

# 南海珊瑚环礁开放程度模型构建研究\*

杨娟<sup>1,2,3</sup>, 苏奋振<sup>2,3</sup>, 石伟<sup>2,3</sup>, 左秀玲<sup>2,3</sup>, 方月<sup>2,3</sup>

1. 中国地质大学信息工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

3. 中国南海研究协同创新中心, 江苏 南京 210093

**摘要:** 南海环礁发育过程中形成了开放程度不同的环礁类型, 依据环礁不同地貌部位的几何因子作为反映环礁开放程度的指标可以定量划分环礁开放程度类型。如果将潟湖潮汐通道作为环礁地貌结构要素用来反映环礁开放程度, 则潮汐通道可以成为新的度量因子。利用高分辨率遥感影像结合 GIS 技术, 以潟湖潮汐通道的几何参数为主构建反映环礁开放程度的模型, 结果表明, 以口门宽度与礁体中轴线长度之比为指标建立的经验式, 可用来划分环礁开放程度类型, 封闭型环礁的开放度为 0, 准封闭型环礁的开放度为 0~0.06, 半开放型环礁的开放度为 0.06~0.25, 开放型岛礁的开放度为 0.25~1。因此, 采用这一量化表达式反映南海环礁的开放程度类型, 可为珊瑚环礁的开放程度发育规律研究提供科学工具。

**关键词:** 珊瑚环礁; 潮汐通道; 发育规律; 南海

中图分类号: P737.11 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2014)03-0052-05

## Research on building a model of the open type for coral atolls in the South China Sea

YANG Juan<sup>1,2,3</sup>, SU Fen-zhen<sup>2,3</sup>, SHI Wei<sup>2,3</sup>, ZUO Xiu-ling<sup>2,3</sup>, FANG Yue<sup>2,3</sup>

1. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing 210093, China

**Abstract:** All coral atolls consist of several facies zones. Tidal inlet, which is the channel to connect the lagoon and the sea, has different geometric shapes. According to different angle and principle, coral atolls have been classified into various types. In order to identify the open type of atolls quantificationally, two geometric parameters of tidal inlet are regarded as new metrical factors to construct a new expression. The new description function is the ratio of tidal inlet's width to atoll's midline. Finally, the threshold division of the atolls' type is formed on the basis of the new expression. The threshold result shows that the open degree of the enclosed atolls is 0, the contiguous enclosed atolls is between 0 and 0.06, the half-opening atolls' is between 0.06 and 0.25, and the opening atolls' is between 0.25 and 1. Thus, the new function can be used to reflect the openness of different atolls for development regularity of coral atolls in the South China Sea.

**Key words:** coral reef atoll; tidal inlet; the development regularity; South China Sea

19 世纪初, Charles Darwin 考察大西洋与太平洋岛屿的珊瑚礁后认为, 岛屿的沉降过程导致珊瑚岸礁演变为堡礁, 继而演化为环礁(Darwin, 1851)。当冰后期海侵, 被淹没的古礁体边缘的珊瑚生长比中部的快, 适应海平面的上升, 逐渐形成边缘高中部

低的环礁形态(刘昭蜀, 2002)。就此, 环礁广泛分布的南海诸岛, 形成数百座通常命名为岛、沙洲、(干出)礁、暗沙、(暗)滩的珊瑚礁岛礁滩地貌。

环礁被分为很多类型。1965 年 Stoddart(1965)对世界环礁作了初步统计。1983 年 Hopley 根据全

收稿日期: 2013-09-13; 修订日期: 2013-11-15。殷波编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271409); 国家高技术研究发展计划重大项目(2012AA12A406)

作者简介: 杨娟(1988~), 女, 陕西省汉中市人, 硕士生, 研究方向为遥感信息提取。E-mail: yangj@lreis.ac.cn

通信作者: 苏奋振(1972~), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为时空信息提取和海洋海岸带应用。

\*感谢国家海洋局第一海洋研究所刘宝银研究员及中国科学院南海海洋研究所赵焕庭研究员的帮助。

新世礁相沉积的覆盖率和平面分布形态, 将大堡礁区的珊瑚礁划分为 6~7 个类型, 但缺乏定量指标, 且该演化分类仅适用于受信风控制海域的珊瑚礁 (Hopley, 1983)。定量分析不同类型的环礁经历了以下阶段: 1) 参照 Hopley 的分类原理, 王国忠等(1988)提出了环礁礁坪与潟湖宽度之比可作为现代环礁成熟度的定量标志的观点; 2) 陈欣树等将礁坪面积与潟湖面积的比值定为反映珊瑚环礁演化规律的发育指数, 由计算各环礁发育指数得到的不同阈值定量地将环礁划分为开放型、半开放型、准封闭型和封闭型(钟晋樑, 1996); 3) 在中国科学院南海海洋研究所的学者们提出的以环礁发育指数确定环礁类型的基础上, 刘宝银等(2000)提出了以珊瑚环礁的融合信息熵和开放度提出环礁发育指数改进型经验式。

文章采用高分辨率卫星影像结合 GIS 技术对南海环礁进行定量分析, 发现利用新数据源统计的环礁几何参数与结合上述 3 个阶段构建的经验式计算结果均有差异。考虑到已有研究所做的定量分析均忽略了潮汐通道的几何形态对环礁发育的影响, 因此文中着重以潮汐通道作为新的几何变量因子对南海环礁做定量分析, 从环礁围封的现状考虑珊瑚环礁的开放程度, 并以高分辨率遥感影像和 GIS 为技术支持, 构建了南海环礁类型划分模型, 为识别环礁类型及其发育规律提供科学依据。

## 1 已有定量分析模型及实例分析

### 1.1 环礁类型

南海环礁处于特定的地理位置, 受地质构造控制, 在不同环境条件下呈现出不同的发育形态。在海平面相对稳定的情况下, 环礁从形成至衰亡经过如下变化: 开放型环礁→半开放型环礁→准封闭型环礁→封闭型环礁→台礁化环礁→台礁(图 1)。

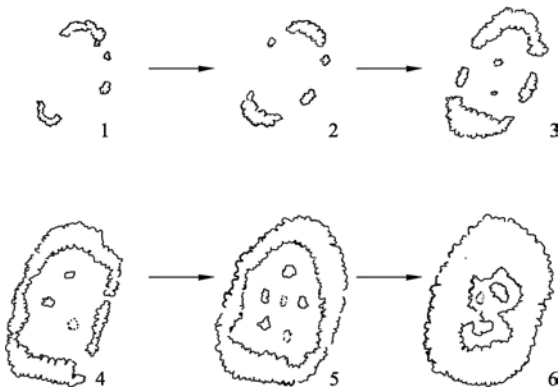


图 1 环礁发育演化综合模式

1. 开放型环礁; 2. 半开放型环礁; 3. 多口门准封闭型环礁; 4. 单口门准封闭型环礁; 5. 封闭型环礁; 6. 台礁化环礁

Fig. 1 The synthesis mode of atolls' evolution

### 1.2 已有模型

环礁的地貌结构可分为向海坡、礁坪、潟湖和潮汐通道(口门)等地貌部位。在定量分析划分不同类型的环礁时, 不同研究阶段都是以环礁多个地貌结构的几何形态作为定量指标构建可用来反映环礁发育成熟度的经验式, 即表达式(1)(钟晋樑, 1996)、表达式(2)(钟晋樑, 1996)和表达式(3)(刘宝银等, 2000)。

$$Adi = \frac{S_p}{S_x} \quad (1)$$

式(1)中,  $Adi$ (atoll development index)指环礁发育指数,  $S_p$  礁坪面积( $\text{km}^2$ ),  $S_x$  潟湖面积( $\text{km}^2$ )。

$$\beta = \frac{S_p}{S_t} = \frac{Adi}{Adi + 1} \quad (2)$$

式(2)中,  $\beta$  为表达式(1)改进后的发育指数;  $S_t$  为礁体面积( $\text{km}^2$ ), 即环礁礁环外缘线以内的总面积。

$$\beta' = \left( \frac{S_t - S_x}{S_t} \right)^f \quad (3)$$

式(3)中,  $\beta'$  为表达式(1)和(2)改进后的环礁发育指数;  $f$  为环礁开放度。

$$f = 0.461811 - 2.81733x + 6.20086x^2 - 5.74177x^3 + 1.88675x^4 \quad (4)$$

式(4)中,  $x$  为由式(2)计算出的环礁发育指数  $\beta$ 。

### 1.3 基于已构建模型的实例分析

现以永暑礁、半月礁为例, 采用新数据源统计的 2 个环礁的几何参数, 利用 3 个经验式计算其发育指数, 结果见表 1。

由表 1 对比结果可知, 2 个环礁的 B 值(由新数据源结合 3 个经验式计算的环礁发育指数)都大于 A 值(以 3 个经验式所划分的相应类型环礁的阈值), 即以高分辨率影像统计的环礁几何参数计算出的结果都不在已有研究所划分的相应类型的阈值范围内。原因如下: 1) 基于公式(1)和(2)计算环礁开放类型所统计的环礁几何数据是以地形图和海图量算的, 即以理论基准面的 0 线起算, 而改进的经验式(3)的数据则来自低分辨率的专题制图仪(thematic mapper, TM)获取的多波段扫描影像。这些图像数据对划定环礁外缘边界和潟湖边缘线会造成很大误差, 导致统计的几何参数不准确; 2) 3 个计算环礁发育指数的经验式都含变量因子——礁坪面积, 而且(1)~(3)表达式中礁坪面积=礁体面积-潟湖面积, 即礁坪面积包括了口门面积, 这一计算结果与采用高分辨率影像度量的礁坪面积有差异。3) 根据 3 个经验式计算的划分环礁开放程度类型的阈值仅针对南沙干出环礁。由于南海不同位置地形地貌的差异, 使得南海

表 1 实验环礁的对比结果

Tab. 1 The results of experimental comparison for two atolls

名称	类型	经验式	A	B	名称	类型	经验式	A	B
永暑礁	开放型	(1)	$Adi < 0.15$	0.464	半月礁	准封闭型	(1)	0.2 $Adi$	0.4
		(2)	$\beta$	0.12			(2)	0.17 $\beta$	0.29
		(3)	$\beta'$	0.702			(3)	0.916 $\beta'$	0.993
				0.974				0.994	

注: A 表示以 3 个经验式所划分的相应类型环礁的阈值; B 表示由新数据源结合 3 个经验式计算的环礁发育指数

其他区域的环礁的发育指数可能不在其阈值范围内。根据以上分析认为在模型构建中不可忽略口门面积, 因此文中以口门的几何形态为主构建划分环礁类型的模型。

## 2 基于潮汐通道的几何参数构建模型及其结果分析

### 2.1 潮汐通道的地貌特征

环礁发育过程中, 除礁坪和潟湖变化明显之外, 潮汐通道也发生变化。

潮汐通道, 又称口门, 是环礁潟湖与外海沟通的水道(赵焕庭, 1999)。除封闭型环礁外, 每个环礁都有 1 至多个大小不等的潮汐通道, 周围为礁岩和活珊瑚丛。通道流急, 一般无碎屑沉积物。

从高分辨率卫星影像所示环礁地貌形态可知, 环礁礁体走向主要呈东-西走向、东北-西南走向, 而口门的走向则无明显规律(图 2)。南海环礁口门的形态特征如下:

1) 口门单一, 较宽, 通道处水较深, 礁体为复合大环礁上的小礁体, 大多礁坪呈敞口型, 所围潟湖与外海水体交换流畅, 如奈罗礁和牛轭礁。

2) 口门单一, 较窄, 通道处水较深, 礁体多为深海独立小礁体, 如半月礁、黄岩岛等。

3) 口门少, 较宽, 通道处水深, 礁体潟湖与外海水体交换能力强, 如东沙岛。

4) 口门少, 较窄, 通道处水浅, 各段礁体几乎接踵, 潟湖与外海水体交换随潮流涨落进行, 如安乐礁、美济礁、东门礁等。

5) 口门众多, 较宽, 通道处水较深, 任何方向的海流从一方之门进, 便直接从另一方之门出, 水体交换流畅, 如永暑礁、西礁、五方礁。

6) 口门多, 较宽, 多数通道处水不深, 同外海交换在个别方向上较畅通, 如仁爱礁。

7) 无口门, 环礁礁坪完整, 潟湖较浅, 礁内外水体交换只能在涨潮后期和落潮前期时随潮流越过礁坪进行, 如簸箕礁、华阳礁、舰长礁等。

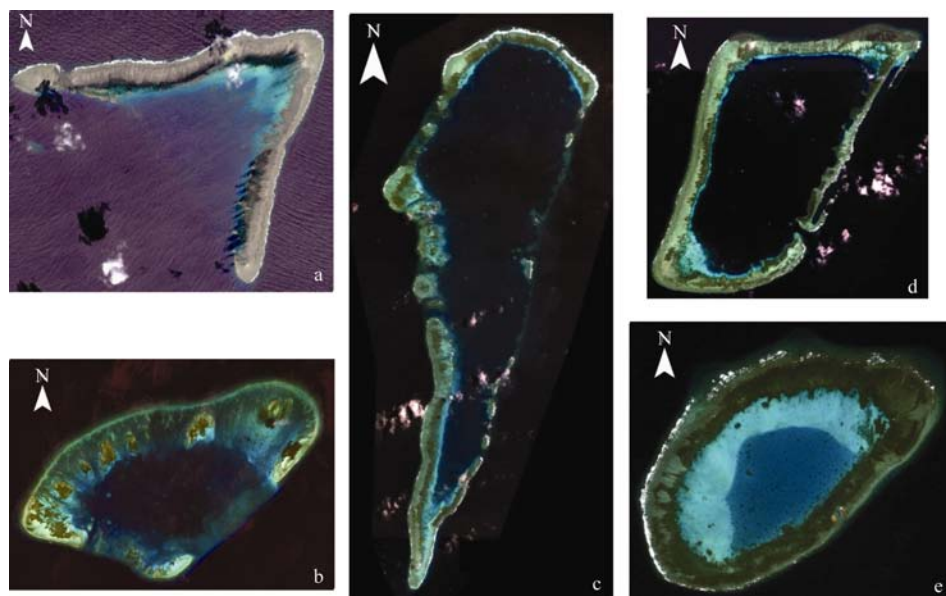


图 2 不同环礁口门形态特征的卫星遥感影像示例

a. 牛轭礁; b. 西礁; c. 仁爱礁; d. 半月礁; e. 簸箕礁

Fig. 2 Satellite remote sensing images of tidal inlets' morphometrics in different atolls

### 2.2 基于潮汐通道的几何参数构建模型

#### 2.2.1 潮汐通道的几何参数

文中选用 QuickBird 和 WorldView 的影像数据, 在不明确水深的情况下, 结合以往经验解译环

礁信息, 采用 GIS 软件统计 22 座环礁的几何信息(邹亚荣 等, 2012)(表 2)。由 QuickBird 和 WorldView

卫星提供的影像数据, 获取时间大致为 2007~2012 年, 其全色分辨率分别为 0.61m 和 0.41m。

表 2 不同环礁潮汐通道的几何参数  
Tab. 2 The geometric parameters of tidal inlet in different atolls

岛礁名称	礁体走向	形状	礁体中轴线 长度/m	口门宽度/m	岛礁名称	礁体走向	形状	礁体中轴线 长度/m	口门宽度 /m
海口礁	E-W	椭圆形	5628.861	0	东门礁	N-WS	方形	5460.9690	100.9713
簸箕礁	EN-WS	簸箕形	6811.315	0	小南熏礁	WN-ES	椭圆形	2897.2623	59.1393
蓬勃暗沙	EN-WS	椭圆形	5304.458	0	西门礁	WN-ES	椭圆形	5646.5124	127.2120
清碧礁	EN-WS	梨形	12582.78	0	安乐礁	WN-ES	耳状	5008.8310	263.6100
东礁	NWW-S	楔形	28519.155	226.798	舶兰礁	EN-WS	椭圆形	4257.1777	390.4258
半月礁	EN-WS	平行四边形	14454.244	207.96	赤瓜礁	N-S	海参形	10192.1254	970.5289
美济礁	W-E	椭圆形	23899.782	284.402	光星仔礁	W-E	三角形	11633.2600	1170.7780
华光礁	E-WSS	椭圆形	56455.26	1705.672	仁爱礁	EN-WS	长楔形	36159.4240	8592.6530
西礁	EN-WS	扇形	23214.133	14807.706	奈罗礁	EN-WS	梯形	5080.3253	1294.1334
五方礁	EN-WS	椭圆形	32392.82	18104.78	牛轭礁	EN-WS	牛轭形	19234.5400	6750.3340
永暑礁	EN-WS	纺锤形	52745.285	33866.497	黄岩岛	长轴 NE-SW 短轴 NWW-SEE	等腰直角 三角形	43862.23	346.634

不同环礁潮汐通道的几何参数如表 2 所示。其中，礁体中轴线长度指所有环礁处于完全封闭的理想状态下，无缺口礁坪的环形中心线，即礁坪中线与口门中线的长度之和(图 3)；口门宽度指水平方向上分割礁体中轴线的长度，即口门中线长度。在缺乏水深信息的情况下，对于开放程度较高的环礁，假定礁坪的平均宽度为口门长度，以此为基准，封闭礁体，统计其礁体中轴线长度和口门宽度。礁体中轴线及口门宽度是采用 ArcGIS 软件自动提取面状要素中轴线的方法而获取的(魏士春 等, 2007)。

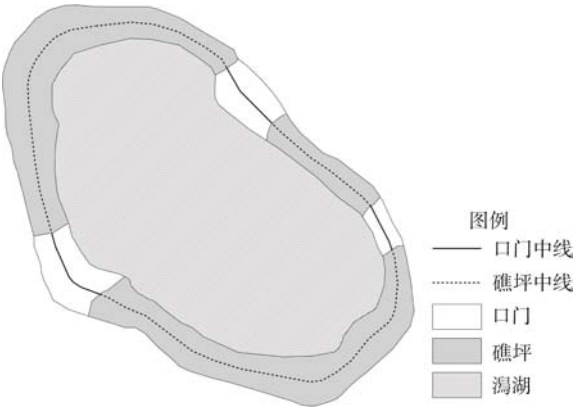


图 3 口门中线与礁坪中线示意图  
Fig. 3 The midline diagram of tidal inlet and reef flat

2.2.2 划分环礁类型的模型

从珊瑚环礁的发育规律看，在地质构造和海平面相对稳定的情况下，礁坪的发育沿低潮面水平方向扩展，日益宽广，口门面积逐渐减小，并逐渐围封潟湖，使环礁向台礁演化。表达式(5)是从珊瑚环礁水平方向的围封程度考虑构建反应环礁开放度的模型。

$$r = \frac{l_k}{l_t - l_k}$$

(5)

式(5)中， $r$  表示环礁开放度， $l_t$  为礁体中轴线长度， $l_k$  为口门宽度。由于表达式(5)计算的环礁开放度的阈值范围太大，因此对表达式(5)加以改进，构建表达式(6)。

$$r' = \frac{l_k}{l_t} = \frac{r}{r+1}$$

(6)

式(6)中， $r'$ 表示环礁开放度。

2.3 结果及验证分析

根据式(5)对 22 座环礁进行计算，结果显示，封闭型环礁， $r'=0$ ；准封闭型环礁， $0 < r' < 0.06$ ；半开放型环礁， $0.06 < r' < 0.25$ ；开放型环礁， $0.25 < r' < 1$ (表 3)。

表 3 环礁开放度  
Tab. 3 The open-degree of atolls

类型	岛礁名称	$r$
封闭型	海口礁	0
	簸箕礁	0
	蓬勃暗沙	0
	清碧礁	0
准封闭型	黄岩岛	0.0079
	东礁	0.008
	美济礁	0.0119
	半月礁	0.0144
	东门礁	0.0185
	小南熏礁	0.0204
	西门礁	0.0225
	华光礁	0.0302
	安乐礁	0.0526
	舶兰礁	0.0917
半开放型	赤瓜礁	0.0952
	光星仔礁	0.1006
	仁爱礁	0.2376
开放型	奈罗礁	0.2547
	牛轭礁	0.3509
	五方礁	0.5589
	西礁	0.6379
	永暑礁	0.6421

为验证环礁类型划分的阈值是否正确, 现以鲎藤礁、东沙环礁、六门礁为例进行检验(表 4)。由表 4

中  $\beta$  值可知, 鲎藤礁、东沙环礁属开放型环礁, 六门礁属半开放型环礁, 符合对南海环礁类型的经验划分。

表 4 验证环礁的几何参数及开放度

Tab. 4 The geometric parameter and the open-degree of verified atolls

岛礁名称	礁体走向	形状	礁体中轴线长度/m	口门宽度/m	$r'$
鲎藤礁	N-S	钳形	19176.58	14406.4006	0.7512
东沙环礁	E-W	圆形	61529.298	16068.6446	0.2612
六门礁	WN-ES	长梭形	40599.4532	10025.1065	0.2469

3 结语

采用高分辨率南海环礁遥感影像并结合 GIS 技术, 不断修正环礁的几何参数指标, 能够更精确地改进和计算环礁开放度, 有利于监测南海环礁的发育状况。基于潮汐通道几何参数构建的分类模型, 能够反映环礁的开放程度, 随着口门个数和宽度的减少及口门附近水深变浅, 环礁的封闭程度有所提

高。采用以潮汐通道的几何信息为主建立的经验式, 在水深数据不明确的情况下, 不仅可降低划定礁坪向海侧及向泻湖侧的界限误差, 且对复合环礁上小环礁的类型划分也是适用的, 如双子群礁的奈罗礁、九章群礁的牛轭礁等。

文中基于潮汐通道的几何参数构建的模型, 忽略了潮汐通道的走向、长度等几何因素对环礁开放类型分类的影响, 这些是后续研究中需要注意的问题。

参考文献

刘宝银, 王岩峰. 2000. 南沙珊瑚环礁的遥感复合信息熵与类型[J]. 海洋学报, 22(1): 43-51.

刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清, 等. 2002. 南海地质[M]. 北京: 科学出版社: 216-223.

王国忠, 吕炳全, 全松青, 等. 1988. 一个大陆坡环礁的沉积相模式及其演化趋势[J]. 同济大学学报, 16(2): 149-158.

魏士春, 张红日, 苏奋振, 等. 2007. 基于 ArcGIS 的面状要素中轴线提取方法研究[J]. 地理空间信息, 5(2): 45-47.

赵焕庭, 张乔民, 宋朝景, 等. 1999. 华南海岸和南海诸岛地貌与环境[M]. 北京: 科学出版社: 395-398.

钟晋樑, 陈欣树, 张乔民, 等. 1996. 南沙群岛珊瑚礁地貌研究[M]. 北京: 科学出版社: 44-64.

邹亚荣, 梁超, 朱海天. 2012. 基于 QuickBird 影像上珊瑚礁发育状况监测实验研究[J]. 海洋学报, 34(2): 57-62.

DARWIN C. 1851. The structure and distribution of coral reefs[M]. California: University of California Press: 38-44.

HOPLEY D. 1983. Morphological classification of shelf reefs, perspectives on coral reefs[J]. Australian Institute of Marine Science Contribution, 200: 180-199.

STODDART D R. 1965. The shape of atolls, marine geology[M]. Amsterdam: Elsevier Publishing Company: 369-383.