

文章编号:1000-0550(2017)05-0877-11

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.002

中国盆地动力学研究现状及展望

解习农¹,林畅松²,李忠³,任建业¹,姜涛¹,姜在兴²,雷超¹

1.中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室,武汉 430074

2.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083

3.中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

摘要 沉积盆地既是人类最重要的资源宝库,又包含了丰富的全球气候变化、流体流动和地球动力学等相关信息。人类社会对矿产资源和水资源的大量需求推动盆地分析领域的快速发展,地球科学家对沉积盆地开展了多年的系统性探索,在盆地形成和演化机制、沉积充填、盆地流体及相关资源的聚集过程等诸多方面的研究取得了一系列重要的进展和突破,形成了一门新兴的学科—盆地动力学。近年来,我国学者在大型叠合盆地和大陆边缘盆地的动力学过程、陆相盆地层序地层、深水沉积、源—汇系统等方向取得了显著成绩和突出进展。相关成果不仅有效地服务于能源、矿产、水资源等各类资源勘探,而且为地球动力学、重大构造事件、全球环境变迁及气候演变研究提供了丰富资料和详实证据。

关键词 盆地动力学;源—汇系统;层序地层;深水沉积

第一作者简介 解习农,男,1963年出生,教授,博士生导师,油气地质和海洋地质,E-mail: xnxie@cug.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

0 引言

沉积盆地分析(sedimentary basin analysis)是以沉积盆地为对象,研究沉积盆地形成演化、沉积充填及其资源形成过程与赋存规律的理论体系和分析方法。早在20世纪中叶,Potter和Pettijohn^[1]出版的《古流与盆地分析》和Conybeare^[2]出版的《沉积盆地岩性地层分析》两部专著揭开了盆地分析的序幕,率先提出了盆地整体分析的思路及其沉积地层系统编图方法。至上世纪末,一系列专著的相继问世,如《沉积盆地分析原理》(Miall,2000)^[3]、《沉积盆地:演化、相和沉积输入》(Einsele,2000)^[4]、《盆地分析原理和应用》(Allen, *et al.*, 2005;2013)^[5-6]、《沉积盆地分析基本原理》(Wangen, 2013)^[7]、《盆地分析中的定量方法》(Lerche, 1990)^[8]等,这些专著构建了沉积盆地分析的系统理论和方法体系。特别是Dickinson^[9-10]率先提出了沉积盆地动力学这一学术思想,并列入到美国地球动力学委员会(USGC)提出的沉积盆地研究纲要,进而将盆地研究拓展到盆地形成过程的动力学分析。基于企业界和学术界高度重视和密切关注,大大推动盆地分析的快速发展,使得当今盆地分析也进入到盆地动力学研究的新阶段。

当代沉积盆地动力学可以理解为研究盆地形成

演化、沉积充填和沉积矿产成矿规律的分支学科。它既包括盆地内沉积物和地层流体的充填过程、发育机制及其控制因素分析,也包括直接控制盆地形成演化的地球内、外动力地质作用及其动力学机制分析。盆地动力学研究内容主要包括以沉积学分析为主的盆地充填动力学、以构造地质学分析为主的盆地形成演化动力学和多学科交叉的盆地流体动力学研究等。本文试图从我国近年来盆地动力学领域所取得成果入手,阐述盆地动力学内涵及研究内容,系统综述盆地动力学方向最新研究进展。

1 与盆地动力学相关的重大研究计划

沉积盆地作为资源宝库,备受工业界的高度关注,同时盆地动力学作为地球动力学的重要组成部分,也受到地质学家的广泛关注。来自企业的大力支持和学术界的高度关注大大推动了盆地分析原理和技术方法的快速发展。近20多年来,许多国际机构相继实施了多个与沉积盆地相关的综合性研究计划,如美国地球科学家提出的为期30年(1990—2020)的“大陆动力学”研究计划,其重要的科学问题之一就是大型沉积盆地的成因和演化^[11]。由IUGS(International Union of Geological Sciences)和IUGG(International Union of Geodesy and Geophysics)实施的国

收稿日期:2017-07-20;收修改稿日期:2017-08-20

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91528301);高等学校创新引智计划(B14031)[**Foundation:** Major Research Program of National Natural Science Fund Integration Project, No. 91528301; Higher Education Innovation Initiative Project, No. B14031]

际岩石圈计划 (ILP: International Lithosphere Program) 设有专门的“沉积盆地成因”研究小组^[12], 其任务是促成学术界和工业界研究机构对沉积盆地开展合作研究, 如从区域到纳米尺度、从地球深部到地表过程对沉积盆地及其能源环境效应研究, 该研究小组从 1990 年开始几乎每年召开 1 次工作会议^[13-14], 现任研究小组组长为荷兰乌得勒支大学 Liviu Matenco 教授和法国 IFP Energies nouvelles (IFPEN) 研究院的 Fadi Henri Nader 研究员。从 2005 年开始, 国际岩石圈计划针对全球范围内各种典型沉积盆地开展研究, 如环极地沉积盆地^[15]、非洲及其大陆边缘盆地^[16]、墨西哥湾及拉丁美洲与环太平洋盆地、中东、亚洲—澳大利亚沉积盆地^[13]。2008 年欧洲科学基金会 (European Science Foundation) 设立了 TOPO-EUROPE 大型合作研究计划 (学术委员会主席为荷兰乌得勒支大学 Sierd Cloetingh 教授), 该计划设置了 10 个大型研究课题, 开展了大量有关沉积盆地的地球深部与地表过程的研究^[17], 如研究山脉隆升与周缘盆地沉降过程的 TOPOALPS 项目 (首席科学家为瑞士联邦理工大学的 Sean Willett 教授)。此外, 欧洲科学基金会还资助了大量与盆地动力学相关的研究计划, 如 ESF-Integrated Basin Studies^[18-20]、EURO-PROBE GeoRift^[21-23]、ESF-EUROMARGINS 等。美国国家科学基金会 (NSF) 于 1998 年启动大陆边缘研究计划 (MARGINS), 随后许多国家和区域组织相继建立了各自的大陆边缘科学计划, 如欧洲大陆边缘计划 (EUOMARGINS)、英国的大陆边缘 3D 研究、挪威大陆边缘研究网络计划以及澳大利亚大陆边缘计划等, 基于这些计划整合建立了国际大陆边缘科学组织 (InterMargins), 该组织通过对大陆边缘张裂、沉积过程、俯冲带过程、流体过程及地球化学和微生物等方面的分析, 协调和推动国际间、多学科的大陆边缘研究。该计划于 2010 年结束, 由于其对地球科学的发展起到了重要的推动作用, 随后于 2013 年正式启动“裂谷与俯冲边缘的地球动力学过程” (Geodynamic Processes at Rifting and Subducting Margins, 简称 Geoprisms (地质棱镜计划)), 其主要研究内容包括了俯冲带物质循环和变形作用、初始破裂和演化两个方面, 前者选择了阿拉斯加大陆边缘、Cascadia 大陆边缘和新西兰作为重点研究区域, 后者选择了东非裂谷系统和北美东部大陆边缘作为重点研究区域, 研究成果在最近几年的美国地球物理 (AGU) 年会都进行了专门报告。此外, 代表了海洋科学最高水平的综合大

洋发现计划 (IODP) 将大陆边缘盆地动力学作为重点研究方向, 近几年来, 基于 Iberia-Newfoundland 边缘的洋陆转换带大量地震和 IODP 钻探资料以及出露在阿尔卑斯山的中生代特提斯被动陆缘的露头剖面的研究, 提出了非岩浆型被动大陆边缘岩石圈张裂的新模式^[24-27]。这些大型研究计划伴随着人类对矿产资源的需求和认识地球愿望的提高, 开展了广泛的国际性多学科的综合研究, 引领并兴起了一系列研究方向, 如深水沉积学、定量层序地层学、强调过程的源—汇 (source-to-sink) 系统、岩石圈拉伸减薄破裂机制、构造—剥蚀—气候耦合/脱耦机制研究。

我国盆地整体分析始于 20 世纪 80 年代初^[28], 其代表作之一就是李思田主编出版的“断陷盆地分析与煤聚积规律”^[29], 随后许多中国学者针对我国一些有特色的陆相盆地和大型叠合盆地开展了大量综合研究, 涌现出一批丰硕的成果^[30-34], 同时也出版了多部与盆地分析相关的本科生和研究生教材^[35-38]。近年来, 我国实施了国家油气重大专项、“深部探测技术与实验研究”国家专项 (SinoProbe, 简称深部探测计划)、科技部国家重点基础研究发展计划 (简称 973 项目)、国家自然科学基金“华北克拉通破坏”和“南海深海过程演变”等重大研究计划, 近年推出的国家重点研发计划等, 以上研究计划都涉及到盆地动力学的研究内容^[39-41], 无疑, 这些计划的实施大大推动了我国盆地动力学快速发展。

2 盆地动力学研究主要进展

近 20 多年来, 我国学者在政府部门和能源企业的大力支持下, 围绕盆地形成演化、沉积充填、盆地流体等开展了大量且卓有成效的研究, 使得我国沉积盆地分析研究逐渐从单一沉积学分析拓展到综合分析, 从局部单因素分析拓展到盆地整体分析, 从静态要素分析拓展到过程和动力机制分析, 从而将盆地分析推向盆地动力学研究新阶段。所取得的主要进展和成就大致可概括为以下几个方面:

2.1 盆地形成演化动力学研究进展

沉积盆地形成演化分析包括沉积盆地形成演化同期及其后期变形、反转的动力学机制及其演变过程, 以及盆地与板块构造格架和地幔深部过程的动力学关系^[37]。基于我国沉积盆地形成演化的特点, 特别是含油气盆地的特点, 既强调了板块构造和地幔对流系统对盆地形成演化的控制作用, 又突出了盆地与造山带作为统一体系的关联性和成因联系。其突出

进展包括:

(1) 重建大型叠合盆地演化史及动力学过程。盆地和造山带是大陆最基本的构成单元,它们是统一的盆—山体系在不同时空演化阶段所形成的成对耦合的产物。因此将盆地与造山带作为统一体系进行研究可更好地揭示其更大范围中板块相互作用的动力过程。我国西部大型叠合盆地的演化及其周缘碰撞造山的响应是这类研究的最佳地域。在以往西部盆地认识基础上^[33,42-44],近年来以周缘造山带非史密斯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格局,进一步认识了西部典型叠合盆地的区域动力学体制^[45-47];以同造山—后造山期高分辨率碎屑沉积记录和不整合面分析为切入点,识别了陆内构造变形—造山阶段原型盆地区域隆坳过程,在叠合盆地的定型构造及其驱动模型方面取得了新的进展^[48-49]。总之,我国学者及石油地质工作者经过几十年努力,通过造山事件和过程的精细定年、盆地中不整合界面与构造—地层对比,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造山带形成演化取得了一系列成果和新认识,在一定程度上揭示了小块体背景下基底构造、块体间碰撞构造以及块体内部地幔柱构造对多期叠合盆地分异演化的诸多控制细节,对大型叠合盆地演化的动力过程做出了合理的解释。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^[34,50],这些成果也为盆地形成演化动力学研究提供了新的中国范例。

(2) 大陆边缘盆地动力学进展显著。我国的海域盆地处于欧亚板块、太平洋板块和印—澳板块的交汇地带,是全球构造运动最为强烈的地区之一,也是地球系统动力学研究的前沿与热点地区,在总体汇聚板块的背景下,形成了一系列构造属性迥异的沉积盆地。从20世纪末开始,中国海域经过我国科学家领衔的ODP148航次钻探,两轮国家重点基础研究发展计划(973计划)项目、国家自然科学基金重大计划“南海深海演变过程”和多次国内外的科学专题考察航次的成功实施,使得我国南海成为国际海洋科学研究的热点,特别是2014年实施的IODP349航次和2017年实施的IODP367、368航次,将我国大陆边缘动力学研究推向了新的高点,并取得了一系列重要的进展。晚中生代以来东亚大陆及其陆缘裂谷构造演化谱系的建立^[51-53]阐明了中国东部和海域中新代

盆地演化的多幕裂陷和多幕反转过程^[54-55],明确了南海处于该演化谱系的终端,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^[56-57]。基于南海边缘海形成演化的动力学背景分析和陆缘盆地的详细解剖,人们已经认识到红河—越东—Lupar线断裂是东南亚地区的一个重要的构造界线,该界线将南海划分出两个构造特征和演化过程迥异的区域构造变形区^[58-59],即界线的西侧为印度—欧亚大陆碰撞所产生的“挤出一逃逸构造区”和界线的东侧为“古南海俯冲拖曳构造区”。不同构造区内陆缘盆地成盆主控机制迥异,挤出一逃逸构造区内有许多与大型走滑带有关的盆地,且受伸展与走滑运动双重机制控制,引起伸展的构造应力主要来源于地幔物质的上隆,所谓的“转换伸展”成为该构造区成盆主控机制^[60]。古南海俯冲拖曳构造区盆地主要受拉伸作用控制,在南海的北部陆缘形成了一系列的伸展盆地和边缘海海盆。发育在南海北部陆缘深水/超深水的大型拆离断层及其所控制的拆离盆地群是近年来南海构造研究方面的突破性进展^[61]。这些拆离断层在跨越南海北部陆缘远端带和洋陆转换带的长电缆剖面以及连片三维地震剖面上清晰显示出来,规模巨大,位移距离长,向下延伸最终汇聚到地壳底界Moho面,与控制陆架浅水区盆地的高角度正断层形成鲜明的对比。研究表明南海北部岩石圈在新生代期间经历了纯剪切变形控制的伸展、拆离断层作用控制的强烈薄化、剥离断层控制的地幔剥露和洋中脊扩张作用控制的裂解过程,表明岩石圈伸展破裂过程不是理论模型^[62]所预测的“瞬时”过程,而是经历了阶段性明显的“非瞬时”伸展破裂过程,其中“地壳拆离薄化作用”是南海北部陆缘深水盆地成盆的主控因素。大型拆离断层及其所控制的拆离盆地的发现,改变了深水—超深水盆地形成和演化为高角度正断层控制的传统认识,为科学地评价深水—超深水盆地的油气勘探潜力提供了重要的理论基础,对于正在快速走向深水海域的中国海洋油气勘探具有重要的意义。此外,南海北部大陆边缘裂后期异常沉降现象的揭示和机理的解释是我国大陆边缘盆地动力学研究的又一个重要的进展。Mckenzie模型是阐明伸展型大陆边缘盆地演化的最经典的理论模式^[62],探讨了岩石圈拉伸、减薄、盆地沉降、软流层上隆以及相应的热历史之间的定量关系,作为裂谷盆地动力学模式被广泛采用,其最主要的贡献是将盆地的沉降区分出断层控制的、瞬时性的同裂陷期沉降和随时间呈幂指数衰减的

热回沉作用控制的裂后期沉降。但是,南海北部被动陆缘与经典的大西洋型被动边缘模式不同,裂后阶段仍显示了较强烈的构造活动,并有一系列构造热事件发生,表现为显著的构造沉降的幕式加速、幔源岩浆活动、新的断裂体系形成以及大规模盆地热流体活动^[63-65]。南海北部边缘盆地构造样式虽然是伸展和离散的,但不属于典型的被动边缘,是发育在总体汇聚板块构造背景之下的非典型被动大陆边缘,其裂后期沉降是在总体热沉降背景之上叠加了周缘板块重组事件引发的边界应力作用和深部地幔动力作用,由此产生了一系列与经典被动大陆边缘形成鲜明对比的构造—热事件活动^[66]。利用南海北部陆缘沉积盆地充填序列反演盆地沉降过程的方法可用于地幔动力学与岩石圈表层关系的研究,是开展大尺度地球动力学研究的重要途径。

(3) 从地球深部背景及地幔对流系统进一步认识盆地的形成与演化。沉积盆地是岩石圈伸展或挠曲变形的产物,而深部物质交换、地幔对流系统对岩石圈的变形起着关键性作用,并影响着沉积盆地构造样式和热状态。90年代兴起的天然地震层析技术揭示了地球深部结构的图像,尽管其精度较差,但为盆地深部的地幔对流系统研究提供了重要的资料基础。应用天然地震成像技术和岩浆岩岩石—地球化学方法对中国东部及海域中生代板块俯冲、地幔流上涌、岩石圈减薄及破裂过程的研究成功地解释了晚中生代—新生代断陷盆地群、火山岩省和大型裂谷盆地的成因和演化^[52],如针对中国东部地幔对流系统的研究成果为盆地动力学研究提供深部背景^[67]。此外,“华北克拉通破坏”重大研究计划项目从深部地球化学及构造演变等角度揭示了渤海湾盆地及周缘构造演化差异性。

2.2 盆地充填动力学研究进展

与盆地形成对应的沉积充填过程和层序发育演化是盆地动力学过程的响应。基于我国特色的地质背景及盆地类型,形成诸多的盆地沉积充填的研究成果及分析方法,如陆相盆地层序地层分析方法等。其突出进展包括:

(1) 陆相层序地层学成果丰硕。自从上世纪末层序地层学的概念和方法提出,很快成为沉积盆地等时地层框架建立和沉积体系精细刻画的关键技术,很快成为油气勘探中一种广泛应用的技术,为源岩和储层沉积学分析提供较为有效的方法。层序地层学起源于被动大陆边缘盆地的研究,我国学者结合中国陆

相盆地的特点有力地推动了陆相层序地层学发展,突出体现在以下几方面:1) 形成了独具特色的陆相断陷盆地层序地层分析方法和流程。我国多数含油气盆地为陆相盆地,在陆相断陷盆地以及构造活动型盆地层序地层学研究中,相应形成了独具特色的断陷盆地层序地层学分析思路和方法^[68-69],也提出了基于中国地质特色的概念和分析方法,如构造坡折带概念^[70]和古地貌恢复方法,成为陆相盆地层序地层分析的有效方法,并取得了良好的经济效益。2) 高精度层序地层分析方法有效地应用于油气勘探。我国多数成熟油气田探区均已从构造圈闭勘探转向地层和岩性圈闭或隐蔽圈闭勘探,对沉积体的刻画具有更高的要求。正是由于油气勘探工作的迫切需求,大大推动了我国高精度层序地层学发展,然而,由于陆相盆地地层年龄的确定非常困难,大大制约了高精度层序地层分析。由王成善教授牵头的国际大陆钻探计划(ICDP)“松辽盆地大陆科学钻探”完整地揭示了大型陆相盆地充填演化系列,同时也构建了陆相湖盆白垩纪高精度层序地层框架^[71],为陆相高精度层序地层学研究提供了极好的范例。3) 陆相沉积体的地震沉积学解剖。近年来,三维地震的地球物理技术和三维可视化技术的广泛应用,使得地震地层学和层序地层学进一步向储层层序地层学方向延伸和发展,导致了以沉积体系和储层精细刻画为目的的地震沉积学应运而生,地震沉积学方法已经成为沉积体系内部构成和储层几何形态刻画及预测的非常有效的工具。目前油气勘探开发中广泛采集的三维地震资料,为在沉积盆地内进行地震沉积学的研究提供了前提条件,地震沉积学的应用为储层和烃源岩分析以及有效预测做出了重要贡献。

(2) 深水沉积研究进展迅猛。20世纪90年代被动大陆边缘(如墨西哥湾、巴西、北海、西非、南海等)深水油气勘探的突破,发现了细粒浊流沉积可作为深水油气储集层^[72-74],同时越来越多的证据也揭示了深海沉积作用的复杂性^[75-78]。随着近年来我国海洋调查及深海油气勘探的深入,我国学者也相继报道了我国南海发育的复杂的深水沉积体系^[79-83]。并在珠江口盆地白云凹陷和琼东南盆地陵水凹陷深水区取得了天然气勘探的重大突破,如深水海底扇^[84]和深水峡谷储层^[85-87]。在现代海洋中,常沿大陆边缘发育一系列深水沉积体系,如与重力流相关的深水峡谷、块体流沉积、海底扇、沉积物波,与底流(或洋流)相关的大型等深岩丘或等深岩席等^[83,88]。值得

一提的是,针对南海陆演化过程在其大洋钻探历史中首次采用连续两个航次(IODP367和368)的方式对该地区实施了7个站位钻探了17个钻孔,总钻探深度达7 669.3 m,在其中六个站位成功获取2 542.1 m具有极高科学价值的沉积物、沉积岩、玄武岩和变质岩珍贵岩芯,相信一批新的成果将会迅速涌现。

2.3 地球表层动力学与源—汇系统研究进展

基于“从源到汇”和“隆升—剥蚀—气候过程”,探讨盆地沉积充填和层序发育对盆地整体动力学的响应过程是当前盆地动力学研究的一个热点方向^[89-91]。

(1) 地球表层动力学研究的快速发展,深化了源区剥蚀过程及其对深部响应过程的认识。沉积物源的供给量变化对沉积盆地的充填过程具有深刻的影响。物源区的剥蚀过程及剥蚀速率研究是沉积盆地分析所要涉及的重要科学问题。在物源区研究中,构造—气候—地球表层过程的系统分析成为这项研究的关键问题^[92-93]。沉积盆地作为造山带物源区卸载物质的堆积场所,物源区的构造和剥蚀演化过程对盆地构造和沉积演化具有重要作用。我国学者在中、新生代以来的造山过程、气候变化等及其对沉积物源的影响方面近年来开展了广泛的研究^[94-97]。比如,基于低温热年代学方法揭示了青藏高原新近纪发育两期快速和重大隆升期(大约13~8 Ma期间和5 Ma以来)^[98-100],这一过程与盆地内快速充填具有很好的耦合关系。

(2) 源—汇系统(source-to-sink,简称S2S)研究进展迅猛。沉积物从剥蚀(山区剥蚀)到搬运(如河流搬运)到堆积(如沉积在湖泊或海洋汇盆地)经历了一个复杂的过程,这些沉积物和溶解物质通过一系列相互连接的地貌环境单元,沉积或沉淀在冲积平原、湖泊、大陆架或深海平原,这套相互连接的环境地貌单元构成了源—汇系统。源—汇系统分析就是再现沉积物从剥蚀区到沉积区的作用过程,探讨控制沉积物分散的各种因素及这套相互连接的环境单元的动力学过程及其响应机制,是地球系统科学中复杂的组成部分之一^[101-104],也是当今沉积学领域一个新的方向^[78]。有关“源—汇”的概念提出较早,但系统性的研究工作是近二十年才开展起来的。许多国际地球科学组织就设立了有关源—汇系统的长期性研究课题,如“大陆边缘科学计划”把源—汇系统列为近十年的四大重要研究领域之一。在我国,源—汇系统

的系统性研究尚处于起步阶段,我国一些学者已经注意到“源—汇系统”的重要性,特别是针对物源供给对盆地沉积充填过程影响方面的研究,成果丰硕^[104-107]。如在我国西部中、新生代陆内前陆盆地中造山带物源体系与前陆盆地沉积充填关系、中国东部的中生代断陷盆地古隆起物源与沉积充填过程等方面的研究取得了一系列重要进展^[108-112]。这些研究多集中于含油气盆地,紧密结合了有利储集砂体分布的预测。中国沉积学者较早就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^[113]。近年来,在我国海域,特别是南海的陆架边缘到深海盆地的源—汇系统研究也取得了许多重要的进展^[106,114-119]。总体来看,这些研究或局限于物源体系,或过分关注其与油气成藏要素的关系,并未将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,如沉积盆地充填动力学示踪气候变化、沉积盆地充填过程反演重要山脉地形地貌演化等,仍需多学科队伍的联合制定长期的研究纲要。

3 盆地动力学研究展望

二十余年以来,国家对油气勘探和科学研究的巨大投入促进了我国盆地动力学研究的迅速发展,创新性的研究思路和方法系统已出现在盆地动力学研究的多个方面,但同国际研究水平仍存在明显差距。我国沉积盆地动力学研究正面临良好的发展机遇和更高难度的挑战,迄今业已形成一定特色和研究基础的重要研究方向。

(1) 沉积盆地充填动力学研究:层序地层学及精确定年技术不仅提出了建立等时地层格架、确定盆地中沉积体系三维配置的理论与方法,而且大大推动了沉积充填动力学的研究。以中国大陆和海域独具特色的沉积盆地为重点,查明各类动力学背景下发育的盆地的构造地层格架和高精度层序地层格架;努力探索沉积盆地充填地层的精确的定年技术,以解决高精度地层对比、沉积速率、地层间断的时间和剥蚀量的确定等一系列沉积充填动力学研究中的关键问题;在中国东部油田开展以找寻储集体为目标的储层层序地层学和地震沉积学研究,可望深化高勘探程度盆地内隐蔽油气藏勘探的理论与技术方法。

(2) 大陆边缘动力学研究:随着IODP367/368航次的实施,南海已经成为继北大西洋南部Iberia-Newfoundland共轭边缘之后第二个针对被动大陆边

缘洋陆转换带实施钻探的地区,南海将成为研究强烈伸展陆缘的独特的天然实验室。综合大洋勘探与深反射地震剖面解释、OBS及重力反演技术相结合将会提供南海北部陆缘伸展岩石圈清晰的结构图像,创新人们对汇聚板块背景下边缘海盆地岩石圈伸展破裂过程、被动陆缘结构和演化、以及深水—超深水盆地发育演化等方面的认识;深反射地震剖面、3D地震勘探、定量计算和数值模拟等先进的技术将越来越广泛地应用于南海伸展陆缘发育演化过程的研究,成为确定岩石圈结构构造、地壳的热状态和流变性以及应力应变状态的有力工具。此外,中国东部大陆边缘盆地动力学演化受控于周缘板块的运动重组事件,并处于太平洋一侧俯冲板块构建的巨型地幔楔背景之上,深部地幔对流系统复杂。横向上从洋盆、大陆边缘到陆内盆地,纵向上从地幔对流、岩石圈到表层盆地构建完整的盆地动力格架将继续成为中国大陆边缘盆地动力学研究的主要趋向,其中以揭示盆地充填中记录的岩石圈动力学信息为核心的构造地层学分析技术、作为岩石圈探针的岩浆岩动力学研究技术、地震层析技术以及盆地动力学数值模拟技术等将快速发展,成为盆地动力学研究的重要手段。

(3) 深水沉积学研究:深水油气勘探及海洋调查成为深水沉积学快速发展的驱动力,使之成为当今国际沉积学的热点领域。随着我国油气勘探向海相、深层、非构造及深水等复杂领域的纵深拓展,海域盆地陆架—陆坡形成和演化,深水扇发育和分布,陆架三角洲沉积体系和大型峡谷系统的发育机制、分布规律,这些沉积学研究可为深水油气勘探及有效储层识别提供技术支持。此外,深水沉积及其与底流成因联系,深水浊流和等深流的海底原位观测,不仅可以为预防和减少海底资源开发活动中的海洋灾害损失提供技术支持,而且还可望进一步深化深水沉积学的理论。

(4) 物源区地貌演化和源—汇系统研究:中国大地构造系统复杂,盆地类型多样,具有极为丰富且复杂的物源区地貌演化和源—汇系统,比如造山过程活跃的青藏高原和台湾周缘,从青藏高原隆升到南海海盆充填、从台湾岛造山到马尼拉海沟堆积等构成了我国独具特色的源—汇系统研究的天然实验室。源区剥蚀过程及其对深部响应过程,对链接物源区和沉积区的沉积物重要输送通道(如河流、深水峡谷)解剖,盆内沉积充填特别是深海沉积分析等系统研究,不仅可以深化地球动力学的理解,而且还可推动多学科交

叉与融合。

上述领域将可望成为我国盆地动力学突破的重点方向。近年来投入巨大的地球科学基础研究及多学科合作聚焦将为盆地动力学研究提供宝贵的信息,同时,新理论和新技术应用不仅可以带来沉积盆地资源勘查的更多突破,而且也会带来盆地动力学理论上创新性探索和总结。

致谢 本文是在盆地动力学与层序地层学专题发展战略研讨会和沉积学发展战略国际研讨会(香山会议)基础上汇总集成。由于作者水平有限,难免有偏颇之处。研讨会及成文期间得到王成善院士、彭平安院士等专家的指导与支持,谨此表达最为衷心的感谢!

参考文献(References)

- [1] Potter P E, Pettijohn F J. Paleocurrents and basin analysis[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1977.
- [2] Conybeare C E B. Lithostratigraphic analysis of sedimentary basins[M]. New York: Academic Press, 1979.
- [3] Miall A D. Principles of sedimentary basin analysis[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2000: 253-257.
- [4] Einsele G. Sedimentary basins: evolution, facies, and sediment budget[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.
- [5] Kleinspehn K L, Paola C. New perspectives in basin analysis[M]. New York: Springer, 1988.
- [6] Allen P A, Allen J R. Basin analysis: principles and applications[M]. 2nd ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2005.
- [7] Allen P A, Allen J R. Basin analysis: principles and applications to petroleum play assessment[M]. John Wiley & Sons, 2013.
- [8] Lerche I. Basin analysis: quantitative methods[M]. San Diego: Academic Press, 1990.
- [9] Wangen M. Physical principles of sedimentary basin analysis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.
- [10] Dickinson W R. Basin geodynamics[J]. Basin Research, 1993, 5(4): 195-196.
- [11] Dickinson W R. The dynamics of sedimentary basins[M]. Washington: National Academy Press, 1997: 43.
- [12] 许志琴,李廷栋,杨经绥,等. 大陆动力学的过去、现在和未来——理论与应用[J]. 岩石学报, 2008, 24(7): 1433-1444. [Xu Zhiqin, Li Tingdong, Yang Jingsui, et al. Advances and prospective of continental dynamics: theory and application[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(7): 1433-1444.]
- [13] Roure F, Cloetingh S, Scheck-Wenderoth M, et al. Achievements and challenges in sedimentary basin dynamics: a review[M]//Cloetingh S, Negendank J. New frontiers in integrated solid earth sciences. International year of planet earth. Dordrecht: Springer, 2010.
- [14] Cloetingh S. Geosphere fluctuations: short-term instabilities in the

- Earth's system[J]. *Global and Planetary Change*, 1990, 89: 177-313.
- [15] Kirkwood D, Lavoie D, Malo M, et al. The history of convergent and passive margins in the Polar Realm: sedimentary and tectonic processes, transitions and resources [C]. Université laval, Québec, Canada, 2006.
- [16] Bertotti G, Frizon de lamotte D, Teixell A, et al. The geology of vertical movements. Proceedings ILP workshop[J]. *Tectonophysics*, 2009, 475(1): 1-199.
- [17] Cloetingh S A P L, Ziegler P A, Bogaard P J F, et al. TOPO-EUROPE: the geoscience of coupled deep earth-surface processes[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 58(1/2/3/4): 1-118.
- [18] Cloetingh S A P L, Bunge H P. TOPO-EUROPE and cyberinfrastructure: quantifying coupled deep earth-surface processes in 4D[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [19] Cloetingh S, Durand B, Puigdefabregas C. Introduction to special issue on integrated basin studies (IBS)—an European Commission (DGXII) project[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12(8): 787-963.
- [20] Mascle A, Puigdefabregas C, Luterbacher H P, et al. Cenozoic foreland basins of western Europe[M]. London: Geological Society, 1998.
- [21] Durand B, Jolivet L, Horváth F, et al. The Mediterranean basins: Tertiary extension within the Alpine orogen[M]. London: Geological Society, 1999.
- [22] Stephenson R A, Wilson M, De Boorder H, et al. EUROPROBE: intraplate tectonics and basin dynamics of the eastern European platform—preface[J]. *Tectonophysics*, 1996, 268(1/2/3/4): 7-10.
- [23] Starostenko V I, Danilenko V A, Vengrovitch D B, et al. A new geodynamical-thermal model of rift evolution, with application to the Dnieper-Donets Basin, Ukraine[J]. *Tectonophysics*, 1999, 313(1/2): 29-40.
- [24] Starostenko V I, Legostayeva O V, Makarenko I B, et al. On automated computer input of geologic-geophysical maps images with the first type ruptures and interactive regime visualization of three-dimensional geophysical models and their fields[J]. *Geophysical Journal*, 2004, 26(1): 3-13.
- [25] Manatschal G. New models for evolution of magma-poor rifted margins based on a review of data and concepts from West Iberia and the Alps[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2004, 93(3): 432-466.
- [26] Crosby A, White N, Edwards G, et al. Evolution of the Newfoundland-Iberia conjugate rifted margins[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 273(1/2): 214-226.
- [27] Pereira R, Alves T M. Margin segmentation prior to continental break-up: a seismic-stratigraphic record of multiphased rifting in the North Atlantic (Southwest Iberia)[J]. *Tectonophysics*, 2011, 505(1/2/3/4): 17-34.
- [28] Sutra E, Manatschal G, Mohn G, et al. Quantification and restoration of extensional deformation along the western Iberia and Newfoundland rifted margins[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(8): 2575-2597.
- [29] 李思田. 断陷盆地分析与煤聚积规律[M]. 北京:地质出版社, 1988. [Li Sitian. Fault basin analysis and coal accumulation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.]
- [30] 李德生. 李德生石油地质论文集[M]. 北京:石油工业出版社, 1992. [Li Desheng. Li Desheng proceedings of petroleum geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.]
- [31] 胡见义, 黄第藩. 中国陆相石油地质理论基础[M]. 北京:石油工业出版社, 1991. [Hu Jianyi, Huang Difan. The bases of non-marine petroleum geology in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.]
- [32] 田在艺, 张庆春. 中国含油气沉积盆地论[M]. 北京:石油工业出版社, 1996. [Tian Zaiyi, Zhang Qingchun. The theory of petroliferous basin in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.]
- [33] 金之钧, 蔡立国. 中国海相层系油气地质理论的继承与创新[J]. *地质学报*, 2007, 81(8): 1017-1024. [Jin Zhijun, Cai Ligu. Inheritance and innovation of marine petroleum geological theory in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(8): 1017-1024.]
- [34] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京:科学出版社, 2001. [Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling orogenic belt and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001.]
- [35] 王成善, 李祥辉. 沉积盆地分析原理与方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2003. [Wang Chengshan, Li Xianghui. Sedimentary basin: from principles to analyses[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.]
- [36] 李思田, 解习农, 王华, 等. 沉积盆地分析基础与应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2004. [Li Sitian, Xie Xinong, Wang Hua, et al. Sedimentary basin analysis: principle and application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.]
- [37] 解习农, 任建业. 沉积盆地分析基础[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2013. [Xie Xinong, Ren Jianye. Principles of sedimentary basin analysis[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2013.]
- [38] 林畅松. 沉积盆地分析原理与应用[M]. 北京:石油工业出版社, 2016. [Lin Changsong. Sedimentary basin analysis: principle and application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.]
- [39] Gao S, Rudnick R L, Xu W L, et al. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 270(1/2): 41-53.
- [40] 汪品先. 追踪边缘海的生命史:“南海深部计划”的科学目标[J]. *科学通报*, 2012, 57(20): 1807-1826. [Wang Pinxian. Tracing the life history of a marginal sea—On “The South China Sea Deep” research program[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(24): 3093-3114.]
- [41] 朱伟林, 钟锴, 李友川, 等. 南海北部深水油气成藏与勘探[J]. *科学通报*, 2012, 57(20): 1833-1841. [Zhu Weilin, Zhong

- Kai, Li Yuchuan, et al. Characteristics of hydrocarbon accumulation and exploration potential of the northern South China Sea deep-water basins[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(24): 3121-3129.]
- [42] Graham S A, Hendrix M S, Wang L B, et al. Collisional successor basins of western China: impact of tectonic inheritance on sand composition[J]. Geological Society of America Bulletin, 1993, 105(3): 323-344.
- [43] Hendrix M S. Evolution of Mesozoic sandstone compositions, southern Junggar, northern Tarim, and western Turpan basins, Northwest China; a detrital record of the ancestral Tian Shan[J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70(3): 520-532.
- [44] 贾承造,魏国齐,李本亮. 中国中西部小型克拉通盆地群的叠合复合性质及其含油气系统[J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 479-492. [Jia Chengzao, Wei Guoqi, Li Benliang. Superimposed-composite characteristics of micro-craton basins and its bearing petroleum systems, central-western China[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(4): 479-492.]
- [45] Charvet J, Shu L S, Laurent-Charvet S. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan (NW China): welding of the Tarim and Junggar plates[J]. Episodes, 2007, 30(3): 162-186.
- [46] Lin W, Chu Y, Ji W B, et al. Geochronological and geochemical constraints for a middle Paleozoic continental arc on the northern margin of the Tarim block: implications for the Paleozoic tectonic evolution of the South Chinese Tianshan[J]. Lithosphere, 2013, 5(4): 355-381.
- [47] Dong S, Li Z, Jiang L. The early Paleozoic sedimentary-tectonic evolution of the circum-Mangar areas, Tarim block, NW China: constraints from integrated detrital records[J]. Tectonophysics, 2016, 682: 17-34.
- [48] 林畅松,李思田,刘景彦,等. 塔里木盆地古生代重要演化阶段的古构造格局与古地理演化[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 210-218. [Lin Changsong, Li Sitian, Liu Jingyan, et al. Tectonic framework and paleogeographic evolution of the Tarim basin during the Paleozoic major evolutionary stages[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 210-218.]
- [49] 李忠,彭守涛. 天山南北麓中—新生界碎屑锆石 U-Pb 年代学记录、物源体系分析与陆内盆山演化[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 739-755. [Li Zhong, Peng Shoutao. U-Pb geochronological records and provenance system analysis of the Mesozoic-Cenozoic sandstone detrital zircons in the northern and southern piedmonts of Tianshan, Northwest China: responses to intracontinental basin-range evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3): 739-755.]
- [50] 许志琴,张国伟. 中国(东亚)大陆构造与动力学——科学与技术前沿论坛“中国(东亚)大陆构造与动力学”专题进展[J]. 中国科学:地球科学, 2013, 43(10): 1527-1538. [Xu Zhiqin, Zhang Guowei. Progress in tectonics and dynamics of China (East Asia)—forum on frontiers of science & technology: tectonics and dynamics of China (East Asia)[J]. Scientia Sinica Terrae, 2013, 43(10): 1527-1538.]
- [51] 李思田. 盆地动力学与能源资源——世纪之交的回顾与展望[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 1-9. [Li Sitian. The dynamics of sedimentary basins and energy resources——retrospective and prospects at the turn of the century[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 1-9.]
- [52] 李思田. 沉积盆地动力学研究的进展、发展趋向与面临的挑战[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 1-8. [Li Sitian. Advancement, trend and new challenges in basin geodynamics[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 1-8.]
- [53] Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas[J]. Tectonophysics, 2002, 344(3/4): 175-205.
- [54] 闫义,夏斌,林舸,等. 南海北缘新生代盆地沉积与构造演化及地球动力学背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 53-61. [Yan Yi, Xia Bin, Lin Ge, et al. The sedimentary and tectonic evolution of the basins in the north margin of the South China Sea and geodynamic setting[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(2): 53-61.]
- [55] 林畅松,张燕梅,李思田,等. 中国东部中生代断陷盆地幕式裂陷过程的动力学响应和模拟模型[J]. 地球科学, 2004, 29(5): 583-588. [Lin Changsong, Zhang Yanmei, Li Sitian, et al. Episodic rifting dynamic process and quantitative model of Mesozoic-Cenozoic faulted basins in eastern China[J]. Earth Science, 2004, 29(5): 583-588.]
- [56] 任建业,庞雄,雷超,等. 被动陆缘洋陆转换带和岩石圈伸展破裂过程分析及其对南海陆缘深水盆地研究的启示[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 102-114. [Ren Jianye, Pang Xiong, Lei Chao, et al. Ocean and continent transition in passive continental margins and analysis of lithospheric extension and breakup process: implication for research of the deepwater basins in the continental margins of South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 102-114.]
- [57] Lei C, Ren J Y, Sternai P, et al. Structure and sediment budget of Yinggehai-Song Hong basin, South China Sea: implications for Cenozoic tectonics and river basin reorganization in Southeast Asia[J]. Tectonophysics, 2015, 655: 177-190.
- [58] Clift P, Lee G H, Duc N A, et al. Seismic reflection evidence for a Dangerous grounds mini-plate in the South China Sea and implications for extrusion tectonics in SE Asia[J]. Himalayan Journal of Sciences, 2008, 5(7): 42.
- [59] 任建业,雷超. 莺歌海—琼东南盆地构造—地层格架及南海动力变形分区[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3303-3314. [Ren Jianye, Lei Chao. Tectonic stratigraphic framework of Yinggehai—Qiongdongnan basins and its implication for tectonic province division in South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3303-3314.]
- [60] 李思田. 大型油气系统形成的盆地动力学背景[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2004, 29(5): 505-512. [Li Sitian. Basin geodynamics background of formation of huge petroleum systems[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences),

- 2004, 29(5): 505-512.]
- [61] Lei C, Ren J Y. Hyper-extended rift systems in the Xisha Trough, northwestern South China Sea; implications for extreme crustal thinning ahead of a propagating ocean[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 846-864.
- [62] McKenzie D. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 40(1): 25-32.
- [63] Xie X, Bethke C M, Li S, et al. Overpressure and petroleum generation and accumulation in the Dongying depression of the Bohaiwan Basin, China[J]. *Geofluids*, 2001, 1(4): 257-271.
- [64] 雷超, 任建业, 裴健翔, 等. 琼东南盆地深水区构造格局和幕式演化过程[J]. *地球科学*, 2011, 36(1): 151-162. [Lei Chao, Ren Jianye, Pei Jianxiang, et al. Tectonic framework and multiple episode tectonic evolution in deepwater area of Qiongdongnan basin, northern continental margin of South China Sea[J]. *Earth Science*, 2011, 36(1): 151-162.]
- [65] Yang S C, Hu S B, Cai D S, et al. Present-day heat flow, thermal history and tectonic subsidence of the East China Sea basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(9): 1095-1105.
- [66] Xie X N, Müller R D, Li S T, et al. Origin of anomalous subsidence along the northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(7): 745-765.
- [67] 宋晓东, 李江涛, 鲍学伟, 等. 中国西部大型盆地的深部结构及对盆地形成和演化的意义[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 126-136. [Song Xiaodong, Li Jiangtao, Bao Xuewei, et al. Deep structure of major basins in western China and implications for basin formation and evolution[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 126-136.]
- [68] 李思田, 王华, 路凤香. 盆地动力学: 基本思路与若干研究方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. [Li Sitian, Wang Hua, Lu Fengxiang. *Basin geodynamics: fundamental idea & some approaches*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999.]
- [69] 蔡希源, 李思田. 陆相盆地高精度层序地层学: 基础理论篇: 隐蔽油气藏勘探基础、方法与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2003. [Cai Xiyuan, Li Sitian. *High resolution sequence stratigraphy of continental basins* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.]
- [70] 林杨松, 潘元林, 肖建新, 等. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2000, 25(3): 260-266. [Lin Changsong, Pan Yuanlin, Xiao Jianxin, et al. Structural slope-break zone: key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2000, 25(3): 260-266.]
- [71] 王成善, 冯志强, 王璞珺, 等. 白垩纪松辽盆地松科1井大陆科学钻探工程[M]. 北京: 科学出版社, 2016. [Wang Chengshan, Feng Zhiqiang, Wang Pujun, et al. Initial report of continental scientific drilling project of the Cretaceous Songliao basin (SKI)[M]. Beijing: Science Press, 2016.]
- [72] Bouma A H, Stone C G. Fine-grained turbidite systems. AAPG memoir 72, SEPM special publication No. 68[M]. Tulsa, Okla, United States: American Association of Petroleum Geologists, 2000: 1-19.
- [73] Shanmugam G. Deep-marine tidal bottom currents and their reworked sands in modern and ancient submarine canyons[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(5): 471-491.
- [74] Weimer P, Slatt R M. Introduction to petroleum geology of deepwater settings[M]. Tulsa: AAPG, 2006: 816.
- [75] Stow D A V, Mayall M. Deep-water sedimentary systems: new models for the 21st century[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 125-135.
- [76] Deptuck M E, Steffens G S, Barton M, et al. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6/7/8): 649-676.
- [77] Harris R N, Schmidt-Schierhorn F, Spinelli G. Heat flow along the NanTroSEIZE transect: results from IODP Expeditions 315 and 316 offshore the Kii Peninsula, Japan[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(8): Q0AD16.
- [78] 汪品先. 深海沉积与地球系统[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 1-11. [Wang Pinxian. Deep sea sediments and earth system[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 1-11.]
- [79] 朱秀华, 王卫强, 周伟东, 等. 南海海面温度的年际模态及其与季风强迫的关系[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(4): 42-50. [Zhu Xiuhua, Wang Weiqiang, Zhou Weidong, et al. Interannual mode of sea surface temperature in relation to monsoon forcing in South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22(4): 42-50.]
- [80] Wang Z F, Jiang T, Zhang D J, et al. Evolution of deepwater sedimentary environments and its implication for hydrocarbon exploration in Qiongdongnan Basin, northwestern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(4): 1-10.
- [81] 解习农, 陈志宏, 孙志鹏, 等. 南海西北陆缘深水沉积体系内部构成特征[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2012, 37(4): 627-634. [Xie Xinong, Chen Zhihong, Sun Zhipeng, et al. Depositional architecture characteristics of deepwater depositional systems on the continental margins of northwestern South China Sea[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2012, 37(4): 627-634.]
- [82] 陈慧, 解习农, Van Rooij D, 等. 中国南海西北次海盆西北陆缘洋陆过渡区深水沉积体系特征[J]. *沉积学报*, 2014, 32(3): 442-449. [Chen Hui, Xie Xinong, Van Rooij D, et al. Characteristics of deep-water depositional systems on the northwestern margin slopes of the Northwest Sub-Basin, South China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(3): 442-449.]
- [83] Chen H, Xie X N, Zhang W Y, et al. Deep-water sedimentary systems and their relationship with bottom currents at the intersection of Xisha Trough and Northwest Sub-Basin, South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2016, 378: 101-113.

- [84] 柳保军, 庞雄, 颜承志, 等. 珠江口盆地白云深水区渐新世—中新世陆架坡折带演化及油气勘探意义[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 234-242. [Liu Baojun, Pang Xiong, Yan Chengzhi, et al. Evolution of the Oligocene-Miocene shelf slope-break zone in the Baiyun deep-water area of the Pearl River mouth basin and its significance in oil-gas exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 234-242.]
- [85] 王振峰. 深水重要油气储层——琼东南盆地中央峡谷体系[J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 646-653. [Wang Zhenfeng. Important deepwater hydrocarbon reservoirs: the central canyon system in the Qiongdongnan basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(4): 646-653.]
- [86] Su M, Zhang C, Xie X N, et al. Controlling factors on the submarine canyon system: a case study of the central canyon system in the Qiongdongnan basin, northern South China Sea[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(10): 2457-2468.
- [87] Su M, Hsiung K H, Zhang C M, et al. The linkage between longitudinal sediment routing systems and basin types in the northern South China Sea in perspective of source-to-sink[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 111: 1-13.
- [88] Soares D M, Alves T M, Terrinha P. Contourite drifts on early passive margins as an indicator of established lithospheric breakup[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 401: 116-131.
- [89] Ravnås R, Steel R J. Architecture of marine rift-basin successions[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(1): 110-146.
- [90] Bryan S E, Riley T R, Jerram D A, et al. Silicic volcanism: an undervalued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins[M]//Menzies M A, Klempner S L, Ebinger C J, et al. Volcanic rifted margins. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 2002.
- [91] Lacombe O, Lavé J, Roure F M, et al. Thrust belts and foreland basins[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [92] Molnar P. Late Cenozoic increase in accumulation rates of terrestrial sediment: how might climate change have affected erosion rates? [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2004, 32: 67-89.
- [93] Willett S D. Late Neogene erosion of the Alps: a climate driver? [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2010, 38: 411-437.
- [94] Wang E, Kirby E, Furlong K P, et al. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(9): 640-645.
- [95] Yang R, Willett S D, Goren L. *In situ* low-relief landscape formation as a result of river network disruption[J]. Nature, 2015, 520(7548): 526-529.
- [96] Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data[J]. Geology, 2004, 32(9): 809-812.
- [97] Jing L Z, Li W, Oskin M, et al. Focused modern denudation of the Longmen Shan margin, eastern Tibetan plateau[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2011, 12(11): Q11007.
- [98] Coleman M, Hodges K. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension[J]. Nature, 1995, 374(6517): 49-52.
- [99] Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet[J]. Science, 1992, 255(5052): 1663-1670.
- [100] 张克信, 王国灿, 曹凯, 等. 青藏高原新生代主要隆升事件: 沉积响应与热年代学记录[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(12): 1575-1588. [Zhang Kexin, Wang Guocan, Cao Kai, et al. Cenozoic sedimentary records and geochronological constraints of differential uplift of the Qinghai-Tibet plateau[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(11): 1658-1672.]
- [101] Cowie P A, Whittaker A C, Attal M, et al. New constraints on sediment-flux-dependent river incision: implications for extracting tectonic signals from river profiles[J]. Geology, 2008, 36(7): 535-538.
- [102] Montgomery D R, Stolar D B. Reconsidering Himalayan river anticlines[J]. Geomorphology, 2006, 82(1/2): 4-15.
- [103] Whittaker A C, Cowie P A, Attal M, et al. Contrasting transient and steady-state rivers crossing active normal faults: new field observations from the Central Apennines, Italy[J]. Basin Research, 2007, 19(4): 529-556.
- [104] 郑洪波, 王平, 何梦颖, 等. 长江东流水系建立的时限及其构造地貌意义[J]. 第四纪研究, 2013, 33(4): 621-630. [Zheng Hongbo, Wang Ping, He Mengying, et al. Timing of the establishment of the east-flowing Yangtze River and tectonic-geomorphic implications[J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(4): 621-630.]
- [105] 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等. 地貌演化、源—汇过程与盆地分析[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 9-20. [Lin Changsong, Xia Qinglong, Shi Hesheng, et al. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 9-20.]
- [106] 赵梦, 邵磊, 乔培军. 珠江沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄特征及其物源示踪意义[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(6): 915-923. [Zhao Meng, Shao Lei, Qiao Peijun. Characteristics of detrital zircon U-Pb geochronology of the Pearl River sands and its implication on provenances[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(6): 915-923.]
- [107] 杨守业, 韦刚健, 石学法. 地球化学方法示踪东亚大陆边缘源汇沉积过程与环境演变[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(5): 902-910. [Yang Shouye, Wei Gangjian, Shi Xuefa. Geochemical approaches of tracing source-to-sink sediment processes and environmental changes at the East Asian continental margin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(5): 902-910.]
- [108] 林畅松, 刘景彦, 张燕梅, 等. 库车坳陷第三系构造层序的构成特征及其对前陆构造作用的响应[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2002, 32(3): 177-183. [Lin Changsong, Liu Jingyan, Zhang Yanmei, et al. Depositional architecture of the tertiary tectonic sequences and their response to foreland tectonism in the Kuqa depression, the Tarim Basin[J]. Science in China Series

- D; Earth Sciences, 2002, 45(3): 250-258.
- [109] 李勇, 贺佩, 颜照坤, 等. 晚三叠世龙门山前陆盆地动力学分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(4): 401-411. [Li Yong, He Pei, Yan Zhaokun, et al. Dynamics of Late Triassic Longmenshan foreland basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(4): 401-411.]
- [110] 李忠, 高剑, 郭春涛, 等. 塔里木块体北部泥盆—石炭纪陆缘构造演化: 盆地充填序列与物源体系约束[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 35-52. [Li Zhong, Gao Jian, Guo Chuntao, et al. Devonian-carboniferous tectonic evolution of continental margins in northern Tarim block, northwest China: Constrained by basin-fill sequences and provenance systems [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 35-52.]
- [111] 王璞珺, 赵然磊, 蒙启安, 等. 白垩纪松辽盆地: 从火山裂谷到陆内拗陷的动力学环境[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 99-117. [Wang Pujun, Zhao Ranlei, Meng Qi'an, et al. The Cretaceous Songliao basin: dynamic background from volcanic rift to interior sag basin [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 99-117.]
- [112] 董树文, 李廷栋, 钟大赉, 等. 侏罗纪/白垩纪之交东亚板块汇聚的研究进展和展望[J]. 中国科学基金, 2009, 23(5): 281-286. [Dong Shuwen, Li Tingdong, Zhong Dalai, et al. Recent progress and perspective of the research on J-K East Asian multi-direction convergent tectonics [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2009, 23(5): 281-286.]
- [113] 潘元林, 李思田. 大型陆相断陷盆地层序地层与隐蔽油气藏研究: 以济阳拗陷为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004. [Pan Yuanlin, Li Sitian. Study of large-scale continental rift basin sequence stratigraphy and subtle oil and gas reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.]
- [114] 邵磊, 赵梦, 乔培军, 等. 南海北部沉积物特征及其对珠江演变的响应[J]. 第四纪研究, 2013, 33(4): 760-770. [Shao Lei, Zhao Meng, Qiao Peijun, et al. The characteristics of the sediment in northern South China Sea and its response to the evolution of the Pearl river [J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(4): 760-770.]
- [115] Jiang T, Cao L C, Xie X N, et al. Insights from heavy minerals and zircon U-Pb ages into the middle Miocene-Pliocene provenance evolution of the Yinggehai Basin, northwestern South China Sea [J]. Sedimentary Geology, 2015, 327: 32-42.
- [116] Lin C S, Jiang J, Shi H S, et al. Sequence architecture and depositional evolution of the northern continental slope of the South China Sea: responses to tectonic processes and changes in sea level [J]. Basin Research, 2017, doi: 10.1111/bre.12238. (in Press)
- [117] Shao L, Cao L C, Pang X, et al. Detrital zircon provenance of the Paleogene syn-rift sediments in the northern South China Sea [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2016, 17(2): 255-269.
- [118] Wang C, Liang X Q, Xie Y H, et al. Provenance of upper Miocene to Quaternary sediments in the Yinggehai-Song Hong basin, South China Sea: evidence from detrital zircon U-Pb ages [J]. Marine Geology, 2014, 355: 202-217.
- [119] Yan Y, Carter A, Palk C, et al. Understanding sedimentation in the Song Hong-Yinggehai Basin, South China Sea [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2011, 12(6): Q06014.

Research Reviews and Prospects of Sedimentary Basin Geodynamics in China

XIE XiNong¹, LIN ChangSong², LI Zhong³, REN JianYe¹, JIANG Tao¹, JIANG ZaiXing², LEI Chao¹

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: Sedimentary basin, a huge and important treasury of resources, comprises significant information of global climate change, fluid flow, geodynamics, and so forth. The requirements of mineral products and water resources for economic construction have speeded the development of sedimentary basin analysis. With years of systematic exploration towards sedimentary basin, a series of significant progresses and breakthroughs have been achieved in various aspects, which involve the formation and evolution mechanism of sedimentary basin, basin fillings, basin fluids, accumulation of the related resources, and so on. Subsequently, a new discipline termed as sedimentary basin geodynamics come into being. For the past few years, Chinese scholars have made outstanding achievements and progresses in many aspects, such as the dynamics processes of large superimposed basins and continental margin basins, continental sequence stratigraphy, deep-water sedimentation, and source-to-sink system, and so on. These researches not only serve various resource explorations comprising energy sources, mineral products, water resources, but also provide abundant information and detailed evidence for the researches on earth geodynamics, significant tectonic events, and global climate and environment changes.

Key words: basin geodynamics; source-to-sink system; sequence stratigraphy; deep-water sedimentation