

巴布亚新几内亚合恩半岛晚第四纪上升 珊瑚礁造礁珊瑚的成岩历史

祝仲蓉 J.Chappell

(澳大利亚国立大学生物地理及地貌系)

J.Marshall

(澳大利亚矿物资源局)

摘要 更新世以来, 剧烈的构造运动已将巴布亚新几内亚合恩半岛东北海岸的晚第四纪珊瑚礁阶地抬升上千米. 阶地中造礁珊瑚的成岩变化和成岩产物的组构特征反映了该礁的成岩历史, 充分体现该区快速构造上升的影响. 海水潜流带和淡水渗流带为上升礁的主要成岩环境. 生物钻孔、生物碎屑填隙、珊瑚文石针粗化、珊瑚骨骼的溶解和新生变形转化, 以及其不同矿物成分和组构的种种胶结物的胶结作用是造礁珊瑚经历的主要成岩作用. 地球化学资料表明其成岩变化发生于开放的化学体系之中.

关键词 构造运动 合恩上升礁阶地 造礁珊瑚 成岩作用

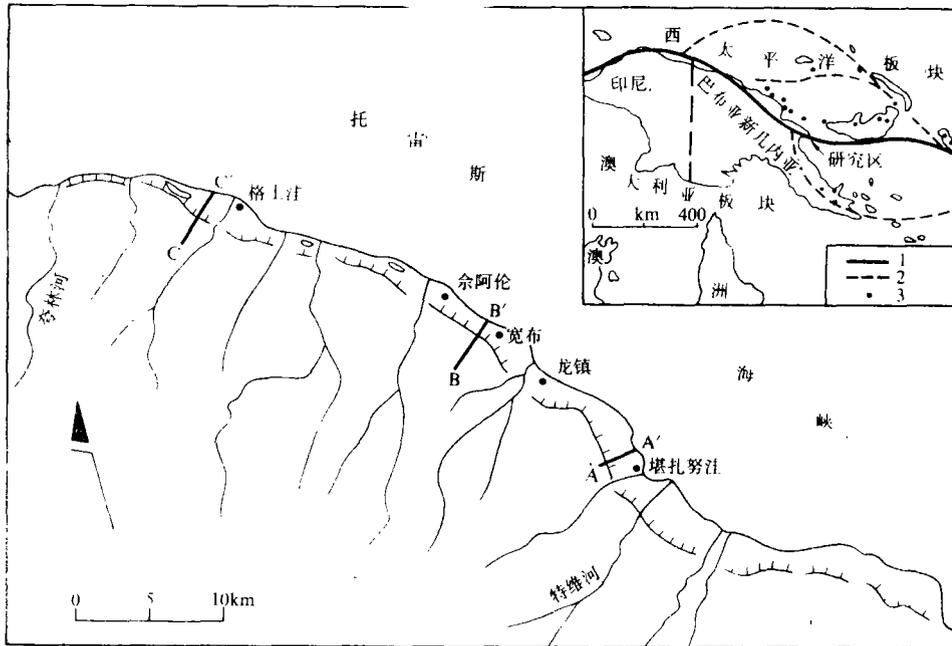
第一作者简介 祝仲蓉 男 32 岁 博士研究生 海洋地质学

地处西太平洋板块和澳大利亚板块碰撞带的巴布亚新几内亚合恩 (Huon) 半岛东北海岸发育了一系列壮观的晚第四纪珊瑚礁阶地. 阶地主要由造礁珊瑚以及伴生的生物碎屑石化形成的礁灰岩构成. 文石质造礁珊瑚及其孔隙充填物呈现不同程度的成岩变化, 反映了该上升珊瑚礁阶地的成岩历史, 为研究剧烈构造运动地区生物礁的成岩作用提供了理想的场所. 作者经两年的野外工作, 在位于不同气候条件和不同构造上升速度的三条剖面上系统观察、采样. 对采自不同年代的阶地和礁相的 160 个珊瑚样品的矿物成分分别作了 X 射线衍射定量测定的薄片染色定量估计, 鉴定了 200 多珊瑚和礁灰岩岩石薄片, 作了 27 个样品的电镜扫描研究, 并对宽布 (Kwambu) 剖面中不同阶地的 17 个珊瑚样品作了电子探针分析. 本文在上述研究基础上, 研究合恩上升阶地中造礁珊瑚及其填隙物的成岩变化、成岩组构及地球化学特征, 探讨了构造上升迅速地区珊瑚礁成岩变化的特点.

一、气候与地质背景

合恩半岛东北海岸位于南纬 $6^{\circ} 20'$, 东经 $147^{\circ} 30'$, 三面临海, 西南依山 (图 1). 本区的气候状况由南半球冬夏两季的西北和东南季风规则交替以及内地高山地形影响所制约. 由于地形影响, 本区现今年降雨量变化显著. 沿海岸从余阿伦 (Sialum) 附近 1200mm 往西北至格土洼 (Gitua) 升为 1400mm, 往东南至芬其哈芬 (Fenschhafen) 上升至 4000 多毫

米. 由于格望维尔 (Cromwell) 山脉影响, 降雨量沿海岸向陆也急剧增加. 在余阿伦地区从海岸向陆仅 8.5km, 海拔 670m 处, 年降雨量已由 1200mm 增至 2500mm. Dunkerley (1976) 测得 11 个月的本区海岸中午日均气温为 29.9°C, 500m 高处气温较海岸地区低 3—6°C. 外海海水月均温度变化小, 8 月为 26.6°C, 3 月为 29°C, 温差不超过 2.5°C. 本区潮汐主要为全日潮. 潮差小, 朔望大潮时不超过 1 米, 小潮时仅 0.3m.



AA'、BB'、CC'分别为堪扎努洼、宽布、格土洼剖面, 海岸与断线间为全新世和 12 万年前礁阶地组合
右上插图表示上升礁的构造位置.

图 1 巴布亚新几内亚合恩半岛东北海岸晚第四纪珊瑚礁阶地位置图

Fig.1 The location of Late Pleistocene coral reef terraces along the northeast coast of the Huon Peninsula.

构造上合恩半岛位于西太平洋和澳大利亚两活动板块的碰撞带, 故地震频繁, 火山活跃, 新构造运动十分剧烈. 自更新世以来, 本区一直急剧上升. 由于断挠运动, 本区构造上升速度沿岸变化, 从西北部格土洼的 0.5m/ka 往东南增至堪扎努洼 (Kanzarua) 附近的 3.5m/ka. 晚第四纪上升礁阶地沿合恩半岛东北海岸呈一条宽约 10km, 长 80km 的窄带展布. 形态完整时代不同的主要阶地有十二级 (图版 I, 1). 其地层被称为万朵岩 (Wandokai) 组, 为一套浅褐色至灰色生物礁灰岩, 不整合覆于中新统至上新统碎屑岩和灰岩之上. 各阶地礁灰岩出露厚度 10—100m 不等, 多在 20—50m 之间. 造礁生物为典型的印度洋—太平洋区浅水造礁珊瑚. 其原地生长结构保存良好, 构成礁骨架, 局部丰度可达 70% 以上 (图版 I, 2). 附礁生物主要是软体动物、珊瑚藻、仙掌藻、棘皮动物和有孔虫等. 用 ^{14}C 和钍—铀系法测年已精确地确定了从全新世至距今 24 万年前各阶地的年代, 老于 24

万年的阶地也由其高程和上升速率推算出年代。

二、造礁珊瑚及其填隙物的成岩作用

1. 生物钻孔

宽布地区现代和全新世堡礁体系是生物钻孔作用的极好例证。钻孔生物主要是海绵、腹足类、瓣鳃类和蠕虫。海绵及软体动物大多钻孔于海水潜流带, 蠕虫则主要作用于潮间带, 孔径一般 3—5mm。野外观察蠕虫钻孔局部可占珊瑚骨骼体积的 20% 或更多。合恩上升礁中, 绝大多数造礁珊瑚中的钻孔被生物碎屑和胶结物充填(图版 I, 3)。重复进行的生物钻孔和沉积物充填作用极大地改造了造礁生物骨架, 甚至可使骨架结构消失, 泥屑比增大, 给人以低能环境形成的含生物碎屑泥晶灰岩的假象, 这在研究古代礁的微相变化时是需注意的。

2. 生物碎屑填隙作用

礁区生物骨骼机械破碎后, 填积于珊瑚体腔孔和次生孔隙, 形成填隙物(基质)。合恩礁中珊瑚孔隙被生物碎屑充填于早期阶段。现代珊瑚活生物组织之下的骨骼孔隙中已出现生物碎屑充填。它们由粉砂至泥级的生物碎屑构成, 如钙藻屑、软体动物碎屑、棘屑、有孔虫和海绵骨针等。各种粒级的碎屑常混杂一起, 表明快速沉积特征(图版 I, 3)。由于含大量粉砂级生物碎屑, 所以易与化学沉积的微晶胶结物区别。它们充填于珊瑚的原生体腔孔和生物钻孔, 但在溶蚀作用形成的次生孔隙中却少见。

3. 粗化文石针

薄片观察发现合恩上升礁中一些造礁珊瑚骨骼文石针晶体组构发生了变化, 针状文石加粗(图版 I, 4), 长达 300 μm , 宽为 40—60 μm , 远粗于原始珊瑚文石晶体。而且, 粗化文石针在显微镜下透明度增高, 少含杂质。珊瑚文石针的粗化通常开始于晶簇间接触面附近, 有的粗化文石针延伸穿过钙化中心。X 射线衍射和岩石薄片染色证实粗化的针状晶体矿物成分仍为文石。电子探针分析显示(表 1), 其 SrCO_3 含量变化于 0.89 至 1.00mol 数, 平均为 0.95mol 数。其它如低镁高钠的地球化学特征完全与现代文石质珊瑚的化学成分一致(表 1)。这表明造礁珊瑚的文石针粗化作用只改变珊瑚的组构。合恩上升礁中珊瑚文石针粗化现象并不十分普遍, 并非文石质珊瑚向方解石转化过程中必经之过程。

4. 溶解作用

合恩上升礁中珊瑚骨骼的溶解十分普遍。在野外, 珊瑚礁阶地常呈壮观的喀斯特地貌, 其特征与福克等人(1973)描述的克曼岛(Cayman)上的“植物喀斯特”类似。由于与珊瑚骨架伴生的生物碎屑细组分更易石化, 转化成方解石, 所以露头上珊瑚骨骼常呈白垩, 或完全溶解淋滤, 形成溶蚀坑。薄片观察发现, 大多数珊瑚骨骼的溶解始于其钙化中心, 逐渐向外扩张, 形成溶孔和溶沟。次生溶孔少被胶结物充填, 大多仍保持为空洞。一些珊瑚骨骼的溶解也首先沿其隔壁或孔隙表面进行, 然后逐渐向内扩展, 其钙化中心保持不变。

合恩晚第四纪珊瑚礁中选择溶解现象十分明显。岩石薄片常观察到珊瑚骨骼文石针部分或全部被溶走, 而生长于其上的文石针胶结物或镁方解石胶结物环边却保持下来(图版 II, 3)。

5. 胶结作用

合恩晚第四纪上升礁中造礁珊瑚的原生体腔孔、生物钻孔和溶蚀孔洞等次生孔隙常被胶结物填满或部分充填。对胶结物的矿物成分和组构特征的分析可知,合恩珊瑚礁经历了广泛的海水和大气淡水成岩环境的胶结作用。

(1) 微晶胶结物

微晶胶结物在合恩造礁珊瑚孔隙中广泛分布,以粒径小($<4\mu\text{m}$)、均一、不含或极少含粉砂级生物碎屑为特征(图版1, 5, II, 3)。根据其矿物成分、岩石学和地球化学特征,合恩造礁珊瑚孔隙中的微晶胶结物可分成三种:高镁方解石、文石和方解石微晶胶结物。

表1 上升礁造礁珊瑚及填隙物的地球化学特征

Table 1 Geochemical features of corals in the Huon raised reefs

	Ca	Sr	Fe	Mg	Na	K
1. 全新世文石质珊瑚	97.00	0.97	nd	nd	1.96	0.04
	96.47 - 97.19	0.94 - 1.01			1.80 - 2.25	0 - 0.07
2. 更新世文石质珊瑚	97.55	0.99	0.03	nd	1.25	0.03
	96.69 - 98.40	0.83 - 1.36	0 - 0.18		0 - 2.30	0 - 0.15
3. 文石针粗化珊瑚	97.10	0.95	nd	nd	1.90	0.05
	96.94 - 97.44	0.89 - 1.00			1.62 - 2.08	0 - 0.12
4. 新生变形方解石质珊瑚	99.05	0.20	nd	0.47	0.27	0.01
	97.22 - 100	0 - 0.44		0 - 1.84	0 - 2.45	0 - 0.15
5. 全新世镁方解石微晶胶结物	83.98	0.26	0.39	14.40	0.87	0.21
	81.24 - 87.13	0.09 - 0.45	0.11 - 0.69	10.51 - 16.84	0.43 - 1.55	0 - 0.53
6. 全新世文石微晶胶结物	97.66	0.97	nd	nd	1.34	0.02
	97.18 - 98.13	0.94 - 1.00			0.82 - 1.85	0 - 0.03
7. 更新世文石微晶胶结物	98.27	0.83	0.43	nd	0.59	0.02
	97.18 - 98.79	0.58 - 1.04	0 - 1.10		0.28 - 1.85	0 - 0.06
8. 更新世方解石微晶胶结物	97.96	0.12	0.36	1.46	0.06	0.01
	95.91 - 99.95	0 - 0.45	0 - 2.28	0.20 - 5.50	0 - 0.66	0.03 - 0.13
9. 全新世文石针胶结物	98.11	1.19	nd	nd	0.70	nd
	97.85 - 98.27	1.02 - 1.41			0.66 - 0.74	
10. 更新世文石针胶结物	98.12	1.04	nd	nd	0.81	0.01
	96.79 - 99.13	0.73 - 1.38			0.20 - 2.12	0 - 0.08
11. 菱形镁方解石胶结物	95.76	0.09	nd	4.18	nd	nd
	94.51 - 96.52	0 - 0.14		3.37 - 5.47		
12. 新生变形方解石扇胶结物	98.92	0.47	0.02	0.53	0.05	nd
	98.33 - 99.64	0.10 - 1.04	0 - 0.12	0 - 2.11	0 - 0.28	
13. 等轴粒状方解石胶结物	99.60	0.08	nd	0.37	nd	nd
	98.20 - 99.96	0.04 - 0.12		0 - 1.72		
14. 放射纤状方解石胶结物	99.01	0.08	nd	0.89	0.01	nd
	95.33 - 100	0 - 0.23		0 - 4.56	0 - 0.15	

注: 1. 以上值均为摩尔百分数, 为 17 个样品约 270 个测定值综合。2. 表中值分子为平均摩尔百分数, 分母为变化范围。3. nd 为小于检测含量。4. Mn 含量也被测, 但各组分的 Mn 含量均低于检测范围, 故略去。

高镁方解石微晶胶结物仅出现于全新世样品中. 透射光下它们呈深褐色, 粒径非常均一. 常以直径为 20—60 μm 的球形或半球形聚合体出现. 球心以小于 4 μm 的它形微晶构成核, 外围以 5—10 μm 的菱形镁方解石亮晶. 电子探针分析表明其 MgCO_3 含量变化于 10—16mol 数, 平均值为 14.40mol 数 (表 1). 与世界上其它礁区的镁方解石微晶胶结物的镁含量相似. 珊瑚孔隙中的镁方解石微晶胶结物曾被描述为粪球粒、钙藻的丝状体和生物碎屑颗粒. Macintyre (1976) 等人以充分的证据论述了它们的海底沉淀成因, 表明它们是海底胶结物的一种特殊形式. 其球状组构中核和外围晶体的双峰构造确定其属两个沉积阶段的结果.

文石微晶胶结物在全新世和更新世样品中均有发现. 它们透射光下色较暗, 均匀分布, 少以球粒的形式出现, 常以文石针胶结物伴生. 全新世样品中文石微晶胶结物以高锶 (平均 SrCO_3 含量为 0.97mol, 变化范围 0.94—1.00mol)、高钠 (平均 1.34mol) 和低镁 (低于 500ppm) 为特征, 表明其海水环境成因. 与之相比, 更新世样品中文石微晶胶结物含相对更多的 Ca 和较少的 Sr (表 1). 虽然在距今 124, 000 年前阶地的珊瑚样品中还发现有文石微晶胶结物, 但其分布并不广泛. 在更新世样品中普遍出现的是低镁方解石微晶胶结物. 其组构与高镁方解石无大区别, 也常呈球粒出现 (图版 I, 6), 但其外图为自形的方解石亮晶胶结物. 因溶解—充填作用, 方解石微晶常与粗粒的方解石胶结物伴生, 且多位于其下, 成为基底. 从方解石微晶胶结物的组构、相对较高的镁含量 (平均 1.46mol MgCO_3 , 变化于 0.20—5.50mol 之间) 和低锶含量 (平均 0.12mol SrCO_3) 等岩石学的地于化学特征推断, 它们主在来源于海水环境的镁方解石微晶, 在大气淡水作用下镁离子析出, 转化成方解石.

(2) 文石针胶结物

针状文石胶结物是珊瑚礁中最普遍的海底胶结物之一. 针状胶结物等厚环边在合恩阶地里现代珊瑚、全新世和更新世珊瑚孔隙中广泛出现. 针状晶体通常长 40 μm , 宽 5 μm , 共轴生长于珊瑚骨骼之上, 呈一等厚环边围绕于珊瑚孔隙表面 (图版 I, 7、8). 其晶体的针状构造、费格耳溶液染色变黑以及高锶 (平均含 1.19mol SrCO_3), 高钠 (平均 0.70mol) 和低镁 (低于 500ppm) 的地球化学特征证实了它们的文石矿物成分和海水形成环境 (表 1). 它们形成极早, 在活珊瑚有机组织之下的孔隙时即有出现. 它们比珊瑚骨骼的文石针更稳定. 常常, 它们赖以生长的珊瑚基底已完全溶走或新生变形转化成方解石, 文石针环边胶结物的矿物成分和组构仍保持不变 (图版 I, 8). 文石针胶结物被亮晶方解石交代的现象也可见到. 这时, 它们的针状组构被块状方解石替代, 但仍可见原始针状结构的残痕. 虽然在几十万年的珊瑚孔隙中仍有文石针胶结物保存, 但一般趋势为其含量随样品的年代增加而减少. 文石针环边胶结物的保存程度与珊瑚底质的成岩转化程度有关. 在采于高构造上升速率、弱成岩转变的堪扎努洼 (Kanzarua) 和宽布剖面珊瑚样品中, 文石针胶结物广泛分布, 但在低构造上升速率和强成岩转化的格土洼珊瑚中, 未见文石针胶结物存在, 仅见其残余结构.

另一类针状胶结物在三条剖面的珊瑚样品中均有发现. 它们由众多的针状晶体构成, 结核于珊瑚孔隙表面一点, 幅散式向外生长, 形成松散聚集的扇状晶体簇 (图版 II, 1、2). 构成扇体的单个针状晶体一般长 100—200 μm , 宽 1—3 μm . 透射光下扇状胶结物呈淡褐色, 在珊瑚孔隙中常以悬挂胶结物的形式出现, 电镜扫描观察揭示其曾经历溶解. 扇胶结物常互相透置生长, 它们也生长于其它底质上, 如珊瑚孔隙表面, 微晶胶结物等. 薄片染色显示, 全新世珊瑚中扇状胶结物矿物成分为文石, 偏光镜下呈波状消光, 而更新世珊瑚中胶结

物扇为方解石, 针状束为块状消光. 电子探针分析测得其锶含量普遍高且变化大, 平均为 0.47molSrCO_3 , 变化于 $0.10\text{—}1.04\text{mol}$ 之间. 从其矿物成分的演化、微量元素分布特征以及悬挂性质和定向性, 笔者推断此类扇状胶结物是海水渗流带扇形针状文石胶结物, 随后在淡水环境新生变形转化形成.

(3) 菱形镁方解石胶结物

合恩上升礁中菱形镁方解石胶结物多呈原约 $100\mu\text{m}$ 的环边围绕珊瑚骨骼周边 (图版 II, 3、4). 其晶形极好, 干净透明, 呈偏三角面菱形晶. 晶体长 $10\text{—}50\mu\text{m}$, 宽 $5\text{—}10\mu\text{m}$, 有的沿 C 轴延伸生长而成叶状. 一些晶体因溶蚀之故变为纯圆, 菱角消失, 但仍保持其菱面晶形状. 电子探针研究表明其碳酸镁含量为 $3.37\text{—}5.47\text{mol}$, 平均为 4.18mol (表 1), 低于其它珊瑚礁区镁方解石胶结物内碳酸镁的含量 (Milliman, 1974). 菱形镁方解石胶结物在所分析的合恩造礁珊瑚中分布并不广泛, 它们仅出现在全新世样品和成岩程度偏低的堪扎努洼剖面样品中. 这大概与合恩阶地迅速构造上升, 珊瑚经历了广泛的大气淡水成岩变化有关.

(4) 亮晶方解石胶结物

亮晶方解石胶结物是合恩晚第四纪礁珊瑚孔隙中最常见的胶结物类型. 根据其组构、分布和地球化学特征, 它们可分成两类:

一类呈等轴粒状, 晶体干净透明, 或迭覆于文石针环边胶结物 (图版 I, 8), 或直接沉淀于珊瑚孔隙表面 (图版 II, 5). 其粒径在同一孔隙中普遍均一, 变化于 $50\mu\text{m}$ 至 $1000\mu\text{m}$. 等轴粒状亮晶方解石胶结物或填满或部分充填珊瑚孔隙. 一些呈等厚边沿孔隙表面生长, 但更多在在孔隙壁狭窄处呈接触式生长. 虽然此类胶结物也存在于某些文石质珊瑚样品中, 但其含量倾向于随珊瑚转化成方解石的程度而增加. 它们以低 Sr (平均含 0.08molSrCO_3), 低镁 (平均含 0.37molMgCO_3) 和低钠 (小于 250ppm), 表明其从淡水直接沉淀的成因. 在已新生变形转化的珊瑚样品中, 绝大多数等轴粒状方解石胶结物呈选择组构嵌晶分布, 仅极少量呈切割嵌晶形式. 这与合恩礁以大气淡水渗流带成岩作用为主相平.

第二类亮晶方解石胶结物通常与微晶胶结物或生物碎屑填隙物伴生, 呈放射纤状, 长宽比约为 $3:1$. 它们也干净透明, 少含包裹体, 但晶体界面弯曲, 甚至呈缝合线接触. 晶体大小变化较大, 通常从孔隙表面或微晶胶结物向外粒径增加, 其长度变化于 $50\text{—}1000\mu\text{m}$ 之间 (图版 II, 6). 放射纤状亮晶方解石胶结物的微量元素含量变化较大 (表 1), 但通常比等轴粒状方解石胶结物含较多的镁 (平均含 0.89molMgCO_3). 这大概因它们更靠近微晶胶结物和生物碎屑填隙物之故.

6. 新生变形

新生变形转化是合恩上升礁中文石质造礁珊瑚经历的最广泛、最重要的成岩变化. 岩石学研究表明, 现今为方解石的珊瑚样品几乎在转化过程中都只经历了新生变形, 仅局部有溶解-充填现象.

珊瑚骨骼新生变形的方解石晶体呈褐色, 表面看去很“脏”, 易与干净透明的方解石胶结物区别. 其晶体变化较大, 但大多在 0.5 至 1mm 粒级, 最大的新生变形亮晶可达数毫米. 粒径变化甚至在同一薄片中也十分明显. 另一方面, 新生变形亮晶的大小似乎与珊瑚属种, 即与珊瑚的微细结构有关. 粗大多孔的如扁脑珊瑚、蜂巢珊瑚通常新生变形后产生较粗的方解石晶体; 而细小致密的种属如滨珊瑚和鹿角珊瑚, 转化后一般形成较小的晶体. 新生变形方

解石晶体间边界通常弯曲, 或呈缝合线接触(图版 II, 7)。在合恩礁中, 转化的珊瑚骨骼大多与胶结物呈选择组构嵌晶形式(图版 II, 5), 而少见切割嵌晶。并且, 常见珊瑚骨骼首先沿钙化中心溶解, 产生溶孔, 余下部分新生变形转化成粗大的方解石晶体。之后, 方解石胶结物充填溶孔, 悬浮于大的新生变形晶体之中, 呈两个世代现象(图版 II, 8)。在这种情况下, 第一世代为方解石胶结物, 占据珊瑚钙化中心位置, 而第二世代新生变形方解石则保存珊瑚骨骼结构。因此, 珊瑚新生变形转化过程中方解石晶体的“两个世代”是因珊瑚的不同部位具不同微细结构, 从而对成岩变化的反应不同样所致, 而非孔隙水地球化学成分变化引起。

合恩礁珊瑚骨骼新生变形方解石中锶含量高且变化大。平均含 SrCO_3 0.2mol, 变化于 0.04—0.44mol 之间。与合恩礁中文石质珊瑚极其微量的 Mg 含量相比, 珊瑚新生变形后镁明显增加, MgCO_3 含量平均达 0.47mol (表 1)。综合以上珊瑚样品的岩石学和地球化学特征可知, 所分析的合恩礁珊瑚的新生变形主要发生在大气淡水渗流带。

三、造礁珊瑚成岩历史

合恩晚第四纪上升礁珊瑚的成岩作用和产物清楚地表现出 4 个成岩系, 反映了该礁的成岩历史(图 2)。

1. 海水潜流带成岩

珊瑚礁总是首先生长、发育于温度适宜、日照充足、水动力强的海水潜流带。合恩礁中造礁珊瑚在此带已开始各种成岩变化, 其成岩系列由全新世样品中文石和镁方解石微晶胶结物, 生物钻孔及生物碎屑填隙和更新世样品中保存的文石针和菱形镁方解石环边胶结物表现出来。粒径均一的镁方解石微晶球粒胶结物反映其形成于长期悬浮状态的环境条件下, 呈环边生长的文石针和菱形镁方解石胶结物也代表了海水充满孔隙的环境特征。成岩带内生物钻孔发育, 钻孔多被生物碎屑基质和海水潜流带胶结物充填, 其微环境控制胶结物的形成十分明显。文石和镁方解石胶结物常分别出现在邻近的孔隙, 其它孔隙无胶结物形成的现象并不少见(图版 I, 5)。在大气淡水环境中, 文石针环边胶结物趋于保存其矿物成分和组构, 镁方解石微晶和菱形胶结物则倾向于失去镁, 转化成方解石。合恩礁样中广泛出现和保存的文石针及菱形镁方解石环边胶结物、微晶胶结物、生物钻孔及基质充填表明海水潜流带成岩是该礁成岩历史中重要的一环。

2. 海水渗流带成岩

合恩半岛位于剧烈构造上升地区。珊瑚礁在形成过程中一旦海平面上升速度减慢或趋于稳定, 它们便被抬升进入海水渗流带。该带主要的成岩作用是蠕虫引起的生物钻孔, 珊瑚原生和次生孔隙内生物碎屑充填以及定向性极佳的文石针扇的胶结作用。重复进行的生物钻孔, 基质充填和胶结物沉淀极大地改造了珊瑚骨架。文石针扇胶结物一致的定向性似乎是重力胶结的结果, 反映出该带内珊瑚孔隙未饱含海水。造礁珊瑚骨骼文石针的粗化作用似乎也出现在此阶段, 因现今位于海水渗流带的珊瑚样品有粗化作用。迅速的构造抬升和本区小潮差影响使合恩阶地在海水渗流带持续时间不长, 随即进入大气淡水成岩环境, 遭受更广泛的成岩变化。

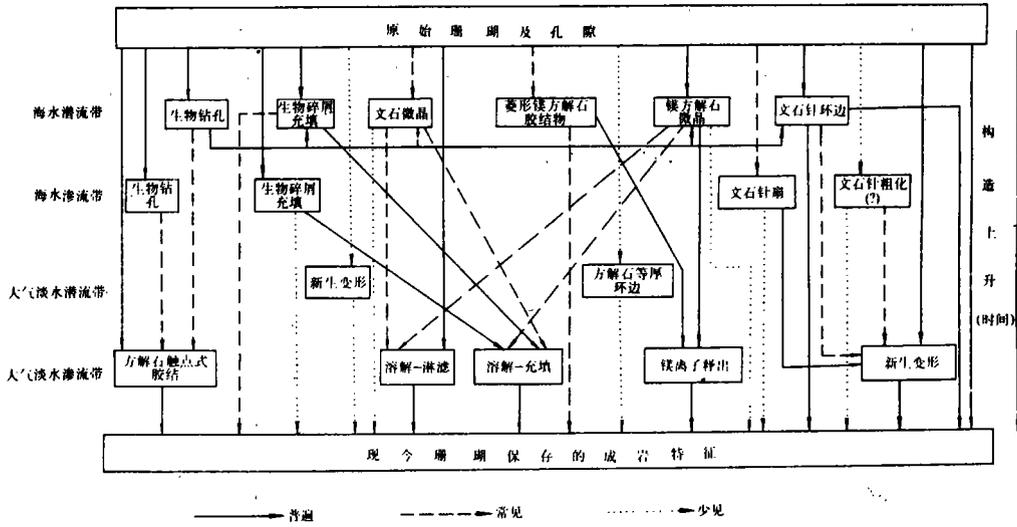


图2 合恩晚第四纪上升礁造礁珊瑚成岩系列

Fig.2 Diagenetic sequence of reef coral in the Huon Peninsula

3.大气淡水潜流带成岩

反映合恩珊瑚礁经历淡水潜流带成岩作用的岩石学特征有新生变形珊瑚中的切割嵌晶胶结物，径大透明含 Sr 低 ($Sr < 1000\text{ppm}$) 的新生变形方解石晶体，以及环绕珊瑚孔隙表面的等厚粒状方解石胶结物。粒状方解石胶结物环边在文石质珊瑚中也常出现，表明其形成于现珊瑚骨骼新生变形转化之前，而切割嵌晶方解石胶结物与珊瑚新生变形同期形成。总体讲来，所分析的合恩珊瑚样品中，新生变形方解石晶体普遍表面脏，Sr 含量高，缺乏切割嵌晶结构和等厚环边方解石胶结物含量少，表明合恩礁阶地上部并未长期处于淡水潜流环境，这由本区剧烈的构造上升所致。

合恩礁中淡水潜流带的成岩特征常与淡水渗流带的特征同时出现，甚至在同一薄片中也观察到 (图版 II, 5)。从该礁的总体成岩历史看，这些潜流带成岩很可能是局部环境控制因素，如与骨架伴生的致密沉积物产生的渗透屏障，在淡水渗流环境里作用，故其应为“渗流环境中的 (局部) 潜流透镜体带”成岩产物。

4.大气淡水渗流带成岩

合恩上升礁造礁珊瑚强烈的溶解作用是该带最重要的成岩变化之一。溶解作用产生了野外所见壮观的喀斯特地貌；溶解作用使珊瑚骨骼白堊化和淋滤，形成众多的次生孔隙。以前海水潜流带和渗流带里充填于孔隙内的沉积物和胶结物也遭溶解淋滤。当溶解作用沿珊瑚的微细孔隙进行时，孔隙水很快饱和 CaCO_3 ，并“就地”沉淀方解石，产生新生变形。新生变形方解石绝大多数呈选择组构嵌晶型，文石残余多，铈含量高。部分溶走的 CaCO_3 加入孔隙水，使之逐渐饱和 CaCO_3 ，最后呈方解石胶结物在孔隙狭窄处沉淀下来。海水潜流带形成的文石针环边和海水渗流带内的文石针扇均受到新生变形作用的影响。由于结构上的差异，文石针扇变化更大。海水环境里的镁方解石微晶及菱形环边胶结物中镁离子的释出也出

现了此带。上述特征表明, 大气淡水渗流带成岩是合恩礁上部造礁珊瑚成岩历史中最重要的阶段。

收稿日期: 1989年2月2日

参 考 文 献

- (1) Bloom A.L., Broecker W.S., Chappell J., Matthews R.K. and Mesolella, K.J., 1974, *Quat. Res.*, V.4, p.185-205.
- (2) Bathurst R.G.C., 1976, *Carbonate Sediments and their Diagenesis*. Elsevier, Amsterdam, 658p.
- (3) Chappell J., 1974, *Geol.Soc.Amer.Bull.*, V.85, p.553-570.
- (4) Constantz B.R., 1986, The primary surface area of corals and variations in their susceptibility to diagenesis, In: Schroeder, J.H., and Purser, B.H. (eds), *Reef Diagenesis*, Springer-Verlag Berlin, p.53-76.
- (5) James N.P., 1974, *J.Paleontol.*, V.48, p.785-799.
- (6) Longman M.W., 1980, *A.A.P.G. Bull.*, V.64, p.461-487.
- (7) Macintyre I.G., 1976, *J.Sed.Petrol.*, V.47, p.503-516.
- (8) Marshall J., 1986, Regional distribution of submarine cements within an epicontinental reef system: central Great Barrier Reef, Australia, In: Schroeder, J.H., and Purser, B.H. (eds), *Reef Diagenesis*, Springer-Verlag Berlin, p.8-26.
- (9) Matthews R.K., 1968, *J.Sed.Petrol.*, V.38, p.1110-1119.
- (10) Pingitore N.E., 1976, *J.Sed.Petrol.*, V.46, p.985-1006.
- (11) Schlanger S.O., 1963, *U.S.Geol.Surv.Prof.Paper*, 260 BB, p.991-1038.
- (12) Schubert C., 1977, Pleistocene Marine terraces of La Blanquilla Island, Venezuela, and their diagenesis, *Proc.3rd Intern.Coral Reef Symp.*, V.2, Miami, p.149-154.
- (13) Shinn E.A., 1969, *Sedimentology*, V.12, p.109-144.
- (14) Tebbutt G.E., 1975, *AAPG Studies in Geol.* V.2, p.297-331.

Diagenetic Histories of Reef Corals in the Late Quaternary Huon Raised Coral Reefs, Papua New Guinea

Z. R. Zhu

J. Chappell

(Department of Biogeography and Geomorphology, Australian
National University, Australia)

J. Marshall

(Division of Marine Geosciences and Petroleum Geology, Bureau
of Mineral Resources, Australia)

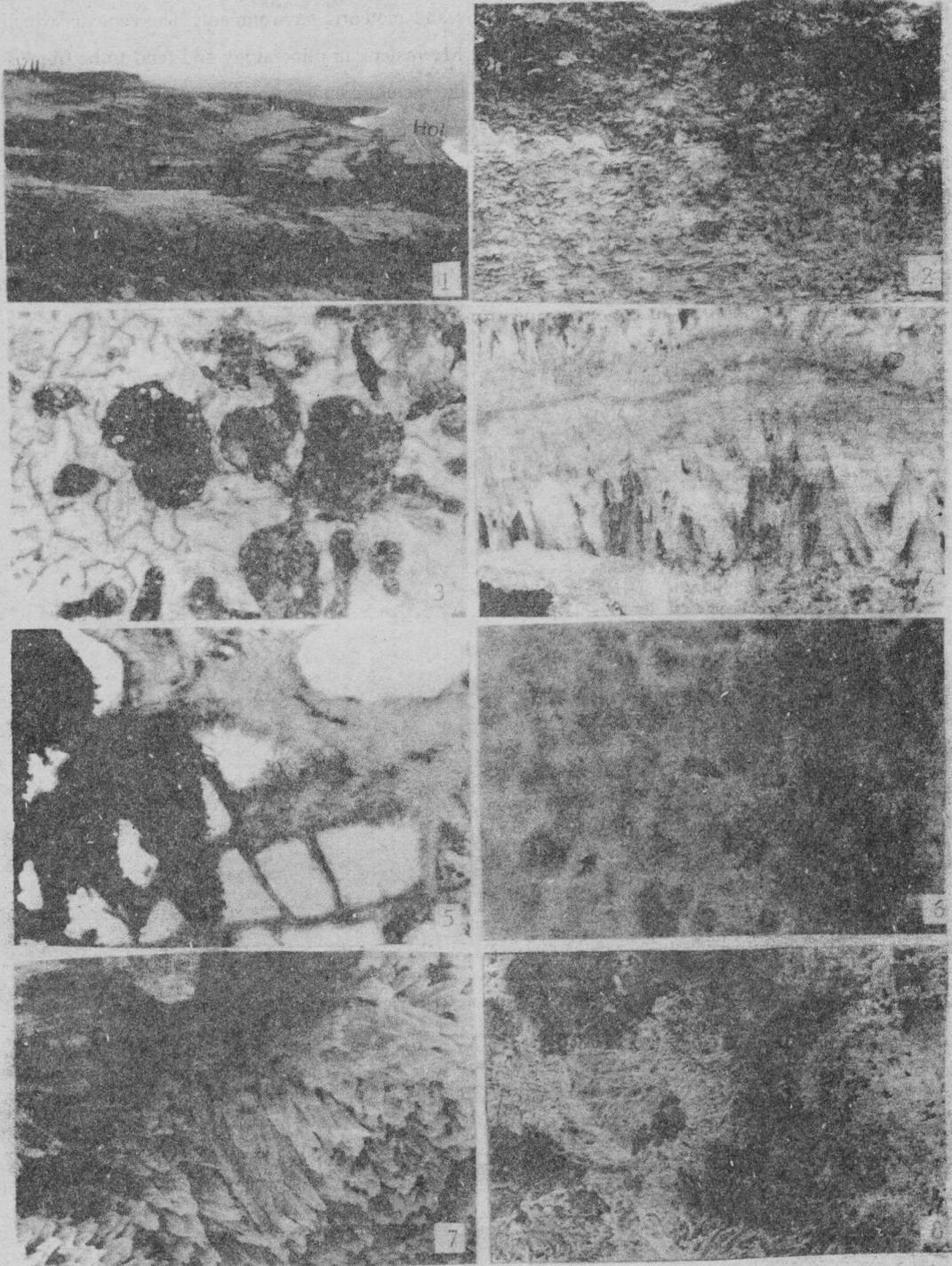
Abstract

A series of late Quaternary raised coral reef terraces, mainly consisting of Indo-Pacific shallow water reef-corals and reef limestones, occur along the northeast coast of the Huon Peninsula, Papua New Guinea. The diagenetic alterations of the reef-corals and internal sediments reflect the diagenetic history of the Huon reefs are described for the first time through field investigations, petrologic, and geochemical analyses of samples taken along three transects representing different environmental conditions. The results indicate that rapid tectonic uplift at the Huon Peninsula not only has a great effect on the formation and development of the coral reef terraces, but also plays an important part in the diagenetic history.

Reef-corals in the Huon reefs have undergone marine phreatic, marine vadose, meteoric phreatic and meteoric vadose diagenetic alterations. Owing to the rapid tectonic uplift, the most significant diagenesis occurs in marine phreatic and meteoric vadose environments. The dominant diagenetic alterations experienced by the reef-corals are boring, sedimentation of internal sediments, coarsening of fibrous aragonite coral skeletons (formation of secondary aragonite), dissolution and neomorphic transformation of corals, and cementation of varied mineralogical and crystal fabric cements. Borings and deposition of internal sediments occur mainly in the marine environment and greatly modify the coral framework, while dissolution and neomorphic transformation of coral skeletons are predominant in meteoric diagenetic environments. The coral reef terraces present extensively karst morphology. Most samples examined show that dissolution of coral skeleton begins at the centres of trabeculae, and that any secondary pores produced are either filled by sparry calcite cement or remain empty. Selective dissolution of different components of corals is obvious. It is often shown that with the coral skeleton dissolved, the rim of aragonite fibrous cement, syntaxially growing on them is preserved. This suggests that coral aragonite fibres are relatively unstable compared to inorganically precipitated aragonite. Neomorphic transformation of coral skeletons in the Huon reefs to calcite is the most widespread diagenetic alteration. Almost all coral skeletons in samples which are now calcite have only experienced neomorphic alteration during their transformation. Very few corals have undergone transformation to calcite as a result of total leaching of the coral skeleton and later precipitation

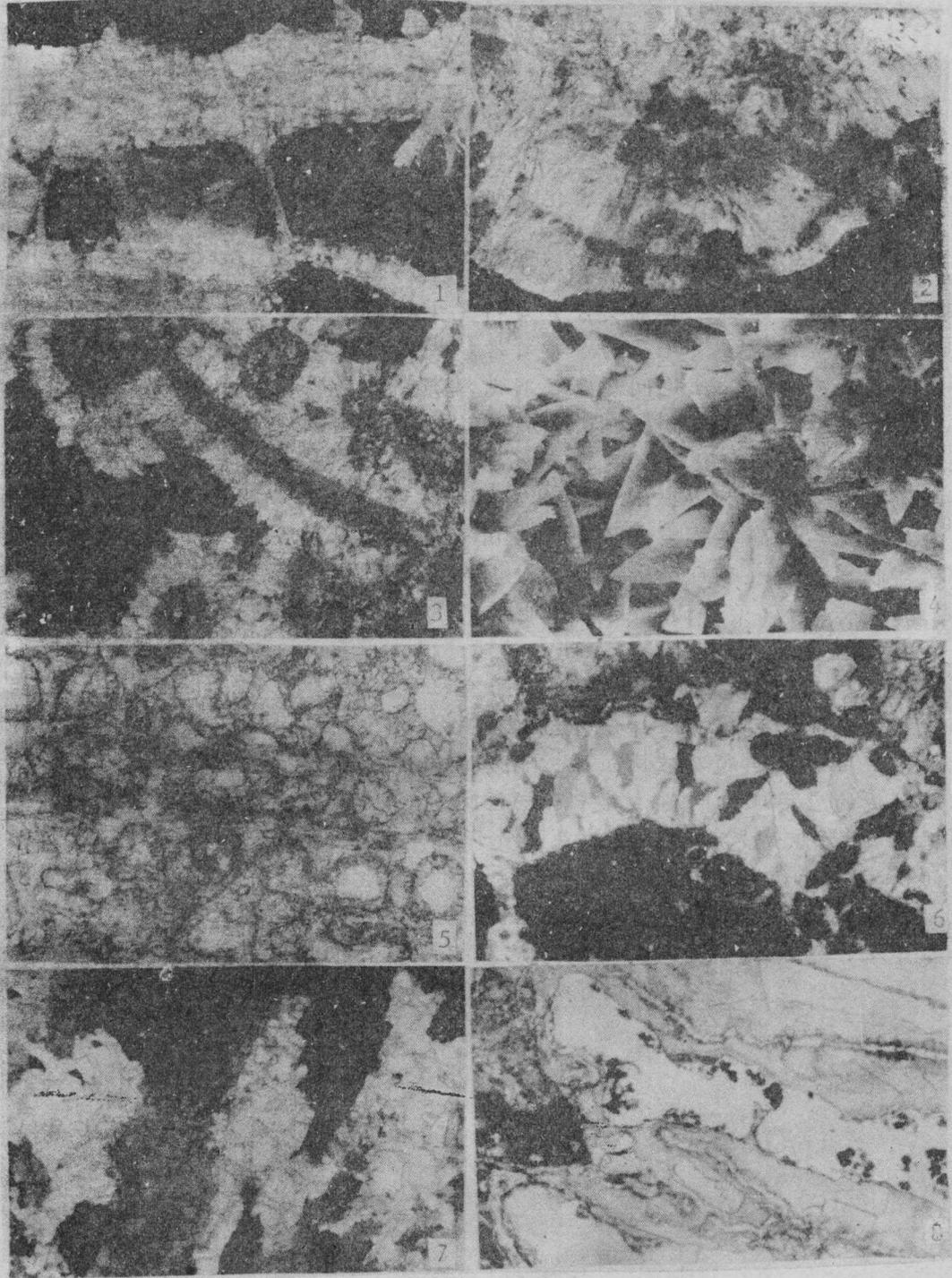
of calcite cement. Cementation occurs in both marine and meteoric environments. The cements which are formed in the marine environment are aragonite and Mg-calcite in mineralogy and tend to be fibrous and rhombic in crystal structures, while those formed in the meteoric environment are all calcite in mineralogy and are commonly blocky. Coarsening of coral aragonite fibers only changes their fabrics, not the mineralogical and chemical composition. The process causing the coarsening of the coral aragonite fibres is unknown.

Geochemical work shows that diagenesis operates in a chemically open system. Diagenetic products from the marine environment are characterised by relatively higher strontium and sodium contents, and those from meteoric environments by lower contents of strontium and sodium, and variable magnesium.



图版 I

1. 合恩上升礁堪扎努洼剖面南眺. 全新世阶地 (Hol.) 海拔 15m, 12.4 万年前阶地 (VII) 为 330m. 2. 克拉萨罗 (Kilasairo) 全新世礁露头. 原地生长的块状和板状造礁珊瑚构成的礁骨架保存完好. 露头高 8m. 3. 生物钻孔及生物碎屑充填. $\times 20$, +, 286, 全新世. 4. 珊瑚骨骼文石针粗化产生于其晶簇边缘, 左下为新生变形方解石化珊瑚. $\times 50$, +, J-372, 距今 8.1 万年. 5. 镁方解石微晶球粒和针状文石胶结物分处不同的孔隙, 微环境控制不同矿物成分的胶结物沉淀. $\times 20$, -, 206, 距今 5.9 万年. 6. 珊瑚孔隙内的微晶球粒胶结物. 现今矿物成分为方解石. $\times 120$, +, 206, 距今 5.9 万年. 7. 文石针胶结物. 电镜扫描照片, $\times 540$, 287a, 全新世. 8. 文石针胶对物环绕已完全新生变形转化成方解石的珊瑚骨骼. 箭头所指为后期块状方解石胶结物充填. 电镜扫描照片. $\times 150$, 1536, 距今 12.4 万年.



图版 II

1.文石针扇胶结构具波状消光. $\times 50, +, 13$, 现代. 2.新生变形扇状胶结构, 其针状束具块状消光. $\times 140, +, 270$, 距今 5.9 万年. 3.镁方解石微晶覆于菱形镁方解石胶结构之上. 珊瑚骨骼被选择性溶解. $\times 50, +, 231$, 距今 8.1 万年. 4.菱形镁方解石胶结构. 扫描电镜照片, $\times 1700, 287a$, 全新世. 5.等轴粒状方解石胶结构和选择组构嵌晶型新生变形的珊瑚骨骼. $\times 50, -, 213$, 距今 5.9 万年. 6.放射纤状方解石胶结构紧邻泥晶填充物. 胶结构向孔隙中部加粗. $\times 20, +, 369$, 距今 12.4 万年. 7.切割嵌晶型新生变形, 珊瑚骨骼形态清晰可见. $\times 20, +, 387$, 距今 41 万年. 8.珊瑚骨骼新生变形的两个世代现象, 中为干净透明的亮晶胶结构, 反映了珊瑚的钙化中心. $\times 56, -, 1586$, 距今 17.3 万年.