

陆相盆地古源-汇系统定量重建、级次划分及耦合模式

朱红涛¹,徐长贵²,杜晓峰³,刘强虎¹,孙中恒¹,曾智伟¹

[1. 中国地质大学(武汉)资源学院,湖北武汉430074;2. 中海石油(中国)有限公司,北京100010;

3. 中海油研究总院有限责任公司,北京100028]

摘要:陆相盆地古源-汇系统定量重建、级次划分及耦合模式是还原深时盆地剥蚀和沉积过程的重要研究内容。陆相盆地古源-汇系统物源区定量重建难点主要包含古地貌重建和古水系重建。古地貌重建新技术的发展提出了基于剥蚀区、超剥区(剥蚀和超覆作用共同作用区)和超覆区为框架,残余地貌重建、差异沉降校正、超剥区恢复、剥蚀区恢复和沉积古地貌恢复流程的“三区五步”恢复方法。古水系重建方面提出了基于ArcGIS系统的古水系定量恢复和拾取方法。陆相盆地古源-汇系统级次划分的代表方法是“三线三级”法,关键是拾取分水岭、分水线和脊线,进而划分一级、二级、三级古源-汇系统。基于重建的古源-汇系统物源区流域单元与沉积区沉积体的面积、形态组合、配置关系,建立了“哑铃型”“球拍型”“奖杯型”和“标枪型”4种古源-汇系统耦合模式。研究成果对古源-汇系统定量化研究和勘探目标评价、预测具有一定的参考价值。

关键词:级次划分;耦合模式;古源-汇系统;定量重建;古地貌恢复;古水系重建;陆相盆地

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Quantitative reconstruction, hierarchical division and coupling mode establishment for ancient source-to-sink systems in continental basins

ZHU Hongtao¹, XU Changgui², DU Xiaofeng³, LIU Qianghu¹, SUN Zhongheng¹, ZENG Zhiwei¹

[1. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. CNOOC, Beijing 100010, China; 3. Research Institute, CNOOC, Beijing 100028, China]

Abstract: Quantitative reconstruction, hierarchical division and coupling mode establishment are important means to restore the erosion and sedimentation processes for depth-time ancient source-to-sink systems in continental basins. The main difficulties in quantitative reconstruction of provenance lie in paleo-geomorphology reconstruction and paleo-drainage reconstruction. New techniques for paleo-geomorphology reconstruction use a “three-zone and five-step” restoration method based on the framework of denudation, overlap-denudation and overlap zones as well as steps of residual geomorphology reconstruction, differential subsidence correction, overlap-denudation zone restoration, denudation zone restoration and depositional paleo-geomorphology restoration. In terms of paleo-drainage system reconstruction, a quantitative restoration and picking method is resorted to based on the ArcGIS system. The division of ancient source-to-sink systems in continental basins is usually realized by using the “three-line and three-level” method, of which, picking up watersheds, water dividing lines and ridge lines are very critical before a further division of first-order, second-order, and third-order source-to-sink systems. According to the area, geometric configuration and coupling relationship of the drainage unit and sedimentary body within the reconstructed ancient source-to-sink system, this paper puts forward four types of source-sink coupling modes, i. e., “dumbbell”, “racket”, “trophy” and “javelin” modes, and thus may serve as a valuable reference for quantitative study of source-to-sink system and prediction of deep exploration targets.

Key words: hierarchical division, coupling mode, ancient source-to-sink system, quantitative reconstruction, paleo-geomorphologic reconstruction, reconstruction of paleo-drainage system, continental basin

收稿日期:2023-02-13;修订日期:2023-03-19。

第一作者简介:朱红涛(1976—),男,教授、博士生导师,层序地层学、沉积学、地震沉积学。E-mail: htzhu@cug.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42172127,41872149,41902112)。

引用格式:朱红涛,徐长贵,杜晓峰,等.陆相盆地古源-汇系统定量重建、级次划分及耦合模式[J].石油与天然气地质,2023,44(3):539-552. DOI: 10.11743/ogg20230302.

ZHU Hongtao, XU Changgui, DU Xiaofeng, et al. Quantitative reconstruction, hierarchical division and coupling mode establishment for ancient source-to-sink systems in continental basins[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 539-552. DOI: 10.11743/ogg20230302.

源-汇系统自1978年提出以来,由于其囊括了地表岩石圈、水圈和生物圈等整体动态性特征,已被广泛应用于包括地质、环境等在内的多个领域^[1-3]。作为源-汇系统研究的重要议题,陆相盆地古源-汇系统的重建与耦合一直是国内外学者关注的重点^[4-5]。古源-汇系统的重建包括还原物源区的最高点到沉积区盆地地层尖灭的整个系统,与之伴随的侵蚀、搬运和沉积过程是导致古源-汇系统多样化的关键^[6-10]。同时,对物源区-沉积区的系统重建以及耦合分析是提供完整侵蚀-沉积体系整个系统过程的动态视图,包括源到汇过程中的相互联系和反馈机制^[11-12]。古源-汇系统的重建和耦合作为两个相对独立的课题,在还原地质过程、油气勘探的研究中,又有其紧密的内在联系,作为重要议题受到了国内外学者的重视^[8]。

陆相盆地古源-汇系统重建的关键在于对物源和沉积区深时剥蚀和沉积地貌的恢复,同时作为古源-汇系统研究的基本单元,物源区的厘定和划分是还原古源-汇系统关键指标的重要组成部分,重建陆相盆地古源-汇系统是还原地表景观、重现地质作用过程和追溯重大历史变革事件的重要方法与手段^[13]。由于陆相盆地古源-汇系统的大小、形状、梯度、输砂通量和沉积通量存在着巨大差异,其重建和耦合一直是研究中的难点^[14]。尽管如此,由于陆相盆地古源-汇系统具有典型的多物源供给、沟谷与坡折发育样式多,断裂样式多样性强的特点,针对陆相盆地古源-汇系统重建的工作具有很高的科学价值和参考意义^[15-16]。

国际上关于源-汇系统重建的研究大多集中于陆架边缘,主要探讨大陆边缘沉积背景下物源区范围的重建和示踪^[17],其工作主要集中于:①对板块和大型物源区范围的示踪^[18-20];②对溶解质、沉积通量和剥蚀通量的计算^[21-23];③对气候、海平面和构造运动等控制因素变化的关键地质历史时期年龄的判定^[24-25]。除此之外,针对于陆相盆地古源-汇系统的研究,大部分工作注重于对沉积时期关键地形变化等的恢复以及物源区的探索^[26-27]。

与国外研究不同,国内目前针对陆相盆地古源-汇系统重建和耦合的研究重点在于对不同类型古源-汇系统的差异化对比以及成因探讨^[13],然而,当前对古源-汇系统物源区-沉积区的古地貌重建、古源-汇

单元级次划分和古源-汇单元耦合模式研究还较为薄弱,对地貌的差异性分析和汇区的分析对比存在着多种方案并存、但又模糊替代的问题,直接限制了不同类型古源-汇系统刻画的准确性^[28]。相对于洋陆边缘盆地,陆相盆地物源区-沉积区的古源-汇耦合关系清晰、更易观察和定量化研究^[8],因此,本文重点探讨陆相盆地古源-汇系统的定量重建、级次划分和耦合模式,这也是中国陆相盆地古源-汇系统研究的热点和重点。

1 古源-汇系统单元定量重建

1.1 物源区重建

陆相盆地古源-汇系统物源区由于其特有的多物源来源、物源转换频繁、幕式变化等特点,其物源区的重建一直是其古源-汇系统重建的关键^[8]。一方面还原陆相盆地古源-汇系统的物源区地貌是重建古源-汇系统单元的基础;另一方面,现今观察到的物源区特征与沉积时期的古地貌存在明显差异,不能完全呈现出深时物源区信息。因此,对于物源区重建,需明确物源区范围、源区剥蚀量、源区沉积时期古地貌和源区水系的发育特征^[13]。

1.1.1 物源区示踪

确定陆相盆地深时物源来源和供给方向对于重建复杂沉积物路径系统至关重要。物源分析是陆相盆地古源-汇系统物源体系重建的重要组成部分,其作为确定主要物源区位置、基岩性质、沉积物的搬运路径和方向、主体沉积区和砂体分布范围的关键证据,也是重建物源区的重要基础。物源分析的方法主要有重矿物法、元素地球化学法、地质年代学法、黏土矿物学法、生物标志化合物法以及地球物理综合表征法等^[29-34],近些年来随着技术的完善,物源分析已经由定性研究转变为以定量研究为主。

利用单颗粒矿物来推断物源区已经成为示踪物源区的重要手段,目前广泛应用的方法手段有碎屑颗粒的低温热年代学研究方法、含铀矿物的U-Pb年代学分析方法和重矿物综合判别方法^[17, 35-37]。其中,低温热

年代学方法主要借助于磷灰石裂变径迹(AFT)和锆石裂变径迹(ZFT)具有热稳定性较低的特性,还原物源区的构造-热演化、构造抬升和剥蚀历史以及其关键年龄等信息,但由于其封闭温度较低,在许多盆地的研究中严格受限^[36-38]。锆石作为含铀副矿物广泛存在于物源区和沉积区之中,是U-Th-Pb同位素定年的最理想的重矿物,同时由于其富含Hf, Y, Th等微量元素,能很好地被应用于指示物源的来源和成因^[39]。由于不同成因(火成岩或变质岩)锆石具有差异明显的内部晶形结构,通常也能指示不同的母岩类型。近些年来,利用碎屑锆石年龄逆蒙特卡罗方法对锆石和重矿物的物源亲缘程度分析以及不同物源区的物源供给强度占比的定量化分析被提出并充分应用到了物源体系分析之中^[40-43]。基于重矿物成熟度分析(ZRT)指数,以及针对不同基岩和重矿物成因的分析对比(基性岩浆岩、酸性岩浆岩和变质岩母岩)也被广泛应用于陆相盆地的物源体系研究中并取得了理想的效果^[44-47]。

利用地球物理综合表征的方法来进行物源分析被认为是直观表征物源区位置和方向的可靠手段,尤其是近年来提出的基于高精度三维地震数据进行的主物源通道沉积充填期次刻画和基于前积角玫瑰花图的主物源方向识别的综合判别方法,被广泛应用于渤海湾盆地和南海珠江口盆地等陆相盆地古源-汇系统的物源体系分析之中,在定量化刻画母岩来源方面具有天然的优势^[32, 48]。相比于其他技术手段,基于三维地震数据进行物源区分析不依赖岩心样品,具有分辨率高和物源演化过程分析精度高的优点,现今已逐渐应用于国内外不同沉积盆地物源体系研究之中^[49]。

1.1.2 物源区古地貌重建

古地貌是古源-汇系统分析的基础,古地貌重建则是古源-汇系统定量重建第一步。古地貌重建的关键是还原深时物源区-沉积区的原始属性,一定程度上决定了陆相盆地古源-汇系统的类型和发育特征^[1]。古地形地貌是控制一个盆地边界类型和沉积相发育与分布的一个主要因素,同时一定程度上控制着后期油气藏的储-盖组合。同现代地貌一样,古地貌形态受到了所处区域构造位置、气候、基准面变化及构造运动等因素的影响。物源区地貌的重建就是再现流域单元所处的原始构造格局,是揭示物源体系、沉积体系的发育特征与空间配置关系的重要基础^[50-51]。然而,根据古源-汇系统的规模和尺度差异,物源区的范围和界定存在着较大的困难。重建陆相盆地古源-汇系统

物源区古地貌最主要的困难在于:①陆相盆地类型多样,物源区和盆地边界条件复杂^[26];②陆相盆地古源-汇系统控制因素多样,在构造、气候的基础上,盆地古地貌尤为重要,具有多隆多洼的古地理格局和多种不同搬运通道^[8];③陆相盆地物源区母岩类型多样,不同母岩区汇水单元及其沉积响应差别大,这直接导致了物源区内不同凸起的输砂能力和水系的差异,同时对汇区沉积碎屑的通量也至关重要^[4];④陆相盆地沉积体系更为复杂多变、非均质性更强,在不同边界条件的控制下,可在盆地周缘汇区形成多类型沉积体系,对于重建物源区地貌造成了一定困扰^[15]。

在这种背景下,古源-汇系统物源区重建的关键在于对物源区坡度、范围、输砂量等的还原和计算,此外还需要关注地貌类型以及水系重建等工作。在还原物源区古地貌的过程中,因剥蚀和沉积古地貌在地质历史时期中经历构造变形、差异压实、沉积充填以及风化剥蚀等作用,对古物源方向、古水流体系、沉积体系类型和沉积地貌格局的判断和刻画产生了一定的干扰^[13],不能完全准确展示沉积时期古地貌的整体面貌和古源-汇配置关系。而沉积后期,先前沉积的地层由于构造作用受到剥蚀和差异沉降的影响,现今保留的部分古源-汇系统参数与沉积时期的古源-汇系统参数差异较大,不能反映当时沉积时古源-汇系统的特征。因此,获取较为可靠的古源-汇系统各要素参数,对沉积时期的古地貌校正就显得尤为重要。

近年来出现的古地貌恢复方法有很多,主要包括印模法、残余厚度法、填平补齐法、层拉平法、沉积学分析法、误差模拟法、层序地层学古地貌恢复法、回剥法、趋势面恢复法等方法,这些方法主要针对构造发育特征、地层剥蚀强度、气候、基准面等单个或者多个因素进行恢复分析^[52-60],定性地指导古地貌的恢复与研究。这些方法主要针对特定地质背景的古地貌恢复,虽然能一定程度反映古地貌的典型特征和时空演化规律,但同时也在分析中体现出针对某一地质特征的局限性。

通常还原物源区坡度、范围、输砂量等参数的关键在于剥蚀量和剥蚀边界。近些年来根据陆相盆地剥蚀和沉积充填差异,以剥蚀区、超剥区和超覆区为3个单元提出的“三区五步”剥蚀地貌恢复是还原古源-汇系统物源区地貌单元的有效方法之一^[13],其关键点在于:①划分剥蚀区、超剥区和超覆区;②依据回剥法进行超剥区剥蚀量恢复;③基于超覆区和超剥区沉积体系进行剥蚀量定量恢复;④根据陆相盆地构造作用的

幕式变化进行差异沉降校正;⑤以剥蚀量定量计算和差异沉降校正为基础的物源区剥蚀地貌整体恢复。基于“三区五步”方法进行的古源-汇系统物源区恢复的方法充分还原了深时到现今幕式构造运动导致的物源区和沉积区构造变形和隆升剥蚀的影响,充分还原了古物源区的地貌特征^[13]。整体而言,该方法在原有的地层趋势法古地貌恢复的基础上,通过精细的三维地震资料解释以及钻井约束,结合地貌演化规律,利用古源-汇系统定量化研究核心思路,对关键时期残余古地貌进行构造-沉积单元划分,明确物质来源和物质总量,选取沉积基准面进行差异沉降量校正。同时通过对剥蚀范围和沉积体积的标定,对剥蚀区物质总量和物质来源进行剥蚀量恢复。最终结合差异沉降校正和剥蚀量恢复完善沉积时期古地貌,在沉积时期古地貌基础上对各古源-汇单元进行划分。该方法可应用于各类型沉积盆地的原型盆地恢复。

上述“三区五步”方法在陆相盆地古源-汇系统定

量重建中得到了广泛的应用,提高了古地貌恢复的精度。图1为渤海湾盆地沙垒田凸起的古地貌形态恢复结果,可以看出各个时期的地貌特征及其演化得到了有效表征。孔店组-沙(沙河街组)四段沉积时期沙垒田凸起构造高点呈线状大规模延伸,凸起东、西受走滑断裂分割,凸起东、西两段物源高差最大,反映出该时期是物质剥蚀和沉积强度最大阶段(图1d);沙三段沉积时期,海域盆地处于应力拉张背景,先存断裂的强烈活动使得凸起周缘凹陷间分隔性明显增强。凸起区经过地貌恢复,西段的构造高点靠近凸起南部,东段构造高点靠近中部,经过不断的物质剥蚀,东、西两段凸起高差均不同程度降低(图1c);沙一、沙二段沉积时期,盆地继承性裂陷,边界断裂活动性减弱,走滑作用逐渐成为主要应力作用。凸起东、西两段整体地形较为平缓,凸起区与凹陷区垂向高差明显减小(图1b);东(东营组)三段沉积时期,边界断裂活动性逐步减弱,走滑作用逐渐成为主要应力作用,多伴生调节断裂,由于沙河街组的填平补齐作用,在东营组沉积时期前,地形坡度相

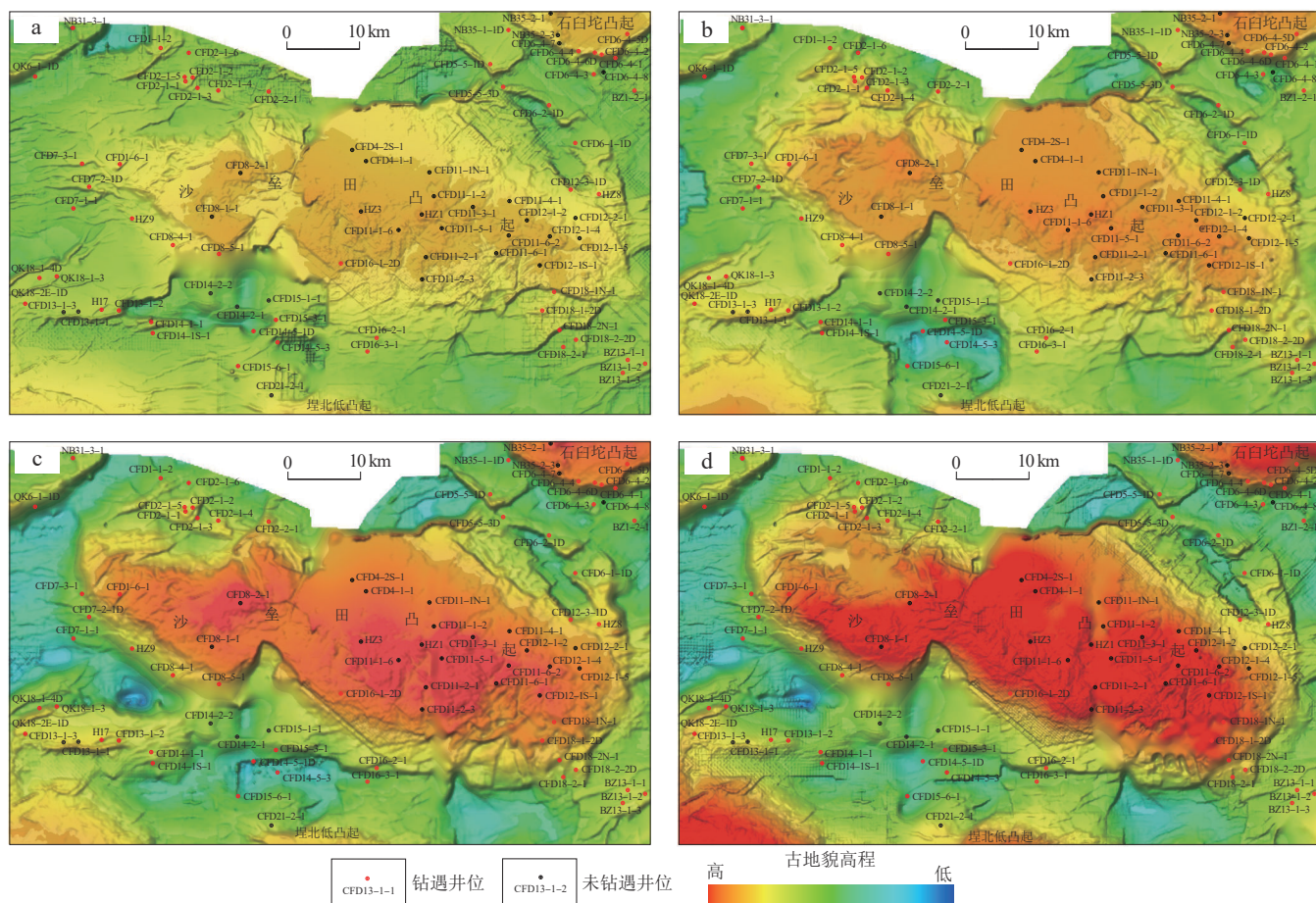


图1 渤海湾盆地沙垒田凸起古近纪古地貌恢复结果

Fig. 1 Paleo-geomorphology restoration for the Paleogene Shaleitian salient, Bohai Bay Basin

a. 东三段沉积时期; b. 沙一、沙二段沉积时期; c. 沙三段沉积时期; d. 孔店组-沙四段沉积时期

对平缓,该时期物源凸起持续萎缩,凸起供源效应进一步减弱(图1a)。

1.1.3 物源区水系重建

陆相盆地古源-汇系统的水系空间和平面发育特征是还原系统内物源区与沉积区结合程度的关键指标。水系的规模和发育样式通常与物源区的供给强度、沉积区的主要沉积体堆积特征等直接相关,是连接物源区和沉积区的关键一环^[20]。与现今陆相盆地水系发育和刻画不同,古源-汇系统水系的重建需要依赖于对物源区剥蚀地貌重建之后的流域特征进行差异化分析,明确主要水系发育规模和频次。

物源区水系重建的主要难点在于:①现今观察的水系通常是后期构造作用变形改造之后的残余水系,与沉积时期水系的规模相比存在较大误差;②水系的分布范围和输砂能力难以量化对比^[21,61];③水系的相对级次高低难以明确。尽管目前存在较多物源区地貌恢复方法,但是目前国内针对物源区水系的重建方法鲜有报道。从基于DEM(Digital Elevation Model)的现代水系分析方法发展起来的古源-汇系统物源区水系重建方法近年来被应用于渤海湾盆地和东海陆架盆地之中,被认为是古源-汇系统物源区水系量化重建的有效手段^[62]。基于物源区高程的古水系重建方法以物源区流域范围为基础,通过对不同流域内水系方向进行矢量化判别,同时对主物源方向进行量化分析,确定水系的规模,进行级次划分,明确各个区带

内不同级次水系发育的频次和主物源方向,是量化重建物源区水系的有效方法。

基于沙垒田凸起沙三段沉积时期古地貌恢复结果,对沙垒田凸起沙三段古水系进行量化自动拾取(图2)。具体步骤如下:①古地貌DEM栅格数据,将恢复的古地貌网格数据通过Global Mapper转换为DEM文件;②填洼处理,在水文分析模块中进行填洼处理,对照原始的DEM栅格数据进行检查,判断是否存在由于数据误差所造成的伪洼地,从而消除误差,保证古水系流向的精度;③古水系流向分析,采用D8算法开展分析,其特点是计算速度快,能够很好地反映出地形对地表径流的控制影响作用;④河网分级,基于流量统计,将沙垒田凸起的流量阈值设置为500,可明显分辨出地表径流古水系,进而根据阈值范围对古水系进行分级并进行矢量化处理,直观呈现河网的形态;⑤古水系恢复,尽管呈现出来的像是连续的河流,但实则还只是离散点,因此利用流向数据和栅格数据将其连接起来,记录河网中结点之间的连接信息;⑥流域单元自动拾取划分,根据拾取的古水系信息,利用水文分析中的流域分析方法对流域单元进行自动划分,划分出a—r共18个流域单元(图2,图3)。值得注意的是,受控于客观地震数据体的分辨率,主观层位解释的精度、追踪密度和差值方法,精确重建高分辨率深时古地貌仍存在较大挑战,这也直接决定了流域盆地内不同河网等级的发育和最终拾取的古水系精度。

沙三段沉积时期沙垒田凸起东段整体以太古宇花

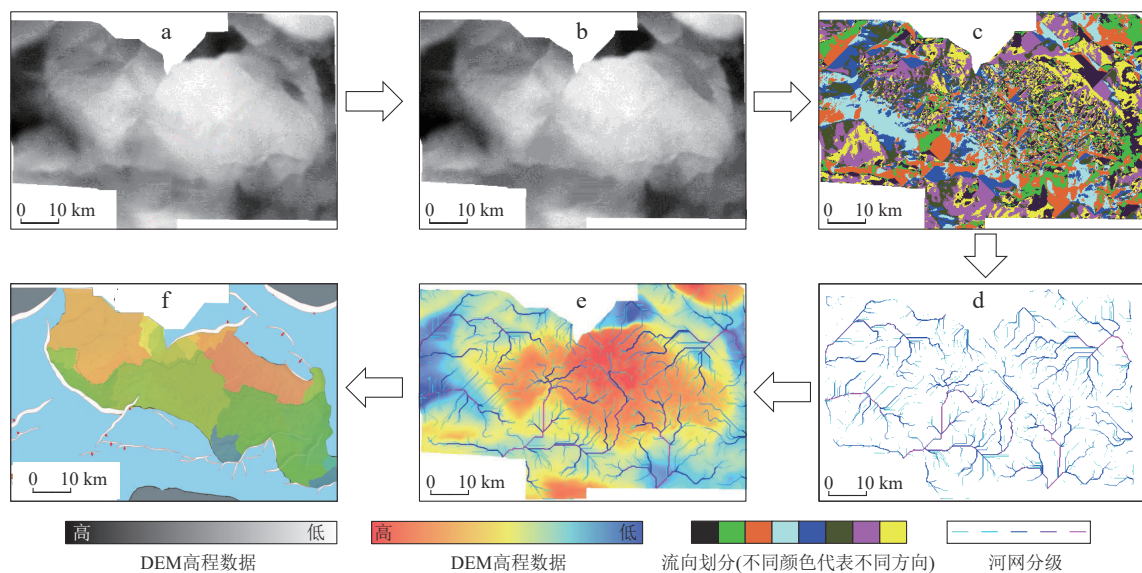


图2 渤海湾盆地沙垒田凸起古水系自动拾取流程

Fig. 2 Workflow for automatic picking of a paleo-drainage system in the Shaleitian salient, Bohai Bay Basin

a. DEM栅格图;b. 填洼;c. 流向分析,流量计算和阈值设置;d. 河网分级;e. 古水系恢复;f. 流域单元自动拾取

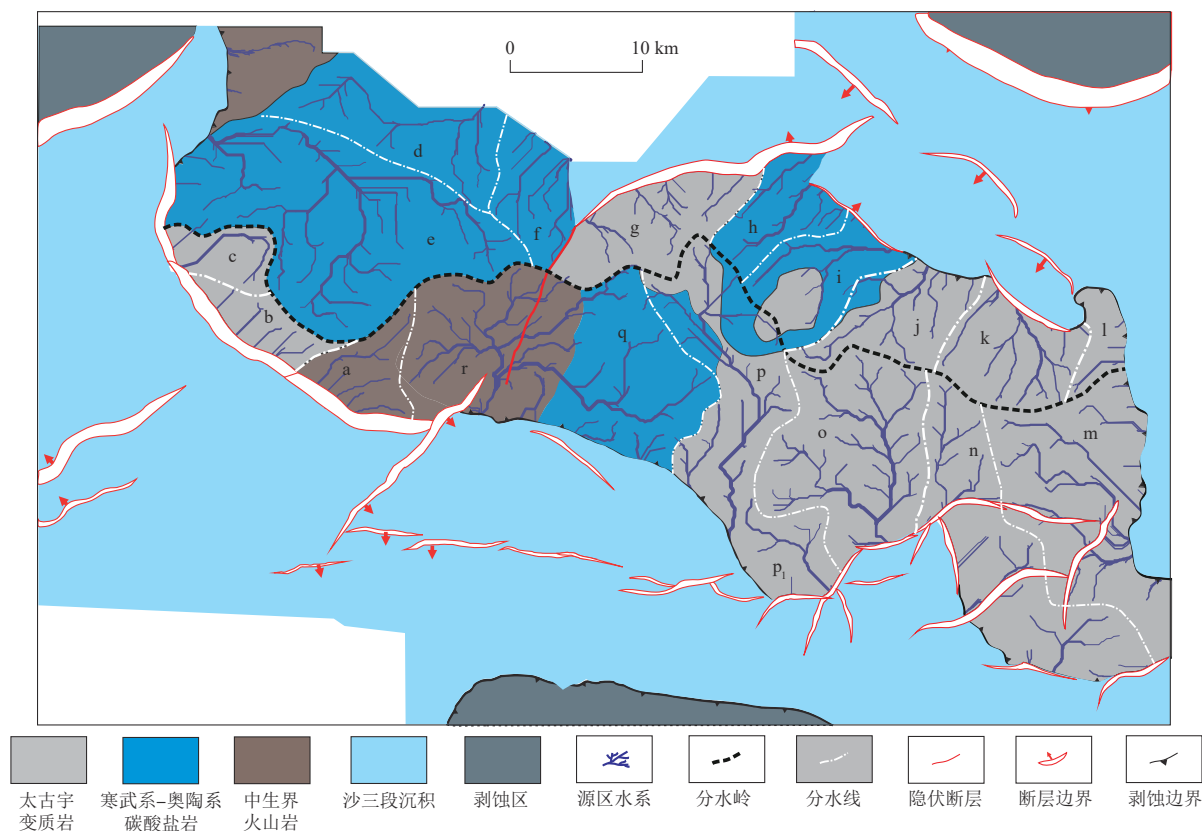


图3 渤海湾盆地沙垒田凸起沙三段沉积时期古水系分布特征

Fig. 3 Distribution of a palaeo-drainage system during the deposition of the third member of Shahejie Formation in the Shaleitian salient, Bohai Bay Basin

(a—r 为划分的18个流域单元编号)

岗岩发育为主,在南部西侧和北部局部发育奥陶系碳酸盐岩,其中在凸起东段南部变质岩区断裂缓坡带发育树枝状水系,水系支流与干流之间呈现锐角相交(图3),支流相对发育,分支比为2.84~3.26,河网发育系数在1.25左右,河网密度大于0.5 km/km²。凸起东段碳酸盐岩发育区,其边界条件均为断裂缓坡带,水系多呈现为近平行状特征,支流间相互平行发育,数量少且短,分支比为2.00~2.47,河网发育系数小(0.735~1.118),河网密度小于0.5 km/km²(图3)。沙垒田凸起西段以分水岭为界,以北大面积发育碳酸盐岩,发育近平行状水系,河网发育系数在1.19左右,河网密度小于0.5 km/km²。凸起分水岭以南西侧局部太古宇变质岩发育区域由于物源区高差大,有效物源区面积小,且北西向边界断裂发育,导致水系被改造,形成单支干流平行状水系,支流几乎不发育(图3)。凸起西段南部东侧中生界火成岩发育区域,物源区有效面积大,水系样式以扇形为主,支流高度发育且长,从不同方向汇入干流,形成由干流和支流组成的骨扇状水系(图3)。

1.2 沉积区重建

相对于物源区来说,陆相盆地古源-汇系统沉积区在沉积后期主要经历了规模较小的剥蚀以及差异化构造变形,因此沉积区重建的关键在于沉积区边界的重建和沉积时期地貌的重建两个方面^[13]。

1.2.1 沉积区边界重建

沉积区边界的重建是明确沉积区范围、沉积物后期剥蚀总量和恢复沉积原型盆地的基础。尽管沉积区和物源区都经历了相同的构造运动,但是在构造变形中通常存在着截然不同的变形结果。由于沉积区通常也是沉降的中心区域,在后期构造变形过程中的剥蚀范围和剥蚀量相对较小,因此整体上能保存沉积区的大部分原貌。然而,由于差异化的剥蚀程度,通常都难以还原真实的边界范围,这对古源-汇系统重建的准确性产生了较大的影响,尽管如此,前人对沉积区边界重建的研究并不多见。基于超剥区、超覆区沉积体和沉积边界的恢复为沉积区边界类型、边界样式、坡角等

的重建和划分提供了可靠的依据。同时基于前积角度和前积终止方向的判别为沉积区的边界拾取提供了可行的方案,这能更好地反映沉积时期的物源和沉积体系的配置关系,也是还原沉积区沉积体系类型的基础。

1.2.2 沉积区地貌校正

沉积区地貌校正的基础是明确盆地沉积中心、沉积边界和沉积物主要堆积场所的关键^[63-64]。回剥法恢复古地貌是目前最常用的沉积区地貌校正的方法之一,也是可信度和可操作性较强的古地貌恢复方法之一。回剥法古地貌恢复是在地层厚度后期无明显变化,地层无明显剥蚀的情况之下,对原始地貌的沉积恢复,侧重于对地层参数和特征的充分分析。回剥法的核心是对不同沉积区沉积物总量和供源方向的恢复,通过对沉积区物质总量、沉积中心、斜坡发育方向等参数的综合拾取,明确盆外区域物源的主要供给方向和时空演化规律。主要通过对残余地层厚度参数、压实校正参数、负载校正参数和古水深参数进行综合分析,绘制沉降量图、构造沉降速率图、古地理单元图和古地貌形态图等相关图件,对古地貌特征进行呈现^[57]。许多实例都证实,依靠回剥法对沉积区地貌校正沉积地层保存较好的沉积区具有很好的效果,然而在沉积后期遭受剥蚀较为严重的区域,需要在进行剥蚀通量恢复的前提下进行校正分析,只有这样才能取得较为准确的结果。

2 古源-汇系统单元级次划分

不管是海相盆地还是陆相盆地的古源-汇系统研究,都很少涉及古源-汇系统的级次划分。实际上,在现代源-汇和古源-汇系统中,其内部的源-汇耦合单元是可以分级次的。古源-汇系统单元级次划分是古源-汇系统量化研究、多尺度重建、精细解剖的基础,为古源-汇系统单元的表征及差异性分析提供支持。

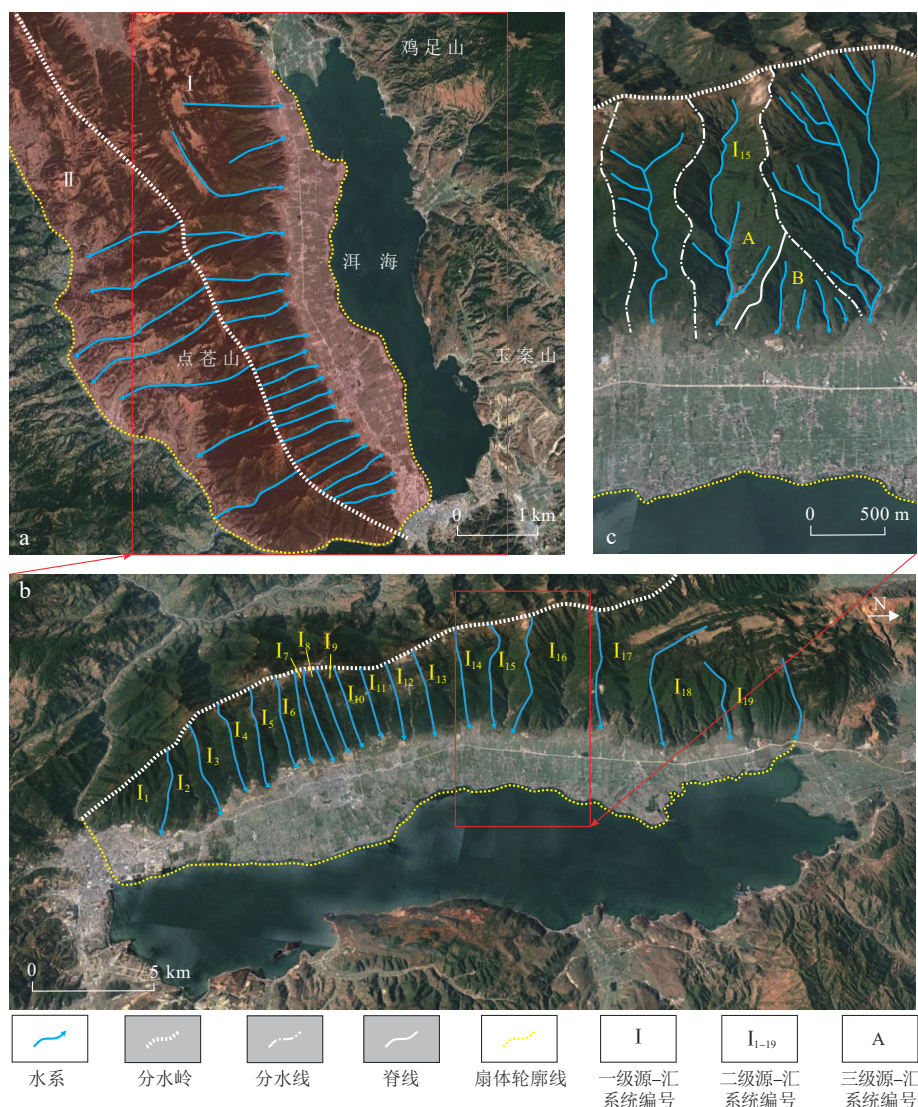
陆相湖盆古源-汇系统级次划分的一种方法是进行“三线三级”源-汇系统划分^[26, 60, 65]。三线指的是分水岭、分水线、脊线,作为划分一级、二级和三级源-汇系统级次的界线和依据。在地理科学领域,分水岭是指分隔相邻两个流域的山岭或高地;分水线是指是由于地形向两侧倾斜,使降水分别汇集到两条河流中去的脊岭线。脊线一词来源于气象学领域,指在海拔相同的平面上,气压高于毗邻三面而低于另一面的区域。根据三线的初始定义,在三级源-汇系统级次划分过程中,进一步明确分水岭、分水线

和脊线的地质含义,尤其是从自然地理科学领域的角度对脊线的地质意义进行重新定义、解释,用于源-汇系统级次划分。

分水岭-分水线-脊线三级古源-汇单元级次划分方法:分水岭分隔相邻两个流域的山岭或高地,通过凸起轴向展布与两侧坡向变化,追踪与之平行的分水岭,垂直或近垂直于分水岭的水系被分为流向相反的流域,划分一级古源-汇单元;分水线考虑凸起边缘构造沉降量及构造样式差异,短轴方向追踪对应的分水线,分水线的末端与分水岭垂交、斜交相连,划分二级源-汇单元;脊线考虑水系能否回溯到分水岭以及地形坡度、水系发育系数、主水系与分支水系组合等参数差异,脊线的末端与分水线垂交、斜交相连,划分三级源-汇单元(图4)。

依据建立的“三线三级”源-汇系统级次划分方法,对洱海西岸“点苍山-洱海”现代源-汇系统进行级次划分(图4)。可以看出,白色虚线为点苍山最高点连线作为分水岭,沿点苍山凸起长轴方向展布,两侧水系流向完全相反,划分为东、西两个一级源-汇系统Ⅰ和Ⅱ(图4a),一级源-汇系统发育的水系均与分水岭垂直或近垂直。东侧一级源-汇系统Ⅰ,白色点线是源-汇系统短轴方向拾取对应的分水线,以分水线为边界建立二级源-汇系统(图4b),将一级源-汇系统依次划分为19个二级源-汇系统(从南到北依次为1~19号),组成二级源-汇系统的单支区域性水流畅向基本平行。选取15号二级源-汇系统,综合考虑地形坡度、主水系与分支水系组合关系以及沉积区沉积体特点,在二级源-汇系统中拾取对应脊线(白色实线),以脊线为边界,划分出三级源-汇系统(图4c)。将15号二级源-汇系统划分为A和B两个三级源-汇系统:三级源-汇系统A中多条分支水系汇聚成一条主水系可回溯至分水岭,是具有稳定地貌学研究意义的汇水盆地;三级源-汇系统B由多条近平行的水系组成,水系未能回溯到分水岭,是局部汇水盆地(发展中的汇水盆地,瞬态地貌)。

对于古源-汇系统级次划分,基于重建的物源区和沉积区的古地貌和古水系,进行人工或自动划分,划分的过程中,需要用地震反射剖面进行验证、校正。与现代陆相盆地源-汇系统划分不同的是,古源-汇系统的分水岭、分水线和脊线的拾取和刻画更为复杂,需要明确分水岭、分水线和脊线在沉积后期的稳定性。与现代源-汇系统边界单元相比,古代源-汇系统的物源区边界单元主要呈现出两种不同的类型:稳态型和变革型。稳态型边界单元指示物源区凸起边界在演化过程中的高点位置相对稳定,其物源区持续剥蚀并且向沉

图4 “三线三级”源-汇系统单元划分^[64]Fig. 4 “Three-line and three-level” source-to-sink unit division method^[64]

a. 一级源-汇系统; b. 二级源-汇系统; c. 三级源-汇系统

积区供源,稳态型边界控制下的古源-汇单元划分具有与现代陆相盆地源-汇单元划分相近的划分方法,在恢复后的剥蚀地貌基础上能对边界进行较好的划分。变型型凸起边界的古源-汇单元划分更为复杂,不同于稳态型边界,这种凸起边界的分水岭位置不稳定,在剥蚀过程中通常由于受到构造应力的作用而不断发生迁移,在进行古源-汇单元划分的过程中需要对分水岭的实际位置进行界定。

3 古源-汇系统耦合模式

古源-汇系统耦合模式是古源-汇系统进行沉积区沉积体系预测的核心工作。基于古源-汇系统的级次划分,可以开展古源-汇系统耦合模式分析。根据

古源-汇系统物源区流域单元和沉积区沉积体面积、形态及其二者组合、配置关系,可以划分出4种耦合模式:哑铃型、球拍型、奖杯型和标枪型。哑铃型是指物源区流域单元面积与汇区沉积体面积基本相近,反映的是一种“大源大汇”的古源-汇系统耦合模式,其物源区与沉积区比例接近于1:1,通常发育发散状水系和树枝状水系,水系发育程度高,且分支比较大(图5a);球拍型是指较小的物源区流域单元面积和较大的汇区沉积体面积的组合样式,反映出“小源-大汇”型古源-汇系统耦合模式,通常指示该古源-汇系统物源区母岩成砂效率高,输砂能力强,颗粒质含量较多而溶解质含量相对较低,其物源区与主体汇区比例明显小于1:1,通常只发育单支或多支干流水系,水系的分叉系数小,且水系级别较低(图5b);奖杯型

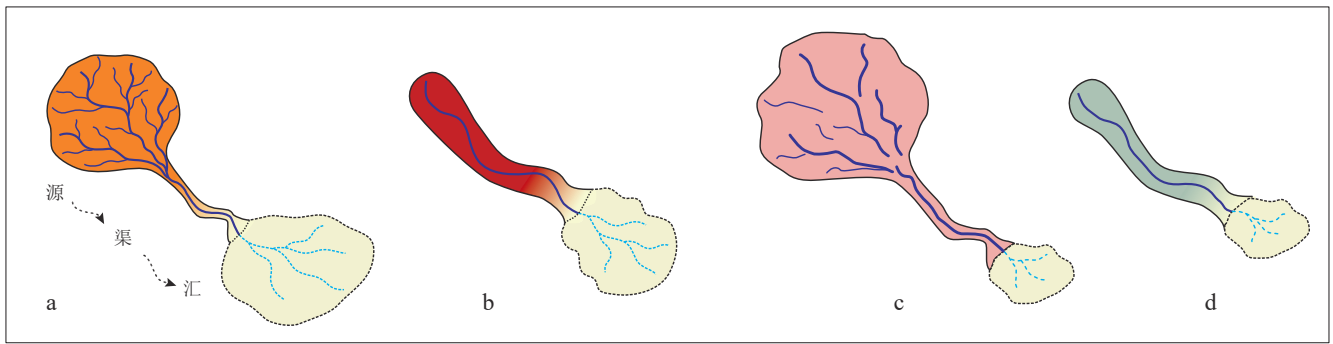


图5 源-汇系统耦合模式示意图

Fig. 5 Sketches showing the “dumbbell”, “racket”, “trophy” and “javelin” coupling modes of source-to-sink systems

a. 哑铃型; b. 球拍型; c. 奖杯型; d. 标枪型

是指物源区流域单元面积大于沉积区沉积体面积,呈现出“大源-小汇”型古源-汇系统耦合模式,通常指示该古源-汇系统物源区母岩成砂效率低、溶解质较多,剥蚀的沉积物较难保存于沉积区,物源区的水系也有一定程度的发育,其物源区与主体汇区比例明显大于1:1,产生这种差异的原因通常与颗粒质和溶解质的占比有关(图5c);标枪型是指物源区流域单元面积和沉积区沉积体均不太发育,呈现出“小源-小汇”型古源-汇系统耦合模式,通常指示该古源-汇系统物源区母岩成砂效率低、溶解质较多,水系不发育,沉积区沉积体不发育(图5d)。不同类型的古源-汇系统耦合模式一定程度上是物源区基岩类型、输导搬运通道的搬运方式和能力以及沉积区水体作用强度的综合体现^[66]。

针对陆相盆地古源-汇系统重建及耦合,在渤海湾盆地渤南低凸起和沙垒田凸起的实例中,基于不同背景下的古源-汇系统重建和耦合分析,在储层分布预测和对比中取得了较好的预测效果。

渤南低凸起西北洼的勘探实践中存在沉积体通量与物源面貌不匹配的问题,在对低凸起西段构造演化及断裂活动性分析后发现,渤南低凸起西段北侧边界断裂活动导致凸起北侧区域发生沉降,在这一时期凸起供源面积及高差骤变,针对这一时期的古地貌恢复具有必要性。利用“三区五步”法重建渤南低凸起西段沙一段沉积时期古地貌,对比发现恢复前、后供源面积及高差。基于“三线三级”古源-汇系统单元划分方法,分不同级次明确分水岭、分水系和脊线的位置,明确关键地质时期的地貌特征,细化水系特征与差异以及优势入口,统计关键古源-汇参数,在渤海湾盆地渤南低凸起西支重建3个典型古源-汇系统(A, B和C)(图6)。其中, A区古源-汇系统的物源区以干流型水

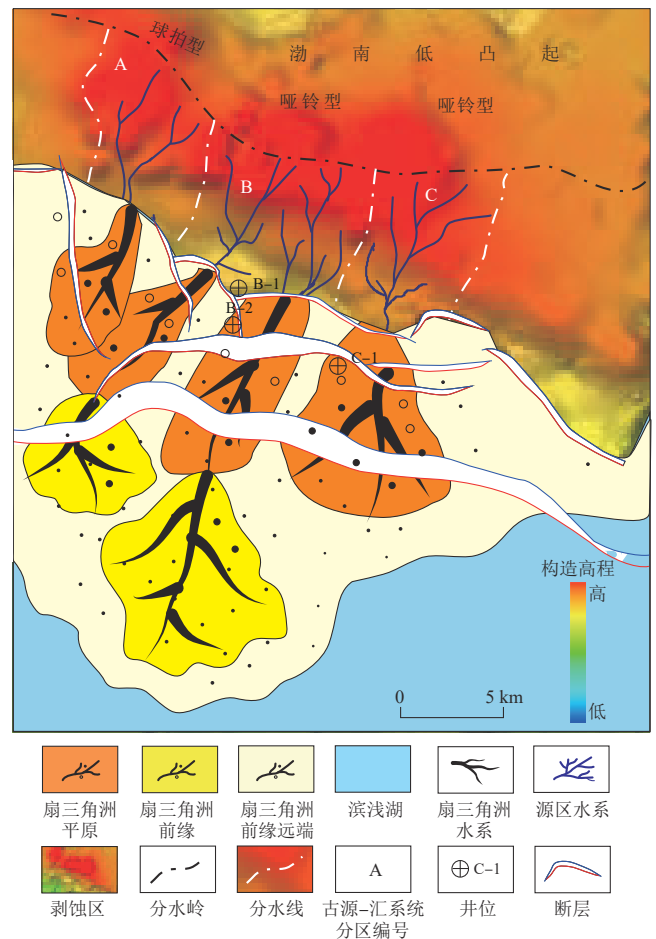


图6 渤南低凸起古近纪球拍型和哑铃型古源-汇系统耦合模式

Fig. 6 The “dumbbell” and “racket” coupling modes of a Paleogene source-to-sink system in the Bonan low salient

系为主,水系分叉系数较低,与沉积区组合形成典型的球拍型古源-汇系统,在这种高角度斜坡背景下发育的扇三角洲沉积,其规模相对于辫状河三角洲较小; B和C区与A区背景相同,具有相似的边界条件,但是整体上水系呈树枝状分布,与汇区相对大规模扇三角洲呈典型的哑铃型耦合模式。

基于渤南低凸起孔店组的有限钻井的岩心、岩屑组分观察分析发现,渤南低凸起B和C古源-汇系统的孔店组岩性主要为砂砾岩,砾石成分多样,主体以火成岩砾石为主,砾石磨圆分选较差,镜下薄片观察发现以砂质支撑为主,杂基含量较高,属于近源快速堆积。基于古地貌恢复结果对物源区水系进行拾取,主要发育树枝状水系,分支比约为3.27,河网系数为1.47,河网密度 1.1 km/km^2 左右,是一种优势供给水系,并且水系受控于古沟谷并聚于黄河口西北洼,使得黄河口西北洼成为优势沉积区(图6)。与A区古源-汇系统相比,B区和C区古源-汇系统孔店组沉积时期物源面积和高差较大,断裂活动性更强,发育侵蚀和搬运能力更强的树枝状水系,且供源母岩为火成岩,能够提供的颗粒质更多,有利于沉积厚度大、面积广的砂体。

古源-汇系统研究中,沉积时期的古地貌及母岩岩性是影响沉积通量及沉积体系的重要因素。渤海海域沙垒田凸起区,经过地貌恢复后该区主要地貌边界类型为缓坡背景,并且断裂发育程度较低(图7)。利用ArcGIS定量水系拾取技术发现,该区发育树枝状水

系,分支比约为2,河网发育系数约0.91,河网密度 0.34 km/km^2 左右。究其主要原因,该时期主要供源母岩为碳酸盐岩,在缓坡地貌和稳定裂后热沉降构造背景下不利于下切型的断槽及沟谷通道发育,因此主要以树枝状水系为主。

与渤南低凸起相比,沙垒田凸起物源面积较大达 241 km^2 (图7),但断裂活动性较弱,属于缓坡背景。虽然发育树枝状状水系,但供源母岩以碳酸盐岩为主,易于保存的颗粒质供给有限,在碳酸盐岩砾石搬运过程中不断受到溶蚀,形成厚度及展布面积都较小的砂体,多扇体累计面积 71 km^2 ,属于典型的奖杯型古源-汇系统。辽东低凸起属于后期隆升型凸起,在新生代早期不存在,由于后期构造差异升降才形成,源区面积较小,仅 10 km^2 左右,导致其供源效应弱,所受剥蚀作用较少,古水系发育程度较低。利用ArcGIS定量水系拾取技术研究发现,辽东低凸起东侧主要发育一系列平行或近平行单支水系,规模较小,对应沉积区扇体沉积面积较小,单个扇体小的仅 $3 \sim 7 \text{ km}^2$,属于典型标枪型古源-汇系统(图8)。

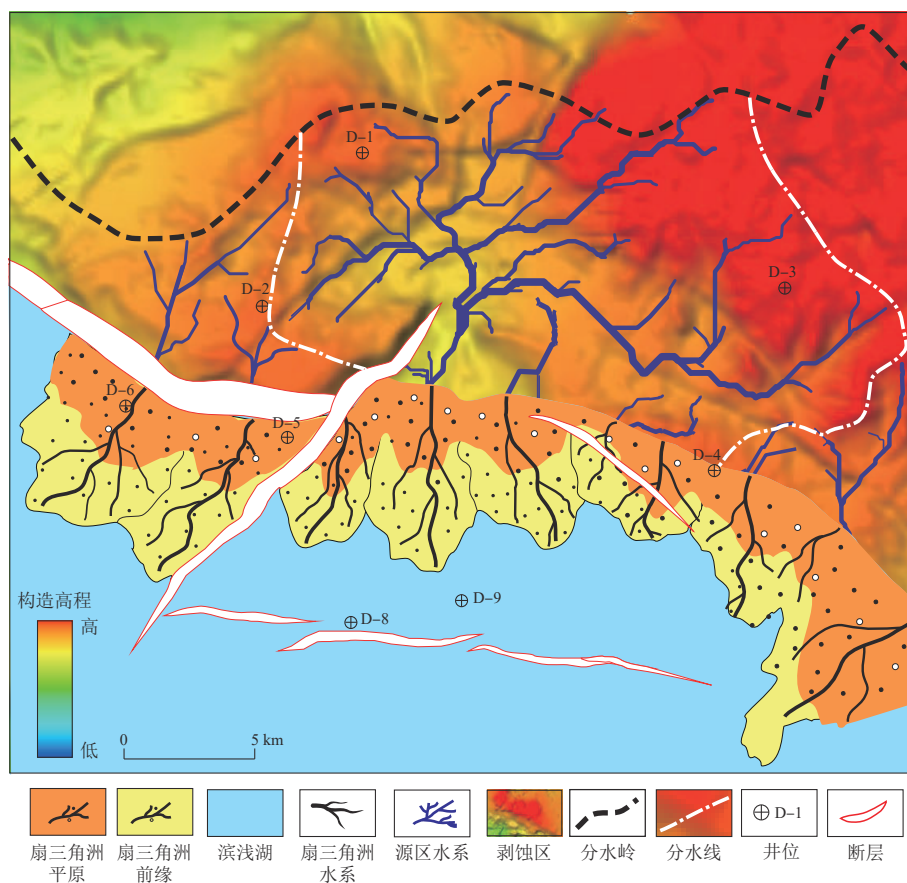


图7 沙垒田凸起古近纪奖杯型古源-汇系统耦合模式

Fig. 7 The "trophy" coupling mode of a Paleogene source-to-sink system in the Shaleitian salient

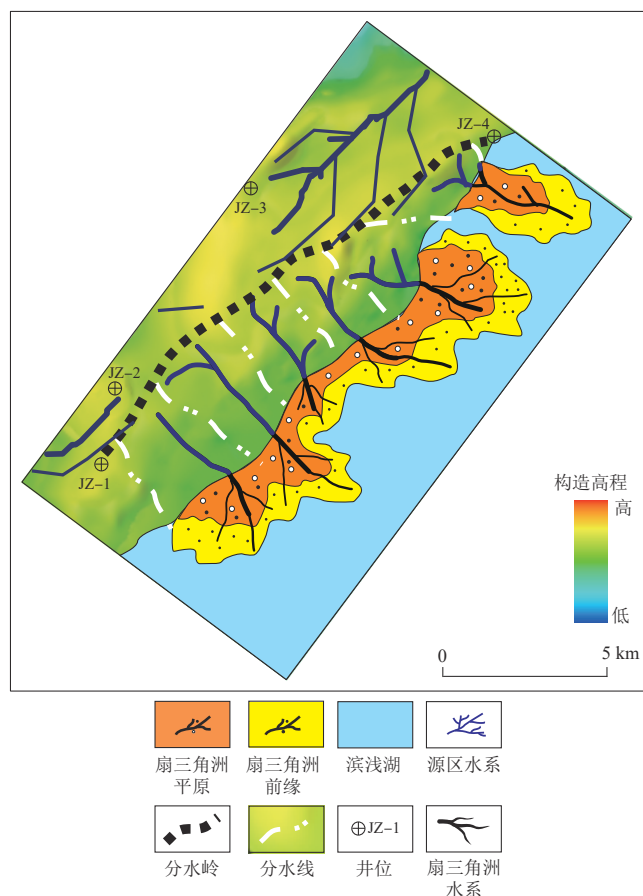


图8 辽东低凸起古近纪标枪型古源-汇系统耦合模式
Fig. 8 The "javelin" coupling mode of a Paleogene source-to-sink system in the Shaleitian salient

4 结论

1) 物源区重建是陆相盆地古源-汇系统重建的关键,物源区重建的核心是对物源范围的示踪、物源区地貌、岩性以及水系的拾取和刻画。基于高精度三维地震的地球物理方法对物源来源和物源输导过程的刻画具有高精度的优势;以“三区五步”为核心的物源区地貌恢复技术、基于高程数据的水系多级拾取技术是重建物源区深时地貌和水系的最新研究方法和重要手段。

2) 沉积区重建关键是原始沉积边界的厘定和沉积时期地貌校正,回剥法和原始坡角恢复法是恢复超剥区内沉积边界的有效手段。在沉积地貌校正中,需充分考虑后期构造变形对沉积区地貌造成的影响,选取合适的基准面进行差异沉降和压实校正是还原沉积区地貌的有效方法。

3) 陆相盆地古源-汇系统级次划分的代表方法是“三线三级”法,根据分水岭、分水线和脊线可以进行湖

盆一级、二级、三级源-汇系统划分。分水岭、分水线和脊线的拾取是古源-汇系统级次划分的关键。

4) 基于古源-汇系统物源区流域单元与沉积区沉积体的面积、形态组合、配置关系,建立哑铃型、球拍型、奖杯型和标枪型4种古源-汇系统耦合模式。这些耦合模式综合反映了物源区基岩类型、输导搬运通道的搬运方式和能力以及沉积区水体作用强度等因素,是沉积区有利目标预测的基础。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. *中国科学: 生命科学*, 2022, 52(4): 534-574.
YANG Yuanhe, SHI Yue, SUN Wenjuan, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2022, 52(4): 534-574.
- [3] WALSH J P, WIBERG P L, AALTO R, et al. Source-to-sink research: Economy of the earth's surface and its strata[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 1-6.
- [4] 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 等. 沙垒田凸起西部断裂陡坡型源-汇系统[J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1883-1896.
LIU Qianghu, ZHU Xiaomin, LI Shunli, et al. Source-to-sink system of the steep slope fault in the western Shaleitian uplift[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1883-1896.
- [5] 李顺利, 朱筱敏, 刘强虎, 等. 沙垒田凸起古近纪源-汇系统中有利储层评价与预测[J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1994-2009.
LI Shunli, ZHU Xiaomin, LIU Qianghu, et al. Evaluation and prediction of favorable reservoirs in source-to-sink systems of the Palaeogene, Shaleitian uplift[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1994-2009.
- [6] 朱红涛, 朱筱敏, 刘强虎, 等. 层序地层学与源-汇系统理论内在关联性与差异性[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 763-776.
ZHU Hongtao, ZHU Xiaomin, LIU Qianghu, et al. Sequence stratigraphy and source-to-sink system: Connections and distinctions[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 763-776.
- [7] 朱筱敏, 陈贺贺, 葛家旺, 等. 陆相断陷湖盆层序构型与砂体发育分布特征[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 746-762.
ZHU Xiaomin, CHEN Hehe, GE Jiawang, et al. Characterization of sequence architectures and sandbody distribution in continental rift basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 746-762.

- [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] PRIZOMWALA S P, BHATT N, BASAVIAH N. Provenance discrimination and source-to-sink studies from a dryland fluvial regime: An example from Kachchh, western India[J]. International Journal of Sediment Research, 2014, 29(1): 99–109.
- [10] LIU J T, HSU R T, HUNG J J, et al. From the highest to the deepest: The Gaoping River–Gaoping Submarine Canyon dispersal system[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 153: 274–300.
- [11] 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(5): 512–531.
- [12] SU Ming, HSIUNG K H, ZHANG Cuimei, 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.
- [13] ZHAO Qian, ZHU Hongtao, ZHANG Xiangtao, et al. Geomorphologic reconstruction of an uplift in a continental basin with a source-to-sink balance: An example from the Huizhou–Lufeng uplift, Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 128: 104984.
- [14] 庞雄, 彭大钧, 陈长民, 等. 三级“源—渠—汇”耦合研究珠江深水扇系统[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 857–864.
PANG Xiong, PENG Dajun, CHEN Changmin, et al. Three hierarchies “source-conduit-sink” coupling analysis of the Pearl River deep-water fan system[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6): 857–864.
- [15] 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.
- [16] HINDERER M. From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales[J]. Sedimentary Geology, 2012, 280: 21–59.
- [17] ALLEN P A. From landscapes into geological history[J]. Nature, 2008, 451(7176): 274–276.
- [18] ALLEN P A. Time scales of tectonic landscapes and their sediment routing systems[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2008, 296(1): 7–28.
- [19] BARTOL J, MATENCO L, GARCIA-CASTELLANOS D, et al. Modelling depositional shifts between sedimentary basins: Sediment pathways in Paratethys basins during the Messinian Salinity Crisis[J]. Tectonophysics, 2012, 536/537: 110–121.
- [20] BHATTACHARYA P, BHATTACHARYA J P, KHAN S D. Paleo-channel reconstruction and grain size variability in fluvial deposits, Ferron Sandstone, Notom Delta, Hanksville, Utah[J]. Sedimentary Geology, 2015, 325: 17–25.
- [21] ANTHONY E J, JULIAN M. Source-to-sink sediment transfers, environmental engineering and hazard mitigation in the steep Var River catchment, French Riviera, southeastern France[J]. Geomorphology, 1999, 31(1/4): 337–354.
- [22] BENDA L, DUNNE T. Stochastic forcing of sediment routing and storage in channel networks[J]. Water Resources Research, 1997, 33(12): 2865–2880.
- [23] BRISSET E, MIRAMONT C, ANTHONY E J, et al. Sediment budget quantification of a sub-Alpine river catchment since the end of the last glaciation[J]. Catena, 2014, 114: 169–179.
- [24] CASTELLTORT S, VAN DEN DRIESCHKE J. How plausible are high-frequency sediment supply-driven cycles in the stratigraphic record?[J]. Sedimentary Geology, 2003, 157(1/2): 3–13.
- [25] COVAULT J A, GRAHAM S A. Submarine fans at all sea-level stands: Tectono-morphologic and climatic controls on terrigenous sediment delivery to the deep sea[J]. Geology, 2010, 38(10): 939–942.
- [26] 朱秀, 朱红涛, 曾洪流, 等. 云南洱海现代湖盆源—汇系统划分、特征及差异[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 2010–2024.
ZHU Xiu, ZHU Hongtao, ZENG Hongliu, et al. Subdivision, characteristics, and varieties of the source-to-sink systems of the modern lake Erhai Basin, Yunnan Province[J]. Earth Science, 2017, 42(11): 2010–2024.
- [27] 徐长贵. 陆相断陷盆地古源—汇时空耦合控砂原理: 基本思想、概念体系及控砂模式[J]. 中国海上油气, 2013, 25(4): 1–11, 21.
XU Changgui. Controlling sand principle of source-sink coupling in time and space in continental rift basins: Basic idea, conceptual systems and controlling sand models[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(4): 1–11, 21.
- [28] 龚承林, 齐昆, 徐杰, 等. 深水源—汇系统对多尺度气候变化的过程响应与反馈机制[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 231–252.
GONG Chenglin, QI Kun, XU Jie, et al. Process-product linkages and feedback mechanisms of deepwater source-to-sink responses to multi-scale climate changes[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 231–252.
- [29] 万延周, 张年念. 东海盆地西湖凹陷花港组物源分析[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(35): 24–27.
WAN Yanzhou, ZHANG Niannian. Analysis on provenance in Huagang Formation of Xihu Depression in the East China Sea basin[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(35): 24–27.
- [30] 秦兰芝, 刘金水, 李帅, 等. 东海西湖凹陷中央反转带花港组锆石特征及物源指示意义[J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 498–504, 526.
QIN Lanzhi, LIU Jinshui, LI Shuai, et al. Characteristics of

- zircon in the Huagang Formation of the central inversion zone of Xihu Sag and its provenance indication [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2017, 39(4): 498–504, 526.
- [31] 韩志宇, 王非, 师文贝. 沉积岩定年及应用: 问题与展望[J]. *沉积学报*, 2022, 40(2): 360–379.
- HAN Zhiyu, WANG Fei, SHI Wenbei. Dating and application for sedimentary rocks: Problems and prospects[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 360–379.
- [32] ZHAO Qian, ZHU Hongtao, ZHOU Xinhui, et al. Continental margin sediment dispersal under geomorphic control in Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 205: 108738.
- [33] 张青林, 张向涛, 许长海, 等. 裂变径迹热年代学在珠江口盆地渐新统珠海组物源分析中的应用[J]. *古地理学报*, 2022, 24(1): 129–138.
- ZHANG Qinglin, ZHANG Xiangtao, XU Changhai, et al. Application of fission track thermochronology in provenance analysis of the Oligocene Zhuhai Formation in Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(1): 129–138.
- [34] 李秋玲, 乔淑卿, 石学法, 等. 北极东西伯利亚陆架沉积物物源: 来自黏土矿物和化学元素的证据[J]. *海洋学报*, 2021, 43(3): 76–89.
- LI Qiuling, QIAO Shuqing, SHI Xuefa, et al. Sediment provenance of the East Siberian Arctic Shelf: Evidence from clay minerals and chemical elements [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 43(3): 76–89.
- [35] 呼其图, 关平, 王大华, 等. 柴达木盆地北缘东段中侏罗统物源分析——来自重矿物、元素地球化学及碎屑锆石年代学的证据[J/OL]. *沉积学报*: 1–25 [2023-02-01]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.044>.
- HU Qitu, GUAN Ping, WANG Dahua, et al. Provenance analysis of the Middle Jurassic in northeastern Qaidam Basin: Evidence from heavy minerals, elemental geochemistry and detrital zircon U-Pb geochronology [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*: 1–25 [2023-02-01]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.044>.
- [36] 马子宁, 韩中鹏, 李亚林, 等. 西藏南部康巴穹隆揭露历史分析: 来自低温热年代学的证据[J]. *沉积与特提斯地质*, 2022, 42(2): 300–309.
- MA Zining, HAN Zhongpeng, LI Yalin, et al. Exhumation history of the Kampa dome in the southern Tibet: Evidence from low-temperature thermochronology [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2022, 42(2): 300–309.
- [37] 黄勇, 付山岭, 赵成海, 等. 低温热年代学方法及其在矿床学研究中的应用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(4): 958–973.
- HUANG Yong, FU Shanling, ZHAO Chenghai, et al. Low-temperature thermochronology and its applications for studying ore deposits[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2021, 40(4): 958–973.
- [38] MALUSÀ M G, CARTER A, LIMONCELLI M, et al. Bias in detrital zircon geochronology and thermochronometry [J]. *Chemical Geology*, 2013, 359: 90–107.
- [39] 李小犁. 电子探针分析锆石 Hf 和 Ti 含量的结果意义与技术优势[J]. *岩矿测试*, 2023, 42(1): 89–101.
- LI Xiaoli. Electron probe microanalysis of Hf and Ti in zircon: Significance and advantage [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023, 42(1): 89–101.
- [40] SAYLOR J E, SUNDELL K E, SHARMAN G R. Characterizing sediment sources by non-negative matrix factorization of detrital geochronological data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 512: 46–58.
- [41] SUNDELL K E, SAYLOR J E. Unmixing detrital geochronology age distributions [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(8): 2872–2886.
- [42] VERMEESCH P. Multi-sample comparison of detrital age distributions[J]. *Chemical Geology*, 2013, 341: 140–146.
- [43] VERMEESCH P, RESENTINI A, GARZANTI E. An R package for statistical provenance analysis [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 336: 14–25.
- [44] BOJAR A V, BOJAR H P, OTTNER F, et al. Heavy mineral distributions of Maastrichtian deposits from the Hațeg Basin, South Carpathians: Tectonic and palaeogeographic implications [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 293(3/4): 319–328.
- [45] GARZANTI E, ANDÒ S. Chapter 29 plate tectonics and heavy mineral suites of modern sands [J]. *Developments in Sedimentology*, 2007, 58: 741–763.
- [46] MORTON A C, HALLSWORTH C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3/4): 241–256.
- [47] WELTJE G J. Quantitative analysis of detrital modes: Statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology [J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 57(3/4): 211–253.
- [48] ZHU Hongtao, ZENG Zhiwei, ZENG Hongliu, et al. 3D seismic data attribute-based characterization of volcanic reservoirs in the BZ34–9 Block, Bohai Bay Basin, eastern China [J]. *Geophysics*, 2020, 85(3): IM1–IM13.
- [49] ZHAO Qian, ZHU Hongtao, ZHOU Xinhui, et al. Tidal sand ridges seismic identification and its application in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin: Enlightenment to hydrocarbon exploration [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 212: 110246.
- [50] LI Guangxue, LI Pin, LIU Yong, et al. Sedimentary system response to the global sea level change in the East China seas since the last glacial maximum [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 139: 390–405.
- [51] SØMME T O, HELLAND–HANSEN W, MARTINSEN O J, et al. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source-to-sink systems: A basis for predicting semi-

- quantitative characteristics in subsurface systems [J]. *Basin Research*, 2009, 21(4): 361-387.
- [52] 任晓海, 刘子平, 周一博, 等. 威远地区龙马溪组地层沉积古地貌恢复及其意义[C]//第32届全国天然气学术年会(2020)论文集. 重庆: 中国石油学会天然气专业委员会, 2020: 407-413.
- REN Xiaohai, LIU Ziping, ZHOU Yibao, et al. Restoration of sedimentary palaeogeomorphology of Longmaxi Formation in Weiyuan area and its significance [C]//Proceedings of the 32nd National Natural Gas Academic Annual Conference (2020). Chongqing: Natural Gas Professional Committee of China Petroleum Institute, 2020: 407-413.
- [53] 程逸凡, 董艳蕾, 朱筱敏, 等. 准噶尔盆地春光探区白垩纪古地貌恢复及其控砂机制[J]. 古地理学报, 2020, 22(6): 1127-1142.
- CHENG Yifan, DONG Yanlei, ZHU Xiaomin, et al. Cretaceous paleogeomorphology restoration and its controlling mechanism on sand-bodies in Chunguang exploration area, Junggar Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(6): 1127-1142.
- [54] 刘国志. 古地貌恢复方法及过程——以渤海湾Z构造为例[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(11): 155-156.
- LIU Guozhi. Restoration methods and process of paleogeomorphology: A case study of Z structure in Bohai Bay [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2020, 40(11): 155-156.
- [55] 王红岩. 西湖凹陷曲流河三角洲古地貌恢复及沉积特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 318-327.
- WANG Hongyan. Paleogeomorphic restoration and sedimentary characteristics of meandering river delta in Xihu Depression, East China Sea [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2020, 47(3): 318-327.
- [56] 张晨, 李进步, 陈存良, 等. 苏里格东南区古地貌恢复及其与气水分布关系[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(3): 498-506.
- ZHANG Chen, LI Jinbu, CHEN Cunliang, et al. Palaeogeomorphologic restoration and relation to the distribution of gas and water in the southeast of Sulige area [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2019, 39(3): 498-506.
- [57] 左丽群. 古地貌恢复方法综述[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(3): 12-16, 21.
- ZUO Liqun. Review on methods of paleo-geomorphologic restoration [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2019, 33(3): 12-16, 21.
- [58] 李媛, 丁文秀, 林松. 基于钻井和地震数据恢复福山凹陷古地貌[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(9): 945-948.
- LI Yuan, DING Wenxiu, LIN Song. Restoration of paleogeomorphology in Fushan Sag based on drilling and seismic data [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(9): 945-948.
- [59] 袁慧, 吴晓明, 谭成仟, 等. 鄂尔多斯盆地洪德地区侏罗系古地貌恢复与油气成藏特征[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(4): 752-759.
- YUAN Hui, WU Xiaoming, TAN Chengqian, et al. Paleogeomorphology restoration and hydrocarbon accumulation characteristics of Jurassic in Hongde area, Ordos Basin [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2021, 41(4): 752-759.
- [60] 王振嘉, 张子为, 张延斌, 等. 靖边气田岩溶古地貌精细恢复及有利储层评价[J]. 内蒙古石油化工, 2021, 47(11): 113-117.
- WANG Zhenjia, ZHANG Ziwei, ZHANG Yanbin, et al. Detailed recovery of the karst paleogeomorphology in Jingbian gas field and its favorable reservoir evaluation [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2021, 47(11): 113-117.
- [61] AMIN I E, JACOBS A M. Accounting for sediment sources and sinks in the linear regression analysis of the suspended sediment load of streams: The Rio Puerco, New Mexico, as an example [J]. *Environmental Geosciences*, 2007, 14(1): 1-14.
- [62] ZENG Zhiwei, ZHU Hongtao, MEI Lianfu, et al. Multilevel source-to-sink (S2S) subdivision and application of an ancient uplift system in South China Sea: Implications for further hydrocarbon exploration [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 181: 106220.
- [63] ALLEN P A, HOVIUS N, HOVIUS N, et al. Sediment supply from landslide-dominated catchments: Implications for basin-margin fans [J]. *Basin Research*, 1998, 10(1): 19-35.
- [64] 施和生, 高阳东, 刘军, 等. 珠江口盆地惠州26洼“源-汇-聚”特征与惠州26-6大油气田发现启示[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 777-791.
- SHI Hesheng, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Characteristics of hydrocarbon source-migration-accumulation in Huizhou 26 Sag and implications of the major Huizhou 26-6 discovery in Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 777-791.
- [65] 陆威延, 朱红涛, 徐长贵, 等. 古源-汇系统级次划分方法及应用[J]. 地球科学, 2020, 45(4): 1327-1336.
- LU Weiyan, ZHU Hongtao, XU Changgui, et al. Methods and applications of level subdivision of source-to-sink system [J]. *Earth Science*, 2020, 45(4): 1327-1336.
- [66] LI Zhiyao, LIU Qianghu, ZHU Hongtao, et al. Compositional relationship between the source-to-sink segments and their sedimentary response to diverse geomorphology types in the intrabasinal lower uplift of continental basins [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 123: 104716.

(编辑 张亚雄)