古环境记录的数字图像分析及应用

孙东怀^{①②} 刘 禹^② 谭 明^③

(①中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; ②中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075;

③中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029. E-mail: sundh@scsio.ac.cn)

摘要 地质或生物记录对环境变化的响应往往直观地表现在不同形式的影像中, 对这些影像进行数字图像分析可快速提取记录中的环境变化信息, 其原理是在记录的发育方向上选择剖面线, 沿剖面线读取图像色值并进行环境代用指标的计算、生长层的识别与自动定年和生长层结构演化等研究. 在详述图像分析原理的基础上, 提出了珊瑚、树轮和石笋记录图像分析的方法, 并通过实例阐述了这些记录图像参数的环境意义.

关键词 数字图像 珊瑚 树轮 石笋

从地质记录或生物记录中获得环境变化的代用指标, 是古环境研究的基本思路. 虽然不同领域的研究者对这些记录建立了较成熟的地球化学或地球物理方法, 但这些分析方法的高成本和较长的分析时间影响了古气候信息提取的效率. 实际上环境与气候的变化往往通过颜色、结构和成分等的变化直观地表现在不同类型的影像上, 图像处理技术使人们获得这些古环境信息成为可能. 例如, 国际上对树轮图像的处理技术就取得了较好的结果^[1], 国内研究者用通用软件对古气候记录进行常规的处理和固定图像线上色值的提取, 实际上也是图像处理技术在古环境研究中的初步应用^[2]. 本研究将数字图像技术应用到古气候记录研究中, 建立了一种快速通用的古环境记录图像分析方法.

1 古环境记录的图像分析原理

古环境记录序列的共同特征是具有随时间发育的生长层或沉积层. 视觉生长层实质上是生长体由于环境变化而产生的颜色、结构和成分等的变化在不同形式影像上的体现. 由于记录类型的不同获得影像的方法可能不同, 其图像类型也有差异, 但其图像的数字实质是相同的, 图像特征也具有相似的特点, 即在同一生长层中图像具有等效性或一致性. 这使得我们可用相似的数字图像方法获得它们的生长参数或沉积参数.

数字图像实质上是颜色值或灰度值的数字矩阵, 图像分析的目的是从这一矩阵中提取生长参数的数字信息. 单色图像的每个像点上为该点的灰度值(图版 I-1, 附本刊后, 下同), 其表示方法因分辨率的不

同可为 2 位、8 位或更高, 其中 8 位灰度图像可表达 256 个灰度级, 能满足大多单色图像的要求. 彩色数字图像的每个像点的色值由红、蓝、绿三基色组成(图版 I-2), 因分辨率和色彩编码的方法不同, 图像的色彩数字表示有多种, 其中 24 位的彩色图像能表达自然的绝大多数颜色, 可称为真彩色. 24 位彩色图像中每个基色 8 位, 有 256 个色阶. 从古气候记录的图像可以看到, 垂直生长层的任一生长轴方向上色值变化是一致的, 所以, 图像分析主要是研究图像在生长方向或沉积方向的变化, 实施的软件过程包括剖面选择、沿剖面线上的色值读取、生长参数计算及其环境意义解释、生长层识别和自动定年等, 这些图像分析对大多数古环境记录是基本的也是通用的.

(i) 剖面线确定. 剖面线选择是古环境图像分析的第 1 步, 剖面线确定方法是选择代表性生长层的垂线方向. 由于记录发育的不均匀性, 剖面线可由多个段组成并且不一定连续, 可由一个剖面线切换到图像上不连续但层序列上连续的下一个剖面线, 目的是始终选择记录发育最好的部位进行图像分析.

(ii) 色值读取. 沿剖面线读取图像色值是图像分析的第 2 步, 首先需要计算活动图像点的位置, 图像行扫描线与剖面线的交点即是每一次数据读取的活动图像点. 在最简单的情况下可沿剖面线依次读取图像文件中相应点的图像值, 为了增加剖面线上灰度值的代表性、减小单点值的高频变化, 可在同一生长层内读多个点的图像值进行平均, 在小范围内垂直于剖面线方向可视为同一生长层, 它与图像扫描线往往不一致, 所以算法较为复杂.

(iii) 生长层的规则度估算. 在图像上生长层规

则度实质上是同一层内图像色值的变化,可用同一生长层上一定宽度内色值的标准差来指示,标准差计算的宽度取决于生长层的横向曲率。

(iv) 生长率或沉积速率计算. 在确定了时间控制点后,沿生长轴上两个控制点之间的距离即生长率. 一般来说具有时间控制意义的生长层是年生长层,所以生长率的分辨率只能达到年。

(v) 生长层的季节性代用指标计算. 在获得了色值序列后,有两种方法表示季节性,一种是一年内最大与最小值的差;另一种是一年内色值的标准差。

(vi) 生长层的结构分析. 主要指年生长层中色值变化规律反映的气候指标的季节性变化特征,可用色值序列上年周期曲线的形状表示。

(vii) 生长层识别. 在获得了色值序列后生长层识别转化成了曲线“峰”与“谷”的识别(如图版Ⅱ中识别出曲线上的“峰”和“谷”). 识别中有两个关键问题,一是阈值的设定,它决定着所识别生长层的级别. 有两种级别的生长层在实际中较为重要,一级为年生长层,其识别阈值较大,但太大的阈值会漏掉有些不明显的年层,太小的阈值会将年层中微生长层识别为年层. 二级生长层是年层内的微纹层,其识别阈值较小,但太小的阈值会将序列中的高频噪音作为微层识别. 识别中的第2个关键是识别的软件算法,在编程中有两种情况:当色值升高时比较它与上一已识别的最小值(低色值生长层)的差,当色值降低时比较与上一已识别的最大值(高色值生长层)的差,任一种情况下差值超过阈值即为新的生长层. 生长层宽度识别的原理是计算色值在同一阈值范围内的生长层的宽度,应将阈值设定为两种相反生长层颜色峰值的中值. 对于个别色值在阈值之外的生长层识别,可能会产生“失诊”(如将年层漏掉而当成亚层)或“误诊”(如将亚层当作年层),对于这种情况有两种解决方案,一种简单的方法是用二重识别或多重识别方法来解决,具体方法是锁定识别窗口并改变阈值重复执行识别程序. 另一种方法是在识别程序中加入其他识别条件,如层的宽度和层出现的位置,如对于年层识别,看生长层的宽度和出现的位置是否与其他年层相像. 用这两种方法之一都可解决“失诊”和“误诊”的问题。

(viii) 计算机自动定年. 用以上程序完成年生长层的识别后,设计一个自动的交互式人机对话界面进行年层的确认和自动年代计算与标定,可达到计

算机自动定年的目的。

以上方法的核心是用了现代数字图像处理技术和算法,需要专业计算机语言编写程序来完成,可用任一图像文件格式和语言来读取灰度或色彩值,这里用了较为简单的通用位图(BMP)格式,并用通用性较好的可视化 BASIC(VB)作为处理和算法语言。

2 高分辨率记录的图像分析方法及古环境意义

高分辨率图像具有记录的整体性和记录序列的一致,因而较适合用图像处理方法提取古环境信息. 研究较成熟的高分辨率记录有珊瑚、树木年轮和溶洞碳酸盐沉积等。

2.1 珊瑚生长层的图像分析方法

造礁珊瑚的基本生命特征是在生命活动过程中快速连续地分泌并沉积碳酸钙骨骼,珊瑚生长过程中生长率和生长密度是珊瑚生长的两个基本参数,两者的乘积即为钙化率,用来表征珊瑚碳酸钙沉积通量,其他生长参数或生长特征都可通过这些参数来计算,包括生长率、生长层规则度和季节性等. 这些生长参数都与生存的海洋环境有某种程度的联系,图像技术为这些生长参数的获得提供了一种精确高效的工具, X 射线照像技术是产生珊瑚影像的常规方法. 在珊瑚密度的 X 射线图像上,生长层的基本单位是由高密度带与低密度带组成的年生长带,并且存在多个微生长层(图版Ⅱ-1). 图像分析中剖面线的选择原则是沿生长轴方向,沿剖面线读取的原始数据为图像的灰度. 根据 X 射线成像原理,当样品厚度均匀时灰度是样品密度的代用指标^[3]. 研究表明,珊瑚的骨骼密度反映了珊瑚生长环境的综合质量,温度、光照、海水的生物组成及化学组成等都可能对生长密度产生不同程度的影响^[4],对中国南海滨珊瑚的研究表明,骨骼密度的年生长周期主要取决于温度的季节性变化(见实例部分). 生长层的规则性可能是海水中有毒成分含量的一种标志,因为从生长机理来看,这些因素影响的结果使得生长层在宏观上失去规则性^[5],由图版Ⅱ-1 可以看出不规则度升高的年层段生长层明显扭曲. 珊瑚生长层的识别包括年层和微纹层的识别. 前者识别的阈值较大,后者较小. 一般珊瑚生长层中的有效时间控制点为最低海温时的暗色生长线,在中国南海的滨珊瑚中一般取为 1 月(如图版Ⅱ-1),两个年控制点之间的距离即为年生长率。

以暗色与浅色生长层的中值作为两者的分界,用生长层识别技术可计算出冬半年与夏半年生长层的宽度.由图版 II 可以看出,三亚海域滨珊瑚的年生长量平均约 2~3 cm,其中冬半年生长层的变化较小,而夏半年的生长量变化较大,并且年生长量主要取决于夏半年的生长量.生长层密度的季节性是气候指标季节性变化的一种代用指标,季节性较高的年份图像上生长带的对比度明显大.对这一样品的微纹层识别结果表明,微层发育较好的年层中层数为 12~13 个,显然与月周期有关,指示了月球公转引起的月光和潮汐作用对珊瑚微生长层形成的作用.由图版 II -1 可以看出,年层数与年生长量成正相关,指示了生长量较大的年层中微层发育也较好.由于南海珊瑚密度主要取决于表层海流决定的表层海温,所以可以认为年生长层的结构反映了冬、夏两种季风驱动的表层流在一年中的组合特征.

2.2 树轮的影像分析方法

树轮生长层影像的获得方法有两种,一种是对横截面抛光后照相或直接在扫描仪上扫描其反射影像,第 2 种方法与珊瑚影像类似,将树轮沿横截面方向加工成等厚树盘,抛光后在 X 射线透视机上照像.树木生长中木质密度和宽度是两种基本生长参数,它们都可在树轮横截面的影像上测量,数字图像分析技术不仅可简便地测量密度和宽度参数,同时还可获得其他有气候信息的生长参数.

树轮的反射影像中像点色值与所在点的密度、结构和颜色有关^[6~8],同一截面上色值主要取决于密度的大小,并在大多数树轮中以红色为主色.研究表明,在中纬度地区的大多树轮中,低密度的浅色生长层代表了早材,高密度的暗色生长层代表晚材,一般以晚材与次年早材的界线作为这一轮的年代标定点^[7],沿生长轴上两个标定点之间的距离即为年生长宽度,给定早材与晚材色值的阈值及两者的中值,用图像识别技术同时可识别并计算出年层、早材和晚材的宽度.树轮图像色值的季节性指示了早材与晚材的密度差,在某种程度上反映了区域气候的季节性特征.

树木生长的气候影响因子研究表明,对树轮宽度和密度影响最大的气候要素是气温和降水^[6,7],但生长参数与气候要素之间的关系较为复杂,并且因地区和树种的不同而不同^[7],例如在干旱区生长对降水反应敏感,而在相对湿润地区则对气温敏感,所以

要确定某一地区密度和宽度等参数的气候意义,则需要系统的相关分析.图版 II -2 是陕西黄陵现生柏树的一段生长层反射影像^[9],可以看出,中国北方季风区的柏树树轮的晚材宽度变化较小而早材的变化幅度较大,并且年层的宽度主要取决于早材的宽度.树轮图像色值的季节性指示了早材与晚材的密度差,在中国北方可能反映了其相应季节降水的变率,值得注意的是季节性的变化与年层宽度和早材宽度变化有非常好的相关性,反映了它们之间的内在联系.

2.3 石笋的图像分析方法

观察发现石笋的沉积层在透光和反光影像中都有表现^[10],石笋沉积纹层的成因较为复杂,其中多数纹层的形成与环境气候的变化有关.研究表明,普通光源的透射或反射图像中沉积层影像的变化主要是沉积物的成分变化引起的,并且大多与有机质或其他暗色物质的含量变化有关^[11],图像中的灰度值即是暗色物质的一种指示.从时间尺度来说石笋的沉积层有年层和大于年层的非年层两种,对有年层的序列来说,给定年层和季节亚层的阈值可识别年层、季节亚层的宽度.长周期非年层的识别主要取决于不同级别沉积层的阈值设定.在确定了沉积单层的时间单位后,可根据时间控制点之间的距离计算沉积速率.灰度的季节性指示了暗色物质沉积速率的季节性变化.年生长层的结构变化主要指示了暗色物质沉积速率在一年内变化的季节性分布特征.

图版 II -3 是北京石花洞的石笋的一段透射图像,成分及古气候研究表明,其中沉积层的基本单位是有机质的季节性变化产生的年周期纹层^[10].在图像上年纹层由一个宽浅色带和一个非常细的暗色线组成,在灰度线上表现为单峰脉冲型曲线.对这一记录的沉积机理研究认为,年沉积旋回的形成主要是由于每年干旱后第 1 次降水将地表和通道中的暗色物质大量带到洞中集中沉积而形成,所以灰度指示了以有机质为主的暗色物质沉积速率,而它可能与地表植被有某种程度的联系^[10].年沉积参数的计算表明,暗层的变化较小而亮层的变化较大,并且年层宽度决定着年层的宽度.另外,灰度的季节性也与年层宽度呈明显的正相关,指示了降水季节性与年降水量的内在联系.所以,用图像分析技术进行灰度曲线和沉积层结构的研究,将揭示降水和植被变化的许多重要信息.

3 应用实例: 南海珊瑚记录的图像分析

珊瑚生长的影响因素是珊瑚古环境研究的首要问题, 从环境与气候变化的时间尺度来看, 季节性和长时间尺度的趋势变化是珊瑚古环境研究的两种重要方面. 研究的样品分别采自三亚近岸海域和三亚以南 8 km 的西岛海域, 研究的基本思路是用数字图像技术获得珊瑚生长参数序列, 通过生长参数与环境因素间的相关分析, 研究了珊瑚生长的季节性变化与趋势变化的影响因子.

3.1 滨珊瑚生长的季节性变化及其影响因素

由高密度与低密度带组成的年生长周期带是珊瑚生长序列的基本特征, 大量的研究表明珊瑚生长的年周期是气候的季节性变化引起的, 这里研究了主要气候因子对珊瑚季节性生长的影响. 众多的研究发现, 温度是珊瑚分布和生长的重要因子^[12~14], 钙化率的检测实验表明, 造礁珊瑚能适应的温度范围大致为 16~36℃^[15], 最适宜的温度是 26~29℃^[16]. 南海北部的表层温度一般低于珊瑚的适宜温度上限, 所以温度的变化与珊瑚生长呈正相关. 图 1 给出了三

亚滨珊瑚生长量和密度及主要环境指标间的关系. 珊瑚密度序列为去掉了趋势的年际变化和季节变化, 目的是研究珊瑚生长的季节性变化的影响因素. 可以看出, 珊瑚密度和海温的年变化曲线的年周期非常相似, 而与降水的关系并不明显, 密度与海温间的相关分析也证实了它们之间的成因联系. 但密度变化的某些特征并不能完全用温度变化来解释, 如有些生长层中温度与密度年变化幅度不完全一致. 另外, 微生长层很难用温度变化来解释, 这些可能说明了温度对珊瑚生长的季节变化的影响是非线性的.

研究表明, 光照有利于珊瑚共生藻的光合作用, 从而促进珊瑚排出的 CO₂ 被共生藻吸收形成碳酸钙^[17~20]. 白天与夜晚的光照量变化、潮汐引起的光照量变化和云量引起的光照变化是光照变化的主要影响过程. 前两者都以均匀的日生长层^[21]和月生长层^[17]反映在珊瑚的季长中. 对三亚西岛的滨珊瑚年生长层中的微纹层统计和计算机识别表明, 微纹层发育较好的年纹层数一般约 12~13 个(图版 II-1), 与潮汐的主周期相同. 看来三亚滨珊瑚中某些微纹层

图 1 三亚滨珊瑚生长与环境 and 气候指标的关系
(a) 时间序列; (b) 相关关系. 1. 年生长量, 2. 钙化率

的形成与潮汐导致的光照量变化有关. 其他海域的研究发现, 云量变化对珊瑚生长也有一定程度的影响^[17]. 图 1 中还给出了云量或降水量变化曲线, 可以看出, 云量和反映云量的降水与珊瑚密度变化之间的相关性不明显. 例如云量和降水曲线上的高频变化并没有记录在珊瑚生长中, 没有证据能表明它们对珊瑚生长有直接影响. 海水盐度与珊瑚骨骼密度变化的相关性也不明显, 这与早期研究一致^[22].

所以, 表层海温变化可能是南海北部滨珊瑚生长密度的季节性变化的主要因素, 年生长层中的部分生长纹层形成与潮汐引起的海面变化有关.

3.2 人类活动对近代滨珊瑚生长的影响

珊瑚生长的长时间变化趋势, 在很大程度上反映了其所在海域海水生存质量的变化. 用数字图像技术对三亚浅海旅游区滨珊瑚生长序列研究发现, 几乎所有研究样品的骨骼密度和生长层规测度有共同的变化特征. 即近 20 多年来, 珊瑚生长密度阶段性地变大, 生长层的规则性也在变差, 这些变化趋势大约从 1985 年开始, 并从 1995 年开始进一步发展. 就骨骼密度来说, 在 1985 年以前, 大多数滨珊瑚的生长密度一般保持在 $1.0 \sim 1.1$ 单位(g/cm^{-3})的年平均水平, 从 1985 年开始增加到 1.3 单位, 从 1996 年开始进一步增加到 1.5 以上. 生长层规则度与密度也保持着一致的变化(图 2). 从图 1 可以看出, 温度、降水和云量等主要气候参数在近 20 多年并没有如此大幅度的趋势变化. 我们知道近 20 多年来全球平均温度有缓慢升高的趋势, 但这一海域的温度变化仍在珊瑚生长的最佳温度以下, 温度升高应使珊瑚生长密度减小, 所以珊瑚的这一变化趋势不能用气候的变化来解释.

值得注意的是三亚海域的人类活动在近 20 年内发生了实质性的变化. 初步的统计资料显示, 三亚市和近岸的工业经济活动和旅游业在近 20 年来一直呈增长的趋势, 现今繁荣的旅游和经济体系建立于 20 世纪 80 年代, 并在 90 年代进一步发展. 仅人口和旅游人数来说, 相对于 20 年前就增加了几十倍, 工业和经济活动的加剧更是明显的. 人类活动至少可从两个方面对珊瑚生长产生直接影响: 一方面, 人类活动所产生的颗粒物的增加可直接进入珊瑚组织或骨骼对其生长产生破坏, 并使骨骼密度增大^[22~25]; 另一方面, 人类活动所产生的有害物质对珊瑚的直接

破坏也是明显的^[26]. 从以上的对比分析可以看出, 珊瑚生长层的这一系列变化指示了海南岛南岸海水生存环境质量的阶段性降低, 与近海旅游业和其他经济活动在 20 世纪 80 年代的初步形成和 90 年代中期的迅速发展在时间上相一致, 在很大程度上指示了人类活动对近海海洋环境的影响.

4 小结与应用的扩展

(i) 用数字图像技术进行古环境研究包括了 3 个过程. (1) 图像获得: 尺度较小的序列一般用显微镜下的透射影像, 较大尺度的序列可用扫描仪或数码相机直接获得反射影像; 密度影像一般用 X 射线照相方法获得; 荧光和红外等影像都有其专用的成像设备. (2) 图像分析: 包括剖面线确定、沿剖面线的色值读取与生长参数的计算和生长层识别. (3) 图像参数的环境意义研究: 记录的成分和密度是图像色值的主要因素. 在确定了色值的环境基础上, 结合图像分析原理可给出计算参数的环境意义.

(ii) 珊瑚 X 射线图像灰度序列是密度的替代性指标, 骨骼密度反映了珊瑚生长环境的综合质量, 在中国南海滨珊瑚中主要取决于温度的季节性变化; 生长层的规则性可能是海水有害成分量的一种标志; 珊瑚生长层的识别包括年层和微纹层的识别, 在年层确定基上可计算年层、冬半年与夏半年生长层的宽度. 生长层密度的季节性是气候指标季节性变化的一种代用指标. 珊瑚年层中微层的发育与月球公转引起的月光和潮汐作用有关; 南海滨珊瑚的年层结构反映了冬、夏两种季风驱动的表层流在一年中的组合特征.

(iii) 树轮反射影像的色值序列主要取决于木质纤维的密度, 在中国北方季风区主要与降水和(或)气温变化季节性变化有关; 色值的季节性指示了早材与晚材密度的密度差, 在中国北方可能反映了降水或气温的季节性特征; 给定年层、早材与晚材色值的阈值, 用图像识别技术可识别并计算出它们的宽度.

(iv) 石笋沉积层影像的灰度值是以有机质为主的暗色物质的指示, 与气候决定的地表植被有关; 灰度的季节性指示了暗色物质沉积速率的季节性变化. 年生长层的结构变化主要指示了暗色物质沉积速率在一年内变化的季节性分布特征; 对有年层的序列来说, 给定年层和季节亚层的阈值可识别年层、季节亚层的宽度和相应的碳酸钙沉积速率.

图2 三亚不同海域现代滨珊瑚生长密度的变化趋势
(a) 西岛 XD3; (b) 西岛 XDI; (c) 西岛 XD4. 图中阴影标出了珊瑚生长变化的两个阶段

在图像分析中,本文只给出了较通用的几种参数计算方法,根据研究的需要可进一步扩充更多的参数,也可根据记录的不同设计特需的参数,如树轮中不同方位半径上参数的关系、珊瑚层中不同生长轴的多个剖面线上参数的研究等.作为图像分析在古气候记录中的应用,本文中给出了较为典型的珊瑚生长层、树木年轮和石笋沉积层的研究例子,其实这一方法对大多古气候记录都是适用的,所不同的是图像获得的方法及对色值序列环境意义的解释,只要记录者的色值具有一定的环境和气候意义,就可用数字图像分析技术研究.如海洋和湖泊钻芯,原来都用色度仪测量,但用数码相机或摄像头获得图像后很容易用本方法来处理;又如对黄土-古壤序列从野外用相机获得图像后也很容易用本方法来处理,但对这些大尺度记录必须作图像之间的色值校正.而相对来说,高分辨率图像具有完整性和色值的相对一致性,获得的色值序列较为可靠,所以数字图像分析技术对高分辨率记录最为适用.

致谢 施祺博士参加了样品采集,在珊瑚的生长机制研究或样品处理中得到了彭子成教授、聂宝福研究员和余克服研究员的帮助;邵雪梅研究员对树轮的生长机制提供了有意义的资料,蔡演军博士为图像获得技术提供建议并就溶洞碳酸盐的发育机制提供了资料,在此一并致谢.本工作受中国科学院南海海洋研究所创新项目(5210607)、中国科学院创新项目(KZCX2-108)和国家自然科学基金项目(批准号:49976015)资助.

参 考 文 献

1 Sheppard P R, Graumlich L J, Conkey L E. Reflected-light image analysis of conifer rings for reconstructing climate. *The Holocene*, 1996, 6(1): 62 ~ 68

2 秦小光, 刘东生, 谭明, 等. 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其气候意义——I. 微层显微特征. *中国科学, D 辑*, 1998, 28(1): 91 ~ 96

3 Chalker B, Barnes D, Isdale P. Calibration of X-ray densitometry for the measurement of coral skeletal density. *Coral Reefs*, 1985, 4: 95 ~ 100

4 Lough J M, Barnes D J. Environmental controls on growth of the massive coral porites. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, 245: 225 ~ 243

5 Brown B E, Tudhope A W, Tissier M D, et al. A novel mechanism for iron incorporation into coral skeletons. *Coral Reefs*, 1991, 10: 211 ~ 215

6 Cook E R, Kairiukstis L. *Methods of Dendrochronology*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1990. 1 ~ 200

7 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990. 1 ~ 369

8 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年表的建立. *地理学报*, 1994, 49(2): 174 ~ 181

9 刘禹, 邵雪梅, 刘洪滨, 等. 树轮密度、稳定同位素对过去 100 年陕西黄陵的季节气温与降水的恢复. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(3): 271 ~ 276

10 谭明, 秦小光, 沈凛梅, 等. 中国洞穴碳酸盐双重光性显微旋回及其意义. *科学通报*, 1999, 44(6): 646 ~ 648

11 Gascoyne M. Palaeoclimate determination from cave calcite deposits. *Quaternary Science Reviews*, 1992, 11: 609 ~ 632

12 Shenn E A. Coral growth rate, an environmental indicator. *J Paleontol*, 1966, 40: 233 ~ 240

13 Highsmith R C. Coral growth rates and environmental control of density banding. *J Exp Mar Biol Ecol*, 1979, 37: 105 ~ 125

14 Schneider R C, Smith S W. Skeletal Sr content and density in *Porites* spp. In relation to environmental factors. *Mar Biol*, 1982, 66: 121 ~ 131

15 齐文同. 六射珊瑚. 北京: 科学出版社, 1989. 430 ~ 442

16 Gladfelter E H. Skeletal development in *acropora cervicornis*: III. A comparison of monthly rates of linear extension and calcium carbonate accretion measured over a Year. *Coral Reefs*, 1984, 3: 51 ~ 57

17 Knutson D W, Buddemeier R W, Smith S V. Coral chronometers: seasonal growth bands in reef coral. *Science*, 1972, 177: 270 ~ 272

18 Bak R P M. Available light and other factors influencing growth in stony corals through the year in Curacao. In: Cameron A, ed. *Proc 2nd Int Coral Reef Symp*. Brisbane: Great Barrier Reef Committee, 1974. 229 ~ 233

19 Wellington G M, Glynn P W. Environmental influences on skeletal banding in (Panama) corals. *Coral Reefs*, 1983, 1: 215 ~ 222

20 Marshal A T. Calcification in hermatypic and ahermatypic corals. *Science*, 1996, 271: 637 ~ 639

21 Well J W. Coral growth and geochronometry. *Nature*, 1963, 197: 948 ~ 950

22 Buddemeier R W, Kinzie III R S. Coral growth. *Oceanographical Marine Biology Annual Review*, 1976, 14: 183 ~ 225

23 Macintyre T G, Smith S V. X-radiographic studies of skeletal development in coral colonies. In: Cameron A, ed. *Proc 2nd Int Coral Reef Symp*, Z. Brisbane: Great Barrier Reef Committee, 1974. 277 ~ 287

24 Shen G T, Boyle E A. Lead in corals: Reconstruction of historical fluxes to the surface ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 1987, 82: 289 ~ 304

25 Brown B E, Tudhope A W, Tissier M D, et al. A novel mechanism for iron incorporation into coral skeletons. *Coral Reefs*, 1991, 10: 211 ~ 215

26 Bastidas C, Garcia E. Metal concentration in the tissue and skeleton of coral, *Monastrea annularis* at a Veneyualan reef. In: Balboa, ed. *Proceedings of 8th Coral Reef Symposium*. Panama: Smithsonian Tropical Research Institute, 1997. 1847 ~ 1850

1

2

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-21-1613>

图像的数字格式

1. 单色图像, 2. 三基色彩色图像

珊瑚、树轮和石笋记录的数字图像分析方法

1. 珊瑚, 2. 树轮, 3. 石笋