

资源古地理学研究及应用展望*

孙龙德^{1,2,3} 朱如凯^{1,2,4} 吴胜和⁵ 白雪峰^{1,6} 岳大力⁵ 姜在兴⁷ 邵龙义⁸
胡宗全⁹ 赖维成¹⁰ 刘 波¹¹ 李 庆⁵ 万 力⁴ 张天舒⁴ 陈芳玉⁴

- 1 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
2 怀柔国家实验室新疆基地, 新疆乌鲁木齐 830011
3 中国石油天然气集团有限公司, 北京 100007
4 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
5 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249
6 中国石油大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆 163002
7 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083
8 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083
9 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206
10 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028
11 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

摘 要 中国古地理学研究特色鲜明, 服务于油气、煤炭、铀等关键战略资源勘查与开采。聚焦中国独具特色的小陆块群演化、关键地质事件、古地理学研究方法与技术、AI+古地理等领域方向, 编制了一批有工业价值的岩相古地理图件, 有力指导了矿产资源的勘查与开采。结合古地理学发展趋势及资源勘查的需求, 提出资源古地理学是古地理学中以研究地质资源为研究目标的一个分支学科, 通过解析古地理演化的时空规律, 反推资源形成背景和分布范围, 指导资源勘探、评价和合理开发, 属新兴学科。未来重点发展方向是圈层作用与资源古地理、沉积盆地古地理与多资源协同、页岩层系古地理与生烃过程、煤系古地理与煤及烃类富集、古地理与二氧化碳地质埋存、古地理与地下特殊空间、资源古地理与 AI、纳米技术等领域跨界融合。

关键词 古地理学 资源古地理学 多资源协同 AI+纳米技术

第一作者简介 孙龙德, 男, 1962 年生, 博士, 中国工程院院士, 中国石油天然气集团有限公司教授级高级工程师, 主要从事油气勘探开发研究与工程实践。E-mail: sunld-ilm@petroChina.com.cn。

通讯作者简介 朱如凯, 男, 1968 年生, 博士, 中国石油勘探开发研究院正高级工程师, 主要从事沉积储集层与非常规油气地质研究。E-mail: zrk@petroChina.com.cn。

中图分类号: P539.2 文献标志码: A

Research progress and application prospects of resource palaeogeography

谨以此文纪念冯增昭先生 100 周年诞辰。

* 国家自然科学基金企业创新发展联合基金集成项目(编号: U24B6004)资助。[Financially supported by the Integrated Project of the National Natural Science Foundation of China (No. U24B6004)]

收稿日期: 2026-06-15 改回日期: 2026-07-18

SUN Longde^{1,2,3} ZHU Rukai^{1,2,4} WU Shenghe⁵ BAI Xuefeng^{1,6} YUE Dali⁵
 JIANG Zaixing⁷ SHAO Longyi⁸ HU Zongquan⁹ LAI Weicheng¹⁰ LIU Bo¹¹
 LI Qing⁵ WAN Li⁴ ZHANG Tianshu⁴ CHEN Fangyu⁴

1 National Key Laboratory for Green Mining of Multi-resource Collaborative Continental Shale Oil, Heilongjiang Daqing 163712, China

2 Xinjiang Base of Huairou National Laboratory, Ürümqi 830011, China

3 China National Petroleum Corporation, Beijing 100007, China

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

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

6 CNPC Daqing Oilfield Company Limited, Heilongjiang Daqing 163002, China

7 College of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

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

9 SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China

10 CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China

11 College of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract Chinese palaeogeographic research has developed distinctive characteristics by focusing on the exploration and exploitation of key strategic resources such as petroleum, natural gas, coal, and uranium. Studies on the evolution of small continental blocks in China, key geological events, palaeogeographic methods and technologies, and AI-assisted palaeogeography have produced a series of lithofacies palaeogeographic maps with practical industrial value, which have effectively guided mineral-resource exploration and development. In view of the development trend of palaeogeography and the demand for resource exploration, resource palaeogeography is proposed as an emerging branch of palaeogeography oriented toward geological resources. It aims to reveal the spatial-temporal evolution of palaeogeographic settings, infer the formation background and distribution of resources, and guide resource exploration, evaluation, and rational development. Future research should emphasize sphere interactions and resource palaeogeography, palaeogeography of sedimentary basins, multi-resource synergy, shale succession palaeogeography and hydrocarbon generation, coal-measure palaeogeography and enrichment of coal and hydrocarbons, palaeogeography and geological storage of carbon dioxide, palaeogeography and special underground space, and interdisciplinary integration of resource palaeogeography with AI and nanotechnology.

Key words palaeogeography, resource palaeogeography, multi-resource synergy, AI and nanotechnology

About the first author SUN Longde, born in 1962, Ph.D., Academician of the Chinese academy of engineering, professor-level senior engineer at CNPC, is mainly engaged in research and engineering practice of oil and gas exploration and development. E-mail: sunld-tlm@petroChina.com.cn.

About the corresponding author ZHU Rukai, born in 1968, Ph.D., professor-level senior engineer at the Research Institute of Petroleum Exploration & Development (RIPED), PetroChina, is mainly engaged in the research of sedimentary reservoirs and unconventional oil and gas geology. E-mail: zrk@petroChina.com.cn.

0 引言

古地理学的研究认知,可能要早于地质学的研究认知。对人类而言,它更直接、更易观察(刘宝珺和曾允孚,1985;冯增昭,1992;冯增昭等,2004;王成善等,2025)。资源古地理学则是以矿产资源为对象,通过确定有利古地理单元的分布,有效指导资源勘查开采,是学科发展的必然。

近几十年来,中国古地理学研究取得了一系列重要成果。一是聚焦古地理学研究方法与技术看新,代表性著作有《岩相古地理基础和工作方法》(刘宝珺和曾允孚,1985),《单因素分析综合作图法——岩相古地理学方法论》(冯增昭,1992),《单因素分析多因素综合作图法——定量岩相古地理重建》(冯增昭等,2004),《岩相古地理优势相方法及应用——兼谈“广义”与“狭义”岩相古地理及若干新的研究方向》(李增学等,2021)等。冯增昭先生从 1970 年代开始探索与实践单因素岩相古地理方法,在华北地区奥陶系研究中运用单因素的思路进行古地理分析,明确提出“单因素分析→多因素综合→定量编图”的完整研究流程(冯增昭等,2004),形成了较成熟的理论体系,主导编制了北方奥陶纪和南方二叠纪系统的岩相古地理图,形成了一系列成果(刘宝珺,2001)。二是聚焦油气、煤炭、铀等关键战略资源勘探,以典型海相克拉通盆地和陆相盆地(如鄂尔多斯、四川、松辽、塔里木、准噶尔等)岩相古地理为核心,编图范围从区域级到盆地级至区带级,有效指导了重点盆地有利区优选和资源勘探开发,编图精度从系、统、组、段到油层组、准层序组(吴崇筠和薛叔浩,1993;冯增昭等,2000;孙龙德等,2010,2015;朱如凯等,2017,2025)。三是聚焦中国独具特色的小陆块群演化,重点研究了华北、扬子、塔里木及众多微陆块的拼合历史,揭示了特提斯构造域的独特古地理过程(张世红等,2001;李三忠等,2016;陈安清等,2020;吴福元等,2020)。四是聚焦关键地质事件,如中三叠世华北—扬子碰撞、白垩纪以来中国地势由“东高西低”转“西高东低”、青藏高原隆升的古地理效应、“大不整合”为构造运动而非冰川作用所致(钟大赉和丁林,1996;田云涛等,2022;Zhan *et al.*, 2026)。五是聚焦 AI+古地理,基于机器学习模型,整合古生物、同位素数据、地层厚度、沉积构造等

多源数据,智能反演古水深、古气候、古海平面、古物源等关键古地理参数,构建高精度古地理演化模型(侯章帅等,2020;侯明才等,2023),如“TimeMachine 全球古地理重建平台”,融合 AI 技术与深时数据库,实现板块重建、古坐标计算、古地理数据可视化与智能分析,推动古地理重建向数字化、在线协同方向发展,可精准还原不同地质时期的沉积环境与古地理格局(侯明才等,2023)。

2013 年,冯增昭先生以 87 岁高龄发起筹建国际古地理学会(ISP),2022 年正式成立,是中国成立的第一家地质学领域国际性学术组织,显著提升了中国在古地理领域的国际话语权。2025 年,设立了岩相古地理学、生物古地理学、资源古地理学、古地理学研究方法与技术等专业委员会。本研究在古地理学发展研究现状调研分析的基础上,结合古地理学的发展趋势,提出了资源古地理学的概念内涵及主要研究内容,进一步提出了资源古地理学的下一步重点发展方向,希望通过对资源古地理学的持续共同探讨,发展完善理论技术体系,明确与矿产资源(如石油、天然气、煤炭、沉积矿床等)形成、分布和富集规律相关的古自然环境,揭示古环境条件对矿产资源形成与空间分布的控制作用,编制形成一批有工业价值的资源古地理图件,指导矿产资源的勘查与开采。今年是冯增昭先生诞辰百年,以此缅怀先生。

1 古地理学发展现状、挑战与方向

在中国历史上,(古)地理学概念较早可追溯至东晋葛洪(约公元 283—362 年)著《神仙传·麻姑》,“接待以来,已见东海三为桑田。向到蓬莱,水又浅于往者,会时略半也,岂将复为陵陆乎?”,提出了沧海桑田概念;此后,颜真卿著《麻姑山仙坛记》,沈括著《梦溪笔谈》卷二十四,朱熹著《朱子语类》卷九十四等均有相关描述。国际上,欧美国家较早从《圣经》诺亚大洪水不可动摇的信条,到 18—19 世纪初的水火之争,至英国 Lyell (1830) 著《地质学原理》,奠定了“将今论古”的现实主义方法。Hunt (1873) 提出了以古生物地理研究为主的古地理学研究思路。

从古地理学发展历程看,大致可以分为 3 个时期。

1) 早期阶段(19 世纪后期至 20 世纪中期):

以传统生物地层学、沉积学为基础,初步考虑古地理与矿产分布,形成了古地理学研究的基本思路和方法。代表性著作有 Hunt (1873) 的《北美大陆的古地理》,应用古植物学和古动物学研究地质历史时期的古环境;Wegener (1915) 著《海陆的起源》,认为晚古生代末期,全球大陆曾聚合为一个超级大陆,周围是统一的广阔海洋;中生代初泛大陆开始分裂,先形成北方的劳亚古陆与南方的冈瓦纳古陆,之后进一步破碎漂移,逐渐形成现代海陆分布的格局,从此开启了从固定论到活动论的范式转变,为后续板块构造学说奠定了思想基础,改变了人类对地球表面演化的认知。葛利普著《中国地质史》(Grabau, 1924),书中提供了 36 幅亚洲古地理图。赵金科 (1936) 发表了《震旦纪地层之分布及其古地理学之意义》一文。刘鸿允 (1955) 出版《中国古地理图》一书,是中国第一部系统的古地理专著,采用固定论构造背景下的古地理复原方法,以生物地层学+岩石地层学为基础,聚焦中国从震旦纪、寒武纪、奥陶纪、志留纪、泥盆纪、石炭纪、二叠纪、三叠纪至侏罗—白垩纪的 9 个关键时期,恢复了各时期海陆分布、古气候带、沉积相区与古生物地理分区,建立了中国古地理研究的范式,推动了全国区域地质调查与古

地理编图的标准化,为石油、煤炭、磷矿等沉积矿产的区域勘探提供了关键的古地理背景。

2) 成熟阶段 (20 世纪后期): 板块构造理论、地球化学技术等引入,推动了全球古地理格局对资源的控制研究,如泛大洋演化与油气盆地的关系。国际上,Christopher R. Scotese 团队于 1980 年代启动 PALEOMAP Project (古地理重建),系统整合了古地磁、岩相、古生物数据,开展全球古地理编图;1992 年发布 28 张显生宙古地理图,成为全球古地理研究的里程碑。国内,关士聪 (1984) 著《中国海陆变迁—海域沉积相与油气》,对海陆变迁、盆地演化及油气远景评价具有重要指导意义;王鸿祯 (1985) 主编《中国古地理图集》,引入板块构造观点,修正了早期固定论的不足;刘宝珺和许效松 (1994) 著《中国南方岩相古地理图集》等。冯增昭 (1977, 1992, 2004) 提出了单因素分析多因素综合作图法,创立了定量岩相古地理学。

3) 现代阶段 (21 世纪以来): 多技术融合 (GIS、数值模拟、高精度地球化学), 聚焦精细古地理重建与资源精准预测,同时关注资源开发与古地理环境的耦合。国际上,Scotese (2014, 2016, 2021) 不断发展完善 PALEOMAP Project 全球海陆变迁研究 (图 1), 以海洋进退为核心主题,融合了

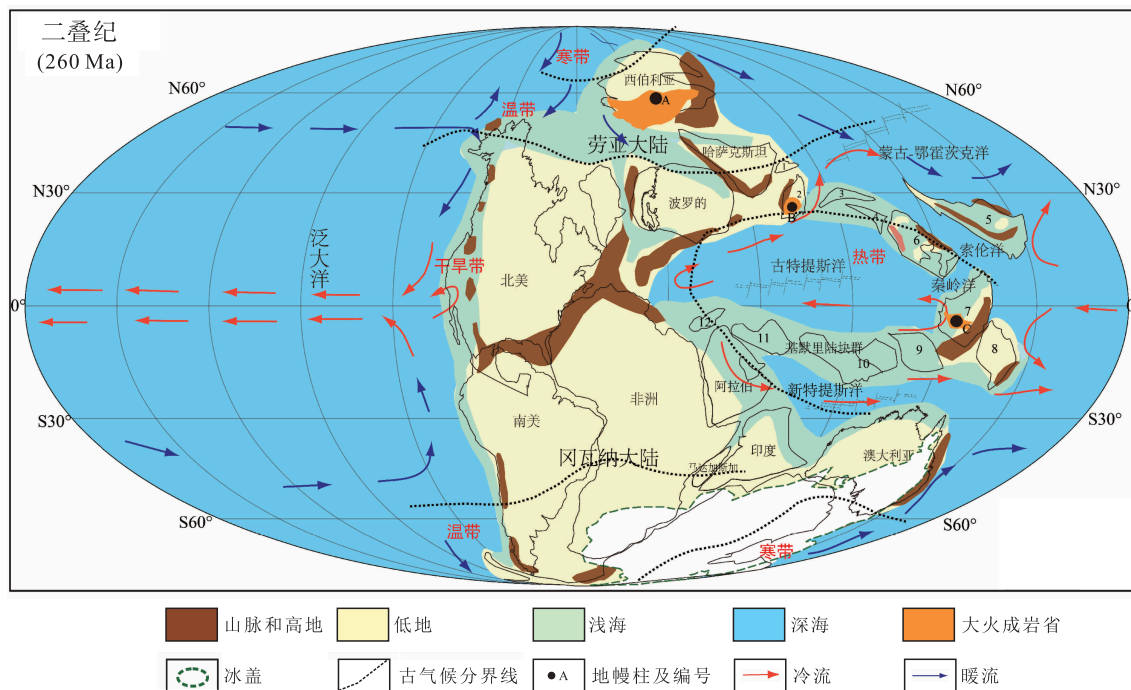


图 1 晚二叠世 (270—250 Ma) 全球古地理环境恢复 (据 Scotese, 2021)

Fig. 1 Global palaeogeographic reconstruction of the Late Permian (270–250 Ma) (after Scotese, 2021)

古地磁、岩相、古生物、洋壳年龄—深度关系，构建了古大陆、板块构造、古地理、古气候、古海洋五层重建体系，实现了从定性描述到定量化、动态化的跨越，为板块构造、古气候、资源勘探提供基础。冯增昭（2003）提出古地理学是研究地质历史时期与人类历史时期自然环境特征及其演变的科学；同时，聚焦支撑油气地质调查与勘探，层序岩相古地理（侯中健等，2001；朱如凯等，2011）、构造—层序岩相古地理（马永生等，2009；郑和荣和胡宗全，2010）、数字岩相古地理（牟传龙，2022）、源—汇系统岩相古地理（王星星等，2016；张志杰等，2023）、湖相页岩层系沉积岩相古地理（胡宗全等，2020；张天舒等，2023；孙龙德等，2024；朱如凯等，2026）（图 2）、小尺度古地理与沉积构型（吴胜和等，2026）等一批专著和论文相继问世。

当前，全球古地理学研究正处于多学科深度融合、先进技术驱动、定量建模与应用拓展的快速发展期，核心是从定性描述走向高精度、动态、多尺度的古地理重建，并深度服务于资源勘探开发、深时气候与生命演化研究。研究方向主要包括：（1）板块构造与全球古地理重建，以古地磁、古生物、地球化学为核心，高精度重建超大陆的聚合与裂解，聚焦新特提斯洋演化、微陆块漂移等关键过程。（2）深时气候与古地理耦合，结合古气候模型与地质记录，揭示古地理格局对大气环流、洋流、极端气候事件的控制机制。（3）古地理与生命协同演化，解析古地理变迁对生物迁移、辐射、灭绝与复苏的驱动作用，如奥陶纪末、二叠纪末大灭绝的古地理背景。（4）资源形成的古地理定量模拟，将古地理演化与油气、矿产形成过程耦合，实现从经验勘探到预测性建模的转变。技术方法主

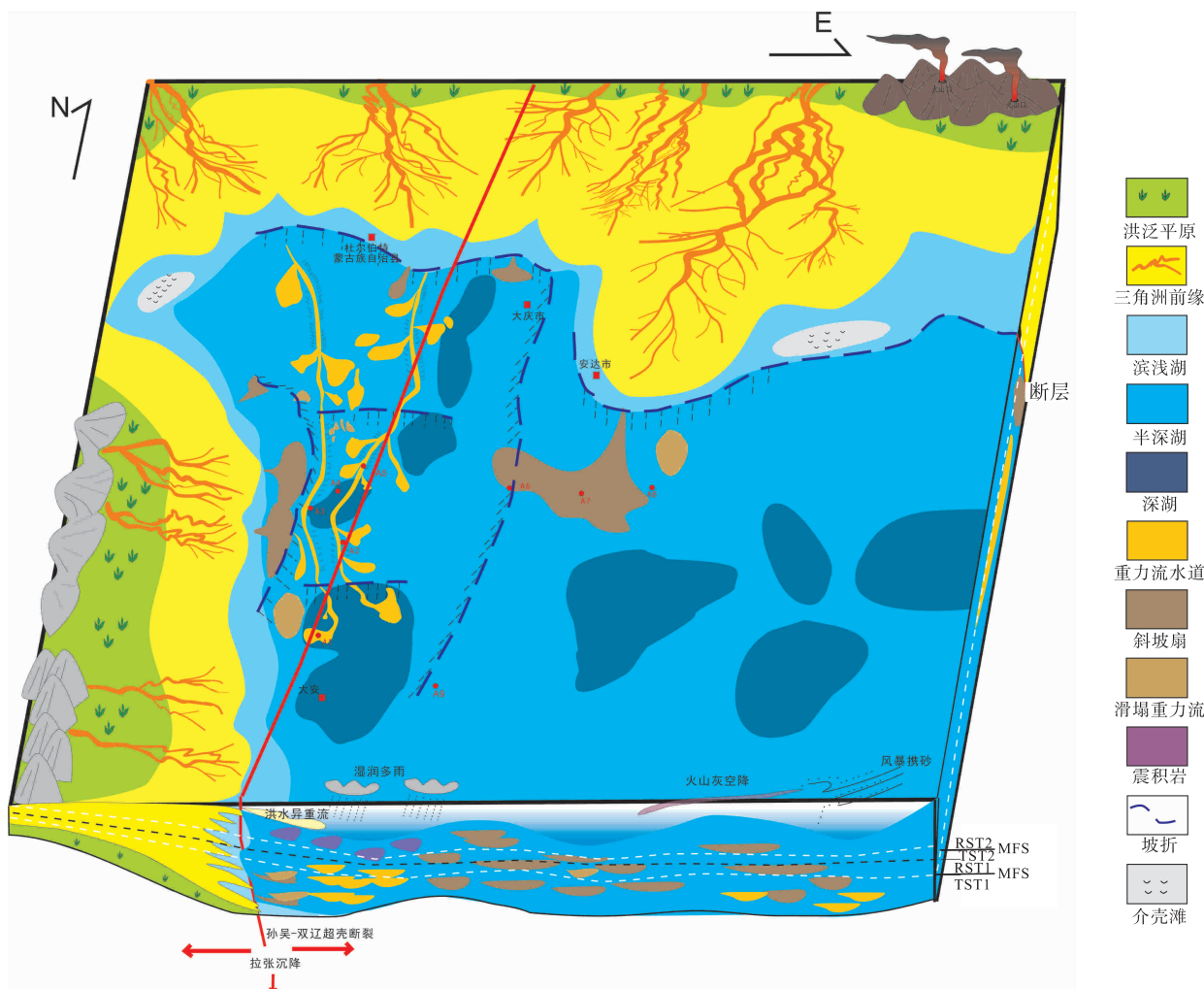


图 2 松辽盆地北部青山口组沉积模式（据张天舒等，2023；有修改）

Fig. 2 Sedimentary model of Qingshankou Formation in northern Songliao Basin (modified from Zhang *et al.*, 2023)

要有：(1) 高精度定年，通过 U-Pb 锆石、Ar-Ar、ID-TIMS 等测年技术，将古地理事件时间分辨率提升至百万年甚至十万年、万年级。(2) 多代理指标整合，以有机/无机地球化学、古生物多样性、沉积学数据融合，提高重建可靠性。(3) 数值模拟与 GIS，以古气候模型、盆地模拟、GIS 空间分析，实现动态、三维、定量的古地理可视化与过程模拟 (Peters and McClennen, 2016; Müller *et al.*, 2018, 2019)。(4) 大数据与人工智能，全球古地理数据库建设，AI 用于古地理图自动编绘与模式识别。

但是，古地理学研究当前也面临主要挑战：一是全球、板块、盆地、区带等多尺度耦合研究脱节，从全球到局部的古地理协同重建难度大；二是前寒武纪古地理缺乏有效古地磁与化石记录，研究仍处假说阶段；三是古地理重建的确定性模型与不确定性模型、误差评估、多解性问题突出。

当今，古地理学已从传统的编图学科发展为地球系统科学的核心分支，随着技术进步与数据积累，古地理重建将更精准、更动态。未来发展趋势，一是应多学科深度交叉，古地理学与沉积学、地球化学、古气候学、地球物理学、(古)生物学全方位融合，发展四维高精度与定量化动态古地理模型，实现过程模拟与预测；二是应构建全球统一、开放共享的古地理数据平台，推动数据驱动研究；三是从传统资源勘探向深时全球变化、生命演化、极端气候预测等基础与应用领域延伸。

2 资源古地理学概念与内涵

石油、天然气、煤炭及其共生资源、盐类、沉积型铀矿、铁矿、非金属矿、磷矿、地下水、关键金属矿产等资源的形成离不开特定的古地理条件(如古海洋、古湖泊、古森林、古河流等)。资源古地理学是古地理学以研究地质资源为目标的一个分支学科，通过解析古地理格局的时空演化规律，反推资源的形成背景和分布范围，指导资源勘探、评价和合理开发，是古地理演化过程与资源富集过程的耦合研究，属新兴学科。研究目标是通过分析盆地性质、类型、结构、时空演化等古构造背景，重建关键地质时期(如成煤期、成烃期、成矿期)的古地理环境(如古气候、古地形、古水文、古生物、古沉积体系等)和古地理格局(如古大陆

位置、古盆地边界、古沉积中心)；揭示矿产、能源、水资源等形成的古地理控制因素(如聚煤古地理、油气储集古地理、膏盐与钾盐古地理、沉积型铁矿与铝土矿古地理、咸水层古地理等)；建立古地理—资源类型—分布规律的对应关系，预测未发现资源的潜在区域。

资源古地理学的核心研究内容包括：(1) 古地理环境重建。通过多学科手段还原地质历史时期的自然环境，是资源分析的前提，一是古气候重建，利用古生物化石、沉积地球化学指标、岩性特征，判断古温度、古降水、古大气成分；二是古沉积环境与沉积体系重建，通过岩石学特征、沉积构造和古生态资料，识别沉积相，明确沉积物的来源、搬运路径和堆积中心；三是古地形与古地理格局重建，应用板块构造理论，利用地层厚度分析、古生物地理分区等资料，还原古大陆、古海洋、古盆地的空间分布；四是古水文与古生态重建，针对地下水、煤层气等资源，重建古含水层的演化、古水流方向、古生物群落结构，判断古生态系统对资源形成的贡献。(2) 资源形成的古地理控制机制。油气领域主要关注沉积盆地类型、深水还原环境、储集体；煤炭领域主要关注古气候、古地形、古植物群落、古构造稳定性；铁矿、铝土矿等金属矿产领域主要关注古海洋化学条件、古风化壳形成与分布；盐、钾矿等非金属矿产领域主要关注古盆地封闭性、古气候干旱程度；孔隙水、岩溶水、咸水层等地下水领域主要关注沉积相、古地形、古岩溶作用。(3) 利用古地理图指导资源勘探靶区选择、资源评价与开发。通过编制不同地质时期的古地理图，圈定资源潜在富集区和咸水层封存有利区；结合古地理演化史，分析资源的纵向和横向分布规律，为储量估算、开采和 CCS 提供依据。

从古地理的研究层级看，包括古地理背景、古地理格局、古地形、古沉积环境 4 个层次，前一项为后一项提供形成基础，反过来，沉积记录可反演所有古地理要素(表 1)，共同决定古地理环境。

资源古地理学的研究依赖多学科交叉技术：(1) 应用传统地质方法。通过地层划分对比，确定成矿/成烃期的时代，分析地层厚度、岩性组合反映的古地理变化；通过放大镜、显微镜、扫描电子显微镜等观察岩石成分、结构、构造，建立沉积相识别标志；利用化石的生态习性、地理分布重建

表 1 古地理相关概念内涵与相互关系对照表
Table 1 Comparison of connotations and interrelationships of palaeogeographic related concepts

项目	古地理背景	古地理格局	古地形	古沉积环境
定义	控制区域古地理演化的宏观地质基础,是形成各类古地貌面貌的条件	空间分布、单元组合与配置关系	地势高低、坡度、起伏形态,侧重地貌形态本身	沉积物形成时的水动力、介质、生物、化学条件
尺度	全球/大区构造—地层	盆地、坳陷、隆起等一级构造单元	内部地貌单元(斜坡、洼地等)	微相、亚相
要素	板块构造、区域构造运动、基底性质、古气候、大地构造演化	隆起/坳陷分布、海陆边界、源—汇展布、水系等	海拔、坡度、古河道、古隆起、斜坡、深洼、台地等	盐度、水深、水动力、氧化还原条件、沉积介质等
逻辑关系	控制古地理特征形成	宏观空间框架	地表形态	沉积作用条件
相互作用	决定古地理格局整体样式	约束古地形分布范围,物源区、沉积洼地的空间位置	控制水深、流速、物源卸载等	记录古地理演化信息,反演古地形、古格局、古背景特征
实例	华北克拉通抬升、陆内坳陷发育、干旱—半干旱古气候	鄂尔多斯盆地“西隆东坳、南北分带”整体构造沉积格局	盆地西部陡坡、东部宽缓斜坡、中部湖盆深洼、北部冲积平原	陡坡近岸水下扇、东部浅水滩坝、中部半深湖泥岩、北部河流冲积环境

古环境。(2) 地球化学与地球物理方法。利用元素地球化学、有机地球化学、稳定同位素和非传统同位素等分析测试数据,判断古温度、古盐度、古水体氧化还原条件、有机质类型与来源、古生产力、保存条件等;通过地震勘探、重力勘探、磁法勘探,反推地下古沉积体的形态、古盆地结构,为古地理重建和资源勘探提供深部数据。(3) 先进技术与模型模拟。利用遥感影像解析地表出露的古地理痕迹,通过 GIS 叠加分析古地理单元与已知资源点的关系;利用古气候模型、沉积盆地模拟软件,重现古地理演化过程,预测资源富集的时空范围;通过大量勘探钻孔的岩心、测井数据,验证古地理重建结果,优化资源分布预测模型。

学科意义在于完善地球系统科学认知,揭示古地理演化与资源形成的耦合机制,丰富圈层相互作用(岩石圈、水圈、生物圈、大气圈)的研究;构建资源形成的统一理论框架,将不同类型资源的形成规律纳入古地理演化的整体视角,打破单一资源研究的局限性。应用价值在于降低资源勘探成本,通过古地理规律指导勘探靶区优选,减少盲目钻探,提高勘探成功率;支撑资源可持续开发,如通过古水文演化研究,优化地下水开采方案,避免过度开采导致的地面沉降;结合古环境背景,评估矿区生态修复的可行性;服务国家资源安全,针对中国紧缺的油气、钾矿等资源,通过古地理研究寻找新的勘探远景区,降低资源对外依赖程度。

总之,资源古地理学的核心是将今论古、以古鉴今、以古找矿,通过解译地质历史时期的古地理

环境、古构造背景及资源空间分布规律,科学指导资源勘探和开采,对保障国家资源安全、推动能源结构转型具有重要意义。

3 资源古地理学发展方向

资源古地理学属新兴学科、交叉学科。作者认为资源古地理学与传统岩相古地理学是有区别的,一应突出资源与古地理多学科融合特点及其在常规—非常规油气勘探开发中的作用;二应考虑多尺度古地理对资源勘探开发的控制,强化与产业需求的对接;三应结合资源勘探开发的阶段性需求。目前,尚没有一张真正意义上的资源古地理图,编制好第一张资源古地理图将成为未来一段时期工作重点和标志性成果。现阶段,作者认为有以下主要发展方向,当然,在发展实践过程中可以动态优化。

3.1 圈层作用与资源古地理

圈层作用与资源古地理,是地球系统科学与古地理学深度融合的前沿方向,圈层作用决定古地理格局,继而控制资源形成与富集。以岩石圈、地幔、水圈、大气圈、生物圈的物质—能量循环为核心,解释沉积盆地形成、古地理格局演化与矿产/能源资源时空分布的内在联系(王成善等, 2025; 朱日祥等, 2025)(图 3)。

以油气聚集为例,可以从深部圈层与浅部圈层两个维度开展研究。深部圈层(地幔—岩石圈),通过地幔对流与板块运动,驱动大陆裂解、洋盆形

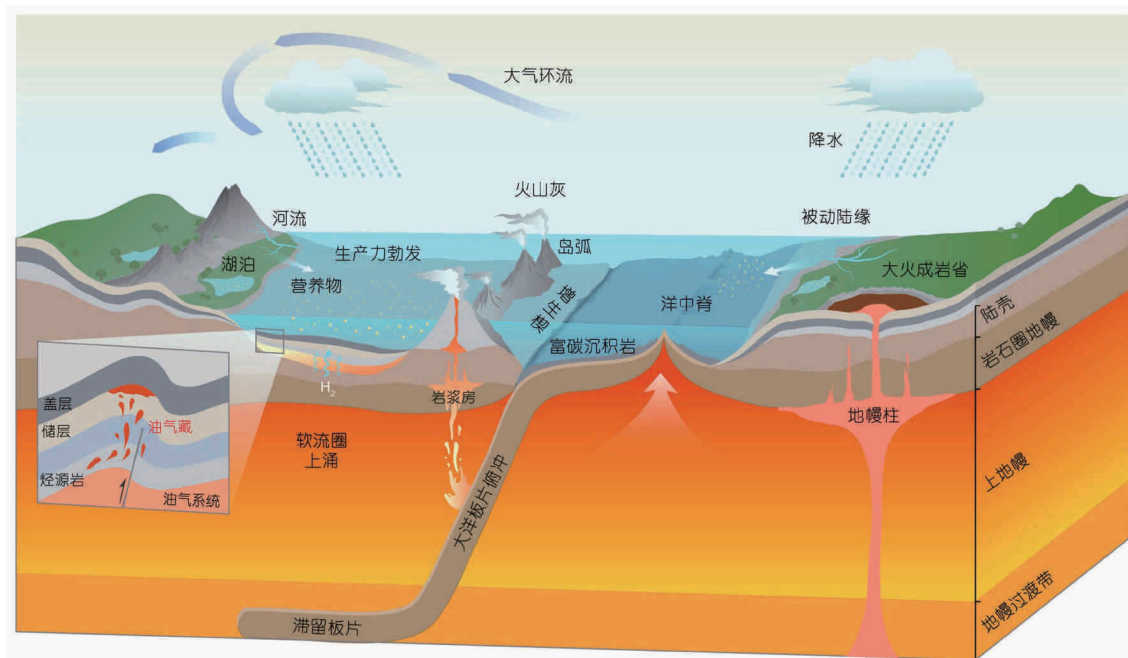


图 3 多圈层驱动的油气形成与富集理论模式 (据朱日祥等, 2025)

Fig. 3 Conceptual model of multi-sphere coupled hydrocarbon formation and enrichment (after Zhu *et al.*, 2025)

成、造山带隆升, 控制盆地类型及其形成分布 (如裂谷盆地、被动陆缘、前陆盆地); 通过俯冲带脱水、脱碳, 释放 CO_2 、 CH_4 、 H_2 等流体, 为浅部成矿、成烃提供物质与能量; 通过地幔柱/热点, 引发地壳隆升、裂谷发育与大规模火山活动, 提供高热流, 加速烃源岩成熟与地热资源形成; 通过岩石圈伸展/挤压, 形成断陷、前陆等盆地, 利于富有机质沉积与油气聚集。

表层圈层包括水圈、大气圈和生物圈。其中, 水圈 (海平面、古海洋、古湖泊) 通过海 (湖) 平面升降控制沉积相带迁移, 决定烃源岩、储集层、盖层的组合关系, 古海洋化学 (氧化还原、盐度、温度) 控制有机质保存与沉积矿产 (如铁、锰、磷、蒸发岩) 形成。大气圈 (古气候、 CO_2) 通过温室气体浓度控制全球温度与风化、剥蚀、沉积速率, 气候带 (干旱/湿润) 决定沉积体系类型 (如河流、湖泊、碳酸盐台地)。生物圈 (古生物、有机质) 通过光合作用固定碳, 形成烃源岩与煤的物质基础, 微生物作用改造有机质, 影响油气类型与成藏, 生物骨骼与壳质堆积形成生物礁、碳酸盐岩, 是重要储集层。如中国中生代岩石圈伸展, 形成大型陆相断陷和拗陷盆地, 发育厚层富有机质页岩, 形成陆相页岩油规模富集区, 支撑 “中国

式页岩革命”。

3.2 沉积盆地古地理与多资源协同

这是当前的核心前沿方向, 即同一套古地理格局, 控制多类型资源在时空上共生、互控、富集。如渤海湾古近纪裂谷盆地, 热流值高、烃源岩发育, 常规油气+页岩油气+地热+盐类资源共同富集; 鄂尔多斯、松辽等中生代拗陷盆地, 经历多期湖侵, 细粒沉积发育且分布稳定, 常规油+页岩油+煤+铀共同富集; 塔里木库车山前、准噶尔盆地南缘等新生代前陆盆地, 物源充足, 煤系发育, 碎屑岩储集体规模分布, 常规油气+煤+煤层 (岩) 气+致密砂岩气+铀共同富集; 塔里木、四川、鄂尔多斯等克拉通盆地, 多期海侵、多次构造运动, 形成多套储盖组合, 常规油气+非常规油气+煤+钾盐共同富集。纵向上, 同一套沉积旋回内, 页岩 (油/气/铀) - 煤 (气) - 砂岩 (油/气) - 盐类 (锂/钾) 等纵向叠置, 多资源协同。横向上, 深湖一半深湖环境, 富有机质页岩发育, 页岩油气、铀资源丰富; 三角洲、河流、滩坝等环境砂体发育, 常规油气、致密油气资源丰富; 滨浅湖沼泽环境, 植物繁盛, 煤、煤层 (岩) 气资源丰富; 盐湖、蒸发盆地等环境, 古盐度高, 锂、钾盐、硼等

资源丰富。

资源利用上，从单一资源开发走向盆地系统多资源整体评价与开发，一孔多探、一层多评，多资源协同开采、综合利用、提高效益。

3.3 页岩层系古地理与生烃过程

泥岩（页岩）的发育与分布受岩相古地理严格控制，古水深、沉积环境、水体氧化还原条件及古气候共同决定泥岩（页岩）的有机质丰度、类型与生烃潜力。在埋藏热演化过程中，干酪根随温度和压力升高，依次进入生油、湿气、干气阶段，最终形成页岩油、页岩气、常规油气等油气资源。古地理是物质基础，生烃过程是能量转化，二者共同控制页岩层系油气的形成与富集。在泥岩（页岩）古地理研究中，针对湖相页岩层系岩相与有机质分布的非均质性，首先应关注层序对泥岩（页岩）发育的控制作用，建立精细的古地貌+水动力条件+生物有机相+遗迹学+纹层结构的标准化微相模型，综合反演和正演方法，运用人工智能技术，结合页岩油气甜点评价关键参数，开展不同类型纹层组合时空分布规律的定量化评价预测和智能化分析编图，重现初级生产力、氧化条件、埋藏效率、有机质通量共同控制下的有机质分布特征，指导页岩油气富集段/区优选(图 4)。

3.4 煤系古地理与煤及烃类富集

煤岩的发育与分布严格受岩相古地理控制，温

暖湿润气候、平缓低洼的沼泽环境是煤岩形成的关键。古地理格局决定了煤层厚度、煤质优劣及煤系生烃潜力。在埋藏热演化过程中，煤岩有机质逐步成熟，生成煤层气与煤成油气。古地理背景奠定物质基础，热演化控制烃类生成，构造与保存条件决定最终富集。煤系古地理与烃类富集的耦合研究，是煤系油气、煤层（岩）气勘探评价的核心依据。

3.5 古地理与资源开采

古地理控制着矿产资源富集区内部的资源品质及其分布的差异性，从而影响着矿产资源的评价与开发。以油气资源为例，小尺度古地理（亚—微沉积环境）的空间分布差异控制着油气储集层的连续性和连通性以及储集层质量与含油气差异性，继而影响油气储量的估算及油气开采效率。迄今，由于这些因素的影响，全球已开发砂岩油藏中近 70% 的原油未能采出而滞留于地下成为剩余油。另一方面，在页岩油富集段/区，小尺度古地理格局控制着页岩油层的储集性、可流动性及可压裂性（脆性）等要素的差异，使得页岩油的规模开采迄今未能达到预期的效果。因此，发展小尺度古地理三维数智化建模技术，深入开展亚/微环境空间分布与演化研究，对提高资源开采效率具有重要意义（吴胜和等，2026）。

3.6 古地理与二氧化碳地质埋存

古地理是 CO₂ 地质埋存评价的基础。古地理

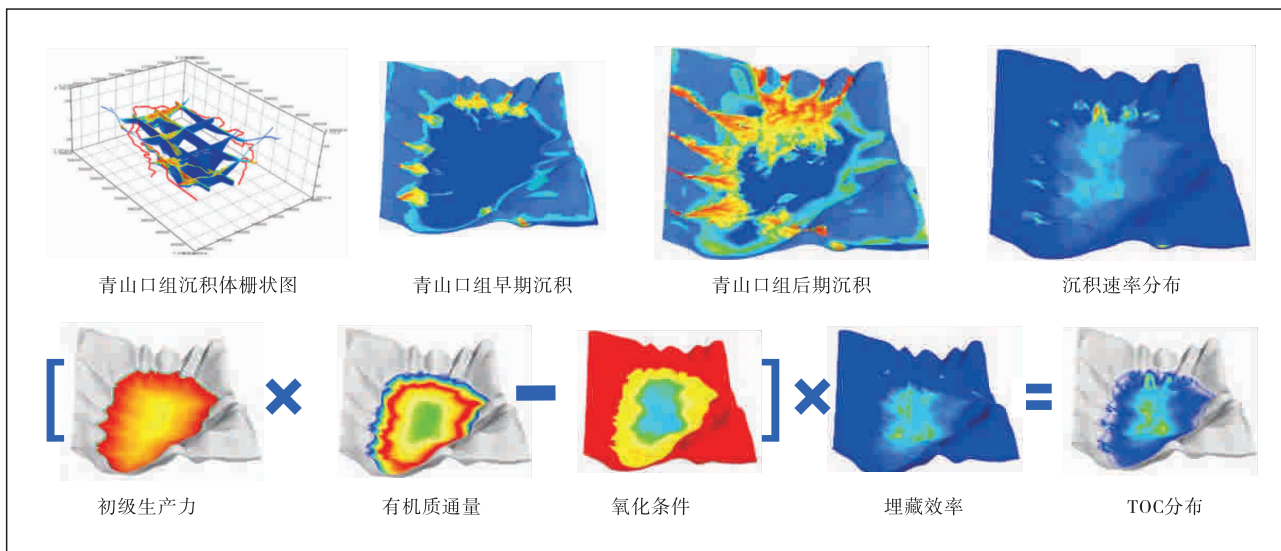


图 4 细粒物质—有机质沉积过程数值模拟技术流程

Fig. 4 Numerical simulation workflow for fine-grained sediments and organic-matter deposition

格局控制沉积盆地类型、沉积体系展布与储盖组合发育, 决定储集层的孔隙结构、厚度与分布范围, 以及盖层的封闭能力和稳定性。古地理背景通过制约储集层、盖层、圈闭及构造保存条件, 从根本上控制 CO_2 埋存的空间容量、注入安全性与长期封存可靠性, 如蒸发岩/泥岩盖层容量大、封闭极强, 最适合大型咸水层埋存。以古地理恢复为指导, 可精准预测有利埋存区带, 为 CCUS 选址与部署提供关键地质依据, 古地理决定在哪存、能存多少、安不安全。

3.7 古地理与地下特殊空间

地下特殊空间指具有特殊用途、特殊地质条件的地下空间(图 5), 如油气储集空间、 CO_2 地质埋存空间(CCUS)、地下储气库(天然气、氢气)、地下储能空间(压缩空气、热能)、核废料处置空间、地下水、地热、矿层空间、地下工程、隧道、硐室等工程空间。古地理格局控制地下特殊空间的成因、类型、分布、规模与稳定性, 是地下空间资源评价、开发与安全利用的基础。

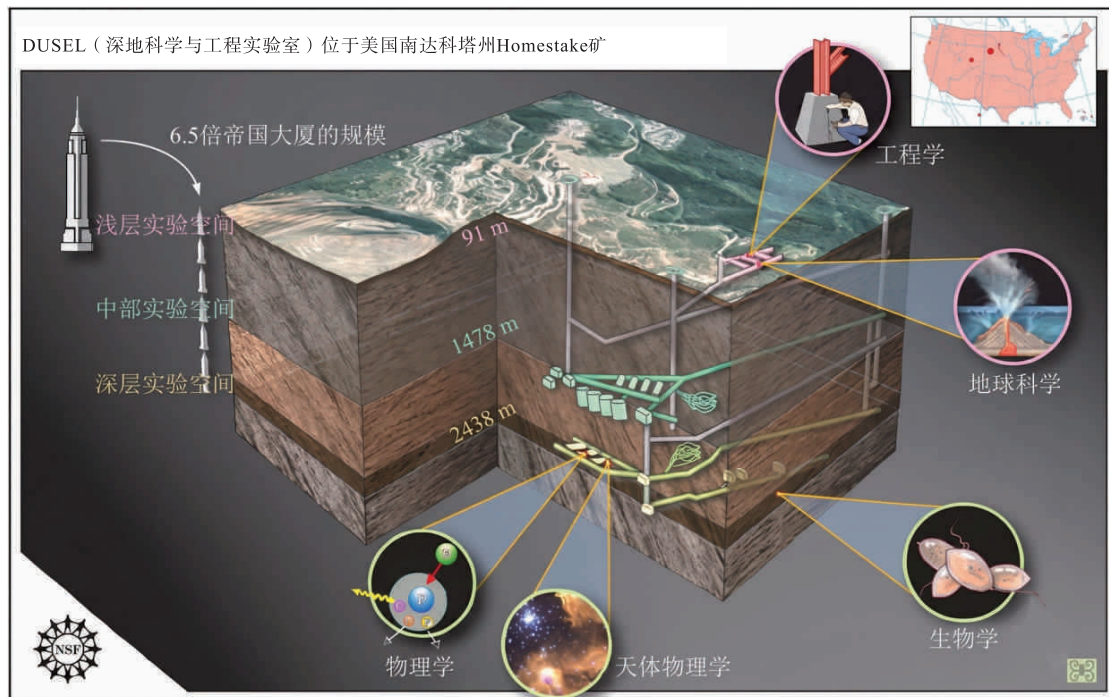
古地理是地下特殊空间形成与分布的主控因素, 古地理格局通过控制沉积体系、岩相类型、岩性组合及后期成岩演化, 决定地下空间的物质载

体、储集性能、封闭条件与地质稳定性, 如浅海台地、生物礁、滩相碳酸盐岩中孔隙、溶洞、裂缝发育, 是大型储集空间、储气库、埋存空间; 三角洲、河道、滨岸砂体中的砂岩孔渗好、分布广, 是油气储集层、咸水层埋存、储气库的基础; 深湖/海相泥页岩致密、低渗、塑性好, 是盖层封闭空间、核废料处置有利区; 蒸发岩具有极低渗透性和流变封闭性, 是最安全的地下封存、处置空间。古地理直接决定能不能用、安不安全、能用多久。

3.8 资源古地理与 AI、纳米技术等领域跨界融合

资源古地理的核心是解析古地理演化过程, 揭示资源时空分布规律, 其研究依赖海量地质数据(岩心、测井等)的处理、微观地质特征的识别, 以及复杂地质过程的模拟与预测。AI+纳米+资源古地理的协同融合, 可实现宏观—微观、定性—定量、预测—干预的全链条覆盖, 构建更高效、更精准的资源古地理研究与应用体系, 是未来的核心发展方向。

当前古地理学研究传统数据源主要包括地层厚度、沉积物粒度、岩性及占比、重矿物分析、地球化学分析、古水流方向、古地形高差、氧化还原条



注: 国界底图取自审图号: GS (2016) 2492号, 1:30 000 000

图 5 美国深地科学与工程实验室 (DUSEL)

Fig. 5 Deep Underground Science and Engineering Laboratory (DUSEL) in United States

件、水体深度等，未来可引入如空天遥感数据等新兴数据源，并深化挖掘现有数据源，可以扩展古生产力、有机质通量、埋藏效率等多类型数据。

AI 技术的优势是海量数据挖掘、非线性关系解析与智能预测，可破解传统研究中数据处理低效、预测精度不足的难题。AI 技术（机器学习、深度学习、知识图谱、计算机视觉等）与资源古地理的融合，主要聚焦数据处理、古地理重建、资源预测和勘探部署等场景，依托强大的数据处理与非线性推理能力，突破传统研究的技术瓶颈，相关应用已成为当前地质研究的热点方向。在岩相智能识别与划分方面，利用深度学习（CNN、Transformer 等）算法，对岩心图像、测井曲线、地震剖面等数据进行自动识别，精准划分岩相类型，替代传统人工识别与经验判断，不仅提升识别效率，还能减少人为误差，如 GeoMap-Agent 智能系统，可自动读取、分析地质图中的断层、岩层、构造边界等信息，大幅提升古地理重建中地质图解析的效率与精度。在古地理演化过程智能模拟方面，将 AI 技术与地球系统数值模拟技术相结合，模拟古地理格局的动态演化过程，预测不同地质时期的沉积环境分布，破解传统模拟中参数设置复杂、计算效率低的难题，为资源形成环境的解析提供科学依据。AI 技术通过对古地理数据与资源分布数据的深度挖掘，构建古地理参数—资源富集的关联模型，实现资源潜力的精准预测与评价，大幅降低勘探成本。在多资源协同预测方面，基于 AI 的知识图谱技术，整合油气、煤炭、铀矿等多资源的分布数据，结合古地理格局（盆地类型、岩相分布、沉积环境），构建多资源协同富集预测模型，可同时预测煤层气、煤成油、铀矿的富集区域，实现一孔多探、一层多评。在 CO₂ 地质埋存研究中，利用 AI 技术分析古地理控制的储盖组合分布，可精准预测有利埋存区带，为 CCUS 选址提供关键支撑。

纳米技术的优势在于微观尺度的精准表征，能够突破传统技术对微观地质结构、物质迁移过程的认知局限。通过高分辨率表征手段，可从纳米尺度解析地质体的微观特征，为古地理环境与资源形成机制的研究提供全新视角。利用场发射扫描电子显微镜、透射电子显微镜、原子力显微镜等纳米表征技术，在高分辨率条件下，精准观测泥岩、页岩、煤、砂岩等岩石的纳米级孔隙、裂隙结构，分析古

地理环境对微观孔隙演化的控制作用。利用纳米光谱、纳米探针等技术，精准检测岩石中纳米级有机质、矿物颗粒（如纳米级石英、黏土矿物）的组成与分布，解析古地理环境中物质的迁移与转化过程，如通过纳米技术分析煤岩中纳米级镜质组、壳质组的分布，可精准评价煤岩的生烃潜力，揭示古沼泽环境对煤岩质量的控制作用。利用纳米级矿物的同位素组成与晶体结构，解析古气候（温度、降水）、古海洋化学（盐度、氧化还原条件）的变化，如通过分析黏土矿物的结晶度与元素组成，可反演古气候的干湿变化；通过微—纳米级方解石的同位素分析，可还原古海洋的温度与盐度，为海相、陆相古地理环境重建提供微观支撑。利用纳米示踪技术，追踪古地理环境中物质的迁移路径与转化过程，解析沉积环境的演化规律，如在湖相古地理研究中，通过纳米示踪剂追踪陆源碎屑物质的迁移过程，可还原古物源方向与沉积速率，为湖盆古地理格局的重建提供精准依据；在海相沉积研究中，通过纳米级生物标志物的分析，可追踪古海洋中藻类、微生物的分布与演化，揭示古海洋生产力与沉积环境的关联。

4 结论

1) 古地理学已从传统的“编图学科”发展为地球系统科学的核心分支，随着技术进步与数据积累，古地理重建将更精准、更动态。资源古地理学研究的主要难点是数据源的挖掘与数据有效性的分析、沉积非均质性与跨尺度规律性、编图单元等时效性确认与精度、数据体与地质体融合等，未来发展趋势主要包括多学科深度交叉，构建全球统一、开放共享的古地理数据平台，从传统资源勘探向深时全球变化、生命演化、极端气候预测与极端地下环境等基础与应用领域延伸。

2) 资源古地理学应突出资源与古地理多学科融合特点，强化其在常规与非常规油气及其他关键矿产资源勘探开发中的作用，通过解译地质历史时期的古地理环境、古构造背景及其空间分布规律，科学指导资源勘探和开采，编制好第一张资源古地理图将成为未来一段时期工作重点和标志性成果。

3) AI、纳米技术与资源古地理的协同融合，可实现宏观—微观、定性—定量、预测—干预的全链条覆盖，构建高效精准的资源古地理研究与应用

体系,是未来核心发展方向。

后记 国内外岩相古地理研究成果众多,本文仅引用了部分相关成果,敬请见谅。

参考文献 (References)

- 陈安清,侯明才,林良彪,邢凤存,徐胜林,钟怡江,杨帅,熊晨,张玺华,文龙,陈洪德. 2020. 上扬子地区寒武纪岩相古地理: 对中国小陆块海相盆地演化特点及其控藏效应的启示. 沉积与特提斯地质, 40(3): 38-47. [Chen A Q, Hou M C, Lin L B, Xing F C, Xu S L, Zhong Y J, Yang S, Xiong C, Zhang X H, Wen L, Chen H D. 2020. Cambrian lithofacies paleogeographic characteristics of the Upper Yangtze Block: implications for the marine basin evolution and hydrocarbon accumulation of small-scale tectonic blocks in China. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 40(3): 38-47]
- 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. A new study on the lithofacies paleogeography of the Lower Ordovician in North China. Journal of East China Petroleum Institute, (3): 57-79].
- 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 paleogeography. 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, problem 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, 张家强, 金振奎, 鲍志东, 王国力. 2000. 中国西北地区寒武纪岩相古地理. 古地理学报, 2(2): 1-10. [Feng Z Z, Zhang J Q, Jin Z K, Bao Z D, Wang G L. 2000. Lithofacies palaeogeography of the Cambrian in Northwest China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2(2): 1-10]
- 关士聪. 1984. 中国海陆变迁海域沉积相与油气. 北京: 科学出版社. [Guan S C. 1984. Marine Sedimentary Facies and Petroleum in the Sea-land Changes of China. Beijing: Science Press]
- 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, Ti P, Wang H, Zhang L, Cheng H. 2023. The progress and perspective of digital intelligence in comprehensive paleogeographic reconstruction. Acta Geologica Sinica, 97(9): 2956-2974]
- 侯章帅, 樊隽轩, 张琳娜, 沈树忠. 2020. 全球古地理重建模型的构建方法、比较与知识发现. 高校地质学报, 26(1): 86-99. [Hou Z S, Fan J X, Zhang L N, Shen S Z. 2020. Construction method and comparison of global paleogeographic reconstruction models and associated knowledge discovery. Geological Journal of China Universities, 26(1): 86-99]
- 侯中健, 陈洪德, 田景春, 覃建雄, 彭军. 2001. 层序岩相古地理编图在岩相古地理分析中的应用. 成都理工学院学报, 28(4): 376-382. [Hou Z J, Chen H D, Tian J C, Qin J X, Peng J. 2001. The application of sequence lithofacies and paleogeography mapping to the analyses of lithofacies-paleogeography. Journal of Chengdu University of Technology, 28(4): 376-382]
- 胡宗全, 朱彤, 杜伟, 吴靖, 王冠平. 2020. 细粒沉积研究与页岩岩相编图. 北京: 地质出版社, 25-41. [Hu Z Q, Zhu T, Du W, Wu J, Wang G P. 2020. Fine-grained Sedimentary Research and Shale Lithofacies Mapping. Beijing: Geological Publishing House, 25-41]
- 李三忠, 赵淑娟, 余珊, 曹花花, 李玺瑶, 刘鑫, 郭晓玉, 肖文交, 赖绍聪, 闫臻, 李宗会, 于胜尧, 张剑, 兰浩圆. 2016. 东亚原特提斯洋(II): 早古生代微陆块亲缘性与聚合. 岩石学报, 32(9): 2628-2644. [Li S Z, Zhao S J, Yu S, Cao H H, Li X Y, Liu X, Guo X Y, Xiao W J, Lai S C, Yan Z, Li Z H, Yu S Y, Zhang J, Lan H Y. 2016. Proto-Tethys Ocean in East Asia (II): affinity and assembly of Early Paleozoic micro-continental blocks. Acta Petrologica Sinica, 32(9): 2628-2644]
- 李增学, 李莹, 刘海燕, 王东东, 王平丽, 宋广增, 李晓静, 贾强, 赵洪刚. 2021. 岩相古地理优势相方法及应用: 兼谈“广义”与“狭义”岩相古地理及若干新的研究方向. 古地理学报, 23(3): 489-506. [Li Z X, Li Y, Liu H Y, Wang D D, Wang P L, Song G Z, Li X J, Jia Q, Zhao H G. 2021. Method and application of lithofacies palaeogeographic dominant facies: also discuss the lithofacies palaeogeography in broad and narrow sense and some new research directions. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(3): 489-506]
- 刘宝珺. 2001. 中国沉积学的回顾和展望. 矿物岩石, 21(3): 1-7. [Liu B J. 2001. Sedimentology of China: a review and look forward. Journal of Mineralogy and Petrology, 21(3): 1-7]
- 刘宝珺, 曾允孚. 1985. 岩相古地理基础和工作方法. 北京: 地质出版社. [Liu B J, Zeng Y F. 1985. Base and Working Procedure of Lithofacies Paleogeography. Beijing: Geological Publishing House]
- 刘宝珺, 许效松. 1994. 中国南方岩相古地理图集. 北京: 科学出版社. [Liu B J, Xu X S. 1994. Atlas of Lithofacies Palaeogeography in South China. Beijing: Science Press]
- 刘鸿允. 1955. 中国古地理图. 北京: 科学出版社. [Liu H Y. 1955. Paleogeographic Map of China. Beijing: Science Press]
- 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 Tectonic-sequence Lithofacies Paleogeography in South China. Beijing: Science Press, 1]
- 牟传龙. 2022. 中国岩相古地理研究进展. 沉积与特提斯地质, 42(3): 340-349. [Mou C L. 2022. The research progress of litho-

- facies paleogeography in China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42(3): 340–349]
- 孙龙德, 方朝亮, 李峰, 朱如凯, 何东博. 2010. 中国沉积盆地油气勘探开发实践与沉积学研究进展. *石油勘探与开发*, 37(4): 385–396. [Sun L D, Fang C L, Li F, Zhu R K, He D B. 2010. Petroleum exploration and development practices of sedimentary basins in China and research progress of sedimentology. *Petroleum Exploration and Development*, 37(4): 385–396]
- 孙龙德, 方朝亮, 李峰, 朱如凯, 张云辉, 袁选俊, 贾爱林, 高兴军, 苏玲. 2015. 油气勘探开发中的沉积学创新与挑战. *石油勘探与开发*, 42(2): 129–136. [Sun L D, Fang C L, Li F, Zhu R K, Zhang Y H, Yuan X J, Jia A L, Gao X J, Su L. 2015. Innovations and challenges of sedimentology in oil and gas exploration and development. *Petroleum Exploration and Development*, 42(2): 129–136]
- 孙龙德, 朱如凯, 张天舒, 蔡毅, 冯子辉, 白斌, 江航, 王淳. 2024. 陆相页岩沉积学研究进展与发展方向: 以大庆古龙页岩为例. *石油勘探与开发*, 51(6): 1183–1198. [Sun L D, Zhu R K, Zhang T S, Cai Y, Feng Z H, Bai B, Jiang H, Wang B. 2024. Advances and trends of non-marine shale sedimentology: a case study from Gulong Shale of Daqing Oilfield, Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(6): 1183–1198]
- 田涛, 秦咏辉, 胡杰, 张贵洪, 刘一珉, 潘黎黎, 颜照坤, 张增杰, 孙习林, 张培震. 2022. 白垩纪以来东亚地貌演化与构造驱动: 来自沉积盆地与构造变形的记录. *大地构造与成矿学*, 46(3): 471–482. [Tian Y T, Qin Y H, Hu J, Zhang G H, Liu Y M, Pan L L, Yan Z K, Zhang Z J, Sun X L, Zhang P Z. 2022. Cretaceous-Cenozoic first-order landscape evolution of the East Asia and its tectonic drivers: a synthesis of sedimentary and structural records. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(3): 471–482]
- 王成善, 马永生, 彭平安, 邹才能, 谢树成, 肖文交, 张水昌, 胡修棉, 王剑, 高抒, 侯明才, 朱筱敏, 邵龙义, 吴怀春, 刘志飞, 陈中强, 朱如凯, 陈曦. 2025. 从沉积学到沉积圈科学: 百年简要回顾与发展展望. *沉积学报*, 43(5): 1535–1554. [Wang C S, Ma Y S, Peng P A, Zou C N, Xie S C, Xiao W J, Zhang S C, Hu X M, Wang J, Gao S, Hou M C, Zhu X M, Shao L Y, Wu H C, Liu Z F, Chen Z Q, Zhu R K, Chen X. 2025. A century journey from sedimentology to sedimentosphere science: review and perspective. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(5): 1535–1554]
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集. 北京: 地图出版社. [Wang H Z. 1985. *Atlas of Paleogeographic Maps of China*. Beijing: Map Publishing House]
- 王星星, 朱筱敏, 宋爽, 吴陈冰洁, 贺敬聪, 曹刚. 2016. 渤海湾盆地车西洼陷陡坡带古近系沙河街组沙三下段“源-汇”系统. *古地理学报*, 18(1): 65–79. [Wang X X, Zhu X M, Song S, Wu C, He J C, Cao G. 2016. “Source-to-sink” system of the Lower Member 3 of Paleogene Shahejie Formation in steep slope zone of Western Chechen sub-sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 18(1): 65–79]
- 吴崇筠, 薛叔浩. 1993. 中国含油气盆地沉积学. 北京: 石油工业出版社, 32–110. [Wu C Y, Xue S H. 1993. *Sedimentology of Petroliferous Basins in China*. Beijing: Petroleum Industry Press, 32–110]
- 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]
- 吴胜和, 孙龙德, 鲍志东, 邵龙义, 吴因业, 郑秀娟. 2026. 多尺度的古地理学研究: 思考与展望. *古地理学报*, 28(3): 843–864. [Wu S H, Sun L D, Bao Z D, Shao L Y, Wu Y Y, Zheng X J. 2026. Multi-scale palaeogeographic research: reflections and prospects. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 28(3): 843–864]
- 张世红, 朱鸿, 孟小红. 2001. 扬子地块泥盆纪—石炭纪古地磁新结果及其古地理意义. *地质学报*, 75(3): 303–313. [Zhang S H, Zhu H, Meng X H. 2001. New paleomagnetic results from the Devonian-Carboniferous successions in the southern Yangtze Block and their paleogeographic implications. *Acta Geologica Sinica*, 75(3): 303–313]
- 张天舒, 朱如凯, 蔡毅, 王华建, 吕丹, 周海燕, 付秀丽, 刘畅, 崔坤宁, 张素荣, 王淳, 吴松涛, 张婧雅, 姜晓华, 冯有良, 刘合. 2023. 松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组页岩层序等时格架下的有机质分布规律. *石油与天然气地质*, 44(4): 869–886. [Zhang T S, Zhu R K, Cai Y, Wang H J, Lyu D, Zhou H Y, Fu X L, Liu C, Cui K N, Zhang S R, Wang B, Wu S T, Zhang J Y, Jiang X H, Feng Y L, Liu H. 2023. Distribution of organic matter in the Qingshankou Formation shale, Gulong sag, Songliao Basin observed within an isochronous sequence stratigraphic framework. *Oil & Gas Geology*, 44(4): 869–886]
- 张志杰, 周川闽, 袁选俊, 曹正林, 陈星渝, 万力, 成大伟. 2023. 准噶尔盆地二叠系源-汇系统与古地理重建. *地质学报*, 97(9): 3006–3023. [Zhang Z J, Zhou C M, Yuan X J, Cao Z L, Chen X Y, Wan L, Cheng D W. 2023. Source-to-sink system and palaeogeographic reconstruction of Permian in the Junggar Basin, northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 3006–3023]
- 赵金科. 1936. 震旦纪地层之分布及其古地理学之意义. *地质论评*, 1(4): 417–436. [Zhao J K. 1936. Distribution of Sinian strata and its palaeogeographical significance. *Geological Review*, 1(4): 417–436]
- 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, 1–194. [Zheng H R, Hu Z Q. 2010. *Atlas of Pre-Mesozoic Tectonic Lithofacies and Paleogeography in China*. Beijing: Geological Publishing House, 1–194]
- 钟大赉, 丁林. 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 26(4): 289–295. [Zhong D L, Ding L. 1996. Uplift process of the Tibetan Plateau and its mechanism. *Science in China* (Series D: Earth Sciences), 26(4): 289–295]
- 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, Zhang W, Wang H, Li J, Hu Q, Zhao L, Wang X, Zhang S, Hao F, Jin Z. 2025. A theory of multi-spheric interaction-driven hydrocarbon formation and enrichment. *Science China Earth Sciences*, 68(8): 2492–2510]

- 朱如凯,白斌,刘柳红,苏玲,高志勇,罗忠. 2011. 陆相层序地层学标准化研究和层序岩相古地理: 以四川盆地上三叠统须家河组为例. 地学前缘,18(4): 131-143. [Zhu R K, Bai B, Liu L H, Su L, Gao Z Y, Luo Z. 2011. Research on standardization of continental sequence stratigraphy and palaeogeography: a case study from the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin. Earth Science Frontiers,18(4): 131-143]
- 朱如凯,邹才能,袁选俊,吴松涛,崔景伟,王岚,林森虎,苏玲,罗忠. 2017. 中国能源沉积学研究进展与发展战略思考. 沉积学报,35(5): 1004-1015. [Zhu R K, Zou C N, Yuan X J, Wu S T, Cui J W, Wang L, Lin S H, Su L, Luo Z. 2017. Research progress and development strategic thinking on energy sedimentology. Acta Sedimentologica Sinica,35(5): 1004-1015]
- 朱如凯,孙龙德,张天舒,张志杰,沈安江,毛治国,王兆明,任义丽,江航,张素荣,万力. 2025. 中国油气勘探开发中的沉积学研究新进展与发展方向. 沉积学报,43(1): 1-19. [Zhu R K, Sun L D, Zhang T S, Zhang Z J, Shen A J, Mao Z G, Wang Z M, Ren Y L, Jiang H, Zhang S R, Wan L. 2025. Advances and trends in sedimentological research in oil and gas exploration and development in China. Acta Sedimentologica Sinica,43(1): 1-19]
- 朱如凯,张天舒,万力. 2026. 陆相页岩沉积学: 岩相古地理研究的思考. 古地理论,28(1): 68-86. [Zhu R K, Zhang T S, Wan L. 2026. Non-marine shales sedimentology: perspectives on lithofacies palaeogeography research. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),28(1): 68-86]
- Grabau A W. 1924. Stratigraphy of China. Part I: Palaeozoic and Older. Peking: Geological Survey, Ministry of Agriculture and Commerce.
- Hunt T S. 1873. The paleogeography of the North-American continent. Journal of the American Geographical Society of New York,4: 416-431.
- Lyell C. 1830. Principles of Geology: Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface, by Reference to Causes Now in Operation. Vol. 1. London: John Murray.
- Müller R D, Cannon J, Qin X D, Watson R J, Gurnis M, Williams S, Pfaffelmoser T, Seton M, Russell S H J, Zahirovic S. 2018. GPlates: Building a virtual earth through deep time. Geochemistry, Geophysics, Geosystems,19(7): 2243-2261.
- Müller R D, Zahirovic S, Williams S E, Cannon J, Seton M, Bower D J, Tetley M G, Heine C, Le Breton E, Liu S F, Russell S H J, Yang T, Leonard J, Gurnis M. 2019. A global plate model including lithospheric deformation along major rifts and orogens since the Triassic. Tectonics,38: 1884-1907.
- Peters S E, McClennen M. 2016. The Paleobiology Database application programming interface. Paleobiology,42(1): 1-7.
- Scotese C R. 2014. PALEOMAP PaleoAtlas for ArcGIS. PALEOMAP Project.
- Scotese C R. 2016. PALEOMAP PaleoAtlas for GPlates and the PaleoData Plotter Program. Geological Society of America Abstracts with Programs,48(5). doi: 10.1130/abs/2016NC-275387
- 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.
- Wegener A. 1915. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn.
- Zhan R R, Duan L, Zattin M, Christie-Blick N, Wan B, Wei R H, Yang Z, Wang J Q, Gou L L, Olivetti V, Chen K Y, Zhang X L. 2026. Tectonism rather than "snowball Earth" glaciation is responsible for the Great Unconformity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,123(9): e2523891123.

(责任编辑 李新坡)