

从层序地层走向源-汇系统的储层预测之路

徐长贵¹, 龚承林^{2,3}

[1. 中国海洋石油集团有限公司, 北京 100010; 2. 油气资源与探测国家重点实验室 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]

摘要:具有沉积充填和有利储层预测功能的预测地层学被广泛应用于盆地分析和油气勘探, 经历了从层序地层走向源-汇系统的储层预测发展之路。为了应对“预测有利成藏要素(储层和盖层等)”的勘探挑战, Exxon地质学家创立了层序地层方法理论; 为了解决“层序不一定控砂、低位不一定有扇”的勘探难题, 地质学家将源-汇系统的概念和方法运用到有利储层预测研究中来, 形成了源-汇控砂方法原理。文章讨论了层序地层的研究现状, 梳理了海相和陆相层序地层研究近年来的重要进展, 介绍了陆-洋和陆-湖源-汇控砂研究近年来的进展, 提出了“基于源-渠-汇-岩耦合的优质储层预测技术”, 以期解决“层序源-汇控砂但不一定控储”的勘探挑战。

关键词:源-渠-汇-岩耦合; 预测地层学; 层序地层; 源-汇系统; 储层预测; 油气勘探

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Predictive stratigraphy: From sequence stratigraphy to source-to-sink system

XU Changgui¹, GONG Chenglin^{2,3}

[1. China National Offshore Oil Corporation (CNOOC), Beijing 100010, China; 2. China State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: Predictive stratigraphy with the ability to predict sedimentary fills and high-quality reservoirs has been widely applied to basin analysis and hydrocarbon exploration, and has undergone the evolutionary process from sequence stratigraphy to source-to-sink system for reservoir quality prediction. In response to the challenge of predicting favorable play elements (i. e. reservoir and seal), geologists of ExxonMobil established the sequence stratigraphic methodology and theory. To answer why the sequences do not necessarily control sandstone development and lowstand systems tract does not necessarily result in fan deposits, the geologists adopted the source-to-sink hypothesis in predicting high-quality reservoirs, creating the source-to-sink-based sandstone mapping methodology. The present study reviews the status quo of sequence stratigraphy and major advances in application to marine and lacustrine sequences, and introduces major progress in the application of source-to-sink-based methodology to predict high-quality reservoirs in both continental-marine and continental-lacustrine systems. A source-channel-sink-diagenesis coupling technique to predict high-quality reservoirs is proposed in the study to solve the difficulty encountered in exploring why the source-to-sink system serves to control sandstone development, but not necessarily determine reservoir formation.

Key words: source-channel-sink-diagenesis coupling, predictive stratigraphy, sequence stratigraphy, source-to-sink system, reservoir prediction, hydrocarbon exploration

引用格式:徐长贵, 龚承林. 从层序地层走向源-汇系统的储层预测之路[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 521-538. DOI: 10.11743/ogg20230301.

XU Changgui, GONG Chenglin. Predictive stratigraphy: From sequence stratigraphy to source-to-sink system[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 521-538. DOI: 10.11743/ogg20230301.

收稿日期: 2023-02-16; 修订日期: 2023-04-12。

第一作者简介: 徐长贵(1971—), 男, 教授级高级工程师, 海洋油气勘探开发管理和综合研究。E-mail: xuchg@cnooc.com.cn。

基金项目: 中海油科技项目(KJZH-2021-0003-00)。

具有沉积充填和有利储层预测功能的预测地层学(predictive stratigraphy)是在“20世纪50—60年代两位卓越的沉积学家(Larry Sloss和Harry Wheeler)所开展的开创性工作”基础上发展而来的^[1-3]。这一时期的预测地层学相较于传统地层学最大的突破在于提出了年代地层(time stratigraphy)和层序(sequence)等重要概念^[1-4]。20世纪70年代,随着各种勘探技术手段的进步(尤其是二维地震勘探技术),美国石油地质协会于1977年编辑出版了《Seismic Stratigraphy: Application to Hydrocarbon Exploration》一书,标志着地震地层学的诞生和层序地层学的奠基^[5-6]。20世纪80年代,美国沉积地质学协会(SEPM)于1988年编辑出版了《Sea-level Changes: An Integrated Approach》一书,标志着地震地层学正式发展演化为层序地层学^[7]。相较于传统地层学(如生物地层学和磁性地层学等),地震地层学和层序地层学所建立的地层格架能够用于预测沉积盆地的地层结构、沉积充填和成藏要素(如烃源岩、储层和盖层等),是沉积地质资源,特别是油气资源,预测和勘探的有效工具^[3-4, 8-9]。

源-汇系统(source-to-sink system)这一概念萌芽于地质学家对剥蚀区所剥蚀沉积物以及河流输送搬运沉积物的定量计算^[10-11]。20世纪80年代,美国科罗拉多州立大学Stanley A. Schumm教授在《The Fluvial System》一书中,首次将“河流中沉积颗粒产生—搬运—堆积的生命历程”划分为剥蚀区碎屑颗粒的产生、转换区碎屑颗粒的搬运和沉积区碎屑颗粒的堆积,标志着源-汇系统概念的萌芽^[12]。在此基础上,地质学家开始尝试将物源区的定量数据(如沉积物供给量等)和沉积区的地下数据(如地震和钻、测井数据等)纳入到一个由“源”到“汇”的系统中,并综合分析沉积物的剥蚀、搬运至堆积这一系统历程的响应关系与控制机制^[3, 13]。在这样的学科背景下,孕育产生了新一代预测地层学——源-汇系统;源-汇系统研究的核心是将沉积物在母岩区的剥蚀、流域盆地的搬运与汇水盆地的堆积纳入到一个由“源”到“汇”的系统中,来研究地球表层动力学过程对这一“剥蚀—搬运—堆积源-汇历程”的过程响应与控制作用^[13-16]。源-汇分析能够用于定量预测汇水区沉积体系的尺寸规模和时空展布等,对沉积矿产(尤其是石油与天然气资源)预测的指导意义已经显现^[13-15, 17-19]。

层序地层和源-汇系统是相辅相成的,二者的结合可以更好地预测盆地的沉积充填与成藏要素(尤其是有利砂体);层序划分往往是源-汇研究的基础,为源-汇分析提供区域可对比的等时格架^[20]。作为一种

地质理论,它们得到了地质学家的广泛认可,产生了一系列重要学术成果;作为一种盆地分析技术,它们在预测沉积盆地的地层结构、沉积充填和成藏要素等方面得到了广泛应用,取得了巨大的经济效益^[4, 20-21]。

本文无意就“由层序地层和源-汇系统构成的预测地层学”作全面论述,仅聚焦在“如何利用层序地层和源-汇系统分析预测沉积盆地的沉积充填和有利砂体”这一领域,就该领域内近年来(2000年至今)代表性研究成果与笔者思考作简要讨论。

1 用于沉积充填预测的层序地层研究现状

源于被动大陆边缘盆地的层序地层学经历了逾40年的发展,已成为较为完善的划分层序地层单元和建立等时地层格架的方法理论(图1),其在预测湖盆和海盆的沉积充填和有利砂体方面取得了一系列重要进展。

1.1 层序地层研究当前的“共识”

汇水盆地的沉积充填是由一系列不同级别和不同规模的地质界面(界面性)所分割的沉积旋回(旋回性)堆砌叠置而成,这些沉积旋回的几何形态、岩性组合和叠置样式往往是沉积物供给、构造升降和海/湖平面变化等因素综合作用的结果^[4, 8]。基于层序地层方法理论所识别的不同类型层序界面及其所建立起来的层序格架是划分地层单元、预测沉积充填最为行之有效的工具^[4, 8-9]。尽管层序地层理论方法还存在较多争议(如推进层序地层标准化)^[22],但在诸多方面取得了广泛共识。

第一,地质学家普遍认可不同级别的不整合面分隔着不同级别的层序,不同级别的成因旋回(构造旋回和基准面旋回等)形成了不同级别的沉积旋回^[4]。不整合面及与之对应的整合面常常是高级别(1—3级)层序地层单元的顶、底界面,而整合面(如下超包络面等)常常用于识别和划分次级别(4—5级)层序地层单元(如体系域或准层序组)(图1)。1级(巨层序)和2级(超层序)往往以区域性的构造不整合面为界,因而也被称为“构造层序”。识别这些区域不整合面并划分构造层序可为沉积盆地的充填演化、源-汇系统再造、油气聚集区带和勘探战略选区等提供宏观区域可对比的等时层序地层格架^[8]。3级层序常常以次一级的、由局部的不整合面及其对应的整合面为界、往往由一个相对完整的沉积旋回所构成,故而也被称为“沉积层序”。

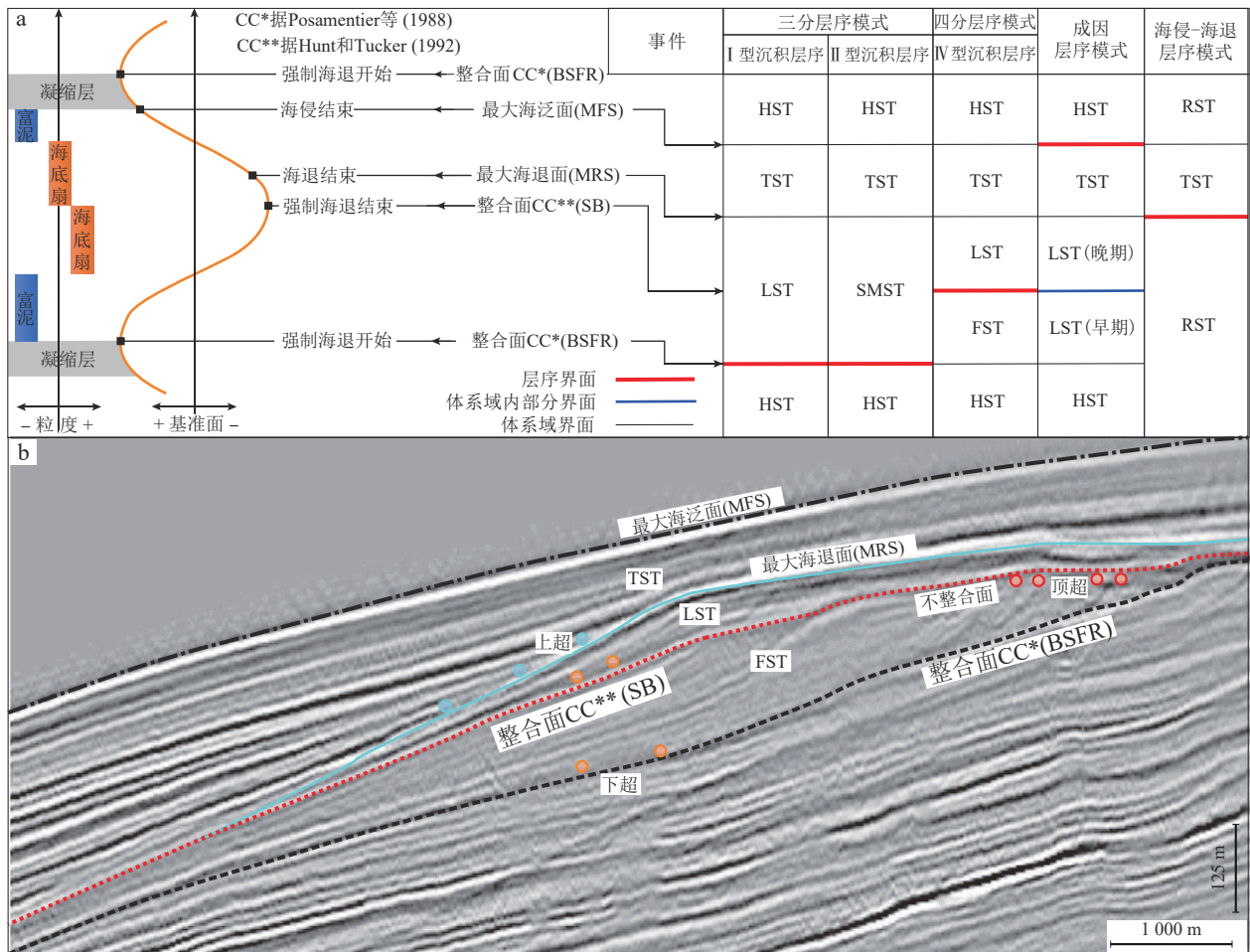


图1 不同类型层序划分模式

Fig. 1 Schematic diagram showing the division model of different types of sequences

a. 不同层序模式的构成样式及其与各类层序界面和基准面变化时间之间的对应关系;b. 显示不同类型层序界面所伴生的特征地震反射终止关系的地震剖面(地震剖面据文献[4]修改)

HST. 高位体系域;LST. 低位体系域;TST. 海侵体系域;RST. 海退体系域;FST. 下降体系域;SMST. 陆架边缘体系域;MFS. 最大海泛面;MRS. 最大海退面;SB. 层序界面;BSFR. 强制海退底界面

识别这些局部不整合面可在一定范围内识别对比各种沉积体系域或沉积成因单元,进而可为沉积充填和成藏要素(如储集体)精细研究提供在重点区带内可对比的高精度层序地层格架^[8]。

第二,依据沉积基准面变化划分地层单元仍然是工业界广为接受和使用的方法技术。层序地层学从20世纪80年代发展至今,先后提出了4种经典的基于沉积基准面变化划分体系域的层序地层模式,亦即三分层序模式、四分层序模式、成因层序模式和海侵-海退层序模式(图1)^[9, 23-24]。在这些层序模式中,Hunt等(1992)^[9]提出的四分层序模式为:①将层序界面从三分层序模式所提出的强制海退开始[图1中的BSFR(强制海退底界面)地震反射界面]推移至强制海退结束[图1中的SB(层序界面)地震反射界面],彼时海平面下降达到最大、海退达到最盛,层序界面的不整合面

规模也就相应达到最大;②将一个完整的沉积层序细分为4个体系域,自底至顶依次为低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)、高位体系域(HST)和下降体系域(FST)(图1)。

利用四分层序方法开展沉积充填预测的典型实例如图2所示:①在两个最大海泛面(MFS)所限定的地层序列(中中新世珠江陆缘)中,依据地震反射终止关系,识别了不整合面及其对应的整合面CC*[BSFR(强制海退起始面)]、整合面CC**[SB(层序界面)]和最大海退面(MRS);②这3个不整合面将中中新世珠江陆缘划分为“HST,FST,LST和TST”4个沉积体系域(图2)。其中,FST在剖面上表现为顶积层和底积层不发育、见较厚前积层的斜交型前积,易于形成滑塌型海底扇;而LST在剖面上表现为顶积层和前积层不发育、见较厚底积层的顶超型前积反射,易于发育水道型海底扇

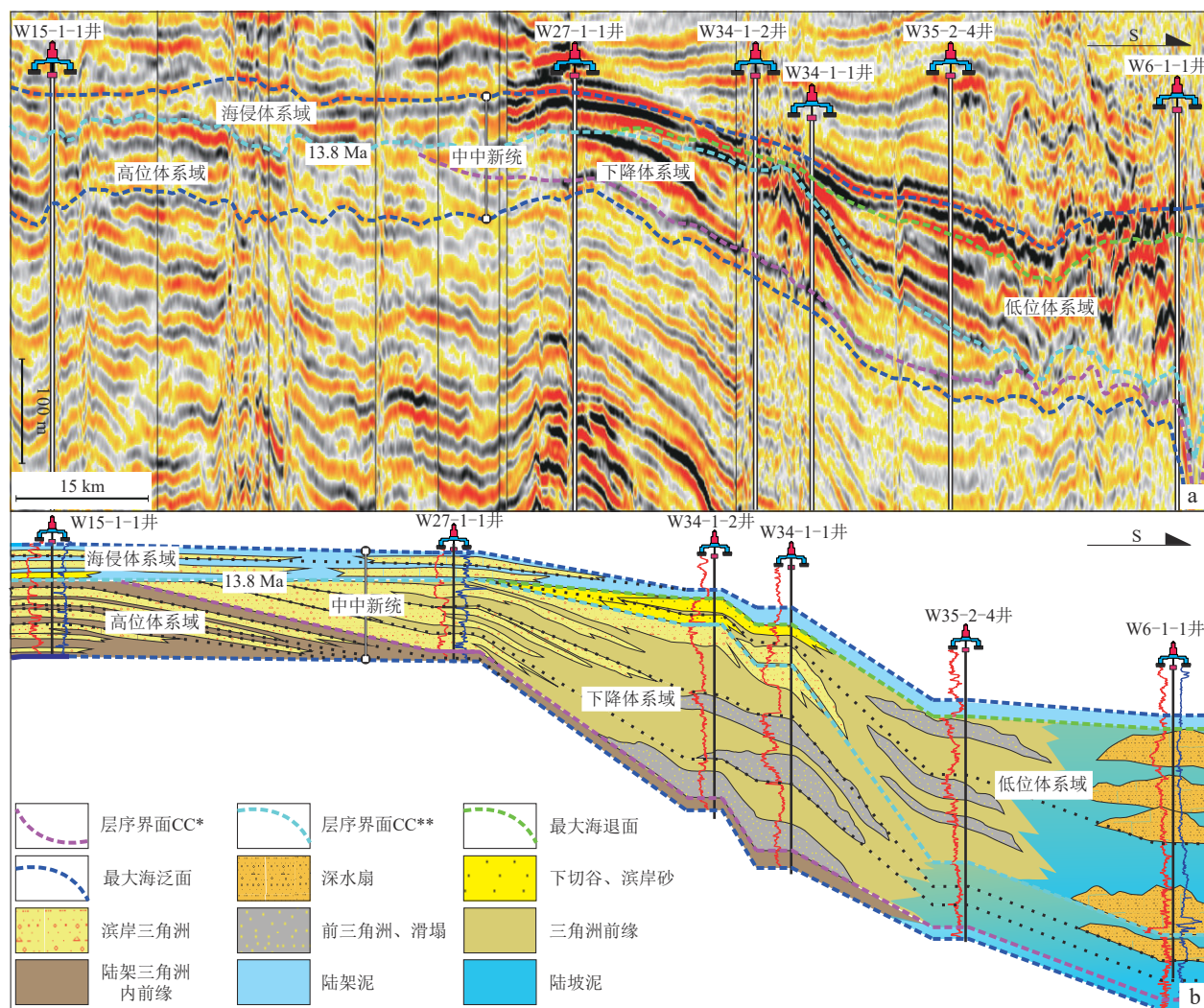


图2 四分层序模式的体系域框架及其对海底扇和岩性圈闭的控制

Fig. 2 Framework of four systems tracts within depositional sequence and its controls on submarine fans and lithologic traps

a. 顺物源方向的过井地震解释剖面; b. 顺物源方向过井地震剖面对应的连井解释剖面

(图2)。由此可见,建立区域可对比的高精度层序格架(四分层序模式)对于搜索深水规模优质储层和岩性圈闭均具有重要实践意义(图2)。

1.2 层序地层研究当前的“争议”

尽管层序地层已做为建立等时地层格架、划分地层单元和预测沉积充填的理论方法被广泛接受,但围绕层序地层方法原理还存在着以下诸多争议。

首先,围绕沉积层序内体系域划分、命名以及是否废弃沉积体系域等层序基本概念,一直颇具争议^[25]。在经典的层序地层学理论中,沉积体系域概念被赋予了海平面变化的含义,是用于描述一个沉积层序内形成于海平面处于相对下降(FST)、低水位缓慢上升(LST)、快速上升(TST)和高水位缓慢上升(HST)的沉积单元^[7, 23, 26]。然而,Exxon公司地质学家于2009年在

《Geology》第37期撰文指出:这一依据海平面变化划分命名沉积体系域的方法原理是层序地层持续争议和相关术语混乱的根源所在;建议废除沉积体系域的概念,倡导以地层叠置样式来命名层序地层单元^[25]。然而经过十余年的发展,该方法并未引起工业界的共鸣,依据沉积基准面变化建立层序地层格架并划分命名体系域依然被工业界广泛使用。

其次,推进层序地层标准化也存在较多争论^[4, 27]。2010年至今,加拿大艾尔伯塔大学 Octavian Catuneanu 教授倡导并致力于层序地层标准化研究,在其主编并于2022年再版的《Principles of Sequence Stratigraphy》一书中尝试从“堆砌样式、地层单元、地层界面和层序格架”来讲授层序地层学方法原理,并废除了该书第一版中“可容空间与滨线迁移、沉积体系域和层序地层模式”等不利于推行层序地层标准化的相关内容^[4]。层

序地层标准化强调利用不同的方法手段识别和区分不同级别的物理界面(不整合面或整合面),研究被这些物理界面所分割的、具有相同堆砌样式地层单元内岩石关系。为此,一些学者提出了依据地层叠置样式或坡折轨迹来划分地层单元,譬如地质学家提出依据沉积成因类型、可容空间序列和坡折迁移轨迹等识别划分层序地层单元^[25, 27-29]。然而,这些层序地层学标准的方法概念并未在工业界得到广泛应用。

2 用于沉积充填预测的层序地层研究进展

2.1 海相层序地层学研究重要进展

2000年至今,海相层序地层学在如下4个方面取得重要进展。

2.1.1 沉积供给驱动层序地层模式

经典Exxon层序地层模式认为可容空间或相对海平面变化驱动了粗碎屑颗粒向盆地深水区的搬运分散:相对海平面下降导致河口向海迁移,进而向盆地深水区搬运配给粗碎屑颗粒;而相对海平面上升驱使河口向陆撤退,从而使得粗碎屑颗粒主要堆积卸载在浅水陆架区^[7, 26]。

与上述可容空间驱动层序地层模式截然不同是,Carvaja等(2016)^[30]研究发现:美国怀俄明洲南部晚白垩世Washakie盆地平均陆架坡折加积速率(R_a)为267 m/Myr,平均陆架坡折进积速率(R_p)为47.8 km/Myr,为一典型高速沉积物供给的陆缘。在这一陆缘上,除了可容空间驱动层序地层模式所预测的低幅下降型或低幅上升型陆架坡折(沉积基准面下降)前方、层序界面之上发育海底扇之外,在中幅上升型和高幅上升型陆架坡折(沉积基准面上升)前方、最大海泛面之上亦出现海底扇^[30]。这表明相对海平面下降不再是形成海底扇的唯一驱动机制,当沉积物供给量足够大时,其可抑制相对海平面上升,向深水中输运配分粗碎屑颗粒,形成海底扇。这一层序地层模式被称为“沉积供给驱动层序地层模式”^[30]。

沉积供给驱动层序地层模式改变了油气工业界仅依据指示相对海平面下降的地质证据(如低幅下降型或低幅上升型陆架坡折)和层序界面来寻找深水油气储集体(低位海底扇)的传统方法;使寻找高位海底扇成为可能,在工业界取得了较好的勘探应用成效^[30-32]。高沉积物供给速率主要出现在2种地质条件下:①当陆

架坡折“ $R_a > 150$ m/Myr或 $R_p > 10$ km/Myr”时,彼时的陆架边缘往往具有绝对高的沉积物供给速率;②当“陆架较窄(宽度20~50 km)、峡谷水道的头部与河口相接或相邻(距离5~40 km)或处于温室气候背景条件下”时,彼时的陆架边缘出现相对高的沉积物供给速率。

2.1.2 坡折迁移轨迹和斜坡进积体

在一个沉积层序内,伴随着可容空间与沉积物供给量比值($\delta A/\delta S$ 比值)的变化,滨岸或陆架坡折往往表现出“向前、向后、向上或向下”的迁移运动,孕育差异的迁移运动轨迹。Steel等(2022)^[33]首次提出陆架坡折迁移轨迹和斜坡进积体的层序分析方法。通过追踪滨线或陆架坡折迁移轨迹以及分析斜坡进积体堆砌样式可以更加客观地在一个连续的水进或水退过程中分析沉积体系随时间的迁移变化,而非基于各种看不见也摸不着的层序假设(如可容空间变化、沉积基准面和相对海平面变化等)(图3)^[28-29, 34-35]。近年来,基于坡折迁移轨迹和斜坡进积体堆砌样式的层序地层相关研究在学界得到了较为广泛关注^[28-29, 34-35]。

根据滨线或陆架坡折的运动方式,可将坡折迁移轨迹依轨迹角角度(T_{se})区分为低幅下降型($-2^\circ < T_{se} < 0^\circ$)、低幅上升型($0^\circ < T_{se} < 1^\circ$)、中幅上升型($1^\circ < T_{se} < 2^\circ$)、高幅上升型($2^\circ < T_{se} < 15^\circ$)和向陆回退型($90^\circ < T_{se} < 130^\circ$),它们分别对应进积主导型、明显进积型、进积加积型、加积主导型和明显退积型斜坡进积体(图3)^[31-32]。这其中,尤以低幅下降型、中幅上升型和高幅上升型陆架坡折迁移轨迹及其所对应的进积主导型、进积加积型和加积主导型斜坡进积体最为常见。

在层序地层研究中,可以利用陆架坡折迁移轨迹来判识沉积物供给条件、陆架可容空间条件和沉积基准面变化情况。

首先,依据公式(1)和公式(2)计算获取陆架坡折迁移轨迹的加积速率(R_a)和进积速率(R_p),可半定量判识沉积物供给条件(Q_s)^[31]:

$$R_a = \frac{dy}{T} \quad (1)$$

$$R_p = \frac{dx}{T} \quad (2)$$

式中:dx为陆架坡折进积距离(起止陆架坡折在横轴上投影之间的水平距离,km);dy为陆架坡折加积距离(起止陆架坡折在纵轴上投影之间的垂直距离,km);T为陆架坡折所夹持地层单元的地质年龄,Myr。

当“ $R_a > 150$ m/Myr或 $R_p > 10$ km/Myr”时,为高沉积物供给速率(高 Q_s);当“ $R_a < 150$ m/Myr或 $R_p < 10$ km/Myr”时,为低沉积物供给速率(低 Q_s)。

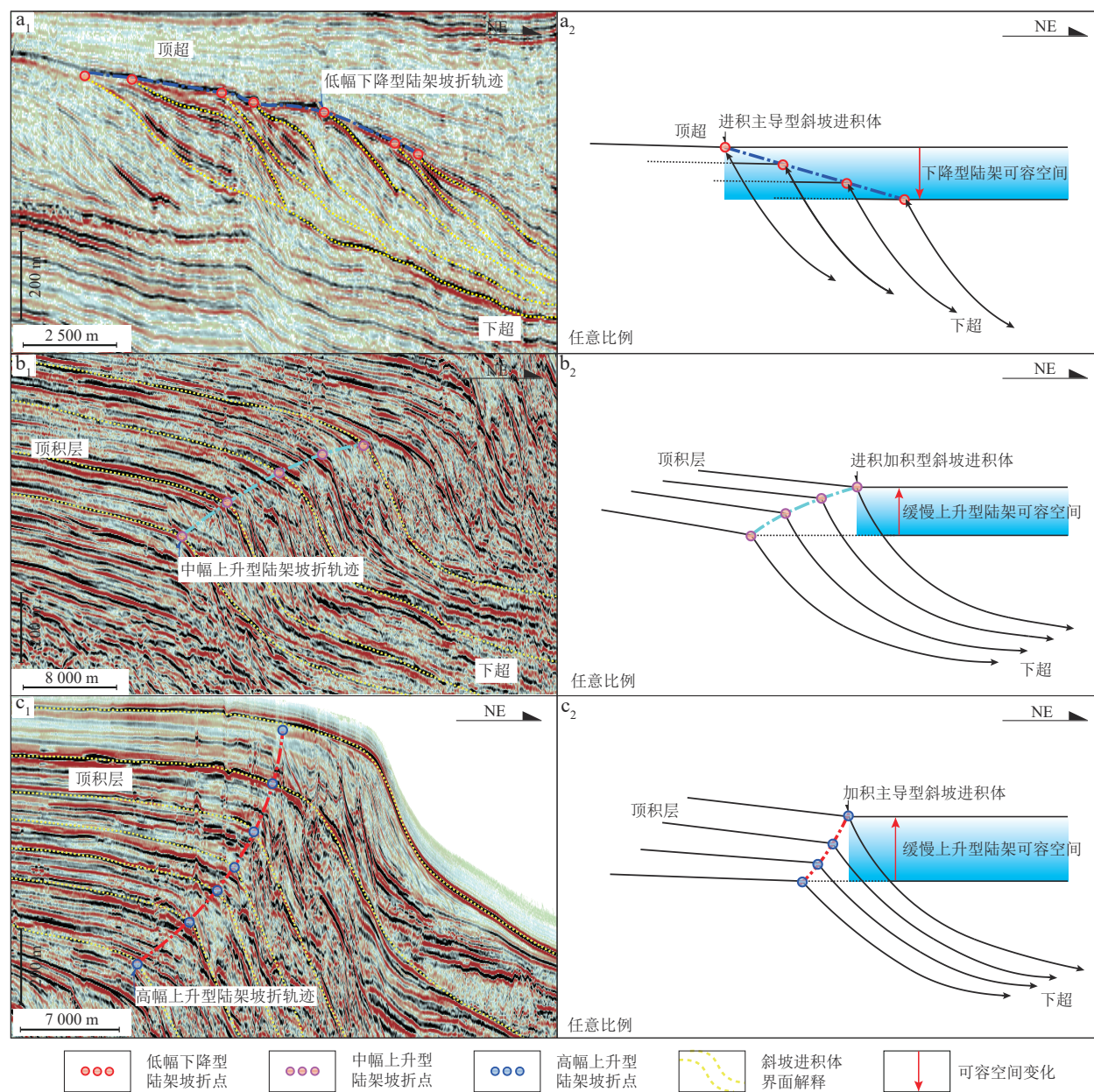


图3 不同类型陆架坡折迁移轨迹地震剖面及其对应的斜坡进积体结构样式

Fig. 3 Seismic sections showing different forms of shelf-break trajectories and the style of associated shelf-margin clinoforms

a₁. 低幅下降型陆架坡折迁移轨迹剖面; a₂. 进积主导型斜坡进积体结构样式; b₁. 中幅上升型陆架坡折迁移轨迹剖面; b₂. 进积加积型斜坡进积体结构样式; c₁. 高幅上升型陆架坡折迁移轨迹剖面; c₂. 加积主导型斜坡进积体结构样式

其次,在计算获取“ T_{se} ” [$T_{se} = \arctan(dx/dy)$]的基础上,依据如下可容空间条件判识标准,可半定量判识陆架可容空间条件(δ_a)^[31-32]:

当“ $-2^\circ < T_{se} < 1^\circ$ ”时,为下降型沉积基准面,对应低 δ_a ;当“ $1^\circ < T_{se} < 2^\circ$ ”时,为缓慢上升型沉积基准面,对应中 δ_a ;当“ $2^\circ < T_{se} < 130^\circ$ ”时,为快速上升型沉积基准面,对应高 δ_a 。

2.1.3 可容空间序列层序分析法

在一个沉积层序内,伴随着 $\delta A/\delta S$ (可容纳空间与

沉积物供给量)比值的变化,斜坡进积体或地层单元往往表现出“向前进积、向上加积、向陆退积和向下进积(考虑其具有明显的削截特征,建议将其翻译为削积)”的叠置样式。基于这一层序地层基本原理,Neal等(2009)^[25]提出了依据地层叠置样式进行层序内成因单元划分的可容空间序列层序分析法(图4)。

可容空间序列层序分析法认为:依据地层叠置样式可把一个沉积层序区分为:PA型(进积-加积型)地层单元、R型(退积型)地层单元和APD型(加积-进积-削积型)地层单元^[25]。这其中,APD型地层单元可

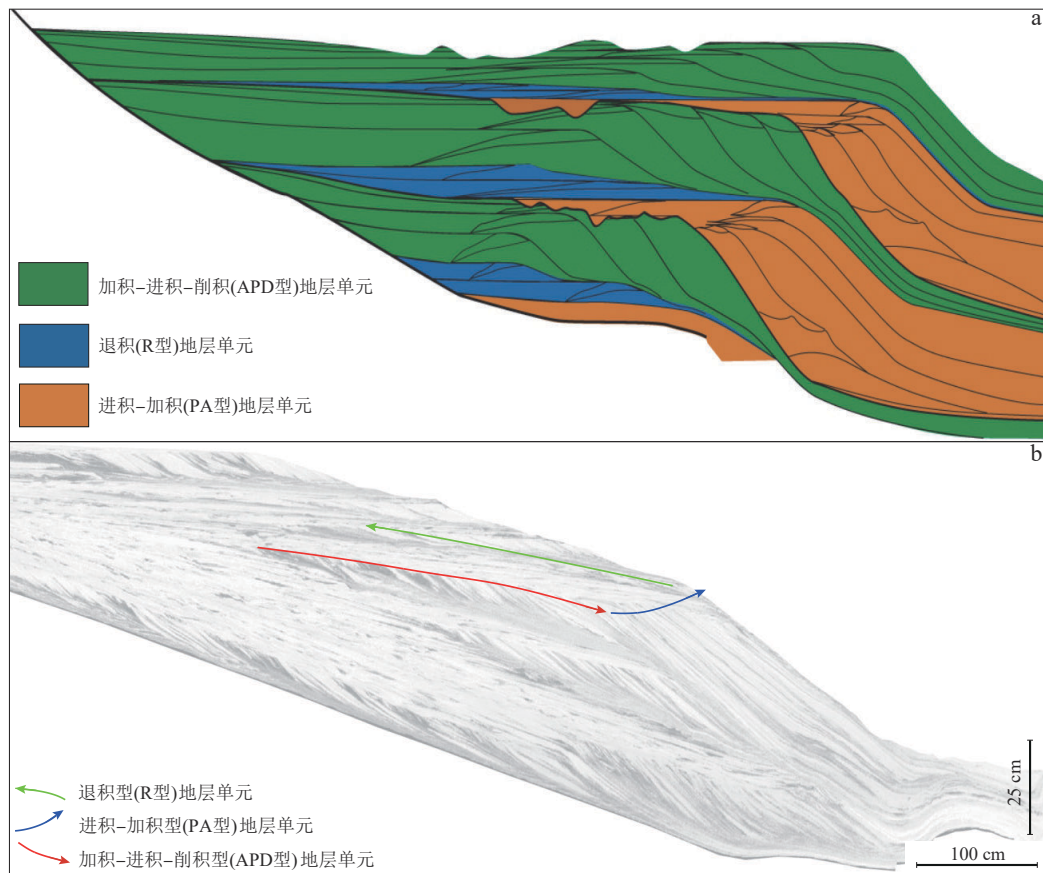


图4 PA-R-APD可容空间序列层序地层模式与对应物理实验剖面

Fig. 4 Sequence stratigraphic model of accommodation successions PA-R-APD and the associated profile of physical experiments

a. PA-R-APD可容空间序列层序地层模式(剖面引自文献[25]); b. 基于物理实验剖面的PA-R-APD可容空间序列层序划分对比(剖面引自文献[38])

进一步被拆分为AP型(加积-进积型)地层单元和PD型(进积-削积型)地层单元;而R型地层单元仅在内陆架至中陆架区域局限分布(图4a)^[25, 36]。因而,一个沉积层序往往表现为“PA-R-APD地层叠置序列(三分层序模式)”或“PA-R-AP-PD地层叠置序列(四分层序模式)”。这一地层叠置序列得到了物理模拟实验的证实,在层序物理模拟剖面上(图4b),Neal等(2016)^[37]识别划分了“PA型、R型和APD型地层单元”^[25, 38]。

在四分层序模式下,PA-R-AP-PD可容空间序列与沉积体系域、陆架坡折迁移轨迹和沉积基准面变化具有如下对应关系:

- ① PA型地层单元 = LST = 低幅上升型陆架坡折迁移轨迹(基准面上升早期);
- ② R型地层单元 = TST = 向陆回退型陆架坡折迁移轨迹(基准面上升中期);
- ③ AP型地层单元 = HST = 中幅上升型或高幅上升型陆架坡折迁移轨迹(基准面上升晚期);
- ④ PD型地层单元 = FST = 低幅下降型陆架坡折迁移轨迹(基准面下降时期)。

2.2 陆相层序地层学研究重要进展

2000年至今,陆相层序地层研究相关重要进展主要有3个方面。

2.2.1 坡折(带)方法概念

2000年至今,中国学者结合陆相断陷盆地开展了大量层序地层研究,并提出了富有中国盆地特色的层序地层概念和方法^[21, 39-42]。这其中,以构造坡折(带)最具代表性,为中国陆相含油气盆地有利砂体和隐蔽油气藏预测提供了重要的理论基础^[8, 41]。构造坡折(带)是指盆地中长期活动的同沉积构造,特别是同沉积断裂形成的古地貌突变带或斜坡带^[8, 41]。如同海盆中的滨线坡折或陆架坡折一样,在层序地层中,坡折(带)构成了古构造、古地貌、古沉积环境和古水文条件的分界(图5),控制着沉积相带(如湖底扇)和沉积体系域的发育部位^[8, 41];在源-汇系统中,坡折(带)是搬运体系与汇-聚体系直接的分界,控制着可容空间与大型沉积单元的发育展布^[8, 17, 43-44]。

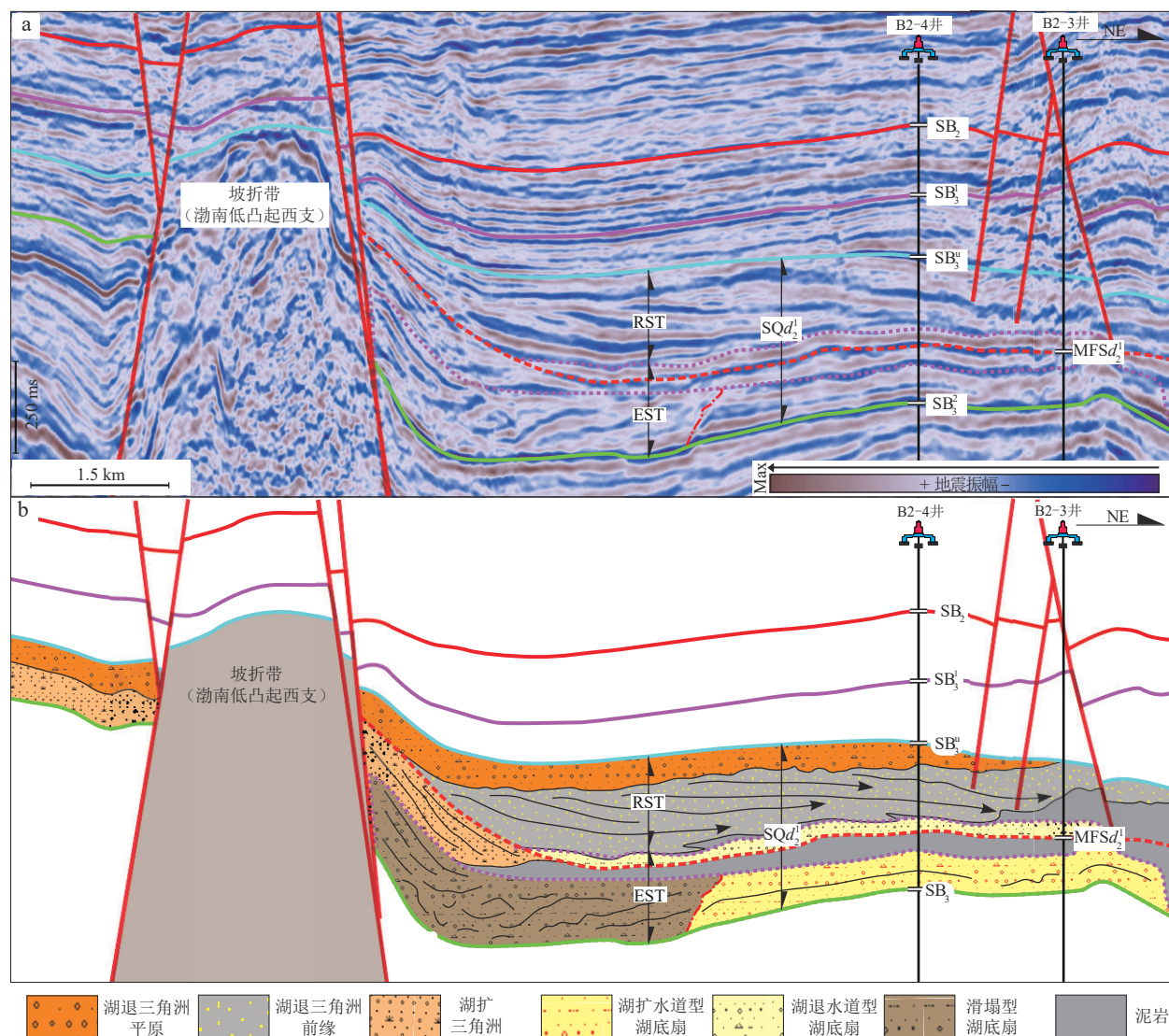


图5 渤中凹陷东营组东二下亚段典型层序沉积解释剖面

Fig. 5 Section showing typical sequences and sedimentary interpretation for the lower section of the 2nd member of

Dongying Formation, Bozhong Sag

a. 地震剖面; b. 沉积解释剖面

EST. 湖扩体系域; RST. 湖退体系域; SQd_2^1 . 东二下亚段沉积层序; SB_3^2 . 东二下亚段沉积层序底界面; SB_3^1 . 东二上亚段沉积层序底界面; SB_3^1 . 东一段沉积层序底界面; SB_2 . 东一段沉积层序顶界面

坡折带从成因上可以划分为构造坡折带和沉积坡折带,它们是重力流沉积和岩性油气藏发育的有利地带^[8,45]。坡折(带)增大了携沙水流的高度差,当携沙水流流经坡折时会因坡度陡增而被加速,演变为重力流(超临界),而当越过坡折地形再次变缓后这些超临界重力流会减速形成低能(临界或亚临界)浊流并伴随着粗粒沉积物的卸载堆积。同沉积断裂和盆内低凸起往往是湖盆中最重要的两类坡折(带),为湖底扇的发育奠定了良好的地势基础;它们的前方往往发育大型富砂湖底扇。图5所示的渤南低凸起西支前方发育一规模富砂湖底扇,该海底扇靠近生烃洼陷带且受构造

坡折(带)控制,四周被深湖-半深湖泥岩所包围,岩性圈闭的有效性较好,是渤中凹陷中-深层最有利的大型岩性勘探目标。

2.2.2 湖盆与海盆层序发育条件的差异

越来越多的研究表明,湖盆和海盆具有差异的层序发育条件:①构造因素主导了湖盆的层序充填,构造格架和同沉积断裂控制了层序的构成样式以及沉积相带和沉积体系域的特征与分布;断陷湖盆的不同构造演化阶段(如初始断陷期、强烈断陷期、断-拗转换期和拗陷沉降期)层序构型样式具有显著差

异^[39, 42, 46-47]。② 陆相层序演化和沉积充填对气候变化更为敏感,在润湿气候期,河流作用强、径流量大、异重流及其所形成的水道型湖底扇更为发育,而干旱气候期,河流作用弱、径流量小、异重流及其所形成的水道型湖底扇则相对较为不发育^[48-50]。③ 湖盆缺少宽缓的陆架区,故由陆到湖的陆-湖源-汇系统过渡区往往较局限、响应尺度也较小,陆相层序演化和沉积充填主要受沉积物供给而非可容空间的调控^[49, 51-52]。④ 湖盆具有更为紧密的湖平面变化和沉积物供给成因关联,当气候润湿、湖平面上升时,河流径流量大作用强,搬运到深湖-半深湖区的沉积物量亦会增多;而当气候干旱、湖平面下降时,河流径流量小作用弱,搬运到深湖-半深湖区沉积物供给量亦会减少^[48-50]。

上述湖、海层序发育条件差异表明源于被动陆缘的 Exxon 层序理论并不能被直接运用到湖盆当中,这一推论被如图 6 所示的上升-下降坡折轨迹对所印证。

在海盆中,底积层出现在下行水退坡折迁移轨迹而非上行水进坡折迁移轨迹的前方,这表明与经典的 Exxon 层序理论相符的是,在相对海平面下降条件下,河口向盆地一侧迁移驻留进而向海盆深水区搬运配给陆源碎屑颗粒形成底积层(图 6a);在湖盆中,底积层出现在上行水进坡折迁移轨迹而非下行水退坡折迁移轨迹的前方,这表明与经典的 Exxon 层序理论相悖的是,在相对湖平面上升条件下,河口向盆地一侧迁移驻留并同时向湖盆深水区卸载配分粗碎屑颗粒形成底积层(图 6b)。

愈来愈多的研究表明,在湖平面上升(润湿气候期)的湖扩体系域:① 湖平面在湖扩体系域初期退缩至最低,物源剥蚀区面积更大,盆外物源供给也更加充沛;② 降雨量大、径流量大、作用较强,河流携带搬运到湖盆的沉积供给量也就越多^[48-49, 53];③ 伴随着湖平面上升、湖水盐度减小,湖水与挟沙水流的密度差增大,重力流(尤其是异重流)亦更为活跃发育^[48, 54]。由

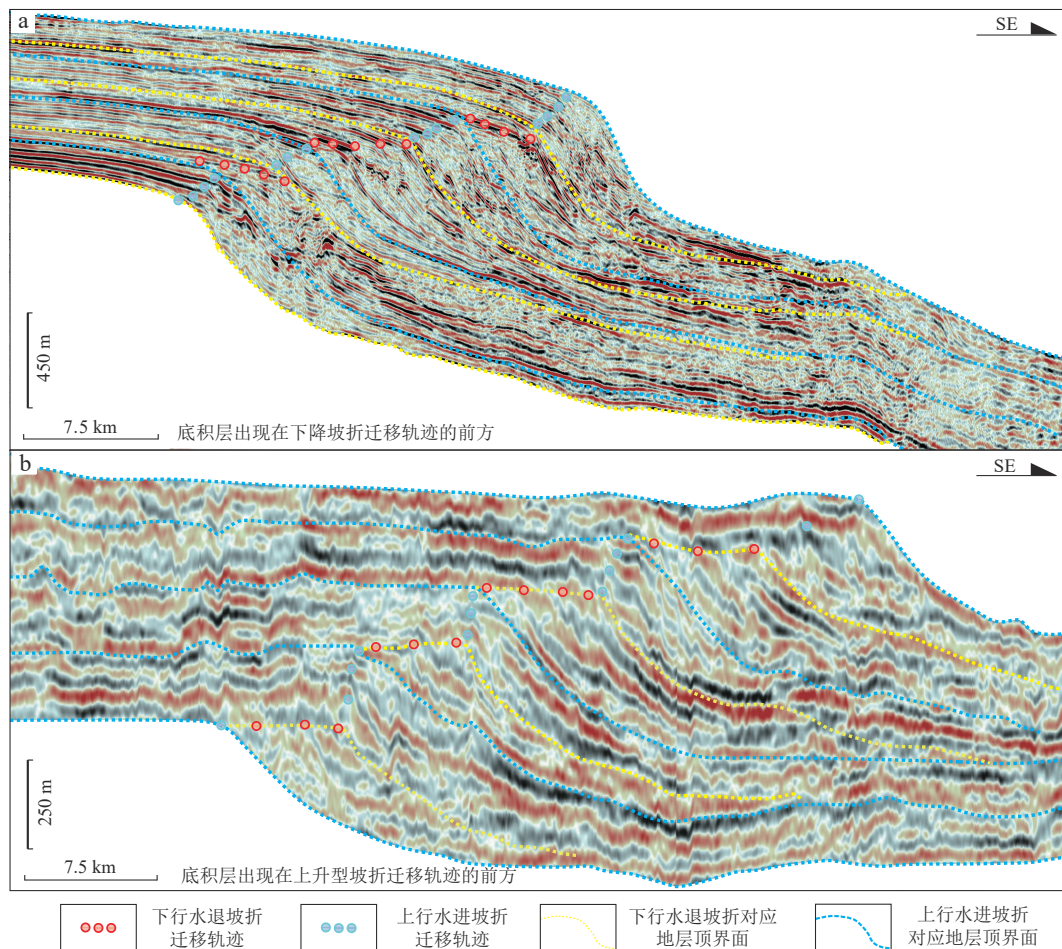


图6 海盆与湖盆上行水进-下行水退坡折迁移轨迹对与对应的斜坡进积体发育特征对比

Fig. 6 Comparison of transgressive and regressive shelf-break trajectory pairs and their associated shelf-margin clinoforms in marine and lacustrine basins

a. 南海西北陆缘琼东南盆地海相盆地地震剖面及迁移轨迹对解释;b. 匈牙利 Pannon 湖相盆地地震剖面及迁移轨迹对解释

此可见,在湖平面上升的湖扩体系域盆外物源供给更加充沛,重力流(尤其是异重流)也更为强劲;相应地更易于形成盆外远源水系供源的重力流沉积体系。譬如,渤中凹陷东营组东二下亚段沉积层序SQd₂的湖扩体系域发育规模水道型湖底扇(图5);该湖底扇具有“楔状、强振幅-低频-中低连续、杂乱”的地震相特征,厚0~378 m(平均为320 m)、面积为130 km²(图5)。此外,李相博等(2023)^[55]研究表明:三叠纪卡尼期梅雨事件造成的暖湿气候期,大量的陆缘碎屑颗粒以重力流(异重流尤盛)的形式搬运、卸载至鄂尔多斯盆地深湖区,相应出现湖泊-三角洲-湖底扇沉积体系;而在卡尼期梅雨事件前后的干旱气候期,搬运分散至鄂尔多斯盆地深湖区的陆缘碎屑颗粒数量则急剧减少,湖底

扇不发育,相应发育河流扇沉积体系。

2.2.3 供给成因陆相层序模式

前已述及,湖盆和海盆具有差异的层序地层发育条件,Gearon等(2022)^[56]在充分考虑湖、海差异层序地层发育条件的基础上,建立了一种颇具创新的陆相层序地层学模式——供给成因层序模式(supply-generated sequence model)(图7)。

供给成因陆相层序模式具有与经典Exxon层序模式截然相反的层序特征与构成样式:① Exxon层序模式认为层序界面发育出现在强制海退结束期(图1中的BSFR),而供给成因陆相层序模式认为层序界面发育在湖退结束期(图1中的SB),对应经典层序模式的最大海

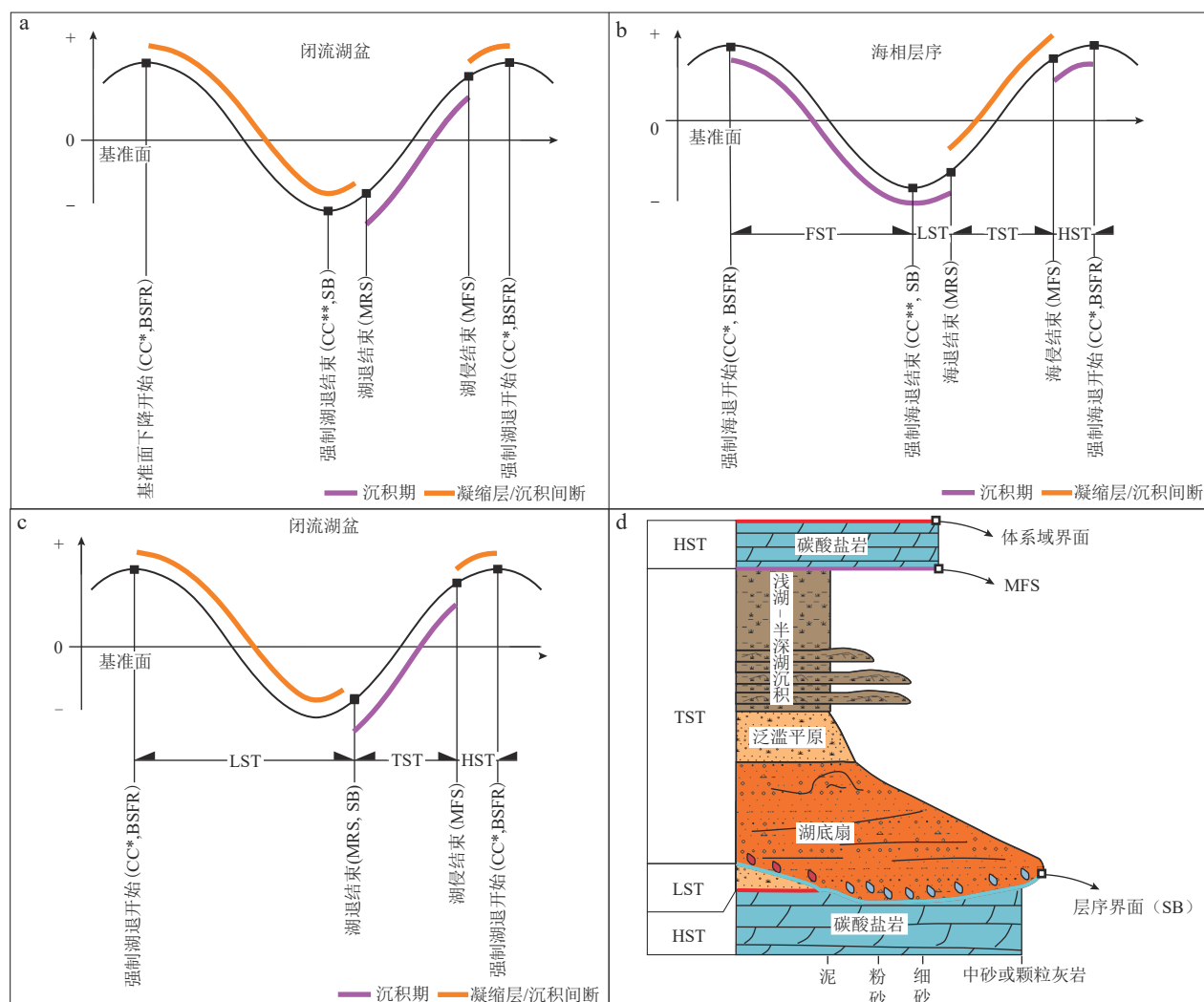


图7 供给成因陆相层序模式与经典Exxon层序发育模式及其沉积充填过程对比(据文献[56]修改)

Fig. 7 Comparison of sequence development and sedimentary filling patterns between the classical Exxon sequence model and the provenance-dominated terrigenous sequence model (modified from reference [56])

a. 经典Exxon层序发育模式;b. 闭流湖盆基准面变化事件;c. 闭流湖盆层序模式;d. 闭流湖盆层序充填样式

LST. 低位体系域;TST. 海侵体系域;HST. 高位体系域;FST. 下降体系域;BSFR. 强制海退起始面;SB. 四分层序的层序界面;MRS. 最大海退面;MFS. 最大海泛面

退面处(图7a);② Exxon层序模式认为一个沉积层序的主要沉积期出现在层序的FST,LST和HST,而供给成因陆相层序模式认为一个沉积层序的主力沉积期出现在层序的TST(图7a,b);③ Exxon层序模式认为粗碎屑颗粒向深水区分散配给形成海底扇主要发生在LST沉积期,而供给成因陆相层序模式认为粗碎屑颗粒向深湖区搬运堆积形成湖底扇主要发生在TST沉积期(图7)。供给成因陆相层序模式亦被来自Pannon湖盆的地质实例所证实,Pannon湖盆底积层及其所伴生的湖底扇等粗颗粒沉积单元发育在沉积基准面上升的上行水进坡折迁移轨迹之上(图7)^[49,51]。

在湖盆沉积序列中,初始湖泛面的确定往往缺少地貌(地形坡折带)参照,故而往往难以识别出首次湖泛面并区分LST和TST。故而,采用两分层序模式,将一个湖盆沉积层序划分为沉积基准面上升条件下形成的湖扩体系域(EST)和沉积基准面下降条件下形成的湖退体系域(RST),可能是在湖盆沉积充填预测研究中最具合理性的层序划分方案。基于这一方案,可将渤中凹陷东营组东二下亚段沉积层序SQ_{d2}划分为EST和RST两个沉积体系域;如同供给成因陆相层序模式所预测的那样,规模富砂水道型湖底扇主要发育在沉积基准面上升而非基准面下降的背景条件下(图6)。

3 用于有利砂体预测的源-汇系统研究进展

层序控砂方法原理应用于有利砂体(储层)预测时,有时会碰到“低位不一定有扇、坡折不一定控砂”的窘境。2010年至今,地质学家强调对物源区和沉积物分散路径的研究,成功地将源-汇系统方法原理运用到有利砂体预测研究中来,取得了系列重要进展。

3.1 陆-洋源-汇控砂研究重要进展

2010年至今,地质学家将源-汇系统的方法原理运用到寻找海盆有利油气储集体的勘探实践中来,在以下3个方面取得了重要进展。

3.1.1 沉积物分散路径再造构造古地理

近年来,碎屑锆石测年被广泛地应用到沟通汇水区与造山带的纽带(沉积物分散路径)的恢复重建中来;而一些特定碎屑矿物(如金红石、独居石和磷灰石等)的同位素测年亦在源-汇研究中发挥着重要作用^[57]。通过比对碎屑锆石U/Pb年龄谱峰值分布与潜在物源区特征年龄谱,可以锁定潜在的物源区(图8)^[58]。

在此基础上,结合汇水区沉积充填解剖和区域资料分析,可以更准确地恢复物源区的构造演化及其与古水系演变和充填演化之间的耦合关系,再造盆地构造古地理。

利用沉积物分散路径再造构造古地理的典型实例来自喜马拉雅-孟加拉湾源-汇系统(图8)。碎屑锆石年龄核密度统计结果显示:晚中新世以来,指示古布拉马普特拉河迁移演化的60~0 Ma碎屑锆石在若开-尼科巴扇呈现出逐渐减少的变化趋势(图8f—h),而在孟加拉扇则呈现出逐渐增多的变化趋势(图8c—e)。这一此消彼长式碎屑锆石年龄核密度变化特征忠实地记录了尼科巴-孟加拉扇跷跷板式的沉积转换事件^[59,61]。①晚中新世,主沉积物分散路径靠近孟加拉湾东部发育,将大量碎屑颗粒向尼科巴扇搬运分散,形成以“深水水道数量多和下切规模大”为特征的若开-尼科巴扇;②上新世初,西隆高原抬升使主沉积物分散路径向西迁移分流,东支向尼科巴扇搬运分散的碎屑颗粒数量开始减少,而西支向孟加拉扇搬运分散的碎屑颗粒数量则开始增多,导致水道数量和下切规模在若开-尼科巴扇有所减少,而在孟加拉扇开始增大;③第四纪初,印度板块与亚洲板块之间的最强碰撞造成主沉积物分散路径东支衰废弃、西支与恒河并流后向孟加拉扇卸载大量碎屑颗粒,形成以“水道数量多和下切规模大”为特征的孟加拉扇。这表明喜马拉雅-孟加拉湾源-汇系统的有利砂体在早期(晚中新世)主要分布在孟加拉湾东侧的若开-尼科巴扇,而晚期(第四纪)主要沿着孟加拉湾西侧的孟加拉扇展布发育。

3.1.2 源-汇地貌比例关系预测扇体规模

近年来,利用源-汇要素地貌比例关系预测沉积体的尺寸规模愈发受到关注^[19,62-64]。该方法旨在利用源-汇地貌比例关系,通过对已知源-汇要素(如剥蚀区面积等)的地貌参数进行定量测定,来预测未知源-汇要素(如海底扇等)的尺寸规模(图9,图10)^[19,62-63]。早在20世纪60—70年代,地理学家便统计发现冲积扇的面积与剥蚀区面积成幂函数的地貌比例关系^[65-66]。

在源-汇系统这一学术思想融入到盆地分析的研究生之后,Sømme等(2009)^[19]统计了全球29个不同构造背景条件下的陆-洋源-汇系统的剥蚀区、搬运区和沉积区的各类地貌要素,并建立了各类源-汇要素之间的地貌比例关系(图9)。通过对源-汇地貌参数的统计分析发现,全球典型源-汇系统可以依据“剥蚀区的面积和古水系参数”区分为“小型、中型和大型源-汇系统”3类,而不同类型的源-汇系统具有差异的海

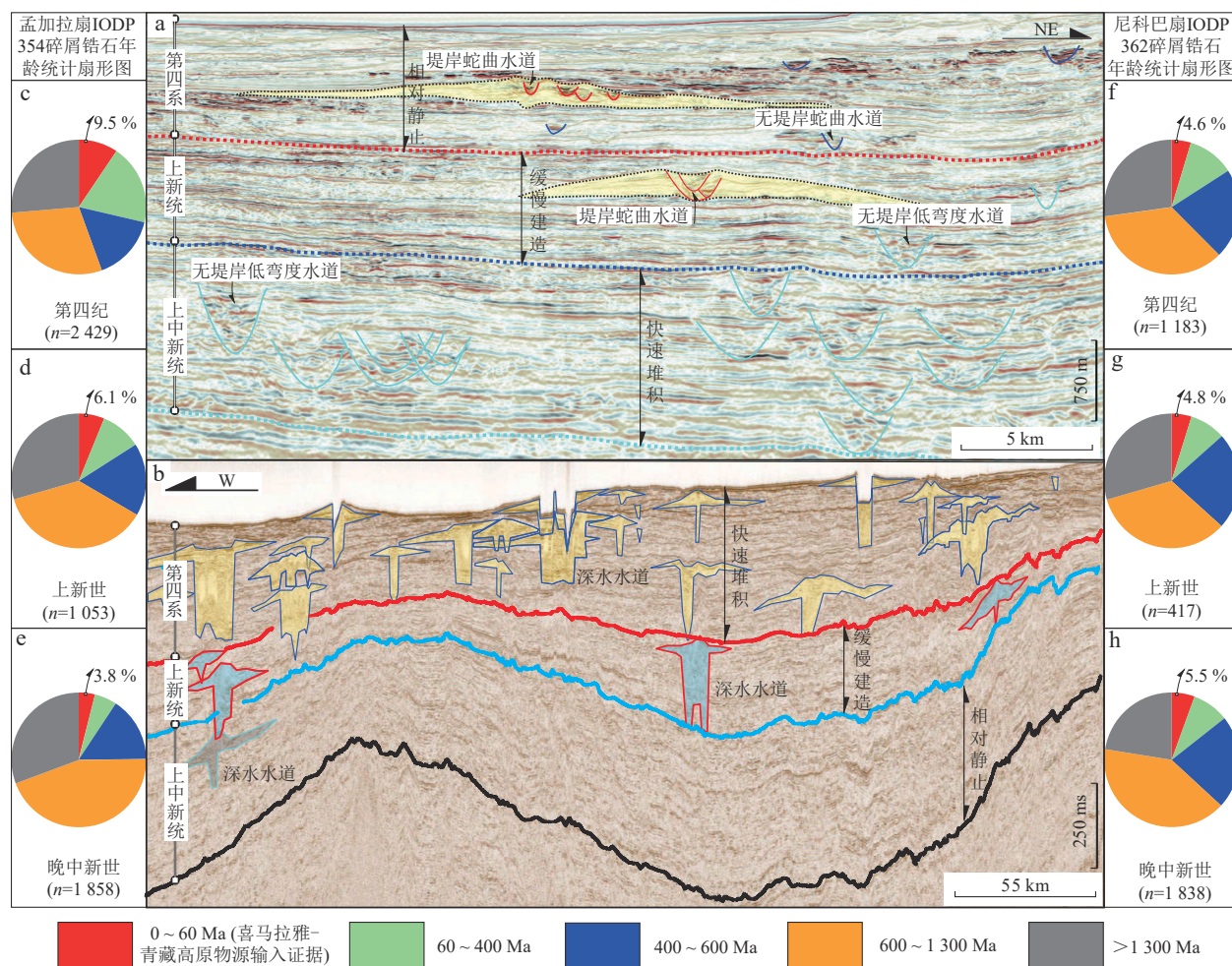


图8 晚中新世以来孟加拉扇和尼科巴扇沉积充填过程解释与碎屑锆石年龄统计

Fig. 8 Interpretation of sedimentary filling processes in the Late Pleistocene Bengal and Nicobar submarine fans and statistics of U/Pb detrital zircon ages

a. 孟加拉扇晚中新世以来沉积充填过程的地震解释; b. 尼科巴扇晚中新世以来沉积充填过程的地震解释; c—e. 孟加拉扇IODP354航次碎屑锆石年龄在主要构造层序内的统计扇形图(数据引自文献[59]); f—h. 若开-尼科巴扇IODP362航次碎屑锆石年龄在主要构造层序内的统计扇形图(数据引自文献[60])

底扇长度、宽度和面积(图9)^[19, 63]。

统计发现古水系的最大长度(R_l , km)忠实地反映了剥蚀区的面积(C_a , km²), 二者之间呈幂函数拟合关系(图10b):

$$C_a = 1.06 R_l^{1.80} (R^2 = 0.80, n = 91) \quad (3)$$

利用基于源-汇地貌参数的拟合公式可以定量估算有利储集体的尺寸规模。譬如, 统计发现海底扇的扇体长度(F_l , km)与扇体宽度(F_w , km)呈现幂函数拟合关系(图10b); 当拟评价扇体的宽度已知为100~150 km时, 则该扇体长度预计介于120~170 km。

3.1.3 洲-扇源-汇耦合预测扇体的富砂性

在陆-洋源-汇研究中, 物源区的沉积物剥蚀供给情况常因过于复杂或缺少数据而难以进行恢复与重

构^[67-69]。Gong等(2020)^[70]研究指出: 以外陆架为界可将陆-洋源-汇系统划分为“物源区-内陆架”和“外陆架-深海盆地”两个次级系统。外陆架-深海盆地源-汇系统主要由发育在外陆架上的陆架边缘三角洲(背景“源”)、峡谷水道(输送“渠”)和形成于大陆坡及深海盆地内的海底扇(沉积“汇”)组成, 故而又称之为陆架边缘三角洲-海底扇源-汇系统(简称“洲-扇源-汇”)。基于洲-扇源-汇耦合分析, 可以预测海底扇的富砂性。

Gong等(2016b)^[71]通过对全球42个发育下降型陆架坡折迁移轨迹的洲-扇源-汇实例研究发现: 仅有24个富砂沉积物供给的河控或浪控陆架边缘三角洲的前方发育富砂海底扇, 而另外18个富泥沉积物供给的陆架边缘三角洲前方多以块状搬运复合体为主。由此可见, 富砂的沉积物供给是首要前提, 在此条件下海

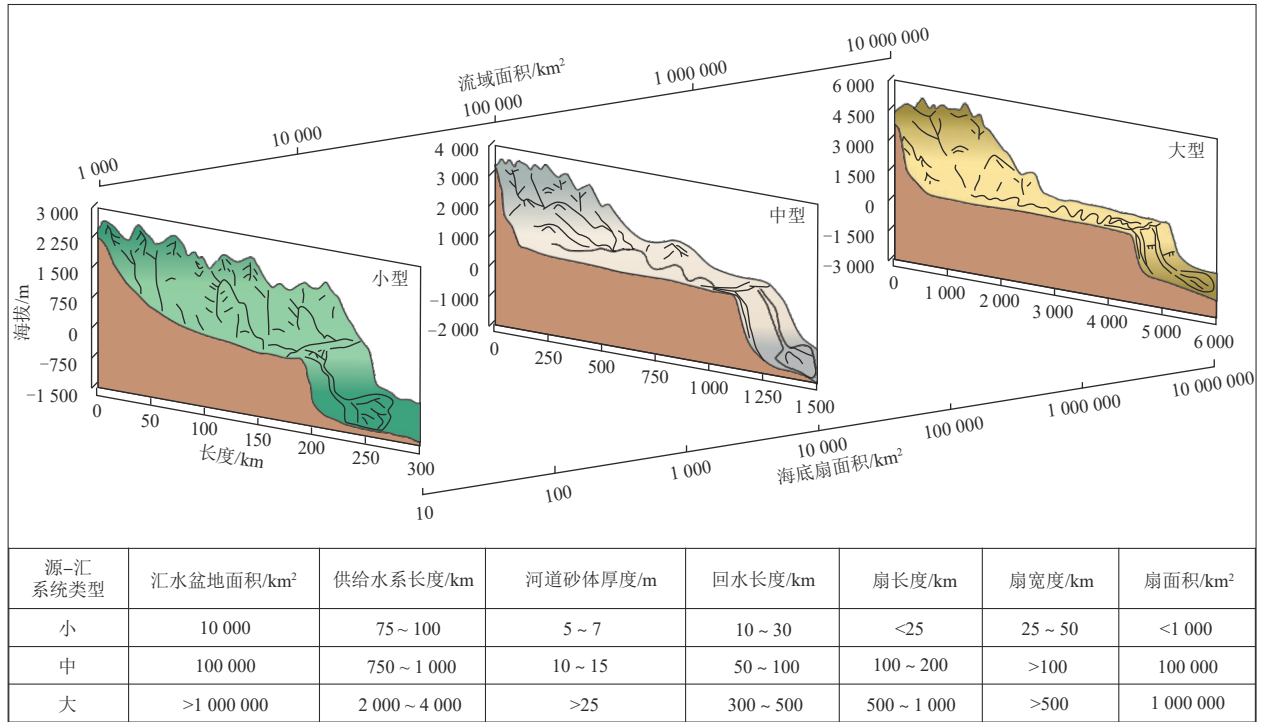


图9 基于地貌参数划分的源-汇系统类型及其源-汇地貌比例关系(综合修改自文献[16, 63])

Fig. 9 Classification of source-to-sink systems based on geomorphic parameters and corresponding source-to-sink geomorphic proportions (modified from references [16, 63])

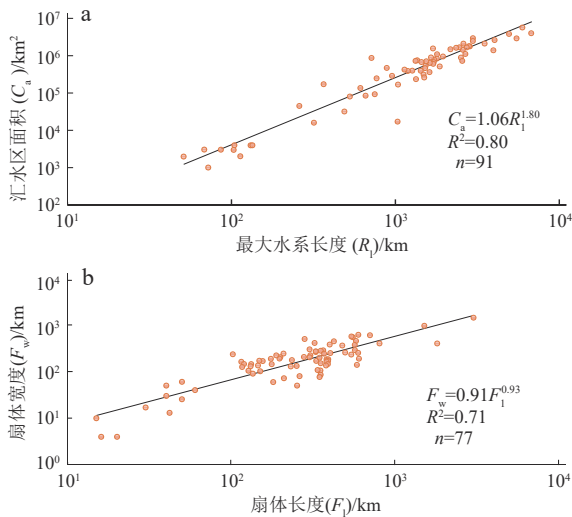


图10 两类型源-汇地貌比例关系(原始数据引自文献[16, 63])

Fig. 10 Geomorphic proportions of two typical source-to-sink landforms (original data from references [16, 63])

平面下降时才有可能形成富砂的海底扇。故而,可以通过分析陆架边缘三角洲内前缘的岩性(富砂还是富泥)来预测其前方海底扇的富砂性。

此外,Gong等(2016b)^[71]通过对24个发育下降型陆架坡折迁移轨迹和富砂沉积物供给的洲-扇源-汇实例分析发现:17个河控陆架边缘三角洲前方发育的海

底扇规模较大且富砂,6个浪控陆架边缘三角洲前方发育的海底扇富砂但规模相对较小,而潮控陆架边缘三角洲的前方往往不会发育海底扇。由此可见,陆架边缘三角洲的水动力条件也是海底扇富砂性的“代言人”:当陆架边缘三角洲以河控或浪控为主时,其前方的海底扇往往富砂;而当陆架边缘三角洲以潮汐作用为主时,前方出现富砂海底扇的可能性较小^[68-69, 72]。因而,通过对陆架边缘三角洲的水动力条件进行分析,也可预知陆架边缘三角洲前方海底扇的富砂性。

3.2 陆-湖源-汇控砂研究重要进展

2010年至今,地质学家将源-汇系统的方法原理运用到湖盆寻找有利油气储集体的勘探实践中来,在如下两个方面取得了重要进展。

3.2.1 山-沟-坡-面耦合控砂

随着陆-洋源-汇系统研究的兴起,地质学家(尤其是中国的地质学家)开始在陆相断陷盆地的油气勘探中引入源-汇系统的方法概念,建立了陆相源-汇控砂方法理论,在湖盆砂体预测中起到了重要作用,并对断陷盆地油气勘探起到了巨大的推动作用^[17-18, 43, 73-74]。

20世纪90年代中国石化胜利油田在东营凹陷北部

陡坡带油气勘探过程中便认识到沟-扇对应的成因关联,并将其运用到砂岩油气藏的预测中来,有效地指导了陡坡扇砂砾岩体的油气勘探。在断陷盆地的砂体预测中,徐长贵等(2013,2017)^[17, 43]提出了山(有效物源)-沟(搬运通道)-坡(坡折体系)-面(层序界面)耦合控砂的理论方法,认为山-沟-坡-面的有效配置决定了砂体在平面上的分布位置,而层序界面决定了砂体发育的有利时期。山-沟-坡-面耦合控砂方法理论认为:在平面上,发育完整有效的山-沟-坡配置关系的区域为有利储集砂体的富集场所;在剖面上,层序界面附近(尤其是低位域沉积期)是有利储集砂体的富集时期^[17, 43]。

3.2.2 陆相源-汇时-空耦合控砂

针对复杂陆相断陷盆地的砂体预测,徐长贵等

(2020)^[44]在渤海海域创新提出了陆相断陷盆地源-汇时-空耦合控砂理论,系统阐述了陆相断陷盆地源-汇系统控砂原理(图11)。在陆相源-汇时-空耦合控砂理论指导下,渤海海域古近系储层预测成功率从40%提高到80%^[18, 43],显著提高了陆相断陷盆地储层预测的成功率,对复杂陆相断陷盆地的沉积体系分析和有利储层预测具有重要的借鉴意义。

这一方法原理认为:剥蚀区产生的沉积颗粒(有效物源体系)经过一系列的输砂通道(有效输砂体系)搬运输送后,在特定的时间上(如层序界面附近)和特定的空间下(如山-沟-坡耦合地带)分散堆积下来,构成一个完整的源-汇时-空耦合控砂系统(图11a)^[43-44]。其中,剥蚀区产生的粗碎屑颗粒往往在搬运通道前方坡折带下倾地区分散堆积;搬运通道的类型、规模和产

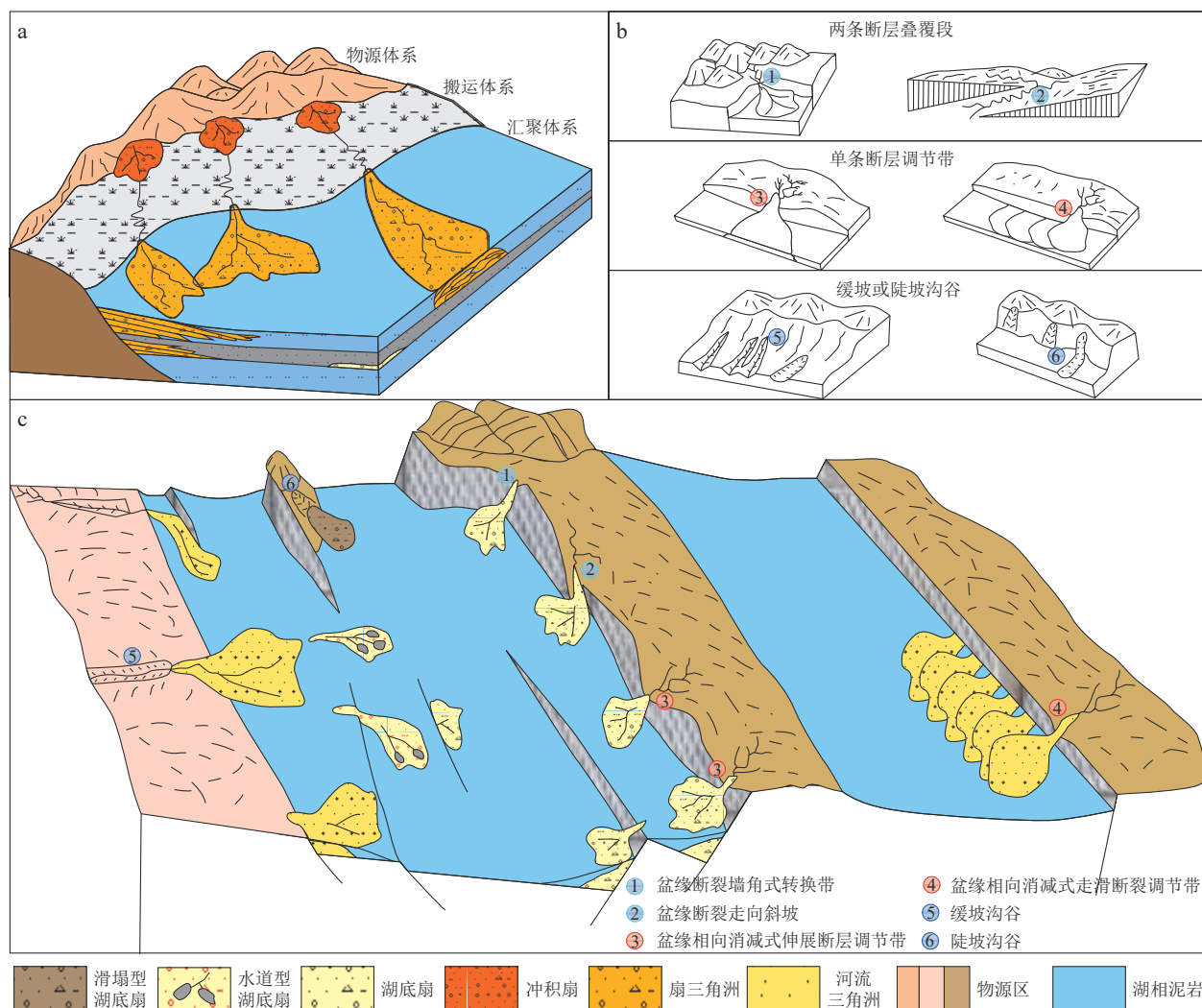


图11 源-汇时-空耦合控砂系统概念示意图

Fig. 11 Sketch diagram showing the spatial-temporal coupling of source and sink and their controls on sandstone development

a. 源-汇时-空耦合控砂系统概念示意图(修改自文献[17]); b. 渤海海域不同类型源-汇输砂通道示意图(修改自文献[17]); c. 渤海海域源-汇时-空耦合控砂系统概念示意图(修改自文献[17])

状控制了物源输入方向,决定了整个源-汇时-空耦合控砂系统的类型与特征(图11b)^[17, 43-44]。在渤海海域识别总结了6种常见的有效输砂通道:盆缘断裂墙角式转换带、盆缘断裂走向斜坡、盆缘相向消减式伸展断层调节带、盆缘相向消减式走滑断裂调节带、缓坡沟谷和陡坡沟谷(图11b,c)。这6种搬运通道前方坡折下倾区域往往是有利砂体的富集区,发育三角洲、扇三角洲、水道型湖底扇和滑塌型湖底扇等富砂油气储集体。故而,在陆相断陷盆地中识别追踪这6种有效搬运通道可以预测有利储集砂体的发育位置。

4 基于源-渠-汇-岩耦合的优质储层预测技术

源-汇控砂方法原理应用于有利砂体(储层)预测时,又碰到了“源-汇不一定控储”的挑战。为了解决这一勘探挑战,本文提出了源-渠-汇-岩耦合控储的优质储层预测新方法,将“来自于剥蚀区的沉积颗粒经搬运通道输送分散到汇水盆地沉积下来、并经过成岩埋藏成岩形成岩石”这一系统过程称之为“源-渠-汇-岩系统”。源-渠-汇-岩耦合控储的核心内涵是源-汇系统控域,源-汇沉积控砂,成岩作用控性,源-渠-汇-岩耦合控储,具体包括如下核心步骤。

1) 层序地层格架建立

区域可对比的等时层序地层格架,是源-渠-汇-岩系统研究的基础。通过地震资料和钻、测井资料,识别地质界面(不整合面及重要的整合面),多种资料相互验证对比,井-震结合,建立区域可对比的层序地层格架。

2) 物源子系统分析

沉积物源是储集砂体存在的物质基础,物源子系统分析是源-渠-汇-岩系统研究的关键。物源子系统分析主要包括:物源类型识别、古地理格局厘定、基岩地质年代与岩性组成分析、汇水单元划分以及物源供给通量计算等。

3) 搬运子系统刻画

搬运通道是连接物源子系统和汇聚子系统之间的纽带,其类型、特征与展布控制了沉积体系的分布和规模,是源-渠-汇-岩系统研究的重点。搬运子系统刻画主要包括:搬运通道类型(断槽、沟谷和构造转换带等)识别、展布(平行、分叉、汇聚和分散等)分析、搬运通量(延伸长度、宽度、下切深度和截面积等)表征以及沉积物分散路径重建等。

4) 汇聚子系统刻画

汇聚体系是剥蚀区沉积颗粒经过搬运通道输送分

散并最终沉积下来的产物,是源-渠-汇-岩系统研究的核心。汇聚子系统刻画主要包括:在等时层序地层格架约束下开展汇聚场所(构造古地貌、坡折带和微古地貌等)刻画和沉积体系解剖等。

5) 成岩子系统分析

成岩过程是经由源-渠-汇体系形成的沉积产物,经埋藏后最终变为岩石的作用过程,其控制着岩石的储层物性。成岩子系统研究主要包括:沉积相分析、成岩相(压实作用、溶蚀作用和胶结作用等)分析、成岩演化(成岩阶段划分等)研究、储层物性特征(孔隙结构发、储层评价和储层分类等)分析以及成岩相与孔隙演化研究。

6) 源-渠-汇-岩耦合控储研究

在上述研究的基础上,明确源-渠-汇体系时-空配置关系及其与规模砂体的控制作用,揭示源-渠-汇体系对成岩作用和储层质量的控制作用,并最终从揭示源-渠-汇-岩系统的角度落实优质储层的时空展布。

5 结论

1) 在层序控砂方面,尽管当前学术界似乎热衷于层序地层学标准化,但依据沉积基准面变化划分体系域(如四分层序模式)仍然是工业界广泛使用的方法技术。海相层序地层研究提出了坡折迁移轨迹、供给驱动的模式和可容空间序列法的新概念新方法;陆相层序地层研究在坡折(带)控砂、湖海层序发育条件差异和供给成因陆相层序模式方面也取得了重要进展。

2) 在源-汇控砂方面,将源-汇系统运用到预测海相储层的勘探实践中,所取得的代表性研究进展主要有:利用沉积物分散路径再造构造古地理,利用源-汇地貌比例关系预测扇体规模和基于洲-扇源-汇耦合预测扇体富砂性;中国地质学家结合中国复杂断陷盆地特征提出了山-沟-坡-面耦合控砂和陆相源-汇时-空耦合控砂的陆相储层预测方法原理。

3) 针对层序源-汇控砂但不一定控储的勘探难题,本文提出了基于源-渠-汇-岩耦合的优质储层预测技术。该技术方法的内涵是:源-汇系统控域、源-汇沉积控砂、成岩作用控性、源-渠-汇-岩耦合控储。具体来说,在等时的层序格架内,开展物源子系统、搬运子系统、汇聚子系统和成岩子系统精细刻画,揭示源-渠-汇体系对成岩作用和储层质量的控制作用,从源-渠-汇-岩系统耦合的角度查明优质储层的时空展布。

参 考 文 献

- [1] SLOSS L L, KRUMBEIN W C, DAPPLES E C. Integrated facies analysis[M]//LONGWELL C R, MOORE R C, MCKEE E D, et al. Sedimentary Facies in Geologic History. Boulder: Geological Society of America, 1949: 91-124.
- [2] WHEELER H E. Time-stratigraphy[J]. AAPG Bulletin, 1958, 42(5): 1047-1063.
- [3] MARTINSEN O J, SØMME T O, GROTH A. Development of predictive stratigraphy—sequences, source-to-sink, and back to seismic[M]//HART B, ROSEN N C, WEST D, et al. Sequence Stratigraphy: The Future Defined. Broken Arrow: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2017: 7-8.
- [4] CATUNEANU O. Principles of sequence stratigraphy[M]. 2nd ed. San Diego: Elsevier Science, 2022: 1-336.
- [5] MITCHUM R M, Jr, VAIL P R, THOMPSON S III. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 2: The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis[M]//PAYTON C E. Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 53-62.
- [6] VAIL P R, MITCHUM R M, Jr, THOMPSON S III. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap[M]//PAYTON C E. Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 63-81.
- [7] VAN WAGONER J C, POSAMENTIER H W, MITCHUM R M, et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions[M]//WILGUS C K, HASTINGS B S, POSAMENTIER H, et al. Sea-Level Changes: An Integrated Approach. Broken Arrow: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1988: 39-45.
- [8] 林畅松. 盆地沉积动力学: 研究现状与未来发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 685-700.
LIN Changsong. Sedimentary dynamics of basin: Status and trend[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 685-700.
- [9] 龚承林, STEEL R J, 彭晔, 等. 深海碎屑岩层序地层学50年(1970—2020)重要进展[J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 292-318.
GONG Chenglin, STEEL R J, PENG Yang, et al. Major advances in deep-marine siliciclastic sequence stratigraphy, 1970 to 2020[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 292-318.
- [10] GILBERT G K. Hydraulic-mining debris in the Sierra Nevada[R]. Washington, D. C.: U. S. Geological Survey, 1917: 105-154.
- [11] BROWN W M, RITTER J R. Sediment transport and turbidity in the Eel River Basin, California[R]. Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office, 1971: 13-65.
- [12] SCHUMM S A. The fluvial system[M]. New York: Wiley, 1977: 338.
- [13] ROMANS B W, CASTELLTORT S, COVAULT J A, et al. Environmental signal propagation in sedimentary systems across timescales[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 153: 7-29.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 徐长贵. 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[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.
- [18] 徐长贵, 杜晓峰. 陆相断陷盆地源-汇理论工业化应用初探——以渤海海域为例[J]. 中国海上油气, 2017, 29(4): 9-18.
XU Changgui, DU Xiaofeng. Industrial application of source-to-sink theory in continental rift basin: A case study of Bohai sea area[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(4): 9-18.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 王成善, 林畅松. 中国沉积学近十年来的发展现状与趋势[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(6): 1217-1229.
WANG Chengshan, LIN Changsong. Development status and trend of sedimentology in china in recent ten years[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(6): 1217-1229.
- [22] HELLAND-HANSEN W. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 94(1/4): 95-97.
- [23] HUNT D, TUCKER M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: Deposition during base-level fall[J]. Sedimentary Geology, 1992, 81(1/2): 1-9.
- [24] CATUNEANU O. Principles of sequence stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier Press, 2006: 105-290.
- [25] NEAL J, ABREU V. Sequence stratigraphy hierarchy and the accommodation succession method[J]. Geology, 2009, 37(9): 779-782.
- [26] POSAMENTIER H W, JERVEY M T, VAIL P R. Eustatic controls on clastic deposition I-conceptual framework[M]//WILGUS C K, HASTINGS B S, POSAMENTIER H, et al. Sea-Level Changes: An Integrated Approach. Broken Arrow: SEPM

- Society for Sedimentary Geology, 1988: 109–124.
- [27] CATUNEANU O, ABREU V, BHATTACHARYA J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 92(1/2): 1–33.
- [28] GONG Chenglin, WANG Yingmin, PYLES D R, et al. Shelf-edge trajectories and stratal stacking patterns: Their sequence-stratigraphic significance and relation to styles of deep-water sedimentation and amount of deep-water sandstone [J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(7): 1211–1243.
- [29] GONG Chenglin, WANG Yingmin, STEEL R J, et al. Growth styles of shelf-margin clinoforms: Prediction of sand- and sediment-budget partitioning into and across the shelf [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85(3): 209–229.
- [30] CARVAJAL C R, STEEL R J. Thick turbidite successions from supply-dominated shelves during sea-level highstand [J]. *Geology*, 2006, 34(8): 665–668.
- [31] GONG Chenglin, STEEL R J, WANG Yingmin, et al. Shelf-margin architecture variability and its role in sediment-budget partitioning into deep-water areas [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154: 72–101.
- [32] PAUMARD V, BOURGET J, PAYENBERG T, et al. Controls on shelf-margin architecture and sediment partitioning during a syn-rift to post-rift transition: Insights from the Barrow Group (Northern Carnarvon Basin, North West Shelf, Australia) [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 177: 643–677.
- [33] STEEL R, OLSEN T. Clinoforms, clinoform trajectories and deepwater sands [M]//ARMENTROUT J M, ROSEN N C. *Sequence Stratigraphic Models for Exploration and Production: Evolving Methodology, Emerging Models and Application Histories*. Broken Arrow: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2002: 367–380.
- [34] HELLAND-HANSEN W, HAMPSON G J. Trajectory analysis: Concepts and applications [J]. *Basin Research*, 2009, 21(5): 454–483.
- [35] PELLEGRINI C, PATRUNO S, HELLAND-HANSEN W, et al. Clinoforms and clinothems: Fundamental elements of basin infill [J]. *Basin Research*, 2020, 32(2): 187–205.
- [36] PAUMARD V, BOURGET J, PAYENBERG T, et al. From quantitative 3D seismic stratigraphy to sequence stratigraphy: Insights into the vertical and lateral variability of shelf-margin depositional systems at different stratigraphic orders [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 110: 797–831.
- [37] NEAL J E, ABREU V, BOHACS K M, et al. Accommodation succession ($\delta A/\delta S$) sequence stratigraphy: Observational method, utility and insights into sequence boundary formation [J]. *Journal of the Geological Society*, 2016, 173(5): 803–816.
- [38] MARTIN J, PAOLA C, ABREU V, et al. Sequence stratigraphy of experimental strata under known conditions of differential subsidence and variable base level [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(4): 503–533.
- [39] 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术——高精度地震探测基础上的层序地层学研究 [J]. *地球科学*, 2002, 27(5): 592–598.
- LI Sitian, PAN Yuanlin, LU Yongchao, et al. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in lacustrine fault basins: Sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey [J]. *Earth Science*, 2002, 27(5): 592–598.
- [40] LIN Changsong, ERIKSSON K, LI Sitian, et al. Sequence architecture, depositional systems, and controls on development of lacustrine basin fills in part of the Erlian Basin, northeast China [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(11): 2017–2043.
- [41] 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念 [J]. *地球科学*, 2000, 25(3): 260–266.
- LIN Changsong, PAN Yuanlin, XIAO Jianxin, et al. Structural slope-break zone: Key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins [J]. *Earth Science*, 2000, 25(3): 260–266.
- [42] 朱红涛, 刘可禹, 朱筱敏, 等. 陆相盆地层序构型多元化体系 [J]. *地球科学*, 2018, 43(3): 770–785.
- ZHU Hongtao, LIU Keyu, ZHU Xiaomin, et al. Varieties of sequence stratigraphic configurations in continental basins [J]. *Earth Science*, 2018, 43(3): 770–785.
- [43] 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等. 沉积盆地“源-汇”系统研究新进展 [J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(1): 1–11.
- XU Changgui, DU Xiaofeng, XU Wei, et al. New advances of the “source-to-sink” system research in sedimentary basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(1): 1–11.
- [44] 徐长贵, 杜晓峰, 朱红涛. 陆相断陷盆地源汇系统控砂原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2020: 1–233.
- XU Changgui, DU Xiaofeng, ZHU Hongtao. Principle and application of source-sink system for sand control in continental faulted basins [M]. Beijing: Science Press, 2020: 1–233.
- [45] 冯有良, 胡素云, 李建忠, 等. 准噶尔盆地西北缘同沉积构造坡折对层序建造和岩性油气藏富集带的控制 [J]. *岩性油气藏*, 2018, 30(4): 14–25.
- FENG Youliang, HU Suyun, LI Jianzhong, et al. Controls of syndepositional structural slope-break zones on sequence architecture and enrichment zones of lithologic reservoirs in northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(4): 14–25.
- [46] CARROLL A R, BOHACS K M. Stratigraphic classification of ancient lakes: Balancing tectonic and climatic controls [J]. *Geology*, 1999, 27(2): 99–102.
- [47] 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.
- [48] FONGNGERN R, OLARIU C, STEEL R J, et al. Clinoform growth in a Miocene, Para-Tethyan deep lake basin: Thin topsets, irregular foresets and thick bottomsets [J]. *Basin Research*, 2016, 28(6): 770–795.
- [49] GONG Chenglin, QI Kun, MA Yuan, et al. Tight coupling between the cyclicity of deep-water systems and rising-then-flat shelf-edge pairs along the submarine segment of the Qiongdongnan sediment-routing system [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2019, 89(10): 956–975.
- [50] LIU Jianping, XIAN Benzong, JI Youliang, et al. Alternating of aggradation and progradation dominated clinothems and its

- implications for sediment delivery to deep lake: The Eocene Dongying Depression, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104197.
- [51] SZTANÓ O, SZAFIÁN P, MAGYAR I, et al. Aggradation and progradation controlled clinothems and deep-water sand delivery model in the Neogene Lake Pannon, Makó Trough, Pannonian Basin, SE Hungary[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 103: 149–167.
- [52] 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.
- [53] LYONS R P, SCHOLZ C A, BUONICONTI M R, et al. Late quaternary stratigraphic analysis of the lake Malawi rift, East Africa: An integration of drill-core and seismic-reflection data[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 303(1/4): 20–37.
- [54] GILLI A, ANSELMETTI F S, GLUR L, et al. Lake sediments as archives of recurrence rates and intensities of past flood events [M]//SCHNEUWLY-BOLLSCHWEILER M, STOFFEL M, RUDOLF-MIKLAU F. *Dating Torrential Processes on Fans and Cones: Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment*. Dordrecht: Springer, 2013: 225–242.
- [55] 李相博, 刘化清, 杨伟伟, 等. 一个由干湿交替极端气候事件主导的内陆湖盆: 来自鄂尔多斯盆地上三叠统延长组露头剖面的沉积学证据[J]. *地球科学*, 2023, 48(1): 293–316.
- LI Xiangbo, LIU Huaqing, YANG Weiwei, et al. A lacustrine basin driven by extreme events of alternate dry-wet climatic cycles: Evidence from outcrops of Yanchang Formation in Upper Triassic, Ordos Basin [J]. *Earth Science*, 2023, 48(1): 293–316.
- [56] GEARON J H, OLARIU C, STEEL R J. The supply-generated sequence: A unified sequence-stratigraphic model for closed lacustrine sedimentary basins with evidence from the Green River Formation, Uinta Basin, Utah, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2022, 92(9): 813–835.
- [57] 徐杰, 姜在兴. 碎屑岩物源研究进展与展望[J]. *古地理学报*, 2019, 21(3): 379–396.
- XU Jie, JIANG Zaixing. Provenance analysis of elastic rocks: Current research status and prospect [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(3): 379–396.
- [58] LAWTON T F. Small grains, big rivers, continental concepts[J]. *Geology*, 2014, 42(7): 639–640.
- [59] PICKERING K T, CARTER A, ANDÒ S, et al. Deciphering relationships between the Nicobar and Bengal submarine fans, Indian Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 544: 116329.
- [60] BLUM M, ROGERS K, GLEASON J, et al. Allogenic and autogenic signals in the stratigraphic record of the deep-sea Bengal Fan[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7973.
- [61] 龚承林, 刘力, 邵大力, 等. 晚中新世以来孟加拉-尼科巴扇跷跷板式沉积转换及其源-汇成因机制[J]. *地学前缘*, 2022, 29(4): 25–41.
- GONG Chenglin, LIU Li, SHAO Dali, et al. Depositional patterns of the Bengal-Nicobar Fan system since the Late Miocene: Seesaw-like stepwise changes and the source-sink model [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(4): 25–41.
- [62] XU Shaohua, HAN Jianhui, WANG Yingmin, et al. How much systems-tract scale, three-dimensional stratigraphic variability is present in sequence stratigraphy? : An answer from the Middle Miocene Pearl River Mouth Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2020, 104(6): 1261–1285.
- [63] SNEDDEN J W, GALLOWAY W E, MILLIKEN K T, et al. Validation of empirical source-to-sink scaling relationships in a continental-scale system: The Gulf of Mexico Basin Cenozoic record[J]. *Geosphere*, 2018, 14(2): 768–784.
- [64] NYBERG B, HELLAND-HANSEN W, GAWTHORPE R L, et al. Revisiting morphological relationships of modern source-to-sink segments as a first-order approach to scale ancient sedimentary systems[J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 373: 111–133.
- [65] HOOKE J M. The significance of mid-channel bars in an active meandering river[J]. *Sedimentology*, 1986, 33(6): 839–850.
- [66] BULL W B. The alluvial-fan environment[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1977, 1(2): 222–270.
- [67] BLUM M, MARTIN J, MILLIKEN K, et al. Paleovalley systems: Insights from Quaternary analogs and experiments [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 116: 128–169.
- [68] GONG Chenglin, LI Dongwei, STEEL R J, et al. Delta-to-fan source-to-sink coupling as a fundamental control on the delivery of coarse clastics to deepwater: Insights from stratigraphic forward modelling[J]. *Basin Research*, 2021, 33(6): 2960–2983.
- [69] PAUMARD V, BOURGET J, PAYENBERG T, et al. Controls on deep-water sand delivery beyond the shelf edge: Accommodation, sediment supply, and deltaic process regime [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2020, 90(1): 104–130.
- [70] GONG Chenglin, LI Dongwei, QI Kun, et al. Flow processes and sedimentation in a straight submarine channel on the Qiongdongnan margin, northwestern South China Sea[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2020, 90(10): 1372–1388.
- [71] GONG Chenglin, STEEL R J, WANG Yingmin, et al. Grain size and transport regime at shelf edge as fundamental controls on delivery of shelf-edge sands to deepwater [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 157: 32–60.
- [72] DIXON J F, STEEL R J, OLARIU C. Shelf-edge delta regime as a predictor of deep-water deposition [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, 82(9): 681–687.
- [73] 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 等. 沙垒田凸起前古近系基岩分布及源-汇过程[J]. *地球科学*, 2016, 41(11): 1935–1949.
- LIU Qianghu, ZHU Xiaomin, LI Shunli, et al. Pre-Palaeogene bedrock distribution and source-to-sink system analysis in the Shaleitian uplift[J]. *Earth Science*, 2016, 41(11): 1935–1949.
- [74] 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.