

文章编号: 1671-1505(2026)03-0865-16 DOI:10.7605/gdxb.2026.006

海陆过渡区交织水动力沉积： 以厄瓜多尔奥连特盆地为例*

鲍志东^{1,2} 王腾宇^{1,2} 班舒悦^{1,2} 李发有³ 王光付³ 宋逸婷^{1,2}
张辛雨^{1,2} 夏昌盛^{1,2} 欧长健^{1,2} 刘维则^{1,2} 张 淘^{1,2}
郭妍晶^{1,2} 胡小龙^{1,2} 岳彩新^{1,2}

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 深层地热富集机理与高效开发全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

3 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206

摘要 海陆过渡区是河流、波浪和潮汐共同作用的地带, 交织水动力塑造砂体形态和古地理格局。以厄瓜多尔奥连特盆地富含油气的上白垩统 Napo 组 Main-M1 段和 LU 亚段为例, 利用岩心、测井、录井等资料建立层序格架, 结合重矿物和锆石 U-Pb 年代学分析物源, 并用残厚法与印模法综合恢复沉积前古地貌。研究表明, Napo 组可划分 1 个二级层序和 5 个三级层序, Main-M1 段和 LU 亚段均处于各自三级层序的低位体系域, 物源主要来自东部及东南方向的亚马孙克拉通, 古地貌整体呈东高西低的单斜斜坡。LU 亚段整体为河—潮联控的潮汐三角洲体系, 平面上表现为东平原、西前缘, Main-M1 段则演化为东潮汐三角洲—西浪控浅海陆棚—沿岸流交织改造的混积体系。Napo 组记录了由河—潮联控向河—浪—潮三元混合体系的演化过程, 说明在构造沉降和物源条件制约下, 交织水动力是控制前渊带海陆过渡区砂体展布和古地理格局的关键因素, 对类似前陆盆地海陆过渡区的古地理恢复具有参考意义。

关键词 交织水动力 海陆过渡区 潮汐三角洲 古地理演化 上白垩统 奥连特盆地

第一作者简介 鲍志东, 1964 年生, 教授, 主要从事沉积学与岩相古地理、储层地质与油藏描述研究。

E-mail: baozhd@cup.edu.cn。王腾宇, 1996 年生, 主要从事沉积学研究。E-mail: wangty185@gmail.com。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A

Interwoven hydrodynamic sedimentation in a marine-terrestrial transition zone: a case study of the Oriente Basin, Ecuador

BAO Zhidong^{1,2} WANG Tengyu^{1,2} BAN Shuyue^{1,2} LI Fayou³ WANG Guangfu³ SONG Yiting^{1,2}
ZHANG Xinyu^{1,2} XIA Changsheng^{1,2} OU Changjian^{1,2} LIU Weize^{1,2} ZHANG Tao^{1,2}
GUO Yanjing^{1,2} HU Xiaolong^{1,2} YUE Caixin^{1,2}

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

谨以此文纪念冯增昭先生诞辰 100 周年。

* 国家科技重大专项(编号: 2024ZD1003604)和国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0603104, 2018YFC0604304)联合资助。
[Co-funded by the National Science and Technology Major Project (No. 2024ZD1003604) and the National Key Research and Development Program of China (Nos. 2017YFC0603104, 2018YFC0604304)]

收稿日期: 2025-12-31 改回日期: 2026-02-13

2 State Key Laboratory of Deep Geothermal Resources, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing 102206, China

Abstract The transitional zone between land and sea is an area where rivers, waves and tides act together, and the interwoven hydrodynamic forces shape the sand body morphology and palaeogeographic pattern. This paper takes the Main-M1 member and LU sub-member of the oil and gas-rich Napo Formation in the Oriente Basin of Ecuador as an example. By using core, logging and mud logging data, the sequence framework is established. Provenance was constrained using heavy-mineral assemblages and detrital zircon U-Pb geochronology, while pre-depositional palaeogeomorphology was restored using residual-thickness and imprint methods. The study shows that the Napo Formation can be divided into one second-order sequence and five third-order sequences. The Main-M1 member and LU sub-member are both in the lowstand systems tract of their respective third-order sequences. The provenance mainly comes from the eastern and southeastern Amazon Craton, and the palaeogeomorphology is generally a single inclined slope with the east high and the west low. The LU sub-member is an intertidal delta system controlled by rivers and tides as a whole, with a delta plain in the east and a delta front in the west. The Main-M1 member has evolved into a mixed system of east tidal delta, west wave-controlled shallow marine shelf and coastal current interwoven transformation. The Napo Formation records the evolution process from the river-tide inter-control to the river-wave-tide ternary mixed system, indicating that under the constraints of tectonic subsidence and provenance conditions, the interwoven hydrodynamic forces are the key factors controlling the distribution of sand bodies and palaeogeographic patterns in the transitional zone between land and sea in the foreland basin. This has reference significance for the palaeogeographic restoration of similar transitional zones between land and sea in foreland basins.

Key words interwoven hydrodynamic forces, transitional zone between land and sea, tidal delta, palaeogeographic evolution, Upper Cretaceous, Oriente Basin

About the first authors BAO Zhidong, born in 1964, is a professor. He is mainly engaged in research on sedimentology and lithofacies palaeogeography, reservoir geology and reservoir description. E-mail: baozhd@cup.edu.cn. WANG Tengyu, born in 1996, is currently engaged in sedimentary research. E-mail: wangty185@gmail.com.

0 引言

海陆过渡区是陆源物质进入海洋的关键通道,也是河流、波浪与潮汐共同作用最强、变化最快的沉积环境之一(周心怀等, 2019; 鲍志东等, 2024)。河流提供物质来源与定向输送, 潮汐控制往复搬运与通道—沙坝体系的重塑, 波浪与沿岸流则不断调整岸线位置并改造浅水砂体。在这些过程叠加的背景下, 沉积体系类型往往呈现明显的组合性与过渡性, 同一套层系内部可以在很短的空间尺度上出现“通道砂体—沙坪/沙坝—泥质间区”的频繁互层与快速转换。砂体几何形态因此具有更强的非均质性与不连续性, 薄互层、泥质披覆层和中期叠置的复合砂体更为常见。它们在宏观上决定了

砂体的展布格局, 在微观上决定了储集层连通性与渗流通道差异(邹才能等, 2010; 王颖和季小梅, 2011; 郭旭升等, 2018)。因此, 海陆过渡层系既是古地理重建需要重点约束的对象, 也是油气勘探中最容易形成规模较大但识别困难的隐蔽砂体聚集区。

在混合作用背景下形成的三角洲、河口湾、滨岸与浅海陆棚沉积, 往往同时具备 2 个特征。第 1 个特征是砂体规模可观, 砂体可以由河流阶段性强供砂形成, 也可以由潮汐或波浪对既有砂体进行反复改造与重新分配, 从而产生厚度较大、横向延伸较远的砂体单元; 第 2 个特征是埋藏与圈闭条件更隐蔽, 许多砂体的边界不是由明显断层或构造闭合

控制，而是由相带快速过渡、砂体侧向尖灭、泥质披覆与多期叠置形成的内部隔夹层所控制（Ainsworth *et al.*, 2011；Collins *et al.*, 2021；彭旸等，2022）。这类组合使油气聚集具有较强的隐蔽性，也使传统以单一相带连续展布为基础的预测思路面临更高的不确定性。对这类砂体的识别与解释，往往需要把沉积过程、层序位置与古地貌约束放在同一个框架中讨论。

近年来，围绕河流—波浪—潮汐混合作用过程，国内外研究在 3 个方面推动较快。第 1 类工作来自现代沉积体系观测，研究者通过潮汐三角洲、潮控河口、浪控滨岸等典型环境的长期监测，逐步认识到水动力强度在季节尺度与事件尺度上都可能发生显著变化，且这种变化会直接影响通道迁移方式、沙坝稳定性与泥质披覆的发育频率；第 2 类工作来自古地层剖面解剖与高分辨率层序对比，越来越多的案例表明，传统“河控—浪控—潮控”三分方案只能刻画端元类型，却很难描述真实地层记录中不同动力过程的交替与叠加关系；第 3 类工作来自过程模拟与盆地尺度综合研究，沉积体系不仅受局部水动力控制，还受到可容纳空间、物源供给与岸线构型的共同约束（Peng *et al.*, 2018a, 2020a）。相同的动力组合在不同的相对海平面阶段、不同的坡折背景下，可能产生完全不同的砂体形态与沉积带。正因如此，多数海陆过渡沉积体系并非单一动力主控，而是在时间上经历不同动力的反复交替，在空间上表现为河控、潮控与浪控的分带并存，并进一步通过层序叠置过程放大或弱化砂体的保存与连通性差异。

在前人关于河流—波浪—潮汐混合作用过程研究进展（Peng *et al.*, 2022；丁峰等，2024）的基础上，凝练海陆过渡区交织水动力的基本概念、典型类型及其沉积古地理响应特征，构建适用于奥连特盆地的认识框架。结合上白垩统 Napo 组层序划分、物源分析与沉积前古地貌恢复，系统解析 Main-M1 段和 LU 亚段在交织水动力控制下的沉积相组合及其时空展布特征，建立不同层序阶段的沉积模式与古地理演化图，探讨交织水动力对砂体几何形态及隐蔽油藏空间分布的控制作用。旨在从交织水动力的角度深化对奥连特盆地前渊带海陆过渡沉积体系的认识，为全球类似前陆盆地海陆过渡区的古地理恢复和隐蔽油藏预测提供借鉴。

1 交织水动力研究进展

1.1 概念与基本类型

在浅海—海陆过渡沉积体系中，河流、波浪与潮汐往往同时或先后作用于同一物源体系，其相对强度和作用时空格局发生持续调整，从而形成多种混合能量沉积体系。交织水动力概念主要包含 2 个层面：一是河流动力与波浪、潮汐等海洋动力在时间和空间上的相互消长及叠加，如河流—波浪（河—浪）、河流—潮汐（河—潮）、波浪—潮汐（浪—潮）以及河流—波浪—潮汐（河—浪—潮）等不同组合，对三角洲、河口湾及滨岸—陆棚体系的形态与沉积结构产生共同控制；二是针对斜交海岸线背景下波浪作用力的分解过程，入射波在接近岸线时产生垂直岸线的回流以及平行岸线的沿岸流，沿岸流与河口喷流或水下分流河道共同作用，可在河口两侧形成条带状沿岸沙坝或复合滩坝等特征砂体（图 1）（Peng *et al.*, 2018a, 2018b）。

在传统三角洲分类框架中，河流、波浪与潮汐分别对应河控三角洲、浪控三角洲和潮控三角洲端元。实际沉积体往往介于端元之间，并在不同时间或不同空间位置呈现出不同动力过程占优的状态。因此，越来越多的研究将三角洲及相关沉积体系视作一类交织水动力系统，强调在多种动力共同作用下形成的连续谱系，而非若干孤立的端元类型（Peng *et al.*, 2020a, 2020b）。从动力组合关系看，可区分为 3 种两两混合体系（河—浪、河—潮、浪—潮）和 1 种河—浪—潮三元混合体系。

1.2 河—浪联控体系

河—浪混合作用主要发生在河流入海河口及邻近海岸带。河口喷流强度与波浪能量大小共同决定三角洲被波浪改造的程度，河流较强、波浪较弱时，三角洲前缘以多分流河道主导的舌状或指状砂体为特征；波浪及沿岸流占优时，河口坝及水下斜坡易被重塑为沿岸拉长的条带状滩坝，三角洲平面形态趋于非对称。沉积记录上，河—浪联控体系常表现为垂向上由河控下部粗粒河口坝和下水分流河道，向上渐变为较细粒的浪成沙坝和岸外席状砂体；平面上指状河口砂体与沿岸条带状滩坝并存，前者沿最大坡降指向盆地深部，后者平行岸线展布。岩心常见复合流形成的交错层理、浪成交错层理及风暴浪沉积构造（Ashton and Giosan, 2011；

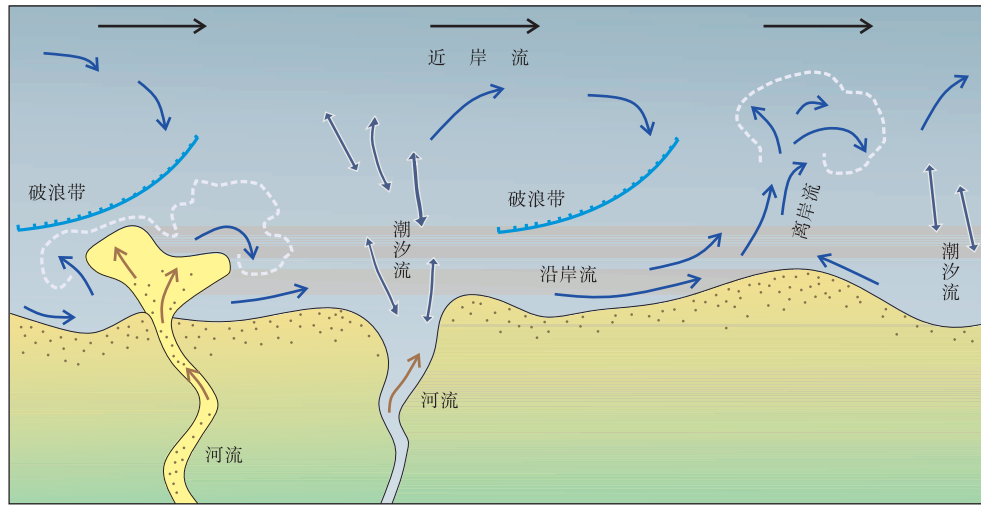


图 1 海陆过渡区交织水动力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interwoven hydrodynamic forces in the transitional zone between land and sea

李维禄等, 2017; 王昕等, 2023)。对 Napo 组 Main-M1 段西部浅海陆棚砂体的识别, 河—浪联控端元提供了重要对比模板。

1.3 河—潮联控体系

河—潮混合作用多发育于潮差较大或潮能较强的河口和半封闭海湾, 包括潮汐三角洲与河口湾等沉积体系。河流径流与潮汐能量的季节性变化以及相对海平面升降, 使沉积体在时间上呈现多期交替的进积—退积旋回。在沉积特征上, 潮汐三角洲平原与潮道砂体中广泛发育双向交错层理、潮汐束状体、砂泥韵律层理及反向粒序等构造; 前缘与河口湾环境中, 则常见被潮流改造的分流河道—潮道复合体和潮汐沙坝, 砂体沿潮道方向拉长, 并夹有大量薄层泥岩披覆层, 在储集层内部形成明显隔夹层。层序上, 海平面上升、河流减弱时潮汐主导沉积向上加厚; 海平面下降或物源加强时, 河控三角洲前移叠置于潮汐沉积体之上 (李小平等, 2016; 刘雪萍等, 2021; 郭芪恒等, 2022)。后文 LU 亚段及 Main-M1 段东部潮汐三角洲平原—前缘砂体的判识, 主要对应这一端元特征。

1.4 浪—潮联控体系

浪—潮混合作用常见于开阔潮坪及部分浪控岸线、障壁岛—泻湖体系。波浪控制岸线侵蚀与沙坝形成, 潮汐通过周期性涨落调节浪带位置和水深, 二者叠加形成具有明显垂向韵律的沉积序列。在潮坪及其近岸砂体中, 垂向上依次发育涨潮期复合流

形成的向陆迁移交错层理、高潮期对称性浪成沙纹及退潮期复合流形成的向海迁移交错层理, 局部伴随生物扰动和薄层泥岩; 沿岸滩坝与潮沟—潮道在平面上的组合与迁移, 反映不同阶段波浪与潮汐能量对岸线位置和砂体形态的控制 (Harris *et al.*, 2020)。该类端元主要为后文讨论 Main-M1 段西部沿岸滩坝和浅海陆棚砂体中浪—潮联合作用提供参考。

1.5 河—浪—潮联控体系

在多数大型海陆过渡沉积体系中, 河流、波浪和潮汐 3 种过程往往同时存在, 只是在不同区域或不同演化阶段主导程度不同, 可视为河—浪—潮联控体系。空间上常表现为沿岸方向河控—潮控—浪控的分带格局, 物源附近河流作用较强, 发育河口坝和分流河道砂体; 向下游和远岸方向, 潮汐与沿岸流增强, 形成潮道、潮汐沙坝及潮汐三角洲前缘砂体; 更远处则为波浪与沿岸流重塑的滩坝与陆棚砂体。在层序—古地理尺度上, 河—浪—潮联控体系常记录在 1 个或若干高频层序内由河控向潮控或浪控转换的沉积序列, 以及在相对海平面升降背景下多期进积、退积与叠置的演化过程。砂体类型多样、几何形态多变, 砂体之间普遍夹有薄层泥岩和生物扰动层, 导致储集层非均质性增强 (Cappelle *et al.*, 2017; Peng *et al.*, 2018b, 2020b)。文中将 Napo 组 LU 亚段与 Main-M1 段视作处于这一连续谱系中的不同阶段, 其中 LU 亚段更接近河—潮联控

端部，Main-M1 段则向三元混合体系演化，是构建前渊带海陆混合沉积模式与古地理格局的关键实例。

2 海陆过渡交织水动力环境

海陆过渡区是陆相与海相沉积体系的过渡带，既受到来自陆地的河流物源输入，又叠加波浪、潮汐及沿岸流等多种海洋水动力，是交织水动力作用最为显著的区域(图 2)。该区最典型的沉积体系包括潮汐三角洲、河口湾、潮坪以及浪控滨岸—浅海陆棚等，它们在岩性组合、沉积构造和砂体几何形态上都具有较为稳定的识别标志 (Peng *et al.*, 2018a, 2020a)。

潮汐三角洲平原/前缘发育在潮差较大的河口和半封闭海湾，沉积物以细—中粒砂及粉砂为主，夹少量泥岩。平原亚相中常见分支潮道、潮汐沙坝和潮坪等微相，岩心中发育双向交错层理、潮汐束状体、砂泥韵律层理以及透镜状—波状层理等，是潮汐往复流主导的直接记录。前缘亚相由潮汐改造

的分流河道、潮汐三角洲前缘砂体和潮汐沙坝组成，砂体在平面上沿潮道方向拉长，长宽比可达数倍至十余倍，内部发育大量薄层泥岩夹层和潮汐韵律层，可在储集层内部形成显著的非均质性 (Cao *et al.*, 2020; 李阳等, 2020)。

浪控滨岸—浅海陆棚环境主要受波浪和风暴浪控制，沿岸流和回流是重塑沉积物的重要动力。典型滨岸砂体一般由中—细砂组成，分选和磨圆较好，生物碎屑丰富，岩心中常见对称性浪成沙纹、低角度交错层理和风暴形成的丘状—洼状交错层理等构造。砂体在平面上多平行岸线呈条带状展布，在垂向上则表现为由下部风暴砂层向上渐变为高频浊浪/浪成砂层的下粗上细序列，局部可叠置形成滩坝—岸外席状砂体 (李顺利等, 2020; Celis *et al.*, 2021)。

潮坪及其相关环境一般分为潮上带、潮间带和潮下带 3 个分带，发育于开阔海岸、障壁岛内侧及河口湾等地。碎屑潮坪沉积物以粉砂岩、细砂岩与泥岩互层为主，垂向上常见粗—细粒渐变或多级韵律层理，岩心中发育大量生物潜穴和生物扰动构

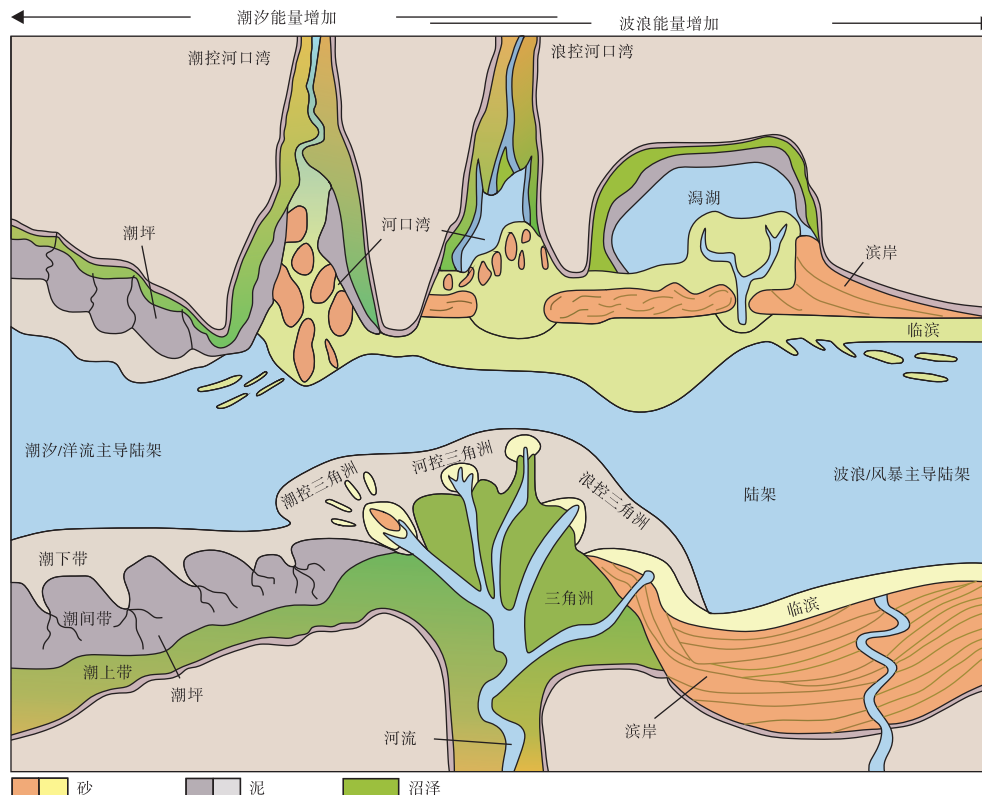


图 2 海陆过渡区主要沉积类型分布示意图 (据 Boyd *et al.*, 1992; 有修改)

Fig. 2 Schematic diagram distribution of the main sedimentary types in the transitional zone between land and sea (modified from Boyd *et al.*, 1992)

造。障壁岛—泻湖体系中，面对外海一侧以浪成沙坝和风暴冲越扇为主，背海一侧则以泻湖泥和潮坪沉积为主，显示出明显的浪—潮联合作用特征 (Harris *et al.*, 2020)。

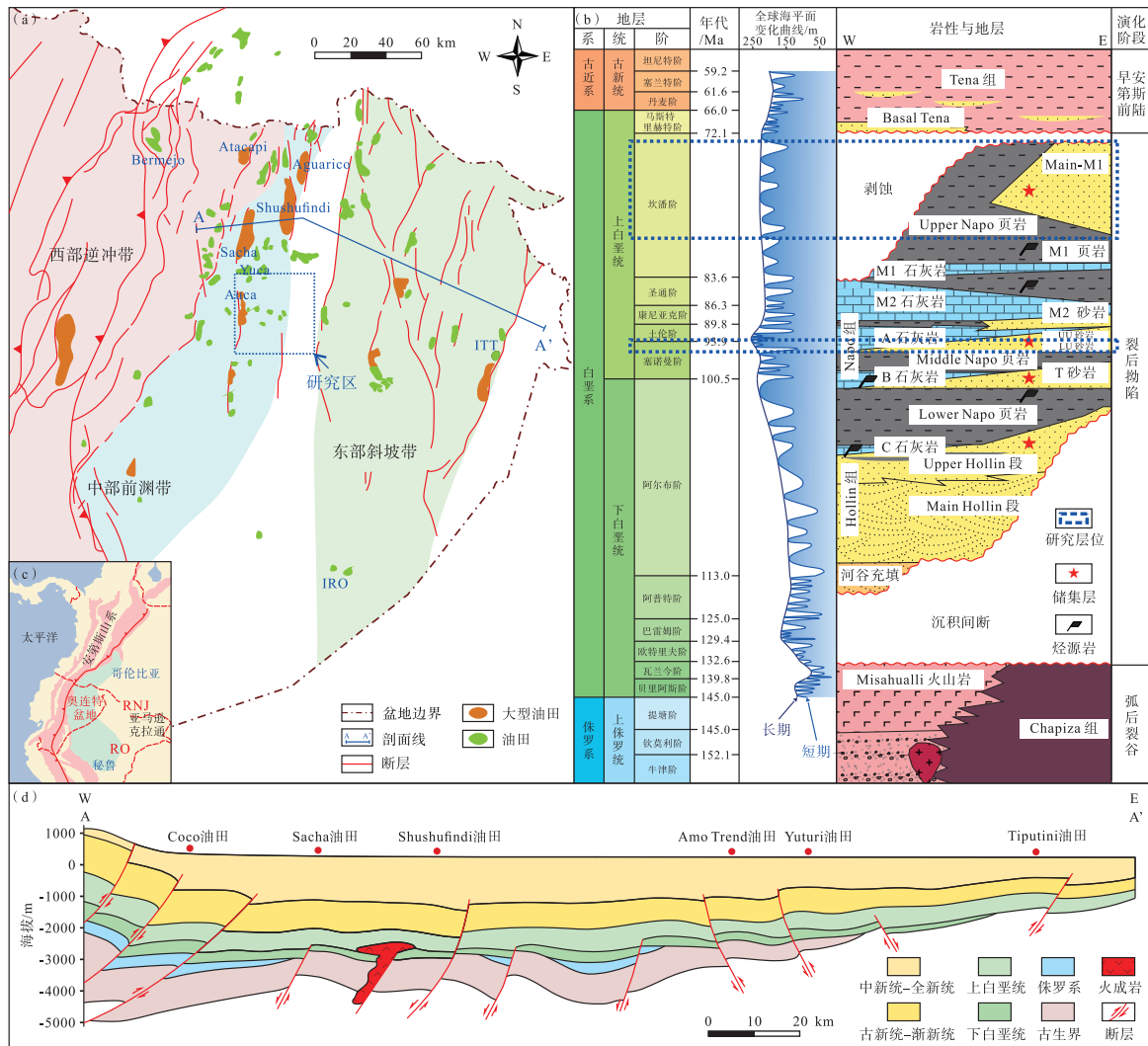
这些沉积体系在沉积物粒度、生物扰动、沉积构造及砂体几何形态等方面均体现了河流、波浪与潮汐等不同水动力过程的综合影响。识别这些特征并将其与层序格架和古地貌条件相结合，是理解交织水动力控制下砂体展布和古地理格局的基础。

3 奥连特盆地上白垩统 Napo 组地质特征

3.1 区域地质概况

奥连特盆地位于南美安第斯造山带东侧，整体

走向近 NE-SW，呈西陡东缓的单斜结构格局，可划分为西部逆冲带、中部前渊带和东部斜坡带等一级构造单元(图 3-a)。其中前渊带是晚白垩世以来泥砂沉积的主要聚集区 (王光付等, 2024)，也是本次研究的重点区域。在构造演化上，晚白垩世盆地受安第斯构造运动持续影响，西侧逆冲带不断隆升，东侧亚马孙克拉通相对稳定，盆地内部整体承受挤压—挠曲作用，形成自东向西地层厚度与沉积水深逐渐增加的格局(图 3-d)。其中，Napo 组 Main-M1 亚段沉积时期为裂陷盆地向前陆盆地转换的关键构造反转时期。Napo 组形成于这一构造背景下，在研究区内为 1 套厚度可达数百米的地层单元，岩性以砂岩、泥岩和石灰岩互层为主，内部发育多套砂泥岩组合，是奥连特盆地上白垩统中最重



a—奥连特盆地构造单元图；b—奥连特盆地白垩系综合柱状图；c—奥连特盆地地理位置；d—近东西向构造剖面

图 3 奥连特盆地基础地质特征概况

Fig. 3 General overview of the basic geological characteristics in Oriente Basin

要的含油气层系之一(图 3-b)。研究区内 Napo 组在垂向上发育多个层序单元,其中 Main-M1 段与 LU 亚段是砂岩较为集中的 2 个关键层段,分别对应本区上部与下部的重要储集层位;在平面上,这些层段的厚度和岩性组合受盆地整体构造格局及沉积前古地貌起伏的共同制约,沿 NE-SW 方向形成多个沉积中心。

3.2 层序划分与体系域特征

综合岩心、测井与地震资料,对奥连特盆地前渊带 Napo 组的纵向岩性组合与沉积充填特征进行

了识别与对比。综合柱状图与测井响应显示, Napo 组自下而上总体表现为砂岩段与泥岩—石灰岩段的交替,下部发育 1 套以砂岩为主的充填段,该充填段顶部为 LU 亚段砂泥互层组合,中部连续发育泥岩与石灰岩为主的厚层段,夹少量薄层砂岩,上部再次出现以砂岩为主的充填段对应 Main-M1 段,该段砂岩发育最为集中(图 4)。基于这些纵向充填旋回及关键岩性界面的稳定性,可以将 Napo 组划分为 1 个二级层序(KSQ)和 5 个三级层序。每个三级层序内部均可识别低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)与高位体系域(HST)的组合

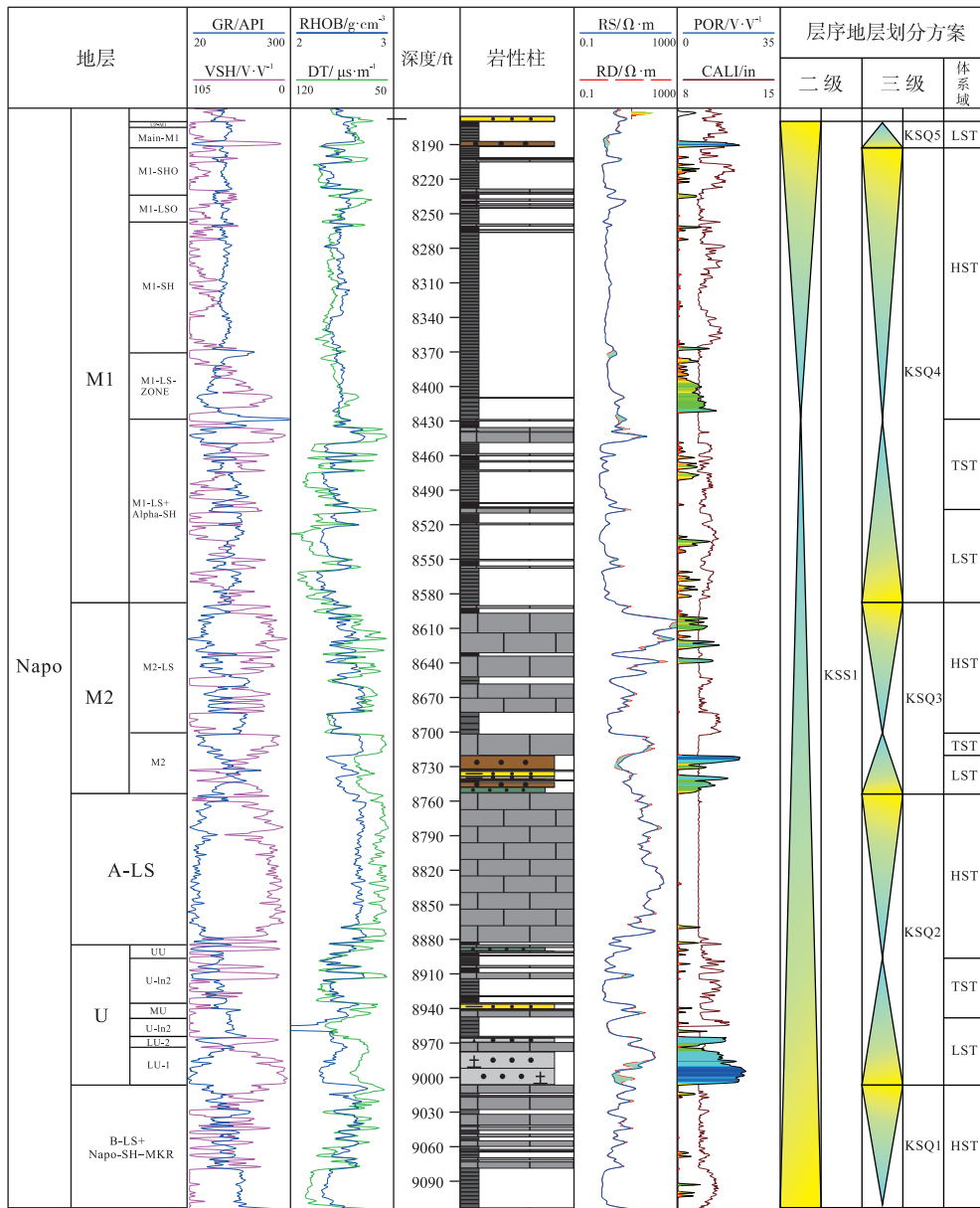


图 4 奥连特盆地 H17 井 Napo 组层序地层划分方案

Fig. 4 Sequence stratigraphic division scheme of the Napo Formation in Well H17 in Oriente Basin

特征 (王光付等, 2024)。在三级层序内部的进一步细分方面, Main-M1 段在测井曲线形态及砂泥互层组合上具有可对比的分段特征, 可划分为 3 个小层 (M1-1、M1-2、M1-3); LU 亚段同样表现出 2 套相对稳定的砂泥互层组合, 可划分为 2 个小层 (LU-1、LU-2)。从体系域发育特征看, LU 亚段与 Main-M1 段均对应各自三级层序的低位体系域阶段, 表现为以砂岩为主的快速充填特征; 其间 KSQ3 与 KSQ4 以泥岩与石灰岩为主, 反映相对海平面上升背景下的细粒沉积占优, 并对上下 2 套砂岩层系形成有效分隔。总体上, 低位体系域内以进积型砂体为主, 局部可见砂泥互层的快速转换, 反映供砂增强或相对海平面下降背景下的沉积响应。

3.3 物源分析

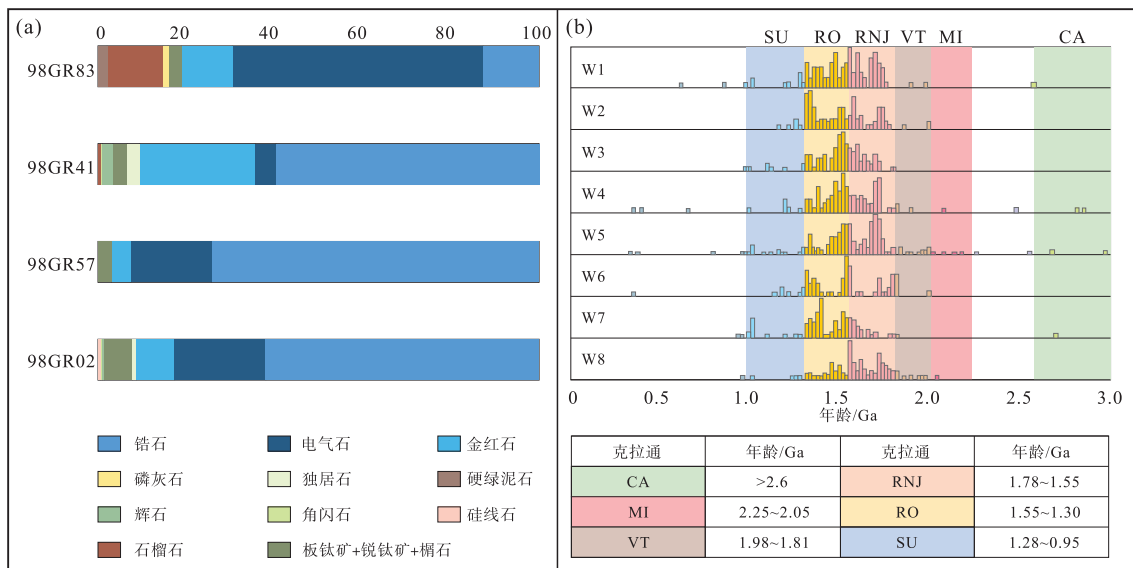
对 Napo 组砂岩的重矿物组合与碎屑锆石 U-Pb 年代学结果进行了统计与对比。重矿物组合以稳定矿物为主, ZTR 指数为 0.80~0.95, 反映物源区以成熟的基底岩系为主, 且沉积物经历了较充分的搬运与再沉积过程 (图 5-a)。碎屑锆石 U-Pb 年龄谱显示, 样品的年龄峰值主要集中在 1.3~1.8 Ga 这个区间。为解释这些年龄峰值的地质含义, 将其与研究区周缘主要构造单元的典型年龄带进行对比: 1.3~1.8 Ga 的峰值与亚马孙克拉通东部基底地块 RO、RNJ 的前寒武纪年龄范围相一致 (图 3-c; 图 5-b)。综合重矿物成熟度特征与碎屑锆石年龄

谱对比结果可以判断, 研究区沉积物的主体来源为盆地东部及东南方向的亚马孙克拉通基底区, 混入少量与西部冲断带相关的再循环物源成分。

3.4 沉积前古地貌

为约束 Napo 组沉积时期奥连特盆地前渊带的沉积前古地貌形态, 在统一层序基准面约束下, 对 Main-M1 段与 LU 亚段分别开展沉积前古地貌相对高程恢复。基准面选取 M1-LS+Alpha-SH 顶界面。该界面在研究区内 GR 值高, 侧向连续性较好, 可作为近似等时对比面。在此基础上, Main-M1 段采用残厚法恢复沉积前相对高程: 以基准面之上至 Main-M1 各小层顶界的残余厚度为基础, 并在同一参考面内将其转换为相对高程起伏的指示。LU 亚段采用印模法恢复沉积前相对高程: 利用 LU 沉积结束后直接覆盖其上的地层厚度对下伏地形的“印模”效应, 对沉积前地形进行半定量反演。图 6 展示的均为相对 M1-LS+Alpha-SH 顶界面的古地貌相对高程分布。

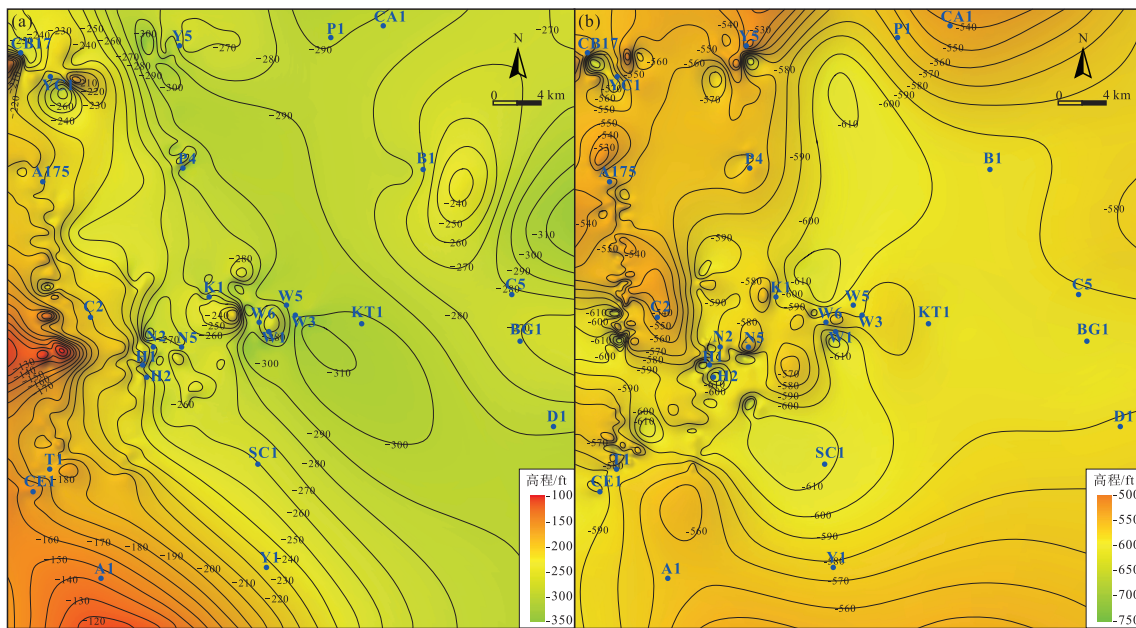
恢复结果显示, 研究区沉积前地形总体呈单斜背景, 并叠加若干沿走向展布的低洼与微幅高地。本节讨论的“高/低”指的是相对高程, 而不是地层厚度本身, 地层厚度的增大通常对应更大的可容纳空间, 因而更容易形成低洼或沉积中心。Main-M1 段的相对高程分布表现为东部相对较高、西部相对较低的总体格局, 同时在研究区中部发育 1 条



a—重矿物组合; b—锆石 U-Pb 测年频谱图

图 5 奥连特盆地中部 Napo 组物源判别依据

Fig. 5 Discrimination basis of provenance of the Napo Formation in central Oriente Basin



a—Main-M1 段；b—LU 亚段

图 6 奥连特盆地中部 Napo 组沉积前古地貌相对高程图

Fig. 6 Palaeogeomorphic restoration map of the Napo Formation before deposition in central Oriente Basin

近 NE-SW 向的相对低值带，该带对应沉积前的低洼区与主要可容纳空间分布区。该低值带在不同小层中具有一定继承性，反映沉积前地形受构造差异沉降的持续控制(图 6-a)。LU 亚段的沉积前相对高程整体起伏幅度较小，但仍可识别出受地形控制的条带状低洼区与局部高地。印模法结果显示，东部相对高程略高，内部发育若干沿走向延伸的微幅高地，与之相对应的相对低洼区为低位体系域砂体的优先充填部位，控制了后续砂体的趋向性展布(图 6-b)。

4 沉积微相展布的交织水动力响应

综合岩心、测井及录井资料，建立奥连特盆地 Napo 组 Main-M1 段及 LU 亚段测井相图版(图 7)，研究区主要发育潮汐三角洲—浅海陆棚沉积体系。

4.1 Main-M1 段沉积微相展布

对 Main-M1 段开展单井沉积相识别，并在此基础上进行连井沉积相对比，最后建立沉积相平面展布。单井各层内的岩性、沉积构造与测井响应为相带划分提供了直接证据(图 8-a)。连井剖面用于检验单井解释的可对比性，并约束砂体在横向上的延伸、叠置与尖灭规律(图 8-c)。平面沉积相

图以单井相标定和连井对比结果为基础，再结合井点分布对相带边界进行约束(图 8-b)。

单井相特征表明，Main-M1 段沉积时期研究区处于河流、潮汐与波浪共同作用的海陆过渡—浅海陆棚环境，沉积相类型以潮汐三角洲相与浅海陆棚相为主。在潮汐三角洲体系内，平原亚相发育分流河道及分流河道间微相。河道充填砂岩以中粒砂为主，常见槽状交错层理与冲刷面，局部可见根迹构造。河道间以粉砂岩—泥岩互层为主，生物潜穴发育。岩心中双向交错层理、潮汐束状体和砂泥韵律层理较常见，这些现象反映潮汐往复流对河口区沉积物的反复改造。潮汐三角洲前缘亚相主要由水下分流河道、前缘沙坪及水下分流河道间微相组成。水下分流河道砂体以细—中砂为主，内部可见交错层理与复合流沉积构造。前缘沙坪多为薄层中细砂岩与粉砂岩互层，局部夹泥岩并伴随生物扰动，反映河流喷流与潮流共同作用的沉积环境。

连井沉积相对比进一步约束了 Main-M1 段砂体的横向展布特征。连井剖面显示，水下分流河道与潮汐水道砂体在横向上呈透镜状—舌状叠置，砂体之间常被水下分流河道间或潮汐水道间的粉砂岩—泥岩隔夹。该特征说明砂体具有明显的侧向分异与分段连通性。剖面中部砂体叠置更明显，向两侧砂体逐渐变薄并发生尖灭或过渡为沙坪与泥质

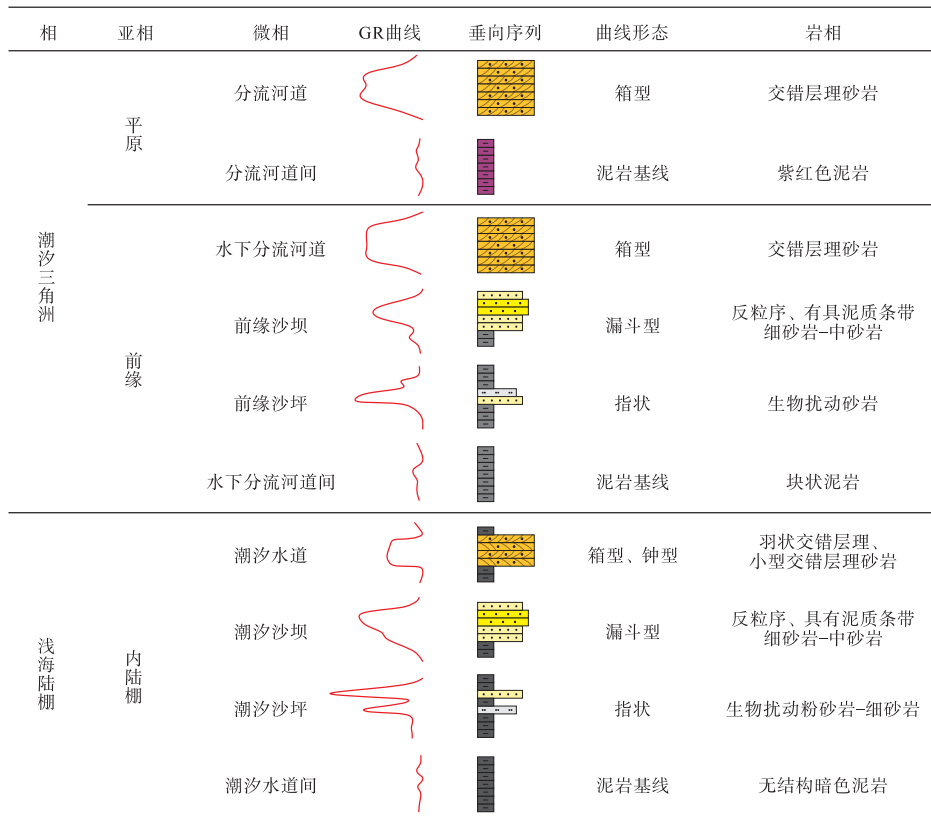


图 7 奥连特盆地中部 Napo 组 Main-M1 段及 LU 亚段测井相图版

Fig. 7 Well-log diagrams of the Main-M1 member and LU sub-member of Napo Formation in central Oriente Basin

沉积。

在连井对比约束下，Main-M1 段沉积相平面展布呈现明显的分带性。研究区东部以潮汐三角洲体系为主，可识别潮汐三角洲平原与前缘的组合。平原区河道与潮汐水道发育，前缘区水下分流河道与前缘沙坪成带状或斑块状展布。研究区中部为潮汐三角洲前缘—滨岸过渡带，河流、潮汐与波浪的共同作用更突出。研究区西部沉积环境向浅海陆棚过渡，砂体以沿岸滩坝和岸外席状砂体为主。岩心中对称波痕、低角度交错层理及风暴浪相关的丘状交错层理较常见，生物碎屑相对丰富，反映波浪与沿岸流对沉积物重塑的作用增强。

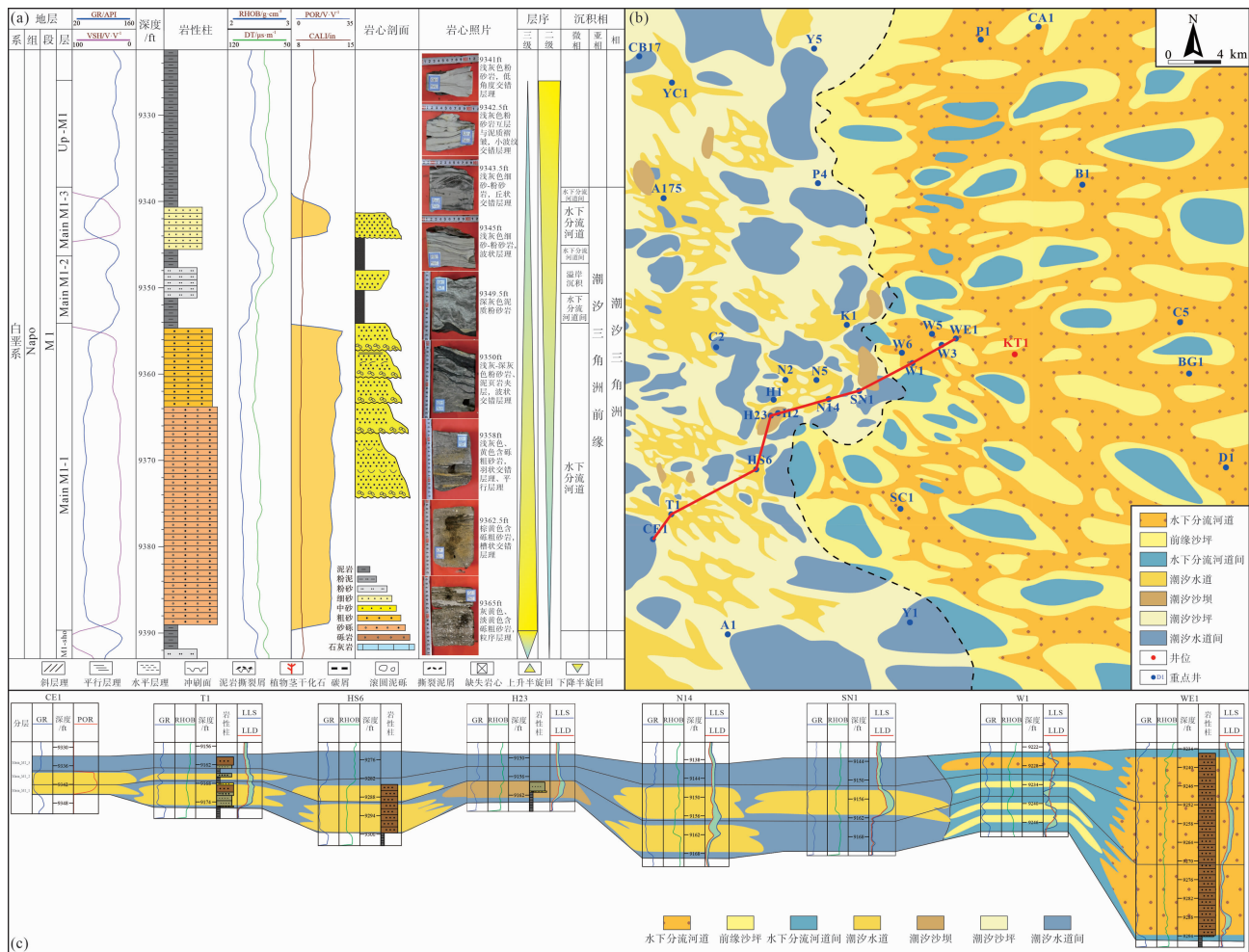
4.2 LU 亚段沉积微相展布

LU 亚段单井相分析表明，整体为潮汐三角洲沉积，是典型的河—潮联控体系(图 9-a)。潮汐三角洲平原发育分流河道与分流河道间微相。分流河道以中—粗砂岩为主，常见槽状交错层理和冲刷侵蚀面，局部可见泥屑与植物根迹构造，反映洪水期河流动能较强。分流河道间以粉砂岩—泥岩互层

为主，生物潜穴与水平层理较常见，局部可见潮沟充填构造，说明潮汐改造和静水沉积作用占比提高。潮汐三角洲前缘发育水下分流河道、前缘沙坪及水下分流河道间微相。水下分流河道砂体多呈舌状或指状，内部可见双向交错层理与束状层理，显示河口喷流与往复潮流共同作用。前缘沙坪以薄层中细砂岩与粉砂岩互层为主，局部夹泥岩薄层与生物扰动层，砂体顶部常见向上变细或韵律层序，反映前缘能量逐步衰减的沉积过程。

连井沉积相对比进一步说明，LU 亚段砂体在横向上具有明显的分带与侧向转换特征(图 9-c)。剖面上水下分流河道砂体多呈透镜状—舌状叠置，砂体之间常被水下分流河道间或沙坪的粉砂岩—泥岩隔夹，连通性具有分段性。局部位置砂体加厚并出现多期叠置，向两侧逐渐变薄并过渡为沙坪或泥质沉积。

在单井相标定与连井对比约束下，LU 亚段沉积相平面展布呈现稳定的东平原—西前缘格局(图 9-b)。W 油田以东主要发育潮汐三角洲平原亚相，水道砂体较密集；向西过渡为潮汐三角洲前



a—KT1 井 Main-M1 段单井相图；b—Main-M1 段平面图；c—Main-M1 段连井相图

图 8 奥连特盆地中部 Napo 组 Main-M1 段沉积相

Fig. 8 Sedimentary facies of the Main-M1 member of Napo Formation in central Oriente Basin

缘亚相，水下分流河道与前缘沙坪组合占优。与 Main-M1 段相比，LU 亚段中浅海陆棚相基本缺失，说明该时期潮汐三角洲体系在盆地内部占主导，并向西部推进，反映相对海平面较低或物源供给较强背景下的前渊带快速充填特征。

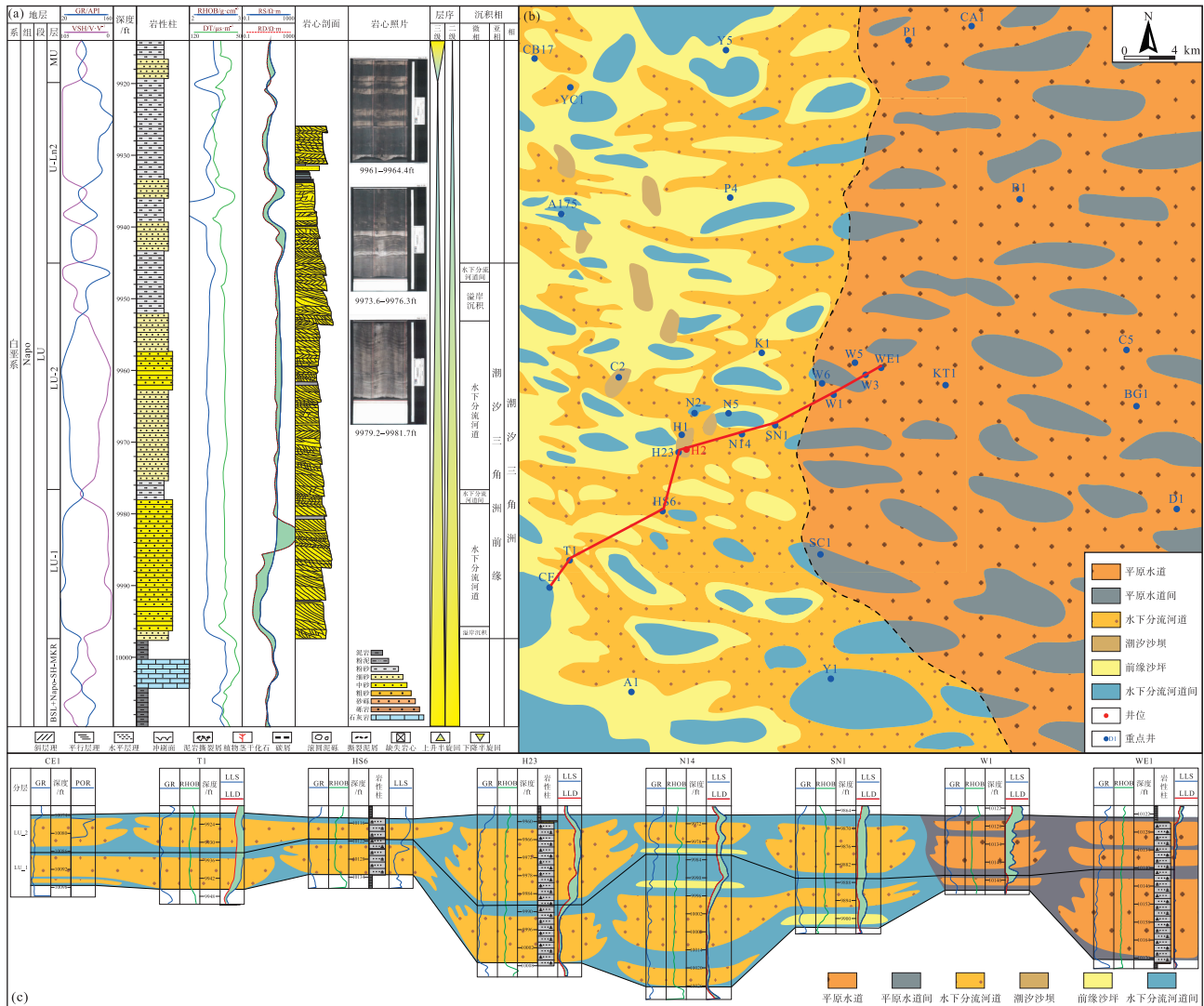
4.3 交织水动力沉积响应

将 Main-M1 段与 LU 亚段的沉积特征与前文总结的交织水动力类型进行对比，可以看出两者均具有典型的混合动力沉积响应特征，但主导动力组合和空间分布存在差异。

1) 河—潮混合作用的沉积响应。2 套层段中均广泛发育双向交错层理、潮汐束状体、砂泥韵律层理和反向粒序等典型潮汐构造，特别是在潮汐三角洲平原和水下分流河道砂体内表现尤为突出。这

些构造反映了潮流在涨、落潮阶段流向和流速的周期性变化，是河—潮联控体系的重要标志。其中，LU 亚段中潮汐三角洲体系更为完备，平原与前缘亚相分带清晰，且在整个研究区范围内占据主导地位，显示出更强的潮汐控制；Main-M1 段则在东部保持河—潮联控特征，但向西部过渡为波浪和沿岸流主导的陆棚环境。

2) 河—浪混合作用的沉积响应。Main-M1 段西部浅海陆棚区广泛发育浪成沙坝及风暴浪沉积构造，砂体在平面上平行岸线展布，形成条带状滩坝及岸外席状砂体，这与典型河—浪联控及浪控滨岸体系的沉积响应高度一致。相较之下，LU 亚段几乎不见明显的浪控岸线及陆棚沉积，说明在 KSQ2 低位体系域时期波浪能量相对较弱，而在 KSQ5 低位体系域时期波浪和沿岸流显著增强，三角洲前缘



a—H2 井 LU 亚段单井相图；b—LU 亚段平面相图；c—LU 亚段连井相图

图 9 奥连特盆地中部 Napo 组 LU 亚段沉积相

Fig. 9 Sedimentary facies of the LU sub-member of Napo Formation in central Oriente Basin

部分砂体被改造为沿岸滩坝和席状砂体。

3) 河—浪—潮混合作用的沉积响应。在 Main-M1 段，沿盆地方向可以识别出由东向西依次为河—潮联控的潮汐三角洲平原—前缘、河—浪—潮共同作用的三角洲前缘—滨岸带以及浪—潮联控的浅海陆棚滩坝体系，形成明显的沿岸分带格局。这种格局与三元混合体系的理论模型相吻合，反映了物源供给、海平面变化和沿岸水动力在盆地边缘的综合调控作用。LU 亚段虽然整体以河—潮联控的潮汐三角洲为主，但在前缘一带仍可观察到局部风暴浪沉积构造和浪成沙纹，说明波浪在该时期并非完全缺失，而是在潮汐主导背景下对砂体顶部和边缘进行重塑。这些特征说明 Napo 组低位体系域

砂体记录了从以河—潮联控为主向河—浪—潮三元混合体系演化的过程，是典型的海陆过渡区交织水动力沉积响应。

5 沉积模式与古地理演化

5.1 Main-M1 段沉积模式

基于古地貌恢复、单井沉积相、平面相分析等成果，可以建立 Main-M1 段的海陆混合沉积模式（图 10）。在 Main-M1 沉积时期，东部邻接亚马孙克拉通的物源区形成宽广的潮汐三角洲平原，发育多级分流河道及潮道网络，河道之间分布广泛的泥质漫滩和潮坪沉积。向西过渡至潮汐三角洲前缘，

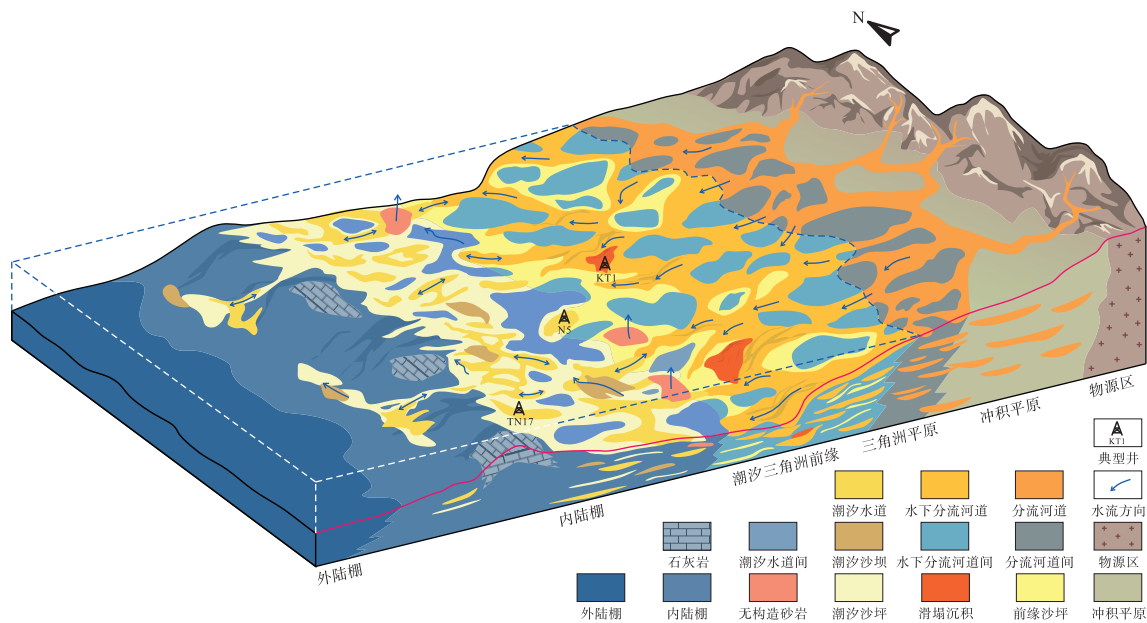


图 10 奥连特盆地 Napo 组中部 Main-M1 段沉积模式

Fig. 10 Sedimentary model of the Main-M1 member of Napo Formation in central Oriente Basin

水下分流河道和前缘沙坪在多个高频层序内前积叠置，砂体在平面上呈舌状一指状展布，沿古坡降方向指向盆地内部。更向西部，水深加大、波浪和沿岸流增强，三角洲前缘砂体逐渐被改造为沿岸滩坝和岸外席状砂体，形成典型的浪控滨岸—浅海陆棚沉积。岸线总体呈 NE-SW 向，在前渊带中部局部向盆地凸出，构成若干河口湾和三角洲凸岸。沿岸方向上，潮汐三角洲平原—前缘带与浪控浅海陆棚带交替出现，使得砂体在平面上呈现明显的非对称展布，靠近物源区侧砂体规模大、叠置程度高，向远离物源方向砂体迅速变薄并被泥岩覆盖。这种古地理格局是河流、波浪与潮汐三元混合作用及构造—古地貌条件共同作用的结果。

5.2 LU 亚段沉积模式

LU 亚段沉积时期，研究区整体处于相对海平面较低、物源供给充足的阶段，沉积模式以潮汐三角洲体系为主，平面上呈东平原—西前缘的格局（图 11）。岸线较 Main-M1 期整体向盆地内部推进，前渊带大部分区域被潮汐三角洲覆盖。潮汐三角洲平原中分流河道和潮道纵横交织，沿物源方向延伸数十千米；潮汐三角洲前缘则由多期叠置的水下分流河道和前缘砂坪组成，砂体在平面上呈细长条带状或新月状展布。相较于 Main-M1 期，LU 期浪控浅海陆棚范围明显收缩，说明此时潮汐相对波

浪具有更高的能量和影响范围。从层序与古地貌特征说明 LU 亚段代表了以河—潮联控为主的低位体系域阶段，其沉积模式可概括为在东高西低的单斜坡地形背景下，物源自东向西输入，在潮汐作用强化的河口区形成规模较大的潮汐三角洲平原及前缘砂体，砂体沿古坡降方向前积至前渊带中部，并受古低洼区束缚发生加厚叠置。

5.3 Napo 组古地理演化

将 LU 亚段与 Main-M1 段的沉积模式进行综合对比，可以构建 Napo 组海陆混积层系在前渊带的演化模式。研究区位于前渊带，沉积期受西侧冲断带加载影响，持续发生挠曲沉降。挠曲沉降在前渊带内部形成沿走向延伸的沉降中心带，并对应 1 条稳定的低地貌带。该低地貌带提供较大的可容纳空间，也约束沉积物的输送路径。来自盆地东部的物源更容易沿该低地貌带向前渊带内部输送，并在带内形成砂体的定向汇聚与叠置。

早期（Lower Napo Shale 沉积时期）：盆地处于以细粒沉积为主的背景阶段。前渊带内挠曲沉降控制的可容纳空间广泛发育，沉积物以泥质充填为主，形成区域性连续的细粒层系，为后续砂体的分隔与封盖提供基础（图 12-a）。

中期（U 与 T 沉积时期）：挠曲沉降增强了前渊带内部的可容纳空间，细粒沉积在区内进一步扩

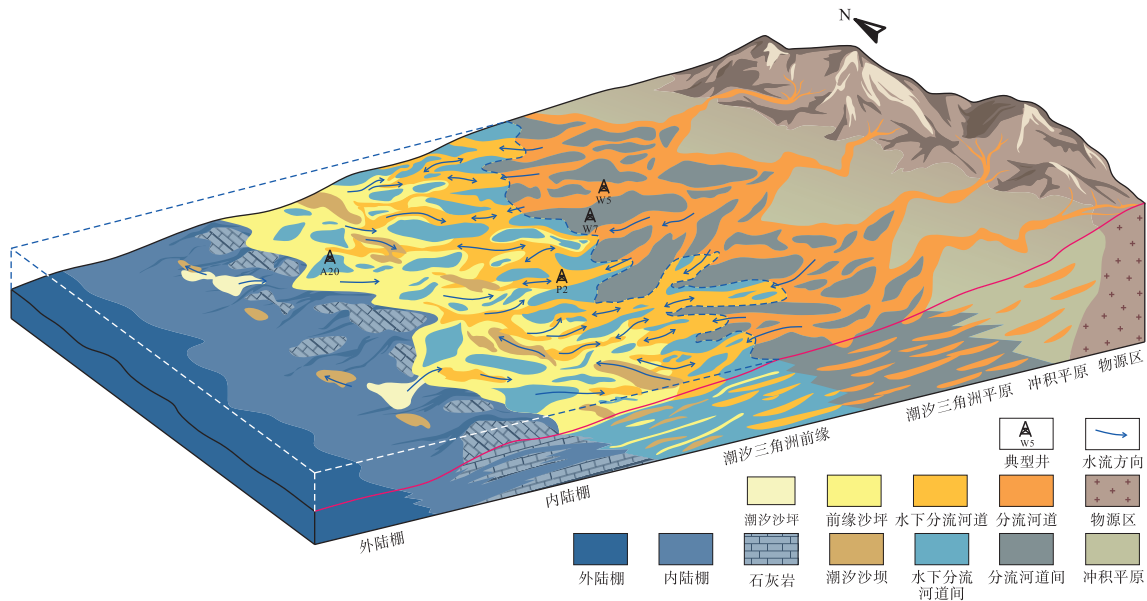
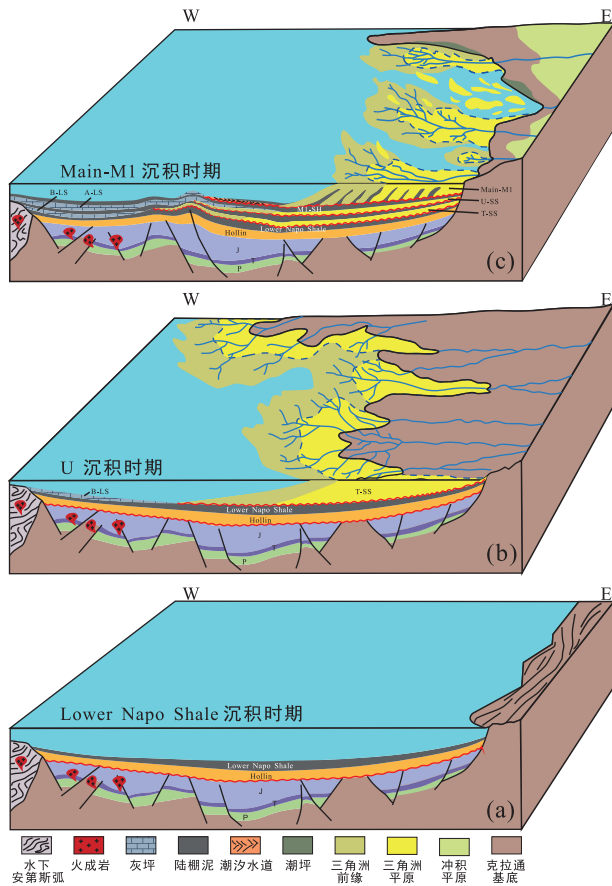


图 11 奥连特盆地中部 Napo 组 LU 亚段沉积模式

Fig. 11 Sedimentary model of the LU sub-member of Napo Formation in central Oriente Basin



a—Lower Napo Shale 期古地理模式图；b—U 期古地理模式图；c—Main-M1 期古地理模式图

图 12 奥连特盆地中部 Napo 组古地理演化模式

Fig. 12 Palaeogeographic evolution model of Napo Formation in central Oriente Basin

展，并在前渊带内形成更清晰的沉积中心。该阶段以泥岩为主，局部夹少量砂质输入，整体对应海侵—高位体系域的沉积背景，对上下砂岩层系形成区域性分隔与封盖(图 12-b)。

晚期 (Main-M1 沉积时期): 体系进入以砂质充填为主的阶段。该期整体处于相对海平面下降背景下的相对上升期，相对上升增强了海水影响，并提高了波浪对滨岸—陆棚带的改造强度，促使前渊带形成“东部潮汐控制、向西过渡为波浪改造增强”的格局。与 LU 亚段以河—潮联控为主的沉积模式相比，Main-M1 期海陆混积层系表现出更显著的河流—潮汐—波浪三元混合特征：东部以潮汐作用主控的三角洲（或河口）沉积为主，中部发育河—潮—浪共同作用的前缘—滨岸过渡带，西部则发展为波浪改造的浅海陆棚滩坝体系(图 12-c)。

这一演化过程表明，Napo 组海陆过渡沉积体系在挠曲沉降与相对海平面变化的共同作用下，经历了由河—潮联控潮汐三角洲体系向河—浪—潮三元混合体系的演化。交织水动力的空间差异与阶段性变化，是控制砂体展布与古地理格局的重要机制。

6 结论

1) 海陆过渡区沉积受河流、波浪和潮汐共同作用控制，沉积体系多处于河控、浪控与潮控端元

之间的连续谱系。文中梳理河—浪、河—潮、浪—潮及河—浪—潮4类混合体系的基本特征,总结其在岩性组合、沉积构造和砂体几何形态上的识别标志,并构建了适用于奥连特盆地的交织水动力认识框架。

2) 奥连特盆地前渊带 Napo 组可划分为1个二级层序和5个三级层序, Main-M1 段与 LU 亚段均位于各自三级层序的低位体系域。重矿物组合与碎屑锆石 U-Pb 年龄表明,物源主要来自盆地东部及东南方向的亚马孙克拉通;残厚法和印模法恢复的沉积前古地貌为东高西低的单斜斜坡,前渊带内部叠加 NE-SW 向古高地与古低洼,对低位体系域砂体的聚集位置起到明显控制作用。

3) LU 亚段整体为河—潮联控的潮汐三角洲体系,平面上表现为东平原、西前缘; Main-M1 段演化为东潮汐三角洲、西浪控浅海陆棚的河—浪—潮三元混合体系。Napo 组记录了由河—潮联控向三元混合体系的演化过程,说明在构造沉降和物源条件制约下,交织水动力是前渊带海陆过渡区砂体展布和古地理格局的关键机制,对类似前陆盆地海陆过渡区的古地理恢复和储层预测具有参考意义。

参考文献 (References)

- 鲍志东,王光付,冯志强,郑秀娟,李新坡,孙宇. 2024. 油气富集域早古生代以来的古地理演化及其对成藏的控制:南美—北非—中东—中亚特提斯域古地理与油气资源. 古地学报,26(1): 1-4. [Bao Z D, Wang G F, Feng Z Q, Zheng X J, Li X P, Sun Y. 2024. Early Paleozoic palaeogeography evolution and its control on hydrocarbon accumulation: palaeogeography and petroleum resources of the South American-North African-Middle Eastern-Central Asian Tethys domain. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(1): 1-4]
- 丁峰,王光付,孙建芳,孙钰,李发有,薛明喜,吴洁,班舒悦,鲍志东. 2024. 南美奥连特盆地坎潘阶碳酸盐岩建隆的识别及科迪勒拉运动早期抬升对 Main-M1 储集层沉积的控制作用. 古地学报,26(1): 5-16. [Ding F, Wang G F, Sun J F, Sun Y, Li F Y, Xue M X, Wu J, Ban S Y, Bao Z D. 2024. Observation of a carbonate build-up in Oriente Basin, South America, and the early stage Cordillera uplift's control on Main-M1 reservoir deposition. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(1): 5-16]
- 郭茂恒,史书婷,金振奎,李阳,王金艺,任奕霖,王凌. 2022. 河口湾潮坪潮汐水道发育特征及地质意义:以钱塘江为例. 沉积学报,40(1): 182-191. [Guo Q H, Shi S T, Jin Z K, Li Y, Wang J Y, Ren Y L, Wang L. 2022. Characteristics and geological significance of tidal channels in an estuarine tidal flat: a case study from the Qiantang River estuary. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(1): 182-191]
- 郭旭升,胡东风,刘若冰,魏祥峰,魏富彬. 2018. 四川盆地二叠系海陆过渡相页岩气地质条件及勘探潜力. 天然气工业,38(10): 11-18. [Guo X S, Hu D F, Liu R B, Wei X F, Wei F B. 2018. Geological conditions and exploration potential of Permian marine-continent transitional facies shale gas in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 38(10): 11-18]
- 李顺利,李竞,陈彬滔,许磊,于兴河,侯国伟,高照普. 2020. 西湖凹陷新新统花港组大型沿岸砂坝沉积特征及主控因素. 古地学报,22(3): 493-503. [Li S L, Li J, Chen B T, Xu L, Yu X H, Hou G W, Gao Z P. 2020. Sedimentary characteristics and controlling factors of large-scale longshore bar in the Oligocene Huagang Formation, Xihu sag. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(3): 493-503]
- 李维禄,徐怀民,高思宇,江同文,韩如冰,黄素,郭文飞,余义常. 2017. 三角洲改造背景的浪控滨岸砂体成因类型及展布特征:以塔里木盆地东河塘地区“东河砂岩”为例. 中国海洋大学学报(自然科学版),47(9): 86-95. [Li W L, Xu H M, Gao S Y, Jiang T W, Han R B, Huang S, Guo W F, Yu Y C. 2017. Genetic types and distribution features of wave-dominated shore deposits with reworked-delta background: a case study of “Donghe Sandstones” in Donghetang Oil Field, Tarim Basin. *Periodical of Ocean University of China*, 47(9): 86-95]
- 李小平,柳保军,丁琳,郝建光,龚文. 2016. 海相三角洲沉积单元划分及其对勘探砂体对比的意义:基于现代珠江三角洲沉积水动力综合研究. 沉积学报,34(3): 555-562. [Li X P, Liu B J, Ding L, Hao J G, Gong W. 2016. Depositional elements definition of marine delta and significance to sand body correlation in petroleum exploration: from hydrodynamic analysis of the modern Pearl River Delta. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(3): 555-562]
- 李阳,金振奎,朱小二,史书婷,袁坤,黎瑞,王金艺. 2020. 潮控河口湾岩相类型及沉积模式:以厄瓜多尔 Oriente 盆地北部区块上白垩统 Napo 组 LU 段为例. 沉积学报,38(4): 826-837. [Li Y, Jin Z K, Zhu X E, Shi S T, Yuan K, Li R, Wang J Y. 2020. Lithofacies and sedimentary model of a tidal-dominated estuary: a case study of the LU interval from the Upper Cretaceous Napo Formation, northern Oriente Basin, Ecuador. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(4): 826-837]
- 刘雪萍,卢双舫,唐明明,孙东权,唐佳凡,张克鑫,何涛华,齐宁,卢明月. 2021. 河流—潮汐耦合控制下河口湾坝体沉积动力学数值模拟. 地球科学,46(8): 2944-2957. [Liu X P, Lu S F, Tang M M, Sun D Q, Tang J F, Zhang K X, He T H, Qi N, Lu M Y. 2021. Numerical simulation of sedimentary dynamics of estuarine bars under coupled fluvial-tidal control. *Earth Science*, 46(8): 2944-2957]
- 彭畅,龚承林,李顺利. 2022. 河流—波浪—潮汐混合作用过程研究进展. 沉积学报,40(4): 957-978. [Peng Y, Gong C L, Li S L. 2022. Recent advances in river-wave-tide mixed processes. *Acta*

- Sedimentologica Sinica, 40(4): 957-978]
- 王光付,李发有,孙建芳,徐海,张亚雄,冯玉良,丁峰,叶双江,陈诗望,吴洁,孙钰. 2024. 奥连特盆地隐蔽油藏高效滚动勘探开发方法技术及应用:以厄瓜多尔14和17区块为例. 石油与天然气地质, 45(1): 243-255. [Wang G F, Li F Y, Sun J F, Xu H, Zhang Y X, Feng Y L, Ding F, Ye S J, Chen S W, Wu J, Sun Y. 2024. Efficient progressive exploration and exploitation technology for subtle reservoirs in the Oriente Basin and its applications to blocks 14 and 17 in Ecuador. Oil & Gas Geology, 45(1): 243-255]
- 王昕,魏思源,吕奇奇,代榕,呼焕,毕宇航,张丽雯,梁岩,张建坤. 2023. 基于物理模拟的三角洲前缘横向砂坝发育过程及形成机理. 沉积学报, 41(3): 818-827. [Wang X, Wei S Y, Lü Q Q, Dai R, Hu H, Bi Y H, Zhang L W, Liang Y, Zhang J K. 2023. Development process and formation mechanism of lateral sand bars in the delta front based on physical simulation. Acta Sedimentologica Sinica, 41(3): 818-827]
- 王颖,季小梅. 2011. 中国海陆过渡带: 海岸海洋环境特征与变化研究. 地理科学, 31(2): 129-135. [Wang Y, Ji X M. 2011. Environmental characteristics and changes of coastal ocean as land-ocean transitional zone of China. Scientia Geographica Sinica, 31(2): 129-135]
- 周心怀,高顺莉,高伟中,李宁. 2019. 东海陆架盆地西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡型岩性油气藏形成与分布预测. 中国石油勘探, 24(2): 153-164. [Zhou X H, Gao S L, Gao W Z, Li N. 2019. Formation and distribution of marine-continental transitional lithologic reservoirs in Pingbei slope belt, Xihu sag, East China Sea Shelf Basin. China Petroleum Exploration, 24(2): 153-164]
- 邹才能,董大忠,王社教,李建忠,李新景,王玉满,李登华,程克明. 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力. 石油勘探与开发, 37(6): 641-653. [Zou C N, Dong D Z, Wang S J, Li J Z, Li X J, Wang Y M, Li D H, Cheng K M. 2010. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China. Petroleum Exploration and Development, 37(6): 641-653]
- Ainsworth R B, Vakarelov B K, Nanson R A. 2011. Dynamic spatial and temporal prediction of changes in depositional processes on clastic shorelines: toward improved subsurface uncertainty reduction and management. AAPG Bulletin, 95: 267-297.
- Ashton A D, Giosan L. 2011. Wave-angle control of delta evolution. Geophysical Research Letters, 38: 13405.
- Boyd R, Dalrymple R, Zaitlin BA. 1992. Classification of clastic coastal depositional environments. Sedimentary Geology, 80: 139-150.
- Cao Y, Zhang W, Zhu Y L, Ji X M, Xu Y W, Wu Y, Hoitink A J F. 2020. Impact of trends in river discharge and ocean tides on water level dynamics in the Pearl River Delta. Coastal Engineering, 157: 103634.
- Cappelle M V, Ravnas R, Hampson G J, Johnson H D. 2017. Depositional evolution of a progradational to aggradational, mixed-influenced deltaic succession: Jurassic Tofte and Ile formations, southern Halten Terrace, offshore Norway. Marine and Petroleum Geology, 80: 1-22.
- Celis S A, Rodríguez-Tovar F J, Giraldo-Villegas C A, Pardo-Trujillo A. 2021. Evolution of a fluvial-dominated delta during the Oligocene of the Colombian Caribbean; sedimentological and ichnological signatures in well-cores. Journal of South American Earth Sciences, 111: 103440.
- Collins D S, Avdis A, Wells M R, Dean C D, Mitchell A J, Allison P A, Johnson H D, Hampson G J, Hill J, Piggott M D. 2021. Prediction of shoreline-shelf depositional process regime guided by palaeotidal modelling. Earth-Science Reviews, 223: 103827.
- Harris D L, Concejo A V, Austin T, Benavente J. 2020. Multi-scale morphodynamics of an estuarine beach adjacent to a flood-tide delta: assessing decadal scale erosion. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 241: 106759.
- Peng Y, Steel R J, Olariu C. 2018a. Amazon fluid mud impact on tide- and wave-dominated Pliocene lobes of the Orinoco Delta. Marine Geology, 406: 57-71.
- Peng Y, Steel R J, Rossi V M, Olariu C. 2018b. Mixed-energy process interactions read from a compound-clinoform delta (paleo-orinoco delta, trinidad): preservation of river and tide signals by mud-induced-wave damping. Journal of Sedimentary Research, 88: 75-90.
- Peng Y, Olariu C, Steel R J. 2020a. Recognizing tide- and wave-dominated compound deltaiclinothems in the rock record. Geology, 48: 1149-1153.
- Peng Y, Steel R J, Olariu C, Li S L. 2020b. Rapid subsidence and preservation of fluvial signals in an other wise wave-reworked delta front succession: early-mid Pliocene Orinococontinental-margin growth, SE Trinidad. Sedimentary Geology, 395: 105555.
- Peng Y, Hagstrom C A, Horner S C, Hodgson C A, Martin H K, Leckie D A, Pedersen P K, Hubbard S M. 2022. Low-accommodation foreland basin response to long-term transgression: arecord of change from continental-fluvial and marginal-marine to open-marine sequences over 60,000 km² in the western Canada foreland basin. Marine and Petroleum Geology, 139: 105583.

(责任编辑 郑秀娟)