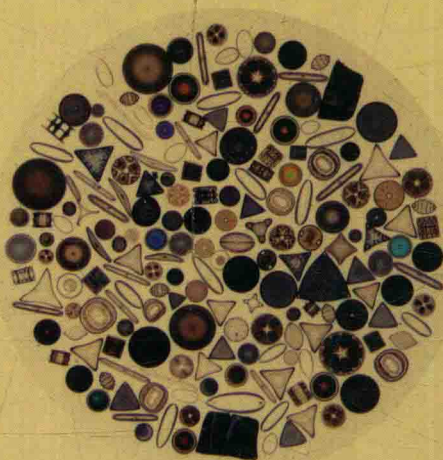


国家自然科学基金（项目编号40676026）资助项目

YINGYONG GUIZAO SIDU NANHAI XI
NANBU WANDISIJI YILAI DE GUHUAJING

应用硅藻释读南海西、南部晚第四纪以来的古环境

孙美琴 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

国家自然科学基金(项目编号 40676026)资助项目

应用硅藻释读南海西、南部 晚第四纪以来的古环境

孙美琴 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

应用硅藻释读南海西、南部晚第四纪以来的古环境/孙美琴著. —武汉:中国地质大学出版社,2014.12

ISBN 978-7-5625-3545-4

I. ①应…

II. ①孙…

III. ①南海-晚第四纪-古环境-研究

IV. ①Q911.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 247326 号

应用硅藻释读南海西、南部晚第四纪以来的古环境

孙美琴 著

责任编辑:王凤林

责任校对:周 旭

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:224 千字 印张:8.5

版次:2014 年 12 月第 1 版

印次:2014 年 12 月第 1 次印刷

印刷:武汉珞南印务有限责任公司

ISBN 978-7-5625-3545-4

定价:32.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

本书通过对取自南海的 62 个站位的表层样品和 3 个柱状岩芯进行硅藻、沉积物粒度和地球化学分析,结合 ^{14}C 测年结果和已有的研究资料,查明了该海区硅藻的种类组成及分布特点,探讨了硅藻分布与现代海洋环境之间的关系,进而对南海西、南部晚第四纪以来古海洋环境演变进行了较为详细的研究。

本书从南海表层沉积物和南海西、南部两个柱样沉积物中,共鉴定到硅藻 272 种和变种、变型,隶属 57 属,并附 27 个图版。其中记录 2 个新种和 6 个我国首次记录的种。新种是双角缝舟藻四角变型 *Rhaphoneis amphiceros* f. *tetragona* Sun et Lan 和珠网斑盘藻 *Stictodiscus arachne* Sun et Lan; 新记录种分别是 *Asterolampra grevillei*, *Dictyoneis marginata*, *Plagiogramma papille*, *Rutilaria radiata*, *Triceratium contumax* 和 *Triceratium subofficinosum*。

南海表层沉积硅藻种类丰富,以热带外洋种为优势,伴有一定量的热带—亚热带近岸种和广布种。优势种类为非洲圆筛藻、结节圆筛藻、柱状小环藻、楔形半盘藻、具槽直链藻、海洋菱形藻、方格罗氏藻、菱形海线藻、离心列海链藻以及长海毛藻。其中,热性种结节圆筛藻在南海分布最广,是主要的优势种类。由于各海区环境因素的差异,硅藻遗壳含量分布是不同的,总体上,从陆架至深海盆,其数量呈递增趋势。沉积硅藻的分布受海底地形地貌、水动力、沉积速率、水文气候等环境条件综合作用的影响。

根据沉积硅藻中具有指示意义的硅藻种的分布和生态变化,可将该海区分成 6 个硅藻组合带。各组合分别反映不同的海洋环境,其分布主要受到海洋环流的影响,表现为黑潮暖流、印度洋暖水的入侵以及沿岸流对南海表层沉积硅藻分布的影响。其中, *Coscinodiscus africanus*, *Coscinodiscus nodulifer*, *Hemidiscus cuneiformis* 和 *Nitzschia marina* 等热性硅藻种类可作为黑潮暖流及印度洋暖水入侵南海的指示种。而 *Cyclotella stylum*, *Cyclotella striata*, *Melosira sulcata*, *Diploneis bombus*, *Diploneis crabro* 和 *Trachyneis antillarum* 等则可作为判断沿岸流对南海水域影响强度的指示种。沿岸种具槽直链藻在半深海一些区域的大量出现,可能是受到沿岸水的入侵,或者是受到浊流沉积搬运的影响。长海毛藻 *Thalassiothrix longissima* 在深海沉积物中大量出现可以作为南海水体高初级生产力的指示种。

对南海西、南部的两个柱状样 SA13-76 和 SA08-34 沉积硅藻研究表明,两孔的硅藻均呈现氧同位素旋回变化特征。根据表层沉积硅藻研究结果可以认为在上升流作用的高生产力区,历史时期的沉积硅藻相比钙质生物能更好地反映古季风演变。南海西、南部海区明显存在冰期时夏季风弱,全新世夏期风强的特点。季风是驱动上升流加强的主要因素。不论在冰期亦或全新世,南海夏季风均存在不稳定性和旋回性的特征。

综合分析地球化学指标和微体古生物指标认为,南海西、南部的古生产力演化趋势在氧同位素 1、3、5 期表现为高的特征,2、4 期表现为相对较低的特征。对 SA08-34 孔各古生

产力指标对比研究认为,硅藻和有孔虫、 CaCO_3 在 MIS 3 期显著的差异,可能是因为有孔虫和 CaCO_3 均发生了较强的溶解作用;也可能与影响各个指标变化的主要因素不同有关,比如有孔虫受季风气候影响的程度可能比硅藻要小。古生产力演化过程的主要控制因素推测主要受季风影响。

本次研究的 3 个柱状样中记录的一些气候突变事件,初步认为可能分别与首先在北半球高纬地区发现的 YD 事件及 H 事件($\text{H}_1 \sim \text{H}_5$)有关。根据 SA08-34 和 SA09-90 钻孔研究分析,推算南海南部末次冰盛期大约在 13.4~13.1kaBP 时结束而进入冰消期。综合南海西、南部 3 个钻孔所揭示的沉积环境演变非常一致,3 个钻孔反映的南海西、南部的古生产力、古季风、古气候演变趋势大致相同,初步认为晚第四纪以来南海西、南部气候均主要受东亚夏季风控制。

笔 者
2014 年 10 月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 古海洋学研究历史与现状	1
第二节 南海的古海洋学研究	2
第三节 硅藻的研究与进展	3
一、硅藻研究简史	3
二、国内研究进展	7
第四节 选题目的及主要内容	8
第二章 区域地质概况	10
第一节 南海位置及海底地形地貌特征	10
第二节 海底沉积物特征	10
第三节 南海现代表层海流及水温和盐度的分布	12
第四节 上升流	13
第三章 材料与方法	14
第一节 研究材料	14
第二节 研究方法	17
一、硅藻样品分析	17
二、沉积物粒度分析	18
三、沉积物地球化学分析	19
四、地质年代测定	19
第四章 南海表层和柱样沉积物硅藻分类	20
第一节 本次发现的新种和新记录种	20
一、新种	20
二、我国的新记录种	20
第二节 种类与生态特征	22
第五章 表层沉积物中的硅藻分布及环境意义	36
第一节 表层沉积物粒度特征	36
一、沉积物类型及分布特征	36
二、粒度参数分布特征	38
第二节 硅藻属种组成	40
第三节 优势种生态环境划分	41
第四节 硅藻分布特征	42
第五节 硅藻组合分区	44

第六节 南海硅藻生态特征	47
第七节 影响表层沉积硅藻分布的主要因素	48
一、海底地质地貌的影响	48
二、水动力的影响	48
三、沉积速率的影响	50
四、水文气候条件的影响	50
第八节 典型硅藻种类及其环境意义	51
第六章 柱状沉积物记录的古海洋环境演化	55
第一节 年代框架	55
一、 ^{14}C 测年	55
二、碳酸盐地层学	55
三、沉积速率	56
第二节 柱状沉积物岩性和粒度分布特征及环境意义	57
一、SA08-34 孔	57
二、SA09-90 孔	59
三、SA13-76 孔	62
第三节 柱状岩芯中的硅藻分布特征及其古环境意义	65
一、SA08-34 孔	65
二、SA13-76 孔	67
三、SA09-90 孔	69
第四节 沉积地球化学特征及环境意义	69
一、SA08-34 孔	69
二、SA09-90 孔	74
第五节 晚第四纪以来的古生产力演化	79
一、古生产力的不同记录	79
二、SA08-34 孔各古生产力指标对比	83
第六节 古上升流与古季风演化	84
第七节 新仙女木和 Heinrich 事件	85
第八节 南海西、南部晚第四纪以来的古环境演变	87
第七章 结论与展望	90
一、结论	90
二、本研究的创新点	91
三、存在的问题及工作展望	92
主要参考文献	93
图版及图版说明	

第一章 绪 论

温室效应、全球变暖、海平面上升、厄尔尼诺、环境恶化等已经成为影响人类文明进步的全球性问题,世界各国正加强合作,着力解决相关问题。其问题的基本根源可归结为地球各圈层及人与地球系统之间相互作用的结果,深入了解掌握全球变化规律成为当今世界主要的科研焦点和紧迫的使命任务。全球变化归根到底是全球环境的变化,而海洋占地球表面积的71%,它不仅是地球生命的巨大储藏库,而且是地球各圈层界面连续活动的场所;海洋不只是调节气候、降低高纬度地区的季节变化幅度,更与大气交互作用影响短期甚至长期气候变化,对地球系统有巨大的调节作用,可以说海洋是地球生命的脉搏。20世纪人类为了满足对矿产资源的需求而研究海洋,21世纪为了保护赖以生存的地球人类必须研究海洋。而要想很好地认识现在所面临的环境问题,必须了解过去的环境变化,所以20世纪70年代以来,随着全球变化思想的迅速发展,研究地质历史时期以来的古气候和古海洋环境演变的古海洋学已成为地球科学最为活跃的前沿之一,特别是晚第四纪古海洋学的研究更是受到世界地学界的普遍关注。

第一节 古海洋学研究历史与现状

古海洋学是依据海洋沉积物中记录的古环境变化信息,利用海洋地质学的研究方法,结合化学海洋学、物理海洋学和生物海洋学的研究成果,研究地质历史上的海洋体系状况及其演化和受控因素的一门学科。古海洋学是20世纪随深海钻探计划(DSDP)的实施而真正发展起来的一门新兴边缘学科。早期的古海洋学研究与稳定同位素理论的建立密切相关,美国化学家 Urey 于1947年提出了利用海洋碳酸盐中氧同位素的组成来恢复地质时期的海水温度变化(Urey,1947);1955年,美国地质学家 Emiliani 首次利用浮游有孔虫壳体测得了更新世海水表层的古温度,得出了更新世的冰期与间冰期旋回,验证了米兰柯维奇理论的正确性(Emiliani,1955),这一时期的古海洋学可称为“氧同位素古海洋学”。古海洋学的迅速发展得益于深海钻探计划的实施,1968—1983年进行的深海钻探(DSDP)及随后的大洋钻探(ODP)为古海洋学的研究提供了理想的材料,使古海洋学家有了更多施展才华的机会。而20世纪70年代开始使用液压活塞取样装置(HPC)采得的无扰动岩芯为高分辨率地层的建立创造了条件。稳定同位素质谱仪进样系统的发展使得样品的测量范围和精度大大提高。此外,应用超导磁力仪获得的大洋地层古地磁年代和氧同位素地层的结合,解决了地层年代的对比问题(Shackleton,1973,1976)。这三方面的突破带来了古海洋学的突飞猛进,海洋学的研究取得了一系列的丰硕成果,揭示了古气候和古海洋环境演变的基本规律,建立了古环境演变的基本格架,这些成果对于认识现代全球变化具有宏观的指导意义。

进入 20 世纪 90 年代,高分辨率氧同位素地层学的建立为高精度的地层划分和对比提供了良好的参照系。海洋微体古生物转换函数所得到的精度为 $0.5 \sim 1^{\circ}\text{C}$ 的古温度,为详细研究古海洋温度场提供了可靠的依据。而 AMS¹⁴C 测年技术的应用使地层年代学精度达到百年级,带来了地质年代测定的革命,这些新技术的应用使得高频古海洋学事件的研究成为古海洋学研究的新热点。新仙女木事件(Younger Dryas)、Heinrich 事件、D-O 旋回以及 Bond 旋回这一系列非轨道事件的发现和对它们的认识,对于揭示人类历史上气候、环境的演变过程和现代环境的形成以及预测其未来的发展趋势有着极其重要的意义。目前,愈来愈多的研究表明,这些高频率的突发事件具有全球意义,说明地球是一个统一的整体,牵一发而动全身,为了了解和解释这些短期事件的形成机制,必须考虑到整个地球系统的各个圈层及其它们之间的相互作用,古海洋学的研究必须紧密围绕全球变化进行。所以 1995 年启动的国际地圈-生物圈计划(IGBP)的重要核心计划之一就是“过去的全球变化”(PAGES)研究。过去全球变化研究可以提供历史时期地球环境变化规律以及人类活动对地球环境的影响等一系列信息。现在是过去的延续,未来是现在的发展,只有更好地了解事物发展的客观规律及内在联系,才能更好地预测事物的发展,对未来进行科学、合理的预测。

在研究方法上,微体古生物仍然是古海洋信息的主要载体,并从以往诸多定性的静态描述转为通过对“过程”的研究,进行定量的动力学探讨,其中有两个主要的研究特点,一个是根据因子分析、聚类分析和回归分析等多元统计分析技术建立微体生物群落的统计学模型,结合现代海洋环境资料赋予不同统计模型以特定的环境指示意义,客观地分析生物群落与古海洋环境之间的相关关系(Ravelo et al., 1990, 1992; Wells et al., 1994; Andreason et al., 1997)。另一个特点是随着海洋古生态学研究的深入,对某些特征属种的环境指示意义的研究也更加精细和具体化(Hermehn, 1985; Xu Xuedong, 1999; Jian Zhimin, 2000)。在研究的方式上,打破了学科间的壁垒围限,进行跨学科的交叉和结合,使古海洋学研究沿着纵向深入和横向交叉的方向发展,其中地球化学在古海洋学研究中异军突起,成为颇具生命力的发展方向。随着古海洋学研究成果的日益丰富和一些新方法、新技术的应用和突破,古海洋学的理论会日渐成熟,必将产生一系列丰硕的成果,古海洋学在未来全球变化研究中将起到举足轻重的作用。

第二节 南海的古海洋学研究

与早已享有国际声誉的陆上第四纪研究不同,我国的海洋第四纪研究起步较晚,而且长期以近岸浅海为主。以深海研究为特点的古海洋学研究在我国从 20 世纪 80 年代开始以来,由于缺乏高质量的深海沉积样品和先进的分析手段,发展初期步履维艰。进入 90 年代,我国古海洋学研究大力开展国际合作,同时与国内的陆上研究紧密结合,取得了高速度的发展,开始跻身于国际行列,而发展的主战场正是南海。

从 1994 年中德合作太阳号 S0-95 航次到 1999 年南海大洋钻探 ODP184 航次的成功,南海已经成为国际古海洋学研究的新热点。在地层学方面,南沙海区首次建立了中国海第一个更新世深海地层序列,使用了包括 4 类微体化石的生物地层学、磁性地层学、同位素地层学和碳酸盐地层学的证据。在高分辨率环境记录方面,东沙附近站位最近 4 万年的环境记录时间

分辨率精度超过 20 年(赵泉鸿等,1999)。此外,在诸如海水表层古水温、水团演化、表层生产力和海水上层结构等海洋参数研究、碳酸钙旋回、深海沉积作用和突变事件等方面的研究都涌现出一大批成果(翦知湑等,1998a、1998b;汪品先,1995、1997;Wang L et al.,1997;Wang P et al.,1995;陈建芳等,1998;黄维,1998;Pnaumann,1999;孙湘君,1999;王律江,1994、1999;钱建兴,1999)。特别是近年来对于南海古季风的研究,成果尤其突出。对于亚洲季风,一向以陆地的黄土研究为主,直到 1994 年中德合作南海古季风的专题航次才开始古季风海洋记录的研究。1999 年以东亚季风为主题的南海大洋钻探 ODP184 航次,开始了对更老地质历史时期古季风的演化进行研究。已有研究成果表明,晚新生代以来东亚季风系统发生了明显的波动,并伴随一系列海洋过程的变化(陈木宏等,2002;汪品先等,2003;郑范等,2006)。随着海洋沉积物中古季风记录研究的各项指标日益增多和成熟,海洋古季风记录将有望与黄土沉积记录一起,在古季风研究上互为佐证,相互补充,共同恢复东亚季风的演化史。中国边缘海古海洋研究已经取得了一大批重要成果,许多研究成果都已经达到了国际前沿水平,基本上已经和国际接轨。

第三节 硅藻的研究与进展

硅藻是一种常见的、具有色素体的单细胞藻类。大多数为水生,几乎在所有水体里都能生长,只有少数生活在潮湿的泥土里、树皮上、苔藓中……硅藻种类繁多,有化石的和现在生存的种类。无论是硅藻的分类研究,还是应用研究,都是以研究硅藻壳体外形和壳壁上的各种微细构造为基础。硅藻的壳壁由非晶质氧化硅(SiO_2)和果胶质(Pectin)组成,厚度大多数都在 $1\mu\text{m}$ 以下。沉积物中的硅藻壳(遗骸)或经酸处理后的硅藻壳只有硅质壁而没有果胶。据资料记载,已发现的最小硅藻只有 $1\mu\text{m}$,最大的硅藻也仅 $3\sim 4\text{mm}$,但硅藻却是海洋浮游植物中最主要的成员之一。据估算,硅藻和其他浮游的单细胞藻类,年产达 $5\,500\times 10^8\text{t}$,在生物圈的物质和能量循环中居重要地位。

生活着的硅藻的生态分布与海洋中的各种物化条件和不同的地理区域有密切关系。硅藻生物体死亡后,其硅质遗骸沉积于海底,其抗溶解能力强,易于在沉积物和地层中保存。因此,地层中的硅藻化石蕴涵着非常丰富的地质时期的环境与年代信息,是追溯地质环境变化的重要生物标志。尤其是在水深大于碳酸钙补偿深度的大洋中,硅藻和放射虫几乎是唯一有效的微体化石。因而,硅藻被广泛应用于现代表层沉积过程,地层划分与对比,推断古温度、古盐度,再造古地理环境,研究海面升降和岸线变迁等方面。迄今,人们利用分布广、种类多的硅藻群落生态特征、丰度、属种演化等信息,在重要的国际大型合作项目国际地圈-生物圈变化(IGBP)、过去全球变化(PAGES)、深海钻探计划(DSDP)、大洋钻探计划(ODP)等中的古海洋环境及其演变过程、地质事件记录等研究中,取得了丰硕成果。

一、硅藻研究简史

硅藻研究的历史较长,国外早在 18 世纪 20 年代就已开始,不过在相当长的时间里,研究

局限于现生硅藻分类学、形态学和生态学等方面的研究。19 世纪中叶,少数学者认识到硅藻的古生态学价值并开始对硅藻的古环境做初步研究。直到 20 世纪 20 年代,硅藻才广泛应用于古环境学的研究之中(Nipkow, 1927)。在研究初期,人们主要是定性地研究硅藻化石的分布及其在时间上和空间上的变化,从而得出相对的古地理、古气候变化资料。随着计算机技术的发展,人们有可能定量地研究现代硅藻分布与环境变量(如温度、盐度、酸碱度和营养盐类)之间的关系,并将此定量关系应用于研究沉积物中的硅藻化石组合,从而为定量古地理、古气候研究提供可靠的依据。

水体中的硅藻对其生存的环境变化十分敏感,因此硅藻已成为研究水体环境变化的重要手段。硅藻反映水体的 pH 值、盐度、碱度、水体深度、水流速度、营养水平、矿物质元素、重金属以及光照和水温等环境参数的变化(Stoermer & Smol, 1999)。浮游硅藻增殖后,经衰老、死亡,其遗骸在水中既可以经过分解、破坏、溶解,也可以通过浮游动物的捕食之后的粪便沉积(Gersonde & Wefer, 1987; Flower, 1993)。由于硅藻壳的分解、溶解、破坏,在表层数十米的光合带内进行得最快,一些硅质壁薄的,作为现代海洋条件指示种的角毛藻属 *Chaetoceros*、脆杆藻属 *Fragilaria*、菱形藻属 *Nitzschia* 和根管藻属 *Rhizosolenia* 的大部分种的遗体,在未沉积下来以前就被溶解,在沉积物中便没有得到很好的保存。尽管原先产生的硅藻信号在它转运到沉积物时,记录发生了显然的改变,海底沉积物中硅藻壳的数量和属种与表层活体硅藻群相比,有着本质上的不同,但可以肯定的是,水体中硅藻多的海区,表层沉积物中包含的硅藻壳也多。在南极海、白令海、太平洋高纬度地区等营养盐丰富的海区,由于海水中硅藻含量高,海底沉积物中的硅藻壳也多,这些海区存在大量的硅藻软泥(Jousé et al., 1969, 1971)。表层沉积物中的硅藻遗体能在很大程度上反映上覆水体中的活体硅藻群的种的组成。先前关于表层沉积物中硅藻分布大量的研究已经证明,它们的组合和表层海洋水文条件有着密切的联系。

Kozlova 最早在印度洋开展了表层沉积硅藻的研究(Kozlova, 1964)。接着, Jouse 对太平洋表层沉积硅藻进行了大范围的研究(Jousé et al., 1969, 1971)。此后,国外陆续开展了各大洋和一些陆架海的研究工作。目前,国际上对海洋沉积物中硅藻的研究已涵盖了太平洋、印度洋、地中海、大西洋、北极、南极海域,以及美、日、苏联等国的陆架海及部分陆域,这些系统的研究形成了相当丰富的研究成果。关于各大洋表层沉积物硅藻组成的种类、地理分布及其与环境关系的研究工作,及在太平洋地区进行得较为丰富和深入。如 Jousé (1969, 1971) 综合前苏联学者的长期研究结果,以表层水中现生硅藻的地理分布为基础,研究划分了底质中遗体硅藻组合的类型,并分别按优势种用地理名称命名,如亚热带种和热带种占优势的遗体硅藻组合,分别叫做亚热带硅藻组合和热带硅藻组合。这些硅藻群的分布,一般都呈明显的带状。各自分布在不同的纬度区,代表不同的水温等条件。这些组合的硅藻属种可以用来追溯水团的位置,如南极组合的特征分子 *Eucampia balaustium*、*Coscinodiscus lentiginosus*、*Thalassiosira gracilis* 等在沉积物中的分布被用作南极底层水(Antarctic Bottom Water, 简称 ABW)在南太平洋萨摩亚群岛以南分成两支北上的证据之一,在大西洋和印度洋也可以用硅藻追踪出南极底层水的流路(Schrader & Schuette, 1981)。

Belayeva (1972) 通过对东南太平洋硅藻细胞个体的大小研究,首次把硅藻壳体大小变化与上升流相联系,认为上升流增强,硅藻个体发育也相应增大。Burckle 和 Todd (1975) 发现赤道太平洋和日本海的沉积硅藻 *Annellus californicus* 个体大小明显不同,认为环境是主要的影响因子。较为系统的是 Burckle 和 McLanughlin (1977) 对太平洋地区 14°N 至 9°S 间 13 个

表层沉积物样品中结节圆筛藻 *Coscinodiscus nodulifer* Schmidt 壳体大小的变化进行了定量研究,发现细胞的直径与纬度的变化有直接关系。这是由于在赤道太平洋地区形成一股向西流动的带状海流,使得赤道辐射区深部富含营养盐的水上升到表面,形成大量硅藻得以生存的有利条件。

近年,有学者结合卫星测量(CZCS)提供的海洋初级生产力数据,并采用沉积物捕获器(sediment traps)对东北太平洋表层沉积物硅藻进行了研究(Lopes, 2006),表明沉积硅藻和海洋初级生产力、海水表层温度、营养盐浓度和盐度等因素具显著相关性。Abrantes(2007)对东南太平洋表层沉积硅藻研究的结果表明,沉积物硅藻也能很好地反映本地区的水温、上升流和生产力。沉积物中高硅藻丰度值标志了东赤道太平洋上升流和沿岸上升流的环境。采用Q-因子分析和多元回归的数理统计分析方法,建立了表层水温(SST)与海洋初级生产力(PP)之间精确的量的关系,海水表层水温与海洋初级生产力的数据和卫星测得数据的误差仅为 $\pm 0.9^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 23\text{gC}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$,为估计古海洋表层水温和古初级生产力提供了新的工具。

现生硅藻分布于海水、半咸水和淡水中,具有浮游和底栖两种生活方式。它们能敏锐地反映生活水域的盐分、温度和所含各种无机盐类。因此利用硅藻的生态特征可以有效地恢复、了解沉积物在沉积时的古地理环境。利用不同硅藻群落的盐度特征来研究水体变化尤其是干旱地区湖泊盐度变化已成为一个实用的手段,许多学者都曾研究过硅藻分布与盐分的关系。Simonsen(1962)根据对波罗的海西部海水—半咸水硅藻的耐盐范围的调查研究,提出了按耐盐性划分的硅藻生态类型,绘制了硅藻盐度耐受格局图。其中贫盐型相当于淡水种,中盐型相当于半咸水种,高盐种相当于海水种。表明硅藻对盐度具有良好的敏感性,因而对环境变化具有指示作用。根据硅藻在水体中的分布和生态习性,可将它们分为浮游、底栖两大类型。根据这两种类型硅藻组合的不同,可以判断滨海和湖泊的相对深度以及滨海和湖泊水位的变化趋势。硅藻对水体深度的指示性已成为研究湖泊演变和海平面变化的最重要手段之一(Stoermer & Smol, 1999)。Vos & De Wolf (1988)在前人研究的基础上提出了一种硅藻反映环境的研究方法。基于硅藻生态习性和耐盐特征,硅藻被分成 16 个生态群,不同的生态群与不同的沉积环境有关。

大量研究表明,硅藻分析是一种有效的研究手段。不仅可以用于表层的现代沉积过程研究,还可以用于地质历史时期沉积环境变化及进行古环境重建、划分地层年代、识别气候事件、追踪高纬度地区冰川的发育情况等研究,而且有些种类还可作为指示种运用于海流流经范围与海流强弱的研究。特别是在缺乏钙质微体化石的极地附近高纬度海区,多用硅藻化石组合指示古海洋学环境,如 Sancetta 和 Silvestri(1986)运用北太平洋指示不同水团的各种硅藻组合以及水团和气团之间的密切关系,推断该区上新世—更新世水气体系的演变模式,促进了硅藻在古洋流研究中的发展。

220 万年以来,共有 8 次硅藻化石上的重要事件,可用作地层对比,而 Burckle(1978)将下中新统到更新统底定出 43 个时间基准面,有学者则认为,这种按个别种定时间基准面的方法,对不同纬度区硅藻演化的区别考虑不够,有些种可以不止一次地出现和消失,因此主张对各时期不同的纬度带划分不同的硅藻组合。目前,硅藻化石从中新世中期至今已有相当可靠的地层分带,包括低纬度区、北太平洋和南大洋共 3 种不同的分带方案,各自可与磁性地层年代表相对比(Barron, 1985)。至于早白垩世和古近纪,尚未建立统一的硅藻地层表;另外,关于硅藻地层对比意见也欠一致,前苏联采用的硅藻地层方案就与美国等国家采用的世界性方案有

所不同。尽管如此,硅藻的演化序列、地层和生态分布的研究正在深入进行,硅藻化石在大洋地层学上的意义是毋庸置疑的(Fenner,1985)。

在多数情况下,属级的识别是对化石硅藻组合进行全面地层解释的基础。如 Jousé (1978) 基于海洋浮游硅藻 50 个属的演变,建立了属级硅藻生物地层带。有些硅藻种演化的时间已经查明,可以为地层对比提供可靠的标准,例如 *Annelus californicus* Tempere & Peragallo 的首次出现是中中新世初的标志;*Nitzschia miocenica* Burckle 出现于晚中新世晚期,正好是中新世与上新世交接时消失(Burckle,1978)。化石种 *Sephanodiscus* 属的某些种如 *Sephanodiscus williamsii*、*Sephanodiscus yukonensis* var. *antiquus* 和 *Sephanodiscus princeps* 只在新生代的某一地层中出现,人们利用 *Sephanodiscus* 属的这个特征能够对上新生代地层进行准确划分(Khuresevich et al.,2001)。

此外,在第四纪大洋地层中,硅藻化石特定属种的相对丰度与个体大小的变化,明显地与气候变迁相对应,因此也可以用于地层划分与对比,这个结论是 Burckle 和 McInughlin (1977) 在大量研究了赤道太平洋第四纪柱样沉积物中结节圆筛藻 *Coscinodiscus nodulifer* Schmidt 壳体大小变化后获得的,该结果表明,太平洋第四纪柱样沉积物自上而下,首次出现的壳体大小 $<60\mu\text{m}/>60\mu\text{m}$ 极大值,相当于氧同位素 2Cn,极点值为 18kaBP,第二个极大值相当于氧同位素 4Cn,紧接其后低值段相当于氧同位素 5Cn,最低值点为 125kaBP。他认为结节圆筛藻的大小随着深度的不同而呈现有规律的变化,这与更新世期间大洋水动力变化特点有关。

近年来,突破性的工作是对硅藻休眠孢子(resting spore)化石的分类学和地层学意义进行的研究。硅藻休眠孢子是一些海洋中心纲和少数的淡水硅藻及羽纹纲硅藻生活史中具有很厚的硅质层的阶段,它使藻类在不利的条件下存活(McQuoid & Hobson,1996;Mark,1997)。硅藻休眠孢子和营养细胞可以完全一样(*Thalassiosira nordenskiöldii* 和 *Detonula confervacea* 等),也可以截然不同(*Chaetoceros diadema* 和 *Bacteriastrum delicatulum* 等)(Hargraves & French,1983)。并且很多属的休眠孢子之间在形态上没有明显的区别,如脊刺藻属 *Liradiscus*、棘箱藻属 *Xanthiopyxis*、角毛藻属 *Chaetoceros*、*Di cladia* 属、*Hercothec* 属等。因此过去人们认为,根据化石休眠孢子的分类来划分地层是有困难的,休眠孢子在以往的地层学研究中被排除。直到最近,有人利用扫描电子显微镜对 *Di cladia*、*Xanthiopyxis*、*Periptera*、*Pterotheca*、*Liradiscus*、*Di cladia*、*Monocladia* 和 *Syndendrium* 等一些属的休眠孢子化石的形态学进行了研究,才发现它们的区别和其代表的地层学意义,为重建新近纪和第四纪古海洋环境提供了新的证据(Gersonde,1980;Lee,1993;Suto,2003;Suto,2004)。

分子生物学的研究手段促进了沉积硅藻研究的进程,分子系统发育学的研究基本验证了以往人们对沉积物中硅藻化石的研究结论(Sims,2006a、2006b)。如分子生物学研究表明,硅藻起源于异鞭毛藻类(heterokont algae)(Medlin et al.,1997b),其最早出现的时间为 240Ma,平均时间为 165Ma(Kooistra & Medlin et al.,1996;Medlin et al.,1997a),这与硅藻化石出现最早的时间为 180Ma(Rothpletz,1896)基本吻合。分子生物学研究证明,羽纹纲硅藻(Pennatae)是从中心纲(Centricae)进化来的(Simonsen,1979),这也和化石在地层中出现的顺序一致(Fritsch,1935)。晚白垩世地层中硅藻的主要变化是羽纹纲的出现(75Ma),分子生物学的研究的结果也是如此(Kooistra & Medlin,1996)。

随着硅藻研究工作的深入开展,其环境指示属性逐渐被揭示,硅藻在流水和湖泊中可以指

示水文、气候、表层水酸性、富营养化、水面变化、生物地球化学硅损耗及进行环境状况评估(Moberg, 2005; Vaughan, 2003; Roberts, 2001; Philip, 2003; Huntsman-Mapil, 2006; Garcí'a-Rodríguez, 2004; Patrick, 2005), 在近岸沉积物中, 硅藻被用来记录古环境盐度的变化(Roberts D, 1998; Hustedt, 1953; Simonsen, 1962; Vos & De Wolf, 1993a, 1993b; Juggins, 1992; Roberts, 2004)和潮汐(Simonsen, 1962; Denys, 1991)。在淡水沉积环境中, 硅藻提供古信息有关的 pH 值(Cholnoky, 1968; Spaulding, 1999)。在海洋和河口环境中指示海流, 滨海古环境和相对海平面变化等(Admiraal, 1984; Koning, 2001; Michinobu, 2006; McDonald, 1999; Zielinski, 1997), 并且在考古、油气开发、法医学应用、大气迁移等领域也有较好的指示意义(Sachsenhofer, 2003; Eugene, 2004; Benjamin, 2006)。

在研究过程中, 由于影响硅藻种类分布的因子很多, 为了从复杂的硅藻组合中提取温度、盐度、水团等环境变化的信息, 人们在研究过程中运用了多种解释方法。其中, 比较成功的有转换函数法(Imbrie & Kipp, 1971; Pichon, 1987; Sancetta, 1979; Kog, 1992; Michèle, 1999)、硅藻温度指数法(金谷、小泉, 1966)、硅藻壳体大小比值法(Garstang, 1937; Belayeva, 1972; Burckle & McLanughlin, 1977)、分异度法(Hutson, 1980)、因子分析法(Abrantes, 2007)、聚类分析法(Aron, 2007)和其他方法(De Wolf, 1982)。

二、国内研究进展

我国的现生硅藻研究始于 20 世纪 30 年代, 厦门大学是我国硅藻分类学研究的发源地, 金德祥教授开辟了我国硅藻研究的先河, 出版了《中国海洋浮游硅藻类》(金德祥等, 1965)、《中国海洋底栖硅藻类》(上、下)(金德祥等, 1982, 1991)、《The marine benthic diatoms in China》(Vol. 1)(Chin et al., 1985)等专著。暨南大学齐雨藻教授和中国科学院胡鸿钧研究员对我国江河、湖泊的现生淡水硅藻进行了系统研究(胡鸿钧等, 1980; 齐雨藻等, 2004)。程兆第教授、高亚辉教授等对我国现生海洋硅藻作了系统的研究, 出版有《硅藻彩色图集》(程兆第和高亚辉等, 1996), 在分类学和生态学方面, 提出了微型硅藻研究新领域, 出版了国内第一本微型硅藻专著《福建沿岸微型硅藻》(程兆第和高亚辉等, 1993), 并不断发现了一些新的种类。而海洋沉积硅藻的研究直至 20 世纪 70 年代才开始, 虽然起步较晚, 但进展很快。同济大学王开发教授等先后进行了南海、东海、黄海、渤海部分海区的表层和第四纪硅藻的研究(王开发, 1982, 1985, 1987, 1990, 1993, 2001, 2003); 地质矿产部地质研究所李家英教授等完成了山东硅藻土、四极藻演化系列的研究(李家英, 1989), 黄成彦教授等完成了我国西藏、吉林、浙江、云南、广东等地第三纪和第四纪硅藻植物群的研究(黄成彦, 1998); 国家海洋局第三海洋研究所蓝东兆研究员对我国沉积硅藻学和硅藻生物地层学作了系统研究, 先后开展了南黄海、东海及太平洋、台湾海峡及福建沿海等地新近纪和第四纪沉积硅藻研究(蓝东兆, 1989, 1993, 1998, 1999, 2000, 2002a, 2002b, 2003), 并出版了《南海晚第四纪沉积硅藻》(蓝东兆等, 1995)。另外我国还有许多学者对沉积硅藻进行了研究, 综合其研究内容主要集中于以下几个方面:

(1) 进一步查明我国各海域表层硅藻属种组成及其地理分布规律(金德祥, 1980; 詹玉芬, 1987; 蒋辉, 1987; 余家桢, 1986; 王开发, 2003; 陆钧, 2001; 刘师成等, 1984; 支崇远等, 2005)。

(2) 对硅藻沉积过程取得更多认识, 就各种理化环境因子如温、盐、深、流等对硅藻生长繁殖、分布及遗骸沉积过程的影响进行了初步探讨(余家桢, 1989, 1991; 王开发等, 1985, 1988、

2001a、2001b;陆钧,1999;冉莉华等,2005;陈荣华等,2003;郑玉龙,2001;王汝建等,2000)。

(3) 开展表层沉积硅藻组合分区研究及硅藻生态与拟生态分区研究等(王开发,1982、1985、1986、1987、1990、1993、2003a;郑执中,1994)。

(4) 根据硅藻的组合进行地层的划分和对比,对古海洋环境及其演变过程、陆海相互作用过程进行了解释(齐雨藻等,1981;赵焕庭,1987;李家英,2002、2002;王开发,1982、1987、2001、2002、2003b;支崇远等,2003、2005)。

(5) 在研究方法上,将各种数理统计方法如聚类分析、最优分割、对应分析、因子分析等结合到硅藻分析中,使我国沉积硅藻研究水平得到进一步提高,逐渐由定性或半定量向定量研究迈进(吕厚远等,1991;蒋辉,2002;支崇远等,2003、2005;黄元辉等,2007)。

第四节 选题目的及主要内容

南海是西太平洋最大的,由一系列岛弧组成的半封闭的,发育最完善、最复杂的边缘海。南海南部不仅是典型的热带边缘海,而且与西太暖池密切相关,对东亚的季风气候变化起着举足轻重的作用;是我国研究全球变化区域响应及其驱动力的天然试验场(赵泉鸿和汪品先,1999)。

南海沉积物中的硅藻可能蕴含了丰富的东亚季风、古上升流、古海流、古环境演化、青藏高原隆起的环境变化信息。因此,进一步开展南海硅藻的环境信息与指标等的基础性研究,无疑对揭示南海古海洋环境演变特征与历史、圈层作用与事件地质以及包括 IODP 等重大研究计划在南海的实施发挥重要的作用。

南海属于半封闭性海域,仅靠几条海峡通道与太平洋等海区相连,其浮游硅藻的生物地理特征决定其无论是群落结构、组合特征和分布状态均与太平洋、印度洋等世界上其他海区有一定的区别。由于不同海区间存在硅藻地理区系或硅藻区系差异特征,加之人们对硅藻的区域性生态研究的不足,至今仍难以说明不同海区硅藻生态特征的具体差异及其沉积记录的详细关系,这势必会造成引用其他海区资料所形成的解释误差,导致在利用岩芯样品的硅藻组合特征解释特定海域环境历史形成难以逾越的障碍。因此,尽快开展包括南海在内的典型海区硅藻生态与沉积环境的研究具有迫切性和重要性。全面了解南海硅藻与生态环境和沉积条件的关系,探讨该海区沉积物中硅藻生态特征对指示环境的可靠性和特殊性,建立硅藻解释环境的判别指标,对深入研究南海海洋地质资源环境、全球变化及其区域响应、圈层作用与事件地质等具有必要性和重要的科学意义。

以往的硅藻学家们对南海硅藻的专题研究,为有关的研究打下了良好的基础和创造了一个具有前景的开端。然而,由于受各种客观条件的限制,相对于广阔的南海海域,以往的研究区域主要集中在南海北部陆架、陆坡和北部海盆,中部和南部海域研究得较少,主要报道的内容是现生硅藻的种类组成和分类学研究;沉积硅藻的种类分布及其与环境的关系;对于南海硅藻生态的研究较薄弱,特别是上升流及其相关环境因素的生态与沉积特征等许多重要信息尚未被详细分析与揭示,由于缺少这些信息导致在南海古海洋环境及其演变过程中的解释中存在诸多的疑问,如硅藻在岩芯中呈现阶段性分布是海水的溶解作用或是沉积环境或其他因素

起主导作用? 哪些属种能指示古海流、古气候、古地理环境等? 因此, 只有了解南海不同水团、不同环境的硅藻生态特征, 沉积物中硅藻的保存特征与上覆水团的生态关系, 不同环境的硅藻判别指标等, 才能正确地解释南海的古海洋环境及其演变过程。

本书针对这些问题, 根据海洋学科前沿领域等课题中对硅藻研究的需要, 从一个较为完整海区的表层沉积硅藻分类学研究入手, 对硅藻沉积学特征进行全面研究, 探讨硅藻分布与环境的关系。在定量分析个体数、种类、优势种、特征种的分布特征和组合特征的基础上, 探讨沉积硅藻分布与地形地貌、水动力条件等环境因素的关系; 通过柱样和岩芯沉积物样品中的硅藻种群、丰度、特征种、替代性指标的研究, 结合 ^{14}C 年代测定和地球化学测试资料, 来探索南海晚第四纪以来的沉积环境及其演变过程。该研究不仅可以丰富我国南海硅藻分类学的内容, 阐明硅藻典型种类对环境的指示意义, 还可以为边缘海沉积硅藻的发展积累资料, 为恢复古海洋、古气候、古地理提供“将今论古”的依据。同时, 该研究对于圈层作用与地质事件全球变化与区域响应等研究有重要的科学意义。具体研究内容如下。

1. 南海沉积硅藻分布特征

主要通过对表层沉积物硅藻样品的硅藻丰度值变化规律和典型生态环境中的特征种和指示种的分布进行研究, 划分硅藻组合带, 突出分析硅藻种类在南海对不同水团或海流的响应。

2. 南海海底沉积环境的研究

对南海表层沉积物样品进行粒度分析, 确定表层样的沉积物类型、粒度参数特征, 探讨环境变化与底部水动力状况之间的关系以及沉积环境对硅质壳体的保存状况所造成的影响, 尽可能地提取沉积物沉积特征所记录的各种环境变化信息。

3. 南海晚第四纪以来的沉积环境及其演变过程

通过柱样和岩芯沉积物样品中的硅藻种群、丰度、特征种、替代性指标的研究, 结合 ^{14}C 年代测定、沉积物粒度和地球化学测试资料, 探索南海晚第四纪以来的沉积环境及其演变过程, 并研究晚更新世沉积物中存在的大量沿岸种具槽直链藻 (*Melosira sulcata*)、柱状小环藻 (*Cyclotella stylorum*) 和条纹小环藻 (*Cyclotella striata*) 与古季风、古海流或古环境的关系, 以及硅藻在岩芯中呈现阶段性分布是海水的溶解作用或是沉积环境或其他因素起主导作用等科学问题。

第二章 区域地质概况

第一节 南海位置及海底地形地貌特征

南海是西太平洋最大的边缘海之一,地处欧亚、太平洋、印度洋三大板块的交汇处,它本身是欧亚板块的一部分。南海北起 $23^{\circ}37'N$,南迄 $3^{\circ}00'N$;西自 $99^{\circ}10'E$,东至 $122^{\circ}10'E$,最大水深 5 400m。南海北连中国大陆,东邻台湾岛和菲律宾群岛,西界中南半岛,南至加里曼丹岛和苏门答腊岛,面积约 $360 \times 10^4 km^2$,约为渤海、黄海和东海总面积的 3 倍。南海的周边被大陆和岛屿环抱,这些岛屿使南海与东海、太平洋及苏禄海、爪哇海和安达曼海等隔开,其间由 10 多个海峡沟通,主要有台湾海峡、吕宋海峡、民都洛海峡、巴拉巴克海峡、卡里马塔海峡、加斯帕海峡和马六甲海峡。南海北部和西北部宽阔的陆架区通过水深约 50m 的台湾海峡与中国东海相连;中部通过水深约 450m 的民都洛海峡和深度约 100m 的巴拉巴克海峡与苏禄海沟通;东北部通过台湾岛和吕宋岛间的吕宋海峡与太平洋海水进行交换;南部和西南巽他陆架区域通过新加坡海峡和马六甲海峡与印度洋相连,同时还通过卡里马塔海峡和加斯帕海峡与爪哇海相通。南海海底地形从周边向中央倾斜(图 2-1),依次分布着大陆架和岛架、大陆坡和岛坡、深海盆地等。南海的大陆架和岛架总面积为 $168.5 \times 10^4 km^2$,约占南海总面积的 48%,大陆坡和岛坡总面积约为 $126.4 \times 10^4 km^2$,占到南海总面积的 36% 左右。陆坡和岛坡区地形常为崎岖不平,次级地貌类型又包括海台、海山、海槽、海脊、海谷和海底扇等,是南海地形变化最为复杂的区域。深海盆位于南海中部,呈北东-南西向展布,并以南北向的中南海山为界,分为中央海盆和西南海盆,总面积约为 $55.1 \times 10^4 km^2$,大约占到南海总面积的 15.7%。深海盆地以平原地貌为主,并有宏伟壮观的链状和线状海山分布(刘以宣等,1994)。

第二节 海底沉积物特征

南海海底表层沉积物主要可分为黏土、粉砂质黏土、黏土质粉砂、砂和珊瑚砂砾 5 种类型。黏土:为南海最细粒沉积物,主要分布在深海盆地,水深大于 4 000m,其中较深处为红色深海黏土。其次分布在珠江口外,多沿海岸带展布,此外,在雷州半岛东部水深 50m 附近也有黏土分布。粉砂质黏土,该类型为本区分布范围最大的细粒沉积物,主要分布于大陆坡及海盆,水深大致为 1 000~4 000m,呈大片展布,成分为半深海、深海钙质泥和深海硅质泥。黏土质粉砂:该类型主要分布于大陆坡上部,呈条状带展布于砂和粉砂质黏土之间,水深大致在 500~