

南沙珊瑚环礁的遥感复合信息熵与类型*

刘 宝 银 王 岩 峰

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

摘 要 基于南沙群岛珊瑚环礁发育指数为多指标的观点, 将测度出的多项相关因子的遥感复合信息数据, 细分为 N_1, N_2, \dots, N_{10} 个地理事件, 进行了环礁信息熵分析. 表征了熵值大小与干出环礁发育指数密切相关的因子, 它们依次为礁顶面积(0.319)、潟湖面积(0.324)、环礁开放度(0.336)、走向(0.551)等. 就此, 对于干出环礁发育指数提出一个新的表达式, 用以划分南沙环礁发育的开放性类型.

关键词 南沙群岛 遥感信息 信息熵 发育指数 环礁类型

中图法分类号: P737.2

1 引言

我国南沙群岛的环礁达 60 余座, 其中干出环礁礁顶面积大的近 620 km^2 , 小的不过 1 km^2 左右, 研究其形成和发育具有重要的科学和现实意义. 环礁在海平面相对稳定时期发育形成的地质历史过程中, 被确认属于海侵型环礁. 干出环礁礁环的开放程度被分为开放型、半开放型、准封闭型和封闭型四个类型. 笔者试图立足于已有的研究对其进行定量划分, 并结合遥感复合信息熵与珊瑚环礁所遵循的地质规律作一探讨^[1].

2 礁体发育的基础条件与物质基础

南沙环礁发育在深度大于 $1\ 000 \text{ m}$ 的不同台阶上, 这与南海的海底扩张、漂移、沉降等地质构造运动以及海平面变化有密切关系. 礁体发育具备了三个基础条件: (1) 地质构造基础, (2) 造礁生物及其参与礁体的建造, (3) 礁体增长的速度大于地壳沉降速度, 且珊瑚发育到低潮面后向水平方向扩展. 环礁的物质基础由造礁生物与附礁生物构成. 在南沙群岛所采集的珊瑚样品中, 造礁珊瑚类有 15 科、42 属、128 种, 其实在南沙远不止于此, 其中滨珊瑚 (*Porites*)、蜂巢珊瑚 (*Favia*) 和菊花珊瑚 (*Goniastrea*) 等系抗浪性强的优势属, 起着造礁构架的重要作用. 为环礁的建造担当充填碎屑物的是鹿角珊瑚 (*Acropora*)、墙礁珊瑚 (*Montipora*)

本文于 1998-04-15 收到, 修改稿于 1998-10-09 收到.

* 国家自然科学基金资助项目 (编号: 49571054).

第一作者简介: 刘宝银, 男, 58 岁, 研究员, 从事海洋遥感应用及其信息系统研究.

和软体动物的大量壳屑或硬体部分等,一些藻类则促进了礁体增生^[1].

在海平面变化或珊瑚向上生长乃至植被的发育等一定条件下,暗滩、暗沙、暗礁、沙洲和岛屿等五类密切相联系的珊瑚礁可能发生转化.

3 珊瑚礁的动力环境及其发育和分布的局限性

造礁石珊瑚的生长环境十分严格,需要温暖的海水、足够的光照、适中的海水盐度、充足的氧气、海水透明度大而清澈并有坚硬的基底等条件. 已如所述,南沙海域完全具有造礁石珊瑚生长的自然条件,所形成的珊瑚礁及其分布与如下诸要素有密切的关系.

3.1 水温与珊瑚礁分布的关系

南沙群岛海域地处热带,水温高,均匀层厚度大,跃层强度小,海域水温稳定,适宜珊瑚的生长. 珊瑚礁基本都分布在表面水温达 20℃ 的海域中. 对此,1957 年 Wells 的研究表明,年平均水温在 23~25℃ 左右,珊瑚礁发育最好.

3.2 盐度与珊瑚礁分布的关系

南沙群岛近海的盐度变化具有大洋的特性,主要受季风影响,年变幅不大. 其特点是盐度大、跃层强度弱、季节变化小. 2 月份盐度为 32.50~33.30,8 月份盐度为 32.50~33.30,表层盐度的变化范围为 32.70~34.00. 变化总趋势是冬、春季高于夏、秋季,北部高于南部,陆坡区高于陆架区. 海水保持正常盐度是珊瑚礁发育的良好条件.

3.3 水色、透明度与珊瑚礁分布的关系

南沙群岛海域水色高,透明度大,季节变化小. 区域透明度的特点是 1~3 月份群岛西部大于 30 m,东部小于 26 m;4~6 月份则相反,在 5 月份透明度达到 35~40 m;7~9 月份西南部小于 18 m,东北部大于 24 m;进入 10~12 月份,各处透明度分布较均匀,通常为 28 m. 该海域透明度大、足够的光有利于珊瑚分泌碳酸钙形成礁石,补偿点在光强约为水面光强 15%~20% 的深度.

3.4 风向、风力与珊瑚礁分布的关系

南沙群岛有明显的季风特点. 5~9 月为西南季风期;11 月至翌年 3 月为稳定东北季风期,多为 4~5 级;4 和 10 月份为季风转换期;各月平均风速为 5~10 m/s.

东北和西南季风使环礁礁体外缘交替处在迎风面和背风面,促使造礁与礁栖生物交替生长,环礁迅速向外延伸. 同样,季风风浪的作用,也使潟湖坡上缘的珊瑚和礁栖生物良好地生长和繁衍. 这种环礁的内、外扩展,促使了环礁的良好发育.

3.5 风暴作用与珊瑚礁分布的关系

在南沙海域热带气旋所引起的风暴,对环礁礁体发育有明显的作用. 具体反映在对环礁向海坡的侵蚀塑造作用以及造礁生物和礁栖生物硬体的堆积,乃至对环礁口门的维持.

台风作为主要动力可翻转礁体巨块,打断珊瑚枝体,促使礁盘、滩堤和岛屿的砾滩堆积.

3.6 波浪与珊瑚礁分布的关系

南沙海域的波浪特点是浪大,且涌浪大于风浪. 每年 11 月至翌年 3 月东北季风期,以频率大于 40% 的东北浪为主,而 6~9 月西南季风期,风浪波向盛行 S—SW 向浪,其风浪频率为 40%~50%,从 3 月下旬到 5 月下旬波浪较小;4 和 10 月份为风浪转换月份,波向频率分布较分散. 因此,南沙海域的恒定强浪,送来了较多的浮游生物,并有较多的氧气溶于水中,这对珊

瑚的发育很有利。涌浪大对礁盘上珊瑚碎屑的发育、珊瑚礁岛的形成有重要的影响。

3.7 潮汐与珊瑚礁分布的关系

南沙海域的潮汐主要受太平洋潮波的影响,日潮不等现象显著,不正规日潮范围大,日潮范围次之,分布在 8°N 以南, 108°E 以东至加里曼丹岛之间的海域。岛礁区内潮差各处不尽相同,平均潮差为 $0.6\sim 1.5\text{ m}$,直接影响着礁体的出没。

3.8 潮流与珊瑚礁分布的关系

该海域潮流性质复杂,且流速较大。大部分海域为正规日潮流区和不正规日潮流区。潮流差大的水域潮流流速也大,在礁群区域内日分潮流异常增大。

3.9 海流与珊瑚礁分布的关系

南沙海域的表层海水在风应力的作用下,形成了随季节变化的风流海。其季风漂流厚度约为 200 m ,东北季风期属环流型,但在每年 $6\sim 9$ 月份在西南季风的作用下,海流基本为东北流。该海域内的海流强度较小,一般流速为 0.5 kn 以下。海流对珊瑚的种属区系的形成与分布起着主要作用,同时带来了丰富的饵料,使珊瑚礁体得到很好的发育。

3.10 造礁珊瑚的成长率

造礁珊瑚的成长率因珊瑚种属与环境不同而有所差别,并随纬度增高而减小。枝状珊瑚在枝头的顶端生长,平均为 $1\sim 10\text{ mm/a}$,在短时间内发育很快,因风暴不断将其打断而形成珊瑚砂。群生珊瑚生长速度缓慢,有的则为 1 mm/a 。

3.11 珊瑚礁的成长率

据统计,珊瑚礁形成速度为被冲刷速度的 $10\sim 100$ 倍,因此珊瑚礁能越来越向上生长而不被冲刷掉。据黄镇国的研究,在 16°N 南海诸岛造礁珊瑚成长率是 9 mm/a (最小为 5.5 mm/a ,最大为 20 mm/a)。

3.12 珊瑚礁生长与海平面

珊瑚的生长具有一定的空间,海水的表面控制了珊瑚礁的生长使其不能高于海平面,当珊瑚礁生长达到最高点时便向横向发展。就此,已有研究表明,到了全新世的后半期,即 $3\ 000\text{ a}$ 来,海平面上升很慢,珊瑚礁不能向上生长,而是横向生长。因此,应考虑由珊瑚礁生长形成地貌上的差异与海平面变化相应的关系。

4 珊瑚环礁遥感信息解译基本依据

珊瑚礁发育特点和类型及其组成要素的彼此差异与其时-空特性,均可具体反映在对电磁波的响应特性上。

(1) 光谱辐射特性:在可见光波段反映出地物不同的颜色,如礁坪、潟湖等彼此颜色差异很大。

(2) 空间特性:该特性对电磁波没有光谱响应,系为珊瑚岛礁的形状、大小、结构、位置、色调等在图像中的表现特征。珊瑚岛礁对电磁波的空间响应为图像信息解译的主要依据之一。

(3) 时间特性:不同时相的潮位影响着珊瑚岛礁对电磁波的响应特性,以此建立其遥感数据的多时相地学分析。

(4) 偏振特性:其反应珊瑚岛礁对电磁波从入射到反射之间产生的偏振变化。

考虑各个波段辐射的饱和度影响时,对浅水域的水深分辨率, TM1 和 TM2 两个波段小于

TM3 和 TM4 等波段,因此,波段的选择要考虑波段的透水深度和对水深变化的分辨率等因素.

对卫星图像时相的选取,应尽可能选择海况好且处于停潮或平潮的情况.依据水深遥感的信息传递过程作灰色系统模型,可视大气与大气—海面的子系统结构稳定.

在遥感图像中所表现的珊瑚礁体迎风面水域由破波现象等所形成的纹理特征,表明了海面的粗糙度与泡沫的出现,用以判别水下珊瑚礁滩的发育特征及其地形走向信息.时—空效应影响着珊瑚礁滩的光谱响应模式,如水下礁体和水上礁体以及潮间带各具有明显的时—空效应特征,即珊瑚礁滩的光谱亮度值是不统一的,而且同一礁滩也随潮位的变化而变化.

可见光—近红外遥感信息有以下特征:

(1) 珊瑚岛礁在多时相的遥感图像中有稳定的影像得以表现.

(2) 尽管珊瑚礁滩本身的表面性质、形态和出露水面程度的差异,使光谱亮度值的随机性较强,但其与周围的海水有一定的反差.反射率相对高的珊瑚岛、沙洲、点礁与中反射率的浅水礁盘以及低反射率的潟湖、礁门等,往往共同组合成易于辨认的、不同类型的环礁.

(3) 在一定区域内,岛礁发育受制于海洋动力条件,且其具有一定的方向性.对其判别采用同一时相,对海水具有不同穿透能力的多波段遥感图像,可获得信息解译的理想效果.

(4) 洁净的深海水没有来自海底的可分辨信号,穿透深度相应的光谱值,则可由各波段统计分布来确定,这为划分礁滩、浅水区和深水区提供了依据.就此,对研究区的彩色合成图像,借助于计算机可进一步提取有关礁滩范围和造礁珊瑚所表现的生态特征^[6].

5 环礁开放性类型

依据卫星图像所表征的珊瑚礁地貌形态及其发育的彼此差异和环礁围封程度,可分为四种类型:

(1) 开放型环礁:低潮位时,干出礁环量度小于礁环的 1/3,其余之礁环处于水下 10~20 m 或缺失,并有众多的口门成为潟湖内外间水体交换的流畅通道.

(2) 半开放型环礁:发育尚不完全,低潮位时的干出礁环量度约占礁环的 1/2,大部分礁环为暗礁,礁门较多,且宽而深,礁湖深度亦大,湖内外水体交换通畅.

(3) 准封闭型环礁:有比较完整的礁坪,并仍有一至若干个礁门存在,在低潮位时礁湖内外的水体尚能交换.

(4) 封闭型环礁:具有完整的环形礁坪,低潮位时礁坪基本干出,也没有礁湖内外水体交换的口门,完全呈封闭状态.

(5) 台礁化环礁:环礁处在晚期阶段发育,礁湖逐渐变为残留浅水区,并分割为众多礁塘,生长着造礁珊瑚,整个环礁朝台礁类型转化^[1].

6 环礁发育特征及其与动力环境相关的遥感复合信息系统

基于上述信息,建立了南沙遥感的多项相关因子的复合信息间系统关系,如图 1 所示.

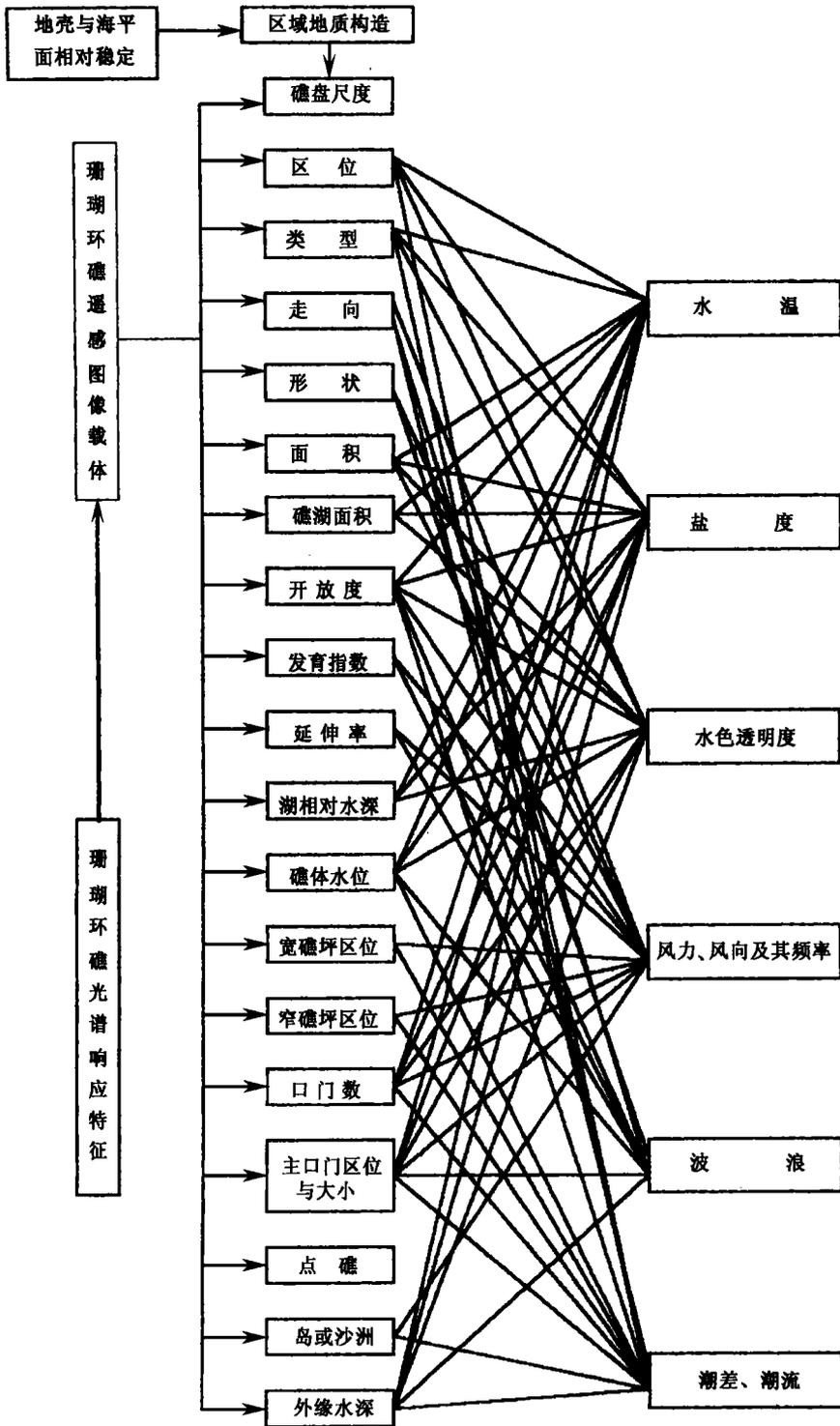


图1 珊瑚环礁发育特征及其与动力环境相关的遥感复合信息系统

7 珊瑚环礁复合信息熵

珊瑚环礁信息熵可视为其地理系统有序程度的标志. 当按珊瑚环礁开放程度进行定量分类时, 环礁礁顶面积、潟湖面积、开放度、潟湖水深、走向、长度、宽度及其建立的环礁发育指数等诸多参数, 以不同的配容方式相组合, 这种方式的种类越单调, 直至趋向于一个固定的范式时, 则该环礁地理系统的总体表现为有序, 反之, 则为无序.

环礁的空间结构现象可视为一种动态的熵变行为. 当环礁空间结构为有序时, 则其对应于低值的信息熵, 直至达到 0 为完全有序, 不同数值表示了环礁不同的有序程度, 故此, 可实现环礁地理系统的数量比较和发育进程的分析.

环礁空间结构发育的信息量, 系指复合信息所描述的环礁空间结构发育出现的概率, 而环礁的信息熵则表示总体的平均信息量. 就此, 把南沙群岛干出环礁遥感复合信息的 8 个参量代入如下信息熵的计算公式:

$$H = \frac{Q}{m} = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad n = 44,$$

式中, H 代表环礁信息熵, 其数值定义是 hartley (即 $1 \text{ hartley} = \log_2 10 = 3.219 \text{ bit}$), 为单位信息的地理信息量; Q 为 10 类复合信息的总信息量; m 指地理信息的总个数; p_i 系地理事件中环礁复合信息出现的概率. 计算结果如表 1 所示. 就此, 由于地理信息量具有统计特性, $m = 352$, 依据大数法规则, 它是有意义的^[7].

表 1 南沙群岛干出环礁的遥感复合信息量与信息熵

| 参数 属性 | 地理 事件 | 环礁复合信息 出现概率 | 每个复合信息 的信息量 | 总数 352 个中 所占信息数 | 各类复合信息 的信息量 | 环礁信息熵 H |
|------------------------|----------|----------------|----------------|--------------------|----------------|--------------|
| 礁顶面积/ km^2 | N_1 | 0.750 | -0.124 9 | 264.000 | -32.983 8 | 0.319 |
| | N_2 | 0.159 | -0.798 6 | 55.968 | -44.696 2 | |
| | N_3 | 0.023 | -1.638 2 | 8.096 | -13.263 5 | |
| | ... | ... | ... | ... | ... | |
| | N_{10} | 0.045 | -1.346 8 | 15.840 | -21.333 1 | |
| 潟湖面积/ km^2 | N_1 | 0.750 | -0.124 9 | 264.000 | -32.983 8 | 0.324 |
| | N_2 | 0.091 | -1.041 0 | 32.032 | -33.344 0 | |
| | N_3 | 0.023 | -1.638 3 | 8.096 | -13.263 5 | |
| | ... | ... | ... | ... | ... | |
| | N_{10} | 0.045 | -1.346 8 | 15.840 | -21.333 1 | |
| 开放度/ % | N_1 | 0.068 | -1.167 | 23.936 | -27.933 | 0.336 |
| | N_2 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | |
| | N_3 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | |
| | ... | ... | ... | ... | ... | |
| | N_{10} | 0.795 | -0.100 | 279.84 | -27.881 | |

续表

| 参数 属性 | 地理 事件 | 环礁复合信息 出现概率 | 每个复合信息 的信息量 | 总数 352 个中 所占信息数 | 各类复合信息 的信息量 | 环礁信息熵 H |
|------------|----------|----------------|----------------|--------------------|----------------|--------------|
| 潟湖水深/ m | N_1 | 0.114 | -0.943 1 | 40.128 | -37.844 5 | 0.732 |
| | N_2 | 0.250 | -0.602 1 | 88.000 | -52.981 3 | |
| | N_3 | 0.091 | -1.041 0 | 32.032 | -33.344 0 | |
| | ... | ... | ... | ... | ... | |
| | N_{10} | 0.023 | -1.638 3 | 8.096 | -13.263 5 | |
| 走向 | N_1 | 0.545 | -0.263 6 | 191.840 | -50.569 7 | 0.551 |
| | N_2 | 0.182 | -0.739 9 | 64.064 | -47.402 8 | |
| | N_3 | 0.136 | -0.866 5 | 47.872 | -41.479 2 | |
| | ... | ... | ... | ... | ... | |
| | N_{10} | 0.000 | 0.000 0 | 0.000 | 0.000 0 | |
| 长度/ km | N_1 | 0.341 | -0.467 2 | 120.032 | -56.084 4 | 0.711 |
| | N_2 | 0.318 | -0.497 6 | 111.936 | -55.696 3 | |
| | N_3 | 0.136 | -0.866 5 | 47.872 | -41.479 2 | |
| | ... | ... | ... | ... | ... | |
| | N_{10} | 0.045 | -1.346 8 | 15.840 | -21.333 1 | |
| 宽度/ km | N_1 | 0.273 | -0.563 8 | 96.096 | -54.182 5 | 0.756 |
| | N_2 | 0.364 | -0.438 9 | 128.128 | -56.235 2 | |
| | N_3 | 0.091 | -1.041 0 | 32.032 | -33.344 0 | |
| | ... | ... | ... | ... | ... | |
| | N_{10} | 0.023 | 1.638 3 | 8.096 | -13.263 5 | |

由表 1 可见,南沙环礁信息熵排序为:礁顶面积(0.319)、潟湖面积(0.324)、环礁开放度(0.336)、走向(0.551)、长度(0.771)、潟湖水深(0.732)、宽度(0.756)。由此可知,南沙环礁空间结构的有序性表现在奇异的分布序列与若干统一的特征上,进而为南沙环礁发育指数进行分类对比和排序的可比性,取得了定量的依据。

8 南沙干出环礁开放性分类

珊瑚环礁发育指数的诸种表达方式虽不尽相同,但观点是一致的,其中改进型的经验式(β 等于礁坪面积除以礁顶面积,下同)^[1]对不同类型环礁计算出的发育指数值差异甚小,如属于开放型环礁的双子群礁与准封闭型环礁的美济礁的发育指数,前者为 0.125,后者为 0.183。就此,着眼于南沙群岛珊瑚干出环礁发育指数为多指标的观点,对环礁发育的开放程度来讲,环礁开放度、礁顶面积和潟湖面积三者的信息熵极为接近。图 2 表示南沙干出环礁开放度和相应的环礁改进型经验式计算出的发育指数,进行一元多次回归分析的结果由下式所表达:

$$Y = 0.461\ 811 - 2.817\ 33x + 6.200\ 86x^2 - 5.741\ 77x^3 + 1.886\ 75x^4, \quad (1)$$

式中, Y 为开放度; x 为改进型经验式计算出的环礁发育指数。该式对应的各次方差分别为

1.199 93, 0.751 346, 0.585 397, 0.528 639, 0.525 360. 表明了两者间的拟合曲线是理想的, 拟合曲线示出环礁从发育的初期到形成为完全封闭型, 演化进程的差异梯度较大. 大多数环礁礁坪的发育是在环礁呈现完全封闭型环境下, 处在一个条件相似的慢过程中, 由此建立如下公式:

$$\beta' = \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1} \right)^f, \quad (2)$$

式中, β' 为环礁发育指数; S_1 为礁顶面积; S_2 为潟湖面积; f 为环礁开放度.

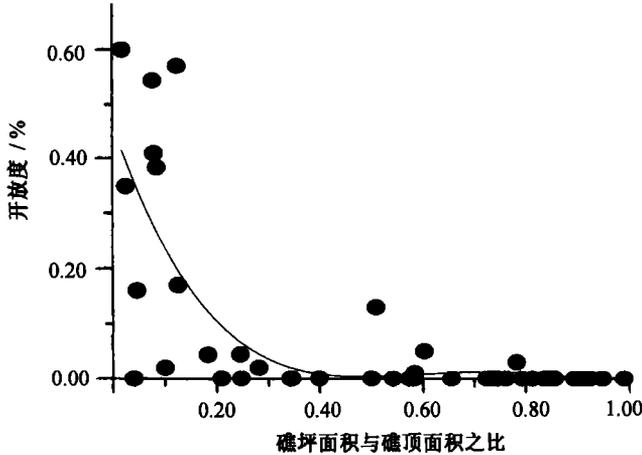


图2 多因子的环礁开放度与环礁发育指数 β' 的关系曲线

由上式对南沙干出环礁计算的结果, 用 β' 值划分环礁开放程度类型分别为 $\beta' < 0.702$ 时, 系开放型环礁; $\beta' = 0.702 \sim 0.916$ 时, 系半开放型环礁; $\beta' = 0.916 \sim 0.993$ 时, 系准封闭型环礁; $\beta' > 0.993$ 时, 则系封闭型环礁. 开放型到半开放型环礁 β' 阈值的绝对差值为 0.829, 而准封闭型环礁 β' 阈值的绝对差值为 0.077, 这符合开放型环礁发育指数跨度远大于准封闭型环礁的发育指数跨度之客观规律.

9 结语

来自空间的高分辨率的南沙群岛环礁遥感信息, 可不断修正已有的环礁特征要素的参数. 诚然, 这对环礁信息熵的分析, 乃至发育指数模式的改进和计算均是有利的条件. 与此同时, 充分利用环礁的遥感复合信息建立起发育的预测模型, 也是极为必要的.

参考文献

- 1 钟晋梁, 陈欣树, 张乔民等. 南沙群岛珊瑚礁地貌研究. 北京: 科学出版社, 1996. 44~64
- 2 Liu Baoyin, Wang Yanfeng. The remote sensing composite information of Nansha reef's closed atoll and the model of its spatial structure evolution—I. Acta Oceanologica Sinica, 1997, 16 (1): 57~70
- 3 尼贝肯 J W 著. 海洋生物学——生态学探讨. 林光恒, 李和平译. 北京: 海洋出版社, 1991. 235~254
- 4 赵焕庭. 南沙群岛自然地理. 北京: 科学出版社, 1996, 180~199
- 5 Andre Guilcher. Coral Reef Geomorphology. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1988. 12~99

- 6 刘宝银, 郝庆祥, 王岩峰. 南沙珊瑚岛礁空间结构的遥感信息树模型研究. 海洋学报, 1997, 19 (5): 47~55
- 7 牛文元. 理论地理学. 北京: 商务印书馆, 1992, 72~80

The remote sensing composite information entropy and types of Nansha coral reef atolls

Liu Baoyin,¹ Wang Yanfeng¹

1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266003*

Abstract— In the viewpoint that the coral reef atolls' growth index of the Nansha Islands is influenced by many factors, the measured remote sensing composite information including some mutually related factors is divided into 10 geographic events as N_1, N_2, \dots, N_{10} , and the analysis of the atolls' information entropy is made. From the value of the entropy, the closed related factors with the index of the emerged atolls are shown. In proper order, the factors are reef top's area (0.319), lagoon's area (0.324), open-degree of atoll (0.336), trend of atoll (0.551). On the basis of this work, a new description function of the emerged atoll growth index is proposed. This function can be used to identify the open type of Nansha atoll growth.

Key words Nansha Islands, remote sensing information, information entropy, growth index, atoll's types