第 28 卷 第 1 期
2026 年 2 月

古 地 理 学 报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY (Chinese Edition)

Vol. 28 No. 1
Feb. 2026

**文章编号**：1671-1505(2026)01-0025-19 **DOI**:10.7605/gdlxb.2026.002

# 源汇系统：研究关注热点和发展趋势*

朱筱敏[1] 刘强虎[2] 谈明轩[3] 陈贺贺[4]

1 中国石油大学（北京）地球科学学院，北京 102249
2 中国地质大学（武汉）资源学院，湖北武汉 430070
3 河海大学海洋学院，江苏南京 210098
4 中国地质大学（北京）海洋学院，北京 100083

**摘 要** 源汇系统是指从剥蚀地貌中剥蚀产生、经搬运体系输送、最终在沉积地貌中沉积下来的完整沉积物剥蚀—搬运—沉积过程，其研究不仅有助于完整认识地球表层动力学过程及其演化，而且能为沉积矿产勘探开发提供地质基础和预测性模型。在分析源汇系统研究历史的基础上，认为当今关注热点包括整合视角下的现代源汇系统研究、深时源汇系统与古地理重建、源汇过程表征与地貌—沉积演化耦合模拟和源汇系统理论的能源地质应用；指出在源汇系统分类和主要类型特征、物源区特征和供源作用、搬运过程和路径系统信号传播、沉积过程（砂体分散体系）和控制因素、源汇系统要素定量表征（BQART 模型）、源汇系统与砂体预测等方面取得了显著进展，最后讨论了源汇系统未来研究应关注的搬运过程和路径系统信号传播、源汇系统要素定量表征与砂体预测等主要研究方向。

**关键词** 源汇系统 物源区及供源作用 沉积路径系统 沉积过程与控制因素 砂体预测 发展趋势

**第一作者简介** 朱筱敏，男，1960 年生，博士，教授，从事沉积地质学、层序地层学与储层地质学研究。E-mail：xmzhu@cup.edu.cn。

**中图分类号**：P588.2 **文献标志码**：A

# Research frontier and development of source-to-sink systems

ZHU Xiaomin[1] LIU Qianghu[2] TAN Mingxuan[3] CHEN Hehe[4]

1 *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*
2 *School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan* 430070, *China*
3 *College of Oceanography, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*
4 *School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*

**Abstract** The source-to-sink system (S2S) refers to the complete process of sediment erosion, transport, and deposition, in which sediments are generated from erosional landscapes, transported through routing systems, and ultimately deposited within depositional environments. Research on S2S not only advances our comprehensive understanding of Earth surface dynamics and their evolution, but also provides a geological basis and predictive models for identifying favorable sandbody distributions and guiding sedimentary mineral exploration and development. Based on a review of the history of S2S studies, this work highlights current research frontiers, including integrated perspectives on modern S2S systems,

* 国家自然科学基金项目(编号：42272110)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42272110)]
收稿日期：2025-09-16 改回日期：2025-10-08

deep-time S2S systems and palaeogeographic reconstruction, characterization of S2S processes coupled with geomorphic-sedimentary evolution modeling, and applications of S2S theory in energy geology. Significant progress has been achieved in several aspects, such as classification of S2S systems and characterization of their main types, source-area attributes and sediment supply, sediment transport processes and signal propagation along routing systems, depositional processes (sandbody dispersal systems) and their controlling factors, quantitative characterization of S2S components (e.g., the BQART model), and prediction of sandbody distribution. Finally, future research should place greater emphasis on the quantitative characterization of sediment transport and signal propagation of routing system, as well as predictive approaches for sandbody distribution.

**Key words** source-to-sink system, source area and sediment supply, sediment routing system, sedimentary processes and controlling factors, sandbody prediction, future tendency

**About the first author** ZHU Xiaomin, born in 1960, Ph. D., professor, engaged in teaching and research of sedimentology. E-mail: xmzhu@cup.edu.cn.

# 1 概述

## 1.1 发展历史

源汇系统的概念最早由美国地质调查局 Meade (1972, 1982) 提出，其核心思想是从整体视角揭示物源区至沉积区的连续过程。其研究强调在人类活动与自然过程共同作用下，沉积物供给在河口和沼泽环境中多被滞留，仅有少量输送至深海，这标志着源汇系统作为沉积地质研究重要框架的开端。随后源汇概念在气候变化、碳循环及大气污染等全球过程研究中反复被提及 (Taylor and Lloyd, 1992；徐胜友和蒋忠诚，1997；陈利顶等，2006)。地球表层系统中的源汇系统研究可追溯至 1999 年美国国家自然科学基金会 (NSF) 联合海洋学协会 (JOI) 制定的大陆边缘计划 (MARGINS Office, 2003)。随后，美国 STRATAFORM、欧洲 EUROSTRATAFORM、新西兰 MARGINS2S、日本“亚洲三角洲演化与近代变化”等大型源汇研究计划相继开展。2007 年国际地表动态建模系统联盟 (CSDMS) 成立，为源汇过程模拟提供多种开源技术。2011 年，美国地球物理联合会 (AGU) 召开主题为“时空演变下的源汇系统”查普曼会议，会议成果于 2016 年组织专辑在 *Earth-Science Reviews* 杂志上出版。2020 年，由欧盟“地平线 2020”资助的“源汇未来” (S2S-Future) 项目启动，汇集了全球 9 个国家 22 个机构的科研人员，通过方法创新、人员培训、宣传推广等工作在源汇系统基础研究及能源地质应用方面产生了重要的影响。与此同时，世界大河与三角洲体系源汇线上系列研讨会连续 3 年(2020-2022) 成功举办，累计有超过 100 位学者展示相关研究成果，表明全球源汇系统研究已步入高潮阶段。

21 世纪以来，中国源汇系统研究从无到有，飞速发展，展现出强劲活力。2000 年启动的国家重大基础研究规划项目“中国边缘海的形成演化及重要资源的关键问题”，首次涉及源汇系统研究 (李铁刚等，2003；高抒，2005)。2007 年中国海沉积物“源到汇”研讨会、2013 年海峡两岸在东海及台湾海峡“从源到汇”研究伙伴科学研讨会、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的顺利举行，持续推动中国大陆边缘源汇系统研究的发展。2015—2020 年国家海洋局国际合作项目“亚洲大陆边缘源-汇过程与陆海相互作用”的顺利完成，在国际上产生了积极的重大影响 (石学法等，2021)。近年来，王成善院士在主持的“中国沉积学发展战略研究”项目中，将源汇系统作为中国沉积学未来 4 个重要学科发展方向之一，认为其将有望取得具有国际前沿的开拓性成果 (王成善和林畅松，2021)。

## 1.2 定义和总体关注热点

源汇系统是沉积物 (固体颗粒与化学溶解物质) 从物源区经搬运路径最终到达沉积区的动力学系统 (林畅松等，2015)，其核心在于构建一个跨时空尺度的连续地质系统模型。该系统不仅聚焦沉积物特性 (如矿物组成、粒度分布、沉积物通

量等）及其在系统内变化特征（Michael and Zühlke，2022），而且侧重于沉积物通量响应环境信号的扰动过程（Romans *et al.*，2016；Tofelde *et al.*，2021；Castelltort *et al.*，2023）。

近 40 年来，源汇系统研究关注重点从早期剥蚀、路径示踪及基础模型构建，向沉积颗粒、水动力及沉积过程尺度推进，进而关注气候—构造的联合作用与深水沉积响应，近期向多技术方法、多学科集成与定量耦合分析转换（图 1），主体聚焦以下 4 个方向：（1）整合视角下的现代源汇系统研究：当前研究不再孤立分析物源区、沉积区或沉积路径系统中的任一部分，而是强调从侵蚀源头到最终沉积保存全过程耦合（Liu *et al.*，2016）。这种整合视角促使研究者关注地貌演化、河道迁移、沉积物分选等关键环节及其对现代源汇系统发育的控制作用（Bentley *et al.*，2016）。（2）深时源汇系统与古地理重建：源汇系统重建是深时盆地地貌演化与源汇过程研究难点（Helland-Hansen *et al.*，2016；Liu *et al.*，2024）。通过碎屑矿物定量示踪、地貌比例关系及物质平衡分析等研究方法，精细表征古水系样式、沉积物路径系统、古地理面貌及沉积物通量变化特征（邵龙义等，2019；谈明轩等，2020）。（3）源汇过程表征与地貌—沉积演化耦合模拟：随着遥感技术与计算软硬件技术的发展，源汇定量表征及数值建模能力得到极大提升。通过源汇要素表征与数值模拟研究量化外部驱动对地貌演化与沉积体系的协同影响（何锦秋等，2024），以解释与预测沉积构型与演化趋势。（4）源汇系统理论的能源地质应用：源汇系统研究为传统层序地层学及储层地质学难以解决的诸多问题提供理论补充（李顺利等，2017；朱红涛等，2022；徐长贵和龚承林，2023）。随着源汇系统理论与数据驱动模型融合，其在常规/非常规油气勘探、热储资源开发、二氧化碳地质封存等领域的应用潜力持续上升。

## 2　源汇系统关键要素研究进展

### 2.1　源汇系统的地貌单元组成

源汇系统作为沉积地质学与盆地分析的重要研究框架，通常由物源区、搬运通道和沉积区 3 大基本地貌单元组成，并通过边界条件与物质流动建立起动态耦合关系（聂银兰等，2022；朱筱敏等，2023）。物源区是源汇系统的基本要素与沉积物供给的物质基础，其研究需在区域地质学背景下，综合开展物源区风化效率评价、碎屑物源分析与定量示踪、古构造恢复及古地貌精细刻画等工作。搬运

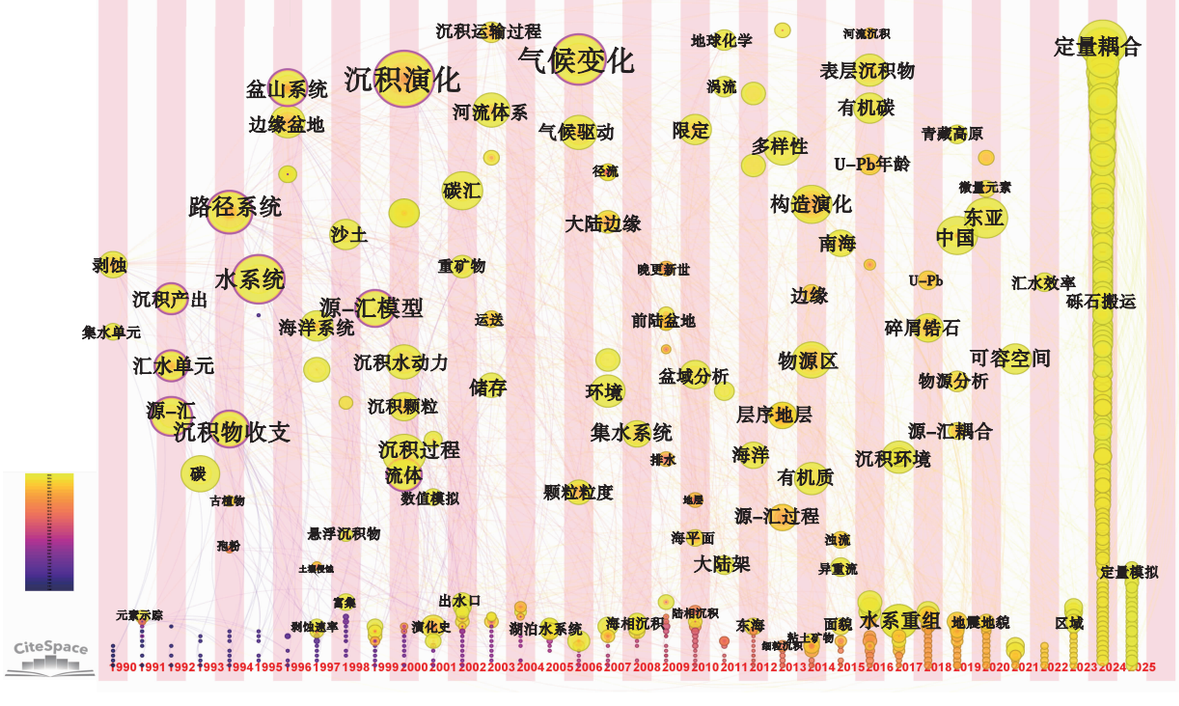



图 1　源汇系统知识图谱（基于 1990—2025 年 WOS 发表文献统计）

Fig. 1　Knowledge graph of source-to-sink systems（Based on the WOS publications from 1990 to 2025）

通道是连接物源与沉积区的输运纽带，狭义上包括古沟谷、构造变换带及相关输砂通道，广义上则涵盖沉积物从源到汇完整的沉积路径系统，涉及河流、冰川、风成或海流等多种搬运机制，因此其研究重点不仅在于单一通道的识别与剖析，更强调沉积物流的整体性、动态性与系统性。沉积区则是物源供给与搬运作用的综合响应，形成冲积扇、河流、三角洲、湖泊或海岸、重力流等沉积体系，其沉积样式与分配特征既继承了物源供给与搬运过程的复杂性，同时也叠加了沉积区的物质分配机制。

这 3 个地貌单元的边界常表现为地貌梯度或动力条件的明显突变：例如山麓地带的冲积扇常标志着物源区向沉积区的过渡；高能河道进入低能盆地或湖泊环境处，搬运区与沉积区的界线被清晰界定；而河口三角洲则反映了搬运区向沉积区的最终转换。在源汇系统框架下，沉积体系研究结合层序地层学、沉积学与地震沉积学等方法，不仅揭示了沉积体系的分散格局，还能定量表征深时沉积体系的发育形态与规模，并通过其垂向演化特征揭示深时源汇系统的整体响应过程。

## 2.2 源汇系统分类和主要类型特征

源汇系统可从时间尺度、空间尺度和几何形态 3 个维度进行分类，不同类型在物源供给、搬运通道特征与沉积区响应上表现出显著差异。这种多维度划分不仅揭示其形成与演化规律，同时也为沉积盆地类型化研究提供重要理论支撑。

### 2.2.1 时间尺度分类

源汇系统按照时间尺度可划分为现代、中尺度（注：第四纪）与深时 3 类（Romans *et al.*，2016）。现代源汇系统（$<10^2$ 年）受控于气候事件、人类活动及植被覆盖等因素的短期变化。该尺度下保留较为完整的历史资料与器测记录，能开展相对精确的源汇过程分析与预测。第四纪源汇系统（$10^2$ ~ $10^6$ 年）受气候变化与基准面波动共同控制。其物源区与搬运区地貌格局相对稳定，沉积区演化受高频海平面变化、轨道—亚轨道气候波动调控。深时源汇系统（$>10^6$ 年）受控于长时间尺度构造演化及重大气候事件。由于物源区保存条件差、地层记录不完整、边界条件不确定等因素，常采用模式指导、正演与反演相结合的研究方法恢复该类源汇系统（刘强虎等，2023）。

### 2.2.2 空间尺度分类

源汇系统按空间尺度可划分为板块、盆地、盆内区带及盆内流域 4 个层级，其研究侧重点各具特色（刘强虎等，2023；Liu *et al.*，2024）。板块尺度源汇系统（源汇距离大于 $10^5$ km）着眼于由陆到海的大型源汇系统，强调陆相盆地作为沉积物中转站的角色；盆地尺度源汇系统（源汇距离 $10^3$ ~ $10^4$ km）突出沉积盆地与其临近物源区的耦合关系；盆内区带尺度源汇系统（源汇距离 $10^2$ ~ $10^3$ km）关注沉积盆地内部不同构造单元间在地貌、构造与沉积体系的差异性；盆内流域尺度源汇系统（源汇距离$<10^2$ km）则聚焦单一流域长期演化及其与邻域相互作用。这 2 个盆内次一级尺度源汇系统研究也是沉积环境或沉积相、沉积砂体分布预测的关键（林畅松，2019）。

### 2.2.3 几何形态分类

基于现今陆地和海洋地貌特征综合分析，可将全球海相源汇系统按照几何形态可划分为“陡-短-深、宽-深、宽-浅”等 3 种类型（Helland-Hansen *et al.*，2016；Nyberg *et al.*，2018），常发育于不同类型的构造与沉积背景中。其中，陡-短-深源汇系统表现为窄陆架、高坡差、短搬运路径的典型格局，常具有瞬态型源汇信号传输特征，主要发育于裂谷盆地、走滑拉分盆地以及弧前盆地等构造背景（图 2）。相比之下，宽-深源汇系统常具有缓冲

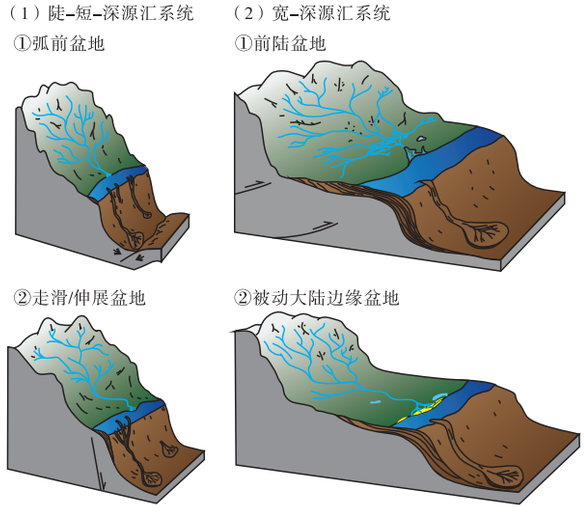



图 2 现代源汇系统几何形态分类（据 Nyberg *et al.*，2018；有修改）

Fig. 2 Classification of geometrical morphologies of modern source-to-sink systems (modified from Nyberg *et al.*, 2018)

型源汇信号传输特征。其地形相对平缓、陆架宽广、地形高差大，主要见于被动陆缘与前陆盆地（图 2）。除此之外，宽-浅源汇系统则常见于陆表海或浅海海道沉积背景（Nyberg *et al.*, 2018）。事实上，对于陆相湖盆源汇系统而言，也可采取相类似的分类方案。例如，陆-湖（断陷湖盆）源汇系统通常具有陡-短-深的特征，而陆-湖（拗陷湖盆）源汇系统则具有宽-深的特征（林畅松等，2015）。

## 2.3　物源区特征和供源作用

作为沉积过程的物质基础，预测物源区产出碎屑物的组分、粒度和通量是源汇系统研究的关键（刘强虎等，2023）。长期以来，相关研究多侧重于利用碎屑物组分示踪物源演化，而对沉积物通量，尤其是粒度特征的关注相对不足（Caracciolo, 2020）。构建源区属性与供源特征间的定量联系已成为当下研究热点之一。近年来，部分学者强调物源区关键地质属性（如面积、高差、降雨量）并用于预测沉积物通量。Syvitski 和 Milliman（2007）基于全球 488 条河流的地形、气候以及 30 年沉积物通量数据拟合构建了 BQART 模型（图 3）。Watkins 等（2019）在研究希腊科林斯湾全新世源汇系统时发现，BQART 模型预测的沉积物通量与基于地震资料反演得到的实际碎屑物通量高度一致，表明该模型可拓展应用至千年尺度。Sømme 等（2009a）通过对 29 个现代大陆边缘源汇系统的拟合，建立了物源区地貌参数与沉积区沉积体参数之间的比例关系（图 3）；其后在挪威海 Møre 盆地 Ormen-Lange 源汇系统的研究中得到验证，发现沉积区沉积体几何参数与古源区特征高度匹配（Sømme *et al.*, 2009b）。总体而言，前人构建的半定量—定量经验公式为碎屑通量估算提供了简单且可行的手段。但经验公式的有效性严重依赖于其初始样本的代表性，故上述公式在不同背景下的可靠性仍需大量实例进行约束（刘强虎等，2023）。

构造地貌学研究为预测物源区碎屑物产出提供了基于过程的新视角。在无冰川覆盖地区，碎屑物产出与河流侵蚀所驱动的地貌演化密切相关（Allen and Hovius, 1998；图 3）。以意大利亚平宁山

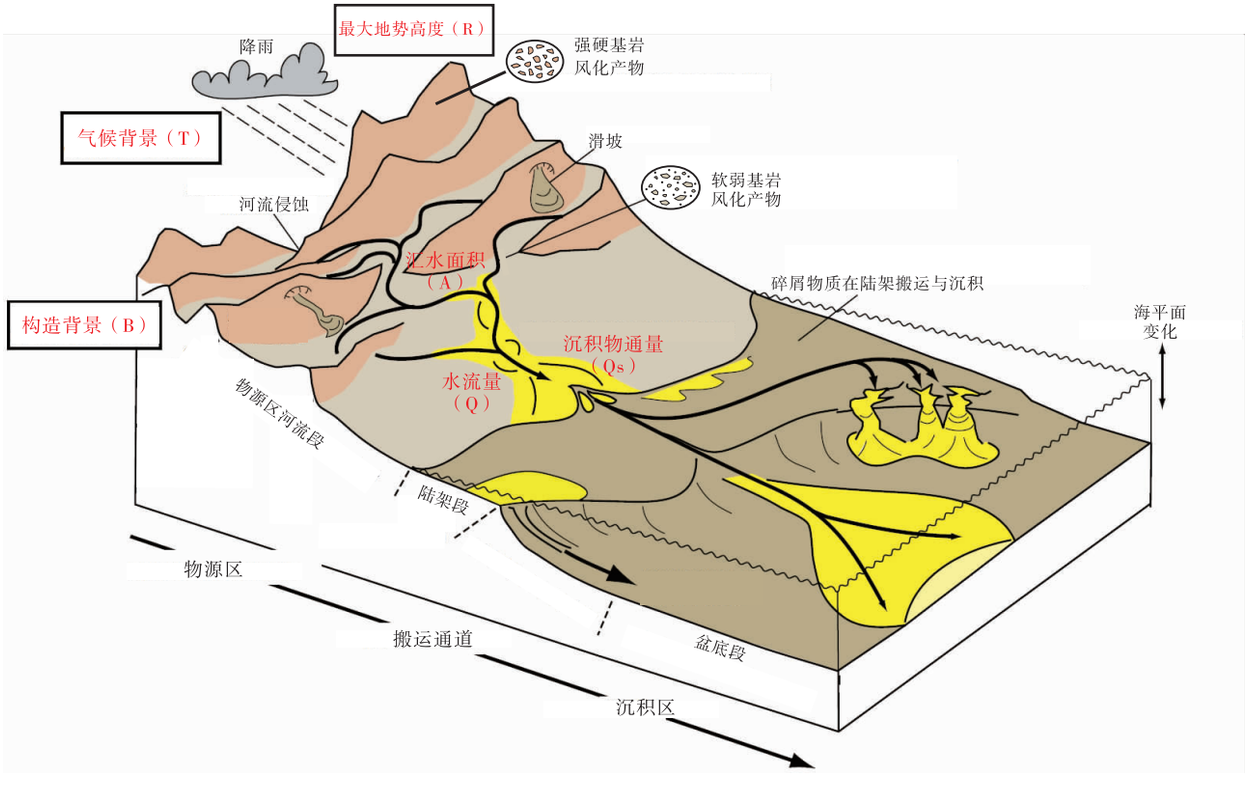



图 3　物源区特征与碎屑产出间的关系及供源其对源汇系统的影响（据 Allen and Heller, 2012；有修改）

Fig. 3　Relationship between provenance characteristics and clastic production, and their influence on source-to-sink systems (modified from Allen and Heller, 2012)

脉的断层下盘河流为例，Whittaker 等（2010）发现源区可根据裂点位置划分为上下 2 个侵蚀速率截然不同的部分。同时，河流袭夺作为一种能够显著改变流域面积的地貌过程，在现代地貌中已被广泛识别（Malusà *et al.*, 2024）。相应地，在深时地貌演化中同样可能普遍存在河流袭夺事件，造成供源体系在碎屑组分、粒度和沉积物通量上的显著变化。与传统的经验模型方法相比（Syvitski and Milliman, 2007; Sømme *et al.*, 2009a），构造地貌学视角更强调源区侵蚀速率的空间非均一性及流域范围的动态调整。然而，构造地貌学方法在深时源-汇系统研究中应用受限，主要因地层记录不完整、时间尺度差异与边界条件不确定等因素。未来需融合多学科数据，发展非稳态模型，引入正反演结合方法，并提高时空分辨率，以揭示古流域侵蚀过程及沉积响应。

## 2.4 搬运过程和沉积路径系统信号传输

源汇系统的输送系统连接物源区与沉积区，是沉积物从侵蚀、搬运到最终堆积的核心环节。其动力机制、搬运路径及物质改造特征深刻影响着沉积体系的展布与演化（Allen, 2008, 2017; Sømme *et al.*, 2009a）。沉积物输送系统由多个地貌动力学单元组成，涵盖流域盆地—河流系统、陆架系统和深海系统等各类沉积环境。每个系统中的沉积物搬运过程相互作用、动态耦合，通过多级联动方式将物源区的物质输送至沉积区（Allen, 2017）。流域盆地—河流系统是陆地搬运的主要环节，涉及流域内物源区与海洋或内流盆地之间的连通（图 4）。该系统的沉积物输运能力与效率可通过流域面积、主干河道长度、径流量等多种参数进行定量表征（Sømme *et al.*, 2009a; Kocurek and Ewing, 2012）。

陆架系统作为海岸与河流沉积物输运系统交互作用的枢纽，对海平面变化具有高度敏感性。其特点和水动力过程决定了沉积物的储存潜力及向深海的输出效率（Romans *et al.*, 2009; Mazumder *et al.*, 2017）。大陆架宽度、坡度、陆架坡折处水深等因素直接影响沉积物搬运模式和沉积过程，特别是波浪、潮汐等水动力过程对物质分布的调控作用。这些因素共同决定了沉积物如何从陆源向深海输送，并在不同海域表现出沉积特征的差异性。深海沉积物输送系统主要接收来自陆架的沉积物，尤其是通过深水重力流与牵引流向下游方向输送（Kneller, 2003; Bernhardt *et al.*, 2016; Ge *et al.*, 2017）。陆坡沉积物由从陆架溢出的悬浮沉积物构成，沉积物水深梯度与斜坡特征依赖于构造沉降与沉积物供给的分布（Strong and Paola, 2008; Gales *et al.*, 2013）。在深水区，沉积物通量从接近 0 到超过 90%不等，体现出沉积物输送系统的差异性（Allen, 2017）。作为传递上游环境信号的载体，其变化可能受到构造、气候等强制作用的影响，但信号在向下游传播过程中常常被修改、延迟或掩盖。成功识别外部信号的周期和幅度是否超越系统自生扰动的影响，是能否有效解读深时地层记录的关键问题之一（Romans *et al.*, 2016; Caracciolo, 2020）。

## 2.5 沉积过程与控制因素

沉积物的时空分布与特征受构造、气候、海平面变化及生物活动等多因素的综合控制，这些外部因素通过调节物源供给、搬运效率和沉积空间，深刻影响沉积物的形成、搬运与分布（Allen, 2008, 2017; Liu *et al.*, 2016; Romans *et al.*, 2016; Chen

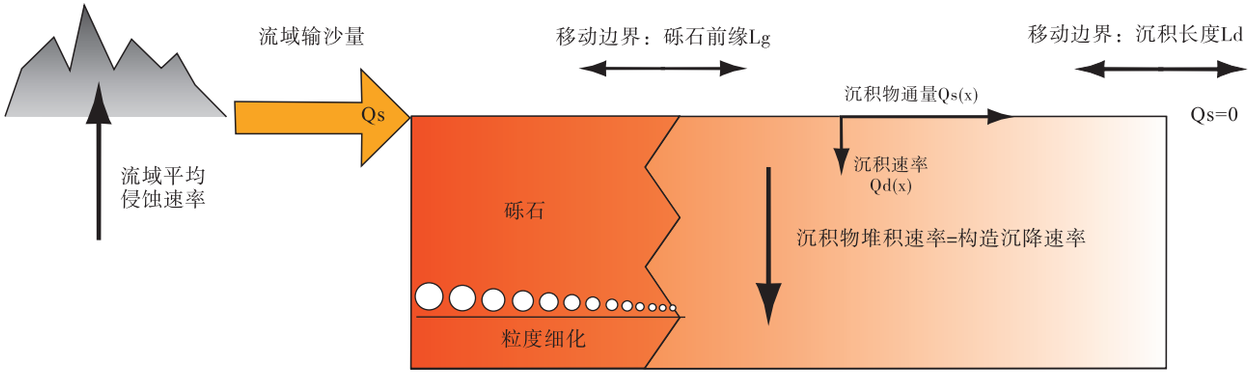



图 4 沉积物路径系统中的沉积物扩散与沉积（据 Allen and Allen, 2013；有修改）

Fig. 4 Sediment dispersion and deposition in sediment routing systems (modified from Allen and Allen, 2013)

*et al.*，2020；Tan *et al.*，2024）。构造作用决定了盆地类型、沉积物产率与沉积分散格局（Gawthorpe and Leeder，2000），其影响主要体现在断裂与褶皱对物源供给方向、沉积范围及体系展布的控制（Liu *et al.*，2016；Chen *et al.*，2022）。气候控制则体现在风化产物供给与搬运机制的差异（Romans *et al.*，2016；Allen，2017），湿润气候增强河流搬运与化学风化，干旱气候则以风成沉积和蒸发岩沉积为主，冰期与间冰期交替更在地层中留下规律性沉积响应（Sun *et al.*，2025）。海平面升降直接调控沉积物的供源方式（点源/线源）与沉积分布格局，同时影响沿岸流与等深流动力过程（Covault and Fildani，2014；Chen *et al.*，2021）。此外，生物活动通过生物泵作用、絮团形成与有机质富集等机制显著改变沉积物搬运和沉积特征（图 5；Baker *et al.*，2017；Craig *et al.*，2020；Sobocinska and Bass，2022）。

除了上述外部因素，近期研究强调了沉积内动力机制在源汇系统演化中的关键作用（Romans *et al.*，2016）。所谓内动力机制，主要包括沉积物在搬运和沉积过程中因颗粒相互作用、流体动力学反馈及地貌演化耦合而产生的非线性响应。沉积内动力机制通常作用于较小的时间和空间尺度，如洪水、风暴、浊流或河流袭夺等事件过程，常在事件至千年时间尺度内表现为快速且非线性的沉积响应（Romans *et al.*，2016）。然而，这些短时过程通过

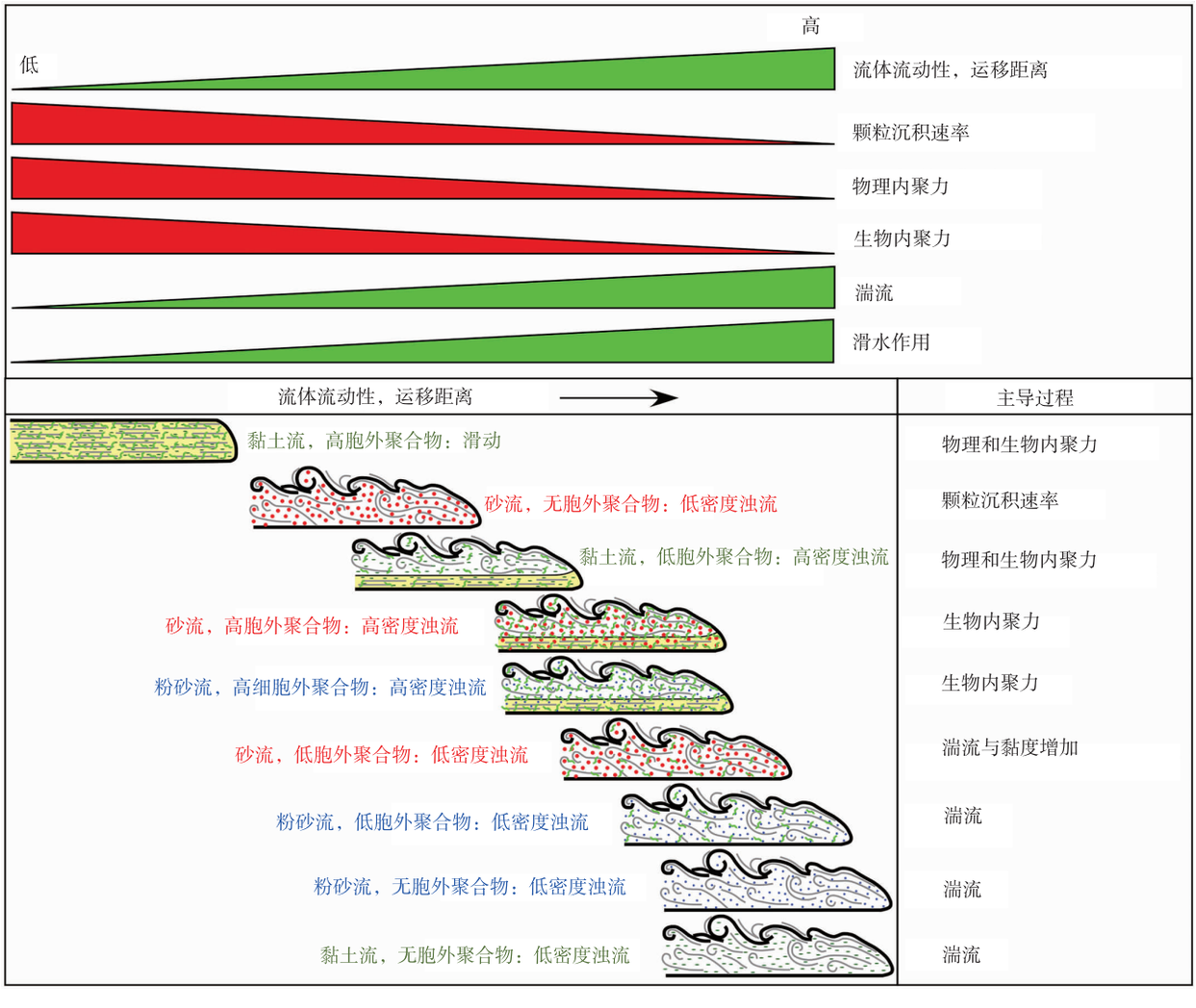



图 5　细胞外聚合物含量对沉积重力流类型和输送距离的影响（据 Sobocinska and Baas，2022；有修改）

Fig. 5　Influence of extracellular polymeric substance content on sediment gravity flow types and transport distance (modified from Sobocinska and Baas，2022)

长期的叠加与重复发生，往往在更大时间尺度上对地貌格局和沉积充填产生累积效应。例如，河流袭夺可逐步重塑流域范围，三角洲朵叶迁移可在深时地层中形成完整的沉积序列。由此可见，内动力机制虽以小尺度过程为主，但其长期效应在中等时间尺度乃至更深时的地层记录中同样具有重要的地质意义。

## 2.6 源汇系统要素定量表征

随着观测技术的进步和数值模拟方法的发展，源汇系统要素的定量表征在分辨率、精度和预测有效性上取得了系列突破。多学科方法集成已成为主流，其中地质年代学法通过碎屑锆石年代学及同位素等物源示踪技术有效建立了源区与沉积区的物质联系（陈星渝等，2024）；将今论古法通过现代过程观测与古代地质记录类比，实现古水动力参数和侵蚀速率定量估算，其关键在于地质背景的类比及地质参数的选择；沉积学法则利用地震地貌、岩心测井数据或源区裂点迁移分级统计沉积物通量，重建盆地充填历史（Liu *et al.*，2024），但该方法受多变量控制，需兼顾构造—气候背景及研究尺度。

作为源汇系统定量研究的重要进展，BQART 模型建立了入海（湖）流域沉积物通量与地质背景 B、水流量 Q、流域面积 A、最大地势高度 R 及年均温度 T 之间的经验关系（图 3；Syvitski and Milliman，2007；Nyberg *et al.*，2021）。该模型已逐渐发展为深时古流域地貌重建的重要工具。其应用本质上是一个多学科交叉、反复迭代与验证的过程，不仅能够定量估算沉积物通量，还为理解构造演化、气候变化、地表风化与物源供给的耦合关系提供了支撑（王新航等，2022），实现了“物源区—搬运通道—沉积区”的全过程定量表征。在执行过程中，模型一般包括 4 个步骤：（1）获取 BQART 模型中各参数并进行定量计算；（2）代入公式，获得理论沉积物通量；（3）通过与沉积体积回填法等实测沉积物通量进行对比，反复调整关键参数，尤其是 R 值和 A 值，实现模型校准；（4）开展古地势重建与演化分析，在拟合条件下利用 R 值揭示构造抬升的幅度、速率及演化序列。进一步的拓展包括：量化物源供给、评估搬运效率及预测沉积响应。例如利用该方法揭示峨眉山大火成岩省内带剥蚀区在晚二叠世持续缓慢抬升，至末期超过 200 m，累计抬升幅度 500～750 m，展现了 BQART 模型在深时古地势重建中的可行性与应用潜力（王学天等，2022）。

在具体应用中，关键参数的可靠获取与检验始终是基础，模型的有效性在很大程度上取决于数据的精度与代表性。此外，BQART 模型主要适用于气候温暖湿润、构造相对稳定的大陆边缘源汇系统研究，而在陆相湖盆中的应用仍处于探索阶段。因此，预测结果需与独立地质证据反复比对，并通过多学科交叉验证加以约束，以实现对古地理演化的系统性认知。

## 2.7 源汇系统与砂体预测

等时地层框架下沉积充填过程与砂体分布预测是源汇系统研究的核心，直接关系到沉积矿床勘查的准确性和成功率。尽管该领域已有较为成熟的实践研究，但当前仍存在明确的挑战。深时源汇系统研究多依赖钻测井和地震资料解释，同时结合层序地层学与地震沉积学方法对沉积体系进行表征（Liu *et al.*，2016，2019）。然而传统研究主要集中于湖盆内沉积体形态、属性及油气资源预测，缺乏对沉积物形成、搬运至最终堆积全过程的系统分析。物源区表征侧重于残余地貌与不整合面特征，搬运过程研究则多聚焦于通道类型与规模的描绘。由于深时地质资料的分辨率和空间分布的局限，导致在等时地层框架内对沉积体的精确刻画与预测仍存在较大不确定性，成为当前深时源汇系统研究面临的主要瓶颈。

在源汇系统框架下，物源供应和可容空间共同调控沉积层序发育。与传统的层序地层分析侧重可容空间不同，源汇系统强调物源供应的主导作用（Bhattacharya *et al.*，2016）。当物源匮乏或与搬运通道不匹配时，可能会导致沟扇系统失配，基准面下降期未必形成富砂沉积（徐长贵，2013）。在多物源背景下，不同沉积体系间的相互作用可导致某一物源体系的增强以及其他体系中的砂体规模的萎缩，进而控制砂体时空差异展布样式（Cullen *et al.*，2019；Liu *et al.*，2023）。在多旋回叠合盆地或多幕构造背景下，原型盆地的充填沉积可能遭受抬升和剥蚀，改造早期地层并影响沉积物通量（Michael，2013；谈明轩等，2020）。这种背景下，长周期沉积速率低于短期速率（Schumer and Jerolmack，2009），因此需要从构造平衡和沉积响应尺

度分析剥蚀量变化，并关注隐性物源区的影响。

基于源汇系统的砂体预测受控于多个地质因素。已有研究表明，构造、气候和水体等多重因素共同作用制约沉积过程。差异构造背景下的地壳伸展与岩浆作用不仅影响地层改造，也可能限制沉积砂体分散路径（Chen *et al.*，2022）。气候条件变化通过控制沉积物通量与基准面波动，影响三角洲和湖底扇的富砂性（Zhang *et al.*，2020；Liu *et al.*，2022）。水体深度变化则通过可容空间和携砂能力调控沉积物搬运与堆积，造成不同坡度下扇体类型和分布的差异（Strong *et al.*，2005；Tamura，2012）。砂体预测的关键在于深化源汇要素定量表征和动态耦合机制(图 6)，结合物源区、搬运通道及沉积响应参数构建“物源供给势能—搬运效率—沉积体积”模型，可有效提升渤海湾盆地古近系储集层预测成功率至 80%（徐长贵等，2020）。

## 3　源汇系统研究发展讨论

### 3.1　深化物源体系研究

物源体系研究应更多关注物源区产出碎屑物的成分和粒度特征。已有研究表明，在相似的构造和气候条件下，冲积扇沉积过程与沉积相差异主要受物源区供给的碎屑物粒度控制：以花岗岩、片麻岩、石英岩等坚硬结晶岩为主的源区，常产出粗粒砾石和块状物质，利于形成碎屑流沉积；而以砂岩、页岩、泥岩等较软沉积岩为主的物源区，则更易产出细粒物质，促使片流沉积的发育（Blair，1999；Nichols and Thompson，2005）。由此可见，碎屑成分和粒度可通过影响沉积动力学过程而控制沉积相类型与演化。明确给定源区在特定岩性、构造和气候背景下产出的碎屑颗粒特征，这对于沉积体形态表征和储集层刻画具有重要指示意义。

物源体系研究应紧密关注河流地貌演化过程，向多方法联合应用上发展。河流地貌分析在揭示物源区侵蚀速率的非均一性和流域范围的动态性等方面展现出难以替代的巨大潜力（Finlayson *et al.*，2002），但其在地下残余地貌中的适用程度仍有待深入探讨。而常用的经验关系（如 BQART 模型与地貌比例模型）则具有相对易于操作的优点。根据研究区的实际情况选择相应的方法，并尽可能综合应用多方法，刻画物源区碎屑产出有利于约束结果的不确定性（Brewer *et al.*，2020）。针对珠江口盆地惠州凹陷超覆区保存的残余地貌，基于河流地貌分析，发现物源区 2 大关键流域的河道剖面存在由边界断层触发的构造裂点，其溯源迁移过程可促成内流水系的沟通（刘强虎等，2025）。这一地貌演化规律同沉积区粒度整体变细、通量变大趋势一致，进而构建了基于地貌过程的源汇系统耦合新模式(图 7)。

### 3.2　多时间尺度定量地质表征

现今源汇系统研究已逐步由定性描述转向致力于“从源区到汇区”整个沉积物搬运和沉积过程的精细数值化表征。前文述及，根据沉积信号的时间尺度，可划分为现代系统、第四纪系统和深时系统，不同源汇系统其定量化表征方法以及面临的核心科学问题与挑战不同(表 1；Helland-Hansen *et al.*，2016)。

源汇系统的不同时间尺度定量地质表征已成为沉积地质学和盆地分析的核心研究方向，在整合地质年代学、地球化学、沉积学、数值模拟和大数据科学方法的同时，也面临着多方面挑战，主要包括：(1) 大数据驱动的系统性研究挑战：面临着数据整合与误差的不确定性，有效整合多源、多尺度的数据，并量化其误差范围，仍是所有尺度定量化地质表征面临的重要问题。(2) 高分辨率预测与人工智能化挑战：定量技术的发展促进不同时间尺度源汇系统研究的深入，未来将向更高分辨率、更高精度的动态模拟和智能化预测方向发展。虽然机器学习算法能够整合地质、地球物理和地球化学数据，以建立更完善的预测模型，但机器学习结果能否突破现今人类地质认知框架，产生新的地质理论，仍然有待进一步验证。(3) 源汇系统模型复杂性：高分辨率数据的出现为多因素地质过程分析提供了基础，也造成了与地质过程匹配的模型越发复杂化。复杂模型的完善化与有效性、普适性之间存在一定的反相关关系，因此大数据支撑下地质模型的复杂性与有效性需维持一定的平衡。(4) 不同尺度研究认识的互通性：“将今论古、古今对比”的现实主义方法是沉积学研究的核心理念。随着地质学的发展，地质学家们意识到“the present is not always the key to the past（现今并非一定是过去的钥匙）”，不同尺度源汇系统研究如何相互佐证仍

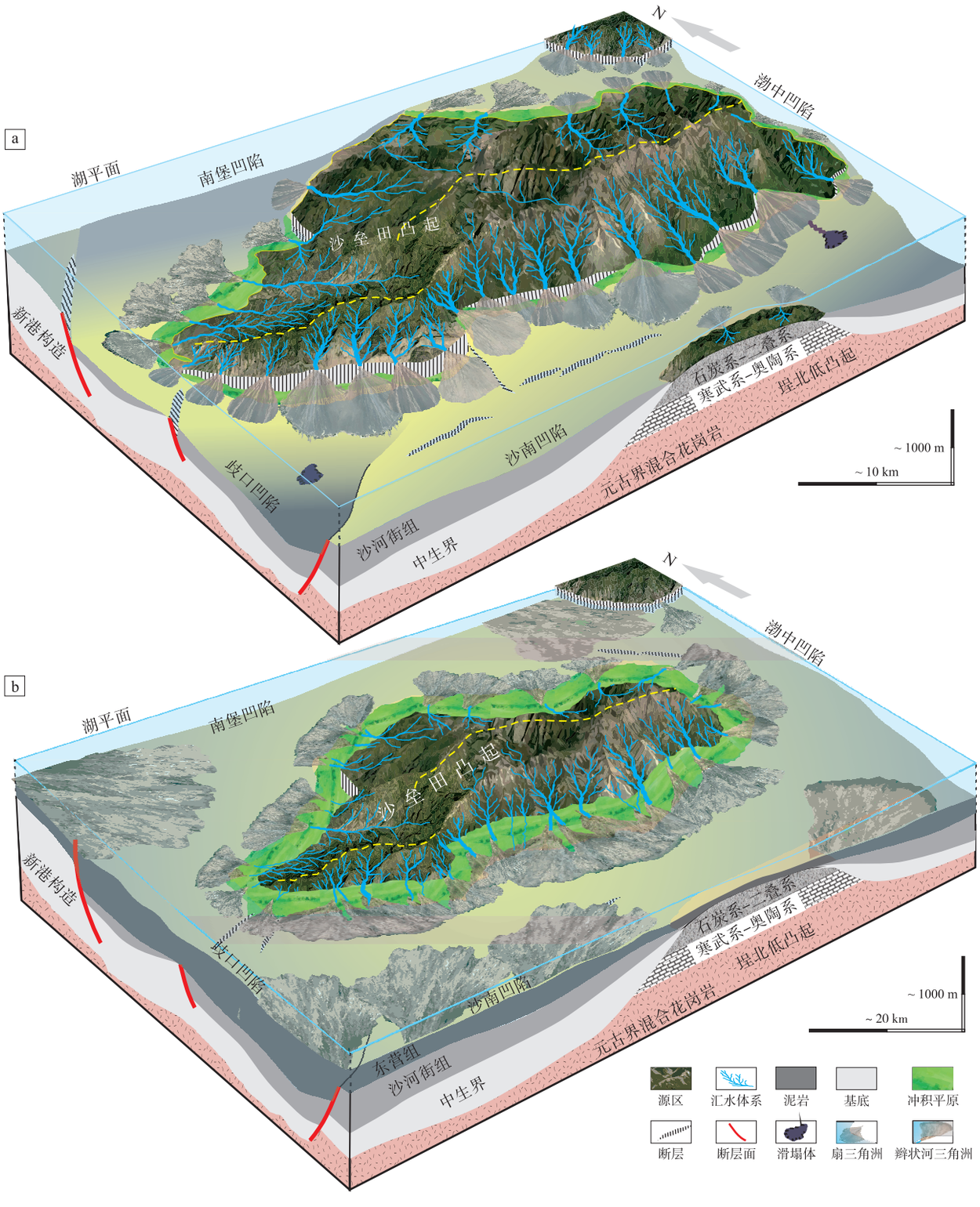



图 6 渤海海域沙垒田凸起及周缘沙河街组（a）与东营组（b）源汇耦合控砂模式

Fig. 6 Source-to-sink coupling and sand-controlled model of the Shahejie Formation (a) and Dongying Formation (b) in Shaleitian uplift and adjacent areas in Bohai Sea

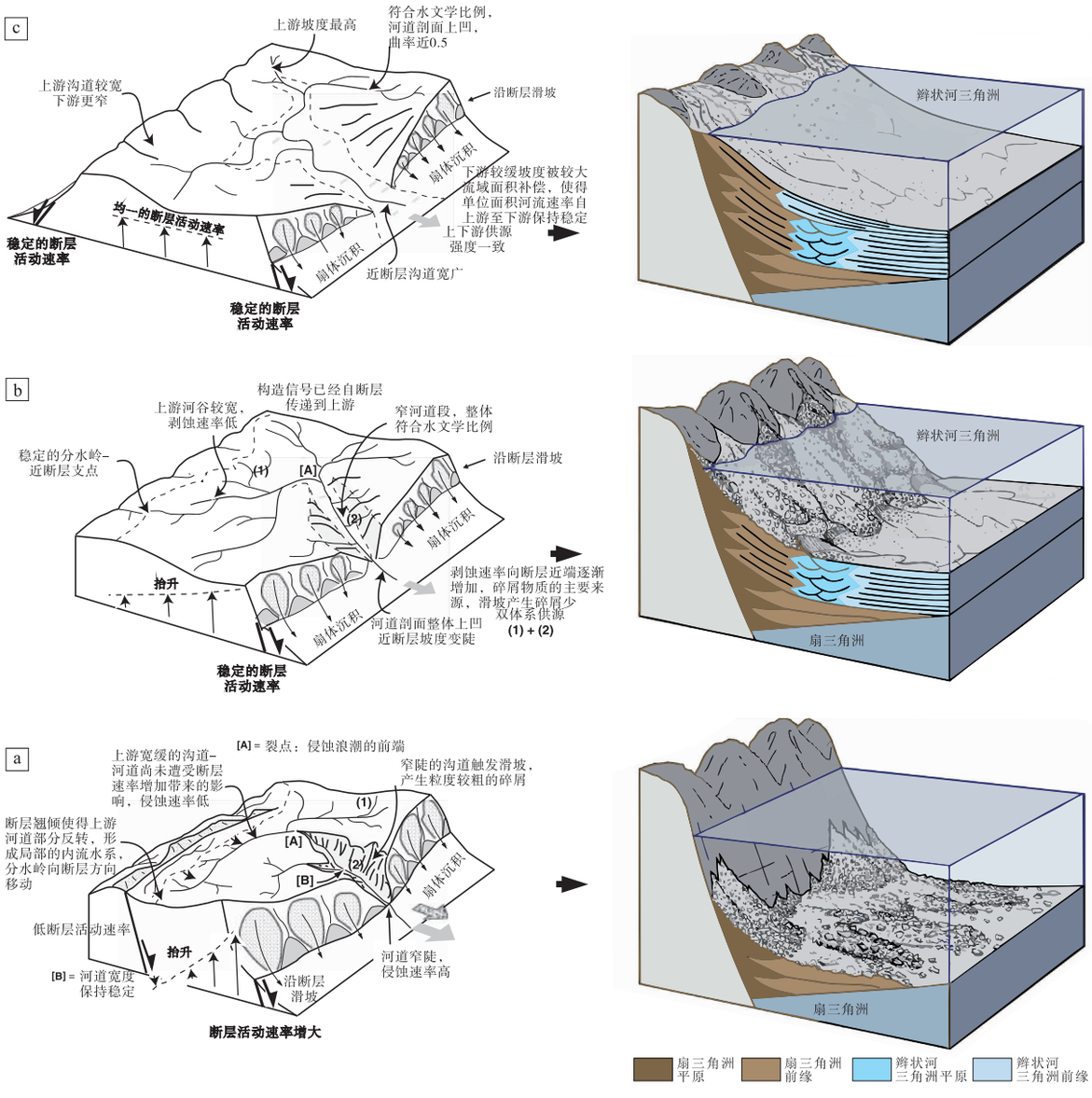



图 7　陆相断陷盆地断陷期（a）–转换期（b）–拗陷期（c）源区流域构造裂点迁移及沉积区扇体耦合响应模型

Fig. 7　Coupled response model of provenance tectonic breakpoint migration and fan development in the sink area during the syn-rifting (a)–transition (b)–post-rifting (c) stages of continental rift basins

**表 1　不同尺度源汇系统核心问题及其表征方法**

Table 1　Key issues and characterization methods of multi-scale source-to-sink systems

| 时间尺度 | 研究对象与空间尺度 | 核心科学问题与挑战 | 主要定量表征技术与方法 |
|---|---|---|---|
| 现代源汇系统 | 现代河流、三角洲、海底扇；米—千米级 | 过程响应机制、人类活动影响、实时监测数据获取 | 高精度地形扫描（LiDAR）、遥感卫星、原位传感器、水文测量、无人机摄影测量、沉积物通量实时监测 |
| 第四纪源汇系统 | 冰芯、湖芯、海洋沉积物；全球到区域尺度 | 气候事件序列、侵蚀—沉积速率突变、海平面变化影响、测年精度与分辨率 | 同位素测年（$^{14}$C，OSL）、环境磁学、元素地球化学、生物标志化合物、气候替代性指标分析、统计学分析 |
| 深时源汇系统 | 地层记录、古地貌；千米—数百千米级 | 地层保存不全、古环境参数稀缺、时间分辨率低、多期构造叠加改造 | 地层学与沉积学分析、碎屑锆石 U–Pb 定年与微量元素、重矿物组合、地球化学指标（主微量、同位素）、数值模拟（地形演化、沉积过程） |

是未来面临的另一重大挑战。

## 3.3 源汇系统要素发育主控因素

源汇系统基本要素（物源区、搬运通道、沉积区）受构造、气候、地貌三端元动态耦合控制，当前研究主要聚焦于 3 大方向：（1）构造—控制机制：量化构造活动对物源剥蚀量与通道格局的动态效应（Zhu *et al.*，2023，2024），建立构造活动—地貌响应模型，解析裂陷幕等事件触发系统的配置关系；（2）气候—地表过程耦合：揭示降水、温度、植被对风化效率与搬运能力的协同效应，构建气候敏感性方程以量化极端事件对物源通量调整的作用过程或配比（Nyberg *et al.*，2021；Chai *et al.*，2025；黄湘通等，2025）；（3）地貌—继承性约束：关注地貌抗剥蚀指数，分析古坡度、岩性差异对搬运路径分异的控制，评价古裂谷肩对沉积区物源贡献率的约束强度（Whipple，2004，2009）。

主控因素分析中需重点关注的 3 个方面问题：（1）多要素耦合复杂性：构造抬升—气候反馈—地貌响应存在非线性循环（Whipple *et al.*，1999；Wolf *et al.*，2022；徐胜等，2025）。在构造抬升作用下，降水增加引发基岩剥蚀加速，促使地形削平。有必要整合构造关联的热年代学数据与气候调控下古降水的指标信息（魏晓椿，2017），联合人工智能机器学习，开展构造抬升敏感性分析以量化因素作用权重。（2）跨圈层驱动配置响应不一致性：构造控沉积（$10^6$ 年尺度）与气候控过程（$10^3$ 年尺度）的时空不匹配（Romans *et al.*，2016；Chen *et al.*，2021）。需依托高精度层序地层格架关联长期沉降与短期气候旋回，辅以高分辨率定年技术约束事件沉积体时限。（3）局部与区域因素混杂：盆地内局部断层活动与区域季风对沉积中心的贡献率难以分离（Liu *et al.*，2020）。需构建源汇系统单元贡献率模型，通过重矿物分区—碎屑锆石年龄谱系解析物源贡献比例，利用沉积速率/化学指标比值建立相关判别函数。

## 3.4 深时源汇系统要素耦合模型

源汇系统研究的核心是建立各要素间的定量耦合关系，从而揭示从物源区到沉积区的全过程动力学机制。随着源汇系统研究逐步由近现代向第四纪、深时转变，源汇系统要素耦合模型需要在以下几方面深化研究。

### 3.4.1 多级次系统理论构建

源汇系统具有明显的级次性和尺度依赖性，未来研究需加强基于盆地类型和成因的源汇系统类型和级次划分（陈星渝等，2024）。不同级次的源汇系统对应不同的控制因素和过程响应：从时间尺度看，源汇系统可分为瞬间事件、短期过程和长期演化等多个层次，多时间尺度的定量表征是未来重要发展方向。从空间尺度看，源汇系统可划分为局部、区域和盆地等多个级次。小型源汇系统主要涉及单个山坡和冲积扇，大型源汇系统可能涵盖整个流域和大洋盆地。不同级次的源汇系统要素耦合模型不同，需开展区别细化研究。

### 3.4.2 驱动机制协同研究

源汇系统受构造、气候、海（湖）平面变化和地表过程等多种因素控制，未来研究需加强多驱动机制协同作用分析（刘强虎等，2023）。构造活动控制着物源区隆升和盆地沉降，进而决定了源汇系统的基本格局。气候条件影响风化作用和降雨模式，控制着沉积物的产生和搬运能力。海（湖）平面变化控制着基准面变化，影响着沉积物的最终堆积位置和保存状况。未来需建立多因素耦合模型，定量分析各因素的相对贡献和协同作用。

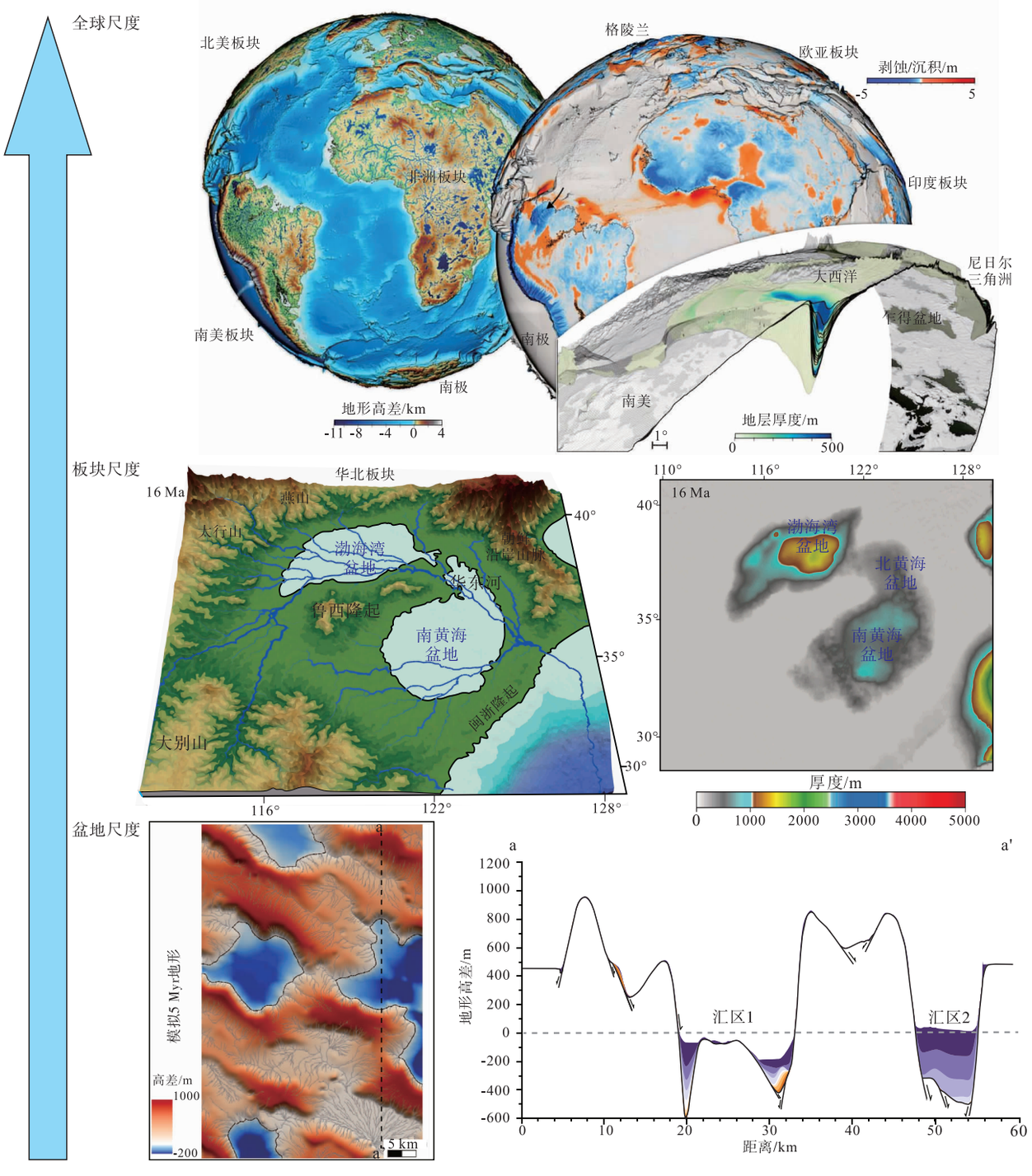
### 3.4.3 古气候与古环境约束强化

古气候和古环境对风化效率和沉积碎屑生成具有重要控制作用，是影响源汇系统物质平衡的关键环节（刘强虎等，2023）。植被发育通过影响风化速率和水土保持能力，显著改变沉积物生产效率。不同气候带下的源汇系统特征差异明显，需建立不同气候带下的特定源汇模型。古水温、古盐度同样也是影响沉积物搬运和堆积的重要因素之一。张治波等（2022）基于碎屑岩沉积学特征及元素地球化学特征，分析了昌都盆地古近纪沉积环境、古气候及物源特征，展示了多指标古环境重建在源汇系统研究中的应用价值。

### 3.4.4 系统平衡与响应模型深化

源汇系统研究的核心是建立从源到汇的物质平衡关系，未来需加强沉积收支分析，完善系统平衡模型。物质平衡分析基于质量守恒原理，通过比较物源区侵蚀量和沉积区沉积量，揭示源汇系统动态行为（刘炳强等，2022）。系统响应模型关注源汇系统对外部环境信号扰动的响应方式与时间尺度。马艺萍等（2022）基于北祁连北大河沉积物源正

演分析，指出流域内不同物源对现代河流不同碎屑成分贡献的差异性，证实通过河流物源正演分析可进一步建立现代河流源汇模式，这是实现物源量化分析的可行方向之一。未来需要结合现代过程观测和古代记录分析，建立从过程到记录的解译桥梁，开发更加完善的动态响应模型，同时考虑反馈机制和非线性行为，以更好地模拟真实源汇系统的动态演化。




注：全球尺度据 Salles 等（2023）修改；板块尺度据韩续等（2024）修改；盆地尺度据 Pechlivanidou 等（2022）修改

图 8　源汇数值模拟不同空间尺度及其多维度表达

Fig. 8　Various spatial scales and multi-dimensional illustration of source-to-sink numeric modelling

### 3.5 多学科方法的模拟动态分析

多学科动态分析是深时源汇系统研究的重要方向之一，其核心在于将数值模拟与物理实验有机结合，在可控条件下探索地表过程与沉积体系的协同演化机制。二者通过参数互校与结果对比，可显著提升源汇系统演化预测的可靠性与适用性(图 8)。

数值模拟具备探索多种情景与参数的优势，但沉积物搬运物理过程往往由简化方程控制，其结果依赖于对系统认知程度与计算资源约束(Castelltort *et al.*, 2023)。随着计算机技术的日新月异，源汇过程数值模型已经从一维拓展至三维，从水动力扩散扩展至地表过程、地球动力学与热力学相结合的多类型开源程序，使得古高程重建、古构造复原、古气候模拟等多种方法也可被纳入高精度源汇模型的构建中，为不同时空尺度、跨圈层正演模拟分析提供多元约束(Salles *et al.*, 2023)。未来数值模拟发展趋势将是建立跨尺度、全耦合的数字孪生模拟系统(图 8)，并引入高性能计算、数据同化与人工智能算法，以实现从“源区构造与气候驱动”到“汇区沉积响应”的全过程定量重建（李三忠等，2024)。

源汇系统物理模拟在研究中的优势在于其强大的过程类比能力（Castelltort *et al.*, 2023)。这种模型相对而言更加复杂，往往需要有机整合地表降雨模拟、构造砂箱模拟及沉积水槽模拟等多种实验，形成一个“从源到汇”的综合模拟系统（闫兵等，2023)。虽然物理模拟缩尺模型尚存争议，但其能够在流域至沉积盆地尺度再现自然系统的动力学特征（Rohais *et al.*, 2012)。目前常用的“源-汇”过程物理实验装置包括：单一汇水区与冲积扇源汇系统、半坡面陆相山麓源汇系统及环山山麓盆地源汇系统（Babault *et al.*, 2005; Graveleau *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2025)。这些模拟实验常采用具有可控力学性质的颗粒介质模拟基岩。通过喷雾系统模拟降雨侵蚀，沉积区为自由边界的平台，以便排出多余水体与沉积物。需要注意的是，目前这种物理模拟实验尚没有拓展到入海流域完整源汇系统研究中（Castelltort *et al.*, 2023)。

显然，通过实时模拟物源区山体的风化作用及水系迁移过程，系统、直观地分析沉积区建造样式，对深时源汇过程研究具有较强的指示意义与研究前景。

## 4 主要结论

当前，源汇系统研究热点关注“气候变化”、“沉积演化”“输运过程”“沉积演化”“沉积模式”“耦合关系”“定量表征”，特别是加强了整合视角下的现代源汇系统研究、深时源汇系统与古地理重建、源汇过程表征与地貌-沉积演化耦合模拟以及源汇系统理论指导能源矿床勘探开发和高效利用。

基于时间尺度、空间尺度和几何形态可对源汇系统进行分类；物源区特征和供源作用研究强调物源区面积、高差、降雨量和沉积物产出通量；搬运过程和路径系统信号传播研究关注流域面积、汇水盆地最大海拔、流域主干河道长度、径流量和沉积物通量等参数；沉积过程和控制因素研究聚焦盆地类型、沉积物产率、沉积分散过程等方面；源汇系统要素定量表征强化沉积物通量与地质背景（B)、水流量（Q)、流域面积（A)、最大地势高度(R)、年均温度（T）之间关系（BQART 模型)；源汇系统与砂体预测考虑从沉积物形成、搬运到最终堆积与分散的全过程耦合关系。

未来源汇系统研究发展应该关注源区产出碎屑物的成分、粒度特征以及化学溶解物质类型与含量，多时间尺度定量表征源汇系统将成为沉积地质学和盆地分析的核心；源汇系统要素（物源区、搬运通道、沉积区）发育受构造、气候、地貌三端元动态耦合控制，未来研究要量化构造活动（隆升速率、断裂强度）对物源剥蚀量、通道格局（水系分异度、沟谷陡峭指数）的动态效应，建立构造活动-地貌响应模型，揭示降水-温度-植被对风化效率（岩石抗蚀系数）与搬运能力（径流输沙强度）的协同效应，分析古坡度、岩性差异对搬运路径分异的控制；建立深时源汇系统要素定量耦合模型，揭示从物源到沉积区的全过程动力学机制；多学科动态分析是深时源汇系统研究的重要方向，数值模拟与物理实验有机结合是其重要研究手段，能在可控条件下探索地表过程与沉积体系的协同演化机制。

**后记：**在本文付梓之际，适逢恩师冯增昭先生百年诞辰，谨以此文表达深切缅怀与崇高敬意。

冯增昭先生是中国著名沉积学家、古地理学家和地质教育家，亦是《**古地理学报**》的奠基者与推动者。先生毕生致力于碳酸盐岩沉积学与岩相古

地理学研究，开创了具有中国特色的定量岩相古地理学方法体系。他所提出的“单因素分析多因素综合作图法”，系统构建了以古构造控制为核心、陆—海—盆三元划分（源汇思想）的古地理单元定量表征理论，显著推动了中国古地理研究从定性描述向定量成因研究的跨越，为层序地层分析、源汇系统表征、古地理重建及沉积矿产预测提供了关键方法论支撑。先生主持编撰的《中国沉积学》等系列成果，已成为中国沉积地质与古地理学领域的经典文献及重要学术指南。

作为学生，笔者及诸多同仁的成长深受冯先生求真精神与学术远见的指引。先生融贯严谨的科学思维、实证的研究作风与开拓的进取精神，身体力行地诠释了献身地质事业的典范形象，其治学之道与立世风范足为后学楷模。这不仅赋予我们传承地质科学的使命担当，更成为探索新知、攻坚克难的恒久动力。

斯人已逝，风骨长存。冯增昭先生的学术思想基石，持续支撑并滋养着中国沉积地质与古地理学科的蓬勃发展。值此先生百年华诞，敬撰此文，既为探讨“源-汇”系统研究前沿，亦为深切缅怀先生为中国古地理学及沉积科学发展所铸就的学术丰碑，冀望其精神薪火永续传承。

## 参考文献（References）


陈利顶，傅伯杰，赵文武. 2006. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. 生态学报，26(5)：1444-1449. [Chen L D，Fu B J，Zhao W W. 2006. Source-sink landscape theory and its ecological significance. Acta Ecologica Sinica，26(5)：1444-1449]

陈星渝，张志杰，万力，袁选俊，周川闽. 2024. 深时源-汇系统要素的常用定量分析方法. 地质科技通报，43(1)：89-107. [Chen X Y，Zhang Z J，Wan L，Yuan X J，Zhou C M. 2024. Common quantitative analytical methods for deep-time source-to-sink system elements. Bulletin of Geological Science and Technology，43(1)：89-107]

高抒. 2005. 美国《洋陆边缘科学计划 2004》述评. 海洋地质与第四纪地质，25(1)：119-123. [Gao S. 2005. Comments on the “NSF margins program science plans 2004”. Marine Geology & Quaternary Geology，25(1)：119-123]

韩续，索艳慧，李三忠，丁雪松，宋双双，田子晗，付新建. 2024. 新近纪以来华北东部古地貌演化数值模拟及陆架海沉降控制. 古地理学报，26(1)：192-207. [Han X，Suo Y H，Li S Z，Ding X S，Song S S，Tian Z H，Fu X J. 2024. Numerical simulation of eastern North China paleo-landscape evolution since the Neogene controlled by continental shelf subsidence. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)，26(1)：192-207]

何锦秋，李海鹏，侯明才. 2024. 沉积源-汇系统数值模拟研究进展：多模型比较与应用. 地球科学进展，39(11)：1136-1155. [He J Q，Li H P，Hou M C. 2024. Advances in numerical simulation research of source-to-sink systems：comparison and application of multiple models. Advances in Earth Science，39(11)：1136-1155]

黄湘通，崔育华，柳宇，李芳兵，郭玉龙，邓凯，李超，杨守业. 2025. GEOCLIM 模型高分辨率模拟现代全球大陆硅酸盐风化通量：分布特征与控制因素. 中国科学：地球科学，55(8)：2815-2828. [Huang X T，Cui Y H，Liu Y，Li F B，Guo Y L，Deng K，Li C，Yang S Y. 2025. High-resolution modeling of modern global continental silicate weathering fluxes within the GEOCLIM model framework：spatial patterns and controlling factors. Science China Earth Sciences，55(8)：2815-2828]

李三忠，索艳慧，戴黎明，王亮亮，姜兆霞，曹现志，苏国辉，刘丽军，周建平，李玺瑶，刘洁，朱俊江，乔璐璐，王光增，姜素华，王秀娟，刘琳，管红香，李晓辉，胡军，刘鹏，刘泽，董冬冬，郭玲莉，邹志辉，董昊，钟世华，孙国正，刘洋，于胜尧，吴立新，邹卓延，孙毅. 2024. 元地球与数字孪生：思想突破、技术变革与范式转换. 地学前缘，31(1)：46-63. [Li S Z，Suo Y H，Dai L M，Wang L L，Jiang Z X，Cao X Z，Su G H，Liu L L，Zhou J P，Li X Y，Liu J，Zhu J J，Qiao L L，Wang G Z，Jiang S H，Wang X J，Liu L，Guan H X，Li X H，Hu J，Liu P，Liu Z，Dong D D，Guo L L，Zou Z H，Dong H，Zhong S H，Sun G Z，Liu Y，Yu S Y，Wu L X，Zou Z Y，Sun Y. 2024. Meta-earth and digital twin：breakthrough concept，technological revolution and paradigm shift. Earth Science Frontiers，31(1)：46-63]

李顺利，朱筱敏，刘强虎，徐长贵，杜晓峰，李慧勇. 2017. 沙垒田凸起古近纪源-汇系统中有利储层评价与预测. 地球科学，42(11)：1994-2009. [Li S L，Zhu X M，Liu Q H，Xu C G，Du X F，Li H Y. 2017. Evaluation and prediction of favorable reservoirs in source-to-sink systems of the Paleogene，Shaleitian Uplift. Earth Science，42(11)：1994-2009]

李铁刚，曹奇原，李安春，秦蕴珊. 2003. 从源到汇：大陆边缘的沉积作用. 地球科学进展，18(5)：713-721. [Li T G，Cao Q Y，Li A C，Qin Y S. 2003. Source to sink：sedimentation in the continental margins. Advances in Earth Science，18(5)：713-721]

林畅松. 2019. 盆地沉积动力学：研究现状与未来发展趋势. 石油与天然气地质，40(4)：685-700. [Lin C S. 2019. Sedimentary dynamics of basin：status and trend. Oil & Gas Geology，40(4)：685-700]

林畅松，夏庆龙，施和生，周心怀. 2015. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析. 地学前缘，22(1)：9-20. [Lin C S，Xia Q L，Shi H S，Zhou X H. 2015 Geomorphological evolution，source to sink and basin analysis. Earth Science Frontiers，22(1)：9-20]

刘炳强，王伟超，张文龙，黄曼，孙玉琦，邵龙义. 2022. 陆相盆地河—湖沉积源-汇系统收支分析：以柴北缘中侏罗统石门沟组为例. 沉积学报，40(6)：1494-1512. [Liu B Q，Wang W C，Zhang W L，Huang M，Sun Y Q，Shao L Y. 2022. Source-to-sink system budget analysis of continental fluvial-lacustrine sedimentary association：a case study from the Middle Jurassic in the northern Qaidam Basin. Acta Sedimentologica Sinica，40(6)：1494-1512]

刘强虎,李志垚,陈贺贺,周子强,谈明轩,朱筱敏. 2023. 陆相裂陷盆地深时源-汇系统关键地质问题及革新方向. 地球科学,48(12):4586-4612. [Liu Q H,Li Z Y,Chen H H,Zhou Z Q,Tan M X,Zhu X M. 2023. Key geological issues and innovation directions in deep-time source-to-sink system of continental rift basins. Earth Science,48(12):4586-4612]

刘强虎,彭光荣,刘培,余雄飚,熊万林,周子强,朱红涛. 2025. 中国南海东沙隆起北缘晚始新世构造裂点迁移及其源-汇效应. 石油与天然气地质,46(3):846-859. [Liu Q H,Peng G R,Liu P,Yu X B,Xiong W L,Zhou Z Q,Zhu H T. 2025. Migration of the Late Eocene knickpoints and their source-to-sink system along the northern margin of the Dongsha Uplift,South China Sea. Oil & Gas Geology,46(3):846-859]

马艺萍,王荣华,戴霜,马晓军. 2022. 北祁连北大河沉积物碎屑组成及物源正演分析:对物源定量分析方法的启示. 沉积学报,40(6):1525-1541. [Ma Y P,Wang R H,Dai S,Ma X J. 2022. Detrital composition and provenance forward modeling of sediments in the Beida River,North Qilian:implications for quantitative provenance analysis. Acta Sedimentologica Sinica,40(6):1525-1541]

聂银兰,朱筱敏,董艳蕾,杨棵,秦祎,叶蕾. 2022. 陆相断陷盆地源-汇系统要素表征及研究展望. 地质论评,68(5):1881-1896. [Nie Y L,Zhu X M,Dong Y L,Yang K,Qin Y,Ye L. 2022. Characterization and research prospect of source-to-sink system elements in continental rift basin. Geological Review,68(5):1881-1896]

邵龙义,王学天,李雅楠,刘炳强. 2019. 深时源-汇系统古地理重建方法评述. 古地理学报,21(1):67-81. [Shao L Y,Wang X T,Li Y N,Liu B Q. 2019. Review on palaeogeographic reconstruction of deep-time source-to-sink systems. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),21(1):67-81]

石学法,乔淑卿,杨守业,李景瑞,万世明,邹建军,熊志方,胡利民,姚政权,董林森,王昆山,刘升发,刘焱光. 2021. 亚洲大陆边缘沉积学研究进展(2011—2020). 矿物岩石地球化学通报,40(2):319-336. [Shi X F,Qiao S Q,Yang S Y,Li J R,Wan S M,Zou J J,Xiong Z F,Hu L M,Yao Z Q,Dong L S,Wang K S,Liu S F,Liu Y G. 2021. Progress in sedimentology research of the Asian Continental margin(2011-2020). Bulletin of Minerology,Petrology and Geochemistry,40(2):319-336]

谈明轩,朱筱敏,张自力,刘伟,赵宏超. 2020. 古"源-汇"系统沉积学问题及基本研究方法简述. 石油与天然气地质,41(5):1107-1118. [Tan M X,Zhu X M,Zhang Z L,Liu W,Zhao H C. 2020. Summary of sedimentological issues and fundamental approaches in terms of ancient "Source-to-sink" systems. Oil & Gas Geology,41(5):1107-1118]

王成善,林畅松. 2021. 中国沉积学近十年来的发展现状与趋势. 矿物岩石地球化学通报,40(6):1217-1229,1448-1449. [Wang C S,Lin C S. 2021. Development status and trend of sedimentology in China in recent ten years. Bulletin of Minerology,Petrology and Geochemistry,40(6):1217-1229,1448-1449]

王新航,汪银奎,旦增平措,巴桑曲珍,韩中鹏. 2022. 陆相流域盆地沉积通量模拟及古地貌意义:以西藏尼玛地区为例. 沉积学报,40(4):912-923. [Wang X H,Wang Y K,Dazeng P C,Basang Q Z,Han Z P. 2022. Sediment flux simulation paleogeomorphological implications in the terrestrial source-to-sink system:a case study in Nima area,central Tibet. Acta Sedimentologica Sinica,40(4):912-923]

王学天,邵龙义,Eriksson K A,胡修棉,刘钦甫,鲁静. 2022. 基于定量古地理的 BQART 模型深时古地势重建方法:以晚二叠世峨眉山大火成岩省内带为例. 沉积学报,40(6):1461-1480. [Wang X T,Shao L Y,Eriksson K A,Hu X M,Liu Q F,Lu J. 2022. Using BQART model to reconstruct paleo-relief in deep time based on quantitative paleogeography:a case study from the Late Permian central Emeishan Large Igneous Province. Acta Sedimentologica Sinica,40(6):1461-1480]

魏晓椿. 2017. 青藏高原北缘新生代构造隆升和气候变化的耦合响应. 南京大学博士学位论文. [Wei X C. 2017. Coupled responses of Cenozoic tectonic uplift and climate change at the northern margin of the Tibetan Plateau. Doctoral dissertation of Nanjing University]

徐长贵. 2013. 陆相断陷盆地源-汇时空耦合控砂原理:基本思想、概念体系及控砂模式. 中国海上油气,25(4),1-11,21,88. [Xu C G. 2013. Controlling sand principle of source-sink coupling in time and space in continental rift basins:basic idea,conceptual systems and controlling sand models. China Offshore Oil and Gas,25(4):1-11,21,88]

徐长贵,龚承林. 2023. 从层序地层走向源-汇系统的储层预测之路. 石油与天然气地质,44(3):521-538. [Xu C G,Gong C L. 2023. Predictive stratigraphy:from sequence stratigraphy to source-to-sink system. Oil & Gas Geology,44(3):521-538]

徐长贵,杜晓峰,朱红涛. 2020. 陆相断陷盆地源汇系统控砂原理与应用. 北京:科学出版社. [Xu C G,Du X F,Zhu H T. 2020. Controlling Sand Principle and Application of Source-Sink System in Continental Rift Basins. Beijing:Science Press]

徐胜,杨业,张茂亮,邵延秀,李云帅,徐海,刘静,刘丛强. 2025. 构造—地貌—气候—生态系统动力学研究进展. 地学前缘,32(3):23-34. [Xu S,Yang Y,Zhang M L,Shao Y X,Li Y S,Xu H,Liu J,Liu C Q. 2025. Advances in research on tectonics-landform-climate-ecosystem dynamics. Earth Science Frontiers,32(3):23-34]

徐胜友,蒋忠诚. 1997. 中国岩溶作用与大气温室气体 $CO_2$ 源汇关系的初步估算. 科学通报,42(9):953-956. [Xu S Y,Jiang Z C. 1997. Preliminary estimation of the relationship between karstification and the source sink of atmospheric greenhouse gas $CO_2$ in China. Chinese Science Bulletin,42(9):953-956]

闫兵,贾东,赖文,王毛毛. 2023. 走滑断层相关源-汇体系演化的砂箱物理模拟实验. 地质学报,97(9):3043-3055. [Yan B,Jia D,Lai W,Wang M M. 2023. Sandbox modeling on development of source to sink system along strike slip fault. Acta Geologica Sinica,97(9):3043-3055]

张治波,徐颖,苗艳菊,王文锋,赵迪斐,陈丹玲. 2022. 昌都盆地古近系贡觉组物源及其沉积环境. 沉积学报,40(6):1561-1581. [Zhang Z B,Xu Y,Miao Y J,Wang W F,Zhao D F,Chen D L.

2022. Provenance and sedimentary environment of Paleogene Gongjue Formation in Qamdo Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 40(6): 1561-1581]

朱红涛,朱筱敏,刘强虎,徐长贵,杜晓峰. 2022. 层序地层学与源-汇系统理论内在关联性与差异性. 石油与天然气地质,43(4): 763-776. [Zhu H T, Zhu X M, Liu Q H, Xu C G, Du X F. 2022. Sequence stratigraphy and source-to-sink system: connections and distinctions. Oil & Gas Geology, 43(4): 763-776]

朱筱敏,刘强虎,谈明轩,李顺利,陈贺贺,聂银兰. 2023. 深时源-汇系统综合研究和沙垒田实例分析. 沉积学报,41(6): 1781-1797. [Zhu X M, Liu Q H, Tan M X, Li S L, Chen H H, Nie Y L. 2023. Comprehensive investigation of deep-time source-to-sink systems: a case study of the Shaleitian area. Acta Sedimentologica Sinica, 41(6): 1781-1797]

Allen P A. 2008. From landscapes into geological history. Nature, 451(7176): 274-276.

Allen P A. 2017. Sediment Routing Systems: The Fate of Sediments from Source to Sink. Cambridge: Cambridge University Press.

Allen P A, Hovius N. 1998. Sediment supply from landslide-dominated catchments: implications for basin-margin fans. Basin Research, 10: 19-35.

Allen P A, Heller P L. 2012. Dispersal and preservation of tectonically generated alluvial gravels in sedimentary basins. In: Busby C, Azor A(eds). Tectonics of Sedimentary Basins. Chichester, UK: Wiley-Blackwell: 111-130.

Allen P A, Allen J R. 2013. Basin Analysis: Principles and Applications to Petroleum Systems. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.

Babault J, Bonnet S, Crave A, Driessche J V D. 2005. Influence of piedmont sedimentation on erosion dynamics of an uplifting landscape: an experimental approach. Geology, 33: 301-304.

Baker M L, Baas J H, Malarkey J, Jacinto R S, Craig M J, Kane I A, Barker S. 2017. The effect of clay type on the properties of cohesive sediment gravity flows and their deposits. Journal of Sedimentary Research, 87(11): 1176-1195.

Bentley S J, Blum M D, Maloney J, Pond L, Paulsell R. 2016. The Mississippi River source-to-sink system: perspectives on the tectonic, climatic, and anthropogenic influences, Miocene to Anthropocene. Earth-Science Reviews, 153: 139-174.

Bernhardt A, Hebbeln D, Regenberg M, Lückge A, Strecker M R. 2016. Shelfal sediment transport by an undercurrent forces turbidity-current activity during high sea level along the Chile continental margin. Geology, 44(4): 295-298.

Bhattacharya J P, Copeland P, Lawton T F, Holbrook J. 2016. Estimation of source area, river paleo-discharge, paleoslope, and sediment budgets of linked deep-time depositional systems and implications for hydrocarbon potential. Earth-Science Reviews, 153: 77-110.

Blair T C. 1999. Cause of dominance by sheetflood vs. debris-flow processes on two adjoining alluvial fans, Death Valley, California. Sedimentology, 46: 1015-1028.

Brewer C J, Hampson G J, Whittaker A C, Roberts G G, Watkins S E. 2020. Comparison of methods to estimate sediment flux in ancient sediment routing systems. Earth-Science Reviews, 207: 103217.

Caracciolo L. 2020. Sediment generation and sediment routing systems from a quantitative provenance analysis perspective: review, application and future development. Earth-Science Reviews, 209: 103226.

Castelltort S, Fillon C, Lasseur É, Ortiz A, Robin C, Guillocheau F, Tremblin M, Bessin P, Guerit L, Dekoninck A, Allanic C, Gautheron C, Barbarand J, Loget N, Uzel J, Yans J, Briais J, Al-Reda M, Baby G, François T, Roig J, Calassou S. 2023. The source-to-sink Vademecum: history, concepts and tools. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleotology: 16.

Chai N P, Lü G R, Xiao J, Jin J D. 2025. Seasonal and interannual variations of hydrochemistry in the Middle Yellow River. Journal of Hydrology, 662: 133891.

Chen B, Ma X, Mills B J W, Qie W, Joachimski M M, Shen S, Wang C, Xu H, Wang X. 2021. Devonian paleoclimate and its drivers: a reassessment based on a new conodont $\delta^{18}O$ record from South China. Earth-Science Reviews, 222; 103814.

Chen H H, Wood L J, Gawthorpe R L. 2020. Sediment dispersal and redistributive processes in axial and transverse deep-time source-to-sink systems of marine rift basins: Dampier Sub-basin, Northwest Shelf, Australia. Basin Research, 32: 227-249.

Chen H H, Zhu X M, Gawthorpe R L, Wood L J, Liu Q H, Li S L, Shi R S, Li H Y. 2022. The interactions of volcanism and clastic sedimentation in rift basins: insights from the Paleogene-Neogene Shaleitian uplift and surrounding sub-basins, Bohai Bay Basin, China. Basin Research, 34(3): 1084-1112.

Covault J A, Fildani A. 2014. Continental shelves as sediment capacitors or conveyors: source-to-sink insights from the tectonically active Oceanside shelf, southern California, USA.

Craig M J, Baas J H, Amos K J, Strachan L J, Manning A J, Paterson D M, Hope J A, Nodder S D, Baker M L. 2020. Biomediation of submarine sediment gravity flow dynamics. Geology, 48: 72-76.

Cullen T M, Collier R E L, Gawthorpe R L, Hodgson D M, Barrett B J. 2019. Axial and transverse deep-water sediment supply to syn-rift fault terraces: insights from the West Xylokastro Fault Block, Gulf of Corinth, Greece. Basin Research, 31: 1105-1139.

Finlayson D P, Montgomery D R, Hallet B. 2002. Spatial coincidence of rapid inferred erosion with young metamorphic massifs in the Himalayas. Geology, 30: 219.

Gales J A, Forwick M, Laberg J S, Vorren T O, Larter R D, Graham A G C, Baeten N J, Amundsen H B. 2013. Arctic and Antarctic submarine gullies: a comparison of high-latitude continental margins. Geomorphology, 201: 449-461.

Gawthorpe R L, Leeder M R. 2000. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins. Basin Research, 12(3-4): 195-218.

Ge Z, Nemec W, Gawthorpe R L, Hansen E W. 2017. Response of unconfined turbidity current to normal-fault topography. Sedimentology, 64(4): 932-959.

Graveleau F, Strak V, Dominguez S, Malavieille J, Chatton M, Magnighetti I. 2015. Experimental modelling of tectonics-erosion-sedimentation interactions in compressional, extensional, and strike-slip settings. Geomorphology, 244: 146-168.

Helland-Hansen W, Sømme T O, Martinsen O J, Lunt I, Thurmond J. 2016. Deciphering Earth's natural hourglasses: perspectives on source-to-sink analysis. Journal of Sedimentary Research, 86(9): 1008-1033.

Kocurek G, Ewing R C. 2012. Source-to-Sink: an Earth/Mars comparison of boundary conditions for Eolian Dune Systems. SEPM Special Publications, 102: 151-168.

Kneller B. 2003. The influence of flow parameters on turbidite slope channel architecture. Marine and Petroleum Geology, 20(6): 901-910.

Li Q, Li Y, Wang X, Jia D, Li R, Mao Y. 2025. Drainage evolution in accretionary thrust systems as responses to tectono-climatic variability: insights from sandbox modelling. Earth Surface Processes and Landforms, 50: e70099.

Liu H, Van Loon A J, Xu J, Tian L X, Du X F, Zhang X T, Chen D L. 2020. Relationships between tectonic activity and sedimentary source-to-sink system parameters in a lacustrine rift basin: a quantitative case study of the Huanghekou Depression (Bohai Bay Basin, E China). Basin Research, 32: 587-612.

Liu J, Hsu R T, Hung J J, Chang Y P, Wang Y H, Rendle-Bühring R H, Lee C L, Huh C A, Yang R J. 2016. From the highest to the deepest: the Gaoping River-Gaoping Submarine Canyon dispersal system. Earth-Science Reviews, 153: 274-300.

Liu J P, Xian B Z, Tan X F, Zhang L. 2022. Depositional process and dispersal pattern of a faulted margin hyperpycnal system: the Eocene Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China, Marine and Petroleum Geology, 135: 105405.

Liu Q H, Zhu X M, Yang Y, Geng M Y, Tan M X, Jiang L, Chen L. 2016. 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. Marine and Petroleum Geology, 78: 766-784.

Liu Q H, Zhu X M, Zeng H, Li S. 2019. Source-to-sink analysis in an Eocene rifted lacustrine basin margin of western Shaleitian Uplift area, offshore Bohai Bay Basin, eastern China. Marine and Petroleum Geology, 107: 41-58.

Liu Q H, Zhu X M, Zhou Z Q, Bao Y C, Shi W L. 2023. Provenance identification and source to sink studies from an intrabasinal subaqueous uplift in the Eocene western Bohai Bay Basin, eastern North China. Marine and Petroleum Geology, 149: 106087.

Liu Q H, Li Z Y, Chen H H, Zhou Z, Tan M X, Zhu X M. 2024. Current geological issues and future perspectives in deep-time source-to-sink systems of continental rift basins. Journal of Earth Science, 35(5): 1758-1764.

Malusà M G, Resentini A, Wittmann H. 2024. Impact of river capture on erosion rates and offshore sedimentation revealed by geological and in situ 10Be cosmogenic data (Corsica, western Mediterranean). Earth and Planetary Science Letters, 637: 118728.

Mazumder A, Govil P, Kar R, Gayathri M N, Raghuram. 2017. Paleoenvironments of a proglacial lake in Schirmacher Oasis, East Antarctica: insights from quartz grain microtextures. Polish Polar Research: 1-19.

Meade R H. 1972. Transport and deposition of sediments in estuaries. In Nelson B C (ed). Environmental framework of coastal plain estuaries. Geological Society of America, Memoir, 133: 91-120.

Meade R H. 1982. Sources, sinks, and storage of river sediment in the Atlantic Drainage of the United States. Journal of Geology, 90(3): 235-252.

Michael N A. 2013. Functioning of an ancient routing system, the Escanilla Formation, South Central Pyrenee. London: Imperial College London.

Michael N A, Zühlke R. 2022. Source-to-sink: regional grain size trends to reconstruct sediment budgets and catchment areas. Basin Research, 34(1): 393-410.

Nichols G, Thompson B. 2005. Bedrock lithology control on contemporaneous alluvial fan facies, Oligo-Miocene, southern Pyrenees, Spain. Sedimentology, 52: 571-585.

MARGINS Office. 2003. NSF MARGINS Program Science Plans. Columbia University, New York.

Nyberg B, Helland-Hansen W, Gawthorpe R, Sandbakken P, Eide C H, S T, Hadler-Jacobsen F, Leiknes S. 2018. Revisiting morphological relationships of modern source-to-sink segments as a first-order approach to scale ancient sedimentary systems. Sedimentary Geology, 373: 111-133.

Nyberg B, Helland-Hansen W, Gawthorpe R, Tillmans F, Sandbakken P. 2021. Assessing first-order BQART estimates for ancient source-to-sink mass budget calculations. Basin Research, 33(5): 2435-2452.

Pechlivanidou S, Geurts A, Duclaux G, Gawthorpe R, Pennos C, Finch E. 2022. Contrasting geomorphic and stratigraphic responses to normal fault development during single and multi-phase rifting. Frontiers in Earth Science, 9: 748276.

Rohais S, Bonnet S, Eschard R. 2012. Sedimentary record of tectonic and climatic erosional perturbations in an experimental coupled catchment-fan system. Basin Research, 24: 198-212.

Romans B W, Normark W R, McGann M M, Covault, J A, Graham S A. 2009. Coarse-grained sediment delivery and distribution in the Holocene Santa Monica Basin, California: implications for evaluating source-to-sink flux at millennial time scales. Geological Society of America Bulletin, 121(9-10): 1394-1408.

Romans B W, Castelltort S, Covault J, Fildani A, Walsh J P. 2016. Environmental signal propagation in sedimentary systems across timescales. Earth-Science Reviews, 153: 7-29.

Salles T, Husson L, Rey P, Mallard C, Zahirovic S, Boggiani B H, Coltice N, Arnould M. 2023. Hundred million years of landscape dynamics from catchment to global scale. Science, 379(6635): 918-923.

Schumer R, Jerolmack D J. 2009. Real and apparent changes in sediment deposition rates through time. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 114(F3): F00A06.

Sobocinska A, Baas J H. 2022. Effect of biological polymers on mobility and run-out distance of cohesive and non-cohesive sediment gravity flows. Marine Geology, 452: 106904.

Sømme T O, Helland-Hansen W, Martinsen O J, Thurmond J B. 2009a. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source-to-sink systems: a basis for predicting semi-quantitative characteristics in subsurface systems. Basin Research, 21: 361-387.

Sømme T O, Martinsen O J, Thurmond J B. 2009b. Reconstructing morphological and depositional characteristics in subsurface sedimentary systems: an example from the Maastrichtian-Danian Ormen Lange system, Møre Basin, Norwegian Sea. AAPG Bulletin, 93: 1347-1377.

Strong N, Paola C. 2008. Valleys that never were: time surfaces versus stratigraphic surfaces. Journal of Sedimentary Research, 78(8): 579-593.

Strong N, Sheets B, Hickson T, Paola C. 2005. A mass-balance framework for quantifying downstream changes in fluvial architecture. Fluvial Sedimentology, 7: 243-253.

Sun Z, Ji K J, Li C G, Wang M D, Hou J Z. 2025. A sediment record from a modern glacial lake in the central himalayas: implications for proxy interpretation in glacial lake studies. Journal of Earth Science: 1-8. https: // doi.org/10. 1007/ s12583-025-0260-z.

Syvitski J P M, Milliman J D. 2007. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. The Journal of Geology, 115: 1-19.

Tamura T. 2012. Beach ridges and prograded beach deposits as palaeoenvironment records. Earth-Science Reviews, 114(3-4): 279-297.

Tan M X, Sun H N, Fu Y L, Cui H N, Zhang C C. 2024. High-frequency temporal variability of provenance signal in the submarine fan with the narrow shelf: insights from sediment delivery and formation of late Triassic Zhuoni fan in the northeastern Paleo-Tethys Ocean. Basin Research, 36(1): 12835.

Taylor J A, Lloyd J. 1992. Sources and sinks of atmospheric $CO_2$. Australian Journal of Botany, 40(5): 407-418.

Tofelde S, Bernhardt A, Guerit L, Romans B W. 2021. Times associated with source-to-sink propagation of environmental signals during landscape transience. Frontiers in Earth Science, 9: 628315.

Watkins S E, Whittaker A C, Bell R E, McNeill L C, Gawthorpe R L, Brooke S A S, Nixon C W. 2019. 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. Geological Society of America Bulletin, 131: 17.

Whipple K X. 2004. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 32(1): 151-185.

Whipple K X. 2009. The influence of climate on the tectonic evolution of mountain belts. Nature Geoscience, 2(2): 97-104.

Whipple K X, Kirby E, Brocklehurst S H. 1999. Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief. Nature, 401(6748): 39-43.

Whittaker A C, Attal M, Allen P A. 2010. Characterising the origin, nature and fate of sediment exported from catchments perturbed by active tectonics. Basin Research, 22: 809-828.

Wolf S G, Huismans R S, Braun J, Yuan X P. 2022. Topography of mountain belts controlled by rheology and surface processes. Nature, 606: 516-521.

Zhang J Y, Olariu C, Steel R, Kim W. 2020. Climatically controlled lacustrine clinoforms: theory and modelling results. Basin Research, 32(2): 240-250.

Zhu Z J, Li Q, Chen H H, Li J, Zhang W P, Liu Y, Yan Z H. 2023. Tectono-geomorphological evolution and provenance-sedimentary response: insights from the Middle Jurassic-Lower Cretaceous Junggar Basin, China. Marine and Petroleum Geology, 158: 106514.

Zhu Z J, Li Q, Chen H H, Li J, Zhang Y Z, Zhang W P, Qin J, Geng H, Yang F F. 2024. Tectonic-sedimentary evolution in a Palaeocene rifted Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin. Marine and Petroleum Geology, 160: 106616.

（责任编辑　郑秀娟）