

朱萝云, 刘婷婷, 凡仁福, 等. 1986–2019年粤东企望湾砂质海岸线演变过程与驱动机制研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(7): 82–94, doi:10.12284/hyxb2022100

Zhu Luoyun, Liu Tingting, Fan Renfu, et al. Study on the evolution process and driving mechanism of the sandy shoreline of the Qiwang Bay in eastern Guangdong from 1986 to 2019[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(7): 82–94, doi:10.12284/hyxb2022100

# 1986–2019年粤东企望湾砂质海岸线 演变过程与驱动机制研究

朱萝云<sup>1</sup>, 刘婷婷<sup>1</sup>, 凡仁福<sup>2</sup>, 丁圆婷<sup>3</sup>, 于吉涛<sup>1,2\*</sup>

(1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 海南省海洋与渔业科学院, 海南 海口 571126; 3. 海南师范大学 地理与环境科学学院, 海南 海口 571158)

**摘要:** 本文采用1986–2019年113景Landsat影像提取高潮线, 辅以2015–2019年实测剖面数据, 开展了海湾尺度上海岸线的中长期演变过程与驱动机制研究。结果表明: 企望湾以中间小型基岩岬角为界划分出的西侧海滩和东侧海滩分别具备4种和3种不同的空间特征; 超过一半的区域其海岸线演变表现为非线性行为; Mann-Kendall趋势检验和显著性分析方法较好地解决了已有研究中对研究时段划分缺乏依据的问题; 近5年的实测剖面数据也验证了企望湾近期显著的淤积和侵蚀现象。进一步研究表明, 自西向东的沿岸输沙过程是近期海岸线演变主要的驱动机制, 东侧防波堤因为改变了控制性“岬角”的位置, 造成了海湾平面形态不平衡, 而中间小型基岩岬角也影响了企望湾侵蚀和淤积的空间差异性。研究结果对于预测未来岸线位置和控制岸线侵蚀风险具有重要的理论和现实意义。

**关键词:** 海岸线; Landsat 影像; 非线性变化; 沿岸输沙; 岬湾海滩

中图分类号: P737.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)07-0082-13

## 1 引言

全球变暖、海平面上升、海岸线后退之间存在着密切的关系, 因此, 海岸线被视为研究全球气候变化重要且灵敏的“窗口”。例如, Barnard等<sup>[1]</sup>分析了1979–2012年环太平洋海盆48个海滩的海岸线数据、波候数据和当地水位数据, 发现岸线侵蚀具有差异性, 与厄尔尼诺–南方涛动(El Niño–Southern Oscillation, EN–SO)的关系最为紧密。Carvalho等<sup>[2]</sup>将1986–2018年Landsat影像获取的海岸线位置数据与当地的波候数据关联起来, 证实了海岸线的年际变化与拉尼娜年发生的能量更高的风暴事件关系更紧密。已有的研究指出, 在某一时间上的海岸线位置是所有长期过程和短期过程累积的结果<sup>[3–4]</sup>, 不仅包括短期的波、潮、流

等过程和长期的海平面变化和河流输沙量等因素, 还包括人类活动的影响。因此, 海岸线蕴含着重要的过程信息、气候变化信息和人类活动信息, 研究海岸线的变化过程并试图揭示造成变化的驱动因素或机制是当前研究的重点<sup>[4–6]</sup>。

目前, 国内外海岸线变化的研究主要使用历史地图、海图、航空像片、卫星遥感影像、现场GPS调查等数据源, 其中Landsat系列卫星影像得到了越来越多的应用<sup>[7–10]</sup>。大部分研究通过提取多期(少于10期)岸线位置数据, 对生成的断面使用端点速率(End Point Ratio, EPR)方法、线性回归(Linear Regression Rate, LRR)方法、加权线性回归(Weighted Liner Regression, WLR)方法等量化岸线的侵蚀或淤积速率<sup>[7, 11–12]</sup>。而这样处理可能产生了如下的疑问:(1)当

收稿日期: 2021–07–08; 修订日期: 2021–12–10。

基金项目: 国家自然科学基金(42071007, 41701011); 2021年海南省本级部门预算项目“珊瑚岛礁泥沙湍动力过程观测技术构建与应用”。

作者简介: 朱萝云(1994—), 女, 河南省永城市人, 从事地理信息技术及应用研究。E-mail: 1076304138@qq.com

\* 通信作者: 于吉涛(1981—), 男, 山东省威海市人, 博士, 副教授, 从事海滩过程与海岸地貌研究。E-mail: ddyjt@163.com

可用数据较多时,不同的时段是基于岸线的时间变化分析挑选出来的还是随机挑选出来的?(2)所划分的时段能否准确刻画海岸线的变化过程?(3)当采用两种或多种不同的速率计算方法(例如EPR和LRR)时,哪种方法的结果更可靠?本质上,EPR、LRR和WLR方法都假设海岸线位置随时间恒定、匀速变化,认为海岸线变化表现为线性行为。然而,海岸线特有的变化性以及偶尔发生的极端事件或人类活动又决定了这种情况极少发生<sup>[13]</sup>。例如,Fenster等<sup>[3]</sup>为了解海岸线演变的非线性行为,使用最小描述长度(Minimum Description Length, MDL)标准判别历史岸线变化速率中是否发生显著变化和什么时候发生显著变化。Fenster和Dolan<sup>[13]</sup>使用该方法将美国大西洋中部海岸线的大尺度趋势逆转(非线性变化)归因于温带风暴的频率和等级。当前,国内大部分研究主要集中在对空间大尺度(全国、区域或省域)海岸线演变基本特征及驱动因素的研究<sup>[10,14–17]</sup>,且更加偏向于人类活动的影响。但人类活动(例如海岸建筑等)如何影响邻近海岸线的演变、影响多大范围等问题目前尚缺乏关注。

基于此,本文以粤东企望湾作为研究对象,通过提取1986–2019年Landsat影像(共113景)所有可用的高潮海岸线,分析企望湾长期演变的侵蚀、淤积过程;使用线性拟合和多项式拟合方法并尝试引入Mann-Kendall检验方法,阐明海岸线演变的线性行为或非线性行为,揭示企望湾海滩演变的控制机制以及海岸工程如何影响岸线演变;同时,使用了2015–2019年的实测剖面数据,证实企望湾近期发生的显著淤积和侵蚀现象。相关研究结果对于预测未来岸

线的演变和管理岸线侵蚀风险具有重要的意义。

## 2 研究区概况与数据源

### 2.1 研究区概况

企望湾位于广东省汕头市南部(23°09′~23°14′N, 116°38′~116°47′E),东起马耳角,西至海门角,整体呈弧形,湾口朝东南开敞,从北部汕头内港牛田洋分汊达濠溪注入湾顶(图1)。濠溪含沙量少,径流输沙量少<sup>[18]</sup>,河流供沙对海湾演变的影响有限。海湾偏西侧存在1个小型基岩岬角(虎仔山),将海湾划分为西侧海滩和东侧海滩,其中虎仔山西侧岸段被开发为旅游沙滩。企望湾潮汐属于不规则半日潮,平均潮差约为1.22 m,属于弱潮海岸。潮流运动为往复流,涨潮流向为E-ESE,落潮流向为W-WSW,涨潮历时长于落潮历时,平均流速为25~30 cm/s,最大流速为40~60 cm/s,潮流作用较弱<sup>[19]</sup>。影响海湾的波浪以风浪为主,常浪向与常风向(E-ESE)一致,但进湾后往往发生绕射和折射,抵达口门附近的波浪几乎全为SWS向;平均波高为0.79 m,平均最大波高为0.92 m,平均周期为7.7 s<sup>[18]</sup>。研究区夏、秋季节多台风,会对砂质海岸线的短期过程产生显著影响。企望湾为粤东海岸典型的岬湾砂质海滩,海岸线演变(或海岸侵蚀)受岬湾海岸控制的特点显著<sup>[20]</sup>。另外,海湾东西两侧分别于2007年和2012年建设了海岸工程,又对海岸线演变施加了显著的人为影响。近年来虎仔山东侧南山岸段年最大侵蚀距离为14.0 m,年平均侵蚀距离为8.0 m<sup>[21]</sup>。上述特点表明,以企望湾作为研究对象开展海岸线演变过程与驱动机制研究具有典型性和代表性。

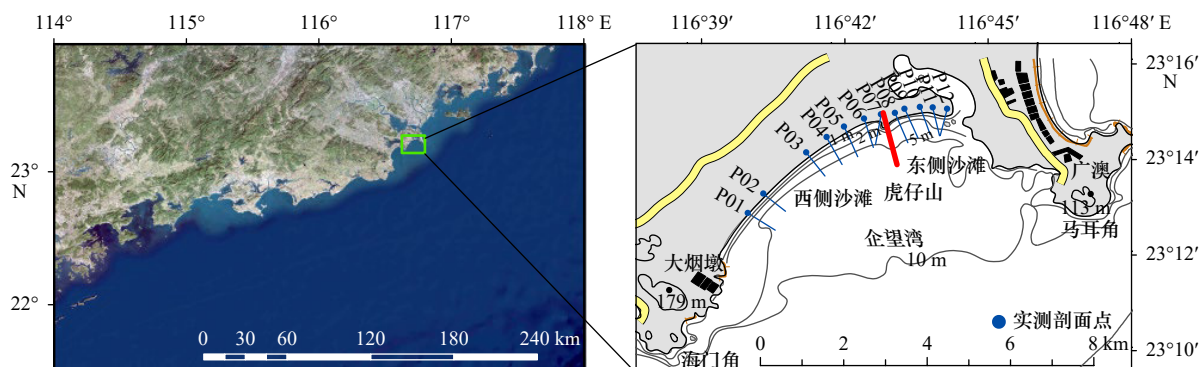


图1 研究区位置和等深线、剖面布设

Fig. 1 Location of the study area, and its bathymetric contours and profile arrangement

黑点处113 m和179 m代表此处的高程

113 m and 179 m at the black spots are the distance height

### 2.2 数据源

本研究数据源主要包括1986–2019年113景

Landsat系列陆地卫星遥感影像数据和2015–2019年夏季企望湾4次现场观测的12条剖面数据。Land-

sat 影像数据来自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 和美国地质调查局官方网站 (<https://earthexplorer.usgs.gov>), 选择行/列号为 120/44, 影像分辨率为 30 m, 云量低于 20% 且研究区无云、阴影和条带覆盖的影

像。113 景影像成像时刻介于 01:44:17–02:42:02, 主要集中在 02:00–02:30 (GMT+8 10:00–10:30)。成像时刻潮高皆低于多年平均高潮位 (图 2)。

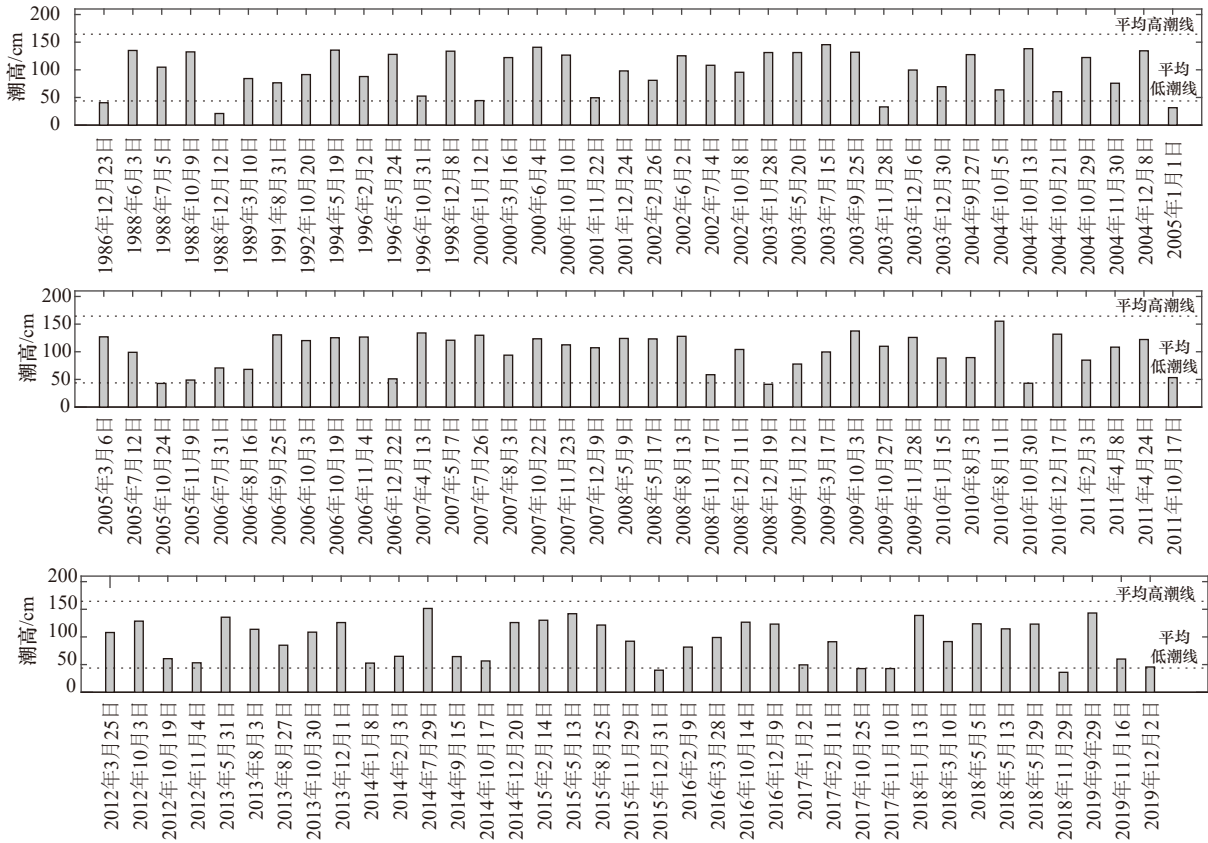


图 2 使用的 Landsat 陆地卫星影像成像时刻潮高

Fig. 2 Landsat series satellite images available and tidal heights at the time of imaging

此外, 本文使用了 2015–2019 年夏季企望湾 4 次现场观测的 12 条海滩剖面 (P01–P12) (图 1) 数据。观测期间, 使用合众思壮 RTK-GPS (国家 2000 坐标系)

沿每条剖面从后滨固定点测至当日低潮位时的涉水最深处 (图 3), 同时在潮间带上部和下部各采集表层泥沙样品 1 个。

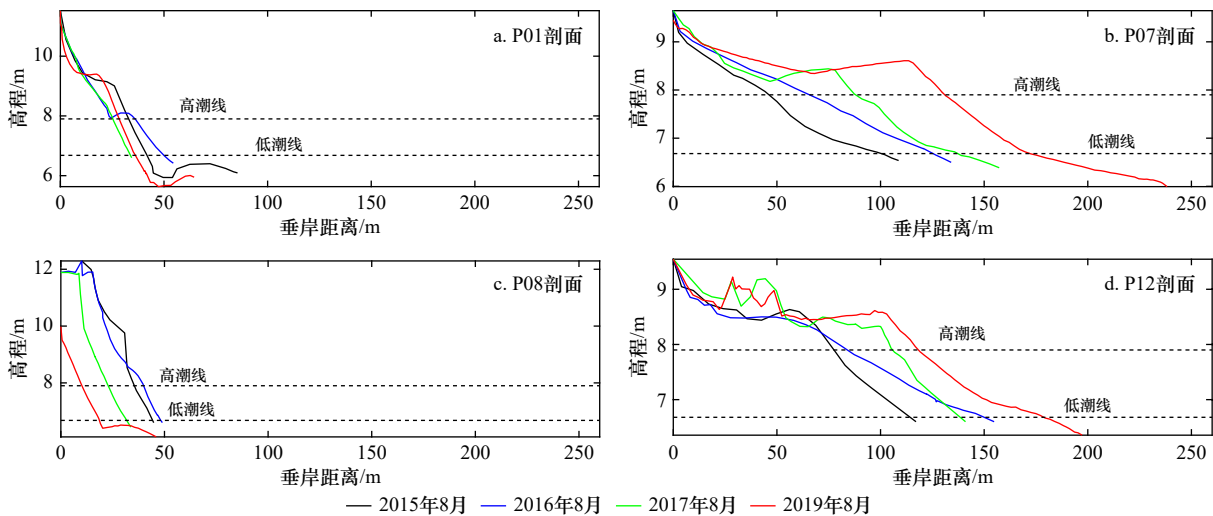


图 3 2015–2019 年夏季企望湾 4 条海滩剖面地形变化情况

Fig. 3 The morphological changes of four beach profiles at the Qiwang Bay in the summers of 2015 to 2019

### 3 研究方法

#### 3.1 高潮海岸线提取

实际应用中遥感海岸线提取较精确的方法一般有两种:一种是基于计算机自动提取瞬时水边线,然后进行潮位校正得到平均大潮高潮线<sup>[22-23]</sup>;另一种是根据岸线特征与野外调查经验进行人工目视解译提取高潮海岸线<sup>[5-6, 12, 24]</sup>。前者假定潮间带海滩坡度保持不变,通过两期遥感海岸线和潮位之差推算出海滩坡度。然而,砂质海滩实际的潮间带坡度是变化的。大部分情况下海滩剖面呈上凹形,即在低潮位附近坡度小,向陆侧坡度逐渐增加,这些情况都表明潮位校正方法未必可靠。另外,图2所示的113景遥感影像成像时的潮高不同且都低于多年平均高潮位,表明提取瞬时水边线也不可靠;因此,本文采用目视解译以光谱反射率不同的亮白干沙区域与灰暗潮间带的分界线作为解译标志分别提取了113景高潮海岸线<sup>[13, 25]</sup>。在ENVI 5.3平台下,对遥感影像进行裁剪、辐射定标、大气校正等预处理。然后,在ArcGIS平台下对TM和ETM+影像采用第5波段、第4波段、第3波段分别定义R(红)、G(绿)、B(蓝)进行假彩色合成提取高潮海岸线,对Landsat OLI影像采用第4波段、第5波段、第6波段的波段组合方式提取高潮海岸线。

#### 3.2 基于断面的速率计算和拟合方法

本文使用了美国地质调查局推荐的数字岸线分析系统(Digital Shoreline Analysis System, DSAS)在ArcGIS平台下自西向东生成了224条断面(断面间距50 m),其中,西侧海滩标记为T01–T167,东侧海滩标记为T168–T224。对于每一条断面的岸线速率计

算,本文采用了EPR和LRR方法<sup>[26]</sup>。此外,为了进一步研究海岸线的变化过程,本文提取了每一条断面上所有的岸线位置数据(113个),分别采用线性拟合方法( $y=ax+b$ )和二阶多项式拟合方法( $y=ax^2+bx+c$ )判断海岸线变化的线性行为或非线性行为。

#### 3.3 Mann-Kendall (M-K) 检验

Mann-Kendall(M-K)检验方法是检验长时间变化趋势的有效方法之一,优点是样本不需要遵循某一特定的分布,受异常值的影响小。该方法在水文、气象学中得到了广泛应用。为了深入探究企望湾海岸线较长期的演变过程与趋势变化,本文尝试引入M-K检验进一步揭示海岸线演变的线性行为或非线性行为,尤其关注趋势逆转或显著变化(例如侵蚀到淤积的转换、淤积加速或侵蚀加速等),其计算原理见文献<sup>[27]</sup>。

## 4 结果

#### 4.1 长期海岸线变化特征

通过EPR和LRR方法计算了1986–2019年企望湾海岸线的进退情况(图4)。EPR方法的结果(图4a)表明,108条断面发生侵蚀(占48.2%),116条断面发生淤积(占51.8%)。龙头山东侧(T01–T07断面)发生淤积,平均淤积速率为0.4 m/a,最大淤积速率为0.5 m/a(T03断面);竞海村至中海度假区岸段(T08–T111断面)发生侵蚀,平均侵蚀速率为1.1 m/a,最大侵蚀速率为2.2 m/a(T38断面);虎仔山西侧(T112–T167断面)发生淤积,平均淤积速率为2.3 m/a,最大淤积速率为5.5 m/a(T166断面)。南山岸段(T168–T181断面)发生侵蚀,平均侵蚀速率为1.8 m/a,最大

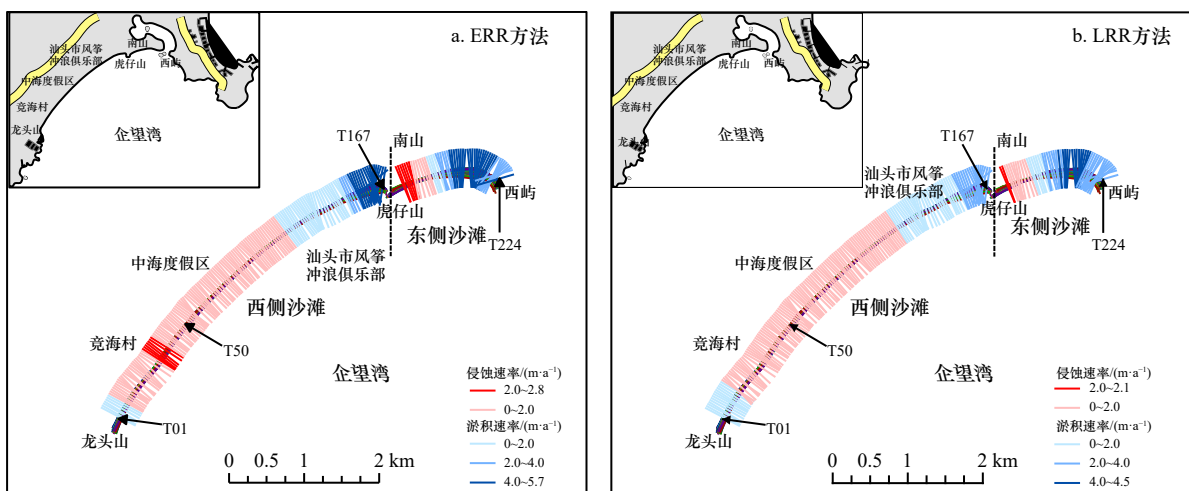


图4 1986–2019年企望湾海岸线进退情况

Fig. 4 Shoreline advance and recession of the Qiwang Bay during 1986 to 2019

侵蚀速率为 2.8 m/a (T168 断面); 西屿西侧 (T182–T224 断面) 发生淤积, 平均淤积速率为 4.0 m/a, 最大淤积速率为 5.7 m/a (T202 断面)。LRR 方法的结果 (图 4b) 则表明, 共有 113 条断面发生侵蚀 (占 50.4%), 111 条断面发生淤积 (占 49.6%)。龙头山东侧 (T01–T14 断面) 发生淤积, 平均淤积速率为 0.8 m/a, 最大淤积速率为 1.4 m/a (T01 断面); 竞海村至中海度假区岸段 (T15–T115 断面) 发生侵蚀, 平均侵蚀速率为 1.0 m/a, 最大侵蚀速率为 1.7 m/a (T36 断面); 虎仔山西侧 (T116–T167 断面) 发生淤积, 平均淤积速率为 1.3 m/a, 最大淤积速率为 2.9 m/a (T166 断面)。南山岸段 (T168–T179 断面) 发生侵蚀, 平均侵蚀速率为 1.3 m/a, 最大侵蚀速率为 2.1 m/a (T168 断面); 西屿西侧 (T180–T224 断面) 发生淤积, 平均淤积速率为 3.1 m/a, 最大淤积速率为 4.5 m/a (T203 断面)。

综上所述, EPR 和 LRR 方法都揭示了研究区近 30 年来在沿岸自西向东方向上所经历的“淤积–侵蚀–淤积–侵蚀–淤积”的空间变化特征, 仅从结果本

身, 无法评价孰优孰劣。两种方法所得到的趋势基本一致, 但侵蚀岸段与淤积岸段的转换位置存在差异, 平均或最大侵蚀和淤积速率也不同。

#### 4.2 不同时段海岸线变化特征

图 5 给出了企望湾不同时段海岸线的侵蚀或淤积情况。其中, 1986–1995 年间发生淤积的岸段有中海度假区岸段 (T53–T56 断面、T108–T137 断面)、虎仔山西侧 (T141–T167 断面)、西屿西侧 (T181–T211 断面), 共 93 条断面, 平均淤积速率为 1.9 m/a; 虎仔山西侧 T149 断面出现最高的淤积 (5.4 m/a), 西屿西侧 T190 断面出现次高的淤积 (4.5 m/a)。其他 131 条断面发生侵蚀, 平均侵蚀速率为 1.7 m/a; 龙头山东侧 T01 断面出现最高的侵蚀 (5.9 m/a), 西屿西侧 T218 断面出现次高的侵蚀 (4.8 m/a)。这一时期与 1986–2019 年的趋势进行对比, 差异性主要表现为龙头山至中海度假区岸段整体遭受侵蚀, 而西屿西侧岸段发生侵蚀 (图 5a)。

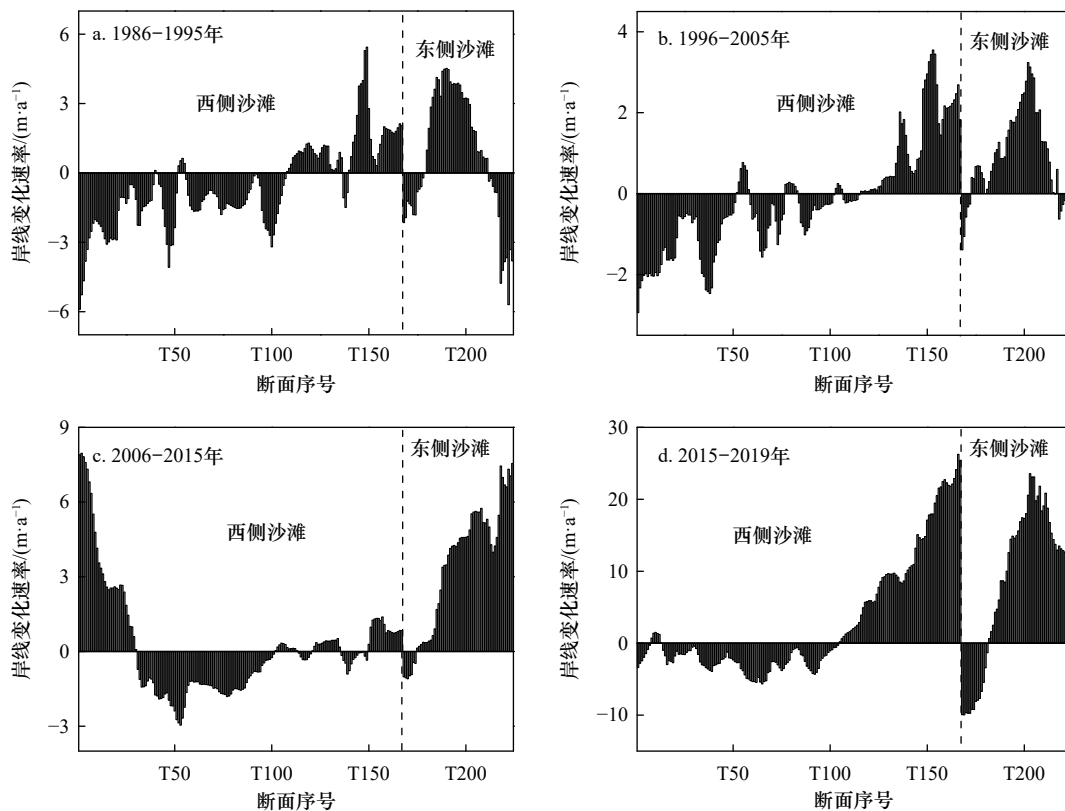


图 5 LRR 方法计算的企望湾不同时段海岸线进退情况

Fig. 5 Shoreline advance and recession during different periods calculated by LRR method at the Qiwang Bay

1996–2005 年间发生淤积的岸段有中海度假区岸段 (T52–T59 断面、T78–T84 断面、T104–T107 断面)、虎仔山西侧 (T116–T167 断面)、西屿西侧 (T173–T214 断面、T217 断面、T223–T224 断面), 共 116 条

断面, 平均淤积速率为 1.2 m/a; 虎仔山西侧 T154 断面出现最高的淤积 (3.6 m/a), 西屿西侧 T202 断面出现次高的淤积 (3.2 m/a)。其他 108 条断面发生侵蚀, 平均侵蚀速率为 1.0 m/a; 龙头山东侧 T01 断面出现最高

的侵蚀(2.9 m/a), 竞海村岸段 T38断面出现次高的侵蚀(2.5 m/a)。这一时期与 1986–2019年的趋势进行对比, 差异性主要表现为竞海村至中海度假区岸段基本上依然遭受侵蚀, 而南山岸段与 1986–1995年相比侵蚀速率减缓, 趋向于稳定(图 5b)。

2006–2015年间发生淤积的岸段有龙头山东侧(T01–T30断面)、中海度假村岸段(T102–T113断面)、虎仔山西侧(T121–T135断面、T150–T167断面)、西屿西侧(T175–T224断面), 共 125条剖面, 平均淤积速率为 2.7 m/a; 龙头山东侧 T02断面出现最高的淤积(8.0 m/a), 西屿西侧 T224断面出现次高的淤积(7.6 m/a)。其他 99条断面发生侵蚀, 平均侵蚀速率为 1.1 m/a; 中海度假区岸段 T53断面出现最高的侵蚀(3.0 m/a), T77断面上出现次高的侵蚀(1.8 m/a)。这一时期与 1986–2019年的趋势相比基本一致, 但是数值差异较大; 另外, 与 1986–1995年、1996–2005年相比, 龙头山东侧岸段开始发生显著淤积, 而虎仔山西侧淤积速率显著降低, 但是西屿西侧显著淤积(图 5c)。

2015–2019年间发生淤积的岸段有龙头山东侧(T08–T13断面)、虎仔山西侧(T105–T167断面)、西屿西侧(T182–T224断面), 共计 112条剖面, 平均淤积速率为 12.0 m/a; 虎仔山西侧 T166断面出现最高的淤积(26.7 m/a), 西屿西侧 T203断面出现次高的淤积(23.6 m/a)。其他 112条断面发生侵蚀, 平均侵蚀速率为 3.3 m/a; 南山岸段 T169断面出现最高的侵蚀(10.0 m/a), 中海度假区岸段 T65断面出现次高的侵蚀(5.7 m/a)。这一时期与 1986–2019年的趋势进行对比, 差异性主要表现为竞海村至中海度假区岸段整体处于侵蚀状态(图 5d)。

综上所述, 4个时段所得到的岸线进退情况表明, 研究区的某些区域存在侵蚀–淤积的逆转(例如龙头山东侧岸段、西屿西侧岸段等), 也表明 EPR 或 LRR 方法无法准确刻画岸线的演变过程。

#### 4.3 线性或非线性变化行为和 M-K 趋势检验

为了揭示海岸线更详细的变化过程, 本文对每条断面上所有的岸线位置数据采用线性拟合和二项式拟合方法评价岸线变化的线性行为或非线性行为。如图 6所示, 224条断面在沿岸方向上整体表现出 7种长期趋势特征。对于西侧海滩, 主要表现为 4种长期趋势特征。例如, 龙头山东侧岸段(T01–T31断面)为开口向上的二项式形态, 自西向东二项式系数  $A$  逐渐降低(图 6a 中的 0.214 降至图 6b 中的 0.113), 长期趋势逐渐趋于线性。竞海村至中海度假区岸段

(T32–T109断面)呈现斜率较大的线性降低趋势(图 6c), 并且向东斜率逐渐减小。汕头市风筝冲浪俱乐部岸段(T110–T123断面)则为斜率很小的线性趋势(图 6d), 可能指示着该岸段的稳定; 虎仔山西侧岸段(T124–T167断面)自西向东非线性趋势越来越显著(图 6e), 表现为二项式系数  $A$  升高。而东侧海滩则主要表现为 3种长期趋势特征。其中, 南山岸段(T168–T179断面)则表现出侵蚀加剧的非线性趋势(图 6f), 即后期的斜率明显大于前期。南山岸段东侧(T180–T183断面)岸段为斜率很小的线性趋势(图 6g), 指示着该岸段的稳定。西屿西侧岸段(T184–T224断面)则表现为自西向东非线性趋势越来越显著(图 6h)。其中, 二项式拟合效果更好的断面约有 128条, 占 57.1%, 而线性拟合效果更好的断面约有 96条, 占 42.9%。

上述结果揭示了企望湾某些岸段在时间上发生了趋势“逆转”, 例如龙头山东侧岸段、虎仔山西侧岸段、西屿西侧岸段, 表现为海岸带前期稳定或遭受侵蚀而后期发生淤积; 也揭示出了南山岸段存在侵蚀“加速度”, 即前期遭受侵蚀, 且后期的侵蚀更加强烈。为了得到发生显著变化的时间, 本文尝试引入 M-K 检验方法反演具体断面上岸线更详细的变化过程, 不仅关注趋势发生显著变化的时间, 还关注趋势的显著性检验。图 7以 8条断面为例阐述对海岸线中长期演变的 M-K 趋势检验。龙头山东侧 T01断面的  $UF$  统计量在  $x=2\ 004.937$ (对应 2004年 12月 8日)和  $x=2\ 007.282$ (对应 2007年 4月 13日)(即  $x$  是以数字代表的年份, 后同)出现显著侵蚀趋势最大值, 且都通过了 0.01 水平的显著性检验; 而  $x=2\ 018.408$ (对应 2018年 5月 29日)淤积趋势有稍减缓的趋势。整体而言,  $x=2\ 007.282$  所处的时间基本上可以将断面划分成前期线性侵蚀和后期线性淤积两个阶段(图 7a)。龙头山东侧 T24断面的  $UF$  统计量在  $x=2\ 004.937$ (对应 2004年 12月 8日)出现侵蚀趋势最大值, 但该侵蚀趋势一直较稳定的持续到  $x=2\ 008.88$ (对应 2008年 11月 17日), 且都通过了 0.01 水平的显著性检验; 然后转向淤积趋势, 但该淤积趋势没有通过 0.05 水平的显著性检验(图 7b)。T01断面和 T24断面海岸线的演变过程类似, 但发生趋势逆转的时间 T24断面滞后于 T01断面, 且 T24断面后期的淤积趋势不如 T01断面显著。竞海村岸段 T35断面的  $UF$  统计量整体呈现线性下降趋势, 并且通过了 0.01 水平的显著性检验; 但图中两个下箭头位置所指示的时段, 反映了短期过程对长期侵蚀趋势的影响(图 7c)。汕头市风筝

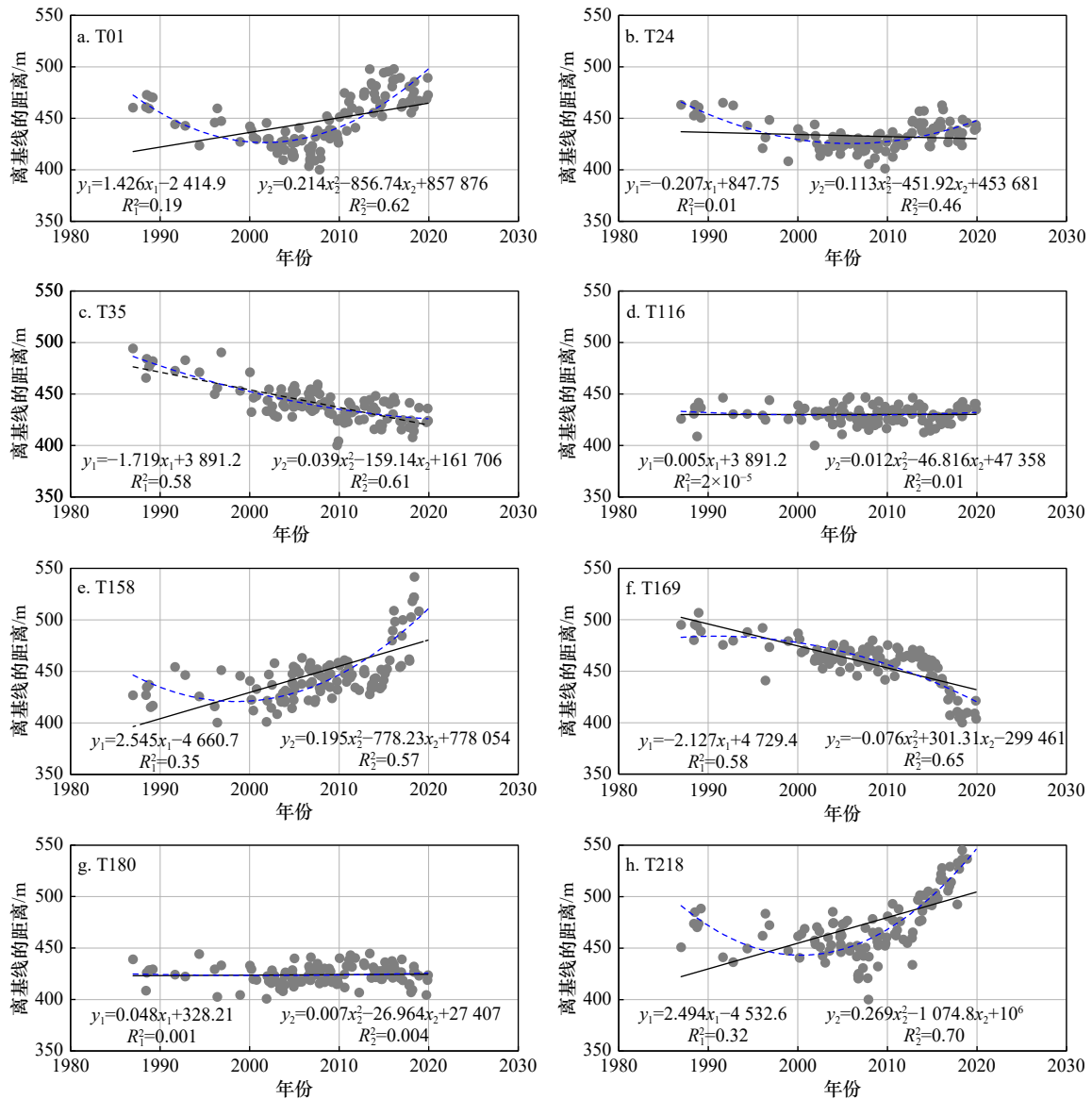


图 6 采用线性拟合方法和二项式拟合方法得到断面的长期趋势特征

Fig. 6 Long-term trend characteristics of individual intersect obtained by the methods of linear and binomial fitting

冲浪俱乐部岸段 T116 断面的  $UF$  统计量整体呈现一定的线性下降趋势,但是没有通过 0.05 水平的显著性检验,可以认为该岸段稳定(图 7d)。虎仔山西侧岸段 T158 断面的  $UF$  统计量在  $x=2004.937$ (对应 2004 年 12 月 8 日)之前趋势较稳定,随后开始朝向淤积状态;图中两个上箭头位置所对应的时段,则反映了短期过程对长期淤积趋势的影响,在  $x=2014.575$ (对应 2014 年 7 月 29 日)之后淤积趋势越来越显著(通过了 0.01 水平的显著性检验)(图 7e)。南山岸段 T169 断面的  $UF$  统计量整体呈现显著的侵蚀趋势一直到  $x=2004.937$ ,图中两个下箭头位置指示了该段时间内侵蚀趋势较稳定的持续到  $x=2013.655$ (对应 2013 年 8 月 27 日),随后侵蚀进一步加速(图 7f)。南山岸段东侧 T180 断面的  $UF$  统计量虽然具有一个先侵蚀后

淤积的趋势,通过 0.05 水平(持续时间较短)但没有通过 0.01 水平的显著性检验,表明岸段较为稳定(图 7g)。西屿西侧岸段 T218 断面的  $UF$  统计量在  $x=2007.94$ (对应 2007 年 12 月 9 日)出现显著的侵蚀趋势最大值;随后转向淤积趋势,图中两个上箭头位置指示了 1 个约两年的趋势稳定时期,一直到  $x=2013.589$ (对应 2013 年 8 月 3 日),随后该断面继续淤积且淤积情况越来越显著(图 7h)。

综上所述, M-K 趋势检验能够较好地揭示出断面上海岸线的长期变化过程。识别趋势的逆转,不仅有助于科学合理的划分研究时段,也有助于探讨造成趋势逆转背后的驱动因素或机制;并且,对于发生趋势逆转的岸段,其近期趋势对于预测岸线未来的演变可能更有意义。

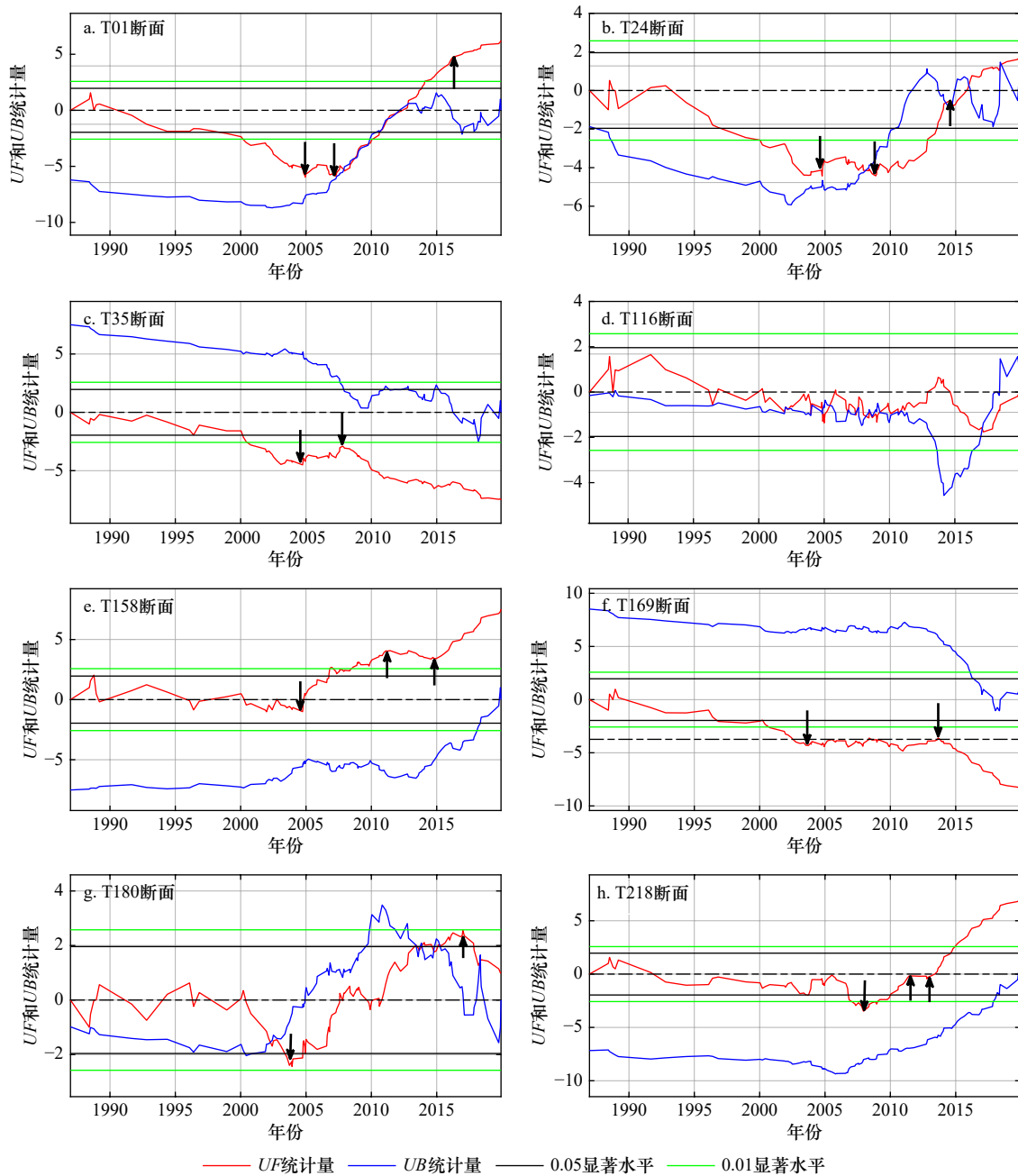


图7 M-K趋势检验得到具体断面的变化趋势及显著性检验

Fig. 7 The changing trend and significance test of specific transect obtained by M-K trend detecting method

箭头指示了断面趋势发生明显变化

The arrows indicate a marked change in the trend of the transect

#### 4.4 近期实测海滩地貌与岸线特征

对企望湾布设的12条海滩剖面在2015–2019年夏季先后开展了4次野外观测工作,海滩剖面地形变化如图3所示,海湾潮间带平均坡度(4次观测平均)和表层泥沙平均粒径(2015–2017年3次观测平均)如表1所示。西侧海滩整体以存在水下沙坝地形为特征,其中,龙头山至中海度假区岸段以横向沙坝为主,虎仔山西侧岸段则以沿岸沙坝为主;东侧海滩南山岸

段以横向沙坝为特征,西屿西侧岸段则以反射特征为特点。竞海村岸段和南山岸段潮间带宽度较小,一般小于15 m(图3a,图3c);而虎仔山西侧岸段和西屿西侧岸段宽度往往大于30 m(图3b,图3d),甚至有时超过50 m。表1表明,竞海村岸段和南山岸段坡度陡,由中砂组成,而虎仔山西侧岸段和西屿西侧岸段坡度较缓,由细砂所组成。

将近5年通过实测剖面得到的高潮线位置分别

表 1 企望湾潮间带海滩平均坡度和泥沙粒径的沿岸变化

Table 1 Longshore variation in average beach gradient and sediment size from the intertidal beach at the Qiwang Bay

| 剖面             | 西部海滩 |      |      |      |      |      | 东部海滩 |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                | P01  | P02  | P03  | P04  | P05  | P06  | P07  | P08  | P09  | P10  | P11  | P12  |
| 上部坡度/(°)       | 7.1  | 4.8  | 4.6  | 3.1  | 1.8  | 2.2  | 2.0  | 9.1  | 7.5  | 6.3  | 2.7  | 2.8  |
| 下部坡度/(°)       | 6.2  | 5.9  | 3.4  | 2.0  | 1.2  | 1.2  | 1.3  | 7.2  | 4.8  | 4.2  | 2.3  | 1.6  |
| 上部粒径( $\Phi$ ) | 1.60 | 1.58 | 1.84 | 2.28 | 2.41 | 2.47 | 2.44 | 1.30 | 1.05 | 1.50 | 2.27 | 2.54 |
| 下部粒径( $\Phi$ ) | 1.50 | 1.48 | 1.98 | 2.20 | 2.29 | 2.42 | 2.32 | 1.44 | 1.43 | 1.56 | 2.32 | 2.53 |

表 2 近 5 年实测岸线位置数据和遥感岸线位置数据使用 EPR 和 LRR 方法计算的岸线变化速率值对比

Table 2 Comparison of the values of shoreline change rate by the methods of EPR and LRR using measured shoreline position data and remote sensing shoreline position data in recent five years

| 实测剖面 | 对应断面 | 实测岸线 EPR 值/( $\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ ) | 遥感岸线 EPR 值/( $\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ ) | 实测岸线 LRR 值/( $\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ ) | 遥感岸线 LRR 值/( $\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ ) |
|------|------|---|---|---|---|
| P01  | T40  | -1.15                                       | -3.52                                       | -1.65                                       | -3.13                                       |
| P02  | T59  | -0.20                                       | -4.39                                       | -0.65                                       | -5.23                                       |
| P03  | T104 | -0.50                                       | 0.44  | -0.18                                       | -0.30                                       |
| P04  | T122 | 2.80  | 5.24  | 3.02  | 5.83  |
| P05  | T138 | 7.98  | 10.05                                       | 7.80  | 8.66  |
| P06  | T153 | 17.70                                       | 26.52                                       | 17.73                                       | 19.48                                       |
| P07  | T167 | 21.20                                       | 30.88                                       | 21.30                                       | 25.41                                       |
| P08  | T173 | -6.33                                       | -9.50                                       | -7.23                                       | -9.23                                       |
| P09  | T182 | 0.05  | 1.18  | -0.08                                       | 0.65  |
| P10  | T193 | 16.55                                       | 20.27                                       | 15.20                                       | 14.45                                       |
| P11  | T202 | 15.3  | 23.85                                       | 14.46                                       | 20.58                                       |
| P12  | T217 | 10.2  | 13.82                                       | 10.71                                       | 12.95                                       |

采用 EPR 和 LRR 方法进行计算(所得高潮线位置数据分别为 EPR 值和 LRR 值),并与近 5 年 22 期遥感海岸线位置数据计算得到的 EPR 值和 LRR 值进行对比。由表 2 可知,近 5 年来竞海村岸段和南山岸段均遭受侵蚀,而虎仔山西侧岸段和西屿西侧岸段发生淤积;其中,实测岸线的 LRR 值与遥感海岸线的 LRR 值趋势比较一致(侵蚀或淤积),整体而言数值更加接近;但在侵蚀岸段两个值之间的偏差较大,而在淤积岸段偏差较小。这主要是由于计算实测岸线的 LRR 值只使用了 4 个岸线位置,有限的个数会导致拟合结果的不确定性。此外,结果对比也反映了较陡、较窄的潮间带比较缓、较宽的潮间带不确定性更

高。图 3b 和图 3d 直观地反映了虎仔山西侧岸段和西屿西侧岸段发生淤积的事实,不仅表现为岸线向海推进,也表现为潮上带泥沙的明显堆积;虎仔山西侧岸段已形成典型的风沙地貌,以新月形沙丘为特征(图 8d 至图 8f)。图 8a 至图 8c 则证实了竞海村至中海度假区岸段海岸线显著的后退,早期滨海建造的房屋一部分已位于沙滩之上且遭受了严重毁坏。图 3c 和图 8g 至图 8i 则反映了南山岸段显著的侵蚀,不仅表现为岸线显著后退,也表现为后滨泥沙整体丧失而向陆后退。

## 5 讨论

企望湾属于弱潮海岸(潮差小于 2 m),但虎仔山西侧岸段和西屿西侧岸段因潮间带泥沙较细、坡度较缓导致潮间带宽度往往大于 30 m(图 3),这表明利用计算机提取瞬时水边线的方法在企望湾不一定可靠。表 1 展示了企望湾潮间带海滩坡度的沿岸变化和垂岸变化,表明采用潮汐校正瞬时海岸线推算出大潮平均高潮线的做法也很难保证岸线提取的准确性<sup>[22-23]</sup>。因此,本文采用了目视解译方法提取高潮海岸线。对于岸线提取结果精度评估,侯西勇等<sup>[28]</sup>提出了“理论最大允许误差”的概念及计算方法判断岸线的精度水平。本文据此对 2016 年、2017 年和 2019 年 8 月实测的 36 个控制点和高潮点(图 3)与 3 期遥感影像(2016 年 10 月 14 日、2017 年 10 月 25 日和 2019 年 9 月 29 日)提取的高潮海岸线进行误差分析,均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)分别为 31.37 m、37.89 m 和 22.17 m,平均值为 31.15 m,误差水平约为 1 个像元。因为没有做到同步观测,该评价结果可能包括因台风事件等造成的高潮海岸线变化。因此,为了降低提取过程中存在的不确定性<sup>[9-10]</sup>,本文增加了遥感影像的数量(超过 100 景)。

本文采用线性拟合和非线性拟合方法评价了海



图8 企望湾典型侵蚀(a-c, g-i)和淤积(d-f)岸段的特征

Fig. 8 Erosion (a-c, g-i) and accretion (d-f) characteristics of typical segments at the Qiwang Bay

岸线演变的线性或非线性行为。结果表明,超过半数(57.1%)断面上的海岸线变化主要表现为非线性行为,这也反映了EPR和LRR方法的不可靠性。而对于长期表现出线性变化行为的海岸线,也可能受到短期过程或极端事件的影响(图7c),相比于LRR方法,EPR方法由于只使用了两个岸线位置会产生更大的不可靠性。

对于龙头山东侧岸段、虎仔山西侧岸段、西屿西侧岸段前期与后期变化特征逆转的区域,为了更准确地划分“前期”与“后期”之间的时间,本文尝试引入的M-K趋势检验可以较好地揭示海岸线详细的演变过程和趋势特征。对于具有线性变化行为或比较稳定的区域(例如竞海村至中海度假区岸段、汕头市风筝冲浪俱乐部岸段和南山岸段东侧),所有的数据都对长期趋势有所贡献;而对于具有非线性变化行为的区域(例如龙头山东侧岸段、虎仔山西侧岸段、西屿西侧岸段等),当对未来岸线位置进行预测时,应该重点考虑后期数据。这一处理也纠正了目前很多研究中对于研究时段的划分缺乏依据的问题<sup>[7,11-12]</sup>。

由4.3节可知,龙头山东侧岸段在2007–2008年自西向东依次发生了趋势逆转(侵蚀–淤积)。遥感影像显示,企望湾西侧在2007年建设了防波堤。该工程建设影响了龙头山东侧岸段的海岸线演变(大约为1.55 km);造成该区域海岸线自西向东依次发生趋

势逆转(时间响应逐渐滞后),并且该工程对越靠近西侧的岸线影响越大,淤积越显著。西侧海滩的竞海村至中海度假区岸段和虎仔山西侧岸段以及东侧海滩南山岸段和西屿西侧岸段的变化特征,表明了企望湾近期存在着显著自西向东的沿岸输沙。因小型基岩岬角(虎仔山)对西侧泥沙的阻挡,导致西侧海滩和东侧海滩都具有这种空间分布特征,其中汕头市风筝冲浪俱乐部岸段和南山岸段东侧则表现出“枢纽”作用,这两个岸段海岸线比较稳定。

东侧海滩西屿西侧岸段的长期演变趋势与龙头山东侧岸段类似(前期侵蚀后期淤积),应归因于企望湾东侧2012年修建的向海延伸很长的防波堤。由4.3节可知,西屿西侧岸段(T218断面)开始发生显著淤积的时间为2013年8月3日,南山岸段(T169断面)发生侵蚀加速的时间为2013年8月27日,虎仔山西侧岸段(T158断面)则在2014年7月29日后淤积越来越显著。这表明,东侧防波堤发挥了控制性“岬角”的作用,改变了岬湾海滩原有的长期平面形态。基于此,本文使用了岬湾海滩平衡平面形态模型(Model for Equilibrium Planform of BAY Beach, MEP-BAY)软件<sup>[29]</sup>模拟了“岬角”变动前后企望湾长期的平衡平面形态。如图9所示,东侧防波堤建设前,模拟的海岸线在岬角以西位于实际海岸线陆侧,表明企望湾处于一种动态平衡状态。东侧防波堤建成后,模拟

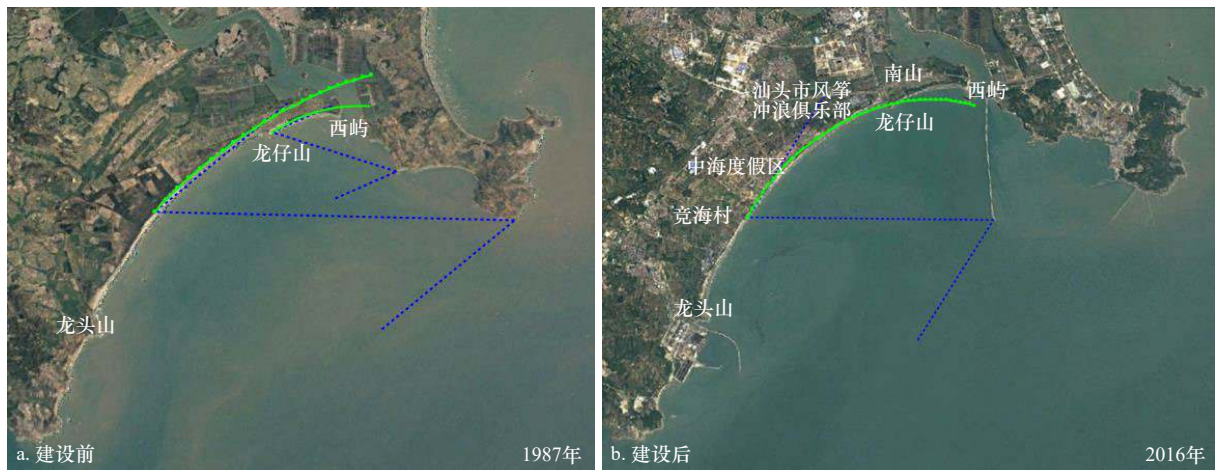


图9 MEPBAY 软件模拟东侧防波堤建设前后对海湾平衡平面形态的影响(a: 动态平衡; b: 不稳定)

Fig. 9 Modelling the impact of the absence and presence of the east breakwater on headland-bay equilibrium plan-form by the software of MEPBAY (a: dynamic equilibrium; b: unstable state)

的海岸线在岬角以西位于实际海岸线海侧,表明海湾处于一种不稳定状态。这表明,东侧防波堤建成后,导致西侧海滩由竞海村至中海度假区岸段经汕头市风筝冲浪俱乐部岸段向虎仔山西侧岸段堆积泥沙,但因虎仔山岬角的阻挡,泥沙无法继续向东搬运;而这进一步导致了东侧海滩南山岸段近期发生显著侵蚀,经南山岸段东侧向西屿西侧岸段堆积泥沙。所以,东侧防波堤的建设导致企望湾处于不稳定状态,沿岸流控制着泥沙自西向东搬运,试图重塑企望湾新的平衡平面形态,影响范围约为 9.65 km。

此外,本文使用了 M-K 检验对单个断面逐一进行了趋势识别并测定了发生趋势显著变化的时间,发现海湾东侧防波堤的修建导致海岸线自东向西在时间上依次滞后响应。这表明,相邻断面上的岸线位置变化具有空间相关性。Frazer 等<sup>[30]</sup>和 Genz 等<sup>[31]</sup>也指出,单个断面上岸线位置的变化非独立事件,而是与相邻断面上岸线位置的变化有关。因此,今后将继续探索沿岸方向上包含海岸线速率变化相关性的方法。

## 6 结论

本文使用了 1986–2019 年 113 景的 Landsat 影像

数据提取高潮海岸线,开展了海湾尺度下海岸线的中长期演变过程与驱动机制研究,主要得到如下结论:

(1)以中间小型基岩岬角为界划分出的西侧海滩在空间上具备 4 个特征:前期侵蚀后期淤积、一直侵蚀、较稳定、前期侵蚀或稳定而后期淤积;东侧海滩在空间上则具备 3 个特征:前期侵蚀后期侵蚀加剧、较稳定和前期侵蚀后期淤积。

(2)超过半数的区域海岸线演变表现出非线性行为,表明 EPR 和 LRR 方法的不可靠性;而对于主要表现为线性变化行为的海岸线,LRR 方法因使用了更多的岸线位置数据点会更具可靠性。

(3)M-K 趋势检验可以较好地识别海岸线的中长期趋势变化并进行显著性检验,解决了已有研究中对研究时段的划分缺乏依据的问题;而近 5 年的实测剖面数据证实了 M-K 趋势检验所得到的近期海滩侵蚀和淤积的事实。

(4)东侧防波堤的建设影响的海岸范围约为 9.65 km,表现为海岸线的响应时间自东向西滞后。该防波堤影响海岸线的主要原因是造成了控制性“岬角”位置的变动,导致岬湾海滩平面形态变为不稳定状态,自西向东的沿岸输沙过程和中间小型基岩岬角的阻挡主要控制着海岸线演变的空间特征。

## 参考文献:

- [1] Barnard P L, Short A D, Harley M D, et al. Coastal vulnerability across the Pacific dominated by El Niño/Southern Oscillation[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 801–807.
- [2] Carvalho B C, Dalbosco A L P, Guerra J V. Shoreline position change and the relationship to annual and interannual meteo-oceanographic conditions in Southeastern Brazil[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 235: 106582.
- [3] Fenster M S, Dolan R, Elder J F. A new method for predicting shoreline positions from historical data[J]. *Journal of Coastal Research*, 1993, 9(1): 147–171.
- [4] 毋亭, 侯西勇. 海岸线变化研究综述[J]. *生态学报*, 2016, 36(4): 1170–1182.

- Wu Ting, Hou Xiyong. Review of research on coastline changes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 1170–1182.
- [5] Hapke C J, Reid D, Richmond B. Rates and trends of coastal change in California and the regional behavior of the beach and cliff system[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(3): 603–615.
- [6] Kish S A, Donoghue J F. Coastal response to storms and sea-level rise: Santa Rosa Island, Northwest Florida, U. S. A.[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, SI(63): 131–140.
- [7] 丁小松, 单秀娟, 陈云龙, 等. 基于数字化海岸分析系统(DSAS)的海岸线变迁速率研究: 以黄河三角洲和莱州湾海岸线为例[J]. *海洋通报*, 2018, 37(5): 565–575.
- Ding Xiaosong, Shan Xiujuan, Chen Yunlong, et al. Study on the change rate of shoreline based on digital coastal analysis system (DSAS): taking the shoreline of the Yellow River Delta and Laizhou Bay as an example[J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37(5): 565–575.
- [8] 沈昆明, 李安龙, 蒋玉波, 等. 基于数字岸线分析系统的海岸线时空变化速率分析——以海州湾为例[J]. *海洋学报*, 2020, 42(5): 117–127.
- Shen Kunming, Li Anlong, Jiang Yubo, et al. Time-space velocity analysis of coastline based on digital shoreline analysis system: a case study of the Haizhou Bay[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(5): 117–127.
- [9] Xu Nan. Detecting coastline change with all available Landsat data over 1986–2015: a case study for the State of Texas, USA[J]. *Atmosphere*, 2018, 9(3): 107.
- [10] Xu Nan, Gong Peng. Significant coastline changes in China during 1991–2015 tracked by Landsat data[J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(14): 883–886.
- [11] 张翔, 王霄鹏, 黄安齐, 等. 基于遥感影像提取山东半岛复杂海岸线及海岸线多年变迁研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2021, 43(2): 171–181.
- Zhang Xiang, Wang Xiaopeng, Huang Anqi, et al. Extraction of complex coastline feature and its multi-year changes in Shandong Peninsula based on remote sensing image[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2021, 43(2): 171–181.
- [12] Benkhattab F Z, Hakkou M, Bagdanavičiūtė I, et al. Spatial-temporal analysis of the shoreline change rate using automatic computation and geospatial tools along the Tetouan Coast in Morocco[J]. *Natural Hazards*, 2020, 104(1): 519–536.
- [13] Fenster M, Dolan R. Large-scale reversals in shoreline trends along the U. S. mid-Atlantic Coast[J]. *Geology*, 1994, 22(6): 543–546.
- [14] 高义, 王辉, 苏奋振, 等. 中国大陆海岸线近30 a的时空变化分析[J]. *海洋学报*, 2013, 35(6): 31–42.
- Gao Yi, Wang Hui, Su Fenzhen, et al. The analysis of spatial and temporal changes of the continental coastlines of China in recent three decades[J]. *Haiyang Xuebao*, 2013, 35(6): 31–42.
- [15] 徐进勇, 张增祥, 赵晓丽, 等. 2000–2012年中国北方海岸线时空变化分析[J]. *地理学报*, 2013, 68(5): 651–660.
- Xu Jinyong, Zhang Zengxing, Zhao Xiaoli, et al. Spatial-temporal analysis of coastline changes in northern China from 2000 to 2012[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 651–660.
- [16] 刘百桥, 孟庆伟, 赵建华, 等. 中国大陆1990–2013年海岸线资源开发利用特征变化[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(12): 2033–2044.
- Liu Baiqiao, Meng Qingwei, Zhao Jianhua, et al. Variation of coastline resources utilization in China from 1990 to 2013[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(12): 2033–2044.
- [17] Hou Xiyong, Wu Ting, Hou Wan, et al. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(9): 1791–1802.
- [18] 梁国雄. 汕头南部企望湾海岸地貌发育[J]. *热带海洋*, 1986, 5(3): 33–41.
- Liang Guoxiong. Coast line development in the Qiwang Bay south of Shantou city[J]. *Tropic Oceanology*, 1986, 5(3): 33–41.
- [19] 李伯根, 谢钦春, 夏小明, 等. 企望湾砂质海滩剖面冲淤幅度的估算[J]. *东海海洋*, 2002, 20(1): 20–27.
- Li Bogen, Xie Qin Chun, Xia Xiaoming, et al. Assessment on the adjustable fluctuation between erosion and deposition on beach profile in sandy arc-shaped shore of the Qiwangwan Bay[J]. *Donghai Marine Science*, 2002, 20(1): 20–27.
- [20] 季荣耀, 罗章仁, 陆永军, 等. 广东省海岸侵蚀特征及主因分析[C]//第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 北京: 海洋出版社, 2009: 742–747.
- Ji Rongyao, Luo Zhangren, Lu Yongjun, et al. The characteristics and main causes of coastal erosion in Guangdong Province[C]//Proceedings of the 14th China Offshore Engineering Symposium (Volume I). Beijing: China Ocean Press, 2009: 742–747.
- [21] 自然资源部海洋预警监测司. 2020年中国海平面公报[R]. 北京: 自然资源部海洋预警监测司, 2021.
- Department of Marine Early Warning and Monitoring, Ministry of Natural Resources. 2020 China sea level bulletin[R]. Beijing: Department of Marine Early Warning and Monitoring, Ministry of Natural Resources, 2021.
- [22] 胡亚斌, 马毅, 孙伟富, 等. 基于多期遥感影像的砂质岸线提取方法——以海阳沙滩为例[J]. *海洋开发与管理*, 2016, 33(5): 32–36, 49.
- Hu Yabin, Ma Yi, Sun Weifu, et al. A method of extracting sandy coastline based on multi-temporal images: a case in Haiyang Beach[J]. *Ocean Development and Management*, 2016, 33(5): 32–36, 49.
- [23] Maiti S, Bhattacharya A K. Shoreline change analysis and its application to prediction: a remote sensing and statistics based approach[J]. *Marine Geology*, 2009, 257(1/4): 11–23.
- [24] Del Río L, Gracia F J, Benavente J. Shoreline change patterns in sandy coasts: A case study in SW Spain[J]. *Geomorphology*, 2013, 196: 252–266.

- [25] Pajak M J, Leatherman S. The high water line as shoreline indicator[J]. *Journal of Coastal Research*, 2002, 18(2): 329–337.
- [26] Thieler E R, Himmelstoss E A, Zichichi J L, et al. The digital shoreline analysis system (DSAS) version 4.0—an ArcGIS extension for calculating shoreline change[R]. Woods Hole: U. S. Geological Survey, 2017: 49–50.
- [27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007: 69–72.
- Wei Fengying. *Modern Climate Statistics Diagnosis and Prediction Technology*[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 69–72.
- [28] 侯西勇, 毋亭, 王远东, 等. 20世纪40年代以来多时相中国大陆岸线提取方法及精度评估[J]. *海洋科学*, 2014, 38(11): 66–73.
- Hou Xiyong, Wu Ting, Wang Yuandong, et al. Extraction and accuracy evaluation of multi-temporal coastlines of mainland China since 1940s[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(11): 66–73.
- [29] da Fontoura Klein A H, Vargas A, Raabe A L A, et al. Visual assessment of bayed beach stability with computer software[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29(10): 1249–1257.
- [30] Frazer L N, Genz A S, Fletcher C H. Toward parsimony in shoreline change prediction ( I ): basis function methods[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(2): 366–379.
- [31] Genz A S, Frazer L N, Fletcher C H. Toward parsimony in shoreline change prediction ( II ): applying Basis function methods to real and synthetic data[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(2): 380–392.

## Study on the evolution process and driving mechanism of the sandy shoreline of the Qiwang Bay in eastern Guangdong from 1986 to 2019

Zhu Luoyun<sup>1</sup>, Liu Tingting<sup>1</sup>, Fan Renfu<sup>2</sup>, Ding Yuanting<sup>3</sup>, Yu Jitao<sup>1,2</sup>

(1. *School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China*; 2. *Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 571126, China*; 3. *School of Geography and Environmental Sciences, Hainan Normal University, Haikou 571158, China*)

**Abstract:** A dataset of the high water lines extracted from 113 Landsat images from 1986 to 2019 and the measured profile data from 2015 to 2019 were used to examine the middle-term to long-term shoreline process and driver at the embayment scale in this paper. The results show that the western and eastern beaches of the Qiwang Bay, which is separated by one small bedrock headland, have four and three different spatial characteristics, respectively. More than half of the shorelines behaved nonlinear in their variation trends. Thus, we use the Mann-Kendall method to solve the problem of the lack of basis for the division of time periods. In addition, the east breakwater resulted in the unstable embayment planform due to changing the position of the controlling “headland” and therefore the longshore sediment transport from west to east is the main driver of the most recent shoreline. And the intervening small bedrock headland also influenced the spatial variability of erosion and accretion at the Qiwang Bay. These findings will have important theoretical and practical significance for predicting further shoreline position and reducing the risk of shoreline erosion.

**Key words:** shoreline; Landsat image; nonlinear change; longshore sediment transport; headland-bay beach