

# 珊瑚礁对赤潮的响应与记录研究进展

陈天然 余克服 林志芬 陈特固

(中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

**摘要:**大量研究证实,对环境变化非常敏感的珊瑚能够记录越来越多的环境信息。由于浮游生物过度繁殖而引发的赤潮对珊瑚礁生态系统有明显的影响。赤潮爆发时,赤潮区海水 pH 值和铁、锰含量异常,赤潮生物覆盖海水表面,阻碍珊瑚共生藻的光合作用;后期赤潮生物大量死亡,还会大量消耗溶解氧,排放有害化学物质,导致珊瑚死亡。理论上讲,幸存的珊瑚在其骨骼中能够记录这些环境异常过程。通过采用硼同位素法、铁锰微量元素法和生长特征观测法等方法,研究珊瑚骨骼的化学特征,从而可能揭示过去赤潮发生的规律。目前,关于珊瑚礁对赤潮的生态响应和记录研究仍处于探索之中,如果能够结合赤潮的机理、特征、生态影响以及珊瑚本身的特性而成功实现这项研究的话,则不仅对珊瑚礁环境记录研究领域是个重要的补充,而且还提供了一把记录赤潮的新钥匙。

**关键词:**珊瑚礁 赤潮 生态响应 记录

中图分类号: P736; X145

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)06-0523-07

## The advances in the study of the response of coral reefs to red tides and the possible record of historical red tides in reef corals

CHEN Tian-ran, YU Ke-fu, LIN Zhi-fen and CHEN Te-gu

(South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

**Abstract:** Being sensitive to surrounding environmental changes, reef corals have proved to be capable of recording such environmental information as temperature, salinity and pollution. Red tides, visible 'blooms' of phytoplankton, badly affect reef ecosystems. During red tides, alkalinity (or pH value), dissolved oxygen and concentration of iron and manganese in sea water are abnormal. Furthermore, the algae accumulate in large quantities to discolor the water, shade submerged reefs, block the photosynthesis of zooxanthellae, the symbiosis algae in polyps, and cause oxygen depletion when dead algae begin to decompose. The changes may lead to the extensive death of reef. In theory, the reefs that survive the red tides can record these changes in water. We can analyze the geochemical changes in coral skeletons such as boron isotope and trace elements like iron and manganese and probe into characteristics of corals so as to investigate the historical red tides. At present, the researchers on the response of coral reef to red tides and the record of historical red tides in reef corals are only in the beginning stages. The combination of the mechanism, characteristics and ecological impacts of the red tides with the characteristics of corals can not only help the study of coral reef environment record but also open a new way to record historical red tides.

收稿日期: 2006-04-11; 修订日期: 2006-07-20

基金项目: 中国科学院创新项目(KZCX3-SW-220); 国家自然科学基金重点项目(40231009); 科技部重大基础研究前期专项(2002CCA02700)

作者简介: 陈天然(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事珊瑚礁生态与环境记录方面的研究, E-mail: ctrknight@scsio.ac.cn

**Key word:** coral reef; red tide; ecological response; record

20 世纪中期以来,赤潮在一些发达国家和地区沿海水域频频发生,到了 80 年代,赤潮也开始在中国等发展中国家沿海肆虐。赤潮的频繁发生严重影响了我国沿海经济的发展,如 1998 年发生在深圳、香港、珠海水域的特大规模赤潮导致赤潮区养殖的鱼虾几乎全部死亡,直接经济损失达 4 亿元人民币(吕颂辉等 2005),每年因赤潮引起养殖的鱼虾贝类大量死亡而造成的经济损失达十几亿元(周名江等, 2001)。赤潮也破坏海洋生态系统平衡,如塔玛亚历山大藻等有毒藻种的毒素能使海洋生物生理失调或死亡。赤潮还危害人类健康,20 世纪 60 年代以来,我国因误食赤潮毒化的鱼、贝类而中毒的达 1 600 多人,死亡 30 多人(潘克厚等, 2004)。因此,赤潮已经成为我国沿海地区主要的海洋灾害之一。但是,目前国际上对赤潮发生的机理尚未完全清楚,赤潮的预警预报技术尚处于摸索阶段,因此对赤潮记录和监测的研究极其必要,它将有助于了解赤潮发生的机理、频率及其对海洋生态的影响等。

珊瑚礁是一种分布于热带海洋及部分温暖水域的重要的海洋生态资源。珊瑚礁的主体——珊瑚对环境变化敏感,骨骼具有年际界线清楚、年生长率大、连续生长时间长等特点,被证实能够很好地记录其生长水域的环境变化过程,是高分辨率环境记录的重要载体。由于珊瑚礁对环境要求非常严格(Wells, 1956),因此珊瑚礁对近年来频繁发生的赤潮的响应或者赤潮对珊瑚礁生态系统的影响自然成为人们关注的热点(Genin *et al.*, 1996; Abram *et al.*, 2003; Hoeksema *et al.*, 2004)。赤潮导致短时间尺度内海洋环境的巨大变化,理论上讲在赤潮发生区域的珊瑚骨骼中应该有明显的记录。本文根据国内外相关的文献总结赤潮对珊瑚礁生态系统的影响,分析珊瑚骨骼对历史赤潮的可能记录。

## 1 赤潮发生的机制和水化学特征

赤潮指由于海洋浮游生物的过度繁殖造成海水变色的现象(齐雨藻, 2003)。由于引起海水变色的赤潮藻(有时是原生动植物)不同,赤潮时海水的颜色也不尽相同,一般为红色。

### 1.1 赤潮发生机制

赤潮的爆发机理十分复杂,一般认为与海洋污

染、水文气象、孢囊形成等因素有关,但至今尚未有公认的解释。海洋污染方面,吕颂辉等(2005)认为赤潮生物的存在和水体污染(富营养化)是形成赤潮的主要原因。水文气象方面,龚强等(2004)以 1988 年 7~10 月辽东海域赤潮为例,分析了气象因素对赤潮全过程的影响,认为气温、降水、光照、风速等气象因素与赤潮的发生、发展和消亡有密切的关系,气象条件是诱发赤潮的关键因素。对孢囊研究方面,齐雨藻等(1997)通过对 1991 年 3 月发生的卡盾藻赤潮的研究并结合 1992 年在大鹏湾底泥中发现有海洋卡盾藻孢囊存在的事实,提出孢囊的萌芽、营养细胞的增殖和潮流的聚集作用构成了该次赤潮 3 个重要环节的结论。

目前一般认为,赤潮的爆发是生物因素(赤潮生物)、化学因素(营养盐等)和物理因素(水文气象条件)相互耦合的结果。Yang(2004)通过对 1998 年香港赤潮的研究,提出赤潮种 *Karenia digitata* 的大面积爆发是许多因素协同作用的结果,如水中营养元素、暖流的侵入等,其中非常令人注目的一点就是认为此次赤潮与厄尔尼诺事件有很强的关联。

### 1.2 赤潮的水化学特征

赤潮发生期间,赤潮区海水 pH 值、Fe、Mn、DO (dissolved oxygen 溶解氧)等水化学性质会发生一系列的变化:① pH 值升高。由于大量藻类光合作用,水体中 CO<sub>2</sub> 含量降低,导致海水 pH 值上升(可达 8.5 以上,有时甚至达到 9),例如对 2002 年 6 月 4 日至 13 日在珠江口赤湾至桂山岛一带海域发生的赤潮进行跟踪监测,赤潮发生期间 pH 值一直维持在 8.5 以上,超出海水二类水质标准(GB3097-1997)(朱小山等 2004)。另外,酸碱度的变化会导致海水中一些元素的化学变化,如硼同位素分馏(齐雨藻, 2003)。② 海水铁、锰元素含量异常。高素兰(1997)观察到,在赤潮出现之前,海水中铁和锰的浓度达到最大值,同时指出微量元素如 Fe 和 Mn 是赤潮形成的诱发因子,是诱发赤潮形成的关键。梁舜华等(1993)在 1990 年到 1993 年赤潮发生期间对盐田海域水质做了监测,结果表明,赤潮发生期间,水质锰的含量突然大幅度升高 1~4 倍,随着赤潮的消亡,锰含量急剧下降,恢复到赤潮以前的水平。铁、锰激发赤潮产生的机理目前还没有完全研究清楚,仅从现象来看,铁、锰元素与赤潮藻的爆发有明显的相关性,如秦

晓明等(1997)采用正交实验法研究了 N、P、Fe-EDTA 和 Mn 对锥状斯氏藻生长的影响。结果表明,Fe-EDTA 和 Mn 对该藻的生长有明显的促进作用。③ 溶解氧(DO)含量下降。在赤潮后期,随着赤潮生物大量死亡、分解,赤潮区域海水溶解氧含量急剧减少,一般可下降到 5 mg/L 左右(汤坤贤等,2004)。

## 2 赤潮的生态影响与珊瑚礁对赤潮的响应

赤潮的出现在局部海域打破了海洋生态系统的动态平衡,改变了其结构和功能,造成食物链的局部中断,使食物网动态(food-web dynamics)陷于混乱(Anderson,1997)。赤潮初期,水体因大量赤潮藻类的光合作用,会出现高叶绿素、高溶解氧、高 pH 值的情况,并且赤潮生物竞争性消耗水体中的营养物质。环境因素突然改变,致使某些海洋生物不能适应而影响其正常生长、发育、繁殖,最终结果是逃避或死亡(齐雨藻,2003)。赤潮中期,大量赤潮生物覆盖水面导致海水透光度下降,并且赤潮生物分泌或产生黏液附于鱼类等海洋动物的鳃上,妨碍呼吸,导致其窒息死亡,或者产生毒素,直接杀死其他海洋生物,如塔玛亚历山大藻对海洋鱼类、贝类、桡足类有明显的影响(周立红等,2002;邢小丽等,2003)。从理论上讲,赤潮毒素对珊瑚虫生理也应存在影响,但到目前为止,还没有该项研究的相关报道。赤潮后期,赤潮生物死亡后在分解过程中大量消耗水中氧气,并在缺氧条件下分解还会产生大量硫化氢和甲烷,进一步使水质恶化。因此,赤潮对珊瑚礁的生长发育是极其不利的。

珊瑚礁是有着极丰富的生物多样性和极高的生产力但又十分脆弱的生态系统,它对环境要求非常严格,如造礁珊瑚的生长必须要有充足的阳光;它只能生活在 27‰~40‰ 的盐度范围内,但最适宜的盐度是 36‰,造礁珊瑚最适宜的生长温度范围狭窄,在 25~29℃ 之间(Wells,1956)。赤潮期间由于大量赤潮生物漂浮在海面上,降低水体透明度,虫黄藻光合作用降低或停止,珊瑚可能会因此而死亡。此外,处在消失期的赤潮生物大量死亡并被分解,大量消耗水体中溶解氧,并产生其他有害气体,珊瑚礁生物大量因窒息而死亡。如 1997 年下半年,印度尼西亚苏门答腊岛发生的规模空前的森林大火释放了上万吨铁以及其他营养物质,并通过大气输送转入海洋,加上气候等其他环境因素,引发了规模巨大的

赤潮,赤潮生物死亡分解大量消耗水体中的氧气,造成明打威群岛附近绵延数百公里的珊瑚礁大面积窒息死亡(Abram *et al.*,2003)。

## 3 珊瑚骨骼对赤潮的记录

### 3.1 赤潮的历史记录

严格意义上讲,赤潮是一种自然现象,自古已有发生。我国最早的关于赤潮记录由费鸿年(1952)报道。赤潮记录自 20 世纪 70 年代的 11 起赤潮事件开始增加,80 年代上升至 75 起,从 1990 年到 2000 年共 278 起,2001 和 2002 年的赤潮发生次数都达到 70 起以上,2003 年、2004 年和 2005 年分别达到 119、96 和 82 起(吴玉霖等,2001;国家海洋局《中国海洋灾害公报》,1989~2005)。赤潮的记录有限,从目前的资料来看,对 90 年以前的记录呈现不连续性,并且记录的次数和规模含主观因素较多,90 年代开始,由于赤潮渐渐引起有关部门的重视,再加上监测设备的进步,关于赤潮的记录逐渐丰富和完整起来。但是,在此之前的大部分时间里,对赤潮的记录仍是空白,所以需要探讨赤潮环境记录的方法。已有学者从生物和地球化学等角度探求历史赤潮的环境记录(龚一鸣等,2002;徐杰等,2003),用珊瑚骨骼作为赤潮环境记录的载体目前还处于理论阶段。

### 3.2 珊瑚骨骼的环境记录特征

虽然珊瑚骨骼记录赤潮的研究目前还处于探索阶段,但是,目前确定可用珊瑚骨骼记录的环境信息较多,有温度、盐度、日照强度、海洋污染、降雨、上升流等等。珊瑚是记录环境变化极好的材料(Yu *et al.*,2005a),其根据是珊瑚对周围环境变化十分敏感,并且珊瑚骨骼能够很好地保持环境变化的信息、有很高的年生长率(可达 1~2 cm/年),珊瑚骨骼如树轮一样有清楚的年际界限、持续生长历史长(可达好几百年)、分布广(从热带到温带海域均有分布)、是高精度铀系定年的理想材料(Lough *et al.*,1997;Yu *et al.*,2005b),因此能够很好地记录过去环境变化的历史。

#### (1) 温度

目前,珊瑚骨骼 Sr/Ca、Mg/Ca、U/Ca 比值、 $\delta^{18}\text{O}$  和骨骼生长条带的宽窄等都能反映海水表面温度(sea surface temperature, SST)变化。

已经证实,除了在有上升流的海域,Sr/Ca 与 SST 有很好的相关性(Weber,1973;Beck *et al.*,1992;Villiers *et al.*,1994)。国内外学者对 Sr/Ca

温度计做了大量的研究,并建立了 Sr/Ca 与 SST 之间的回归方程(Damien *et al.*, 2001; 韦刚健等, 2004)。但是,不同学者建立的方程各不相同,还需要相互对比,寻找内部的联系。后来又发现,骨骼中 Mg/Ca (Mitsuguchi *et al.*, 1996)和 U/Ca (Min *et al.*, 1995)同样与 SST 存在相关性。但是, Mg/Ca、U/Ca 并不总是与 SST 保持高度相关(Quinn *et al.*, 2002),所以它们的应用没有 Sr/Ca 温度计广泛。

$\delta^{18}\text{O}$  受海水表面温度和海水表面盐度的双重影响(Yu *et al.*, 2005b)。在盐度变化小的区域,  $\delta^{18}\text{O}$  与 SST 有较好的相关性(Weber *et al.*, 1972)。在利用  $\delta^{18}\text{O}$  进行高分辨率气候记录研究方面,我国在雷州半岛和南沙群岛滨珊瑚研究中已有报道(余克服等, 1999-2001)。

Knutson 等(1972)用 X 射线照相的方法揭示了每年生长的珊瑚骨骼由高密度带和低密度带组成,反映在 X 射线照片上为黑白相间的条带。后来发现,珊瑚的生长速率受 SST 变化的影响, SST 较高时,生长带相对较宽,反之,则较窄(Weber *et al.*, 1975; 聂宝符等, 1997),于是根据逐年珊瑚生长带宽的变化,可以推算其对应年份水温的变化。

## (2) 盐度

珊瑚骨骼中 Sr/Ca 和  $\delta^{18}\text{O}$  可用来反映历史上海水表面盐度(sea surface salinity, SSS)的变化,如 Hendy 等(2002)通过检测大堡礁珊瑚骨骼中 Sr/Ca、U/Ca、 $\delta^{18}\text{O}$  记录末冰期太平洋热带海域 SSS 的变化。

## (3) 日照时数

Grottol(2000)指出碳同位素分馏主要受代谢作用的影响,在无上升流海域,  $\delta^{13}\text{C}$  可以作为太阳辐射变化的代用指标。我国也有学者对  $\delta^{13}\text{C}$  环境指示意义做过研究,余克服(1999)对影响造礁珊瑚骨骼  $\delta^{13}\text{C}$  的环境因素以及  $\delta^{13}\text{C}$  反映日照时数和 ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 方面做了探讨。

## (4) 污染

珊瑚骨骼能够记录海洋环境的重金属污染,原因在于骨骼对海水金属元素有富集的现象(Dodge *et al.*, 1984; Shen *et al.*, 1987)。用珊瑚记录海水污染状况在国内外均有报道,如:余克服等(2002)通过对 1976 到 1998 年扁脑珊瑚(*Platygyra*)骨骼中 Cu、Pb 和 Cd 含量的研究及其与观测记录的比较,分析了其年际变化与海洋环境指示意义,Runnalls 等(2003)通过监测珊瑚骨骼中 Cu、Zn、Sn、Pb 元素异常,评价一家精炼厂排出废水的环境影响。

## (5) 降雨

Iisdal(1984)第一次报道了大堡礁块状珊瑚骨骼在长波紫外线的照射下呈现黄-绿荧光带,并且指出条带的宽度和密度与降雨量和陆地径流量有很好的相关关系。

## (6) 上升流

珊瑚礁对上升流的记录可用珊瑚骨骼中 Cd/Ca 来实现。Shen 等(1987)通过检测珊瑚骨骼中 Cd/Ca 的变化,记录了加拉帕哥斯群岛历史上升流的变化。

## (7) 其他

还有其他一些有关珊瑚骨骼特性的应用:Wyn-dham 等(2004)用 LA-ICP-MS 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱)分析大堡礁珊瑚样品中稀土元素(REE),发现了 Nd/Yb 比值以及 Ce 含量季节性的周期循环,提出 REE 可以作为沿岸海水生物活性的代用指标。McCulloch 等(2003)用大堡礁滨珊瑚 Ba/Ca 比值评价了由 Burdekin 河带来的大量沉积物对大堡礁内的水质影响。此外,利用珊瑚礁记录海平面和地震、火山爆发等地质事件也有相关报道。

## 3.3 珊瑚对赤潮记录的可能性

珊瑚能记录温度、盐度、上升流等多种环境信息,因此,有人提出珊瑚记录赤潮的可能性(刘羿等, 2004)。赤潮发生时海水化学特征发生了显著变化,如 pH 值增高(包括硼同位素分馏)、溶解氧含量降低等,因此,理论上讲这些特征应该在赤潮发生区域生长的珊瑚骨骼中有明显的记录。目前已提出的方法有硼同位素法、生长特征观测法、碳同位素法和铝法。

### (1) 硼同位素法

硼同位素可以作为海水 pH 值代用指标。海水中溶解态的硼主要有两种存在形式——硼酸 [ $\text{B}(\text{OH})_3$ ] 和硼酸盐 [ $\text{B}(\text{OH})_4^-$ ],并且在海水中的相对含量受 pH 值控制(pH 值低于 7 时以硼酸形式存在, pH 值大于 10 时主要以硼酸盐形式存在)(Hönisch *et al.*, 2004)。 $^{11}\text{B}$  优先富集在  $\text{B}(\text{OH})_3$  中,而  $^{10}\text{B}$  富集在  $\text{B}(\text{OH})_4^-$  中,且实验证明,温度、光照和水深不能导致可测量范围内的硼同位素组成变化,也就是说,硼同位素作为海水 pH 值代用指标受环境因素的干扰较小(Hönisch *et al.*, 2004)。

理论上,假设钙化过程中没有额外的硼同位素分馏并根据实验数据的曲线拟合,可以提出以下公式(Bard *et al.*, 2003):

$$\text{pH} = 8.8 - \log\left(\frac{\delta^{11}\text{B}_{\text{sw}} - \delta^{11}\text{B}_{\text{c}}}{\alpha_{3/4}\delta^{11}\text{B}_{\text{c}} - \delta^{11}\text{B}_{\text{sw}} + 1000 \times (\alpha_{3/4} - 1)}\right)$$

其中  $\delta^{11}\text{B}_{\text{sw}}$  为海水中硼同位素组成,取 39‰;  $\delta^{11}\text{B}_{\text{c}}$  为珊瑚碳酸盐中硼同位素的组成;  $\alpha_{3/4}$  为  $\text{B}(\text{OH})_3$  和  $\text{B}(\text{OH})_4^-$  之间硼同位素分馏系数,取 0.98。可以利用这一原理,通过测定珊瑚骨骼中硼同位素的含量,计算出某时间段海水的 pH 值,如果异常,则可能发生过赤潮。国外已有文献证实 pH 值与硼同位素分馏的关系,并开展了珊瑚骨骼 B 同位素古海洋 pH 值代用指标的研究 (Hönisch *et al.*, 2004; Bard *et al.*, 2003; Reynaud *et al.*, 2004)。

### (2) 生长特征观测法

造礁珊瑚骨骼呈年周期性带状生长,如同树木的年轮一样,呈明显的条带状分布。生长特征(生长率、生长密度、钙化率等)变化与其生长环境密切相关,具有重要的环境指示意义。海水温度和日照时数是影响珊瑚生长率的主要因素(施祺等, 2002, 2004)。如果海水温度和日照时数没有太大变化,那么珊瑚生长率也应该没有太大变化。换句话说,如果某年珊瑚骨骼生长率异常减小甚至停止生长,而该年的海水温度和日照时数正常,那么影响珊瑚生长的很可能是特定的环境事件,即来自不同地点的多个珊瑚生长率的共同信号暗示着某个突发环境事件的发生,其中就包括赤潮。但是,造成珊瑚生长率异常还有许多因素,如珊瑚礁白化、飓风、地震、疾病、生物(如鹦嘴鱼、棘冠海星)入侵等,所以该方法必须与其他方法相结合。

### (3) 碳同位素法和铝法

碳同位素法原理在于赤潮藻光合作用偏向于吸收  $^{12}\text{C}$  而使水体中  $^{13}\text{C}$  富集,从而使珊瑚中  $\delta^{13}\text{C}$  含量异常;铝法原理在于赤潮时期水体 pH 值上升,溶解态铝易絮凝离开水体而使水体中铝含量下降,通过测定珊瑚骨骼中的铝含量变化来判断有无赤潮发生(刘羿等, 2004)。

上述这些方法本身并不是孤立的,它们可以相互结合起来,这样对于历史上赤潮的判断会更加准确些。

## 4 结语和展望

珊瑚骨骼以其年生长率大、持续生长时间长等特性而能够记录具有高分辨率的环境变化历史,如记录温度、盐度、日照时数、污染、降雨、上升流等。基于赤潮发生的水化学性质、赤潮与珊瑚之间的影响与响应关系,所以提出采用珊瑚记录赤潮的可能性。目前珊瑚记录赤潮的方法有硼同位素法和生长

率观测法等。结合赤潮发生的机理和水化学性质的变化,本文从理论上提出一种新的记录方法——铁、锰微量元素法。研究表明,一般认为金属元素进入珊瑚骨骼存在 3 种方式:①含金属的颗粒物在珊瑚骨骼表面和骨骼内空隙中吸附和沉积;②通过珊瑚虫的生物吸收结合到骨骼中;③珊瑚骨骼形成(钙化)过程中,金属离子直接从海水进入骨骼替代文石晶格的部分  $\text{Ca}^{2+}$ (黄德银等, 2003)。既然赤潮前期海水中铁、锰含量异常,那么,这种异常应该可以由铁锰元素通过上述途径进入赤潮区珊瑚骨骼而在珊瑚骨骼中表现出来,因此,通过测试珊瑚骨骼样品中的铁、锰含量,可能可以推断赤潮发生的历史与频率。如果珊瑚礁记录赤潮能够成功,将有助于加深我们对赤潮现象的认识。

## Reference

- Abram N J, Gagan M K, McCulloch M T, *et al.* 2003. Coral Reef Death During the 1997 Indian Ocean Dipole Linked to Indonesian Wildfires [J]. *Science*, 301: 952~955.
- Anderson D M. 1997. Turning back the harmful red tide [J]. *Nature*, 388: 513~514.
- Bard C R, Chaussidon M and Lanord C F. 2003. pH control on oxygen isotopic composition of symbiotic corals [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 215: 275~288.
- Beck J W, Edwards R L, Taylor F W, *et al.* 1992. Sea-surface temperature from coral skeletal strontium calcium ratios [J]. *Science*, 257: 644~647.
- Damien Cardinal, Bruno Hamelin, Edouard Bard, *et al.* 2001. Sr/Ca, U/Ca and  $\delta^{18}\text{O}$  records in recent massive corals from Bermuda: relationships with sea surface temperature [J]. *Chemical Geology*, 176: 213~233.
- De Villiers S, Shen G T, Nelson B K. 1994. The Sr/Ca-temperature relationship in coralline aragonite: Influence of variability in (Sr/Ca) seawater and skeletal growth parameters [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(1): 197~208.
- Dodge R E and Gilbert T R. 1984. Chronology of lead pollution contained in banded coral skeleton [J]. *Marine Biology*, 82: 9~13.
- Fei Hongnian. 1952. The Cause of Red Tide Occurrence [J]. *Xue Yi*, 22(1): 1~3 (in Chinese).
- Gao Sulan. 1997. Correlation of Nutrient Salts and Microelements to Huanghua Red Tide [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai&Bohai seas*, 15(2): 59~63 (in Chinese with English abstract).
- Genin Amatzia, Lazar Boaz and Brenner Stephen. 1996. Vertical mixing and coral death in the Red Sea following the eruption of Mount Pinatub [J]. *Nature*, 377: 507~510.
- Gong Qiang, Wang Hongyu and Fu Dandan. 2004. Analysis on Meteorological Factors Effect on Red Tide [J]. *Environmental Protection Science*, 30(125): 30~33 (in Chinese with English abstract).
- Gong Yiming, Li Baohua, Si Yuanlan, *et al.* 2002. Late Devonian red tide and mass extinction [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(7): 554~560 (in Chi-

- nese with English abstract).
- Grottoli A G. 2000. Stable Carbon Isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ) in Coral Skeletons[J]. *Oceanography*, 13(2):93~97.
- Hendy E J, Gagan M K, Alibert C A, et al. 2002. Abrupt Decrease in Tropical Pacific Sea Surface Salinity at End of Little Ice Age[J]. *Science*, 295: 1511~1514.
- Hoeksema B W and Cleary D F. 2004. The Sudden Death of a Coral Reef[J]. *Science*, 303: 1293~1294.
- Hönisch B, Hemming N G, Grottoli A G, et al. 2004. Assessing scleractinian corals as recorders for paleo-pH: Empirical calibration and vital effects[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(18): 3675~3685.
- Huang Deyin, Shi Qi, Zhang Yechun. 2003. Contents of heavy metals in coral Porites in Sanya Bay and their environmental significance[J]. *Marine Environmental Science*, 22(3): 35~38 (in Chinese with English abstract).
- Isdale P. 1984. Fluorescent bands in massive corals record centuries of coastal rainfall[J]. *Nature*, 310: 578~579.
- Knutson D W, Budderueiter R W and Smith S V. 1972. Coral Chronometers: Seasonal Growth Bands in Reef Corals[J]. *Science*, 177: 270~272.
- Liang Shunhua and Zhang Hongbiao. 1993. Change in manganese concentration in waters of Yantian, Dapeng bay during red tide occurrence[J]. *Marine Science Bulletin*, 32(2): 13~16 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yi, Peng Zicheng, Chen Tegu, et al. 2004. A New Way of Investigating Red Tides-Reconstructing Paleo-environment from Reef Corals[J]. *Nature Journal*, 26(3): 141~144 (in Chinese with English abstract).
- Lough J M, Barnes D J and Taylor R B. 1997. Understanding growth mechanisms: the key to successful extraction of proxy climate records from corals[J]. *Proc 8th Int Coral Reef Symp*, 2: 1697~1700.
- Lü Songhui and Qi Yuzao. 2005. Red tide in China: Cases, harmful effects, and prevention[A]. *Red tide in China: research and prevention(1)*——Proceedings of conference on red tide research and prevention, Chinese Society of Oceanography[C] Beijing: Ocean press, 1~7 (in Chinese).
- McCulloch Malcolm, Fallon Stewart, Wyndham Timothy, et al. 2003. Coral record of increased sediment flux to the inner Great Barrier Reef since European settlement[J]. *Nature*, 421: 727~730.
- Min G R, Edwards R L, Taylor F W, et al. 1995. Annual cycles of U/Ca in coral skeletons and U/Ca thermometry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 2025~2042.
- Mitsuguchi T, Matsumoto E, Abe O, et al. 1996. Mg/Ca thermometry in coral skeleton[J]. *Science*, 274: 961~963.
- Nie Baofu, Chen Tegu, Liang Meitao, et al. 1997. The Relationship Between Reef Coral and Environmental Changes of Nansha Islands and Adjacent Regions[M]. Beijing: Science Press. 37~61 (in Chinese).
- Pan Kehou and Jiang Guangxin. 2004. The Occurrence, Ecological Effects of HAB and Countermeasures Against it[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 34(5): 781~786 (in Chinese with English abstract).
- Qi Yuzao. 2003. The Red Tide in Coastal China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1~302 (in Chinese).
- Qi Yuzao and Huang Changjiang. 1997. Environment background of *Chatonella* marina bloom in the Dapeng Bay, the South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 28(4): 337~342 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaoming and Zou Jingzhong. 1997. Study on the effects of N, P, Fe-EDTA, Mn on the growth of a red tide dinoflagellate *Scrippsiella Trochoidea*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 28(6): 594~598 (in Chinese with English abstract).
- Quinn T M and Sampson D E. 2002. A multiproxy approach to reconstructing sea surface conditions using coral skeleton geochemistry[J]. *Paleoceanography*, 17(4): 141~1411.
- Reynaud Stéphanie, Hemming N G, Leclerc A J, et al. 2004. Effect of pCO<sub>2</sub> and temperature on the boron isotopic composition of the zooxanthellate coral *Acropora* sp[J]. *Coral Reefs*, 23: 539~546.
- Runnalls L A and Coleman M L. 2003. Record of natural and anthropogenic changes in reef environments (Barbados West Indies) using laser ablation ICP-MS and sclerochronology on coral cores[J]. *Coral Reefs*, 22: 416~426.
- Shen G T, Bolye E A and Lea D W. 1987. Cadmium in corals as a tracer of historical upwelling and industrial fallout[J]. *Nature*, 328: 794~796.
- Shi Qi, Sun Donghuai and Zhang Yechun. 2004. Digital Image Analysis of Coral Skeletal Growth Characteristics[J]. *Marine Science Bulletin*, 23(4): 19~24 (in Chinese with English abstract).
- Shi Qi, Zhang Yechun and Sun Donghuai. 2002. Characteristics of Growth Rate of Porite Coral from Sanya, Hainan Island and its Relationship to Environmental Variable[J]. *Marine Science Bulletin*, 21(6): 31~38 (in Chinese with English abstract).
- State Oceanic Administration People's Republic of China. 1989~2005. Marine Disaster Communiqué, People's Republic of China. <http://www.soa.gov.cn/hygh/> (in Chinese).
- Tang Kunxian, Yuan Dongxing, Lin Yesen, et al. 2004. A Preliminary Study on Prediction of Dissolved Oxygen Lack After Near Shore Red Tide Occurrence and Biological Prevention of Red Tide[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 43(6): 886~888 (in Chinese with English abstract).
- Weber J N. 1973. Incorporation of strontium into reef coral skeletal carbonate[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(9): 2173~2190.
- Weber J N, Deines Peter, White E W, et al. 1975. Seasonal high and low density bands in reef coral skeleton[J]. *Nature*, 255: 697~698.
- Weber J N and Woodhead P M J. 1972. Temperature dependence of oxygen-18 concentration in reef coral carbonate[J]. *Geophys. Res.*, 77(4): 63~67.
- Wei Gangjian, Yu Kefu and Zhao Jianxin. 2004. Sea surface temperature variations recorded on coralline Sr/Ca ratios during Mid-Late Holocene in Leizhou Peninsula[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(17): 1770~1775 (in Chinese).
- Wells J W. 1956. *Scleractinia*[A]. *Treatise on Invertebrate Paleontology*[C] Kansas: Geol. Soc. of America, Part F: F328~F444.
- Wu Yulin, Zhou Chengxu, Zhang Yongshan, et al. 2001. Evolution and Causes of Formation of *Gymnodinium Sanguineum* Bloom in Yantai Sishili Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 32(2): 159~166 (in Chinese with English abstract).
- Wyndham Timothy, McCulloch Malcolm, Fallon Stewart, et al. 2004. High-resolution coral records of rare earth elements in coastal seawater: Biogeochemical cycling and a new environmental proxy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(9): 2067~2080.
- Xing Xiaoli, Gao Yahui and Lin Rongcheng. 2003. Advances of research on effects of red tide algae on the feeding, egg production and hatching of copepod[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 22(3): 369~376 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jie, Chen Jianfang, Liu Guangshen, et al. 2003. Progresses in study on Sedimentary Record of Historic Red Tide and Paleonutrient[J]. *Marine Science Bulletin*, 22(6): 63~70 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z B and Hodgkiss I J. 2004. Hong Kong's worst "red tide"—causative

- factors reflected in a phytoplankton study at Port Shelter station in 1998 [J]. *Harmful Algae*, 3: 149~161.
- Yu Kefu. 1999. General Situation of the Study on Reef Coral  $\delta^{13}\text{C}$  and the Related Environment information [J]. *Marine Science Bulletin*, 18(3): 82~88 (in Chinese with English abstract).
- Yu Kefu, Chen Tegu, Huang Dingcheng, et al. 2001. The high-resolution climate recorded in the  $\delta^{18}\text{O}$  of *Porites lutea* from the Nansha Islands of China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(14): 1199~1204 (in Chinese).
- Yu Kefu, Chen Tegu, Lian Jiansheng, et al. 2002. Annual Changes of Heavy Metals in Coral *Platygyra* in Daya Bay and Their Marine Environment Implication [J]. *Quaternary Sciences*, 22(3): 230~235 (in Chinese with English abstract).
- Yu Kefu, Huang Yaosheng, Chen Tegu, et al. 1999. A Monthly Resolution  $\delta^{18}\text{O}$  Thermometer of A *Porites lutea* Coral From Leizhou Peninsula [J]. *Quaternary Science*, 19(1): 67~72 (in Chinese with English abstract).
- Yu Kefu, Zhao Jianxin, Wei Gangjian, et al. 2005a.  $\delta^{18}\text{O}$ , Sr/Ca and Mg/Ca records of *Porites lutea* corals from Leizhou Peninsula, northern South China Sea, and their applicability as paleoclimatic indicators [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 218: 57~73.
- Yu Kefu, Zhao Jianxin, Wei Gangjian, et al. 2005b. Mid-late Holocene monsoon climate retrieved from seasonal Sr/Ca and  $\delta^{18}\text{O}$  records of *Porites lutea* corals at Leizhou Peninsula, northern coast of South China Sea [J]. *Global and Planetary Change*, 47: 301~316.
- Zhou Lihong, Chen Xuehao. 2003. Effect of *Alexandrium tamarense* on ATPase activity in the liver and gill of *Tilapia mossambica* [J]. *Marine Science*, 27(12): 75~78 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Lihong, Chen Xuehao and Lai Botao. 2002. The Effects of *Alexandrium tamarense* on ATPase Activity of Shellfish's Tissues [J]. *Journal of Jimei University (Natural Science)*, 7(2): 125~128 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Mingjiang, Zhu Mingyuan and Zhang Jing. 2001. Status of harmful algal blooms and related research activities in China [J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 13(2): 54~59 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaoshan, Yi Bing, Dong Yanhong, et al. 2004. A primary study on one of "bilateral" red tide at Chi Bay of Pearl River Estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 23(4): 41~44 (in Chinese with English abstract).
- 海洋通报, 32(2): 13~16.
- 刘 羿 彭子成 陈特固 等. 2004. 一种研究赤潮的新途径——珊瑚古环境法的探讨 [J]. *自然杂志*, 26(3): 141~144.
- 吕颂辉 齐雨藻. 2005. 中国的赤潮、危害、成因和防治 [A]. 中国海洋学会赤潮研究与防治专业委员会. 中国赤潮研究与防治(一)——中国海洋学会赤潮研究与防治学术研讨会论文集 [C]. 北京: 海洋出版社, 1~7.
- 聂宝符 陈特固 梁美桃 等. 1997. 南沙群岛及其邻近礁区造礁珊瑚与环境变化的关系 [M]. 北京: 科学出版社, 37~61.
- 潘克厚 姜广信. 2004. 有害藻华(HAB)的发生、生态学影响和对策 [J]. *中国海洋大学学报*, 34(5): 781~786.
- 齐雨藻. 2003. 中国沿海赤潮 [M]. 北京: 科学出版社, 1~302.
- 齐雨藻 黄长江. 1997. 南海大鵬湾海洋卡盾藻赤潮发生的环境背景 [J]. *海洋与湖沼*, 28(4): 337~342.
- 秦晓明 邵景忠. 1997. N, P, Fe-EDTA, Mn 对赤潮生物锥状斯氏藻增殖影响的初步研究 [J]. *海洋与湖沼*, 28(6): 594~598.
- 施 祺 孙东怀 张叶春. 2004. 珊瑚骨骼生长特征的数字影像分析 [J]. *海洋通报*, 23(4): 19~24.
- 施 祺 张叶春 孙东怀. 2002. 海南岛三亚滨珊瑚生长率特征及其与环境因素的关系 [J]. *海洋通报*, 21(6): 31~38.
- 国家海洋局《中国海洋灾害公报》. 1989~2005. <http://www.soa.gov.cn/hygb/>.
- 汤坤贤 袁东星 林亚森 等. 2004. 近海赤潮消亡后水体缺氧的预测与生物防治方法初探 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 43(6): 886~888.
- 韦刚健 余克服 赵建新. 2004. 雷州半岛中晚全新世造礁珊瑚 Sr/Ca 比值的表层海水温度记录 [J]. *科学通报*, 49(17): 1770~1775.
- 吴玉霖 周成旭 张永山 等. 2001. 烟台四十里湾海域红色裸甲藻赤潮发展过程及其成因 [J]. *海洋与湖沼*, 32(2): 159~166.
- 邢小丽 高亚辉 林荣澄. 2003. 赤潮藻对桡足类摄食、产卵及孵化影响的研究进展 [J]. *台湾海峡*, 22(3): 369~376.
- 徐 杰 陈建芳 刘广深 等. 2003. 古赤潮与古营养状况的沉积记录研究进展 [J]. *海洋通报*, 22(6): 63~70.
- 余克服. 1999. 造礁珊瑚骨骼  $\delta^{13}\text{C}$  及其反映的环境信息研究概况 [J]. *海洋通报*, 18(3): 82~88.
- 余克服 陈特固 黄鼎成 等. 2001. 中国南沙群岛滨珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  的高分辨率气候记录 [J]. *科学通报*, 46(14): 1199~1204.
- 余克服 陈特固 练健生 等. 2002. 大亚湾扁脑珊瑚中重金属的年度变化及其海洋环境指示意义 [J]. *第四纪研究*, 22(3): 230~235.
- 余克服 黄耀生 陈特固 等. 1999. 雷州半岛造礁珊瑚 *Porites lutea* 月分辨率的  $\delta^{18}\text{O}$  温度计研究 [J]. *第四纪研究*, 19(1): 67~72.
- 周立红 陈学豪. 2003. 塔玛亚历山大藻对罗非鱼肝及鳃组织 ATP 酶活性的影响 [J]. *海洋科学*, 27(12): 75~78.
- 周立红 陈学豪 赖伯涛. 2002. 塔玛亚历山大藻对贝类鳃组织  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、ATP 酶活性的影响 [J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 7(2): 125~128.
- 周名江 朱明远 张 经. 2001. 中国赤潮的发生趋势和研究进展 [J]. *生命科学*, 13(2): 54~59.
- 朱小山 易 斌 董燕红 等. 2004. 珠江口赤湾一次双相赤潮成因初探 [J]. *海洋环境科学*, 23(4): 41~44.

## 附中文参考文献

- 费鸿年. 1952. 发生赤潮的原因 [J]. *园艺*, 22(1): 1~3.
- 高素兰. 1997. 营养盐和微量元素与黄赤潮的相关性 [J]. *黄渤海海洋*, 15(2): 59~63.
- 龚 强 汪宏宇 付丹丹. 2004. 影响赤潮的气象因素分析 [J]. *环境保护科学*, 30(125): 30~33.
- 龚一鸣 李保华 司远兰 等. 2002. 晚泥盆世赤潮与生物集群灭绝 [J]. *科学通报*, 47(7): 554~560.
- 黄德银 施 祺 张叶春. 2003. 三亚湾滨珊瑚中的重金属及环境意义 [J]. *海洋环境科学*, 22(3): 35~38.
- 梁舜华 张红标. 1993. 大鵬湾盐田水域赤潮期间水质锰的变化规律 [J].