



同济大学 1907-2017  
Tongji University



同济博士论丛  
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

马文涛 李前裕 田军 著

# 新生代晚期冰盖与大洋碳储库变化的 轨道周期及其数值模型分析

Box Model Simulation of Orbital Cyclicity in the  
Late Cenozoic Ice Sheet and Oceanic Carbon  
Reservoir Changes



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

 同济博士论丛  
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

马文涛 李前裕 田 军 著

# 新生代晚期冰盖与大洋碳储库变化的 轨道周期及其数值模型分析

Box Model Simulation of Orbital Cyclicity in the  
Late Cenozoic Ice Sheet and Oceanic Carbon  
Reservoir Changes

 同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书对新生代晚期冰盖与大洋碳循环的轨道周期进行了研究并对其数值模型进行了分析。基于箱式模型,加入了冰盖、海冰和大气模式,重点考查了冰盖和热带过程共同作用下 CO<sub>2</sub> 和大洋  $\sigma^{13}\text{C}$  的响应。通过数学统计方法进一步讨论了轨道驱动高低维气候变化和大洋碳储库的关系。

本书可供海洋地质专业的高校师生和古气候转型的研究人士参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

新生代晚期冰盖与大洋碳储库变化的轨道周期及其数值模型分析 / 马文涛,李前裕,田军著. —上海: 同济大学出版社,2017. 5

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-7026-7

I. ①新… II. ①马… ②李… ③田… III. ①晚新生代—海水—碳—储量—数值模拟—化学分析 IV.

①P734.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 093479 号

---

## 新生代晚期冰盖与大洋碳储库变化的 轨道周期及其数值模型分析

马文涛 李前裕 田 军 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 冯寄湘 胡晗欣

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 10.25

字 数 205 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-7026-7

---

定 价 78.00 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

## “同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强  
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

# “同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侏红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何晶晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城 莫天伟 夏四清 顾 明 顾祥林 钱梦騷  
徐 政 徐 鉴 徐立鸿 徐亚伟 凌建明 高乃云  
郭忠印 唐子来 閻耀保 黄一如 黄宏伟 黄茂松  
戚正武 彭正龙 葛耀君 董德存 蒋昌俊 韩传峰  
童小华 曾国荪 楼梦麟 路秉杰 蔡永洁 蔡克峰  
薛 雷 霍佳震

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

# 总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月



# 论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版110余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017年5月

# 前言

新生代晚期以来,全球大洋深海有孔虫碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )记录中广泛发现 40 万年周期,这一周期可能与偏心率长周期的轨道驱动有关。但  $\delta^{13}\text{C}$  的 40 万年周期并不是一直都稳定存在,在 13.9 百万年(Ma)前和 1.6 Ma 时, $\delta^{13}\text{C}$  的这一长周期就发生过两次重要变化。13.9 Ma 之前是中新世气候适宜期(Miocene Climate Optimum, MCO, 17—14 Ma),  $\delta^{13}\text{C}$  具有明显的 40 万年周期,且重值期与偏心率长周期的最低值对应。13.9 Ma 东南极冰盖扩张后,40 万年周期则不再明显。1.6 Ma 之前  $\delta^{13}\text{C}$  重值期也与偏心率低值对应,之后, $\delta^{13}\text{C}$  的长周期拉长到 50 万年,重值期不再与偏心率低值对应。目前对  $\delta^{13}\text{C}$  的 40 万年周期的成因及其周期拉长的机制还不明确。

本书使用箱式模型研究了热带过程与冰盖相互作用及其对大洋碳循环的影响。箱式模型将海洋划分为 6 个箱体,每个箱体包括了磷酸盐、溶解无机碳(DIC)、碱度(ALK)和  $\delta^{13}\text{C}$  等四个属性。大气箱体接收来自火山和沉积物氧化释放的  $\text{CO}_2$ 。碳酸盐和硅酸盐的风化产物通过河流向低纬海区输入 DIC 和 ALK。初级生产力受表层箱体中磷酸盐浓度控制。碳酸盐和有机碳埋藏将碳从大洋中移除而碳酸盐的溶解又能

使碳重新进入大洋。

本书选择中新世和更新世两个关键时间段。中新世的模拟以轨道参数 ETP 为外部强迫而不考虑冰盖。在 ETP 驱动下,分别改变河流输入 DIC 和 ALK 以及营养盐。 $\delta^{13}\text{C}$  模拟结果具有极强的 40 万年周期。底层水  $\delta^{13}\text{C}$  模拟结果与地质记录无论是振幅还是相位都能很好匹配。40 万年周期成因与大洋碳储库 >10 万年的长滞留时间有关。河流输入的 DIC 和 ALK 是控制  $\delta^{13}\text{C}$  变化的主要因素。 $\delta^{13}\text{C}$  的 40 万年周期代表了大洋碳储库对热带季风风化过程的响应。偏心率处于高值期时,季风的变化幅度大,物理和化学风化增强,碳酸盐沉积总量也增加但主要以浅海碳酸盐沉积形式保存,表层和底层水  $\delta^{13}\text{C}$  同时变轻,而与河流 DIC 和 ALK 输入同步的  $\text{PO}_4^{3-}$  输入促进了表层生产力和有机碳埋藏增加。反之,季风减弱,河流输入 DIC, ALK 以及营养盐减少,  $\delta^{13}\text{C}$  变重。 $\delta^{13}\text{C}$  变化主要受无机碳与有机碳埋藏比例控制,当无机碳相对有机碳埋藏增加(减少)时,  $\delta^{13}\text{C}$  变轻(变重)。

更新世的模型加入了冰盖、海冰和大气模式,重点考察冰盖和热带过程共同作用下大气  $\text{CO}_2$  和大洋  $\delta^{13}\text{C}$  的响应。模拟结果显示当北半球高纬海区海冰迅速增大时冰盖迅速融化,进入冰消期。而当海冰快速消失后,冰盖则重新缓慢增长。冰盖变化具有明显冰期长,间冰期短的非对称形态。在季节性太阳辐射量的驱动下冰盖变化具有 10 万年冰期—间冰期旋回。当冰盖融化速率受北半球高纬夏季太阳辐射量控制时,冰盖变化的岁差周期明显加强,相位与地质记录一致,说明轨道驱动可以通过非线性相位锁定机制使冰盖变化与其在相位上保持一致。海冰的阻隔效应使大气  $\text{CO}_2$  浓度在冰消期时升高。冰期时大洋环流减弱使大气  $\text{CO}_2$  浓度逐渐降低。当同时考虑冰盖变化和 ETP 驱动的风化作用时,模拟  $\delta^{13}\text{C}$  结果的 40 万年周期减弱而 10 万年周期加强,并且 40 万

年周期的相位与不考虑冰盖变化时的相位也存在差异,反映了冰盖变化引起的洋流改组压制了大洋碳循环对热带过程的响应。

本书第三部分以 0—5 Ma 高低纬海水表层温度(SST)、底栖有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  记录为基础,采用系列数学统计方法讨论了轨道驱动、高低纬气候变化和大洋碳储库间的关系。研究发现,2.7 Ma 时东西太平洋和高低纬度 SST 差异开始增大,1.7 Ma 时温差进一步增大。SST 演化谱分析结果显示 2.7 Ma 时 4 万年斜率周期开始加强,1.7 Ma 时 4 万年周期进一步加强,至 0.8 Ma 时,10 万年周期强度超过 4 万年周期。南大洋底栖有孔虫合成  $\delta^{13}\text{C}$  记录在 2.9 Ma 时开始快速变轻,对应东边界上升流区生产力的提高,说明南大洋环流系统在 2.9 Ma 发生了重大变化,现代极锋系统开始形成,亚南极模态水、南极中层水和南极底层水可能同时加强引起海洋东边界上升流加强。根据太阳辐射量计算公式发现累积辐射量或年均辐射量以 4 万年周期为主,而日平均或月平均辐射量以岁差周期为主。地质记录中 4 万年周期的外部因素是太阳的累积辐射量或年均辐射量而非日平均或月平均辐射量。SST 与太阳辐射量交叉频谱结果显示,赤道太平洋 SST 与高纬地区的累积太阳辐射量相位一致,影响斜率周期上赤道太平洋 SST 变化的外部强迫应是高纬而非低纬地区的累积太阳辐射量。在 4 万年和 10 万年的冰期—间冰期尺度上,东西赤道太平洋 SST 相位一致,说明温跃层深度的变化也可能是整体垂直方向上的同步运动,而非“跷跷板式”变化。SST 记录中还表现明显的 40 万年周期,可能与碳循环的热带过程有关。当偏心率处于高值期时,岁差调控的季风强盛,有利于河流向海洋输入大量的 DIC 和 ALK,造成大量碳酸盐在浅海沉积,向大气释放大量的  $\text{CO}_2$ ,从而引起温度升高。当偏心率低值期时,太阳辐射量变化幅度小,季风减弱,浅海碳酸盐沉积减少而造成大气  $\text{CO}_2$  浓度和温度降低。晚上新世以来

2.7—3.2 Ma, 1.7—1.9 Ma, 0.8—1.2 Ma 地球斜率变化幅度三次达到最小, 驱动了气候转型。而根据  $\delta^{13}\text{C}$  计算得到的大气  $\text{CO}_2$  浓度在转型期过程中也表现出阶梯式的下降过程: 2.9 Ma 之前大气  $\text{CO}_2$  浓度的平均值保持  $270 \times 10^{-6}$  的稳定状态, 2.9—2 Ma 大气  $\text{CO}_2$  浓度逐步降低至  $243 \times 10^{-6}$ , 2—1.5 Ma 大气  $\text{CO}_2$  浓度保持稳定, 1.5—0.8 Ma 降低至  $230 \times 10^{-6}$  后维持稳定。大气  $\text{CO}_2$  可能是驱动气候转型的内在驱动力。南大洋是引起大气  $\text{CO}_2$  浓度变化的重点区域, 南大洋  $\delta^{13}\text{C}$  变化可能灵敏的记录了大洋碳循环的信息。

# 目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 人类活动与全球变暖 .....	1
1.2 碳循环与热带驱动 .....	3
1.3 碳循环与碳储库 .....	8
1.4 研究内容 .....	9
第 2 章 气候与碳循环数值模式 .....	11
2.1 GCM 模式发展历史 .....	12
2.2 箱式模型简介 .....	13
2.2.1 箱式模型原理 .....	13
2.2.2 微分方程的数值解法 .....	15
2.3 箱式模型研究进展 .....	17

2.3.1	冰期—间冰期旋回研究 .....	17
2.3.2	快速气候变化研究 .....	19
2.3.3	碳同位素长周期研究 .....	19
<b>第3章</b>	<b>中新世暖期大洋碳储库的40万年周期模拟 .....</b>	<b>20</b>
3.1	概述 .....	20
3.2	模型介绍 .....	21
3.2.1	磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ ) .....	25
3.2.2	溶解无机碳(DIC) .....	27
3.2.3	碱度(ALK) .....	30
3.2.4	碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ ) .....	33
3.3	模拟结果 .....	36
3.3.1	控制实验 .....	36
3.3.2	风化输入强迫实验 .....	38
3.3.3	营养盐输入强迫实验 .....	40
3.3.4	风化与营养盐综合强迫实验 .....	41
3.4	中新世暖期大洋碳循环 .....	42
3.4.1	$\delta^{13}\text{C}$ 40万年周期成因 .....	42
3.4.2	$\delta^{13}\text{C}$ 模拟结果与偏心率相位关系 .....	44
3.4.3	中新世暖期碳酸盐岩沉积 .....	48
3.4.4	中新世暖期碳同位素重值事件的轨道驱动 .....	51
3.5	本章小结 .....	53
<b>第4章</b>	<b>更新世1Ma以来大洋碳储库模拟 .....</b>	<b>54</b>
4.1	概述 .....	54



4.2	模型描述	55
4.2.1	海洋与海冰模型	60
4.2.2	大气模型	63
4.2.3	冰盖模型	65
4.2.4	生物地球化学模型	66
4.3	模拟结果	67
4.3.1	封闭系统冰盖与碳循环模拟	68
4.3.2	开放系统冰盖与碳循环模拟	73
4.4	冰盖与大洋碳循环相互作用	77
4.4.1	冰盖变化的轨道驱动	77
4.4.2	大洋环流对冰盖变化的响应	77
4.4.3	冰盖与低纬过程相互作用的周期性变化	79
4.5	本章小结	82
<b>第5章</b>	<b>晚上新世以来北半球冰盖扩张和气候转型的轨道驱动</b>	<b>83</b>
5.1	概述	83
5.2	材料与方法	85
5.2.1	气候替代性指标	85
5.2.2	太阳辐射量及其计算	90
5.2.3	频谱分析方法	92
5.3	晚上新世以来气候转型期的地质记录响应	93
5.3.1	SST 的长期变化	93
5.3.2	南大洋洋流变化	96
5.4	气候转型的轨道驱动	99
5.4.1	SST 与 $\delta^{18}\text{O}$ 谱分析结果	99