

山东半岛海滩动力地貌特征分类

张丽丽¹, 邢浩¹, 张旭日¹, 李华庆¹, 刘宗宇¹, 石洪源^{1,2}, 尤再进^{1,3}

(1. 鲁东大学 水利工程学院, 山东 烟台 264025; 2. 鲁东大学 港口海岸防灾减灾研究院, 山东 烟台 264025; 3. 大连海事大学 港口与航运安全协同创新中心, 辽宁 大连 116026)

摘要: 划分海岸应从海洋地貌学视角考虑, 根据形状、成因、物质构造和发育演化等阶段, 提供具体的划分方法, 从而了解海岸的地形动力特性, 这对海岸工程技术和防护、旅游发展等方面有重要意义。本文对山东半岛砂质海滩进行海洋动力地貌分类界定, 根据地貌背景、海滨地貌形态、海滨沉积物类型和海洋动力要素等, 选取了六个特征作为系统聚类因子。运用海滩相对潮差分类模型(Ω -RTR 模型), 结合聚类分析, 确定了山东半岛 43 个海滩的地貌动态特征, 并对这 43 个海滩的类型进行了讨论, 结果表明: ①可将山东半岛海滩归为六种不同的海滩状况, 分别为: 低潮沙坝/裂流海滩/超消散组、中间状态组/消散组(无沙坝)、超消散组、消散组(沙坝-槽谷)、低潮阶地和反射组。②聚类分析方式和 Ω -RTR 模式的结论基本相同, 在部分沙滩的分类结论上略有不同。但总体上仍能够合理划分海滩种类, 有助于理解海滩的动力地貌系统。

关键词: 地貌特征; 海滩分类; Ω -RTR 模型; 聚类分析; 山东半岛

中图分类号: P731.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)2-0010-10
DOI: 10.11759/hyxx20220227004

天然海滩形态主要受海浪和潮汐等动力因素的影响, 也受控于海岸地形地貌^[1], 不同地理位置的海滩受当地环境背景的影响导致状态各异, 掌握海滩的地貌动力特征并将其分类对于理解海滩碎波带环境、未来海岸带的开发利用与保护均具有重要意义。

海滩客观的地形地貌特征以及准确的海滩聚类因子选择关系到海滩分类模型结果的准确性。聚类分析的目的是对观测量地形进行自然分类, 避免了人为通过测量确定海滩状态的主观因素, Ω -RTR 模型则是无维沉降速率参数 Ω 和相对潮差 RTR 参数结合形成的模型, 这两种方法逐渐被共同应用于海滩分类。Short 等将整个海滩形态与水动力和沉积学参数联系起来, 提出 Ω -RTR 模型, 并将海滩划分为六种形态^[2]。戴志军等^[3-4]通过研究华南海滩及其地貌特征, 发现 Short 等提出的六种海滩状态可以一个空间同时出现。李志强等^[5]利用 5 个要素对我国华南海岸的 43 个海滩进行了聚类分析, 结果显示, 对于潮差较小的沙滩, 聚类分析方法所得结论和相对潮差模型的结论稍显差异。朱士兵等^[6]采用 Ω -RTR 模型, 并挑选六个因素对雷州半岛 23 个海滩进行聚类, 比较两种分析结果的异同点。 Ω -RTR 模型和聚类分析已经被应用于中国华南海滩和雷州半岛海滩的划分。海滩分类对研究

海滩地貌的三维空间变化、海滩开发以及预防海岸灾害有重要意义。但在山东半岛区域内尚没有完整的动力地貌分类, 因此本文采用课题组 2019—2020 年采集和收集的山东半岛海滩相关数据, 选取 43 个海滩作为样本, 基于聚类分析和 Ω -RTR 模型, 对山东半岛海滩类型进行分类与讨论。

1 研究区域与数据收集

1.1 研究区域概况

山东半岛地处我国山东胶莱谷地的东端, 地处黄海与渤海中间, 约北纬 $35^{\circ}05' \sim 37^{\circ}50'$, 东经 $119^{\circ}16' \sim 122^{\circ}42'$ (图 1), 海岸线全长 $3\,121\text{ km}$ ^[7], 约占全国的六分之一, 砂质海岸为其海岸的主体类型。海岸的地形特征与动力学特性可以充分反映海岸现状与沿海环境的发展过程, 对山东半岛海岸资源与环境的保护非常重要^[8]。

收稿日期: 2022-02-27; 修回日期: 2022-08-28

基金项目: NSFC-山东联合重点基金资助项目(U1806227); NSFC-山东联合重点基金资助项目(U1906231)

[Foundation: NSFC-Shandong Joint Key Fund Project, No. U1806227; NSFC-Shandong Joint Key Fund Project, No. U1906231]

作者简介: 张丽丽(1998—), 女, 山东曲阜人, 硕士研究生, 主要从事海岸变化的动力因素方面研究, E-mail: 1658489299@qq.com; 石洪源(1986—), 男, 通信作者, 山东枣庄人, 博士, 讲师, 主要从事物理海洋学方面研究, E-mail: shihongyuan1234@163.com

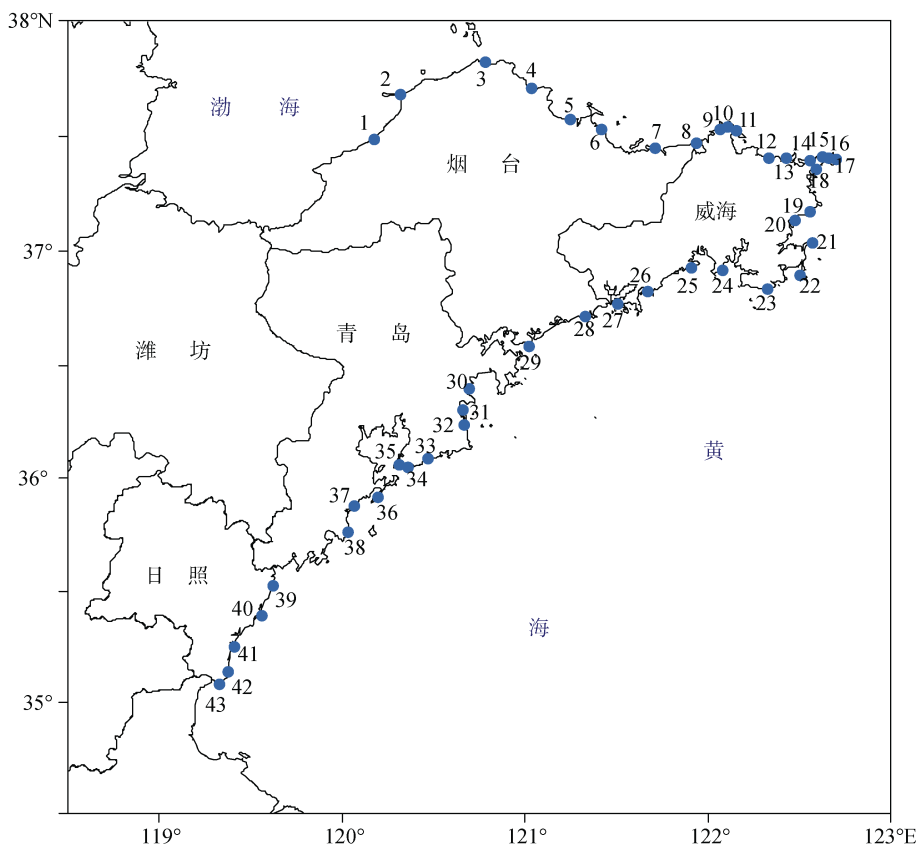


图 1 43 个海滩位置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of 43 beaches

山东海区波浪特点以风成浪居多, 平均波高为 0.2~0.7 m, 平均波周期为 2.3~5.5 s。山东半岛各方位波浪特点相异, 东部月平均波高夏季较大, 冬季较小; 北部海岸波浪特点与其相反, 最大月均波高在冬季, 夏季较小; 在南岸各季浪向相异, 春秋浪向比较分散, 夏季多显 S 向风浪, 有时伴有 E 向、EES 向涌浪, 冬季多显 NW-NNE 向风浪, 有时伴有 E 向涌浪。潮汐主要为规则半日潮, 但也有渤海湾南部大口河至莱州湾东岸龙口、威海至成山角、荣成南部沿岸为不规则半日潮, 潮差 0.7~3.7 m。山东半岛北岸潮差为 0.70~2.7 m, 南岸为 0.79~3.7 m^[9-12]。因为它所特有的特殊地理位置, 山东半岛易遭受热带和温带气旋及冷空气环境的影响, 同时也是风暴潮灾频发的地方之一^[13]。

1.2 数据收集

本文选取 43 个沙滩作为样本进行山东沙滩动力状况分类研究, 分别为石虎嘴-辛庄村、妃姆岛、蓬莱海市公园西、纹石宝滩、海水浴场、第一海水浴场、金山港西、逍遥港、初村北海、威海金海滩、

葡萄滩海水浴场、伴月湾、张家庄、成山林场、羨霞湾、马栏湾、成山头、天鹅湖、爱连湾、荣成海滨公园、楮岛南、镆钁岛、朱口-沙口、南辛、文登金滩、乳山银滩、大乳山、烟墩石栏-辛家港、丁字嘴、蓝谷滨海公园、小蓬莱、仰口湾、石老人海水浴场、青岛第三海水浴场、青岛第六海水浴场、青岛银沙滩、青岛海滨公园、南小庄、日照海滨国家森林公园、海龙湾人造沙滩、金沙岛海滨浴场、左家岭东、多岛海赶海园(图 1)。选取的沙滩基本均匀分布在山东砂质海岸区域, 粒径数据采用 2019—2020 年两年夏季的沉积物粒径数据。波高、波周期以及平均潮差的数据采用 9 个波浪站的夏季波浪统计数据(表 1), 数据来源于《海湾志》^[10-11]、调查报告^[7]以及相关文献^[14-15]。

最终将以下 6 个可量化的数据值作为山东半岛海滩系统的聚类因子, 其中平均波高(m)、平均波周期(s)、最大潮差(m)和平均潮差(m)作为动力因子; 泥沙粒径(mm)作为沉积因子; 海滩坡度(°)作为地貌形态因子。

表 1 波浪站数据
Tab. 1 Wave station data

序号	海洋站	平均波高/m	平均周期/s	平均潮差/m
1	龙口站	1.0	4.3	0.9
2	蓬莱站	0.8	4.0	1.1
3	芝罘岛站	0.3	2.7	1.6
4	双岛湾站	0.4	2.6	1.6
5	威海站	0.4	5.1	1.4
6	成山头站	0.5	3.0	0.75
7	桑沟湾站	0.2	6.5	1.1
8	石岛站	0.4	2.2	1.7
9	乳山口站	0.7	3.6	2.4
10	麦岛站	0.7	4.4	2.8
11	黄岛 II 号站	0.2	1.7	2.6
12	岚山头站	0.6	3.8	3.0

1.3 数据预处理

利用 Kormar 和 Gauhan 的半经验公式计算 H_b [16]:

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

其中, H_0 为考虑波浪折射的波高; $L_0 = gT^2/\pi$ 为深水波长。

沉降速度按照 Ferguson 和 Church 的公式 [17] 进行计算:

$$\omega = (RgD^2) / \left[C_{1v} + (0.75C_2RgD^3)^{0.5} \right], \quad (2)$$

其中, $C_1=18$, $C_2=1.0$, D 为中值粒径, R 为沉积物密度(根据石英计算, 取值为 1.65), ν 为运动黏度, $\nu=1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, g 为重力加速度。

2 研究方法

基于空间观测数据的海滩分类已经被越来越多的学者普遍接受, 提出了一系列的海滩状态分类模型。Johnson [18] 首次把波陡变化和沙堤的发育过程联系起来, 以验证海滩水下沙坝槽系统的发育过程。结果表明, 当波浪陡度高于 0.03 时, 能够形成离岸沙坝, 当波陡低于 0.025 时, 离岸沙坝将无法发育; 1975 年, Guza 等 [19] 系统性的给出了一个破波尺度参数 ε 来说明沙滩对入射波的反射性:

$$\varepsilon = \alpha_1 \omega^2 / g \tan^2 \beta, \quad (3)$$

式中的 α_1 破波振幅, ω 是入射波弧度频率, β 是沙滩坡度, g 为重力加速度。

Wright 等 [2] 经过对澳洲东南部海岸线的长期观测, 证实了此参数, 并依据 ε 值大小将海滩的反射能力分成了 6 个类别, 包括完全反射海滩, 完全耗散海滩以及四种过渡类型; 王文介等 [20] 通过对我国华南

海滩地形特征的综合研究, 把沙滩划分为为沿岸坝沟或低潮阶地型、耗散优势型、反射优势型和海岸坝-槽型四种分类; Wright 和 Short [2] 通过对澳大利亚海滩的研究, 将无维沉降速率参数(Ω)模型所定义:

$$\Omega = H_b / T\omega, \quad (4)$$

式中, H_b 为破波带波高, T 为波周期, ω 为堆积物下降频率, 对沙滩类型界定的结果如下: 当 $1 \leq \Omega \leq 6$ 时为过渡型沙滩, $\Omega < 1$ 时为反射型沙滩, $\Omega > 6$ 时为消散型沙滩; 1993 年, Masselink [21] 等在无维沉降速率的理论基础上, 给出了相对潮差(RTR)的定义:

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

式中, H_b 是破波波高, TR 是大潮的平均潮差; 崔金瑞等引入潮汐作用指标(K)为量化指数, 来评估海滩对水动力环境变化的反应特征 [22], 并定义:

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

其中, H 为平均浪高; R 为平均潮差。 $K > 1$ 时为浪控地形, $K < 1$ 时为潮控地形, K 在 1 附近时为过渡型地形。

本文分别采用 Ω -RTR 模型和聚类分析法对山东半岛所选的 43 个海滩进行地貌特征分类与讨论。

2.1 Ω -RTR 模型

使用无维沉降速率参数 Ω 和相对潮差组参数 RTR 组合, 构成 Ω -RTR 模型, 此模型划分的海滩类型分别是:

2.1.1 反射组($\Omega < 2$)

①当 $\Omega < 2$ 和 $RTR < 3$ 时, 称为完全反射类型海滩(Relective beaches, 又称 R 类)。其特点主要表现为海边滩面比较陡峭, 一般成尖形, 也有滩角出现, 且泥沙较细。明显的粗台阶常出现在斜冲带的底部, 阶跃高度随波高和粒径的增大而增大, 波浪通常在海滩上汹涌或俯冲。

②当 $\Omega < 2$, $3 < RTR < 7$ 时, 称为出现裂流的低潮台地型沙滩(low tide terrace with rips, 又称 LTTR 类)。此类沙滩主要有以下两种形态, 在滩面较陡的低潮线上常产生高潮反射; 在滩面较平缓的低潮线内常伴有小裂流产生。在高潮位时, 可能有滩角出现。低潮位时, 经常产生崩破波, 潮低处的阶地可能被小型的裂沟所切割。

③当 $\Omega < 2$, $RTR > 7$ 时, 称为无裂流的低潮台地型海滩完全反射类型海滩(low tide terrace without rips, 又称 LTT 类)。该类沙滩由于所处地理位置相应潮差值很大, 会产生均匀的、毫无特征的低潮阶地, 被不间断的浅滩波所控制, 没有形成离岸水道。

2.1.2 中间状态组($2 \leq \Omega \leq 5$)

①当 $2 \leq \Omega \leq 5$, $RTR < 3$ 时, 称为沙坝中间型海滩(Barred beaches, 简称 B 类)。这类沙滩由各种形状的沙坝共同发育, 伴随着裂流会形成水平或倾斜沙坝, 有时也会形成线性沙坝。

②当 $2 \leq \Omega \leq 5$, $3 \leq RTR \leq 7$ 时, 称为低潮沙坝/裂流中间型海滩(low tide bar/rip, 又称 LTBR 类), 随着相对潮差的增大, 海滩保持相对陡峭的上升。低梯度的中潮间带, 可能有冲沙。这些海滩具有更复杂的形态动力学特征, 在整个潮汐循环过程中可能会经历反射(高潮)、中间和耗散(低潮)的浪区条件。

2.1.3 消散组($\Omega > 5$)

①当 $\Omega > 5$, $RTR < 3$ 时, 称为沙坝消散型沙滩(barred dissipative beaches, 简称 BD 类), 沙滩剖面呈逐渐减弱的海岸沙槽型, 海浪以崩破波居多, 存在强烈的近海回流。

②当 $\Omega > 5$, $RTR > 3$ 时, 称为无沙坝的消散型沙滩(non-barred dissipative beaches, 又称 NBD 类), 这一类海

滨滩面既比较平缓而均衡, 比较消散, 不会产生沙坝。

(4) 超级消散型

当 $\Omega > 2$ 且 $RTR > 7$ 时, 称为超消散型沙滩(ultra-dissipative beaches, 又称 UD 类), 这一类海滨滩面一般相对平静开阔, 但消散性能更强, 潮间带较宽, 波浪在整个潮汐循环中呈消散状态。

2.2 聚类分析

目前越来越多的研究者使用聚类分析等方法进行海滩分类^[23-24], 聚类分析采用系统的聚类方法, 这是目前使用最广泛的一种聚类方法。聚类过程如下: 首先, 将每个观测值视为一个类, 找到具有下一个属性的两个类后, 将它们合并到一个新类中。根据距离公式, 按照采用欧氏距法的要求用距差平方和法进行聚类, 计算新类别中各类别之间的距离, 直到所有的观测值聚成一类为止。进行聚类分析之前先将原始数据进行规范化处理, 获得无量纲数据, 提高分类效果。为了便于观测, 把整个划分体系绘制为一个谱系图(图 2), 能够表明不同距离下的划分状况^[25]。

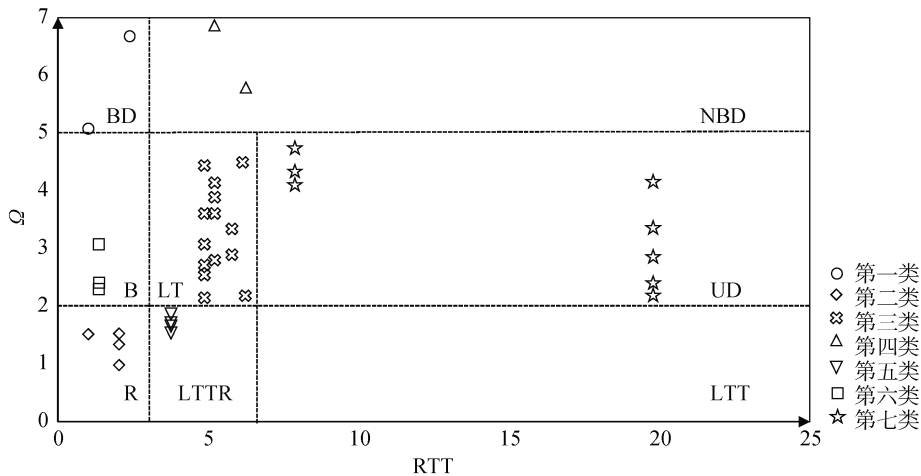


图 2 海滩状态分类模型结果

Fig. 2 Results of beach state classification model

3 结果分析

3.1 基于 Ω -RTR 模型的海滩分类

利用公式(2)、(3)、(4)计算无量纲沉降速度 Ω 、相对潮差 RTR 和浪潮作用指数 K 的结果在山东半岛 43 个沙滩的体现(表 2)。从表中可以看出: (1)山东半岛北部, 烟台多处海滩 $\Omega > 5$, 属于消散型沙滩, 局部属于过渡型沙滩; (2)青岛、日照海滨地区等绝大部分沙滩 $\Omega < 5$, 属于过渡型或反射型, 局部为消散型; (3)根据 K 值大小, 烟台蓬莱以西的沙滩 $K > 1$, 为浪控地貌; 烟台蓬莱

以东, 威海、青岛以及日照 $K < 1$, 为潮控地貌。

基于海滩状态分类模型可将山东半岛 43 个海滩分为 7 类, 分别为: 第一类沙坝消散型(○)包括石虎嘴-辛庄村和蓬莱海市公园西; 第二类完全反射型(◇)包括: 妃姆岛、羨霞湾、成山头 and 天鹅湖; 第三类低潮沙坝/裂流中间海滩(⊠)包括: 张家庄、第一海水浴场、初村北海、镇镛岛、南辛、文登金滩、乳山银滩、大乳山、烟墩石栏-辛家港、丁字嘴、蓝谷滨海公园、小蓬莱、仰口湾、石老人海水浴场、青岛第三海水浴场、青岛第六海水浴场; 第四类没有沙坝的消散型

表 2 43 个海滩的动力地貌参数

Tab. 2 Geomorphic dynamic parameters of 43 beaches

海滩编号	海滩名称	Ω	RTR	K
1	烟台招远石虎嘴-辛庄村	5.05	1.32	2.78
2	烟台龙口市妃姆岛	1.48	1.32	2.78
3	烟台蓬莱市蓬莱海市公园西	6.95	2.09	1.82
4	烟台福山区张家庄	2.01	6.30	0.47
5	烟台开发区海水浴场	5.39	6.30	0.47
6	烟台芝罘区第一海水浴场	4.29	6.30	0.47
7	烟台牟平市金山港西	6.94	5.53	0.63
8	威海环翠区初村北海	2.66	5.53	0.63
9	威海环翠区威海金海滩	1.51	3.46	0.71
10	威海环翠区葡萄滩海水浴场	1.72	3.46	0.71
11	威海环翠区伴月湾	1.44	3.46	0.71
12	威海环翠区逍遥港	1.72	3.46	0.71
13	威海荣成市纹石宝滩	1.55	3.46	0.71
14	威海荣成市成山林场	2.92	1.76	1.67
15	威海荣成市羨霞湾	1.29	1.76	1.67
16	威海荣成市马栏湾	2.31	1.76	1.67
17	威海荣成市成山头	0.83	1.76	1.67
18	威海荣成市天鹅湖	1.41	1.76	1.67
19	威海荣成市爱连湾	2.36	1.76	1.67
20	威海荣成市荣成海滨公园	0.86	6.71	0.45
21	威海荣成市楮岛南	0.91	6.71	0.45
22	威海荣成市镍镉岛	2.77	6.21	0.59
23	威海荣成市朱口-沙口	1.00	6.21	0.59
24	威海文登市南辛	3.14	6.21	0.59
25	威海文登市文登金滩	3.53	5.52	0.73
26	威海乳山市乳山银滩	3.78	5.52	0.73
27	威海乳山市大乳山	4.06	5.52	0.73
28	烟台海阳市烟墩石栏-辛家港	3.53	5.52	0.73
29	烟台海阳市丁字嘴	3.78	5.52	0.73
30	青岛即墨区蓝谷滨海公园	2.95	5.26	0.63
31	青岛崂山区小蓬菜	2.79	5.26	0.63
32	青岛崂山区仰口湾	2.30	5.26	0.63
33	青岛崂山区石老人海水浴场	2.17	5.26	0.63
34	青岛市南区第三海水浴场	4.25	5.26	0.63
35	青岛市南区第六海水浴场	3.60	5.26	0.63
36	青岛黄岛区银沙滩	2.76	21.38	0.19
37	青岛黄岛区海滨公园	4.09	21.38	0.19
38	青岛黄岛区南小庄	3.39	21.38	0.19
39	日照东港区海滨国家森林公园	2.34	21.38	0.19
40	日照东港区海龙湾人造沙滩	2.18	21.38	0.19
41	日照东港区金沙岛海滨浴场	3.93	8.64	0.50
42	日照岚山区左家岭东	4.77	8.64	0.50
43	日照岚山区多岛海赶海园	4.30	8.64	0.50

海滩(Δ)包括金山港西和烟台海水浴场;第五类存在裂流的低潮台地型海滩(▽)包括威海金海滩、葡萄滩海水浴场、伴月湾、逍遥港、纹石宝滩;第六类沙坝中间型海滩(□)包括成山林场、马栏湾、爱连湾;第七类超消散型海滩(☆)包括青岛银沙滩、青岛海滨公园、南小庄、日照海滨国家森林公园、海龙湾人造

沙滩、金沙岛海滨浴场、左家岭东、多岛海赶海园,分类结果如图2所示。

3.2 基于聚类结果的海滩分类

根据6个聚类因子对山东半岛43个海滩的进行系统聚类,结果见图3。以距离4.3为阈值,可以将山东半岛海滩分成6类。

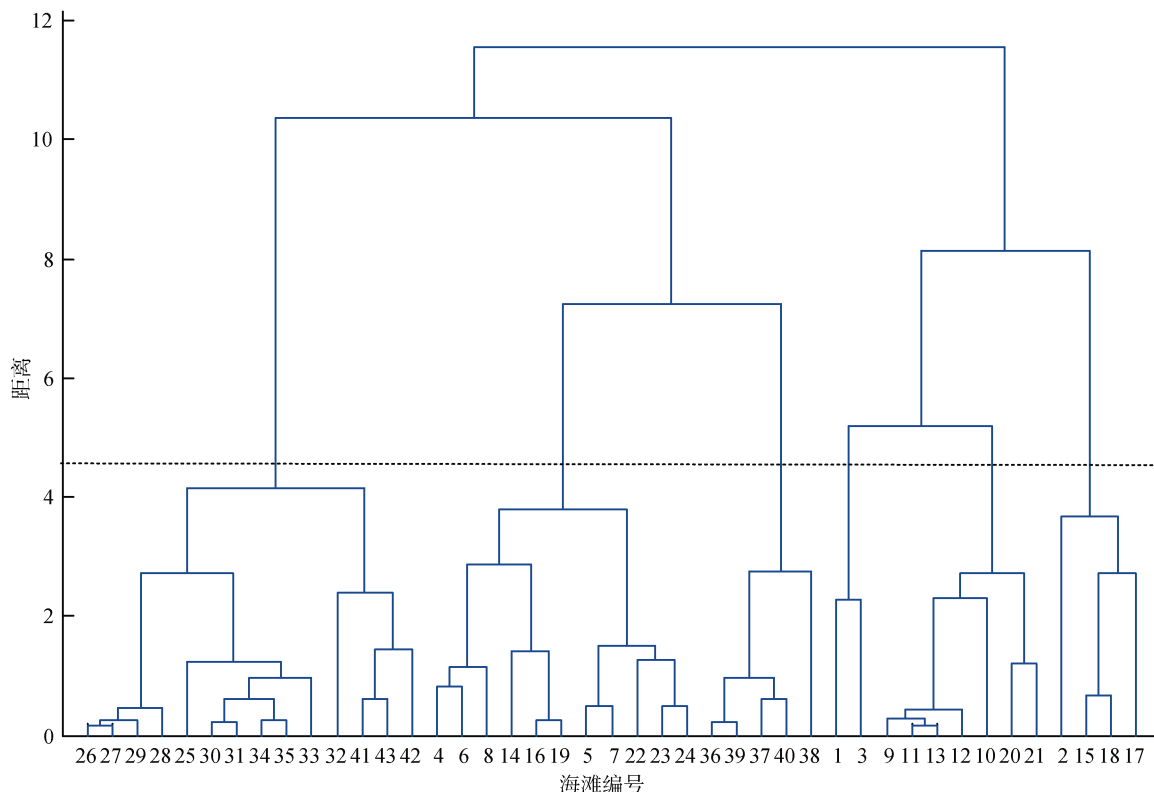


图3 海滩地形动力状态聚类谱图

Fig. 3 Cluster spectrum of beach topographic dynamic state

第一类:低潮沙坝/裂流海滩/超消散组。包括文登金滩、乳山银滩、大乳山、烟墩石栏-辛家港、丁字嘴、蓝谷滨海公园、小蓬莱、仰口湾、石老人海水浴场、青岛第三海水浴场、第六海水浴场。此类海滩平均潮差较大, $K < 1$ 为潮控型海滩地貌, 海滩类型多为岬湾型和夷直型。根据观测, 乳山银滩长约 8.8 km, 宽约 100 m, 发育有较大滩肩和滩角, 前滨低缓, 以细砂为主, 有较强的耗散性。山东半岛南部有较多曲折的岬湾和平直的砂岸, 青岛市岸线较为曲折, 春夏季常浪向为 SE 向, 秋冬季常浪向为 NW 向, 主要受波浪作用, 海湾和岬角相间分布, 石老人海水浴场和第三海水浴场均属于岬湾型海岸。日照东港区海滩平坦宽广, 消耗了入射波能量, 潮汐叉道发育极好, 沉积物粒径较小。岚山区海滩滩肩宽度

在 225 m 左右, 沙滩发育有冲流坝。将此类沙滩归为低潮沙坝/裂流海滩/超消散组(图 4)。

第二类:中间状态组/消散组(无沙坝)。包括张家庄、烟台海水浴场、烟台第一海水浴场、金山港西、初村北海、成山林场、马栏湾、爱连湾、镆钁岛、朱口-沙口、南辛。这类沙滩地形动力特征比较复杂, 多分布于山东半岛的东部和北部, 东部沙滩受控于东风和东南风造成的强烈海浪, 而山东半岛北部的沙滩的坡度比较小, 一般在 $1.1^{\circ} \sim 2.1^{\circ}$, 且宽度很大, 滩面较为平缓。以烟台第一海水浴场为例, 海滩长度约为 800 m, 宽度为 70~75 m, 坡度小于 5° , 无滩肩发育, 滩面上发育有滩脊, 粒径较粗, 属于砂砾质海滩, 将其划分为中间状态组/消散组(无沙坝)(图 4)。

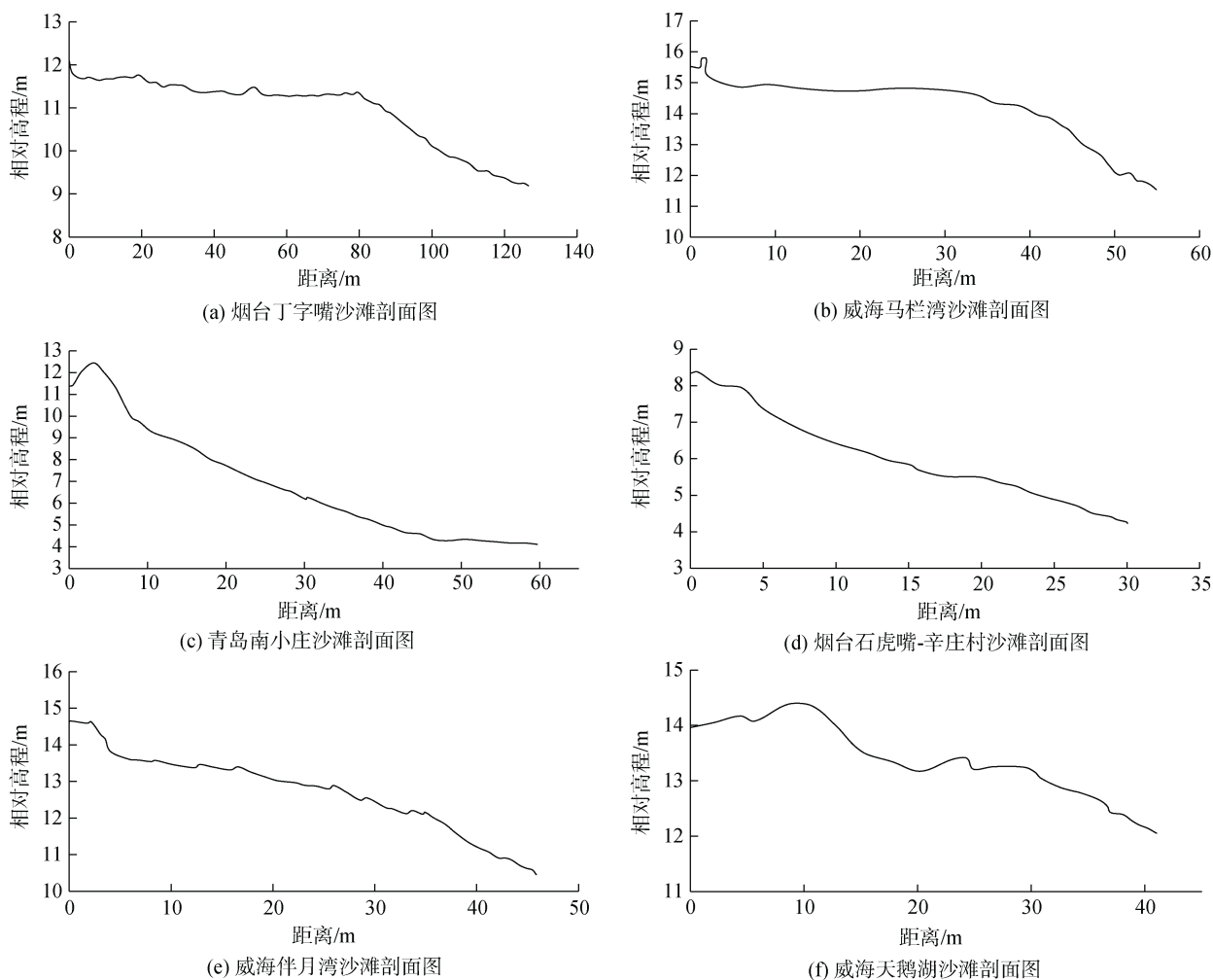


图 4 海滩地貌特征
Fig. 4 Beach geomorphic features

第三类：超消散组。包括青岛银沙滩、青岛海滨公园、南小庄、日照海滨国家森林公园、海龙湾人造沙滩。这类沙滩一般潮差都比较大，潮流作用强烈，沙滩潮汐作用指数 $K < 1$ ，属于潮控型海滩地貌。滩面平缓，消散性强，沙滩潮间带广阔，前滨坡小，沉积物大部分为细砂。超消散型海滩随着强潮汐的涨落，容易在滩面上形成潮沟，泥沙和潮水的运输多通过潮沟，这是超消散型海滩的主要地貌。以日照海滨国家森林公园为例，海滩宽度较大，可达 290 m。后滨多发育有沙丘，滩肩发育迟缓，海滩沉积物为细砂。受董家口咀岬角的阻挡作用和海滩宽广平缓的影响，潮汐叉道发育，将这类沙滩归为超消散组(图 4)。

第四类：消散组(沙坝-槽谷)。包括山东半岛西北部的石虎嘴-辛庄村和蓬莱海市公园西。这类沙滩多发

育在浪控性海岸，海滩剖面上部一般呈凸型，波浪破碎多为卷破波，一般无滩肩。虎头崖至蓬莱市岸段岸线平直，海滩狭窄，常发育有连岛坝。海滩顶部常形成滩脊，物质以粗细砂为主，在波浪和风的作用下，形成平行于岸边的沙坝-槽谷地形。此类的两个海滩地处弱潮环境，平均波高和平均波周期较大，波浪作用明显，NE 和 NNE 向波浪占优势，易形成沙坝-槽谷，因此将这类沙滩划分为存在沙坝-槽谷的消散组(图 4)。

第五类：低潮阶地。包括威海金海滩、葡萄滩海水浴场、伴月湾、逍遥港、纹石宝滩、荣成海滨公园、楮岛南。此类沙滩多发育在潮控性海岸和潮差比较大的地区，滩面陡斜，低潮阶地低缓。在高潮时，陡斜的滩面被海浪作用；在低潮时，海浪从低潮阶地逐渐消散，具备一定的反射性。例如，荣成海滨公园沙滩长约 5.5 km，宽约 90 m，沙滩坡度在 7.5° 左右，

冬季有明显滩肩, 滩肩沉积物处以中粗砂为主, 低潮阶地处以细砂为主。伴月湾沙滩长度约为 0.7 km, 宽度较小, 前滨坡度较大, 在高潮带受海浪侵蚀, 易形成滩坎, 将这类海滩划分为低潮阶地组(图 4)。

第六类: 反射组。包括妃姆岛、羨霞湾、成山头、天鹅湖。此类沙滩属于浪控型海滩地貌, 岸线曲折, 所在环境浪潮作用指数 $K > 1$, 多发育海蚀地貌。潮间带坡度平缓, 在滩面往往形成滩角和滩坎交替存在, 无水下沙坝, 滩肩易遭受风暴潮的损害, 沙滩粒径较粗。以天鹅湖为例, 沙滩长度约为 4.8 km, 剖面宽度在 40 m 左右, 有滩角形成, 将此类沙滩归为反射组(图 4)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 海岸背景对海滩地貌的影响

海岸地貌的形成和发展与波浪的作用密不可分, 海岸剖面形态和演变趋势直接受波浪破碎和波能决定, 潮差大小决定波能的分布。在潮差较小的海岸, 波浪破碎的位置比较稳定, 波能比较集中; 在潮差较大的海岸, 波能比较分散。浪潮作用指数的物理意义是反映了波能作用的集中程度与潮汐的相对强度。聚类分析表明山东半岛 43 个沙滩状态呈一定的规律性, K 值在山东半岛海岸地貌的反应作用十分明显。在山东半岛的北部的部分沙滩, 如龙口地区, K 值较大, 波浪作用明显, 浪强潮弱; 往东部荣成地区, K 值相对减小, 但波能仍占优势, 岸线多呈螺旋状; 半岛南部青岛地区, 沿岸 K 值最小, 此地区潮汐作用强烈, 潮强浪弱, 此处海岸线多呈曲折状态。各地区交界处也存在海岸 K 值接近 1, 为过渡性海岸。山东半岛各地区的波浪潮汐动力作用的差异导致形成不同的海滩地貌类型。

海滩岬角能够改变波浪传播形态, 促进波能损耗, 减小沿岸输沙和海岸侵蚀。没有岬角庇护的海岸受到波浪作用较强, 往往形成滩面平缓, 消散性强的海岸地貌。由于陆域构造和山丘走向的不同, 海湾的开口方向也会产生差异, 从而影响海滩地貌形态。偏西向海湾海底供沙相对最弱, 偏南向海湾供沙相对充足^[3]。

浪高是影响海滩时间变化的主要变量, 潮差时间变化的影响仅次于波浪, 但不会使海滩在形态上产生任何实质性的变化, 也不会向邻近的海滩类型转移。随着潮差的增加, 波浪仍然是海滩时间变化的主要贡献者。随着波浪的能量在潮间带上的扩散, 单位海滩的泥沙输移率减小, 海滩变化缓慢^[2]。本文模型中忽略时间尺度的变化, 在中小时间尺度上, 海

滩所处的海洋环境、沉积物特性变化都较小, 对海滩分类结果影响也较小。

4.1.2 可靠性分析

海滩形态状态不能仅仅用平均波浪、潮汐和沉积物条件来描述, 但这些变量确实为观测到的海滩自然变化提供了一级解释^[26]。将 Ω -RTR 模型所得到的海滩形态划分结果与聚类分析所得到的 6 组沙滩形态进行比较, 结果表明系统聚类分析方法与 Ω -RTR 模型所得到的海滩分类结果相似度高, 但也存在一些不吻合。例如第一类中金沙岛海滨浴场、左家岭东和多岛海赶海园按照 Ω -RTR 模型应该属于超消散海滩, 但却与低潮沙坝/裂流中间海滩聚成一类。主要是因为聚类分析除了考虑到动力和沉积等因素外, 还考虑到了地形因素。

在本文中, 由于沙滩数量庞大且分布连续, 无法精确判断每个沙滩的潮差、波浪等动力因素影响。因此, 本研究使用多种来源资料采用各种来源资料综合评判海滩动力要素时, 结论会产生一些偏差。但由于动力要素能够较好的涵盖全部研究范围, 所以也具有一定的可行性。

4.2 结论

经过前期对山东半岛 43 个沙滩的数据观测和现场研究, 按照地理背景、地貌形状、海滩沉积物类型和海岸动力要素选取了 6 个可量化的指数, 并采用聚类分析和 Ω -RTR 模型对山东半岛的 43 个沙滩进行了归类, 得到如下结果:

(1) 通过聚类分析, 可将全山东半岛 43 个沙滩归为 6 种不同的海滩形态, 分别是: 低潮沙坝/裂流海滩/超消散组、中间状态组/消散组(无沙坝)、消散组(沙坝-槽谷)、超消散组、低潮阶地、反射组。

(2) 本研究证实了 Ω -RTR 模型与聚类分析方法在海滩地貌划分上的有效性, Ω -RTR 模型将山东半岛海滩分为七类, 和聚类分析的分类结果略有不同。相比较而言, 聚类分析考虑的因素更加全面, 灵敏度更高。两种模型都可以帮助我们更好的理解海滩地貌。

参考文献:

- [1] 柯马尔 P D. 海滩过程与沉积作用[M]. 北京: 海洋出版社, 1985: 8-223.
KEMAL P D. Beach processes and sedimentation[M]. Beijing: China Ocean Press, 1985: 8-223.
- [2] WRIGHT L D, SHORT A D. Morphodynamic variabil-

- ity of surf zones and beaches: A synthesis[J]. *Marine Geology*, 1984, 56(1/4): 93-118.
- [3] 戴志军, 李春初. 华南弧形海岸岸线形态与地貌发育模式[J]. *地理学报*, 2004, 5: 738-744.
DAI Zhijun, LI Chunchu. Coastline Configuration and Geomorphic Development Model of Arc-shaped Coast in South China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 5: 738-744.
- [4] 戴志军, 李春初. 华南弧形海岸动力地貌过程[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2008.
DAI Zhijun, LI Chunchu. Dynamic coastal geomorphic processes of south China arc[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2008.
- [5] 李志强, 朱雅敏. 华南海岸岬间海滩地形动力状态类型研究[J]. *海洋通报*, 2015, 34(2): 181-189.
LI Zhiqiang, ZHU Yamin. Morphodynamic characteristics and classification of headland beaches in South China Coast[J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(2): 181-189.
- [6] 朱士兵, 李志强, 张会领, 等. 基于地貌动力学的雷州半岛海滩状态分类研究[J]. *地理研究*, 2020, 39(6): 1269-1282.
ZHU Shibing, LI Zhiqiang, ZHANG Huiling, et al. Morphodynamic classification of beaches on the coast of Leizhou Peninsula[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(6): 1269-1282.
- [7] 山东省科学技术委员会. 山东省海岸带和海涂资源综合调查报告集(综合调查报告)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990.
Scientific and Technological Committee of Shandong Province (STCSP). Integrated investigation report on coastal zone of Shandong Province[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990.
- [8] 童钧安. 山东海洋功能区划[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
TONG Junan. Shandong marine function layout[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992.
- [9] 陈吉余, 夏东兴, 虞志英, 等. 中国海岸侵蚀概要[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
CHEN Jiyu, XIA Dongxing, YU Zhiying, et al. The compendium of coastal erosion in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2010.
- [10] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第 3 分册(山东半岛北部和东部海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
Compiation Committee of "Record of Bays in China" (CCRBC). Records of Bays in China (Volume 3: Bays in the North and East Shandong Peninsula)[M]. Beijing: China Ocean press, 1991.
- [11] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第 4 分册(山东半岛南部和江苏省海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
Compiation Committee of "Record of Bays in China" (CCRBC). Records of bays in China (Volume 4: Bays in the South Shandong Peninsula and Jiangsu Province)[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993.
- [12] 宫立新. 山东半岛东部海滩侵蚀现状与保护研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
GONG Lixin. Study on the Status and Protection of Beach Erosion in eastern Shandong Peninsula[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [13] 周淑玲, 闫丽凤. 影响山东半岛风暴潮的分析和预报[J]. *气象科技*, 2002, 30(1): 37-42.
ZHOU Shuling, YAN Lifeng. Analysis and forecast of weather of storm tide in east Shandong[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2002, 30(1): 37-42.
- [14] 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[J]. *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[J]. *Marine science*, 2017, 41(4): 118-127.
- [15] 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[J]. *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[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(1): 83-94.
- [16] KORMAR P D, GAUGHAN M K. Airy wave theory and breaker height prediction[C]//International Conference on Coastal Engineering, 1972, 1(13): 405-418.
- [17] FERGUSON R I, CHURCH M. A Simple universal equation for grain settling velocity[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2004, 74(6): 933-937.
- [18] JOHNSON J W. Shore processes and shoreline development[M]. New York: Wiley, 1949: 584.
- [19] GUZA R T, INMAN D L. Edge waves and beach cusps[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(21): 2997-3012.
- [20] 王文介, 杨雪舞. 华南沿海海滩状态和演变[J]. *热带海洋*, 1996, 18(4): 9-16.
WANG Wenjie, YANG Xuewu. Beach phases and revolution in the coasts of South China[J]. *Tropic Oceanology*, 1996, 18(4): 9-16.
- [21] MASSELINK G, SHORT A D. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model[J]. *Journal of Coastal Research*, 1993, 9(3): 785-800.
- [22] 崔金瑞, 夏东兴. 山东半岛海岸地貌和波浪、潮汐特征的关系[J]. *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[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Sea*, 1992, 10(3): 20-25.

- [23] HEGGE B, ELIOT I, HSU J. Sheltered sandy beaches of Southwestern Australia[J]. *Journal of Coastal Research*, 1996, 12(3): 748-760.
- [24] JENNINGS R, SHULMEISTER J. A field based classification scheme for gravel beaches[J]. *Marine Geology*, 186(3/4): 211-228.
- [25] JOHNSON R A, WICHERN D W, 2001. 实用多元统计分析(第四版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 569-575.
- JOHNSON R A, WICHERN D W, 2001. *Applied Multivariate Statistical Analysis(4th Edition)*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 569-575.
- [26] SCOTT T, MASSELINK G, RUSSEL P. Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales[J]. *Marine Geology*, 2011, 286(1/4): 1-20.

Classification of beach dynamic geomorphic features in the Shandong Peninsula

ZHANG Li-li¹, XING Hao¹, ZHANG Xu-ri¹, LI Hua-qing¹, LIU Zong-yu¹,
SHI Hong-yuan^{1, 2}, YOU Zai-jin^{1, 3}

(1. School of Hydraulic Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. Institute of Port and Coastal Disaster Prevention and Mitigation, Ludong University, Yantai 264025, China; 3. Collaborative Innovation Center of Port and Shipping Security, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Received: Feb. 27, 2022

Key words: geomorphic features; Beach classification; Ω -RTR model; Cluster analysis; Shandong peninsula

Abstract: From a marine geomorphology standpoint, it is necessary to provide a specific method to divide the coast according to its shape, genesis, material structure, development, and evolution to understand the topographic dynamic characteristics, which are critical for coastal engineering technology research and protection, tourism development, and other aspects. In this paper, the marine dynamic geomorphology of sandy beaches in the Shandong Peninsula is classified and defined. Six features are selected as systematic clustering factors according to the geomorphological background, coastal geomorphology, coastal sediment type, and marine dynamic factors. Using the beach relative tidal range classification model (Ω -RTR model) and cluster analysis, the geomorphic dynamic characteristics of 43 beaches in the Shandong Peninsula are determined, and their types are analyzed. The beaches on the Shandong Peninsula can be divided into six different beach categories based on the results, including the low tide bar/split beach/excess dissipation group, intermediate state group/excess dissipation group (no bar), excess dissipation group, excess dissipation group (bar-trough valley), low tide terrace, and reflection group. (2) The conclusions of the cluster analysis method and THE ω -RTR model are the same, but the classification conclusions of some beaches are slightly different. Overall, it can reasonably classify the beach types, which is helpful in understanding the dynamic geomorphic system of the beach.

(本文编辑: 康亦兼)