

古“源-汇”系统沉积学问题及基本研究方法简述

谈明轩^{1,2,3},朱筱敏^{2,3},张自力^{2,3},刘伟^{3,4},赵宏超^{3,5},苏彬³

[1. 河海大学 海洋学院,江苏 南京 210098; 2. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;
3. 中国石油大学(北京) 地球科学学院,北京 102249; 4. 南方科技大学 海洋科学与工程系,广东 深圳 518055;
5. 同济大学 海洋地质国家重点实验室,上海 200092]

摘要:盆-山动力学、地表过程及沉积物收支研究一直是地球科学领域的研究前沿之一。“源-汇”系统则是以沉积物路径系统将三者有机结合起来,使其成为一个完整的剥蚀-沉积体系。随着近年来研究手段和理论认识的不断发展,“源-汇”系统定量研究逐渐由现代、第四纪向深时方向发展。由于古“源-汇”在后期受到不同程度的改造,所保存的地质信息并不完整。在系统总结其内部要素中几个重要沉积学问题的基础上,分析结果表明源区和汇区的古地貌、古水系及古环境定量重建和精细表征是古“源-汇”系统研究的首要前提。碎屑矿物定量示踪、地貌比例关系以及物质平衡分析是明确古代“源-汇”系统发育特征及其过程的重要方法,为建立新的“源-汇”模型和深入了解地貌演化、沉积历史、有利储层预测具有关键性作用。

关键词:汇水体系;物源示踪;物质平衡;古“源-汇”系统;沉积盆地

中图分类号:TE122.3 **文献标识码:**A

Summary of sedimentological issues and fundamental approaches in terms of ancient “Source-to-Sink” systems

Tan Mingxuan^{1,2,3}, Zhu Xiaomin^{2,3}, Zhang Zili^{2,3}, Liu Wei^{3,4}, Zhao Hongchao^{3,5}, Su Bin³

[1. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China; 5. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China]

Abstract: Basin-mountain dynamics, earth surface process and sediment budget are always the frontier areas of geoscientific research. The “Source-to-Sink” system integrates the three issues into one complete denudation-deposition system based on the sediment routing system. With the recent development of methods and theories, the quantitative study on the “Source-to-Sink” system has extended from modern or the Quaternary to earlier stages. As the ancient “Source-to-Sink” systems were usually subject to modification of different degrees, the geological details have not been well preserved. The quantitative reconstruction and detailed characterization of palaeo-geomorphology, palaeo-drainages, palaeo-environment of source and sink areas have been the prerequisite of the study on the ancient “Source-to-Sink” systems based on the systematic summary of several critical sedimentological issues for inside elements. The quantitative tracing of detrital minerals, geomorphological scaling relationship and mass balance studies are the predominant approaches for deciphering the characteristic and process codes of ancient “Source-to-Sink” systems, thus playing a crucial role in the establishment of new models and the further understanding of geomorphic evolution, depositional history and prediction of favorable reservoirs.

Key words: catchment system, provenance tracing, mass balance, ancient “Source-to-Sink” system, sedimentary basin

目前地球上广泛分布的沉积物是地质历史时期多次构造、气候事件记录^[1]。了解环境信号及从“源”到

收稿日期:2020-01-20;修订日期:2020-08-04。

第一作者简介:谈明轩(1990—),男,博士、讲师,沉积学及海洋地质学。E-mail:mingxuantan0301@hotmail.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05001002-002);国家留学基金项目(201706440095);中央高校基本业务费项目(2019B06314)。

“汇”的传输效率及相互作用过程已经成为了地球科学与地理科学中的重大科学问题^[2-4]。“源-汇”系统逐渐成为近十年来盆山动力学、沉积动力学及构造地貌学等交叉学科的研究热点。2002年,欧盟第5个框架计划——“欧洲大陆边缘地层”项目(EuroSTRAT-AFORM)启动,多国展开对欧洲大陆边缘海相沉积物“源-汇”研究相关的多学科合作。美国国家科学基金会(NSF)也于2004年将“源-汇”系统研究(Source-to-Sink,简称S2S)列为“大陆边缘”项目(MARGINS)四大重要研究议题之一。2011年,由“大陆边缘”项目赞助的美国地球物理联合会(AGU)查普曼专题会议在美国Oxnard召开,议题为“时空演变下的源-汇系统”^[5],并将此次会议成果汇编为专辑在《Earth Sciences Review》杂志上出版^[6]。沉积地质学会(SEPM)于2017年在西班牙举办主题为“源-汇地层学中的环境信号传输”研究会议,旨在利用多学科方法解决剥蚀、搬运和沉积中信号传输与干扰问题,详细报道现代和古“源-汇”研究成果及技术方法,极具学术价值和实践意义。

同时,中国“源-汇”系统研究在近十年来亦如火如荼。2000年,“中国边缘海的形成演化及重要资源的关键问题”国家973计划启动,最早触及“源-汇”系统研究^[7]。2016年,沉积物“从源到汇”过程研究国际短训班暨长江-东海源汇过程与环境响应研讨会在上海召开,该次会议详细报道了21世纪以来东亚及西太平洋边缘海源汇过程的研究进展。2017年,朱红涛、朱筱敏、曾洪流等教授分别在《地球科学(中国地质大学学报)》、《Interpretation》杂志组织了“源-汇”系统专辑,特别介绍了中国含油气盆地“源-汇”系统研究成果,推动了国内“源-汇”系统基本理论和研究方法的创新^[8-9]。

由于古“源-汇”系统研究资料相对匮乏、源区受后期改造较大、测年方法分辨率精度低等客观原因,整体性量化研究相对偏少^[3]。近年来,国内外学者在“将近论古”思想的指导下提出多种系统性研究思路,总结了一系列研究方法^[2,4,10]。然而,目前古“源-汇”系统研究中仍存在诸多与沉积学相关问题值得深入探讨,为今后研究工作提供相关借鉴。

1 理论基础与前提

从剥蚀区形成的物源,包括机械、化学和生物风化产物,以底床载荷、悬浮载荷及溶解载荷的形式搬运到沉积盆地,并最终沉积下来,这一过程被称之为“源-

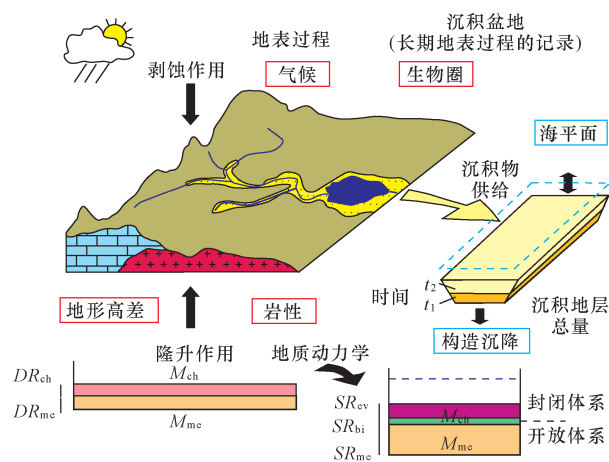


图1 “源-汇”系统概念模式及不同风化产物沉积过程^[14]

Fig. 1 Conceptual model of “Source-to-Sink” system and the sedimentary process of various weathering products^[14]

M_{ch} , 化学风化沉积物质量; M_{me} , 机械风化沉积物质量; DR_{ch} , 化学风化剥蚀速率; DR_{me} , 机械风化剥蚀速率; SR_{ev} , 蒸发作用沉积速率; SR_{bi} , 生物作用沉积速率; SR_{me} , 机械风化沉积速率; t_1 , 时间 t_1 充填地层; t_2 , 时间 t_2 充填地层

汇”系统^[11-12]。“源-汇”系统主要针对颗粒物和溶质两部分而言,因此其整体性研究主要涉及到沉积学和地球化学两方面内容。本文着重探讨的“源-汇”系统相对整一、封闭,物源区主要由非化学岩类组成,化学风化产物占比较小。研究对象并不包括干热气候下的封闭咸化湖盆体系,重点关注以机械风化产物为主的固体颗粒物质剥蚀、搬运及沉积作用过程(图1)。

构造运动、气候变化对源区剥蚀、沉积物搬运及沉积过程具有重要影响^[12-13]。由于源区的隆升与剥蚀,现今埋藏地下或出露地表的古“源-汇”系统的源区岩层仅反映了残余地貌形态。过去基于矿物岩石学、地球化学的物源体系研究方法仅仅是定性判定源区构造背景、岩性组合和物源方向,对源区地貌演化关注相对较少。沉积区也仅仅是基于野外露头或地下地质学资料所展开的沉积特征研究,无法系统性了解从源到汇的整体性过程。如何将古源区和汇区的研究有机结合起来,进一步了解剥蚀、搬运及沉积过程,仍然存在较大挑战。

2 “源-汇”要素中的关键问题

2.1 源区古水系地貌演变

源区地貌形态与沉积物供给、沉积物粒度及沉积物发育样式之间的关系密不可分^[15],故而源区地貌定

量重建是“源-汇”系统研究中首要内容。在短期尺度内,区域海拔高度、汇水体系统式、基底岩性组合、气候及植被类型均能影响到搬运能力,长期尺度下促使水系演变,并进一步作用于沉积物搬运、沉积过程^[15-17]。因此,古水系重建是古代“源-汇”系统研究重要环节^[10],在实际研究中必须遵循构造地貌学基本理论,参考现代地貌变化特征。

对断陷盆地而言,构造运动对水系演化的影响最为显著。初始断陷期主体上继承先前水系流向特征,强烈断陷期源区持续隆升及边界断层扩展、连接使得源区水系经其他构造变换带流向低势区^[18-20]。实例如青海湖西北部的布哈河古水系在古近纪湖流入东南部的贵德盆地,在青海湖形成时成为该湖泊的轴向水系^[21]。若区域水系下切能力弱于断块掀斜作用,则会形成反向水系^[22]。实例如希腊 Corinth 裂谷南部两条水系在 0.8 Ma 发生的水系反转现象与断层下盘掀斜作用有关^[23]。强烈断陷期,由于断陷盆地源区的差异性隆升作用,陡坡区的河流溯源能力增强,使分水岭向后迁移,源区水系面积增加^[22]。

降雨量与岩性差异、海(湖)平面变化均会影响断陷盆地水系的演化。简而言之,湿润环境下沉积岩源区的溯源能力强于干旱环境下的变质岩源区。而海(湖)平面直接影响了水系下游出水口的位置,直接影响水系合并与拆分,在短期尺度下对源区水系控制作用较为明显^[24]。例如,东非裂谷系 Malawi 湖在近 110 ka 以来经历多次极端干旱,但气候整体上向潮湿转变,基准面具有不断上升的趋势^[25-26]。与此同时,河流延伸距离逐渐减小,汇水面积也随之减小。笔者发现随着基准面上升,北部轴向古水系逐渐由一个主水系拆分为两个轴向供源的“源-汇”系统(图2),与其匹配的三角洲也由一个演变为两个。

此外,在区域伸展背景下所形成的一系列陆相断陷盆地通常处于不同构造、气候、湖平面演化阶段。特别对于高位期的敞流湖盆而言,其外流水系可能成为其下游低位期湖泊重要的轴向水系。实例如全新世初期东非裂谷系 Kivu 湖和 Edward 湖的整体抬升,向下游 Tanganyika 湖供源,成为该盆地最长的水系。这说明在同一构造背景下多个断陷盆地古水系的整体化

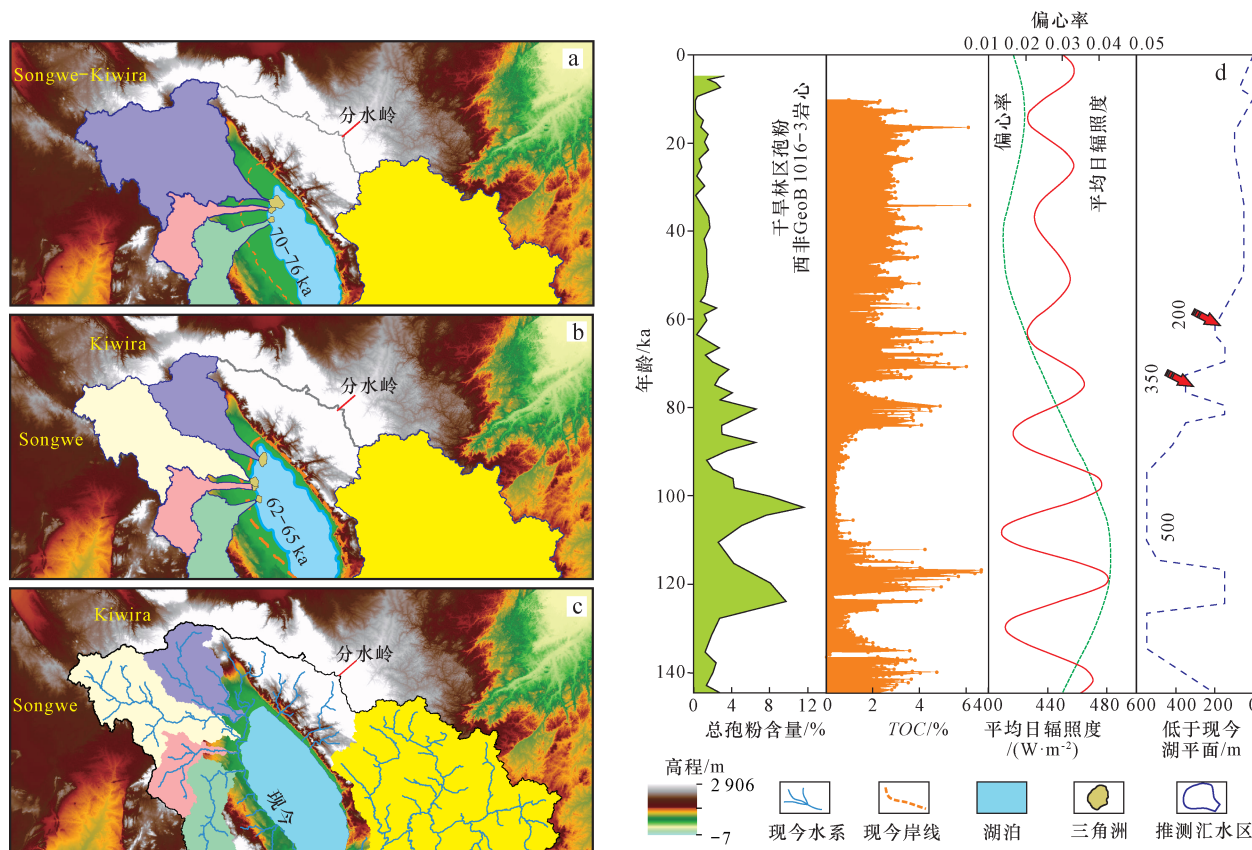


图2 气候因素主导下马拉维湖北盆地自 76 ka 以来水系演变特征(高频气候变化据文献[25-26]有修改)

Fig. 2 Drainage evolution of the North Basin in the climate-controlled Lake Malawi since 76 ka (High-frequency climatic variability is modified from the references[25-26])

a. 低于现今湖平面 350 m; b. 低于现今湖平面 200 m; c. 现今湖平面; d. 晚更新世至今湖平面变化模式

研究对“源-汇”系统分析很有必要。

2.2 汇区沉积物表征

沉积体精细刻画是“源-汇”研究的核心内容。传统沉积相研究方法是汇区沉积体精细刻画的基础。利用钻测井、地震资料刻画源区搬运通道、沉积体系展布和汇区水系大致流向等特征^[27-28],同时能够间接反映源区古水系方向及其注入点大致位置^[26]。与传统沉积相分析相比,该研究内容中着重强调了对汇区沉积物展开定量表征。在层序地层学和地震沉积学理论指导下,利用高精度三维地震资料对不同沉积体开展地震地貌、发育规模的定量研究^[11,29-30]。例如基于井震资料的地层厚度展布或露头剖面插值建模计算沉积物总体积^[31-33],以明确汇区沉积物分配过程。

在多旋回叠合型盆地中,原型盆地充填沉积可能局部甚至主体抬升并遭受剥蚀,最终向汇区提供再旋回陆源碎屑物质,使其先前沉积区地层记录遭受较大的损失。因此,利用上述方法计算所得沉积物总体积仅为残余沉积物体积^[31-34]。Sadler 发现利用地层记录计算所得的长周期沉积速率远小于短期沉积速率的现象(即“Sadler 效应”)^[35],正是由于古老地层经历的多期沉积间断和抬升剥蚀所造成的(图3)。因此,在古代“源-汇”系统物质平衡研究中,“Sadler”效应对长期沉积速率的影响不可避免。特别是针对具有叠合盆地背景的古“源-汇”系统而言,构造平衡剖面分析及沉积区地层剥蚀量恢复成为减弱该效应的重要手段。

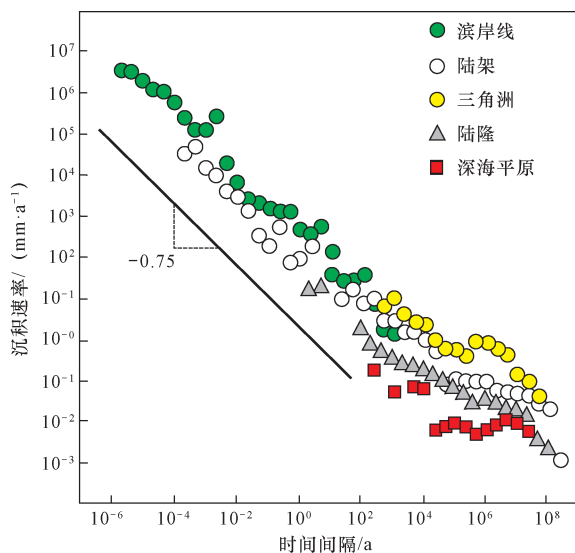


图3 长期尺度下硅质碎屑陆架沉积的“Sadler”效应交会图^[35]

Fig. 3 Cross-plot showing the “Sadler Effect” in siliciclastic shelf deposits from a long-term perspective^[35]

2.3 沉积物中途存储

沉积物在搬运路径中常在山间低地、泛滥平原及陆架上卸载,仅有部分沉积最终搬运到汇区沉积。在这种系统中,汇区沉积物发育规模很少受沉积物通量的变化而产生变化,中途滞留沉积物到最终汇区产生沉积需要较长的反应时间,Allen 将其称为缓冲型(buffered)“源-汇”系统^[2]。易反应型(reactive)“源-汇”系统的中途储存沉积滞留时间较短,地层记录大致能够反映沉积物通量变化。沉积物中途滞留取决于构造地貌特征及基准面位置。一般而言,活动型构造背景中(如前陆盆地、断陷盆地、弧后盆地及走滑盆地)所发育的小型“源-汇”系统通常为易反应型“源-汇”系统,稳定型构造背景(被动大陆边缘盆地、克拉通盆地)所发育的大型“源-汇”系统一般是缓冲型“源-汇”系统^[36]。

对于部分古缓冲型“源-汇”系统而言,由于沉积物滞留所造成信号传输的低效性,汇区地层记录中很难真实反映源区构造、气候的变化。在质量平衡研究中,应当探讨源区地貌、汇区构造样式及基准面变化对沉积物中途存储的影响。例如,Watkins 等在 Corinth 裂谷晚更新世以来的沉积物收支平衡研究认为冰期与间冰期交替变化是造成沉积物缓冲和释放的重要原因^[37]。就缓冲型“源-汇”系统而言,中途储存沉积物比例高,滞留时间长,源区水系与汇区地貌参数相关性偏低^[15,38],利用地貌学比例半定量预测“源-汇”系统发育规模必须审慎使用。

3 基本研究方法概述

古代“源-汇”系统研究涵盖了古地貌重建、古构造恢复、碳循环过程、深时古气候、古环境及古地理研究等多方面研究内容。本文试图就沉积学角度探讨古代“源-汇”系统主要沉积学研究方法:①碎屑矿物的同位素年龄进行物源体系定量示踪;②利用地貌学比例关系进行深时古地貌定量预测;③利用沉积物质量平衡进行沉积物分配分析。

3.1 碎屑矿物物源示踪

碎屑轻重矿物分析是传统物源分析的基本方法,同样也是重建深时沉积物路径系统较为有效方法之一^[4,30]。传统岩石学方法如运用 Dickinson 三角图解法区分物源体系、判定构造背景,但存在一定多解性^[39]。重矿物组合及相关判别参数也是判定母岩矿

物组分及物源方向的常规手段,但其分析结果相对粗略,无法达到“源-汇”系统研究需求。近年来,随着高精度碎屑锆石 U-Pb 同位素定年技术的不断发展,该方法被广泛运用到源区风化产物示踪、古水系重建及沉积路径系统演化研究中,成为古代“源-汇”系统分析重要手段之一^[40-42]。通过碎屑锆石年龄组成与潜在源区结晶岩体年龄组成对比,以区分出源区物质组成及优势路径系统(图4)。与此同时,借助于阴极发光、透射光下的碎屑矿物形态学特征,判别物源体系的搬运距离^[43]。当样品数据点多、源区母岩成分复杂、汇区碎屑锆石年龄组成呈多峰特征,亦可优选 Kolmogorov-Smirnov(K-S)及 Kuiper 检验等方法对多组数据相似性进行对比,以确定源区和汇区的锆石年龄组合相关性^[44]。近年来,利用计算机程序对全球碎屑锆石 U-Pb 年龄大数据分析,建立全球碎屑锆石数据、进行全球尺度的水系研究正成为研究热点^[45]。此外,碎屑轻矿物钾长石 Pb 同位素组成、云母 Ar-Ar 定年及重矿物石榴石、金红石 U-Pb 定年等方法也是近年来古水系演化研究的新技术手段,目前均已取得较好的效果^[46-52]。

笔者在渤海湾盆地辽西凹陷 J 油田 5 口取心井沙二段的岩心、岩屑中碎屑锆石 U-Pb 定年研究中识别出两种不同锆石年龄组合,即中生代侵入岩单一年龄组合、太古代混合花岗岩与中生代侵入岩多年龄组合^[53]。沉积学研究表明,5 口取心井钻遇由燕山褶皱带供源的辫状河三角洲与滩坝沉积。碎屑锆石年龄分析统计、K-S 分析、区域基底岩性、锆石年龄分布及锆石形态对比等研究表明燕山区域物源区存在两条途径不同岩性组合区的潜在沉积物路径系统向研究区供源(图5),并推测出南北两条沉积物路径系统的长度分别为 22 km 和 40 km。因此,在前新生界古基底岩性、区域侵入岩及变质岩锆石年龄及研究区碎屑锆石年龄的研究基础上,碎屑矿物定年和碎屑矿物形态学对比分析有助于特定古水系的路径精细追踪。

在利用碎屑锆石 U-Pb 定年进行研究,要特别注意再旋回沉积物对物源示踪研究的影响。利用碎屑矿物的低温热年代学方法约束源区的隆升与剥蚀时间是明确识别再旋回物源较好的办法。蔡长娥利用锆石裂变及 U-Th/He 定年在中国渤海湾盆地(济阳拗陷)及塔里木盆地(塔西南拗陷)研究中进行了初步分析^[54]。Xu 等同时对单颗锆石上进行 U-Pb 及 U-Th/He 定年以区分北美墨西哥湾北部再旋回 Greenville 期锆石来源^[55]。与锆石 U-Pb 高温测年相比,锆石 U-Th/He 定年的封闭体系温度约为 200 °C,因此

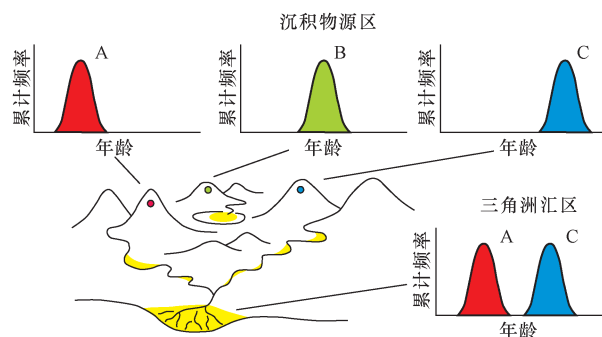


图4 碎屑锆石 Pb-U 定年分析沉积物路径系统示意图^[4]

Fig. 4 Schematic diagram for tracing sediment routing system via detrital zircon Pb-U dating analysis^[4]

能够较好地约束再旋回沉积物遭受抬升剥蚀的年龄。对于中深层或者盆地热流值异常高,埋藏年龄达到锆石的封闭年龄或退火年龄,样品则无法保存原始物源信息。由于碎屑磷灰石的封闭年龄或退火年龄均相对较低,对于盆地热史响应更为灵敏,却损失了原始物源信息,因此并不能用作低温热年代学物源分析方法的主要碎屑矿物。

3.2 地貌学比例关系

地貌比例关系研究旨在利用地貌参数经验关系对古代“源-汇”系统不同单元地貌特征进行定量预测,从而利用地貌参数变化重建“源-汇”过程动态发育过程。20 世纪 60—70 年代,地理学家最早发现冲积扇面积与冲积扇的坡度、源区的汇水面积呈幂函数的比例关系^[56-57]。Schumm 和 Winkely 发现水道长度与汇水面积成正比,与水道坡度成反比^[58]。Davidson 等发现汇水面积和河道满岸形态相关性较强^[59]。Hovius 等、Talling 等、Walcott 和 Summerfield 先后探讨了不同构造背景水系长度与水系出口间距比^[60-62]。Somme 等总结了全球 29 个不同构造背景的海相“源-汇”系统的源区、陆架、陆坡及深海平原等地貌参数的比例关系^[15]。近年来,随着全球数字高程数据精度大幅提高,Nyberg 等将其地貌参数提取与拟合分析扩展至全球上万个现代“源-汇”系统中,完善了现代“源-汇”系统的地貌学数据库^[38]。

地貌学研究证实无论地表过程如何变化,地貌形态参数间的内在联系相对较为稳定。尽管依据该方法估算所得的地貌学参数普遍存在较大不确定性,但一般而言预测值与实际值理论上处于一个数量级内。选取多种地貌学回归关系进行共同约束,对古“源-汇”系统定量预测具有较大实用意义^[63-64]。

东非 Malawi 湖晚更新世以来源区水系样式主要

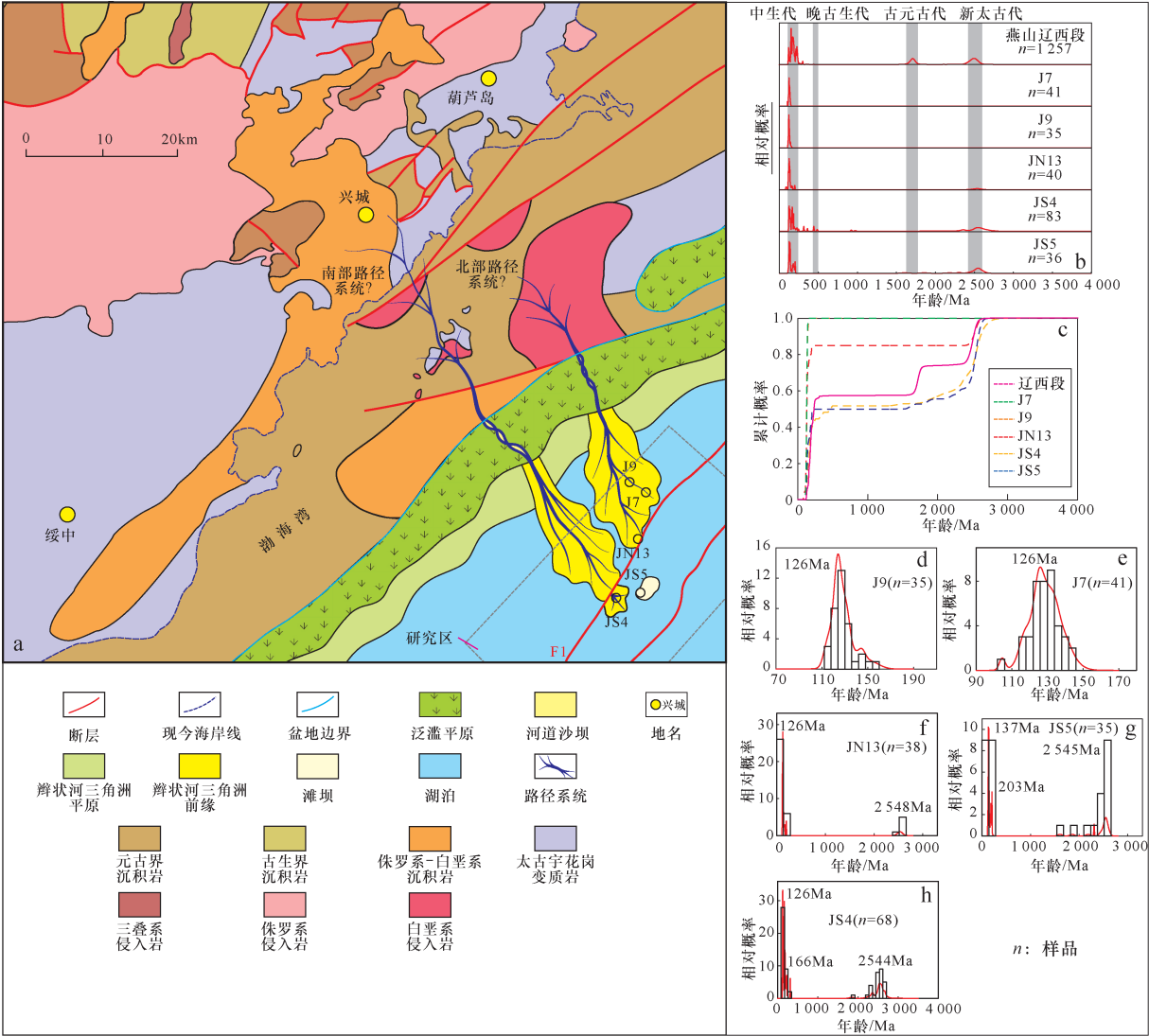


图 5 渤海 J 油田燕山辽西段沙河街组二段区域“源-汇”系统的优势路径及碎屑锆石年龄证据^[51]

Fig. 5 Advantageous routings and detrital zircon dating signatures of regional “Source-to-Sink” systems from the second member of the Shahejie Formation in the Liaoxi segment of Yanshan Mountain in the J oilfield, offshore Bohai Sea^[51]

a. 渤海 J 油田三角洲“源-汇”系统及潜在物源区基岩地质图; b. 研究区沙河街组二段碎屑锆石年龄概率分布函数; c. 研究区沙河街组二段碎屑锆石累积分布函数; d. J9 井研究层段碎屑锆石 U-Pb 协和图; e. J7 井研究层段碎屑锆石 U-Pb 协和图; f. JN13 井研究层段碎屑锆石 U-Pb 协和图; g. JS5 井研究层段碎屑锆石 U-Pb 协和图; h. JS4 井研究层段碎屑锆石 U-Pb 协和图

受控于高频气候变化所引起的基准面变化(图 3)。笔者依据现今地貌高程数据、晚更新世湖平面变化定量统计晚更新世以来的主要水系相关地貌参数,利用采集间距较小的高分辨率二维地震资料(主频达 150Hz)、高精度年龄模型约束晚更新世缓坡三角洲的发育规模和沉积速率,建立了整个湖盆不同汇水盆地低坡度三角洲“源-汇”系统地貌学比例关系。事实证明,汇水体系与最长河流长度、主河流平均坡度存在较好的幂函数关系,这与全球地貌比例数据分布具有一致性的趋势^[38]。具有相似构造背景或边界构造样式的三角洲与汇水面积相关性相对较强(图 6)。类似的地貌学比例关系统计研究在墨西哥湾古近系“源-

汇”系统区域性研究中也得到了进一步验证^[65]。

3.3 沉积物质量平衡

沉积物质量平衡分析重点在于物源供给总量与沉积体发育规模的对比探讨“源-汇”系统中各阶段物质产生、输送及损失、“源-汇”系统封闭性及沉积物粒度分异等问题。因此,从“源”到“汇”质量平衡分析是了解整个沉积物路径系统运转过程的理论依据^[2,35,39]。

质量平衡分析包括源区剥蚀量、沉积物供给及汇区沉积体三方面对比分析。事实上,由于源区沉积物短暂储存、汇区沉积物改造乃至跨盆地物质搬运,源区剥蚀产物总量、沉积物通量及汇区沉积体总量往往并

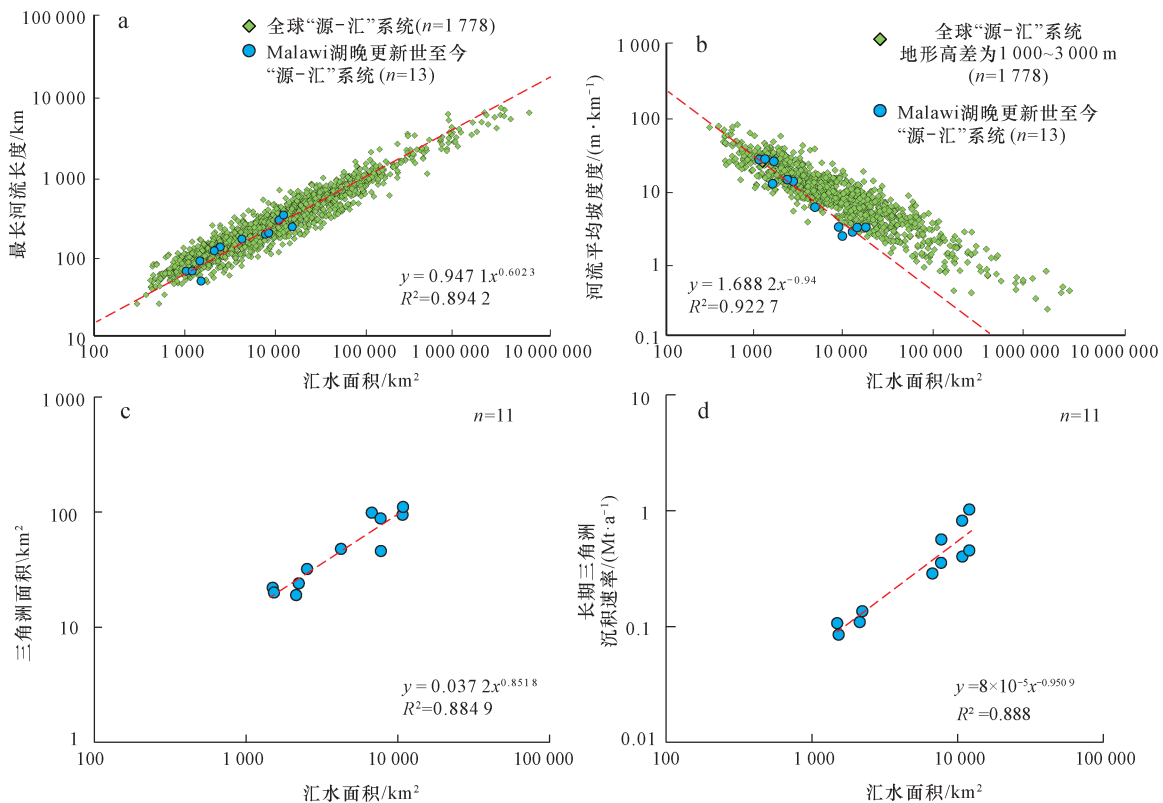


图6 非洲 Malawi 断陷湖晚更新世缓坡及轴向“源-汇”系统地貌学比例特征(全球地貌数据文献[38])

Fig.6 Geomorphological scaling relationship of shoaling and axial “Source-to-Sink” systems in Lake Malawi rift since the Late Pleistocene (The global geomorphological dataset is after the reference[38])

a. 汇水面积与最长河流长度;b. 汇水面积与河流平均坡度;c. 汇水面积与三角洲面积;d. 汇水面积与长期三角洲沉积速率

不一致。在盆地尺度的“源-汇”系统研究中,通过对比三者差异可以确定沉积物搬运、沉积及分配过程,明确沉积物粒度向下游的变化趋势^[21,35-37]。

源区剥蚀量可由成因宇核法测定的源区平均剥蚀速率并结合相关测年方法所得^[66-67],或利用低温热年代学所记录的退火年龄及热史模拟测定剥蚀量^[68],或利用地层趋势法插值建模恢复^[29]。相比而言,成因宇核方法仅能计算第四纪的剥蚀量,而低温热年代学法、地层趋势恢复法则更适用于深时“源-汇”系统。汇区沉积体表征在上述章节已作过简单讨论。对于埋藏于地下的沉积体而言,则需进行去压实及孔隙度校正,以恢复其同期沉积物规模^[31]。

沉积物通量计算则主要建立在现代地貌学、水利学以及相关经验关系的研究基础上,其中以“支点”法和“BQART”模式法计算沉积物供给为代表^[69]。

1) “支点”法

“支点”法是以河流体系作为从“源”到“汇”的杠杆,在河流层序地层学及沉积学研究的基础上,运用钻测井响应特征或露头发育特征对河道满岸形态(如满岸宽度、满岸深度)进行定量表征^[70]。在河道砂岩粒

度分析的基础上,结合若干水力学公式(如 Chezy、Manning 及 Manning-Strickler 公式等)、地貌学经验公式计算满岸河道参数、满岸流量以及沉积物载荷总量(图 7a)。尽管其运算流程比较复杂,相关变量和系数也相对较多^[69-72],却在“源-汇”沉积物平衡半定量-定量研究中具有较好的指导意义。

2) “BQART 模式”法

Syvitski 和 Milliaman 在全球 488 条河流超过 30 年水文数据基础上,结合地貌参数统计成果建立了 BQART 经验公式,认为其适用于 96%现代河流体系的沉积物载荷量变化^[73]。在源区基础地质研究的基础上,利用地貌比例关系及水利学经验公式对源区地貌进行精细表征,可对沉积物载荷量进行估算(图 7b)。其计算公式如下:

$$Q_s = \omega B Q^{0.31} A^{0.5} R T \quad (T \geq 2^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$$Q_s = 2\omega B Q^{0.31} A^{0.5} R \quad (T < 2^\circ\text{C}) \quad (2)$$

式中: Q_s 为河流沉积物载荷量, Mt/a ; ω 为常数(0.02); B 为环境参数; Q 为河流流量, km^3/a ; A 为汇水面积, km^2 ; R 为最大地形高差, km ; T 为年平均温度, $^\circ\text{C}$ 。其中环境参数 B 反映了人类活动、基底岩性乃

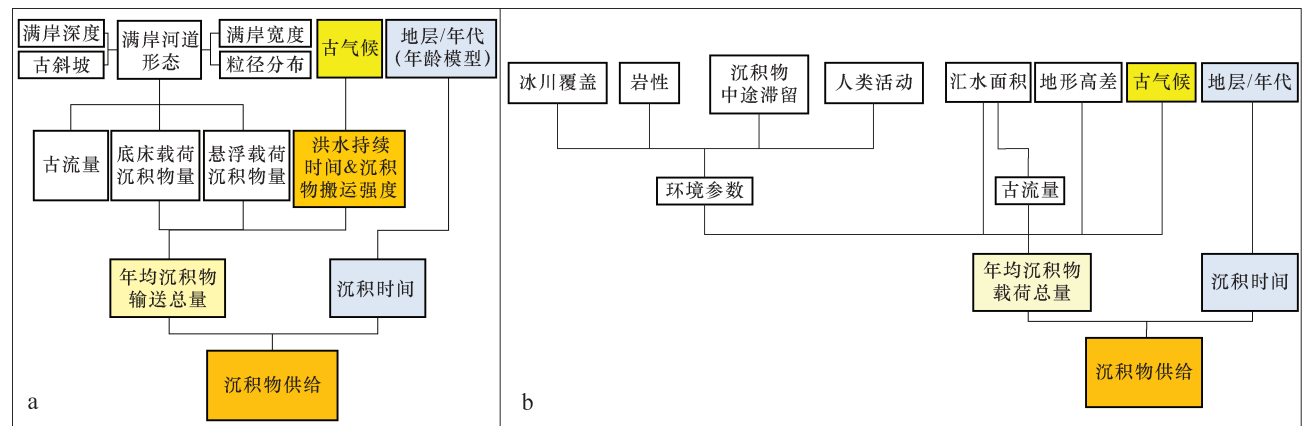


图 7 “支点”法(a)与“BQART 模式”(b)法计算沉积物供给总量工作流程

Fig. 7 Work flows of mass balance analysis through the “fulcrum” (a) and “BQART” (b) approaches

至冰川作用的影响,可具体表征为:

$$B = IL(1 - T_E)E_h \tag{3}$$

式中: I 为冰川侵蚀系数, $I = 1 + 0.09Ag$; Ag 为冰川覆盖率; L 为平均岩性系数(抗风化强度越低,系数越大,一般介于 0.5 ~ 3); T_E 为沉积物中途滞留比例, E_h 为人类影响因素。对未受冰川影响的“源-汇”系统,其沉积物搬运过程未受限制,即环境参数 $B = L$ [74]。

如何准确获取古“源-汇”系统各变量是计算沉积物通量中一大难点,因此利用“支点”法或“BQART 模式”法计算所得的沉积物通量常存在较大不确定性。在实际研究过程中,Sharma 等和 Zhang 等在这两种方法的基础上假设不同变量的概率分布形态 [72,75],并利用 Monte Carlo 模拟计算沉积物供给通量的变化范围,目前被认为是较为可靠的研究方法 [69]。

4 研究意义及发展方向

4.1 沉积学及油气勘探意义

“源-汇”系统研究思想对各要素研究方法的创新均有极大助力作用。源区分析不能是简单停留在传统意义上的物源分析,而是更多地依靠地球化学、构造地貌学方法进行源区剥蚀速率、地貌演化研究。汇区分析不仅仅是古地理研究,而需要建立更加精确的年龄模型,并在高精度层序格架下进行立体建模、定量表征。在“源-汇”系统整体性研究中,则要充分考虑构造、气候、海平面等环境信号的运转过程及传输效率,考虑到沉积物从源到汇的搬运历史,以进一步明确“源-汇”系统的耦合机制。

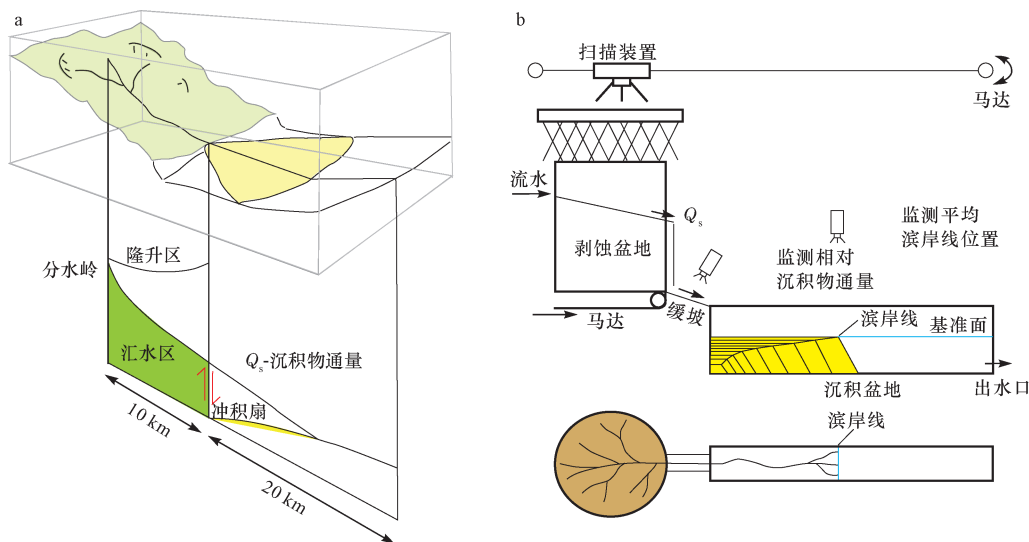
随着“源-汇”系统思想的不断完善,源区古水系重建已经成为油气勘探古地理综合研究方法的重要组成部分。将古“源-汇”系统沉积学的综合研究

方法应用到含油气盆地沉积体系分析中能够低成本、高效预测少井区有利储层分布,从而进一步提高油气勘探成功率及油气采收率 [74]。目前在北海盆地、墨西哥湾盆地及中国渤海湾盆地等全世界大型含油气盆地的油气勘探和开发中均已取得较好的应用效果 [39,65,76-77]。

4.2 发展方向

“源-汇”系统中包含极其复杂的物理、化学和生物作用过程 [32]。目前古“源-汇”系统研究仍停留在定性、半定量分析的阶段。如何获取古“源-汇”系统中源区信息是其中的难点,而沉积物从源到汇的搬运过程研究也变得尤为重要。传统沉积学研究方法仍然是“源-汇”系统的基础,然而未来研究方向则依靠多种学科融合、技术方法不断革新,由定性、半定量逐渐向定量研究发展。

如何建立准确且合理的古“源-汇”系统模型?“源-汇”过程的正演模拟是一个较好的研究手段。在古“源-汇”系统相关变量研究基础上,结合构造、气候背景进行相关区域进行正演模拟分析,为古“源-汇”系统过程定量预测提供了新的思路。目前较多的计算机数模软件是基于简单扩散模型的地层正演模拟方法(如 Sedisim, DionisoFlow),其研究基础是假定沉积物供给速率(水沙流量)保持恒定,实际上是将源区地貌、沉积物供给及沉积区地层叠置样式模拟割裂开来 [75]。基于水力侵蚀模型的地层模拟方法则将构造与气候演变、源区剥蚀、地貌演化乃至沉积充填有机地联系起来(图 8a)(如 Lecode, Pybadlands, GEOLEM 等) [1,79-81]。在盆地分析的基础上,设置相应环境参数,了解环境信号在古“源-汇”系统中的传输、损耗,从而明确“源-汇”系统的缓冲和快速反应机制。与

图8 基于“源-汇”系统的理论模型及水槽实验模型^[1,80]Fig.8 Theoretical and flume experimental models based on “Source-to-Sink” system^[1,80]

a. 数值模拟理论模型; b. 水槽实验模型

此同时,设计从源到汇的水槽模拟^[82],通过设定不同构造隆升速率和降雨量参数,能够更加直观地分析源区水系演化过程、三角洲动态建造过程(图8b),对于古“源-汇”过程研究亦有较强的指导意义。

从源到汇的地貌统计学分析仍然是未来一段时间内重要的研究方向。目前“源-汇”系统各要素的地貌统计学研究已经涵盖了全球三角洲及海底扇体系^[38,83],并且越来越多统计学研究开始涉足到深时“源-汇”系统中。然而“源-汇”系统的均衡特性、构造和气候差异对各地貌要素直接的相关性影响相当显著。依据气候分带、构造背景分类、分区域建立具有鲁棒性的“源-汇”系统地貌比例大数据,通过有效的大数据筛选方法将“源-汇”系统地貌统计学应用到古“源-汇”系统重建中去。

除此之外,针对不同构造背景、不同时间尺度的“源-汇”系统而言,在研究中应注意由浅入深、循序渐进,遵循从浅层到深层、从单一到叠合、从封闭到开放、从单一风化作用过程到多种风化作用过程约束的原则,建立适用于不同规模、不同构造背景古“源-汇”系统的综合研究方法,并将其广泛应用于物源示踪、沉积充填、储层预测等一体化研究中。

5 结语

1) 古“源-汇”系统是在构造、气候驱动下地貌单元发生变化,沉积地层部分或完全缺失,所保留的地质信息通常并不完整。相对于第四纪乃至现代“源-汇”体系来说,其研究难度也相对更大。由于源区剥

蚀、水系变迁、测年困难等重要原因,适用于现代“源-汇”系统的研究方法似乎并不能很好解决古“源-汇”系统相关问题。因此,与从“源”到“汇”息息相关的重要沉积学问题(地貌水系演化、汇区定量表征、沉积物中途储存)应当审慎对待。

2) 古“源-汇”系统提出绝不是“新瓶装旧酒”。传统意义上的物源分析、沉积相分析乃至沉积物输送通道等沉积体系分析方法仅是部分“源-汇”研究工作的基础,然而其并没有把“源-汇”系统各要素有机整合进行定量化、相关性研究。碎屑物源定量示踪有利于推断优势路径系统,地貌学比例关系能够提供诸多有意义的原始地貌信息,而沉积物质量平衡分析则是完整分析“源-汇”过程中的产生、输送及损失。多学科与传统沉积学交叉形成一系列最新研究方法,成为解决古“源-汇”系中沉积学问题的重要途径。与此同时,传统沉积学研究逐渐向定量化发展,数值模拟及物理模拟将成为未来“源-汇”研究中重要手段。上述一系列系统性研究方法为传统沉积学研究的技术突破、思想转变带来契机,为少井区油气勘探选区、有利储层预测提供了新思路。

致谢:感谢美国雪城大学地球科学系“Lacustrine Rift Research Program” C. A. Scholz 教授提供的东非裂谷系相关资料以及一年以来的倾情指导!

参 考 文 献

- [1] Armitage J J, Duller R. A, Whittaker A C, et al. Transformation of tectonic and climatic signals from source to sedimentary archive [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(4): 231-235.

- [2] Allen, P A. From landscapes into geological history [J]. *Nature*, 2008, 451(17): 274–276.
- [3] Romans B W, Graham S A. A deep-time perspective of land-ocean linkages in the sedimentary record [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5(5): 69–94.
- [4] Romans B W, Castellorts S, Covault J A, et al. Environmental signal propagation in sedimentary systems across timescales [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 7–29.
- [5] Kuehl S A, Nittroer C A. Exploring the transfer of Earth surface materials from source to sink [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2011, 92(22): 188–188.
- [6] Walsh J P, Wiberg P L, Alato R, et al. Source-to-sink research: economy of the earth's surface and its strata [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 1–6.
- [7] 李铁刚, 曹奇原, 李安春. 从源到汇: 大陆边缘的沉积作用 [J]. *地球科学进展*, 2003, 18(5): 713–721.
- Li Tiegang, Cao Qiyuan, Li Anchun. Source to sink: sedimentation in the continental margins [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(5): 713–721.
- [8] 朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 等. 陆相盆地源-汇系统要素耦合研究进展 [J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1851–1870.
- Zhu Hongtao, Xu Changgui, Zhu Xiaomin, et al. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin [J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1851–1870.
- [9] Zhu H T, Steel R, Zhu X M, et al. Introduction to special section: Source-to-sink system analysis of petroliferous and other sedimentary basins [J]. *Interpretation*, 5(4): STi-STii.
- [10] Helland-Hansen W, Sømme T O, Martinsen O J, et al. Deciphering earth's natural hourglasses: perspectives on source-to-sink analysis [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, 86(9): 1008–1033.
- [11] 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 Frontier*, 2015, 22(1): 9–20.
- [12] 杨江海, 马严. 源-汇沉积过程的深时古气候意义 [J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1910–1921.
- Yang Jianghai, Ma Yan. Paleoclimate perspectives of Source-to-Sink sedimentary processes [J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1910–1921.
- [13] Xu J, Snedden J W, Galloway W E, et al. Channel-belt scaling relationship and application to early Miocene source-to-sink systems in the Gulf of Mexico basin [J]. *Geosphere*, 2017, 13(1): 1–22.
- [14] Hinderer M. From gullies to mountain belts: a review of sediment budgets at various scales [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 280: 21–59.
- [15] Sømme T O, Helland-Hansen W, Martinsen O J, et al. Predicting morphological relationships and sediment partitioning in source-to-sink systems [J]. *Basin Research*, 2009, 21: 361–387.
- [16] Mulder T, Syvitski J P M. Climatic and morphologic relationships of rivers: implications of sea-level fluctuations on river loads [J]. *Journal of Geology*, 1996, 104(5): 509–523.
- [17] Twidale C R. River patterns and their meaning [J]. *Earth-Science Reviews*, 2004, 67(3–4): 159–218.
- [18] Scholz C A, Rosendahl B R, Scott D L. Development of coarse-grained facies in lacustrine rift basins: Examples from East Africa [J]. *Geology*, 1990, 18(2): 140.
- [19] Gawthorpe R L, Leeder M R. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins [J]. *Basin Research*, 2000, 12(3–4): 195–218.
- [20] Pechlivanidou S, Cowie P A, Hannisdal B, et al. Source-to-sink analysis in an active extensional setting: Holocene erosion and deposition in the Sperchios rift, central Greece [J]. *Basin Research*, 2018, 30: 522–543.
- [21] 杨萍. 青海湖的形成与环境演化 [J]. *青海环境*, 2011, 21(2): 59–61.
- Yang Ping. The formation and environmental evolution of Qinghai Lake [J]. *Environment in Qinghai*, 2011, 21(2): 59–61.
- [22] Leeder M R, Jackson J A. The interaction between normal faulting and drainage in active extensional basins, with examples from the western United States and central Greece [J]. *Basin Research*, 1993, 5(2): 79–102.
- [23] Pechlivanidou S, Cowie P A, Duclaux G, et al. Tipping the balance: Shifts in sediment production in an active rifting setting [J]. *Geology*, 2019, 47(3): 259–262.
- [24] Blum M, Martin J, Millken K, et al. Paleovalley systems: insights from quaternary analogs and experiments [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 116: 128–169.
- [25] Scholz C A, Johnson T C, Cohen A S, et al. East African megadroughts between 135 and 75 thousand years ago and bearing on early-modern human origins [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(42): 16416–16421.
- [26] Lyons R P, Scholz C A, Buoniconti M R, et al. Late Quaternary stratigraphic analysis of the Lake Malawi Rift, East Africa: an integration of drill-core and seismic-reflection data [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 303(1–4): 20–37.
- [27] 崔龙涛, 张倩萍. 坡折带-物源耦合控砂模式在湖相盆地储层预测中的探讨——以松辽盆地西斜坡地区白垩系储层为例 [J]. *石油地质与工程*, 2018, 32(4): 6–11.
- Cui Longtao, Zhang Qianping. Discussion on reservoir prediction controlled by slope break belt-source coupling sand bodies in lacustrine basin [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2018, 32(4): 6–11.
- [28] 陈林, 张曰静, 商丰凯, 等. 不同物源体系沉积结合部砂体展布范围精细识别 [J]. *石油地质与工程*, 2019, 33(2): 6–10.
- Chen Lin, Zhang Yuejing, Shang Fengkai, et al. Fine identification of sedimentary boundary of different provenance systems [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2019, 33(2): 6–10.
- [29] Liu Q H, Zhu X M, Yang Y, et al. Sequence stratigraphy and seismic geomorphology application of facies architecture and sediment-dispersal patterns analysis in the third member of Eocene Shahejie Formation, slope system of Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2016, 78: 766–784.
- [30] 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等. 沉积盆地“源-汇”系统研究新进展 [J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(1): 1–11.
- Xu Changgui, Du Xiaofeng, Xu Wei, et al. New advances of the “source-to-sink” system research in sedimentary basin [J]. *Oil &*

- Gas Geology, 2017, 38(1): 1–11.
- [31] 李勇, 黎兵, 周荣军, 等. 剥蚀-沉积体系中剥蚀量与沉积通量的定量对比研究——以岷江流域为例 [J]. 地质学报, 2007, 81(3): 332–343.
- Li Yong, Li Bing, Zhou Rongjun, et al. The quantitative correlation between denudation volume and sedimentary flux in the denudation-accumulation system: examples from Minjiang River drainage system [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(3): 332–343.
- [32] Guillocheau F, Rouby D, Robin C, et al. Quantification and causes of the terrigenous sediment budget at the scale of a continental margin: a new method applied to the Namibia-South Africa margin [J]. Basin Research, 2012, 24(1): 3–30.
- [33] Michael N. Functioning of an ancient routing system, the Escanilla Formation, South Central Pyrenees [D]. London: Imperial College London, 2013.
- [34] Sadler P M. Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections [J]. The Journal of Geology, 1981, 89(5): 569–584.
- [35] Schumer R, Jerolmack D J. Real and apparent changes in sediment deposition rates through time [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2009, 114(F3): F00A06.
- [36] Allen P A. Sediment routing systems: The fate of sediment from source to sink [M]. Cambridge Cambridge University Press, 2017.
- [37] Watkins S E, Whittaker A C, Bell R E, et al. Are landscapes buffered to high-frequency climate change? A comparison of sediment fluxes and depositional volumes in the Corinth Rift, central Greece, over the past 130 k. y. [J]. Geological Society of America Bulletin, 2019, 132(3/4): 372–388.
- [38] Nyberg B, Helland-Hansen W, Gawthorpe R L, et al. Revisiting morphological relationships of modern source-to-sink segments as a first-order approach to scale ancient sedimentary systems [J]. Sedimentary Geology, 2018, 373: 111–133.
- [39] 马收先, 孟庆任, 曲永强. 轻矿物物源分析研究进展 [J]. 岩石学报, 2014, 30(2): 597–608.
- Ma Shouxian, Meng Qingren, Qu Yongqiang. Development on provenance analysis of light minerals [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(2): 597–608.
- [40] Xu J, Snedden J W, Stockli D F, Fulthorpe D F, et al. Early Miocene continental-scale sediment supply to the Gulf of Mexico basin based on detrital zircon analysis [J]. Geological Society of America Bulletin, 2017, 129(1–2): 3–22.
- [41] Sharman G R, Hubbard S M, Covault J A, et al. Sediment routing evolution in the North Alpine Foreland Basin, Austria: interplay of transverse and longitudinal sediment dispersal [J]. Basin Research, 2017, 30(3): 426–447.
- [42] 郭佩, 刘池洋, 王建强, 等. 碎屑锆石年代学在沉积物源研究中的应用及存在问题 [J]. 沉积学报, 2017, 35(1): 46–56.
- Guo Pei, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, et al. Consideration on the application of detrital-zircon geochronology to sedimentary provenance analysis [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(1): 46–56.
- [43] Markwitz V, Kirkland C. Source to sink zircon grain shape: Constraints on selective preservation and significance for Western Australian Proterozoic basin provenance [J]. Geoscience Frontiers, 2018, 9: 415–430.
- [44] Saylor J E, Sundell K E. Quantifying comparison of large detrital geochronology data sets [J]. Geosphere, 2016, 12(1): 203–220.
- [45] Sharman G R, Sharman J P, Sylvester Z. detritalPy: A Python-based Toolset for Visualizing and Analyzing Detrital Geo-Thermochronologic Data [J]. The Depositional Record, 2018, 4: 202–215.
- [46] Tyrell S, Haughton P D W, Daly J S. Drainage reorganization during breakup of Pangea revealed by in-situ Pb isotopic analysis of detrital K-feldspar [J]. Geology, 2007, 35(11): 971–974.
- [47] Zhang Z J, Tyrrell S, Li C A, et al. Pb isotope compositions of detrital K-feldspar grains in the upper-middle Yangtze River system: Implications for sediment provenance and drainage evolution [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2015, 15(7): 2765–2779.
- [48] Jinnah Z A, Roberts E M, Deino A L, et al. New ^{40}Ar – ^{39}Ar and detrital zircon U-Pb ages for the Upper Cretaceous Wahweap and Kaiparowits Formations on the Kaiparowits Plateau, Utah: implications for regional correlation, provenance, and biostratigraphy [J]. Cretaceous Research, 2009, 30(2): 287–299.
- [49] Liu Z S, Shi H S, Zhu J Z, et al. Detrital K-feldspar $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages: source constraints of the Lower Miocene sandstones in the Pearl River Mouth Basin, South China Sea [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2012, 86(2): 383–392.
- [50] 喻顺, 陈文, 孙敬博, 等. 库车盆地白垩系碎屑白云母物源区示踪与构造意义 [J]. 地质学报, 2016, 90(8): 1874–1885.
- Yu Shun, Chen Wen, Sun Jingbo, et al. Provenance tracing of Cretaceous Detrital Muscovite in the Kuqa Basin and its tectonic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(8): 1874–1885.
- [51] Hietpa J, Samson S, Moecher D. A direct comparison of the ages of detrital monazite versus detrital zircon in Appalachian foreland basin sandstones: Searching for the record of Phanerozoic orogenic events [J]. Earth & Planetary Science Letters, 2011, 310(3–4): 488–497.
- [52] 简星, 关平, 张巍. 碎屑金红石: 沉积物源的一种指针 [J]. 地球科学进展, 2012, 27(8): 828–846.
- Jian Xing, Guan Ping, Zhang Wei. Detrital Rutile: a sediment provenance indicator [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(8): 828–846.
- [53] Tan M X, Zhu X M, Liu W, et al. Sediment routing systems in the second member of the Eocene Shahejie Formation in the Liaoxi Sag, offshore Bohai Bay Basin: A synthesis from tectono-sedimentary and detrital zircon geochronological constraints [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 94: 95–113.
- [54] 蔡长娥. 沉积盆地碎屑锆石低温热年代学研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- Cai C E. Detrital zircon low-temperature thermochronology in sedimentary basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [55] Xu J, Stockli D F, Snedden J W. Enhanced provenance interpretation using combined U-Pb and (U-Th)/He double dating of detrital zircon grains from lower Miocene strata, proximal Gulf of Mexico Basin, North America [J]. Earth & Planetary Science Letters, 2017, 475: 44–57.
- [56] Hooke R L B. Steady-state relationships on arid-region alluvial fans in

- closed basins [J]. *American Journal of Science*, 1968, 266 (8): 609–629.
- [57] Bull W B. The alluvial-fan environment [J]. *Progress in Physical Geography*, 1977, 1 (2): 222–270.
- [58] Schumm S A, Winkley B R. 1994. The character of large alluvial rivers [M]//Schumm S A, Winkley B R. *The Variability of Large Alluvial Rivers*. New York: American Society of Civil Engineers, 1994: 1–9.
- [59] Davidson S K, North C P. Geomorphological regional curves for prediction of drainage area and screening modern analogues for rivers in the rock record [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79 (10): 773–792.
- [60] Hovius N. Regular spacing of drainage outlets from linear mountain belts [J]. *Basin Research*, 1996, 8 (1): 29–44.
- [61] Talling P J, Stewart M D, Stark C P, et al. Regular spacing of drainage outlets from linear fault blocks [J]. *Basin Research*, 1997, 9 (4): 275–302.
- [62] Walcott R C, Summerfield M A. Universality and variability in basin outlet spacing: implications for the two-dimensional form of drainage basins [J]. *Basin Research*, 2009, 21 (2): 147–155.
- [63] Sømme T O, Jackson C A L. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Møre – Trøndelag area of southern Norway: Part 2, sediment dispersal and forcing mechanisms [J]. *Basin Research*, 2013, 25: 512–531.
- [64] Sømme T O, Martinsen O J, Thurmond J B. Reconstructing morphological and depositional characteristics in subsurface sedimentary systems: an example from the Maastrichtian-Danian Ormen Lange system, Møre Basin, Norwegian Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93 (10): 1347–1377.
- [65] Snedden J W, Galloway W E, Milliken K T, et al. Validation of empirical source-to-sink scaling relationships in a continental-scale system: The Gulf of Mexico basin Cenozoic record [J]. *Geosphere*, 2018, 14 (2): 768–784.
- [66] Covault J A, Romans B W, Graham S A, et al. Terrestrial source to deep-sea sink sediment budgets at high and low sea levels: Insights from tectonically active Southern California [J]. *Geology*, 2011, 39 (7): 619–622.
- [67] Mason C, Romans B. Climate-driven unsteady denudation and sediment flux in a high-relief unglaciated catchment-fan using ^{26}Al and ^{10}Be : Panamint Valley, California [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 492: 130–143.
- [68] Babault J, Viaplana-Muzas M, Legrand X, et al. Source-to-sink constraints on tectonic and sedimentary evolution of the western Central Range and Cenderawasih Bay (Indonesia) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 156: 265–287.
- [69] Brewer C J, Hampson G J, Whittaker A C. Comparison of methods to estimate sediment flux in ancient sediment routing systems [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 207: 103217.
- [70] Holbrook J, Wanas H. A fulcrum approach to assessing source-to-sink mass balance using channel paleohydrologic parameters derivable from common fluvial data sets with an example from the Cretaceous of Egypt [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2014, 84 (5): 349–372.
- [71] Lin W, Bhattacharya J P. Estimation of source-to-sink mass balance by a fulcrum approach using channel paleohydrologic parameters of the Cretaceous Dunvegan Formation, Canada [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87 (1): 97–116.
- [72] Sharma S, Bhattacharya J P, Richards B. Source-to-sink sediment budget analysis of the Cretaceous Ferron Sandstone, Utah, USA, using the fulcrum approach [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87 (6): 594–608.
- [73] Syvitski J P, Milliman J D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean [J]. *Journal of Geology*, 2007, 115: 1–19.
- [74] Sømme T O, Piper D J W, Deptuck M E, et al. Linking onshore-offshore sediment dispersal in the Golo Source-to-Sink System (Corsica, France) During the Late Quaternary [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2011, 81 (2): 118–137.
- [75] Zhang J Y, Covault J, Pyrcz M, et al. Quantifying sediment supply to continental margins: Application to the Paleogene Wilcox Group, Gulf of Mexico [J]. *AAPG Bulletin*, 2018, 102 (9): 1685–1702.
- [76] Martinsen O J, Sømme T O, Thurmond J B, et al. Source-to-sink systems on passive margins: theory and practice with an example from the Norwegian continental margin [C]//Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series. Geological Society of London, 2010, 7 (1): 913–920.
- [77] Zhu X M, Li S L, Liu Q H, et al. Source to sink studies between the Shaleitian uplift and surrounding sags: Perspectives on the importance of hinterland relief and catchment area for sediment budget, Western Bohai Bay Basin, China [J]. *Interpretation*, 2017, 5 (4): 65–84.
- [78] Ding X S, Salles T, Flament N, et al. Quantitative stratigraphic stratigraphic analysis in a source-to-sink numerical framework [J]. *Geoscientific Model Development*. 2019, 12 (6): 2571–2585.
- [79] Salles T, Duclaux G. Combined hillslope diffusion and sediment transport simulation applied to landscape dynamics modelling [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2015, 40 (6): 823–839.
- [80] Tristan S, Ding X S, Gilles B, et al. pyBadlands: A framework to simulate sediment transport, landscape dynamics and basin stratigraphic evolution through space and time [J]. *Plos One*, 2018, 13 (4): e0195557.
- [81] Clevie Q, De Boer P L, Wachter M. Numerical modelling of drainage basin evolution and three-dimensional alluvial fan stratigraphy [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 163: 85–110.
- [82] Gazzetti, E. Autogenic signals in an experimental source-to-sink system [D]. Minnesota: University of Minnesota, 2015.
- [83] Pettinga L, Jobe Z, Shumaker L, et al. Morphometric scaling relationships in submarine channel-lobe systems [J]. *Geology*, 2018, 46 (9): 819–822.

(编辑 张亚雄)