修改稿日期: 2020-12-04

蟹等底栖动物。目前,黄河三角洲滩涂养殖、构筑物修建等活动及黄河改道、入海水沙减少、海水侵蚀等因素,使滩涂的自然状况受到扰动,贝类栖息环境不断变化。掌握滩涂贝类栖息地的动态变化,不仅有助于了解黄河三角洲贝类资源变动情况,也对该区域鱼类资源的养护具有重要意义。

目前,对黄河三角洲滩涂变动的研究多集中在湿地景观格局、土地利用、覆被变化等方面(肖艳芳等, 2015; 吴晶晶等, 2018; 于小娟等, 2019), 该类研究将滩涂作为众多土地利用类型之一进行动态变化分析, 分类标准基本为光滩。但滩涂贝类栖息地不仅包括光滩, 还包括部分盐生植被区域。滩涂泥泞, 可达性差, 难以用传统方法进行测量, 而遥感技术成像受地面限制小且实时性强, 易于监测贝类栖息地的变化。遥感技术在海洋鱼类栖息地研究中已得到应用(丁琪等,

2015; 陆尧等, 2019)。本研究以遥感数据为数据源, 基于 GIS (geographic information system) 技术平台, 对黄河三角洲滩涂贝类栖息地的时空变化格局进行分析, 在此基础上, 进一步分析变化原因, 以为贝类栖息地保护和鱼类资源养护提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄河三角洲位于黄河入海口, 主要在山东省滨州市和东营市境内, 为国家级自然保护区。保护区由南、北两部分组成, 分别为现行黄河入海口两侧部分和 1976 年以前刁口河流路黄河入海口部分。本研究范围为东营市的行政区划范围, 北临渤海湾, 东靠莱州湾(图 1)。

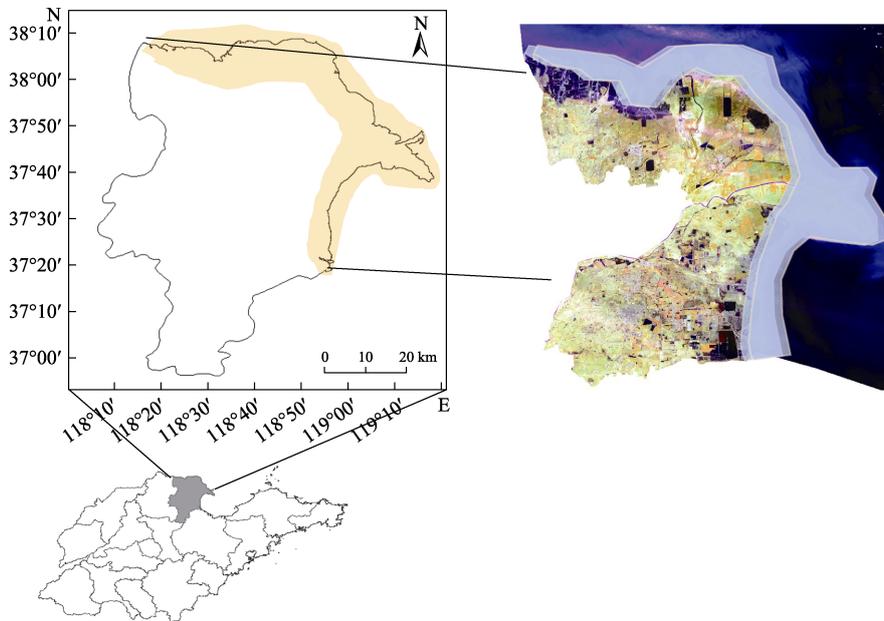


图 1 研究区域位置示意图

Fig.1 Location map of the study area

### 1.2 数据源及预处理

以 Landsat TM/ETM<sup>+</sup>/OLI 遥感影像作为数据源, 筛选了 1986—2017 年期间潮位最低、无云或少云的影像 6 景, 且保证 6 个时期的潮位基本相同, 均位于平均潮位以下, 数据的空间分辨率为 30 m (表 1)。所有数据都进行了大气校正, 利用 ENVI 软件进行了几何精校正、增强处理以及研究区域提取等预处理。

### 1.3 研究方法

研究区海岸包括淤泥质海岸和人工构筑物海岸。未开发的淤泥质海岸生长着数量繁多的耐盐植被, 且近陆侧植被生长茂密, 近海侧植被生长稀疏, 形成明

显的耐盐植被生长过渡带。由于潮汐的冲刷作用, 滩涂物质成分差异及暴露水上时间长短不同而导致含

表 1 选用的遥感影像数据

Tab.1 Remote sensing data used for the study

卫星 Satellite	传感器 Sensor	成像日期 Imaging date	成像时刻 Imaging time
Landsat5	TM	1986-08-08	02:03:39
Landsat5	TM	1993-09-28	02:04:01
Landsat7	ETM <sup>+</sup>	2001-10-12	02:31:45
Landsat5	TM	2008-10-07	02:26:33
Landsat8	OLI	2013-11-22	02:43:48
Landsat8	OLI	2017-09-30	02:42:26

水量不同, 光谱特征差异显著, 在 Landsat 影像上形成清晰的边界线, 可用于平均高潮线的提取(刘雪等, 2013; 贾明明等, 2013; 仇传银等, 2019)。已开发的淤泥质海岸, 养殖池塘、围垦大堤等人工构筑物可作为高潮线指标。本研究区域较大, 不易进行精确的潮位校正, 以瞬时水边线作为下边界进行提取。

黄河三角洲潮间带的高、中、低潮区是大型底栖动物的分布区域(董贯仓等, 2012; 李玄等, 2020), 贝类在潮间带各潮区均有分布, 数量较大(刘强等, 2018), 米草入侵改变了底栖无脊椎动物的群落结构(申保忠, 2006)。根据贝类的栖息环境, 同时, 考虑集中成片分布的米草区域无法利用。因此, 本研究将潮间带内的光滩和稀疏盐生植被定义为贝类栖息地。以围垦大堤、养殖池塘、平均高潮线结合植被线作为上边界(近陆地边界), 以每年最低潮位影像的瞬时水边线作为下边界(近海边界)进行贝类栖息地的提取。尽管不同年份的影像存在潮位差异, 但能够反映长期的演变规律, 且该方法在类似研究中已成功应用(Kuenzer *et al.*, 2015; Behling *et al.*, 2018)。

针对研究区的特点, 对多种指数(王志辉等, 2007)进行比较, 改进型归一化水体指数[MNDWI=(GREEN-SWIR)/(GREEN+SWIR)]和归一化植被指数[NDVI=(NIR-Red)/(NIR+Red)]分别适用于 OLI 和 TM/ETM<sup>+</sup>数据的滩涂信息提取。因此, 本研究基于 MNDWI 和 NDVI, 利用阈值法提取瞬时水边线、植被线和人工构筑物边界线; 并根据研究范围内不同区域的水体环境, 选择合适的阈值以提高提取精度。最后, 对获取的边界参照假彩色合成影像, 进行目视解译加以修正。在 ArcGIS 中对不同年份的数据进行空间叠加计算, 分析 1986—2017 年贝类栖息地的时空变化。

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{float}(b_3) - \text{float}(b_6)}{\text{float}(b_3) + \text{float}(b_6)} \quad (\text{适用于 OLI 数据}) \quad (1)$$

$$\text{NDVI} = \frac{\text{float}(b_4) - \text{float}(b_3)}{\text{float}(b_4) + \text{float}(b_3)} \quad (\text{适用于 TM、ETM}^+ \text{数据}) \quad (2)$$

式(1)中,  $b_3$  为 OLI 数据第 3 波段绿波段,  $b_6$  为 OLI 数据第 6 波段短红外波段。式(2)中,  $b_4$  为 TM/ETM<sup>+</sup>数据第 4 波段近红外波段,  $b_3$  为 TM/ETM<sup>+</sup>数据第 3 波段红光波段。

## 2 结果

### 2.1 贝类栖息地总体变化情况

结果显示, 1986 年以来, 研究区贝类栖息地面积呈连续下降趋势(表 2)。1986—2017 年贝类栖息地

面积减少了 791.79 km<sup>2</sup>, 减少约 66.65%, 降低速率约为 25.54 km<sup>2</sup>/a。其中, 1986—1993 年呈显著下降趋势, 平均下降速率约为 26.29 km<sup>2</sup>/a; 1993—2001 年变化剧烈, 降低速率上升为 34.25 km<sup>2</sup>/a; 2001—2008 年, 贝类栖息地面积基本稳定; 2008—2013 年面积减少了 170.788 km<sup>2</sup>, 平均每年减少 34.15 km<sup>2</sup>; 2013—2017 年, 平均减少速率为 27.95 km<sup>2</sup>/a。

表 2 黄河三角洲滩涂贝类栖息地面积变化  
Tab.2 Habitat area changes of mudflat shellfish in the Yellow River Delta

时间 Time	面积 Area/km <sup>2</sup>	面积变化 Area change/km <sup>2</sup>
1986-08-08	1188.079	
1993-09-28	1004.057	-184.022
2001-10-12	695.768	-308.289
2008-10-07	678.807	-16.961
2013-11-22	508.019	-170.788
2017-09-30	396.289	-111.805

将 6 个不同时段的遥感提取结果叠加在一起, 得到研究区 1986—2017 年黄河三角洲滩涂贝类栖息地分布图(图 2)。由图 2 可见, 研究区内贝类栖息地变化较大的区域为刁口段和河口段 2 个区域; 刁口段区域内, 滩涂贝类栖息地分布的上边界逐渐向海推进, 下边界剧烈蚀退, 宽度变窄; 河口段区域内, 上边界基本稳定, 各年份间下边界不断变化。东营港及邻近段, 1986 年滩涂贝类分布面积较大, 1993 和 2008 年零星分布, 其他年份无分布。莱州湾段贝类栖息地上边界 1986、1993 年向内陆延伸, 其他年份固定不变, 下边界逐渐向陆地蚀退。

### 2.2 贝类栖息地的时空变动

利用 ArcGIS 将提取结果进行叠加分析, 获得不同年份滩涂贝类栖息地的时空变动(图 3), 各段的划分与图 2 一致。

1986—1993 年(图 3a), 刁口段、河口段贝类栖息地向海略有扩张, 东营港及邻近段贝类栖息地大幅度减少, 莱州湾段栖息地下边界出现一定退缩。两年份的重合分布面积为 779 km<sup>2</sup>, 1986 年独有面积为 409 km<sup>2</sup>, 1993 年独有面积为 225 km<sup>2</sup>。

1993—2001 年(图 3b), 刁口段贝类栖息地面积大幅减少, 河口段栖息地未出现向海延伸, 但入海口改道淤积成新的贝类栖息地(北部入海口), 东营港及邻近段略有减少, 莱州湾段虽然整体面积减少, 但下边

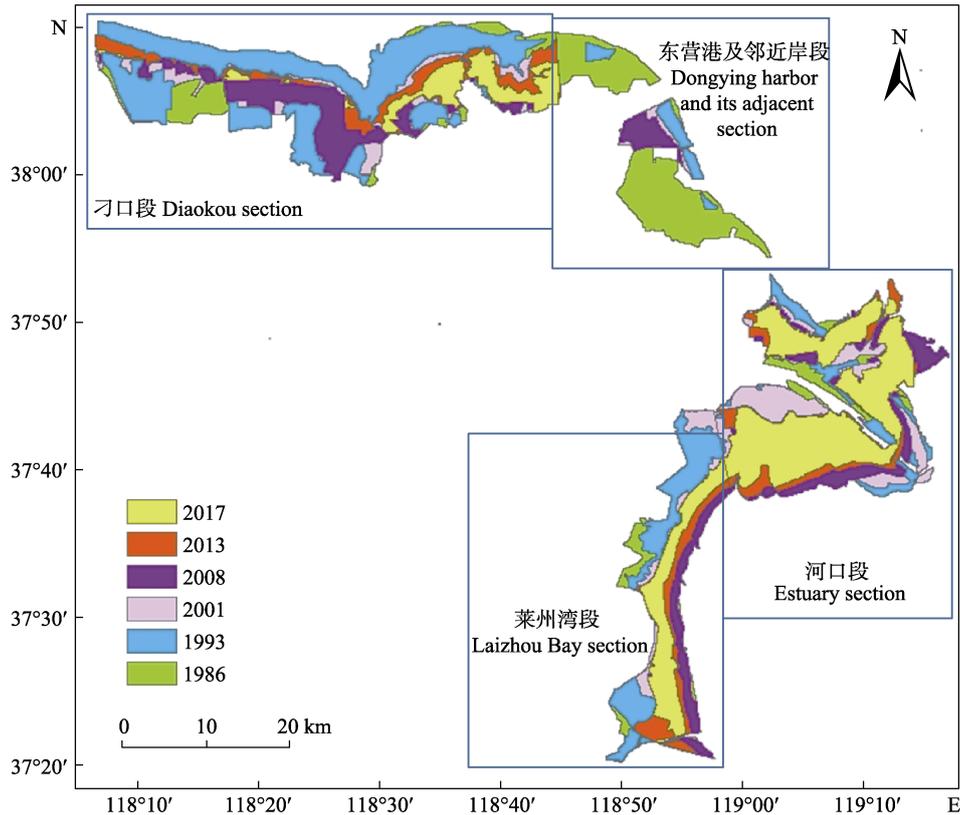


图2 1986—2017年黄河三角洲滩涂贝类栖息地分布(遥感数据提取结果)

Fig.2 Habitat distribution of mudflat shellfish in the Yellow River Delta during 1986—2017 (Results derived from remote sensing data)

界向海略有延伸。两年份的重合分布面积为  $520 \text{ km}^2$ ，1993年独有面积为  $484 \text{ km}^2$ ，2001年独有面积为  $176 \text{ km}^2$ 。

2001—2008年(图3c)，刁口段下边界轻微蚀退，面积缩小；河口段新河口不断向外淤积，形成新的滩涂贝类栖息地，改道前的河口(南部入海口)由于缺少水沙来源，下边界轻微蚀退；东营港及邻近段基本无变化；莱州湾段上边界稳定，下边界略向海延伸。两年份的重合分布面积为  $519 \text{ km}^2$ ，2001年独有面积为  $177 \text{ km}^2$ ，2008年独有面积为  $160 \text{ km}^2$ 。

2008—2013年(图3d)，刁口段面积大幅减少，上边界向海推进，宽度变窄；河口段下边界向海延伸和向陆地蚀退相结合；2013年，东营港及邻近段不再有滩涂贝类栖息地分布；莱州湾段上边界稳定，下边界向陆地推进。重合面积为  $438 \text{ km}^2$ ，2008年独有面积为  $241 \text{ km}^2$ ，2013年独有面积仅为  $70 \text{ km}^2$ 。

2013—2017年(图3e)，刁口段和河口段面积均进一步减少；东营港及邻近段无滩涂贝类分布；莱州湾段上边界一致，下边界向陆地蚀退。两年份间重合面积为  $370 \text{ km}^2$ ，2013年独有面积为  $138 \text{ km}^2$ ，2017年

独有面积减少到  $26 \text{ km}^2$ 。

1986—2017年(图3f)，30年间，滩涂贝类栖息地分布变化剧烈。刁口段的变化最为显著，上边界向海推进，下边界向陆地推进，由1986年的大面积分布演变为2017年的零星分布；河口段的上边界和下边界均向海推进；东营港及邻近段，1986年滩涂贝类广泛分布，2017年已全部开发，无贝类栖息地存在；莱州湾段，滩涂贝类栖息地变窄，上边界向海推进，下边界蚀退，向陆地推进。30年来，滩涂贝类重合分布区域仅为  $308 \text{ km}^2$ ，1986年的独有面积为  $880 \text{ km}^2$ ，2017年的独有面积为  $88 \text{ km}^2$ 。

### 2.3 重点变化区域分析

滩涂贝类栖息地变化较大的为刁口段和河口段(表3)。刁口段整体上呈锐减趋势，30年间减少约85%，速率约为  $12.77 \text{ km}^2/\text{a}$ ；其中，1986—1993年呈增长趋势，1993年达到最大值( $509 \text{ km}^2$ )，之后急剧减少。河口段面积整体呈先增加后减少的趋势，且变化幅度相对较小，2008年达到最大值( $314 \text{ km}^2$ )，之后逐年递减。河口段处于自然保护区内，由图2

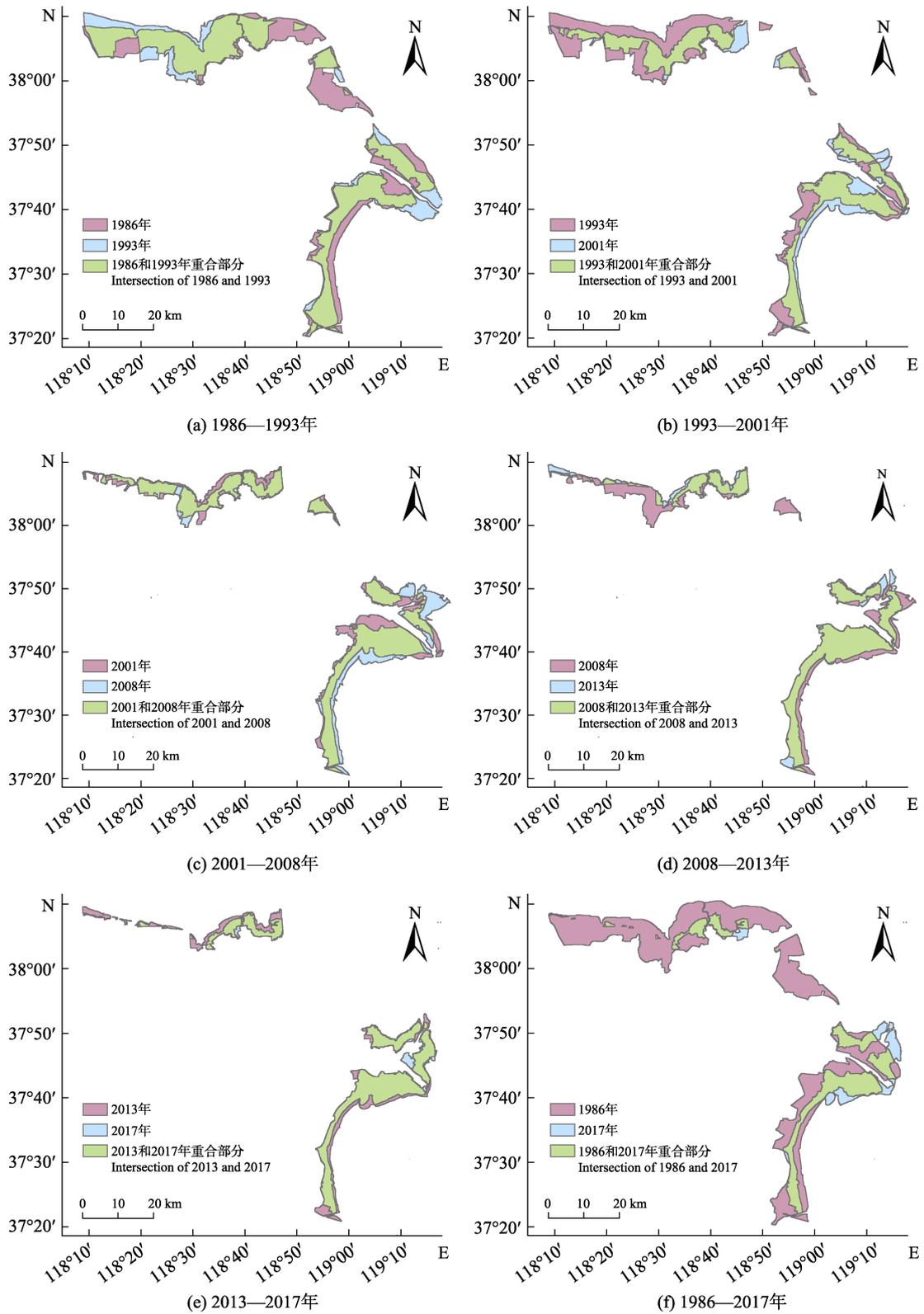


图 3 1986—2017 年期间滩涂贝类栖息地时空变动

Fig.3 Spatio-temporal variations of mudflat shellfish habitat during 1986—2017

可见,河口段贝类栖息地的变化主要是入海口改道摆动淤积造成。图 4 为 1986—2017 年刁口段的遥感解译结果。2001 年以来,养殖池塘和盐田规模不断扩

大,大量占用滩涂贝类栖息地,致使栖息地面积不断减少;同时,海水侵蚀使栖息地下边界不断向陆地后退,是造成栖息地面积减少的另一个原因。

表3 刁口段、河口段滩涂贝类栖息地面积  
Tab.3 Habitat area of mudflat shellfish in  
Diaokou and Estuary sections/km<sup>2</sup>

日期 Date	刁口段 Diaokou section	河口段 Estuary section
1986-08-08	468	282
1993-09-28	509	265
2001-10-12	247	301
2008-10-07	201	314
2013-11-22	129	266
2017-09-30	72	249

### 3 讨论

#### 3.1 栖息地上部变化分析

经分析,研究区内的刁口段和莱州湾段滩涂贝类

栖息地上边界变化的原因,主要是滩涂盐田、水产养殖池塘和工程建设对栖息地的占用。20世纪90年代初开始,沿海产盐业和水产养殖业不断发展壮大,1986—2001年,刁口段和莱州湾段的盐田和水产养殖池塘面积大幅增加,大量占用滩涂,贝类栖息地上边界迅速向海推进,栖息地变窄,面积急剧减少,这与徐振田等(2020)的研究结果一致。2001—2017年,盐田和水产养殖池塘继续稳步增长,面积逐年增加,栖息地上边界继续向海推进,面积进一步减少(郭宇等,2018; 刘海红等,2018)。莱州湾段上边界于2008年已修建为人工堤坝,自2008年开始,上边界固定。河口段处于黄河三角洲国家级自然保护区,该区域滩涂贝类栖息地变化不受人为因素的影响,其变化主要与滩涂自然发育及植被分布有关,上边界由平均高潮线和盐生植被的分布决定。

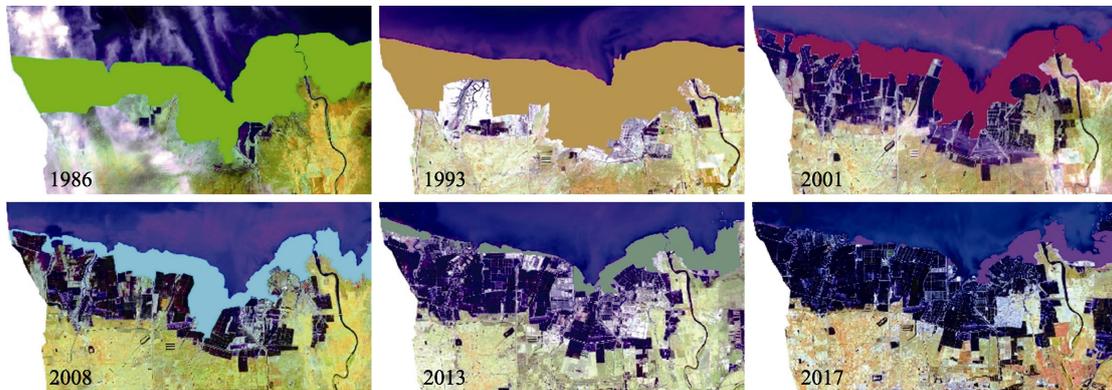


图4 刁口段滩涂贝类栖息地变化

Fig.4 Habitat change of mudflat shellfish in Diaokou section

#### 3.2 栖息地下部变化分析

滩涂贝类栖息地下边界为瞬时水边线。随着油田和港口建设,东营港及邻近段下边界1993年已基本固化为人造构筑物。自然岸段主要由潮滩冲淤决定,刁口段、河口段和莱州湾段的水动力条件、沉积物来源及地质构造等各不相同,其下边界的变化也各有特点。

1976年黄河改道清水沟流路后,刁口段失去水沙来源的有效补给,加之沉积物以粉砂为主,稳定性差(杨中华等,2006),海洋动力的侵蚀导致贝类栖息地下边界蚀退。本研究表明,1986—2017年该区域贝类栖息地大幅度向陆地蚀退,30余年间,仅1993年略有淤积。自2010年开始,黄河三角洲实施“生态补水”战略,刁口河流路恢复过水,同时带来一定的泥沙淤积,这也使得该区域蚀退变慢,甚至出现轻微淤积的年份,2008—2013年,该段虽然总面积减少,但部

分区域下边界呈向海淤积态势。另一方面,随着盐田和人工养殖业的大力发展,盐田和水产养殖池塘不断向海推进,该段西部区域的贝类栖息地几乎消失,如2013年和2017年(图3e、图4),其下边界基本为养殖池塘边界。

河口段为现行水流路的入海口段,黄河入海带来大量泥沙,泥沙淤积和海洋动力侵蚀共同作用,使该区域贝类栖息地下边界不断变化。1976年黄河人工改道清水沟以来,利津站多年平均径流量和年输沙量与1950—1975年相比均有较大幅度的减少;其中,以1986年为界,后期的来水和来沙量远小于前期;20世纪90年代中后期,黄河下游河段断流严重,入海泥沙进一步减少(常军等,2004);1999年,黄河水资源实施统一管理和调度政策,2003年小浪底水库正式调水调沙,入海水沙明显增加,是近十几年来的转折点(徐美等,2007; 牛明香等,2020)。在入海泥沙

变动的影 响下, 1986—1993 年, 入海口门继续向海延伸, 但沙嘴两侧区域受到海洋动力作用, 发生蚀退(图 3a); 1996 年黄河入海口向北改道后, 形成新的沙嘴, 原入海口因失去水沙供应, 海洋动力作用使其持续受到侵蚀, 1993—2001 年原入海口区域蚀退, 新入海口区域淤积(图 3b); 2001—2008 年, 调水调沙政策的实施, 使新入海口明显向海淤积, 老入海口继续蚀退(图 3c); 2008—2013 年黄河入海水沙量减少, 新入海口淤积缓慢, 老入海口继续蚀退(图 3d); 2013—2017 年栖息地轻微蚀退(图 3e)。

莱州湾段贝类栖息地地下边界总体向陆地蚀退, 该区域淤积的泥沙主要来自于黄河入海口泥沙, 随着黄河入海水沙减少和黄河向北改道, 输送到该段的泥沙减少, 在海洋动力作用下不断蚀退。

#### 4 结论

本研究选取 1986—2017 年期间黄河三角洲每年潮位最低的 Landsat 遥感影像 6 幅, 构建模型, 提取平均高潮线和低潮线, 并基于 GIS 技术进行空间分析, 获得了 1986—2017 年研究区的贝类栖息地数据及时空演变规律, 结果如下:

1) 选取每年最低潮位的遥感影像, 通过构建模型并选取合适的阈值, 提取贝类栖息地数据, 研究其时空演变规律具有一定的可行性, 可作为简单易行的手段, 初步解决大尺度滩涂贝类栖息地信息提取及动态监测问题。

2) 1986—2017 年, 黄河三角洲滩涂贝类栖息地面积不断减少, 由 1986 年的 1188 km<sup>2</sup> 减少为 2017 年的 396 km<sup>2</sup>, 减少了近 67%。其中, 刁口段面积减少最为显著, 1986—2017 年减少了约 396 km<sup>2</sup>。由于入海口改道、泥沙淤积和海水侵蚀的多重作用, 河口段栖息地面积先增加后减少。1993 年开始, 东营港及邻近段贝类栖息地基本消失, 莱州湾段栖息地面积大幅减少。

3) 养殖池塘和人工堤坝建设是贝类栖息地上边界的主要控制因素, 下边界主要受黄河入海水沙减少和海水侵蚀的双重影响。

需要说明的是, 研究中滩涂贝类栖息地地下边界为瞬时水边线, 区域范围大, 黄河入海口以北和以南的潮位会有差别, 尽管在数据的挑选中保持入海口区域潮位一致, 但其他区域会略有差别, 对贝类栖息地地下边界的数据准确提取有一定影响, 后续研究中会加入潮位校正等资料, 进一步提高精度。

#### 参 考 文 献

- BEHLING R, MILEWSKI R, CHABRILLAT S. Spatio-temporal shoreline dynamics of Namibian coastal lagoons derived by a dense remote sensing time series approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 68: 262–271
- CHANG J, LIU G H, LIU Q S. Analysis on spatio-temporal feature of coastline change in the Yellow River estuary and its relation with runoff and sand-transportation. *Geographical Research*, 2004, 23(5): 339–346 [常军, 刘高焕, 刘庆生. 黄河口海岸线演变时空特征及其与黄河来水来沙关系. *地理研究*, 2004, 23(5): 339–346]
- CREIGHTON C, PRAHALAD V N, MCLEOD I, *et al.* Prospects for seascape repair: Three case studies from eastern Australia. *Ecological Management and Restoration*, 2019: 12384
- CRINALL S M, HINDELL J S. Assessing the use of saltmarsh flats by fish in a temperate Australian embayment. *Estuaries*, 2004, 27(4): 182–191
- DING Q, CHEN X J, WANG J T. Comparison habitat suitability index model of *Illex argentinus* and its application into fishing ground forecasting. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(3): 8–13 [丁琪, 陈新军, 汪金涛. 阿根廷滑柔鱼 (*Illex argentinus*) 适宜栖息地模型比较及其在渔场预报中的应用. *渔业科学进展*, 2015, 36(3): 8–13]
- DONG G C, LI X Q, LIU F, *et al.* Community characteristics of macrozoobenthos and environmental quality assessment in intertidal zone of the Huanghe Delta. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(3): 370–374 [董贯仓, 李秀启, 刘峰, 等. 黄河三角洲潮间带底栖动物群落结构分析及环境质量评价. *海洋环境科学*, 2012, 31(3): 370–374]
- GUO Y, SUN M Q, WANG F Q, *et al.* Influence analysis of runoff and sediment on the landscape pattern change in the Yellow River Delta wetland. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science)*, 2018, 39(4): 36–41 [郭宇, 孙美琪, 王富强, 等. 水沙对黄河三角洲湿地景观格局演变的影响分析. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(4): 36–41]
- HARRIS M, WEISLER M I. Prehistoric human impacts to marine mollusks and intertidal ecosystems in the Pacific islands. *Journal of Island and Coastal Archaeology*, 2018, 13(2): 1–21
- JIA M M, LIU D W, WANG Z M, *et al.* Coastline changes in Hangzhou Bay based on object-oriented method using multi-source remote sensing data. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(2): 262–269 [贾明明, 刘殿伟, 王宗明, 等. 面向对象方法和多源遥感数据的杭州湾海岸线提取分析. *地球信息科学学报*, 2013, 15(2): 262–269]
- KNEIB R. Bioenergetic and landscape considerations for scaling expectations of nekton production from intertidal marshes. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 264: 279–296

- KUENZER C, KLEIN I, ULLMANN T, *et al.* Remote sensing of River Delta Inundation: Exploiting the potential of coarse spatial resolution, temporally-dense MODIS time series. *Remote Sensing*, 2015, 7(7): 8516–8542
- LI X, SHI H J, WANG H Y, *et al.* Diversity and distribution of intertidal molluscs in the Yellow River Delta, China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(8): 1055–1063 [李玄, 史会剑, 王海艳, 等. 黄河三角洲潮间带软体动物多样性与分布格局. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8): 1055–1063]
- LIU H H, LIU Y X, ZHANG C H, *et al.* Remote sensing monitoring of wetland changes in the Yellow River Delta during 1991–2016. *Earth and Environment*, 2018, 46(6): 590–598 [刘海红, 刘胤序, 张春华, 等. 1991–2016 年黄河三角洲湿地变化的遥感监测. *地球与环境*, 2018, 46(6): 590–598]
- LIU Q, ZHANG S H, LIU Y F. Survey and analysis of *Macra veneriformis* resources in intertidal zone of the Yellow River Delta. *Marine Fisheries*, 2018, 40(2): 163–170 [刘强, 张士华, 刘艳芬, 等. 黄河三角洲潮间带四角蛤蜊资源调查分析. *海洋渔业*, 2018, 40(2): 163–170]
- LIU X, MA Y Y, LI G X, *et al.* Coastline evolution of the Yangtze estuary upon satellite remote sensing analysis. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2013, 33(2): 17–23 [刘雪, 马妍妍, 李广雪, 等. 基于卫星遥感的长江口岸线演化分析. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(2): 17–23]
- LIU Y, CHEN X J, WANG J T, *et al.* Dynamics of suitable habitat of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(5): 19–25 [陆尧, 陈新军, 汪金涛, 等. 西北太平洋柔鱼适宜栖息地动态变化研究. *渔业科学进展*, 2019, 40(5): 19–25]
- NIU M X, WANG J. Analysis of coastline variations in Dongying section of Yellow River Delta based on Landsat remote sensing image. *Water Resources Protection*, 2020, 36(4): 26–33 [牛明香, 王俊. 基于 Landsat 遥感影像的黄河三角洲东营段海岸线变化分析. *水资源保护*, 2020, 36(4): 26–33]
- ODUM E P. Tidal marshes as outwelling/pulsing systems. In ‘Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology’ (Eds M.P. Weinstein and D.A. Kreeger), 2002, 3–7
- PLATELL M E, FREEWATER P. Importance of saltmarsh to fish species of a large south-eastern Australian estuary during a spring tide cycle. *Marine and Freshwater Research*, 2009, 60(9): 936–941
- QIU C Y, LI X, LIU S A, *et al.* Monitoring tidal flats in the Yangtze River Delta using Landsat images. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(2): 269–278 [仇传银, 李行, 刘淑安, 等. 长江三角洲滩涂信息的遥感提取及时空变化. *地球信息科学*, 2019, 21(2): 269–278]
- SHEN B Z. Effects of rice grass invasion on macrobenthic invertebrates in the Yellow River Delta. Master’s Thesis of Shandong Normal University, 2006 [申保忠. 黄河三角洲米草入侵对大型底栖无脊椎动物的影响. 山东师范大学硕士研究生学位论文, 2006]
- WANG Z H, YI S Z. Comparison and research on the different index models used in water extraction by remote sensing. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(4): 534–537 [王志辉, 易善桢. 不同指数模型法在水体遥感提取中的比较研究. *科学技术与工程*, 2007, 7(4): 534–537]
- WU J J, LI Y Z, YU L J, *et al.* Dynamic changes and driving factors of landscape connectivity for natural wetland in Yellow River Delta. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(1): 71–78 [吴晶晶, 栗云召, 于良巨, 等. 黄河三角洲自然湿地景观连接度动态变化及其驱动因素分析. *生态环境学报*, 2018, 27(1): 71–78]
- XIAO Y F, ZHANG J, MA Y, *et al.* Landscape pattern and scale effect of Yellow River Estuarine wetland based on ZY-3 satellite. *Marine Sciences*, 2015, 39(2): 35–42 [肖艳芳, 张杰, 马毅, 等. 2015. 基于“资源三号”卫星的黄河口湿地景观格局及其空间尺度效应分析. *海洋科学*, 2015, 39(2): 35–42]
- XU M, HUANG S F, LI X T, *et al.* Monitoring the change of the Yellow River estuary with remote sensing and analysis of flow and sediment condition in the last ten years. *Journal of Sediment Research*, 2007(6): 39–46 [徐美, 黄诗峰, 李小涛, 等. 黄河口近十年变化遥感监测及水沙条件分析. *泥沙研究*, 2007(6): 39–46]
- XU Z T, SHAHZAD A, ZHANG S, *et al.* Mapping the wetland in Yellow River Delta and its dynamics in recent 30 years based on Landsat data. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020(3): 70–79 [徐振田, Ali Shahzad, 张莎, 等. 基于 Landsat 数据的黄河三角洲湿地提取及近 30 年动态研究. *海洋湖沼通报*, 2020(3): 70–79]
- YANG Z H, WANG W D, MA H L. Influences of water and sand regulation on Yellow River estuary reach monitored by remote sensing. *Hydro-Science and Engineering*, 2006(3): 65–68 [杨中华, 王卫东, 马浩录. 遥感监测调水调沙对黄河河口尾间的影响. *水利水运工程学报*, 2006(3): 65–68]
- YU X J, XUE Z S, ZHANG Z S, *et al.* Impacts of tidal channels on typical landscapes of wetland in the Yellow River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(12): 2504–2515 [于小娟, 薛振山, 张仲胜, 等. 潮沟对黄河三角洲湿地典型景观格局的影响. *自然资源学报*, 2019, 34(12): 2504–2515]

## Remote Sensing Monitoring of the Spatio-Temporal Dynamics of Mudflat Shellfish Habitat in the Yellow River Delta

NIU Mingxiang<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>1,2①</sup>, WANG Andong<sup>3</sup>, CHEN Ruisheng<sup>1</sup>, ZHANG Jiaxu<sup>4</sup>, ZHAO Yajie<sup>3</sup>

(1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Ecological Environment, Qingdao, Shandong 266071, China; 2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao, Shandong 266071, China; 3. Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve Administration Committee, Dongying, Shandong 257091, China; 4. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China)

**Abstract** Mudflat in the Yellow River Delta is the main production region of shellfish in Shandong Province. To enable economic development, the mudflat was greatly exploited, natural condition of the mudflat was disturbed, and the shellfish habitat was constantly subjected to changes. Based on remote sensing (RS) data and geographic information system (GIS) technology, the mudflat shellfish habitat in the Yellow River Delta data were obtained, and its spatio-temporal variation over the past 30 years was analyzed. For this study, a collection of Landsat images taken during the lowest tidal levels during 1986—2017 were selected as the data source and six images were used in the study. To extract the mudflat shellfish habitat, we chose the instantaneous waterline as the lower boundary and the reclamation dyke, aquaculture pond, or mean high tide line combined with vegetation line as the upper boundary. The results showed that the shellfish habitat area continued to decline from 1986 to 2017, from 1188 km<sup>2</sup> in 1986 to 396 km<sup>2</sup> in 2017. The variations were the most obvious during 1993—2001 and 2008—2013, and the average annual reduction area was approximately 34 km<sup>2</sup>. In terms of space, the Diaokou section showed a drastic variation, and the lower boundary expanded slightly to the sea during 1986—1993. However, the upper boundary moved toward the sea and the lower boundary retreated to the land during all other periods, and the area was greatly reduced. As for the estuary, its upper boundary was stable. At the lower boundary, deposition and erosion alternated due to the dual effects of runoff, sand transportation, and marine dynamic erosion, but the area changed only slightly on the whole. The factors influencing spatio-temporal changes in shellfish habitat were evidently different. Occupation by salt fields, aquaculture ponds, and engineering constructions were the main reasons for the changes in the Diaokou and Laizhou Bay sections. The estuary was mainly affected by changes in runoff, sand transportation, and marine dynamic erosion. However, in the Dongying Harbor and its adjacent section, habitat function was completely lost because of the construction of ports and oilfields.

**Key words** Mudflat shellfish; Habitat; Spatio-temporal dynamics; Remote sensing; Yellow River Delta

① Corresponding author: WANG Jun, E-mail: wangjun@ysfri.ac.cn