

# 基于地貌动力学的雷州半岛海滩状态分类研究

朱士兵<sup>1</sup>, 李志强<sup>1</sup>, 张会领<sup>2</sup>, 曾春华<sup>2</sup>, 陈海银<sup>2</sup>

(1. 广东海洋大学电子与信息工程学院, 湛江 524088; 2. 广东海洋大学海洋工程学院, 湛江 524088)

**摘要:** 海滩地貌动力学为理解海滩形态和海岸动力环境提供了理论框架, 在海滩的保护与开发中有重要的指导意义。基于地质背景、海滩地貌形态、海滩沉积物和海洋动力要素选取7个可以量化的海滩特征指标, 采用聚类分析对雷州半岛23个海滩进行分类和地貌动力特征识别, 针对海滩状态分类模型 $\Omega$ -RTR在雷州半岛复杂多变海岸线环境下的适用性进行了分析, 结果表明: ① 雷州半岛海滩可以分为六类: 反射组、低潮阶地/反射组(有裂流)、沙坝-槽谷/中间状态组、沙坝消散组、超消散组和低潮阶地/反射组(无裂流); ② 波浪、潮汐、沉积物特征以及海岸地质构造背景等对雷州半岛海滩状态均有不同程度的影响, 在不同岸段各要素的影响各异。地质背景是海滩状态分类不可忽视的因素。③ 由于 $\Omega$ -RTR模型在判别海滩状态时更侧重于动力和沉积因素, 分类结果与聚类分析结果稍有差异, 但总体上可以有效区分海滩状态类型, 是理解海滩动力地貌系统有效手段。

**关键词:** 海滩状态; 地貌动力学;  $\Omega$ -RTR模型; 聚类分析; 雷州半岛

DOI: 10.11821/dlyj020190444

## 1 引言

海洋动力因素(波浪、潮流)驱动着泥沙运动使得海滩形态动态变化, 而不同地理空间的环境背景(波浪、潮汐、沉积物、地质等)造就了海滩各异的状态。基于此, 海岸研究学者将一些关键环境条件参数化联系起来, 提出了海滩状态分类模型。最早提出的是碎波相似参数 $\zeta$ <sup>[1]</sup>:

$$\zeta = \tan\beta / (H_b L_0) \quad (1)$$

式中:  $\beta$ 是海滩坡度;  $H_b$ 碎波波高;  $L_0$ 是深水波长。当 $\zeta < 0.4$ 时, 破波类型为崩破波; 当 $\zeta > 2$ 时, 破波类型为激破波; 当 $0.4 < \zeta < 2$ 时, 破波类型为卷破波。此参数可识别波浪特征进而判断波浪环境和碎波带内的海滩状态。在此基础上, Guza和Inman在1975年提出了应用更为广泛的等价模型碎波尺度参数 $\varepsilon$ <sup>[2]</sup>:

$$\varepsilon = \alpha_i \omega^2 / g \tan^2 \beta \quad (2)$$

式中:  $\alpha_i$ 是破波振幅;  $\omega$ 是入射波频率;  $g$ 是重力加速度;  $\beta$ 是海滩坡度。该模型主要通过判别破波类型将海滩类型进行分类, 模型只将海滩划分为两种极端状态: 完全消散型( $\varepsilon < 2.5$ )和高度反射型( $\varepsilon > 20$ )。

1984年Wright和Short基于波浪和沉积物要素提出无量纲沉降速率 $\Omega$ 的海滩状态分类<sup>[3]</sup>:

收稿日期: 2019-05-29; 修订日期: 2019-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41676079); 广东海洋大学创新强校工程项目(Q18307)

作者简介: 朱士兵(1992-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为海滩资源及海岸地貌动力过程。

E-mail: 26585759@qq.com

通讯作者: 李志强(1974-), 男, 湖南郴州人, 教授, 博士生导师, 研究方向为海岸地形动力学。

E-mail: qiangz11974@163.com

$$\Omega = H_b / W_s T \quad (3)$$

式中： $H_b$ 是破波波高； $W_s$ 是泥沙沉降速率； $T$ 是波浪周期。该模型不仅限定了两种极端海滩类型：反射型（ $\Omega < 1$ ）和消散型（ $\Omega > 6$ ）。还指出，当 $1 < \Omega < 6$ 时，海滩处于中间状态，随着 $\Omega$ 值的增大，海滩依次表现为低潮台地（LTT）、横向沙坝和裂流（TBR）、韵律沙坝和海滩（RBB）、沿岸沙坝槽谷（LBT）四种中间状态。该模型得到了广泛的使用并取得了良好的效果<sup>[4,5]</sup>。

1988年Sunamura提出用无量纲数 $k^*$ 来表征海滩蚀积状态与波能的关系，并把水下沙坝作为标识海滩状态的重要特征地形<sup>[6]</sup>：

$$k^* = H_b^2 / (gT^2 D) \quad (4)$$

式中： $H_b$ 是破波波高； $g$ 是重力加速度； $T$ 是波浪周期； $D$ 为泥沙粒径。此模型把海滩特征地貌组合演变分为8个阶段，有利于加深对砂质海岸侵蚀机制的认识。然而，碎波相似参数 $\zeta$ 、碎波尺度参数 $\epsilon$ 、无量纲沉降速率 $\Omega$ 和无量纲数 $k^*$ 都以波周期、波高和海滩泥沙来描述海滩状态，忽略了潮汐对海滩形态塑造的作用，模型是不全面的。

1993年Masselink和Short提出了相对潮差RTR的概念：

$$RTR = TR / H_b \quad (5)$$

式中： $H_b$ 是破波波高； $TR$ 为大潮平均潮差。此模型将相对潮差加入到海滩状态类型判别标准中，结合无量纲沉降速率 $\Omega$ 将海滩状态分为4组8类：完全反射组（ $\Omega < 2$ 和 $RTR < 3$ ）；有裂流的低潮台地组（ $\Omega < 2$ ， $3 < RTR < 7$ ），没有裂流的低潮台地组（ $\Omega < 2$ ， $RTR > 7$ ）；沙坝中间组（ $2 \leq \Omega \leq 5$ ， $RTR < 3$ ），低潮沙坝/裂流中间组（ $2 \leq \Omega \leq 5$ ， $3 \leq RTR \leq 7$ ）；沙坝消散组（ $\Omega > 5$ ， $RTR < 3$ ），没有沙坝的消散组（ $\Omega > 5$ ， $RTR > 3$ ），超消散组（ $\Omega > 2$ 和 $RTR > 7$ ）。

各种模型的提出，极大促进了对海滩的理解，但模型的侧重方向存在一定的差异。碎波相似参数 $\zeta$ 模型局限于碎波带内波浪破碎形式对海滩状态的影响；碎波尺度参数 $\epsilon$ 模型不足之处在于无法识别海滩中间状态；无量纲沉降速率模型 $\Omega$ 的提出初步划分了海滩中间状态类型，在海滩状态分类上取得了很大进步，但在中间状态海滩类型的区分上还要通过现场观测来进行；无量纲数 $k^*$ 将地形的侵蚀变化与碎波过程能量的变化联系起来，但仍仅适合日本小潮差海滩。海滩状态分类模型 $\Omega$ -RTR引入了潮差对海滩状态的影响，将更多影响海滩状态的主要因子考虑进来，使海滩状态的理论框架更加完善，在后来的海滩分类方面研究工作中得到了大量应用<sup>[7-12]</sup>，并且在海滩生态学<sup>[13]</sup>、海滩裂流风险评估方面得到应用<sup>[14]</sup>。 $\Omega$ -RTR模型已成为判别海滩状态应用最为广泛的模型。

随着海滩状态分类研究的不断深入，越来越多成果表明 $\Omega$ -RTR模型在区分海滩状态类型方面存在一些不足。因为现有模型都是基于无边界约束条件建立的，忽略了地质背景和地貌控制作用对海滩分类、地貌动态的影响<sup>[15]</sup>。海滩所在区域的地质框架通过影响近岸波浪场变化、沉积物丰度及可用性，会对海滩形态的演变施加重要的边界条件<sup>[16]</sup>。对于岬角控制的弧形海岸，海湾形状、岬角间距、近岸地貌等因素对于海滩地貌类型和演变至关重要<sup>[17]</sup>。尽管如此，经典海滩状态分类模型 $\Omega$ -RTR仍被应用和深化<sup>[18]</sup>。

聚类分析法可以将物理或抽象对象的集合分成由类似对象组成的多个类，为海滩类型的识别和归类提供了新的思路<sup>[19]</sup>。李志强等采用与 $\Omega$ -RTR模型相关的5个地貌动力要素特征值对华南51个海滩进行聚类，发现华南海滩聚类结果与模型有一定的差异<sup>[20]</sup>。Scott等在对英格兰和威尔士部分海滩类型进行聚类识别时加入了海滩形态因子（沙坝等），取得了良好效果<sup>[21]</sup>。本文基于地质背景、地貌形态学、沉积学和海岸动力学要素，通过聚类分析对雷州半岛23个海滩状态进行识别和归类，评估 $\Omega$ -RTR模型在高度复杂多变的环境条件和地貌背景下的适用性。

## 2 研究区概况和数据来源

### 2.1 雷州半岛概况

雷州半岛海岸线绵长曲折, 长约 1180 km, 有南三岛和硇洲岛等附属岛屿 (图 1)。半岛东部为台地溺谷湾海岸, 南部为火山台地海岸, 西部为海成阶地和台地溺谷湾海岸。海岸地貌类型多种多样, 西部和南部沿岸岸线呈锯齿状, 岬角、海滩相间, 以岬湾弧形海岸为主。东部存在平缓开阔的大型夷直海滩, 如南三岛、东海岛、吴阳黄金海岸。雷州半岛部分岸段为珊瑚礁海岸和淤泥质海岸。因此, 雷州半岛是进行海滩动力地貌类型分类研究的优良样本。作为中国三大半岛之一的雷州半岛与山东半岛相比, 在海滩系统方面的研究还十分薄弱<sup>[22]</sup>。目前雷州半岛岸滩也面临着海岸侵蚀严重、海岸带生态环境脆弱、海滨浴场溺水事故高发、大量海滩资源待开发等问题。基于地貌动力学对海滩进行状态分类可加深海滩地貌-动力耦合机制的充分理解, 也可以为这些问题的解决提供理论框架。

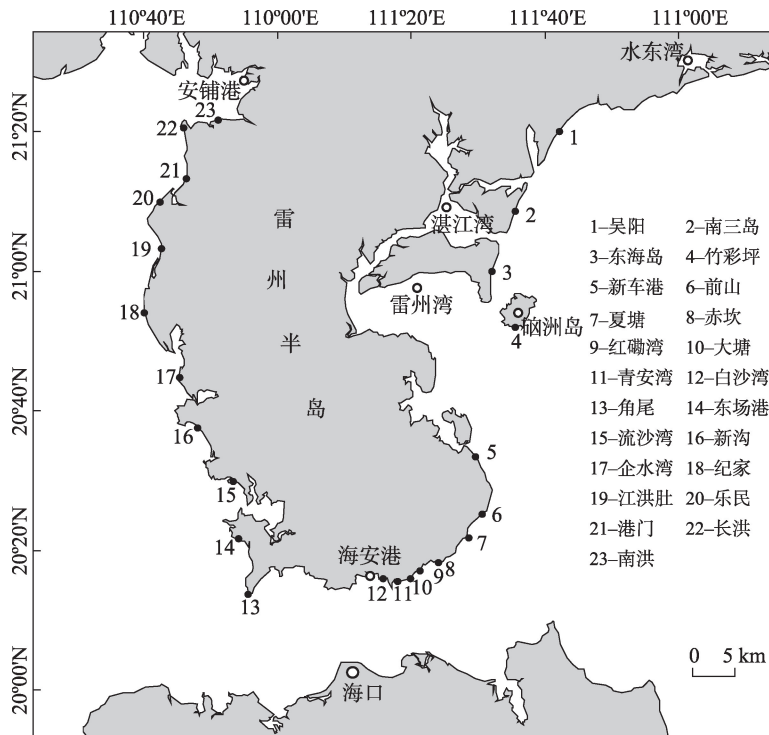


图 1 区域概况及研究海滩位置

Fig. 1 Regional overview and research beach location

### 2.2 地质地貌背景及动力条件

雷州半岛大部分在地质构造上属于北部湾盆地 (旧称雷琼凹陷)<sup>[23,24]</sup>。在湛江组沉积的阶段, 沉积相具有明显的横向变化, 地形大势自沉降中心——雷州半岛中南部向南、向北逐渐变高, 造成地层厚度自中心向南、向北出现由厚变薄, 颗粒由小变大的现象<sup>[25]</sup>。对于地貌形态的演化来说, 雷州半岛地区在第四纪以来的环境变迁过程中, 经历了多次的海陆变迁, 才形成了现在的地貌轮廓。其中, 在距今 7000~8000 年前的全新世中期发生的大海侵, 是奠定雷州半岛地貌形态的时期。另外, 雷州半岛地区的古环境演变, 经

历了更新世时期的滨海相-河流-洪积相-火山湖口堆积期,这是一个地壳逐渐上升的时期。到了全新世时期,地壳发生波动,经历了陆相-海相-陆相的成陆过程,才形成了现今的地貌形态,在此基础上如今进行着雕塑作用<sup>[26]</sup>。

雷州半岛沿岸海洋动力环境多样,东部受南海影响,南部受琼州海峡的作用,西部受北部湾影响东侧沿海为不规则半日潮,西侧沿海为规则全日潮。潮汐沿岸变化,平均潮差增减较快的是雷州半岛东西海岸,西部从南端的1.0~1.5 m,到北端的英罗湾很快增到3.0~3.5 m。东部从前山附近到雷州湾和湛江港,增大到2.0~2.5 m。半岛沿岸平均波高0.5~1.5 m。几个代表性海湾或港口水文信息见表1。

表1 雷州半岛及附近海域代表性海湾或港口水文信息

Tab. 1 Hydrological information of representative ports on Leizhou Peninsula

	潮汐类型	平均潮差(m)	年平均波高(m)	常浪向	年平均波周期(s)
水东湾	不规则半日潮	1.74	0.80	SE	3.60
湛江港	不规则半日潮	2.16	0.90	ENE	3.10
雷州湾	不规则半日潮	1.77	0.90	ENE	3.10
安铺港	不规则半日潮	3.50	0.70	SW	4.00
硇洲岛	不规则半日潮	1.77	0.90	ENE	3.10

### 2.3 数据收集

选取雷州半岛23个海滩:吴阳、南三岛、东海岛、竹彩坪、新车港、前山、夏塘、赤坎、红磡湾、大塘、青安湾、白沙湾、角尾、东场港、流沙湾、新沟、企水湾、纪家、江洪肚、乐民、港门、长洪、南洪(图1)。于2018年1月进行了地质地貌调查、地形测量、沉积物采样工作。其中,对于地形测量采用南方测绘生产的全站仪垂直海岸方向观测至涉水最深处,由现场观测结合潮位信息确定海滩潮上带、潮间带、潮下带范围。对采取得沉积物在实验室进行去除有机质、除去钙胶结物、洗盐、烘干步骤,用筛分振动仪测试得出沉积物各组分含量,同时计算粒度参数。海洋动力数据来源于《海湾志》<sup>[27]</sup>、《广东省海岸带和滩涂资源调查报告》<sup>[28]</sup>和相关文献<sup>[29,30]</sup>,对于难以获取水文数据的地点由邻近港口线性插值获得。

聚类因子的选择决定着聚类效果。本研究共获得波浪、潮流、海滩形态、沉积粒度、岬湾弧形等15个相关参数,根据相关分析筛选去除冗杂和相关性很强的数据(例如 $H_{1/3}$ 和 $H_0$ 、泥沙平均粒径和分选、开敞性和遮蔽性等)。最终选取四大类因素7个可以量化的数据作为雷州半岛海滩系统聚类因子。动力因子选择平均波高(m)、平均波周期(s)、平均潮差(m)、最大潮差(m);沉积因子选择泥沙粒径(mm);地貌形态因子选择前滨坡度、滩面宽度(m);地质控制因子选择海滩开敞度,海滩开敞程度定义为海湾宽度(CL)和海湾岸线的长度(SL)的比值。比值( $SL/CL$ )说明海滩暴露程度,反映海滩所在区域的地质控制作用<sup>[31]</sup>。研究区聚类因子具体信息见表2。

## 3 研究方法和数据预处理

### 3.1 研究方法

首先,计算雷州半岛海滩地貌动力参数:无量纲沉降速率 $\Omega$ 和相对潮差RTR,运用 $\Omega$ -RTR模型对海滩状态进行分类,模型所对应的海滩状态分别是:

(1) 完全反射组R类( $\Omega < 2$ 和 $RTR < 3$ )。完全反射类型海滩(relective beaches, 简称



表2 23个海滩地貌动力因子特征参数

Tab. 2 Characteristic morphodynamic parameters of 23 beaches

	动力因子			沉积因子	地貌因子		地形控制因子
	平均波高(m)	平均波周期(s)	平均潮差(m)	泥沙粒径(mm)	前滨坡度(%)	滩面宽度(m)	开敞度(SL/CL)
吴阳	1.10	3.30	1.79	0.20	2.21	115.00	0.99
南三岛	1.22	3.20	1.83	0.24	2.32	120.00	0.99
东海岛	1.11	3.10	1.80	0.28	2.00	110.00	0.99
竹彩坪	0.90	3.40	1.71	0.18	2.40	135.00	0.89
新车港	0.67	3.10	1.59	0.17	0.30	200.00	0.97
前山	0.85	3.20	1.01	0.16	4.26	58.00	0.94
夏塘	0.85	3.20	0.89	0.17	4.40	55.00	0.98
赤坎	0.71	3.20	0.90	0.18	2.70	40.00	0.90
红礮湾	0.68	3.30	0.91	0.25	4.70	45.00	0.85
大塘	0.65	3.30	0.88	0.18	3.20	50.00	0.86
青安湾	0.60	3.60	0.82	0.18	2.50	60.00	0.76
白沙湾	0.52	3.60	0.82	0.19	3.50	52.00	0.87
角尾	0.70	2.50	1.27	0.31	6.30	24.00	0.98
东场港	0.78	2.60	1.31	0.28	5.40	25.00	0.86
流沙湾	0.91	2.80	1.76	0.16	5.40	25.00	0.78
新沟	0.66	3.10	1.82	0.18	4.00	45.00	0.74
企水湾	0.67	3.20	2.24	0.19	1.10	190.00	0.99
纪家	0.71	3.40	2.43	0.54	11.00	15.00	0.99
江洪肚	0.67	3.55	2.68	0.35	4.00	20.00	0.93
乐民	0.70	3.70	2.91	0.44	8.40	10.00	0.98
港门	0.69	3.71	3.16	0.54	12.60	16.00	0.95
长洪	0.70	3.86	3.41	0.61	13.00	20.00	0.95
南洪	0.69	3.86	3.52	0.81	11.00	20.00	0.98

R类)的典型特征表现为海滩滩面较陡,在冲流带底部存在滩坎,滩面经常伴随有滩角出现,泥沙较细。

(2)有裂流的低潮台地组LTTR类( $\Omega < 2$ ,  $3 < RTR < 7$ )。存在裂流的低潮台地型海滩(low tide terrace with rips,简称LTTR类)通常有两部分类型组成,在低潮线以上,滩面陡峭,并呈现高潮反射型;低潮线以下滩面平缓呈台地状,并伴随有裂流发生。高潮位时,碎波过程类似于反射型海滩,滩面会有滩角出现;低潮位时,由于低潮台地的消散性,常出现崩顶破波。

(3)没有裂流的低潮台地组LTT类( $\Omega < 2$ ,  $RTR > 7$ )。没有裂流的低潮台地型海滩(low tide terrace without rips,简称LTT类)所处海洋环境相对潮差比较大,在未破碎的浅化波浪控制下,容易形成更加平缓均匀的低潮台地,不存在裂流通道。

(4)沙坝中间组B类( $2 \leq \Omega \leq 5$ ,  $RTR < 3$ )。沙坝中间型海滩(barred beaches,简称B类)有不同类型沙坝发育,可能有韵律形态沙坝或线性沙坝出现;沙坝地形也可由裂流和横向沙坝共同组成。

(5)低潮沙坝/裂流中间组LTBR类( $2 \leq \Omega \leq 5$ ,  $3 \leq RTR \leq 7$ )。低潮沙坝/裂流中间海滩

(low tide bar/rip, 简称LTBR类), 随着潮汐作用增强, 潮间带向岸部分坡度增加, 向海部分坡度有所降低, 海滩地貌动力复杂, 沙坝和裂流地形以及冲流坝时常出现。

(6) 沙坝消散组BD类 ( $\Omega > 5$ ,  $RTR < 3$ )。沙坝消散型海滩 (barred dissipative beaches, 简称BD类) 典型特征是水下发育沿岸沙坝-槽谷组合地形。波浪以崩破波为主, 存在较强的回返流和离岸向底流。

(7) 没有沙坝的消散组NBD类 ( $\Omega > 5$ ,  $RTR > 3$ )。没有沙坝的消散型海滩 (non-barred dissipative beaches, 简称NBD类) 滩面平缓均匀, 没有沙坝发育。

(8) 超消散组UD类 ( $\Omega > 2$  和  $RTR > 7$ )。超消散型海滩 (ultra-dissipative beaches, 简称UD类) 更加平缓宽阔, 具有更强的消散性。

然后, 基于地貌背景、地貌形态学、沉积学和海岸动力学要素, 运用系统聚类分析方法对雷州半岛23个海滩进行聚类, 对海滩状态进行识别归类。鉴于雷州半岛不同区域的波浪、潮流动力环境复杂性, 根据崔金瑞等提出的海滩状态对水动力环境的响应模型计算浪潮作用指数 ( $K$ )<sup>[32]</sup>, 判别海滩状态对水动力环境的响应特征。

$$K = 2.5H/R \quad (6)$$

式中:  $H$ 为平均波高;  $R$ 为平均潮差。当 $K > 1$ 时, 海滩属于浪控型海滩地貌; 当 $K < 1$ 时, 海滩属于潮控型海滩地貌。通过 $K$ 值判别波浪和潮差作用对海滩的影响, 作为讨论海滩状态的参考辅助条件。

最后, 结合传统海滩状态分类模型 $\Omega$ -RTR和系统聚类分析确定雷州半岛海滩类型, 并探讨模型 $\Omega$ -RTR在岸线形态、动力环境、地理背景复杂的雷州半岛的适用性。

### 3.2 数据预处理

计算海滩地形动力状态及对水动力环境响应时, 破碎波波高 ( $H_b$ ) 采用利用Kormar等的半经验公式<sup>[33]</sup>:

$$H_b/H_0 = 0.563(H_0/L_0)^{1/5} \quad (7)$$

式中:  $H_0$ 为深水波高;  $L_0 = gT^2/2\pi$ , 为深水波长。

泥沙沉降速率按照按Ferguson等提出的公式计算<sup>[34]</sup>:

$$\omega = (RgD^2)/[C_1\nu + (0.75C_2RgD^3)^{0.5}] \quad (8)$$

式中:  $\omega$ 为泥沙沉降速率;  $R$ 为沉积物水下比重, 按石英取1.65;  $g=9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ;  $D$ 为泥沙中值粒径;  $C_1$ 、 $C_2$ 为常数, Ferguson等建议 $C_1=18$ 、 $C_2=1$ ;  $\nu$ 为运动粘滞系数,  $\nu=1.0 \times 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (水温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )。

对研究区海滩进行聚类前, 对原始指标数据矩阵进行标准化处理, 以消除量纲的影响。样品间距离选用最常用的欧式距离 ( $d$ )。为了保证谱系聚类的有效性, 对于5种类间距离最短距离 ( $z_1$ )、最长距离 ( $z_2$ )、类平均距离 ( $z_3$ )、重心距离 ( $z_4$ )、内平方距离 ( $z_5$ ) 与指标距离 ( $d$ ) 做相关分析以确定最佳类间距离。

## 4 结果分析

### 4.1 海滩地貌动力参数及基于 $\Omega$ -RTR模型的海滩分类

计算雷州半岛23个海滩的无量纲沉降速率 $\Omega$ 、相对潮差RTR、浪潮作用指数 $K$ 三个地貌动力参数 (表3)。通过浪潮作用指数 $K$ 指数可以看出 (表3), 雷州半岛不同区域的波浪和潮汐作用强度具沿海岸线具有一定的差异性, 分布在雷州半岛东南部的海滩 (图1中1~16) 波浪作用强于潮汐作用, 分布在雷州半岛西部的海滩 (图1中17~23) 则以潮汐作用为主。

表3 海滩地貌动力状态参数

Tab. 3 Parameters of beach morphodynamic state

海滩编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Omega$	5.98	6.54	6.21	1.78	2.58	1.84	1.68	1.77	1.73	1.74	1.65	1.63
RTR	2.06	2.28	2.23	5.48	17.00	5.21	4.55	6.01	5.64	4.22	5.66	5.45
K	1.54	1.67	1.54	1.32	1.05	2.10	2.39	1.97	1.87	1.85	1.83	1.59
海滩编号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
$\Omega$	1.62	1.64	2.44	2.53	3.14	1.47	1.56	1.52	1.49	1.74	1.33	
RTR	6.17	6.42	6.43	6.78	24.00	8.86	8.95	9.68	10.11	10.25	12.30	
K	1.38	1.49	1.29	0.91	0.75	0.73	0.63	0.60	0.55	0.51	0.49	

由计算得到的2个海滩地貌动力状态参数 $\Omega$ 和RTR, 基于海滩状态分类模型将雷州半岛23个海滩分为五类(图2), 分别为: 第1类BD( $\circ$ )包括图1中1(吴阳)、2(南三岛)、3(东海岛); 第2类LT( $\diamond$ )包括图1中15(流沙湾)、16(新沟); 第3类UD( $\triangle$ )包括图1中5(新车港)、17(企水湾); 第4类LTT(+ )包括图1中18(纪家)、19(江洪肚)、20(纪家)、21(港门)、22(长洪)、23(南洪); 第5类LTTR( $\times$ )包括图1中4(竹彩坪)、6(前山)、7(夏塘)、8(赤坎)、9(红礮湾)、10(大塘)、11(青安湾)、12(白沙湾)、13(角尾)、14(东厂港)。

#### 4.2 聚类分析结果

类间距离与原始指标距离的线性相关系数可以度量各聚类因子的不相似性, 若该系数越接近于1, 则说明聚类效果越好。对于五种类间距离与指标距离做相关分析(表4)。

由表3可知,  $R(z3 d)=0.85$ 最接近1, 故选择类平均距离作为类间距离进行系统聚类分析, 以距离2.6为阈值, 将所选取的雷州半岛23个海滩分为六类(图3)。

#### 4.3 基于聚类结果的海滩状态类型识别

**4.3.1 第I类: 反射组** 第I类海滩包括竹彩坪、前山、夏塘、赤坎、红礮湾、大塘、青安湾和白沙湾。这些海滩均属于半遮蔽型, 海离开敞度介于0.75~0.95, 海滩表层沉积物由细砂组分组成。此类海滩所处的海洋环境浪潮作用指数 $K>1$ , 波浪作用明显大于潮流作用。海滩地貌形态主要只有波浪作用塑造, 波浪以涌浪或者卷破波形式上涌或者卷上海滩时, 大部分的波能处于入射和次谐频率(波浪周期的两倍)<sup>[35]</sup>, 滩面通常形成滩角或者滩坎。前滨坡度较陡, 介于2.5°~5°之间。前滨滩面具有反射特性, 将其归结为反射

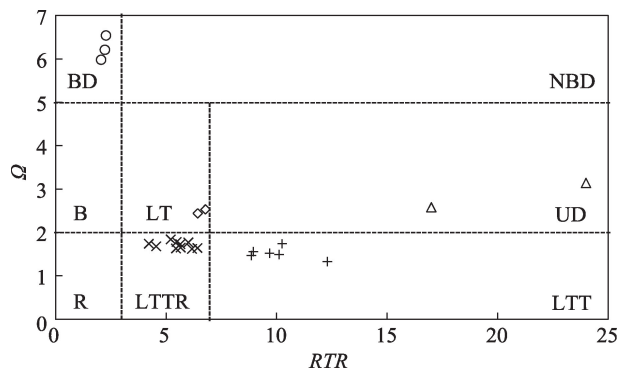
图2 海滩状态分类模型 $\Omega$ -RTR结果Fig. 2 Classification diagram of beach morphodynamic based on  $\Omega$ -RTR model

表4 类间距离与指标距离相关分析表

Tab. 4 Correlation analysis of distance between classes and index distance

相关性	(z1 d)	(z2 d)	(z3 d)	(z4 d)	(z5 d)
R	0.80	0.79	0.85	0.78	0.80

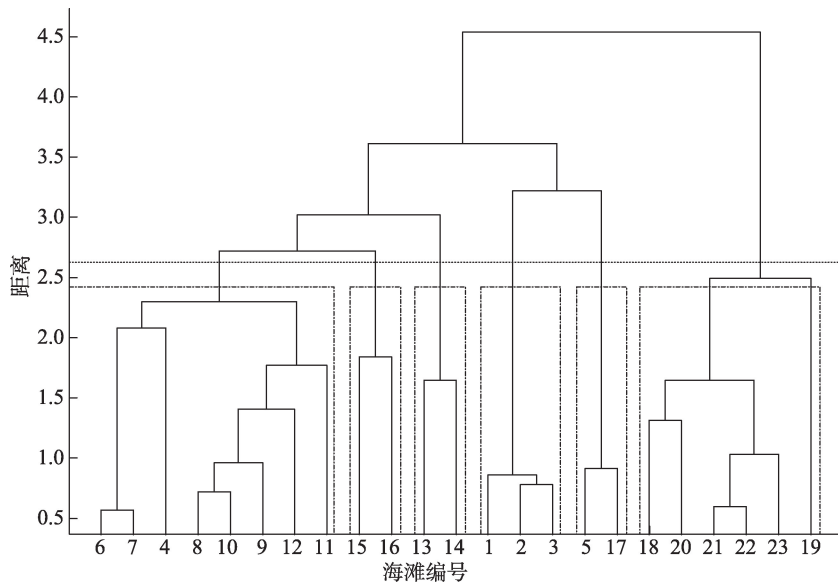


图3 23个海滩地貌动力状态聚类结果

Fig. 3 Cluster result of beach morphodynamic state of 23 beaches

型海滩。此类海滩通常在冲流带的底部一般会形成滩坎，滩坎的高度取决于泥沙的粒度和波高，滩角和滩坎受到潮汐的调控作用交替出现（图4）。

**4.3.2 第Ⅱ类：低潮阶地/反射组（有裂流）** 第Ⅱ类海滩包括角尾和东场港。这两个海滩地处琼州海峡和北部湾交界处，这种海滩类型是上部滩面反射和下部阶地消散的复合体（图4）。其特点是具有明显的斜坡断裂，从高潮线附近陡峭的反射型海滩过渡到低潮线附近平缓的阶地消散型海滩，中间没有明显的缓坡过渡体，低潮时可以看到阶地部分存在小型裂流通道。波浪破碎过程和第Ⅰ类浪控型海滩类似，滩角一般出现在高潮线附近。沉积物分带明显，在海滩反射部分泥沙为中砂，消散部分沉积物粒径比反射部分小，介于细砂和中砂之间。斜坡断裂处泥沙最粗（可出现粗砂和极粗砂组分）海滩沉积物垂岸方向的不同性质是该组海滩类型的重要控制因素。根据海滩的地貌特征及动力环境将此类海滩归结为存在裂流的低潮阶地/反射组。雷州半岛此种类型的两个海滩由于其特殊地理位置，海洋动力环境受琼州海峡和北部湾的共同影响，混合波的特点决定了海滩地形成动力状态类型。

**4.3.3 第Ⅲ类：沙坝-槽谷/中间状态组** 第Ⅲ类海滩包括流沙湾和新沟海滩。这两个海滩开敞度比较小，有典型岬湾弧形海岸的特点。海滩表层沉积物主要由细砂组成。和第Ⅱ类海滩相比，这两个海滩位于雷州半岛东北部，平均潮差增大，导致潮间带宽度增大，且上部坡度变大，中部坡度减小，有利于冲流坝和低潮位附近沙坝的形成。由于相对潮差的增加，低潮时将增大裂流环流强度。此类海滩地形成动力特征较为复杂，在整个潮汐周期内可能经历反射型（高潮）、中间状态和消散型（低潮）碎波带环境，低潮线附近能够形成沿岸沙坝-槽谷系统，且在低潮前后可变动。整个海滩系统没有表现出明显的反射或者消散性质，从其地貌特征将此类海滩归类为沙坝-槽谷/中间状态组。

**4.3.4 第Ⅳ类：沙坝消散组** 第Ⅳ类海滩包括吴阳黄金岸滩、南三岛海滩和东海岛海滩。3个海滩属于典型的夷直型岸滩，开敞度达到0.99；海滩平直开阔，前滨坡度在 $2^{\circ}$ 左右，滩面宽阔（100 m以上），海滩具有消散性；表层沉积物粒径介于细砂和中砂之间。此种



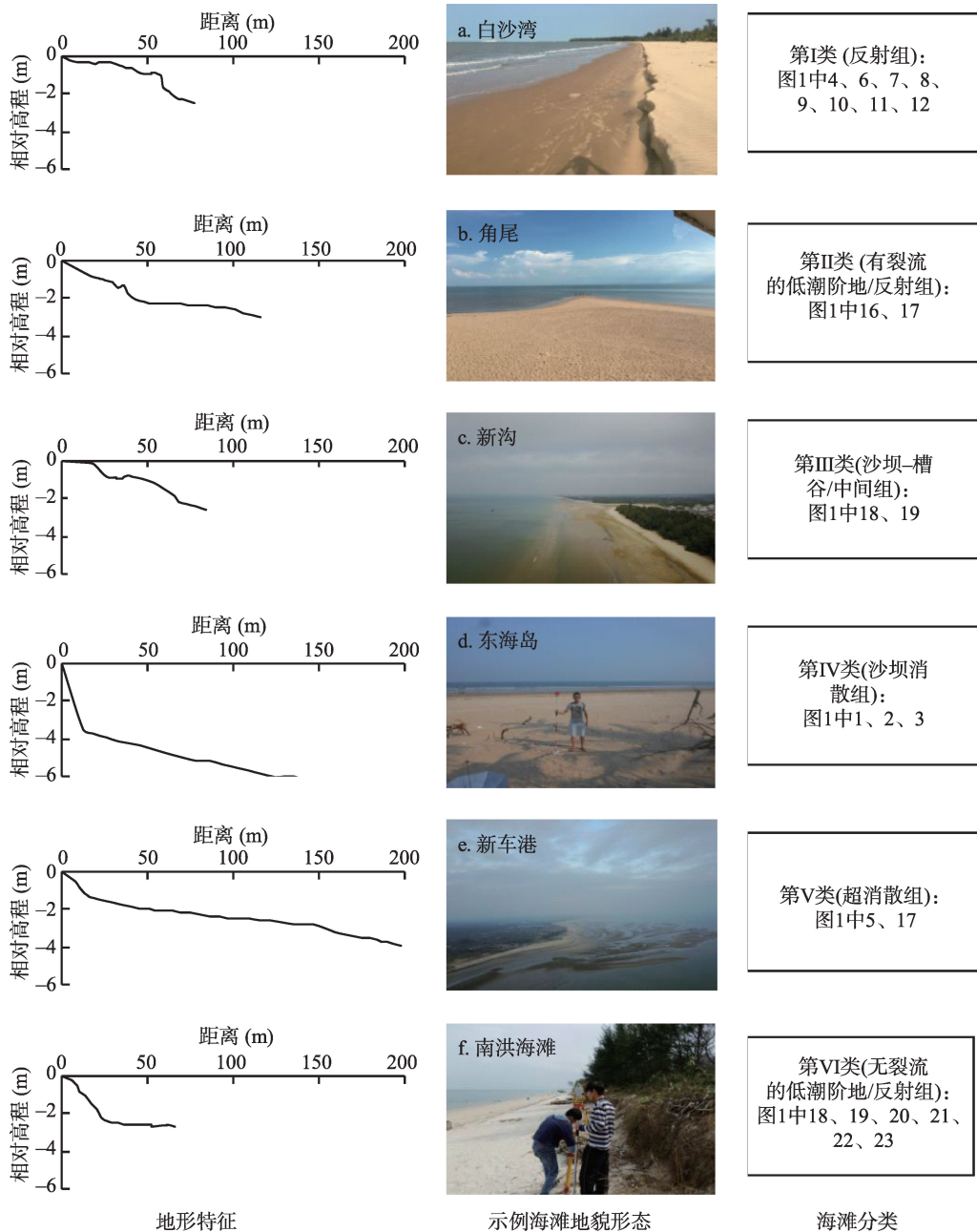


图4 六类海滩地貌特征

Fig. 4 Morphologic characteristic of 6 types of beach

类型海滩在海洋动力环境方面存在着相同的状态: 3个海滩均面向南海开敞, 岸滩受入射波直接垂直作用。在入射波群向岸传播过程中随着近岸浅水变形过程中, 这3个海滩宽阔的滩面(前滨宽度均在100 m以上)为长重力波的释放提供了巨大空间, 外加上海滩所处海洋区域的年平均波高在1.1 m左右, 波浪动力比雷州半岛其他海滩略强, 导致碎波带内存在较强的长重力波, 因此此类海滩较有可能出现裂流, 并且具有典型水下沿岸沙坝-槽谷地形。将此类海滩归类为有裂流存在沙坝消散型海滩。

**4.3.5 第V类:超消散组** 第V类海滩包括新车港和企水湾。此类海滩的特点是:整个海滩平缓无变化,潮间带宽阔(接近200 m),前滨坡度小(小于1)。表层沉积物主要由细砂组成,浪潮作用指数 $K < 1$ ,潮流作用明显大于波浪作用。整个滩面具有很强的消散性,将此类海滩归结为超消散型海滩。超消散型海滩一般潮差比较大,潮流作用强,伴随着强潮汐涨落速度的不平稳在平缓宽阔的滩面上多发育有潮沟系统,成为潮水和泥沙输入输出的主要通道,是此种类型海滩的主要地貌单元(图4)。

**4.3.6 第VI类:低潮阶地/反射组(无裂流)** 第VI类海滩分布在雷州半岛西部,包括纪家、江洪肚、乐民、港门、长洪和南洪。和第II类海滩地貌形态相似,这些海滩上部高潮位附近滩面宽度小(小于20 m),坡度大,6个海滩平均前滨坡度超过 $9^\circ$ ,海滩反射性较强;下部低潮位附近为阶地,滩面极为平缓,均匀无变化,坡度小于 $0.2^\circ$ ,不存在裂流通道,具有典型消散性质。因此,将这种不同地貌状态的海滩复合体归结为无裂流的低潮阶地/反射型海滩。此类海滩上部反射部分表层沉积物主要由粗砂组分组成,低潮阶地部分沉积物一般为细砂,泥沙性质的分带性导致了海滩形成低潮阶地和反射的复合体。此类海滩动力条件主要受北部湾海洋环境影响,相比雷州半岛其他海滩潮差大,年平均波高较小,波周期长。海滩地貌动力状态与波高无关,海滩形态在潮汐调控作用的主导下,主要受低能量的涌浪塑造。在涌浪和长周期波的建设作用下,高潮线附近会形成滩坎,海滩剖面呈现滩肩剖面模式。由于反射型海滩不能很好的消波消能,加上雷州半岛区域受台风影响最为频繁,对于后滨有沙丘的海滩一般会被侵蚀呈陡坎状(图4)。

## 5 讨论

### 5.1 海岸背景对海滩形态的影响

从聚类状态识别结果可以看出,23个海滩状态沿雷州半岛呈现一定规律性。对于雷州半岛东部的海滩(图1中1~12),从浪潮作用指数可以看出,这些岸滩所处的海洋环境波浪作用明显大于潮汐作用,是海滩地形动力状态形成的主要营力。而半岛西北部海滩(图1中15~23),浪潮作用指数 $K < 1$ ,在海滩地貌形态塑造过程中,潮汐调制作用做了很大贡献,这是区域大环境背景所决定的。雷州半岛东部海滩海洋动力环境受琼州海峡及南海影响,西部海滩受北部湾环境影响,潮差均是从南到北递增,且雷州半岛西部潮差明显大于东部,潮流作用明显大于波浪作用。海滩形态在东部以波浪作用为主,西部多以潮汐调控作用为主导,这种南北潮汐动力差异导致了不同的海滩状态类型。

第IV类海滩东海岛、南三岛、吴阳黄金岸滩是雷州半岛仅有的夷直型岸滩,平直开阔的特征决定了海滩状态。3个海滩没有岬角庇护,开敞度均接近于1,受到强浪的正面作用,形成了滩面宽阔,水下存在沙坝-槽谷地形的沙坝消散型海滩。第II类的角尾和流沙湾所在区域有珊瑚礁的存在,近岸底部礁坪的存在导致沉积物不足;另外从琼州海峡传来的波浪经过礁石能量衰减并发生折射,导致海滩所处动力环境较低,剖面形态与动力条件相适应形成了低能反射型海滩。这是受地质背景控制的海滩类型。第V类海滩企水湾和新车港虽处雷州半岛东西两侧,但两个海滩有共同的特征:海滩滩面长度达到200 m,滩面平缓宽阔且在辐射沙洲内缘区有潮沟发育,均表现出向潮滩性质过渡的特征。这主要与沉积物的供应状况有关。经实地考察,新车港和企水湾均有河流存在,且企水湾存在大大小小的多个河流。两个地方河流输沙供应充足,滩面可长期保持淤长状态。在淤长过程中保持均衡态时的剖面形态并呈现潮滩特征,导致海滩自成一类。因此,该类型受到河流供沙条件的影响。

海岸地质背景除上述的近岸珊瑚礁和海岸岬角对波浪传播与能量耗损的作用外, 陆域构造和山丘走向造成的海湾的开口方向也会对海滩的状态产生重大影响。戴志军等指出, 偏西向海湾海底供沙相对最弱, 偏南向海湾供沙相对充足, 由此对海滩状态的影响也是显著的<sup>[36]</sup>。第Ⅳ类海滩(东海岛、南三岛、吴阳黄金海滩)位于雷州半岛的东部, 第Ⅵ类海滩(纪家、江洪肚、乐民、港门、长洪和南洪)分布在雷州半岛西部, 两类海滩潮下带都有宽平的岸滩, 但由于海湾朝向的不同, 陆架供沙条件存在显著差别。雷州半岛西部海滩后部普遍滩肩窄且高度较小, 水下形成宽平的低潮阶地, 而东部海滩滩肩高大, 同时水下形成较大的沙坝<sup>[30]</sup>。

因此, 从雷州半岛海滩地形动力状态分类中可以看出, 动力环境背景、地质背景、地形约束等可以通过影响海洋动力环境、沉积物的可用性及丰度从而会影响海滩地貌形态, 是海滩分类不可忽视的考虑因素。

## 5.2 海滩状态分类模型 $\Omega$ -RTR在雷州半岛的适用性

模型 $\Omega$ -RTR的提出是海滩地貌动力研究的重要开端, 但该模型也存在一定的局限性, 主要表现在: ① 模型中的无量纲沉降速模型 $\Omega$ 是基于澳大利亚微潮至小潮差无边界约束的海滩系统提出来的, 对于大潮或者遮蔽海滩是否具有普适性还没得到完全验证。② 相对环境参数无量纲化的使用(例如, 相对潮差为大潮平均潮差与破波波高的比值), 参数的比值无量纲化明显的缺陷就是忽略了动力因素的绝对能级、波浪周期和沉积物大小的作用, 而研究表明波浪作用力强度和持续时间在控制海滩状态十分重要<sup>[37]</sup>; 潮差不仅决定了潮间带的坡度和涨落潮速率而且潮汐的强弱是沿岸流的主要驱动力, 对沿岸沙坝的形成有重要贡献<sup>[38]</sup>; 海滩沉积物粒度的分带性则决定了海滩的复合形态<sup>[39]</sup>。③ 忽略了时间尺度的变化。时间参数平均化的使用无视驱动海滩变化的波浪、潮汐、沉积物条件的可变性, 无法反映海滩的季节性变化<sup>[40]</sup>。④ 忽略了地质作用。海洋动力环境和沉积特性对海滩形态特征至关重要, 而越来越多的研究发现海滩所处地理位置的地质背景可以影响沉积物大小和来源、特殊地形通过影响波浪传播条件可以控制海滩形态。尽管模型存在这些缺陷, 但仍被作为识别海滩状态的主要手段被大量应用。为衡量此模型在雷州半岛的适用性, 本研究通过波浪、潮差、沉积物用海滩状态分类模型 $\Omega$ -RTR计算的雷州半岛23个海滩状态参数划分海滩类型。

将 $\Omega$ -RTR模型对海滩分类结果(图2)对比聚类识别出的6组海滩形态发现: 系统聚类模型和 $\Omega$ -RTR模型得出的海滩分类有很大的相似性。而海滩状态分类模型 $\Omega$ -RTR在识别海滩类型时反映不够灵敏, 仅把雷州半岛海滩分为五类, 甚至在角尾海滩出现了偏差(与实际观测的不一致)。这主要是由于 $\Omega$ -RTR模型对海滩地形动力状态分类时, 更加侧重于海洋动力和沉积因素所造成的。研究区的角尾海滩拥有着特殊复杂的环境背景, 不仅同时受到来自琼州海峡和北部湾混合动力的复杂影响, 而且所处海域存在珊瑚礁, 基岩底质对于沉积物丰度的限制, 以及珊瑚礁对于入射波的削减作用共同造成了角尾海滩地貌动力的特殊性。但总体上传统的形态动力学参数 $\Omega$ 和RTR对区分不同的海滩群是有效的。因此,  $\Omega$ -RTR模型可以为海滩地形动力类型的识别提供理论框架和依据。

## 5.3 可靠性分析

本文中海滩数量多且连续分布于雷州半岛沿岸, 因此无法准确的获得各个海滩的潮差、波浪等动力要素。由于区域较小, 波浪要素沿岸变化较小, 可以认为对结果的影响不大。雷州半岛沿岸潮差变化较大, 本研究中采用多种来源资料综合并结合插值方法确定潮差要素, 会对最后的结果产生一定误差。但由于有实测潮差资料的站点包括了水东、湛江、硇洲、雷州、海安、乌石、流沙、草潭、安铺等港口, 可以较好的覆盖研究区域, 因此潮差数据也具备相当的可靠性。



海滩表层泥沙特征参数具有时间变化特性,本文模型中忽略了时间尺度的变化。中小时间尺度上由于海滩所处海洋环境变化不大,海滩沉积物特性变化也是较小的,对海滩状态结果的影响也是较小的。朱士兵等在2014年9月对吴阳黄金岸滩、南三岛和东海岛海滩状态研究时,对比本次研究,由于泥沙粒径的季节性变化导致计算无量纲沉降速率 $\Omega$ 中 $\omega$ 参数的不同,但并没有影响海滩状态类型<sup>[41]</sup>,和本次研究计算结果一致,同为沙坝消散型海滩。

## 6 结论

本研究基于地质背景、地貌形态、海滩沉积物和海岸动力要素选取7个量化的指标,通过聚类分析方法对雷州半岛23个海滩进行归类,并探讨海滩状态分类模型 $\Omega$ -RTR在雷州半岛的适用性,得出以下结论:

(1) 雷州半岛沿岸海滩由于区域海洋动力环境背景及南北潮汐动力差异,海滩状态呈规律性分布。通过聚类分析将23个海滩归为六种不同的海滩状态,结合现场调查将其识别为:反射组、有裂流的低潮阶地/反射组、沙坝-槽谷/中间组、沙坝消散组、超消散组、无裂流的低潮阶地/反射组。

(2) 波浪、潮汐、沉积物特征以及海岸地质构造背景等对雷州半岛海滩状态均有不同程度的影响,在不同岸段各要素的影响各异。地质背景(珊瑚礁、海湾开口方向、海滩开敞度等)等可以通过影响海洋动力环境、沉积物的可用性及丰度从而决定着海滩地貌形态,是海滩分类不可忽视的因素。

(3)  $\Omega$ -RTR模型将雷州半岛海滩分为五类,与聚类分析的分类结果稍有差异。这主要是由于模型在判别海滩状态时更侧重于动力和沉积因素,导致在海滩分类识别过程中灵敏度略低,但总体上可以有效区分海滩类型,是理解海滩动力地貌系统的有效手段。

**致谢:** 真诚感谢匿名评审专家在论文评审中所付出的时间和精力,评审专家对本文研究思路、文章框架完善和调整、结果分析、结论梳理方面的修改意见,使本文获益匪浅。

## 参考文献(References)

- [1] Bauer B O, Greenwood B. Surf-zone similarity. *Geographical Review*, 1988, 78(2): 137-147.
- [2] Guza R T, Inman D L. Edge waves and beach cusps. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(21): 2997-3012.
- [3] Wright L D, Short A D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 1984, 56(1-4): 93-118.
- [4] Costas S, Alejo I, Vila-Concejo A, et al. Persistence of storm-induced morphology on a modal low-energy beach: A case study from NW-Iberian Peninsula. *Marine Geology*, 2005, 224(1-4): 43-56.
- [5] Anthony E J. Sediment-wave parametric characterization of beaches. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14(1): 347-352.
- [6] Sunamura. Beach morphologies and their change. In: Kiyoshih. University of Tokyo Press. Tokyo, Kiyoshih, 1988: 136-166.
- [7] Sedrati M, Ciavola P, Reyns J, et al. Morphodynamics of a microtidal protected beach during low wave-energy conditions. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(1): 198-202.
- [8] Pontee N I, Pye K, Blott S J. Morphodynamic behaviour and sedimentary variation of mixed sand and gravel beaches, Suffolk, UK. *Journal of Coastal Research*, 2004, 20(1): 256-276.
- [9] 蔡锋, 苏贤泽, 曹惠美, 等. 华南砂质海滩的动力地貌分析. *海洋学报*, 2005, 27(2): 106-114. [Cai feng, Su Xianze, Cao Huimei, et al. Analysis on morphodynamics of sandy beaches in South China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(2): 106-114.]
- [10] 岳保静, 廖晶, 高茂生, 等. 山东半岛砂质海滩动力地貌演化特征. *海洋科学*, 2017, 41(4): 118-127. [Yue Baojing, Liao Jing, Gao Maosheng, et al. Evolutionary features of morphodynamics of sandy beaches on the Shandong Peninsula.



- Marine Science, 2017, 41(4): 118-127.]
- [11] 周良勇, 薛春汀, 刘健, 等. 山东半岛东、北部海滩动力地貌特征及影响因素. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 83-94. [Zhou Liangyong, Xue Chunting, Liu Jian, et al. Beach morphodynamics and impact factors on the beaches in the northern and eastern of Shandong Peninsula. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(1): 83-94.]
- [12] 戴志军, 李春初. 华南弧形海岸动力地貌过程. 上海: 华东师范大学出版社, 2008: 112-149. [Dai Zhijun, Li Chunchu. *The dynamic geomorphic process of the curved coast of South China*. Shanghai: East China Normal University Press, 2008: 112-149.]
- [13] Rodil I F, Lastra M. Environmental factors affecting benthic macrofauna along a gradient of intermediate sandy beaches in northern Spain. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2004, 61(1): 37-44.
- [14] Zhiqiang L I. Study on the rip current hazard of South China beaches based on beach morphodynamics. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, (1): 8-14.
- [15] Jackson D W T, Cooper J A G, Rio L D. Geological control of beach morphodynamic state. *Marine Geology*, 2005, 216(4): 297-314.
- [16] Jackson D W T, Cooper J A G. Geological control on beach form: Accommodation space and contemporary dynamics. *Journal of Coastal Research*, 2009, 56(56): 69-72.
- [17] Antonio Henrique da Fontoura Klein, Joao Thadeu de Menezes. Beach morphodynamics and profile sequence for a headland bay coast. *Journal of Coastal Research*, 2001, 17(4): 812-835.
- [18] Gómez-Pujol L, Orfila A, Cañellas B, et al. Morphodynamic classification of sandy beaches in low energetic marine environment. *Marine Geology*, 2007, 242(4): 235-246.
- [19] Hegge B, Eliot I, Hsu J. Sheltered Sandy beaches of Southwestern Australia. *Journal of Coastal Research*, 1996, 12(3): 748-760.
- [20] 李志强, 朱雅敏. 华南海岸岬间海滩地形动力状态类型研究. 海洋通报, 2015, 34(2): 181-189. [Li Zhiqiang, Zhu Yamin. Morphodynamic characteristics and classification of headland beaches in South China Coast. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(2): 181-189.]
- [21] Scott T, Masselink G, Russell P. Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. *Marine Geology*, 2011, 286(1-4): 1-20.
- [22] 宫立新. 山东半岛东部海滩侵蚀现状与保护研究. 青岛: 中国海洋大学博士论文, 2014. [Gong Lixin. *Research on the current situation and protection of beach erosion in the eastern part of Shandong Peninsula*. Qingdao: Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2014.]
- [23] 王丽荣, 赵焕庭, 宋朝景, 等. 雷州半岛灯楼角海岸地貌演变. 海洋学报, 2002, 24(6): 135-144. [Wang Lirong, Zhao Huanting, Song Chaojing, et al. Coastal geomorphic evolution at the Denglou Cape Leizhou Peninsula of China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(6): 135-144.]
- [24] 李建生. 关于湛江组时代问题. 地层学杂志, 1988, 12(4): 60-64. [Li Jiansheng. About the era of the Zhanjiang Formation. *Journal of Stratigraphy*, 1988, 12(4): 60-64.]
- [25] 林晓东, 宗永强. 湛江组沉积相特征. 地层学杂志, 1990, 14(3): 195-202. [Lin Xiaodong, Zong Yongqiang. Characteristics of sedimentary facies in Zhanjiang Formation. *Journal of Stratigraphy*, 1990, 14(3): 195-202.]
- [26] 李建生. 雷州半岛地区第四纪环境演变. 海洋科学, 1990, 14(2): 40-44. [Li Jiansheng. The quaternary environmental evolution of the Leizhou Peninsula area. *Marine Sciences*, 1990, 14(2): 40-44.]
- [27] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第十分册). 北京: 海洋出版社, 1999: 139-393. [China Gulf Annals Compilation Committee. *China Gulf Annals* (volume 10). Beijing: Ocean Press, 1999: 139-393.]
- [28] 广东省海岸带和海涂资源综合调查大队. 广东省海岸带和滩涂资源调查报告. 北京: 海洋出版社, 1987: 128-148. [General investigation team of coastal zone and tidal flat resources in Guangdong Province. *Investigation Report of Coastal Zone and Tidal Flat Resources in Guangdong Province*. Beijing: China Ocean Press, 1987: 128-148.]
- [29] 包砺彦. 雷州半岛南部青安湾海滩的沉积特征和地形发育. 热带海洋, 1989, 8(2): 75-83. [Bao Liyan. Sedimentary characteristics and landform developments of Qing'an Bay Beach in the southern Leizhou Peninsula. *Tropical Oceanology*, 1989, 8(2): 75-83.]
- [30] 李志强, 刘长华, 杜健航, 等. 复经验正交函数方法对湛江南三岛海滩剖面季节变化动态特征研究. 海洋工程, 2012, 30(2): 79-86. [Li Zhiqiang, Liu Changhua, Du Jianhang, et al. Using CEOF method to analyze the seasonal variation characteristics of beach profile in Nansan Island, Zhanjiang, China. *The Ocean Engineering*, 2012, 30(2): 79-86.]
- [31] Klein A H D F, Schumacher D H. Short-Term beach rotation processes in distinct headland bay beach systems. *Journal of Coastal Research*, 2002, 18(3): 442-458.
- [32] 崔金瑞, 夏东兴. 山东半岛海岸地貌与波浪、潮汐特征的关系. 黄渤海海洋, 1992, 10(3): 20-25. [Cui Jinrui, Xia Dongxing. The relationship between coastal morphology and the characteristics of waves and tides of Shandong Peninsula. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1992, 10(3): 20-25.]

- [33] Kormar P D, Gaughan M K. Airy wave theory and breaker height prediction. *International Conference on Coastal Engineering*, 1972, 1(13): 405-418.
- [34] Ferguson R I, Church M. A Simple universal equation for grain settling velocity. *Journal of Sedimentary Research*, 2004, 74(6): 933-937.
- [35] 于吉涛, 陈子桑. 砂质海滩地行动力分类研究进展. *热带地理*, 2011, 31(1): 107-112. [Yu Jitao, Chen Zishen. A review on progress of morphodynamic classification study of sandy beaches. *Tropical Geography*, 2011, 31(1): 107-112.]
- [36] 戴志军, 李春初. 华南弧形海岸岸线形态与地貌发育模式. *地理学报*, 2004, 59(5): 738-744. [Dai Zhijun, Li Chunchu. Coastline configuration and geomorphologic development mode of arc-shaped coast in South China. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 738-744.]
- [37] Loureiro C, Ferreira, óscar, Cooper J A G. Applicability of parametric beach morphodynamic state classification on embayed beaches. *Marine Geology*, 2013(12), 346: 153-164.
- [38] Masselink G, Short A D. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 1993, 9(3): 785-800.
- [39] Oblinger A, Anthony E J. Surface moisture variations on a multibarred macrotidal meach: implications for aeolian sand transport. *Journal of Coastal Research*, 2008, 24(5): 1194-1199.
- [40] Ranasinghe R, Symonds G, Black K, et al. Morphodynamics of intermediate beaches: a video imaging and numerical modelling study. *Coastal Engineering*, 2004, 51(7): 629-655.
- [41] 朱士兵, 李志强, 张智在, 等. 雷州半岛东部平直海滩地行动力状态研究. *水利天地*, 2015, 1(11): 24-28. [Zhu Shibing, Li Zhiqiang, Zhang Zhizai, et al. Study on the dynamic state of the terrain of the straight beach in the eastern part of Leizhou Peninsula. *Water Conservancy*, 2015, 1(11): 24-28.]

## Morphodynamic classification of beaches on the coast of Leizhou Peninsula

ZHU Shibing<sup>1</sup>, LI Zhiqiang<sup>1</sup>, ZHANG Huiling<sup>2</sup>, ZENG Chunhua<sup>2</sup>, CHEN Haiyin<sup>2</sup>

(1. College of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China; 2. College of Ocean Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China)

**Abstract:** Beach morphodynamic provides a theoretical framework for understanding the beach morphology and coastal dynamic environment, and has important guiding significance in beach protection and development. In order to determine the beach classification on the Leizhou Peninsula, 7 quantifiable beach characteristics about geological background, beach morphology, beach sedimentation and coastal dynamic factors were selected. Results show that: (1) beaches on the Leizhou Peninsula coast can be divided into 6 groups: reflective group, low tide terrace/reflective group (with rip current), sand bar-trough/middle state group, barred dissipative group, ultra-dissipative group and low tide terrace/reflective group (without rip current). (2) Wave, tide, sediment characteristics and coastal background of geological structure have different effects on the beach state in the study area. Factors have different influences on different coastal sections on Leizhou Peninsula. Geological background is an important factor in beach classification. (3) Because the  $\Omega$ -RTR model is more focused on dynamic and sedimentary factors in identifying beach state, classification results derived from  $\Omega$ -RTR model are slightly different from those from cluster analysis. As a whole, the  $\Omega$ -RTR model can effectively distinguish beach state type and is an effective means to understand beach morphodynamic system.

**Keywords:** beach state; beach morphodynamic;  $\Omega$ -RTR model; cluster analysis; Leizhou Peninsula