

永兴岛珊瑚礁的沉积环境和沉积特征

王国忠 吕炳全 全松青

(同济大学海洋地质研究所,上海)

提要 永兴岛珊瑚礁是我国西沙群岛中发育最好的生物礁之一。礁顶呈椭圆形,可分出四个沉积相带;各相带呈环状分布,但受季风和海流的控制,其东、西向发育不对称。礁组合是上部被一圈原地礁岩和粘结岩包箍着的碳酸盐丘状体,属台礁型。原地礁岩和粘结岩是高能带的产物,具抗浪功能,但松散碎屑沉积物占优势。沉积组分中珊瑚骨屑占绝对优势,有别于太平洋礁区以藻屑为主。本区珊瑚生长带的槽沟的成因是侵蚀型的。

1979—1981年,同济大学现代碳酸盐研究组先后三次对永兴岛进行了水文、地貌、沉积特征、生物种类和数量的调查研究。本文阐述永兴岛珊瑚礁的沉积环境、礁体形态、结构构造以及沉积相带等特征,并着重剖析沉积环境对沉积特征的影响和控制作用。

沉积环境

永兴岛位于南海西北部(16°50'N, 112°20'E)的西沙海台的东北侧。该海台长250km,宽150km,大致为1000m等深线所圈闭,其上滩、洲、礁、岛呈丘状隆起,直达海面。该岛东北濒临3000m以下的深海,而其西南1000m深的海台上,众多的礁岛如群岚叠障(图1)。据海图资料,该礁岛东侧水下地形以水深20—40m间的坡度最大,为10.8°,其余都在3°以下;西侧地形比东侧陡,水深20m以浅为5.6°—10.2°,而水深20—40m间为20°。据西永1#资料^[1],海面以下1251m处由早第三纪风化剥蚀面组成珊瑚礁的基础,其上为中新世以来的滨海生物礁相兼夹浅海陆架相和深海相的生物碎屑灰岩,其中第四纪厚度为150m。

本区属季风热带岛屿气候。历年平均气温为26.3°C,表层海水平均温度为26.8°C。每年10月到次年3月以东北风为主,周期长,频率高,风力较大;西南季风的影响比东北季风弱,周期短(5—8月),但短期强风和灾害性暴风——台风,常以西南风出现(见图2a)。季风影响波浪和海流,区内波浪作用较强,1977—1978年海浪平均周期为4.3秒/次,平均波高为0.9—2.05m,最大平均波高(2.1—8.0m)的方位分布也以东北、西南向为主(图2b)。风浪与涌浪之比为88.5/11.5,表层海流每年10月到次年3月自东北流向西南,在其前进途中顺斜坡向上形成上升流,带来丰富的营养物质和活跃的水交换条件,为生物的繁盛生长提供了有利的条件;而5—8月间的西南海流通过复杂的地形后作用于永兴礁,其影响相对减弱。本海域的潮汐作用属不正规全日潮,平均潮差为0.9m。海水透明度大于10m。

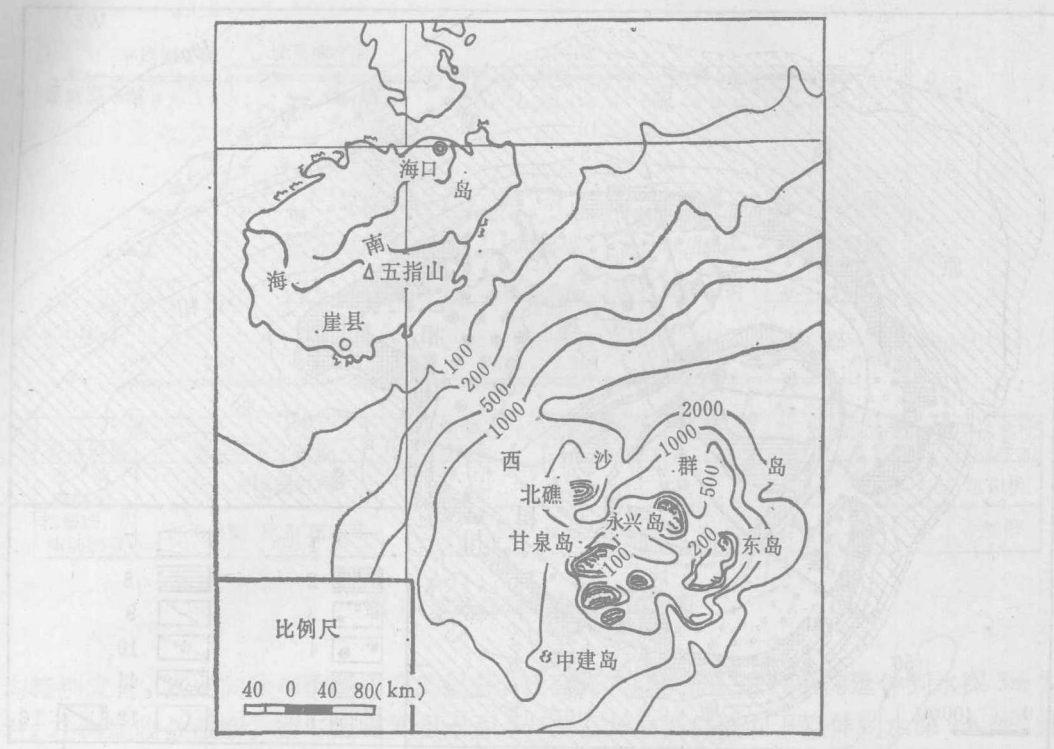


图1 西沙群岛地形图
(据 1/400 万中国地形图)

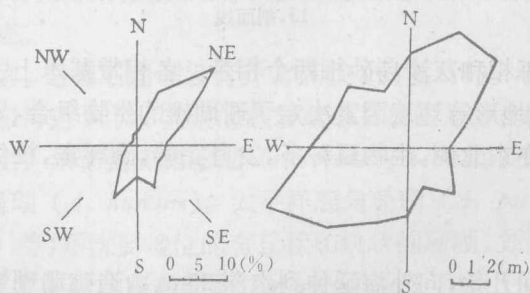


图2 永兴岛风向频率和最大平均波高分布图
(据西沙气象台和永兴岛海洋站资料绘制)

永兴岛年平均降雨量为 1854.23mm, 年平均蒸发量为 2541.22mm。受两者的控制, 表层海水的盐度变化为 32.95—33.95‰。气候、地形和沉积物性质决定了永兴岛无地表径流入海。

上述诸因素都给珊瑚等造礁生物和附礁生物以有利的生长和发育的条件, 但是水下地形和波、潮、流等的不对称性也造成了珊瑚礁发育的东西向不对称。

珊瑚礁沉积特征

永兴岛珊瑚礁礁顶略呈椭圆形, 其上部可分出原地珊瑚礁相、礁缘浅滩砾石-粘结岩

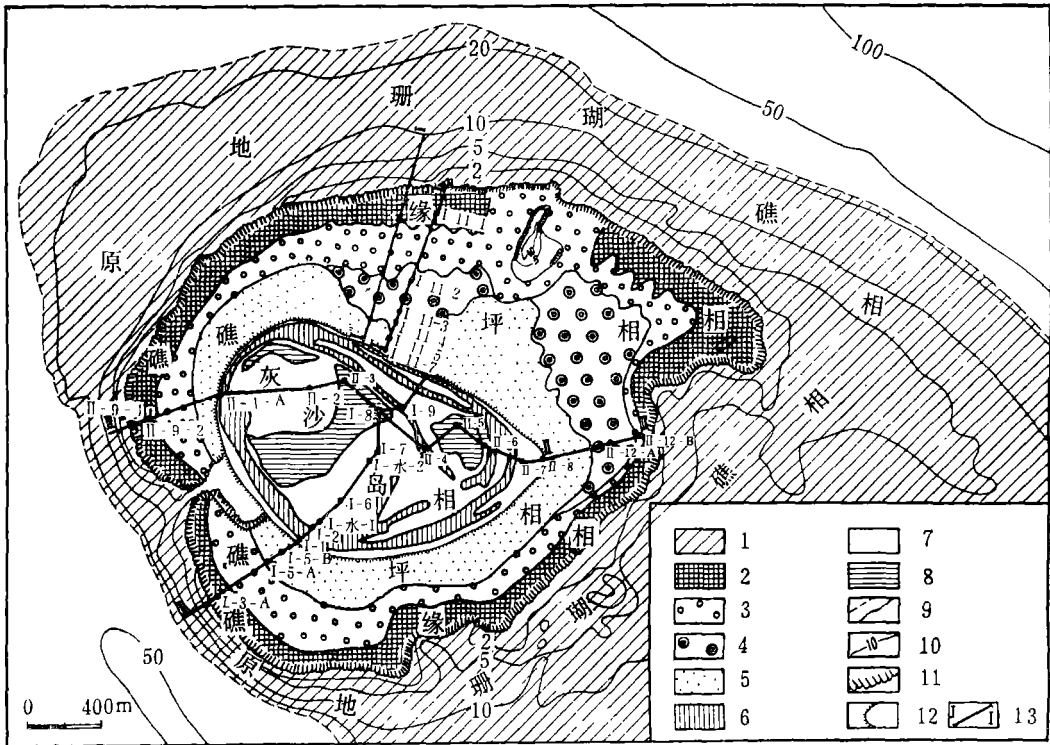


图3 永兴岛珊瑚礁沉积相平面分布图

- 1. 原地珊瑚礁相; 2. 礁缘砾石-粘结石相; 3. 礁坪砾石相; 4. 礁坪珊瑚铺砌相; 5. 礁坪含砾砂相;
- 6. 灰砂岛砂堤相; 7. 灰砂岛平台砂相; 8. 灰砂岛洼地相; 9. 相带界线; 10. 等深线; 11. 礁缘; 12. 海岸线;
- 13. 剖面线

相、礁坪含补丁礁砂砾相和灰砂岛砂相四个相带，各相带基本上围绕礁岛呈环带状分布(图3)。但季风、海流、地形等环境因素决定了珊瑚礁的生物组合、发育程度和沉积特征的差异和不对称。一般在东北侧，生物属种多，发育完善，礁坪宽，粒级细，而西南侧反之。现将各沉积相分述如下。

1. 原地珊瑚礁相

自礁坪边缘低潮面开始，向外海延伸到水深 25m，由造礁珊瑚繁茂生长的礁面和槽沟体系组成，这是珊瑚发育最好的相带，因此又称礁体珊瑚生长带。受水动力条件影响，东北和西南侧不对称，平均坡角西部较陡为 5.6° — 10° ，而东部较平缓为 1.3° — 2.4° ；宽度与坡度成反比，西部为 100—200m，而东部宽 400—800m(图3)。斜坡上缓下陡，自礁缘到水深 2m 处坡角小于 2° ，2—3m 左右为一陡峭的转折，礁面受强烈切割，向下以 1° — 6° 的坡角延伸到 20m 深处，其下以近于垂直的坡度下降到 25m。斜坡上发育有水深 5m 和 10m 的两个平台，其宽为 20—100m(图4)，均为低海面的产物。珊瑚生长带前沿以横岭状向前伸出，边界参差不齐，各横岭间相距百余米。

珊瑚生长带上部槽沟发育，西南部发育三组：两组垂直礁缘而另一组与礁缘平行；东北部仅有前两组而缺失后一组。第一组槽沟自低潮面开始，众多的剖面为 V 型的小沟垂直礁缘外延，逐渐汇集成深约 1m 的槽沟，两沟间相距 6—10m；在水深 1.5—3m 处，槽

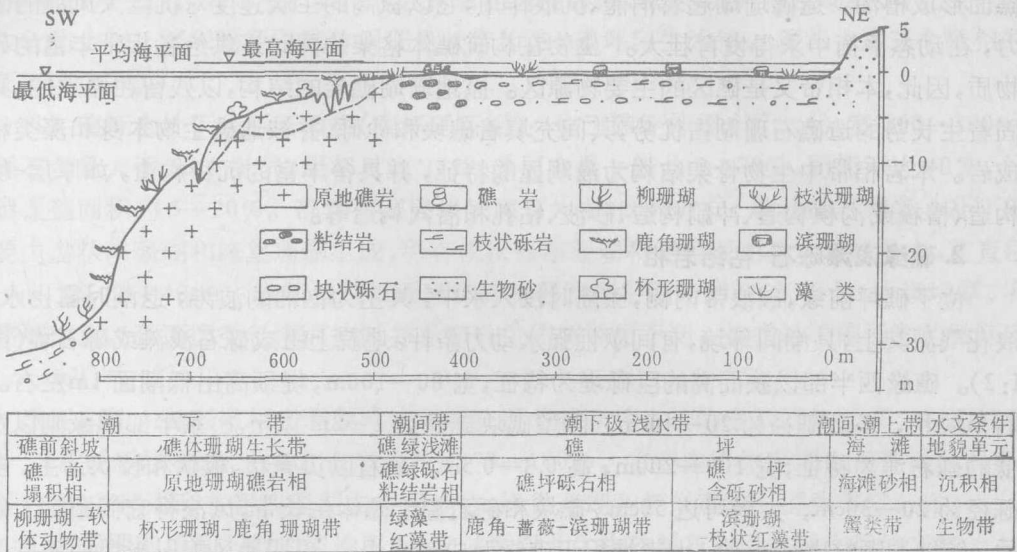


图4 永兴岛珊瑚礁西南剖面图

沟特别发育,其走向除与礁缘垂直的以外,还有与其斜交的;这些槽沟延伸到水深5m左右,在沟端收敛截断。第二组槽沟自水深5m左右开始沿斜坡向下延伸到水深9m处,逐渐消失或汇入第三组槽沟。槽沟深2m左右。在水深9—10m处,第三组槽沟呈弧形而狭长,与礁缘平行,横切斜坡,沟宽1—2m,沟深1—3m,长几十米,横断面呈U型。此外,在西半部的礁面上,排列着几排略呈菱形的凹坑,其对径为6—13m,这应是槽沟间的礁块被暴风浪冲击摧毁的残迹。

珊瑚礁体生长带里,造礁石珊瑚发育异常茂盛(图版I:1)。礁面上活珊瑚群体的覆盖率达70%以上,局部可达90%,其余的礁岩或砾石表面为藻类覆盖。生长带的造礁珊瑚以匍匐状和枝状为主,如匍匐鹿角珊瑚(*Acropora prostrata*),伞房鹿角珊瑚(*A. corymbosa*),粗野鹿角珊瑚(*A. humilis*),太平洋鹿角珊瑚(*A. pacifica*),瘤状杯形珊瑚(*Pocillopora verrucosa*)等;居次要地位的有丘状和块状的珊瑚,如滨珊瑚(*Poritidae*)、蜂巢珊瑚(*Faviidae*),以及叶状的蔷薇珊瑚(*Montiporidae*)和牡丹珊瑚(*Pavonidae*);千孔螅(*Millipora*)也参与造礁。本带礁面上广泛分布的喜礁生物有海鸡冠(*Alcyonarian*)、海绵、海胆、贝类等。

因波浪作用较强,槽沟底部无活珊瑚生长,但在沟壁上,礁面附近有少量珊瑚生长并伸向槽沟上空。水深5m以浅的沟底以充填礁块和砾石为主,砾石上有红藻和绿藻繁殖;水深5m以下的沟底大都被生物砂覆盖,并组成与槽沟方向垂直的、峰高为20—30cm的砂波。

槽沟发育最强的地带处于波浪作用最强烈的深度(平均海面以下2.1—2.9m),其形态由V型向U型转化。西南侧在暴风浪侵袭下,形成巨大的凹坑以及在石岛以北更新世生物碎屑灰岩中发育而延伸很长的V型沟等事实,都证明其成因属侵蚀型。

综上所述,在礁体珊瑚生长带内,激荡的水动力给生物繁茂生长创造了条件,并侵蚀

礁面形成槽沟。造礁珊瑚起着消能、抗浪作用;它以极高的生长速度对抗巨大风浪的破坏力,在动态平衡中求得发育壮大。生物在构筑礁体格架的同时还供给各相带丰富的碎屑物质,因此,本相带又是礁区的主要物源区。原地珊瑚礁岩的结构,以残留在原地的、具有固着生长势的造礁石珊瑚占优势,其间充填着礁块和砾石,并被造礁生物本身和藻类粘结成岩。本岩相带中生物骨架结构为最明显的特征,并具备丰富的沉积构造,如厚层-块状构造、槽模或沟模构造、冲刷构造、砂波、钻孔和潜穴构造等。

2. 礁缘浅滩砾石-粘结岩相

位于礁坪前缘,破浪带内侧,涨潮时没入水中,其上为汹涌的波涛;退潮时露出水面,浪花飞溅其上;具潮间环境,有间歇性强水动力条件。地貌上组成砾石浅滩或砾石堤(图版1:2)。礁缘西半部以狭而高的巨砾堤为特征,宽80—100m,堤顶高出低潮面1m左右。砾石呈块状,多数砾径为20—40cm,巨型礁块砾径达1—2m以上。东半部礁缘则以宽而低的砾石滩为特征,宽100—200m,高0.3—0.5m。砾石以贝壳状、板状和枝状为主,多数砾径为20—30cm,大者可达50cm。礁块和砾石源于礁体生长带,风浪将它们搬运上礁缘后,较细的颗粒向岸运动,大者堆积于礁缘而成滩或堤。短期暴风浪以来自西南向为主(图2b),其能量与平时相差悬殊,摧毁了在长期低能环境中形成的礁岩,因而礁块的体积大;来自东北向的暴风浪较少,因而东北侧礁缘上的礁块较小。礁缘外侧呈弧形突出,其内侧,在西部为弧形,而东部以锯齿状伸入礁坪(图3)。礁缘内、外侧坡度小而平缓,中央堆积礁块和砾石,因而表面参差不齐。砾石呈角砾-次棱角状,表层被蠕虫、穿孔贝和藻类腐蚀而千疮百孔,砾块的形状基本上是珊瑚生长时的顶面翻转朝下或向岸倾倒,可依此特征区别于原地生长的礁体。

本相带位于低潮面以上,但浪花能溅湿其表面。因此,珊瑚类生物的生长受到遏制,仅在洼坑内有小丛活珊瑚生长,其覆盖面积约10%。然而各种藻类却能大量繁殖,如蕨藻、拟刚毛藻、珊瑚藻、伞藻等向上生长,发育成藻席,厚达0.5—3cm。藻席以其丝状体和分泌的粘液阻滞并捕集大量泥沙;而另一些被壳状或网格状的红藻(如毡藻等)发育于砾石的背面。这样,它们很快将浅滩的表面粘成一整体。本相带的结构是以礁块、砾石为格架,其间有生长纹层的红藻,并充填以含砂屑的灰泥胶结物。钙质红藻既是岩石的骨骼组分,又起粘结作用;非钙质藻死亡后虽腐烂、消失,但被其阻留、固定的泥沙却能成为岩石的胶结物。

由上可见,粘结岩形成于礁缘破浪带内的间歇性高能环境下,它是缺乏生长势的珊瑚顶的、由礁块和砾石为格架的、被钙藻粘结和含砂屑灰泥胶结的中层-块状的岩石,是同生成岩的产物。它与原地礁岩的区别在于缺少原生珊瑚顶和造礁珊瑚类本身的粘结作用。

3. 礁坪含补丁礁砂砾相

礁坪是低潮面附近一个宽广而平坦的地貌单元,中部微凸,低潮时露出水面,外侧在低潮面以下约30cm,而沿岸带低潮时水深可达50—60cm(图4)。由于东北和西南的水动力条件相差较大,东、西礁坪不对称,西部宽250—500m,而东部宽400—1000m;珊瑚属种各异,西部发育两个沉积微相:含补丁礁砾石微相和含补丁礁砾砂微相;但在东部礁坪上,在此两微相间还发育着一个苍珊瑚-滨珊瑚铺砌微相(图3)。

因受礁坪上波浪分选作用的控制,沉积物分布的总趋势是:自海向岸,沉积物由粗变

细,从砾石为主到砂屑为主。其上也发育着活珊瑚群体、软体动物、棘皮动物、有孔虫等原地生长的生物。沉积物源以礁体珊瑚生长带为主,礁坪自生为辅。现将上述三个微相的特征概述如下。

(1) 礁坪含补丁礁砾石微相(礁坪砾石相): 位于礁坪外圈(图3,4),宽100—300m,以砾石含量大于50%为界,局部可达95%,砂屑含量一般为5—20%,局部可达40%,补丁礁覆盖面积约5—20%。礁坪西部以块状砾石为主,向岸方向,枝状砾石增多。补丁礁主要由盘状滨珊瑚和蜂巢珊瑚组成,另有枝状蔷薇珊瑚和鹿角珊瑚呈丛簇状散布,其直径1—3m,高30—40cm。盘状橙黄滨珊瑚和蜂巢珊瑚顶平而略凹,底部下凸;边缘增厚,有活珊瑚繁育,顶面因受低潮面控制并受穿孔生物腐蚀而下凹,这类补丁礁通称为微环礁(Microatoll)^[6]。

礁坪东部,砾石微相由珊瑚礁块和断肢覆盖着原地生长的珊瑚群体而成,表面较平整。砾石以板状、枝状为主,占底面积的75—100%,主要由礁体珊瑚生长带搬运而来。本带内侧,苍珊瑚和普哥滨珊瑚占主要地位,蜂巢珊瑚和杯形珊瑚小群体零星分布。

石岛周围礁坪砾石带的结构不同,它以更新世生物碎屑灰岩受海蚀作用的产物为主。

(2) 苍珊瑚-普哥滨珊瑚铺砌微相(礁坪珊瑚铺砌相): 仅发育于礁坪东北部砾石带的内侧,宽300—500m(图3)。苍珊瑚(*Helicopora*)和普哥滨珊瑚(*Porites pukoensis*)圆盘的直径为50—100cm,高30—40cm,彼此镶嵌铺砌于生物砂底之上,表面平整,酷似码头或人行道上水泥块铺砌的地面。苍珊瑚是蓝色的四射珊瑚(图版1:3),普哥滨珊瑚为淡黄-褐色的六射珊瑚,骨骼白色。因为它们生长在浅水礁坪上,受低潮面的控制而发育成圆盘状。在局部地区此类珊瑚群体覆盖的面积可达80%以上。本带内分布着大致与礁缘垂直的水道,深40—50cm,底面铺着白色生物砂,其它生物有橙黄滨珊瑚、蔷薇珊瑚、杯形珊瑚小群体、海葵、软体动物;藻类中有红藻、水云、绿藻、团扇藻等,海草类中有喜盐草(*Halophila*)^[3]。

本微相的特征可与太平洋中马绍尔群岛比基尼珊瑚礁的类似相带作对比^[8]。

(3) 礁坪含补丁礁砾砂微相(礁坪砾砂相): 分布于礁坪的近岸侧,生物砂占50%以上,宽150—400m。沉积物为白色含砾生物粗砂,分选性向岸变好,其组分以珊瑚碎屑为主(60%以上),其次为有孔虫壳、介屑和藻屑(图5)。本带西部滨珊瑚等补丁礁占底面积的5—15%,其直径为50—200cm;东部苍珊瑚、普哥滨珊瑚圆盘占3—35%。其它生物有砗磲、砗磲、螺、芋螺、宝贝、枝状红藻、仙人掌藻、海龟草、喜盐草等。

在礁缘或礁坪上的细碎屑中,有孔虫组分变化于1.4—21%之间,且自礁缘向岸含量增多,自每克样品中平均含3—50个增到680个,属种以底栖大有孔虫为主,占总数的81.9—86.9%。其中以马刺虫(距轮虫)为主,形成拟距马刺虫(*Calcarina calcarinoides*)-茸毛马刺虫(*Calcarina hispida*)组合。小有孔虫中有瓷质壳、螺旋壳以及少量平旋壳和胶结壳。

4. 灰沙岛砾砂相

当礁坪上碳酸盐砂砾屑堆积高出海面时便形成灰沙岛。灰沙岛在平面上呈半月形,东北平直,西南弧状凸出(图3),其前沿以海滩与礁坪为界,东西长1800m,最宽处1150m,全岛面积1.8km²。岛上发育1—4道沙堤,其间发育沙坪和洼地等地貌单元。相应

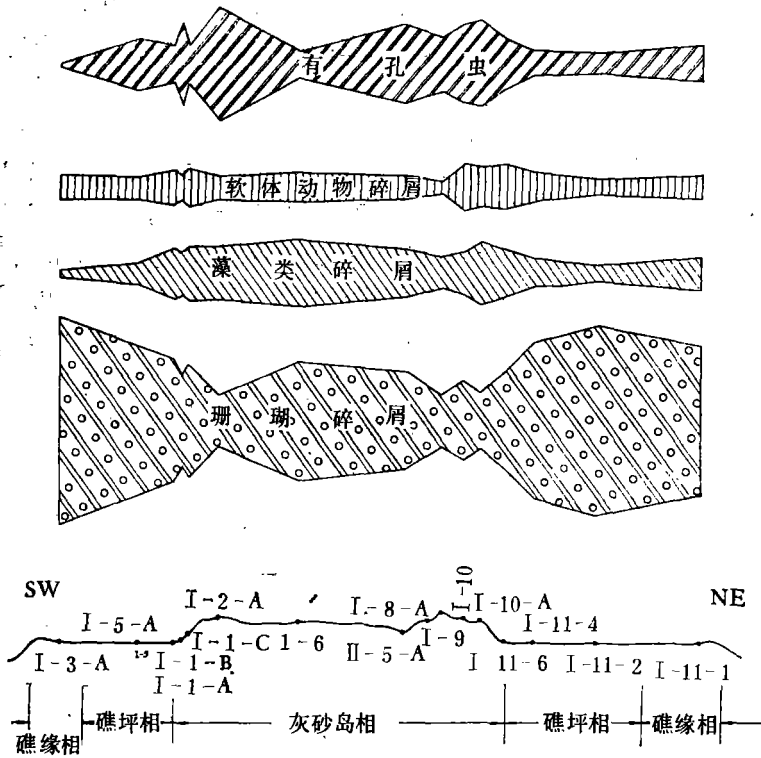


图5 永兴岛珊瑚礁砂屑组分分布图

的沉积微相有以下三种。

(1) 海滩砾砂微相：灰沙岛前沿砂质或含砾砂质海滩，一般宽十余米，东北比西南宽；高潮线以下的前滩为 3° — 4° ，滩肩宽3—30m不等，后滩的坡角在 8° 以上。因离礁缘的距离不同和暴风浪的影响，西南侧海滩受侵蚀、坍塌，而东北岸处于快速堆积状态。

海滩沉积为含砾中-粗砂，西部的粒级比东部粗，具明显的双跳跃组分。砾石含量为1.5—3.5%，西部多碎砾壳而东部富集芋螺和宝贝等介壳。与礁坪对比，在海滩砂的组分中，珊瑚碎屑的含量明显地降低(37.3—49.7%)，而有孔虫壳和藻屑明显地增加(图5)。在西北部的潮间带，海滩沉积已胶结成海滩岩。

(2) 沙堤砂微相：在波浪和风的作用下形成沿岸沙堤。现代沙堤高2m以上，向海侧为 14° 左右。西岸为一复合沙堤，宽约150m，高大于5m。这是因为离礁缘距离近，海岸堆积作用和侵蚀作用交替影响所致；而在东北部，因远离礁缘以及礁坪上海水环流的影响，海岸堆积迅速，不断向海推进，从而形成了3—4道沙堤。沙堤沉积同样是西部粗(含砾中-粗砂)，东部细(中-粗砂)；分选性较好($\sigma_1 = 0.75$ — 0.6)。组分中珊瑚骨屑进一步减少(21—32%)，有孔虫和藻屑更加富集，有孔虫壳含量高达21.7—46.3%而居首位(图5)。在沙堤发育过程中，植被起着重要的固沙作用，并形成草海桐(羊角树 *Scaerola sericea*) 灌木群丛^[2]。

(3) 沙坪和洼地砂微相：沙坪系指沙堤间海拔2m以上，表面平坦的沙质沉积，为早先的沙洲或海滩沉积被后期的沙堤包围，经改造而成。其上植被茂盛，以白避霜花(麻枫

桐 *Pisonia grandis*) 为主, 组成白避霜花群丛^[2]。海拔 2m 以下的洼地或临时沼泽沉积为含砾粗砂。此处地势低洼, 常有积水, 发育芦苇、莎草等淡水沼泽群落^[2]。沉积组分中珊瑚骨屑占 37.9%, 有孔虫壳达 32.1%。

结 语

因受季风周期性的交替作用, 永兴岛珊瑚礁区并不存在固定的向风面或背风面, 在礁体的形态、结构、沉积相等各方面东、西两侧基本相似, 然而其不对称性又远不及太平洋中的珊瑚礁^[3]。后者因受信风控制, 迎风侧和背风侧的沉积特征完全不同。因此, 虽然永兴岛现代珊瑚礁是宣德群岛马蹄形环礁的主体, 但它本身却是一个东、西不对称的台礁。上述两种命名是不矛盾的, 正如 Levorsen 指出: “一般认为多数台礁是从前的环礁的残迹”^[5]。

表 1 不同礁区礁坪沉积中碎屑组对比表

组分	区域	永兴岛	太平洋 ^[7]	加勒比海 ^[7]
珊瑚骨屑		61.4—85.3	15—36	20—35
珊瑚藻屑	}	2.9—13.3	23—52	10—24
仙掌藻屑			2—10	2—40
有孔虫壳		11.4—21.0	10—23	2—13
软体动物介屑		6.4—12.4	12	5—12
介屑/钙藻屑		1.15	0.28	0.36

在永兴岛珊瑚礁沉积分布的规律中, 可以清楚地看出, 自物源区开始的沉积物搬运过程中, 在机械分选作用的同时, 伴随着沉积组分的分异作用(图5)。但在不同礁区的某个沉积相带里, 碎屑组分的对比即能明显地表示出各自的特征, 如永兴岛礁坪沉积物中珊瑚砂砾屑占有绝对优势(61.4—85.3%, 见表1), 而珊瑚藻和仙掌藻等钙藻屑仅占有很不明显的地位(<13.3%); 但在太平洋和加勒比海礁区, 礁坪沉积物中的沉积物组分则完全相反, 那里以钙藻屑为主(29—64%), 而珊瑚骨屑仅占次要地位(<36%, 表1)。

参 考 文 献

- [1] 王崇友、何希贤、裘松余, 1979. 西沙群岛西永一井碳酸盐岩地层与微体古生物的初步研究. 石油实验地质 1: 23—38.
- [2] 伍辉民、陈伟球, 1977. 我国西沙群岛的植物和植被. 科学出版社, 127页.
- [3] 杨宗岱, 1982. 中国海草的生态学研究. 海洋科学 2: 34—37.
- [4] Jordan, C. F., 1978. Tropical lagoonal sedimentation. In: The Encyclopedia of Sedimentology (Fairbridge, R. W. and J. Bourgeois, ed.). Dowden, Hutchinson and Ross, Inc. pp. 821—828.
- [5] Levorsen, A. I., 1967. Geology of Petroleum. (2nd edition). W. H. Freeman Company, San Francisco. 724pp.
- [6] Mergner, H. and G. Scheer, 1974. The physiographic zonation and the ecological conditions of some South Indian and Ceylon coral reefs. In: Proceeding of the Second International Coral Reef Symposium. Great Barrier Reef Committee, Brisbane. pp. 3—30.
- [7] Milliman, J. D., 1974. Marine Carbonates. Springer-Verlag. Berlin, Heideberg, New York, 375pp.
- [8] Tracey, J. I., J. H. S. Ladd and J. E. Hoffmeister, 1948. Reefs of Bikini, Marshall Island. Bull. of the Geol. Soc. Amer. 59: 881—899.

THE SEDIMENTARY ENVIRONMENTS AND CHARACTERISTICS OF THE CORAL REEF OF THE YONGXING ISLAND

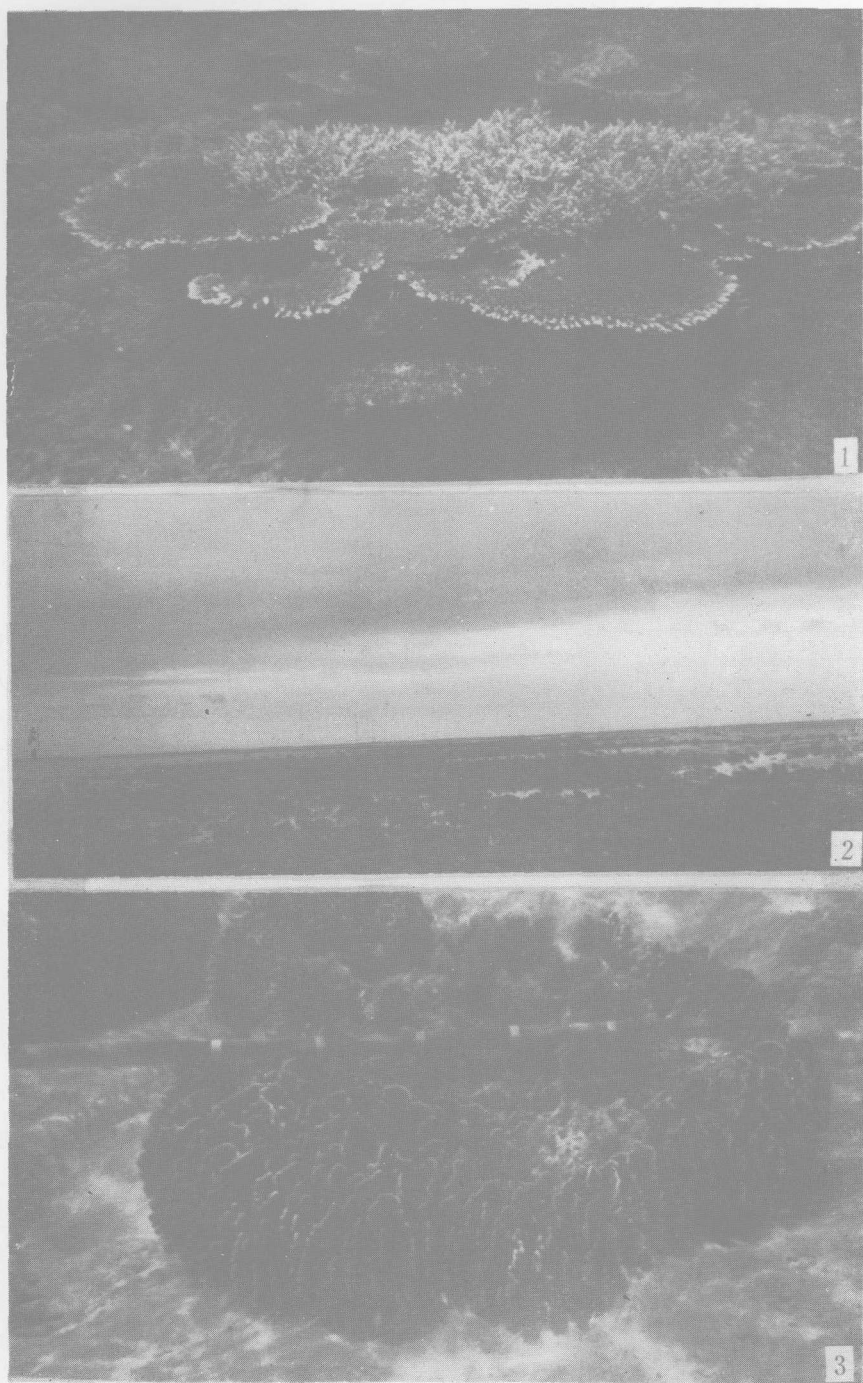
Wang Guozhong, Lu Binqun and Quan Songqing
(*Institute of Marine Geology, Tongji University, Shanghai*)

ABSTRACT

The climate of Yongxing Island, a well developed reef areas in the Xisha Islands in the South China Sea, is that of tropical monsoon. This coral reef is based on the residuum of granite-gneiss and has been developing continually since Miocene epoch.

Recent coral reef crest of the Yongxing Island is in elliptical form and ring-like. The facies on the northeast and the south-west sides are generally alike, but differ in width, number of coral genera and products of carbonate sediments. They are distributed asymmetrically as a result of asymmetrical monsoons, currents and submarine relief, while the distribution of the coral reefs in the Pacific are controlled by the trade wind.

The recent coral reef crest of the Yongxing Island appears in the following facies: the autochthonous coral reef rock facies, the reef marginal shoal gravel-boundstone facies, the reef flat sand-gravel with patch reef facies, and the cay gravel-sand facies. This reef complex is of a carbonate mound surrounded by the autochthonous reef rocks and biendstones on the reef crest. It belongs in category to the table reef. Though the sediments in the coral reef areas of the Pacific are predominantly algal debris, yet those of the Yongxing Island are absolutely dominated by the scleractinian coral and their debris.



1. 礁体珊瑚生长带的匍匐状和枝状鹿角珊瑚；2. 永兴岛珊瑚礁西南礁缘浅滩砾石——粘结石相外貌；3. 盘状苍珊瑚 (*Heliopora*)，底质为白色生物砂。(标尺每格为 10cm)