



地质学报

Acta Geologica Sinica

ISSN 0001-5717, CN 11-1951/P

《地质学报》网络首发论文

题目: 海底峡谷汇流过程对盐底辟响应的定量分析:以墨西哥北部陆坡为例
作者: 许鸿翔, 葛智渊
DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025088
收稿日期: 2025-03-11
网络首发日期: 2025-06-25
引用格式: 许鸿翔, 葛智渊. 海底峡谷汇流过程对盐底辟响应的定量分析:以墨西哥北部陆坡为例[J/OL]. 地质学报. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025088>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

海底峡谷汇流过程对盐底辟响应的定量分析： 以墨西哥北部陆坡为例

许鸿翔^{1,2,3)}, 葛智渊^{*1,2,3)}

1) 中国石油大学(北京)海南研究院, 海南三亚, 572025;

2) 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京, 102249;

3) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249

内容提要:海底峡谷作为浊流输送陆源沉积物至深水区的重要通道,其头部多个分支峡谷常在地貌和水动力作用下发生汇流,而汇流区域的水动力过程对深水沉积体系的时空演化具有重要影响。现有研究已探讨了海底峡谷汇流过程中诸多形态与沉积特征,但对盐底辟等构造地貌控制下峡谷汇流的动力学机制仍缺乏深入认识,尤其缺少对其形态学与水动力学的定量分析。本研究以墨西哥湾北部 Dorsey-Sounder 峡谷体系为研究对象,结合三维地震数据、峡谷形态识别及水动力定量分析方法,系统揭示了盐底辟构造控制下峡谷汇流过程中的形态演变、水动力响应特征及沉积演化规律。研究结果表明,Dorsey-Sounder 峡谷体系中现今主干峡谷由东支峡谷和汇流后峡谷组成,其汇流点自冲坑处向东南方向迁移约 1 km,形成显著的喇叭状加宽加深形态。盐底辟作为主要构造地貌控制了峡谷汇流演化过程:平面展布上通过构造改向约束峡谷路径并决定汇流区域;垂向剖面上增强限制性而促进峡谷下切侵蚀;时空演化上则通过盐底辟差异生长速率来控制汇流点的迁移。本研究首次系统阐明了盐底辟活动区海底峡谷汇流的三维水动力学过程与形态演化机制,为相关盆地的深水沉积体系预测与油气勘探提供了新的实践和理论依据。

关键词:海底峡谷;汇流;盐底辟;浊流;墨西哥湾盆地

海底峡谷作为深水沉积系统中重要的物质和能量输送通道,在全球海洋碳汇与生态系统演替中发挥着关键作用(Talling et al., 2023, 2024)。其形成机制较为复杂,主要受陆坡滑坡(Wu Nan et al., 2022)、水下沉积物密度流(Talling et al., 2013)、等深流(Heezen et al., 1966)、内波(Cacchione et al., 2002)以及高密度陆架瀑布流(Canals et al., 2006; Wu Nan et al., 2024)等多种沉积动力过程控制。这些沉积过程不仅塑造了大陆陆坡的地貌,还通过浊流与滑塌的强烈侵蚀和快速沉积作用构建了海底峡谷系统(王大伟等, 2018)。作为浊流的主要输运通道,海底峡谷横跨陆坡数十至上百千米,将陆源沉积物从浅水陆架快速搬运至深水盆地(王星星, 2019),形成全球最大的沉积体——海底扇(Mutti

and Normark, 1991; Talling et al., 2013; Fildani, 2017)。值得注意的是,海底峡谷通过高频浊流活动(浊流泵)实现陆源有机碳的高效传输和深海埋藏,对全球碳循环的贡献远超预期(Hage et al., 2020, 2022; Baker et al., 2024; Talling et al., 2024)。同时,峡谷内强烈的浊流水动力作用将(微)塑料从海洋表层输送至深海(Kane et al., 2020),并在局部冲坑形成大型垃圾堆积(Zhong Guangfa and Peng Xiaotong, 2020; Yang Yuping et al., 2024),显著改变了海洋生态系统的物质循环过程。同时由于其富含油气资源,海底峡谷一直是学界和工业界的研究重点(Kuenen and Migliorini, 1950; Lowe, 1982; Talling et al., 2023)。

海底峡谷汇流通常发生在多个小型峡谷或沟槽

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 42102119, 42472183)资助的成果。

收稿日期:2025-03-11;改回日期:2025-04-26;责任编委:刘俊来;责任编辑:蔡志慧。

作者简介:许鸿翔,男,1998年生。博士研究生,主要从事深水沉积和盐构造研究。E-mail: hongxiangxu@outlook.com。

* 通讯作者:葛智渊,男,1986年生。教授,博士生导师,主要从事深水沉积和盐构造的研究和教学工作。E-mail: gezhiyuan@cup.edu.cn。

引用本文:许鸿翔,葛智渊. 2025. 海底峡谷汇流过程对盐底辟响应的定量分析:以墨西哥北部陆坡为例. 地质学报, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025088.

Xu Hongxiang, Ge Zhiyuan. 2025. Quantitative response of turbidity current confluence processes to salt diapirs in submarine canyons: A case study from the northern Gulf of Mexico continental slope. Acta Geologica Sinica.

的汇集区域(Harris and Whiteway, 2011; Bührig et al., 2022)。作为不同分支峡谷水流和所携带沉积物的交汇区域,汇流点不仅控制着沉积物分布,还主导着沉积体系的构建和物质输送效率(Gamboa et al., 2012; 张子涵等, 2024)。近年来,随着高分辨率地震探测技术的进步,海底峡谷汇流过程得到了广泛关注(Gamboa and Alves, 2015; Jobe et al., 2015; Qin Yongpeng et al., 2016, 2020; Wu Nan et al., 2022)。根据峡谷活跃程度,汇流过程可分为三类:① 活跃分支峡谷与活跃主干峡谷汇流(Gamboa et al., 2012);② 不活跃分支峡谷与活跃主干峡谷汇流(Jobe et al., 2015);③ 活跃分支峡谷与不活跃主干峡谷汇流(Primez et al., 2000)。此外,构造地貌对峡谷的形成与演化具有重要影响。在富含盐岩的大陆边缘或盆地,盐底辟、盐墙等构造变形不仅改变流动路径,还调控浊流水动力特征和沉积物分布(Rowan et al., 2003; Mayall et al., 2010; Oluboyo et al., 2014; Howlett et al., 2021)。在盐构造动态演化背景下,峡谷流动路径可能发生改向、偏转,甚至被限定或封堵(Clark and Cartwright, 2009, 2011, 2012; 陈亮等, 2017),导致汇流点迁移和汇流角度变化(Ismail, 2017; Qin Yongpeng et al., 2020),使得峡谷汇流过程的时空演化更加复杂。

尽管已有研究探讨了海底峡谷汇流过程中的基本形态和沉积特征,但在盐底辟等构造地貌控制下的峡谷汇流演化机制仍不明确,特别是缺乏对峡谷形态与水动力变化的定量分析(Qin Yongpeng et al., 2020),这一研究不足制约了对相关沉积系统的深入理解和沉积物分布的准确预测。本研究以墨西哥湾北部陆坡复杂盐底辟控制下的 Dorsey-Sounder 峡谷体系为研究对象,基于三维地震数据、峡谷形态识别及水动力定量分析方法,旨在:① 通过峡谷形态连续定量表征汇流过程及其对盐底辟的响应;② 基于 Chézy 公式定量预测汇流过程中浊流的水动力学响应;③ 通过地震相特征重构峡谷汇流过程及沉积体系。本研究采用定量方法揭示了盐底辟为代表的构造地貌影响下的峡谷汇流过程与水动力学响应机制。为深入理解峡谷汇流过程中沉积物输送与分布特征提供了定量化的视角。

1 区域地质概况

墨西哥湾盆地位于北美洲东南部(图 1a),其现今的盆地形成始于晚侏罗世至白垩纪期间北美板块

与加勒比板块的分离过程中(Pindell and Kennan, 2009)。在裂谷拉张过程中,海水间歇性侵入并在高温干旱的蒸发环境沉积了巨厚 Louann 盐岩。盆地在随后的被动陆缘阶段经历了强烈的盐构造活动,发育了复杂的盐构造系统、断层相关构造和深水沉积环境,使其成为全球重要的油气勘探区(Lawal and Cook, 2025)。研究区所在的 Mississippi-Alabama 陆坡沉积序列包括约 3 km 厚的晚侏罗世至白垩纪裂后期及被动陆缘期沉积,以及上覆的 2.5~3 km 厚始新世至更新世沉积物(Carter et al., 2016)。自中新世以来,Mississippi 三角洲持续向外陆架和上陆坡输送沉积物,形成了一系列不同规模的朵体,记录了更新世海平面下降期间的海底沉积过程(Sylvester et al., 2012)。在此期间,Mississippi-Alabama 陆架坡折带向东南方向进积超过 50 km。现代海底地貌显示该区域具有盐底辟、沟槽、峡谷、滑坡痕迹及相关的块体搬运沉积等特征(图 1b、c)。研究区内深水沉积体系受到盐构造活动的直接控制。Louann 盐岩在重力作用下发生塑性流动,形成了包括盐底辟、盐核褶皱及伴生正、逆断层在内的多种构造样式(侯云超等, 2022)。研究区内发育了 8 个凸出海底的环形盐底辟(A—H),其顶部普遍存在滑塌痕迹,四周发育小型滑塌沉积;地震剖面显示盐核内部呈杂乱弱反射特征,底部具有速度上拉现象,顶部伴生披覆褶皱(图 1b、c)。Dorsey-Sounder 峡谷体系是该区域最显著的陆坡地貌,由 Dorsey(西支)峡谷、Sounder(东支)峡谷及一小型峡谷组成(Portnov et al., 2020)。这三条峡谷在向下坡方向延伸过程中绕过多个盐底辟(A、B 和 C),并在其间微盆地内汇流合并成单一主干峡谷(图 1b、c)。根据盐底辟上覆地层厚度及两翼盐动力层序特征(Giles and Rowan, 2012),研究区内盐底辟可分为持续活跃型和活跃减弱型两类。持续活跃型盐底辟(如底辟 C)顶部地层厚度较薄,侧翼发育钩状盐动力层序,指示盐底辟生长速率大于沉积物堆积速率(图 2b);活跃减弱型盐底辟(如底辟 A、B 和 F)顶部地层厚度较大,侧翼发育楔状盐动力层序,反映盐底辟生长速率小于沉积物堆积速率(图 2b~d)。

2 数据与方法

2.1 地震资料解释

本研究基于墨西哥湾盆地北部 Mississippi-Alabama 陆坡的三维时间域地震数据,研究区域面

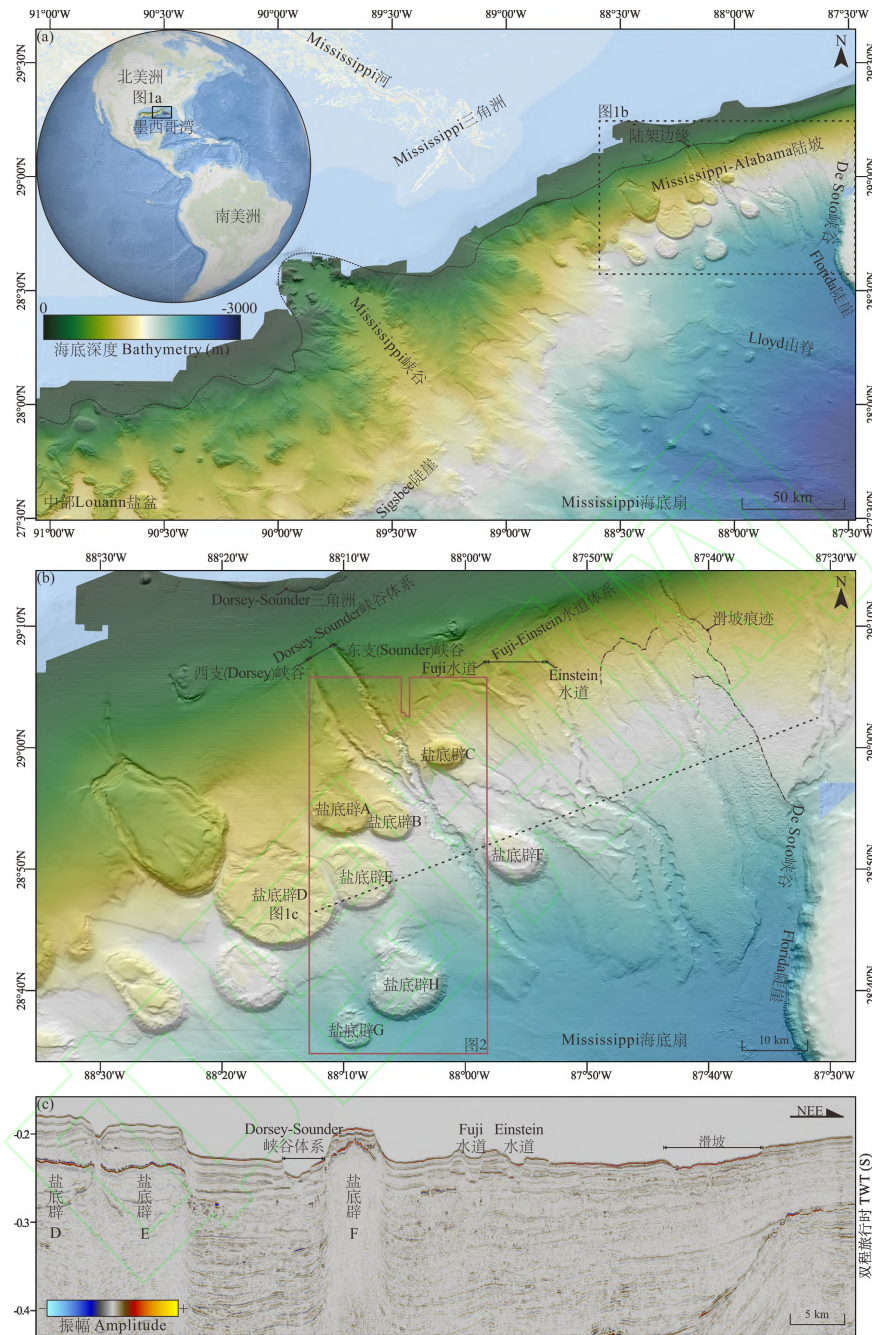


图1 墨西哥湾北部 Mississippi-Alabama 陆坡(a)及 Dorsey-Souder 峡谷体系(b)地貌图与沿陆坡走向区域地震剖面(c)

Fig. 1 Geomorphological maps of the Mississippi-Alabama Slope (a) and the Dorsey-Souder Canyon System (b) in Northern Gulf of Mexico and regional seismic profile along the continental slope (c)

积约 1850 km^2 (图 2)。数据垂向采样间隔为 4 ms , 主测线与联络测线的道间距分别为 22.5 m 和 12.5 m 。目的层主频为 50 Hz , 垂向分辨率约为 7.5 m , 数据质量良好, 可清晰识别盐底辟构造及海底峡谷体系沉积单元。地震数据经三维叠后时间偏移处理后显示为零相位, 采用 SEG (勘探地球物理学会) 正极性显示标准, 其中正反射系数对应波阻抗增大 (波峰), 在地震剖面中以红色反射同相轴呈现。海底地

貌时深转换采用 1340 m/s 的水柱速度值。本研究以三维地震资料为基础, 通过精细地震解释与分析, 结合峡谷形态识别算法和水动力分析方法, 对 Dorsey-Souder 峡谷体系的形态特征、构成要素及其汇流过程对盐底辟地貌的响应机制进行了定量研究。

2.2 峡谷形态识别与水动力分析

本研究基于海底层位三维解释数据, 开发了一

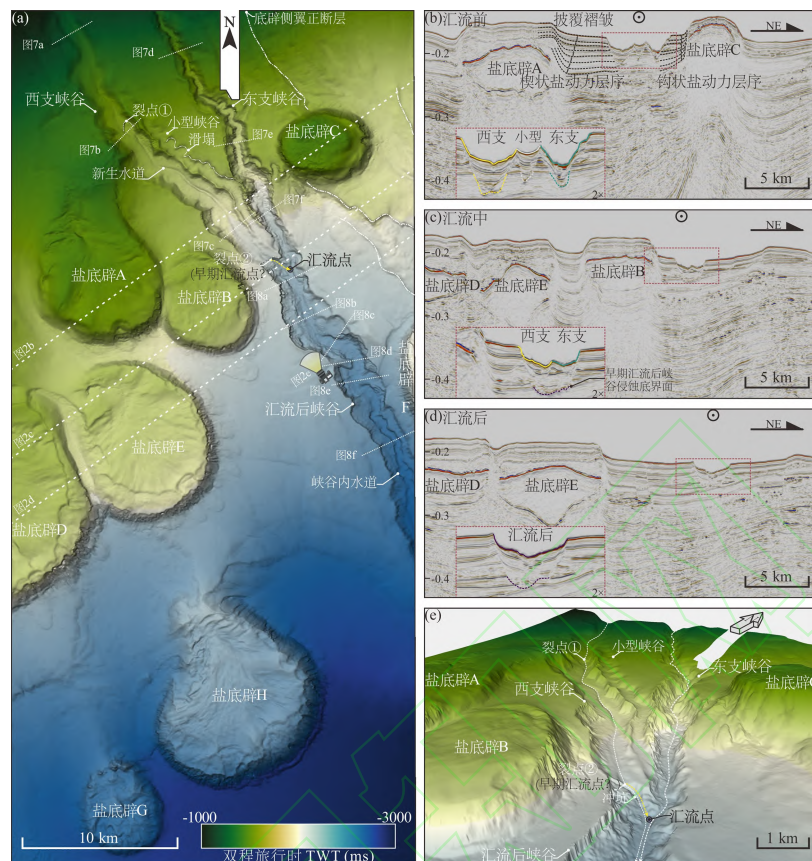


图2 Dorsey-Sounder 峡谷体系地貌图(a)、汇流前、中、后垂直峡谷局部地震剖面(b、c、d)以及汇流形态三维视图(e)

Fig. 2 Geomorphological map of the Dorsey-Sounder Canyon System (a), local seismic profiles across the canyons before, during and after confluence (b, c, d) and 3D view of the confluence morphology (e)

套峡谷形态自动识别算法,实现了峡谷形态特征的连续提取(图 3a)。该算法的核心在于深泓线的识别与拟合,这也是确保形态分析有效性的关键步骤。具体流程包括:首先,从海底层位数据中识别深泓点,并利用地形点云数据拟合生成峡谷深泓线;其次,以 80 m 为采样间距,沿深泓线切线方向创建垂直横截面,通过识别峡谷侧翼坡度小于 2° 的转折点确定东西两侧边缘,从而获取峡谷宽度、深度和宽深比等参数。其中,宽度定义为两侧边缘的水平距离,深度为深泓点与两翼最高点的海拔高差,宽深比则为宽度与深度的比值,用于表征峡谷下切程度(李磊等,2019)。在平面分析中,算法分别以 1 km 和 5 km 为采样间距,通过计算深泓线路径与直线距离的比值来量化峡谷弯曲度(图 3b)。与传统手动测量方法相比,本算法直接基于地形数据,仅需少量深泓点位置的人工干预定位,即可实现对峡谷形态更连续、精确、快速的定量化表征。最后,将获取的形态参数输入 Chézy 公式(Parker et al., 1987),进行满槽水力学计算,从而定量预测峡谷汇流过程中浊流的水动力学参数(沉积物浓度、流速与底床剪切应

力等)。

3 峡谷汇流过程

3.1 基于峡谷形态定量表征汇流过程及其对盐底辟的响应

3.1.1 西支峡谷

西支峡谷在研究区内沿深泓线延伸约 22 km,水深 950~1700 m,宽度 1200~3000 m,深度 55~235 m(图 2a,图 4)。该峡谷在陆坡上部呈 NNW-SSE 走向,在水深 1200 m 处,受西侧盐底辟 A 的影响,发生局部弯曲度(采样间距 1 km)由 1.05 增至 1.2,走向转变为 NW-SE(图 2a,图 3a,图 4)。纵剖面显示,峡谷平均坡度为 1.98° ,但在两个裂点处坡度显著增大至 11° 以上。其中,裂点①位于盐底辟 A 侧翼,呈新月型,其下游发育 12 km 的峡谷内新生水道,反映了浊流的溯源侵蚀作用(Heijnen et al., 2020);裂点②距汇流点约 1 km,下游形成约 100 m 的地貌台阶,坡度由 2° 增至 3° ,坡脚处发育 70 m 深的冲坑(图 2d,图 4)。

西支峡谷在流经盐底辟 A 和 B 处表现出明显

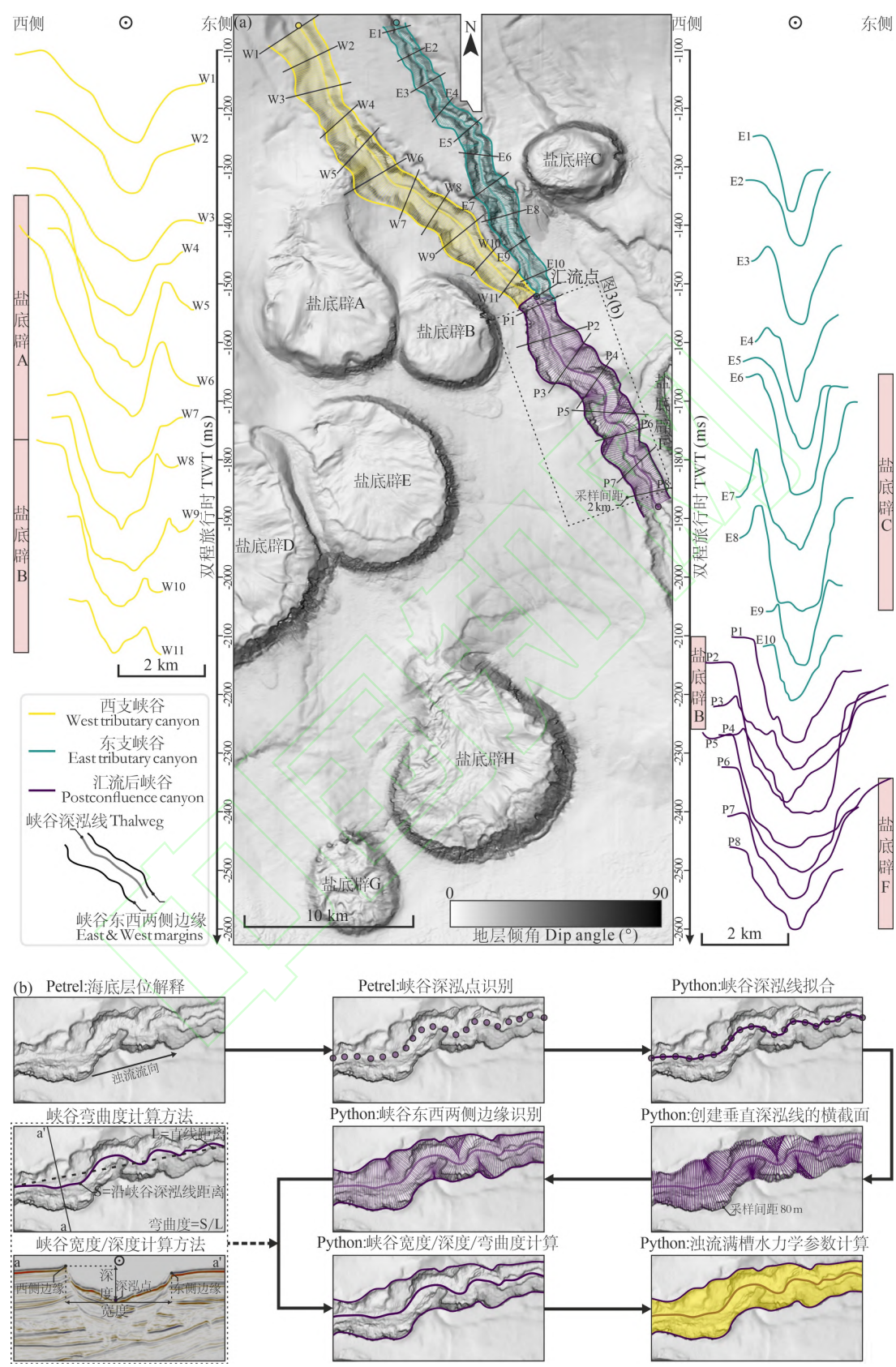


图 3 Dorsey-Sounder 峡谷体系地层倾角属性与峡谷横截面形态(a)及峡谷形态自动识别算法流程图(b)
Fig. 3 Dip map and cross-sectional morphology of the Dorsey-Sounder Canyon System (a)
and flowchart of automatic extraction process of canyon morphology (b)

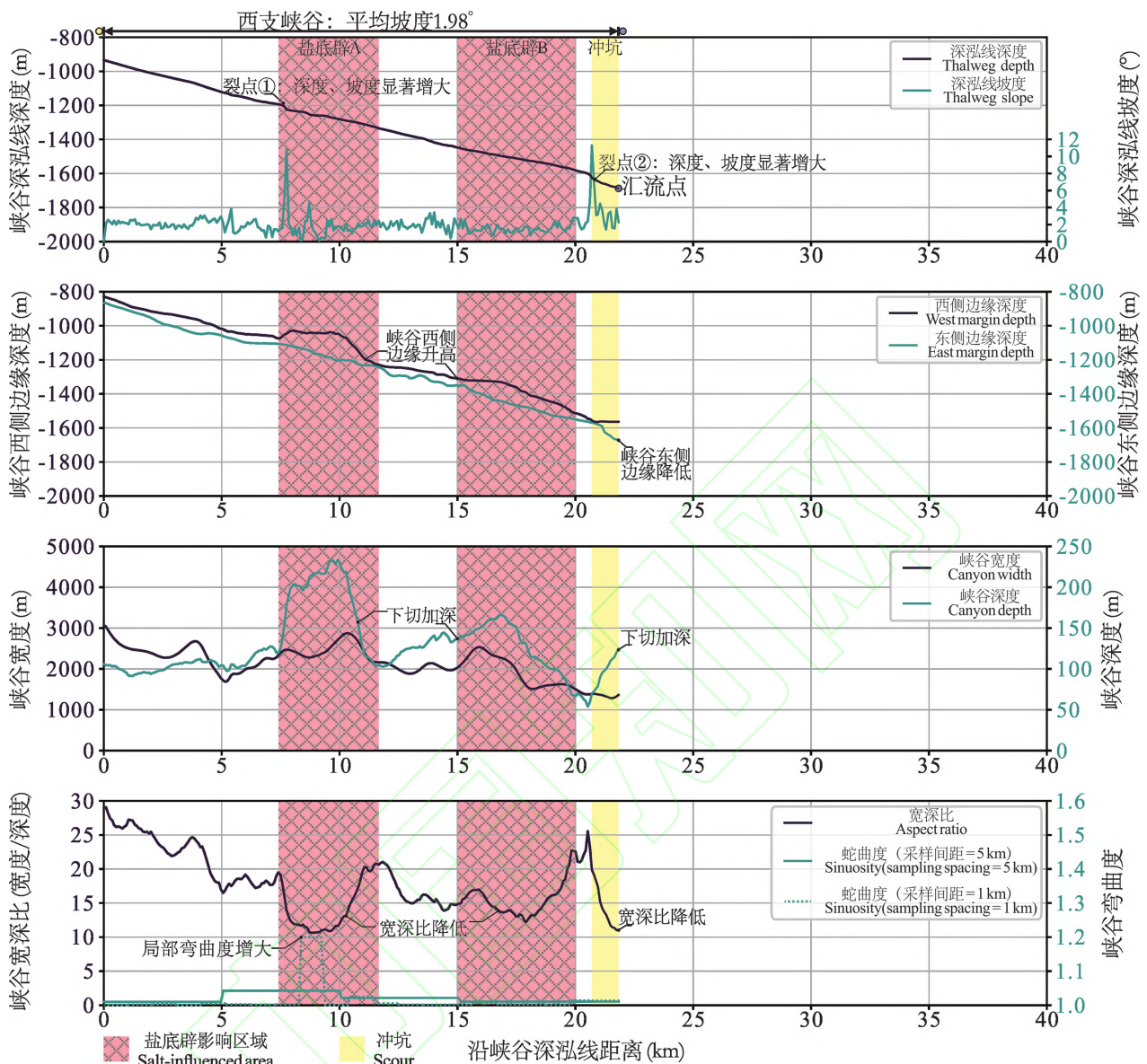


图4 Dorsey-Sounder 峡谷体系西支峡谷沿深泓线形态学参数剖面

Fig. 4 Profile of morphological parameters along the thalweg of west tributary canyon in Dorsey-Sounder Canyon System

的深度变化。流经盐底辟 A 时,西侧边缘抬升显著,东西落差达 150 m,峡谷深度由 125 m 增至 235 m,宽度维持在 2500~3000 m,宽深比由 20 降至 10 (图 3a,图 4)。流经盐底辟 B 时,东西落差 110 m,深度由 125 m 增至 160 m,宽度由 2500 m 缩至 1500 m,宽深比从 17 降至 13 (图 3a,图 4)。此外,峡谷由冲坑向汇流点汇聚过程中,东侧边缘深度显著增大,东西落差达 100 m,深度从 55 m 增至 125 m,宽深比由 25 降至 11 (图 3a,图 4)。

3.1.2 主干峡谷(东支与汇流后峡谷)

基于峡谷深泓线深度、坡度连续性分析,本研究确认现今主干峡谷由东支峡谷及其汇流后峡谷段构成。东支峡谷自末端汇流点向上游延伸约 21 km,

水深范围为 1000~1700 m (图 2a)。该峡谷在陆坡上部呈现北北西-南南东走向,与西支峡谷近乎平行。在水深约 1300 m 处,受西侧盐底辟 A 影响,其局部弯曲度(1 km 采样间距)由 1.05 显著增加至 1.6,走向转为北西-南东。随后东支峡谷在东侧盐底辟 C 作用下,走向恢复为北北西-南南东,最终在水深 1700 m 处以 30° 夹角与西支峡谷汇流(图 2a,图 5)。空间形态分析表明,在不同采样间距(1 km 和 5 km)下,东支峡谷的平均弯曲度均显著高于西支;纵剖面显示其坡度变化范围更大,指示东支峡谷浊流活动较西支更为活跃(图 2a,图 5)。坡度测量结果显示,东支峡谷平均坡度为 1.91°,与西支峡谷基本持平;而汇流后峡谷坡度降至 0.91°,使主干峡

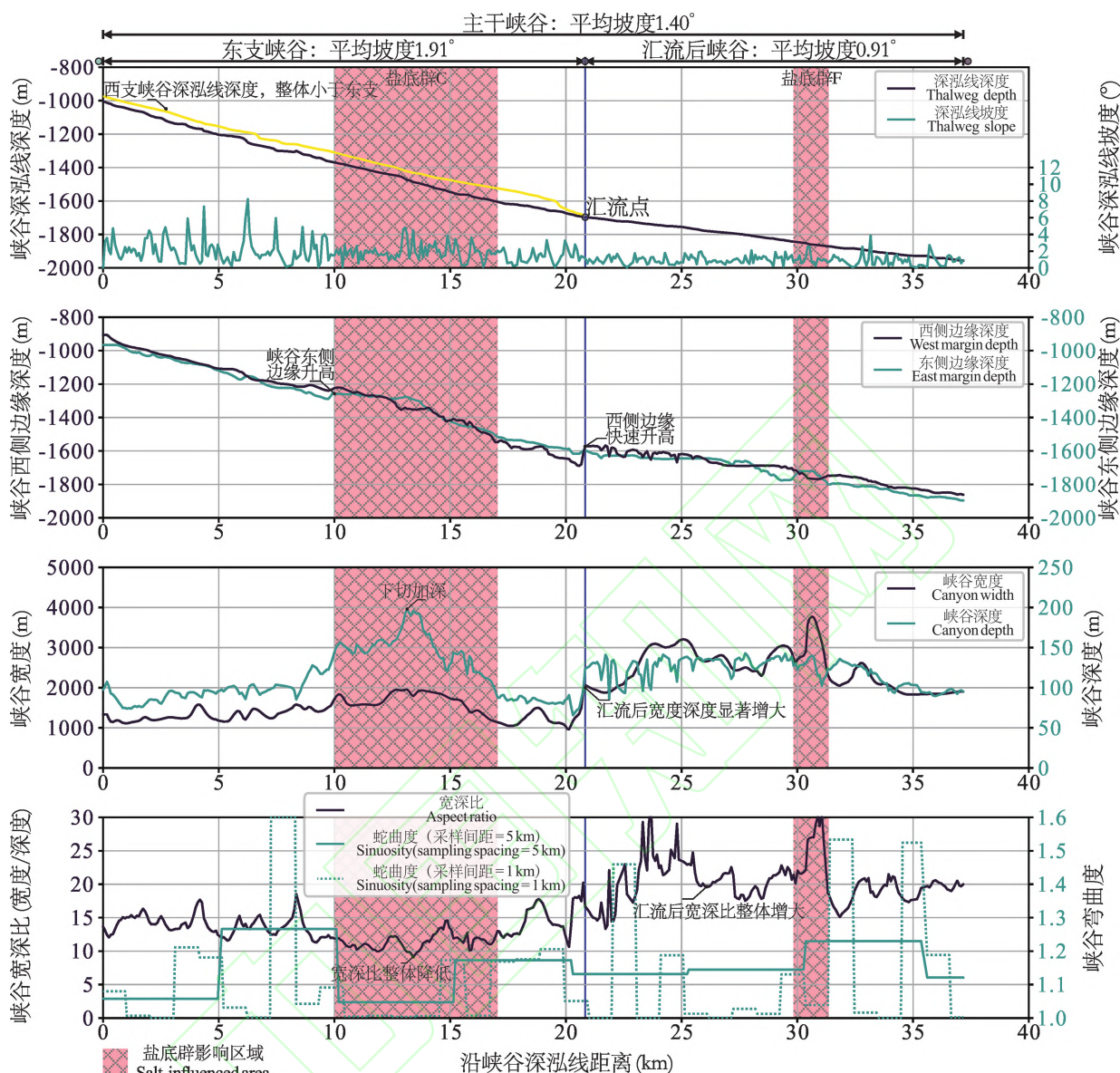


图5 Dorsey-Sounder 峡谷体系主干(东支及汇流后)峡谷沿深泓线形态学参数剖面

Fig. 5 Profile of morphological parameters along the thalweg of main (east tributary and postconfluence) canyon in Dorsey-Sounder Canyon System

谷整体平均坡度达到 1.40° (图 5)。

东支峡谷流经盐底辟 C 时表现出显著的下切特征,局部深度增至 200 m,宽度维持在 2000 m 以下,宽深比降至约 10。汇流点处,峡谷宽度由东支末端的 1000 m 扩展至 2000 m,略小于两支峡谷末端宽度之和(图 3a,图 5);深度由 70 m 加深至 130 m,与西支峡谷深度相当。汇流后峡谷继承了东支东翼和西支西翼的特征,整体宽度扩展至 3000 m,深度约 140 m,局部宽深比达 30(图 3a,图 5)。在 1820 m 水深处,峡谷流经盐底辟 F 时出现形态异常:东侧边缘深度减小,东西两侧落差达 50 m,宽度异常增至 3800 m,深度减至 100 m,宽深比达 30(图

2a,图 3a,图 5)。

3.2 基于 Chézy 公式定量预测汇流过程浊流水动力学响应

由于盐底辟侧翼峡谷在平面上呈现出由局部高弯曲度向低弯曲度转变的趋势,同时在剖面上表现出下切加深的特征,加之汇流过程中峡谷的加宽和加深等形态变化,本研究基于峡谷形态参数,结合改进的 Chézy 公式(Parker et al., 1987)进行满槽水力学计算,从而定量预测汇流过程中浊流对盐底辟地貌的水动力学响应。通过引入浊流与周围海水界面间的阻力及浮力影响,建立了浊流平均流速估算公式:

$$U^2 = \frac{RgCHS}{C_{fi} + C_{fb}}$$

式中: R 为沉积物折算密度系数, 本研究选取石英约为 1.65; g 为重力加速度 (m/s^2); C 为浊流深度平均体积浓度 (%), 初始值参照全球范围内 (尤其是被动陆缘) 浊流原位观测数据 (Talling et al., 2023), 取值 0.2%, 并假设浊流浓度与峡谷横截面面积成反比, 即 $C_0 \times A_0 = C_1 \times A_1$; H 为流体厚度 (m), 即峡谷满槽深度; S 为峡谷坡度 θ 的正切值; C_{fi} 为浊流与海水界面处的摩擦系数, 经验公式为 $0.072\sin\theta$ (Parker et al., 1987); C_{fb} 为浊流与底床摩擦系数, 范围为 $0.002 \sim 0.006$ (Konsoer et al., 2013), 本研究取 0.005。

浊流的底床剪切应力可结合浊流的驱动力公式和峡谷形态学数据, 通过以下公式计算:

$$\tau = \rho_w RgCHS$$

式中: ρ_w 为海水密度, 取 1040 kg/m^3 。该方法基于以下假设: 浊流的驱动力主要源于重力, 底床阻力由摩擦力控制, 同时考虑浮力作用和海水界面阻力 (Konsoer et al., 2013)。这一简化水力学模型借鉴了河流系统中的流动方程 (Leopold and Maddock, 1953), 并在亚马逊扇、尼日尔三角洲、加拿大布特湾等深水水道研究中均得到验证 (Pirmez and Imran, 2003; Jolly et al., 2017; Pope et al., 2022)。通过结合峡谷几何形态及沉积物浓度数据, 该方法可有效估算浊流的底床剪切应力和流速, 进而推测浊流对海底地貌的侵蚀作用。这一研究为深入理解深水浊流在活跃构造区域 (如盐底辟) 的动力学过程及其地貌影响提供了重要的理论依据。

对峡谷内浊流的定量分析表明: 在汇流过程中, 持续活跃型和活跃减弱型两类盐底辟对浊流的水动力学影响具有显著差异。在西支峡谷, 当浊流流经活跃减弱型盐底辟 A 时, 峡谷形态对盐底辟构造表现出近乎完全的响应特征: 峡谷下切导致浊流体积浓度减半至 0.1%, 同时局部流速和剪切应力显著增加, 分别达到 7.5 m/s 和 500 Pa (图 6)。相比之下, 东支峡谷的浊流在流经持续活跃型盐底辟 C 时, 尽管峡谷同样发生下切加深且使浊流体积浓度最低稀释至 0.1%; 但纵剖面上的坡度变化表明浊流流速与剪切应力的增加有限, 仅分别达到 4 m/s 和 160 Pa (图 6)。这一差异表明, 东支峡谷形态尚未完全反映浊流对持续活跃型盐底辟构造的响应。

此外, 在西支峡谷汇流点上游约 1 km 的冲坑处, 浊流浓度、流速和剪切应力迅速减半, 反映出浊

流在坡度急剧减缓处发生的水跃现象。汇流后, 峡谷内沉积物体积浓度显著增加, 最高达到 0.8%; 随后因峡谷形态加宽加深而有所减小, 但浓度、流速和剪切应力仍高于东支和西支峡谷。汇流后峡谷在盐底辟 F 西侧经历两次弯曲后趋于稳定 (图 3a), 局部沉积物体积浓度增加至 0.8%, 同时流速和剪切应力分别增大至 8 m/s 和 500 Pa , 最终形成峡谷内新生水道 (图 2a, 图 3a, 图 6)。

3.3 基于地震相特征重建峡谷汇流过程

基于峡谷形态特征和水力学参数的定量分析, 结合地震相特征分析, 本研究认为现今主干峡谷由东支峡谷和汇流后峡谷构成。峡谷内部充填特征与现今海底新鲜沉积物分布进一步表明, 西支峡谷现已基本废弃, 而东支峡谷仍是浊流的主要输运通道。通过对东西支峡谷沉积特征的对比分析, 研究发现西支峡谷内充填大量深海披覆泥, 其下切深度较早期显著减小 (图 7a~c), 仅在裂点①下游存在少量与裂点水跃相关的新鲜沉积物, 约占峡谷横截面面积的 15%。相比之下, 东支峡谷底部滞留沉积上方的水道充填特征更为明显 (图 7d~f), 海底残余新鲜沉积物约占横截面面积的 40%。这些沉积特征表明, 东支峡谷内的浊流活动频率显著高于西支峡谷, 进一步证实了东支峡谷为该区域的主要分支峡谷。值得注意的是, 汇流后峡谷的海底同样存在新鲜沉积物, 其残余比例 (17%~56%) 与峡谷下切深度和深泓线坡度密切相关, 在截面积上与东支峡谷接近。这一发现进一步证实了东支峡谷与汇流后峡谷的浊流活动具有连续性, 二者共同构成了现今的主干峡谷体系。

在峡谷汇流过程中, 汇流点会随时间变化而发生空间迁移。研究表明, 现今西支峡谷汇流点上游约 1 km 处发育有裂点及冲坑, 这类地貌通常形成于支流与主流交汇处 (Best, 1988)。研究区的地貌台阶位于西支峡谷与东支峡谷交汇区域附近, 且在现今汇流点上游 500 m 处的地震剖面中可识别出早期汇流后峡谷的侵蚀底界面 (图 2c)。基于这些证据, 我们推断裂点指示了西支与东支峡谷的原始汇流位置。值得注意的是, 在原始汇流点处, 西支峡谷底界面显著高于东支峡谷; 而在现今汇流点处, 两者的底界面已达到相同深度 (图 2e)。这一现象表明, 汇流点已向东南方向迁移约 1 km , 在此过程中, 西支峡谷底界面从地貌台阶顶部下降至台阶底部, 同时实现了汇流深度的均一化。

汇流后峡谷内除发育与东支峡谷相似的水道充

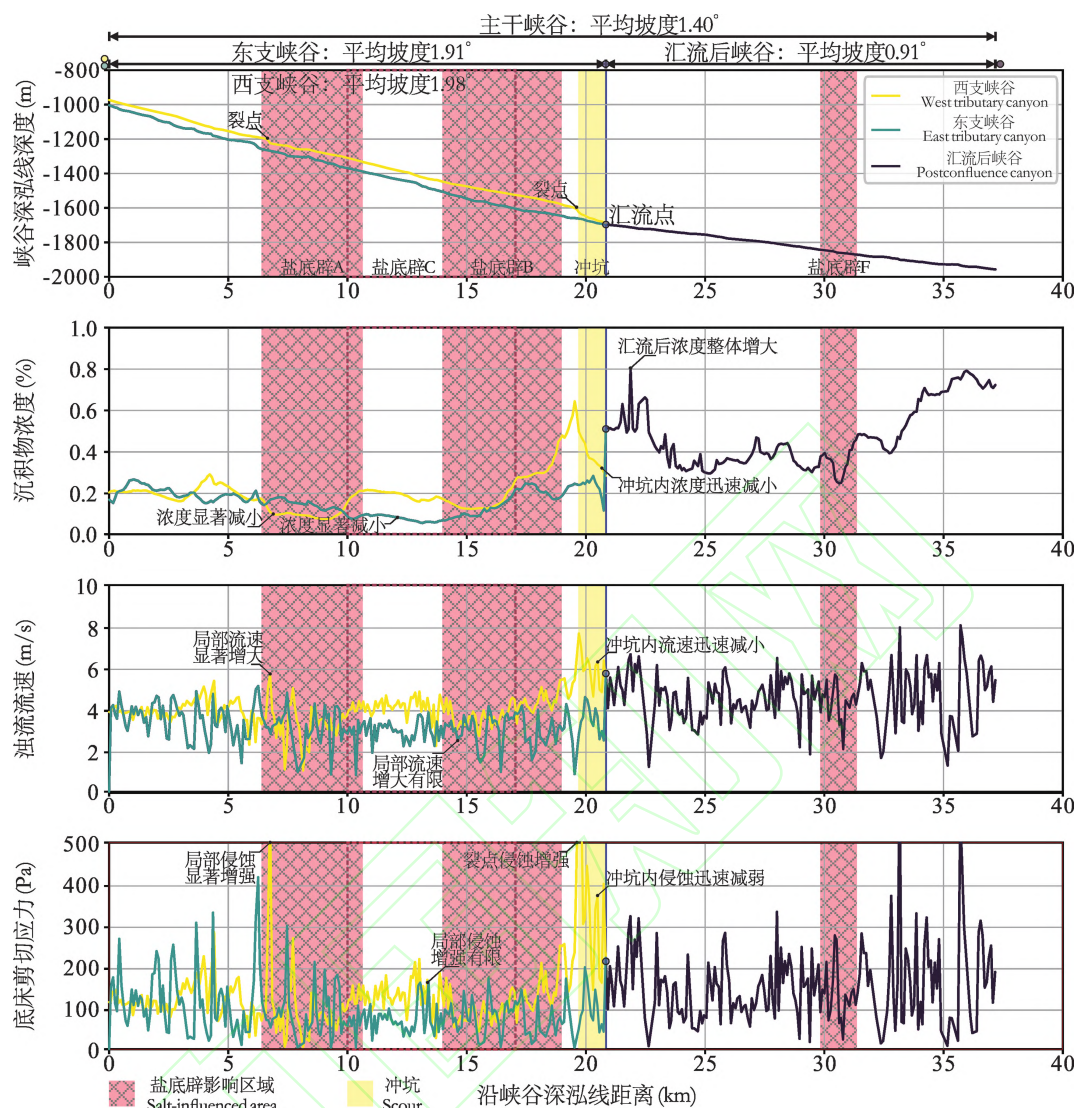


图6 Dorsey-Sounder 峡谷体系西支、主干(东支及汇流后)峡谷沿深泓线水动力学参数剖面
Fig. 6 Profile of hydrodynamical parameters along the thalwegs of west tributary and main (east tributary and postconfluence) canyon in Dorsey-Sounder Canyon System

填沉积外,还广泛发育内天然堤沉积,反映了该区域复杂的水动力环境。汇流后峡谷近端呈喇叭口状展布,导致流速局部减缓并产生波动。在此水动力条件下,低流速流体在流体剥离作用下携带低浓度沉积物,逐渐堆积于高浓度、高流速水道的两侧,最终形成对称的内天然堤(图 8b; Deptuck et al., 2003)。值得注意的是,在盐底辟 F 西侧,汇流后峡谷出现两次显著弯曲,并伴随发育不对称内天然堤(图 8c~e),这种地貌特征有效控制了峡谷宽度和深度的扩展。当峡谷水动力条件趋于稳定后,水道两侧重新发育对称的内天然堤(图 8f)。

4 盐底辟对峡谷汇流的控制作用

本文聚焦于 Dorsey-Sounder 峡谷体系在盐底

辟控制下西支与东支峡谷汇流过程的形态学特征、水动力学响应及沉积体系分布,揭示了盐底辟对峡谷汇流的控制机制。研究表明,盐底辟在平面展布上控制着峡谷流动路径及汇流区域,在垂向剖面上促进了峡谷侵蚀下切作用,并在时空演化过程中主导了汇流点的迁移规律。这一发现证明了盐底辟对峡谷汇流过程的时空演化具有重要的控制作用。

4.1 盐底辟决定峡谷流动路径及汇流区域

先存盐底辟或持续活动盐底辟,通过限制、改向、偏转和封堵等作用,显著改变了海底峡谷或水道的流动路径(Clark and Cartwright, 2009, 2011, 2012; 陈亮等, 2017)。在 Dorsey-Sounder 峡谷体系中,盐底辟的差异隆升导致原本近乎平行的东、西分支峡谷发生流向改变,形成约 30° 的汇流夹角(图

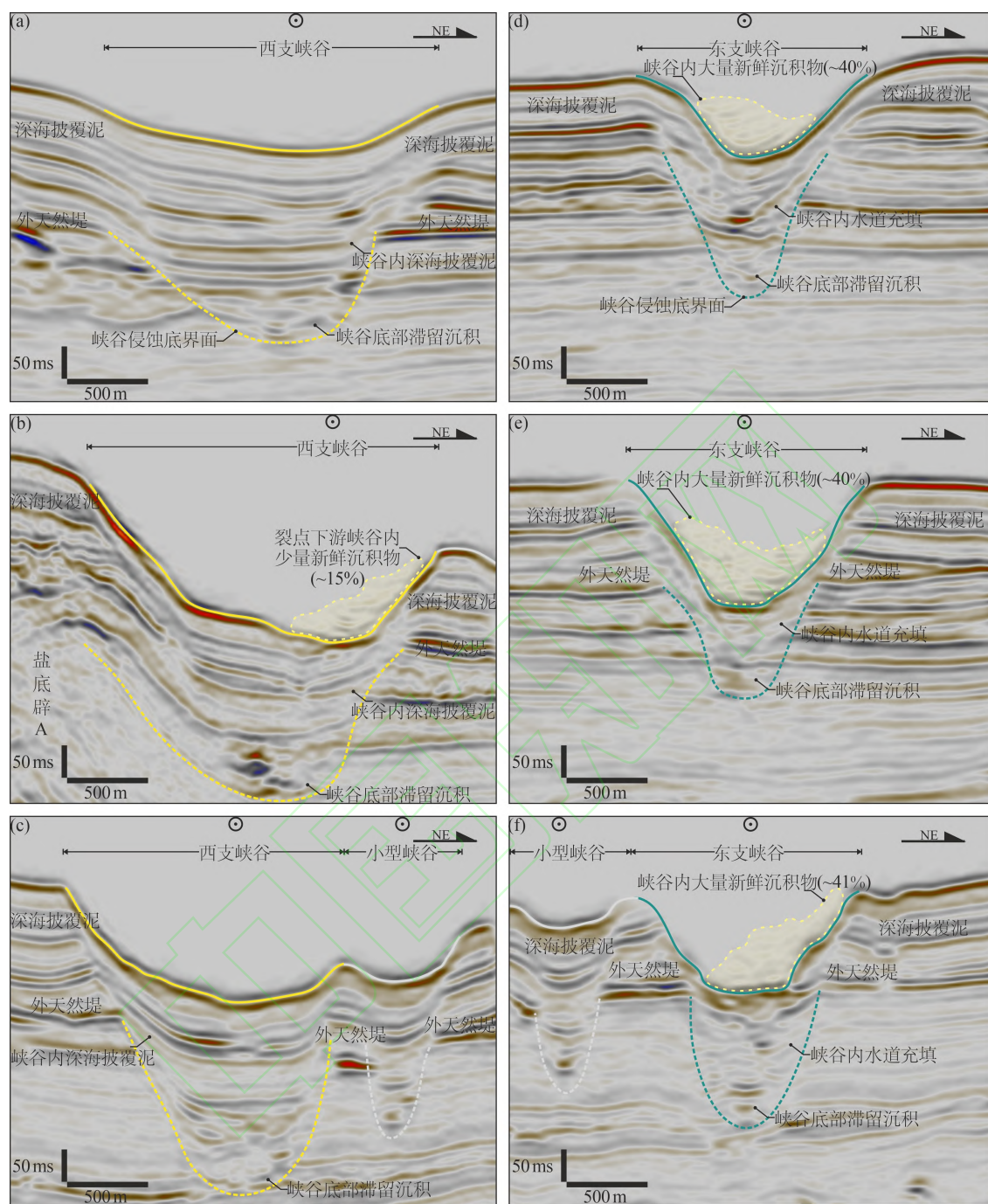


图7 Dorsey-Sounder 峡谷体系横切西支(a~c)、东支(d~f)峡谷的地震剖面(剖面位置见图 2a)

Fig. 7 Seismic cross-sections cutting through west (a~c) and east (d~f) tributary canyons in Dorsey-Sounder Canyon System (section locations shown in Fig. 2a)

2a)。同时,盐底辟的分布格局控制了局部负地貌(微盆地)的发育位置,进而决定了峡谷汇流区的空间分布。

研究区西支峡谷在流经盐底辟 A、B 后,流向由南南东向转为东南向;东支峡谷则在盐底辟 C 的影响下由东南向转为南南东向(图 2a,图 3a)。这种局部快速流向改变在平面上表现为低采样间距(1 km)下峡谷弯曲度的显著增大(图 4,图 5)。盐底辟

的改向作用不仅控制了峡谷的延伸路径,还直接影响了峡谷汇流模式。值得注意的是,汇流夹角大小对汇流后峡谷的流动特征具有重要影响。对比研究表明,在巴西圣埃斯皮里图盆地 Rio Doce 水道系统中,西支与东支水道以 75° 高夹角汇流,由于流体分离作用导致的动能损失较大(Best and Reid, 1984),汇流后水道宽度和深度变化不明显(Gamboa et al., 2012),且汇流点在入流作用下向

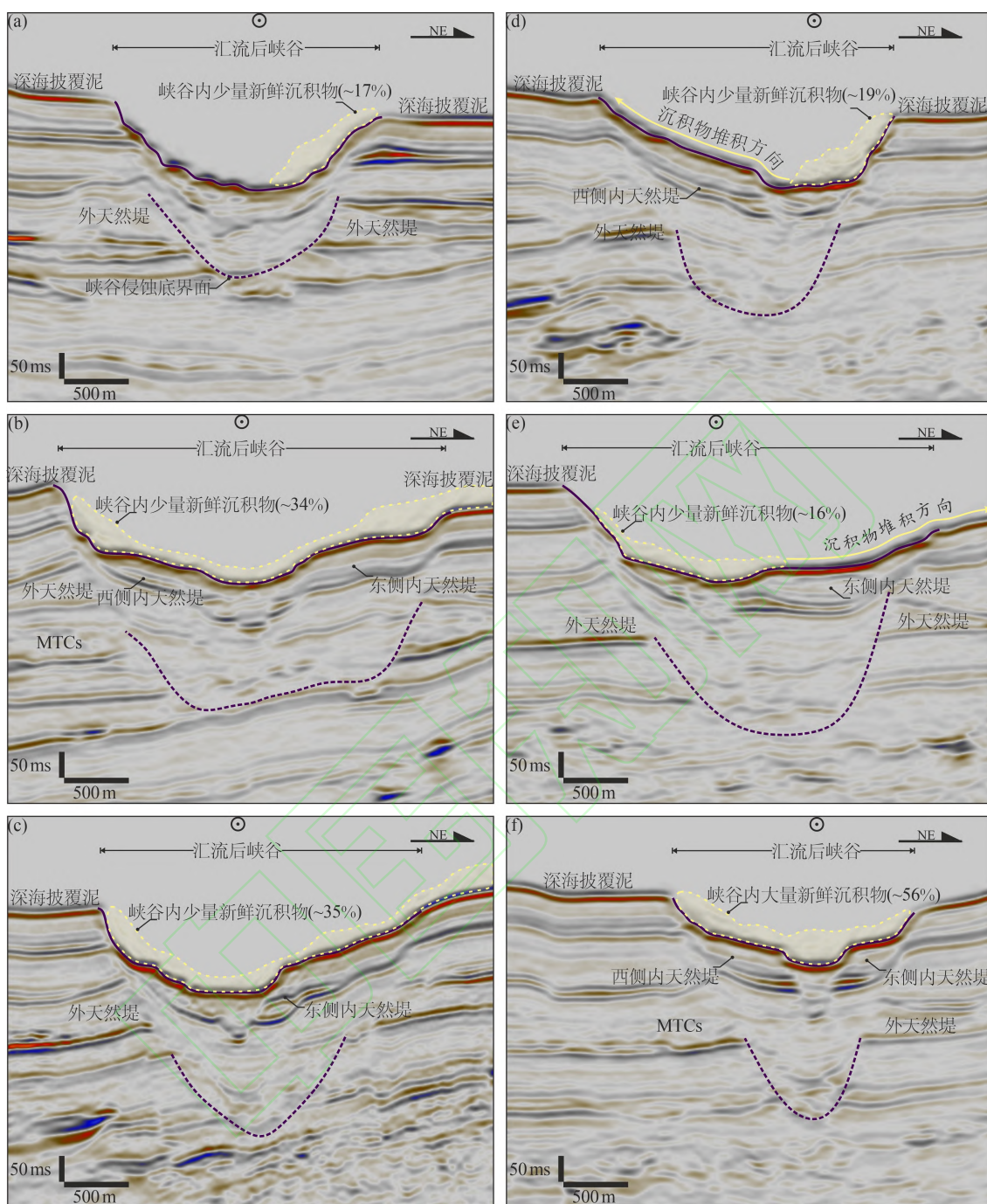


图8 Dorsey-Sounder 峡谷体系横切汇流后峡谷的地震剖面(剖面位置见图2a)

Fig. 8 Seismic cross-sections cutting through postconfluence canyon in Dorsey-Sounder Canyon System (section locations shown in Fig. 2a)

东南迁移,形成沉积坝并导致水道弯曲(Qin Yongpeng et al., 2020)。相比之下,本研究区西支与东支峡谷以 30° 低夹角汇流,流体碰撞过程中动能损失较小,导致汇流后峡谷显著加宽加深,流速增大,且路径相对顺直。峡谷弯曲主要发生在汇流点下游受盐底辟 F 影响的区域,其弯曲度由 1.15 增至 1.22。

此外,盐底辟的隆升作用导致峡谷侧翼发生显

著抬升,当峡谷单侧翼受盐底辟影响时,其东西两翼呈现出明显的深度不对称(图 3a,图 4,图 5)。这种构造特征使得峡谷深泓线的流动路径主要沿盐底辟间的地形最低点延伸,从而决定了汇流区域的分布格局。研究区内,盐底辟 A、B(空间距离过近,对峡谷的影响可视为一个整体)、盐底辟 C 和盐底辟 F 呈近似等边三角形分布,三者围限形成的微盆地构成了局部地势最低点,成为峡谷汇流的发生区域。

4.2 盐底辟促进峡谷侵蚀下切

盐底辟不仅通过控制峡谷的改向和汇流来影响流动路径,还在剖面上促进峡谷的侵蚀下切。当峡谷流经盐底辟侧翼时,其宽度基本保持不变,但深度显著增大,导致宽深比增加。这种变化增强了峡谷的限定性,增大了局部坡度,反映了下切加深、流速加快以及剪切应力增大的现象。与河流响应方式不同,海底峡谷或水道的下切深度对构造扰动的响应更为敏感(例如 Howard, 1994; Whipple and Tucker, 2002; Whittaker et al., 2007)。定量研究表明,浊流倾向于在构造应变(率)最低处(即褶皱隆起的相对低点)侵蚀下切,表现为深度显著增加而宽度变化较小,导致宽深比显著减小。同时,水力学参数计算表明,底床剪切应力和浊流流速显著增加。当底床剪切应力未达到阈值时,受生长褶皱地形影响,水道易发生改向或偏转,弯曲度和曲率增大,且浊流易于溢出天然堤形成决口扇(Jolly et al., 2016; Mitchell et al., 2021a, 2021b, 2022; Pizzi et al., 2021; 葛智渊和许鸿翔, 2023)。

本研究发现,盐底辟对峡谷的作用与逆冲褶皱具有相似之处。研究区内峡谷流经盐底辟侧翼时,其宽度保持相对稳定,而深度则随底辟隆起显著增加(图 4, 图 5)。这一现象可归因于浊流密度分层作用:下部高密度浊流产生的较大剪切应力主要作用于峡谷底部,导致下切深度增加;而上部低密度浊流产生的较小剪切应力作用于峡谷两翼,但其侵蚀能力有限,未能引起峡谷宽度的明显变化(Jolly et al., 2017)。尽管横截面积增大会稀释浊流平均浓度,但峡谷底部限定性的增强导致局部流速和剪切应力增大,表现为局部坡度显著增加(图 4, 图 5, 图 6)。研究还表明,峡谷侵蚀下切形态对浊流水动力变化的响应程度与盐底辟的活跃程度密切相关。对于活跃减弱型盐底辟 A 和 B,峡谷形态能够完整记录盐底辟构造的影响;而对于持续活跃型盐底辟 C,由于底辟持续生长导致侧翼长期处于地貌缓慢隆升的不稳定状态,现今峡谷形态可能尚未完全反映浊流对持续生长盐底辟构造的及时响应(图 2b, 图 3a, 图 6)。这一现象与逆冲褶皱作用下的构造地貌响应特征相吻合。例如, Jolly et al. (2017) 的研究表明,由于下伏褶皱的短期抬升,处于地貌不稳定状态的水道 3 并未呈现出显著的下切特征,这与本研究观察到的持续活跃型盐底辟作用下的峡谷形态特征具有一致性。

4.3 盐底辟控制汇流点迁移

盐底辟的差异生长速率及活跃程度对汇流点的迁移具有直接控制作用。研究表明,在峡谷形成初期,现今汇流点上游 500 m 处已存在早期峡谷汇流现象(图 2c),据此现象推断现今汇流点上游 1 km 的裂点②可能为早期汇流点(图 2a)。随着盐底辟 A、B 生长速率降低、活跃程度减弱,其顶部及西支峡谷内发育了大量深海披覆泥,导致西支峡谷侵蚀基准面逐渐抬升并最终废弃。与此同时,高生长速率下、持续活跃的盐底辟 C 侧翼东支峡谷发生袭夺作用,成为现今主要物源通道,这表现为东支峡谷底部新鲜沉积物残余显著多于西支峡谷(图 7)。在此过程中,汇流点向东南方向迁移约 1 km 至东支峡谷一侧(图 2a)。值得注意的是,局部冲坑的形成可以作为峡谷汇流点迁移的重要标志(Qin Yongpeng et al., 2020)。在 Dorsey-Sounder 峡谷体系中,浊流流经西支峡谷裂点②时,流速和剪切应力显著增加,导致峡谷底部急剧下切形成冲坑,最终使东、西支峡谷达到相近深度。汇流点由活跃减弱型底辟向持续活跃型底辟的迁移过程,反映了盐底辟的差异生长速率对峡谷沉积体系构建的重要影响。

5 结论

本研究基于三维地震数据,结合定量峡谷形态识别与水动力分析方法,对墨西哥湾北部 Dorsey-Sounder 峡谷体系进行了系统研究,重点探讨了峡谷汇流过程中的形态演化、水动力学响应及沉积特征,并深入分析了盐底辟地貌对峡谷汇流过程的控制机制。研究取得以下主要认识:

(1) Dorsey-Sounder 峡谷体系的现今主干峡谷由东支峡谷与汇流后峡谷构成,其汇流点自冲坑处向东南方向迁移约 1 km,汇流后峡谷呈现显著的喇叭状加宽加深形态特征。

(2) 海底峡谷的汇流过程受到盐底辟为代表的构造地貌显著影响:在平面展布上,盐底辟的改向作用导致近平行展布的东、西支峡谷流动路径产生夹角并最终汇流;在垂向剖面上,盐底辟的限定性增强作用促进了峡谷的侵蚀下切,但下切响应是否完全取决于盐底辟生长活动速率;时空演化上,盐底辟的生长速率差异控制了汇流点由活跃减弱型底辟向持续活跃型底辟的迁移过程。

本研究定量地揭示了盐底辟地貌控制下海底峡谷汇流过程的动力学机制及其对沉积物分布的控制规律,研究结果为构造活动区域深水峡谷沉积过程和

相关区域油气勘探提供了新的理论依据和实践指导。

References

- Baker M L, Hage S, Talling, P J, Acikalin S, Hilton, R G, Haghipour N, Ruffell S C, Pope E L, Jacinto R S, Clare M A, Sahin S. 2024. Globally significant mass of terrestrial organic carbon efficiently transported by canyon-flushing turbidity currents. *Geology*, 52(8): 631~636.
- Best J L. 1988. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. *Sedimentology*, 35(3): 481~498.
- Best J L, Reid I. 1984. Separation zone at open-channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11): 1588~1594.
- Bühlig L H, Colombero L, Patacci M, Mountney N P, McCaffrey W D. 2022. A global analysis of controls on submarine-canyon geomorphology. *Earth-Science Reviews*, 233: 104150.
- Cacchione D A, Pratson L F, Ogston A S. 2002. The shaping of continental slopes by internal tides. *Science*, 296(5568): 724~727.
- Canals M, Puig P, de Madron X D, Heussner S, Palanques A, Fabres J. 2006. Flushing submarine canyons. *Nature*, 444(7117): 354~357.
- Carter R C, Gani M R, Roesler T, Sarwar A K. 2016. Submarine channel evolution linked to rising salt domes, Gulf of Mexico, USA. *Sedimentary Geology*, 342: 237~253.
- Chen Liang, Zhao Qianhui, Wang Yingmin, Sun Hongjun, Wan Qionghua, Tang Wu, Zhao Peng. 2017. Interactions between submarine channels and salt structures: Examples from the Lower Congo basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(6): 1197~1204 (in Chinese with English abstract).
- Clark I R, Cartwright J A. 2009. Interactions between submarine channel systems and deformation in deepwater fold belts: Examples from the Levant basin, eastern Mediterranean Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 26(8): 1465~1482.
- Clark I R, Cartwright J A. 2011. Key controls on submarine channel development in structurally active settings. *Marine and Petroleum Geology*, 28(7): 1333~1349.
- Clark I R, Cartwright J A. 2012. Interactions between coeval sedimentation and deformation from the Niger delta deepwater fold belt. Application of the Principles of seismic geomorphology to continental-slope and base-of-slope systems: case studies from seafloor and near-seafloor analogues. *SEPM Special Publication*, 243~267.
- Deptuck M E, Steffens G S, Barton M, Pirmez C. 2003. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 20(6~8): 649~676.
- Fildani A. 2017. Submarine Canyons: A brief review looking forward. *Geology*, 45(4): 383~384.
- Gamboa D, Alves T M, Cartwright J. 2012. A submarine channel confluence classification for topographically confined slopes. *Marine and Petroleum Geology*, 35(1): 176~189.
- Gamboa D, Alves T M. 2015. Spatial and dimensional relationships of submarine slope architectural elements: A seismic-scale analysis from the Espírito Santo basin (SE Brazil). *Marine and Petroleum Geology*, 64: 43~57.
- Ge Zhiyuan, Xu Hongxiang. 2023. Hydraulic and sedimentary responses of turbidity current to structurally-controlled topography. *Journal of Palaeogeography*, 25(5): 1090~1117 (in Chinese with English abstract).
- Giles K A, Rowan M G. 2012. Concepts in halokinetic-sequence deformation and stratigraphy. Geological Society, London, Special Publications, 363(1): 7~31.
- Hage S, Galy V V, Cartigny M J B, Acikalin S, Clare M A, Gröcke, D R, Hilton R G, Hunt J E, Lintern D G, McGhee C A, Parsons D R. 2020. Efficient preservation of young terrestrial organic carbon in sandy turbidity-current deposits. *Geology*, 48(9): 882~887.
- Hage S, Baker M L, Babonneau N, Soulet G, Dennielou B, Jacinto R S, Hilton R G, Galy V, Baudin F, Rabouille C, Vic C. 2024. How is particulate organic carbon transported through the river-fed submarine Congo Canyon to the deep sea?. *Biogeosciences*, 21(19): 4251~4272.
- Harris P T, Whiteway T. 2011. Global distribution of large submarine canyons: Geomorphic differences between active and passive continental margins. *Marine Geology*, 285(1~4): 69~86.
- Heezen B C, Hollister C D, Ruddiman W F. 1966. Shaping of the continental rise by deep geostrophic contour currents. *Science*, 152(3721): 502~508.
- Hou Yunchao, Fan Tailiang, Li Yifan, Cai Wenjie, Wang Hongyu, Liu Longlong, Yin Siqi, Li Dong. 2022. Interactions and responses between salt structures and deep water gravity flow: A case study from the Miocene strata in the Sureste basin, Gulf of Mexico. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(1): 22~33 (in Chinese with English abstract).
- Howard A D. 1994. A detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water resources research*, 30(7): 2261~2285.
- Howlett D M, Gawthorpe R L, Ge Z, Rotevatn A, Jackson C A L. 2021. Turbidites, topography and tectonics: Evolution of submarine channel-lobe systems in the salt-influenced Kwanza basin, offshore Angola. *Basin Research*, 33(2): 1076~1110.
- Ismail H. 2017. Confluence of density currents produced by lock-exchange. Doctoral dissertation of University of South Carolina.
- Jobe Z R, Sylvester Z, Parker A O, Howes N, Slowey N, Pirmez C. 2015. Rapid adjustment of submarine channel architecture to changes in sediment supply. *Journal of Sedimentary Research*, 85(6): 729~753.
- Jolly B A, Lonergan L, Whittaker A C. 2016. Growth history of fault-related folds and interaction with seabed channels in the toe-thrust region of the deep-water Niger delta. *Marine and Petroleum Geology*, 70: 58~76.
- Jolly B A, Whittaker A C, Lonergan L. 2017. Quantifying the geomorphic response of modern submarine channels to actively growing folds and thrusts, deep-water Niger Delta. *GSA Bulletin*, 129(9~10): 1123~1139.
- Kane I A, Clare M A, Miramontes E, Wogelius R, Rothwell J J, Garreau P, Pohl F. 2020. Seafloor microplastic hotspots controlled by deep-sea circulation. *Science*, 368(6495): 1140~1145.
- Konsoer K, Zinger J, Parker G. 2013. Bankfull hydraulic geometry of submarine channels created by turbidity currents: Relations between bankfull channel characteristics and formative flow discharge. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(1): 216~228.
- Lawal M A, Cook A E. 2025. Gas migration phenomena and pockmark evolution in a Gulf of Mexico minibasin. *Marine and Petroleum Geology*, 173: 107270.
- Leopold L B, Maddock T. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications (Vol. 252). US Government Printing Office.
- Li Lei, Zou Yun, Zhang Peng, Ruan Yu. 2019. Quantitative analysis of the geometry of sinuous submarine channels: a case from the Rio Muni Basin of Equatorial Guinea. *Marine geology frontiers*, 35(10): 23~35 (in Chinese with English abstract).
- Lowe D R. 1982. Sediment gravity flows II, depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Research*, 52(1): 279~297.
- Mayall M, Lonergan L, Bowman A, James S, Mills K, Primmer T, Pope D, Rogers L, Skeene R. 2010. The response of turbidite slope channels to growth-induced seabed topography. *AAPG Bulletin*, 94(7): 1011~1030.
- Mitchell W H, Whittaker A C, Mayall M, Lonergan L. 2021a. New models for submarine channel deposits on structurally complex slopes: Examples from The Niger Delta system. *Marine and Petroleum Geology*, 129: 105040.
- Mitchell W H, Whittaker A C, Mayall M, Lonergan L, Pizzi M.

- 2021b. Quantifying the relationship between structural deformation and the morphology of submarine channels on the Niger Delta continental slope. *Basin Research*, 33(1): 186~209.
- Mitchell W H, Whittaker A C, Mayall M, Lonergan L, Pizzi M. 2022. Quantifying structural controls on submarine channel architecture and kinematics. *GSA Bulletin*, 134(3~4): 928~940.
- Mutti E, Normark W R. 1991. An integrated approach to the study of turbidite systems. In: *Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems*. New York: Springer New York.
- Oluboyo A P, Gawthorpe R L, Bakke K, Hadler-Jacobsen F. 2014. Salt tectonic controls on deep-water turbidite depositional systems: Miocene, southwestern Lower Congo basin, offshore Angola. *Basin Research*, 26(4): 597~620.
- Parker G, Garcia M, Fukushima Y, Yu W. 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1): 123~147.
- Pindell J L, Kennan L. 2009. Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: An update. Geological Society, London, Special Publications, 328(1): 1~55.
- Pirmez C, Beaubouef R T, Friedmann S J, Mohrig D C. 2000. Equilibrium profile and baselevel in submarine channels: examples from Late Pleistocene systems and implications for the architecture of deepwater reservoirs.
- Pirmez C, Imran J. 2003. Reconstruction of turbidity currents in Amazon Channel. *Marine and Petroleum Geology*, 20(6~8): 823~849.
- Pizzi M, Whittaker A C, Lonergan L, Mayall M, Mitchell W H. 2021. New statistical quantification of the impact of active deformation on the distribution of submarine channels. *Geology*, 49(8): 926~930.
- Pope E L, Cartigny M J, Clare M A, Talling P J, Lintern D G, Vellinga A, Hage S, Açikalin S, Bailey L, Chaplow N, Chen Ye. 2022. First source-to-sink monitoring shows dense head controls sediment flux and runout in turbidity currents. *Science advances*, 8(20): eabj3220.
- Portnov A, Santra M, Cook A E, Sawyer D E. 2020. The Jackalope gas hydrate system in the northeastern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 111: 261~278.
- Qin Yongpeng, Alves T M, Constantine J A, Gamboa D. 2016. Quantitative seismic geomorphology of a submarine channel system in SE Brazil (Espírito Santo basin): Scale comparison with other submarine channel systems. *Marine and Petroleum Geology*, 78: 455~473.
- Qin Yongpeng, Alves T M, Constantine J A, Gamboa D, Wu Shiguo. 2020. Effect of channel tributaries on the evolution of submarine channel confluences (Espírito Santo basin, SE Brazil). *GSA Bulletin*, 132(1~2): 263~272.
- Rowan M G, Lawton T F, Giles K A, Ratliff R A. 2003. Near-salt deformation in La Popa basin, Mexico, and the northern Gulf of Mexico: A general model for passive diapirism. *AAPG Bulletin*, 87(5): 733~756.
- Rowan M G, Giles K A. 2023. Different scales of salt-sediment interaction during passive diapirism. *AAPG Bulletin*, 107(1): 7~22.
- Soutter E L, Bell D, Cumberpatch Z A, Ferguson R A, Spychala Y T, Kane I A, Eggenhuisen J T. 2021. The influence of confining topography orientation on experimental turbidity currents and geological implications. *Frontiers in Earth Science*, 8: 540633.
- Sylvester Z, Deptuck M E, Prather B E, Pirmez C, O'byrne C. 2012. Seismic stratigraphy of a shelf-edge delta and linked submarine channels in the northeastern Gulf of Mexico. Application of the Principles of seismic geomorphology to continental-slope and base-of-slope systems: Case studies from seafloor and near-seafloor analogues. *SEPM Special Publication*, 31~59.
- Talling P J, Paull C K, Piper D J. 2013. How are subaqueous sediment density flows triggered, what is their internal structure and how does it evolve? Direct observations from monitoring of active flows. *Earth-Science Reviews*, 125: 244~287.
- Talling P J, Cartigny M J, Pope E, Baker M, Clare M A, Heijnen M, Hage S, Parsons D R, Simmons S M, Paull C K, Gwiazda R. 2023. Detailed monitoring reveals the nature of submarine turbidity currents. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(9): 642~658.
- Talling P J, Hage S, Baker M L, Bianchi T S, Hilton R G, Maier K L. 2024. The global turbidity current pump and its implications for organic carbon cycling. *Annual Review of Marine Science*, 16(1): 105~133.
- Tucker G E, Whipple K X. 2002. Topographic outcomes predicted by stream erosion models: Sensitivity analysis and intermodel comparison. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B9): ETG-1.
- Wang Dawei, Bai Hongxin, Wu Shiguo. 2018. The research progress of turbidity currents and related deep-water bedforms. *Advances in Earth Science*, 33(1): 52~65 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xingxing. 2019. Deep-water sedimentary processes and responses in the Pearl River Canyon, South China Sea. Doctoral dissertation of Zhejiang University (in Chinese with English abstract).
- Whittaker A C, Cowie P A, Attal M, Tucker G E, Roberts G P. 2007. Contrasting transient and steady-state rivers crossing active normal faults: New field observations from the Central Apennines, Italy. *Basin Research*, 19(4): 529~556.
- Wu Nan, Nugraha H D, Zhong Guangfa, Steventon M J. 2022. The role of mass-transport complexes in the initiation and evolution of submarine canyons. *Sedimentology*, 69(5): 2181~2202.
- Wu Nan, Zhong Guangfa, Niyazi Y, Wang Biwen, Nugraha H D, Steventon M J. 2024. Transformation of dense shelf water cascade into turbidity currents: Insights from high-resolution geophysical datasets. *Earth and Planetary Science Letters*, 626: 118547.
- Yang Yuping, Wang Dawei, Kneller B, Zhong Guangfa, Yu Kaiqi, Wang Minghan, Xu Jingping. 2024. How does plastic litter accumulate in submarine canyons? *Geophysical Research Letters*, 51(18): e2024GL110767.
- Zhang Zihan, Ren Yupeng, Tao Wei, Xu Guohui, Jin Zikun. 2024. Variations in sediment concentration and velocity after turbidity current confluence in submarine canyon. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 44(4): 78~87 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Guangfa, Peng Xiaotong. 2021. Transport and accumulation of plastic litter in submarine canyons—The role of gravity flows. *Geology*, 49(5): 581~586.

参 考 文 献

- 陈亮, 赵千慧, 王英民, 孙红军, 万琼华, 唐武, 赵鹏. 2017. 盐构造与深水水道的交互作用——以下刚果盆地为例. *沉积学报*, 35(6): 1197~1204.
- 葛智渊, 许鸿翔. 2023. 浊流对复杂构造地貌的水动力和沉积响应. *古地志学报*, 25(5): 1090~1117.
- 侯云超, 樊太亮, 李一凡, 蔡文杰, 王宏语, 刘隆隆, 尹思琪, 李冬. 2022. 盐构造与深水重力流的相互作用及响应——以墨西哥湾 Sureste 盆地中新统为例. *沉积学报*, 40(1): 22~33.
- 李磊, 邹韵, 张鹏, 阮昱. 2019. 深水弯曲水道几何形态定量分析——以赤道几内亚 Rio Muni 盆地为例. *海洋地质前沿*, 35(10): 23~35.
- 王大伟, 白宏新, 吴时国. 2018. 浊流及其相关的深水底形研究进展. *地球科学进展*, 33(1): 52~65.
- 王星星. 2019. 南海珠江口外峡谷深水沉积作用及响应. 浙江大学

博士学位论文.
张子涵, 任宇鹏, 陶威, 许国辉, 靳梓堃. 2024. 海底峡谷浊流汇流

后含沙量与速度变化研究. 海洋地质与第四纪地质, 44(4): 78~87.

Quantitative response of turbidity current confluence processes to salt diapirs in submarine canyons: A case study from the northern Gulf of Mexico continental slope

XU Hongxiang^{1,2,3)}, GE Zhiyuan^{*1,2,3)}

1) Hainan Institute of China University of Petroleum (Beijing), Sanya, Hainan 572025, China;

2) National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3) College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

* Corresponding author: gezhiyuan@cup.edu.cn

Abstract

Submarine canyons are critical conduits for turbidity currents transporting terrigenous sediments into deep-water environments. Their head regions, often comprising multiple tributary canyons, frequently experience confluence influenced by geomorphology and hydrodynamic processes. The hydrodynamic conditions within these confluence zones significantly impact the spatiotemporal evolution of deep-water depositional systems. While existing research has explored various morphological and depositional features associated with submarine canyon confluences, the hydrodynamic mechanisms governing confluences under structural controls, such as salt diapirism, remain poorly understood, particularly lacking quantitative analyses integrating morphological and hydrodynamic aspects. This study focuses on the Dorsey-Sounder canyon system in the northern Gulf of Mexico. We integrate 3D seismic data, canyon morphological recognition and quantitative hydrodynamic assessment to systematically reveal the morphological evolution, hydrodynamic response characteristics and depositional evolution patterns during canyon confluence under the control of salt diapirism. The results demonstrate that the present-day main canyon of the Dorsey-Sounder system consists of an east tributary canyon and a post-confluence canyon. The confluence point has migrated approximately 1 km southeastward from a scour, resulting in a distinct trumpet-shaped widening and deepening morphology. Salt diapirs dominantly controlled the confluence process through three-dimensional mechanisms: planar structural diversion confined canyon pathways and defined the confluence zone; enhanced vertical confinement promoted canyon incision and erosion; and differential diapir growth rates governed confluence point migration. This study presents the first systematic elucidation of the three-dimensional hydrodynamic processes and morphological evolution mechanisms governing submarine canyon confluences in salt diapir-affected settings. The findings provide novel practical and theoretical insights for predicting deep-water depositional systems and informing hydrocarbon exploration in analogous basins.

Key words: submarine canyon; confluence; salt diapirism; turbidity current; Gulf of Mexico basin