



移动阅读

张涛, 王琳霖, 廖慧鸿, 等, 2024. 沉积盆地古水深恢复方法与研究进展[J]. 沉积与特提斯地质, 44(3): 582–599. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.11003](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.11003)

ZHANG T, WANG L L, LIAO H H, et al., 2024. Methods and research progress of paleo-water depth reconstruction in sedimentary basins[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(3): 582–599. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.11003](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.11003)

沉积盆地古水深恢复方法与研究进展

张涛¹, 王琳霖¹, 廖慧鸿^{2*}, 邹敏¹, 梁茹³, 王鹏¹, 苏中堂^{2,4,5}

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 3. 中国石化中原油田分公司物探研究院, 河南 濮阳 457001; 4. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都理工大学, 四川 成都 610059; 5. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要: 古水深分析对古环境重建、盆地分析、层序地层学研究、古地貌恢复以及生、储、盖层条件的评价都有重要意义。古水深分析通常有古生物法、沉积学法、地球物理法、地球化学法及数字模拟法, 各种方法优缺点并存, 尽管某些方法在特定地质条件下存在优势, 但在恢复同一环境的古水深时, 不同方法还是存在其偏差; 这些方法多以定性为主, 许多方法易受自然条件限制, 且对样品可靠性要求高, 一定程度上限制了古水深研究。古水深恢复建议综合考虑地质背景、环境演化、研究地质体特征及地质资料情况等多种因素, 多方法研究相互约束, 以期更客观地再现古水深变化规律。

关键词: 古水深; 层序地层; 古生物方法; 沉积学方法; 地球化学法; 数字模拟法

中图分类号: P531

文献标识码: A

Methods and research progress of paleo-water depth reconstruction in sedimentary basins

ZHANG Tao¹, WANG Linlin¹, LIAO Huishong^{2*}, ZOU Min¹, LIANG Ru³,
WANG Peng¹, SU Zhongtang^{2,4,5}

(1. *Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China*; 2. *Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*; 3. *Geophysical Exploration Research Institute of Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang 457001, China*; 4. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*; 5. *Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resource, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*)

Abstract: The analysis of paleo-water depth is of great significance in fields such as paleo-environment reconstruction, basin analysis, sequence stratigraphy studies, reconstruction of ancient landform, and the evaluation of source, reservoir, and cap rock conditions. Paleo-water depth analysis methods usually include paleontological, sedimentological, geophysical, geochemical, and

收稿日期: 2023-05-18; 改回日期: 2023-06-23; 责任编辑: 周小琳; 科学编辑: 邓奇

作者简介: 张涛(1973—), 男, 高级工程师, 主要从事碳酸盐岩沉积、储层方面的研究。E-mail: zhangtao1973.syky@sinopec.com

通讯作者: 廖慧鸿(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为沉积学。E-mail: 1316236646@qq.com

资助项目: 中石化科技部项目“鄂南富县区块古生界天然气成藏规律与精细评价”(P22070); 中国科学院 A 类战略先导科技专项(XDA14010406)

digital simulation methods, each with their own strengths and limitations. Although some methods have advantages in a specific geological background, there are some deviations between different methods in reconstructing paleo-water depth in the same environment. These methods are mostly qualitative, easily restricted by natural conditions and require the samples of high reliability, which limits paleo-water depth research to a certain extent. Therefore, when analyzing paleo-water depth, it is suggested to comprehensively consider various factors such as geological background, environmental evolution, geological characteristics, and geological data, and to adopt multiple methods to study mutual constraints, in order to jointly explore the law of Paleo-water depth variation in the target layer.

Key words: paleo-water depth; sequence stratigraphy; paleontological method; sedimentological method; geochemical method; digital simulation method

0 引言

水深是任何水下沉积环境的基本参数,是指两个特定界面或不连续面间的垂直间距:一是沉积物—水界面;二是水—大气界面(Allen, 1967)。对于现今海洋和湖泊,可以利用安装在船只上的现代多波束测深仪(Krastel et al., 2001; Roberts et al., 2005)或安装在轨道航天器上的雷达高度计(Sandwell et al., 2006)等高精度仪器实现水体深度的测量;但就地史时期的海洋、湖泊而言,古水深多基于沉积记录中所识别的一系列指标进行定性或半定量恢复。

古水深分析对古环境重建、盆地演化研究具有重要的意义,也是研究深时海平面变化、古地貌恢复、层序地层学以及评价生、储、盖等油气地质条件的关键(张世奇和任延广, 2003; 万锦峰等, 2011; Jiang et al., 2014; 程逸凡等, 2020),但精确获取古代沉积物沉积时的水深很难(方鹏高, 2020),多借用各类替代性指标间接分析。为确定古水深,前人做了诸多研究,相继提出多种方法,常见方法包括:古生物法,如古生物标志法(郭秋麟和倪丙荣, 1990; 牛晓路等, 2015)、遗迹化石法(赵激林等, 1989; 刘梦瑶等, 2020)和古生物分异度法(王建和杨怀仁, 1995; 郑德顺和李守军, 2002)等;沉积学方法,如自生矿物法(王成善和李祥辉, 2003; 庞军刚等, 2012)、沉积构造法(庞军刚等, 2009; 杨克文等, 2009)、地层厚度法(董刚和何幼斌, 2010; 闫佩等, 2013; 肖坤泽等, 2020)及滨线轨迹法(Cant, 1991; Helland-Hansen, 1996; 康波等, 2012)等;地球物理方法,如自然伽马能谱曲线法(代大经等, 1995; 陈中红等, 2004; 王学军等, 2008)以及地震资料法(钟建华等, 2015, 2017)恢复水深变化等;地球化学方法,如钴元素法(王峰等, 2017; 范萌萌等, 2019; 刘

鑫等, 2021)、元素比值法(郑荣才和柳梅青, 1999; 汪凯明和罗顺社, 2009)和碳同位素法(田景春和曾允孚, 1995; 黄思静, 1997; 李任伟等, 1999; 邵龙义, 1999; 许中杰等, 2020)等;数字模拟法(王璞珺和杜小弟, 1993; Zhang et al., 2014; Emmel et al., 2015)等。然而,上述各类方法通常会受具体地质资料限制,且对样品有效性要求相对较高,这对古水深研究构成了限制。本文基于前人研究,总结各种方法在恢复古水深方面的原理及其适用条件,以期为古水深恢复研究提供借鉴。

1 古生物法

生物在水体中的生活深度与水体的透光度、温度、氧气、营养盐及底层性质等生态条件有关,因此,不同深度水域内的生物种属有所差别,可利用生物生态习性定性恢复古水深。本文选取一些常见种属进行论述,古生物指示古水深的标志详见图 1。

1.1 古生物标志法

古生物标志法通常以将今论古的思想利用现代生物获取对应关系,进而推演至地史时期。生物在生态系统中的出现、分布和多样性受到环境因素的影响,其中包括水深。通过研究化石、古生物遗存或化石记录中的特定生物群体或特征,即基于不同生物对水深的喜好和适应性,可以推断出当时的水深条件。但沉积物再改造作用、生物栖息地偏好会随时间推移而发生变化,甚至关于地史期是否存在同类或类似生物尚存争议,这些都影响了古生物法判别古水深的准确度(Emmel et al., 2006; Flügel, 2010; Thuy, 2013)。

1.1.1 钙藻

钙藻是指藻体能够通过生命过程和生物化学过程在体内或者体外沉积碳酸盐钙的浮游或底栖

标志		大陆	边缘海		浅 海					深 海				
			潮上	潮间	10	30	50	100	200	300	1000	2000	>2000 m	
古生物标志	蓝绿藻	—								—	—			
	松藻				—	—								
	粗枝藻			—	—		—	—						
	轮藻	—												
	红藻								—	—				
	珊瑚藻			—	—	—	—	—	—	—	—			
	底栖有孔虫			—	—					—	—			
	浮游有孔虫				—	—	—	—	—	—	—	—		
	钙质海绵				—	—	—	—						
	玻璃海绵						—	—						
	普通海绵	—		—	—	—	—	—						
	两性珊瑚				—	—	—	—						
	包壳苔藓虫				—	—	—	—						
	枝状苔藓虫				—	—	—	—						
	腕足类					—	—	—			—	—		
	掘足类				—	—	—	—				—	—	
	腹足类	—	—	—	—	—	—	—						
双壳类	—	—	—	—	—	—	—							
介形虫	—													
棘皮类	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
遗迹化石	<i>Scoyenia</i> 遗迹相	—												
	<i>Trypanites</i> 遗迹相	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>Glossofungites</i> 遗迹相			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>Skolithos</i> 遗迹相						—	—	—	—	—	—	—	—
	<i>Cryziane</i> 遗迹相							—	—	—	—	—	—	—
	<i>Nereites</i> 遗迹相											—	—	—
	<i>Zoophycus</i> 遗迹相								—	—	—	—	—	—

图1 指示古水深的古生物标志 (据刘宝珺和曾允孚, 1985; Frey, 1975; Frey and Seilacher, 2007)

Fig. 1 Paleontological markers indicating paleo-water depth (modified from Liu and Zeng, 1985; Frey, 1975; Frey and Seilacher, 2007)

藻类(Wary, 1977)。它并非是一个自然分类类群, 而是一个包括钙化的蓝藻纲、红藻纲、绿藻纲、轮藻纲和一些分类位置尚不明确的藻类以及显微疑难藻类在内的成员组成的人为分类类群(刘志礼, 1990; Riding, 1991)。

红藻门和绿藻门是钙藻化石中最常见的门类。绿藻和红藻对光照的依赖性很强, 其分布受光照控制, 因此, 其分布样式成为古水深的良好指示标志之一(牛晓路等, 2015; 2016)。对现代钙藻进行的研究表明: 现代粗枝藻科主要分布在浅水环境, 深度在低潮线到海底有光环境的范围内, 一般发育在潮汐带和浅潮下带, 数量随着深度的增加而逐渐减少(Wray et al., 1998)。松藻科通常分布于低潮面下小于 5 m 的浅水中, 深度最大不超过 15 m(Ginsburg et al., 1972)。据现代非粗枝藻类绿藻的生活范围确定绿藻生态群的相关下限深度大约为 100 m。由于红藻比较喜爱较弱的光线, 珊瑚状红藻在热带

环境里的分布水深为 20~80 m, 在冷水环境则可生长于超过 200 m 的水深位置。受盐度、含氧量和水体化学成分、营养供给及沉积底质类型等因素的限制, 现今轮藻多分布于淡水和微咸水环境(湖泊、河流和微咸水边缘海)(Flügel, 2010)。

1.1.2 虫黄藻-珊瑚

虫黄藻只有在见光的条件下才能进行光合作用、释放氧气并制造有机物, 受地理位置和水深限制, 主要集中在热带亚热带水深不足 100 m 的海域。通常认为, 石珊瑚化石和珊瑚礁的出现代表光照条件非常好的浅海环境, 虫黄藻与石珊瑚存在着共生关系, 因此虫黄藻-珊瑚的出现指示水深小于 100 m 的浅水环境(Flügel, 2010)。但关于古生代皱纹珊瑚化石里是否存在虫黄藻有较大争议, 故使用该指标时应充分论证。

1.1.3 海绵动物

海绵动物是对一类多孔滤食性生物体的统称,

可分为钙质海绵纲、玻璃海绵纲、普通海绵纲,主要为底栖生活,多为海洋生物,较少出现于淡水中,分布于各个纬度,出现在潮间带到深海环境,喜欢静水环境。钙质海绵分布在浅海水深 10~100 m 之间;玻璃海绵出现于浅海水深 30 m 至深海(水深大于 2 000 m)范围内;普通海绵主要分布在边缘海的潮间以及浅海水深 200 m 之内(图 1)。

1.1.4 苔藓动物

现代钙质苔藓虫均为海洋动物,在低纬度到高纬度的不同深度海域中均有发现(管守锐, 1988)。苔藓虫发育于潮汐面之下,一直延伸至深海,主要分布于浅海,如包壳苔藓虫分布在浅海几米到 80 m 的深度范围;枝状苔藓虫出现于浅海至深海 1 000 m 水深范围(图 1)。

1.1.5 腕足和软体动物

腕足类分布于海洋的各个部位,常附着于硬底之上,在温带、寒带的正常盐度海水内均可见到,分布环境主要位于浅海水深 10 m 至深海水深 2 000 m 之间。软体动物也称贝类,是软体动物门动物的统称,各个门类体制的差异很大,但有共同的特征:体柔软而不分节,一般分头-足两部分。其种类有掘足类、腹足类、双壳类等,栖息地分布广泛,如图 1 所示,掘足类一般分布于浅海几米至深海水深 1 500 m 附近,而双壳类和腹足类在陆地浅水、边缘海、浅海和深海都有分布,范围广泛。

1.2 遗迹化石法

由于生物的活动范围在很大程度上取决于食物链和氧气的供给,故遗迹化石的组成与分布特征、

生物扰动程度、遗迹潜穴间距等反映了生物在不同深度数量种类的变化,可用以确定古水深。Seilacher 等(1964, 1967)提出“遗迹相”概念,认为遗迹相代表着特有的沉积相或指示一定的古水深分带,按海水由浅变深划分出六个遗迹相(图 1):*Skolithos* 遗迹相、*Glossofungites* 遗迹相、*Cruzian* 遗迹相、*Zoophycus* 遗迹相、*Nereites* 遗迹相以及被认为属于淡水红层非海相沉积的 *Scoyenia* 遗迹相,后面又增加了坚硬基底的钻孔 *Trypanites* 遗迹相。国内学者对遗迹化石与古水深的关系研究颇多(杨式溥, 1985, 1999; 赵激林等, 1989; 龚一鸣等, 1994, 2009; 胡斌等, 2006; 宋慧波等, 2012)。如宋慧波等(2012)根据遗迹化石的形态、组成、产状、分布特征以及丰度、分异度、生物扰动程度的不同,将豫西太原组碳酸盐岩中的遗迹组构划分为 5 种,并通过分析不同遗迹组构,得到它们的沉积环境分布模式(图 2),从而间接地判断大体水深。然而,生物群落组合除受营养物主控外,氧化作用、沉积速率等亦是需考虑的因素,故仅依据遗迹化石组合推断古水深需谨慎。

1.3 古生物分异度法

分异度的概念最早出现在现代生态学研究,随后应用古生态学研究推断地层的沉积环境和生物的演化规律等(郭秋麟和倪丙荣, 1990)。分异度的值随着环境的深度、温度以及盐度变化而变化,所以常被用来分析古水深变化。该方法简单易行,且不受种异同及有无现生种的影响,但该方法对古水深指示具有双解性,需要结合地质资料综

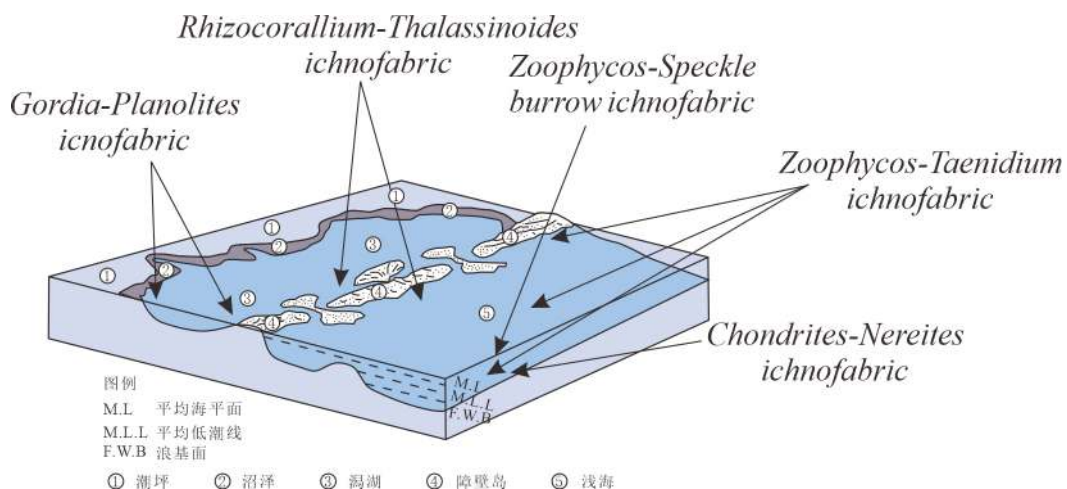


图 2 豫西太原组遗迹组构沉积环境分布模式图(据宋慧波等, 2012 修改)

Fig. 2 Sedimentary environment model of the ichnofabrics in the Taiyuan Formation, western Henan (modified from Song et al., 2012)

合分析,且对样品要求较高,数据不够详尽时定量计算结果会出现偏差;资料达不到分异度统计要求时,可采用微体生物生态习性或藻类和植物的光合作用性质来恢复古水深。

利用函数或其他统计方法计算化石群的优势分异度亦可恢复古水深(李守军等, 2005; 苏新等, 2012)。郭秋麟和倪丙荣(1990)等利用化石群分异度探讨古水深,表明现代介形类分异度相对高值呈由波基面向湖岸和较深湖区两侧逐渐减小的趋势。信息函数熵值 $H(s)$ 是区分化石群优势分异度的最佳指标,它代表概率空间中的不确定性程度,可用于指示生物群的分异度(郑德顺和李守军, 2002)。生物群中的熵 $H(s)$ 可用下式计算:

$$H(s) = - \sum P_i \ln P_i \quad (\text{其中 } i = 1, 2, \dots, s) \quad (1)$$

P_i 是指第 i 个种的个体数,即 $P_i = n_i/N$, 其中, n_i 是指全群总个数 N 中所占的比例;信息函数熵值与生物生存环境有密切关系,利用公式定量计算生物分异度可更准确地确定古水深。

此外,有研究利用有孔虫分异度来分析区域古水深。现代底栖有孔虫主要分布于陆架到深海盆区,随水深增加,丰度总体呈下降趋势;而浮游有孔虫多集中于水深 200~2 000 m 的上陆坡,向浅水、深水方向,丰度均下降(图 1)(李学杰等, 2004)。但在早前研究中,有孔虫分析难以给出定量的结果,便有学者尝试使用浮游有孔虫与底栖有孔虫的比值(P/B)或浮游有孔虫含量(P%)定量反映古水深(Phleger and Parker, 1951; Grimsdale and Morkhoven, 1955)。Zwaan 等(1990)在对前人研究进行综合分析后,给出水深与浮游有孔虫含量间的经验方程:

$$\ln D = a + b \times P \text{ 或 } D = e^{(a+b \times P)} \quad (2)$$

式中 D 为水深(m); P 为浮游有孔虫含量; a 、 b 为常数,不同的海区有所区别;应用时,应定量拟合数据,得出常数 a 、 b 。李学杰等(2004)获取珠江口盆地浮游有孔虫与水深关系为: $\ln D = 3.32 + 0.024P$, 适用于水深为 27.7~314 m 的海区。

2 沉积学方法

推测古水深的沉积学方法主要依据沉积过程中环境条件与水深的关系,因此属间接方法。沉积学中常用以判别古水深的依据有:自生矿物(图 3)、岩石类型、沉积构造和沉积厚度及滨岸线。

2.1 自生矿物法

自生矿物记录了其形成时的自然条件,可间接

反映古水深。例如,热带气候条件下,海绿石形成于深度大于 50 m 的环境,而气候较为寒冷时,则在深度 10 m 左右的区域即可见;鲕绿泥石一般形成于深度小于 100 m 的温暖浅海环境。含铁自生矿物在水深控制的氧化还原条件下呈现出有规律的分布特征:赤铁矿形成于水深 0~1 m,褐铁矿为 1~3 m,菱铁矿为 3~15 m,水深大于 15 m 时则以黄铁矿(王成善和李祥辉, 2003; 庞军刚等, 2012)为主。锰结核通常与深海环境相关,也有浅海锰结核,但深海锰结核含有较多的钴、镍、铜、锌、铅等微量元素(刘宝珺和曾允孚, 1985)。此外,还有钙质层、蒸发岩假晶和自生沸石等,其具体分布范围可见图 3。但需要注意的是,有一些矿物存在非自生的同类型矿物,如绿泥石,自生绿泥石晶形完整、棱角分明,边缘清晰可见,常以胶结物的形式产出(张霞等, 2011);鲕绿泥石呈颗粒的环边形式出现,形成环边鲕绿泥石胶结带。莓球状黄铁矿被认为是同生—早成岩阶段的标志性矿物,在成岩—后生阶段,随着温度和压力的升高,莓球状黄铁矿发生重结晶而形成五角十二面体和立方晶形(郑荣才等, 2021)。

2.2 岩石类型法

一些特定岩类常形成于特有环境,也可指示沉积古水深。如蒸发岩在干燥气候条件下受限制海岸水体及附近的潮坪环境中形成,水深在零到几米范围内;碳酸盐岩类型可用以区分极浅水、浅水、较深水 and 深水环境,准同生白云岩分布在潮上和潮间带,还有团粒、鲕粒和皮粒多发育于热带浅水环境,团粒仅在数十厘米的极浅水环境形成,鲕粒一般发育在 15 m 左右水深范围内,皮粒形成于数十厘米至几米水深范围内;珊瑚、层孔虫等一些造礁生物多沿波浪带生长,所以对于造礁生物灰岩,则可以通过造礁典型生物古水深方法恢复古水深;核形石则多见于透光带—弱透光带的潮间—潮下带环境(Flügel, 2010);深水环境中则多是软泥沉积及硅质沉积,少有碳酸盐沉积(例如球粒灰岩),并常见浊流沉积。

2.3 沉积构造法

沉积构造反映水动力条件,后者受水深控制通常形成不同的沉积构造。小于 1 m 的裸露水面上,通常会出现干裂、雨痕、盐晶痕等层面构造;在 1~20 m 的浅水区主要形成间断韵律层理,且波痕和冲刷侵蚀构造更加发育,窗孔构造也是一种浅水

标志		大陆	边缘海		浅 海					深 海				
			潮上	潮间	10	30	50	100	200	300	1000	2000	>2000 m	
自生矿物特征	钙质层													
	蒸发岩假晶			---										
	鲕绿泥石(热带)							---						
	海绿石(温带)				---							---		
	海绿石(热带)							---				---		
	自生铁矿物		---											
岩石类型特征	锰结核	---					---						---	
	自生沸石	---							---					
	准同生白云岩													
	蒸发岩	---										---		
	鲕粒灰岩	---												
	球粒灰岩									---		---		
沉积构造特征	皮粒灰岩													
	团粒灰岩													
	礁灰岩								---					
	核形石灰岩													
	干裂													
	雨痕													
	微古喀斯特													
	帐篷构造													
	叠层石构造	---												
	小型波痕									---				
	大型波痕										---			
	沙纹交错层理													
	大型交错层理													
	丘状交错层理													
	人字形层理													
	鲍玛序列													

图 3 指示古水深的沉积学标志 (据刘宝珺和曾允孚, 1985)

Fig. 3 Sedimentological markers indicating paleo-water depth (after Liu and Zeng, 1985)

构造; 在大于 20 m 的深水区主要形成水平层理、连续的韵律层理(杨克文等, 2009), 深水区域则主要发育槽模、沟模等(庞军刚等, 2009)。

2.4 地层厚度法

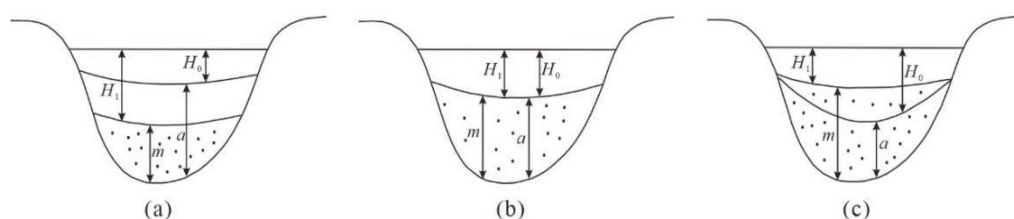
地层厚度法是基于水深对沉积速率的影响以及水深与沉积厚度、沉降幅度之间的关系, 利用水深与地层厚度之间存在的对应关系所获取的一种定性(在一定条件下甚至可以定量)地恢复古水深的方法(董刚和何幼斌, 2010)。

在沉积盆地中, 水深取决于沉降作用与沉积作用的综合影响, 据该关系可将盆地分为三类(杨桥等, 2006; 董刚和何幼斌, 2010): ①欠补偿盆地(图 4a), 即沉降速率大于沉积速率时, 沉降幅度大于沉积厚度 ($a>m$), 此时 $m=a-(H_1-H_0)$; ②补偿盆地(图 4b), 即沉降速率等于沉积速率时, 沉降幅度等于沉积厚度 ($a=m$), 此时 $m=a$; ③超补偿盆地(图

4c), 即沉降速率小于沉积速率时, 沉降幅度小于沉积厚度 ($a<m$), 此时 $m=a+(H_0-H_1)$ 。 a 为沉降速率; m 为沉积厚度; H_0 为沉积前水深; H_1 为沉积后水体深度。

正常情况下, 依据于不同水深条件沉积速率存在差别, 通过地层厚度法能定性判断古水深, 通常浅水环境沉积速率远大于深水环境。现今地层厚度, 恢复剥蚀厚度后, 经去压实校正可获取原始沉积物厚度, 而古地层的沉积速率等于沉积物厚度与地质年代的比值, 将所得沉积速率与现今不同水深条件下的沉积速率进行比较, 便可确定地层沉积时的水深环境(董刚和何幼斌, 2010)。

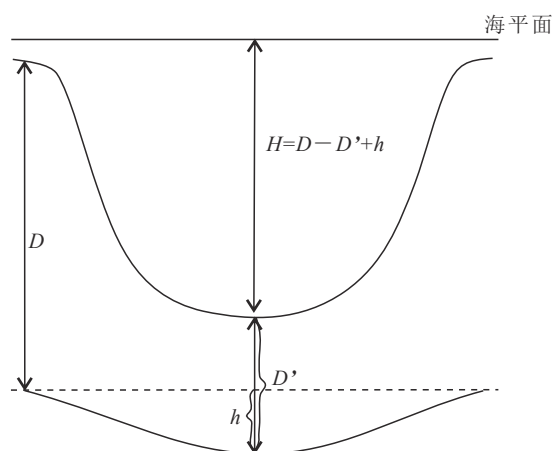
根据地层厚度与水深之间的定量关系, 进而对沉积盆地古水深进行定量恢复。同时期, 盆地内各沉积区域因差异沉降和沉积速率不同, 导致不同沉积区域内的补偿状态不同, 其沉积物记录古水深也



a. 欠补偿盆地; b. 补偿盆地; c. 超补偿盆地

图4 沉积水深与沉积厚度、沉降幅度的关系图(据董刚和何幼斌, 2010)

Fig. 4 Relationship diagram of sedimentary water depth with sedimentary thickness and subsidence magnitude (after Dong and He, 2010)



D 为补偿点基准面与所求水深时期的沉积界面之间的地层厚度; D' 为所求点基准面与所求水深的沉积界面之间的地层厚度; H 为所求水深值; h 为差异沉降量

图5 根据地层厚度定量恢复古水深示意图(据董刚和何幼斌, 2010)

Fig. 5 Schematic diagram of quantitative reconstruction of paleo-water depth according to formation thickness (after Dong and He, 2010)

不相同。如图5所示,在沉积盆地中,欲求某一地史时期盆地某点古水深(H),需分别求出沉积补偿点原始厚度(D)、所求点同期地层界面与基准面之间的原始地层厚度(D'),二者厚度差加上差异沉积量(h)即为所求点古水深。因补偿点和基准面较难确定,该方法仅适合于沉积基底清晰、沉积过程连续、沉积与沉降速率较稳定的情况,若存在地层剥蚀,还需进行剥蚀量恢复(董刚和何幼斌, 2010; 闫佩等, 2013)。

2.5 滨线轨迹法

滨线是陆地与沉积水体的边界,可视为零水深线。滨线轨迹法是依据可容纳空间与沉积物供给速率间的变化关系获取滨线迁移规律,而后用定量

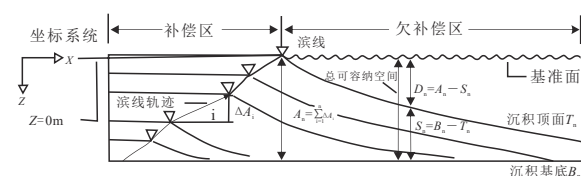


图6 利用滨线轨迹计算古水深的基本原理(据康波等, 2012)

Fig. 6 Basic principle for paleo-water depth using shoreline trajectory (after Kang et al., 2012)

函数法恢复水深(吴因业等, 2012),计算原理如图6。滨线随时间沿沉积倾角方向呈现的变化形态通常为一条曲线(Cant, 1991; Helland-Hansen, 1996)。古水深的计算公式如下(康波等, 2012):

$$D_n = A_n - S_n \quad (3)$$

$$A_n = \sum_{i=1}^n \Delta A_i \quad (4)$$

$$S_n = B_n - T_n \quad (5)$$

式(3)中, D_n 为古水深, A_n 为总可容纳空间, S_n 为某沉积时刻沉积物的总厚度,可由回剥法恢复得到该时刻的沉积物总厚度;式(4)中 ΔA_i 为该时刻第 i 期朵体单元中滨线轨迹记录的垂向分量;式(5)中 B_n 为沉积基底, T_n 为沉积顶面。具体参数见图6。

水深决定可容纳空间大小,滨线轨迹可指示可容纳空间的变化,结合沉积物填充状况,即可得出沉积物沉积时的水深。该法不仅考虑到不同点构造沉降差异,而且还考虑了三级层序内沉积物供给速率的变化趋势,可以较为准确地预测三角洲区的古水深变化。康波等(2012)将该方法应用于东营三角洲沉积区地区,较好地揭示了该区各四级层序阶段古水深变化。研究结果显示,该地区沙三中(Es_{3-2})共发育9期进积体,最大水深为180 m。但需注意:滨线点可能存在差异构造沉降,会影响可容纳空间与沉积物供给量间的函数关系。

因此,在使用该方法时,我们可以先假定三级层序内不同斜坡位置构造差异沉降为匀速变化,那么在四级层序内的可容纳空间的大小需考虑差异沉降所带来的影响,即盆地内某一时刻每一点的可容纳空间需要加上由于构造沉积差异引起的垂相增加分量。

3 地球物理方法

3.1 测井曲线法

自然伽马能谱测井是现代常规测井之一,能获得地层中 U(铀)、Th(钍)、K(钾)的含量(张立鹏等, 2001; 张向林等, 2006)。Th/U 值可反映出沉积期环境特征,因此可用以反演古水深。通过自然伽马能谱曲线可获取垂向连续的 Th、U 数据,因此利用 Th/U 值可恢复沉积期古水深(陈中红和查明, 2004; 贺轲, 2012)。

铀的化学性质较活泼,有机物对铀具还原与吸附作用(陈中红和查明, 2004),因此岩石中铀的富集通常代表还原环境。钍元素与铀元素关系密切,但钍的化学性质较稳定。当铀元素富集时, Th/U 值偏小,趋于还原环境,水体相对较深;反之,当铀元素含量减少时, Th/U 值偏大,表明沉积水体较浅(陈中红和查明, 2004; 万锦峰等, 2011)。因此, Th/U 值能够较清晰地反映氧化还原环境变化(表 1),进而反演古水深变化。

由于铀曲线的形态特征可直接体现水体的演

表 1 Th/U 比值与沉积环境的关系 (据贺轲, 2012)
Table 1 Relationship between Th/U and redox conditions (after He, 2012)

Th/U 比值	> 30	30~10	10~4	< 4
沉积环境	强氧化	弱氧化—弱还原	还原	强还原

变特征,为了更直观反映古水深的变化,可以运用定量分析方式,将 $U=0$ 定义为零水深,则相对水深为每个数据点相对于水深的偏差,各层段内水体总深度可用水深的相对方差表示(陈中红和查明, 2004)。表达式为:

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [w(U)_i]^2 \tag{6}$$

式中, $w(U)_i$ 为各点的铀值; D 为水深函数的方差; i 为数据点的顺序标号。

利用 Th/U 值进行古水深分析颇具优点,连续的自然伽马能谱曲线不仅容易获取,且其受限因素少,因此 Th/U 值恢复古水深是一种经济可靠、行之有效的方法。需注意:因成岩过程中的压实和重结晶作用会导致铀含量降低,从而影响 Th/U 值的准确性,故建议在应用 Th/U 值恢复古水深时尽量选择未受地表水淋滤且埋藏较浅的地层;在进行古水深恢复时,研究区应处于同一沉积水体范围。为了剔除岩性的影响,在垂向上,研究目的层需均为岩性一致的沉积岩层。

3.2 地震剖面法

地震剖面法是相对可靠地定量恢复古水深的方法(钟建华等, 2015),其原理是利用地震方法解析三角洲前积层的厚度或高度来定量研究古水深,关键是在地震剖面上识别出可靠的三角洲前缘相,地震剖面上代表三角洲前缘相的前积层为一组倾斜的双曲面或“S”的反射轴,也可能是两套平行反射轴夹了一套倾斜反射轴(Chappell and Polach, 1991; Glørstad-Clark et al., 2011; 钟建华等, 2017)。前积层顶面代表三角洲平原,略低于水面;前积层底面代表前三角洲,是湖泊或海洋的沉积底面,故三角洲前积层的高度或厚度基本与水体的深度相近(钟建华等, 2015)。考虑压实作用影响,实际古

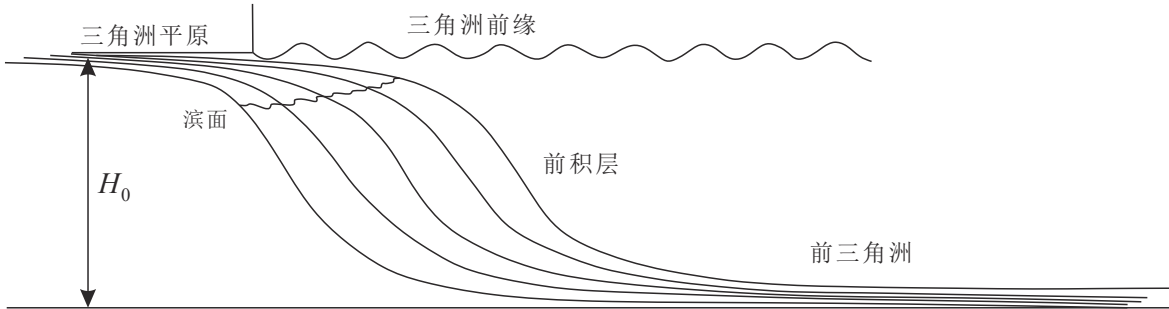


图 7 三角洲前积层厚度与水深关系示意图 (据钟建华等, 2017 修改)
Fig. 7 Sketch for the relationship between water depth and the foreset bed thickness in delta (modified from Zhong et al., 2017)

水深需做去压实校正。具体古水深恢复示意图如图 7 所示, 计算公式如下(李慧琼等, 2014; 钟建华等, 2015):

$$H = H_0 \times 1 / (1 - K) \quad (7)$$

式中, H 为古水深; H_0 为前积层现今垂深(即厚度); K 为压实系数, 可由岩石压实模拟实验获取。

地震法具精度高、分辨力强、探测深度大等优点, 可定量恢复古水深, 且结果较可靠。钟建华等(2015)利用地震剖面 and 连井剖面, 结合岩心和测井等资料, 恢复了东营凹陷古近纪沙三中时期三角洲前积层的高为 485 m, 校正后反演的覆水深度为 681 m(表 2), 指示着东营三角洲在形成时期的湖泊古水深可达 485~681 m。但该法对地震资料品质要求非常高, 主要适用于现代沉积或相变简单的盆地, 特别是海相深水盆地; 浅水沉积前积层较薄时, 则通过地震资料往往难以识别(钟建华等, 2015; 曾洪流等, 2015)。

4 地球化学方法

元素的聚集、分散与水深及离岸距离具一定关系, 因为元素在沉积过程中发生的沉积分异作用使其在不同水深中表现出地球化学行为的差异。基于此, 元素、元素比值、同位素、有机地球化学等指标常被用以恢复古水深。需要注意的是, 只有代表原始海水信息的元素才能真正反映古水深的情况, 而源区的气候信息以及成岩作用的影响都会造成海洋化学元素的失真, 对于源区的气候影响, 可以采取元素风化指数 α^{AlE} 值进行评估(李绪龙等, 2022), 剔除易受到源区风化作用而迁移的元素; 除此之外, 碳酸盐岩的成岩作用易对原始海水信息造成影响, 通常使用元素比值 Mn/Sr, 以及碳氧同位

素的相关性进行判别(Qing and Veizer, 1994; Derry et al., 1994)。

4.1 钴元素法

通过岩样中的钴(Co)元素可推算沉积物的沉积速率, 进而可利用 Co 来定量计算出沉积环境最大古水深(周洪瑞等, 1999; 吴智平和周瑶琪, 2000; 王峰等, 2017; 范萌萌等, 2019; 刘鑫等, 2021), 计算公式如下:

$$V_s = V_0 \times N_{\text{Co}} / (S_{\text{Co}} - t \times T_{\text{Co}}) \quad (8)$$

$$h = C / (V_s^{1.5}) \quad (9)$$

式中, V_s 为某样品沉积时的沉积速率(单位: m/Ma); V_0 为当时正常湖泊沉积速率(m/Ma); N_{Co} 为正常湖泊沉积物中钴的丰度(%); S_{Co} 为样品中钴的丰度(%); t 为样品中镧(La)的含量/陆源碎屑岩中镧(La)平均丰度(%); T_{Co} 为陆源碎屑岩中钴的丰度(%); C 为常数, 现代海水深与沉积速率测算值为 3.05×10^5 ; h 为古水深度(m)。

王峰等(2017)以鄂尔多斯盆地纸坊组为例, 首先确定不同沉积环境沉积速率(滨浅湖沉积速率 0.2 mm/a, 三角洲前缘 0.3 mm/a, 河流沉积速率 0.3 mm/a), 将不同区域泥岩及粉砂质泥岩样品进行微量元素含量测定得到的钴(Co)元素和镧(La)元素含量代入上述公式进行纸坊组古水深定量计算。鄂尔多斯盆地纸坊组整体古水深在 5.19~105.28 m, 平均水深为 29.64 m, 盆地在该时期古地形平坦开阔, 湖盆总体分布局限, 水体较浅, 仅部分地区存在相对洼陷, 大型汇水湖泊尚未形成。

使用该法时需注意: ①生物富集作用、火山活动等的影响, 这些往往会造成沉积地层中 Co 异常; ②对沉积环境沉积速率的赋值, 相关因素会影响计算的准确性。

表 2 五个地震剖面的沙三中解释成果(据钟建华, 2015 修改)

Table 2 Interpretation results of mid-Sha3 in five seismic profiles (modified from Zhong et al., 2015)

剖面号	顶积层 走时/s	底积层 走时/s	顶积层对 应深度/m	底积层对 应深度/m	前积层高 度/m	校正前对 应水深/m	校正后对 应水深/m
1	2.100	2.400	2 579	3 068	489	489	586.8
2	2.375	2.675	3 028	3 457	429	429	626.4
3	2.334	2.625	2 954	3 457	503	503	664.8
4	2.325	2.625	2 942	3 457	515	515	619.2
5	2.100	2.400	2 579	3 068	489	489	586.8
6	效果不好	效果好	效果不好	效果不好	效果不好	效果不好	效果不好
7	前积层不明显	前积层不明显	前积层不明显	前积层不明显	前积层不明显	前积层不明显	前积层不明显
平均	/	/	/	/	485	485	681.13

4.2 元素比值法

(1) Sr/Ba 值和 1 000Sr/Ca 值

Sr/Ba 或 1 000Sr/Ca 值常被用以判别相对古水深(邱家骧和林景仟, 1991; 郭晓强等, 2020)。Sr 通常在较深水环境富集, 浅水近岸处因文石和高镁方解石不稳定而仅有少部分 Sr 被保留, 故含量较低。Ba 在水体中的迁移能力明显弱于 Sr, Ba 通常富集于近岸浅水环境(邱家骧和林景仟, 1991)。自然界水体中元素 Sr 与 Ba 沉积次序变化较大, 使 Sr/Ba 值与古水深呈正相关关系。由浅滩向陆棚方向, 水深逐渐增大, 1 000Sr/Ca 值亦逐渐升高(汪凯明和罗顺社, 2009), 通常认为 1 000Sr/Ca 值与古水深亦成正相关关系。

(2) V/Ni 值

钒(V)、镍(Ni)主要赋存于陆源碎屑和黏土矿物中, 近岸环境海水能量较高, 簸选作用使碎屑物质含量降低, V、Ni 元素质量分数偏低; 而深水环境水体较安静, 便于陆源碎屑物质沉积, 故深水环境 V/Ni 值较浅水环境高(胡明毅, 1994)。海相 V/Ni 值较淡水湖相明显增加, 且随水深加大, 比值增高(许中杰等, 2017), 因此, V/Ni 比值增加代表水体加深, 反之则代表水体深度减小。

(3) Ca/Mg 值

钙(Ca)和镁(Mg)元素常以钙盐和镁盐形式赋存于水体, 但钙盐和镁盐的溶解度不同, 通常钙盐比镁盐更易沉淀(许中杰等, 2012)。随水深增加, Mg 元素质量分数逐渐降低(许中杰等, 2017), Ca/Mg 值与水深呈正相关性, Ca/Mg 值减小, 水体变浅, 比值增大, 水深增加。

(4) Mn/Fe 值

铁(Fe)、锰(Mn)均属变价元素, 对环境的氧化还原条件异常敏感, Fe 在高温干燥气候下易被氧化, 其化合物通常在河口或滨海聚集; Mn 较稳定地存在于离子溶液内, 通常远岸聚集(田景春等, 2006), 因此, 浅水环境中 Mn/Fe 值较深水 Mn/Fe 值低。

(5) Fe/Co 值

铁(Fe)、钴(Co)为同族元素(Ⅷ族), 物理、化学性质相近, 但近岸处 Fe 沉淀比例高于 Co, 随水体逐渐加深, Co 含量逐渐增加。因此, 可依据 Fe/Co 值推断沉积物的离岸距离。若沉积水体遵循随深度增大游离氧减少、还原性增强的变化规律, 该离岸指标亦可指示古湖泊相对水深, 即

Fe/Co 值增大, 水体变浅; Fe/Co 值减小, 水体加深(杨万芹等, 2015)。

(6) Rb/Zr 值

铷(Rb)与锆(Zr)元素地球化学行为差异可估算相对水深。Rb 化学性活泼易迁移, 主要赋存于云母、黏土矿物等矿物, 容易沉积于水体相对较深的低能环境; 而 Zr 化学性质稳定, 主要以锆石等重矿物形式存在, 水体较浅时易直接沉淀。因此水体愈深, Rb/Zr 值越高, 反之则 Rb/Zr 值越低(陆雨诗等, 2021)。

对于元素比值法, 沉积物中元素的丰度同时受到母岩类型和沉积-成岩环境控制。因此对样品均有较高的要求。如在浅水环境中, 大部分沉积物都含有较多的石英、长石及岩屑, 继承自母岩的元素含量所占权重较大可能会影响判别结果。

4.3 碳同位素法

海相碳酸盐岩碳同位素与有机碳埋藏速率密切相关(黄思静, 1997), 海平面升降变化控制了海洋有机碳的埋藏速率, 使碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值与海平面呈正相关关系(田景春和曾允孚, 1995; 邵龙义, 1999)。随海平面上升, 水体逐渐加深, 有机碳埋藏速率增加, 光合作用减弱, 水体的耗氧量增大, 使因剥蚀进入海洋的有机碳减少, $\delta^{13}\text{C}$ 值增高; 反之, 海平面下降, $\delta^{13}\text{C}$ 值降低。碳同位素值容易获取, 且 $\delta^{13}\text{C}$ 值受成岩影响较弱, 基本保存了原始同位素信息, 故依据碳同位素恢复海相地层古水深是一种较可靠的方法。为降低成岩作用影响, 建议采新鲜样品辅以薄片鉴定选取成岩作用较弱的样品获取碳同位素值。

碳酸盐岩碳同位素的组成容易受到有机质降解、后期成岩蚀变作用、大气淡水胶结作用等埋藏后作用/过程的影响, 故在利用碳氧同位素进行古环境等方面的研究时, 须评估碳酸盐岩碳氧同位素(尤其是氧同位素)是否保留了原始信息。迄今为止, 对碳酸盐岩成岩蚀变有效性的评估, 前人已总结了诸多的研究方法(Qing and Veizer, 1994; Kaufman and Knoll, 1997; 樊茹等, 2010), 主要包括: ①岩石样品观察和显微薄片分析判别法; ②直接特征判别法(如 $\delta^{18}\text{O}$ 判别、 $\delta^{13}\text{C}$ 判别、 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 相关性判别); ③阴极发光分析; ④微量元素分析判别法(如 Mn/Sr 比值判别法、Mg/Ca 比值判别法)。

4.4 TOC 法

现代咸水湖河口沉积物中, TOC 含量与水深

具良好相关性,因此可利用沉积物中原始有机碳含量来恢复沉积水体深度(魏亚琼等,2017)。经验公式为:

$$H = 5.6375e^{0.618 \times \text{TOC}_r \times K_c'} \quad (10)$$

H 为古水深(单位:m); TOC_r 为残余有机碳含量; K_c' 为有机碳恢复系数,可根据镜质体反射率(R_o)及干酪根类型进行确定(卢双舫等,2003)。但该公式目前仅限于陆相湖盆古水深恢复,且需对沉积物中原始有机碳含量进行恢复。当有机质成熟度较高时,因难以准确恢复原始有机碳含量而无法根据TOC含量对古水深进行定量计算。王昌勇等(2022)利用TOC法成功计算得出川东地区早侏罗世湖泊最深可达60 m,显示广安—万州一带发育半深湖—深湖环境。

需要注意的是,成岩早期微生物降解、后期热变质作用以及陆源有机质的混入皆有可能对海相碳酸盐岩有机碳同位素组成造成影响,致使其同位素组成不能代表原始同位素信息。故在利用有机碳同位素进行古环境研究时,有必要检查其保留的原始信息。前人一般利用干酪根的元素组成(尤其是H/C原子比)、成熟度及热演化指标等来评估有机碳原始信息的保存情况,一般认为,H/C>0.5、低热演化、未成熟/低成熟的样品中有机碳的原始信息保存良好,可用于古环境变化的研究(Durand and Espitalié, 1973; Strauss et al., 1992; 李高杰, 2020)。

5 数字模拟法

大数据与人工智能技术推动地质学研究范式发生变革(张琳娜等,2016;翟明国等,2018;周永章等,2021)。依托深时数据库中的海量古生物、地球化学、地球物理等资料,从这些数据中提取与古水深相关的特征并进行处理,通过数字模拟软件,在适当参数校正下可获取深时古水深。Gemmer等(2002)利用三维热力模型(该模型将岩石圈视为黏弹塑性的连续体,模拟岩石圈对区域应力场和热结构的响应),再结合已有的地质数据并排除海平面变化、沉积作用以及剥蚀作用等影响,对丹麦北海盆地东部古新世的古水深进行模拟。张琳娜等(2014)在古生物学与地层学数据库(GBDB, <http://geobiodiversity.com>)中获取了374个有关赫南特阶的剖面数据,依据岩相和生物组合特征划分古水深,而后应用ArcGIS软件克里金插值法模拟出了古水

深连续曲面。Emmel等(2015)利用地震数据去压实校正获取原始沉积物厚度,而后计算可容纳空间,通过SEMI PW软件模拟重建了Hammerfest盆地白垩纪古水深,并选取岩石、古生物记录、沉积构造等数据对其校正。数值模拟法避免了传统古水深恢复法诸多限制,能定量模拟任一时空古水深。但利用数字模拟法恢复古水深时,必须要有足够的基础资料的积累、精确的数据以及稳定的数字拟合模型,这样才能确保恢复古水深的精确性。

6 讨论

确定古水深是沉积学长期未解的难题,但古水深却是古环境、古地貌恢复、构造演化以及盆地分析等的关键参数(朱筱敏等,1992;刘招君等,2010;杨振等,2016;武爱俊等,2017)。前人探索提出的古水深恢复判别指标以定性方法为主,传统的“标志物—水深”法,诸如古生物标志法、遗迹化石法、自生矿物法、沉积组构法等即属此类,这些方法虽然可以很好地反映古沉积环境的变化,却只能定性地判断古水深,无法精确判别;生物与水体深度有直接联系,古生物分异度法也是恢复古水深最常见的方法,但受限于化石的保存状态以及数据资料完备度,故需要借助其他方法综合研究。地层厚度法与滨岸线轨迹法虽说克服了“标志物—水深”传统模式间接求古水深的不足,但却容易受到差异构造沉降、补偿点和基准点、风化剥蚀等因素的影响。自然伽马测井曲线法和地震剖面法是较为常见的恢复古水深的地球物理方法,但也有各自的不足,如自然伽马曲线有受控因素少、易获取的优点,最具实用性,但岩性对其影响较大;地震剖面法则以高精度、定量等优点颇具优势但却需要品质非常高的地震资料以及具体的岩性组合。利用碳同位素法、TOC法、微量元素分析判别法等地球化学方法来描述和估算水深的变化趋势(梁宇,2017;武爱俊等,2017),虽能很好反映古水深变化趋势,但其限制条件颇多。如在使用微量元素时,需要考虑源区气候、成岩蚀变的影响;使用碳同位素时则需要考虑有机质降解、后期成岩蚀变作用、大气淡水胶结作用等埋藏后作用/过程;利用TOC时,需要考虑成岩早期微生物降解、后期热变质作用以及陆源有机质的混入等因素的影响。因此在使用地球化学方法前需要对数据进行评估,提出外界因素的干扰。数字模拟法作为大数据时代衍生的新的

定量方法, 在古水深恢复研究中日益广泛, 但唯一的不足是需要对数据有足够的积累。

为更精确恢复古水深, 不同学者尝试运用介形虫、有孔虫等微体古生物记录、地层厚度、滨岸线、地球物理、有机碳及数字模拟等方法来半定量、定量反演古水深, 取得了较好效果, 然而, 每种方法都有其适用条件(王昌勇等, 2022; 郭秋麟和倪丙荣, 1990; Kjennerud and Sylta, 2001; 李守军等, 2005; 董刚和何幼斌, 2010; 钟建华等, 2017; Farouk et al., 2020; Pérez-Asensio, 2021), 一定程度上限制了古水深定量计算的研究。为了直观呈现不同判别指标

的应用条件, 便于古水深恢复方法的合理选取, 表 3 围绕古水深恢复各项指标的判别原理及优缺点进行了梳理。

古水深恢复方法仍然是一个活跃的研究领域, 不断涌现出新的方法和技术。传统的“标志物-水深”对水深的预测精度较低, 却是作为直接的判断古水深的区间范围的方法, 在此基础上, 选用其他指标进一步确定水体深度, 从而确保恢复的古水深准确且精度较高。除此之外, 对于该研究领域开展一些展望: ①随着技术的进步, 高分辨率的方法将成为研究古水深的重要手段, 例如一些高分辨率的

表 3 古水深恢复方法及其优缺点
Table 3 Paleo-water depth reconstruction methods and their advantages and disadvantages

研究指标	指示古水深	指示局限	指标优势
古生物方法	古生物标志	只能定性的判断古水深, 且分布受到地史事件等影响较大	与古水深有着直接联系, 可以很好地反映古沉积环境
	遗迹化石		
	古生物分异度	对样品要求较高, 资料要尽可能详细	能定量恢复古水深
沉积学方法	自生矿物	不同的水深环境, 有不同自生矿物和岩石类型, 会形成不沉积构造、组构, 以此来划分古水深	与古水深有着直接联系, 可以很好地反映古沉积环境
	岩石类型		
	沉积构造		
	地层厚度	利用沉积速率、地层厚度与水深之间的关系半定量恢复古水深	补偿点和基准面的确定难度较大, 适合沉积基底明显、沉积过程连续、沉积和沉降速率较稳定的情况, 对存在剥蚀的地区需要进行剥蚀量恢复
	滨岸线轨迹法	利用可容纳空间与沉积物供给速率两者间接的变化关系恢复古水深	受到差异构造沉降的影响
地球物理方法	自然伽玛曲线	利用自然能谱测井曲线获得的钍(Th)、铀(U)曲线, 根据Th/U值与氧化还原条件及水深的关系, 恢复古水深的相对变化	要求沉积水体在横向和纵向上都具连续性, 且岩性对计算结果的影响较大
	地震剖面	利用地震解析三角洲前积层的厚度或高度来恢复古水深	需要品质非常高的地震资料及具体的岩性组合, 且获得的深度总是略小于实际水深, 多应用于碎屑岩(如泥岩、砂岩)中
	Co(钴)元素法	$V_s = V_o \times N_{Co} / (S_{Co} - t \times T_{Co})$ $h = C / (V_s^{1.5})$	Co的含量受到生物富集、火山活动等其他因素影响, 在用此法是需要考虑这些的影响值
	元素比值法	主要有 Sr/Ba、1000Sr/Ca、V/Ni、Ca/Mg、Fe/Mn、Fe/Co、Rb/Zr等。利用水深和离岸距离对元素的地球化学行为的影响, 进而指示古水深	只能定性地恢复古水深, 判断水深的变化趋势
地球化学方法	碳同位素法	利用碳酸盐岩的 $\delta^{13}C$ 演化与海平面变化有明显的相关性, 且海平面上升, 水体逐渐变深, 海平面下降, 水体逐渐变浅, 从而间接地恢复古水深。	碳酸盐岩的 $\delta^{13}C$ 演化与海平面变化密切相关, 且碳氧同位素易获取, 进而恢复古水深。
	TOC法	$H = 5.6375e^{0.618 \times TOC \times K'}$	适用于陆相湖盆, 在有机质成熟度较高的条件下无法利用TOC法定量恢复古水深
	数字模拟法	依托于大数据库, 基于相应软件建立模型, 模拟古水深	要求数据有足够的积累
			可以精确地恢复古水深, 避免传统方法中各种阻碍

地球化学分析技术可以提高古水深恢复的准确性和可靠性;②随着大数据时代的来临,数据大量积累,我们需要对其进行归类整合,并利用大数据分析,揭示更加广阔的地质背景历史下的水深变化模式。除此之外,利用数字模拟和人工智能算法,将更加准确的模型和预测方法运用于古水深恢复之中。

7 结语

古水深恢复方法可分为5大类:古生物法(古生物标志法、遗迹化石法、古生物分异度法)、沉积学方法(自生矿物法、沉积组构法、沉积构造法、地层厚度法与滨线轨迹法)、地球物理方法(自然伽马能谱曲线法以及地震剖面法)、地球化学方法(钴元素法、元素比值法、碳同位素法以及TOC法)和数字模拟法。

随着技术的不断发展,古水深恢复方法从定性到定量不断完善,但在选择方法时还需注意以下两点:①古水深恢复可采用多项指标综合分析,避免单指标缺点,以更准确地分析古水深变化规律。②古水深恢复需要依据研究对象特点和地质资料情况,科学选用合适方法。

References

- Allen J., 1967. Depth Indicators of Clastic Sequences[J]. *Marine Geology*, 5 (5) : 429–446.
- Cant D J., 1991. Geometric Modelling of Facies Migration: Theoretical Development of Facies Successions and Local Unconformities[J]. *Basin Research*, 3 (2) : 51–62.
- Chappell J., Polach H., 1991. Post-glacial Sea-level Rise From a Coral Record at Huon Peninsula, Papua New Guinea[J]. *Nature*, 349 (6305) : 147–149.
- Chen Z H., Zha M., Jin Q., 2004. Application of natural gamma ray logging and natural gamma spectrometry logging to recovering paleoenvironment of sedimentary basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, (6) : 1145–1150 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z H., Zha M., 2004. Application of uranium curve to paleoenvironment inversion in sedimentary basin[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 28 (6) : 11–14 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Y F., Dong Y L., Zhu X M., et al., 2020. Cretaceous palaeogeomorphology restoration and its controlling mechanism on sand-bodies in Chunguang exploration area, Junggar Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22 (6) : 1127–1142 (in Chinese with English abstract).
- Dai D J., Tang Z S., Chen X T., et al., 1995. Geochemical characteristics of uranium and the application of its response on logging curve to oil and gas exploration[J]. *Gas Industry*, 15 (5) : 21–24, 99–100.
- Derry L A., Brasier M D., Corfield R M., et al., 1994. Sr and C isotopes in Lower Cambrian carbonates from the Siberian craton: A paleoenvironmental record during the 'Cambrian explosion'[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 128 (3–4) : 671–681.
- Dong G., He Y B., 2010. Study on paleo-water-depth restoration according based on stratum thickness[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition) Science & Engineering*, 7 (3) : 484–486 (in Chinese with English abstract).
- Durand B., Espitalié J., 1973. Evolution de la matière organique au cours de l'enfouissement des sédiments[J]. *Compte rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, 276: 2253–2256.
- Emmel B., Geiger M., Jacobs J., 2006. Detrital Apatite Fission-track Ages in Middle Jurassic Strata at the Rifted Margin of W Madagascar—indicator for a Protracted Resedimentation History[J]. *Sedimentary Geology*, 186 (1) : 27–38.
- Emmel B., Jager G D., Zieba K., et al., 2015. A 3D, map based approach to reconstruct and calibrate palaeo-bathymetries – Testing the Cretaceous water depth of the Hammerfest Basin, southwestern Barents Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 97: 21–31.
- Fan M M., Bu J., Zhao X Y., et al., 2019. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 49 (4) : 633–642 (in Chinese with English abstract).
- Fang P G., 2020. Subsidence process and controlling factors of Cenozoic continental margin basins in convergent setting: Insights from the Okinawa Trough, East China Sea and the Valencia Trough, Mediterranean[D]. Hangzhou: Zhejiang University: 1–158.
- Fan R., Deng S H., Zhang X L., 2010. The data validity evaluation of carbonate $\delta^{13}\text{C}$ in C-isotope chemostratigraphy[J]. *Journal of Stratigraphy*, 34 (4) : 445–451 (in Chinese with English abstract).
- Farouk S., Aaskalany M., El-Sorogy A., et al., 2020. Maastrichtian - early Paleocene foraminiferal palaeobathymetry and depositional sequences at Gebel El Sharawna, south Luxor, Egypt[J]. *Lethaia*, 53 (3) : 316–331.
- Flügel E., 2010. Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application[M]. Berlin: Springer: 725–802.
- Frey R W. The Study of Trace Fossils: A Synthesis of Principles, Problems, and Procedures in Ichnology[M]. Springer Berlin Heidelberg, 1975.
- Frey R W., Seilacher A., 2007. Uniformity in Marine Invertebrate Ichnology[J]. *Lethaia*, 13 (3) : 183–207.
- Gemmer L., Huuse M., Clausen O R., et al., 2002. Mid-Palaeocene palaeogeography of the eastern North Sea basin: integrating geological evidence and 3D geodynamic modelling[J]. *Basin Research*, 14 (3) : 329–346.
- Ginsburg R N., Rezak R., Wray J L., 1972. Geology of calcareous algae (Notes for a short course) [R]. Miami: University of Miami.
- Glorstad-Clark E., Birkeland E P., Nystuen J P., et al., 2011. Triassic platform-margin deltas in the western Barents Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 28 (7) : 1294–1314.

- Gong Y M, Hu B, Lu Z S, et al., 2009. Study of trace fossils in the past eighty years in China[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48 (3) : 322 – 337 (in Chinese with English abstract).
- Gong Y M, 1994. Association Relationships among the Devonian Trace Fossils in Northern Xinjiang and Their Palaeoenvironmental and Palaeoecological Significances[J]. *Geoscience*, 8 (2) : 154 – 162 (in Chinese with English abstract).
- Grimsdale T F, Morkhoven F, 1955. The ratio between pelagic and benthonic foraminifera as a means of estimating depth of deposition of sedimentary rocks[C]. IV World Petrol Cong Proc, Soc I/D, Rep, 4: 473 – 491.
- Guan S R, 1988. Petrography of fossils [M]. Dongying: China University of Petroleum Press: 92 – 96.
- Guo Q L, Ni B R, 1990. Determination of palaeodepth with diversity of fossil community[J]. *Journal of the University of Petroleum*, 14 (2) : 1 – 7 (in Chinese with English abstract).
- Guo X Q, Li H B, Wei R Z, et al., 2020. Characteristics of elemental geochemistry of the Cambrian carbonate rocks and their palaeoenvironmental implication in western margin of Qinshui Basin, Shanxi province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 22 (2) : 349 – 366 (in Chinese with English abstract).
- Helland-Hansen W, Martinsen O J, 1996. Shoreline trajectories and sequences; description of variable depositional-dip scenarios[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 66 (4) , 670 – 688.
- He K, 2012. Th/U ratios curve was used to study sedimentary environment of water depth change[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 33 (z1) : 230 – 231 (in Chinese with English abstract).
- Hu B, Jiang Z X, Qi Y A, et al., 2006. Trace fossils of deeper lacustrine deposits in the Paleogene Shahejie Formation of Jiyang Depression, Shandong Province, eastern China[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 45 (1) : 83 – 94 (in Chinese with English abstract).
- Hu M Y, 1994. Geochemical characters and environmental significance of Ordovician carbonate rocks in Kepingarea, Tarim basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 15 (2) : 158 – 163 (in Chinese with English abstract).
- Huang S J, 1997. A study on carbon and strontium isotopes of Late Paleozoic carbonate rocks in the Upper Yangtze platform[J]. *Acta Geologica Sinica*, 71 (1) : 45 – 53 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Z X, Liang S Y, Zhang Y F, et al., 2014. Sedimentary hydrodynamic study of sand bodies in the upper subsection of the 4 th Member of the Paleogene Shahejie Formation in the eastern Dongying Depression, China[J]. *Petroleum Science*, 11 (2) : 189 – 199.
- Kang B, Xie X N, Du X B, et al., 2012. A new paleobathymetric approach based on shoreline trajectory: An example from Dongying delta in the third member of Paleogene Shahejie Formation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30 (3) : 443 – 450 (in Chinese with English abstract).
- Kaufman A J, Knoll A H, Narbonne G M, 1997. Isotopes, ice ages, and terminal Proterozoic earthhistory[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94 (13) : 6600 – 6605.
- Kjennerud T, Sylta O, 2001. Application of Quantitative Palaeobathymetry in Basin Modelling, with Reference to the Northern North Sea[J]. *Petroleum Geoscience*, 7 (4) : 331 – 341.
- Krastel S, Schmincke H U, Jacobs C L, et al., 2001. Submarine Landslides Around the Canary Islands[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 106 (B3) : 3977 – 3997.
- Li G J, 2020. The carbon isotope fluctuations and its paleoenvironmental significance of the Upper Jurassic bulk carbonate from Amdo area, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1 – 171.
- Li H Q, Pu R H, Wang D X, et al., 2014. Progradational reflection from lacustrine Yanchang Formation in Ordos Basin, China[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 49 (5) : 985 – 996 (in Chinese with English abstract).
- Li R W, Chen J S, Zhang S K, 1999. Carbon and oxygen isotopic compositions of carbonate rocks and the changes of the sea level in the Mesoproterozoic Wumishan Formation[J]. *Science Bulletin*, 44: 1697 – 1702 (in Chinese with English abstract).
- Li S J, Zheng D S, Jiang Z X, et al., 2005. Water depth of palaeo-lacustrine basin recovered by dominance diversity of Ostracoda: An example from sedimentary period of the Member3 of Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag, Shandong Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 7 (3) : 399 – 404 (in Chinese with English abstract).
- Li X L, Zhang X, Lin C M, et al., 2022. Overview of the Application and Prospect of Common Chemical Weathering Indices[J]. *Geological Journal of China Universities*, 28 (1) : 51 – 63 (in Chinese with English abstract).
- Li X J, Chen F, Chen C Y, et al., 2004. Quantitative research on relationship between planktonic foraminifera content and water depth in western South China Sea[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 6 (4) : 442 – 447 (in Chinese with English abstract).
- Liang N, 2017. The volcanic event study in Permian -Triassic boundary of Longmen mountain[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1 – 173.
- Liu B J, Zeng Y F, 1985. Basic and working methods of lithofacies paleogeography[M]. Beijing: Geological Publishing House: 222 – 224.
- Liu M Y, Qi Y G, Shi Y H, et al., 2020. Formation Mechanism of Cambrian—Ordovician Bioturbated Dolomites in North China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38 (1) : 91 – 103 (in Chinese with English abstract).
- Liu X, Shang T, Tian J C, et al., 2021. Paleo-sedimentary environmental conditions and its significance of Chang 4+5 Member of Triassic Yanchang Formation in the Zhenbei area, Ordos basin, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95 (11) : 3501 – 3518 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z J, Meng Q T, Liu R, et al., 2010. Paleolimnology Study : Taking Huadian Fault Basin as an example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28 (5) : 917 – 925 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z L, 1990. Introduction to Calcareous Algae[M]. Beijing: Higher Education Press, 1 – 18.
- Lu S F, Xue H T, Zhong N N, 2003. Simulating calculation of the variations of organic matter abundance and hydrocarbon-generating potential during geological processes[J]. *Geological Review*,

- 49 (3) : 292 – 297 (in Chinese with English abstract).
- Lu Y S, Hu Y, Hou Y D, et al., 2021. Geochemical Characteristics of Trace Elements in Yanghugou Formation in the Western Margin of Ordos Basin and Their Implications for Sedimentary Environment[J]. *Science Technology and Engineering*, 21 (28) : 11999 – 12009 (in Chinese with English abstract).
- Niu X L, Li G B, Han Z C, et al., 2015. Eocene calcareous algae from Duina, Yadong, Southern Tibet, China[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 32 (4) : 361 – 371 (in Chinese with English abstract).
- Niu X L, Li G B, Wang T Y, 2016. Paleogene calcareous algae and sedimentary environment in Tuna area of Yadong in southern Tibet[J]. *Geoscience*, 30 (4) : 863 – 870 (in Chinese with English abstract).
- Pang J G, Li W H, Xiao L, 2009. Identifying characteristics of shallow lake and deep lake of Yanchang formation depressed type lacustrine basin in Shanbei area[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 45 (6) : 37 – 40.
- Pang J G, Yang Y Y, Hao L, 2012. Summary of research status of ancient water depth restoration in lake Basin[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition) Science & Engineering*, 9 (9) : 42 – 45.
- Pérez - Asensio J N, 2021. Quantitative palaeobathymetric reconstructions based on foraminiferal proxies: a case study from the Neogene of south - west Spain[J]. *Palaeontology*, 64 (4) : 475 – 488.
- Phleger F B, Parker F L, 1951. Ecology of Foraminifera, Northwest Gulf of Mexico[J]. *Quarterly Review of Biology*: 1 – 84.
- Qing H, Veizer J, 1994. Oxygen and carbon isotopic composition of Ordovician brachiopods: Implications for coeval seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58 (20) : 4429 – 4442.
- Qiu J X, Lin J Q, 1991. Petrochemistry. Beijing[M]. Geological Publishing House: 242 – 256.
- Riding R, 1991. Calcareous algae and stromatolites[M]. Springer, Berlin Heidelberg.
- Roberts J M, Brown C J, Long D, et al., 2005. Acoustic Mapping Using a Multibeam Echosounder Reveals Cold-water Coral Reefs and Surrounding Habitats[J]. *Coral Reefs*, 24 (4) : 654 – 669.
- Sandwell D T, Smith W, Gille S, et al., 2006. Bathymetry From Space: Rationale and Requirements for a New, High-resolution Altimetric Mission[J]. *Comptes Rendus - Géoscience*, 338 (14) : 1049 – 1062.
- Seilacher A, 1964. Sedimentological classification and nomenclature of trace fossils[J]. *Sedimentology*, 3: 253 – 256.
- Seilacher A, 1967. Bathymetry of Trace Fossils [J]. *Marine Geology*, 5 (5) : 413 – 428.
- Shao L Y, Jones T P, 1999. Carbon isotopes and the strati-graphical implication of the Late Permian Carbonates in Central Guangxi[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17 (1) : 84 – 88 (in Chinese with English abstract).
- Song H B, Jin Y, Hu L, et al., 2012. Ichnofabrics and their sedimentary environment of the Lower Permian Taiyuan Formation, western Henan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86 (6) : 972 – 984 (in Chinese with English abstract).
- Strauss H, Moore T B, Schopf W, et al., 1992. Abundances and isotopic compositions of carbon and sulfur species in whole rock and kerogen samples[J]. *The Proterozoic biosphere*: 709 – 798.
- Su X, Ding X, Jiang Z X, et al., 2012. Using of multi-microfossil proxies for reconstructing quantitative paleo-water depth during the deposit period of LST of Ess4 in Dongying Depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 19 (1) : 188 – 199 (in Chinese with English abstract).
- Thuy B, Meyer C A, 2013. The pitfalls of extrapolating modern depth ranges to fossil assemblages: new insights from Middle Jurassic brittle stars (Echinodermata: Ophiuroidea) from Switzerland[J]. *Swiss Journal of Palaeontology*, 132 (1) : 5 – 21.
- Tian J C, Zeng Y F, 1995. The evolution pattern of the carbon and oxygen isotopes in the Permian marine carbonate rocks from Guizhou[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 22 (1) : 78 – 82 (in Chinese with English abstract).
- Tian J C, Chen G W, Zhang X, et al., 2006. Application of sedimentary geochemistry in the analysis of sequence stratigraphy[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 33 (1) : 30 – 35 (in Chinese with English abstract).
- Wan J F, Xian B Z, She Y Q, et al., 2011. Palaeobathymetric reconstruction based on natural gamma ray spectrometry logging data: by taking Bachu Formation in region 4 of Tahe oilfield for example[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 33 (6) : 98 – 103.
- Wang K M, Luo S S, 2009. Geochemical characters of carbonates and indicative significance of sedimentary environment—an example from the Gaoyuzhuang Formation of the Changcheng System in the northern Hebei Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 30 (3) : 343 – 349 (in Chinese with English abstract).
- Wang C Y, Chang J, Li N, et al., 2022. Paleo-water-depth Reconstruction of Early Jurassic Lakes in the Eastern Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*: 1 – 16.
- Wang C S, Li X H, 2003. Sedimentary basin: From principles to analyses[M]. Beijing: Higher Education Press: 136 – 145.
- Wang F, Liu X C, Deng X Q, et al., 2017. Geochemical Characteristics and Environmental Implications of Trace Elements of Zhifang Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35 (6) : 1265 – 1273 (in Chinese with English abstract).
- Wang J, Yang H R, 1995. Transfer function and water depth changes in the southern Yellow Sea in the last 130000 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 15 (4) : 321 – 326 (in Chinese with English abstract).
- Wang P J, Du X D, 1993. Principles and Methods of Quantitative Mathematical Simulation of Sedimentary Basin Analysis[J]. *Journal of Xi'an Shiyong University (Natural Science Edition)*, 8 (1) : 14 – 18 (in Chinese with English abstract).
- Wang X J, Wang Z X, Liu X Y, et al., 2008. Recovery of ancient water depth in Ordos Basin by using uranium logging data[J]. *Natural Gas Industry*, 28 (7) : 46 – 48.
- Wei Y Q, Wang C Y, Meng X H, et al., 2017. Organic matter analysis of surface sediment in Buha Estuary region and its comparative sedimentology significance[J]. *Journal of Lake Sciences*, 29 (5) : 1254 – 1264 (in Chinese with English abstract).

- Wray J L, 1978. Calcareous Algae[M]. Amsterdam: Elsevier: 34 – 71.
- Wu Y Y, Wu L F, Yue T, 2012. Shoreline trajectory analysis of continental lacustrine basins and its application to petroleum geology[C]//Summary of Papers of the Twelfth National Academic Conference on Paleogeography and Sedimentology: 235.
- Wu Z P, Zhou Y Q, 2000. Using the characteristic elements from meteoritic must in strata to calculate sedimentation rate[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 18 (3) : 395 – 399 (in Chinese with English abstract).
- Wu A J, Xu J Y, Teng B B, et al., 2017. Fine description method of dynamic provenance and its application: A case from Yanan Sag, Qiongdongnan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 29 (4) : 55 – 63 (in Chinese with English abstract).
- Xiao K Z, Tong H M, Yang D H, et al., 2020. Restoration of Neogene paleo-geomorphology of Yinggehai Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 42 (2) : 215 – 222 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z J, Cheng R H, Zhang L, et al., 2012. The Geochemistry Records of Sea-Level Relative Movement and Paleoclimatic Evolution of the South China Continental Margin in Late Triassic-Early-Middle Jurassic[J]. Earth Science, 37 (1) : 113 – 124 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z J, Kong J T, Cheng R H, et al., 2020. Geochemical and Carbon and Oxygen Isotope Records of Relative Sea-Level Change of Mufushan Formation in Early Cambrian in Nanjing, Lower Yangtze Region[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 50 (1) : 158 – 169 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z J, Lan Y Z, Cheng R H, et al., 2017. Carbonate geochemical record of sea-level change of Lunshan Formation in Lower Ordovician in Jurong area[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 47 (5) : 1458 – 1470 (in Chinese with English abstract).
- Yan P, Li R F, Jia H B, 2013. Analysis on restoration methods of ancient lake bathymetric[C]//China Petroleum Society. 6th International Symposium on Oil and Gas Formation Mechanisms and Oil and Gas Resource Evaluation.
- Yang K W, Pang J G, Li W H, 2009. Determination method of lake shoreline in depressed-type lacustrine basin: Taking the Yanchang Formation of Zhidan area as an example[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 45 (3) : 13 – 17 (in Chinese with English abstract).
- Yang Q, Qi J F, Cheng X S, et al., 2006. Distribution of original stratigraphic thickness of each member in the Paleogene and its tectonopaleogeographic implication in Dongpu Sag, Henan Province[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 8 (3) : 407 – 413 (in Chinese with English abstract).
- Yang S P, 1985. Advances in palaeoicnological research in China [J]. Geological Review, 31 (3) : 197 – 203 (in Chinese with English abstract).
- Yang S P, 1999. Palaeoenvironmental and palaeogeographic significance of trace fossils[J]. Journal of Palaeogeography, 1 (1) : 7 – 19 (in Chinese with English abstract).
- Yang W Q, Zhu D S, Yin Y, et al., 2015. Geochemical restoration method of ancient water depth and its application in sequence stratigraphic division[J]. Geological Review, 61 (S1) : 756 – 757 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z, Zhang G X, Zhang L, et al., 2016. Paleogeomorphology of early middle Miocene in the Xisha sea area and Its control factors[J]. Marine geology and Quaternary geology, 36 (3) : 47 – 57 (in Chinese with English abstract).
- Zeng H L, Zhao X Z, Zhu X M, et al., 2015. Seismic sedimentology characteristics of sub-clinoformal shallow-water meandering river delta: A case from the Suning area of Raoyang Sag in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 42 (5) : 566 – 576 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G, Yang S F, Chen N H, et al., 2018. Big data epoch : Challenges and opportunities for geology[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 33 (8) : 825 – 831 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L P, Bian R X, Yang S Y, et al., 2001. Identifying hydrocarbon source rock with log data[J]. Well Logging Technology, 25 (2) : 146 – 152 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L N, Fan J X, Chen Q, et al., 2014. Reconstruction of the mid-Hirnantian palaeotopography in the Upper Yangtze region, South China[J]. Estonian Journal of Earth Sciences, 63 (4) : 329 – 334.
- Zhang L N, Fan J X, Chen Q, 2016. Geographic distribution and palaeogeographic reconstruction of the Upper Ordovician Kuanyinchiao Bed in South China[J]. Chinese Science Bulletin, 61 (18) : 2053 – 2063 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S Q, Ren Y G, 2003. The study of base level changes of the Songliao Basin in Mesozoic[J]. Journal of Chang'an University (Earth Science Edition), 25 (2) : 1 – 5 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X L, Tao G, Liu X R, 2006. Progress in oil geophysical exploration[J]. Progress in Geophysics, 21 (1) : 143 – 151.
- Zhang X, Lin C M, Chen Z Y, 2011. Characteristics of chlorite minerals from Upper Triassic Yanchang Formation in the Zhenjing area, Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 85 (10) : 1659 – 1671 (in Chinese with English abstract).
- Zhao C L, Jiang Z X, Liu M H, 1989. The ichnofacies of lower Tertiary in the west part of Dongpu Depression[J]. Journal of East China Petroleum Institute (Natural Science Edition), 13 (1) : 1 – 8 (in Chinese with English abstract).
- Zheng D S, Li S J, 2002. Study on the dominance diversity of Ostracoda of the Paleogene in Dongying Sag of Shandong[J]. Journal of Palaeogeography, 4 (2) : 64 – 70 (in Chinese with English abstract).
- Zheng R C, Liu M Q, 1999. Study on palaeosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 20 (1) : 22 – 27 (in Chinese with English abstract).
- Zheng R C, Wen H G, Xu W L, 2021. Sedimentary petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 87 – 89.
- Zhong J H, Li Y, Shao Z F, et al., 2015. The Ultr-water lake of Middle Sha-3 Formation during Paleogene in Dongying Sag, NE China[J]. Geological Journal of China Universities, 21 (2) : 320 – 327 (in Chinese with English abstract).
- Zhong J H, Ni L T, Shao Z F, et al., 2017. Identification of the

- ultradeep water deposition of the Bohai Bay Basin during the Paleogene and its significance for oil and gas geology[J]. Geological Journal of China Universities, 23 (3) : 521 – 532 (in Chinese with English abstract).
- Zhou H R, Wang Z Q, Cui X S, et al., 1999. Study of the Neoproterozoic strata on the southern of the North China Platform[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1 – 90.
- Zhou Y Z, Zuo R G, Liu G, et al., 2021. The great-leap-forward development of mathematical geoscience during 2010-2019: Big Data and Artificial Intelligence Algorithm are Changing Mathematical Geoscience[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 40 (3) : 556 – 573, 777.
- Zhu X M, Hu Q X, Xin Q L, et al., 1992. Paleogeographic settings of Paleogene in southeastern Dongpu depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 16 (4) : 1 – 7 (in Chinese with English abstract).
- Zwaan G, Jorissen F J, Stigter H, 1990. The depth dependency of planktonic/benthic foraminiferal ratios: Constrains and applications[J]. Marine Geology, 95 (1) : 1 – 16.
- ### 附中文参考文献
- 陈中红, 查明, 金强, 2004. 自然伽玛及自然伽玛能谱测井在沉积盆地古环境反演中的应用[J]. 地球物理学报, (6) : 1145 – 1150.
- 陈中红, 查明, 2004. 铀曲线在沉积盆地古环境反演中的应用[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 28 (6) : 11 – 14.
- 程逸凡, 董艳蕾, 朱筱敏, 等, 2020. 准噶尔盆地春光探区白垩纪古地貌恢复及其控砂机制[J]. 古地理学报, 22 (6) : 1127 – 1142.
- 代大经, 唐正松, 陈鑫堂, 等, 1995. 铀的地球化学特征及其测井响应在油气勘探中的应用[J]. 天然气工业, 15 (5) : 21 – 24, 99 – 100.
- 董刚, 何幼斌, 2010. 根据地层厚度恢复古水深度的研究[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 7 (3) : 484 – 486.
- 范萌萌, 卜军, 赵筱艳, 等, 2019. 鄂尔多斯盆地东南部延长组微量元素地球化学特征及环境指示意义[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 49 (4) : 633 – 642.
- 方鹏高, 2020. 汇聚背景下新生代陆缘盆地的沉降特征及主控因素——以东海冲绳海槽和地中海瓦伦西亚海槽为例[D]. 杭州: 浙江大学: 1 – 158.
- 樊茹, 邓胜徽, 张学磊, 2010. 碳酸盐岩碳同位素地层学研究中数据的有效性[J]. 地层学杂志, 34 (4) : 445 – 451.
- 龚一鸣, 胡斌, 卢宗盛, 等, 2009. 中国遗迹化石研究 80 年[J]. 古生物学报, 48 (3) : 322 – 337.
- 龚一鸣, 1994. 新疆北部泥盆系遗迹化石共生组合关系及其古环境和古生态意义[J]. 现代地质, 8 (2) : 154 – 162.
- 管守锐, 1988. 化石岩石学[M]. 东营: 石油大学出版社: 92 – 96.
- 郭秋麟, 倪丙荣, 1990. 利用化石群分异度探讨古水深[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 14 (2) : 1 – 7.
- 郭晓强, 李好斌, 魏荣珠, 等, 2020. 山西沁水盆地西缘寒武系碳酸盐岩的元素地球化学特征及其古环境意义[J]. 古地理学报, 22 (2) : 349 – 366.
- 贺轲, 2012. 利用 Th/U 比值曲线研究沉积环境古水深变化[J]. 中国石油和化工标准与质量, 33 (z1) : 230 – 231.
- 胡斌, 姜在兴, 齐永安, 等, 2006. 山东济阳坳陷古近系沙河街组深水湖沉积中的遗迹化石[J]. 古生物学报, 45 (1) : 83 – 94.
- 胡明毅, 1994. 塔北柯坪奥陶系碳酸盐岩地球化学特征及环境意义[J]. 石油与天然气地质, 15 (2) : 158 – 163.
- 黄思静, 1997. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究[J]. 地质学报, 71 (1) : 45 – 53.
- 康波, 解习农, 杜学斌, 等, 2012. 基于滨线轨迹的古水深定量计算新方法——以古近系沙三段东营三角洲为例[J]. 沉积学报, 30 (3) : 443 – 450.
- 李高杰, 2020. 西藏安多地区上侏罗统碳同位素波动与古环境研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1 – 171.
- 李慧琼, 蒲仁海, 王大兴, 等, 2014. 鄂尔多斯盆地延长组地震前积反射的地质意义[J]. 石油地球物理勘探, 49 (5) : 985 – 996.
- 李任伟, 陈锦石, 张淑坤, 1999. 中元古代雾迷山组碳酸盐岩碳和氧同位素组成及海平面变化[J]. 科学通报, 44: 1697 – 1702.
- 李守军, 郑德顺, 姜在兴, 等, 2005. 用介形类优势分异度恢复古湖盆的水深——以山东东营凹陷古近系沙河街组沙三段湖盆为例[J]. 古地理学报, 7 (3) : 399 – 404.
- 李绪龙, 张霞, 林春明, 等, 2022. 常用化学风化指标综述: 应用与展望[J]. 高校地质学报, 28 (1) : 51 – 63.
- 李学杰, 陈芳, 陈超云, 等, 2004. 南海西部浮游有孔虫含量与水深关系定量研究[J]. 古地理学报, 6 (4) : 442 – 447.
- 梁宁, 2017. 龙门山地区 PTB 界线处火山事件研究[D]. 成都: 成都理工大学: 1 – 73.
- 刘宝珺, 曾允孚, 1985. 岩相古地理基础和工作方法[M]. 北京: 地质出版社: 222 – 224.
- 刘梦瑶, 齐永安, 史云鹤, 等, 2020. 华北寒武纪—奥陶纪豹皮状碳酸盐岩系生物扰动成因[J]. 沉积学报, 38 (1) : 91 – 103.
- 刘鑫, 尚婷, 田景春, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长 4+5 段沉积期古环境条件及意义[J]. 地质学报, 95 (11) : 3501 – 3518.
- 刘招君, 孟庆涛, 柳蓉, 等, 2010. 古湖泊学研究: 以桦甸断陷盆地为例[J]. 沉积学报, 28 (5) : 917 – 925.
- 刘志礼, 1990. 化石藻类导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1 – 18.
- 卢双舫, 薛海涛, 钟宁宁, 2003. 地史过程中烃源岩有机质丰度和生烃潜力变化的模拟计算[J]. 地质论评, 49 (3) : 292 – 297.
- 陆雨诗, 胡勇, 侯云东, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地西缘羊虎沟组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 科学技术与工程, 21 (28) : 11999 – 12009.
- 牛晓路, 李国彪, 韩子晨, 等, 2015. 西藏亚东堆纳地区始新世钙藻化石[J]. 微体古生物学报, 32 (4) : 361 – 371.
- 牛晓路, 李国彪, 王天洋, 2016. 藏南亚东堆纳地区古近纪钙藻化石与沉积环境[J]. 现代地质, 30 (4) : 863 – 870.
- 庞军刚, 李文厚, 肖丽, 2009. 陕北地区延长组坳陷湖盆浅湖与深湖亚相的识别特征[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 45 (6) : 36 – 40.
- 庞军刚, 杨友运, 郝磊, 2012. 湖盆古水深恢复研究现状综述[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 9 (9) : 4.
- 邱家骥, 林景任, 1991. 岩石化学[M]. 北京地质出版社: 242 – 256.
- 邵龙义, Jones T P, 1999. 桂中晚二叠世碳酸盐岩碳同位素的地层学意义[J]. 沉积学报, 17 (1) : 84 – 88.

- 宋慧波, 金毅, 胡磊, 等, 2012. 豫西地区下二叠统太原组遗迹结构及其沉积环境[J]. 地质学报, 86(6): 972–984.
- 苏新, 丁旋, 姜在兴, 等, 2012. 用微体古生物定量水深法对东营凹陷沙四上亚段沉积早期湖泊水深再造[J]. 地质前缘, 19(1): 188–199.
- 田景春, 曾允孚, 1995. 贵州二叠纪海相碳酸盐岩碳、氧同位素地球化学演化规律[J]. 成都理工学院学报, 22(1): 78–82.
- 田景春, 陈高武, 张翔, 等, 2006. 沉积地球化学在层序地层分析中的应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 33(1): 30–35.
- 万锦峰, 鲜本忠, 余源琦, 等, 2011. 基于伽马能谱测井信息的古水深恢复方法——以塔河油田4区巴楚组为例[J]. 石油天然气学报, 33(6): 9, 98–103.
- 汪凯明, 罗顺社, 2009. 碳酸盐岩地球化学特征与沉积环境判别意义——以冀北拗陷长城系高于庄组为例[J]. 石油与天然气地质, 30(3): 343–349.
- 王昌勇, 常玖, 李楠, 等, 2022. 四川盆地东部地区早侏罗世湖泊古水深恢复[J]. 沉积学报: 1–16.
- 王成善, 李祥辉, 2003. 沉积盆地分析原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社: 136–145.
- 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 沉积学报, 35(6): 1265–1273.
- 王建, 杨怀仁, 1995. 转换函数与南黄海13万年来海水深度的变化[J]. 地理科学, 15(4): 321–326.
- 王璞珺, 杜小弟, 1993. 沉积盆地分析的定量数学模拟: 原理与方法[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 8(1): 14–18.
- 王学军, 王志欣, 刘显阳, 等, 2008. 利用铀的测井响应恢复鄂尔多斯盆地古水深[J]. 天然气工业, 28(7): 46–48, 135.
- 魏亚琼, 王昌勇, 孟祥豪, 等, 2017. 青海湖布哈河口区表层沉积物有机质分析及其比较沉积学意义[J]. 湖泊科学, 29(5): 1254–1264.
- 吴因业, 吴洛菲, 岳婷, 2012. 陆相湖盆的滨线轨迹分析及其石油地质应用[C]//第十二届全国古地理学及沉积学学术会议论文摘要集: 235.
- 吴智平, 周瑶琪, 2000. 一种计算沉积速率的新方法: 宇宙尘埃特征元素法[J]. 沉积学报, 18(3): 395–399.
- 武爱俊, 徐建永, 滕彬彬, 等, 2017. “动态物源”精细刻画方法与应用——以琼东南盆地崖南凹陷为例[J]. 岩性油气藏, 29(4): 55–63.
- 肖坤泽, 童亨茂, 杨东辉, 等, 2020. 莺歌海盆地新近纪以来古构造地貌恢复[J]. 石油实验地质, 42(2): 215–222.
- 许中杰, 程日辉, 张莉, 等, 2012. 华南陆缘晚三叠—早、中侏罗世海平面相对升降与古气候演化的地球化学记录[J]. 地球科学, 37(1): 113–124.
- 许中杰, 孔锦涛, 程日辉, 等, 2020. 下扬子南京地区早寒武世幕府山组海平面相对升降的地球化学和碳、氧同位素记录[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 50(1): 158–169.
- 许中杰, 蓝艺植, 程日辉, 等, 2017. 句容地区下奥陶统仑山组海平面变化的碳酸盐岩地球化学记录[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 47(5): 1458–1470.
- 闫佩, 李儒峰, 贾海波, 2013. 湖泊古水深恢复方法分析[C]//中国石油学会. 第六届油气成藏机理与油气资源评价国际学术研讨会论文集.
- 杨克文, 庞军刚, 李文厚, 2009. 拗陷湖盆湖岸线的确定方法——以志丹地区延长组为例[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 45(3): 13–17.
- 杨桥, 漆家福, 程秀申, 等, 2006. 河南东濮凹陷古近系各组段的原始地层厚度分布及其构造古地理意义[J]. 古地理学报, 8(3): 407–413.
- 杨式溥, 1985. 我国遗迹化石研究的新进展[J]. 地质论评, 31(3): 197–203.
- 杨式溥, 1999. 遗迹化石的古环境和古地理意义[J]. 古地理学报, 1(1): 7–19.
- 杨万芹, 朱德顺, 银燕, 等, 2015. 古水深的地球化学恢复方法及在层序地层划分中的应用[J]. 地质论评, 61(S1): 756–757.
- 杨振, 张光学, 张莉, 等, 2016. 西沙海域中新世早期古地貌及其控制因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(3): 47–57.
- 曾洪流, 赵贤正, 朱筱敏, 等, 2015. 隐性前积浅水曲流河三角洲地震沉积学特征——以渤海湾盆地冀中拗陷饶阳凹陷肃宁地区为例[J]. 石油勘探与开发, 42(5): 566–576.
- 翟明国, 杨树锋, 陈宁华, 等, 2018. 大数据时代: 地质学的挑战与机遇[J]. 中国科学院院刊, 33(8): 825–831.
- 张立鹏, 边瑞雪, 杨双彦, 等, 2001. 用测井资料识别烃源岩[J]. 测井技术, 25(2): 146–152.
- 张琳娜, 樊隽轩, 陈清, 2016. 华南上奥陶统观音桥层的空间分布和古地理重建[J]. 科学通报, 61(18): 2053–2063.
- 张世奇, 任延广, 2003. 松辽盆地中生代沉积基准面变化研究[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 25(2): 1–5.
- 张向林, 陶果, 刘新茹, 2006. 油气地球物理勘探技术进展[J]. 地球物理学进展, 21(1): 143–151.
- 张霞, 林春明, 陈召佑, 2011. 鄂尔多斯盆地镇泾区块上三叠统延长组砂岩中绿泥石矿物特征[J]. 地质学报, 85(10): 1659–1671.
- 赵激林, 姜在兴, 刘孟慧, 1989. 东濮凹陷西部下第三系的遗迹相[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 13(1): 1–8.
- 郑德顺, 李守军, 2002. 山东东营凹陷古近纪介形类优势分异度研究[J]. 古地理学报, 4(2): 64–70.
- 郑荣才, 柳梅青, 1999. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究[J]. 石油与天然气地质, 20(1): 22–27.
- 郑荣才, 文华国, 徐文礼, 2021. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社: 87–89.
- 钟建华, 李勇, 邵珠福, 等, 2015. 东营凹陷古近纪沙三中后期超深水湖泊的研究[J]. 高校地质学报, 21(2): 320–327.
- 钟建华, 倪良田, 邵珠福, 等, 2017. 渤海湾盆地古近纪超深水与极超深水沉积及油气地质意义[J]. 高校地质学报, 23(3): 521–532.
- 周洪瑞, 王自强, 崔新省, 等, 1999. 华北地台南部中新元古界层序地层研究[M]. 北京: 地质出版社: 1–90.
- 周永章, 左仁广, 刘刚, 等, 2021. 数学地球科学跨越发展的十年: 大数据、人工智能算法正在改变地质学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 40(3): 556–573, 777.
- 朱筱敏, 胡庆喜, 信荃麟, 等, 1992. 东濮凹陷东南部早第三纪古地理背景初探[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 16(4): 1–7.