

doi:10.3799/dqkx.2017.122

沉积区—剥蚀区古地貌一体化恢复及古水系研究： 以渤海湾盆地辽东东地区馆陶组为例

鲜本忠^{1,2}, 王震¹, 马立驰³, 晁储志¹, 蒲强¹, 景安语³, 王俊辉^{1,2}

1. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249

2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

3. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 207015

摘要: 古地貌是控制古水系、沉积体系的关键因素之一。以渤海湾盆地渤中坳陷东部的辽东东地区中新世馆陶组为例, 对馆陶组的沉积区和剥蚀区分别开展了基于残余地层厚度法和印模法的古地貌恢复, 以增进对研究区古水系、源—汇系统的整体认识, 为其物源体系、沉积环境、砂体分布的预测提供科学依据。两种方法的古地貌及古水系恢复结果对比研究表明, 基于残余地层厚度法的沉积区古地貌恢复结果适用于目的层沉积区古水系的恢复; 而基于印模法的沉积区—剥蚀区一体化的古地貌恢复结果实现了剥蚀区、沉积区古水系的统一解释。沉积区—剥蚀区一体化的古地貌恢复弥补了基于沉积区古地貌的古水系恢复中难以判断“源—汇体系”中源区古水系分布及从源到汇古水系派生关系的局限性。

关键词: 古地貌; 古水系; 物源体系; 源—汇系统; 辽东东地区; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2017)11-1922-14

收稿日期: 2017-07-03

Paleo-Drainage System and Integrated Paleo-Geomorphology Restoration in Depositional and Erosional Areas: Guantao Formation in East Liaodong Area, Bohai Bay Basin, China

Xian Benzong^{1,2}, Wang Zhen¹, Ma Lichi³, Chao Chuzhi¹, Pu Qiang¹, Jing Anyu³, Wang Junhui^{1,2}

1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Research Institute of Exploration and Development of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 207015, China

Abstract: Paleo-geomorphology is one of key controls on paleo-drainage and depositional systemson. In order to better understand the paleo-drainage system and Source-to-Sink system to provide scientific evidences for predictions of provenance system, deposition system and sand stone distribution, the paleo-geomorphology of the Guantao Formation in East Liaodong area, East Bozhong depression of Bohai bay basin are reconstructed using two methods in this paper. Comparison of paleo-morphological reconstruction and paleo-drainage interpretation with different methods shows that paleo-morphology restoration of deposition area using residual thickness may be used in understanding of paleo-drainage outlines for deposition area only. However, paleo-geomorphology restoration for depositional area and erosional areas provides a comprehensive paleo-drainage interpretation for depositional and erosional areas taken as a whole. The integrated paleo-morphology restoration can facilitate the prediction of paleo-drainage distribution in source area of “Source-to-Sink system”, and establishment of relationship of paleo-drainage systems from source area to sink area.

Key words: paleo-geomorphology; paleo-drainage system; provenance system; Source-to-Sink system; East Liaodong; petroleum geology.

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos.41172104,41372117,41702104); 国家油气重大专项(Nos.2017ZX05009002,2016ZX05026007).
作者简介: 鲜本忠(1973—), 男, 副教授, 研究方向为沉积学、层序地层学. ORCID: 0000-0002-5561-3707. E-mail: xianbz@cup.edu.cn

引用格式: 鲜本忠, 王震, 马立驰, 等. 2017. 沉积区—剥蚀区古地貌一体化恢复及古水系研究: 以渤海湾盆地辽东东地区馆陶组为例. 地球科学, 42(11): 1922-1935.

0 引言

古地貌有构造古地貌、剥蚀古地貌和沉积古地貌之分,盆地边缘有沉积区与剥蚀区之别。剥蚀古地貌与构造古地貌通常用于描述剥蚀区的剥蚀程度和构造活动末期的地貌残局,而沉积古地貌通常用于描述沉积区发生沉积前的地貌格局(赖生华和李晓宏,2007)。除了剥蚀古地貌外,剥蚀区的构造古地貌与沉积区的沉积古地貌可分别影响盆外、盆内古水系的流向和级别,进而影响硅质碎屑沉积物沉积体系的构成及特征(蔡佳,2009;刘军锸等,2014;陈树光等,2015;高艺等,2015)。此外,古地貌恢复还广泛应用于碳酸盐岩沉积环境的解释和岩溶储层的预测(苗钱友等,2014)。

长期以来,逐渐意识到剥蚀量计算、压实校正、古水深恢复、磷灰石或锆石定年是古地貌恢复的技术关键(House *et al.*, 2001; 王敏芳等, 2006; Hong *et al.*, 2016),并逐步提出了残留地层厚度法(郭少斌和孙绍寒,2006)、填平补齐法、印模法、沉积学分析法、层序地层学法(王家豪等,2003)、地球物理法(李家强,2008;朱红涛等,2013)等多种古地貌恢复方法(吴丽艳等,2005;赖生华和李晓宏,2007;庞军刚等,2013)。基于古地貌恢复结果,可以开展目的层沉积时期古水系研究。

随着构造隆升或海/湖平面的下降,盆地边缘地区普遍遭受风化、剥蚀作用(Roden *et al.*, 2011; 辛云路等,2013),可分出沉积区和剥蚀区。在沉积区,基于残余地层厚度法、地震层拉平法等地貌恢复结果可广泛应用于盆地内部古水系和沉积物分散体系的重建(王华等,2009;Bhattacharya *et al.*, 2016)。但是,仅仅利用沉积区的古水系恢复结果,无法获知各水系主次、汇水面积等信息(张宇焜等,2015),严重影响了对各沉积体系沉积规模和砂体成因的判断和预测(吴丽艳等,2005;庞军刚等,2013)。古水系的恢复是源—汇系统(Source-to-Sink system)分析的重要内容,涉及到从源到汇的路径、汇水面积及水系分级等内容(Cassel *et al.*, 2012),在平面上涉及到从剥蚀区到沉积区的源—汇全域(李容全和孙秀萍,1985;李勇等,2006;刘强虎等,2016)。因此,为了系统了解一个地区源—汇体系构成,落实不同沉积体系的汇水面积、搬运距离、地形背景(Davidson and Hartley, 2010; 刘化清等, 2011; Wang *et al.*, 2014),预测盆地沉积体系的展布和规模(Cassel *et al.*, 2012),需要针对沉积区—剥蚀区开展一体化的古

地貌恢复。

本文以渤海湾盆地辽东东地区新近系为例,开展沉积区—剥蚀区一体化的古地貌恢复,其目的在于:(1)对比基于沉积区和基于沉积区—剥蚀区一体化的古地貌恢复结果的差异,并利用古地貌恢复结果重建研究区馆陶组下段、馆陶组上段古水系展布;(2)探索更利于源—汇系统分析的古地貌、古水系恢复方法;(3)为少井控制的勘探区砂体分散体系和沉积体系研究提供重要技术支撑。

1 区域地质概况

辽东东地区地理上位于中国东部渤海湾东部的浅海海域,地质上位于渤海湾盆地中东部、郯庐走滑断裂带东侧(图 1a),可分为胶辽隆起、渤中拗陷两个二级构造单元,其中后者可细分为渤东凹陷、庙西北凸起和辽东东斜坡(图 1b)(徐昊清,2017)。该研究区处于下辽河拗陷、渤中拗陷与胶辽隆起的接合部位(图 1a),新构造运动十分强烈,断层的主要形成时期为 N-Q(徐昊清,2017)。

研究区以太古界为基底,自下而上主要发育了中上元古界,古近系孔店组、沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组。在三维地震工区内(图 1b),新近系围绕胶辽隆起自西向东、自南向北逐层上超(刘晓峰等,2008;杨贵丽,2014),以发育多层系的地层超覆圈闭及岩性—构造圈闭为特征,具有较好的油气成藏条件(钱诗友等,2008;杨贵丽,2014)。近几年,学者们在海域郯庐断裂带内发现了蓬莱 19-3、蓬莱 25-6、蓬莱 9-1 等多个大中型油气田,显示了辽东东探区较大的勘探潜力(张成等,2013)。由于该区钻井少,基于地震资料的古水系研究可为该区砂岩储层分布预测提供技术支撑。

2 资料与方法

本次对基于工区内二维地震 1 583 km,三维地震 730 km² 和已完钻的 12 口探井的录井、测井资料开展研究。三维地震工区、主要二维测线及主要钻井的分布如图 1b 所示,研究方法涉及到:(1)井—震统一的层序地层划分和地层发育样式及其时空展布;(2)古地貌恢复;(3)古地貌单元细分及古水系重建。

等时性层序地层格架为古地貌恢复成图单元和印模法中披覆基准面的选择提供保障。层序地层学

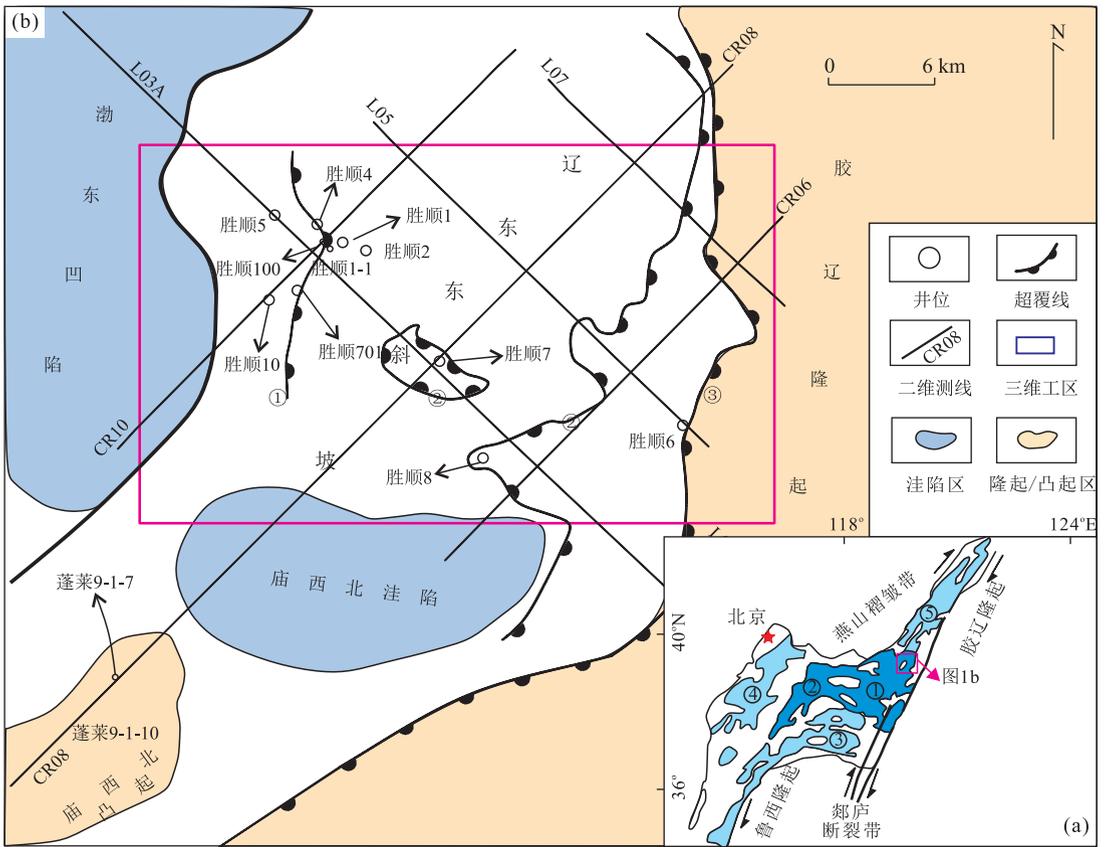


图 1 研究区地理位置与构造单元划分

Fig.1 Regional geographic position and structural unit division of study area

a. 渤中坳陷位于渤海湾盆地的中西部, 而研究区位于渤中坳陷东北部; b. 研究区构造单元划分及钻井、3D地震工区与2D地震测线分布. 图1a中, ①渤中坳陷, ②黄骅坳陷, ③济阳凹陷, ④冀中坳陷, ⑤辽河坳陷; 图1b中, ①馆下段顶界超覆线, ②馆上段顶界超覆线, ③明下段顶界超覆线

的研究以不整合面及其对应的整合面的识别为基础, 以井—震相互标定和三维闭合解释为关键. 本文利用地震反射中的超覆、削蚀、顶超反射结构开展地震层序边界识别, 利用钻测井资料中沉积旋回的划分及井—震精细标定, 实现井—震层序划分的一致性, 最后通过地震的闭合解释落实关键层序界面及层序地层的三维空间分布. 以此为基础来总结研究区地层发育样式, 确定首次披覆剥蚀区(潜山区)且具有等时意义的披覆基准面.

在层序格架的控制下, 分沉积区和剥蚀区针对各层序开展古地貌恢复. 对于没有遭受明显剥蚀的“沉积区”, 利用目的层现今沉积厚度或残余地层厚度重建沉积期古地貌格局. 对于无目的层发育的剥蚀区, 常常基于压模法进行沉积覆盖前的古地貌恢复. 为了统一进行沉积区、剥蚀区地貌格局恢复, 增进从源到汇的古水系流向和级次, 预测物源供给及沉积体系的展布, 本文将印模法从剥蚀区推广应用于沉积区.

运用印模法进行古地貌恢复时, 上覆沉积层中的披覆基准面的选择比较重要, 需要满足以下条件: (1)全区范围内分布, 具有等时意义; (2)离风化壳面越近越好; (3)该界面地震反射强且连续, 易于识别(邓宏文等, 2001; 陈树光等, 2015). 一般优选初次披覆剥蚀区的首个沉积层序边界或最大洪泛面.

考虑到本研究成图单元为三级层序(或沉积层序), 内部经历了湖进、湖退引起的沉积环境迁移和演化, 不同时期古水深变化较大, 不同时期岩性的横向迁移性大. 因此, 尽管在不同地区存在岩性分布差异, 但考虑到不同岩性均遭受到压实作用, 压实校正后地层厚度普遍增大而改变地形坡度, 但其平面分布所表现出的地貌格局通常不会发生根本性改变. 所以本次的古地貌恢复中没有开展压实校正. 此外, 三级层序的时间跨度达百万年(Ma)级别, 古水深对地层厚度的影响也必然会被长时间、继承性沉积作用所弱化. 因此, 本研究没有开展古水深的校正.

3 地层发育样式

3.1 地层特征

钻井资料揭示, 辽东东工区在太古界结晶变质岩

之上发育了中新元古代、中生代和新生代 3 套沉积岩系。新生代地层包括古近系孔店组、沙河街组、东营组和近新系馆陶组、明化镇组及第四系平原组。本次重点研究的新近系馆陶组分为馆上段和馆下段(图 2)。

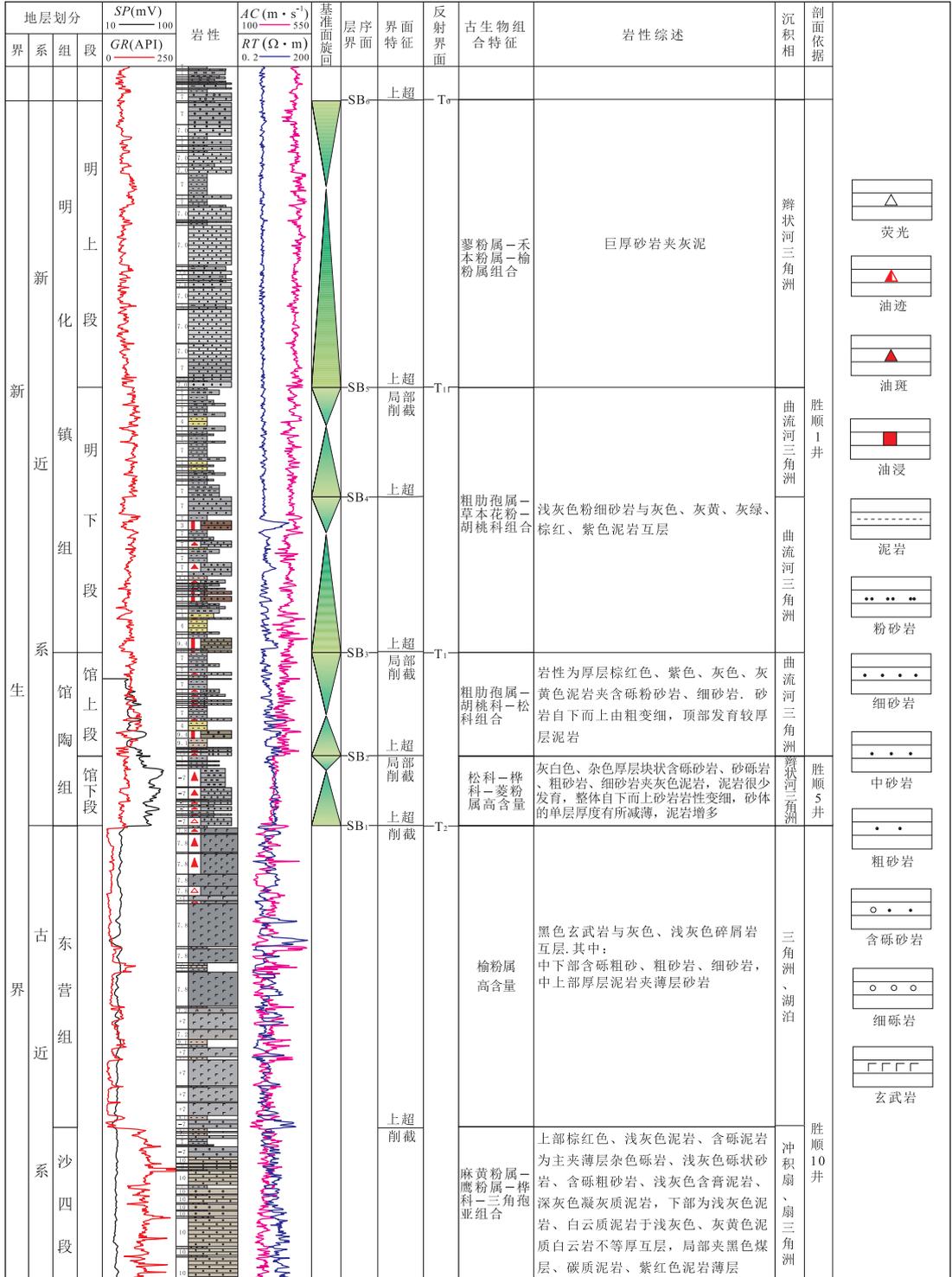


图 2 辽东东地区地层综合柱状图及层序地层划分方案

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column and sequence division of the east of Liaodong area

馆下段底部与东营组呈角度不整合接触,较少出露,多数井缺失馆下段.岩性为浅灰色、灰色厚层含砾粗砂岩、砾状砂岩、细砂岩、粉砂岩夹灰色泥岩,泥岩很少发育(图 2).自下而上,砂岩岩性变细,砂体单层厚度减薄,泥岩增多.自然伽马曲线整体表现为由低到高的钟形响应,反映了其退积特征.馆上段底部与下伏馆下段在盆地边缘呈平行不整合接触,岩性为厚层棕红色、紫红色、紫色、灰色、灰黄色泥岩夹灰白色、灰色含砾砂岩、细砂岩、细砂岩.馆上段低自然伽马值与馆下段顶部的高自然伽马值呈突变接触(图 2).

综合地震反射结构和测井上退积—进积旋回的识别,将研究区内发育的新近系馆陶组—明化镇组下段划分为 4 个沉积层序(李建平等,2012):馆下段层序、馆上段层序、明下段下部层序和明下段上部层序(图 2).除了馆下段底部呈现区域性不整合面特征外,其余层序界面都为局部性不整合面,显示各个层序沉积时期仅在辽东斜坡区上部发育短时期暴露(图 2).

3.2 地层时空展布

通过对区内关键二维测线的地层解释并将其与渤中坳陷地层划分及展布相对比,落实了研究区古近系、新近系馆下段、馆上段、明化镇组下段(明下段)及明化镇组上段(明上段)—第四系的空间展布(图 3).

古近系集中分布于渤东凹陷、庙西北洼陷等受断裂活动控制的地势沉降区(图 3).位于工区西南部的庙西北凸起与胶辽隆起之间的庙西北洼陷地区古近系沉积厚度可达 500 m 以上,顶底均以不整合分别与新近系和中生界/中上元古界接触(图 3a).位于工区东部的渤东凹陷中古近系埋藏深度可达 3 000 m 以下,厚度分布在 300~400 m,横向的分布也受到断层活动的控制.

受控于东营运动抬升、剥蚀影响,研究区及周缘地区内古近系与新近系之间呈现为区域性角度不整合.古近系第一套沉积层序(馆下段)的分布仅限于地势低洼的渤东凹陷区,庙西北洼陷中可能仅在最低洼之处发育馆下段,而大部分地区缺失馆下段(图 3a),甚至缺失馆上段(图 3b).从渤东凹陷到辽东斜坡区,馆下段、馆上段层层超覆,沉积范围逐渐扩大.到明下段下部沉积时期,沉积范围快速扩大,呈披覆式覆盖辽东斜坡区.因此,明下段下部层序的层序边界或最大洪泛面可以作为“印模法”恢复古地貌中的披覆基准面,用于其下覆地层沉积古地貌的恢复.

3.3 地层发育样式

综合研究区地层解释结果及其周缘地区地层分布特征,总结了研究区新生代地层发育样式(图 4).特征如下:(1)中生界、古近系、新近系之间均表现为区域性角度不整合接触关系,存在明显剥蚀或沉积

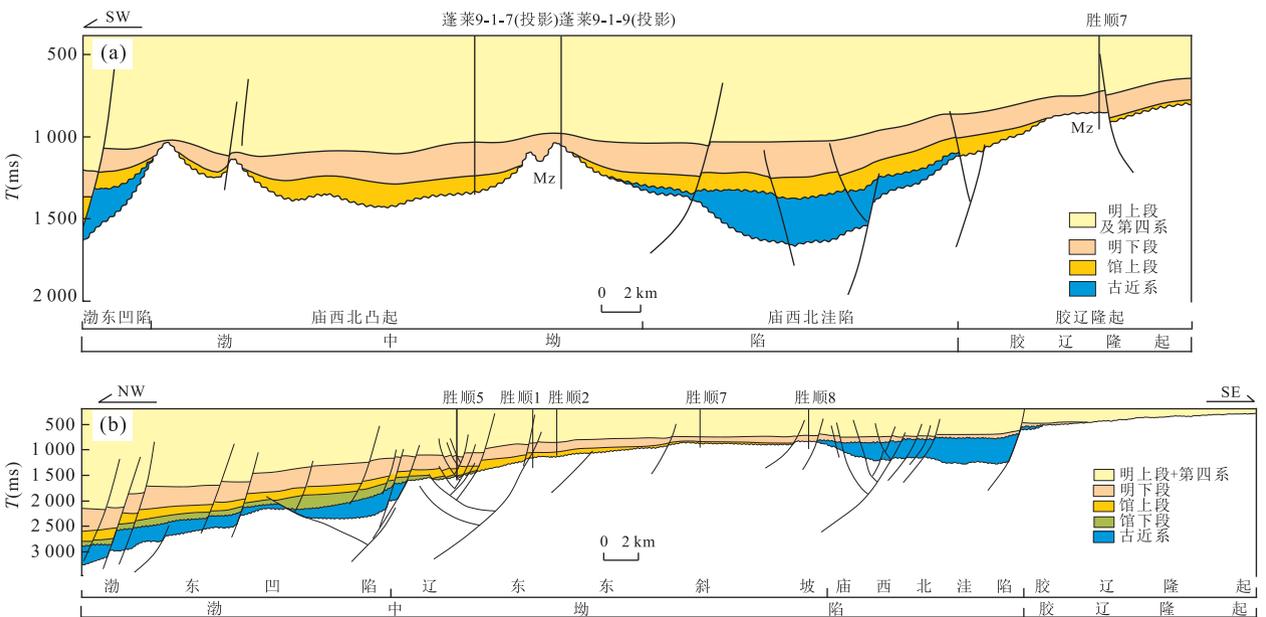


图 3 研究区及外围地区古近系与新近系地层解释剖面

Fig.3 Paleogene and Neogene stratigraphic profiles in study area and surrounding regions

a.CR08 测线地层解释结果;b.L03A 测线地层解释结果.剖面位置详见图 1

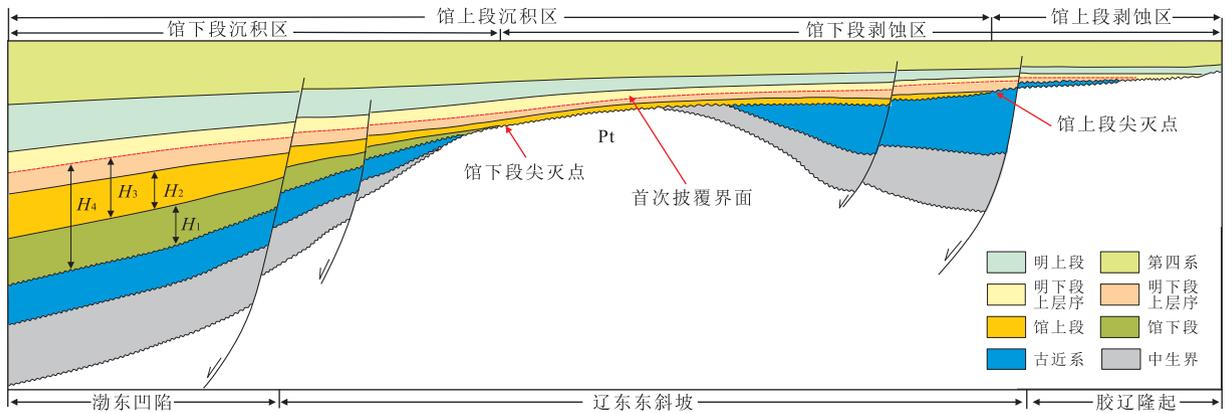


图 4 研究区新生代地层发育样式及平面分区

Fig.4 Stratigraphic development pattern and planar division of Paleogene and Neogene in study area

间断;(2)中生界、古近系的展布受控于同生断层控制,具有断陷湖盆沉积充填特征;(3)新近系呈逐层上超方式超覆于辽东东斜坡和胶辽隆起区,沉积范围逐渐扩张,湖盆规模日渐扩张,但地层厚度日渐趋稳,地形坡度越来越小;(4)馆陶组分布较局限,馆下段主要分布于东营运动之后的凹陷或凹槽地区,受地貌影响非常明显;(5)到明下段下部层序沉积时期,地形坡度明显变小,沉积范围快速扩张,第一次整体覆盖了辽东东斜坡。

4 古地貌与古水系恢复

4.1 沉积区古地貌恢复

考虑到进入新近系之后渤海湾盆地整体进入拗陷期,除郯庐断裂走滑活动外,古近世广泛活跃的张性断层不再活跃(徐昊清,2017)。东营运动导致渐新世沉积之后渤海湾盆地整体抬升、遭受剥蚀(杨贵丽,2014)。之后进入中新世热沉降阶段,整个渤海湾盆地发育统一的沉降中心,但早期构造与剥蚀作用导致其地表凹槽明显、沟壑相间(张成等,2013)。

在井一震标定的基础上,通过三维地震和二维地震的闭合解释,完成了研究区馆下段沉积区现今地层厚度等值线图(图 5a)。从图 5a 可知,研究区内馆下段沉积厚度为 100~600 m,平均 200~300 m;西部和北部发育两个沉降次中心,它们之间由 NNW 向低凸起相分隔;现有地层剥蚀线并非地层尖灭线,据此可知馆下段顶部曾遭受一定剥蚀作用;根据现存地层厚度及趋势估计,馆上段顶部遭受剥蚀的厚度在 30~80 m;馆下段地层厚度的平面变化较快,坡降在 30~130 m/km,坡度较大。

综合上述分析可知,馆下段的真实沉积区应该

比现今残余地层分布范围略大。但由于剥蚀厚度只有数十米,而馆下段坡度较大,真实沉积区范围较现有地层分布区差异不会太大。再考虑到当前对于剥蚀厚度的恢复精度普遍不高,本文中仍采用现今馆下段分布范围作为其沉积区,以进一步开展古地貌研究(图 5b)。

基于残余地层厚度的分布恢复了馆下段沉积区沉积古地貌(图 5b)。从图 5b 可知,该沉积时期的地势东高西低,南高北低;区内发育两个沉降中心,之间发育一个 NNW 向的低凸起;东南部存在一个 NW 向大型沟槽直接连通西部的渤海凹陷;东北部发育一个先 EW 后 NNW 向的次级沟槽。

同样依据三维地震和二维地震的闭合解释,完成了研究区馆上段沉积区沉积古地貌的恢复(图 6)。从图 6 可知,研究区地势东高西低,只在西部发育一个沉降中心——渤海凹陷。

在工区东南部和北部,分别存在 NW 向和 NNE 向次级洼谷,可能成为水系供给的主要通道;此外,东部的胶辽隆起在馆上段沉积期仍然暴露,作为剥蚀区向西部辽东东斜坡区供给物源和流水。在辽东东斜坡区的南部和北部,集中发育 2 个次级沟槽体系,中间以胜顺 7 井区的山区为界(图 6)。

4.2 沉积—剥蚀区一体化古地貌恢复

为了弥补基于残余地层厚度的沉积区古地貌在物源、水系分析上的不足,针对工区内的三维地震区馆下段和馆上段利用印模法开展了其沉积区—剥蚀区一体化的古地貌恢复。

首先,通过研究区内地层发育样式和层序地层划分结果,根据印模法披覆基准面优选原则,将明下段下部层序的顶界面优选为该区馆下段、馆上段印模法古地貌恢复中上覆地层的顶界面(图 4)。然后,

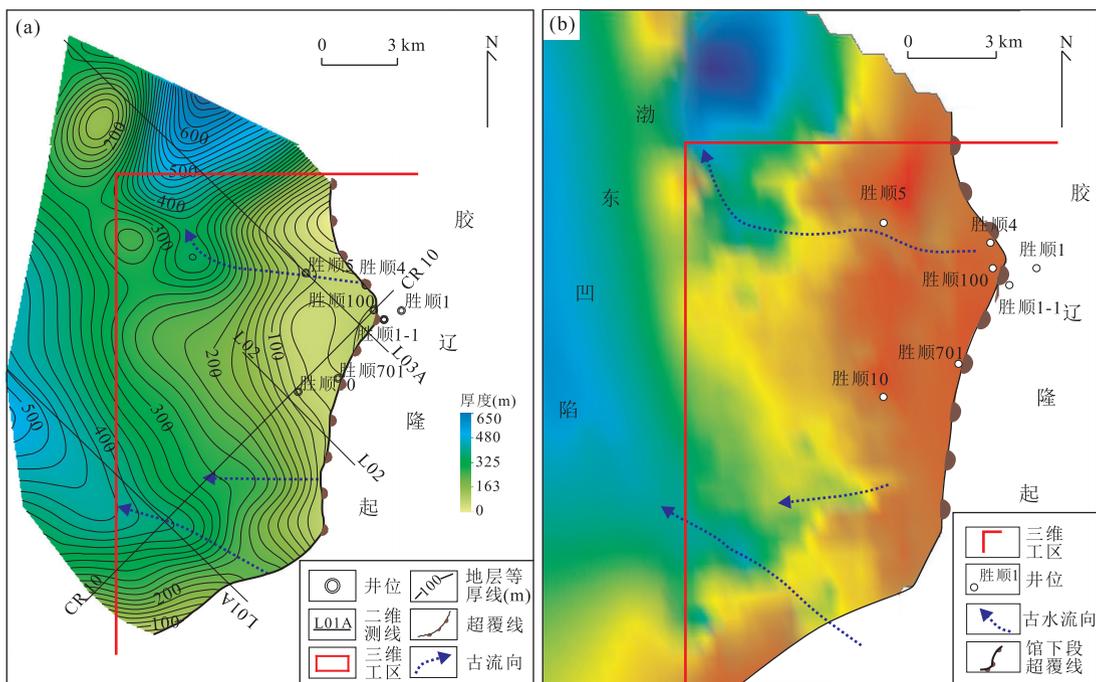


图 5 馆下段沉积区残余地层厚度等值线图(a)及古地貌恢复结果(b)

Fig.5 Contour map of thickness of the upper member of Guantao Formation in deposition area (a) and corresponding palaeogeomorphological map (b)

图 a 中地层厚度数据来自图 4 中 H_1

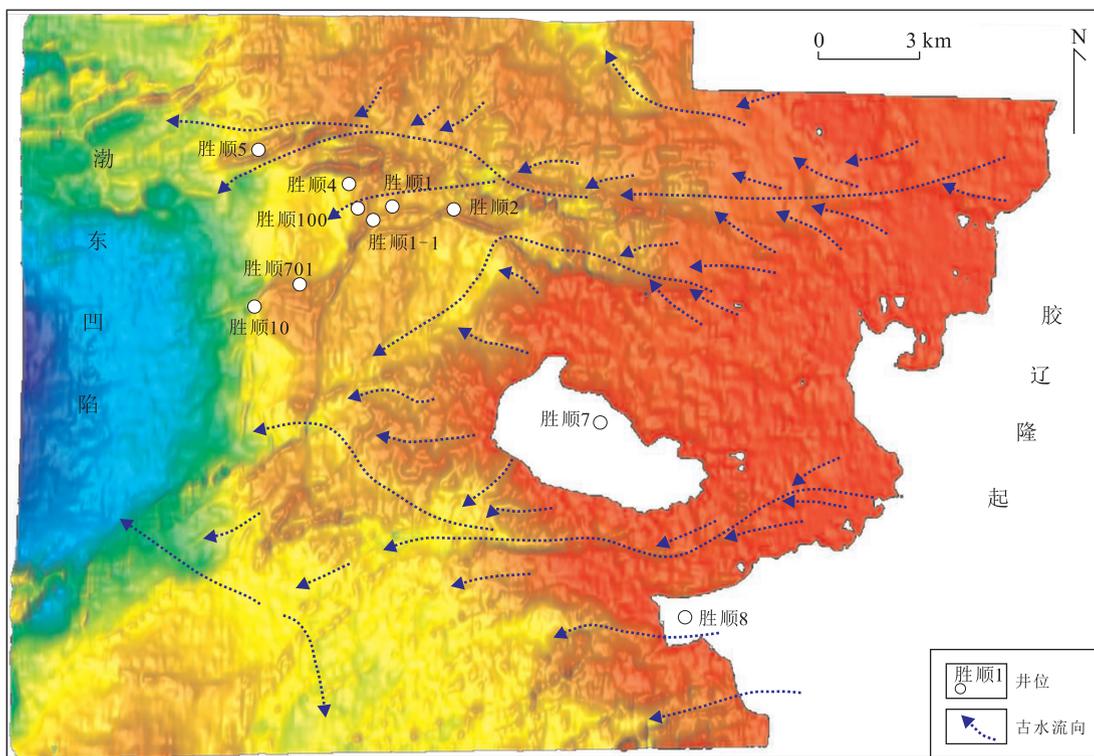


图 6 馆上段沉积区基于残余地层的古地貌与古水系恢复结果

Fig.6 Paleo-geomorphology and paleo-drainage system reconstructed by residued thickness of the upper member of Guantao Formation in deposition area

地层厚度数据来自图 4 中 H_2

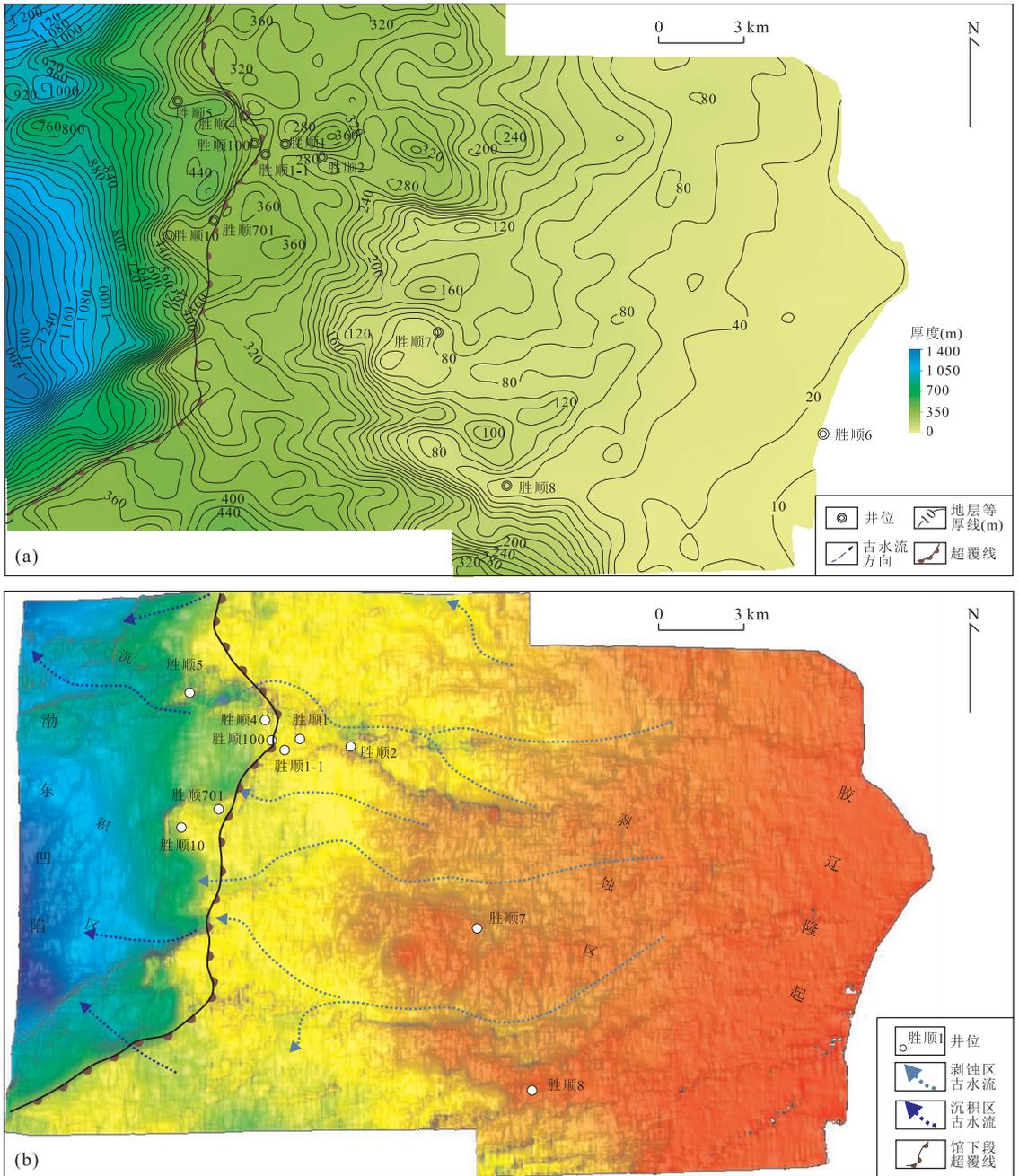


图 7 基于印模法的馆下段沉积区-剥蚀区上覆地层厚度等值线图(a)及基于印模法的馆下段沉积区-剥蚀区一体化三级古地貌恢复结果(山地剥蚀区、山前剥蚀区和洼地沉积区)及古水系解释(b)

Fig.7 Contour map of thickness of overlying stratigraphy of deposition and erosion areas using impression method (a) and three-grade geomorphologic and paleo-drainage-system integrated restoration for deposition and erosion areas of the lower member of Guantao Formation using impression method (b)

地层厚度数据来自图 4 中 H_3

选择目的层底界面为底求取二者间地层厚度及其全区分布.最后,结合目的层超覆线和上覆地层厚度平面分布恢复古地貌,以刻画目的层沉积前地貌格局及可能的水系分布.

从馆下段上覆地层(以明下段下部层序顶界为

披覆基准面)厚度分布来看,馆下段的沉积区仅占该三维工区西部 1/5 左右.换言之,工区的中、东部均为馆下段沉积期的剥蚀区(图 7a).从古地貌恢复结果来看,此时期的辽东东斜坡和胶辽隆起均暴露作为剥蚀区向西部渤海东凹陷边缘的沉积区供给物源

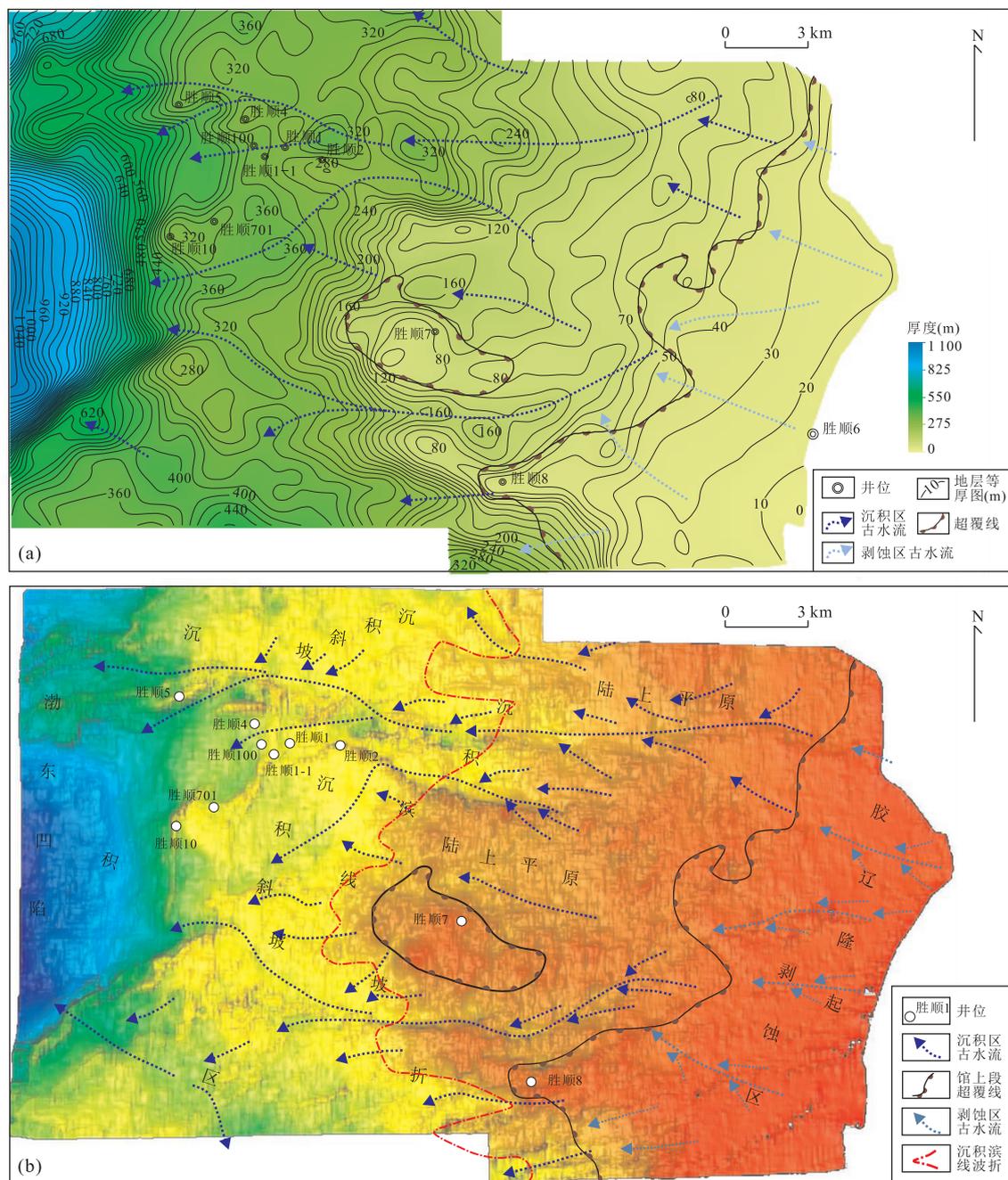


图 8 基于印模法的馆上段沉积区—剥蚀区上覆地层厚度等值线图(a)及古地貌恢复与古水系解释(b)

Fig.8 Contour map of thickness of overlying stratigraphy using impression method (a) and responding paleo-geomorphology and paleo-drainage interpretation (b)

地层厚度数据来自图 4 中 H_4

(图 7b).综合沉积区—剥蚀区而言,三级地貌格局清楚,分别是东部以胶辽隆起为主导的山地剥蚀区、胜顺 1—胜顺 2 井区及其南北的山前剥蚀区和西部的洼地沉积区(图 7b).

另外,从馆上段底界到明下段下部层序顶界面之间的地层厚度平面分布来看,其分布范围比馆上段残余沉积地层分布范围略大,尤其在三维工区东

南部,这说明明下段下部层序继馆上段之后仍因湖盆扩展而持续上超,但扩张幅度有限(图 8a).在胜顺 7 井附近,存在一个约 10 km^2 的“天窗”——馆上段沉积期一直暴露为山,到明下段下部层序沉积期开始逐步被超覆,直至整体披覆.

从馆上段沉积区—剥蚀区一体化古地貌恢复结果可知,三维工区范围内山地剥蚀区揭示不充分,主

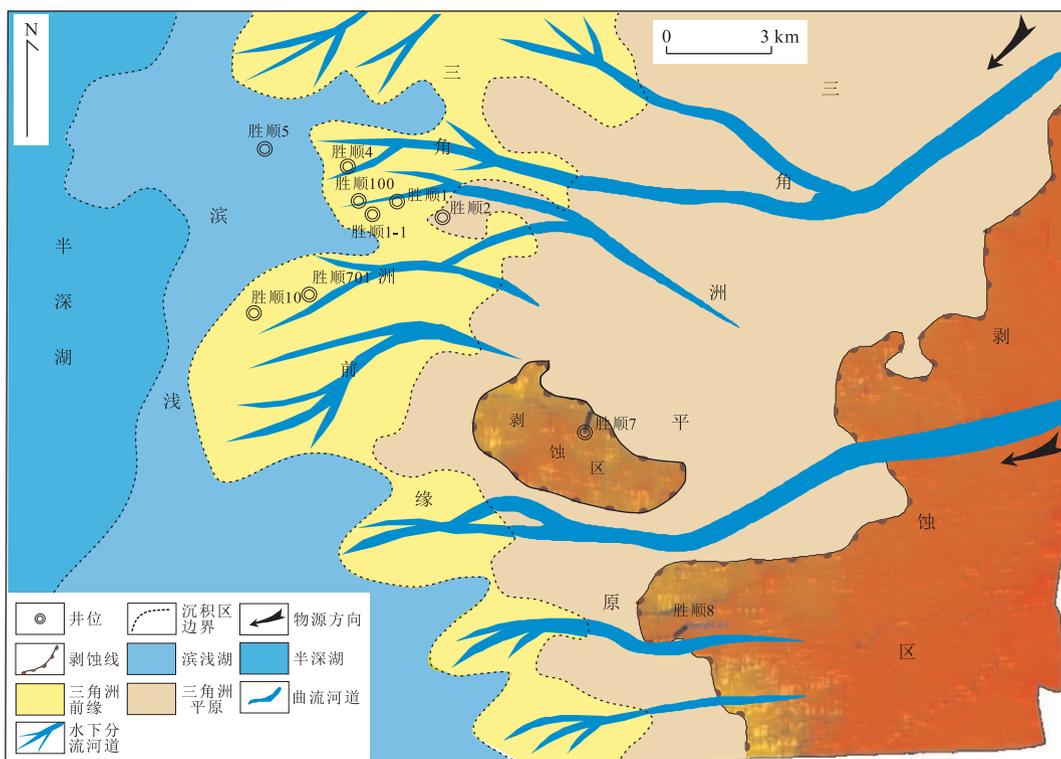


图 9 研究区馆陶组上段沉积相平面分布

Fig.9 Planar distribution of sedimentary facies of the upper member of Guantao Formation in study area

要发育山前剥蚀区和沉积区(图 8b).在沉积区内存在 2 个坡折带,将其沉积区划分出 3 个地貌单元:近超覆线的陆上平原或三角洲平原区、中间的沉积斜坡区或三角洲前缘—浅湖区和西部的深水沉积区(图 8b).其中,搬运—沉积区地势较平坦,但沟梁相间,尤其是胜顺 7 井附近的“天窗”影响了其南北地貌的整体格局(图 8b).

因为残余地层厚度法简单、原理清楚,可以基于地震或丰富的钻井层位数据快速成图,其广泛应用于沉积盆地古地貌的恢复中.实践证明,大部分情况下该方法对于沉积区目的层沉积前古地貌的恢复效果良好.但是,该方法成图范围受控于残余地层发育的“沉积区”,对于沉积区以外的母岩风化区、物源搬运区地貌特征的刻画无能为力.源—汇系统分析需要通过从源区到沉积(汇)区整体的了解,通过母岩性质、水系长度、汇水面积及汇水路径等信息来预测各汇水系统物源供给类型、物源通量及砂体分散特征,这都需要增进对“剥蚀区”古地貌及古水系的认识.而基于目的层上覆地层的印模法可能有效地回避残余地层厚度法在上述方面的缺陷,为源汇分析中的源区古地貌和古水系分析提供技术支撑.

4.3 古水系重建

通过古地貌恢复结果,结合区域地质背景,进行

了研究区古水系重建.根据水系(河流)长度和汇水(流域)面积,结合古地貌恢复中的地貌单元的划分结果,在研究区识别出两级古水流体系.第一级水系发育于地貌中隆起/凸起之间,通常对应于具有构造调节带性质的大型山脉之间的沟谷体系,水系长度和流域面积均较大;第二级水系发育于地貌中某一隆起或凸起内部,通常表现为隆起或凸起上的沟槽系统,水下长度和流域面积均较小.

从馆下段沉积区—剥蚀区一体化古地貌恢复结果来看,工区内发育 3 大古水系:南东水系、北东水系和东部水系.其中,南东水系、北东水系为一级水系,东部水系为二级水系.南东水系来自胶辽隆起的南部侧缘,推测对应于构造调节带性质的山脉间沟谷,应为远距离山间河流汇聚后向渤东凹陷供源的结果,汇水面积和水系规模可能最大(图 7b),但受到东南部庙西北次洼的影响,水系难以企及本工区内部,推测碎屑物主要应该卸载于庙西北次洼或庙西凹陷.北东水系在三维工区仅是根据胜顺 1 北东方向相对低的地势和胜顺 5 北西方向的洼陷区推测的结果,准确落实还有待工区北部地区地震或钻井资料的进一步支持.东部水系属于第二级水系,来自东部山地剥蚀区井山间,主要河流向西进入渤中坳陷对应时期的沉积区,汇水面积中等,搬运距离约

15~30 km,属于东部山区的短源供给系统,山区的小型沟谷进入山前后水体流向基本稳定、持续向西供给,直至进入洼陷沉积区(图 7b)。从本次研究的三维工区来看,该水系内物源供给效率高,应是本区沉积体系的主要供源水系。

由于本次成图所用的三维工区范围有限,加上上覆的明下段下部层序的分布范围相对馆上段而言扩展并不大,所以基于残余地层厚度进行的馆上段沉积区古地貌恢复结果(图 6)和基于上覆地层印模法进行的该时期沉积区—剥蚀区一体化古地貌恢复结果(图 8b)比较接近。但是,由于将周缘剥蚀区纳入进行整体考虑,沉积区—剥蚀区一体化古地貌恢复结果在古水系及走向判断方面具有明显优势,比如虽然在图 6 中可以看到胜顺 7 井的西南部位存在沟壑特征,但无法判断胜顺 7 井的剥蚀区上水系的主流向,而在图 8b 上可以进一步明确胜顺 7 井的剥蚀区上的主要古水系为西南流向,如果需要甚至可以落实不同水下的汇水区域和面积。

4.4 古地貌、古水系对沉积的影响

综合地震反射特征、属性分析及测录井资料,编制了不同时期沉积相平面分布图。对比研究区馆上段沉积时期的古地貌、古水系解释结果和沉积相平面展布结果可知,受控于古水系受控于古地貌,决定了地质历史时期古河道的流向、路径;同时,也势必影响陆源碎屑物质的分散。图 9 展示了基于三维地震、钻测井资料和古地貌格局重建的研究区馆陶组上段三角洲前缘、平原及滨浅湖、半深湖等沉积相带的分布特征。对比图 9 与图 8 中古地貌分布特征可知,沉积环境的分布除了受控于湖平面外,主要受控于古地貌格局;砂体的分布则受控于古水系和沉积环境的共同影响。在三角洲平原,粗粒的陆源碎屑物质主要分布于河床中,呈现条带状特征,砂体的分布与古水系的位置及规模密切相关;而在三角洲前缘,受三角洲形态影响砂体呈片状分布,古水系仅决定砂体进入湖泊的入口,其平面分布除了受控于地形外,还一定程度上受到波浪或沿岸流等湖泊水动力条件的影响(图 9)。

5 结论

(1)根据地层的分布及接触关系,对研究区馆下段、馆上段进行了沉积区和剥蚀区划分。基于残余地层厚度法和印模法分别开展了馆下段、馆上段的沉积区古地貌恢复和沉积区—剥蚀区一体化古

地貌恢复。

(2)基于残余地层厚度的沉积区古地貌恢复结果可用于沉积区目的层沉积前古地貌和古水系的恢复。但是,由于缺乏剥蚀区地貌格局及汇水区域信息,基于沉积区古地貌恢复常常难以判别古水系的长度、规模及汇水面积等信息。

(3)基于印模法的沉积区—剥蚀区一体化古地貌恢复有助于进行剥蚀区古水系与沉积区古流向整体恢复,这对地质历史时期古水系的汇水面积、规模及派生关系的认识提供了技术支持,也可为陆源碎屑物源分散体系、沉积体系及砂体分布的预测提供科学依据。

致谢:感谢胜利油田分公司勘探开发研究院滩海室郭玉新、熊伟、张明华在研究过程中给予的大力协助,感谢审稿专家及编委给予的指导!

References

- Bhattacharya, J. P., Copeland, P., Lawton, T. F., et al., 2016. Estimation of Source Area, River Paleo-Discharge, Paleoslope, and Sediment Budgets of Linked Deep-Time Depositional Systems and Implications for Hydrocarbon Potential. *Earth-Science Reviews*, 153: 77–110. doi: 10.1016/j.earscirev.2015.10.013
- Cai, J., 2009. Paleo-Morphologic Restoration of Paleogene in Qiongdongnan Basin and Its Control on Sequence Architecture and Sedimentary Characteristics (Dissertation). China University of Geoscience, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Cassel, E. J., Grove, M., Graham, S. A., 2012. Eocene Drainage Evolution and Erosion of the Sierra Nevada Batholith across Northern California and Nevada. *American Journal of Science*, 312 (2SI): 117–144. doi: 10.2475/02.2012.03
- Chen, S. G., Ren, J. Y., Wu, F., et al., 2015. Palaeogeomorphic Recovery and Its Application in Shabei Area, Central Bohai Depression. *Special Oil and Gas Reservoir*, 22 (2): 52–55 (in Chinese with English abstract).
- Davidson, S. K., Hartley, A. J., 2010. Towards a Quantitative Method for Estimating Paleohydrology from Clast Size and Comparison with Modern Rivers. *Journal of Sedimentary Research*, 80 (7–8): 688–702. doi: 10.2110/jsr.2010.062
- Deng, H. W., Wang, H. L., Wang, D. Z., 2001. Control of Paleomorphology to Stratigraphic Sequence in Continental Rift Basins: Take Lower Tertiary of Western Slope in Bozhong Depression as an Example. *Oil & Gas Geology*, 22 (4): 293–296 (in Chinese with English abstract).

- Gao, Y., Jiang, Z. X., Li, J. J., et al., 2015. Restoration of Paleogeomorphology and Its Controlling Effect on Deposition of Beach-Bar Sand Bodies; A Case Study of the Fourth Member of Shahejie Formation, Shubei Area, Liaohe Western Sag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 22(5): 40–46 (in Chinese with English abstract).
- Guo, S. B., Sun, S. H., 2006. Rebuilding Paleogeomorphology of Pre-Jurassic and Oil-Gas Accumulation Regulation in Zhoujiawan Area. *Earth Science*, 31(3): 372–377 (in Chinese with English abstract).
- Hong, Z., Su, M., Liu, H., et al., 2016. Clastic Compaction Unit Classification Based on Clay Content and Integrated Compaction Recovery Using Well and Seismic Data. *Petroleum Science*, 13(4): 685–697. doi:10.1007/s12182-016-0129-y
- House, M. A., Wernicke, B. P., Farley, K. A., 2001. Paleo-Geomorphology of the Sierra Nevada, California, from (U-Th)/He Ages in Apatite. *American Journal of Science*, 301(2): 77–102. doi:10.2475/ajs.301.2.77
- Lai, S. H., Li, X. H., 2007. A New Approach in Studying Depositional System within Rift-Subsidence Basin: From Paleogeomorphology, Lithologic Change and Water Depth to Depositional System. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(5): 663–670 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Q., 2008. Application of Bedding Flattening in the Process of Rebuilding Paleomorphology before Basin Deposition; A Case Study in Dongying Sag, Jiyang Depression. *Petroleum Geophysics*, 6(2): 46–49 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. P., Yang, B., Zhou, X. H., et al., 2012. Analysis of Sedimentary Facies of Dongying Formation in the Bozhong Sag. *Journal of Northeast Petroleum University*, 36(4): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Li, R. Q., Sun, X. P., 1985. A Preliminary Research on the Ancient River Systems and Its Features of the Plain in Front of the Mountains in Fangshan County of Beijing. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, (4): 85–92 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Li, B., Steffen, D., et al., 2006. Provenance Analysis and Drainage Evolution in Late Cenozoic Chengdu Basin on Eastern Margin of Tibetan Plateau. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(3): 309–320 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. Q., Li, X. B., Wan, Y. R., et al., 2011. Palaeogeographic and Sedimentological Characteristics of the Triassic Chang 8, Ordos Basin, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(6): 1086–1095 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. E., Jian, X. L., Kang, B., et al., 2014. Paleogeomorphology of the Middle Part of 3rd Member of Shahejie Formation and Their Effects on Depositional Systems, Dongying Delta, Dongying Depression. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 21(1): 20–23 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. H., Zhu, X. M., Li, S. L., et al., 2016. Pre-Paleogene Bedrock Distribution and Source-to-Sink System Analysis in the Shehejie Uplift. *Earth Science*, 41(11): 1935–1949 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. F., Xie, X. N., Zhang, C., 2008. Characteristics and Generation of the Reservoir Overpressure in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 33(3): 337–341 (in Chinese with English abstract).
- Miao, Q. Y., Zhu, X. M., Li, G. B., et al., 2014. Paleogeomorphology Recovery and Reservoir Prediction of Upper Carboniferous in M Block, Pre-Caspian Basin. *Earth Science*, 39(7): 871–879 (in Chinese with English abstract).
- Pang, J. G., Yang, Y. Y., Li, W. H., et al., 2013. Study Development of Palaeogeomorphology Reconstructions in Continental Facies Hydrocarbon Basin. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 33(4): 424–430 (in Chinese with English abstract).
- Qian, S. Y., Zeng, J. H., Lin, H. X., et al., 2008. Physical Simulation Experiment and Mechanism Analysis on Oil Migration and Accumulation in East Liaodong Area. *Natural Gas Geoscience*, 19(5): 604–610 (in Chinese with English abstract).
- Roden, J., Abdelsalam, M. G., Atekwana, E., et al., 2011. Structural Influence on the Evolution of the Pre-Eonile Drainage System of Southern Egypt: Insights from Magnetotelluric and Gravity Data. *Journal of African Earth Sciences*, 61(5): 358–368. doi:10.1016/j.jafrearsci.2011.08.007
- Wang, H., Bai, Y. F., Huang, C. Y., et al., 2009. Reconstruction and Application of the Paleogene Provenance System of the Dongying Formation in Qikou Depression. *Earth Science*, 34(3): 448–456 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. H., Wang, H., Zhao, Z. X., et al., 2003. Sequence Stratigraphy in Paleogeomorphology Analysis: An Example from Tahe Oilfield. *Earth Science*, 28(4): 425–430 (in Chinese with English abstract).
- Wang, M. F., Jiao, Y. Q., Ren, J. Y., et al., 2006. Method and Thinking of Palaeogeomorphologic Reconstruction in Sedimentary Basin—Example from Depositional Stage of Xishanyao Formation in Junggar Basin. *Xinjiang Geology*, 24(3): 326–330 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z., Jiang, H., Wang, T., et al., 2014. Paleo-Geomorphology Formed during Tongwantectionization in Sichuan Basin and Its Significance for Hydrocarbon Accumulation. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 338–345

- Wu, L. Y., Chen, C. Q., Jiang, C. M., et al., 2005. Paleogeomorphic Restoring Techniques in China's Hydrocarbon Exploration. *Journal of Oil and Gas Technology*, 27(4): 25–26 (in Chinese with English abstract).
- Xin, Y. L., Ren, J. Y., Li, J. P., 2013. Control of Tectonic-Paleogeomorphology on Deposition; A Case from the Shahejie Formation Sha 3 Member, Laizhouwan Sag, Southern Bohai Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3): 302–308 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. Q., 2017. Fault Characteristics and Construction Patterns of the Liaodongdong Area in Bohai Sea. *Journal of Shengli College China University of Petroleum*, 31(1): 7–10 (in Chinese with English abstract).
- Yang, G. L., 2014. Analysis on Oil/Gas Reservoir-Forming Conditions in Eastern Liaodong Region, Bohai Sea. *Special Oil and Gas Reservoir*, 21(4): 76–79 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Xie, X. N., Guo, X. R., et al., 2013. Pathway System of Large-Scale Petroleum System and Its Controls on Hydrocarbon Accumulation in the Bazhong Sub-Basin, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 38(4): 807–818 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. K., Hu, X. Q., Niu, T., et al., 2015. Controlling of Paleogeomorphology to Paleogene Sedimentary System of Shijiutuo Uplift in Bohai Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(6): 1589–1596 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. T., Yang, X. H., Zhou, X. H., et al., 2013. Sediment Transport Pathway Characteristics of Continental Lacustrine Basins Based on 3-D Seismic Data; An Example From Dongying Formation of Western Slope of Bozhong Sag. *Earth Science*, 38(1): 121–129 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 蔡佳, 2009. 琼东南盆地古近系古地貌恢复及其对层序样式和沉积特征的控制 (博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 陈树光, 任建业, 吴峰, 等, 2015. 渤中坳陷沙北地区古地貌恢复及其应用. 特种油气藏, 22(2): 52–55.
- 邓宏文, 王红亮, 王敦则, 2001. 古地貌对陆相裂谷盆地层序充填特征的控制——以渤中凹陷西斜坡区下第三系为例. 石油与天然气地质, 22(4): 293–296.
- 高艺, 姜在兴, 李俊杰, 等, 2015. 古地貌恢复及其对滩坝沉积的控制作用——以辽河西部凹陷曙北地区沙四段为例. 油气地质与采收率, 22(5): 40–46.
- 郭少斌, 孙绍寒, 2006. 周家湾地区前侏罗纪古地貌恢复及油气富集规律. 地球科学, 31(3): 372–377.
- 赖生华, 李晓宏, 2007. 断陷盆地沉积体系研究新思路: 从古地貌、岩性变化、水体深度到沉积体系. 沉积学报, 25(5): 663–670.
- 李家强, 2008. 层拉平方法在沉积前古地貌恢复中的应用——以济阳坳陷东营三角洲发育区为例. 油气地球物理, 6(2): 46–49.
- 李建平, 杨波, 周心怀, 等, 2012. 渤中凹陷东营组层序地层及其沉积相分析. 东北石油大学学报, 36(4): 1–10.
- 李容全, 孙秀萍, 1985. 北京房山县山前平原古水系及其特征初步研究. 北京师范大学学报(自然科学版), (4): 85–92.
- 李勇, 黎兵, Steffen, D., 等, 2006. 青藏高原东缘晚新生代成都盆地物源分析与水系演化. 沉积学报, 24(3): 309–320.
- 刘化清, 李相博, 完颜容, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地长 8 油层组古地理环境与沉积特征. 沉积学报, 29(6): 1086–1095.
- 刘军钢, 简晓玲, 康波, 等, 2014. 东营凹陷东营三角洲沙三段中亚段古地貌特征及其对沉积的控制. 油气地质与采收率, 21(1): 20–23.
- 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 等, 2016. 沙垒田凸起前古近系基岩分布及源-汇过程. 地球科学, 41(11): 1935–1949.
- 刘晓峰, 解习农, 张成, 2008. 渤海湾盆地渤中坳陷储层超压特征与成因机制. 地球科学, 33(3): 337–341.
- 苗钱友, 朱筱敏, 李国斌, 等, 2014. 滨里海盆地 M 区块晚石炭世古地貌恢复与白云岩储层预测. 地球科学, 39(7): 871–879.
- 庞军刚, 杨友运, 李文厚, 等, 2013. 陆相含油气盆地古地貌恢复研究进展. 西安科技大学学报, 33(4): 424–430.
- 钱诗友, 曾溅辉, 林会喜, 等, 2008. 辽东东地区石油运移和聚集物理模拟实验及机理分析. 天然气地球科学, 19(5): 604–610.
- 王华, 白云风, 黄传炎, 等, 2009. 歧口凹陷古近纪东营期古物源体系重建与应用. 地球科学, 34(3): 448–456.
- 王家豪, 王华, 赵忠新, 等, 2003. 层序地层学应用于古地貌分析——以塔河油田为例. 地球科学, 28(4): 425–430.
- 王敏芳, 焦养泉, 任建业, 等, 2006. 沉积盆地中古地貌恢复的方法与思路——以准噶尔盆地西山窑组沉积期为例. 新疆地质, 24(3): 326–330.
- 吴丽艳, 陈春强, 江春明, 等, 2005. 浅谈我国油气勘探中的古地貌恢复技术. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 27(4): 25–26.
- 辛云路, 任建业, 李建平, 2013. 构造-古地貌对沉积的控制作用——以渤海南部莱州湾凹陷沙三段为例. 石油勘探与开发, 40(3): 302–308.
- 徐昊清, 2017. 渤海海域辽东东地区断裂特征及构造样式. 中国石油大学胜利学院学报, 31(1): 7–10.
- 杨贵丽, 2014. 渤海海域辽东东地区油气成藏条件分析. 特种油气藏, 21(4): 76–79.
- 张成, 解习农, 郭秀蓉, 等, 2013. 渤中坳陷大型油气系统输导

体系及其对油气成藏控制.地球科学,38(4):807-818.
 张宇焜,胡晓庆,牛涛,等,2015.古地貌对渤海石臼坨凸起古
 近系沉积体系的控制作用.吉林大学学报(地球科学
 版),45(6):1589-1596.

朱红涛,杨香华,周心怀,等,2013.基于地震资料的陆相湖盆
 物源通道特征分析:以渤中凹陷西斜坡东营组为例.地
 球科学,38(1):121-129.

《地球科学》

2017 年 12 月 第 42 卷 第 12 期 要目预告

大兴安岭中段早三叠世 O 型埃达克岩的发现及其大地构造意义	李世超等
延边官地铁矿构造背景与和龙地块太古宙地壳增生	商青青等
辽吉裂谷带北缘连山关韧性剪切带的构造属性和运动学分析	常瑞虹等
辽东鞍山齐大山韧性剪切带运动学解析及形成机制	刘昕悦等
长春东南劝农山地区早二叠世范家屯组岩石变形组构及流变学特征	梁琛岳等
大兴安岭中段晚三叠世哈达陶勒盖组火山岩成因及构造背景	马永非等
祁连地块西段硫磺矿北花岗闪长岩的岩石成因及其地质意义	陶刚等
基于地面磁信标的水平定向钻进实时定位方法	邓国庆等
闪电熔岩的形态、成分、及其与类似天然物质的对比	周雨欣等
手持 X 射线衍射仪(ED-XRF)在旋回地层学中的应用	曹海洋等
火山地层中的沉积层特征及其地层对比意义	陈崇阳等
准噶尔盆地车排子凸起多物源复杂沉积体系中的地震沉积学	樊晓伊等