

华南岬间弧形海岸平面形态影响因素及类型

李志强¹, 李维泉¹, 陈子桑², 朱雅敏³

(1. 广东海洋大学工程学院, 湛江 524088;

2. 中山大学水资源与环境系, 广州 510275;

3. 国家海洋局珠海海洋环境监测中心站, 珠海 519015)

摘要: 对华南47个典型弧形海岸, 选取表征海岸平面形态特征、海岸水动力等10个地貌动力要素, 利用主成分、分层聚类和非度量多维尺度分析方法对影响华南弧形海岸的主要因素及海岸类型进行研究, 结果表明: (1) 华南弧形海岸平面形态主要受到地质构造、水动力、海陆供沙等要素共同作用; (2) 华南弧形海岸可以分成4个大类。第一类型是中、强潮型海岸; 第二类型主要为强浪型海岸; 第三类型是地质构造控制的大型弧形海岸; 第四类型只有洋浦湾与铺前湾, 是比较独特的弧形海岸类型; (3) 利用非度量多维尺度分析探究地貌动力要素及海岸形态与类型的关系, 说明华南弧形海岸聚类分析结果具有一定的客观性。

关键词: 海岸平面形态; 弧形海岸; 主成分分析; 聚类分析; 非度量多维尺度分析

DOI: 10.11821/dlxb201405003

1 引言

由于基岩台地、岛屿、礁石、人工建筑物等不易受侵蚀的地貌形态存在, 在全球风——浪系统产生的盛行涌浪作用下, 砂质海岸通常被塑造成一种特殊的形态——岬间弧形海湾^[1-2]。据不完全统计, 岬角控制的砂质海岸占世界海岸线的50%以上^[3-4]。由于岬角的控制, 弧形海岸具有相对稳定性, 并形成不同于平直海岸的地形动力过程体系。这一特征得到海岸学者的重视, 同时研究成果也被工程师在海岸工程实践中进行广泛应用。

20世纪40年代以来, 研究者提出了各种数学方程来拟合弧形海岸的平面形态。这些数学方程主要有对数螺线方程^[5]、双曲正切方程^[6]、抛物线方程^[7-9]、双曲螺线方程^[10-11]、椭圆方程^[12]等。其中, 抛物线方程是确定岬间弧形海岸平衡形态最广泛使用的经验关系。大量研究表明, 这些经验形态方程虽然在应用中取得一定的效果, 但都有应用局限性。其原因主要是这些研究都是经验方法, 缺乏对成因机制的深入探讨, 模型中没有较好地体现地貌动力因素。从机理上说, 弧形海岸是波浪、泥沙和地形相互作用的结果。因此, 海岸形态在一定程度上包含地貌动力要素信息。揭示弧形海岸的地貌动力信息, 对海岸环境特征与陆海相互作用研究有重要的学术意义。本文以华南47个典型岬间弧形海岸为例, 利用多种统计诊断方法从多角度探讨弧形海岸包含的地貌动力学意义, 并对其进行分类研究。

2 华南海岸背景

2.1 地质构造基础

华南岬间弧形海岸超过100处^[13], 是全球最典型的弧形海岸带之一。华南地区中新生

收稿日期: 2014-01-12; 修订日期: 2014-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(40806036); 广东省教育厅育苗工程项目; 广东海洋大学自然科学基金青年团队项目 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40806036; Breeding Project of Education Department of Guangdong Province; Guangdong Ocean University Young Group Science Foundation]

作者简介: 李志强(1974-), 男, 湖南郴州人, 博士, 副教授, 从事海岸地行动力学研究。E-mail: qiangz1974@163.com

代形成的一系列 NE-SW 和 NW-SE 向断裂构造是这些弧形海岸形成的基础。华南海岸线与这些构造线斜交, 山地或丘陵向海突, 因而形成系列的锯齿形海岸^[14-16]。新第三纪后, 华南发生了明显的以间歇性上升为主的块断升降差异性运动。此时 NW-SE 断裂活动加强, 在华南沿海形成了一系列断隆和断陷构造区^[17-18] (图 1), 但基本上没有改变上述海岸特征。全新世时期, 随着海平面上升, 波浪将泥沙向陆搬运并在岸线附近沉积, 形成现代海岸线。

2.2 动力背景

波浪、潮汐与潮流、径流、风是塑造海岸形态的动力基础。外海入射波浪在近岸破碎形成沿岸流、产生沿岸输沙是塑造砂质海岸平面形态的直接原因。全球风——浪系统产生的盛行涌浪更是这种大尺度海岸特征形态的决定性动力。潮汐的升降通过改变波浪对海滩的作用范围因而对海岸形态造成显著影响, 这是决定岸线平面的重要因素。因此, 本文主要对华南地区涌浪、潮汐空间分布特征做简要的概述。

2.2.1 涌浪 对中国近海波浪的统计表明^[19]: 春季台湾海峡最多涌浪向为 NE 向; 南海北部最多涌浪向为 E、NE 向为主, 北部湾以 S (北部) 和 SE 向 (南部) 为主。夏季, 台湾海峡最多涌浪向为 SW 向; 南海地区最多涌浪向为 S 和 SW 向, 其中南海北部和北部湾为 S 向。秋季, 台湾海峡最多涌浪向为 NE 向; 南海北部最多涌浪向为 NE 向, 北部湾最多涌浪向为 E (北部) 和 NE 向 (南部)。冬季, 台湾海峡最多涌浪向为 NE 向; 南海最多涌浪向为 NE 向。华南沿岸各海区涌浪周期一般在 5~8 s, 最大可达 22.0 s, 波高在 0.8~3.0 m。其中, 台湾海峡秋、冬季节涌浪波高较大, 最大可达 8.0 m。南海北部近海夏、秋季涌浪波高大于春秋季节, 最大可达 7.5 m。

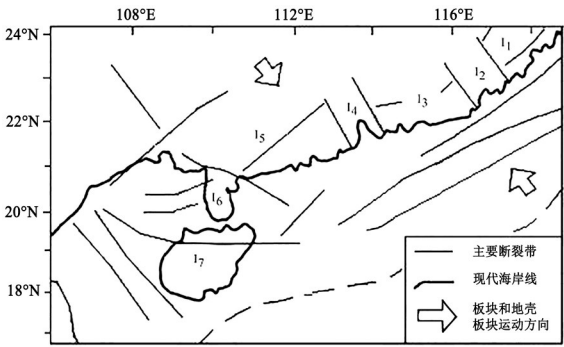
2.2.2 潮汐 (1) 潮汐类型。华南海岸近岸的潮汐除东部局部地区受来自台湾海峡传入潮波的影响外, 主要是由太平洋潮波经巴士海峡和巴林塘海峡传入南海后而形成^[18]。台湾海峡南部是不正规半日潮。南海海区由于半日潮输入能量小于全日潮输入的潮能, 同时南海特有的地理条件, 使得南海海区固有周期接近全日潮周期而产生共振, 造成南海大部分海域的全日潮振幅大于半日潮振幅, 结果南海海区潮汐类型错综复杂。汕头附近海域、大亚湾至雷州半岛属于不正规半日潮。红海湾—碣石湾、琼州海峡中部、海南岛东部和南部属于不正规全日潮。北部湾海区多属于规则全日潮^[19]。

(2) 潮差。潮差是反映潮汐强弱的重要指标。福建沿岸和北部湾顶属于强潮区, 潮差为 4~6 m。粤东至粤西茂名岸段、海南岛东岸潮差较小, 属于弱潮区, 潮差在 1~2 m。雷州半岛南岸和东岸属于中等潮汐区, 潮差变化复杂, 大体在 2~4 m。

3 数据收集与研究方法

3.1 数据收集

岬间海滩具有一个显著的曲线, 由于岬角处的波浪绕射使得波前缘弯曲, 最终使岸线弯曲。依照这一显著特征, 研究者给出诸多名称, 例如: ζ形海湾^[20]、圆齿湾^[21]、半心形海湾^[22]、对数螺线海湾^[5]、弧形或钩状海滩^[23]、袋状海湾^[24]等。但其有以下共同的地貌要素: 上、下控制岬角 (有时下岬角不明显或缺失)、遮蔽段、切线段 (有时还分出过渡段)。本文



I₁ 闽南隆起, I₂ 韩江三角洲断陷, I₃ 粤东断隆, I₄ 珠江三角洲断陷, I₅ 粤西桂南断隆, I₆ 雷琼断陷, I₇ 琼中南断隆
图 1 华南沿海地区中生代断裂构造图 (引自文献[18])

Fig. 1 Sketch map of Mesozoic-Cenozoic fault structure in South China coast (From Reference [18])

从地貌动力学的角度出发,参考前人的研究方法和成果^[25-27],基于数据的客观性、可比较性以及可获得性原则,选取了两大类地貌动力要素。一类是表征弧形海岸平面形态特征的因子,包括湾口开敞大小(海湾弦长 b)、海湾凹入长度 a 、直线段长度 L 、岬角长度 S 以及湾口开口方向角 γ 和螺线切角 β (图2)。另一类是表征海湾所在区域的动力强弱因子,主要是波高 $H_{1/10}$ 、潮差 TR 、最大潮差 MTR 。

形态因子的定义和物理意义如下:

最大凹入度 a ,定义为上、下岬角连线的垂线与弧形岸线相交的最长线段长度。表示岸线在波浪作用下的侵蚀后退程度,一方面与陆侧侵蚀难易程度有关,另一方面也与波浪作用力强弱有关。

湾口弦长 b ,定义为上、下岬角间的距离。反映的是海湾的空间尺度,与地质构造有关。

直线段长度 L ,是弧形海湾平直岸段的长度。表示的是不被岬角遮蔽的岸段,入射波浪不经绕射直接到达岸线,与湾口弦长有关。量取时取与入射波向基本垂直的岸段长度。

岬角长度 S 。以常年优势波做垂线,与遮蔽段弧形曲线相切,切线与上岬角之间的长度即为 S 。反映的岬角的遮蔽范围大小。

湾口方向角 γ ,以 N 向起算,顺时针量取。反映的是海岸的地质构造背景。

螺线型切角 β ,是弧形海湾直线段与海湾弦的夹角。既与海湾侵蚀后退程度有关,也与海湾弦长有关。

同时参照前人的方法,构造一个参数 a/b 。Hsu等将其作为反映弧形海岸平衡性的一个参数^[9]。戴志军等认为该参数表示波浪动力与岬角遮蔽能力的相对强弱^[27]。

动力因子数据主要来自文献[28-33]。波高取多年平均波高,由于我国早期近岸波浪观测是用光学测波仪为主,因此波高值实为十分之一大波波高($H_{1/10}$)的多年平均值。潮汐采用的多年平均潮差。个别海湾波高和潮位数据缺乏则采取对相邻海湾插值的办法得到。

需要说明的是,本文的地貌动力学因子定义大致与前人一致^[25-27],但增加了若干因子,特别是动力因子,以全面体现弧形海湾的地貌动力特征,各因子的物理解释也更客观。泥沙粒径也是重要的地貌动力要素,但由于海滩泥沙粒径空间差异大(一般中间段粗,遮蔽段细,潮上和潮下带细,潮间带粗),数据代表性难以保证,前人的研究也几乎没有提及到该因子,这里也略去。

本文选取华南地区47个弧形典型海岸(绝大多数湾口弦长 b 在2 km以上),收集到上述地貌动力参数值(图3、图4)。其中海湾平面形态参数由2012年出版的海图量测得到,海图比例尺最小为1:5万,最大为1:1万。受冬、夏季风变换的影响,华南海岸盛行波浪向有两个,海岸也呈现出双弧形,这里只选取其中弧形较大(凹入度加大)的一侧,量取形态参数。数据分析前首先对原始参数矩阵进行标准化处理,以消除量纲带来的影响。

3.2 研究方法

本文的研究思路是先利用主成分分析方法找出影响弧形海岸形态的主要地貌动力因子,然后利用分层聚类分析建立华南弧形海岸的类型,最后利用非度量多维尺度分析进一步探讨各弧形海岸类型关系。其中主成分分析和分层聚类分析都是得到广泛应用的多元统计方法,这里不作详细的描述。这里仅对非度量多维尺度分析做一个简要介绍。

非度量多维尺度分析与主成分分析都属于降维分析方法,但主成分是基于数据线性结构特征,而非度量多维尺度分析则可以适用于复杂的非线性结构数据^[34-35]。该方法基于研究现象之间的相似性或距离,将研究对象在一个低维(一般为二维或三维)的空间形象地表

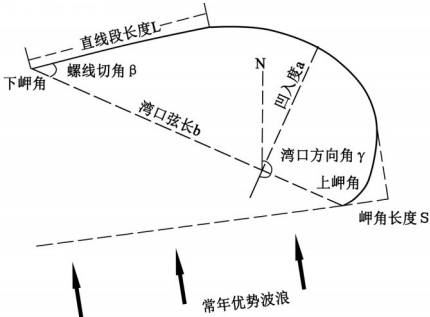


图2 弧形海岸形态要素定义示意图
Fig. 2 Sketch of the arc-shaped coast parameters definition

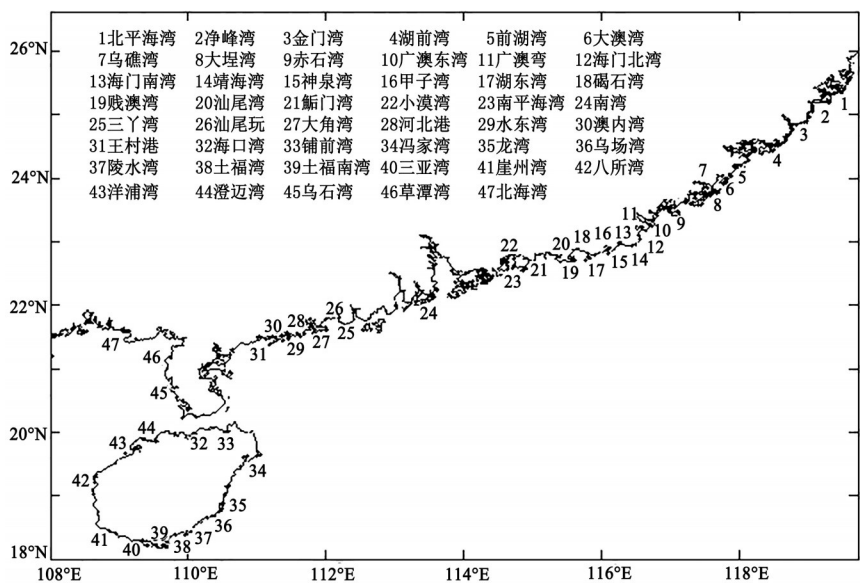


图3 47个弧形海岸位置示意图及代码

Fig. 3 Locations of the 47 arc-shaped coasts

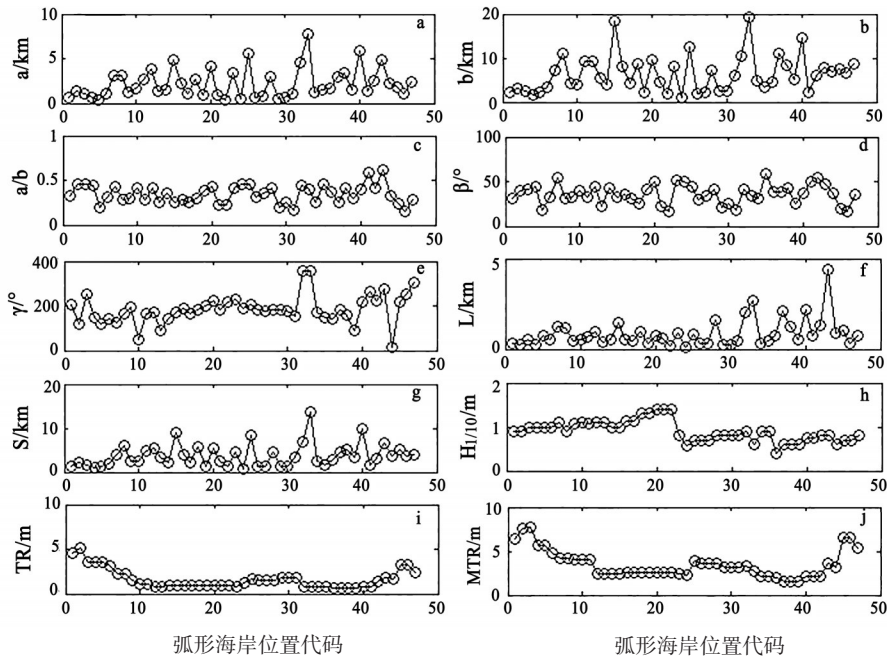


图4 华南47个弧形海岸地貌动力参数值

Fig. 4 Morphodynamic parameters of 47 arc-shaped coast in South China

示出来。非度量多维尺度分析是一种可以将聚类分析内含信息进行进一步展现的图示法。它最早产生于心理度量分析，并在生态学、声学、旅游学等领域中得到了广泛应用^[34-39]。其基本原理如下^[40]：假设有N个客体1, 2, …, n，客体j和k之间的相异性为 δ_{jk} ，而且点间欧氏距离大小 $d_{jk} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{ij} - y_{ik})^2}$ ，客体自身之间的相异性略去，则共有 $m = \frac{n(n-1)}{2}$ 个相异值。在非度量MDS模型中假定： $\delta_{jk} \approx f(d_{jk})$ 。其中当 δ_{jk} 为相似性时，f为单调降函

数, 当 δ_{jk} 为相异性时, f 为单调增函数。若样本之间没有结 (相等),

对于 m 个相异性值应有:
$$\delta_{j1k1} \quad \delta_{j2k2} \quad \cdots \quad \delta_{jmkm} \tag{1}$$

对于 m 个相似性值应有:
$$\delta_{j1k1} \quad \delta_{j2k2} \quad \cdots \quad \delta_{jmkm} \tag{2}$$

需要说明的是这里重要的是排序信息, 距离大小无关紧要。在多数情况下, 式 (1)和式 (2) 并不能完全满足, 只能在一定程度上满足。Kruskal 给出了上述单调性满足的度量模型, 并通过最小化这些度量给出有效算法^[41-42]。具体算法为, 设 $\Delta = (\delta_{jk})_{n \times n}$ 为一个相异性矩阵, $x_{n \times n}$ 为 r 维空间 n 个点的坐标阵, 对 δ_{jk} 的单调单增函数, 定义:

$$S_1(X,f) = \left[\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n (d_{jk} - \hat{d}_{jk})^2 / \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n d_{jk}^2 \right]^{1/2} \tag{3}$$

$$S_2(X,f) = \left[\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n (d_{jk} - \hat{d}_{jk})^2 / \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n (d_{jk} - \bar{d})^2 \right]^{1/2} \tag{4}$$

式中: $\bar{d} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n d_{ij}$, M 为 δ_{jk} 的有效个数。 $S_1(X, f)$ 和 $S_2(X, f)$ 称为 Kruskal 应力 (Stress), 是衡量拟合优度的指标。当 Stress < 0.05 为拟合极好; Stress < 0.1 为拟合较好; Stress < 0.2 为拟合一般; Stress > 0.3 为拟合较差。

具体计算过程中, 先随机给 X 的定初始值, 用单调回归法得到一组 $\{\hat{d}_{jk}\}$, 若应力值较大, 则固定这一组 $\{\hat{d}_{jk}\}$, 再对 X 进行更新。该过程反复进行, 直到应力值降到某个极限或不在发生显著变化为止。由于人工计算过程很繁琐, 现在许多专业软件 (如 MATLAB、SPSS) 都有非度量多维尺度分析计算模块。

4 结果分析

4.1 主成分分析

对标准化处理后的 47 个弧形海湾地貌动力因子矩阵做主成分分析, 得到各主成分的特征值, 分别计算其对总方差的贡献率并进行累计(表1)。从中可以看到, 前 4 个主成分对总方差的累计贡献率已经达到 86.75%, 表征了地貌动力因子的主要信息 (一般认为累计贡献率已经达到 85% 就能足够反映原来变量信息)。进一步按文献[43]介绍的 χ^2 分布对前 4 个主成分代表性进行显著性检验, 得到统计量 $\chi^2 = 495.6176$, 而相应的显著水平 $\alpha = 0.01$ 时的 $\chi^2_{0.01} = 48.278$, $\chi^2 > \chi^2_{0.01}$ 。因此可以用前 4 个主成分来分析华南弧形海岸的主要地貌动力特征。提取前 4 个主成分特征值各地貌动力因子对应的荷载(表2)。

在各主成分因子荷载中, 如果某一因子占该主成分总荷载的比重大, 说明该因子与这

表1 各主成分特征值、方差贡献率和累计贡献率
Tab. 1 The eigenvalues, variance contribution rate and accumulated contribution rate of principal components

主成分	特征值	方差贡献率	累计方差贡献率
第一主成分	4.162061	41.62061	41.62061
第二主成分	1.79842	17.9842	59.60481
第三主成分	1.754227	17.54227	77.14708
第四主成分	0.960727	9.607265	86.75434
第五主成分	0.731246	7.312464	94.06681
第六主成分	0.374815	3.748147	97.81496
第七主成分	0.135147	1.351474	99.16643
第八主成分	0.056537	0.565369	99.7318
第九主成分	0.019439	0.194392	99.92619
第十主成分	0.007380	0.073809	100

表2 前4个主成分各因子分荷载

Tab. 2 Loads of the first four principal components index factor

因子	a/km	b/km	a/b	β	γ	L/km	S/km	$H_{1/10}/m$	TR/m	MTR/m
第一主成分	0.4710	0.4219	0.2184	0.2007	0.2372	0.4014	0.4404	-0.1141	-0.2239	-0.1941
第二主成分	0.10486	0.14414	-0.0955	-0.2314	0.2688	0.1477	0.1855	-0.0944	0.5997	0.6392
第三主成分	-0.0397	-0.2756	0.6411	0.59861	0.0680	0.0616	-0.2207	-0.1287	0.2172	0.1796
第四主成分	0.0650	0.0151	0.0881	0.0860	0.2512	-0.0509	0.0195	0.9510	-0.0260	0.0955

一主成分相关性大，正负符号表示正负相关性。在第一主成分中岬角凹入度 a 、弦长 b 、岬角长度 L 和直线段长度 S 的荷载最大，分别为0.4710、0.4219、0.4014和0.4404。这4个因子都是弧形海岸的平面几何要素，反映的是华南各弧形海岸地质背景。如前面所述，新生代形成的一系列NE-SW和NW-SE向的断裂构造与华南海岸线斜交，山地或丘陵向海突，因而形成系列的锯齿形海岸，是这些弧形海岸形成的基础。所以第一主成分很好的反映了这一特征，与前人的研究成果一致^[14-15, 27]。

第二主成分中，平均潮差和最大潮差占的荷载最大，分别为0.5997和0.6392，说明第二主成分反映的是潮汐对弧形海岸的影响。理论研究和现场观测都表明^[44-48]，潮汐的涨落将改变波浪对海岸作用的基面，进而在时间和空间上影响到净泥沙输运矢量，最终造成弧形海岸在地貌形态上有相应的响应。

第三主成分中，参数 a/b 和螺线切角2个地貌动力参数的因子荷载最大，分别为0.6253和0.6016。如前面对参数的定义，这两个参数是相关的，即凹入度越大，切角也越大。戴志军等解释为波浪强弱因子^[27]。按照Hsu等、Silvester对海岸平衡的分析，岸线相对抛物线模型的凹入或突出对应于淤积或侵蚀状态^[9, 27]。从大尺度海岸行为来说，这是一个地质构造、海洋动力强弱和泥沙供给能力共同作用下的结果。当海陆泥沙供应充足，泥沙在海岸动力作用下将填充海湾，凹入度和切角都将变小。反之，海岸侵蚀，凹入度和切角增大。因此推断为与海陆泥沙供给有关的因子。

第四主成分中因子荷载最大的为波高 $H_{1/10}$ ，为0.9510。说明这是表征波浪因子对弧形海岸形态的作用。由于我国沿海波浪差异不大，所以波浪因子对弧形海岸平面形态的影响没有前几个因子大。

4.2 分层聚类分析

对47个海岸进行聚类分析(图5)。取距离阈值6，可以将华南弧形海岸分为4大类群：

第一类群包括：北平海湾、净峰湾、金门湾、湖前湾、水东湾、澳内湾、王村湾、大澳湾、赤石湾、山白湾、大角湾、大埕湾、北海湾、乌石湾、草潭湾、前湖湾。特点是集中在福建北部和北部湾沿岸，潮差大，平均潮差在3.5~4.5 m，最大潮差在5.5~6.5 m；平面外形较扁平。以距离阈值5该类可以分成两个亚类，其中 I_1 类分布在福建海岸，包括北平海湾、净峰湾、金门湾、湖前湾，都属于强潮海岸。其余属于中等潮差海岸。此类弧形海湾可以定义为中、强潮型弧形海岸。

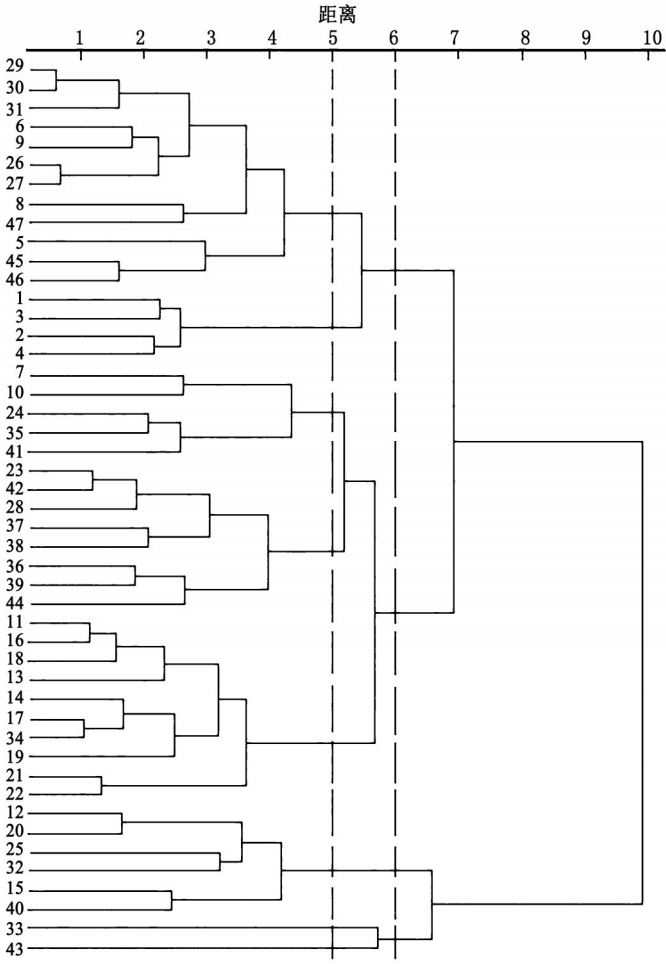


图5 华南弧形海岸聚类图

Fig. 5 Dendrogram of arc-shaped coasts in South China

第二类群包括的海湾比较多,这类弧形海岸的特点是岬角直线段明显,外形较扁,属于比较典型的弧形海岸,a/b 值在 0.30~0.35 之间。各岸段一般波浪较强,潮汐较弱,因此可以定义为强浪型海湾。在距离阈值 5 处又可以分成 3 个亚类,分别是 II₁类:乌礁湾、广澳东湾、南湾、龙湾、崖州湾;II₂类:南平海湾、八所湾、河北湾、陵水湾、乌场湾、土福湾、土福南湾、澄迈湾;II₃类:广澳湾、甲子湾、湖东湾、碣石湾、海门南湾、靖海湾、贱澳湾、冯家湾、鲕门湾、小漠湾,此类海岸波浪作用强。

第三类群包括:海门北湾、汕尾湾、三丫湾、神泉湾、三亚湾、海口湾。海湾尺寸大,直线段长度在 8~10 km 之间,外形呈抛物线型,岬角凹入度深,这类海岸都位于中生代的断陷构造上,因此属于地质构造控制的大型弧形海岸。

第四类铺前湾、洋浦湾,共 2 个海湾,位于海南岛,共同特点是海湾外形尺寸大,岬角凹入度深,外形呈 U 型。但两者在还是有较大的差异,在距离阈值约 5.5 出现显著差异。具体表现是参数是洋浦湾比铺前湾具有更大的潮差和更长的岬角长度值。

4.3 非度量多维尺度分析

对多元变量样本群,利用任何聚类技术都可以得到一个结构群,不管这分类群是否真实存在。因此,解释其分类内涵的依据,并分析探讨合理性是分类的关键。非度量多维尺度分析把研究对象之间的相似 (或不相似) 距离用低维空间中点与点之间的距离表示出来,并通过直观的空间定位图形来显示,为解释海滩群特征和群间参数差异提供了一种有效途径。

利用非度量多维尺度分析方法对各海湾的相似性进行排序。相似性在二维空间上的 Kruskal 应力 Stress = 0.01,已经达到拟合极好水平(图 6a)。上述华南弧形海岸聚类已经给出了一个比较明确的分类结构,通过对各地貌动力要素的影响在二维空间上进行排序 (图 6b),进一步直观反映各要素对弧形海岸类群的影响。需要指出的是,海门北湾 (图上 12 号点) 和土福湾 (图上 38 号点) 位置有些交叉,即聚类分析中的第二类和第三类有些重叠,这在非度量多维尺度分析中是一个正常的现象,这一方面是由于两个海湾的地貌动力因子很接近,同时也是弧形海湾影响因子的复杂性的一种表现。

为探寻弧形海湾相似性在二维空间上排序内涵的地貌动力因子信息,把主成分分析得到的主要地貌动力因子量值按大小分段间,绘制在非度量多维尺度分析的二维空间上 (图 7)。可以看到,各地貌动力要素在相似性二维排序空间上也有明显的群聚性,但其群聚性与类型的群聚性有一定的差异,说明表征弧形海湾的地貌动力要素的数据具有复杂的非线性结构。前四个主成分内的各自主要荷载因子空间分布规律大体相同,但不同主成分之间的主要荷载因子在二维空间上有显著的分布差异。说明本文基于地貌和动力特征的弧形海岸分类是客观可行的。

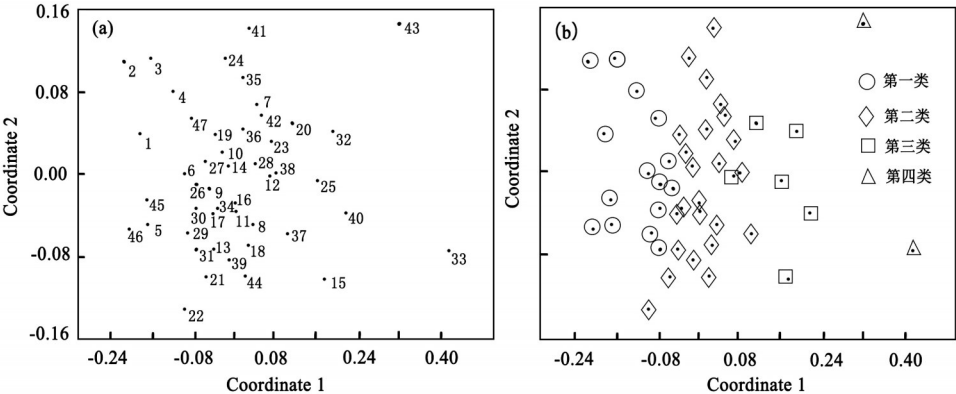


图 6 各弧形海岸 (a) 及类型 (b) 在二维非度量尺度空间上的分布

Fig. 6 Arc-shaped coasts and types distribution in the MDS two-dimensional space

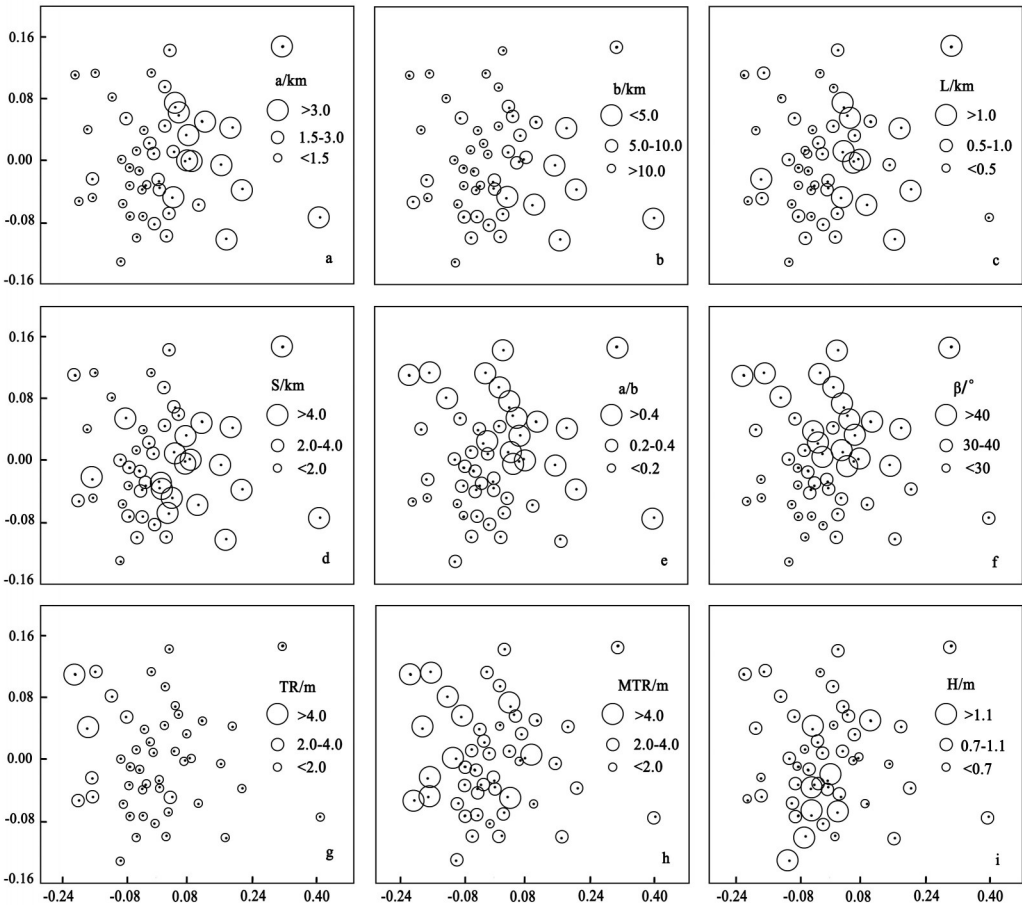


图7 各弧形海岸地貌动力要素在二维非度量尺度空间上的分布

Fig. 7 Morphodynamic parameters for arc-shaped coasts distributed in the MDS space

5 讨论

华南弧形海岸是地质构造背景、海岸动力素、海陆泥沙供给、冰后期海侵共同作用下形成的^[49]。这些要素共同塑造海岸形态，但在漫长的华南海岸线上的分布是复杂多变的，各要素对华南海岸形态的影响存在差异。主成分分析是基于降维的思想，借助正交变换将分量相关的原始随机变量转化成不相关的新随机变量，从而将复杂的多变量地理现象用较少的性变量代替。从上述结果来看，主成分分析能清晰的区分出各种要素对海岸形态的影响。例如第二和第三主成分虽然对方差的贡献率接近，但代表的是两类不同的物理量。各主成分对方差贡献的大小，反映的是其对系统方差解释的大小。冰后海侵以来，海岸线退到现在的位置，华南海岸基本稳定。同时华南海岸波浪变化较小，沿岸输沙量也不大，对弧形海岸发育的作用不大^[49]。因此在主成分中地质构造因素和潮差因子的作用显现。

5.1 地质构造是华南弧形海岸形成的重要背景

如同大多数前人研究，华南弧形海岸的成因与华南地质构造条件直接相关，后者是前者的形成背景。地质构造背景与海岸线的斜交关系，使得华南海岸在盛行波浪作用下形成系列开口方向各异的锯齿形海岸^[14-16]，Silvester的波槽实验也验证这一现象^[22]。本文利用主成分分析、聚类分析和非度量多维尺度分析进一步揭示和证实了这一点。

5.2 地貌动力因子对弧形海岸平面形态有重要影响

以前对华南弧形海岸平面形态及分类研究主要从地质背景出发，很少深入探讨地貌动力的作用。因为，一般认为弧形海岸作为一种大尺度海岸行为，与波高、潮差等短期作用因子的关系不大。如文献[50]中，基于沿岸输沙经验公式，提出若沿岸不存在波高梯度，岸线将处于静态平衡状态。显然不存在波高梯度的假设不满足。同时，现在不少研究已经揭示弧形海岸平面形态与动力因子关系密切。例如 Klein 等对巴西东南沿岸弧形海岸的研究就发现弧形海岸沿岸泥沙运移方式与弧形曲率是函数关系，同时海滩的变化与波浪条件、海洋开敞度、潮差等水动力有关^[51]。Iglesias 等则通过神经网络模型分析了潮差对弧形海岸形态的影响，潮差越大，岸线的凹入度越大^[52] (图 8)。我国福建沿岸的弧形海岸上岬角一般凹入较大，与这结论吻合。

需要指出，在主成分分析中，潮汐因子的重要性超过了波浪因子。这并不是说潮汐对海滩的作用超过了波浪，华南海滩仍是波浪作用下的产物。但是作为一种大尺度海岸行为特征的岸线形态，潮汐通过改变波浪作用基面，延伸了波浪作用范围，泥沙在更大范围内进行调整，从而对海岸平面弧形形态塑造产生影响。同时，由于华南沿海潮差变化大于波高变化，因此潮汐动力因子比波浪因子作用更显著。

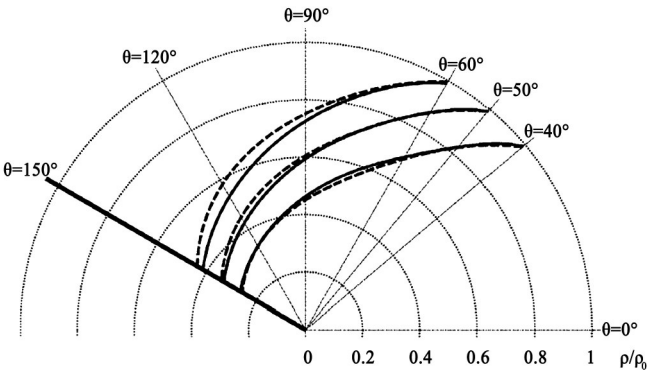


图8 不同潮差条件(实线0.5 m, 虚线4.5 m)下不同波浪入射角(40、50、60)形成的弧形岸线形态(引自文献[51])

Fig. 8 The shapes of arc-shaped coast in different tidal ranges and incident waves (From Reference [51])

5.3 华南弧形海岸平衡问题

弧形海岸的平衡问题是海岸研究者和海岸工程建设者关注的问题。Hsu 最初提出抛物线静态平衡剖面形态模型即是判断海湾是否处于静态平衡状态^[9]。国内研究者对华南弧形海岸的平衡状态研究中，得到了不一致的结果。例如，戴志军利用 Hsu、Silverst 等提出的 3 种判别准则，认为华南只有靖海湾和水东湾都满足静态平衡状态，其余海湾在不同判别准则下平衡性有差别^[53]；李志龙和陈子桑利用抛物线模型和神经网络模型拟合，认为华南的平海湾、海口湾、铺前湾、三亚湾、乌场湾等是处于静态平衡状态，靖海湾为不平衡海湾^[13]；而于吉涛和陈子桑选取华南 31 个海湾的评价结果却只有海门湾和海陵山湾接近静态平衡^[54]。他们的研究结论差异很大，甚至结论相反。这种差异性除了由于参数选择和量取的不确定性与误差造成之外，很重要的原因是这些研究多以海湾形态参数来分析平衡状态，对近岸水动力要素的考虑不足，显然存在不足。本文利用线性的主成分分析方法以及非线性的非度量多维尺度分析在一定程度上揭示了动力要素对海湾的影响。利用分层聚类分析探讨华南弧形海岸的类型，进一步明确不同类型弧形海岸形成机制上的差异，因此在判别海岸平衡性时需要区别考虑不同控制要素的作用。

5.4 可能存在的误差

华南地区海岸线漫长，海岸动力环境复杂，为提取各种要素带来了一定困难，要素的选取有一定的不确定性和误差^[54-55]。本文对水动力要素的提取采用了多种来源资料综合和主观判断，并结合插值方法，会对最后的结果产生一定误差。本文采用海图量取弧形海岸平面数据也会存在一定的误差，但由于海图比例尺较大，采用 2~3 次量取后验算，对计算结果影响很小。此外，海湾的形态要素一方面反映海岸地质构造特征，但同时也与各要素共同作用的结果相关，对分析有一定的影响，但从结果来看，对于揭示海湾类型特征来看还是有必要的，也是前人研究都选取的^[27]。分析得的认识与多次现场考察结果基本吻合。

6 结论

利用主成分分析、聚类分析和非度量多维尺度分析对华南弧形海岸的平面形态影响因素和类型进行探究, 得到以下结论:

(1) 华南弧形海岸平面形态是地质构造背景、水动力条件(波高与潮差)、海陆泥沙供给等要素共同作用的结果。

(2) 利用聚类分析可以将华南弧形海岸分成4个大类, 每个类型又有若干个小类。第一类型主要是强(或中等)潮型; 第二类型主要为波浪型; 第三类型是地质构造控制的大型弧形海岸; 第四类型只有洋浦湾与铺前湾, 是比较独特的海岸类型。

(3) 通过非线性方法非度量多维尺度分析, 较好地揭示出地形动力要素对海岸形态和类型的作用。

(4) 华南弧形海岸形态上看似一样, 但在波浪、潮汐的影响下, 华南弧形海岸有显著的差别, 这为研究华南地区弧形海岸特征提供一个重要的认识。在海岸工程实践中, 岸线平衡状态的判别和海岸工程建设后岸线位置的预测, 必须考虑到波浪和潮汐的共同作用。

参考文献 (References)

- [1] Tan S K, Chiew Y M. Analysis of bayed beaches in static equilibrium. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 1994, 120: 145-153.
- [2] Iglesias G, Negro V. Planform models for bayed beaches: The influence of breakwaters and stream discharges//Allsop W. *Breakwaters, Coastal Structures and Coastlines*. London: Thomas Telford, 2001: 284-292.
- [3] Inman D L. On the tectonic and morphologic classification of coasts. *Journal of Geology*, 1971, 79: 1-21.
- [4] Short A D, Masselink G. Embayed and structurally controlled beaches//Short A D. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1999: 230-249.
- [5] Yasso W E. Plan geometry of headland bay beaches. *Journal of Geology*, 1965, 73: 702-714.
- [6] Moreno L J, KRAUS N C. Equilibrium shape of headland-bay beaches for engineering design//*Proceedings of Coastal Sediments'99*. New York: ASCE, 1999: 860-875.
- [7] Silvester R, Hsu J R C. *Coastal Stabilization*. Singapore: World Scientific Publishing, 1997: 578.
- [8] Hsu J R C, Silvester R, Xia Y M. Generalities on static equilibrium bays. *Coastal Engineering*, 1989, 12: 353-369.
- [9] Hsu J R C, Silvester R, Xia Y M. Static equilibrium bays: new relationships. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1989, 115: 285-298.
- [10] Moreno L J, Kraus N C. Equilibrium shape of headland-bay beaches for engineering design//*Proceedings of Coastal Sediments'99*. New York: ASCE, 1999: 860-875.
- [11] Xia Y M. The curve of the plan outline of sandy bay in equilibrium//*Proceeding of International Symposium on the Coastal Zone*, Beijing, 1988: 341-352.
- [12] McCormick M E. Equilibrium shoreline response to breakwater. *Journal of Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, 1990, 116(3): 362-379.
- [13] Li Zhilong, Chen Zishen. Equilibrium shape model of headland-bay and application in South China coasts. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2006, 25(1): 123-129. [李志龙, 陈子燊. 岬间砂质海岸平衡形态模型及其在华南海岸的应用. *台湾海峡*, 2006, 25(1): 123-129.]
- [14] Yuan Jiayi, Zhao Huaning, Liu Tiesong et al. Geomorphodynamic system of coast in South China. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(1): 72-82. [袁家义, 赵焕庭, 陆铁松等. 华南海岸动力地貌体系. *海洋学报*, 1992, 14(1): 72-82.]
- [15] Li Chunchu. Geomorphological features of bay coast in South China. *Acta Geographica Sinica*, 1986, 41(4): 311-320. [李春初. 华南港湾海岸的地貌特征. *地理学报*, 1986, 41(4): 311-320.]
- [16] Wang Wenjie. Development of the arc-shaped sandy beach at bays of the crenulate coast of East Guangdong. *Journal of Tropical Ocean*, 1985, (5): 19-25. [王文介. 粤东锯齿状海岸弧形沙质海滩的发育. *热带海洋*, 1985, (5): 19-25.]
- [17] Liu Yixuan. *Neotectonic and Crastal Stableness*. Beijing: Science Press, 1994: 108-133. [刘以宣. *南海新构造与地壳稳定性*. 北京: 科学出版社, 1994: 108-133.]
- [18] Cai Feng, Cao Huimei, Su Xianze et al. Analysis on morphodynamics of sandy beaches in South China. *Journal of Coastal Research*, 2007, 23(1): 236-246.

- [19] Sun Xiangping. Regional Oceanography of China Seas. Beijing: China Ocean Press, 2008: 130-190. [孙湘平. 中国近海区域海洋. 北京: 海洋出版社, 2008: 130-190.]
- [20] Halligan G H. Sand movement on the New South Wales coast//Proc. Limnology Soc., 1906: 619-640.
- [21] Silvester R, Ho S K. Use of crenulate shaped bays to stabilize coasts. Coastal Engineering, 1972, 2: 1347-1365.
- [22] Silvester R. Stabilization of sedimentary coastlines. Nature, 1960, 4749: 467-469.
- [23] Rea C C. Computer simulation models of hooked beach shoreline configuration. Sedimentary Petrology, 1975: 866-872.
- [24] Silverster R, Tsuchiya Y, Shibano T. Zeta bays, pocket beaches and headland control//Proceeding of Coastal Engineering. Sydney, ASCE, 1980: 1306-1319.
- [25] Hsu J R C, Silvester R, Xia Y M. Application of headland control. Journal of Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering, 1989, 115(3): 299-310
- [26] Silvester R. Coastal Engineering (Vol. II). Amsterdam: Elsevier, 1974: 338
- [27] Dai Zhijun, Li Chunchu. Coastline configuration and geomorphologic development mode of arc-shaped coast in South China. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(5): 92-95. [戴志军, 李春初. 华南弧形海岸岸线形态和地貌发育模式. 地理学报, 2004, 59(5): 92-95.]
- [28] CCRBC (Compilation Committee of "Records of Bays in China"). Records of Bays in China, Volume 7, Bays in North Fujian. Beijing: China Ocean Press, 1993: 10-327. [中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第七分册 (福建北部海湾). 北京: 海洋出版社, 1993: 207-212.]
- [29] CCRBC (Compilation Committee of "Records of Bays in China"). Records of Bays in China, Volume 8, Bays in South Fujian. Beijing: China Ocean Press, 1993: 10-327. [中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第八分册 (福建南部海湾). 北京: 海洋出版社, 1993: 10-327.]
- [30] Chinese Editorial Group of Coast Zone Hydrology. Coastal Zone Hydrology of China. Beijing: China Ocean Press, 1995: 132-172. [《中国海岸带水文》编写组. 中国海岸带水文. 北京: 海洋出版社, 1995: 132-172.]
- [31] Su Jilan, Yuan Yeli. Hydrology in China Coastal Sea. Beijing: China Ocean Press, 2005: 305-351. [苏纪兰, 袁业立. 中国近海水文. 北京: 海洋出版社, 2005: 305-351.]
- [32] Huang Fang, Ye Chunchi. Ocean Hydrology of the Islands of Guangdong. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1995: 10-77. [黄方, 叶春池. 广东海岛海洋水文. 广州: 广东科技出版社, 1995: 10-77.]
- [33] CCRBC (Compilation Committee of "Records of Bays in China"). Records of Bays in China, Volume 12, Bays in Guangxi. Beijing: China Ocean Press, 1993: 10-327. [中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第十二分册 (广西海湾). 北京: 海洋出版社, 1993: 67-75.]
- [34] Yu Shixiao. The application of non-metric multidimensional scaling in community classification. Acta Phytocologica Sinica, 1995, 19(2): 128-136. [余世孝. 非度量多维测度及其在群落分类中的应用. 植物生态学报, 1995, 19(2): 128-136.]
- [35] Yang Zehua, Tong Chunfu, Lu Jianjian. Effects of saltmarsh on the benthic macroinvertebrate community in Yangtze Estuary Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4387-4393. [杨泽华, 童春富, 陆健健. 盐沼植物对大型底栖动物群落的影响. 生态学报, 2007, 27(11): 4387-4393.]
- [36] Liu Chunji, Gao Jing. A cognitive study on local high-grade tourist areas (spots) by metropolitan residents Based on NMDS approach. Tourism Tribune, 2008, 23(11): 56-63. [刘春济, 高静. 基于NMDS 方法的大都市居民对当地高级别旅游区 (点) 的认知研究. 旅游学刊, 2008, 23(11): 56-63.]
- [37] Jiao Fenglei, Liu Ke, Mao Dongxing. Subjective assessment of car interior sound quality: Applicability of nonmetric multidimensional scaling to sound quality research. Acta Acustica, 2005, 30(6): 523-531. [焦风雷, 刘克, 毛东兴. 基于非度量多维尺度分析的噪声声品质主观评价研究. 声学学报, 2005, 30(6): 523-531.]
- [38] Li Hongmei, Cai Lizhe, Lin Lizhu et al. Using hierarchical clustering and no-metric MDS to explore spatial-temporal variation of benthic community at intertidal in Shenzhen Bay. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2001, 40 (3): 735-740. [厉红梅, 蔡立哲, 林丽珠 等. 深圳湾潮间带底栖动物群落结构的等级聚类与非度量多维标度排序. 厦门大学学报: 自然科学版, 2001, 40 (3): 735-740.]
- [39] Pols L C W. Perceptual and physical space of vowel sounds. J. Acoust. Sos. Am., 1969, 46: 458-467.
- [40] Johnson R A, Wichern D W. Applied Multivariate Statistical Analysis. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 569-575. [Johnson R A, Wichern D W. 实用多元统计分析. 4版. 北京: 清华大学出版社, 2001: 569-575.]
- [41] Kruskal J B. Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. Psychometrika, 1964, 29: 1-27.
- [42] Kruskal J B. Nonmetric multidimensional scalina: A numerical method. Psyehometrika, 1964, 29: 115-129.
- [43] Huang Jiayou. Meteorological Statistical Analysis and Forecasting Methods. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 138. [黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法. 3版. 北京: 气象出版社, 2004: 138.]
- [44] van Houwelingen S, Masselink G, Bullard J. Dynamics of multiple intertidal bars over semi-diurnal and lunar tidal cycles, North Lincolnshire, England. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33: 1473-1490.

- [45] Masselink G, Auger N, Russell P et al. Short-term morphological change and sediment dynamics in the intertidal zone of a macrotidal beach. *Sedimentology*, 2007, 54: 39-53.
- [46] Anthony E J. Sandy beaches and barriers. *Developments in Marine Geology*, 2008, 4: 159-288.
- [47] van Houwelingen S, Masselink G, Bullard J. Characteristics and dynamics of multiple intertidal bars, north Lincolnshire, England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31: 428-443.
- [48] Masselink G, Austin M, Tinker J et al. Cross-shore sediment transport and morphological response on a macrotidal beach with intertidal bar morphology, Truc Vert, France. *Marine Geology*, 2008, 251: 141-155.
- [49] Dai Zhijun, Li Chunchu, Wang Wenjie. Formation mechanism analysis of arc-shaped sandy coast in South China. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2005, (1): 43-48. [戴志军, 李春初, 王文介. 华南弧形砂质海岸形成机制分析. *台湾海峡*, 2005, (1): 43-48.]
- [50] Li Zhilong, Chen Zishen. The neural network model of equilibrium shape of headland-bay. *Marine Science Bulletin*, 2007, 26(3): 19-25. [李志龙, 陈子森. 岬间海湾岸线平衡形态神经网络模型. *海洋通报*, 2007, 26(3): 19-25.]
- [51] Klein A H F, Ferreira Ó, Dias J M A et al. Morphodynamics of structurally controlled headland-bay beaches in southeastern Brazil: A review. *Coastal Engineering*, 2010, 57: 98-111.
- [52] Iglesias G. Headland-bay beach planform and tidal range. *Geomorphology*, 2009, 112: 135-143.
- [53] Dai Zhijun. Application of judgment rules for log-spiral coast to arc-shaped shoreline in South China. *Journal of Tropical Ocean*, 2004, 23(3): 43-49. [戴志军. 螺旋海岸判定准则及其在华南弧形海岸形态中的应用. *热带海洋学报*, 2004, 23(3): 43-49.]
- [54] Yu Jitao, Chen Zishen. Study of headland-bay sandy coast stability in South China. *The Ocean Engineering*, 2010, 28(2): 110-116. [于吉涛, 陈子森. 华南岬间砂质海岸稳定性研究. *海洋工程*. 2010, 28(2): 110-116.]
- [55] Lausman R, Klein A H F, Stive M J F. Uncertainty in the application of the Parabolic Bay Shape Equation: Part 1. *Coastal Engineering*, 2010, 57: 132-141.

Influencing factors and classifications of arc-shaped coasts in South China

LI Zhiqiang¹, LI Weiquan¹, CHEN Zishen², ZHU Yamin³

(1. *Ocean Engineering Department of Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China;*

2. *Department of Water Resources and Environment, Sun Yet-sen University, Guangzhou 510275, China;*

3. *State Oceanic Marine Environmental Monitor Center of Zhuhai, State Oceanic Administration of China, Zhuhai 519015, Guangdong, China)*

Abstract: Using the principal component analysis, hierarchical cluster analysis and non-metric multidimensional scaling analysis, 10 factors affecting coastal plain shape and hydrodynamic of 47 arc-shaped coasts were analyzed, aiming to study the influencing factors and classification spectrum of arc-shaped coast in South China. The results show that: (1) the plane forms of South China's arc-shaped coasts were mainly controlled by geological structure conditions, hydrodynamic conditions (wave and tidal range) and sediment supply. (2) The arc-shaped coasts in South China can be divided into four categories, and each category has several small types. The first category is meso- and macrotidal coast; the second is strong wave coast; the third is geological structure controlled large arc-shaped coast; the fourth, consisting of Yangpu Bay and Puqian Bay, is a unique type of arc-shaped coast. (3) Nonmetric multidimensional scaling analysis reveals the effects of morphodynamic factors on the coastal shape and the types, which shows that the categories are objective. These conclusions will be helpful to the arc-shaped coasts processes research and engineering constructions in South China.

Key words: coastal plain configuration; arc-shaped coast; principle component analysis; cluster analysis; nonmetric multidimensional scaling