

南海 ODP1148 站中中新世(12 ~ 18.3 Ma) 天文调谐的年代标尺

田 军,汪品先,成鑫荣,李前裕

同济大学海洋地质国家重点实验室,上海 200092

摘要: ODP1148 站深海沉积岩心的磁化率记录显示出较强的周期性变化规律. 研究发现,中新世和渐新世的深海地层物性参数具有很强的斜率周期. Shackleton *et al.* 利用这一规律,以北半球高纬太阳辐射曲线作为天文调谐的目标,以 ODP154 航次的深海沉积岩心的磁化率记录作为调谐对象,将磁化率的极大值与北半球天文辐射的极小值相对应,建立了 14 ~ 34 Ma 的天文调谐的年代标尺. 采用相同的方法,利用南海北部 ODP1148 站深海沉积岩心的磁化率记录和北半球高纬太阳辐射曲线建立了南海中中新世天文调谐的年代标尺. 调谐后的磁化率记录显示了很强的斜率周期和较强的岁差周期,并与太阳辐射在这 2 个记录上高度相关,此外偏心率周期在磁化率记录中也较显著. 调谐后 1148 站的浮游有孔虫事件年龄与 ODP154 航次采用相同的天文调谐方法获取的事件年龄异常接近,而与传统方法获取的生物地层事件年龄有较大差距,这在一定程度上证明了利用天文调谐的方法建立中新世深海地层年代标尺的可行性.

关键词: 南海; ODP1148 站; 中中新世; 磁化率; 天文年代标尺.

中图分类号: P53

文章编号: 1000 - 2383(2005)05 - 0513 - 06

收稿日期: 2005 - 05 - 17

Astronomically Tuned Time Scale 12 Ma to 18.3 Ma, ODP Site 1148, Northern South China Sea

TIAN Jun, WANG Pin-xian, CHENG Xin-rong, LI Qian-yu

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Lithological cyclicity was observed in magnetic susceptibility records of the deep sea sediments from ODP Site 1148 in the northern South China Sea (SCS), which was considered to be related to obliquity cycles in the Miocene and Oligocene. Using recent methodology, an astronomically tuned time scale for the middle Miocene of ODP Site 1148 in the northern SCS was established. After tuning, the magnetic susceptibility (MS) records show strong obliquity and precession cycles as well as prominent eccentricity cycles. The planktonic foraminiferal events identified within the studied interval of ODP Site 1148 show ages very close to those set by Shackleton *et al.* (1999) for ODP Leg 154, which were obtained by the same astronomical tuning method as this study, but differ substantially from the traditional age. The results lend support to the practicality of the method for establishing a tuned Miocene time scale.

Key words: South China Sea; ODP site 1148; Middle Miocene; magnetic susceptibility; astronomical timescale.

精确的年代标尺是古海洋学研究的基础. 0 ~ 6 Ma 底栖有孔虫壳体的 ^{18}O 表现出显著的冰期、间冰期旋回,可进行全球对比,通常被用来建立天文调谐的年代标尺. 比较典型的底栖有孔虫 ^{18}O 剖面包括大西洋 ODP659 站 (Tiedemann *et al.*, 1994)、东

太平洋 ODP846 站 (Shackleton *et al.*, 1995a, 1995b)、西太平洋 ODP1143 站 (Tian *et al.*, 2002; 田军等, 2005) 以及 Shackleton 的 6 Ma 合成剖面 (<http://131.111.44.196/coredata/v677846.html>). 更老的深海地层,特别是中新世及其以前的地

基金项目:国家自然科学基金项目 (Nos. 40476027, 40306011, 4999560, 40321603); 国家重点基础研究发展规划项目 (G2000078500).

作者简介:田军(1974 -),男,副教授,主要从事海洋地质学的科研与教学工作. E-mail: tianjun@mail.tongji.edu.cn

层,由于有孔虫 ^{18}O 的冰期、间冰期旋回不甚显著,变化幅度较小,轨道尺度上的全球对比已显得捉襟见肘,地层年代框架通常依靠生物地层和磁性地层,例如古地磁极性反转年代标尺 (GRTS) (Tauxe *et al.*, 1984; Cande and Kent, 1992, 1995) 和生物地层年代标尺 (Berggren *et al.*, 1985a, 1985b). 由于生物地层和磁性地层年龄控制点较少,误差较大,难以满足轨道尺度上的古海洋学研究,研究者开始尝试利用深海沉积岩心的物性参数,如磁化率,建立早上新世、中新世和渐新世的天文年代标尺. 原因之一是,深海沉积岩心中与生产力有关的参数如碳酸钙的含量表现出较强的斜率周期,而与陆源输入物有关的参数如风尘含量则表现出较强的岁差周期 (Shackleton and Crowhurst, 1997),而物性参数的变化则受到这些因素的影响. Shackleton 及其合作者在大西洋 ODP154 航次钻取的深海沉积岩心中,利用周期性变化显著的磁化率记录建立了 14 ~ 34 Ma 的天文年代标尺,取得了很好的效果 (Shackleton and Crowhurst, 1997; Shackleton *et al.*, 1999),被后来的研究者广泛地引用 (Zachos *et al.*, 2001a, 2001b). 本文尝试利用南海北部 ODP1148 站深海沉积岩心的磁化率记录,运用同样的方法建立中中新世的天文年代标尺.

1 材料和方法

1.1 磁化率数据

ODP1148 站位于南海北部下陆坡 (N18°50.17', E116°33.94', 水深 3 294 m, 图 1), 包括 2 个钻孔 (1148A 和 1148B), 依靠岩心的物性参数, 建立了 1148 站 A、B 两孔的合成深度 (0 ~ 852 m) (Wang *et al.*, 2000). 岩心的磁化率通过多传感追踪 (Multi-Sensor track, MST) 装置在取心的过程中现场测定, 分辨率为 5 cm. 1148 站合成深度 155 m 以上岩心采用高级活塞取心技术, 155 m 以下采用延伸式取心筒技术. 2 种取心方式对 GRA 密度的测定会带来误差, 但对磁化率的影响很小. 本文应用的岩心磁化率深度范围为 280 ~ 370 m, 数据由 ODP 提供 (Wang *et al.*, 2000).

1.2 地球轨道参数

有多种计算地质历史时期地球轨道参数 (偏心率、斜率和岁差) 的方案, 其中著名的有 Berger (1988)、Berger and Loutre (1991) 和 Laskar *et al.*

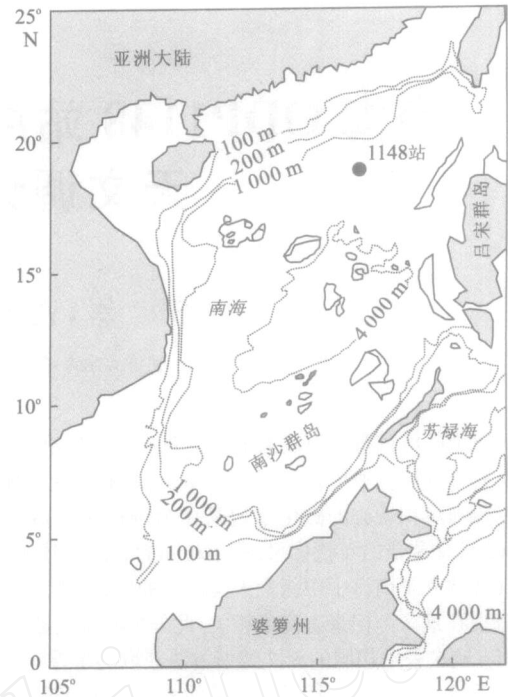


图 1 南海北部 ODP1148 站位置

Fig. 1 Location map of ODP site 1148 in the northern South China Sea

(1993). 地球轨道参数的计算通常考虑两方面的因素, 首先是地月系统围绕太阳公转的轨道, 其次是地月相互作用对地球轨道的影响. Laskar *et al.* (1993) 的解决方案考虑了地月引力导致的地表潮汐摩擦力, 因为潮汐摩擦力会影响地球自转速率和地球形状, 从而对斜率和岁差的计算产生影响. 笔者采用 Laskar *et al.* (1993) 的解决方案, 利用斜率和岁差模拟了一条北纬 65° 盛夏的太阳辐射曲线. 尽管更新世以来, 模拟分析的结果证明气候响应与太阳辐射驱动之间在斜率和岁差周期上有明显的相位差 (Imbrie and Imbrie, 1980; Imbrie *et al.*, 1984), 但在上新世及更老的地质年代, 尚无确凿的数据刻画具体的滞后关系, 因此假定太阳辐射与磁化率记录在斜率和岁差周期上的相位差为 0, 尽管这种假设会影响结果, 但一个斜率周期 (41 ka) 或一个岁差周期 (21 ka) 的误差仍在可以容忍的范围内.

1.3 调谐方法

ODP1148 站的磁化率是我们用作天文调谐的主要源信号. 在碳酸钙含量较高的深海地层中, 岩心磁化率的大小与陆源物质的比例成正比. 与岩心磁化率的极小值相比, 岩心磁化率的极大值通常不受背景噪音的影响, 因此, 我们选择磁化率极大值点作

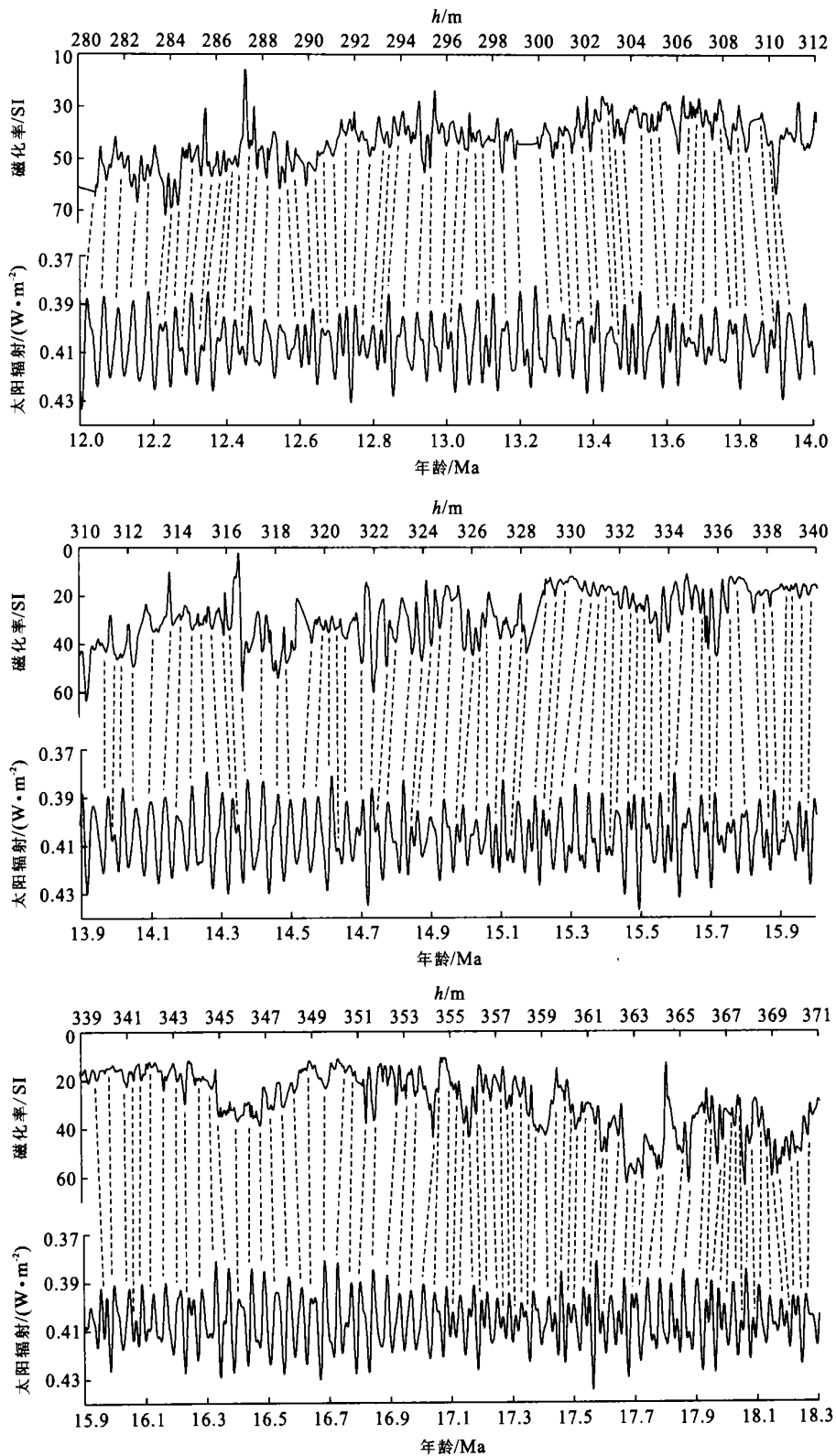


图 2 南海北部 ODP1148 站磁化率记录(280~370 m)与北半球高纬太阳辐射曲线(12~18.3 Ma). 磁化率的极大值与太阳辐射曲线的极小值相对应

Fig. 2 Magnetic susceptibility (MS) records of ODP site 1148 in the northern SCS (280 - 370 m) and the high northern hemisphere insolation records (12 - 18.3 Ma)

年龄的控制点.在天文调谐的过程中,存在 2 种相反的调谐方案,即将磁化率的极大值与北半球天文辐射的极小值相对应,也可以将磁化率的极大值与天文辐射的极大值相对应.大西洋 ODP154 航次的调谐结果表明,后一种方案会在斜率周期上产生不连续的相位差,甚至导致底栖有孔虫 ^{18}O 的极大值与北半球高纬辐射量的极大值呈正相关性的情况出现 (Shackleton and Crowhurst, 1997; Shackleton *et al.*, 1999),这显然与常理相悖.因此,本文采用第一种方案,即将磁化率的极大值与北半球天文辐射的极小值相对应.

2 结果与讨论

调谐过程如图 2 所示.在将磁化率极大值与北半球太阳辐射极小值对应的过程中,尽量考虑均一的原则,避免沉积速率大范围波动的情况出现.由于 1148 站天文调谐的深度范围为 280~370 m,在综合考虑了 ODP1148 站底栖有孔虫 ^{18}O 曲线形态与 Zachos *et al.* (2001b) 合成的全球大洋底栖有孔虫 ^{18}O 曲线形态对比和生物地层的基础上,将合成深度 280.74 m 处的磁化率极大值对应于 12.021 Ma 的太阳辐射曲线的极小值,将合成深度 370.54 m 处的磁化率极大值对应于 18.3 Ma 的太阳辐射曲线的极小值.

天文调谐后,1148 站 280~370 m 钻孔深度与年龄表现出较好的线性关系(图 3a),沉积速率基本在 $10\sim 40(\text{m}\cdot\text{Ma}^{-1})$ 之间变化(图 3b),平均沉积速率为 $15.7(\text{m}\cdot\text{Ma}^{-1})$,与 184 航次初始报告根据分辨率较低的生物地层年代框架估算的沉积速率 ($11\sim 17(\text{m}\cdot\text{Ma}^{-1})$) 相近 (Wang *et al.*, 2000),而且表现出明显的冰期、间冰期旋回的差异,反映了南极冰盖的形成对地表气候变化的影响.结果表明,该研究段的沉积基本上是连续的,没有明显的沉积间断,虽然短尺度的地层缺失可能表现在磁化率相邻极大值峰的紧密排列或叠加上,如 366~370 m 这一段(图 2),但是对于整体并无太大影响.

交叉频谱分析是衡量 2 个时间序列在某个特定的频率域(或周期)上相关性的有效分析方法,也是评估天文调谐的年代标尺的常用方法.相关系数和相位是交叉频谱分析结果的 2 个重要指标.当相位被置于 0 时,相关系数用作衡量 2 个时间序列在某些特定周期上的线性相关性.大于某个标准的相关

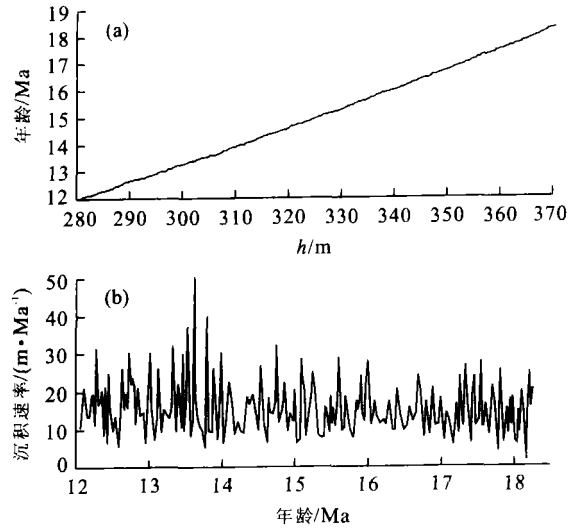


图 3 南海北部 ODP1148 站深度与年龄的关系(a)以及线性沉积速率(b)

Fig. 3 The depth-age relationship of ODP site 1148 (a) and the linear sedimentation rate (b)

系数意味着用作分析的 2 个时间序列在特定的周期上线性相关.相位差指示 2 个时间序列时间上的变化在某些特定周期上的先后关系.本文采用古气候时间序列分析常用的“ANALYSERIES 1.2”程序对 1148 站的磁化率与北半球太阳辐射进行交叉频谱分析 ($12\sim 18.3\text{ Ma}$).结果显示,磁化率(MS)与太阳辐射(Insolation)均表现出显著的斜率(41 ka)与岁差周期($23\text{ ka}, 22\text{ ka}, 19\text{ ka}$),且二者在斜率与岁差周期上高度相关(相关系数均远远超过了 80% 的检验标准).由于调谐的过程中假定了两者的 0 相位差,因此相关差的讨论在此没有意义.与太阳辐射的频谱相比,1148 站 $12\sim 18.3\text{ Ma}$ 的频谱还表现出较强的偏心率周期 ($100\text{ ka}, 138\text{ ka}$),显示了偏心率的控制作用,这与 ODP154 航次相同时间范围内天文调谐后的磁化率频谱特征一致 (Shackleton *et al.*, 1999).此外, $12\sim 18.3\text{ Ma}$ 的磁化率记录还显示出很强的 175 ka 的周期,这是中中新世斜率的振幅变化表现出的典型周期,在 ODP154 航次天文调谐后的磁化率频谱中也有很明显的表现 (Shackleton *et al.*, 1999).

表 1 列举了 1148 站 280~370 m 之间的浮游有孔虫事件及其相应的年龄.年龄 1 来自 Berggren *et al.* (1995),年龄 2 来自 Shackleton *et al.* (1999),年龄 3 为 1148 站采用天文调谐后的年龄.总体上,1148 站经天文调谐后获得的浮游有孔虫事件年龄

表 1 ODP1148 站 280~370 m 合成深度浮游有孔虫事件及其年龄

Table 1 Foraminiferal events of ODP Site 1148 (280 - 370 m)

事件类型	事件	深度/m	t ₁ /Ma	t ₂ /Ma	t ₃ /Ma
未现面(LO)	<i>G. foehsi</i>	301.02	13.0		13.3
初现面(FO)	<i>G. foehsi</i>	303.28	13.4	13.41	13.5
初现面(FO)	<i>G. praefoehsi</i>	308.68	14.0	13.77	13.8
未现面(LO)	<i>P. glomerosa</i>	312.38	14.8		14.1
初现面(FO)	<i>G. preamenardii</i>	317.98	14.9	14.40	14.5
初现面(FO)	<i>Orbulina</i>	320.37	15.1	14.70	14.6
初现面(FO)	<i>P. glomerosa</i>	344.18	16.1	16.30	16.3
初现面(FO)	<i>P. curva</i>	352.98	16.3		16.9
初现面(FO)	<i>P. sicana</i>	355.39	16.4	17.00	17.1
未现面(LO)	<i>C. dissimilis</i>	364.88	17.3	17.50	17.8

t₁ 据 Berggren *et al.* (1995); t₂ 据 Shackleton *et al.* (1999); t₃ 为本次研究结果.

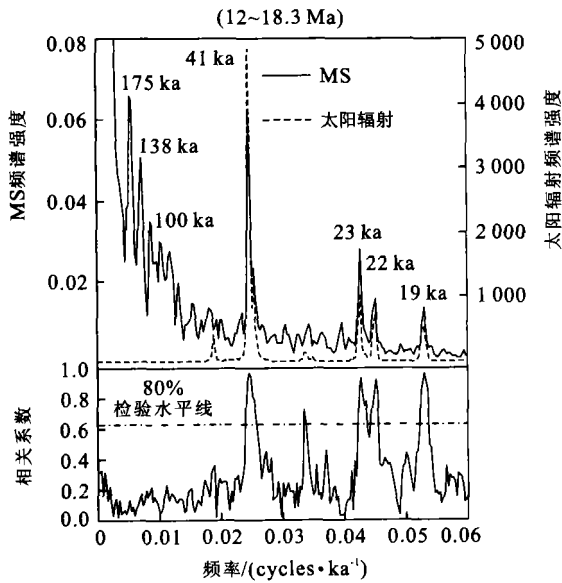


图 4 南海北部 ODP1148 站磁化率记录与北半球太阳辐射记录的交叉频谱

Fig. 4 Cross spectral analyses of magnetic susceptibility records of ODP site 1148 with the high northern hemisphere insolation records. The solid line in the upper part denotes the spectrum of the MS records and the dashed line the insolation records

图 4 上部的实线代表磁化率的频谱,虚线代表太阳辐射记录的频谱;图 4 下部的实线代表相关系数

与 Berggren *et al.* (1995) 的年龄差距大多为 30 万年左右,但也有少数事件年龄的差距较大,达到 70 至 80 万年;但与同样采用天文调谐获得的 Shackleton *et al.* (1999) 的年龄相比,1148 站浮游有孔虫事件的年龄则与其异常接近,差距一般为 10 万年左右,这在一定程度上证明了利用磁化率进行天文调谐的方法在全球范围内的适用性.

3 结论

本文利用 ODP1148 站深海沉积岩心的磁化率记录和北半球高纬太阳辐射曲线建立了南海中新世天文调谐的年代标尺. 调谐后的磁化率记录显示了很强的斜率周期和较强的岁差周期,并与太阳辐射在这 2 个记录上高度相关,此外偏心率周期在磁化率记录中也较显著. 调谐后 1148 站的浮游有孔虫事件年龄与 ODP154 航次采用相同的天文调谐方法获取的事件年龄异常接近,而与传统方法获取的生物地层事件年龄有一定差距,这在一定程度上证明了利用天文调谐的方法建立中新世深海地层年代标尺的可行性. ODP1148 站天文调谐的年代标尺必将在南海晚新生代古海洋学与古环境学研究方面带来新的认识.

致谢:分析研究的样品及资料由国际大洋钻探计划提供.

References

Berger, A., 1988. Milankovitch theory and climate. *Rev. Geophys.*, 26:624 - 657.
 Berger, A., Loutre, M. F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quat. Sci. Rev.*, 10: 297 - 317.
 Berggren, W. A., Kent, D. V., Van Couvering, J. A., 1985a. The Neogene. Part 2. Neogene geochronology and chronostratigraphy. In: Snelling, N. J., ed., *The chronology of the geological record. Geol. Soc. Mem.*, 10:211 - 260.
 Berggren, W. A., Kent, D. V., Flynn J. J., 1985b. Jurassic to Paleogene. Part 2. Paleogene geochronology and chronostratigraphy. In: Snelling, N. J., ed., *The chronology*

- of the geological record. *Geol. Soc. Mem.*, 10: 141 - 195.
- Berggren, W. A., Kent, D. V., Swisher, et al., 1995. A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. In: Berggren, W. A., Kent, D. V., Aubry, M. P., eds., *Geochronology time scales and global stratigraphic correlation. S EPM Spe. Publ.*, 54: 129 - 212.
- Cande, S. C., Kent, D. V., 1992. A new geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J. Geophys. Res.*, 97: 13917 - 13951.
- Cande, S. C., Kent, D. V., 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J. Geophys. Res.*, 100: 6093 - 6095.
- Imbrie, J., Imbrie, J. Z., 1980. Modeling the climatic response to orbital variations. *Science*, 207: 943 - 953.
- Imbrie, J., Hays, J. D., Martinson, D. G., et al., 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine ^{18}O record. In: Berger, A., ed., *Milankovitch and Climate*, D. Reidel, Norwell, Mass, 269 - 305.
- Laskar, J., Joutel, F., Boudin, F., 1993. Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from - 20 Myr to + 10 Myr. *Astron. Astrophys.*, 270: 522 - 533.
- Shackleton, N. J., Hall, N. J., Pate, D., 1995a. Pliocene stable isotope stratigraphy of Site 846. In: Piasias, N. G., Mayer, L. A., Janecek, T. R., et al., eds., *Proc. ODP Sci. Results*, 138: 337 - 355.
- Shackleton, N. J., Crowhurst, S., Hagelberg, T., et al., 1995b. A new Late Neogene time scale: Application to Leg 138 sites. In: Piasias, N. G., Mayer, L. A., Janecek, T. R., et al., eds., *Proc. ODP Sci. Results*, 138: 73 - 101.
- Shackleton, N. J., Crowhurst, S., 1997. Sediment fluxes based on an orbitally tuned time scale 5 Ma to 14 Ma, Site 926. In: Shackleton, N. J., Curry, W. B., Richter, C., et al., eds., *Proc. ODP, Sci. Results*, 154: 69 - 82.
- Shackleton, N. J., Crowhurst, S. J., Weedon, G. P., et al., 1999. Astronomical calibration of Oligocene-Miocene time. *Phil. Trans. R. Soc. London A*, 357: 1907 - 1929.
- Tauxe, L., Tucker, P., Petersen, N. P., et al., 1984. Magnetostratigraphy of Leg 73 sediments. In: Hsu, K. J., ed., *Initial Rept. DSDP, 73*: 609 - 621.
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., et al., 2002. Astronomically tuned Plio-Pleistocene benthic ^{18}O records from South China Sea and Atlantic-Pacific comparison. *Earth and Planetary Science Letters*, 203: 1015 - 1029.
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., 2004. Stable isotope equilibrium test between benthic foraminifer *Cibicides* and *Uvigerina* at ODP Site 1143, Southern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 1 - 6 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., et al., 2005. Astronomically tuned Plio-Pleistocene benthic ^{18}O records from South China Sea and Atlantic-Pacific comparison. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 31 - 39 (in Chinese with English abstract).
- Tiedemann, R., Sarnthein, M., Shackleton, N. J., 1994. Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic ^{18}O and dust flux records from Ocean Drilling Program Site 659. *Paleoceanography*, 9: 619 - 638.
- Wang, P., Prell, W. L., Blum, P., et al., 2000. Proceedings of the ocean drilling program. Initial reports 184, Ocean Drilling Program College Station.
- Zachos, J. C., Shackleton, N. J., Revenaugh, J. S., et al., 2001a. Periodic and non-periodic climate response to orbital forcing across the Oligocene-Miocene boundary. *Science*, 292: 274 - 277.
- Zachos, J. C., Pagani, M., Sloan, L., et al., 2001b. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292: 686 - 693.

附中文参考文献

- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 2004. 南海 ODP1143 站底栖有孔虫 *Cibicides* 与 *Uvigerina* 稳定氧碳同位素值的均衡试验. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(1): 1 - 6.
- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 等, 2005. 南海 ODP1143 站上新世至更新世天文年代标尺的建立. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(1): 31 - 39.