

文章编号: 1671-1505(2026)03-0843-22 DOI:10.7605/gdtxb.2026.009

## 多尺度的古地理学研究：思考与展望\*

吴胜和<sup>1,2</sup> 孙龙德<sup>3,4</sup> 鲍志东<sup>2</sup> 邵龙义<sup>5</sup> 吴因业<sup>6</sup> 郑秀娟<sup>7</sup>

1 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江大庆 163712

4 中国石油天然气集团有限公司, 北京 100007

5 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

6 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

7 中国石油大学(北京)期刊社, 北京 102249

**摘要** 地球表面的古地理单元呈现不同的级次, 但其内涵、研究意义、重建尺度及方法的差异尚不明确, 影响了古地理学的协调发展。古地理单元为具有一定气候、水文、生态特征的古地貌单元。依据地貌相对规模及其成因, 将古地理单元分为大、中、小三级, 相应地将古地理研究尺度分为三级。大尺度古地理研究为在全球及跨板块(盆地)的大区域内, 以数百万年至数千万年为时间单元, 研究大级次古地理单元(大洋、大陆及其内部的大型地貌起伏)的时空分布及多圈层相互作用, 用于宜居地球及矿产资源远景区预测; 中尺度古地理研究为在一个较大型地貌单元(如盆地)内, 以数十万年为时间单元, 研究中级次古地理单元(较大型地貌与亚环境之间的地貌单元)的特征、分布、变迁及相应的地表作用过程, 用于人类宜居环境预测及矿产资源勘探; 小尺度古地理研究为在一个沉积体系内, 以万年或十几万年为时间单元, 研究亚/微环境的特征、分布、变迁及相应的小规模地表作用过程, 用于人类居住环境预测以及矿产资源评价与开发。未来的古地理学应进一步发展不同尺度古地理参数的多信息定量解译方法, 创新不同尺度古地理的智能化重建技术, 深化不同尺度古地理的成因机制研究, 建立不同尺度古地理对矿产资源分布的控制作用模式, 加强多尺度古地理的协同研究。

**关键词** 古地理学 多尺度 宜居地球 矿产资源

**第一作者简介** 吴胜和, 男, 1963年生, 中国石油大学(北京)教授, 博士生导师。主要从事古地理学与沉积学、储层地质学及三维地质建模等方面的教学与科研工作。E-mail: reser@cup.edu.cn。

中图分类号: P539.2 文献标志码: A

## Multi-scale palaeogeographic research: reflections and prospects

WU Shenghe<sup>1,2</sup> SUN Longde<sup>3,4</sup> BAO Zhidong<sup>2</sup> SHAO Longyi<sup>5</sup> WU Yinye<sup>6</sup> ZHENG Xiujuan<sup>7</sup>

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

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

3 State Key Laboratory of Continental Shale Oil, Heilongjiang Daqing 163712, China

4 China National Petroleum Corporation, Beijing 100007, China

谨以此文纪念冯增昭先生诞辰 100 周年。

\* 国家自然科学基金(编号: 42272110, 41772101)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42272110, 41772101)]

收稿日期: 2025-12-27 改回日期: 2026-01-30

5 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

6 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

7 Periodical Press, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

**Abstract** Palaeogeographic units on the Earth's surface exhibit a hierarchical structure, however, their connotations, research significance, reconstruction scales, and methodologies remain unclear, hindering the coordinated development of palaeogeography. Each palaeogeographic unit is a palaeogeographic unit with specific climatic, hydrological, and ecological characteristics. Based on the relative size and formation of landforms, palaeogeographic units are divided into three levels: large, medium, and small, correspondingly classifying palaeogeographic research scales into three levels. Large-scale palaeogeographic research investigates the spatiotemporal distribution and multi-sphere interactions of large-scale palaeogeographic units (oceans, continents, and large-scale geomorphic undulations within them) over millions to tens of millions of years. This research is conducted globally and across tectonic plates (or basins), aiming to predict habitable Earth and prospective areas for mineral resources. Medium-scale palaeogeographic research focuses on the characteristics, distribution, evolution, and associated surface processes of medium-scale palaeogeographic units (geomorphic units between large-scale geomorphic undulations and sub-environments) within a large geomorphic unit (such as a basin). It operates on timescales of hundreds of thousands of years and serves to predict habitable region and guide mineral resource exploration. Small-scale palaeogeographic research examines the characteristics, distribution, changes, and corresponding small-scale surface processes of sub-/micro-environments within a sedimentary system. This research covers timescales of tens to hundreds of thousands of years and aims to predict human habitable locality and to evaluate and develop mineral resources. Future palaeogeography should further develop multi-information quantitative interpretation methods for multi-scale palaeogeographic parameters, innovate intelligent reconstruction technologies of multi-scale palaeogeography, deepen the understanding of the formation mechanisms across different scales, establish models that explain how palaeogeography controls mineral resource distribution at various scales, and enhance collaborative research on multi-scale palaeogeography.

**Key words** palaeogeography, multiscale, habitable Earth, mineral resources

**About the first author** WU Shenghe, born in 1963, is a professor and Ph.D. supervisor of China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in teaching and research on palaeogeography and sedimentology, reservoir geology, and 3D geological modeling. E-mail: reser@cup.edu.cn.

古地理学是研究地质历史时期及人类历史时期自然环境特征及其演变的科学(冯增昭, 2003)。古地理学从“深时”视角揭示地球演化的规律,是连接固体地球、水圈、大气圈和生物圈演化的关键纽带,为地球系统科学研究、人类未来生存环境(宜居地球)预测、矿产资源勘查与开发等提供不可或缺的科学基础,是人类认识自然、实现可持续发展的重要支撑。

科学意义上的古地理学已走过了150多年的发展历史。从最初的以古生物地理研究为主(Hunt,

1873),发展了多分支学科的古地理学,如古生物地理学、构造古地理学、岩相古地理学、第四纪古地理学等(冯增昭, 2003)。古地理学研究在广度和深度上均取得了长足的进展(郑秀娟等, 2021)。

现有的古地理学研究涉及不同的研究范围,例如,全球古地理重建(李江海和姜洪福, 2013; Scotese, 2021; Salles *et al.*, 2023),大区域的古地理重建(如中国)(冯增昭等, 2003; 马永生等, 2009),盆地古地理重建(如鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地等)(郭艳琴等, 2019; 纪友亮等, 2022),

沉积体系内微相分布与构型研究（岳大力等，2007；吴胜和等，2008；赵晓明等，2012）。不同范围古地理重建的时间单元差异也很大（从数百万年至数万年），所表达的古地理单元级次也有较大的差别。然而，不同范围和时间尺度古地理研究的目标、意义及方法差异尚不明确，从而影响着古地理学的协调发展。

作者拟从古地理单元的级次分析入手，探讨不同尺度古地理的内涵、研究目标、研究意义及研究方法的差异，分析当前古地理研究存在的问题并展望未来的发展方向。

## 1 古地理单元级次分析

古地理的本质是古自然环境，其要素主要为古地貌、古气候、古水文、古生态等。古地理单元为具有一定气候、水文、生态特征的古地貌单元。地貌单元可理解为由各种地貌要素所构成的形态组合，其中，海洋和陆地是地球表面最大的 2 个地貌单元，其内又可进一步细分为若干级次的更小单元。

### 1.1 古地理单元级次的划分

基于海相碳酸盐岩岩相古地理的研究，冯增昭

教授将古地理单元划分为三级，其中，将陆和海作为一级，在海中划分出台地、斜坡、盆地等二级单元，在台地中又划分出坪、滩等三级单元（图 1）（冯增昭和吴胜和，1987；冯增昭等，2003）。这一分级适用于稳定构造背景下的碳酸盐岩形成环境。然而，由于不同构造背景的地貌分异有着较大的差别，表现为不同的等级序列，难以用统一的数字分级来表达。为此，在冯增昭先生的古地理单元分级基础上，根据古地貌的相对规模，结合其成因机制，将古地理单元简约地分为大、中、小 3 个级次，并对其内的级次进行粗略地划分（表 1）。

#### 1.1.1 大级次古地理单元

大级次古地理单元为海、陆及其内部的大型地貌单元，相当于冯增昭先生划分的一、二级古地理单元。这 2 个级别的古地理单元分级已有共识。

海洋和陆地为地球表面最宏观的地貌单元，可称为巨型地貌，其延伸距离一般为数百千米以上，面积范围一般大于  $10^5 \text{ km}^2$ 。海洋和陆地内部的大型地貌单元主要依据高程或水深的大幅度差异（数百至数千米）来划分。在陆地内部，按照高程的大幅度差异将其细分为高原、山地、丘陵、盆地、平原等（王鸿祯，1985）。在海洋内部，按照

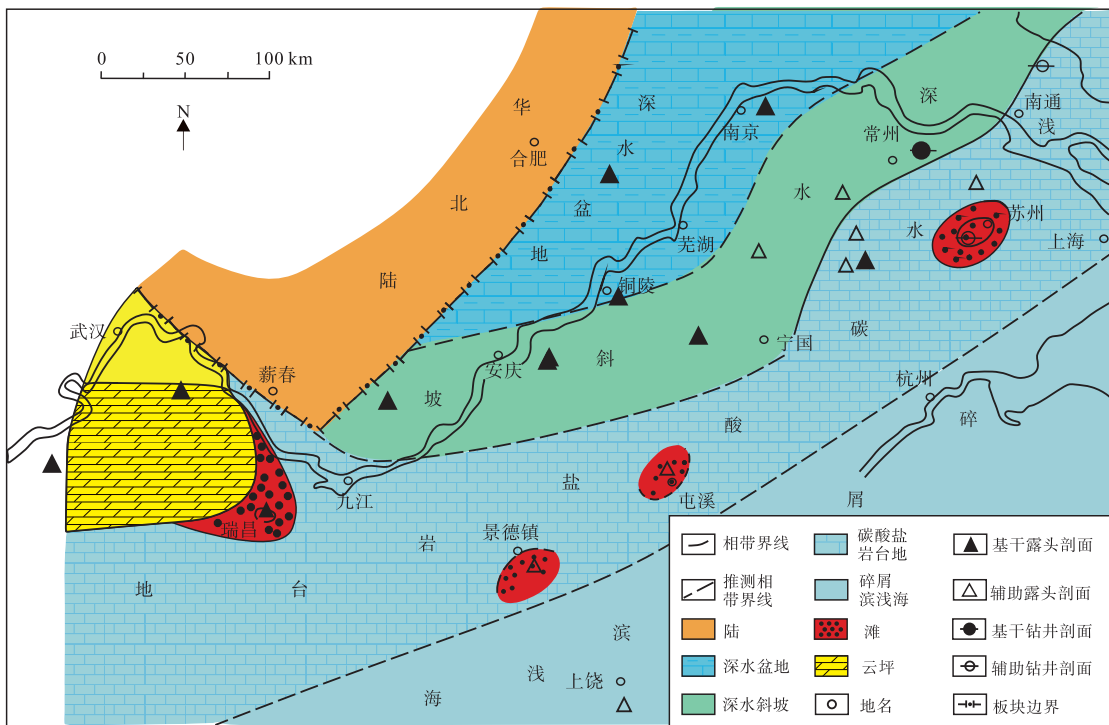


图 1 下扬子地区早三叠世和龙山区岩相古地理分布（据冯增昭和吴胜和，1987；有修改）

Fig. 1 Lithofacies palaeogeographic distribution of the Helongshan Age of Early Triassic in Lower Yangtze River Region (modified from Feng and Wu, 1987)

表 1 古地理单元级次划分方案  
Table 1 Hierarchy scheme of palaeogeographic units

古地理单元级次	大级次		中级次		小级次		
	巨型	大型	中大型	中小型	小型	微型	
古地理单元示例	陆地	高原/山地/丘陵	高原内的峡谷、山间盆地(湖泊)及其内部山前斜坡、冲积平原、浅湖、半深湖—深湖等				
		大盆地/大平原	盆地(湖盆)中凸起/凹地及其内的山前斜坡、冲积平原、滨浅湖(湖棚)、半深湖(斜坡)、深湖(盆底)等	山前斜坡内的冲积扇与扇间;冲积平原中的河流与漫滩;滨—浅湖的三角洲、滩坝等	河流中的河床、堤岸、漫滩等;三角洲中的平原、前缘斜坡、前三角洲等	河流河床中的边滩、心滩等;三角洲前缘中的河口坝、坝间凹地等	
	海洋	滨浅海(陆棚、台地)	海陆过渡区		滨岸;潟湖、障壁岛、潮坪、三角洲、河口湾等	滨岸可划分为海岸沙丘、后滨、前滨和临滨等	
			局限海、开阔海、台内凹地、台地边缘		台内滩、礁等	礁分为礁前、礁核、礁后等	礁核分为礁顶、礁坪等
		半深海(陆坡、斜坡)	海底峡谷、微盆地等	斜坡扇等			
		深海(海槽、盆地)	海沟、深海平原等	盆底扇等			
	地势高差	数百米至数千米		数十米至数百米		数米至数十米	
	延伸距离	10 <sup>2</sup> ~10 <sup>4</sup> km		10 <sup>1</sup> ~10 <sup>2</sup> km		小于 10 km	
	单元面积	大于 10 <sup>5</sup> km <sup>2</sup>		10 <sup>2</sup> ~10 <sup>5</sup> km <sup>2</sup>		小于 10 <sup>2</sup> km <sup>2</sup>	
	主控因素	内营力为主		内营力与外营力并重		外营力为主	

水深及其变化幅度可细分为滨浅海(陆棚、台地)、半深海(陆坡、斜坡)、深海等。其中,陆棚为陆地的延伸,陆坡为板块间接触带,洋盆的基底为洋壳。大型地貌单元的延伸距离一般为数百至数千千米,面积范围一般介于 10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> 之间。

大级次古地理单元的形成与演变受控于地球多圈层(地幔、地壳、水圈、生物圈、大气圈)作用,以内营力(地球内部能量驱动力)作用为主。地球深部动力过程(岩石圈板块运动及深部地幔动力学)是地表环境演化的驱动引擎(朱日祥等, 2025)。板块分离、俯冲、碰撞导致了地球陆地与海洋持续变迁,深部动力使得地壳拉张减薄、折叠压缩、走滑移动,为形成盆地的主要驱动力(Ju *et al.*, 2022),深刻影响着盆山耦合。另外,外营力作用在大规模源汇系统中的地表过程(大气、水等对岩石的风化、侵蚀、搬运、沉积作用等)改变着古地貌(图 2)(Matenco and Andriessen, 2013; Salles *et al.*, 2023)。当然,从该尺度的地貌高差而言,外营力作用只起到次要的作用。

### 1.1.2 中级次古地理单元

在大型地貌单元内部,可划分出很多级次。例如,冯增昭先生在碳酸盐岩台地中划分了坪、滩、礁等三级古地理单元(冯增昭, 2003),其内还可进一步细分,如礁可进一步分为礁前、礁核、礁后等亚环境(亚相),而礁核又可分为礁顶、礁坪等微环境(微相)。

然而,由于构造背景的差异,不同类型大型地貌单元内部的地貌分异有较大的差别,表现为不同的等级序列。

以陆相盆地为例,拗陷湖盆(如鄂尔多斯盆地)作为一个大型地貌单元,其内可分为山前斜坡(山麓)、冲积平原、滨浅湖、半深湖—深湖等次级单元,这些次级单元内部还可进一步分为多个级次,如在滨浅湖中分出三角洲、滩坝等(对应于沉积环境),在三角洲中分出三角洲平原、三角洲前缘、前三角洲等亚环境,在三角洲平原中分出分流河道及河道间等微环境(Reineck and Singh, 1973; 朱筱敏, 2020);断陷湖盆(如渤海湾盆地)构造及地貌更为复杂,其内包含若干隆起和

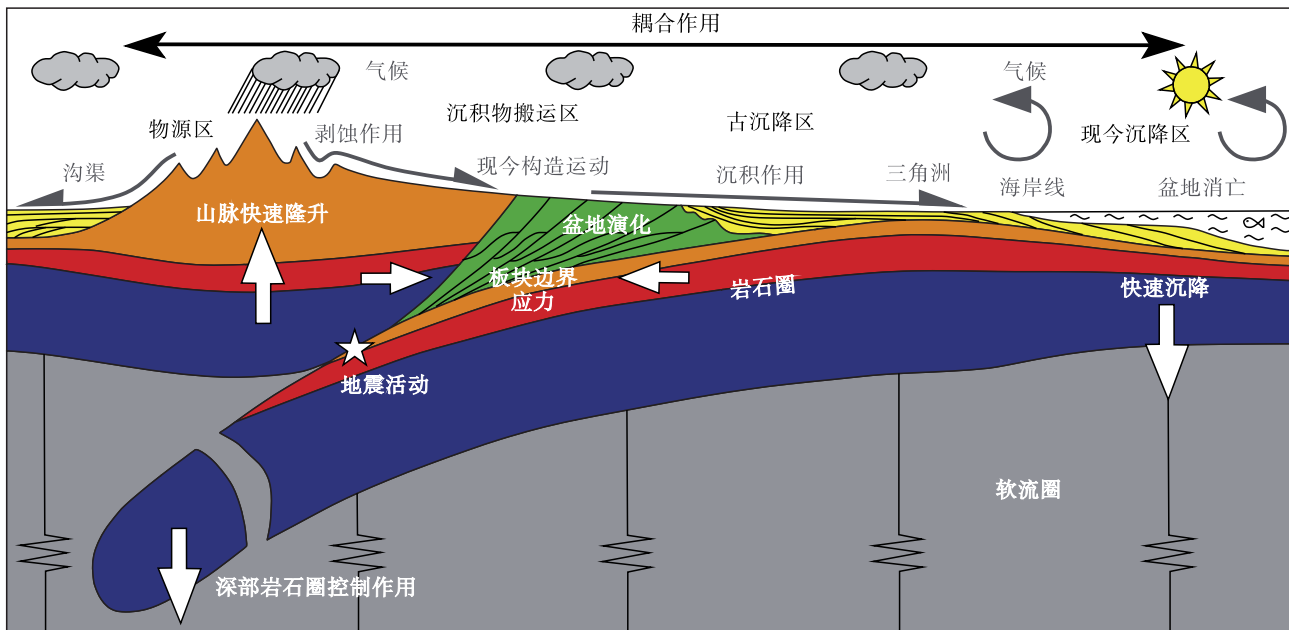


图 2 板块运动背景下的源汇系统与古地理示意图 (据 Matenco and Andriessen, 2013)

Fig. 2 Schematic diagram of source-to-sink systems and palaeogeography within the context of plate tectonics  
(after Matenco and Andriessen, 2013)

拗陷，拗陷内又包含若干凸起和凹陷，凹陷内又可细分山麓—冲积平原、滨浅湖、半深湖—深湖等，山麓—冲积平原内部发育冲积扇、河流等单元 (图 3)，其内还可进一步分为不同的亚环境和微环境。这些亚环境和微环境对应于小型和微型地貌单元。显然，在不同类型的盆地中，微地貌与盆地之间相差 4~5 个级次，迄今未形成普适性的、统一的分级方案。

作者拟按照规模和成因相结合的原则对上述不同级次的地貌进行归类，将小—微地貌单元 (亚—微环境) 归为小级次古地理单元，而将小型地貌单元 (亚环境) 与大型地貌单元 (如盆地) 之间的多级单元统称为中级次古地理单元。

其一，从规模上考虑。小—微地貌的规模小，垂向高程差异一般为数米至数十米，延伸规模一般小于十千米，面积一般小于数十平方千米 (不同沉积体系的小—微地貌规模有差异)；其与盆地之间的其他级次单元的规模则相对较大，垂向高程差异一般为数十至数百米，延伸规模一般为数十千米至数百千米，面积一般数百至数万平方千米。

其二，从成因上考虑。小—微地貌主要受控于外营力 (地球表面受重力和太阳能驱动的作用力) 的影响，而盆地与小型地貌 (亚环境) 之间的各

级单元主要为内营力和外营力并重作用的影响。以沉积盆地为例，内营力作用的区域构造升降影响着盆地物源区及内部地貌，如山前斜坡、冲积平原、滨浅湖、半深湖—深湖，而外营力作用在盆—山源汇系统中的地表过程改变着古地貌 (林畅松等, 2015; 邵龙义等, 2019)，使得物源区不断被侵蚀导致高程变低，沉积区则不断被填充，如深湖区的持续沉积充填使其变为浅湖甚至冲积平原。

因此，中级次古地理单元为大型地貌单元 (如盆地) 与小型地貌单元 (亚环境) 之间的多级单元的统称，其特征、分布与变迁受控于内营力和外营力的并重作用。从相对规模及成因出发，还可将中尺度古地理单元粗略地分为 2 级：将冯增昭先生所定义的坪、滩、礁等三级古地理单元 (对应于碎屑沉积环境的三角洲、湖底扇等) 定为中小型古地理单元，其与大型地貌单元 (如盆地) 之间的多级单元则统称为中大型古地理单元。相对于中小型古地理单元，中大型古地理单元的内营力贡献相对较大。

在陆地中，拗陷湖盆中的山前斜坡、冲积平原、滨浅湖 (湖棚)、半深湖 (斜坡)、深湖 (盆底) 等，断陷湖盆中的凸起、凹陷及其内的山麓、冲积平原、滨浅湖 (湖棚)、半深湖 (斜坡)、深

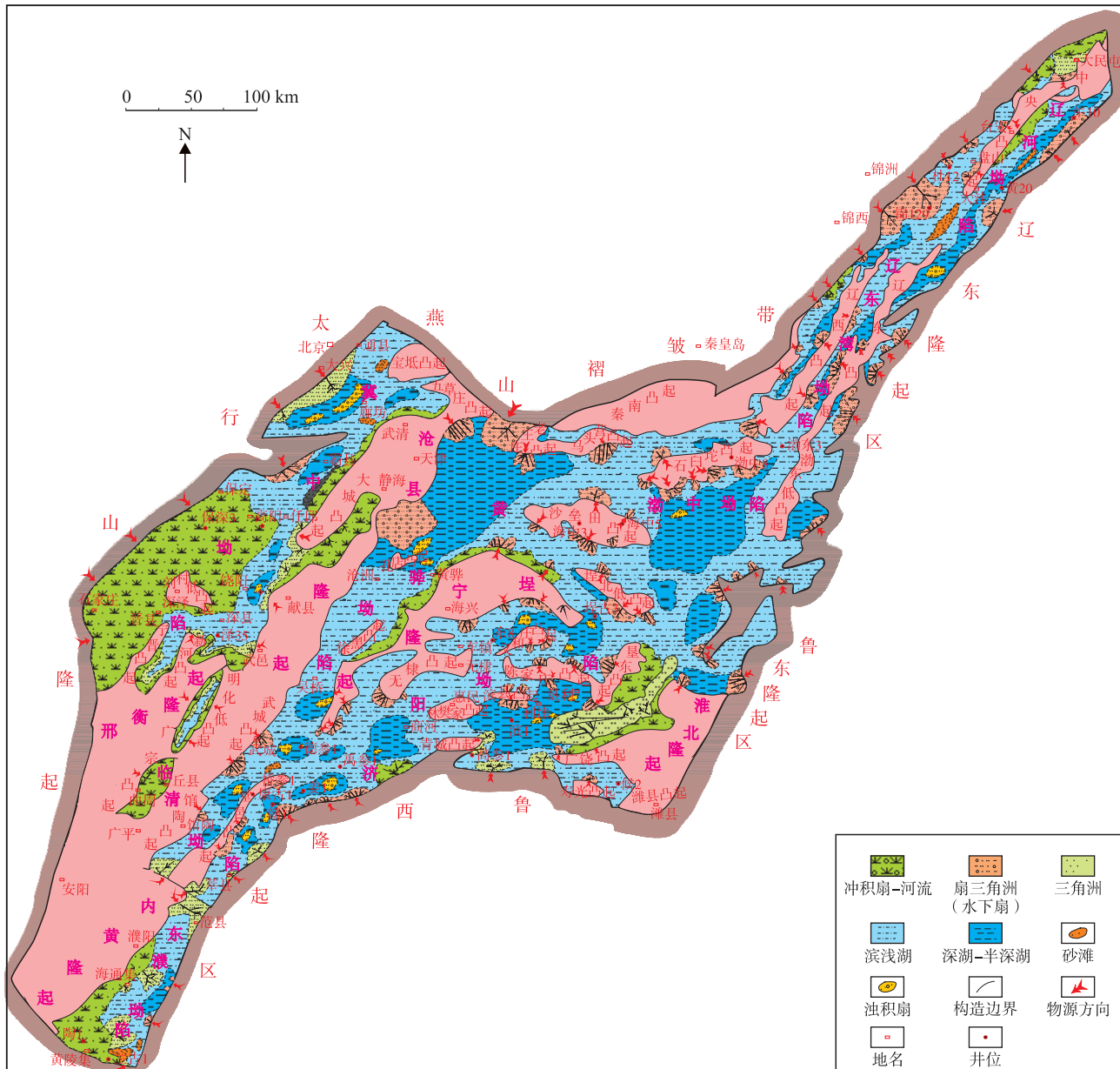


图 3 渤海湾盆地古近系沙河街组三段古地理图 (据纪友亮等, 2022; 有修改)

Fig. 3 Palaeogeography of the Member 3 of Paleogene Shahejie Formation in Bohai Bay Basin (modified from Ji *et al.*, 2022)

湖 (盆底) 等, 高原内的峡谷、山间盆地 (湖泊) 及其内部的山麓、冲积平原、浅湖、半深湖—深湖等均归属于中大型古地理单元。山前斜坡内的冲积扇, 冲积平原中的河流, 滨—浅湖的三角洲、滩坝等, 半深湖—深湖中的湖底扇等, 则归属于中小型古地理单元。

在海洋内, 滨浅海的海陆过渡带、局限海、开阔海、台内凹地、台地边缘等, 半深海的海底峡谷、微盆地等, 归属于中大型古地理单元。在海陆过渡带的滨岸、潟湖、障壁岛、潮坪、三角洲、河

口湾等, 台地边缘的礁、滩等, 深海中的海底扇, 则归属于中小型古地理单元。

### 1.1.3 小级次古地理单元

小级次古地理单元为小—微地貌单元 (亚—微环境), 大体相当于中国沉积相相关教材及论著中的沉积亚相和微相级别。亚相为亚环境及其沉积物 (岩) 的综合, 而微相为微环境及其沉积物 (岩) 的综合 (朱筱敏, 2020)。小级次古地理单元的垂向高程差异一般数米至数十米, 延伸规模一般小于数十千米, 具有特定的形态和成因, 如河道

及其内部的边滩等(图4),三角洲前缘及其内部的河口坝等。这一级次的古地理单元因与沉积作用密切相关,又往往归于沉积学的研究范畴。

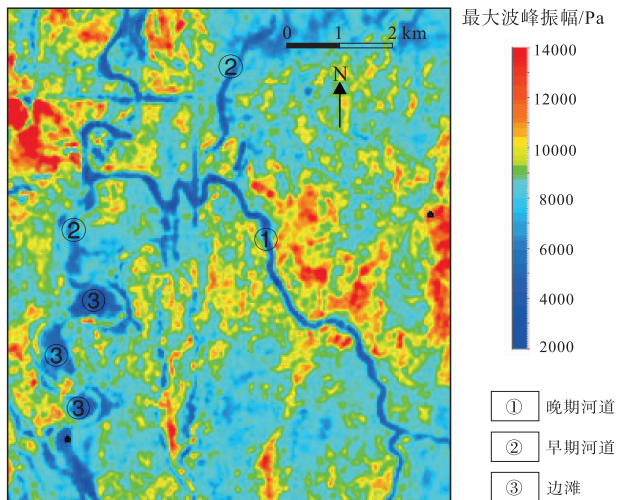


图4 松辽盆地西缘下白垩统嫩江组萨尔图油层三维地震资料的地层切片(指示古河道及边滩分布)

Fig. 4 Distribution of channels and point bars revealed by three-dimensional seismic stratigraphic slice, the Sartu interval of Nenjiang Formation of Lower Cretaceous in western Songliao Basin

小级次古地理单元的形成与分布主要受控于外营力作用。小级次古地理所在的区域构造与气候条件相似,小一微地貌单元的形成与演化主要受到侵蚀、搬运、沉积等外营力作用(地表过程)的影响。例如,在三角洲内,三角洲平原分流河道进入湖泊或海洋而在三角洲前缘形成河口坝,且随着前积作用的进行,三角洲前缘不断被填平而转变为三角洲平原(张昌民等,2010;吴胜和等,2019)。当然,局部构造运动(褶皱、同沉积断裂活动)等内营力作用会影响这一过程,但只起到次要的作用(与大级次、中级次古地理单元相比)。

## 1.2 不同级次古地理的研究意义

古地理研究对于地球系统科学与宜居地球研究、矿产资源勘查与开发具有重要的意义。不同级次古地理研究的意义既有相似之处,又有较大的差异。

### 1.2.1 地球系统科学与宜居地球研究意义

大级次古地理是地球多圈层相互作用的超宏观响应。这一级次的古地理分布及演变可提供岩石圈板块运动及深部地幔动力学信息;古海陆分布直接

影响物种迁移、隔离与辐射,为生物演变提供关键环境背景;地质历史中的海陆变迁及其内部地貌变化影响着大洋环流及大气环流,继而控制着地球气候系统的长期演变规律;同时,这一级次古地理格架控制着大规模(从山脉至深海)的源汇系统及碳循环体系(Müller *et al.*, 2022)。因此,大级次古地理研究是多圈层地球系统科学与宜居地球研究的重要基础。

中级次古地理研究聚焦于区域自然环境,是连接全球/大区域古地理背景与局域自然环境的关键桥梁。以盆地为例,其充填系列保存了造山运动、火山活动、源汇系统、海(湖)侵海(湖)退、气候突变等事件的完整信息,因此,这一级次的古地理研究可精细揭示“构造驱动—沉积响应—气候调节”这一核心地球系统过程及动力学机制,对于区域地球系统过程及宜居环境研究具有重大的意义。

小级次古地理研究关注局域自然环境,揭示关键地质过程的微观机制。通过小一微地貌(亚一微环境)及沉积构型研究,揭示古环境变化(如古风暴事件、洪水事件、盐度短期波动等)及局域内营力作用(如古地震、古火山等)的精细过程和触发机制,为气候系统敏感性分析与未来环境预测、地质灾害风险评估、工程地质基础评价等奠定必要的基础。

### 1.2.2 矿产资源勘探和开发研究意义

古地理控制着矿产资源(如石油、天然气、煤炭、磷矿、锰矿、蒸发岩类等沉积矿产)的形成与分布,因此,古地理研究是矿产资源预测的基础(谢家荣,1948)。然而,不同级次的古地理研究对矿产资源勘查与开发的意义有较大的差别。

大级次古地理控制全球及大区域内矿产资源的宏观分布规律,其研究有利于矿产资源远景区预测,即战略选区。以油气资源为例,古大陆演化及气候旋回等因素影响着烃源岩的宏观分布(Klemme and Ulmishek, 1991; 赵文智等, 2019),地球系统的动态演化及其多圈层(地幔、地壳岩石圈、水圈、大气圈、生物圈)物质循环过程控制了油气资源的形成与富集(朱日祥等, 2025),这一级次古地理研究对于含油气盆地的优选意义很大。

中级次古地理控制盆地或造山带内部矿产资源的分布规律,其研究有利于矿产资源的勘探。以油

气资源为例,盆地内部的古地理控制了油气生、储、盖组合及其展布。例如,稳定的深水陆棚、半深湖—深湖等低能还原环境有利于藻类等优质生油母质的大量繁殖与保存;冲积扇、三角洲、滩坝、湖(海)底扇等环境有利于形成储集层;静水沉积的泥岩、盐岩等可作为优质盖层。盆地中心可形成自生自储的页岩油气层,其含油性、储集性及可改造性受控于盆内古地貌、古水文、古气候、古生态等因素的综合影响(张水昌等,2005;刘招君和孙平昌,2021;孙龙德等,2021;吴因业等,2022;姜在兴等,2023)。因此,深入开展这一级次古地理及其演化研究,对于有利油气勘探区带的精准预测、提升油气勘探成功率具有重要意义(鲍志东等,2024)。

小级次古地理控制矿床内部矿产资源品质及分布的差异,其研究有利于矿产资源的评价与开发。以油气资源为例,亚—微环境的空间分布差异控制着油气储集层的非均质性(储集层连续性和连通性、储集层质量差异性等),继而影响油气储量的估算及油气开采效率(吴胜和,2010;吴胜和等,2021)。迄今,由于这类因素,全球已开发油藏中近70%的原油未能采出而滞留于地下成为剩余油,需要加强储集层非均质性研究以预测和挖潜这部分剩余油。因此,深入研究这一尺度古地理,对于油气藏评价与开发具有重大的指导作用。

## 2 不同尺度的古地理重建

古地理重建,即恢复某一范围、某一地质时期古地理单元的分布及演化。针对不同级次古地理单元分布的重建,研究尺度及方法有较大的差异。

### 2.1 古地理重建的尺度划分

古地理重建尺度包含重建范围(空间尺度)与时段(时间尺度)2个方面。

古地理重建的范围是根据研究目标而定的,可以是全球,也可以是其内任一范围,如亚洲、中国、华北、渤海湾盆地或其内任一小区。针对前述的大、中、小3个级次的古地理单元,相应地将其重建范围分为大、中、小3个尺度。各尺度的重建范围包含相应级次的古地理单元,例如,大级次古地理单元分布的重建范围至少包含若干大型地貌单元(如盆地),因此,大尺度古地理的重建范围

一般为全球或跨盆地大区域。

古地理重建的时段有不同的级次,例如,地质年代中的代、纪、世、期(对应于年代地层单元的界、系、统、阶);岩石地层单元中的群、组、段、亚段;层序地层的单元中的一级层序、二级层序、三级层序、准层序组、准层序、岩层组;油层对比单元中的含油层系、油层组、砂层组、小层和单层。古地理重建的时段取决于重建范围内等时地层对比的“精度”。一般地,范围越大,古地理越复杂,小时段等时地层对比的难度越大,古地理重建的时段则越大。因此,古地理重建的空间尺度与时间尺度有一定的对应关系。当然,若未来的地质测年精度有大幅度提升,可望在大范围内进行小时段对比。

综合考虑古地理重建的目标(古地理单元级次)、研究范围及时段,将古地理重建分为大、中、小3个尺度。

#### 2.1.1 大尺度的内涵

大尺度古地理重建的目标主要为大级次古地理单元的分布与演化。

重建范围一般分为2类。其一为全球范围,即全球尺度;其二为跨古板块、跨盆地或造山带的大区域范围,例如中国范围(跨华北、扬子、塔里木等板块)、华北地区(跨越渤海湾、鄂尔多斯等盆地),可称为跨盆地尺度或大区域尺度。面积级别大体为 $10^5 \text{ km}^2$ 。在这一尺度上,地质历史时期的板块运动会使得地球表面现今某一位置的经纬度发生较大的变化,使得跨板块范围的古地理重建与板块内的古地理重建有较大的差别。

在全球尺度或跨盆地尺度上,主要依据古生物地层学、低温年代学、磁性地层学等进行年代地层对比(Cervený *et al.*, 1988;杨振宇,2002;朱茂炎等,2021)。由于造山带的地层出露差且不连续,从而难以在研究范围内进行连续的地层追踪对比,对比的时段(时间尺度)较大,一般为世和期,例如,冯增昭先生在重建下扬子地区中下三叠统青龙群岩相古地理时,编图单元为组,相当于阶(印度阶、奥伦尼克阶、安尼阶、拉丁阶)(冯增昭 and 吴胜和,1987)。统计表明,在显生宙(第四纪除外)内,世(统)、期(阶)的时段分别为5~15 Ma和2~10 Ma,亦即大尺度古地理重建的时段(编图的时间单元)一般为数百万年至数千

万年。

### 2.1.2 中尺度的内涵

中尺度古地理重建的目标主要为中级次古地理单元的分布与演化。

其研究范围为一个大型地貌单元（如一个盆地）或其内的一个较大区域（如一个拗陷），面积一般为 $10^2 \sim 10^5 \text{ km}^2$ 。与大尺度相比，该尺度研究范围在一个板块（或地块）之内。

在具有钻井和地震资料的盆地内，可进行旋回地层学、钻井测井地层对比、地震层位追踪对比等，因此，地层对比的精度要高于跨盆地的大范围对比。但从整个盆地来讲，钻井井距一般较大，且三维地震难于全面覆盖，因此，地层对比的精度又不是很高。一般地，地层对比的精度可达到岩石地层单元的段或亚段（如渤海湾盆地沙二段上亚段），或层序地层单元的准层序组或体系域，或油层单元对比单元的油层组，这一级别的地层主要受偏心率长周期的影响，其时段一般介于 $0.2 \sim 1 \text{ Ma}$ 之间（郑荣才等，2001），亦即中尺度古地理重建的时段（编图的时间单元）一般为数十万年。

### 2.1.3 小尺度的内涵

小尺度古地理重建的目标主要为小级次古地理单元（亚、微环境）的特征、分布与演化。

研究范围一般为一个沉积体系级别。在现阶段，小尺度古地理重建的地区主要为出露良好的露头区或具有较丰富资料的油气田。例如，鄂尔多斯盆地延安—延长地区的露头（湖盆浅水三角洲）、安塞油田（目的层段为湖泊三角洲）、庆城油田（目的层段为湖底扇）等；渤海湾盆地胜利油区的孤岛油田（目的层段为河流体系）、胜坨油田（目的层段为三角洲）等；英国北海马尔福斯盆地的Buzzard油田（目的层段为海底扇）等。其研究范围一般小于 $10^2 \text{ km}^2$ 。

在出露良好的露头区或已评价开发的油气田内，可进行精度较高的地层对比，因此，可在更小的时段内进行古地理重建。例如，在一个油气田范围内，有众多的钻井（探井和开发井，井距一般为 $100 \sim 1000 \text{ m}$ ）和三维地震资料，地层对比的精度可达层序地层单元中的准层序（短期基准面旋回）和岩层组（超短期基准面旋回），或油层对比单元的小层和单层。短期基准面旋回主要受偏心率短周期的影响，其时段一般为 $0.04 \sim 0.17 \text{ Ma}$ ，而

超短期基准面旋回主要受岁差周期的影响，其时段一般为 $0.02 \sim 0.04 \text{ Ma}$ （郑荣才等，2001），亦即小尺度古地理重建的时段（编图的时间单元）一般为几万年至十几万年。

## 2.2 不同尺度的古地理重建方法

古地理重建与现代地理研究有很大的差异。相比于古地理，现代自然地理相当于地质历史时期的瞬间，是相对“静态的”，而古地理分布在地质历史时期是变化的、活动的；另一方面，现代地理是可以直接观察和测量的，而古地理则已时过境迁，只有地层记录或构造痕迹等，而这些记录或痕迹要么埋藏于地下，要么出露地表但保存不完整甚至缺失，因此，古地理重建具有很大的难度。

总体来说，古地理重建包括3个大的方面：地层—构造模型的建立、古地理单元类型识别与分布、古地理参数的数字化建模。不同尺度古地理重建的方法既有相似之处，又有明显的差异。

### 2.2.1 大尺度古地理重建

大尺度古地理重建是在全球或跨盆地范围内进行大级次古地理单元的特征、分布及演化研究。

#### 1) 地层—构造模型的建立

在全球及跨板块的大范围内，地球演化历史中的板块运动使得地球表面现今某一位置的经纬度在地质历史时期发生很大变化，大级次古地理单元的分布及变迁具有明显的时空活动性。因此，在大尺度古地理重建中，需要在年代地层对比的基础上建立板块运动模型（图5）。首先，通过古地磁视极移曲线分析对古板块（古大陆）进行定位（Cox *et al.*, 1963），并结合古构造和古生物对各板块或地体的古大陆位置进行复位；然后，利用深部地球物理、地表地质断裂证据，借助生物古地理资料，对古大陆和盆地的边界、规模予以限制；最后，利用变形缩短率、构造平衡剖面恢复技术等对原型盆地进行复原（王成善等，2010；刘少峰和王成善，2016）。由于板块运动是活动的，因此，基于板块运动模型重建古地理又被称为“活动论”古地理重建（王成善等，2010；何登发等，2020）。这是大尺度古地理重建、特别是全球古地理重建的一个重要特点。

#### 2) 古地理单元类型的识别与分布

在地层—构造模型基础上，针对各板块（或地体）及其内部部位，进行古地理单元类型的识

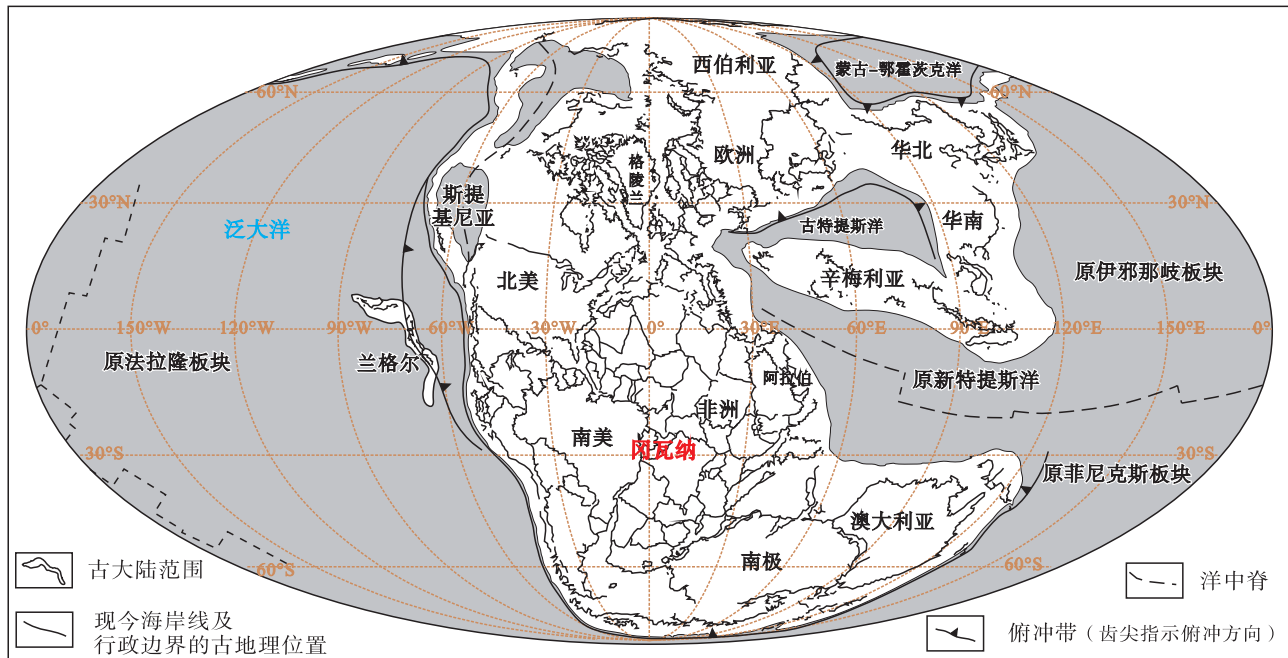


图 5 全球晚三叠世 (230 Ma) 古板块再造 (据 Scotese and Schettino, 2017; Kocsis and Scotese, 2021)

Fig. 5 Late Triassic (230 Ma) paleo-plate reconstruction of the global (after Scotese and Schettino, 2017; Kocsis and Scotese, 2021)

别, 并编制古地理单元类型分布图。对于具有地层记录的地区, 主要基于露头 and 钻探资料, 应用古生物、岩相资料进行大尺度古地理单元类型识别。在剥蚀区, 主要基于构造演化历史推断。

**古生物地理研究:** 根据地层记录中的化石推测古生物当时栖居的环境。早期的古地理研究 (Hunt, 1873) 即是应用古植物学和古动物学研究地质历史时期的古环境 (王成善等, 2010)。中国第一部古地理学专著《中国古地理图》即是以古生物学资料为主要依据编制的 (刘鸿允, 1959)。应用各门类的古生物学资料 (包括遗迹化石资料) 研究沉积环境及古气候等 (卢衍豪等, 1965; 王鸿祯, 1989; 杨式溥, 1999; 杨守仁等, 2001; Hu *et al.*, 2014), 通过生物隔离分析研究生物区系与古板块的关系 (Hallam, 1973; Gray and Boucot, 1976; 王乃文, 1984; 王鸿祯等, 1990)。这类研究属于古生物地理学的范畴 (殷鸿福, 1988)。

**岩相古地理研究:** 从岩相的特征 (物理、化学和生物特征) 推测其形成环境。沉积岩是沉积环境的产物, 而火成岩则是侵入和喷发的产物, 因此可通过其岩相特征及分布推测当时的沉积环境 (Reineck and Singh, 1973; 冯增昭, 1977, 1980; Galloway, 1983; Walker and James, 1992; 吴胜和

等, 1994; 邵龙义等, 2021) 或火山侵入和喷发的环境 (邱家骧, 1984; 王璞珺等, 2003)。由于矿产资源勘探的驱动, 中国的岩相古地理特别是沉积古地理研究取得了巨大的进展, 在全国及大区范围内及多个地层层系开展了一系列的岩相古地理研究和编图 (关士聪等, 1984; 冯增昭等, 1990, 1997, 2003; 刘宝珺和许效松, 1994; 马永生等, 2009; 郑和荣和胡宗全, 2010)。

在大尺度古地理重建时, 时段比较长, 而在这类长时段内的自然环境会随时间发生较大的变化。如何在较长时段内表达某处古地理单元类型是一个必须面对的现实问题。传统的方法是用某一种优势环境表示, 这类定性的方法难于客观表达该时段内的古地理单元特征。为此, 冯增昭先生倡导一种定量统计分析方法, 即“单因素分析多因素综合作图法” (冯增昭, 1977, 1992, 2004, 2016)。首先, 对资料点的不同单因素进行成因分析和比例统计, 然后编制各单因素平面分布图 (这也是资料点之间古环境预测的一个过程), 最后进行综合分析以判别不同位置的古地理单元类型。在古地理图中, 每一个古地理单元的划分和确定都有各种定量的单因素数据和图件为依据, 而且每一个古地理单元的特征也有定量的数据作支撑。这是大尺度古地

理重建的一个重要进展。

### 3) 古地理参数的数字化建模

在古地理重建中，除了重建古地理单元类型的分布，还重建古地理参数（古海拔高程、古海洋海水参数、气候参数等）的分布。这涉及 2 个方面，其一是古地理参数的估算，其二是数字化模型的建立。

在大尺度古地理重建中，主要通过岩相、古生物、地球化学等方法和技术进行古地理参数的估算。岩相和古生物特征反映了其形成时期的环境条件，如 Scotese (2009, 2021) 列举了不同沉积环境对应的岩相类型及其反映的古地形和古水深 (表 2)。由于取样有限的原因，地球化学等方法技术恢复的古地理参数主要用来进行校正，如应用常量/微量元素分析水体古盐度和古水深 (郑荣才和柳梅青, 1999; Wei and Algeo, 2020; 何幼斌等, 2025)，特别是应用碳酸盐团簇同位素 (carbonate clumped isotope) 技术对古水深及古高程进行分析 (Rowley *et al.*, 2001; Ghosh *et al.*, 2007; Eiler, 2011)，并据此分析典型山脉—盆地系统的剥露—埋藏史和典型山脉或区域的隆升过程及可能的古高程 (Currie *et al.*, 2005; Quade *et al.*, 2011)。另外，可依据板块构造重建模型得到的地质历史时期各种板块构造事件来估算古地形和古水深，例如，洋脊扩张形成的大洋岩石圈随着年龄不断增长、冷却而不断沉降，其沉降量 (可换算为古水深) 与大洋地壳年龄平方根成反比关系 (Turcotte and Schubert, 2014)。

随着计算机技术、GIS 技术等方法的长足进

步，古地理图的表达由传统的二维平面矢量线/面向数字化古地理重建方向发展 (Scotese, 2009; 侯明才等, 2023)。在板块构造模型基础上，将研究区域进行网格化，然后在每个网格中进行赋值 (古高程、气候因子等)，从而建立数字化古地理模型。网格“赋值”主要以岩相古地理和生物古地理单元分布图为基础，将识别的古地理单元及高程数据，整合到软件系统 (如 GPlates 软件系统)，构建古地理参数分布模型，据此可得到不同地质历史时期的古地理动态演化模型。依据计算机图形学的可视化功能，可在地球球体背景下从不同角度观察具有古地形和古测深元素的活动三维图，表达古代山岳、海岸线、活动板块边界、古气候带等信息 (图 6)。这类图被称为第三代全球古地理重建图 (王成善等, 2010)。

当然，这类三维古地理模型不是真正意义上的三维模型。在这一模型中，只进行了平面网格划分，例如，Scotese (2021) 在构建全球数字化模型中，平面网格大小为 10 km×10 km；垂向上为一个作图单元 (即为 1 个网格，5 Ma 或 40 m)。“三维”形态主要用数据之差的图形显示来表达。这类模型可称为拟三维模型。

### 2.2.2 中尺度古地理重建

中尺度古地理重建是在大型地貌 (如盆地) 范围及较大时段内研究中级次古地理单元 (如凹陷地貌及沉积体系) 的特征、分布及演化。以含油气盆地内部的古地理重建为例，资料基础主要为少量的岩心、井距为 2~10 km 的探井和评价井钻井与测井数据以及二维或三维地震数据。由于资源

表 2 海拔对应的环境与地质证据 (据 Scotese, 2009, 2021)

Table 2 Elevation, environments, and geological evidence (after Scotese, 2009, 2021)

海拔/m	环境	地质证据
10000~4000	碰撞造山带	高温高压变质岩
4000~2000	安第斯型造山带	大陆环境的安山岩/花岗闪长岩
2000~1000	岛弧火山; 陆内裂谷边缘	海洋环境的安山岩/花岗闪长岩; 邻近的扇砾岩
1000~200	裂谷; 某些弧前脊	地堑中的玄武岩与湖相沉积; 构造混杂岩
200~海平面	海岸平原; 河流下游体系; 三角洲顶部	冲积沉积复合体; 大型泛滥平原沉积复合体; 沼泽和河道砂岩
海平面~-50	内陆架; 筑礁的陆架三角洲前缘	非均质海洋沉积; 巴哈马型碳酸盐岩; 顶积粉砂岩和砂岩
-50~-200	外陆架; 某些陆表海盆地; 前三角洲	细粒沉积物, 丰富的生物产物; 细粒碎屑岩或碳酸盐岩; 前积粉砂岩和近源浊积岩
-200~-4000	大陆斜坡/隆起; 洋中脊; 前三角洲扇	滑塌/等深流沉积; 年龄小于 60 Ma 的洋壳底积黏土和远源浊积岩
-4000~-6000	洋底	洋壳上的远洋层序
-4000~-12000	海沟	远洋层序中的浊积岩

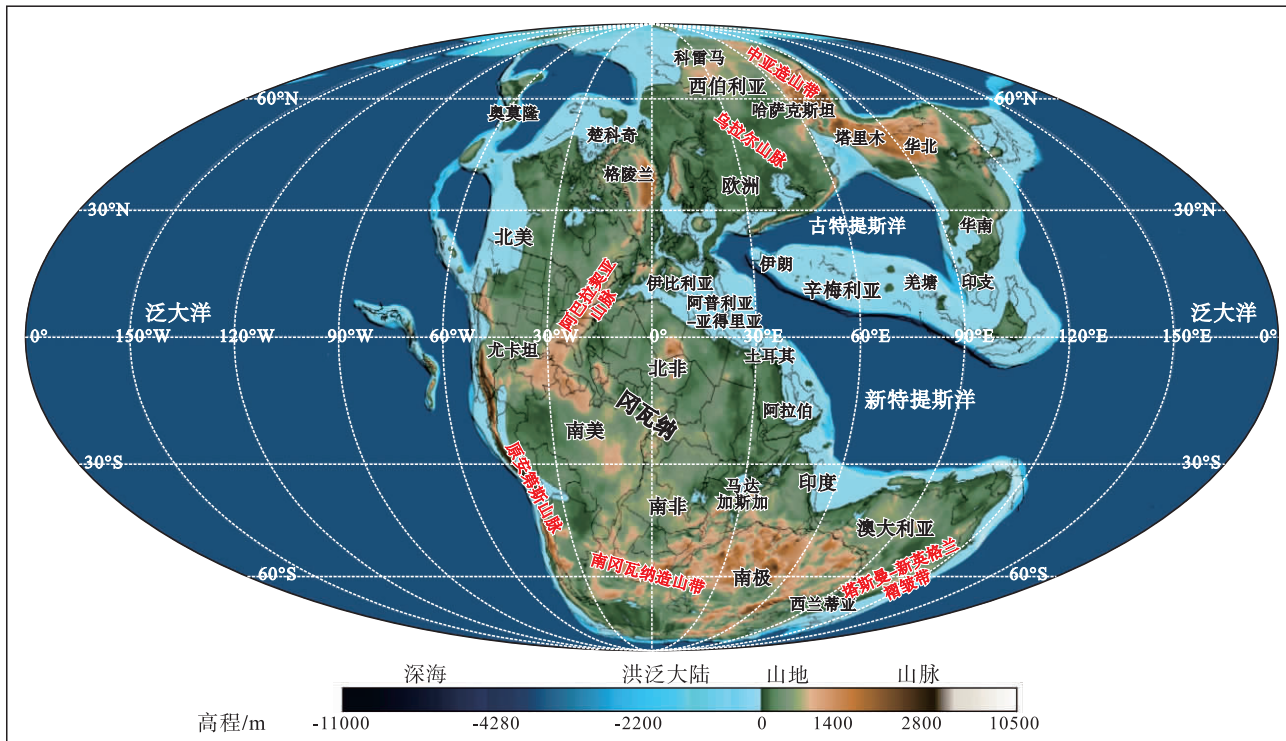


图6 全球晚三叠世(230 Ma)古地理图(据 Scotese and Schettino, 2017)

Fig. 6 Global palaeogeographic map of the Late Triassic (230 Ma) (after Scotese and Schettino, 2017)

勘查的驱动,盆地尺度的古地理研究取得了很大的进展。

1) 地层—构造模型的建立

在中尺度(如盆地范围)古地理重建中,由于研究范围处于板块内部,其相对经纬度变化不大,因此在建立地层—构造模型时,无需考虑板块或地块的“活动性”。

在含油气盆地内地层对比中,一方面是基于露头 and 钻井岩心中的古生物资料、放射性同位素、岩石剩余磁极性等方法进行地层对比;另一方面是在层序地层学理论指导下,基于钻井及人工地震资料进行多井测井地层对比和(或)地震层位追踪对比(邓宏文, 1995; 朱筱敏, 1998; 鲍志东等, 2002; 吴因业和顾家裕, 2002)。

依据地层对比结果(地层厚度及剥蚀情况),结合断裂分析,进行盆地构造分析(盆地内拗陷与隆起、凹陷与凸起等构造单元的分布),建立地层—构造模型。

2) 古地理单元类型的识别与分布

古地理单元类型的识别与分布研究一般遵循以下流程:首先,根据露头或钻井岩心的古生物、岩

性与沉积构造、地球化学分析进行环境识别;然后,通过岩心标定测井,应用测井资料对各单井的岩相及沉积相进行解释;最后,通过井筒标定地震,进行地震地貌学(Posamentier, 2001)和地震沉积学研究(Zeng et al., 1998; 曾洪流等, 2012; 朱筱敏等, 2017),对地震资料进行属性分析和(或)反演,据此进行岩相及沉积相分布预测;或者,在地震资料缺乏的情况下,根据多井编制砂地比图等图件,据此编制岩相古地理图或沉积相分布图。

这类图件由于时段相对较长,垂向上往往有相变,因此在平面图上反映的相边界一般为统计边界(图3)。例如,图中表达的三角洲与浅湖的边界并非严格意义上两者的物理分界。

3) 古地理参数的数字化建模

盆地尺度的古地理参数分布研究主要是编制古地貌图,即某一地质时段或时刻的古高程及古水深分布图。

在盆地范围内,由于岩心资料较少,导致可直接识别古地理参数(如水体深度、古盐度等)的古生物、地球化学资料(常/微量元素等)较少,

难以作为古地理参数数字化建模的主要依据。另一方面，岩相及沉积相分布图所反映的古地理参数（如古水深）精度较低，只能反映概略的地貌分布（如滨浅湖、半深湖、深湖），难以达到盆地内部古地理参数数字化建模的要求。

现有的古地貌恢复方法很多（Martin, 1966; 鲜本忠等, 2017; Liu *et al.*, 2025），大体可归为 2 大类：一是基于地层厚度的“印模法”，即地层厚度是古地貌的“镜像”，地貌低处地层厚度大，地貌高处地层厚度小，但其前提条件是研究范围内沉降幅度相似；二是基于地貌界面的相交法，如在具有前积地层的盆地中将顶积层（指示平原或浅水）的延伸面与前积和底积面（指示水体加深至盆底）之间的相对高差视为地貌高差（经压实校正之后）。该方法可最大程度地消除沉降幅度的影响。图 7 为鄂尔多斯盆地陇东地区上三叠统延长组三维地震数据体的一个南西—北东向剖面。从图 7 中可以看出，延长组长 7 底面至长 3<sub>1</sub> 底面之间发育 1 套下超至长 7 底界面的前积地层，每一个前积层的波峰和波谷代表着 1 个水进—水退旋回（相当于准层序组或中期旋回），共识别 16 个（自下而上从 1 至 16）旋回。按照地貌界面方法恢复了 16 个旋回的古地貌图（图 8-a）。每一旋回的地貌均可分为湖棚区（浅水区）、斜坡区和盆底区，湖盆最大水深可达 300 m。这类古地貌模型实际上也是拟三维模型，但模型精度要高于大尺度模型（平面

网格可达 25 m）。将基于单井及地震资料识别的沉积相分布叠合在古地貌图上（图 8-b），可直观地分析古地貌对沉积体系（三角洲与湖底扇）的控制作用。

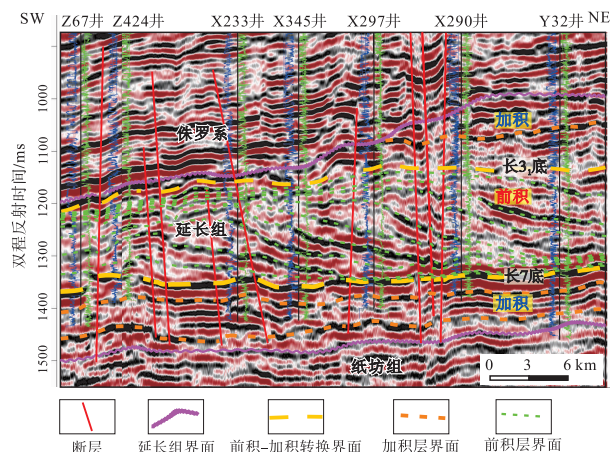
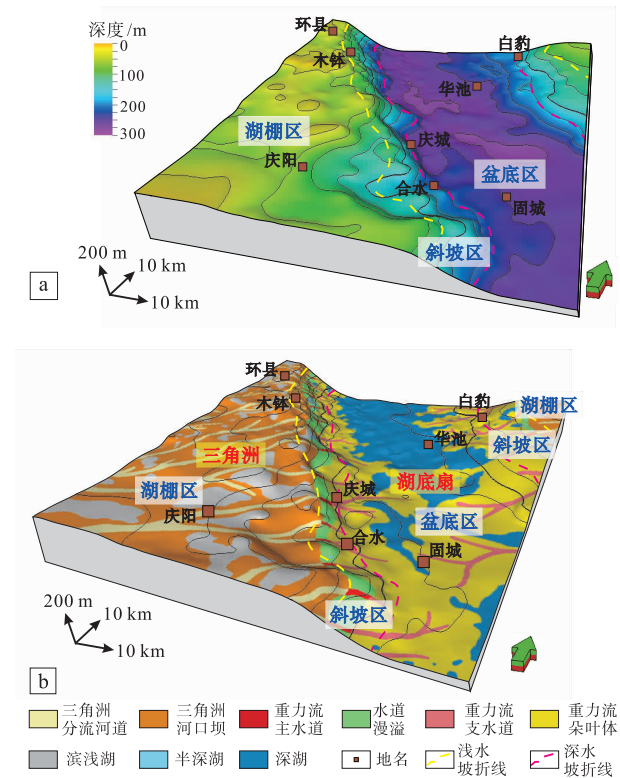


图 7 鄂尔多斯盆地陇东地区西南部上三叠统延长组地震剖面及层位解释

Fig. 7 Seismic profile and stratigraphic interpretation of the Upper Triassic Yanchang Formation in southwestern Longdong area in Ordos Basin



a—沉积前古地貌图；b—沉积相与古地貌叠合图

图 8 鄂尔多斯盆地陇东地区上三叠统延长组三段 6 砂组沉积前古地貌及沉积相分布图

Fig. 8 Palaeogeography and sedimentary facies distribution of the 6th interval, Member 3 of Upper Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin

### 2.2.3 小尺度古地理重建

小尺度古地理重建主要是在一个沉积体系内研究小级次古地理单元（亚/微环境及其沉积物）的特征、分布及演化。前已述及，迄今，小尺度古地理重建主要是在出露良好的露头区或者进入评价或开发阶段的油气田。下面，以油气田小尺度古地理重建为例进行介绍，该尺度古地理重建的资料基础主要为少量的岩心、井距为 0.5~1 km 的钻井测井数据和（或）三维地震数据。

#### 1) 地层—构造模型的建立

小尺度古地理重建的时段较小（对应于小层或单层，一般时段为万年或十几万年），因此，基于古生物、放射性同位素测年、岩石剩余磁极性等

方法难以达到对比精度，甚至主频较低（如小于 30 Hz）的常规地震资料也达不到对比的要求。这与大尺度、中尺度古地理单元地层对比有较大差异。在油气田范围内，高精度的地层对比依据主要为等时标志层（如洪泛泥岩层、凝灰岩层等）、沉积旋回（基准面旋回）和岩性组合。以高精度层序地层学原理为指导，采用井震结合、模式指导、分级控制、构造分析、动态验证、全区闭合的原则进行高精度地层对比（吴胜和等，2021）。目前正在发展智能化高精度地层自动对比技术（邬德刚等，2024）。

在高精度地层对比的基础上，依据多井和地震资料，识别同沉积断裂，建立地层—同沉积断层模型。

2) 古地理单元类型的识别与分布

属性识别方法与中尺度古地理重建相似，主要为单井和井震结合分析。然而，与中尺度古地理单元识别与分布研究不同的是，需要识别的古地理单元精度更高，要求识别沉积环境内的亚环境（亚相）和微环境（微相）。虽然该阶段有开发井网资料，但由于井间预测的单元更小，预测难度也很大。

为此，研发了“层次分析、模式拟合、多维互动”的沉积构型分析技术，可有效地表征单一微环境（微相）及其内部构型的分布（岳大力等，2007；吴胜和等，2008；赵晓明等，2012）。针对地震资料品质相对较差的情况，充分挖掘地震多频多属性信息，研发了地震多属性分频智能融合及智能反演技术，对岩相及砂体厚度的预测取得了较好的效果（Li *et al.*, 2019）。

3) 古地理单元的数字化建模

与大尺度、中尺度“拟三维”数字化古地理模型不同的是，古地理单元的数字化建模是全三维建模。在模型中，不仅平面进行了网格化，而且在高精度地层内部进行了垂向网格化，其大小一般为 0.2~0.5 m（表 3）。因此，在资料点（井点）处，垂向上即使有相变，垂向小网格亦能表达单一微相单元的垂向变化。

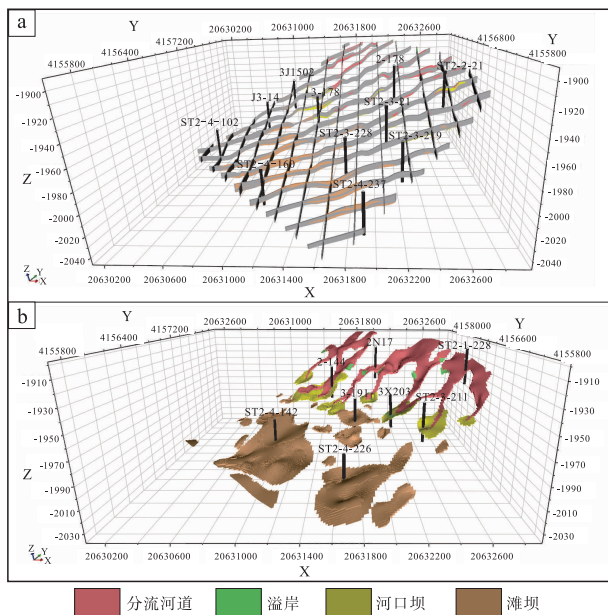
这是小尺度古地理数字化建模的最大突破点，即从传统的优势亚、微相分布研究发展到单一微相的三维分布建模。传统的平面图或拟三维模型上所表达的沉积相、亚相及微相实际上是优势相。例如，传统的平面微相图中的三角洲分流河道实际上是一个时段内的多个分流河道的复合体。而在三维模型中，能反映单一微环境（微相）的三维分布，体现了单一微环境如单一流河道的形态、规模（长、宽、深）及其与其他微相（微环境单元）的叠置关系，而且单元边界为物理界面（图 9）。图 9 展示了渤海湾盆地某油田沙河街组二段某小层内部三角洲分流河道、溢岸、河口坝、滩坝等微相的三维空间分布。该模型垂向网格为 0.2 m，能反映千年级别的亚/微环境的时空演变。

这一三维数字化建模方法的研究始于 20 世纪 80 年代，国际上研发了 RMS、Petrel 等建模软件。作者从 1999 年始，指导开发了 1 套数字化油气藏表征与建模软件（Direct），并取得了良好的推广应用效果（吴胜和等，2008）。随着科学技术的进步，三维建模技术取得了长足的进展，从两点统计建模发展到多点统计建模、从基于像元的建模发展

表 3 不同尺度古地理重建对比

Table 3 Comparison of palaeogeographic reconstructions at different scales

古地理重建尺度	大尺度	中尺度	小尺度
重建目标	大级次古地理单元	中级次古地理单元	小级次古地理单元
重建范围	全球；跨盆地大区域 (大于 10 <sup>5</sup> km <sup>2</sup> )	盆地(凹陷)、造山带 (10 <sup>2</sup> ~10 <sup>5</sup> km <sup>2</sup> )	沉积体系 (小于 10 <sup>2</sup> km <sup>2</sup> )
时间(地层) 跨度	纪(系)、世(统)、期(阶) (数百万年至数千万年)	期(阶);组、段或亚段;体系域、准层序组; 油层组、砂组(数十万年)	准层序和岩层组;小层和单层 (数万年至十几万年)
重建资料	露头、钻井岩心及测井	露头、钻井岩心、探评井测井、 人工地震	露头、钻井岩心、开发井测井、 人工地震、矿产开发动态资料
构造背景	板块构造(活动), 不同地质时期经纬度变化大	区域构造,经纬度相对变化小	局域构造,经纬度相对变化小
数字化网格	拟三维,粗网格, 平面: 10 km×10 km 垂向: 40 m	拟三维,中网格 平面: 1.0 km×1.0 km 垂向: 10 m	真三维,细网格 平面: 25 m×25 m 垂向: 0.2 m



a—三维微相模型栅状图；b—三维微相模型镂空图

图 9 渤海湾盆地某油田沙河街组二段某小层三维微相模型  
Fig. 9 Three-dimensional microfacies model of a small layer in the Member 2 of Shahejie Formation in an oilfield, Bohai Bay Basin

到基于像元—目标—界面的综合建模、从经典的地质统计建模发展到人工智能建模 (Krigé, 1951; Journel, 1983; Eskandari and Srinivasan, 2010; 吴胜和, 2010; Song *et al.*, 2022; 岳大力等, 2025)。

### 3 研究展望

自古地理学诞生以来, 不同尺度的古地理研究均取得了很大的进展, 经历了从单一到综合、从定性到定量、从矢量到数字、从经典到智能的发展趋势。然而, 古地理学作为一门传统学科, 如何在新时期焕发活力, 更好地服务于人类生存环境的预测以及矿产资源的勘探与开发, 是值得思考的问题。未来的古地理学应进一步发展不同尺度古地理参数的多信息定量解译方法, 创新不同尺度数字化与智能化古地理重建技术, 深化不同尺度古地理的成因机制与演变规律研究, 建立不同尺度古地理对矿产资源分布的控制作用模式, 加强多尺度古地理的协同研究。

#### 3.1 发展不同尺度古地理参数的多信息定量解译方法

定量的古地理参数分布的数字化重建是古地理

研究中的重要进展。迄今, 已研发了多类数字化古地理重建的软件平台, 并在古地理参数解译方法有了很大的进步, 但在不同尺度古地理参数的多信息定量解译方面尚存在较多的问题, 尚需进一步攻关。

在大尺度古地理数字化重建中, 主要是表达大型地貌单元古地理参数的宏观分布, 精度要求相对较低, 古高程或古水深的跨度一般为 200 m。在这一尺度上, 现有的基于岩相、古生物及地球化学指标的古地理参数估算能基本满足古地理参数数字化重建的要求。但是, 由于岩相指示的古高程跨度较大, 且具有多解性, 因此古地貌的恢复具有一定的误差。如 Scotese (2009, 2021) 在依据岩相分布图进行全球古地貌恢复时, 将三角洲前积层粉砂岩与近岸浊积岩的水深定为 50~200 m, 将前三三角洲底积层与远端浊积岩的水深定为 200~4000 m。显然, 这一水深范围过于粗略。

在中尺度、小尺度古地理数字化重建中, 古地理参数分布的精度要求更高, 例如, 古高程或古水深的跨度一般为十米或数十米。在这种情况下, 应用现有的基于岩相、古生物及地球化学指标的古地理参数估算方法就难以满足古地理参数数字化重建 (如古地貌恢复) 的要求。以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长 7 油层组沉积时期的最大古水深分析为例, 通过黑色页岩等岩相分析, 仅可定性地判别该区发育深湖环境; 通过古生物化石分析, 认为最大古水深不超过 60 m (杨华等, 2016); 通过地球化学元素分析, 认为其最大古水深 50~120 m (张才利等, 2011); 作者通过井震结合的古地貌恢复方法, 发现同一前积地震同相轴的顶部与底部 (分别代表斜坡的顶底) 相对高程大于 200 m, 说明深湖底部的最大古水深至少大于 200 m。由此可见, 应用不同方法预测的古水深误差大于 100 m。显然, 应用现有的基于岩相、古生物及地球化学指标的古地理参数估算方法难以满足中尺度、小尺度古地貌恢复的要求, 需要进一步发展多信息融合的古高程与古水深定量解译方法。

水体古盐度的重建结果同样存在争议。目前古盐度重建主要借助元素地球化学方法 (如 B/Ga 值、Sr/Ba 值等以及基于硼元素的定量公式等), 但不同地化指标重建的盐度结果存在较大差异, 不同学者对于不同指标判别咸水、半咸水和淡水的阈

值也存在争议 (Wei and Algeo, 2020; Sun *et al.*, 2024)。因此, 应充分挖掘现代沉积物中元素与水体盐度的定量关系, 准确评估物源成分、成岩作用等对于元素含量的影响, 如消除样品中碳酸盐岩物源中 Sr 等元素对于判别结果的干扰等。

当前, 中尺度、小尺度古气候的重建主要是根据古生态学 (孢粉等) 和地球化学方法进行的, 同样存在不同方法之间的结果判别差异 (何幼斌等, 2025; Sun *et al.*, 2026)。因此, 需要充分融合古生态 (如孢粉) 和地球化学等多种信息来综合解译气候的相对干湿条件、古风化强度等, 定量评估样品的物源、沉积物旋回、沉积分选及成岩作用等对结果的干扰程度, 构建现代沉积定量知识库以发展定量古温度重建方法。

此外, 定量评价生态系统在重大地质历史转折期的演化过程, 有助于攻关与深时生命、环境/气候协同演化的机制和驱动力相关的重要科学难题 (陈中强和黄元耕, 2022), 因而需要构建多元古生态学数据库来开展定量古生物地理研究。

因此, 未来的古地理数字化重建需要进一步研究古环境及其定量参数 (如古水深) 与沉积作用、生物习性等的响应机理与模式, 挖掘岩相、古生物 (含遗迹化石)、地球化学数据等蕴含的定量古地理信息, 发展多信息融合的古地理参数 (古高程、古坡度等) 解释技术。

### 3.2 创新不同尺度古地理智能化重建技术

随着数智化技术的进步, 大数据和人工智能技术已开始应用于古地理重建。古地理重建的智能化包括 2 个方面, 其一是资料点古地理单元类型的智能识别, 其二是古地理单元分布的智能预测。

迄今, 在资料点古地理单元类型的智能识别方面, 已取得了较大的进展, 如通过岩相、古生物等信息的大数据构建古地理单元类型及识别特征的知识图谱, 并通过多种深度 (机器) 学习的方法对露头 and 岩心进行古地理单元类型的智能化识别; 另一方面, 通过岩心标定测井, 对井筒测井信息进行岩相和沉积环境 (相) 进行智能化解释。

然而, 古地理单元分布的智能预测尚处于起步阶段。在中尺度、小尺度古地理单元分布的智能预测方面, 已有一定的进展, 例如, 在具有人工地震测量且资料品质较好的情况下, 应用深度学习算法进行井震结合的智能化岩相及古地理单元分布预

测。实际上, 这一“预测”仍属于资料解释的范畴。真正的预测是针对资料点之间 (或井间) 无信息区或信息极弱区 (地震品质低) 进行的。现有的基于数据驱动的智能化技术难以达成这一场景下古地理重建的目标, 需加强知识与数据双驱动的智能化古地理重建技术研究。为此, 一方面需要加强不同级次古地理单元分布样式及知识图谱 (训练图像集) 的构建, 以满足不同尺度智能化古地理重建的知识驱动需求; 另一方面, 要加强知识图谱与多源 (不同来源如露头、岩心、测井、地震等) 异构 (不同结构及分辨率) 数据联合驱动的智能化算法。

### 3.3 深化不同尺度古地理的成因机制与演变规律研究

古地理成因机制研究不仅有助于丰富古地理重建的依据, 而且有利于古地理面貌演化的预测。

大尺度古地理单元的形成动力以内营力为主, 外营力为次。陆地与海洋的形成与演变主要受控于岩石圈板块运动及深部地幔动力学动力机制。虽然在大型板块的形成与演变及其对古地理的影响研究方面取得了很大进展, 但小板块及地体 (如特提斯区域的拉萨和羌塘地体) 的拼合过程、动力机制及其对古地理面貌演变过程研究仍存在较多的问题 (王成善等, 2010; 陈洪德等, 2017), 导致同一地区同一时段古地理重建结果存在较大差异的问题。例如, 在不同作者编制的 230 Ma 全球古地理图中, 东亚和南亚地区的地体分布可能存在差异。另外, 地幔柱作用对板内动力地形的影响值得关注 (何登发等, 2020)。因此, 需进一步加强板块构造及地幔动力对大尺度古地理的控制作用研究, 进一步完善板块构造运动模拟系统。将全球板块构造古地理模型与基于物理特性的地幔和岩石圈有限元模型相结合, 将动力地形与地幔活动过程研究相结合 (刘少峰和王成善, 2016)。另一方面, 大气与水对岩石的侵蚀、搬运、沉积作用改变着古地貌。有学者进行了全球范围的源汇过程数值模拟研究 (Salles *et al.*, 2023), 但剥蚀与沉积速率有待进一步探讨。

中尺度古地理主要受控于内营力与外营力的综合作用。虽然盆地内部古地理格局及成因研究已取得了很大的进展, 但动力学机制及量化过程尚需进一步研究。一方面, 需加强现今造山带范围内

的构造与物源特征研究，从盆—山耦合的角度建立古地理单元的构造演化序列及构造—沉积耦合演化模式（何登发等，2020；胡修棉等，2021）；另一方面，通过动力学研究与数值模拟，进行定量源汇系统模拟，研究构造、气候等因素对物源供给、盆地地貌、水文、生态及沉积演化的定量控制作用。

小尺度古地理为沉积体系范围内的亚、微环境。迄今，虽然对亚、微环境特征及其成因进行了大量的研究，但在分布模式及动力学机制方面仍存在较多的问题，例如，冲积扇内部水道与朵叶体发育程度差异的控制因素及作用机理，三角洲前缘水下分流河道的形成条件等等。一方面，需加强原型模型（可密集测量的现代沉积、露头、密井网区、高分辨率地震测量区）研究，建立不同沉积体系内部亚/微环境的分布样式及定量规模关系；另一方面，加强沉积动力学及沉积模拟（物理模拟与数值模拟）研究，阐明在不同地貌（如坡度）、水文（如水深）、气候等条件下不同沉积体系内部亚/微环境的形成过程与演变规律。

### 3.4 建立不同尺度古地理对矿产资源分布的控制作用模式

长期以来，矿产勘探开发工作者和学者们一直在探索古地理对矿产资源的控制作用，并在矿产资源勘查与开发方面取得了很好的应用效果。随着矿产资源勘查难度的不断增大，古地理对矿产资源分布及品质差异的控制作用研究也面临着新的挑战。

针对全球矿产勘探程度低的区域，需加强大尺度古地理（如超大陆裂解与演化）对矿产资源形成条件的控制作用研究（杜远生等，2023；朱日祥等，2025），优选含油气盆地或富矿区。

在已发现矿产资源的地区（如含油气盆地），加强中尺度古地理对非常规油气资源（如页岩油气、致密油气）及伴生矿产资源（如氦气等）生成与富集的控制作用研究。以页岩油勘查为例，需进一步研究古地貌、古气候、古水文、古生态、古火山等对深水细粒沉积及页岩油甜点的多元控制作用。

针对待开发及开发过程中的矿床或油气藏，加强小尺度古地理对矿床或油气藏内部非均质性的控制作用研究。以油气藏为例，深入研究亚/微环境空间分布与演化对单一油气储集单元的连续性、连通性与渗流屏障及空间叠置关系的控制作用，为开发部署与调整奠定必要的地质基础。

### 3.5 加强多尺度古地理的协同研究

迄今，虽然各尺度古地理研究均取得了较大的进展，但由于研究对象的范围、时段及获取数据的差异，导致不同尺度古地理研究存在脱节的问题，需加强多尺度古地理的协同研究。

一是要建设多尺度古地理协同研究的平台。该平台应包含以下 3 个功能：（1）具有整合不同类型数据以及不同尺度古地理研究素材（如岩相分布图）的功能，可形成全球性开放互动的古地理综合数据平台；（2）具有不同尺度古地理协同重建的研究功能；（3）具有多尺度古地理数字化模型图形展示的功能，类似于 Google Earth（全球可变尺度的现代自然地理数字化模型），但要超越 Google Earth，以实现任意地质时段、任意地区的多尺度古地理重现。

二是要发展多尺度古地理的协同重建方法。发展降尺度（downscaling）技术，在多尺度古地理控制机制指导下，以较大尺度的低分辨率模型约束小尺度高分辨率模型的建立；发展模型粗化（upscaling）技术，将较小尺度的高分辨率模型粗化为较大尺度的低分辨率模型，两者互动进行。应用数字化技术，通过不同尺度的嵌入，构建统一的、可变尺度的古地理数字化模型。

未来应进一步加强古地理学各分支领域（包括岩相古地理、古生物地理、构造古地理、资源古地理以及古地理重构技术等）在不同尺度上的深化研究及协同研究，为宜居地球与矿产资源的保障做出更大的贡献。

后记：很庆幸能师从冯增昭先生。先生在古地理学研究中的深邃见解和创新思想一直指引着笔者的地学研究之路。先生孜孜不倦创立的学术平台，包括《古地理学报》和 *Journal of Palaeogeography*（《古地理学报（英文）》）、学术会议平台（国际古地理学会议、全国古地理学及沉积学学术会议）、学术组织（国际古地理学会、中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会），为古地理学科的发展做出了极其深远的、不可磨灭的贡献。适值先生 100 周年诞辰之际，特撰写此文以表深切的怀念与崇高的敬意。

## 参考文献 (References)

- 鲍志东,管守锐,李儒峰,王英民,刘凌,赵秀岐,齐雪峰. 2002. 准噶尔盆地侏罗系层序地层学研究. 石油勘探与开发, 29(1): 48-51. [ Bao Z D, Guan S R, Li R F, Wang Y M, Liu L, Zhao X Q, Qi X F. 2002. Sequence stratigraphy of the Jurassic in Junggar Basin. Petroleum Exploration and Development, 29(1): 48-51 ]
- 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 ]
- 陈洪德,侯明才,陈安清,时志强,邢凤存,黄可,刘欣春. 2017. 中国古地理学研究进展与关键科学问题. 沉积学报, 35(5): 888-901. [ Chen H D, Hou M C, Chen A Q, Shi Z Q, Xing F C, Huang K K, Liu X C. 2017. Advances and the major scientific issues of the palaeogeography in China. Acta Sedimentologica Sinica, 35(5): 888-901 ]
- 陈中强,黄元耕. 2022. 如何定量评价大灭绝时期生态系统的坍塌与重建过程? 地球科学, 47(10): 3827-3829. [ Chen Z Q, Huang Y G. 2022. How to quantitatively evaluate the collapse and reconstruction process of ecosystems during the mass extinction period. Earth Science, 47(10): 3827-3829 ]
- 邓宏文. 1995. 美国层序地层研究中的新学派: 高分辨率层序地层学. 石油与天然气地质, 16(2): 89-97. [ Deng H W. 1995. A new school of thought in sequence stratigraphic studies in U.S.: high-resolution sequence stratigraphy. Oil & Gas Geology, 16(2): 89-97 ]
- 杜远生,余文超,周琦,郭华,靳松,刘志臣,黄恒,刘海,王萍,齐靓,徐源,许灵通,王宇航,王翰文. 2023. 超大陆裂解与中国大规模成锰作用的耦合关系探讨. 古地理学报, 25(6): 1211-1234. [ Du Y S, Yu W C, Zhou Q, Guo H, Jin S, Liu Z C, Huang H, Liu H, Wang P, Qi L, Xu Y, Xu L T, Wang Y H, Wang H W. 2023. Discussion about the coupling relationship between the breakup of supercontinent and the large-scale manganese accumulation in China. Journal of Palaeogeography ( Chinese Edition ), 25(6): 1211-1234 ]
- 冯增昭. 1977. 华北下奥陶统岩相古地理新探. 华东石油学院学报, (3): 57-79. [ Feng Z Z. 1977. New sights of lithofacies palaeogeography of the Lower Ordovician in North China. Journal of East China Petroleum College, (3): 57-79 ]
- 冯增昭. 1980. 碳酸盐岩沉积环境及岩相古地理的研究. 石油实验地质, 2(3): 24-31. [ Feng Z Z. 1980. Research on the sedimentary environment and lithofacies palaeogeography of carbonate rocks. Petroleum Experimental Geology, 2(3): 24-31 ]
- 冯增昭. 1992. 单因素分析综合作图法: 岩相古地理学方法论. 沉积学报, 10(3): 70-77. [ Feng Z Z. 1992. Single factor analysis and comprehensive mapping method: methodology of lithofacies palaeogeography. Acta Sedimentologica Sinica, 10(3): 70-77 ]
- 冯增昭. 2003. 我国古地理学的形成、发展、问题和共识. 古地理学报, 5(2): 129-141. [ Feng Z Z. 2003. Origin, development, problems and common viewpoint of palaeogeography of China. Journal of Palaeogeography ( Chinese Edition ), 5(2): 129-141 ]
- 冯增昭. 2004. 单因素分析多因素综合作图法: 定量岩相古地理重建. 古地理学报, 6(1): 3-19. [ Feng Z Z. 2004. Single factor analysis and multifactor comprehensive mapping method-reconstruction of quantitative lithofacies palaeogeography. Journal of Palaeogeography ( Chinese Edition ), 6(1): 3-19 ]
- 冯增昭. 2016. 论古地理图. 古地理学报, 18(3): 285-314. [ Feng Z Z. 2016. On palaeogeographic map. Journal of Palaeogeography ( Chinese Edition ), 18(3): 285-314 ]
- 冯增昭,吴胜和. 1987. 下扬子地区中、下三叠统青龙群岩相古地理研究及编图. 沉积学报, 5(3): 40-58. [ Feng Z Z, Wu S H. 1987. Studying and mapping lithofacies palaeogeography of Qinglong Group of Lower-Middle Triassic in the Yangtze Valley. Acta Sedimentologica Sinica, 5(3): 40-58 ]
- 冯增昭,王英华,张吉森,左文岐,张秀莲,洪国良,陈继新,吴胜和,陈玉田,迟元苓,杨承运. 1990. 华北地台早古生代岩相古地理. 北京: 地质出版社, 1-270. [ Feng Z Z, Wang Y H, Zhang J S, Zuo W Q, Zhang X L, Hong G L, Chen J X, Wu S H, Chen Y T, Chi Y L, Yang C Y. 1990. Lithofacies Palaeogeography of Early Paleozoic of North China Platform. Beijing: Geological Publishing House, 1-270 ]
- 冯增昭,鲍志东,吴胜和,李永铁,王国力. 1997. 中国南方早中三叠世岩相古地理. 地质科学, 32(2): 212-220. [ Feng Z Z, Bao Z D, Wu S H, Li Y T, Wang G L. 1997. Lithofacies palaeogeography of the Early and Middle Triassic of South China. Scientia Geologica Sinica, 32(2): 212-220 ]
- 冯增昭,彭勇民,金振奎,鲍志东. 2003. 中国早奥陶世岩相古地理. 古地理学报, 5(1): 1-16. [ Feng Z Z, Peng Y M, Jin Z K, Bao Z D. 2003. Lithofacies palaeogeography of the Early Ordovician in China. Journal of Palaeogeography ( Chinese Edition ), 5(1): 1-16 ]
- 关士聪,演怀玉,陈显群. 1984. 中国海陆变迁海域沉积相与油气: 晚元古代—三叠纪. 北京: 科学出版社. [ Guan S C, Yan H Y, Chen X Q. 1984. The changes of Land and Sea, Marine Sedimentary Facies and Hydrocarbons in China ( Late Proterozoic to Triassic Ages ). Beijing: Science Press ]
- 郭艳琴,李文厚,郭彬程,张倩,陈强,王若谷,刘溪,马瑶,李智超,张梦婷,李百强. 2019. 鄂尔多斯盆地沉积体系与古地理演化. 古地理学报, 21(2): 293-320. [ Guo Y Q, Li W H, Guo B C, Zhang Q, Chen Q, Wang R G, Liu X, Ma Y, Li Z C, Zhang M T, Li B Q. 2019. Sedimentary systems and palaeogeography evolution of Ordos Basin. Journal of Palaeogeography ( Chinese Edition ), 21(2): 293-320 ]
- 何登发,李德生,王成善,刘少峰,陈懋俊. 2020. 活动论构造古地理

- 的研究现状、思路与方法. 古地理学报, 22(1): 1-28. [He D F, Li D S, Wang C S, Liu S F, Chen J J. 2020. Status, thinking, and methodology of studying on the mobile tectono-palaeogeography. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 22(1): 1-28]
- 何幼斌, 侯向阳, 官大勇, 黄晓波, 徐伟, 石文龙, 刘睿, 李华. 2025. 渤海湾盆地黄河口中注古近系元素地球化学特征及古环境意义. 长江大学学报(自然科学版), 1-18. [He Y B, Hou X Y, Guan D Y, Huang X B, Xu W, Shi W L, Liu R, Li H. 2025. Elements geochemical characteristics and sedimentary paleoenvironmental significance of the Paleogene in the central depression of the Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Yangtze University* (Natural Science Edition), 1-18]
- 侯明才, 陈安清, 任强, 钟瀚霆, 李志林, 刘少峰, 肖倚天, 李海鹏, 伍新明, 姜莉莉, 马超, 林成发, 郑栋宇, 尤加春, 孙晓明, 遆鹏, 王瀚, 张蕾, 程汉. 2023. 综合古地理重建的数字智能化趋势与方法进展. 地质学报, 97(9): 2956-2974. [Hou M C, Chen A Q, Ren Q, Zhong H T, Li Z L, Liu S F, Xiao Y T, Li H P, Wu X M, Jiang L L, Ma C, Lin C F, Zheng D Y, You J C, Sun X M, Di P, Wang H, Zhang L, Cheng H. 2023. The progress and perspective of digital intelligence in comprehensive palaeogeographic reconstruction. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 2956-2974]
- 胡修棉, 薛伟伟, 赖文, 王建刚, 安慰, 李娟. 2021. 造山带沉积盆地与大陆动力学. 地质学报, 95(1): 139-158. [Hu X M, Xue W W, Lai W, Wang J G, An W, Li J. 2021. Sedimentary basins in orogenic belt and continental geodynamics. *Acta Geologica Sinica*, 95(1): 139-158]
- 纪友亮, 任红燕, 张世奇, 马铮涛, 牛嘉玉, 郭姗姗, 高晨曦, 刘笑语. 2022. 渤海湾盆地古近纪古地理特征与油气. 古地理学报, 24(4): 611-633. [Ji Y L, Ren H Y, Zhang S Q, Ma Z T, Niu J Y, Guo S S, Gao C X, Liu X Y. 2022. Paleogene palaeogeography and oil and gas distribution in Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 24(4): 611-633]
- 姜在兴, 徐杰, 刘桐, 马代鑫, 牟汉生, 孙守亮. 2023. 燕辽裂陷槽辽西坳陷中元古界黑色页岩沉积环境和生烃潜力. 沉积学报, 41(6): 1830-1846. [Jiang Z X, Xu J, Liu T, Ma D X, Mou H S, Sun S L. 2023. The depositional environment and hydrocarbon potential of the Mesoproterozoic Black Shale in the Western Liaoning Depression of the Yanliao Rift Zone. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6): 1830-1846]
- 李江海, 姜洪福. 2013. 全球古板块再造、岩相古地理及古环境图集. 北京: 地质出版社. [Li J H, Jiang H F. 2013. *World Atlas of Plate Tectonic Reconstruction, Lithofacies Paleogeography and Palaeoenvironment*. Beijing: Geological Publishing House]
- 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 周心怀. 2015. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析. 地学前缘, 22(1): 9-20. [Ling C S, Xia Q L, Shi H S, Zhou X H. 2015. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 9-20]
- 刘宝珺, 许效松. 1994. 中国南方岩相古地理图集: 震旦纪-三叠纪. 北京: 科学出版社. [Liu B J, Xu X S. 1994. *Atlas of Lithofacies and Paleogeography in South of China: Sinian-Triassic*. Beijing: Science Press]
- 刘鸿允. 1959. 中国古地理图(第二版). 北京: 科学出版社. [Liu H Y. 1959. *China Ancient Geography Map* (Second Edition). Beijing: Science Press]
- 刘少峰, 王成善. 2016. 构造古地理重建与动力地形. 地学前缘, 23(6): 61-79. [Liu S F, Wang C S. 2016. Reconstruction of tectono-palaeogeography and dynamic topography. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 61-79]
- 刘招君, 孙平昌. 2021. 中国陆相盆地油页岩形成环境与成矿机制. 古地理学报, 23(1): 1-17. [Liu Z J, Sun P C. 2021. Formation environment and mineralization mechanism of oil shale in continental basins of China. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 23(1): 1-17]
- 卢衍豪, 朱兆玲, 钱义元. 1965. 中国寒武纪岩相古地理轮廓初探. 地质学报, 45(4): 349-357. [Lu Y H, Zhu Z L, Qian Y Y. 1965. Cambrian palaeogeography and lithofacies of China. *Acta Geologica Sinica*, 45(4): 349-357]
- 马永生, 陈洪德, 王国力. 2009. 中国南方构造-层序岩相古地理图集. 北京: 科学出版社. [Ma Y S, Chen H D, Wang G L. 2009. *Atlas of Construction-Sequence and Lithofacies Palaeogeography in South of China*. Beijing: Science Press]
- 邱家骧. 1984. 火山岩相及其主要特征. 地质科技情报, 3(2): 45-52. [Qiu J X. 1984. Volcanic facies and their main characteristics. *Geological technology intelligence*, 3(2): 45-52]
- 邵龙义, 王学天, 李雅楠, 刘炳强. 2019. 深时源-汇系统古地理重建方法评述. 古地理学报, 21(1): 67-81. [Shao L Y, Wang X T, Li Y N, Liu B Q. 2019. Review on palaeogeographic reconstruction of deep-time source-to-sink systems. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 21(1): 67-81]
- 邵龙义, 徐小涛, 王帅, 王东东, 高迪, 王学天, 鲁静. 2021. 中国含煤岩系古地理及古环境演化研究进展. 古地理学报, 23(1): 19-38. [Shao L Y, Xu X T, Wang S, Wang D D, Gao D, Wang X T, Lu J. 2021. Research progress of palaeogeography and palaeoenvironmental evolution of coal-bearing series in China. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 23(1): 19-38]
- 孙龙德, 刘合, 何文渊, 李国欣, 张水昌, 朱如凯, 金旭, 孟思炜, 江航. 2021. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析. 石油勘探与开发, 48(3): 453-463. [Sun L D, Liu H, He W Y, Li G X, Zhang S C, Zhu R K, Jin X, Meng S W, Jiang H. 2021. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing Oilfield, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 453-463]
- 王成善, 郑和荣, 冉波, 刘本培, 李祥辉, 李亚林, 孙红军, 陈建平, 胡修棉. 2010. 活动古地理重建的实践与思考: 以青藏特提斯为例. 沉积学报, 28(5): 849-860. [Wang C S, Zheng H R, Ran B, Liu B P, Li X H, Li Y L, Sun H J, Chen J P, Hu X M. 2010. On palaeogeographic reconstruction: an example for application in Tibetan Tethys. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 849-860]
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集. 北京: 地图出版社. [Wang H Z. 1985. *Atlas of the Palaeogeography of China*. Beijing: Cartographic

- Publishing House]
- 王鸿祯. 1989. 中国古生代珊瑚分类演化和生物古地理. 北京: 科学出版社. [Wang H Z. 1989. Classification, Evolution, and Biogeography of Paleozoic Corals in China. Beijing: Science Press]
- 王鸿祯, 杨森楠, 刘本培. 1990. 中国及邻区构造古地理和生物古地理. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-347. [Wang H Z, Yang S N, Liu B P. 1990. Tectonic Paleogeography and Biogeography of China and Its Neighboring Regions. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1-347]
- 王乃文. 1984. 青藏高原古生物地理与板块构造的探讨. 中国地质科学院地质研究所文集, 9: 5-32. [Wang N W. 1984. On the palaeobiogeography and plate tectonics of Qinghai-Tibet plateau. Journal of Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 9: 5-32]
- 王璞琨, 迟元林, 刘万洙, 程日辉, 单玄龙, 任延广. 2003. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义. 吉林大学学报(地球科学版), 33(4): 449-456. [Wang P J, Chi Y L, Liu W Z, Cheng R H, Shan X L, Ren Y G. 2003. Volcanic facies of the Songliao Basin: classification characteristics and reservoir significance. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 33(4): 449-456]
- 邬德刚, 吴胜和, 刘磊, 孙以德. 2024. 基于模式约束的油层单元智能自动对比方法: 以渤海湾盆地史南油田史深100区块加积式地层对比为例. 石油勘探与开发, 51(1): 161-172. [Wu D G, Wu S H, Liu L, Sun Y D. 2024. An intelligent automatic correlation method of oil-bearing strata based on pattern constraints: an example of accretionary stratigraphy of Shishen 100 block in Shinan Oilfield of Bohai Bay Basin, East China. Petroleum Exploration and Development, 51(1): 161-172]
- 吴胜和. 2010. 储层表征与建模. 北京: 石油工业出版社. [Wu S H. 2010. Reservoir Characterization and Modeling. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 吴胜和, 冯增昭, 何幼斌. 1994. 中下扬子地区二叠纪缺氧环境研究. 沉积学报, 12(2): 29-36. [Wu S H, Feng Z Z, He Y B. 1994. Study on Anoxic environment of Permian in the Middle and Lower Yangtze Region. Acta Sedimentology Sinica, 12(2): 29-36]
- 吴胜和, 岳大力, 刘建民, 束青林, 范峥, 李宇鹏. 2008. 地下古河道储层构型的层次建模研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(S1): 111-121. [Wu S H, Yue D L, Liu J M, Shu Q L, Fan Z, Li Y P. 2008. Hierarchy modeling of subsurface palaeochannel reservoir Architecture. Science in China (Series D): Earth Sciences, 38(S1): 111-121]
- 吴胜和, 徐振华, 刘钊. 2019. 河控浅水三角洲沉积构型. 古地理学报, 21(2): 202-215. [Wu S H, Xu Z H, Liu Z. 2019. Depositional architecture of fluvial-dominated shoal water delta. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 21(2): 202-215]
- 吴胜和, 岳大力, 蒋裕强. 2021. 油矿地质学(第5版·富媒体). 北京: 石油工业出版社, 1-459. [Wu S H, Yue D L, Jiang Y Q. 2021. Oilfield Geology (Fifth edition · rich media). Beijing: Petroleum Industry Press, 1-459]
- 吴因业, 顾家裕. 2002. 油气层序地层学. 北京: 石油工业出版社, 15-58. [Wu Y Y, Gu J Y. 2002. Oil and Gas Sequence Stratigraphy. Beijing: Petroleum Industry Press, 15-58]
- 吴因业, 李国欣, 吴洛菲, 徐兆辉, 龙国徽, 方向, 付蕾, 张天舒, 陶士振. 2022. 中国中西部大型湖盆沉积体系域研究进展及页岩油气勘探. 古地理学报, 24(4): 728-741. [Wu Y Y, Li G X, Wu L F, Xu Z H, Long G H, Fang X, Fu L, Zhang T S, Tao S Z. 2022. Research progress of sedimentary systems tract in large lake basin and shale oil and gas exploration in central and western China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 24(4): 728-741]
- 鲜本忠, 王震, 马立驰, 晁储志, 蒲强, 景安语, 王俊辉. 2017. 沉积区一剥蚀区古地貌一体化恢复及古水系研究: 以渤海湾盆地辽东地区馆陶组为例. 地球科学, 42(11): 1922-1935. [Xian B Z, Wang Z, Ma L C, Chao C Z, Pu Q, Jing A Y, Wang J H. 2017. Palaeo-drainage system and integrated palaeo-geomorphology restoration in depositional and erosional areas: Guantao Formation in East Liaodong area, Bohai Bay Basin, China. Earth Science, 42(11): 1922-1935]
- 谢家荣. 1948. 古地理为探矿工作之指南. 地质学报, 28(1-2): 1-11. [Xie J R. 1948. Palaeogeography as a guide to mineral exploration. Acta Geologica Sinica, 28(1-2): 1-11]
- 杨华, 傅强, 齐亚林, 周新平, 龚宁, 黄少雄. 2016. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长期古湖盆生物相带划分及地质意义. 沉积学报, 34(4): 688-693. [Yang H, Fu Q, Qi Y L, Zhou X P, Gong N, Huang S X. 2016. The paleontology phase zones and its geological significance on the Late Triassic Yanchang Stage palaeo-lacustrine Ordos Basin. Acta Sedimentology Sinica, 34(4): 688-693]
- 杨式溥. 1999. 遗迹化石的古环境和古地理意义. 古地理学报, 1(1): 7-19. [Yang S P. 1999. Palaeoenvironmental and palaeogeographic significance of trace fossils. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 1(1): 7-19]
- 杨守仁, 郝维城, 江大勇. 2001. 三叠纪牙形石的古环境与古地理意义. 古地理学报, 3(1): 78-84. [Yang S R, Hao W C, Jiang D Y. 2001. Palaeoenvironmental and palaeogeographic significance of the Triassic conodonts. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 3(1): 78-84]
- 杨振宇. 2002. 高精度地层划分对比的可靠方法: 磁性地层学研究. 地质通报, 21(1): 45-47. [Yang Z Y. 2002. A reliable method for high precision stratigraphic division and correlation: magnetic stratigraphy research. Geological Bulletin of China, 21(1): 45-47]
- 殷鸿福. 1988. 中国古生物地理学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-329. [Yin H F. 1988. Palaeobiogeography of China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1-329]
- 岳大力, 吴胜和, 刘建民. 2007. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法. 石油学报, 28(4): 99-103. [Yue D L, Wu S H, Liu J M. 2007. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river. Acta Petrolei Sinica, 28(4): 99-103]
- 岳大力, 李伟, 王武荣, 孙盼科, 吴胜和, 徐振华, 刘磊, 邬德刚, 屈林博, 任柯宇, 林津, 张姝琪. 2025. 碎屑岩储层智能表征与建模方法研究现状及展望. 古地理学报, 27(4): 903-923. [Yue D L,

- Li W, Wang W R, Sun P K, Wu S H, Xu Z H, Liu L, Wu D G, Qu L B, Ren K Y, Lin J, Zhang S Q. 2025. Advances and perspectives in intelligent characterization and modeling of clastic reservoir. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(4): 903-923]
- 曾洪流, 朱筱敏, 朱如凯, 张庆石. 2012. 陆相拗陷型盆地地震沉积学研究规范. *石油勘探与开发*, 39(3): 275-284. [Zeng H L, Zhu X M, Zhu R K, Zhang Q S. 2012. Guidelines for seismic sedimentologic study in non-marine postrift basins. *Petroleum Exploration and Development*, 39(3): 275-284]
- 张昌民, 尹太举, 朱永进, 柯兰梅. 2010. 浅水三角洲沉积模式. *沉积学报*, 28(5): 933-944. [Zhang C M, Yin T J, Zhu Y J, Ke L M. 2010. Shallow-water deltas and models. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 933-944]
- 张才利, 高阿龙, 刘哲, 黄静, 杨亚娟, 张艳. 2011. 鄂尔多斯盆地长 7 油层组沉积水体及古气候特征研究. *天然气地球科学*, 22(4): 582-587. [Zhang C L, Gao A L, Liu Z, Huang J, Yang Y J, Zhang Y. 2011. Study of character on sedimentary water and palaeoclimate for Chang 7 Oil Layer in Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 22(4): 582-587]
- 张水昌, 张宝民, 边立曾, 金之钧, 王大锐, 张兴阳, 高志勇, 陈践发. 2005. 中国海相烃源岩发育控制因素. *地学前缘*, 12(3): 39-48. [Zhang S C, Zhang B M, Bian L Z, Jin Z J, Wang D R, Zhang X Y, Gao Z Y, Chen J F. 2005. Development constraints of marine source rocks in China. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 39-48]
- 赵文智, 王晓梅, 胡素云, 张水昌, 王华建, 管树巍, 叶云涛, 任荣, 王铜山. 2019. 中国元古宇烃源岩成烃特征及勘探前景. *中国科学: 地球科学*, 49(6): 939-964. [Zhao W Z, Wang X M, Hu S Y, Zhang S C, Wang H J, Guan S W, Ye Y T, Ren R, Wang T S. 2019. Hydrocarbon generation characteristics and exploration prospects of Proterozoic source rocks in China. *Science China Earth Sciences*, 49(6): 939-964]
- 赵晓明, 吴胜和, 刘丽. 2012. 尼日尔三角洲盆地 Akpo 油田新近系深水浊积水道储层构型表征. *石油学报*, 33(6): 1049-1058. [Zhao X M, Wu S H, Liu L. 2012. Characterization of reservoir architectures for Neogene deepwater turbidity channels of Akpo oilfield, Niger Delta Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 33(6): 1049-1058]
- 郑和荣, 胡宗全. 2010. 中国前中生代构造岩相古地理图集. 北京: 地质出版社. [Zheng H R, Hu Z Q. 2010. Chinese pre Mesozoic Tectonic Lithofacies Palaeogeography Atlas. Beijing: Geological Publishing House]
- 郑荣才, 柳梅青. 1999. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究. *石油与天然气地质*, 20(1): 22-27. [Zheng R C, Liu M Q. 1999. Study on palaeosalinity of Chang-6 oil reservoir set in Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 20(1): 22-27]
- 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 2001. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义. *沉积学报*, 19(2): 249-255. [Zheng R C, Peng J, Wu C R. 2001. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(2): 249-255]
- 郑秀娟, 杜远生, 朱筱敏, 刘招君, 胡斌, 吴胜和, 邵龙义, 旷红伟, 罗静兰, 钟大康, 李华, 何登发, 朱如凯, 鲍志东. 2021. 中国古地理学近十年主要进展. *矿物岩石地球化学通报*, 40(1): 94-114. [Zheng X J, Du Y S, Zhu X M, Liu Z J, Hu B, Wu S H, Shao L Y, Kuang H W, Luo J L, Zhong D K, Li H, He D F, Zhu R K, Bao Z D. 2021. The main progresses of Chinese palaeogeography in the past decade. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(1): 94-114]
- 朱茂炎, 孙智新, 杨爱华, 袁金良, 李国祥, 周志强, 张俊明. 2021. 中国寒武纪岩石地层划分和对比. *地层学杂志*, 45(3): 223-249. [Zhu M Y, Sun Z X, Yang A H, Yuan J L, Li G X, Zhou Z Q, Zhang J M. 2021. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Cambrian in China. *Journal of Stratigraphy*, 45(3): 223-249]
- 朱日祥, 张旺, 王华建, 李继磊, 胡清扬, 赵亮, 王晓梅, 张水昌, 郝芳, 金之钧. 2025. 多圈层驱动的油气形成与富集理论. *中国科学: 地球科学*, 55(8): 2603-2620. [Zhu R X, Zhang W, Wang H J, Li J L, Hu Q Y, Zhao L, Wang X M, Zhang S C, Hao F, Jin Z J. 2025. A theory of multi-spheric interaction-driven hydrocarbon formation and enrichment. *Science China Earth Sciences*, 55(8): 2603-2620]
- 朱筱敏. 1998. 层序地层学原理及应用. 北京: 石油工业出版社. [Zhu X M. 1998. Principles and Applications of Sequence Stratigraphy. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 朱筱敏. 2020. 沉积岩石学(第 5 版·富媒体). 北京: 石油工业出版社. [Zhu X M. 2020. Sedimentary Petrology (Fifth edition · rich media). Beijing: Petroleum Industry Press]
- 朱筱敏, 曾洪流, 董艳蕾. 2017. 地震沉积学原理与应用. 北京: 石油工业出版社. [Zhu X M, Zeng H L, Dong Y L. 2017. The Principle and Application of Seismic Sedimentology. Beijing: Petroleum Industry Press]
- Cerveny P F, Naeser N D, Zeitler P K, Naeser C W, Johnson N M. 1988. History of Uplift and Relief of the Himalaya During the Past 18 Million Years: Evidence from Fission-Track Ages of Detrital Zircons from Sandstones of the Siwalik Group. In: Kleinspehn K L, Paola C. (eds). *New Perspectives in Basin Analysis. Frontiers in Sedimentary Geology*. New York: Springer.
- Cox A, Doell R R, Dalrymple G B. 1963. Geomagnetic polarity epochs and Pleistocene geochronometry. *Nature*, 198(4885): 1049-1051.
- Currie B S, Rowley D B, Tabor N J. 2005. Middle Miocene paleoaltimetry of southern Tibet: implications for the role of mantle thickening and delamination in the Himalayan orogen. *Geological Society of America*, 33(3): 181-184.
- Eiler J M. 2011. Paleoclimate reconstruction using carbonate clumped isotope thermometry. *Quaternary Science Reviews*, 30(25/26): 3575-3588.
- Eskandari K, Srinivasan S. 2010. Reservoir modelling of complex geological systems: a multiple-point perspective. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 49(8): 59-69.
- Galloway W E. 1983. *Terrigenous Clastic Depositional Systems*. New York: Springer-Verlag.
- Ghosh P, Eiler J, Campana S E, Feeney R F. 2007. Calibration of the car-

- bonate 'clumped isotope' paleothermometer for otoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(11): 2736–2744.
- Gray J, Boucot A J. 1976. *Historical Biogeography, Plate Tectonics, and the Changing Environment*. Oregon: Oregon State University Press.
- Hallam A. 1973. *Atlas of Palaeobiogeography*. Elsevier: 1–531.
- Hu B, Wang Y Y, Song H B, Wang Y, Liu M. 2014. The ichnofacies and ichnoassemblages in terrestrial deposits of China. *Journal of Palaeogeography*, 3(1): 61–73.
- Hunt T S. 1873. The paleogeography of the North-American continent. *Journal of the American Geographical Society of New York*, 4: 416–431.
- Journel A G. 1983. Nonparametric estimation of spatial distributions. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(3): 445–468.
- Ju Y, Wang G, Li S, Sun Y, Suo Y, Somerville I, Li W, He B, Zheng M, Yu K. 2022. Geodynamic mechanism and classification of basins in the Earth system. *Gondwana Research*, 102: 200–228.
- Klemme H D, Ulmishek G F. 1991. Effect petroleum rocks of the world: stratigraphic distribution and controlling depositional factors. *AAPG Bulletin*, 75(12): 1–7.
- Kocsis Á T, Scotese C R. 2021. Mapping paleocoastlines and continental flooding during the Phanerozoic. *Earth-Science Reviews*, 213: 103463.
- Krige D G. 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. In: Krige D G (ed). Published in the *Journal*, December 1951; introduction by the author. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 52: 201–203.
- Li W, Yue D L, Wang W F, Wang W R, Wu S H, Li J, Chen D P. 2019. Fusing multiple frequency-decomposed seismic attributes with machine learning for thickness prediction and sedimentary facies interpretation in fluvial reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 177: 1087–1102.
- Liu M C, Wu S H, Yue D L, Xu Z H, Wan X L, Wu H L, Chen Z H, Li Z. 2025. Palaeogeomorphological control on the depositional architecture of lacustrine gravity-flow deposits in a depression lacustrine basin: a case study of the Triassic Yanchang Formation, southern Ordos Basin, China. *Journal of Palaeogeography*, 14(2): 476–500.
- Martin R. 1966. Palaeogeomorphology and its application to exploration for oil and gas. *AAPG Bulletin*, 50(10): 2277–2311.
- Matenco L, Andriessen P. 2013. Quantifying the mass transfer from mountain ranges to deposition in sedimentary basins: source to sink studies in the Danube Basin-Black Sea system. *Global and Planetary Change*, 103: 1–18.
- Müller R D, Mather B, Dutkiewicz A, Keller T, Merdith A, Gonzalez C M, Gorczyk W, Zhirovic S. 2022. Evolution of Earth's tectonic carbon conveyor belt. *Nature*, 605: 629–639.
- Posamentier H W. 2001. Seismic geomorphology and depositional systems of deep water environments; observations from offshore Nigeria, Gulf of Mexico, and Indonesia (abs.). *AAPG Annual Convention Program*, 10: 160.
- Quade J, Breecker D O, Daëron M, Eiler J. 2011. The paleoaltimetry of Tibet: an isotopic perspective. *American Journal of Science*, 311(2): 77–115.
- Reineck H E, Singh I B. 1973. *Depositional Sedimentary Environments: with Reference to Terrigenous Clastics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Rowley D B, Pierrehumbert R T, Currie B S. 2001. A new approach to stable isotope-based paleoaltimetry: implications for paleoaltimetry and paleohypsometry of the High Himalaya since the Late Miocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(1–2): 253–268.
- Salles T, Husson L, Rey P, Mallard C, Zhirovic S, Boggiani B H, Coltice N, Arnould M. 2023. Hundred million years of landscape dynamics from catchment to global scale. *Science*, 379: 918–923.
- Scotese C R. 2009. Late Proterozoic plate tectonics and palaeogeography: a tale of two supercontinents, Rodinia and Pannotia. *Geological Society, London, Special Publications*, 326: 67–83.
- Scotese C R. 2021. An atlas of Phanerozoic paleogeographic maps: the seas come in and the seas go out. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49: 679–728.
- Scotese C R, Schettino A. 2017. Late Permian-Early Jurassic palaeogeography of Western Tethys and the world. *Permo-Triassic Salt Provinces of Europe, North Africa and the Atlantic Margins*: 57–95.
- Song S H, Mukerji T, Hou J G, Zhang D, Lü X. 2022. GANSim-3D for conditional geomodeling: theory and field application. *Water Resources Research*, 58(7): e2021WR031865.
- Sun L, Wu S H, Yue D L, Cui W F. 2024. Paleosalinity reconstruction in offshore lacustrine basins based on elemental geochemistry: a case study of Middle–Upper Eocene Shahejie Formation, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Oceanology and Limnology*, 42(4): 1087–1105.
- Sun L, Wu S H, Yue D L, Jiang S C, Du W, Yang L J, Xu Z H, Zhang K. 2026. Palaeoweathering and palaeoclimate of the Lower Cretaceous upper Xiguayuan Formation in the Luanping Basin, North China: implications for early Aptian global cooling. *Journal of Palaeogeography*, 15(1): 100295.
- Turcotte D, Schubert G. 2014. *Geodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Walker R G, James N P. 1992. *Facies Model: Response to Sea Level Change*. Canada: Geological Association of Canada.
- Wei W, Algeo T J. 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287(15): 341–366.
- Zeng H L, Backus M M, Barrow K T, Tyler N. 1998. Stratal slicing: part I. Realistic 3D seismic model. *Geophysics*, 63(2): 502–513.

(责任编辑 王绍华)