

有孔虫初房特征变化在珠江三角洲晚全新世东亚夏季风降雨研究中的应用*

俞宙菲^{1,2} 李铁刚¹ 南青云¹ 张帅^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

提要 研究中国降雨格局变化对理解东亚夏季风演化意义重大。本文分析了珠江三角洲柱状样 ZJK03-Z 中浅水底栖有孔虫常见种 *Rotalidium annectens* 的平均初房大小、微球型/显球型比值和壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 以及底栖有孔虫组合中瓷质壳的百分含量, 探讨它们对由夏季风降雨引起的河口水体盐度变化的响应, 得到了珠江三角洲 3114—1260a BP 季风降雨的强度变化, 识别出了这期间 14 次季风降雨减少的偏干期。与南美洲 Cariaco 海盆的钛含量记录对比, 二者一致的结果表明, 珠江三角洲晚全新世的东亚夏季风降雨与热带辐合带(ITCZ)的南北移动密切相关: 夏季风降雨减少, 对应于 ITCZ 纬度位置的南移。

关键词 珠江三角洲; 晚全新世; 有孔虫初房壳径(MPS); 东亚夏季风降雨; 热带辐合带(ITCZ)

中图分类号 Q91 **doi:** 10.11693/hyh20130124001

季风是东亚大陆最重要的气候系统之一, 全新世东亚季风降雨的波动可能引起中国新石器文明的衰落(4000a BP 前后)和朝代的兴替(吴文祥等, 2004; Wu *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005; 邵晓华等, 2006; Yancheva *et al.*, 2007)。然而中国不同地区对东亚季风强度变化的环境响应存在差异和争议, 例如 4200a BP 季风减弱、温度降低, 但反映当时古文明变迁的降雨格局却有南北普遍减少、北旱南涝或北方降雨增多等多种记录和解释(谭亮成等, 2008)。因此, 有必要发掘不同区域的季风降雨记录进行综合考虑, 但现今南方的季风记录相对于北方还是很缺乏。

东亚季风降雨对珠江三角洲的影响非常大, 降雨产生的大量淡水径流主要使珠江口水体的水动力条件和盐度发生显著改变。除季风降雨外, 海平面变化也会对这两个因素产生影响, 珠江三角洲海平面在约 7000—6000a BP 达到高水位后相对稳定, 尤其是 3000a BP 以来海平面变化非常小(徐明广等, 1986; 方国祥等, 1991; 黄光庆, 1996; Zong, 2004)。因此, 珠江三角洲晚全新世环境变化主要受东亚季风降雨的控制。

东亚季风有很多研究载体: 黄土、深海沉积提供长时间尺度、低分辨率的记录; 湖泊沉积物、石笋的分辨率较高, 但有地域局限, 且石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 指标至今还存在争议; 而中国西部的记录还受印度季风影响。有孔虫遍布世界大洋, 在盐度波动的河口也有相当多的数量, 且它们对环境变化非常敏感, 死亡后被高沉积速率的河口三角洲沉积物埋藏的有孔虫壳体记录了很好的古环境信息。Rajiv Nigam 率先将浅水底栖有孔虫的平均初房大小(men proloculu size, MPS)运用到河口地区的印度季风降雨研究(Nigam *et al.*, 1995; Khare *et al.*, 2008; Panchang *et al.*, 2012), 取得了良好的结果。

因此, 本研究拟从盐度变化的角度出发, 重点采用浅水底栖有孔虫 MPS 方法, 力图在珠江三角洲建立东亚季风降雨在中国南方的记录。

1 材料和方法

1.1 研究区域背景

珠江三角洲年平均降雨量为 1200—2000mm, 季风降雨带来大量径流(约 $330 \times 10^9 \text{m}^3/\text{a}$)和沉积物(约

* 国家自然科学基金项目, 40906038 号, 41006036 号, 41206044 号; 海洋公益性行业科研专项项目, 200805063 号; 海洋地质国家重点实验室开放基金, MG0903 号。俞宙菲, 博士研究生, E-mail: yuzhoufei5@126.com

通讯作者: 李铁刚, 研究员, E-mail: tgli@qdio.ac.cn

收稿日期: 2013-01-24, 收修稿日期: 2013-03-26

$80 \times 10^6 \text{t/a}$), 其中约86.9%的悬浮沉积物和约80%的径流量来自于雨季(4—9月)(田向平, 1994; Wai *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2011)。如图1所示,

对比冬季, 珠江三角洲夏季的表层水和底层水盐度都受到季风降雨很大的影响, 等值线随淡水向海延伸(Wong *et al.*, 2003)。

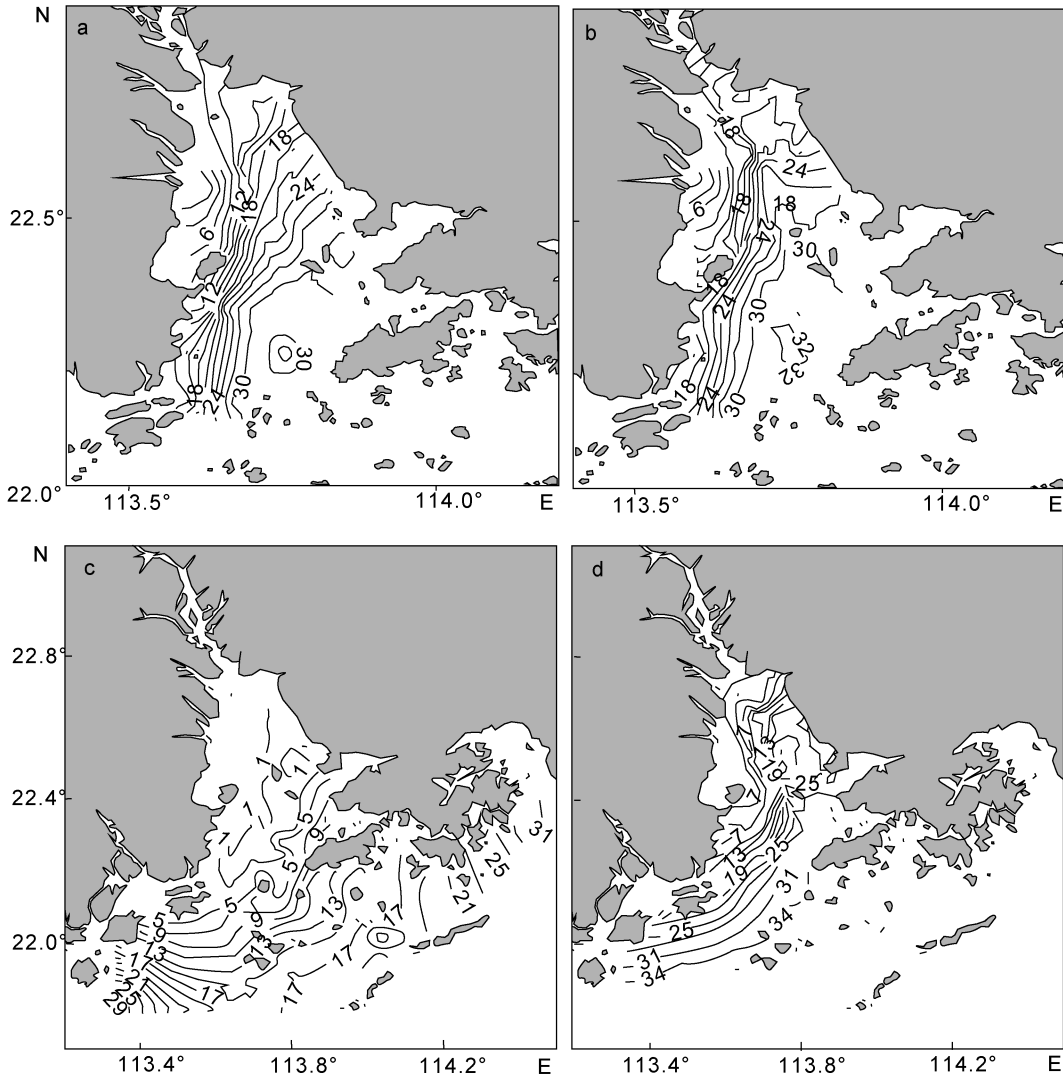


图1 珠江口盐度分布 (引自 Wong *et al.*, 2003)

Fig.1 Salinity distribution in zhujiang (Pearl) River Delta
a: 冬季表层水; b: 冬季底层水; c: 夏季表层水; d: 夏季底层水

1.2 研究材料和方法

重力柱状岩心 ZJK03-Z 孔(113.7177°E, 21.9792°N, 图2)取自2009年珠江三角洲调查航次, 采样水深18.8m, 岩芯长度236cm, 本文以顶部80cm 为研究对象。柱样切分, 照相, 详细描述后按每1cm 取样。微体古生物分析按标准方法进行, 即取定量样品在50°C 恒温下烘干, 加入适量蒸馏水充分浸泡使样品分散(48h 左右), 用0.063mm 的铜筛冲洗样品, 将剩余的粗组分烘干并称重, 待用。

从每一层位样品挑出有孔虫组合(以底栖有孔虫约300枚为准)以及26—42个连接似轮虫 *Rotalidium annectens*。*R. annectens* 是热带河口常见种, 在珠江口已多有报道(李淑鸾, 1985; 华棣, 1989; 陈木宏等, 1994)。统计挑出的底栖有孔虫组合中瓷质壳的个数; 对挑出的 *R. annectens* 利用 LEICA MZ16 显微镜进行初房大小的测量, 测量软件为 Leica Application Suite V3.3.0, 计算得 MPS; 同时统计这些 *A. annectens* 的显球型、微球型个数。再从每个层位挑选保

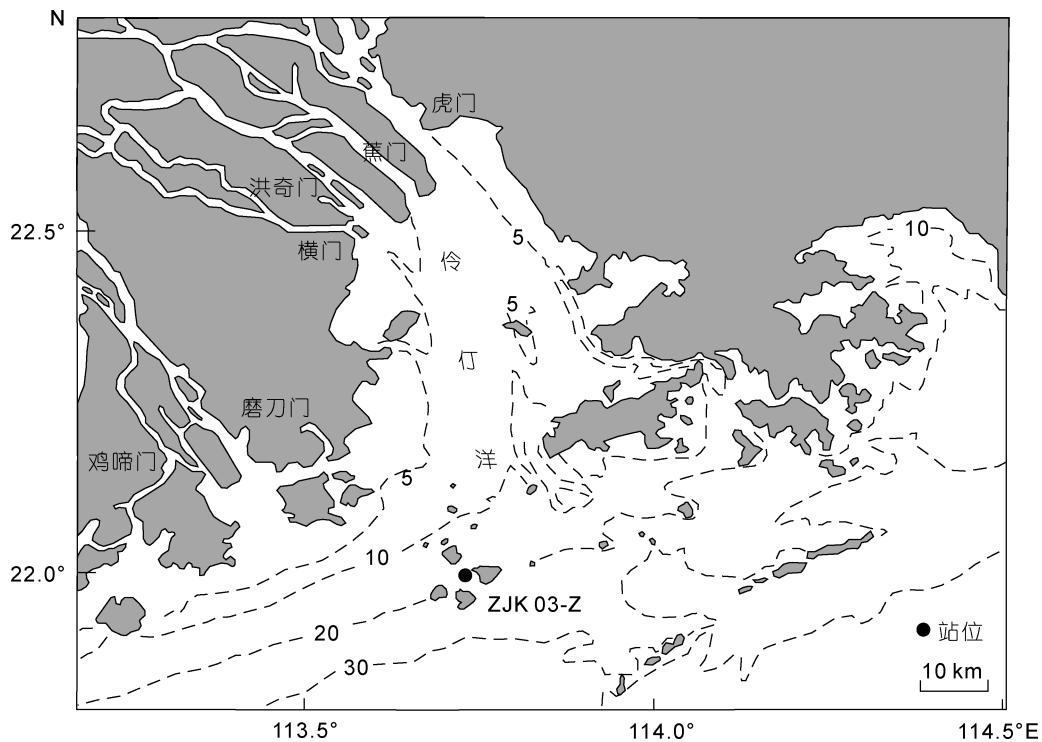


图 2 ZJK03-Z 站位位置

Fig.2 The location of Core ZJK03-Z

存好的(清洁、完整、无溶解)、尽量大小均匀的 *R. annectens* 壳体 4—9 枚, 压碎壳体后用 3%—6% 的双氧水和丙酮溶液超声清洗, 送至上海同济大学海洋地质国家重点实验室进行氧碳同位素测定。氧碳同位素的分析精度采用中国国家标样 GBW04405 检测, 氧、碳同位素标准偏差分别为 0.07‰ 和 0.04‰, 并通过国际标样 NBS19 与 PDB 标准相衔接。另外, 挑取 1cm、40cm、80cm 这 3 个层位的底栖有孔虫混合种在美国 Woods Hole 海洋研究所进行 AMS¹⁴C 年代测试。测试结果用 Calib 6.11 软件校正为日历年龄, 采用线性内插法建立整个柱状样的年代框架。

1.3 ZJK03-Z 孔年龄框架

ZJK03-Z 钻孔年代测试和校正结果见表 1, 可见该柱状样为珠江三角洲在晚全新世沉积的正常序列。上部 40cm 沉积速率非常高, 达到了 1.36mm/a; 下部 40cm 沉积速率为 0.25mm/a(图 3)。

2 结果与讨论

根据 80 个层位共 2527 个 *R. annectens* 的初房测量与统计数据, 计算得 MPS 的范围在 52.55—70.01 μ m, 平均值约为 60.91 μ m。微球型/显球型的比值显示 *R. annectens* 的显球型在柱状样中占了绝大多数, 平均含量约为 87.28%, 微球/显球型比值平均值

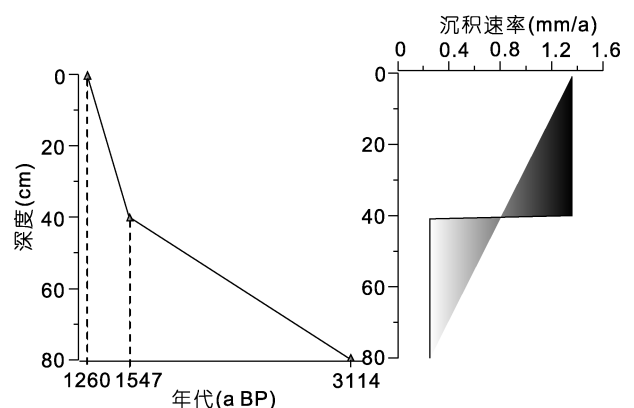


图 3 柱状样 ZJK 03-Z 的年代框架和沉积速率

Fig.3 Chronological model and sedimentation rate at Core ZJK03-Z

约为 0.15, 最大值约为 0.39, 最小值约为 0.03。 *R. annectens* 的壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值约为 -2.12‰, 最大值约为 -0.84‰, 最小值约为 -3.09‰。底栖有孔虫三种壳壁类型中以玻璃壳为优势, 瓷质壳含量最低、平均约为 4.23%(2.01%—8.31%)。

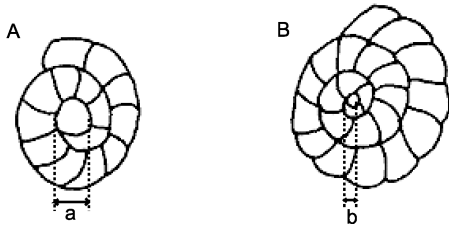
2.1 ZJK03-Z 孔微体古生物指标对夏季风降雨的指示

有孔虫生活史中有两种生殖方式, 产生壳体的双型现象。无性生殖产生显球型(初房大、个体小、房室少), 有性生殖产生微球型(初房小、个体大、房室多)(Saraswat *et al*, 2011), 如图 4 所示。有些属种有

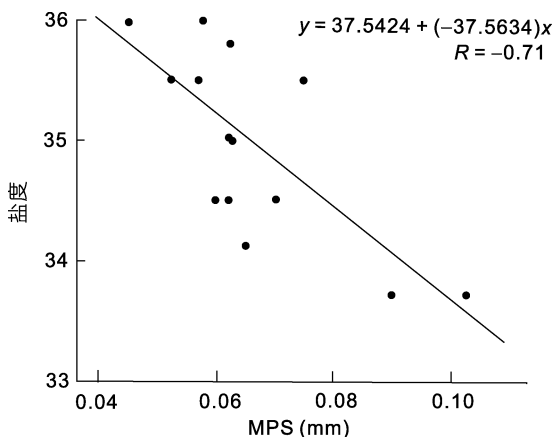
表 1 ZJK03-Z 孔 AMS¹⁴C 测年结果Tab.1 Result of AMS¹⁴C dating for Core ZJK 03-Z

深度(cm)	测年材料	AMS ¹⁴ C 年龄(a BP)	1σ 误差年龄(a BP)	校正后 ¹⁴ C 年龄(a BP)
1	底栖有孔虫混合种	1780±25	1190—1319	1260±65
40	底栖有孔虫混合种	2060±25	1459—1636	1547±65
80	底栖有孔虫混合种	3350±25	3014—3210	3114±67

孔虫的微球、显球型大小界限不容易划定, 因此引入 MPS 的概念, 从另一个角度来体现有孔虫的生殖方式: 其 MPS 变大, 即显球型增多, 趋向无性生殖。水体温度与盐度的波动也影响有孔虫的生殖方式。挪威南部海域常见有孔虫 *Bolivina skagerrakensis* 存在双型现象(Qvale *et al*, 1985), 其微球型在温暖环境中含量更多(Nigam, 1986)。印度西海岸河口 14 个表层样品中常见种 *R. annectens* 的 MPS 与温度($R=-0.78$)、盐度($R=-0.71$)之间存在反比关系(Nigam *et al*, 1987), 如图 5 所示。由此可判断, 有孔虫的初房大小 MPS 可以反映河口的盐度变化: 东亚季风降雨增多, 为珠江三角洲带来大量淡水径流, 河口盐度急剧下降, 有孔虫 MPS 值增大, 微球/显球型比值减小。本文研究

图 4 *R. annectens* 的双型现象 (引自 Nigam *et al*, 1992)。Fig.4 Dimorphism of foraminifera *R. annectens*

A: 显球型; B: 微球型; a 和 b 为初房大小

图 5 底栖有孔虫 *R. annectens* 的 MPS 与水体盐度之间的关系(引自 Nigam *et al*, 1987)Fig.5 Relationship between MPS (mean proloculus size) of *R. annectens* and salinity

发现, ZJK03-Z 孔 MPS 与微球/显球型比值呈明显反向相关关系(图 6a, b), MPS 的极低值和微球/显球型的极高值均指示偏干环境, 即季风降雨偏少。

有孔虫壳体碳酸钙的 $\delta^{18}\text{O}$ 取决于海水 $\delta^{18}\text{O}$ 、海水温度、海平面和有孔虫生命效应, 而海水 $\delta^{18}\text{O}$ 又与盐度和冰期效应相关(同济大学海洋地质系, 1989)。3114—1260a BP 期间, 地处热带的珠江三角洲 *R. annectens* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要受海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值控制, 海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值又取决于季风降雨所引起的盐度波动。对于海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值和盐度的关系, 目前已有大量研究。同位素分馏导致降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负, “雨量效应”导致降雨量越多, 形成的降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 越偏负, 即河口区降雨量越多, 混合后的海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值越负, 水体盐度也越小。东热带太平洋、印度季风区河口海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与盐度之间都存在很好的正相关性, 海水 $\delta^{18}\text{O}$ 随降雨和陆地径流的增加和盐度的降低而降低 (Paul *et al*, 1999; Somayajulu *et al*, 2002; Benway *et al*, 2004; Singh *et al*, 2010)。研究表明, 底栖有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值与水体盐度之间也存在正相关关系(Nigam *et al*, 1993), 并且在印度季风降雨研究中得到了很好的运用(Panchang *et al*, 2012)。本文中 ZJK03-Z 孔 *R. annectens* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值的极大值(图 6c)指示了水体盐度的极大值, 即季风降雨偏少的偏干期。

底栖有孔虫瓷质壳与盐度的关系早在 20 世纪 50 年代开始就有大量研究, 研究结果表明高盐环境使瓷质壳类有孔虫含量增高(孙息春, 1991; 罗宪林等, 2001), 低盐度的河口、沼泽、港湾和泻湖一般缺失瓷质壳(Murray, 2007)。ZJK03-Z 的底栖有孔虫组合中以广盐类的玻璃壳占优势, 指示高盐环境的瓷质壳含量较低, 这说明珠江三角洲受淡水影响显著。图 6d 瓷质壳含量的峰值指示了水体高盐度的季风降雨偏少期。

综上所述, *R. annectens* 的 MPS、微球/显球型比值、壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值和瓷质壳含量这 4 个微体古生物指标显示了很好的一致性, 珠江三角洲在 3114—1260a BP 期间环境干、湿波动频繁, 可以识别出 14 个水体盐度偏高的环境偏干期, 对应于东亚夏季风降雨的

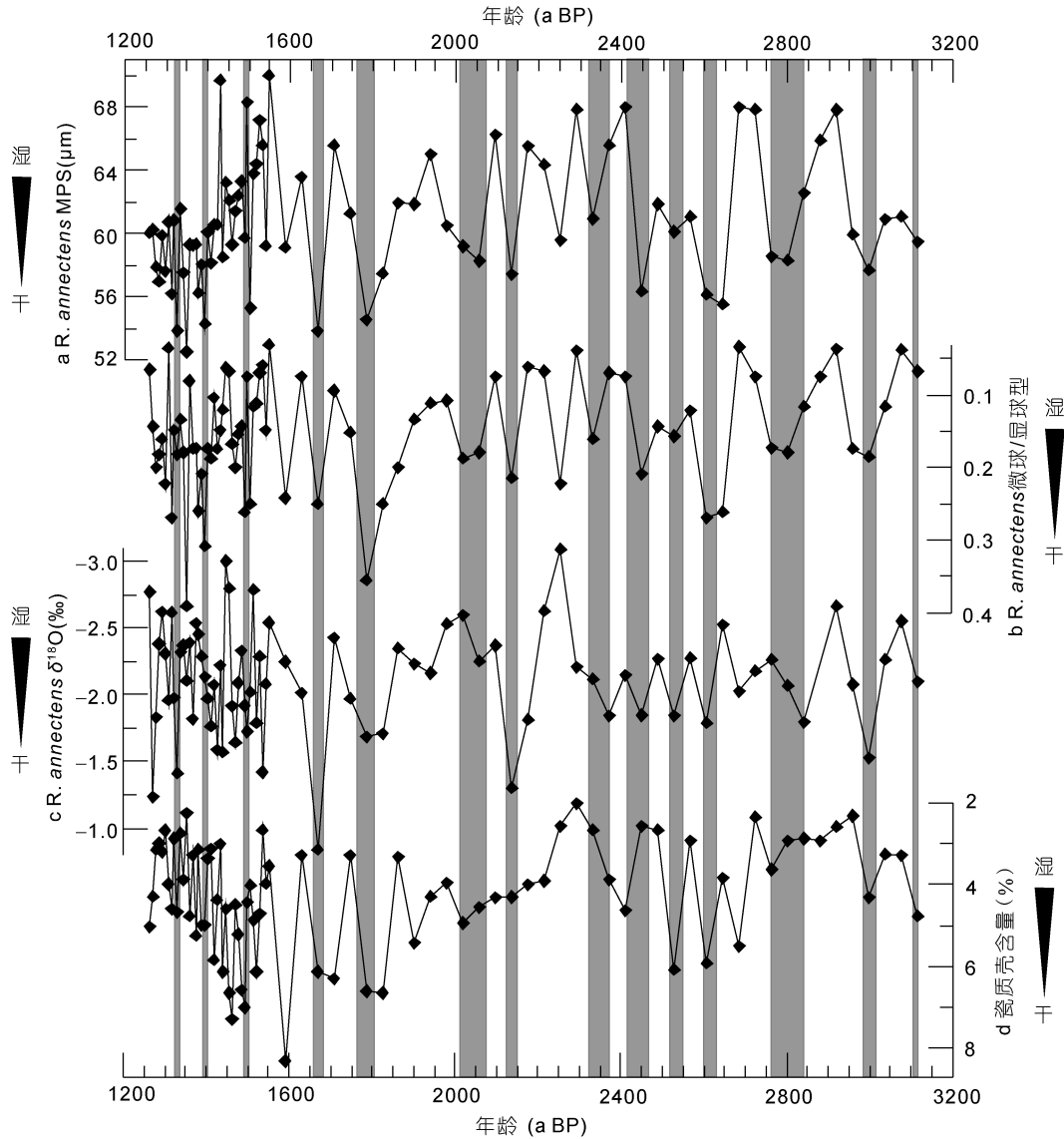


图6 ZJK03-Z 钻孔 *R. annectens* 的 MPS、微球/显球型比值、壳体 $\delta^{18}O$ 值和底栖有孔虫瓷质壳类含量随年代的变化曲线
 Fig.6 MPS, microspheric/meglospheric rate, shell $\delta^{18}O$ of *R. annectens*, and abundance of porcelaneous tests in total benthic foraminifera assemblage from core ZJK 03-Z during 3114-1260 a BP
 灰色条带为季风降雨减少期

偏少期, 时间大致为 3120—3100、3020—2980、2840—2760、2630—2590、2550—2520、2470—2410、2370—2320、2150—2120、2070—2020、1805—1760、1675—1650、1500—1480、1400—1390、1335—1320a BP。
2.2 3114—1260a BP 以来珠江三角洲季风降雨变化与热带辐合带(ITCZ)对比

已有研究显示, 中晚全新世以来随太阳辐射量的变化, 热带辐合带(ITCZ)发生过大规模的南北移动, 且它的位置变化与整个热带地区的降雨息息相关 (Wang *et al.*, 2005)。来自于南美洲委内瑞拉北部陆架 Cariaco 海盆 Ti、Fe 含量记录显示, ITCZ 在约

3110—3090、3025—2990、2860—2830、2620—2595、2570—2540、2460—2430、2360—2330、2125—2095、2045—2020、1730—1695、1650—1620、1500—1480、1415—1400、1340—1320a BP 位置偏南(图 7), 造成 Cariaco 海盆降雨量减少(Haug *et al.*, 2001)。来自 Cariaco 海盆东南方向 ITCZ 活动南界的石笋 $\delta^{18}O$ 记录显示该区由于 ITCZ 的南移导致降雨量增加, 在时间上与东亚夏季风的减弱期, 格陵兰冰芯所记录的冷期有很好的 consistency (Wang *et al.*, 2004)。阿曼南部 Qunf 洞石笋 $\delta^{18}O$ 记录显示 ITCZ 的南北移动为印度夏季风降雨量的首要控制因素, 该地区中晚全新世

ITCZ 持续南移(Fleitmann *et al.*, 2003, 2007)。

东亚季风是由海陆热力性质差异引起的一个庞大耦合季风系统。季风降雨量的多寡主要受由海而来的湿热水汽输入量以及季风雨带滞留的时间控制。对于低纬度华南地区来说,其季风降雨量受 ITCZ 移动影响更大(Cai *et al.*, 2010), ITCZ 雨带的长期滞留将促进区域降雨量的增多(Wang *et al.*, 2003)。来自于东亚季风区的记录显示, ITCZ 的南北移动对东亚季风降雨造成重要影响。贵州董哥洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 3550a BP 突然正向漂移,显示晚全新世的季风突然减弱,与 Cariaco 海盆记录的 ITCZ 南移一致(Dykoski *et al.*, 2005)。广东湖光岩玛珥湖的风尘输入指标 Ti 含量记录与董哥洞和南京葫芦洞石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值、Cariaco 海盆的 Ti 含量记录吻合,指示了东亚冬季风的加强对应于东亚夏季风的减弱、夏季风降雨的减少和 ITCZ

南移(Yancheva *et al.*, 2007)。

如图 7 所示,图 6 中珠江三角洲 ZJK03-Z 柱状样中各微体古生物指标所识别的东亚夏季风降雨的减少期与 Cariaco 海盆 Ti 含量所指示的 ITCZ 南移期之间存在很好的对应性,仅在时间上存在 5—75 年的偏差。其中 ZJK03-Z 孔识别的 1805—1760a BP 这一夏季风降雨减少期与相应的 ITCZ 南移时间 1730—1695a BP 偏差最大(75 年),该事件最近的测年点为(1547±65)a BP。 ^{14}C 测年本身有一定误差,也不能排除线性内插法带来的年龄的不确定性;另外, Cariaco 海盆的 Ti 含量曲线的年代也存在一定的误差。总之,在两个记录的年龄误差范围内, ZJK03-Z 孔微体古生物指标识别的夏季风降雨减少期和 ITCZ 南移期基本匹配。即在 3114—1260a BP 期间,珠江三角洲主要出现了 14 次夏季风降雨减少期,对应于 ITCZ 纬度位置的向南移动。

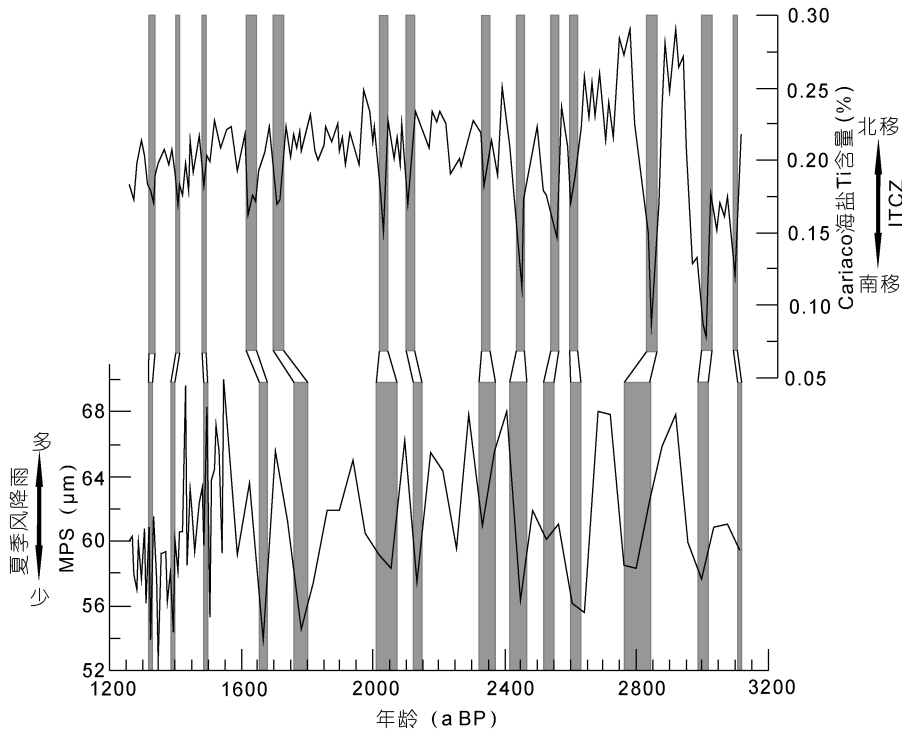


图 7 ZJK03-Z 柱状样 *R. annectens* 的 MPS 值与委内瑞拉北岸 Cariaco 海盆 Ti 含量(Haug *et al.*, 2001)对比结果

Fig.7 Comparison between MPS of *R. annectens* in core ZJK 03-Z and Titanium concentration from Cariaco Basin, off the Venezuelan coast

阴影为 ITCZ 的南移期,即东亚夏季风降雨减少期

3 结论

(1) 首次将底栖有孔虫形态学方法—平均初房大小(MPS)、微球/显球型比值应用到了中国河口三角洲的东亚季风降雨的研究中,取得了良好的结果,证明了其适用性;也填补了珠江三角洲晚全新世东亚

夏季风降雨记录的空白,为以后中国不同地区的季风降雨研究记录对比提供了依据。

(2) 东亚季风降水的减少使淡水径流输入减少,导致珠江三角洲的盐度偏高,水体环境的改变使浅水底栖有孔虫为其生存而做出了响应。*R. annectens*

的繁殖方式偏向有性生殖, MPS 值减小, 微球/显球型比值变大, 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正, 瓷质壳丰度增加。

(3) ZJK03-Z 钻孔 *R. annectens* 的 MPS、微球/显球型比值、壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值和底栖有孔虫组合瓷质壳含量揭示了珠江三角洲 3114—1260a BP 期间共有 14 个夏季风降雨减少期, 即 3120—3100、3020—2980、2840—2760、2630—2590、2550—2520、2470—2410、2370—2320、2150—2120、2070—2020、1805—1760、1675—1650、1500—1480、1400—1390、1335—1320a BP。这些东亚夏季风降雨记录与 ITCZ 的南北移动密切相关, ITCZ 南移使该区季风降雨减少。

参 考 文 献

- 方国祥, 李平日, 黄光庆, 1991. 珠江三角洲 8000 年来海平面变化. 地理研究, 10(4): 1—11
- 田向平, 1994. 珠江口伶仃洋温度分布特征. 热带海洋, 13(1): 76—80
- 同济大学海洋地质系, 1989. 古海洋学概论. 上海: 同济大学出版社, 1—316
- 华 棣, 1989. 珠江磨刀门海区底质中有孔虫、介形虫的分布. 热带海洋, 8(1): 10—18
- 孙息春, 1991. 广东深圳湾和海南新村港底质中的有孔虫. 微体古生物学报, 8(3): 325—337
- 李淑鸾, 1985. 珠江口底质中有孔虫埋葬群的分布规律. 海洋地质与第四纪地质, 5(2): 83—104
- 吴文祥, 刘东生, 2004. 4000aBP 前后东亚季风变迁与中原周围地区新石器文化的衰落. 第四纪研究, 24(3): 278—284
- 陈木宏, 赵焕庭, 温孝胜等, 1994. 伶仃洋 L_2 和 L_{16} 孔第四纪有孔虫群与孢粉化石带特征及其地质意义. 海洋地质与第四纪地质, 14(1): 11—22
- 邵晓华, 汪永进, 程 海等, 2006. 全新世季风气候演化与干旱事件的湖北神农架石笋记录. 科学通报, 51(1): 80—86
- 罗宪林, 李春初, 牟崇键, 2001. 伶仃洋有孔虫生物群和埋葬群的比较及河口沉积作用分析. 海洋学报(中文版), 23(4): 69—74
- 徐明广, 马道修, 周青伟等, 1986. 珠江三角洲地区第四纪海平面变化. 海洋地质与第四纪地质, 6(3): 93—102
- 黄光庆, 1996. 珠江三角洲新石器考古文化与古地理环境. 地理学报, 51(6): 508—517
- 谭亮成, 安芷生, 蔡演军等, 2008. 4.2ka BP 气候事件在中国的降雨表现及其全球联系. 地质论评, 54(1): 94—104
- Benway H M, Mix A C, 2004. Oxygen isotopes, upper-ocean salinity, and precipitation sources in the eastern tropical Pacific. Earth and Planetary Science Letters, 224(3—4): 493—507
- Cai Y L, Tan L, Cheng H *et al*, 2010. The variation of summer monsoon precipitation in central China since the last deglaciation. Earth and Planetary Science Letters, 291(1—4): 21—31
- Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H *et al*, 2005. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. Earth and Planetary Science Letters, 233(1—2): 71—86
- Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M *et al*, 2003. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman. Science, 300(5626): 1737—1739
- Fleitmann D, Burns S J, Mangini A *et al*, 2007. Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). Quaternary Science Reviews, 26(1—2): 170—188
- Haug G H, Hughen K A, Sigman D M *et al*, 2001. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. Science, 293(5533): 1304—1308
- Khare N, Nigam R, Hashimi N H, 2008. Revealing monsoonal variability of the last 2500 years over India using sedimentological and foraminiferal proxies. Facies, 54(2): 167—173
- Murray J W, 2007. Biodiversity of living benthic foraminifera: How many species are there? Marine Micropaleontology, 64(3—4): 163—176
- Nigam R, 1986. Dimorphic forms of recent foraminifera: An additional tool in paleoclimatic studies. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 53(2—4): 239—244
- Nigam R, Khare N, 1992. The reciprocity between coiling direction and dimorphic reproduction in benthic foraminifera. Journal of Micropalaeontology, 11(2): 221—228
- Nigam R, Khare N, 1995. Significance of correspondence between river discharge and proloculus size of benthic Foraminifera in paleomonsoonal studies. Geo-Marine Letters, 15(1): 45—50
- Nigam R, Rao A S, 1987. Proloculus size variation in recent benthic Foraminifera: Implications for paleoclimatic studies. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 24(5): 649—655
- Nigam R, Sarkar A, 1993. Mean proloculus size, $\delta^{13}\text{C}$ & $\delta^{18}\text{O}$ variation in recent benthic foraminifera from the west coast of India and their climatic implications. Indian Journal of Earth sciences, 20(1): 1—6
- Panchang R, Nigam R, 2012. High resolution climatic records of the past ~489 years from Central Asia as derived from benthic foraminiferal species, *Asterorotalia trispinosa*. Marine Geology, 307—310(0): 88—104
- Paul A, Mulitza S, Pätzold J *et al*, 1999. Simulation of Oxygen Isotopes in a Global Ocean Model. Use of Proxies in Paleoceanography. Springer Berlin Heidelberg, New York, US: 655—686
- Qvale G, Nigam R, 1985. Bolivina skagerrakensis, a new name for Bolivina cf. B. robusta, with notes on its ecology and distribution. The Journal of Foraminiferal Research, 15(1): 6—12
- Saraswat R, Deopujari A, Nigam R *et al*, 2011. Relationship between abundance and morphology of benthic foraminifera *Epistominella exigua*: Paleoclimatic implications. Journal of the Geological Society of India, 77(2): 190—196
- Shen P P, Li G, Huang L M *et al*, 2011. Spatio-temporal variability of phytoplankton assemblages in the Pearl River estuary, with special reference to the influence of turbidity and temperature. Continental Shelf Research, 31(16): 1672—1681
- Singh A, Jani R A, Ramesh R, 2010. Spatiotemporal variations of the $\delta^{18}\text{O}$ -salinity relation in the northern Indian Ocean. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 57(11): 1422—1431

- Somayajulu B L K, Rengarajan R, Jani R A, 2002. Geochemical cycling in the Hooghly estuary, India. *Marine Chemistry*, 79(3-4): 171—183
- Wai O W H, Wang C H, Li Y S *et al*, 2004. The formation mechanisms of turbidity maximum in the Pearl River estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 48(5-6): 441—448
- Wang B, Clemens S C, Liu P, 2003. Contrasting the Indian and East Asian monsoons: implications on geologic timescales. *Marine Geology*, 201(1-3): 5—21
- Wang X, Auler A S, Edwards R L *et al*, 2004. Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies. *Nature*, 432(7018): 740—743
- Wang Y, Cheng H, Edwards R L *et al*, 2005. The Holocene Asian Monsoon: Links to Solar Changes and North Atlantic Climate. *Science*, 308(5723): 854—857
- Wong L A, Chen J C, Xue H *et al*, 2003. A model study of the circulation in the Pearl River Estuary (PRE) and its adjacent coastal waters: 1. Simulations and comparison with observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C5): 3156
- Wu W X, Liu T S, 2004. Possible role of the “Holocene Event 3” on the collapse of Neolithic Cultures around the Central Plain of China. *Quaternary International*, 117(1): 153—166
- Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J *et al*, 2007. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. *Nature*, 445(7123): 74—77
- Zhang S, Lu X X, Higgitt D L *et al*, 2008. Recent changes of water discharge and sediment load in the Zhujiang (Pearl River) Basin, China. *Global and Planetary Change*, 60(3-4): 365—380
- Zong Y, 2004. Mid-Holocene sea-level highstand along the South-east Coast of China. *Quaternary International*, 117(1): 55—67

APPLICATION OF FORAMINIFERAL PROLOCULUS SIZE TO THE EAST ASIAN SUMMER MONSOON RAINFALL STUDY IN ZHUJIANG RIVER DELTA DURING LATE HOLOCENE

YU Zhou-Fei^{1,2}, LI Tie-Gang¹, NAN Qing-Yun¹, ZHANG Shuai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Mean proloculus size (MPS), proportion of microspheric and meglospheric forms, and ¹⁸O of calcareous shells of a common species *Rotalidium annectens*, as well as the abundance of porcelaneous tests in total benthic foraminiferal fauna from Core ZJK 03-Z in Zhujiang (Pearl) River Delta, northern South China Sea in Guangdong Province, South China were measured to indicate the fluctuation of salinity in the estuary due to summer monsoon rainfall input. Fourteen short-term dry periods (reduced summer monsoon rainfall) were recognized in this region during 3114—1260 a BP. The monsoon variation is consistent with the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) movement reflected by Ti% record from the Cariaco Basin in South America. The strength of East Asian summer monsoon rainfall in Zhujiang River Delta during the Late Holocene is closely related to the southward and northward movement of the ITCZ: the reduced monsoon rainfall periods was coupled with the southward movement of ITCZ, or vice versa.

Key words Zhujiang (Pearl) River Delta; Late Holocene; mean proloculus size (MPS); East Asian summer monsoon rainfall; intertropical convergence zone (ITCZ)