

中国沉积学近十年来的发展现状与趋势

王成善, 林畅松

中国地质大学(北京), 北京 100083

摘要: 中国沉积学经历了从 20 世纪初至 21 世纪百余年的发展历程。进入 21 世纪以来, 中国沉积学在盆地动力学、层序地层学、源-汇系统、沉积体系和沉积相、古地理学、前寒武纪沉积学、现代沉积环境、深时地质与沉积学、生物沉积学等多领域的研究中取得了重要进展。在深时古气候与全球变化、古环境变化及第四纪沉积等领域的研究与国际同步发展或已迈入国际研究前沿。同时, 形成了陆相层序地层和盆地沉积充填动力学、含油气盆地沉积学等独具我国特色的研究方向, 取得了一系列重要进展并围绕国家能源需求做出了重大贡献。但目前我国沉积学研究仍以跟踪国际前沿为主, 而原创性的、引领性的研究较少。我国沉积学在温室陆地气候与古地貌重建、重大地质转折期的沉积和生物过程、源-汇系统、前寒武纪超大陆演化与早期地球环境等领域有望取得具有国际前沿的开拓性成果。

关键词: 中国沉积学; 发展历程; 研究现状; 未来发展趋势

中图分类号: P512.2 **文章编号:** 1007-2802(2021)06-1217-13 **doi:** 10.19658/j.issn.1007-2802.2021.40.096

Development Status and Trend of Sedimentology in China in Recent Ten Years

WANG Cheng-shan, LIN Chang-song

China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: Sedimentology research in China has experienced over a hundred years of development from the early 20th to 21st centuries. Since the 21st century, important progresses have been made in the fields of studies on basin dynamics, sequence stratigraphy, source-sink systems, depositional systems and sedimentary facies, palaeogeography, Precambrian sedimentology, modern sedimentary environment, deep-time geology and sedimentology, and biologic sedimentology in China. The studies in the fields of deep-time paleoclimate and global climate changes, paleo-environment changes, and quaternary sedimentology are developing synchronically with international researches or have already stepped into the international research frontiers. At the same time, some research areas with unique Chinese characteristics have been formed. They include the terrestrial sequence stratigraphy, basin sedimentary filling dynamics, and petroliferous basin sedimentology, etc., in which a series of important progresses have been achieved and some great contributions to meet the national energy demands have been made. However, at present, sedimentological studies in China are still mainly concentrated on those for tracking the international research frontiers, with relatively limited original and leading researches. Sedimentological studies in China are constantly improving their core competitiveness. Especially, it is expected that some pioneering achievements at the international frontier level will be made in future in the research fields including the greenhouse terrestrial climate and paleogeomorphology reconstruction, sedimentary and biological processes during major geological transitions, source-sink systems, Precambrian supercontinent evolution and early earth environment.

Key words: Sedimentology study in China; development history; research status; future development trend

0 引言

沉积学作为研究沉积物和沉积岩及其形成过

程的一门地学分支学科, 经历了百余年的发展历程。沉积学从初期以研究沉积物和沉积岩的特征和沉积机理的分析为主要任务, 发展到当代兼容多

学科交叉的一门综合性学科。在矿产资源日趋紧张和生态环保问题日益突出的今天,沉积学在其基础理论不断完善的同时,在促进新学科诞生、矿产资源的勘查与开发、人与自然和谐发展等领域的研究,发挥着不可替代的作用。

半个多世纪以来,沉积学在沉积体系和沉积相分析、层序地层学、沉积盆地充填分析、大地构造沉积学、资源沉积学、环境沉积学等诸多方面取得了一系列重大进展。沉积学的研究可通过构造、气候等变化的沉积记录分析,揭示地球表层层圈的相互作用及其演变历史。古大陆-古地理再造、板块构造与沉积作用、盆-山关系、盆地动力学及气候-沉积响应、源-汇系统等研究,是当前旨在揭示地球表层层圈动力学过程和演变的重大课题。深时古气候、生物沉积学、前寒武纪超大陆演化与早期地球环境等成为当前人们最为关注的热点领域。层序地层学从20世纪70年代兴起至今,方兴未艾,其发展使得在盆地或全球范围内进行等时地层对比成为可能,为揭示沉积体系域、古地理、古环境等在时空上的分布和演变带来了革命性的理论和方法体系。沉积学与地球物理、地球化学、计算机技术等多学科实现大跨度的交叉渗透,促进了多个交叉学科方向的迅速发展。结合GIS和计算机模拟技术进行的基于大数据的活动古地理重建,是当今地球科学研究的一个前缘热点领域(王成善等,2010)。当代沉积学已成为地球科学中最重要的基础和应用基础学科之一,其发展在认识地球演化历史、促进相关学科的发展和诞生交叉学科方向,解决能源、水资源短缺及生态、环境污染、地质灾害问题,实现人类可持续发展等,有着深远的学科意义和重大的战略价值。本文旨在通过回顾中国沉积学的发展历程,剖析中国沉积学近十年来的研究进展和存在问题,展望未来的发展趋势,为中国沉积学的发展战略和研究方向提供参考和启示。

1 中国沉积学的发展历程和发展现状

20世纪初,随着中国地质学的起步,我国的沉积学也得到了相应发展。新中国成立前后,叶连俊、业治铮、吴崇筠等一批沉积学前辈和爱国学者先后从国外返回祖国,以服务 and 建设国家为己任,在科学研究和人才培养工作上辛勤耕耘、勇于开拓,是中国沉积学发展的主要奠基人(叶连俊,1942;刘宝珺,2001)。新中国成立后,国家对矿产资源需求的与日俱增不断推动了我国沉积学的发展。到60年代中期,我国已基本形成了一支沉积学

教学和研究队伍,沉积学理论和应用得到了重视和发展,为石油、煤炭等矿产资源的勘探提供了重要的理论支持。这一时期,我国沉积学研究与国际基本上同步发展。

经历了学科停滞的十年文革浩劫后,中国迎来了“科学的春天”,中国沉积学也迎来了全面蓬勃发展的新时期。伴随着改革开放,我国的科学研究从跟踪国际前缘发展,到开拓前缘和创新(刘东生等,1978;王鸿祯,1985;业治铮等,1985;叶连俊,1989;吴崇筠和薛叔浩,1992)。进入21世纪,我国的沉积学及其相关领域,如陆相层序地层学、沉积大地构造、海洋沉积地质、古海洋、古气候等研究在国际上已有不俗表现或占据了一席之地(孙枢,2005)。中国沉积学研究成果的发表数量呈现飞跃式增长态势。据统计,2001年中国沉积学发表研究成果仅占全球的4.01%,至2016年达20.95%,超过了2016年中国总人口占世界总量的比例。2006-2010年,中国成为全球排名第7的沉积学热点研究区域;2011-2015年,中国和中国南海分别成为全球排名第2与第5的沉积学热点研究区域。

2018年,由王成善院士带领的中国沉积学代表参加了第20届国际沉积学大会,取得了在中国举办第21届国际沉积学大会的举办权,标志着中国沉积学在国际上的核心竞争力得到显著提升。中国具有多样化的沉积盆地类型和丰富的沉积地质记录,为中国沉积学的理论创新和发展提供了得天独厚的条件。总体上,中国的沉积学发展已迈入国际研究前缘,发展迅猛。但是,学界也普遍认识到我们的跟踪研究占多,而原始创新、国际引领性的研究少;应用研究多,而基础、基本原理研究少。无疑,中国沉积学核心实力的提升势在必行,任重道远。

2 中国沉积学当前的主要发展趋势

近十多年来,我国沉积学研究在国际热点领域,如深时古气候与全球变化、古环境变化、海平面变化及第四纪沉积等方面的研究与国际相关研究同步发展,同时在陆相盆地沉积学和层序地层学、含油气盆地沉积学、沉积盆地动力学分析、前寒武纪沉积学等多个方向方面也形成了独具特色的研究领域,并取得了一系列重要进展。

2.1 盆地形成演化和盆地动力学机制

我国学者早在20世纪70年代末就开展了沉积盆地的整体分析,在陆相伸展型盆地、陆内拗陷盆地、大型叠合盆地、边缘海盆地等领域出版了大量有特色的专著(李思田,1988;李德生,1992;田在艺

和张庆春,1996)和教材(王成善和李祥辉,2003;李思田等,2004;解习农和任建业,2013;林畅松,2016)。近十多年来,依托我国油气专项、国家自然科学基金重大研究计划、973项目等的研究,盆地整体分析和盆地形成演化研究取得了一批优秀研究成果。沉积盆地的形成演化涉及盆地形成的动力学机制、演变过程以及盆地与板块构造和地幔深部过程的动力学关系。我国西部环青藏高原巨型盆地体系对大陆会聚及碰撞造山的响应关系研究为此提供了范例(金之钧和蔡立国,2007;贾承造,2009)。近年来以周缘造山带地层及沉积记录的解析为切入点,识别了洋盆、洋岛、海山等沉积地层序列,重建了洋陆作用与转化机制,揭示了西部典型叠合盆地演化的区域动力学背景;以同造山-后造山期高分辨率沉积记录分析和不整合面分析为切入点,识别了陆内构造变形-造山阶段原型盆地大区域隆拗变迁及盆地变革期构造-古地理演化,对塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地等大型叠合盆地及其相邻前陆造山带形成演化取得了一系列新成果,对大型叠合盆地演化的动力学过程和形成机制做出了合理的解释(许志琴等,2008;Lin et al.,2012;李忠和彭守涛,2013;Dong et al.,2016)。此外,针对我国中东部的秦岭、大别山、燕山等造山带及其周缘盆地形成演化,多年来也已取得丰硕的研究成果(张国伟等,2001)。

我国东部滨太平洋构造域中生代陆相和边缘海盆地,位于欧亚板块、太平洋板块和澳大利亚板块的交汇处,其演化受控于多方向洋、陆板块的相互作用,其形成和演化的动力学研究自20世纪80年代以来就一直一直是盆地动力学研究的前缘领域(Tapponnier et al.,1990;Lüdmann and Wong,1999)。晚中生代以来东亚大陆及其陆缘裂谷构造演化的谱系蕴含着东亚大陆岩石圈伸展、薄化、破裂扩张过程的丰富信息,通过盆地沉降与伸展裂陷过程的综合研究,阐明了中国东部中生代盆地演化的多幕裂陷和多幕反转过程,为盆地充填的区域性沉积旋回结构、幕式沉降过程,以及幕式生、排烃过程等提供了理论解释(李思田,2015;Lei and Ren,2016;Lin et al.,2018)。我国东部的大陆边缘盆地,一直是地球系统动力学研究的前缘与热点地区。近十多年来,由我国科学家领衔的南海大洋钻探、国家自然科学基金重大计划和多项国际合作考察航次,使我国大陆边缘盆地动力学研究推向了新的高点。近年来一项重要进展是发现在南海北部陆缘深海域存在大型的拆离断裂带,控制着拆离盆地群

的发育;并揭示了南海岩石圈在新生代经历了纯剪切变形伸展、拆离薄化以及地幔剥露和洋中脊扩张等构造作用,为认识深水海域盆地的形成机制和油气潜力评价提供了重要的理论依据(Yang et al.,2018;任建业等,2018)。

2.2 层序地层学

20世纪80年代发展起来的层序地层学理论不断得到完善和发展,已成为沉积地质学和盆地分析的较为完善的理论和分析方法,成为了油气勘探中不可缺少的分析理论和预测技术。但经典的层序地层学理论源于被动大陆边缘海相盆地的研究,难于应用到陆相盆地的层序研究。自20世纪八九十年代以来,我国学者结合陆相盆地的特点开展了卓有成效的创新性研究,揭示了陆相地层序地层的形成机理,形成了独具特色的陆相湖盆层序地层分析理论和技术方法(李思田等,1999;Lin et al.,2001),并提出了基于中国盆地特色的新概念和分析方法,如构造坡折带、构造古地貌等概念和分析方法(林畅松等,2000,2009;林畅松,2019),推动了陆相层序地层学的发展,为我国含油气盆地的生储盖预测提供了重要的理论基础。在陆相高精度层序地层分析方法方面也取得了一系列创新性的进展(蔡希源和李思田,2003;邓宏文,2009)。由王成善教授领导组织实施的松辽盆地国际大陆科学钻探工程,获取了世界上最连续的,长达8191m的陆相白垩系地质记录,完整地揭示了大型陆相盆地沉积充填演化和沉积层序系列,构建了陆地白垩纪高精度层序地层框架(王成善等,2016),为陆相高精度层序地层学研究提供了极好的范例。依赖于高分辨的三维地震等地球物理技术和以找寻油气储集体为目标的高精度层序地层学和地震沉积学的研究,已形成了一整套思路和方法体系,并在识别沉积体系和储层的几何形态及定量预测储集性能等方面的应用成效显著,将促进盆地沉积充填的研究达到更高水平。同时,我国在边缘海盆地的层序地层学研究近年来也取得了显著进展。我国学者通过对地震、测井、古生物及古地磁等多类资料的综合研究,建立了南海大陆边缘新近纪以来的高精度年代-层序地层序列及其成因机制,揭示了南海北部渐新世以来的大陆边缘沉积楔的层序结构、坡折轨迹、沉积体系域的特征和演化及其构造、气候、物源变化等的响应过程,并建立了边缘海盆地的沉积层序演化模式(Wu et al.,2014;Lin et al.,2018;Xie et al.,2019)。

2.3 源-汇系统

“源-汇”系统研究是近十余年沉积学的一个新的研究领域。我国对地球表面大型的源-汇系统的系统性研究整体处于起步阶段,但我国学者较早就在湖相盆地中注意到了“源-汇系统”对沉积体系和储集砂体分析和预测的重要性,在断陷盆地的研究中注意到了“源、沟、扇”成因关系的分析并应用于砂岩油气藏的预测(潘元林和李思田,2004)。关于我国青藏高原新近纪大体同时性的强烈构造隆升,为新近纪盆地快速充填提供了物源条件的研究,也取得了重要进展(Coleman and Hodges, 1995; 张克信等, 2008)。近年来,我国沉积学者在中新生代断陷盆地古隆起物源与沉积充填过程、陆内拗陷或前陆盆地中造山带物源与前陆盆地沉积充填关系、盆内古构造地貌与沉积物搬运路径等方面的研究都取得了可喜的进展(李忠和彭守涛, 2013; 林畅松等, 2015; 徐长贵等, 2017)。对我国南海的陆架边缘到深海盆地的源-汇系统近年来也开展了较为广泛的研究(Jiang et al., 2015; Shao et al., 2016; Lin et al., 2018),在物源区的构造、气候条件与盆地物源供给、从内陆架河流-三角洲到陆架边缘三角洲-海底扇的源-汇系统等方面的研究有突出进展(Wang et al., 2013)。总体来看,这些研究或局限于物源体系,或较多关注其与油气成藏要素的关系,如何从这些局部地质问题扩展成一种源-汇系统及其相关普适的地质机理或地球表层层圈的动力学过程,仍需多学科队伍的联合制定长期的研究纲要。

2.4 沉积体系和沉积相

沉积学主要的研究任务之一就是研究形成沉积物(岩)的沉积环境、沉积过程及其控制因素,沉积体系和沉积相是沉积学主要的、也是基本的研究对象。沉积学的发展过程中已建立了一系列沉积体系或沉积相模式,构成了沉积学的主要理论框架和基础(Reading, 1996)。沉积学仍在不断创新沉积相理论,如深水重力流沉积、生物岩沉积、事件沉积等。近十多年来,我国在陆相湖盆沉积体系和沉积模式、古老小克拉通碳酸盐岩台地、陆架边缘沉积体系和边缘海盆地沉积动力学等方面的研究,取得了令人瞩目的研究成果。

我国中生代陆相湖盆中的扇三角洲或河流三角洲、滨岸滩坝、重力流等沉积体系研究一直是热点课题。我国沉积学者在湖泊浅水三角洲体系、重力流或异重力流沉积的研究方面取得许多重要的进展,有效指导了油气的勘探和开发(邹才能等, 2008; 袁选俊等, 2015; 朱筱敏, 2016)。近年来,在非

常规油气勘探需求的推动下,湖泊细粒沉积作用及其生、储的特性的研究引起了广泛的关注(邹才能和邱振, 2021)。湖泊细粒沉积的生烃潜力的研究,我国学者事实上率先于国际同行并为建立特色的中国陆相石油地质理论奠定基础。湖泊细粒沉积作用和细粒沉积岩相组构及成因等深化研究,涉及湖泊的成因、沉积物源、有机质生产率以及气候等多因素的影响,目前的研究还比较薄弱,亟需开展多学科攻关研究,以建立细粒沉积体系成因模式。

自20世纪90年代以来,陆架边缘沉积结构和沉积体系的研究成为国际上的研究热点和油气勘探新领域,我国围绕南海大陆边缘沉积过程的研究也取得了突出的成果,如通过对南海北部大陆边缘地震、测井、岩心、薄片等多类资料的综合研究,揭示了南海北部渐新世以来的大陆边缘沉积楔的整体演化过程,并建立了沉积演化模式(Wu et al., 2014; Lin et al., 2018; Xie et al., 2019)。特别是斜坡单向迁移水道、陆架边缘三角洲及富砂斜坡扇体系等沉积模式的建立,丰富了陆架边缘斜坡带沉积动力学理论,明确了沉积物供给、气候-海平面变化、构造沉降等对陆架边缘体系和大陆边缘生长的控制作用(Gong et al., 2017; Jiang et al., 2017; Lin et al., 2018; Wu et al., 2018; Zhang et al., 2019; Tian et al., 2021)。对大陆边缘坡折轨迹及其与大陆边缘生长和深水扇发育机制等的定量研究分析方面,也做了大量有益的探讨(朱筱敏等, 2017; Chen et al., 2019)。

我国的碳酸盐岩研究从20世纪七八十年代就一直在追踪国际前沿研究。我国碳酸盐岩的研究伴随着碳酸盐岩油气勘探的突破,近十余年掀起了研究的热潮,在古老小克拉通背景下的碳酸盐岩沉积环境、台地演化和规模储层的发育模式方面取得了系列创新性成果,建立了复杂台地边缘礁滩、蒸发性台地、多因素叠加白云岩等规模储层的发育模式,为油气勘探提供了重要的理论指导(马永生等, 2011; 赵文智等, 2012; Lin et al., 2012; 邹才能等, 2014)。但我国沉积体系和沉积相研究多偏重沉积描述和应用,似乎缺乏系统深入的机理性探讨。

2.5 古地理

古地理的重建涵盖了对地质时期的大陆轮廓、古海洋、古环境、古气候条件等的重建,也涉及对岩石圈、大气圈、生物圈和水圈历史面貌的综合研究。古地理的再造包括从整个地球表层到局部的盆地区带多尺度的古地理研究。古地理学科的发展先后经历了前板块构造“固定论”、板块构造“活动论”

到当前以大数据为基础的古地理重建的发展历程。我国学者在 20 世纪 50 年代就开始了较为系统的古地理研究和编图(刘鸿允,1959)。70 年代后,我国沉积学者开始了岩相古地理研究和编图(冯增昭等,1977);刘宝珺等出版的《岩相古地理基础和工作方法》(刘宝珺和曾允孚,1985)一书标志着我国岩相古地理研究成为沉积地质学的重要分支,具有里程碑意义(陈洪德等,2017)。这一时期出版了一系列有关我国岩相古地理的研究成果,为我国煤、油气等的预测勘探提供了理论指导(关士聪,1984;李思田,1988;刘宝珺和许效松,1994)。值得指出,王鸿祯先生以全球构造“活动论”和地球演化“阶段论”相结合的构造-古地理分析方法,先后出版《中国古地理图集》(1985)和《中国及邻区古生代生物古地理及全球古大陆再造》(1990),推动了我国基于板块构造理论的构造-古地理研究。

近十多年来,我国的盆地沉积古地理或岩相古地理研究面向不同层次的沉积矿产勘探需求,开展了较为系统的广泛的研究和编图。注重把盆地的构造作用与沉积体系和沉积相结合分析、并强调在等时层序地层格架中进行盆地和岩相古地理编图研究,形成了我国具有盆地特色的层序-岩相古地理或盆地构造-岩相古地理研究方向,取得了系列性显著进展。如王成善等(王成善等,1998)出版了《中国南方海相二叠系层序地层与油气勘探》,首次按层序的体系域编制了层序-岩相古地理图;马永生和陈洪德等(马永生等,2009)将构造、层序与岩相古地理有机结合,出版了《中国南方构造-层序岩相古地理图集》;林畅松(2016)注重叠合盆地关键变革期的古构造、古地貌、古地理的结合分析,出版了《叠合盆地层序地层与构造古地理》。然而,我国的古地理研究多服务于矿产勘探和开发,对有关重大科学问题的深化研究较少。最近,随着王成善等主导的深时数字地球(Deep-Time Digital Earth, DDE)计划的开展,我国正在建设大数据古地理重建平台,开展了基于 GBDB 数据库与 GIS 技术的古地理重建,这是具有国际学科前沿的开拓性工作。

2.6 前寒武纪沉积学

前寒武纪占据整个地球演化历史近 90% 的漫长时期,由于地球结构、构造岩浆活动、沉积作用及生命形式等方面都与显生宙显著不同,其表层的沉积作用和演化的研究就一直是沉积学家们广泛兴趣的、也是难以探知的热点领域。前寒武纪沉积学的研究多围绕以下两大问题:一是超大陆聚合-裂解与沉积盆地的响应关系及盆地中蕴藏的矿产和

油气资源潜力;二是前寒武纪环境变迁的沉积记录与早期生命演化。

我国前寒武纪沉积学研究可追溯到 20 世纪 20 年代(高振西等,1934)。80 年代以来,华南中新元古代的大地构造属性和沉积古地理研究是人们广泛关注的课题(许靖华和何起祥,1980;李铨和冷坚,1991;李江海和穆剑,1999)。进入 21 世纪,与前寒武纪超大陆演化紧密相关的沉积学研究成为热点。我国南方新元古代的地层系统很好地记录了 Rodinia 超大陆聚合与裂解的沉积演化过程,包括雪球地球的形成与消融过程、古海洋环境变迁等。我国沉积学家系统研究了华南新元古代沉积盆地演化及其与 Rodinia 超大陆聚合裂解的关系,提出了“南华裂谷”及其开启模式,再造了华南新元古代的岩相古地理(Wang and Li,2003;王剑等,2019)。围绕油气资源潜力的研究,在沉积环境、生烃潜力等方面的研究取得不少创新成果(王铁冠和韩克猷,2011;孙枢和王铁冠,2016)。我国华北、扬子、塔里木中新元古界均具有良好的油气地质条件,已在四川安岳-威远气田区获得了令人振奋的油气发现。近年来,我国学者在国际地学刊物上发表有关前寒武纪地质研究的论文显著增多,提高了我国前寒武纪研究在国际上的地位。然而,我国前寒武纪沉积学研究主要集中在区域性的地层学、年代学、盆地演化等方面,并未追踪国际热点研究,与国际先进水平相比还有待进一步探讨和提高。

2.7 现代沉积环境

20 世纪 60 年代许多经典的沉积模式的建立,有赖于对现代沉积环境的沉积物特征和沉积过程的研究。当代沉积学的发展仍然有赖于对现代各种沉积环境及其沉积过程的观察和分析。我国处于沉积物产出最为丰富、沉积过程最为活跃的区域之一,因而成为现代沉积过程研究的天然实验室。东南亚地区河流入海沉积物通量占到了全球的 80% 以上(Milliman and Farnsworth,2011),我国近海陆架宽广,为滨浅海环境和从陆到海的源汇过程和河口径流、潮汐、波浪、陆架环流的输运堆积过程提供了广阔的空间(Yang and Youn,2007;Liu et al.,2010)。

我国学者对黄河、长江、珠江三角洲体系,江苏海岸-陆架区沙脊群,黄东海陆架泥质沉积,杭州湾河口沉积,盐沼湿地、红树林、珊瑚礁等进行过系统性的研究,取得了显著的进展。如对现代河流三角洲的研究表明,经典的以波浪、河流、潮汐为端元的三角洲分类有相当大的局限性,提出三角洲形成的

沉积物临界入海通量(Wang et al., 2008)、沉积充填演化顺序、三角洲远端泥质沉积(Liu et al., 2014; Jia et al., 2018),以及低海面期的水下三角洲沉积(Gao et al., 2015)等可能是决定三角洲类型的重要因素。对江苏海岸潮滩和辐射状沙脊群的研究揭示了沉积物供给和沿岸潮差变化对沉积地貌分带性的控制机理,成为了继北海潮滩之后的又一个典型范例(Gao, 2019; Liu et al., 2011; Wang et al., 2012; Shi et al., 2017)。此外,我国陆架区潮汐沙脊群占据面积超过2万 km²,在世界上独一无二(高抒, 2014)。我国学者对其形成的水动力和沉积动力过程研究多年,解析了江苏和欧洲北海两地潮流脊的沉积与地貌差异机制和沙脊群复合堆积体的形成过程。在大型河流的流域盆地内,河流与湖泊沉积也是重要的研究对象。多年来,在资源开发、环境保护、生态建设、灾害防护的国家需求下,我国学者对这些沉积体系进行了富有特色的深入研究。

我国现代沉积过程和机理研究还有待深入,尤其是重力流和漂移沉积以及珊瑚礁等方面需要更多的观测数据和模型研究。目前,本领域研究在不断深化原有研究的基础上,与多学科交叉合作以解决人类社会发展的宏观问题,如气候变化、碳循环、人类活动影响等问题,为未来“海岸带蓝图重绘”提供解决方案(Daigle et al., 2017; Mackay et al., 2017)。

2.8 深时地质与沉积学

深时通常指不能通过冰心恢复的、必须依赖岩石记录所恢复的前第四纪的地质记录(Soreghan et al., 2005)。深时气候学研究从整个地球历史的角度,通过对前第四纪沉积记录开展多种时空尺度研究,全面深入了解地球气候系统的变化以及控制这种变化的物理、化学、生物过程,着眼于并试图为未来气候预测提供依据(孙枢和王成善, 2009)。深时气候学研究是当代地球科学研究的重要组成部分。这为沉积地质学提供了难得的发展机遇(Isaacson and Montañez, 2013; Parrish and Soreghan, 2013)。

我国在深时古气候学领域研究进展迅速,涌现出大量的优秀成果。我国学者系统建立了华南新元古代年代地层(An et al., 2015; 周传明, 2016; 张启锐和兰中伍, 2016)与全球代表性剖面成冰纪底界的对比关系,提供了 Marinoan 冰期时代华南与澳大利亚西北部相连的新证据(Zhang et al., 2013)。在晚古生代冰室气候的研究,建立了冈瓦纳大陆冰盖的增长和消融与海平面变化的响应机制(Wang et al., 2013; 邵龙义等, 2014; Liu et al., 2017);发现了

华北在早二叠世含煤沉积的广泛发育与欧美大陆区同时期的干旱化气候存在明显差异,揭示了冰盛末期和温室气候下古温度状态和气候的微细变化(Wang and Pfefferkorn, 2013; 李守军等, 2014)。对西藏地区东特提斯洋获得的沉积地质记录研究,如伴随着海平面急剧上升的有机质碳同位素急剧负偏移、碳酸盐台地淹没和风暴作用增强、大型底栖生物灭绝等,证实了晚中生代快速增温的气候变化事件(Chen et al., 2017; Han et al., 2018)。上述成果对深入认识快速增温事件期间海洋-气候系统响应机制具有重要意义。

受全球古地理和古气候控制,东亚地区晚中生代陆相沉积主要发育在我国大陆。近年来在我国松辽盆地大陆钻探科学工程,获取了白垩纪连续的以湖泊沉积为主的陆相沉积记录。建立了磁性地层学、锆石 U-Pb 年代学、天文地层学、生物地层学等的晚白垩世陆相年代地层标准(Li et al., 2011; Wu et al., 2013),并为研究白垩纪大陆环境与气候演化规律,以及与生物演化更替之间的关系提供了绝无仅有的研究材料,部分成果已发表在国际学科重要期刊上(Hu et al., 2015; Wang et al., 2016),引领了国际白垩纪陆地气候研究。我国不少地史时期的地质记录可以构建跨区域性的古气候断面。认识和发挥我国地学资源优势的意义显得非常重要。通过大陆科学钻探获得保存良好、高分辨率的沉积记录,提高地质年代学的精度,着重温室地球时期深时气候模型的建立,显然是近阶段研究中的重中之重(王成善等, 2017)。

2.9 生物沉积学

生物沉积学是研究有关生物参与和诱导的沉积作用过程的一门沉积学与生物学的交叉学科,其核心内容是揭示生命参与地球环境中物理和化学沉积的过程,反映现生和深时生命-环境的相互作用与协同演化,是当前人们广泛关注的交叉性热点课题(Chen et al., 2017)。这一领域的研究发展迅速。我国学者也运用多学科手段开展了我国地史时期典型实例的重点解剖和综合研究,取得了可喜的进展。

我国华南从新元古代至中生代地层保存有丰富的生物沉积学记录,对我国微生物礁和后生物礁的研究发现了5次由微生物主导向后生物主导的沉积体系转换期(MMT)(Chen et al., 2019)。第一次 MMT 发生在埃迪卡拉纪晚期,在此之前地球生态系统以微生物席为主,此后多细胞生物开始出现。第二次 MMT 发生在寒武纪早-中期,与著名的

“寒武纪底质革命”(Bottjer et al., 2000)紧密相关。研究表明从寒武纪后生生物礁与微生物岩/礁的交替出现到奥陶纪后生生物礁的繁盛,标志着显生宙第一次由微生物主导向后生生物主导的沉积体系的转变(齐永安等, 2014; Yan et al., 2017)。其他三次 MMT 分别发生在志留纪早期、晚泥盆世法门阶和三叠纪早-中期,分别与奥陶纪-志留纪、弗拉斯-法门阶、二叠纪-三叠纪之交的生物大灭绝相关。我国学者还发现,在华南地区,中三叠世主要的造礁后生生物 Tubiphytes 在奥伦尼克期地层中已经大量出现(Song et al., 2011)。因此,微生物礁在早三叠世仍占主导地位。最近,在云南东部关岭组第二段碳酸盐地层中发现发育良好的叠层石,其内部发育与现代蓝细菌无异的丝状体、管状体等,表明微生物在大灭绝之后迅速繁盛,一直持续到安尼期早期(Luo et al., 2014)。这些 MMT 关键时期与全球气候、环境的剧烈演变存在广泛联系,因此,MMT 的生物沉积记录是研究地质历史时期生物与环境协同演化的绝佳对象。

我国生物沉积学研究还处在起步阶段,正确理解(微)生物参与各种环境的沉积过程以及可能的控制因素是生物沉积学亟待解决的重要科学问题之一。特别是由微生物主导向由后生生物主导的沉积体系转折期的生物沉积特征和驱动机制的研究既是国际生物沉积学的研究热点,也是基于我国沉积记录、可望在沉积学领域取得理论创新、突破的重要方向之一。目前,微生物碳酸盐岩研究形成了国际沉积学研究的一个新热点。我国大规模微生物碳酸盐岩多发育于下古生界-前寒武系,微生物碳酸盐岩研究不断受到了广泛的重视,将会不断取得新的进展(Chen and Benton, 2012)。

3 中国沉积学未来发展展望

近十多年来,中国沉积学取得了一系列创新进展,不断地与国际沉积学研究前沿接轨,并在一些特色的领域做出了世界瞩目的研究成果。同时,我国沉积学研究围绕国家需求做出了重大的贡献。然而,正如上文所述,许多研究偏重跟踪、应用,而涉及基础性的科学问题缺乏系统性的研究,原创性成果少。无疑,中国沉积学的未来发展涉及的核心科学问题,既要能反映学科的研究前沿,又要能满足国家和人类社会文明发展的需求。

3.1 温室陆地气候与古地貌重建

全球气候是否会从两极有冰盖的冰室气候状态,进入两极无冰盖的温室气候状态,是大众与科

学界共同关注的问题,人类文明的发展也迫切要求对这种变化的趋势及其环境效应有更加深入的了解。探索地质历史中,尤其是前第四纪温室条件下气候、环境的变化规律、机制及其对生物圈的影响等,意义重大。侏罗纪、白垩纪和古近纪出现过典型的温室气候,发生过多次快速增温事件(Jenkyns, 2010; Godet, 2013; Foster et al., 2018),与现今人类活动造成的全球变暖极其相似。因此,深入剖析这些古环境事件,包括大洋缺氧、酸化、生物灭绝更替、碳酸盐岩台地淹没、大陆风化作用和水文循环增强等的触发机制和生物环境响应过程等,是解开温室条件下地球系统运行模式的最为宝贵的钥匙。

当前深时古气候研究的重大发现大多来自海相沉积记录,有关深时陆地气候的研究仍相对滞后。但是,陆地作为人类生存繁衍的场所,深入了解其气候系统具有迫切需求,同时也是跨越海陆界线,从全球尺度预测未来气候变化的重要基础。我国学者对松辽盆地晚白垩世古土壤碳酸盐的碳、氧同位素和介形虫化石等的研究发现,东亚地区陆地气候与全球海洋气候变化具有一致性,表现为长时间尺度上的逐渐降温和短时间尺度上对快速气候变化事件的响应(Gao et al., 2015)。然而,陆地气候对全球气候变化的响应机制仍不明确。因此,对地质历史时期的古地貌重建,探讨古地貌的变化与陆地古气候的反馈机制,对于深刻理解大陆动力学和气候-环境演化十分重要,将是未来研究的重点。松辽盆地大陆钻探项目的执行,获取了白垩纪连续的湖盆沉积记录,为研究白垩纪陆地气候提供了绝无仅有的研究材料(Wang et al., 2016)。同时,我国有望从陆地植物和古土壤等记录中获取晚中生代以来连续的、精确的陆地气候参数,包括古温度、古CO₂含量、降水量等,可开展快速气候变化的陆地响应等研究,潜力巨大。而且,晚中生代陆相沉积还是我国重要的油气勘探层位。因此,在探究陆相生油与温室气候的关系、陆地生物群与陆地气候的关系方面,中国都具有明显的地域优势。

3.2 重大地质转折期的沉积过程、生物与地球化学响应

地质历史中发生过多次生物更替和环境演化事件(如微生物-后生生物沉积体系转换期、侏罗-白垩纪大洋缺氧事件、古新世-始新世之交的极热事件等),导致生态系统和全球古环境发生了重大转折。这些快速演化事件的强度大、速率快,处在地球系统演化的极端状态,是研究深时全球变化的重要窗口,其沉积记录是研究地质历史时期生物与

环境协同演化的绝佳对象。当前,“以古鉴今”的思想愈发深刻地影响着有关全球变化的研究。人类对未来世界的探索和预测,需要在认识重大地质转折期的极端事件,特别是能与人类时间尺度类比的气候、环境事件的基础上开展系统工作。显然,探索重大地质转折期的沉积过程及生物与地球化学响应是解析地球深时环境演变的关键问题,也是探索未来宜居星球演化的重要参照。

我国华南、华北和西北地区广泛出露地质历史时期的微生物成因碳酸盐岩和生物礁(Yuan et al., 2011; Xiao et al., 2014; Guan et al., 2017; Chen et al., 2019),南海还发育有许多近赤道带的后生生物礁和微生物岩,这为开展“微生物-后生生物沉积体系转换期”的研究提供了得天独厚的素材。此外,我国共有10个古生代系或阶一级的金钉子剖面,这些全球生物地层标准剖面为我国沉积学者开展“微生物-后生生物沉积体系转换期”等的极端生物、环境事件的深入研究提供了良好的地质年代约束。我国西藏出露有古生代以来的连续海相沉积,尤其是早侏罗世-古近纪的浅海碳酸盐岩是全球唯一的新特提斯洋东段南缘古环境演化的记录,为开展中生代重大地质转折期研究提供了宝贵资料,对深化全球中生代古环境演化认识具有十分重要的意义。另外,我国新疆南部还保存有中新生代副特提斯海沉积,对开展区域海洋条件和气候-环境演化研究也意义重大。

3.3 源-汇系统

从造山带的剥蚀区形成的沉积物经搬运通道输送至深海区沉积下来的整个过程被称为“源-汇系统”(Sømme et al., 2013),其动力学过程研究是当前国际地球科学领域的前沿和热点(林畅松等, 2015)。一般来说,研究地球表层系统演化历史的一个重要途径是应用沉积学理论和方法来解译沉积记录。源-汇系统的重要组成部分,如河流和三角洲体系等往往是人口稠密的地区,因而对源-汇系统的研究显然对认识人类生存环境、全球水循环及生态系统等具有重要意义。此外,化石能源,包括石油、天然气、煤炭等都赋存于沉积盆地中,其形成、运移、储藏均与源-汇过程息息相关。随着亚洲古地理格局的演变(新特提斯洋消亡、青藏高原隆升、东亚边缘海盆地打开等),新生代以来东亚地形发生了重大转变,这对亚洲大陆的沉积物源-汇系统造成了巨大影响,也引起了全球气候的巨大变化。这些构造和气候变化信息经由源-汇系统得以全部记录在边缘海盆地沉积中,对这些沉积物的分

析研究是理解东亚大陆构造及气候演化历史的关键。因此,对从造山带到边缘海盆地的源-汇系统的解剖对地球科学理论的发展和人类生存条件的改善都具有极其重要的意义和价值。

西太平洋边缘海发育有全球最为典型的大型流域沉积物源-汇系统,也是全球物质交换最为活跃的边缘海系统。特别是以珠江、红河等河流体系和海洋多尺度洋流系统相互作用构成的南海封闭型源-汇系统,和以长江为代表的世界大河体系与山溪小河体系相互作用为特征的东海开放型源-汇系统,其物源区构造和气候背景、沉积物搬运路径和过程的控制因素、盆地的洋流系统、深海沉积动力学过程以及海盆地质演化时期的沉积源-汇格局等,不仅与青藏高原和西太平洋边缘海宏观地质演化有关,还具有大型流域源-汇系统的独特性,突显了西太平洋边缘海盆地作为开展源-汇过程及环境变迁研究的理想场所的重要性。从青藏高原至亚洲边缘海盆地构成了全球最大的源-汇系统,这一复杂而又独特的源-汇系统的主体位于我国境内,我国学者长期以来在青藏高原隆升和剥蚀历史、长江和黄河的形成演化以及南海和东海演化等方面积累了大量研究成果,为开展从青藏高原至东亚边缘海盆地的源-汇系统研究奠定了重要基础,形成了我国重要的研究优势。

3.4 前寒武纪超大陆演化、早期地球环境和生命

前寒武纪发生过一系列重大地质事件,包括超大陆(Nuna, Rodinia)的聚合与裂解、大氧化事件、“雪球地球”事件、海洋化学转变和早期生命起源与演化等,这些事件是过去几十年间前寒武纪沉积学研究的焦点。越来越多的证据表明前寒武纪地球海洋和大气中氧含量的演化历史十分复杂(Jin et al., 2016; Li et al., 2017; Stolper and Keller, 2018),而超大陆裂解与聚合可能是这一时期地球氧化事件的重要诱发因素(Müller et al., 2005; Campbell and Allen, 2008)。同时,超大陆裂解还会提高海洋生产力,增强生物光合作用,以释放出更多氧气至大气中。因此,对前寒武纪沉积学的研究对揭示大陆演化、大气圈、海洋和地球早期生命之间的相互作用意义重大。

华南、华北和塔里木地区广泛出露元古代至早寒武世沉积,我国学者已开展过大量该时期古地理学、地层学、古生物学和地质年代学等方面的基础工作(Qiao and Wang, 2014; Su, 2016)。近年来,在湖北神农架地区(Li et al., 2013)和安徽淮南地区(Tang et al., 2013)的发现使得我国在前寒武纪沉

积学研究中能够获得连续的地层记录,这将为超大陆的聚合与裂解过程及相关沉积盆地的演化等科学问题的解答提供关键线索。此外,还将为生物与环境的协同演化,包括早期生命起源及海洋和大气环境背景、中元古代真核生物的起源和演化及其与环境的响应关系、微生物对白云岩和含铁建造等的形成过程的影响等的深入研究提供重要的支撑。我国前寒武纪能源和矿产资源丰富,特别是华南新元古代页岩气、华北和塔里木元古代油气资源潜力巨大,具有极高的经济价值,前寒武纪沉积学研究也将为相关油气勘探和预测提供重要的理论基础。

近十多年来,我国沉积学发展方兴未艾,在多个研究方向和领域与国际相关研究同步发展,成果颇多,在不少领域已迈入国际前沿,并在具有中国沉积和盆地特色的一些方向和领域上取得了突出进展。但我国的沉积学研究仍然以跟踪研究占多,而原创性的、国际引领性的研究较少。我们需一如既往,不断提高我国沉积学的核心竞争力。我们相信,中国沉积学必将迎来愈发蓬勃的发展。

致谢: 本文是在由中国沉积学会组织完成的中国沉积学发展战略研讨成果的基础上编写的,这项研究成果倾注了众多中国沉积学者、国际沉积学会同行以及相关学科领域专家的努力(其中不同部分的主要执笔人有李忠、关平、邵龙义、朱筱敏、解习农、侯明才、颜佳新、陈中强、王剑、邹才能、朱如凯、陈代钊、高抒、谢树成、王璞珺、陈曦、胡修棉、刘志飞、李超等,因篇幅所限不一列出,详见《中国沉积学发展战略》);在本文编写过程中还得到了陈曦副教授、张曼莉博士等的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献 (References):

An Z H, Jiang G Q, Tong J N, Tian L, Ye Q, Song H Y, Song H J. 2015. Stratigraphic position of the Ediacaran Miaohu biota and its constrains on the age of the upper Doushantuo $\delta^{13}\text{C}$ anomaly in the Yangtze Gorges area, South China. *Precambrian Research*, 271: 243–253

Bottjer D J, Hagadorn J W, Dornbos S Q. 2000. The Cambrian substrate revolution. *GSA Today*, 10(9): 1–7

Campbell I H, Allen C M. 2008. Formation of supercontinents linked to increases in atmospheric oxygen. *Nature Geoscience*, 1(8): 554–558

Chen X, Idakieva V, Stoykova K, Liang H M, Yao H W, Wang C S. 2017. Ammonite biostratigraphy and organic carbon isotope chemostratigraphy of the early Aptian oceanic anoxic event (OAE 1a) in the Tethyan Himalaya of southern Tibet. *Palaeogeography, Palaeo-*

climatology, Palaeoecology, 485: 531–542

Chen Z Q, Benton M J. 2012. The timing and pattern of biotic recovery following the end-Permian mass extinction. *Nature Geoscience*, 5(6): 375–383

Chen Z Q, Hu X M, Montanez I P, Ogg J G. 2019. Sedimentology as a key to understanding Earth and life processes. *Earth-Science Reviews*, 189: 1–5

Chen S, Steel R, Wang H, Zhao R, Olariu C. 2020. Clinoform growth and sediment flux into late Cenozoic Qiongdongnan shelf margin, South China Sea. *Basin Research*, 32(2): 302–319

Coleman M, Hodges K. 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension. *Nature*, 374(6517): 49–52

Daigle H, Worthington L L, Gulick S P S, Van Avendonk H J A. 2017. Rapid sedimentation and overpressure in shallow sediments of the Bering Trough, offshore southern Alaska. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(4): 2457–2477

Dong S L, Li Z, Jiang L. 2016. The early Paleozoic sedimentary-tectonic evolution of the circum-Mangar areas, Tarim block, NW China: Constraints from integrated detrital records. *Tectonophysics*, 682: 17–34

Foster G L, Hull P, Lunt D J, Zachos J C. 2018. Placing our current ‘hyperthermal’ in the context of rapid climate change in our geological past. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2130): 20170086

Gao S, Liu Y L, Yang Y, Liu P J, Zhang Y Z, Wang Y P. 2015. Evolution status of the distal mud deposit associated with the Pearl River, northern South China Sea continental shelf. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 562–573

Gao S. 2019. Geomorphology and sedimentology of tidal flats. In: Perillo G M E, Wolanski E, Cahoon D R, Hopkinson C S, eds. *Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier

Godet A. 2013. Drowning unconformities: Palaeoenvironmental significance and involvement of global processes. *Sedimentary Geology*, 293: 45–66

Gong C L, Peakall J, Wang Y M, Wells M G, Xu J. 2017. Flow processes and sedimentation in contourite channels on the northwestern South China Sea margin: A joint 3D seismic and oceanographic perspective. *Marine Geology*, 393: 176–193

Guan C G, Wang W, Zhou C M, Muscente A D, Wan B, Chen X, Yuan X L, Chen Z, Ouyang Q. 2017. Controls on fossil pyritization: Redox conditions, sedimentary organic matter content, and *Chuar* preservation in the Ediacaran Lantian Biota. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 474: 26–35

Han Z, Hu X M, Kemp D B, Li J. 2018. Carbonate-platform response to the Toarcian Oceanic Anoxic Event in the southern hemisphere: Implications for climatic change and biotic platform demise. *Earth and Planetary Science Letters*, 489: 59–71

Hu J F, Peng P A, Liu M Y, Xi D P, Song J Z, Wan X Q, Wang C S. 2015. Seawater incursion events in a Cretaceous paleo-lake revealed by specific marine biological markers. *Scientific Reports*, 5: 9508

- Isaacson P E, Montañez I P. 2013. A 'sedimentary record' of opportunities. *The Sedimentary Record*, 11(1): 2-9
- Jenkyns H C. 2010. Geochemistry of oceanic anoxic events. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3): Q03004-
- Jia J J, Gao J H, Cai T L, Li Y, Yang Y, Wang Y P, Xia X M, Li J, Wang A J, Gao S. 2018. Sediment accumulation and retention of the Changjiang (Yangtze River) subaqueous delta and its distal muds over the last century. *Marine Geology*, 401: 2-16
- Jiang J, Shi H S, Lin C S, Zhang Z T, Wei A, Zhang B, Shu L F, Tian H X, Tao Z, Liu H Y. 2017. Sequence architecture and depositional evolution of the Late Miocene to Quaternary northeastern shelf margin of the South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 81: 79-97
- Jiang T, Cao L C, Xie X N, Wang Z F, Li X S, Zhang Y Z, Zhang D J, Sun H. 2015. Insights from heavy minerals and zircon U-Pb ages into the middle Miocene-Pliocene provenance evolution of the Yinggehai Basin, northwestern South China Sea. *Sedimentary Geology*, 327: 32-42
- Jin C S, Li C, Algeo T J, Planavsky N J, Cui H, Yang X L, Zhao Y L, Zhang X L, Xie S C. 2016. A highly redox-heterogeneous ocean in South China during the early Cambrian (~529-514 Ma): Implications for biota-environment co-evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 441: 38-51
- Lei C, Ren J Y. 2016. Hyper-extended rift systems in the Xisha Trough, northwestern South China Sea: Implications for extreme crustal thinning ahead of a propagating ocean. *Marine and Petroleum Geology*, 77: 846-864
- Li F, Yan J X, Algeo T, Wu X. 2013. Paleooceanographic conditions following the end-Permian mass extinction recorded by giant ooids (Moyang, South China). *Global and Planetary Change*, 105: 102-120
- Li F, Yan J X, Burne R V, Chen Z Q, Algeo T J, Zhang W, Tian L, Gan Y L, Liu K, Xie S C. 2017. Paleo-seawater REE compositions and microbial signatures preserved in laminae of Lower Triassic ooids. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 486: 96-107
- Li J G, Batten D J, Zhang Y Y. 2011. Palynological record from a composite core through late Cretaceous-early Paleocene deposits in the Songliao Basin, Northeast China and its biostratigraphic implications. *Cretaceous Research*, 32(1): 1-12
- Lin C S, Li H, Liu J Y. 2012. Major unconformities, tectonostratigraphic framework, and evolution of the superimposed Tarim basin, Northwest China. *Journal of Earth Science*, 23(4): 395-407
- Lin C S, Liu J Y, Cai S X, Zhang Y M, Lu M, Li J. 2001. Depositional architecture and developing settings of large-scale incised valley and submarine gravity flow systems in the Yinggehai and Qiongdongnan basins, South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 46(8): 690-693
- Lin C S, Jiang J, Shi H S, Zhang Z T, Liu J Y, Qin C G, Li H, Ran H J, Wei A, Tian H X, Xing Z C, Yao Q Y. 2018. Sequence architecture and depositional evolution of the northern continental slope of the South China Sea: Responses to tectonic processes and changes in sea level. *Basin Research*, 30(S1): 568-595
- Liu C, Jarochowska E, Du Y S, Vachard D, Munnecke A. 2017. Stratigraphical and $\delta^{13}\text{C}$ records of Permo-Carboniferous platform carbonates, South China: Responses to late Paleozoic icehouse climate and icehouse-greenhouse transition. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 474: 113-129
- Liu J, Saito Y, Kong X H, Wang H, Xiang L H, Wen C, Nakashima R. 2010. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last ~13,000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years. *Quaternary Science Reviews*, 29(17-18): 2424-2438
- Liu X J, Gao S, Wang Y P. 2011. Modeling profile shape evolution for accreting tidal flats composed of mud and sand: A case study of the central Jiangsu coast, China. *Continental Shelf Research*, 31(16): 1750-1760
- Liu Y L, Gao S, Wang Y P, Yang Y, Long J P, Zhang Y Z, Wu X D. 2014. Distal mud deposits associated with the Pearl River over the northwestern continental shelf of the South China Sea. *Marine Geology*, 347: 43-57
- Lüdmann T, Wong H K. 1999. Neotectonic regime on the passive continental margin of the northern South China Sea. *Tectonophysics*, 311(1-4): 113-138
- Luo M, Chen Z Q, Zhao L S, Kershaw S, Huang J Y, Wu L L, Yang H, Fang Y H, Huang Y G, Zhang Q Y, Hu S X, Zhou C Y, Wen W, Jia Z H. 2014. Early Middle Triassic stromatolites from the Loping area, Yunnan Province, Southwest China: Geobiologic features and environmental implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 412: 124-140
- Mackay A W, Seddon A W R, Leng M J, Heumann G, Morley D W, Piotrowska N, Rioual P, Roberts S, Swann G E A. 2017. Holocene carbon dynamics at the forest-steppe ecotone of southern Siberia. *Global Change Biology*, 23(5): 1942-1960
- Milliman J D, Farnsworth K L. 2011. River discharge to the coastal ocean: A global synthesis. Cambridge: Cambridge University Press, 384
- Müller S G, Krapež B, Barley M E, Fletcher I R. 2005. Giant iron-ore deposits of the Hamersley province related to the breakup of Paleoproterozoic Australia: New insights from in situ SHRIMP dating of baddeleyite from mafic intrusions. *Geology*, 33(7): 577-580
- Parrish J T, Soreghan G S. 2013. Sedimentary geology and the future of paleoclimate studies. *The Sedimentary Record*, 11(2): 4-10
- Qiao X F, Wang Y B. 2014. Discussions on the lower boundary age of the Mesoproterozoic and basin tectonic evolution of the Mesoproterozoic in North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 88(9): 1623-1637
- Reading H G. 1996. Sedimentary environments: Processes, facies and stratigraphy. 3rd ed. Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 688
- Shao L, Cao L C, Pang X, Jiang T, Qiao P J, Zhao M. 2016. Detrital zircon provenance of the Paleogene syn-rift sediments in the northern South China Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(2): 255-269
- Shi B W, Cooper J R, Pratalongo P D, Gao S, Bouma T J, Li G C, Li C Y, Yang S L, Wang Y P. 2017. Erosion and accretion on a mud-

- flat: The importance of very shallow-water effects. *Journal of Geophysical Research--: Oceans*, 122(12): 9476–9499
- Sømme T O, Jackson C A L, Vaksdal M. 2013. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Møre-Trøndelag area of southern Norway: Part 1– Depositional setting and fan evolution. *Basin Research*, 25(5): 489–511
- Song H J, Wignall P B, Chen Z Q, Tong J N, Bond D P G, Lai X L, Zhao X M, Jiang H S, Yan C B, Niu Z J, Chen J, Yang H, Wang Y B. 2011. Recovery tempo and pattern of marine ecosystems after the end-Permian mass extinction. *Geology*, 39(8): 739–742
- Soreghan G S, Bralower T J, Chandler M A, et al. 2005. *Geosystems: Probing Earth's deep-time climate and linked systems*. Norman: University of Oklahoma Printing Service
- Stolper D A, Keller C B. 2018. A record of deep-ocean dissolved O₂ from the oxidation state of iron in submarine basalts. *Nature*, 553(7688): 323–327
- Su W B. 2016. Revision of the Mesoproterozoic chronostratigraphic subdivision both of North China and Yangtze Cratons and the relevant issues. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 156–185
- Tang Q, Pang K, Xiao S H, Yuan X L, Ou Z J, Wan B. 2013. Organic-walled microfossils from the early Neoproterozoic Liulaobei Formation in the Huainan region of North China and their biostratigraphic significance. *Precambrian Research*, 236: 157–181
- Tapponnier P, Meyer B, Avouac J P, Peltzer G, Gaudemer Y, Guo S M, Xiang H F, Yin K L, Chen Z T, Cai S H, Dai H G. 1990. Active thrusting and folding in the Qilian Shan, and decoupling between upper crust and mantle in northeastern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 97(3–4): 382–383, 387–403
- Tian H X, Lin C S, Zhang Z T, Li H, Zhang B, Zhang M L, Liu H Y, Jiang J. 2021. Depositional architecture, evolution and controlling factors of the Miocene submarine canyon system in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 104990
- Wang H J, Yang Z S, Wang Y, Saito Y, Liu J P. 2008. Reconstruction of sediment flux from the Changjiang (Yangtze River) to the sea since the 1860s. *Journal of Hydrology*, 349(3–4): 318–332
- Wang J, Deng Q, Wang Z J, Qiu Y S, Duan T Z, Jiang X S, Yang Q X. 2013. New evidences for sedimentary attributes and timing of the “Macaoyuan conglomerates” on the northern margin of the Yangtze block in southern China. *Precambrian Research*, 235: 58–70
- Wang J, Li Z X. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: Implications for Rodinia break-up. *Precambrian Research*, 122(1–4): 141–158
- Wang J, Pfeifferkorn H W. 2013. The Carboniferous-Permian transition on the North China microcontinent-oceanic climate in the tropics. *International Journal of Coal Geology*, 119: 106–113
- Wang P J, Mattern F, Didenko N A, Zhu D F, Singer B, Sun X M. 2016. Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: An inverted active continental margin basin. *Earth-Science Reviews*, 159: 82–102
- Wang X L, Shu L S, Xing G F, Zhou J C, Tang M, Shu X J, Qi L, Hu Y H. 2012. Post-orogenic extension in the eastern part of the Jiangnan orogen: Evidence from ca 800–760 Ma volcanic rocks. *Precambrian Research*, 222–223: 404–423
- Wu H C, Zhang S H, Hinnov L A, Jiang G Q, Yang T S, Li H Y, Wan X Q, Wang C S. 2014. Cyclostratigraphy and orbital tuning of the terrestrial upper Santonian-Lower Danian in Songliao Basin, northeastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 407: 82–95
- Wu H C, Zhang S H, Jiang G Q, Hinnov L, Yang T S, Li H Y, Wan X Q, Wang C S. 2013. Astrochronology of the Early Turonian-Early Campanian terrestrial succession in the Songliao Basin, northeastern China and its implication for long-period behavior of the Solar System. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 55–70
- Wu W, Li Q, Yu J, Lin C S, Li D, Yang T. 2018. The Central Canyon depositional patterns and filling process in east of Lingshui Depression, Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Geological Journal*, 53(6): 3064–3081
- Xiao S H, Shen B, Tang Q, Kaufman A J, Yuan X L, Li J H, Qian M P. 2014. Biostratigraphic and chemostratigraphic constraints on the age of early Neoproterozoic carbonate successions in North China. *Precambrian Research*, 246: 208–225
- Xie X N, Ren J Y, Pang X, Lei C, Chen H. 2019. Stratigraphic architectures and associated unconformities of Pearl River Mouth basin during rifting and lithospheric breakup of the South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 40(2): 129–144
- Yan Z, Liu J B, Ezaki Y, Adachi N, Du S X. 2017. Stacking patterns and growth models of multiscopic structures within Cambrian Series 3 thrombolites at the Jiulongshan section, Shandong Province, northern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 474: 45–57
- Yang L L, Ren J Y, McIntosh K, Pang X, Lei C, Zhao Y H. 2018. The structure and evolution of deepwater basins in the distal margin of the northern South China Sea and their implications for the formation of the continental margin. *Marine and Petroleum Geology*, 92: 234–254
- Yang S Y, Youn J S. 2007. Geochemical compositions and provenance discrimination of the central south Yellow Sea sediments. *Marine Geology*, 243(1–4): 229–241
- Yuan X L, Chen Z, Xiao S H, Zhou C M, Hua H. 2011. An early Ediacaran assemblage of macroscopic and morphologically differentiated eukaryotes. *Nature*, 470(7334): 390–393
- Zhang M L, Lin C S, He M, Zhang Z T, Li H, Feng X, Tian H X, Liu H Y. 2019. Stratigraphic architecture, shelf-edge delta and constraints on the development of the Late Oligocene to Early Miocene continental margin prism, the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea. *Marine Geology*, 416: 105982
- Zhang S H, Evans D A D, Li H Y, Wu H C, Jiang G Q, Dong J, Zhao Q L, Raub T D, Yang T S. 2013. Paleomagnetism of the late Cryogenian Nantuo Formation and paleogeographic implications for the South China Block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 164–177
- 蔡希源, 李思田. 2003. 陆相盆地高精度层序地层学—基础理论篇. 北京: 地质出版社
- 陈洪德, 侯明才, 陈安清, 时志强, 邢凤存, 黄可可, 刘欣春. 2017. 中国古地磁学研究进展与关键科学问题. *沉积学报*, 35(5): 888–901

- 邓宏文. 2009. 高分辨率层序地层学应用中的问题探析. 古地理学报, 11(5): 471-480
- 冯增昭, 鲍志东, 吴胜和, 等. 1977. 中国南方早中三叠世岩相古地理. 北京: 石油工业出版社
- 高抒. 2014. “江苏沿海开发的资源环境生态基础”专栏前言. 南京大学学报(自然科学), 50(5): 535-537
- 高振西, 熊永光, 高平. 1934. 中国北部震旦纪地层. 中国地质学会会志, 13: 243-288
- 关士聪. 1984. 中国海陆变迁海域沉积相与油气. 北京: 科学出版社
- 贾建造. 2009. 环青藏高原巨型盆地体系构造与塔里木盆地油气分布规律. 大地构造与成矿学, 33(1): 1-9
- 解习农, 任建业. 2013. 沉积盆地分析基础. 武汉: 中国地质大学出版社有限责任公司
- 金之钧, 蔡立国. 2007. 中国海相层系油气地质理论的继承与创新. 地质学报, 81(8): 1017-1024
- 李德生. 1992. 李德生石油地质论文集. 北京: 石油工业出版社
- 李江海, 穆剑, 1999. 我国境内格林威尔期造山带的存在及其对元古代末期超大陆再造的制约. 地质科学, 34(3): 259-272
- 李铨, 冷坚. 1991. 神农架上前寒武系. 天津: 天津科学技术出版社, 1-354
- 李守军, 田臣龙, 徐凤琳, 陈茹, 殷天涛, 赵秀丽. 2014. 山东二叠系石盒子组孢粉特征及古气候意义. 地质论评, 60(4): 765-770
- 李思田, 解习农, 王华, 焦养泉, 任建业, 庄新国, 陆永潮. 2004. 沉积盆地分析基础与应用. 北京: 高等教育出版社
- 李思田, 王华, 路凤香. 1999. 盆地动力学-基本思路与若干研究方法. 武汉: 中国地质大学出版社
- 李思田. 1988. 断陷盆地分析与煤聚积规律. 北京: 地质出版社
- 李思田. 2015. 沉积盆地动力学研究的进展、发展趋向与面临的挑战. 地学前缘, 22(1): 1-8
- 李忠, 彭守涛. 2013. 天山南北麓中-新生代碎屑锆石 U-Pb 年代学记录、物源体系分析与陆内盆山演化. 岩石学报, 29(3): 739-755
- 林畅松, 潘元林, 肖建新, 孔凡仙, 刘景彦, 郑和荣. 2000. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念. 地球科学-中国地质大学学报, 25(3): 260-266
- 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 周心怀. 2015. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析. 地学前缘, 22(1): 9-20
- 林畅松, 杨海军, 刘景彦, 蔡振中, 彭莉, 阳孝法, 杨永恒. 2009. 塔里木盆地古生代中央隆起带古构造地貌及其对沉积相发育分布的制约. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(3): 306-316
- 林畅松. 2016. 沉积盆地分析原理与应用. 北京: 石油工业出版社
- 林畅松. 2019. 盆地沉积动力学: 研究现状与未来发展趋势. 石油与天然气地质, 40(4): 685-700
- 刘宝珺, 曾允孚. 1985. 岩相古地理基础和工作方法. 北京: 地质出版社
- 刘宝珺, 许效松. 1994. 中国南方岩相古地理图集. 北京: 科学出版社
- 刘宝珺. 2001. 中国沉积学的回顾和展望. 矿物岩石, 21(3): 1-7
- 刘东生, 安芷生, 文启忠, 卢演侍, 韩家懋, 王俊达, 刁桂仪. 1978. 中国黄土的地质环境. 科学通报, 23(1): 1-9
- 刘鸿允. 1959. 中国古地理图. 2 版. 北京: 科学出版社
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 2011. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述. 地学前缘, 18(4): 181-192
- 马永生, 陈洪德, 王国力. 2009. 中国南方构造-层序岩相古地理图集. 北京: 科学出版社
- 潘元林, 李思田. 2004. 大型陆相断陷盆地层序地层与隐蔽油气藏研究: 以济阳坳陷为例. 北京: 石油工业出版社
- 齐永安, 王艳鹏, 代明月, 李姐. 2014. 豫西登封寒武系第三统张夏组凝块石灰岩及其控制因素. 微体古生物学报, 31(3): 243-255
- 任建业, 庞雄, 于鹏, 雷超, 罗盼. 2018. 南海北部陆缘深水-超深水盆地成因机制分析. 地球物理学报, 61(12): 4901-4920
- 邵龙义, 董大啸, 李明培, 王海生, 王东东, 鲁静, 郑明泉, 程爱国. 2014. 华北石炭-二叠纪层序-古地理及聚煤规律. 煤炭学报, 39(8): 1725-1734
- 孙枢, 王成善. 2009. “深时”(Deep Time) 研究与沉积学. 沉积学报, 27(5): 792-810
- 孙枢, 王铁冠. 2016. 中国东部中-新元古界地质学与油气资源. 北京: 科学出版社
- 孙枢. 2005. 中国沉积学的今后发展: 若干思考与建议. 地学前缘, 12(2): 3-10
- 田在艺, 张庆春. 1996. 中国含油气沉积盆地论. 北京: 石油工业出版社
- 王成善, 陈洪德, 寿建峰. 1998. 中国南方海相二叠系层序地层与油气勘探. 成都: 四川科学技术出版社
- 王成善, 冯志强, 王璞珺. 2016. 白垩纪松辽盆地松科 1 井大陆科学钻探工程. 北京: 科学出版社
- 王成善, 李祥辉. 2003. 沉积盆地分析原理与方法. 北京: 高等教育出版社
- 王成善, 王天天, 陈曦, 高远, 张来明. 2017. 深时古气候对未来气候变化的启示. 地学前缘, 24(1): 1-17
- 王成善, 郑和荣, 冉波, 刘本培, 李祥辉, 李亚林, 孙红军, 陈建平, 胡修棉. 2010. 活动古地理重建的实践与思考——以青藏特提斯为例. 沉积学报, 28(5): 849-860
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集. 北京: 地图出版社
- 王剑, 江新胜, 卓皆文, 崔晓庄, 江卓斐, 魏亚楠, 蔡娟娟, 廖忠礼. 2019. 华南新元古代裂谷盆地演化与岩相古地理(附图集). 北京: 科学出版社
- 王铁冠, 韩克猷. 2011. 论中-新元古界的原生油气资源. 石油学报, 32(1): 1-7
- 吴崇筠, 薛叔浩. 1992. 中国含油气盆地沉积学. 北京: 石油工业出版社
- 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 赵梦. 2017. 沉积盆地“源-汇”系统研究新进展. 石油与天然气地质, 38(1): 1-11
- 许靖华, 何起祥. 1980. 薄壳板块构造模式与冲撞型造山运动. 中国科学, (11): 1081-1089
- 许志琴, 李廷栋, 杨经绥, 嵇少丞, 王宗起, 张泽明. 2008. 大陆动力学的过去、现在和未来——理论与应用. 岩石学报, 27(7): 1433-1444
- 业治铮, 何起祥, 张明书, 韩春瑞, 李浩, 吴健政, 鞠连军. 1985. 西沙石岛晚更新世风成生物砂屑灰岩的沉积构造和相模式. 沉积学报, 3(1): 1-15
- 叶连俊. 1942. 近世沉积学之领域及其演进——纪念朱森教授. 地质论评, 7(6): 299-312

- 叶连俊. 1989. 中国磷块岩. 北京: 科学出版社
- 袁选俊, 林森虎, 刘群, 姚泾利, 王岚, 郭浩, 邓秀芹, 成大伟. 2015. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例. 石油勘探与开发, 42(1): 34-43
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社
- 张克信, 王国灿, 曹凯, 刘超, 向树元, 洪汉烈, 寇晓虎, 徐亚东, 陈奋宁, 孟艳宁, 陈锐明. 2008. 青藏高原新生代主要隆升事件: 沉积响应与热年代学记录. 中国科学: 地球科学, 38(12): 1575-1588
- 张启锐, 兰中伍. 2016. 南华系-莲沱组年龄问题的讨论. 地层学杂志, 40(3): 297-301
- 赵文智, 沈安江, 胡素云, 张宝民, 潘文庆, 周进高, 汪泽成. 2012. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征. 石油勘探与开发, 39(1): 1-12
- 周传明. 2016. 扬子区新元古代前震旦纪地层对比. 地层学杂志, 40(2): 120-135
- 朱筱敏, 葛家旺, 赵宏超, 袁立忠, 刘军. 2017. 陆架边缘三角洲研究进展及实例分析. 沉积学报, 35(5): 945-957
- 朱筱敏, 李顺利, 潘荣, 谈明轩, 陈贺贺, 王星星, 陈锋, 张梦瑜, 侯冰洁, 董艳蕾. 2016. 沉积学研究热点与进展: 第32届国际沉积学会议综述. 古地理学报, 18(5): 699-716
- 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 汪泽成, 张宝民, 魏国齐, 王铜山, 姚根顺, 邓胜徽, 刘静江, 周慧, 徐安娜, 杨智, 姜华, 谷志东. 2014. 四川盆地震旦系-寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现. 石油勘探与开发, 41(3): 278-293
- 邹才能, 邱振. 2021. 中国非常规油气沉积学新进展. 沉积学报, 39(1): 1-9
- 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 罗平, 王岚, 刘柳红, 薛叔浩, 袁选俊, 朱如凯, 陶士振. 2008. 大型敞流拗陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布. 地质学报, 82(6): 813-825

(本文责任编辑:刘莹,龚超颖;英文审校:张兴春)

·亮点速读·

火山二氧化碳的快速排放与二叠纪末生物大灭绝

发生在二叠纪末的生物大灭绝 (EPME, 251 ± 0.037 Ma) 被认为是地球历史上最严重的生物灭绝事件, 其发生时间与西伯利亚大火成岩省的形成时间相一致。现有研究认为, 由于该大火成岩省火山的喷发, 大气中被注入大量的 CO_2 , 引发了严重的全球变暖、灾难性的海洋缺氧以及极端的海洋和陆地酸化, 从而导致二叠纪末陆地和海洋中生命的大灭绝。然而, 目前对触发二叠纪末全球碳循环扰动的贫 ^{13}C 碳的来源、海洋 pH 值下降以及该时期全球变暖等问题尚未达成一致认识, 对从西伯利亚大火成岩省喷发初期到二叠纪生物大灭绝时大气中二氧化碳水平变化的认识也十分有限, 这限制了对该时期释放的温室气体对气候反馈的理解。

针对上述问题, 来自蒙特克莱尔州立大学的 Cui Y. 及其合作者基于来自芬兰马克台地 (Finnmark Platform) 的新的特定化合物碳同位素记录和天文校正的年龄模型, 运用中等复杂性的地球系统模型进行模拟研究 (carbon centric - Grid Enabled Integrated Earth system model, cGENIE), 制约当时二氧化碳排放的来源、速度和总量。同时, 作者还对挪威芬兰马克台地海洋沉积物中保存的代表高等植物叶蜡输入的长链 ($n\text{-C}_{27}$ 和 $n\text{-C}_{29}$) 和代表海洋藻类输入的短链 ($n\text{-C}_{17}$ 和 $n\text{-C}_{19}$) 烷烃的特定化合物碳同位素进行分析, 以区分在二叠纪末生物大灭绝时期大陆 (大气二氧化碳) 和海洋 (海洋藻类输入的二氧化碳) 来源的 $\delta^{13}\text{C}$ 。

通过定量模拟和比较海洋表面 pH

以及硼同位素 pH 指标, 作者认为存在一个巨大的 (~ 36000 Gt C) 的火山二氧化碳碳源 ($\sim 15\%$), 其快速喷发 (~ 5 Gt C yr^{-1}) 驱动了该时期显著的碳同位素漂移 (CIE)、海平面 pH 值的突然下降以及全球气温的急剧升高。研究表明, 这些温室气体的大量加入可能将地球系统推向了一个关键的临界点, 超过该临界点, 海洋 pH 值和温度的极端变化将导致不可逆转的物种灭绝。在海洋沉积物中保存的高等植物叶蜡中观察到的相对放大的 CIE 表明, 芬兰马克台地的地表水与西伯利亚大火成岩省的火山活动首次大规模的百年尺度的碳释放之间很可能存在不平衡, 进一步支持了快速的碳注入模型。研究表明碳排放的活动总伴随着有机碳埋藏, 从而促进海洋广泛的缺氧作用。

[以上成果发表在国际著名地学期刊 *PNAS*: Cui Y, Li M S, van Soelen E E, Peterse F, Kurschner W M. 2021. Massive and Rapid predominantly volcanic CO_2 emission during the end-Permian mass extinction. *PNAS*, 118, No. 37 e2014701118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2014701118>.]

(袁超 编译)