

文章编号: 1671-1505(2026)03-1087-17 DOI:10.7605/gdxb.2026.115

# 特提斯域西段古生代构造演化与岩相古地理响应： 以北非地区为例\*

张忠民<sup>1</sup> 宋逸婷<sup>2,3</sup> 吕对林<sup>2,3</sup> 岳彩新<sup>2,3</sup> 郭妍晶<sup>2,3</sup>  
朱奕璇<sup>1</sup> 朱杰<sup>4</sup> 曹喆<sup>1</sup> 张辛雨<sup>2,3</sup> 孙润明<sup>2,3</sup>  
鲍志东<sup>2,3</sup> 李依霖<sup>2,3</sup> 冯志强<sup>1</sup> 季汉成<sup>2,3</sup>

1 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 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

4 中国石化国际勘探开发有限公司, 北京 100029

**摘要** 通过整合地震数据、测井资料及岩心数据重建了寒武纪至泥盆纪期间北非地区构造演化及岩相古地理响应, 重点探讨构造事件及相关的海平面波动与气候变化对研究区沉积作用与盆地发育的影响。研究表明, 在寒武纪—奥陶纪, 特提斯域西部克拉通内凹陷盆地占据主导地位, 辫状河流系统因气候变冷与冰川作用逐渐转变为冰川沉积; 志留纪见证了古特提斯洋的开启, 导致大规模海侵作用及下志留统富含有机质页岩的沉积; 晚志留世的海平面下降导致三角洲与河流发育; 泥盆纪间, 赫西尼亚造山运动显著改变盆地构造, 形成被动大陆边缘。辫状河与曲流河系统渐变为三角洲与浅海环境, 晚泥盆世的缺氧条件则有利于烃源岩的形成。本研究揭示了构造运动、海平面变化与气候变化等对北非沉积古地理的共同塑造作用, 并在其基础上探究北非地区储集层有利区, 为油气勘探提供依据。

**关键词** 特提斯域西段 构造演化 沉积响应 古生代 北非地区

**第一作者简介** 张忠民, 1971年生, 教授级高级工程师, 主要从事石油地质综合研究及油气勘探工作。E-mail: zzm.syky@sinopec.com。宋逸婷, 2000年生, 主要从事沉积学研究。E-mail: 18740779689@163.com。

**通讯作者简介** 鲍志东, 男, 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: baozhid@cup.edu.cn。

中图分类号: P54 文献标志码: A

## Paleozoic tectonic evolution and lithofacies palaeogeographic response in western segment of Tethyan Realm: a case study of North Africa

ZHANG Zhongmin<sup>1</sup> SONG Yiting<sup>2,3</sup> LÜ Duilin<sup>2,3</sup> YUE Caixin<sup>2,3</sup> GUO Yanjing<sup>2,3</sup>  
ZHU Yixuan<sup>1</sup> ZHU Jie<sup>4</sup> CAO Zhe<sup>1</sup> ZHANG Xinyu<sup>2,3</sup> SUN Runming<sup>2,3</sup>  
BAO Zhidong<sup>2,3</sup> LI Yilin<sup>2,3</sup> FENG Zhiqiang<sup>1</sup> JI Hancheng<sup>2,3</sup>

\* 国家科技重大专项(编号: 2024ZD1003604)、国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0603104, 2018YFC0604304)以及中石化科技攻关项目(编号: P25150)联合资助。[Co-funded by the National Science and Technology Major Project (No. 2024ZD1003604), the National Key Research and Development Program of China (Nos. 2017YFC0603104, 2018YFC0604304) and Sinopec Science and Technology Research Project (No. P25150)]

收稿日期: 2026-04-08 改回日期: 2026-04-28

1 *Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing 102206, China*

2 *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

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

4 *Sinopec International Exploration and Development Co., Ltd., Beijing 100029, China*

**Abstract** This study reconstructs the tectonic evolution and lithofacies palaeogeographic development of North Africa from the Cambrian to the Devonian through an integrated analysis of seismic, well-log, and core data. Emphasis is placed on evaluating how major tectonic events—interacting with eustatic sea-level fluctuations and climatic shifts—controlled sedimentary processes and basin architecture in the region. Results indicate that during the Cambrian-Ordovician, a depression basin dominated the western craton margin of the Tethys domain; progressive climatic cooling and continental glaciation led to the transition from braided fluvial systems to glaciogenic deposits. In the Silurian, rifting associated with the initial opening of the Paleo-Tethys Ocean triggered widespread marine transgression, resulting in the deposition of organic-rich shales in the Lower Silurian. Subsequent late Silurian regression facilitated the development of deltaic and fluvial systems. During the Devonian, the Hercynian orogeny profoundly reconfigured regional basin geometry, establishing a passive continental margin. Fluvial (braided and meandering) systems were progressively replaced by deltaic and shallow-marine environments; persistent bottom-water anoxia in the Late Devonian favored the accumulation and preservation of high-quality source rocks. Collectively, this work elucidates the synergistic controls exerted by tectonics, eustasy, and climate on the paleogeographic evolution of North Africa, identifies prospective hydrocarbon reservoir fairways, and provides a robust geological framework to guide future petroleum exploration.

**Key words** western Tethys domain, structural evolution, sedimentary response, Paleozoic, North Africa

**About the first authors** ZHANG Zhongmin, born in 1971, is a professor-level senior engineer, and his main research focuses on comprehensive petroleum geology research and hydrocarbon exploration. E-mail: zzm.syky@sinopec.com. SONG Yiting, born in 2000, is currently engaged in sedimentary research. E-mail: 18740779689@163.com.

**About the corresponding author** 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: baozhid@cup.edu.cn.

## 0 引言

特提斯构造域西段油气资源极其丰富,是世界油气勘探开发的重点区域之一(甘克文, 2000; 鲍志东等, 2024)。虽然特提斯域西段北非地区油气开采不断深入,但北非地区仍面临诸多涉及油气勘探与开发评价的问题。例如,特提斯洋的开合控制古地貌特征及盆地发育类型,其开合阶段对古生代地貌特征的控制作用尚不明晰;虽然国内外学者通过对北非地区的研究,初步建立了部分盆地的层序地层格架与沉积模式(宋成鹏, 2013; 吕雪雁等,

2024),但因多期构造叠加和勘探资料限制,对北非地区层序内沉积体系的发育类型、具体沉积相带如何划分及如何展布的认识仍不系统,对区域岩相古地理与有利储集层分布特征的认识仍有不足。本研究围绕特提斯构造域西段北非西部盆地及相关地区的岩相古地理特征以及储集层有利区分布展开,在前人研究的基础上,系统厘清研究区的层序地层格架,并对研究区内寒武—泥盆纪的岩相古地理特征进行刻画,确定古生代的古地理特征,揭示有利区分布,为北非地区优质勘探目标的确定提供重要依据。

### 1 区域地质概况

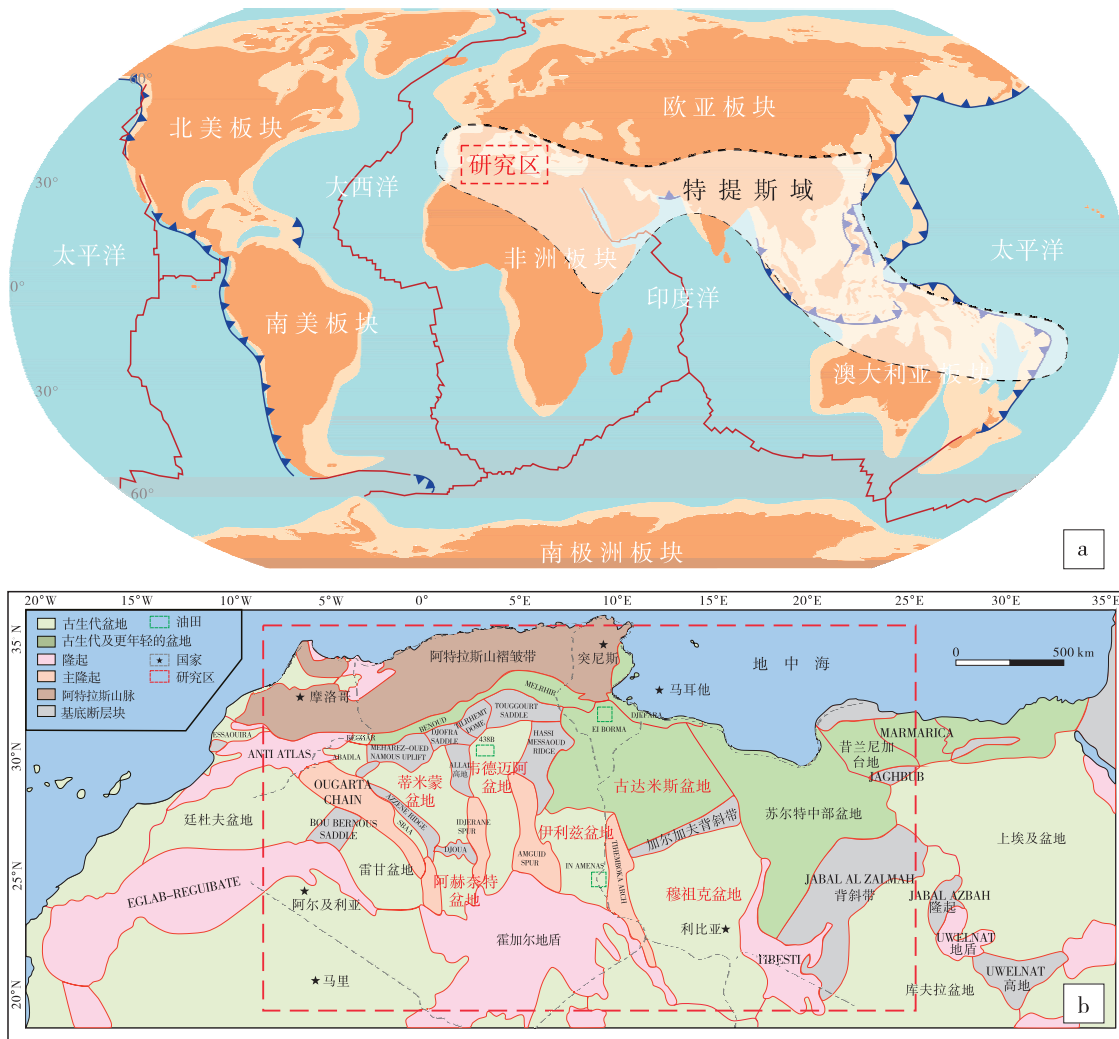
特提斯域发育的特提斯洋为地史中位于劳亚大陆与冈瓦纳大陆之间向东敞开的三角形大洋。根据特提斯洋的扩张与闭合时限，将其划分为原特提斯洋、古特提斯洋、新特提斯洋 3 个演化阶段。特提斯洋开合形成的特提斯构造域横跨非洲与欧亚大陆，西起欧洲与北非，向东南直达澳大利亚东北部。其中研究区北非位于特提斯域西段(图 1-a)。

北非地区西邻大西洋，北邻地中海，东部与阿拉伯板块以红海裂谷相隔，最南部为西非克拉通和霍加尔地盾，自西向东依次为西北缘的阿特拉斯褶皱带、中西部的撒哈拉地台克拉通盆地发育区以及东部沿海裂谷盆地发育区 3 个构造单元 (Askri *et al.*, 1995; craig *et al.*, 2008; Hallett and Clark-

Lowes, 2016; perron *et al.*, 2018) (图 1-b)。北非地区在寒武纪继承了泛非运动构造基底，整体构造高差较小；晚奥陶世—早志留世经历最大冰川期；晚志留世受加里东运动影响，陆内盆地在东西向挤压作用下形成一系列北东—南西向或近南北向隆起；泥盆纪早期海平面继续下降，至泥盆纪晚期海平面快速上升，形成第 2 期区域性海泛面；石炭纪开始进入隆起抬升阶段，在晚石炭世劳亚大陆与冈瓦纳大陆碰撞形成海西造山运动，北非陆内盆地形成大量近北东—南西或东西向隆起，陆块整体抬升使盆地大范围遭受剥蚀。

### 2 特提斯构造演化

北非地区位于特提斯域西段，其寒武纪—泥盆



a—特提斯域以及北非地区位置；b—研究区构造单元分布

图 1 北非地区地质背景图

Fig. 1 Geological background map of North Africa

纪主要受控于原—古特提斯洋演化的影响。

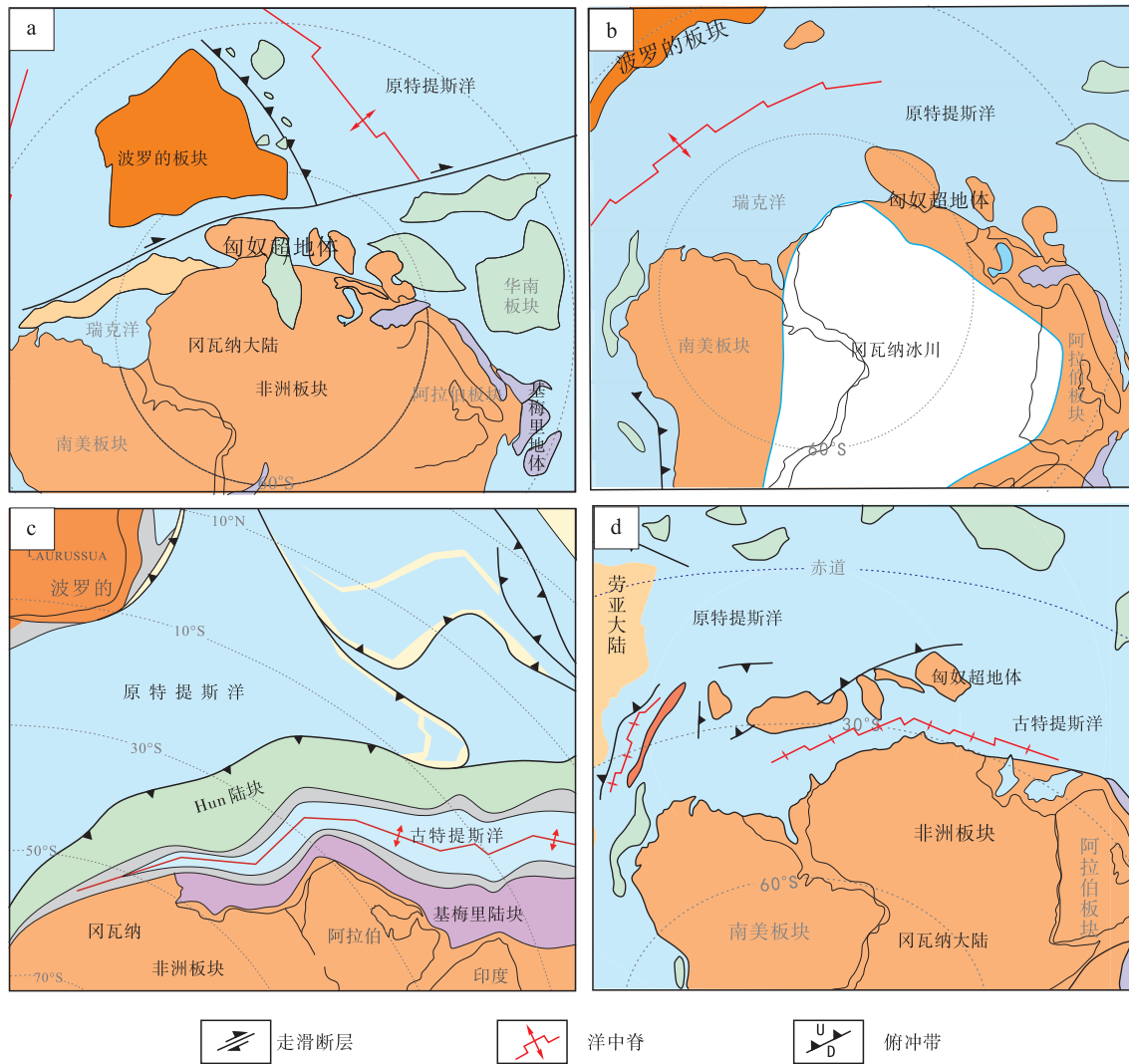
### 2.1 原特提斯洋

新元古代罗迪尼亚超大陆裂解，劳伦、波罗的和西伯利亚等块体脱离大陆，剩下的块体构成冈瓦纳大陆。早古生代，冈瓦纳与劳亚古大陆体系之间的大洋体系称为原特提斯洋 (van Staal and Barr, 2012)。随着阿瓦隆尼亚地体北移，其后缘拉张形成原特提斯洋并不断扩大。阿瓦隆尼亚地体与波罗的大陆碰撞，导致 Tornquist 洋关闭并形成 Thor 缝合带 (Jiang *et al.*, 2017)。早古生代末—晚古生代初，劳伦、波罗的等陆块拼贴形成劳俄古陆，原特提斯洋达鼎盛 (图 2-a)。此时冈瓦纳大陆位于原特提斯洋南侧，北非地区的前寒武纪结晶基底形成

于泛非构造运动，在早寒武世，北非受造山期后伸展作用影响发育局部裂陷及岩浆活动，整体处于克拉通下的张性构造背景中，大型走滑断裂导致北非部分地区发生裂陷作用和拗陷作用，分别发育克拉通内裂谷及克拉通内拗陷盆地，沉积的寒武系是冈瓦纳基底形成后接受的第 1 套沉积，并且因受到海侵作用，以海相沉积为主。

### 2.2 古特提斯洋

中—晚奥陶世，原特提斯洋俯冲消亡，冈瓦纳大陆北缘形成主动大陆边缘及沟弧盆体系；Hun 超地体开始裂离，古特提斯洋发育 (图 2-b)。志留纪初期，原特提斯洋萎缩，冈瓦纳北缘转为被动大陆边缘；Hun 超地体逐步裂解，古特提斯洋扩张，



a—寒武纪；b—奥陶纪；c—志留纪；d—泥盆纪

图 2 特提斯洋构造演化 (据 Ruban, 2007; 有修改)

Fig. 2 Tectonic evolution map of Tethys Ocean (modified from Ruban, 2007)

原特提斯洋最终闭合(图 2-c)。非洲板块向南极高纬度漂移, 奥陶纪晚期发育冰川。中志留世—泥盆纪, 北非北部转为克拉通边缘伸展背景, 沉积范围南扩; 加里东运动局部挤压, 但古特提斯洋扩张主导克拉通边缘—内拗陷沉积格局(图 2-d)。

在 2 期特提斯演化下, 北非地区盆地的沉积序列记录了该区域早古生代古特提斯裂陷、晚古生代隆升剥蚀、中生代新特提斯张裂以及新生代构造反转的“两期裂谷、挤压反转”构造演化特征。此演化过程使得研究区内的叠合盆地具有“南北分异、东西分区”的构造格局, 经历了海相—冰川—陆相的沉积环境转变, 并且沉积体继承原始展布形态, 自南向北呈楔形减薄(贾承造, 2001)。

### 3 层序地层特征

受原、古特提斯洋构造演化的影响, 北非地区在寒武纪发育冈瓦纳超级周期层序, 基于前人对北非地区层序划分方案, 根据岩性组合变化、测井曲线突变现象以及地震反射特征, 对寒武纪至泥盆纪地层进行层序界面识别以及层序划分, 共识别出  $SQ_1^1$ 、 $SQ_1^2$ 、 $SQ_1^3$  共 3 个一级层序界面(图 3)：

1)  $SQ_1^1$  界面：为泛非造山运动末期构造抬升所形成的区域性角度不整合面, 界面处发育厚层的铝土矿风化壳, 寒武系顶部以白云岩为主, 具有硬石膏充填现象, 存在 Fuongian 阶三叶虫化石; 界面之上为奥陶系石英砂岩及底砾岩, 特马豆克阶笔石类生物首次出现, 为岩性突变以及生物地层间断界面, 并且在该界面处还存在碳同位素 SPICE 事件

末期的负偏移以及稀土元素 Ce 负异常, 指示陆表处于暴露氧化条件 (Brown, 2011)。地震剖面上该界面表现为强振幅连续反射轴, 寒武系平行反射结构被奥陶系低角度前积反射截切。

2)  $SQ_1^2$  界面：为晚奥陶世赫南特期冰川消融后海平面快速上升及海西运动早期构造隆升所形成的不整合界面。下伏奥陶系顶部的冰山—海相杂砾岩, 其上为志留系底部海相页岩, 界面处存在古喀斯特溶蚀面或铁质结壳以及含菱铁矿结核的古土壤层。存在笔石动物群, 且界面下伏奥陶系普遍缺失上赫南特阶笔石带, 形成生物地层间断 (Boote, 1998)。岩心可见志留系黑色页岩直接覆盖奥陶系含落石角砾的冰海相泥岩 (Ghienne *et al.*, 2014)。

3)  $SQ_1^3$  界面：为海西运动早期的基底抬升所形成的区域性不整合界面。该界面之下为志留系顶部的海相页岩, 含笔石, 泥盆系底部为陆棚相石英砂岩, 主要存在陆生植物化石, 发育铁质风化壳或喀斯特溶蚀面, 指示沉积环境逐渐向陆相转变 (Fekirine and Abdallah, 1998); 地震剖面上该界面表现为志留系高频连续反射被泥盆系斜交前积反射削截, 测井曲线中 GR 值由志留系页岩突降为泥盆系砂岩 (Lüning *et al.*, 2003)。

在一级层序界面划分的基础上, 根据风化壳、古喀斯特岩溶面、岩性与测井突变处、地震同相轴削截一下超为标志, 进一步识别出 13 个二级层序界面:  $Sq_1^1$  为下寒武统顶部风化面, 地震剖面上见弱振幅反射的局部削截, 测井曲线中 GR 值由高值突降为低值 (Sahoo *et al.*, 2016);  $Sq_1^2$  是寒武统顶

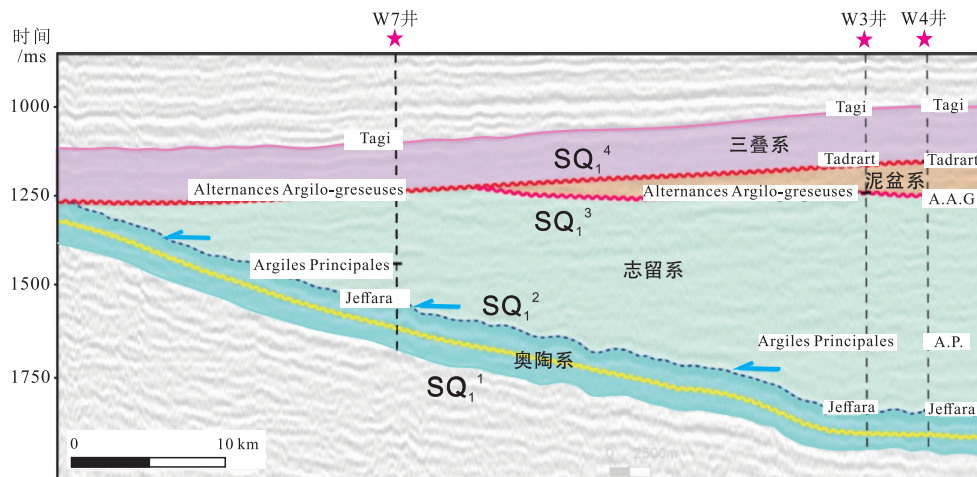


图 3 北非地区一级层序地震界面划分示意图 (据 Zrelli *et al.*, 2024; 有修改)

Fig. 3 Schematic division of first-order sequence seismic interfaces in North Africa (modified from Zrelli *et al.*, 2024)

部白云石化灰岩与下奥陶统底部粗砂岩的突变界面，存在上寒武统前积反射被下奥陶统平行亚平行反射削截现象，局部可见古河谷充填地震相 (Hirst, 2015);  $Sq_2^3$  是上奥陶统顶部海相页岩与砂岩转化层序界面，在地震剖面见前积反射终止或上超充填，GR 值由高值页岩向低值砂岩突变 (图 4)。  $Sq_2^4$  为下志留统海相页岩与砂岩转化界面处，为早志留纪最大海泛面。GR 值从富有机质页岩高值突降至砂岩段的低值;  $Sq_2^5-Sq_2^7$  都为受加里东运动构造隆升而形成的不整合界面，在 GR 曲线上存在突变现象;  $Sq_2^8$  层序界面位于上志留统下部，为浅海相泥灰岩—海陆过渡相粉砂岩转化界面，GR 曲线由高值向低值突变;  $Sq_2^9$  层序界面位于上志留统上部，岩性呈现泥岩—粗砂岩—细砂岩—泥岩的组合样式，指示在该界面形成时水体经历由深变浅、再加深的过程 (图 5);  $Sq_2^{10}-Sq_2^{13}$  层序界面位于泥盆系中，皆为岩性以及 GR 测井曲线突变界面 (图 6)。

利用层序界面，对北非地区寒武系至泥盆系进

行层序划分，共划分出 3 个一级层序和 15 个二级层序。通过分析可知：在寒武纪海平面逐渐下降时期，开始发育海陆过渡相以及陆相沉积。至奥陶纪，冰川相发育带来持续的海平面下降，此时盆地内广泛发育冰川相沉积，河道发育规模相对减小。志留系则反映出显著的海侵—海退周期， $Sq_5$  为海侵体系域，发育最大海侵面，并伴随海相页岩和泥岩的沉积；随着海平面的下降， $Sq_6-Sq_8$  显示出盆地内向北进积的沉积过程，在中志留世，沉积体系逐渐向辫状河三角洲沉积过渡，晚志留世海退进一步增强，陆相沉积占主要地位，并且在凯尔特造山运动的影响下被抬升并遭受侵蚀；晚志留世  $Sq_9-Sq_{11}$  总体上表现为海退层序，沉积粒度逐渐变细，反映水动力减弱。早泥盆世  $Sq_{12}-Sq_{13}$  以海退作用为主;  $Sq_{14}$  为中泥盆世时期，由于海平面持续上升形成三角洲沉积体系，河道砂体厚度与分布范围缩小；在  $Sq_{15}$  沉积时期，海平面进一步上升，研究区以浅海相沉积为主 (图 4 至图 6)。

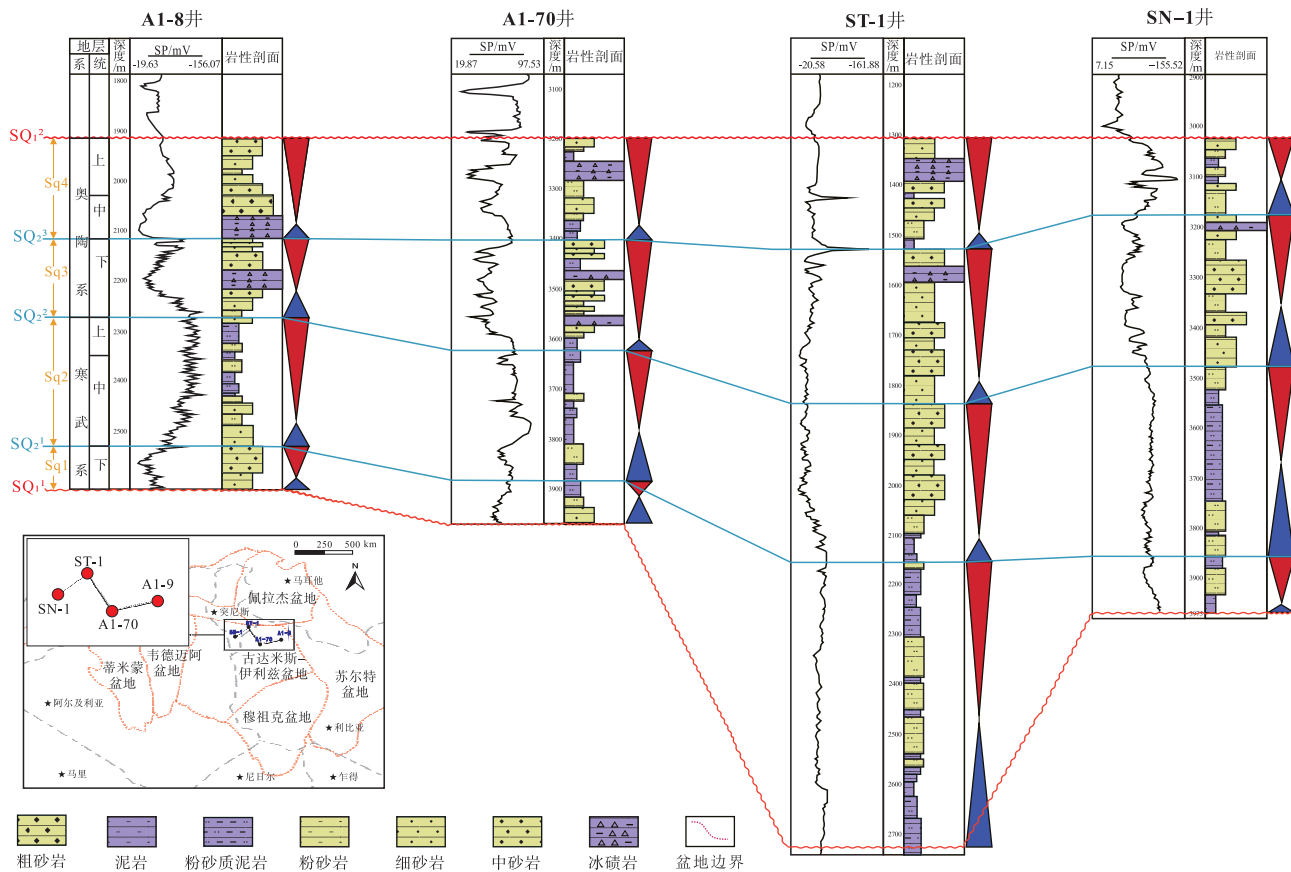


图 4 北非地区寒武系—奥陶系层序界面划分

Fig. 4 Division of the Cambrian-Ordovician sequence boundaries in North Africa

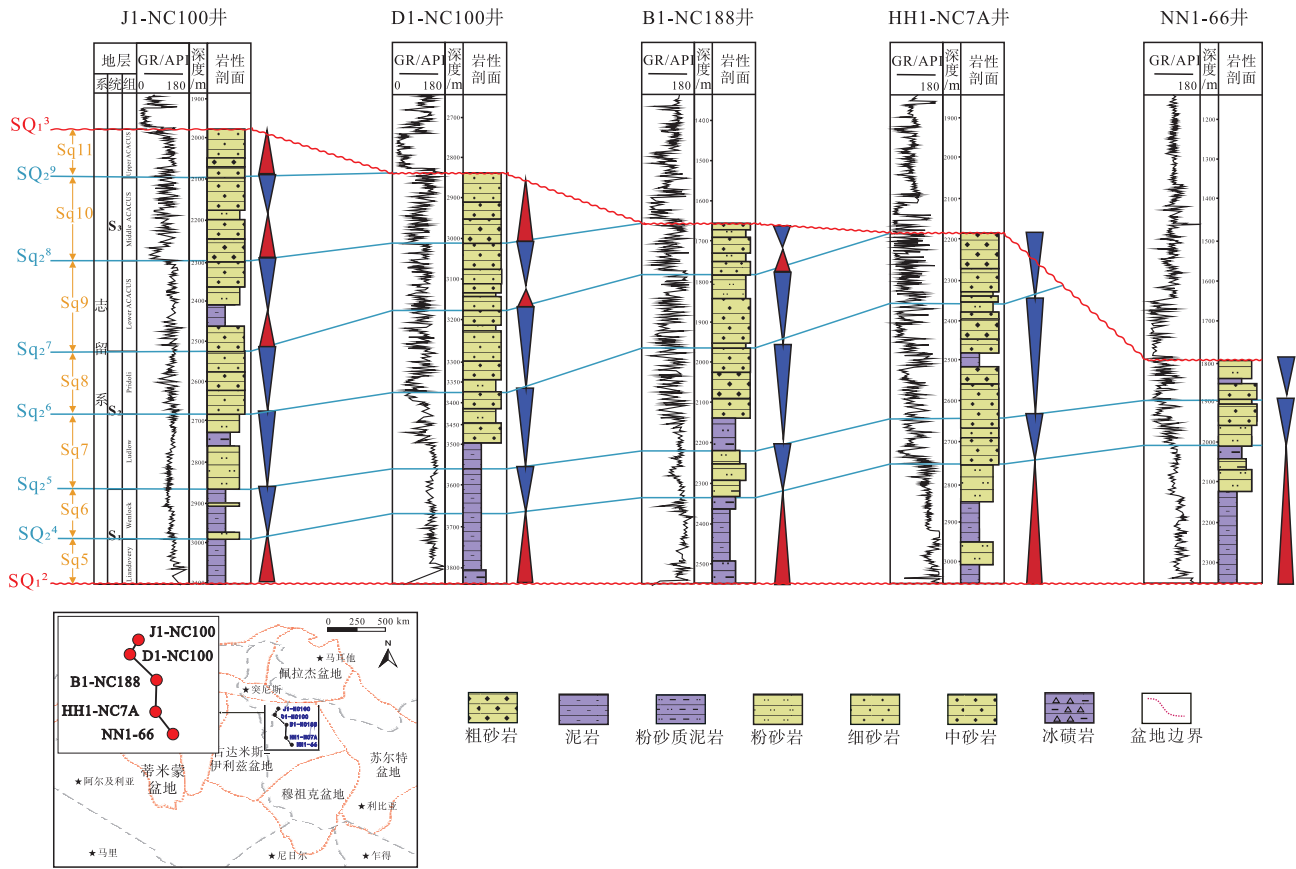


图 5 北非地区志留系层序界面划分

Fig. 5 Division of the Silurian sequence boundaries in North Africa

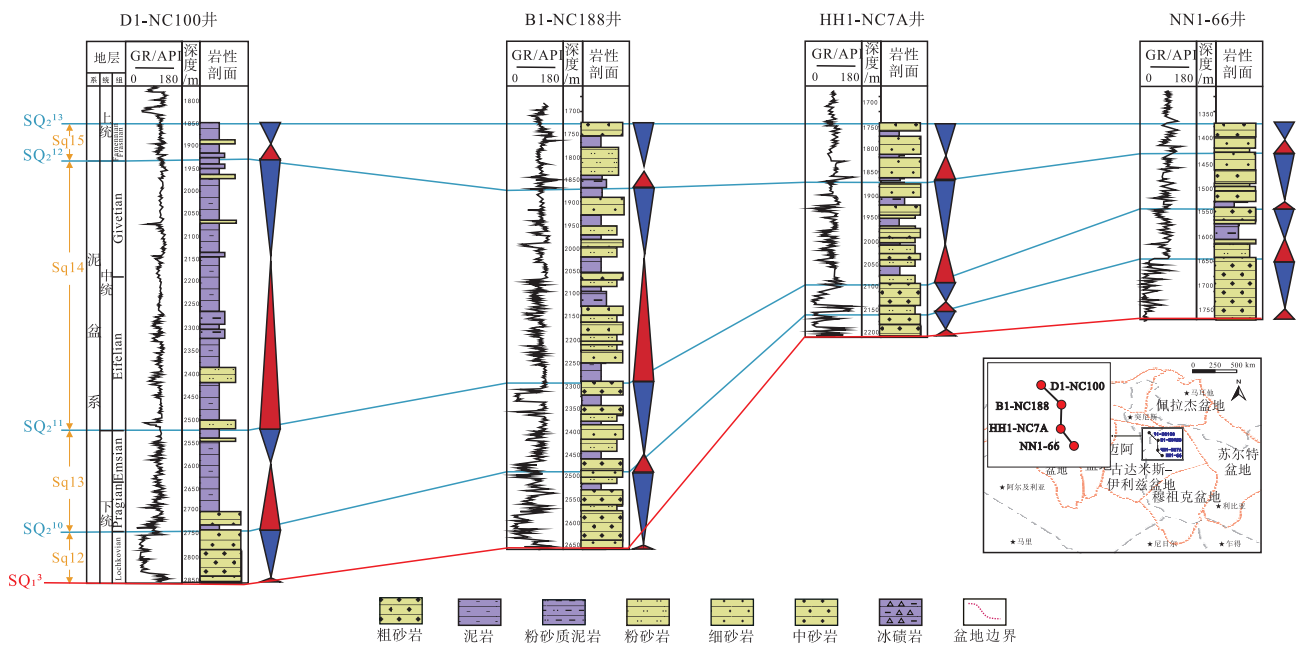


图 6 北非地区泥盆系层序界面划分

Fig. 6 Division of the Devonian sequence boundaries in North Africa

## 4 沉积相特征

本次研究选取韦德迈阿、伊利兹、古达米斯、穆祖克、蒂米蒙等含油气盆地的相关地质资料,分析特提斯构造演化背景下的北非地区沉积响应。

### 4.1 岩性特征

北非地区主要盆地的砂岩均属中—高成熟度石英砂岩,孔隙演化受压实、石英加大及胶结物类型显著影响;长石含量普遍偏低,指示物源区母岩以基性—中性火成岩为主。胶结物主要以石英次生加大、碳酸盐胶结和黏土矿物为主,而岩屑含量在区域分布上具有显著差异,表明研究区内不同区域构造背景具有差异性,并且存在不同的物源供给(表 1)。

在伊利兹盆地东南部,寒武纪地层河流相粗砂岩之上覆有奥陶纪冰期沉积层(Hirst, 2015),并且发育冰川侵蚀面,伊利兹盆地下志留统 Argiles a Graptolithes、Tanezzuft 组和上泥盆统弗拉阶皆发育页岩,其中,泥盆系烃源岩为一套浅至深灰色泥质、微晶和隐晶质、含化石的白云质石灰岩,夹深灰色、黑色或深棕色页岩。在古达米斯盆地志留系阿卡库斯组岩性由厚层砂岩向薄层砂岩、页岩转变,指示沉积环境从浅水高能区向深水低能区转变(Aissaoui, 2016);在乌德迈阿盆地 438B 区块的南部和东部地区,其地层底部由中至粗粒砂岩构成,具有层理和透镜体层理,而上部则过渡为细粒砂岩,具有平行层理和波痕交错层理。这些特征指示潮汐通道快速迁移。在韦德迈阿盆地内,下志留统 Tanezzuft 组发育一套深灰色至灰黑色富有机质放射性页岩;在古达米斯盆地,志留系 Acacus 组烃源岩主要以深黑色云母页岩和粉砂质页岩组成,局部夹有灰白色薄层硅质细砂岩,底部为厚层含化石碳酸盐岩层及含黄铁矿的深黑色放射性泥岩。上泥盆统 Aouinet Ouenine 群烃源岩主要为与碳酸盐

岩伴生的褐色至灰黑色页岩,实际上是黑色页岩与灰岩的交替,而黑色页岩具有放射性。

穆祖克盆地奥陶系—泥盆系的岩石结构整体反映出冰川、河流—湖泊及海侵体系的交互控制。晚奥陶世冰川沉积物具有鞘状褶皱、剪切面及台阶裂隙等冰下构造,显示强烈冰流作用;河流与三角洲沉积砂岩则普遍表现为向上变细或变粗序列,发育槽状、平行及波状交错层理,局部见爬升沙丘和块状重力流构造,支撑方式以颗粒支撑为主。进入中奥陶统 Hawaz 组,常具水平层理、波纹层理及大尺度交错层理,局部生物扰动强烈。生物遗迹织构亦构成重要的结构特征,高能环境中以 Skolithos 管状生痕为主,低能环境则多见 Cruziana 相的爬行、摄食与休息迹。古达米斯盆地泥盆系硅质碎屑岩层序的岩石结构在下泥盆统 Tadrart 组中表现为以粗—中粒砂岩为主,夹砾质物,颗粒分选较差、成熟度低,多呈交错层理与块状结构的特点,并且普遍为颗粒支撑,接触以点—线为主,显示高能辫状河环境。而在中—上泥盆统 Aouinet Ouenine 与 Tahara 组中潮汐沙坝砂岩表现为中—细粒砂岩,分选中等,具波状层理与泥披覆的特点。

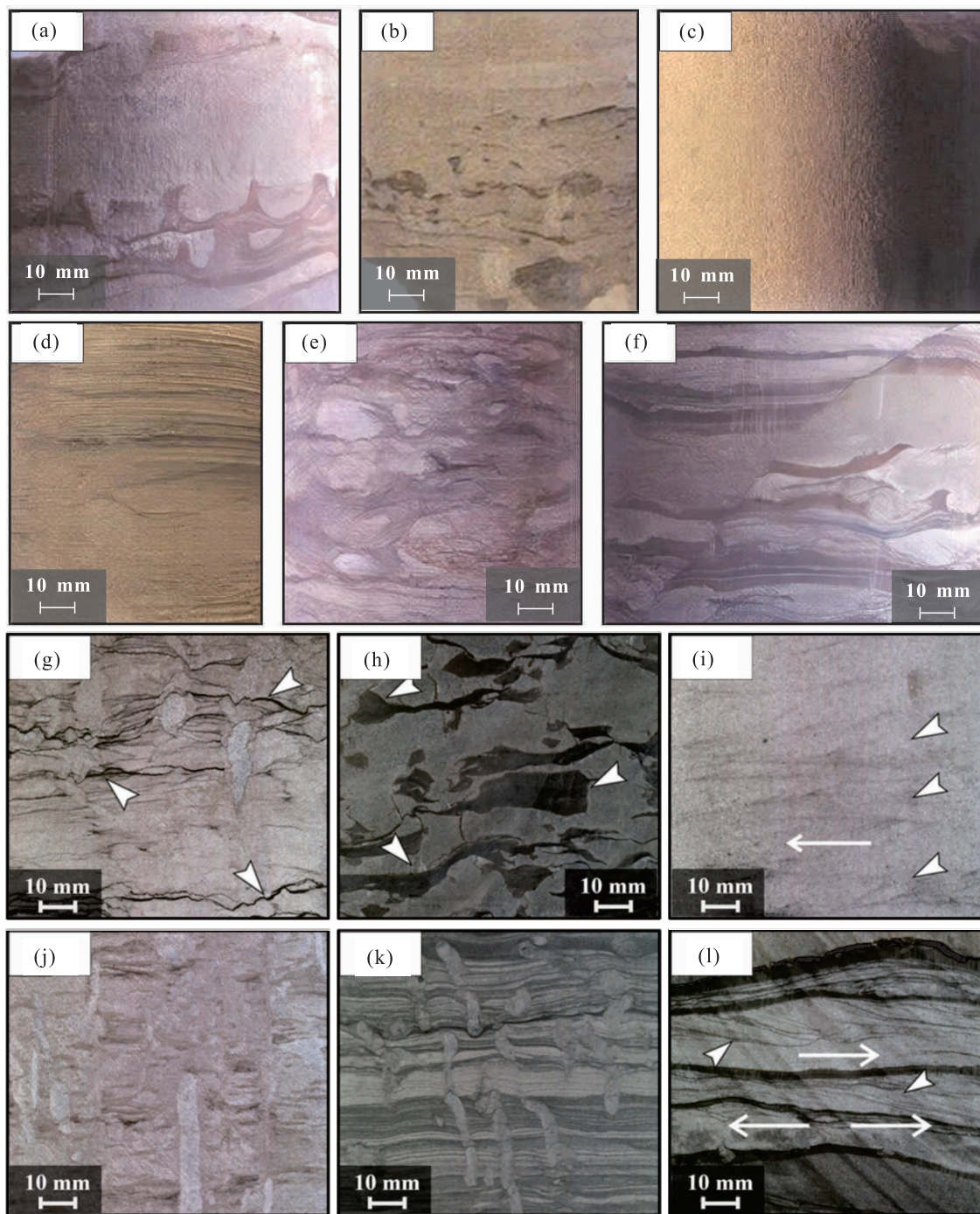
### 4.2 沉积构造特征

研究区常见辫状河及曲流河河道底冲刷、重荷模等构造。伊利兹盆地 Zarzaitine 油田 F4 层以重力流沉积为主。广泛发育火焰状构造、碟状构造、砂枕、砂球构造及小尺度滑塌断层(图 7-a 至图 7-f),反映地层液化与不稳定性;底面常见重荷模。常见平行层理、板状及楔状交错层理,局部见透镜状、波状层理,显示水动力周期性波动。穆祖克盆地 Hawaz 组河道砂体具侵蚀底界,内部发育平行层理、中小型板状与槽状交错层理、波状层理,局部见前积层与绿色泥岩披覆,显示受潮汐影响。砂体多期叠置呈透镜状,局部具曲流特征。发育向上

表 1 北非五大盆地砂岩矿物学特征对比

Table 1 Comparison of mineralogical characteristics of sandstones in five major basins in North Africa

盆地	石英含量/%	长石含量/%	岩屑含量/%	胶结物类型与特征
韦德迈阿	60~70	<5	>5	高岭石、伊利石+碳酸盐胶结,局部铁质胶结
伊利兹	65~75	2~5	3~5	黏土与碳酸盐矿物并存,局部铁质胶结
古达米斯	64~67	含量极低	≈0	胶结物以高岭石(最高可达 36%)、方解石、少量绿泥石及碳酸盐矿物为主,局部见少量黄铁矿
穆祖克	60~70	<3	<3	高岭石、伊利石发育,伴少量黄铁矿,碳酸盐矿物局部发育
蒂米蒙	62~72	0~0.6	0~0.3	石英胶结为主,少量碳酸盐矿物;局部溶蚀明显



a—火焰构造, ZR80 井, 1272.45 ~ 1272.55 m; b—递变层理, ZR140 井, 1484.25 ~ 1484.4 m; c—块状层理, ZR140 井, 1487.35 ~ 1487.5 m; d—碟状构造, ZR140 井, 1474.1 ~ 1474.3 m; e—砂枕构造, ZR140 井, 1440.6 ~ 1440.7 m; f—重力断层, ZR140 井, 1492.3 ~ 1492.4 m; g—潮纹状层理, E 井, HWFA1 砂组; h—河道内撕裂泥砾, F 井, HWFA2 砂组; i—水流波纹, C 井, HWFA2 砂组; j—生物扰动, E 井, HWFA5 砂组; k—生物扰动, D 井, HWFA6 砂组; l—复合流波纹, D 井, HWFA7 砂组

图 7 北非地区伊利兹盆地沉积构造照片

Fig. 7 Core photographs showing sedimentary structures from Eliz Basin in North Africa

变粗的韵律层, 与湖相页岩互层, 伴有沉积变形, 指示洪泛事件; 发育古土壤, 反映长期暴露的沉积环境。整体表现为河流—潮汐—滨岸多动力体系叠

加(图 7-g 至图 7-l)。

韦德迈阿盆地自下而上从辫状河高能环境向曲流河低能环境过渡; 下部发育大型交错层理、正粒

序、侵蚀底界及滞留层，为强水动力快速堆积；向上粒度变细，发育中小交错层理、波状及透镜状层理，指示曲流河—决口扇沉积；顶部细砂岩与粉砂质泥岩互层，见平行层理、滑塌褶皱及火焰状构造，说明水体能量降低。古达米斯盆地泥盆统 Tadrart 组河流沉积，发育交错层理、正粒序、多个冲刷面，为辫状河道充填；废弃河道向上变细，具平行层理及泥质夹层。中—上泥盆统 Aouinet Ouenine 组发育水平及波状层理、豆状层理、泥披覆等，指示潮汐环境。Tahara 组见褶皱、荷重、收缩裂缝等软沉积变形，半咸水扰动，指示前三三角洲—三角洲前缘；兼有交错层理、侵蚀底界及同生角砾，指示河口坝及水下分流河道。整体沉积构造从高能河流、潮控浅海到三角洲前缘叠加。蒂米蒙盆地砂岩发育平行层理、槽状及板状交错层理、波痕，反映河流—三角洲及滨浅海作用；部分地层具风暴沉积，南部见浊积岩及 Bouma 序列，为重力流事件，滑塌、荷重、火焰等软沉积变形广泛；碳酸盐岩中见鲕粒、藻层理，台地边缘建造。总体反映了河流输入、潮汐波浪、风暴与深水重力流的综合影响。

### 4.3 相带展布

通过对研究区内岩石类型、结构与沉积构造特征分析表明，研究区在特提斯构造演化背景下主要发育冰川相、辫状河三角洲相、滨岸相、局限台地相以及浅海陆棚相等 5 种沉积相类型。细分为 10 个沉积亚相以及 17 个沉积微相(表 2)。

在单井沉积相划分的基础上，完成连井相分析，并探究北非地区沉积相带的展布特征。基于特提斯洋开启次序，选取伊利兹盆地东西向 TNB-1 井至 TNBSW-1 井连井剖面分析显示(图 8)，寒武系整体为辫状河沉积环境，体现出河道的快速摆动。早奥陶世，由于非洲板块向南极漂移，导致辫状河分布范围逐渐缩小，并开始发育冰川相。

在古达米斯 J1-NC100 至 NN1-66 连井剖面中，可见志留系海相沉积、海陆过渡相沉积与陆相沉积(图 9)。下志留统沉积时期，由于研究区在晚奥陶世大片冰盖的融化，使得海平面上升，故而在下志留统沉积时期整体为浅海相沉积。中志留统主由于海平面下降逐渐变为海陆过渡的辫状河三角洲相，在 B1-NC188 以及 HH1-NC7A 井所在区域水

下分流河道十分发育，并且河道发育程度向 J1-NC100 井所在方向递减。上志留统由海陆过渡相转变为陆相辫状河沉积，河道延伸距离较远，在 J1-NC100 至 HH1-NC7A 井所在区域河道较为发育，向 NN1-66 井所在地区逐渐被泛滥平原所取代。

在南北向展布的 D1-NC100 井至 NN1-66 井连井剖面中，泥盆系沉积环境与志留系类似，发育辫状河沉积、辫状河三角洲沉积与浅海沉积(图 10)。在中下泥盆统 D1-NC100 井、B1-NC100 井、HH1-NC7A 井所在区域辫状河最为发育，向 NN1-66 井所在区域逐渐转变为曲流河。在中—晚泥盆世，海平面逐渐上升，水体由南向北加深，由此导致 D1-NC100 井所在地区开始发育浅海相，向北过渡为辫状河三角洲。

## 5 岩相古地理

在对研究区特提斯洋构造演化及其控制下的沉积体系的岩性特征、沉积环境演化及沉积相空间展布规律研究的基础上，利用研究区内的钻井岩心与录井数据，在连井沉积相分析的格架下，以相带展布为约束，绘制北非地区岩相古地理图并讨论北非地区古生代沉积响应与岩相古地理发育特征。

### 5.1 寒武纪岩相古地理

早—中寒武世，非洲板块主要位于南半球，随着阿瓦隆地体向波罗的板块漂移，并且原特提斯洋初步扩张，向北非地区方向挤压，形成活动大陆边缘；该时期物源主要来自研究区的南部以及东部，整体呈现南高北低、东高西低的构造格局，在近物源区发育冲积扇，岩性组合以砾岩—粗砂岩—薄层泥岩为主。在平原地带发育河流、湖泊以及泛滥平原。在研究区西部，河流由辫状河向北逐渐过渡为曲流河，最终形成曲流河三角洲。而中部以及东部地区的辫状河，受到地形的影响，多数直接入海或汇入内陆湖。向北水体逐渐加深，由陆相转变为滨岸沉积环境，北部则为广泛的浅海环境(图 11-a)。晚寒武世，盆地北部地区发生海侵，海平面上升，浅海范围扩大，海陆快速交替。受海平面上升的影响，古达米斯盆地西北部物源区范围缩小，湖泊范围扩大。整体仍为克拉通内凹陷盆地，发育河流相沉积，自南向北，发育辫状河—泛滥平原沉积、曲流河沉积、河控三角洲沉积、滨岸

表 2 北非地区寒武系至泥盆系沉积相类型划分

Table 2 Classification of sedimentary facies types from the Cambrian to Devonian in North Africa

沉积相	沉积亚相	沉积微相	岩性、构造特征
冰川相	冰下	底碛	致密块状砾质泥岩,砾石定向排列并且表面具有擦痕,砾石长轴平行古冰流方向
		融出碛	泥砾混杂堆积,含不规则砂质条带或冰融水渗流砂脉,岩心分选极差且结构松散
		变形碛	强烈揉皱的泥砾层,砾石定向排列,并发育微断层
	冰缘	终碛堤	厚层杂砾岩堆积而成,夹有季候泥
		侧碛	条带状砾岩夹坡积角砾,砾石长轴与冰川运动方向一致
		冰碛阜	层状砂砾岩透镜体及板状交错层理,岩心底部见冲刷面,顶部钙质胶结
冰水	蛇形丘	纯砂砾岩,砾石呈叠瓦状排列,指示古水流方向	
	冰水扇	砾岩、砂岩以及粉砂岩,呈正韵律结构,底部含冰川落石,顶部见铁锰质结核	
辫状河三角洲	平原	分支河道	以中粗砂岩为主,含砾岩滞留沉积,垂向呈间断性正韵律,发育板状/槽状交错层理及波痕
		分支河道间湾	以纹层状粉砂岩、泥岩为主,见干裂/雨痕及植物碎片
		天然堤	反韵律,具有波状层理与流水波痕
	前缘	水下分流河道	以粉砂岩为主,夹泥岩,具有冲刷面构造
		河口坝	以细砂岩、粉砂岩为主,发育槽状交错层理
		远沙坝	以粉砂岩为主,深水区为粉砂岩夹泥岩,发育槽状交错/包卷层理及虫孔
席状砂	薄层细砂岩、粉砂岩,发育交错层理		
前三角洲	深水泥页岩	暗色泥质岩与粉砂岩互层为主,富含自生海绿石矿物,具有均质/平行纹层、生物扰动构造及介形虫与双壳类生物群组合	
滨岸	前滨	/	高成熟度的石英砂岩为主,底部见含砾砂岩夹层,具有平行层理、缓倾交错层理、浪成波纹及强烈生物扰动,富含介壳碎屑
	临滨	/	泥岩、粉砂质泥岩与泥质粉砂岩组合,细粒组分增加;典型构造为水平纹层、生物扰动及潜穴
	潟湖	/	膏质白云岩、泥岩
局限台地	潮坪	/	粉晶白云岩—泥质白云岩—含膏白云岩组合、灰岩—白云质灰岩—泥灰岩组合、藻白云岩夹泥质白云岩,小型交错层理、水平纹层、波痕及潜穴扰动构造,生物化石富集
浅海陆棚	/	/	粉砂岩与泥质粉砂岩,夹薄层细砂岩;砂体具有良好分选性和磨圆度,含海绿石、鲕绿泥石等自生矿物

沉积(图 11-b)。在该阶段,研究区岩相分布呈环带状,从靠近物源区的砾岩—粗砂岩—薄层泥岩,由南向北逐渐过渡为河流相的粗砂岩—中砂岩—细砂岩组合样式以及湖泊相泥岩,再到三角洲的细砂岩—粉砂岩—粉砂质泥岩—泥岩组合样式,再到浅海相的泥岩。

### 5.2 奥陶纪岩相古地理

早—中奥陶世,北非地区仍处于被动大陆边缘,特提斯洋持续扩张,随着冈瓦纳大陆向南漂移,冰川作用加强,海平面降低,与寒武纪相比浅海面积缩减,陆相沉积向北扩展。与寒武纪相似,奥陶纪北非地区依旧以冲积扇、辫状河、河漫滩沉积、滨岸沉积和辫状河三角洲沉积为主,岩性也大致相同,不同的是,由于受塔科尼运动及加里东运动影响,研究区局部构造抬升形成多个低隆,形成新的小型物源区,因此奥陶纪冲积扇不仅沿南部物

源区呈条带展布,而在新源区的近物源区域也有发育,并且北非地区东部湖泊更加发育,成为新的沉积中心,湖泊相泥岩沉积范围扩大。研究区西部三角洲更加发育(图 12-a)。奥陶纪末遭遇最大冰期,冈瓦纳大陆大面积被冰层覆盖,物源区面积也随之缩小,冰川发育,仅在北部局部地区发育由冰川融解而形成辫状河三角洲以及滨岸沉积(图 12-b),常见冰碛物以及冰水扇相的季候纹泥。

### 5.3 志留纪岩相古地理

早—中志留世,原特提斯洋萎缩,古特提斯洋开始发育,北非地区形成被动大陆边缘盆地。板块开始向北漂移,气候逐渐转暖,冰川融化,导致海平面迅速上升,此时北非地区发生大规模海侵,形成古生界最大海泛面,泥岩十分发育,陆相沉积区缩小。与寒武纪—奥陶纪相比,志留纪北非地区物

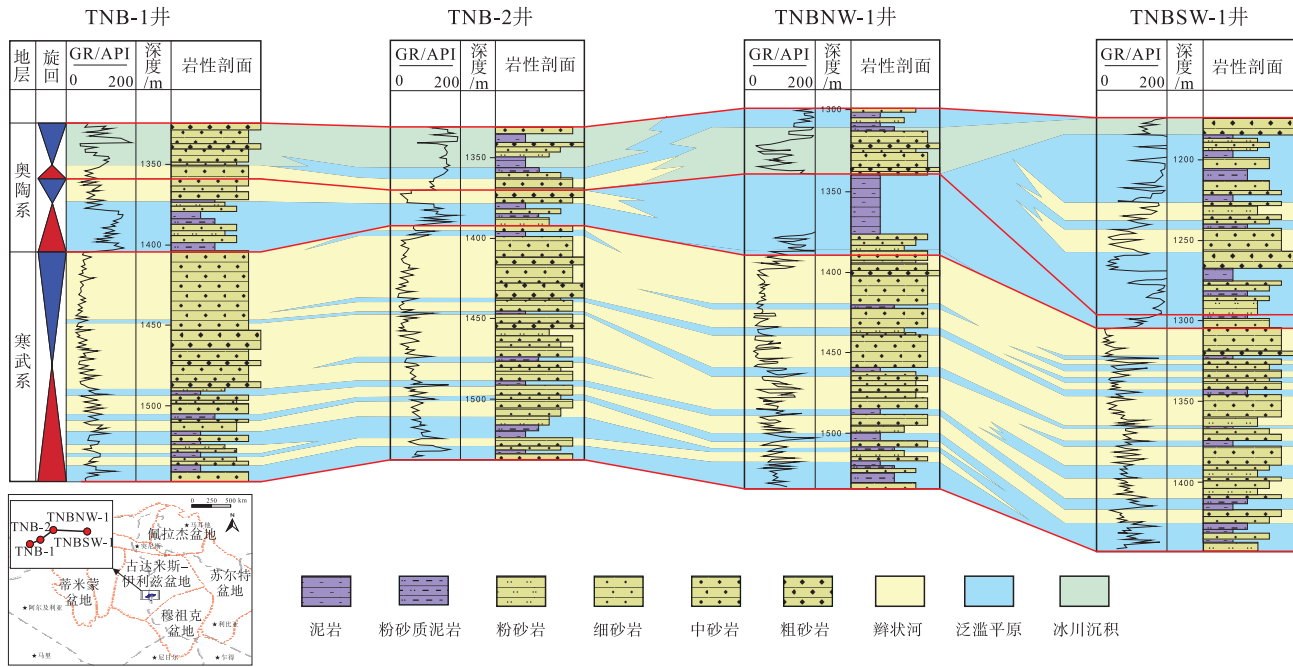


图 8 北非地区伊利兹盆地寒武系—奥陶系 TNB-1 井至 TNBSW-1 井连井剖面沉积相对比分析

Fig. 8 Comparative analysis of inter-well cross-sectional sedimentary facies of the Cambrian-Ordovician between wells TNB-1 and TNBSW-1 in Eliz Basin, North Africa

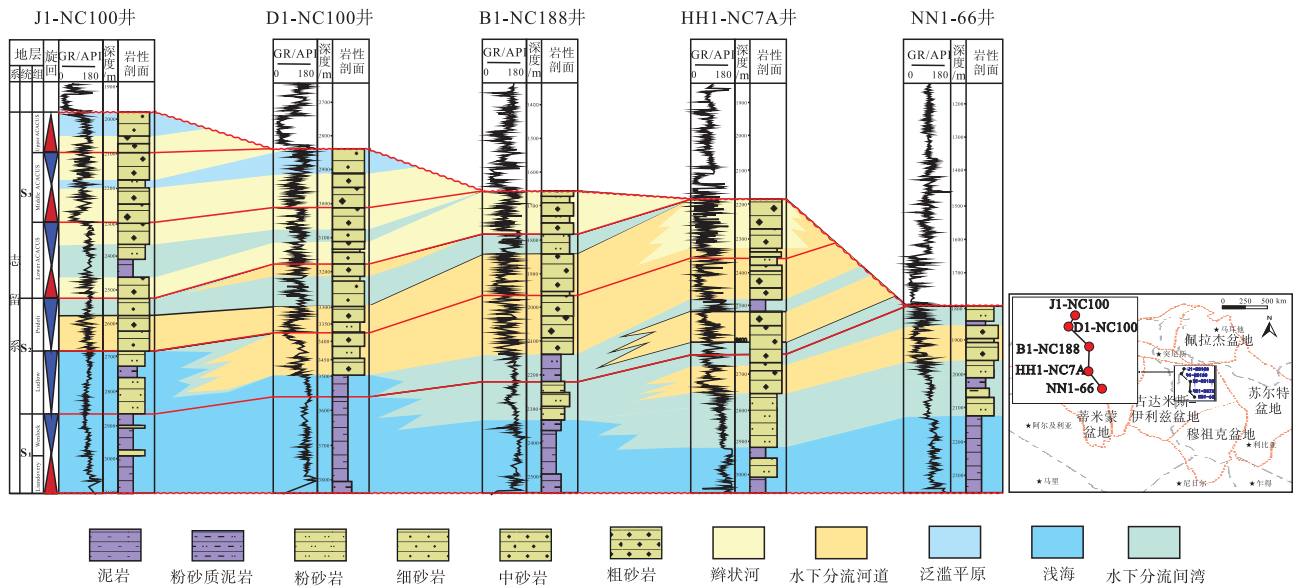


图 9 北非地区古达米斯盆地志留系 J1-NC100 井至 NN1-66 井连井剖面沉积相对比分析

Fig. 9 Comparative analysis of inter-well cross-sectional sedimentary facies of the Silurian between wells J1-NC100 and NN1-66 in Ghadames Basin, North Africa

源区依旧以南部、东部为主，西部逐渐发育新的物源区，含砾粗砂岩、砾岩围绕物源区分布。并且随着海平面上升，西部平原区辫状河流域面积减小，直接入海或形成三角洲。东部湖泊发育区域与浅海相连通，滨岸相更加发育，岩性以高成熟石英砂岩

为主(图 13-a)。晚志留世，古特提斯洋开启，海平面下降，北非地区进入沉降阶段。受加里东运动的影响，研究区东部以及西北部更加隆起，物源区面积扩大，冲积扇发育面积相比寒武、奥陶纪有所缩小，湖泊在近物源区更加发育，在平原地带发育

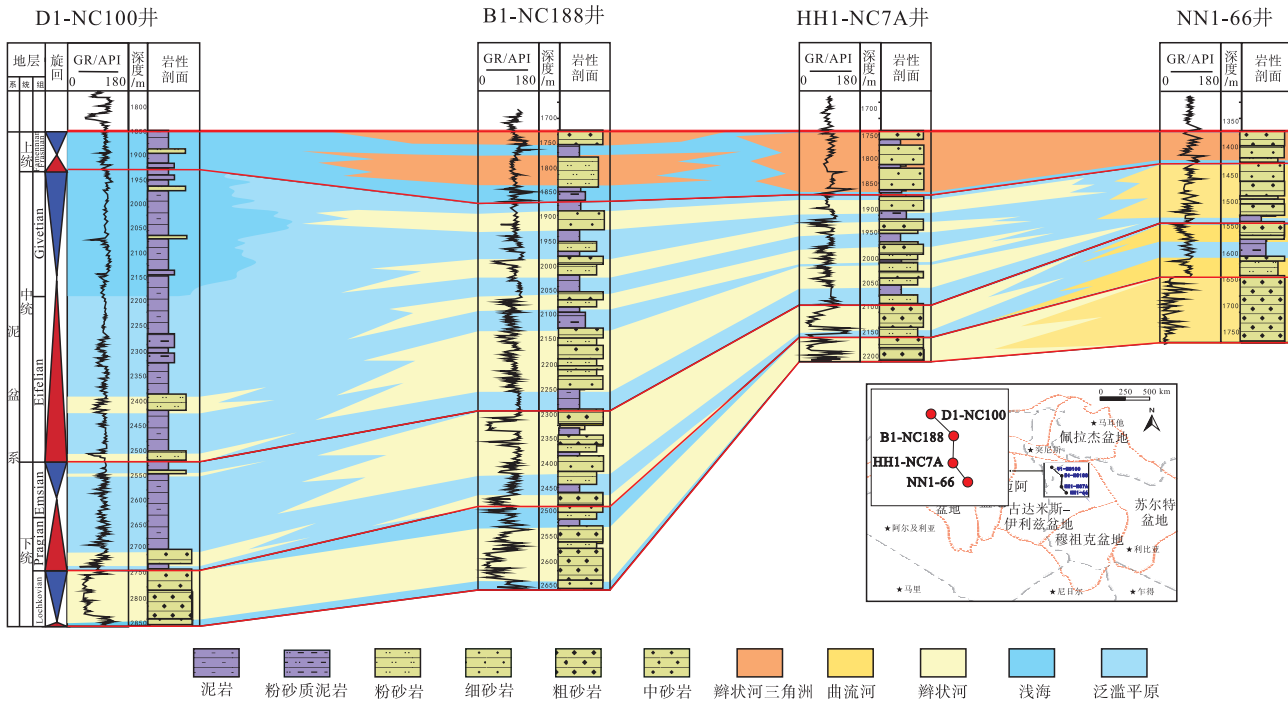
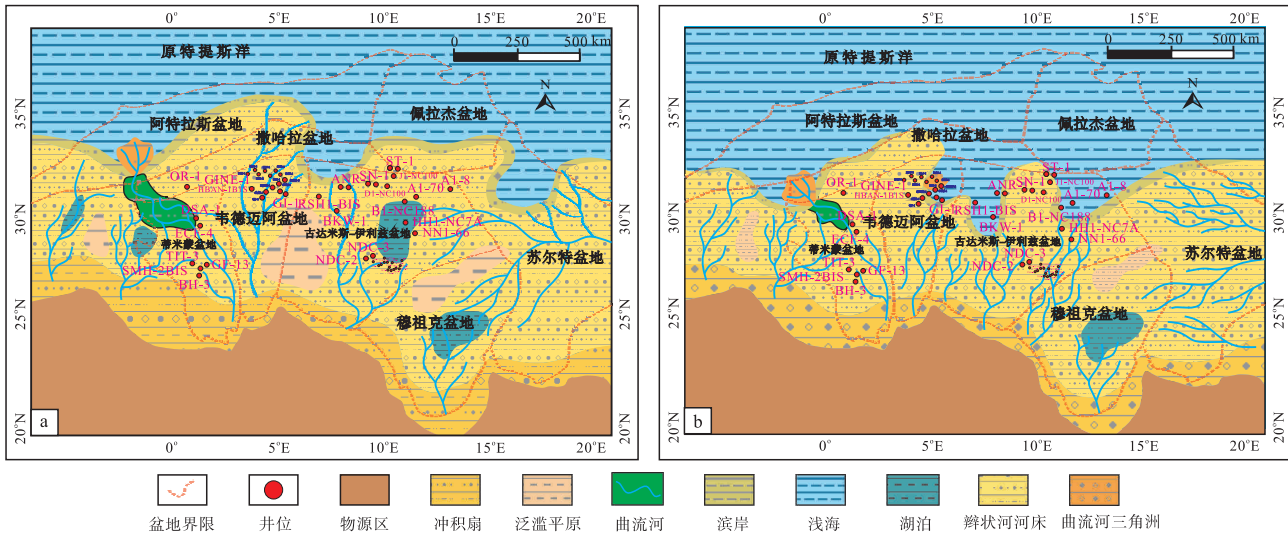


图 10 北非地区古达米斯盆地泥盆系 D1-NC100 井-NN1-66 井连井剖面沉积相对比分析

Fig. 10 Comparative analysis of inter-well cross-sectional sedimentary facies of the Devonian between wells D1-NC100 and NN1-66 in Ghadames Basin, North Africa



a—早—中寒武世岩相古地理；b—晚寒武世岩相古地理

图 11 北非地区寒武纪岩相古地理

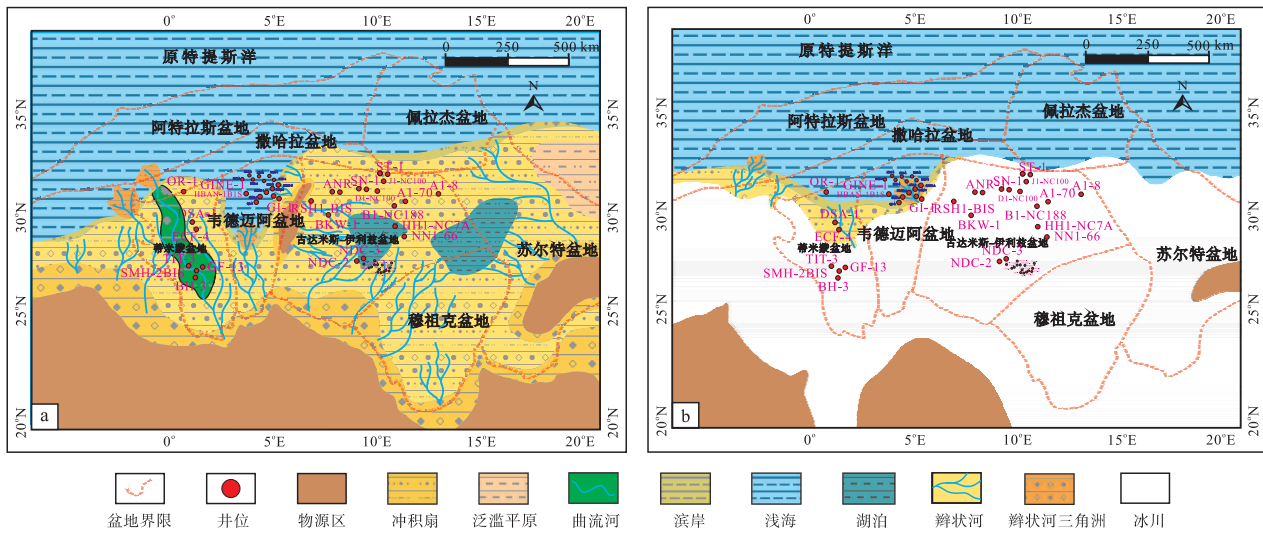
Fig. 11 Lithofacies palaeogeography of the Cambrian in North Africa

辫状河以及曲流河，并且多数河流直接入海，仅在少数地区形成辫状河或曲流河三角洲(图 13-b)。

#### 5.4 泥盆纪岩相古地理

早泥盆世古特提斯洋持续扩张，海西构造运动

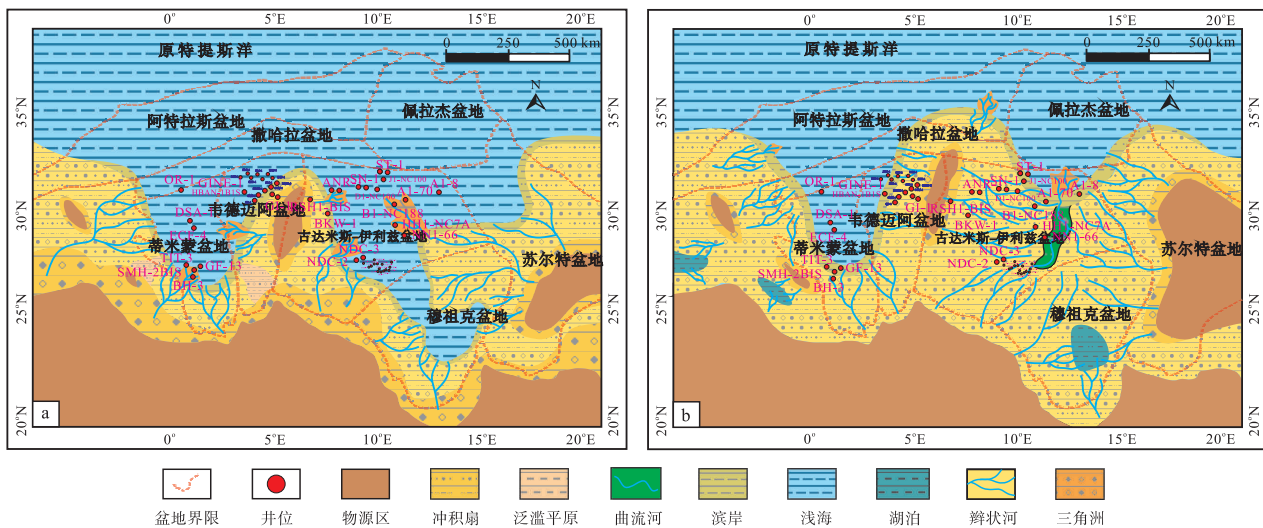
导致北非地区海平面上升，研究区受到挤压，西部以及中部的隆起进一步发育，物源区面积扩大，在盆地内形成多个沉积中心，在研究区西部的湖泊，接收南和北东方向的物源供给，使得其间一部分辫状河汇入湖泊，一部分向研究区北部延伸，形成辫



a—早—中奥陶世岩相古地理；b—晚奥陶世岩相古地理

图 12 北非地区奥陶纪岩相古地理

Fig. 12 Lithofacies palaeogeography of the Ordovician in North Africa



a—早—中志留世岩相古地理；b—晚志留世岩相古地理

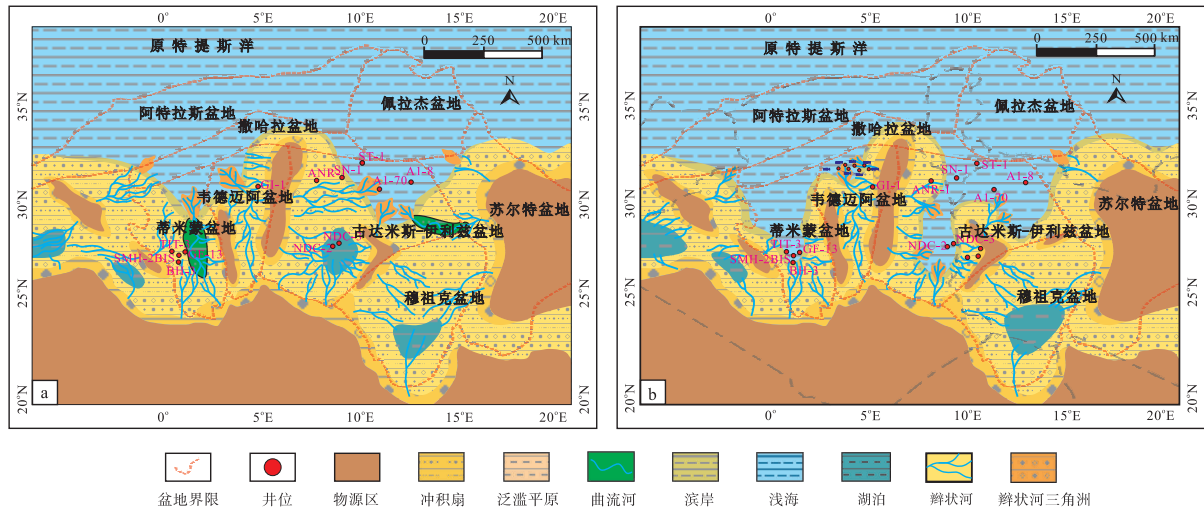
图 13 北非地区志留纪岩相古地理

Fig. 13 Lithofacies palaeogeography of the Silurian in North Africa

状河三角洲，最后汇入海洋；中部以及东部由于存在多个隆起区，导致辫状河向地势低洼区汇聚，一部分辫状河在平原区发展为曲流河，最终以曲流河三角洲汇入海洋，一部分辫状河汇聚形成内陆湖泊（图 14-a）。晚泥盆世海平面持续上升，受早期加里东运动影响，古达米斯西北部继续隆升，北部的浅海陆棚进一步发育，向南延伸，沿岸发育滨岸沉积。沉积环境与早泥盆世不同的是位于盆地中部的古达米斯—伊利兹盆地由湖泊相转变为浅海相，沿岸发育多个小型的辫状河三角洲（图 14-b）。

## 6 储集层发育有利区分布

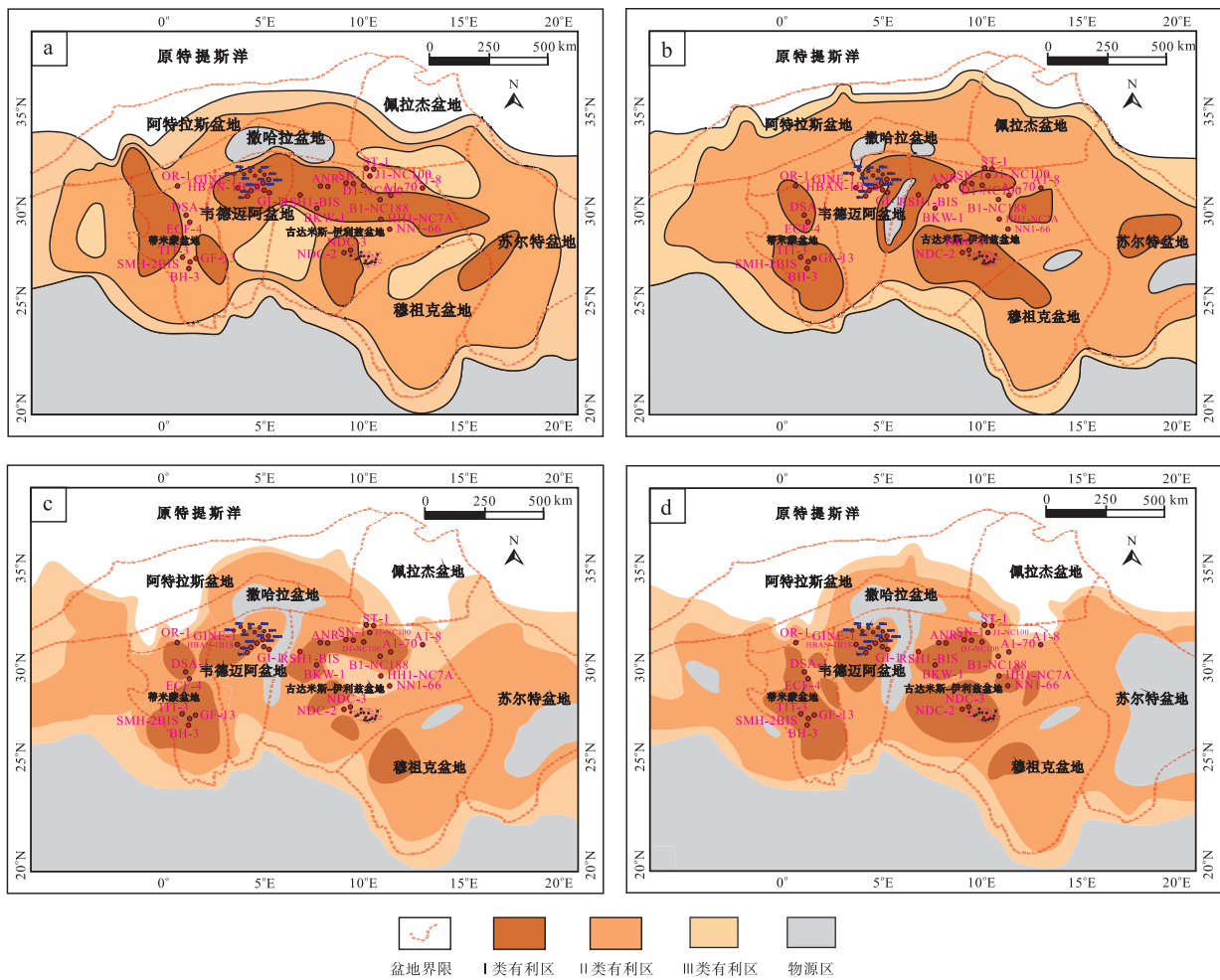
北非地区是全球油气资源最丰富的地区（Suess, 1893; Klemme and Ulmishak, 1991; 吴福元等, 2020; 朱日祥等, 2022; 何治亮, 2023）。而古生界储集层在全球油气勘探中占据重要地位（Ziegler, 2001; Limarino and López-Gamundío, 2021; Hussain *et al.*, 2022），作为世界重要产油区之一的北非地区，已发现一半以上的油气储量位于古生界（HIS, 2021; 郭旭升等, 2022）。综合沉积



a—早—中泥盆世岩相古地理；b—晚泥盆世岩相古地理

图 14 北非地区泥盆纪岩相古地理

Fig. 14 Lithofacies palaeogeography of the Devonian in North Africa



a—寒武系；b—奥陶系；c—志留系；d—泥盆系

图 15 北非地区寒武系—泥盆系储集层有利区分布

Fig. 15 Distribution of favorable areas for the Cambrian-Devonian reservoirs in North Africa

特征以及岩相古地理的相关研究,对北非地区寒武至泥盆系储集层有利区进行识别并分类。

寒武系储集层以辫状河、曲流河河道、辫状河三角洲平原以及前缘砂体、湖泊相自生自储的泥岩为主,因此,将其划为 I 类储集层;而靠近物源区的冲积扇,分选差、粒度粗,储集性较差,为 III 类储集层,而剩余部分介于两者之间为 II 类储集层(图 15-a)。中一下奥陶统与寒武系相比,研究区南部整体发育辫状河沉积,砂体厚度变大, I 类储集层与 II 类有利区面积增加, III 类储集层面积变小;到晚奥陶世,冰川发育,储集层主要为冰水扇、蛇形丘、冰湖中的砂砾岩,而冰碛岩分选极差、泥质含量高,通常作为盖层或非储集层。因此,综合奥陶系的沉积演变,将辫状河与冰水扇、蛇形丘、冰湖重合区域划分为 I 类储集层,底碛与冲积扇、临滨发育区域划分为 III 类储集层,剩余部分为 II 类储集层(图 15-b)。中一下志留统发育浅海一半深海沉积,沉积物多为细砂岩、泥岩 I 类、II 类、III 类储集层面积均减小。上志留统沉积物粒度相较中一下志留统大,砂体厚度增大,储集层物性较好。古达米斯盆地、伊利兹盆地与蒂米蒙盆地主要发育辫状河沉积,储集层物性最好,形成了较有利储集层,发育 I 类储集层(图 15-c)。中一下泥盆统中韦德迈阿盆地沉积物主要为砂岩,储集层物性较好, I 类储集层面积大幅增加;晚泥盆世研究区处在海侵环境,与中一下泥盆统相比,上泥盆统储集层物性变差, I 类储集层减少(图 15-d)。

## 7 主要成果与认识

1) 在本次研究中,识别出北非地区  $SQ_1^1-SQ_1^3$  一级层序界面与  $Sq_1^1-Sq_1^{13}$  二级层序界面,将北非地区寒武系—泥盆系划分为 3 个一级层序和 15 个二级层序,建立了北非地区寒武—泥盆系高精度层序格架。认为研究区在寒武系—奥陶纪海平面经历了 4 期旋回变化,以海平面下降为主;志留纪—泥盆纪海平面变化依旧以下降为主,并且在志留世、中泥盆世最为显著。

2) 北非地区构造演化受 3 期特提斯洋开合及海平面变化控制。早寒武世张性裂谷与拗陷盆地发育,自南向北依次为河流相、湖泊相、三角洲相至浅海相。中一晚奥陶世原特提斯洋俯冲,冈瓦纳北缘转为主动陆缘,古特提斯洋开启致高纬度漂移、

冰川相发育。志留纪古特提斯洋扩张,转为被动陆缘。早泥盆世受海西运动挤压,中部隆升,物源面积增大,形成多沉积中心,发育曲流河—辫状河—湖泊体系。晚泥盆世海平面上升,北部浅海陆棚向南延伸,沿岸发育小型辫状河三角洲。综合沉积特征以及岩相古地理的相关研究,将北非地区寒武至泥盆系储集层有利区分为三级。

## 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. 古地理学报, 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]
- 甘克文. 2000. 特提斯域的演化和油气分布. 海相油气地质, 5(S2): 21-29. [Gan K W. 2000. Evolution and oil and gas distribution in Tethys domain. Marine Origin Petroleum Geology, 5(S2): 21-29]
- 郭旭升,周德华,赵培荣,刘曾勤,张殿伟,冯动军,邢凤存,杜伟,陈刚,杨帆,孙川翔. 2022. 鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向. 石油与天然气地质, 43(5): 1013-1023. [Guo X S, Zhou D H, Zhao P R, Liu Z Q, Zhang D W, Feng D J, Xing F C, Du W, Chen G, Yang F, Sun C X. 2022. Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous-Permian coal measure strata, Ordos Basin. Oil & Gas Geology, 43(5): 1013-1023]
- 何治亮,金之钧,李双建,白国平,吕雪雁,郭金瑞,高键,殷进垠,李英强,郑定业. 2023. 特提斯演化控制下盆地原型、改造与油气差异富集: 基于波斯湾盆地与四川盆地的比较分析. 中国科学: 地球科学, 53(12): 2914-2936. [He Z L, Jin Z J, Li S J, Bai G P, Lü X Y, Guo J R, Gao J, Yin Jin Y, Li Y Q, Zheng D Y. 2023. Basin prototyping, modification and differential hydrocarbon accumulation under the control of Tethys evolution: a comparative analysis of the Persian Gulf and Sichuan basins. Science in China: Earth Sciences, 53(12): 2914-2936]
- 贾承造. 2001. 克拉 2 大气田的发现与“西气东输”工程. 国土资源, (6): 8-9, 4. [Jia C Z. 2001. The discovery of kera-2 gas field and the project "transporting gas from the west to the east. Land & Resources, (6): 8-9, 4]
- 吕雪雁,曹喆,刘静静,杨光庆,张忠民. 2024. 北非地区构造演化与含油气盆地形成. 古地理学报, 26(1): 28-44. [Lü X Y, Cao Z, Liu J J, Yang G Q, Zhang Z M. 2024. Tectonic evolution and petroliferous basin formation in North Africa. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(1): 28-44]
- 宋成鹏,童晓光,张光亚,王兆明,温志新,汪伟光,梁英波. 2013. 北

- 非盆地叠加演化及其对油气地质条件的控制作用. 现代地质, 27(2): 389-396. [Song C P, Tong X G, Zhang G Y, Wang Z M, Wen Z X, Wang W G, Liang Y B. 2013. Evolution characteristic of north Africa superimposed basin and its control effect on oil and gas geologic conditions. *Geoscience*, 27(2): 389-396]
- 吴福元, 万博, 赵亮, 肖文交, 朱日祥. 2020. 特提斯地球动力学. 岩石学报, 36(6): 1627-1674. [Wu F Y, Wan B, Zhao L, Xiao W J, Zhu R X. 2020. Tethyan geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6): 1627-1674]
- 朱日祥, 赵盼, 赵亮. 2022. 新特提斯洋演化与动力过程. 中国科学: 地球科学, 52(1): 1-25. [Zhu R X, Zhao P, Zhao L. 2022. Tectonic evolution and geodynamics of the neo-Tethys ocean. *Scientia Sinica(Terrae)*, 52(1): 1-25]
- Aissaoui A. 2016. Algerian Gas: Troubling Trends, Troubled Policies. Oxford Institute for Energy Studies: 1-29.
- Askri H, Belmecheri A, Benrabah B, Boudjema A, Boumendjel K, Daoudi M, Drid M, Ghalem T, Docca A M, Ghandriche H, Ghomari A, Guellati N, Khennous M, Boote D R D, Clark-Lowes D D, Traut M W. 1995. Geology of Algeria. Algeria Well Evaluation Conference: 1-93.
- Boote D R D, Clark-Lowes D D, Traut M W. 1998. Palaeozoic petroleum systems of north Africa. Geological Society, London, Special Publications, 132: 7-68.
- Brown A R. 2011. Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.
- Craig J, Rizzi C, Said F, Thusu B, Luning S, Asbali A I, Eeley M L, Bell J F, Durham M J, Eales M H, Eswetherick S, Hamblett C. 2008. Structural styles and prospectivity in the Precambrian and Paleozoic hydrocarbon systems of North Africa. Geology of East Libya Symposium, 1: 51-121.
- Fekirine B, Abdallah H. 1998. Palaeozoic lithofacies correlatives and sequence stratigraphy of the Saharan Platform, Algeria. Geological Society, London, Special Publications, 132: 97-108.
- Ghienne J F, Desrochers A, Vandenbroucke T R A, Achab A, Asselin E, Dabard M P, Farley C, Loi A, Paris F, Wickson S, Veizer J. 2014. A Cenozoic-style scenario for the end-Ordovician glaciation. *Nature Communications*, 5: 4485.
- Hallett D, Clark-Lowes D. 2016. Petroleum Geochemistry. Petroleum Geology of Libya. Amsterdam: Elsevier: 229-251.
- Hirst J P P. 2015. Ordovician proglacial sediments in Algeria: insights into the controls on hydrocarbon reservoirs in the In Amenas field, Illizi Basin. Geological Society, London, Special Publications, 368: 319-353.
- Hussain M, Amao A O, Al-Ramadan K, Babalola L O, Humphrey J D. 2022. Unconventional reservoir characterization using geochemical signatures: examples from Paleozoic formations, Saudi Arabia. *Marine and Petroleum Geology*, 143: 105770.
- IHS Markit. 2021. IHS energy: DIN. (2017-06-21). <https://smarkit.com/index.html>.
- Jiang J, Shi H S, Lin C S, Zhang Z T, Wei A, Zhang B, Shu L F, Tian H X, Tao Z, Liu H Y. 2017. Sequence architecture and depositional evolution of the Late Miocene to quaternary northeastern shelf margin of the South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 81: 79-97.
- Klemme H D, Ulmishek G F. 1991. Effective petroleum source rocks of the world: stratigraphic distribution and controlling depositional factors. *AAPG Bulletin*, 75: 1809-1851.
- Limarino C O, López-Gamundí O R. 2021. Late Paleozoic basins of South America: insights and progress in the last decade. *Journal of South American Earth Sciences*, 107: 103150.
- Lüning S, Archer R, Craig J, Loydell D K. 2003. The lower Silurian 'hot shales' and 'double hot shales' in north Africa and Arabia. *The Geology of Northwest Libya*, 3: 91-105.
- Perron P, Guiraud M, Vennin E, Moretti I, Portier É, Le Pourhiet L, Konaté M. 2018. Influence of basement heterogeneity on the architecture of low subsidence rate Paleozoic intracratonic basins (Reggane, Ahnet, Mouydir and Illizi basins, Hoggar Massif). *Solid Earth*, 9: 1239-1275.
- Ruban D A. 2007. Jurassic transgressions and regressions in the Caucasus (northern Neotethys Ocean) and their influences on the marine biodiversity. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 251: 422-436.
- Sahoo S K, Planavsky N J, Jiang G, Kendall B, Owens J D, Wang X, Shi X, Anbar A D, Lyons T W. 2016. Oceanic oxygenation events in the anoxic Ediacaran ocean. *Geobiology*, 14: 457-468.
- Suess. 1983. Are great ocean depths permanent? *Natural Science*, 3: 180-187.
- van Staal C R, Barr S M. 2012. Lithospheric architecture and tectonic evolution of the Canadian Appalachians and associated Atlantic margin. In: *Tectonic Styles in Canada: The Lithoprobe Perspective*. Geological Association of Canada Special Paper, 49: 41-95.
- Ziegler A. 2001. Late Permian to Holocene Paleofacies Evolution of the Arabian Plate and its Hydrocarbon Occurrences. *GeoArabia*, 6(3): 445-504.
- Zrelli A, Amiri A, Sebei K, Abidi O, Barhoumi N, Kharbachi S, Inoubli M H. 2024. Sequence stratigraphy of the Paleozoic successions in Ghadames Basin, southern Tunisia: insights from integrated interpretation of well logs and seismic data. *Journal of African Earth Sciences*, 213: 105218.

(责任编辑 李新坡)