

# 爱尔兰克莱尔盆地 Ross Sandstone 组深水浊积岩露头 高分辨率层序地层学

张磊夫<sup>1</sup>, 吴陈君<sup>2</sup>, 苏洋<sup>3</sup>, 郭艳军<sup>1</sup>, 王红亮<sup>4</sup>

[1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国石油 长城钻探工程技术研究院, 辽宁 盘锦 124010; 4. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083]

**摘要:**应用高分辨率层序地层学原理和分析方法,通过对爱尔兰西海岸 Ross Sandstone 组深水浊积岩露头体的详细研究,基于侧向稳定展布的泥岩段、沉积构造与岩相组合、砂岩融合的程度以及沉积物的样式与厚度 4 个方面,建立了研究区高分辨率层序地层格架,探讨了深水浊积岩的沉积模式及不同层次基准面旋回的控制因素。研究表明,富含有机质与棱菊石化石的远洋泥岩是长期基准面旋回的界面。在长期旋回内,侧向展布数千米至数万米的薄层泥岩夹粉砂岩是中期基准面旋回的界面。每一个中期旋回都由数个相互叠置的向上变厚旋回组成,单个向上变厚旋回通常由底部薄层泥岩夹粉砂岩开始,往上逐渐转变为厚层的无构造砂岩;其厚度通常为 0.5~7 m,并可稳定延伸数百米至数千米,反映了朵叶体的持续前积作用。

**关键词:**基准面旋回;向上变厚旋回;沉积模式;高分辨率层序地层学;深水浊积岩朵叶体;克莱尔盆地;爱尔兰

**中图分类号:**TE121.3 **文献标识码:**A

## High resolution sequence stratigraphy of the Ross Sandstone deepwater turbidite outcrops in the Clare Basin, Ireland

Zhang Leifu<sup>1</sup>, Wu Chenjun<sup>2</sup>, Su Yang<sup>3</sup>, Guo Yanjun<sup>1</sup>, Wang Hongliang<sup>4</sup>

[1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Gansu Provincial Key Laboratory of Petroleum Resources/Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. Engineering Technology Research Institute of GWDC, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China; 4. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

**Abstract:** Using the principles and methods of high-resolution sequence stratigraphy, the Ross Sandstone deepwater turbidite lobe outcrops in the coast of western Ireland are studied based on four factors: laterally extensive mudstones, sedimentary structures and lithofacies associations, degree of sand amalgamation and sedimentary pattern and thickness. The high-resolution sequence stratigraphic framework has been established, the depositional model of deepwater turbidite lobe is proposed, and the controlling factors for base level cycles at different hierarchies are discussed. The results show that, the organic-rich pelagic mudstone with abundant goniatites represents the transition of two adjacent long-term base level hemi-cycles. Within the long-term base level cycle, each mid-term base level cycle is bounded by the thin mudstones with subordinate siltstones which can extend laterally several kilometers to tens of kilometers. Each mid-term cycle is composed of several thickening-upward cycles which are 0.5–7 m thick and several hundred meters to several kilometers across, suggesting continuous lobe progradation.

**Key words:** base level cycle, thickening-upward cycle, depositional model, high resolution sequence stratigraphy, deepwater turbidite lobes, Clare Basin, Ireland

普遍认为深水沉积具有重复的旋回特征<sup>[1-5]</sup>: 从下而上包括底部混杂 MTD 沉积物 (Mass Transport De-

posits, 包括滑动、滑塌等); 富砂的、以砂泥互层为主的浊流沉积物; 陆坡峡谷/水道——天然堤; 最终被区域

收稿日期: 2016-11-09; 修订日期: 2016-12-20。

第一作者简介: 张磊夫 (1987—), 男, 博士, 矿产普查与勘探。E-mail: leifu.zhang@pku.edu.cn。

通讯作者简介: 王红亮 (1971—), 男, 博士、副教授, 沉积学与高分辨率层序地层。E-mail: whliang@cugb.edu.cn。

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2016M591016)。

远洋沉积/凝缩段所覆盖。传统的层序地层学研究认为深水沉积主要发育于相对海平面较低的时期(LST低位域),并将不整合面<sup>[6]</sup>或最大洪泛面<sup>[7]</sup>作为层序划分与对比的最重要界面,但这些研究在深水储层勘探开发的实际应用中尚存在一些问题与困难。首先,与陆相/浅水陆坡沉积不同,深水沉积总是发育于水下,标志着水深突然增加的洪泛面<sup>[8]</sup>较难识别。其次,在构造活动频繁的情况下,可容纳空间可能一直维持在较高的水平<sup>[9]</sup>,相对海平面变化对沉积并没有明显的影响。在陆坡峡谷较短且陆上供应充足的特殊情况下,深水沉积甚至在高位域时期有更好的发育<sup>[10]</sup>。再者,传统的层序地层学研究多基于地震数据,受较大水深的影响,深水地震数据一般质量较差,多解性较强,难以有效地预测和对比沉积时间较短、厚度较小的砂体(如浊积朵叶体砂体)。

露头资料是最直观与真实的资料,较之地震资料与钻井资料具有更高的分辨率,因此高质量露头是进行高分辨率地层学研究的理想场所。本文运用高分辨率层序地层学理论<sup>[11-12]</sup>对爱尔兰西海岸高质量 Ross Sandstone 组浊积岩露头进行了精细研究,重点探讨了深水浊流朵叶体沉积中不同层次基准面旋回的识别标志,研究了不同层次基准面旋回内部的砂体展布特征,建立了研究区深水沉积模式,并探讨了不同层次基准面旋回的控制因素及其与深水构型层次单元的对应关系,是高分辨率层序地层学在深水沉积应用的一次新尝试。

## 1 区域地质概况

爱尔兰西部的石炭纪克莱尔盆地(Clare Basin)是典型的构造限制盆地,普遍认为其可以与北美墨西哥湾的一系列含油气盆地直接类比<sup>[13-14]</sup>。在克莱尔盆地的沉积过程中,发育了一系列富含海相动物群化石的薄层细粒黑色泥岩凝缩段(Marine bands)。这些泥岩段每隔0.065~0.1 Ma出现一次,由冰川-海平面变化所控制,且侧向发育稳定,因此可作为良好的标志层<sup>[13-14]</sup>。克莱尔盆地的沉积主要发育于纳缪尔期,其下部为维宪期由区域地壳伸展导致的厚层石灰岩沉积。纳缪尔期地层可划分为 Shannon 群与 Central Clare 群。在早纳缪尔期,克莱尔盆地扩张至 Kerry 与 Limerick 地区,但是物源匮乏,在整个盆地沉积了一套约180 m厚的黑色层状泥岩(Shannon 群 Clare Shales 组)。随后,Shannon 河河口附近区域逐渐成为沉积中心,并发育了厚度约300~400 m的深水浊积岩(Shan-

non 群 Ross Sandstone 组)。Ross Sandstone 组在爱尔兰西部 Clare 地区西南部厚度最大(400 m),来自于南部与西南部的河流体系提供了富含泥、粉砂与细砂的物源,因此 Ross Sandstone 组的浊积岩沉积以细砂岩为主(含量约65%),其次是薄层泥岩与滑塌沉积物。随着沉积物不断充填,盆地逐渐变浅,沉积逐渐转变为不稳定陆坡沉积(Shannon 群 Gull Island 组),沉积物以滑塌变形的泥质沉积为主,并最终被陆相的河流-浅水三角洲沉积物覆盖(Central Clare 群)。

Ross Sandstone 组沉积物可划分为三大类沉积单元:席状砂/朵叶体,水道和泥质单元<sup>[13]</sup>。朵叶体以厚层细砂岩夹薄层泥岩/粉砂岩为主,一般呈席状/板状,侧向延伸可达数千米并可稳定对比。水道以无构造厚层砂岩为主,通常较浅(<10 m),且呈现充填-溢出模式<sup>[15]</sup>。泥质单元包括凝缩段、滑塌沉积物和区域薄层泥岩。

从下往上,Ross Sandstone 组沉积物中的朵叶体所占比例逐渐变少,而滑塌沉积逐渐增多,反映了水体逐渐变浅,地形坡度逐渐变大,沉积环境从海底平原逐渐向更陡更浅的陆坡(Gull Island 组)转变。值得注意的是,Ross Sandstone 组中重复出现一种向上变厚的旋回(Thickening—upward cycle: Tuc),即由底部的薄层泥岩,含爬升层理、平行层理粉砂岩向上转变为底面具负荷构造、内部砂岩融合现象频繁出现的厚层砂岩。单个旋回一般厚0.5~7 m,侧向连续可达几百米至数千米,旋回上部厚层砂岩的顶面可出现“巨型槽痕”(“Megaflute”,向下冲刷可达2m)。目前,关于这种重复出现的向上变厚旋回以及伴生的巨型槽痕的发育机理尚有争议,沉积学家提出了多种沉积模式加以解释,包括水道侧端决口朵叶体模式<sup>[13]</sup>、水道前端朵叶体沉积模式<sup>[14,16-18]</sup>和水道—水道翼部模式<sup>[15]</sup>等。本文采用水道前端朵叶体沉积模式,主要基于3个方面:①向上变厚旋回在全球各水道前端浊积朵叶体沉积中均有出现;②沉积物呈席状,侧向延续数千米并可稳定对比,这是朵叶体沉积的重要标志;③向上变厚旋回的厚度、宽度、岩相组合与全球其他浊积体系中的水道前端朵叶体相似。

## 2 露头沉积地层特征

研究区位于克莱尔盆地西部(图1a,b),沉积物以 Ross Sandstone 组浊积岩为主<sup>[13-14]</sup>,在沿大西洋海岸线分布的断崖中有非常良好的出露,且侧向连续性良好(图1c)。由于水道化程度低,侧向连续性好,垂

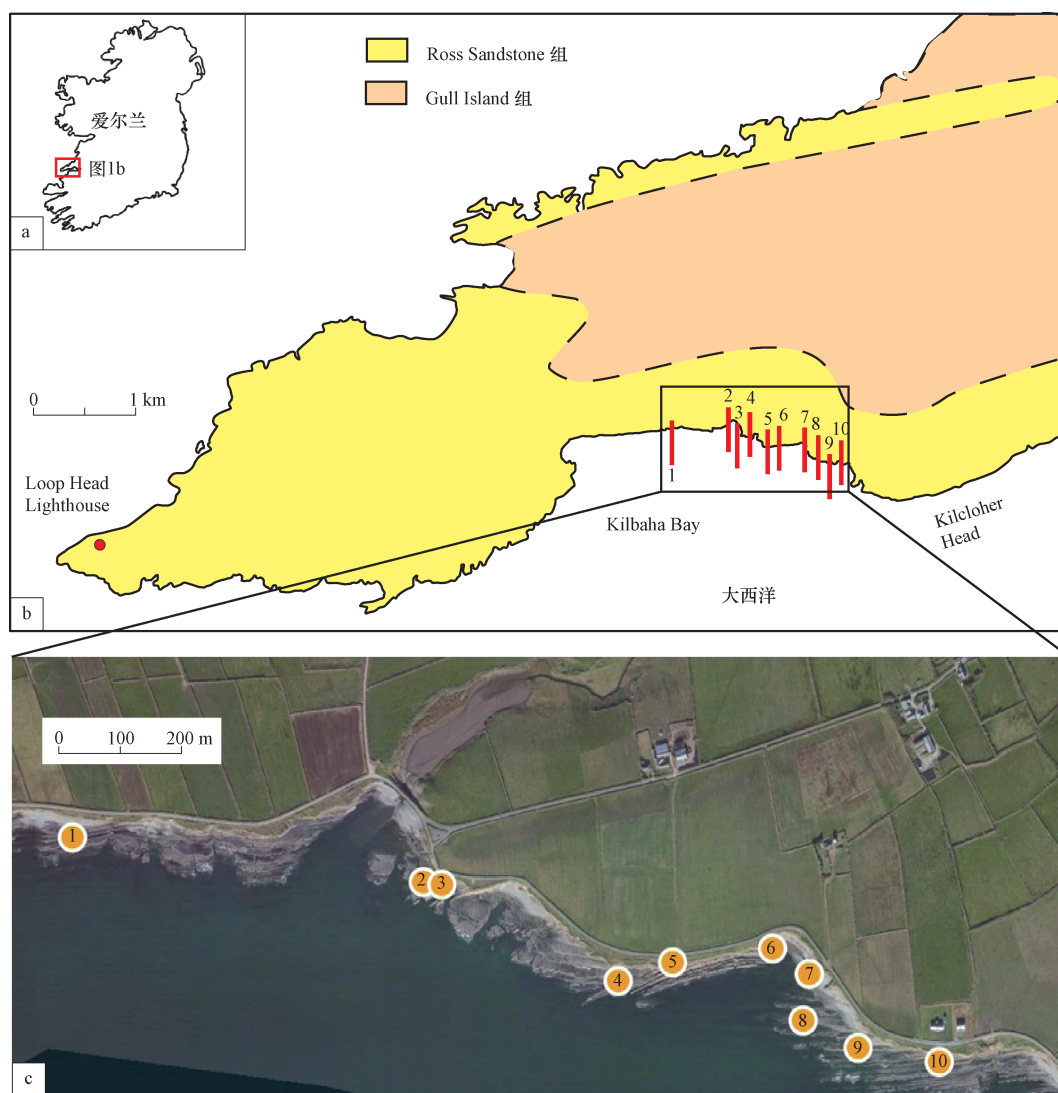


图1 爱尔兰克莱尔盆地地层展布(据文献[13],修改)

Fig. 1 Stratigraphic distribution in the Clare Basin, Ireland (modified from reference[13])

向分辨率高,尤其是古水流方向近似垂直于露头走向<sup>[14]</sup>,因此是对深水浊积朵叶体进行高分辨率层序地层学研究的良好场所。

## 2.1 岩相类型

基于沉积相的组合特征,将研究区地层划分为五种岩相(图2)。

A:厚层细砂岩(图2a),砂地比接近100%,内部除偶见碟状构造外通常不含沉积构造;厚度一般大于0.5 m,内部砂岩融合现象频繁出现,砂岩层间相互融合可形成厚度达3m的单砂层;底面常具负荷构造(图2f),顶面可出现冲刷标志,指示着朵叶化流体头部和近源的高密度浊流沉积,沉积能量较高。

B:薄-中厚层砂岩夹薄层泥岩(图2b),砂地比一般小于50%,厚度为0.03~0.5 m,内部富含平行层理

与爬升层理,砂岩融合频率低-中等,一般位于厚层细砂岩下方,指示着朵叶化流体偏轴部、中-远端沉积,沉积能量中等。

C:层状泥岩(图2c),可含极少的粉砂岩/砂岩夹层,泥岩中可见局部变形;厚度一般为0.2~1 m,指示着朵叶化流体尾部的悬浮沉积,沉积能量较低。

D:富含有机质黑色泥岩(图2d),此岩相为深海平原上的远洋/半远洋悬浮沉积,即上文中提到的凝缩段,指示着盆地范围的沉积间断,是作为区域地层对比的最重要标志层,在研究区仅出现一次,厚度约0.7 m,富含棱菊石化石(*Goniatite*)。

E:细粒滑塌沉积物(图2e),以杂乱泥岩为主,夹少量砂质岩屑。此岩相出现在研究区地层的最上方,标志着该时期沉积坡度较大,水体变浅,应指示着小范围的滑塌事件。



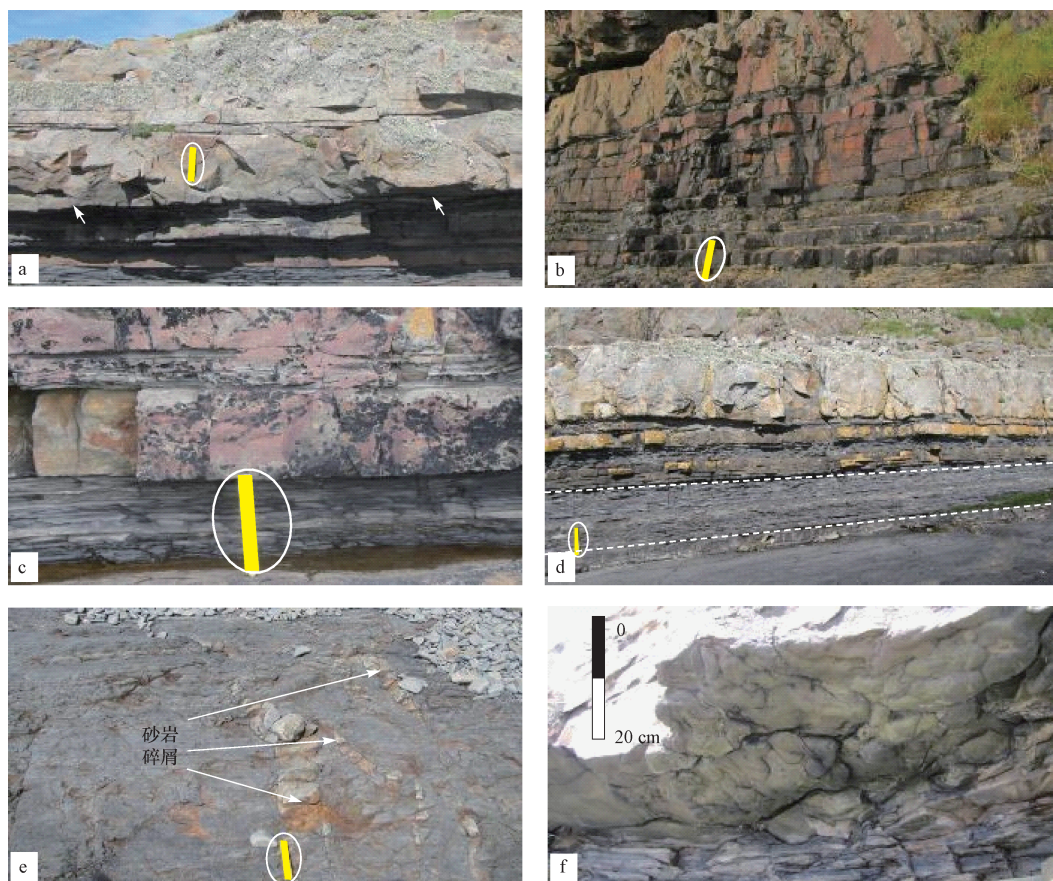


图2 爱尔兰克莱尔盆地露头研究区岩相(黄色标尺25 cm)

Fig. 2 Lithofacies in the Clare basin, Ireland (yellow ruler is 25 cm)

研究区的浊积岩通常表现为(从下往上)CBA, CB, CA 和 CBCA 的组合,整体呈现向上变厚/粗的趋势,指示着底部的低密度浊流向顶部高密度浊流的转变。这意味着在特定位置经过的浊流流体能量与体积逐渐增大,反映了朵叶体的持续前积作用<sup>[17]</sup>。

## 2.2 地层对比

在研究区选取了多个观察点并建立了垂直剖面(图1c)。注意研究区的地层虽然垂向出露良好,但受到了华里西期构造运动的强烈影响,发育了多个褶皱,这给侧向地层追踪带来了一定的困难。通过对选定标志层(图2d)以及对关键界面(如厚层无构造砂岩顶面)的侧向追踪,建立了研究区宽度约1 500 m,厚度约40 m的高分辨率地层剖面。地层剖面底部为一段在研究区发育稳定的泥岩段,顶部为一套以混杂泥岩为主的滑塌沉积(图2f)。总体而言,研究区沉积物以相互平行的中厚层细砂岩夹薄层泥岩为主,且发育了7个厚度稳定与侧向展布稳定的泥岩段(图2c),这些泥岩段对较厚的朵叶体砂体形成了良好的隔挡。在对南非 Karoo 盆地<sup>[19]</sup>与挪威 Spitsbergen 盆地<sup>[20]</sup>浊积朵叶

体沉积物的研究中,这种厚度稳定、侧向展布稳定的泥岩段也被广泛发现,并被作为区分上下两期朵叶体的界面(“Inter-lobe”:朵叶体间泥岩)。

## 3 露头高分辨率层序地层划分

无论是经典层序地层学还是高分辨率层序地层学,对于关键界面的识别都非常重要。对深水沉积进行高分辨率层序地层学研究相对较困难,因为与陆相沉积不同,深水沉积全部发育于水下,不存在陆相沉积中常被作为关键界面的暴露面与古土壤等。大范围的不整合面以及盆地范围的凝缩段可以作为划分长期旋回的界面,但是对更短期基准面旋回界面的识别尚有难度。本文尝试以露头区侧向展布稳定的泥岩段、沉积相组合与沉积构造、砂岩融合程度、沉积物样式与厚度四个方面为基础,识别与对比不同层次基准面旋回。

### 3.1 浊流沉积中基准面旋回识别

#### 3.1.1 侧向展布稳定的泥岩段

Ross Sandstone 组中发育多个凝缩段(Marine



band), 最厚的凝缩段厚度约 20 m<sup>[13-14]</sup>。其中约 0.7 m 厚的凝缩段“H2c2 Marine band”在研究区出露(图 2d), 富含有机质与棱菊石化石(*Goniatites*), 并可在盆地范围对比, 指示由基准面上升所导致的水进。本时期发生的沉积向陆地迁移而无法到达盆地深水区, 因此在深水平原区沉积间断。此凝缩段具有严格的等时对比意义, 应作为长期旋回(3 级层序)界面, 区分上下两期深水扇体。除凝缩段外, 研究区地层中发育着数个稳定的泥岩层段, 厚度为 0.25 ~ 1 m 不等, 内部含少量粉砂岩夹层(即岩相 C)。泥岩段侧向展布稳定, 其顶部很少被侵蚀冲刷, 且往往覆盖并填充下方的冲刷沟槽。这些泥岩是两期朵叶体(厚度 2 ~ 10 m)的界面。同时, 泥岩侧向发育数千米至数万米, 可能指示着连续两期朵叶体沉积之间的沉积间断, 是中期旋回(4 级层序)基准面上升至最高时的产物。

### 3.1.2 沉积构造与岩相组合

在深水重力流沉积过程中, 当 A/S 比值发生变化时, 浊积扇体交替发生进积作用或退积作用, 导致地形梯度发生变化, 沉积物的相序也发生相应变化: 自下而上, 鲍马序列中的波状层理段/水平层理段/泥岩段、至含分散细粒砂岩、至枕状构造、至纹理砂岩、至厚层无构造砂岩的相序反应了地形梯度逐渐变陡<sup>[11-12]</sup>。此外, 浊流沉积中, 砂岩一般由浊流头部及躯干的砂质部分快速卸载形成, 沉积时间较短; 泥岩一般为浊流尾部悬浮的泥质颗粒缓慢降落而形成, 沉积时间较长。如上所述, 研究区发育了 A, B, C, D 与 E 五种岩相。泄水构造与火焰构造指示着快速的沉积, 负荷构造指示着较高的沉积能量。这 3 种沉积构造多见于岩相 A 中。而岩相 B 中一般发育平行层理、爬升层理, 底部偶尔见小型的负荷构造。岩相 C 中常见水平层理, 指示着非常低的沉积能量。自下至上 CBA, CA, CBCBCA 的组合在研究区地层中重复出现, 形成了独特的相互叠置的向上变厚旋回(Thickening-upward cycle; Tuc, 图 3), 指示由短期基准面下降导致的沉积能量增加。

### 3.1.3 砂岩融合的程度

砂岩融合是指示沉积环境的重要标志<sup>[21-22]</sup>。砂岩融合程度越高意味着较新沉积对较老沉积的侵蚀程度越高, 意味着沉积速率越高, 流体能量越大。因此, 砂岩融合的程度是指示 A/S 比值的重要标志。基准面较低时, 较小的可容纳空间迫使较新的沉积侵蚀下方已有的沉积物, 砂岩融合程度高。尤其是侧向展布稳定的泥岩突然被侵蚀时, 标志着沉积能量最高, 指示

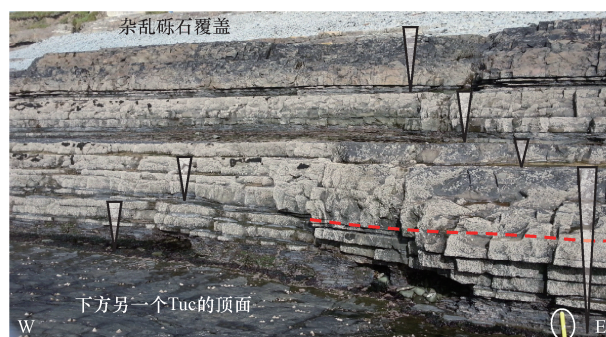


图3 爱尔兰克莱尔盆地典型的向上变厚旋回

Fig. 3 Typical thickening-upward cycles in the Clare basin, Ireland  
[最下方两个 Tuc 的融合(红色虚线); 照片为仰拍(黄色标尺 25 cm)]

着基准面下降至最低。反之, 基准面较高时, 可容纳空间较大, 沉积体叠置呈现“补偿性叠置”特征, 砂岩融合程度较低。在研究区 A 和 B 两种以砂岩为主的岩相中, 岩相 A 中的砂岩融合程度远高于岩相 B。值得注意的是, 向上变厚旋回可以相互融合(即上部 Tuc 的底部泥岩段被突然侵蚀, 而导致上部 Tuc 的砂岩与下部 Tuc 的砂岩直接接触)从而形成更大规模的 Tuc, 但总体向上变厚的趋势保持不变(图 3), 指示着局部流体能量达到最高。Tuc 在向上变厚(砂岩厚度)的同时, 伴随着砂岩融合程度向上增加, 再次指示着沉积能量向上增加, 基准面逐渐降低。

### 3.1.4 沉积物的样式与厚度

在深水浊流沉积中, 基准面较低时, 往往意味着流体体积更大, 沉积物的厚度越大, 以厚层的砂岩夹薄层泥岩、粉砂岩为主。相反, 根据沉积物体积分配原理<sup>[11-12]</sup>, 基准面较高时, 沉积物在相对应的陆上和陆架区域沉积而只有少量能到达深海平原。相对应的, 沉积的砂岩通常较薄, 泥岩较厚, 相对薄层的砂岩一般呈分散式地分布在泥岩中。研究区的砂岩厚度与其内部砂岩融合的程度呈正相关: 砂岩厚度越大, 内部砂岩融合的程度越高。在岩相 A 中的厚层无构造砂岩中, 砂岩融合的程度最高。因此, 厚层砂岩的沉积往往指示着较低的基准面以及较高的沉积能量。

## 3.2 长期与中期基准面旋回划分

基于以上所述四个方面, 在对标志层以及关键界面进行侧向追踪并将标志层拉平后, 建立了研究区露头地层的高分辨率层序地层格架(图 4)。依据 0.7m 厚的凝缩段“H2c2 Marine band”, 可以划分出两个不完整的长期基准面半旋回。其中长期基准面上升半旋回 L1 的下部记录不完整, 长期基准面下降半旋回 L1' 的上部记录不完整。基于前人研究, 研究区凝缩段与

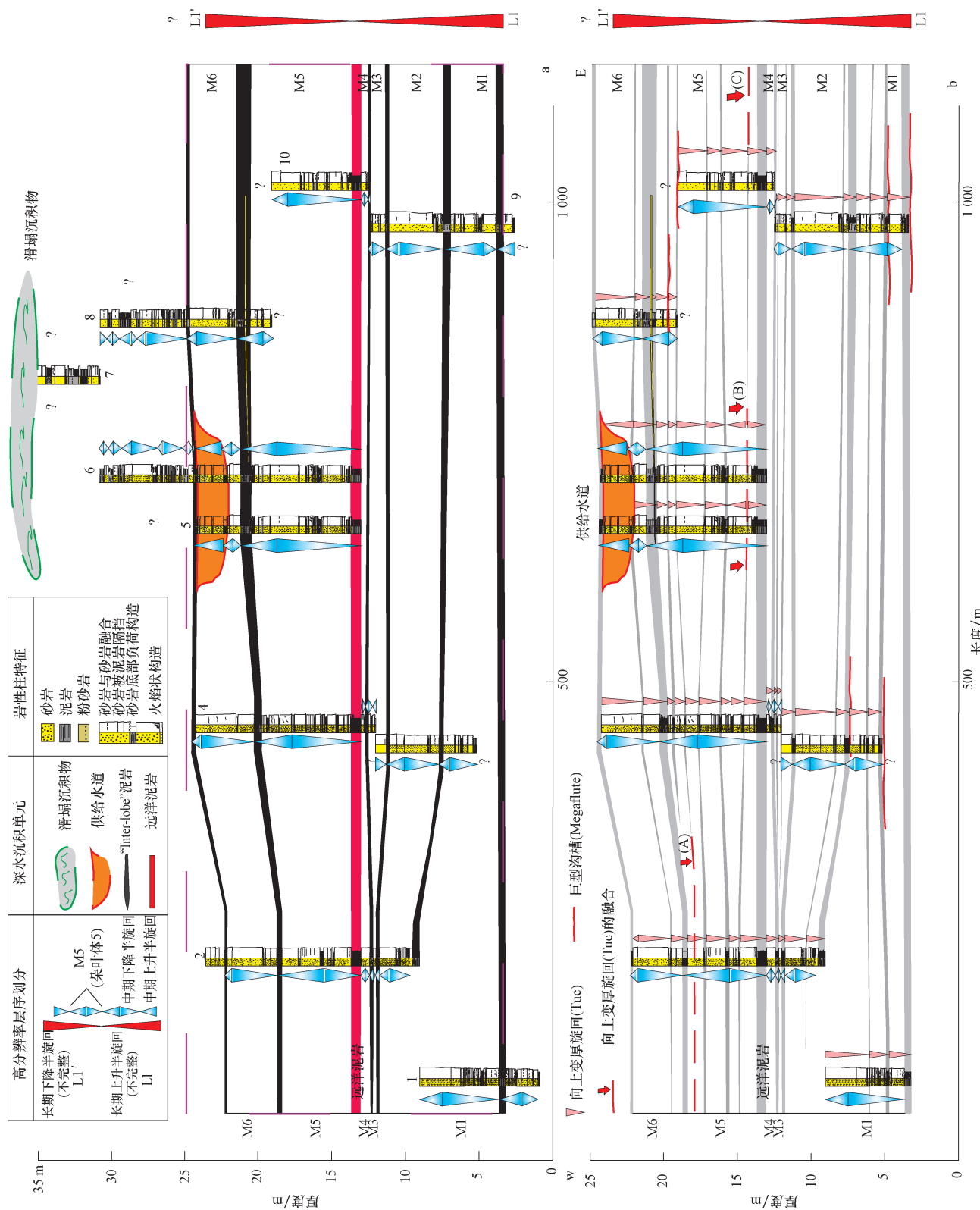


图4 爱尔兰克莱尔盆地露头高分辨率层序地层格架以及向上变厚旋回  
Fig.4 High resolution sequence stratigraphic framework and thickening-upward cycles (Tuc) in the Clare Basin, Ireland

上部、下部另一凝缩段之间的厚度分别约 60 m 与 80 m<sup>[13-14]</sup>,即两期深水扇的厚度分别为 60 m 与 80 m。在长期旋回内部,依据稳定发育的朵叶体间泥岩,在上升半旋回 L1 内部划分出 4 个中期基准面旋回(从下至上 M1—M4)。虽然底部的记录不完整,但是随着基准面持续上升,单个中期旋回的厚度及展布范围逐渐变小,这指示着 A/S 比值 > 1 且不断增大,沉积物在相对应的陆上/陆坡大量沉积而越来越难到达深海平原,最终沉积终止并被凝缩段覆盖。在约 0.06 ~ 0.1 Ma 之后基准面再次降低,长期下降半旋回开始,浊积朵叶体重新开始发育。长期下降半旋回 L1' 在研究区出露了 2 个较完整的中期旋回(M5, M6)。M5 是基准面下降期的首个中期旋回,象征着自沉积物可到达深海平原之后的第一次重力流沉积事件。M5 中期旋回厚度较大, M6 中期旋回的厚度相对减小。与其他中期旋回之间的侧向稳定泥岩段不同, M5 与 M6 之间的泥岩段厚度变化较大并出现约 10 cm 厚、侧向展布数百米的砂岩段(图 4a),这指示着两期朵叶体沉积间断期间所发育的局部砂岩沉积。在 M6 中期旋回的顶部出现了供

给水道,其宽度小于 300 m,底部具明显的侵蚀面,内部沉积物呈现显著的向上变细旋回。水道砂岩底部可发现泥砾,顶部发育波状层理,表明在水道内部水体逐渐变深,可容纳空间变大。在研究区地层的最上方出现了局部的滑塌沉积,侧向展布约数百米,可能是由局部坡度较高而发生的滑移或崩塌所形成。

### 3.3 中期旋回中自旋回作用

除因 Tuc 的相互融合导致沉积物显示向上变薄旋回外(图 4b),研究区每个中期旋回内都含有数个相互叠置的向上变厚旋回(Tuc,图 3,图 4b,图 5),并且在各中期旋回内部可稳定对比。Tuc 通常以 0.02 ~ 0.5 m 厚的泥岩夹少量粉砂岩开始,往上逐渐出现厚层的无构造砂岩,整体厚度 0.5 ~ 7 m 且通常可侧向延伸数百米至数千米。Tuc 内的每一个砂岩单层记录着一次单独的沉积事件,其沉积时间可能很快(数秒至数天)。这些砂岩单层之间出现频繁的相互融合现象(amalgamation),对单一砂层界面的识别与追踪十分困难,很难进行进一步对比。

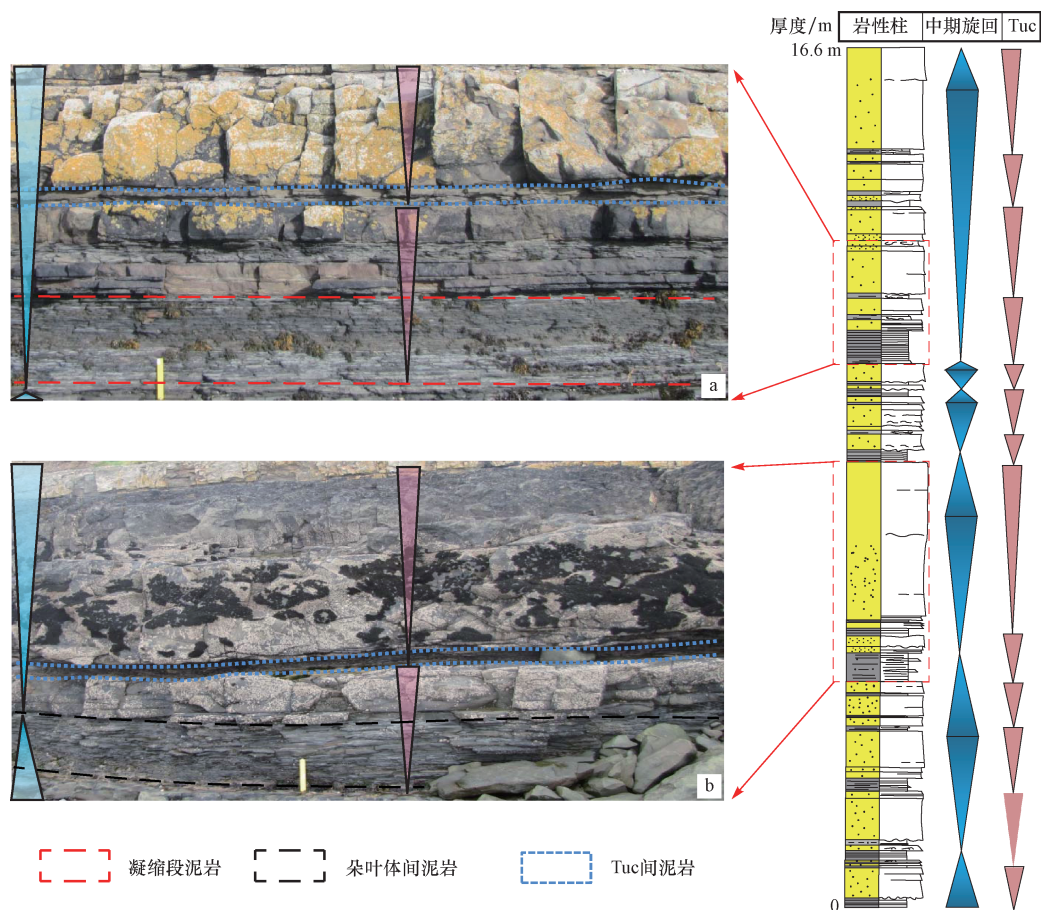


图5 爱尔兰克莱尔盆地典型露头岩性柱中期旋回与向上变厚旋回关系

Fig. 5 Typical outcrop logs showing mid-term cycles and thickening-upward cycles in the Clare Basin, Ireland

a. A 段; b. B 段



此外,这些向上变厚旋回的顶部/上一个向上变厚旋回的底部可出现特殊的冲刷构造(“megaflute”,巨型槽痕,图4b),这种巨型槽痕的宽度为数米至数百米,对Tuc顶部砂岩的下切可达2 m。这种特殊的巨型槽痕在爱尔兰西部 Ross Sandstone 组深水浊积朵叶体露头的各个层段中均有发现(不限于研究区)。朵叶体内部的这种重复出现的Tuc以及伴生的巨型槽痕可能指示着一种局部的自旋回作用。朵叶体沉积具有底平顶凸的特点,随着一个Tuc的沉积持续进行,其沉积中心与边缘的厚度差逐渐增加,导致坡度不断增加。当坡度增加到某一特定值时将迫使后续流体改道并沿着坡度最大的方向沉积,从而继续沉积新一期的Tuc。由于坡度的突然增加,被改道的流体经历了突然的加速过程,从而在原先Tuc沉积中心的顶部(Tuc顶部砂岩)留下巨型槽痕(megaflute),同时可能将侵蚀较老Tuc边缘的泥岩,导致两个Tuc的直接融合(图3,图4)。因此,这种小型的、出现并不频繁的特殊冲刷构造并不一定标志着基准面的急剧下降,而可能与沉积物搬运过程中自生性的改道迁移有关。浊积朵叶体中的这种多个Tuc相互叠置的特殊样式在全球多个深水沉积体系中出现,并被解释为由自生性因素控制<sup>[19-20,22-23]</sup>。由于其沉积迅速发生,规模较小且总体分布规律性不强,可能并不具有时间地层对比意义,因此不能简单的将之划分为中期旋回内部的短期旋回,这从一定程度上显示了深水浊积朵叶体沉积的复杂性。

位于Tuc顶部的厚层无构造砂岩(厚度1~3 m,

砂地比接近100%)可沿侧向逐渐或突然转变为两个或多个平行叠置的薄层砂泥互层单元,并伴随着砂岩融合程度的急剧下降(图6)。这反应了单期Tuc的流体体积与能量由中心往边缘逐渐减弱,换言之厚层块状砂岩指示着沉积中心位置,而其两侧泥质含量增多、砂岩融合程度下降的砂泥互层指示着沉积的偏边缘位置。这种特殊的内部结构对于朵叶体内部的砂岩连通性有重要影响,是近年来浊积朵叶体储层建模研究关注的热点之一<sup>[18,22]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 基准面旋回与构型层次单元

基于Miall针对河流体系所提出的构型要素方法<sup>[24]</sup>,近年来对于深水沉积构型单元的研究逐渐增多,通常按照尺寸、岩相组合和界面等划分出不同层次的深水构型单元。例如,Prelat等基于南非Karoo深水浊积体系的研究提出了单砂层、朵叶体单元、朵叶体和朵叶体复合体的四级构型层次并被广泛引用<sup>[19]</sup>。对研究区高分辨率地层格架中划分出的长期与中期基准面旋回可以与朵叶体复合体以及朵叶体构型层次单元相对应。凝缩段是两期朵叶体复合体的界面,同时指示着长期基准面上升至最高点。但是一个朵叶体复合体并不完全对应着一个完整的上升一下降长期旋回,而是对应着一个长期旋回的下降半旋回和另一个长期旋回的上升半旋回(图4)。朵叶体间泥岩通常用来划

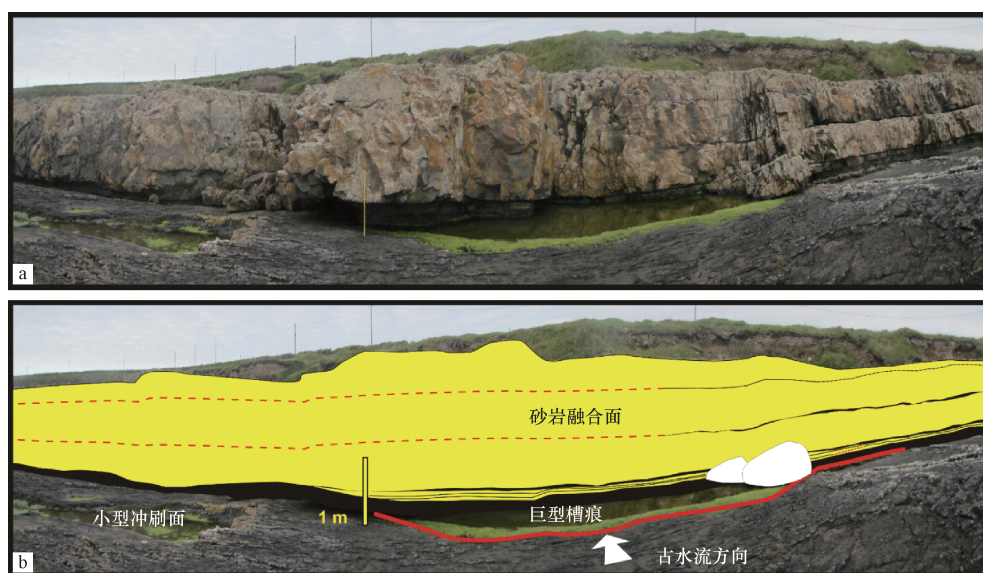


图6 爱尔兰克莱尔盆地露头中的朵叶体单元与巨型槽痕

Fig. 6 Typical lobe elements and megaflutes at outcrop in the Clare Basin, Ireland

a. 露头; b 中黄色为砂岩, 黑色为泥岩, 红色实线为巨型槽痕, 红色虚线为砂岩融合面, 白色为杂乱砾石

分相邻两期朵叶体,同时也是中期基准面上升至最大的标志。同样的,一个朵叶体也并不完全对应着一个完整的上升—下降中期旋回,而是对应着一个下降半旋回和另一个中期旋回的上升半旋回(图4)。在实际的应用中应充分注意这种差异。在中期旋回内部,每一个 Tuc 都对应着一个朵叶体单元,指示着在一个朵叶体内部连续发生的前积作用。

#### 4.2 深水朵叶体沉积模式与控制因素

研究区地层从下至上包括一个长期上升半旋回的最上部分以及一个长期下降半旋回的最下部分(图4)。在不完整的长期上升半旋回中,基准面上升,能搬运至深海平原的砂逐渐减少,沉积物在陆架和河流三角洲体系中被捕获单个砂体的厚度逐渐变薄,砂地比降低,冲刷面较少发育,也未出现较大范围的砂岩融合现象,反应了重力流沉积的能量逐渐减弱直至完全停止,最终被远洋泥岩所覆盖。长期旋回主要受相对海平面、构造因素与气候的控制,完全以异生性因素(allogenic factors)控制为主,以远洋/半远洋悬浮沉降的泥岩为标志。凝缩段泥岩沉积的厚度虽然仅为 0.7 m,但记录了 0.01 ~ 0.1 Ma 的沉积间断<sup>[13-15]</sup>。之后,基准面下降,富砂流体重新到达深海平原,单个砂体厚度较大,砂地比高,砂岩融合现象频繁发育,反应了重力流沉积的能量较高。其中,在最上部发育的富砂的无天然堤下切水道指示着局部基准面下降至最低点,同时也是前积作用的证据。水道内部发育向上变薄的旋回,底部含少量泥砾,整体厚度约为 4 m,显示研究区地层剖面大致处于深水浊积扇体的上部—中部区域。

长期旋回中包含多个中期旋回。中期旋回主要受沉积物供给、相对海平面、构造背景和气候等异生性因素的控制。相邻中期旋回之间的细粒单元(泥岩夹粉砂岩)发育稳定且可以大范围稳定对比,表示在相邻中期旋回之间有相对较长时间的沉积停滞,指示着异生性因素的控制作用。但与此同时,不同期次朵叶体沉积中心的侧向变化表现了明显的“遇高转道,遇低填平”特征(图4),反应了“补偿性叠置”这一自生性因素(autogenic factors)的控制。因此,中期旋回以异旋回为主,同时也受自生性因素的影响。值得注意的是,研究区每一个中期旋回都由数个向上变厚的旋回(Tuc)组成,指示着持续的前积作用。Tuc 的发育主要受自生性因素以及伴随着沉积不断进行而产生的地形变化所控制。在实际的勘探开发中,由于 Tuc 的厚度一般小于 5 m(图6),低于一般地震数据的分辨率而难

以识别。此外,Tuc 之间的相互融合可能导致在很短的距离内出现截然相反的旋回特征,给精细小层对比带来了很大的困难(图4b,图6)。因此,对于高质量露头进行精细研究从而正确认识其沉积特征与发育规律有利于降低风险,提高成功率。

近年对挪威始新世 Spitsbergen 深水体系露头的研究<sup>[19]</sup>显示其朵叶体复合体、朵叶体的尺寸、叠置特征与研究区的长期旋回、中期旋回十分类似。最值得注意的是,挪威 Spitsbergen 深水体系中也发现多个向上变厚旋回(Tuc)稳定叠置,且 Tuc 的厚度(1 ~ 5 m)与研究区十分相近,这种稳定叠置的 Tuc 被解释为是由持续前积作用所形成。对 Spitsbergen 组浊积体系与对 Ross Sandstone 组浊积体系的研究表明,可能存在某种自生性因素控制着 Tuc 发育的规模。例如,随着前积作用的持续,当 Tuc 的厚度到达特定值时,朵叶体沉积物沿侧向的坡度将大于沿物源方向的坡度,导致后续的流体转而沿侧向方向继续前积形成新一期 Tuc,但这种解释尚有待进一步的水槽实验或数学建模研究验证。

## 5 结论

1) 对爱尔兰西海岸出露的约 1 500 m 宽,40 m 厚的 Ross Sandstone 组浊积朵叶体露头进行了精细研究,划分了 5 种岩相类型:厚层细砂岩、薄—中厚层砂岩夹薄层泥岩、层状泥岩、富含有机质黑色泥岩与细粒滑塌沉积物。

2) 基于侧向展布稳定的泥岩段、沉积构造与岩相组合、砂岩融合的程度、沉积物的样式与厚度 4 个要素建立了研究区露头地层的高分辨率层序地层格架。富含有机质的远洋泥岩凝缩段指示着盆地范围的沉积间断,是上升长期半旋回与下降长期半旋回的转换面。横向展布稳定的朵叶体间泥岩标志着—期朵叶体沉积事件的结束,是上升中期半旋回与下降长期半旋回的转换面。

3) 中期旋回由数个向上变厚旋回(Tuc)组成,这些 Tuc 整体厚度为 0.5 ~ 7 m,侧向延伸可达数百米至数千米,通常以 0.02 ~ 0.5 m 厚的泥岩夹少量粉砂岩开始,往上逐渐转变为厚层的无构造砂岩,厚层砂岩顶部常见巨型槽痕。Tuc 之间的相互融合可以导致局部出现向上变薄旋回,给区域对比造成困难。在实际的勘探开发工作中应予以注意。

致谢:感谢中国地质大学(北京)邓宏文教授与姜正龙副教授在成文过程中给予的指导与帮助。

## 参考文献

- [1] Weimer P. Seismic facies, characteristics and variations in channel evolution, Mississippi fan (Plio-Pleistocene), Gulf of Mexico [C] // Weimer P, Link M. Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems. New York: Springer 1991: 323 – 347.
- [2] Beaubouef R T, Friedmann S J. High resolution seismic/sequence stratigraphic framework for the evolution of Pleistocene intra slope basins, western Gulf of Mexico; depositional models and reservoir analogs [C] // Deep-water reservoirs of the world: Gulf Coast Section SEPM 20th Annual Research Conference, 2000: 40 – 60.
- [3] Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(3): 367 – 388.
- [4] Posamentier H, Walker R G. Deep-water turbidites and submarine fans [C] // Posamentier H, Walker R G. Facies models revisited. SEPM Special Publication, No. 84, 2006: 399 – 520.
- [5] Van Der Merwe W C, Flint S S, Hodgson D M. Sequence stratigraphy of an argillaceous, deepwater basin-plain succession: Vischkul Formation (Permian), Karoo Basin, South Africa [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(2): 321 – 333.
- [6] Mitchum R M, Van Wagoner J C. High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles [J]. Sedimentary Geology, 1991, 70(2): 131 – 160.
- [7] Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis, I. Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(2): 125 – 142.
- [8] Van Wagoner J, Mitchum R, Campion K, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies [J]. AAPG Methods in Exploration Series, 1990, 7: 1 – 55.
- [9] Porbski S J, Steel R J. Deltas and sea-level change [J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76(3): 390 – 403.
- [10] Covault J A, Normark W R, Romans B W, et al. Highstand fans in the California borderland: the overlooked deep-water depositional systems [J]. Geology, 2007, 35(9): 783 – 786.
- [11] Cross T A. High-resolution stratigraphic correlation from the perspectives of base-level cycles and sediment accommodation [C] // Dolson J. Unconformity related hydrocarbon exploration and accumulation in clastic and carbonate settings. Rocky Mountain Association of Geologists, 1991: 28 – 41.
- [12] 邓宏文, 王红亮, 祝永军. 高分辨率层序地层学 – 原理与应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1 – 253.
- [13] 董洪刚, 王洪亮, 朱永军. Theory and application of high resolution sequence stratigraphy [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 1 – 253.
- [14] Lien T, Walker R J, Martinsen O J. Turbidites in the Upper Carboniferous Ross Formation, western Ireland; reconstruction of a channel and spillover system [J]. Sedimentology, 2003, 50(1): 113 – 148.
- [15] Pyles D R. Multiscale stratigraphic analysis of a structurally confined submarine fan: Carboniferous Ross Sandstone, Ireland [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(5): 557 – 587.
- [16] Elliott T. Megaflute erosion surfaces and the initiation of turbidite channels [J]. Geology, 2000, 28(2): 119.
- [17] Chapin M A, Davies P, Gibson J L, et al. Reservoir Architecture of Turbidite Sheet Sandstones in Laterally Extensive Outcrops, Ross Formation, Western Ireland [C] // Submarine Fans and Turbidite Systems: Sequence Stratigraphy, Reservoir Architecture and Production Characteristics. Gulf Coast Section SEPM 15th Annual Research Conference, 1994: 53 – 68.
- [18] Macdonald H A, Peakall J, Wignall P B, et al. Sedimentation in deep-sea lobe-elements: Implications for the origin of thickening-upward sequences [J]. Journal of the Geological Society, 2011, 168(2): 319 – 332.
- [19] Zhang L, Manzocchi T, Haughton P D. Impact of Sedimentological Hierarchy on Sandstone Connectivity in Deep-Water Lobes-An Object-Based Modelling Approach [C] // 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 2013.
- [20] Prélât A, Hodgson D M, Flint S S. Evolution, architecture and hierarchy of distributary deep-water deposits: a high-resolution outcrop investigation from the Permian Karoo Basin, South Africa [J]. Sedimentology, 2009, 56(7): 2132 – 2154.
- [21] Grundvåg S A, Johannessen E P, Helland-Hansen W, et al. Depositional architecture and evolution of progradationally stacked lobe complexes in the Eocene Central Basin of Spitsbergen [J]. Sedimentology, 2014, 61(2): 535 – 569.
- [22] Mattern F. Amalgamation surfaces, bed thicknesses, and dish structures in sand-rich submarine fans: numeric differences in channelized and unchannelized deposits and their diagnostic value [J]. Sedimentary Geology, 2002, 150(3–4): 203 – 228.
- [23] Zhang L, Manzocchi T, Haughton P D. Hierarchical parameterisation and modelling of deep-water lobes [C] // 77th EAGE Conference & Petroleum Geostatistics, Biarritz, France, 2015.
- [24] Haughton P D, Davis C, McCaffrey W D, et al. Hybrid sediment gravity flow deposits-Classification, origin and significance [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(10): 1900 – 1918.
- [25] Miall A D. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. Earth-Science Reviews, 1985, 22(4): 261 – 308.

(编辑 董立)