

DOI: 10.12401/j.nwg.2022016

塔里木盆地英买力地区三叠系相对湖平面变化分析

陈兆芹¹, 刘景彦^{1,*}, 杨宪章², 罗彩明², 董火祥¹

(1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 以塔里木盆地英买力地区三叠系为研究对象, 综合岩心、测井曲线等多种资料, 将传统高分辨率层序定性识别与小波变换定量分析的方法相结合, 对其进行层序单元定量划分, 共划分出长期层序 5 个、中期层序 13 个、短期层序 53 个及超短期层序 256 个; 基于超短期旋回绘制 Fischer 图解, 结果显示三叠系相对湖平面呈现湖退到湖侵的过程, 在 SQ4 时期湖平面上升至最高点, 内部次一级的湖侵湖退过程与长期旋回相互对应。通过综合对比分析, 发现随湖平面的升降变化, 沉积相带呈现辫状河三角洲前缘近端、远端与滨浅湖沉积交替演变的特征。笔者研究弄清了英买力地区三叠系湖平面升降规律及其与沉积相带的演化关系, 为后续地质研究提供了基础依据。

关键词: 相对湖平面变化; Fischer 图解; 高分辨率层序地层学; 三叠系; 英买力地区; 塔里木盆地
中图分类号: P539.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6248(2023)01-0203-14

Discussion on Relative Lacustrine Level Changes of Triassic in Yingmaili Area, Tarim Basin

CHEN Zhaoqin¹, LIU Jingyan^{1,*}, YANG Xianzhang², LUO Caiming², DONG Huoxiang¹

(1. College of Energy Resource, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Taking the Triassic in the Yingmaili area of Tarim Basin as an example, it combined with the traditional qualitative identification of high-resolution sequence and quantitative analysis method of wavelet transform. The sequence division of Triassic in Yingmaili area of Tarim Basin was done by using the data of logging, drilling and core, and the Fischer plots was drawn based on the calculation of super short-term sequence cycles. It turns out the law that the relative lacustrine level changes were integrally from a long-time lacustrine regression to a long time lacustrine transgressive and rose the largest during the SQ4. The complete lacustrine transgressive and lacustrine regression of Triassic was corresponded well to the long-term sequence cycles. Compared with integrated analysis, we find the lacustrine level changes is closely related with vertical evolution of sedimentary facies. This study clarifies the law of lake level changes of Triassic in Yingmaili area and its evolution relationship with sedimentary facies belt, which provides a basic basis for subsequent geological research.

Keywords: relative lacustrine level changes; Fischer plots; high-resolution sequence stratigraphy; Triassic; Yingmaili area; Tarim basin

收稿日期: 2022-04-12; 修回日期: 2022-09-23; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目 (U19B6003-01-01)。

作者简介: 陈兆芹 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事层序与沉积相分析。E-mail: chenzq1997@163.com。

* 通讯作者: 刘景彦 (1972-), 女, 博士, 教授, 主要从事层序与沉积相分析。E-mail: ljingyan@cugb.edu.cn。

近年来,随着油气勘探工作的逐步深入,塔北隆起丰富的油气藏储量逐渐被发现,成为塔里木盆地最有利的油气勘探区块之一(康玉柱, 2018; 黄少英等, 2018)。牙哈及哈拉哈塘油气区的发现(田军等, 2021),使得预探井的部署呈现西扩的趋势。英买力地区众凹环绕(李曰俊等, 2012),成藏条件优越,已在多个层系发现油气,使该区成为塔北隆起最具有勘探开发远景的区块之一(崔海峰等, 2009)。贾承造(1997)认为塔里木盆地在三叠纪时期处于大型前陆盆地发展演化阶段,受全球性季风气候影响强烈,从早三叠世—晚三叠世由半干旱炎热向温热湿润气候转变(周统顺, 1999; 黄克难等, 2003; 钱利军等, 2010),该时期在塔北—塔中隆起发育大型陆相浅水湖盆沉积。英买力地区属于塔北隆起的次级构造单元,复杂的多期构造演化使湖平面升降变化频繁,制约了对该区三叠系沉积相展布规律的认识。因此,开展对该区湖平面变化的精细研究,对三叠系沉积相类型的确定具有重要意义。

陆相盆地相较于海相盆地在沉积受控因素、沉积相类型等方面存在区别(胡书毅等, 2002),在小范围内变化更为复杂。郑荣才等(2000)、顾家裕(2004)认为陆相盆地层序、体系域的发育规律与湖平面升降具有更为直接的联系。因此,对陆相盆地沉积体系演化进行精细研究,利用小波变换进行高频层序定量划分,并在此基础上对可容纳空间变化趋势进行探究能够

很好地弥补高分辨率层序划分的不足(郑荣才等, 2000)。

近年来,利用测井曲线及测井信号分析岩性及其组合,研究地质旋回(余继峰等, 2003)、湖平面升降变化的方法越来越多。其中,以测井小波分析为主的高频层序划分方法已经在准噶尔盆地玛湖凹陷(张坦等, 2018)、塔里木盆地英买力地区(夏辉等, 2019)、松辽盆地扶余油层(林孝先等, 2014)等区域得到成功的应用。前人在塔里木英买力地区利用小波分析对白垩系舒善河组(夏辉等, 2019)、卡普沙良群(张荣茜, 2013)的高频层序也进行了划分,在湖平面升降变化、沉积相展布规律等诸多方面取得了良好的成果认识,但该区三叠系尚未见到研究报道,相关工作亟待开展。

笔者以英买力地区三叠系俄霍布拉克组(T_1e)、克拉玛依组(T_2k)及黄山街组(T_3h)为研究对象,结合钻井、测井、岩心等地质资料,利用小波变换方法进行高频层序定量划分,并绘制出 Fischer 图解,精细描述了研究区三叠系相对湖平面的升降以及沉积相带的展布规律。

1 区域地质背景

英买力低凸起位于塔北隆起西端,北邻轮台凸起、库车坳陷,东与轮南低凸起相邻(图 1)。在三叠纪时期,塔北地区处于大型内陆坳陷湖盆演化阶段(唐武

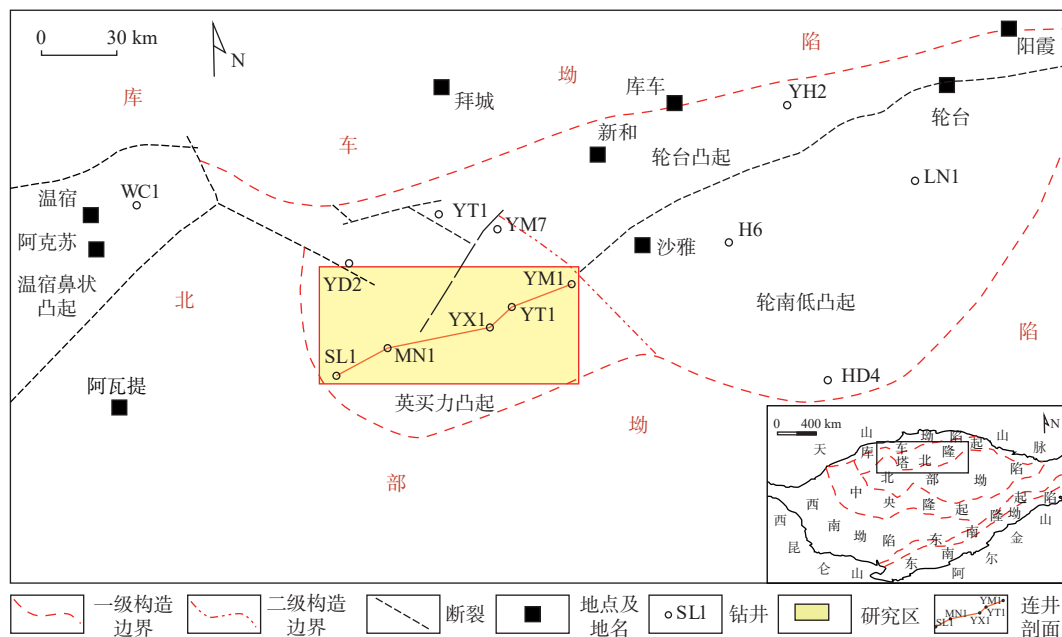


图 1 塔里木盆地塔北隆起构造单元划分及研究区位置图(据顾家裕等, 2004)

Fig. 1 Division of tectonic units and location of study area in Tabei uplift of Tarim Basin

等,2015)。贾承造(1999)、崔海峰等(2008)认为英买力地区由于受到燕山期—喜山期库车坳陷的沉降作用,呈现出区域性的北倾特征。该区频繁的构造运动导致三叠纪地层与下伏二叠纪及上覆侏罗纪、白垩纪地层均呈不整合接触。早三叠纪时期,英买力地区中北部处于构造高位,研究区内存在俄霍布拉克组不发育的情况,少量分布于MN1井附近;三叠纪末受印支运动影响,英买力地区整体抬升,地层受到剥蚀,个别井中黄山街组缺失。研究区内早—晚三叠纪主要为湖泊沉积,中三叠纪地层中砂体发育。刘亚雷等(2012)研究认为该时期以辫状河三角洲沉积为主。研究区整体上为相对细粒的碎屑沉积,以深灰色、灰色、褐色泥岩以及灰色中、细砂岩为主,地层厚度相差较大,约100~600 m。

2 高分辨率层序地层

2.1 高分辨率层序地层划分

邓宏文(1995)、郑荣才(2001)在对高分辨率层序地层学进行研究时,认为可以依据不同级别的基准面旋回对地层进行层序划分及等时对比。作为高分辨率层序地层划分的理论依据,不同级次的基准面旋回(Cross et al., 1998)的识别关系到各级层序的划分(刘景彦等, 2008)。测井、岩心等资料所记录的信息作为层序与沉积学特征在岩石上的响应是判别基准面旋回的基础依据。前人研究表明(刘波, 2002; 温立峰等, 2010; 纪友亮等, 2012; 张坦等, 2018),长、中、短、超短期等低频异旋回受控于基准面的变化(刘波, 2002)。因此,可以通过识别出地层基准面旋回的关键界面进行多级次的层序划分。

在本次研究中采用传统的定性层序划分和基于小波变换的高分辨层序地层划分相结合的方法。在对研究区内钻、测井数据、岩心资料等综合分析后,依据地层旋回界面、湖平面特征,对三级层序及体系域进行定性划分。如图2所示,对应于三级层序,共划分为5个长期层序,13个中期层序。

2.2 小波分析定量层序研究

传统上,高分辨率层序单元的划分依赖于地震、测井、岩心等资料,但受到主观因素和资料水平的限制,难以准确辨认出高频地层旋回识别的关键界面(刘波, 2002; 刘景彦等, 2008),对于层序格架的建立有一定的局限性。

近年来,能够在不同频度域对测井数据进行解析

的小波变换方法成为一种对高频层序进行定量划分的有效手段(赵伟, 2009; 纪友亮等, 2012)。与地震资料等地质数据相比,测井数据在垂向上连续性较好,分辨率更高(杨小萍等, 2001),能精确的展示地质演化的过程,其曲线形态特征和变化趋势在某种程度上体现了地层沉积环境的改变,能够反映出各级层序单元关键界面的特征(王志坤等, 2005; 赵军龙等, 2007)。但是,直接根据测井曲线进行地层划分是在一个视觉级次上完成的,具有一定的局限性,未能深入挖掘其所蕴含的地质信息。而小波变换可以将测井曲线分解成不同尺度的信号,按照不同频率分析曲线特征,可以更好地识别层序地层的关键界面(赵军龙等, 2007)。测井小波变换的基本原理是将某种小波函数作为母函数,对其进行伸缩、平移等变换,模拟并贴近原始信号。这样,原始测井信号化为不同尺度、不同级次小波曲线的组合(余继峰, 2003),将各个级次的小波曲线与地质周期相联系(王志坤等, 2005; 李相博, 2006; 赵军龙, 2007),结合其他地质资料进行综合分析,即可实现各级次层序单元的识别。研究区三叠系内普遍发育砂泥岩,而自然伽马曲线能最为敏锐地反映地层中泥质含量的变化(陈茂山, 1999; 李相博, 2006),对区域内岩性段识别效果最佳。因此,选用自然伽马曲线进行小波分析。

笔者在前人研究基础上(李相博, 2006; 李凤杰等, 2006; 余瑜, 2018),通过对比、分析,并与研究区的实际情况相结合,应用MATLAB软件的小波工具箱(董长虹, 2004)进行小波变换分析,选取了Daubechies小波、Dmeyer小波和Morlet小波对降噪后的SL1井自然伽马(GR)曲线(图3)作小波分解,并绘制小波系数曲线及时频能谱图(图4),对高频层序进行定量识别与划分。与定性划分方案相对比,确定当设定阶数为10、最大级数为12时,对各级层序单元的识别效果最为突出。db小波设定为10阶时,d11曲线(参考dmey12 d11曲线),对应于长周期层序界面的识别,识别出5个长期层序;d10曲线(参考dmey12 d10曲线),对应于中周期层序界面的识别,识别出13个中期层序;d7曲线(参考dmey12 d7曲线),对应于短周期层序界面的识别,识别出62个短期层序;d5曲线(参考dmey12 d5曲线),对应于超短周期层序界面的识别,识别出256个超短期层序(图5)。将小波变换所得到的层序划分方案与高分辨率层序划分方案进行对比,划分结果相吻合,因此在研究区内小波定量层序划分方案与高分辨率层序划分方案具有良好的一致性。

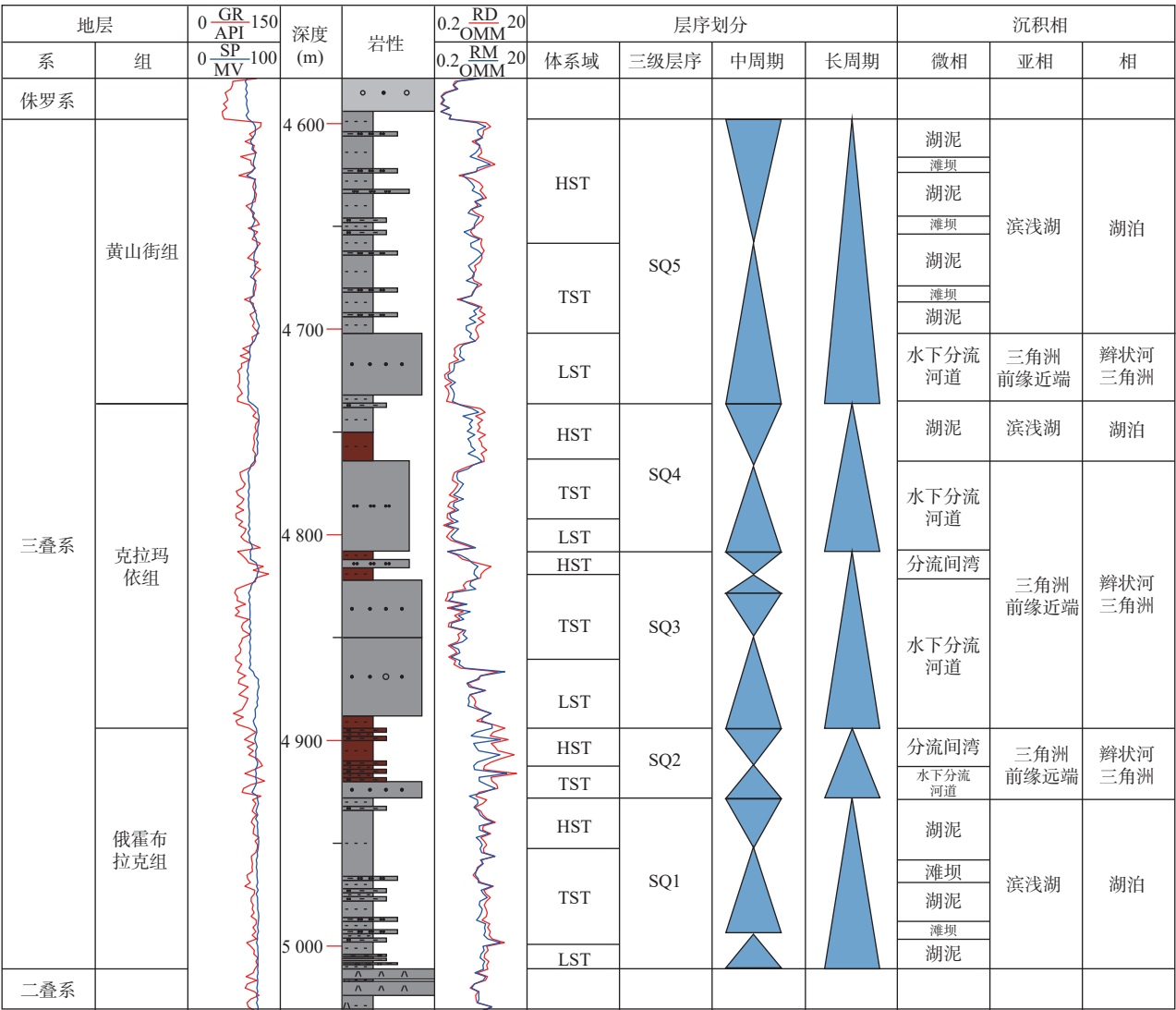


图 2 塔里木盆地英买力地区三叠系高分辨率层序地层划分图

Fig. 2 High resolution sequence stratigraphic division of Triassic in Yingmaili area of Tarim basin

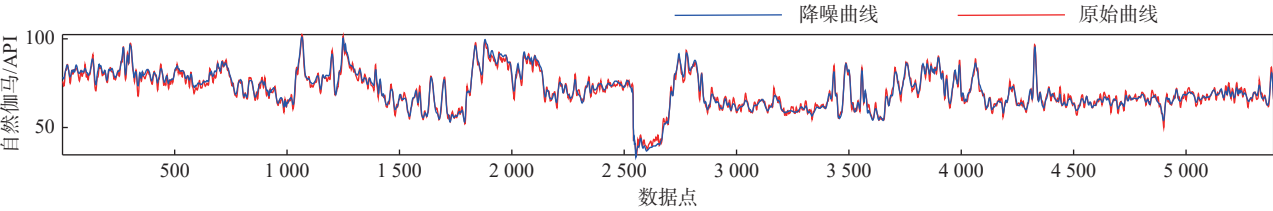


图 3 SL1 井测井曲线原始信号与降噪信号对比图

Fig. 3 Comparison between original signal of logging curves and de-noised signal (Well SL1)

3 小波变换结合 Fischer 图解基准面变化分析

3.1 Fischer 图解

Fischer 图解由 Fischer(1964)在研究奥地利三叠

系碳酸盐沉积时提出的,用来描绘 Lofter 旋回厚度的变化。前人(Osleger et al., 1961; Koerschner et al., 1989)以此为基础,又对 Fischer 图解的使用条件、适用范围及横纵坐标表示方法等方面进行了探讨与改进。目前,Fischer 图解为避免受到沉积间断、旋回周期变化等因素的制约,以“旋回个数”作为横坐标,并以周

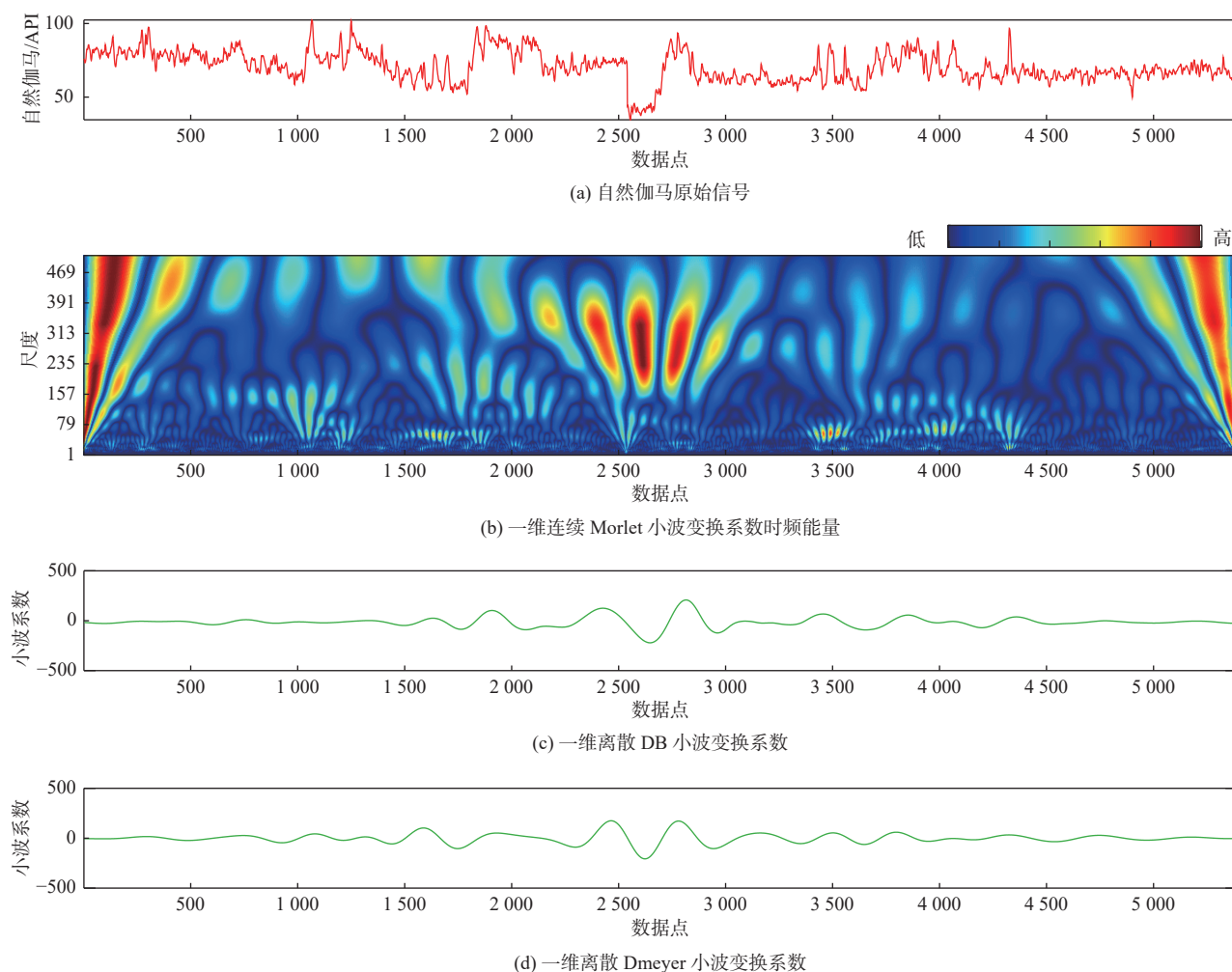


图 4 SL1 井测井信号小波变换图

Fig. 4 Log signal (Well SL1) by wavelet transform

期旋回编号为序; 纵坐标为各旋回厚度与平均旋回厚度差值的累积, 即“平均厚度累积偏移量”。结合图解曲线形态及小波曲线的旋回数目的变化, 可判断沉积时期可容纳空间的变化趋势, 成为一种刻画相对海(湖)平面变化规律的有效方法。近年来, 中国对 Fischer 图解的应用与研究不再局限于单一的碳酸盐岩沉积(翟永红, 1999), 而在碎屑岩沉积(张坦等, 2018; 夏辉等, 2019)或碎屑岩-碳酸盐岩混合沉积中均取得了丰硕的研究成果(苏德辰, 1995), 并证实了 Fischer 图解是研究海(湖)平面升降变化的有效手段。

研究区内三叠系湖相沉积属于陆相湖盆, 湖平面频繁变化, 而北部陆源碎屑持续稳定供给, 岩性以单纯的砂泥岩为主, 是应用 Fischer 图解进行湖平面升降研究的理想层位。通过对小波定量划分的 256 个超短期旋回进行统计计算(表 1), 绘制出研究区三叠系可容纳空间变化曲线。孟祥化等(2004)、冯斌等

(2019)研究认为, 地层未经压实校正时, Fischer 曲线的形态及旋回的组样式变化不大。因此, 笔者在绘制 Fischer 图解时, 未对超短期旋回厚度进行去压实校正的情况对研究结果影响暂且不计。

Fischer 图解曲线反应出三叠系湖平面变化的升降规律。三叠系内部所划分的 5 个三级层序与 3 个组的对应关系为: 俄霍布拉克(T_1e)为 SQ1-2、克拉玛依(T_2k)为 SQ3-4、黄山街组(T_3h)为 SQ5。整体来看, 三叠系经历了一次湖退又湖侵的过程, SQ1-2 对应湖退, SQ3-5 与湖侵过程对应。SQ1 沉积时期, 先是短暂湖侵后快速湖退, 湖平面呈下降趋势; SQ2 沉积时期, 湖侵湖退时间短暂、规模小, 但在此时期湖平面下降至整个三叠系最低点; SQ3 时期, 早期经历了一次小规模湖侵到湖退, 之后整体步入大规模的湖侵阶段; SQ4 时期快速湖侵后, 湖平面达到三叠系的最高位, 其后经历短暂的湖退过程; SQ5 时期湖平面小规模上

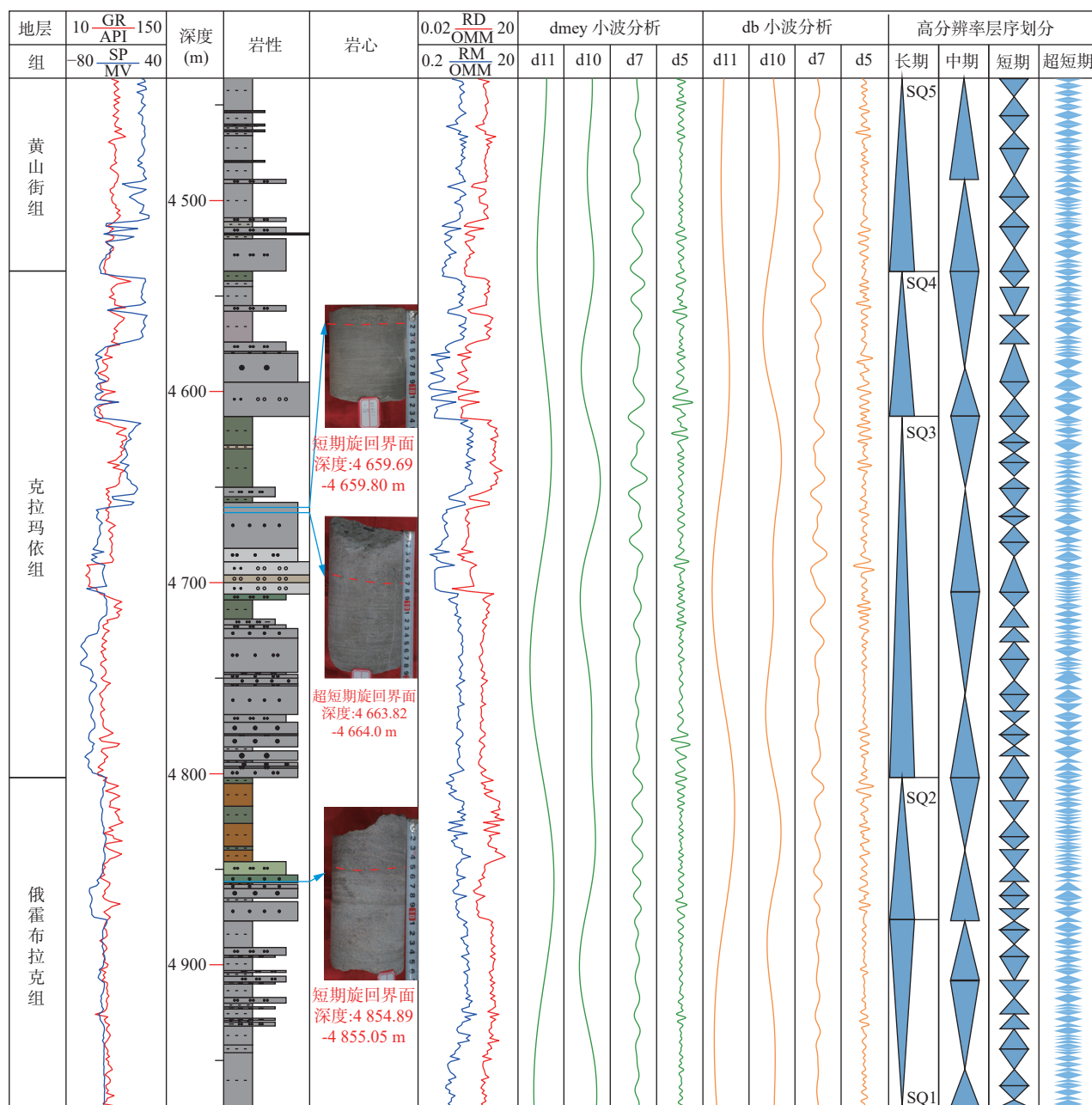


图5 英实力地区SL1井三叠系小波分析及高分辨率层序地层划分方案图

Fig. 5 Wavelet analysis and classification scheme of the high-resolution sequence (Well SL1) of Triassic in Yingmaili area

升后又发生缓慢湖退(图6)。

3.2 综合分析

湖平面升降变化与古气候、盆地沉积充填、构造运动等有直接关系。沉积物颜色可以反映沉积时的环境,与古气候有着直接的联系(吴艳宏等,2004),能够从侧面反应湖平面变化的趋势。笔者依据前人(马瑶等,2015;王熠哲等,2019)研究成果,对研究区目的层段泥岩颜色所表征的氧化-还原环境进行简略分级,根据1~4级氧化还原程度对泥岩颜色进行分类统计:

杂色、褐色等为强氧化浅水环境(数值为1);灰紫、灰白等为弱氧化环境(数值为2);浅灰、灰色等为弱还原(数值为3);深灰、黑色等为强还原深水环境(数值为4)。根据录井资料,统计各层泥岩的颜色转化为数值并连接成趋势曲线,所得泥岩颜色数值曲线与相对湖平面曲线具有很好的关联性。笔者研究成果与前人对塔里木三叠系的认识也具有很好的契合度,在一定程度上证实了笔者研究成果的可靠性。

将Fischer图解曲线、泥岩颜色数值曲线与吕雪

表 1 SL1 井三叠系超短期层序划分及厚度偏移累计统计表

Tab. 1 Accumulated statistical data table of super short-term sequences thickness deviation of Well SL1 of Triassic

层位 编号	顶深 (m)	底深 (m)	累计偏差 (m)	层位 编号	顶深 (m)	底深 (m)	累计偏差 (m)	层位 编号	顶深 (m)	底深 (m)	累计偏差 (m)
T ₃ h 256	4 436.00	4 437.96	0.00	T ₂ k 170	4 617.88	4 619.86	-0.81	T ₁ e 85	4 811.26	4 813.28	-15.22
T ₃ h 255	4 437.96	4 439.74	0.15	T ₂ k 169	4 619.86	4 621.86	-0.68	T ₁ e 84	4 813.28	4 815.16	-15.14
T ₃ h 254	4 439.74	4 441.72	0.4 7	T ₂ k 168	4 621.86	4 623.94	-0.58	T ₁ e 83	4 815.16	4 816.92	-14.91
T ₃ h 253	4 441.72	4 443.62	0.60	T ₂ k 167	4 623.94	4 626.46	-0.55	T ₁ e 82	4 816.92	4 818.70	-14.57
T ₃ h 252	4 443.62	4 44 5.48	0.80	T ₂ k 166	4 626.46	4 630.80	-0.97	T ₁ e 81	4 818.70	4 820.30	-14.24
T ₃ h 251	4 445.48	4 44 7.20	1.05	T ₂ k 165	4 630.80	4 632.74	-3.20	T ₁ e 80	4 820.30	4 821.80	-13.74
T ₃ h 250	4 447.20	4 44 9.04	1.43	T ₂ k 164	4 632.74	4 634.60	-3.04	T ₁ e 79	4 821.80	4 823.68	-13.13
T ₃ h 24 9	4 449.04	4 450.90	1.70	T ₂ k 163	4 634.60	4 636.30	-2.79	T ₁ e 78	4 823.68	4 825.80	-12.91
T ₃ h 24 8	4 450.90	4 452.80	1.94	T ₂ k 162	4 636.30	4 638.14	-2.39	T ₁ e 77	4 825.80	4 827.70	-12.92
T ₃ h 24 7	4 452.80	4 455.14	2.15	T ₂ k 161	4 638.14	4 640.14	-2.12	T ₁ e 76	4 827.70	4 829.50	-12.72
T ₃ h 24 6	4 455.14	4 457.62	1.91	T ₂ k 160	4 640.14	4 642.44	-2.02	T ₁ e 75	4 829.50	4 831.24	-12.41
T ₃ h 24 5	4 457.62	4 459.90	1.54	T ₂ k 159	4 642.44	4 644.52	-2.21	T ₁ e 74	4 831.24	4 833.04	-12.04
T ₃ h 24 4	4 459.90	4 462.30	1.37	T ₂ k 158	4 644.52	4 648.42	-2.18	T ₁ e 73	4 833.04	4 834.72	-11.74
T ₃ h 243	4 462.30	4 464.56	1.07	T ₂ k 157	4 648.42	4 650.58	-3.98	T ₁ e 72	4 834.72	4 836.14	-11.31
T ₃ h 242	4 464.56	4 466.58	0.92	T ₂ k 156	4 650.58	4 652.92	-4.03	T ₁ e 71	4 836.14	4 837.54	-10.63
T ₃ h 241	4 466.58	4 468.54	1.00	T ₂ k 155	4 652.92	4 655.20	-4.27	T ₁ e 70	4 837.54	4 838.98	-9.92
T ₃ h 240	4 468.54	4 470.30	1.15	T ₂ k 154	4 655.20	4 656.96	-4.4 4	T ₁ e 69	4 838.98	4 840.52	-9.26
T ₃ h 239	4 470.30	4 471.92	1.4 9	T ₂ k 153	4 656.96	4 658.46	-4.10	T ₁ e 68	4 840.52	4 842.36	-8.69
T ₃ h 238	4 471.92	4 472.82	1.98	T ₂ k 152	4 658.46	4 659.82	-3.4 9	T ₁ e 67	4 842.36	4 844.14	-8.43
T ₃ h 237	4 472.82	4 474.20	3.18	T ₂ k 151	4 659.82	4 661.82	-2.75	T ₁ e 66	4 844.14	4 845.84	-8.10
T ₃ h 236	4 474.20	4 475.96	3.91	T ₂ k 150	4 661.82	4 664.00	-2.64	T ₁ e 65	4 845.84	4 847.18	-7.70
T ₃ h 235	4 475.96	4 477.90	4.25	T ₂ k 14 9	4 664.00	4 666.94	-2.71	T ₁ e 64	4 847.18	4 848.62	-6.93
T ₃ h 234	4 477.90	4 479.58	4.42	T ₂ k 14 8	4 666.94	4 669.60	-3.55	T ₁ e 63	4 848.62	4 850.38	-6.26
T ₃ h 233	4 479.58	4 481.08	4.85	T ₂ k 14 7	4 669.60	4 672.32	-4.10	T ₁ e 62	4 850.38	4 852.42	-5.92
T ₃ h 232	4 481.08	4 482.56	5.4 5	T ₂ k 14 6	4 672.32	4 675.08	-4.72	T ₁ e 61	4 852.42	4 855.02	-5.85
T ₃ h 231	4 482.56	4 484.44	6.08	T ₂ k 14 5	4 675.08	4 677.30	-5.37	T ₁ e 60	4 855.02	4 857.78	-6.35
T ₃ h 230	4 484.44	4 486.12	6.30	T ₂ k 14 4	4 677.30	4 679.00	-5.4 9	T ₁ e 59	4 857.78	4 860.08	-7.00
T ₃ h 229	4 486.12	4 490.12	6.73	T ₂ k 143	4 679.00	4 680.76	-5.08	T ₁ e 58	4 860.08	4 864.00	-7.20
T ₃ h 228	4 490.12	4 492.82	4.83	T ₂ k 142	4 680.76	4 682.82	-4.74	T ₁ e 57	4 864.00	4 866.12	-9.01
T ₃ h 227	4 492.82	4 495.24	4.24	T ₂ k 141	4 682.82	4 686.58	-4.69	T ₁ e 56	4 866.12	4 868.16	-9.03
T ₃ h 226	4 495.24	4 497.56	3.92	T ₂ k 140	4 686.58	4 688.80	-6.35	T ₁ e 55	4 868.16	4 870.56	-8.96
T ₃ h 225	4 497.56	4 499.82	3.71	T ₂ k 139	4 688.80	4 690.88	-6.4 6	T ₁ e 54	4 870.56	4 874.18	-9.26
T ₃ h 224	4 499.82	4 501.62	3.56	T ₂ k 138	4 690.88	4 693.22	-6.43	T ₁ e 53	4 874.18	4 876.68	-10.77
T ₃ h 223	4 501.62	4 503.36	3.86	T ₂ k 137	4 693.22	4 695.44	-6.67	T ₁ e 52	4 876.68	4 879.70	-11.16
T ₃ h 222	4 503.36	4 504.98	4.23	T ₂ k 136	4 695.44	4 696.96	-6.78	T ₁ e 51	4 879.70	4 882.20	-12.08

续表1

层位 编号	顶深 (m)	底深 (m)	累计偏差 (m)	层位 编号	顶深 (m)	底深 (m)	累计偏差 (m)	层位 编号	顶深 (m)	底深 (m)	累计偏差 (m)
T ₃ h 221	4 504.98	4 506.76	4.71	T ₂ k 135	4 696.96	4 698.24	-6.20	T ₁ e 50	4 882.20	4 884.66	-12.4 7
T ₃ h 220	4 506.76	4 508.52	5.04	T ₂ k 134	4 698.24	4 699.76	-5.37	T ₁ e 4 9	4 884.66	4 886.94	-12.83
T ₃ h 219	4 508.52	4 509.76	5.38	T ₂ k 133	4 699.76	4 701.58	-4.79	T ₁ e 4 8	4 886.94	4 888.84	-13.00
T ₃ h 218	4 509.76	4 511.02	6.25	T ₂ k 132	4 701.58	4 703.30	-4.50	T ₁ e 4 7	4 888.84	4 890.62	-12.80
T ₃ h 217	4 511.02	4 512.90	7.09	T ₂ k 131	4 703.30	4 705.02	-4.12	T ₁ e 4 6	4 890.62	4 892.20	-12.47
T ₃ h 216	4 512.90	4 515.06	7.32	T ₂ k 130	4 705.02	4 706.44	-3.73	T ₁ e 4 5	4 892.20	4 893.96	-11.95
T ₃ h 215	4 515.06	4 517.40	7.26	T ₂ k 129	4 706.44	4 707.96	-3.05	T ₁ e 4 4	4 893.96	4 896.20	-11.60
T ₃ h 214	4 517.40	4 519.64	7.03	T ₂ k 128	4 707.96	4 709.68	-2.4 6	T ₁ e 43	4 896.20	4 898.24	-11.74
T ₃ h 213	4 519.64	4 521.92	6.90	T ₂ k 127	4 709.68	4 711.72	-2.07	T ₁ e 42	4 898.24	4 900.10	-11.67
T ₃ h 212	4 521.92	4 524.88	6.72	T ₂ k 126	4 711.72	4 713.84	-2.01	T ₁ e 41	4 900.10	4 901.86	-11.42
T ₃ h 211	4 524.88	4 527.48	5.87	T ₂ k 125	4 713.84	4 715.90	-2.02	T ₁ e 40	4 901.86	4 904.32	-11.08
T ₃ h 210	4 527.48	4 530.06	5.37	T ₂ k 124	4 715.90	4 717.52	-1.98	T ₁ e 39	4 904.32	4 907.00	-11.43
T ₃ h 209	4 530.06	4 532.24	4.90	T ₂ k 123	4 717.52	4 719.14	-1.4 9	T ₁ e 38	4 907.00	4 909.34	-12.01
T ₃ h 208	4 532.24	4 533.98	4.82	T ₂ k 122	4 719.14	4 720.96	-1.01	T ₁ e 37	4 909.34	4 911.28	-12.24
T ₃ h 207	4 533.98	4 535.18	5.19	T ₂ k 121	4 720.96	4 722.74	-0.72	T ₁ e 36	4 911.28	4 912.80	-12.08
T ₃ h 206	4 535.18	4 536.80	6.09	T ₂ k 120	4 722.74	4 724.46	-0.40	T ₁ e 35	4 912.80	4 914.12	-11.4 9
T ₂ k 205	4 536.80	4 539.12	6.58	T ₂ k 119	4 724.46	4 726.06	-0.01	T ₁ e 34	4 914.12	4 916.46	-10.71
T ₂ k 204	4 539.12	4 541.84	6.36	T ₂ k 118	4 726.06	4 727.36	0.4 9	T ₁ e 33	4 916.46	4 918.90	-10.94
T ₂ k 203	4 541.84	4 544.62	5.75	T ₂ k 117	4 727.36	4 728.68	1.30	T ₁ e 32	4 918.90	4 920.80	-11.28
T ₂ k 202	4 544.62	4 546.86	5.08	T ₂ k 116	4 728.68	4 730.42	2.09	T ₁ e 31	4 920.80	4 922.20	-11.07
T ₂ k 201	4 546.86	4 548.48	4.94	T ₂ k 115	4 730.42	4 732.34	2.4 5	T ₁ e 30	4 922.20	4 923.56	-10.36
T ₂ k 200	4 548.48	4 549.26	5.43	T ₂ k 114	4 732.34	4 734.50	2.64	T ₁ e 29	4 923.56	4 925.30	-9.62
T ₂ k 199	4 549.26	4 551.16	6.75	T ₂ k 113	4 734.50	4 737.88	2.58	T ₁ e 28	4 925.30	4 927.26	-9.25
T ₂ k 198	4 551.16	4 552.92	6.96	T ₂ k 112	4 737.88	4 740.08	1.31	T ₁ e 27	4 927.26	4 929.28	-9.11
T ₂ k 197	4 552.92	4 554.26	7.30	T ₂ k 111	4 740.08	4 742.10	1.21	T ₁ e 26	4 929.28	4 931.36	-9.02
T ₂ k 196	4 554.26	4 555.90	8.07	T ₂ k 110	4 742.10	4 743.70	1.30	T ₁ e 25	4 931.36	4 933.36	-9.00
T ₂ k 195	4 555.90	4 558.02	8.53	T ₂ k 109	4 743.70	4 745.30	1.80	T ₁ e 24	4 933.36	4 935.24	-8.89
T ₂ k 194	4 558.02	4 560.38	8.52	T ₂ k 108	4 745.30	4 746.96	2.31	T ₁ e 23	4 935.24	4 936.62	-8.67
T ₂ k 193	4 560.38	4 563.40	8.26	T ₂ k 107	4 746.96	4 750.12	2.75	T ₁ e 22	4 936.62	4 938.12	-7.94
T ₂ k 192	4 563.40	4 565.90	7.35	T ₂ k 106	4 750.12	4 752.60	1.70	T ₁ e 21	4 938.12	4 940.02	-7.33
T ₂ k 191	4 565.90	4 570.16	6.96	T ₂ k 105	4 752.60	4 755.10	1.33	T ₁ e 20	4 940.02	4 941.84	-7.13
T ₂ k 190	4 570.16	4 571.96	4.80	T ₂ k 104	4 755.10	4 759.68	0.93	T ₁ e 19	4 941.84	4 943.18	-6.84
T ₂ k 189	4 571.96	4 573.66	5.11	T ₂ k 103	4 759.68	4 762.38	-1.54	T ₁ e 18	4 943.18	4 944.38	-6.08
T ₂ k 188	4 573.66	4 575.22	5.51	T ₂ k 102	4 762.38	4 766.70	-2.14	T ₁ e 17	4 944.38	4 945.98	-5.17
T ₂ k 187	4 575.22	4 576.78	6.06	T ₂ k 101	4 766.70	4 769.02	-4.35	T ₁ e 16	4 945.98	4 947.84	-4.67
T ₂ k 186	4 576.78	4 578.32	6.60	T ₂ k 100	4 769.02	4 771.86	-4.57	T ₁ e 15	4 947.84	4 949.56	-4.42

续表1

层位 编号	顶深 (m)	底深 (m)	累计偏差 (m)	层位 编号	顶深 (m)	底深 (m)	累计偏差 (m)	层位 编号	顶深 (m)	底深 (m)	累计偏差 (m)
T ₂ k 185	4 578.32	4 580.14	7.17	T ₂ k 99	4 771.86	4 776.34	-5.30	T ₁ e 14	4 949.56	4 951.00	-4.04
T ₂ k 184	4 580.14	4 581.92	7.4 5	T ₂ k 98	4 776.34	4 779.36	-7.68	T ₁ e 13	4 951.00	4 952.54	-3.37
T ₂ k 183	4 581.92	4 584.02	7.78	T ₂ k 97	4 779.36	4 781.90	-8.59	T ₁ e 12	4 952.54	4 954.54	-2.81
T ₂ k 182	4 584.02	4 587.64	7.78	T ₂ k 96	4 781.90	4 784.54	-9.03	T ₁ e 11	4 954.54	4 956.50	-2.70
T ₂ k 181	4 587.64	4 589.98	6.27	T ₂ k 95	4 784.54	4 787.12	-9.56	T ₁ e 10	4 956.50	4 958.72	-2.55
T ₂ k 180	4 589.98	4 592.58	6.04	T ₂ k 94	4 787.12	4 791.02	-10.03	T ₁ e 9	4 958.72	4 960.26	-2.67
T ₂ k 179	4 592.58	4 597.16	5.54	T ₂ k 93	4 791.02	4 793.36	-11.83	T ₁ e 8	4 960.26	4 961.96	-2.10
T ₂ k 178	4 597.16	4 599.74	3.07	T ₂ k 92	4 793.36	4 797.48	-12.06	T ₁ e 7	4 961.96	4 963.74	-1.70
T ₂ k 177	4 599.74	4 603.04	2.59	T ₂ k 91	4 797.48	4 800.14	-14.08	T ₁ e 6	4 963.74	4 965.48	-1.37
T ₂ k 176	4 603.04	4 605.62	1.40	T ₂ k 90	4 800.14	4 802.34	-14.63	T ₁ e 5	4 965.48	4 967.36	-1.01
T ₂ k 175	4 605.62	4 607.80	0.92	T ₁ e 89	4 802.34	4 804.54	-14.73	T ₁ e 4	4 967.36	4 969.18	-0.78
T ₂ k 174	4 607.80	4 612.10	0.85	T ₁ e 88	4 804.54	4 806.74	-14.82	T ₁ e 3	4 969.18	4 971.54	-0.50
T ₂ k 173	4 612.10	4 614.66	-1.35	T ₁ e 87	4 806.74	4 809.04	-14.92	T ₁ e 2	4 971.54	4 973.76	-0.75
T ₂ k 172	4 614.66	4 616.60	-1.80	T ₁ e 86	4 809.04	4 811.26	-15.11	T ₁ e 1	4 973.76	4 975.00	-0.87
T ₂ k 171	4 616.60	4 617.88	-1.64								

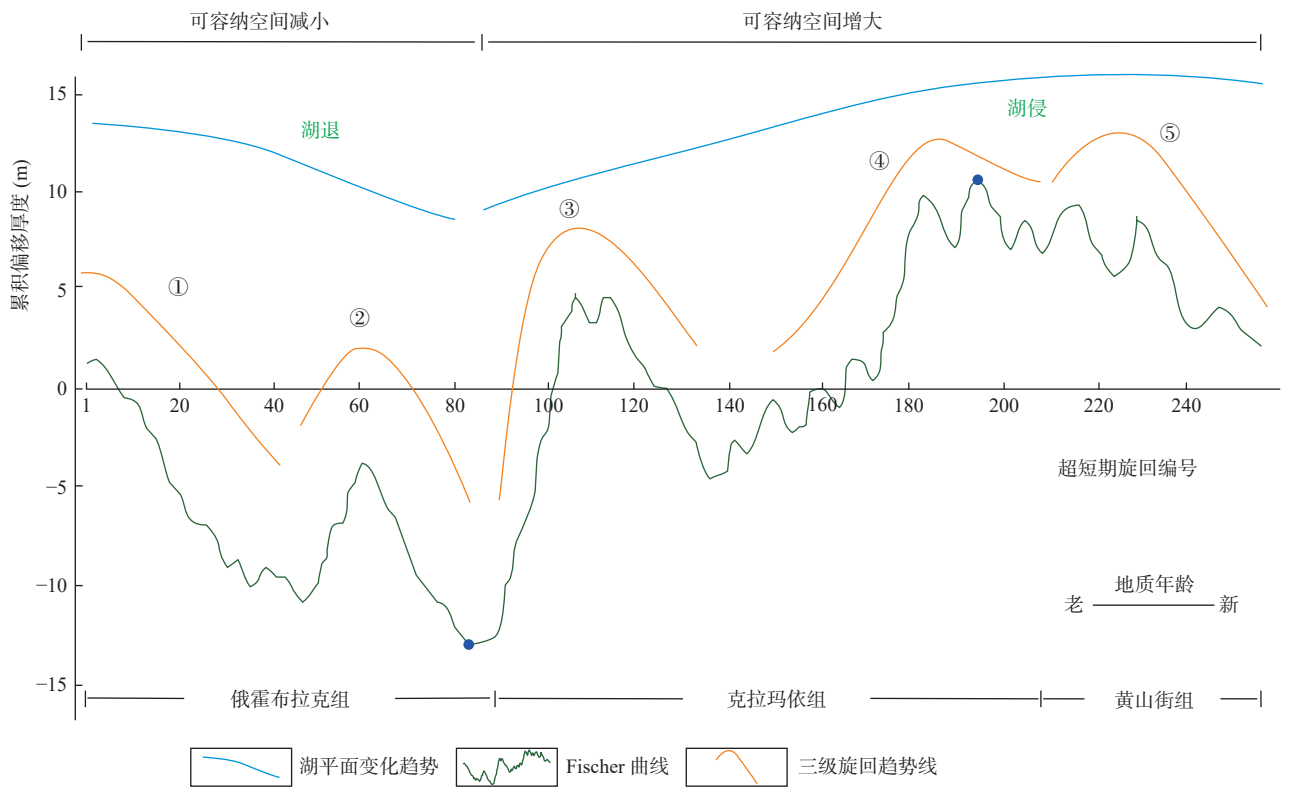


图 6 SL1 井 Fischer 图解分析图
Fig. 6 Fischer plots of Well SL1

雁等(2002)在台盆区,刘辰生(2006)在阿克库勒地区所做相关研究进行综合对比,不难发现各项研究结果具有很好的一致性(图7)。总体上,三叠系沉积期表现为一次大规模的湖退到湖侵的过程,可容纳空间最大值位于克拉玛依组末期,最小值位于俄霍布拉克组末期。俄霍布拉克组早期,塔里木盆地周缘相对稳定,主要以湖相沉积为主,相对湖平面较高,中晚期发生湖退,直到俄霍布拉克组末期,湖平面下降到最低值;克拉玛依组时期,塔北隆起由于较强的风化、剥蚀和搬运作用产生大量碎屑物源,形成较厚的辫状河三角洲河道沉积,而湖平面快速湖侵后又发生一次缓慢湖侵与湖退的过程;三叠纪晚期黄山街组气候湿热,湖平面整体处于高位,湖相沉积的暗色泥岩广泛发育。

将 Fischer 图解曲线投影到研究区内东西向连井沉积相剖面上(图8),可以印证沉积相带垂向演变与湖平面变化曲线的关系。SQ1 时期在垂向剖面上显示,湖平面起始时处于高位,沉积相以深湖-半深湖的

厚层湖泥为主,之后湖平面下降,湖盆范围缩小,湖水变浅,局部发育滩坝;SQ2 时期在湖平面小规模上升期间,湖盆规模扩大,广泛发育粉砂岩,后期湖平面下降过程中,沉积相实现由 SQ1 时期深湖-半深湖到滨浅湖的过渡,湖平面变化与沉积砂体的叠置样式保持一致;SQ3 时期湖平面上升时,湖盆范围扩大,可容纳空间增大,砂体广泛发育,受物源影响,早期自西向东主要发育辫状河三角洲前缘近端-远端,后期高位域发育滨浅湖相沉积;SQ4 时期研究区内湖平面持续上升,湖侵时以辫状河三角洲前缘近端、远端沉积为主,高位湖退时发育滨浅湖滩坝;SQ5 时期短暂湖侵后缓慢湖退,可容纳空间减小,实现由三角洲前缘到滨浅湖的过渡,整体以大面积的湖相为主。湖平面最低位处于 SQ2 时期,而湖平面最高点发生于 SQ4 时期内,在沉积剖面中,湖平面升降曲线与沉积相带的垂向演化基本一致。整体上来看,在垂向上研究区三叠系的沉积演化过程反映了一次完整的湖退到湖侵。

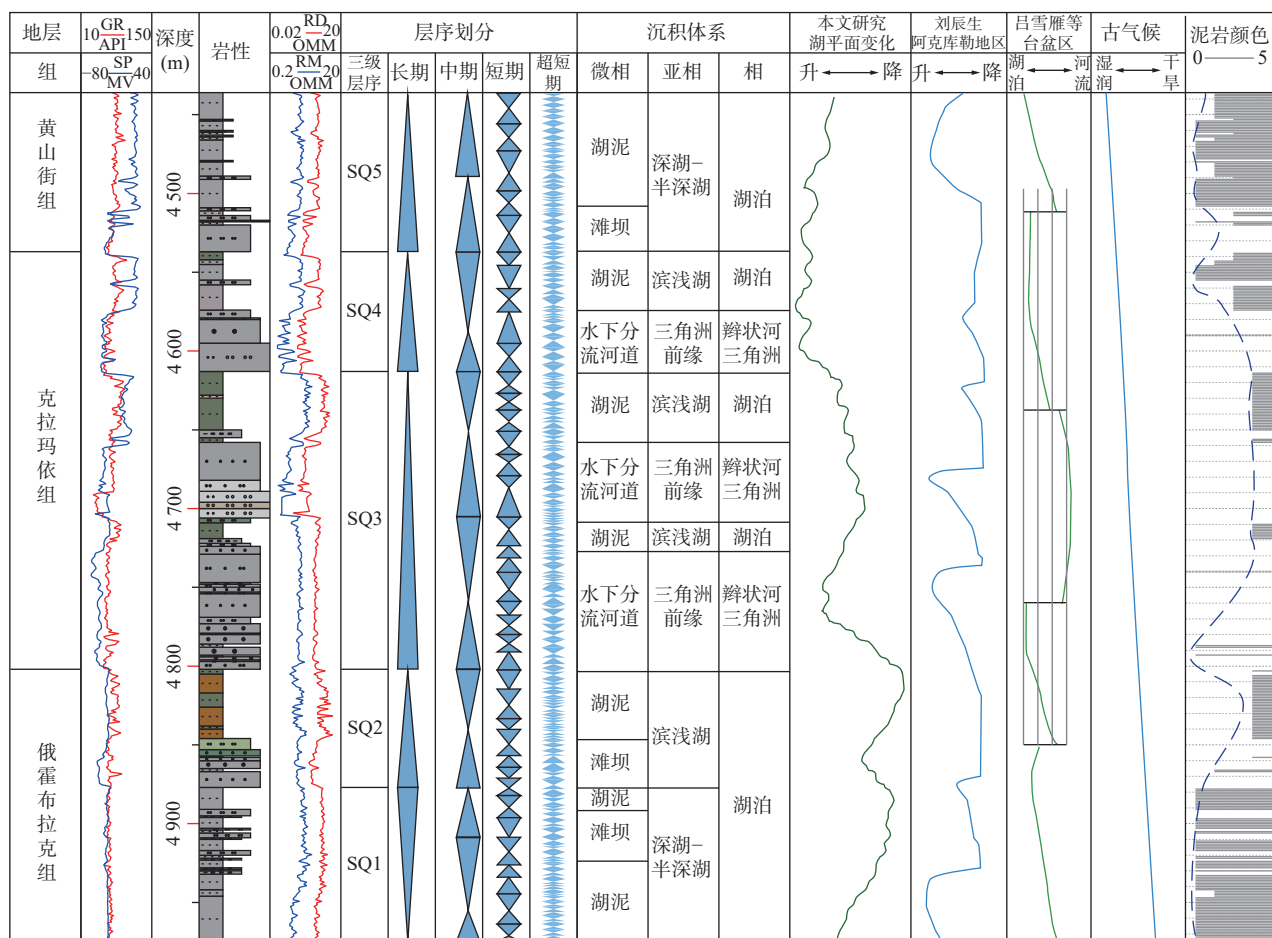


图7 SL井三叠系 Fischer 图解综合柱状图对比分析图

Fig. 7 Synthesis columnar section analysis and comparison of Fischer plots of Well SL1 of Triassic

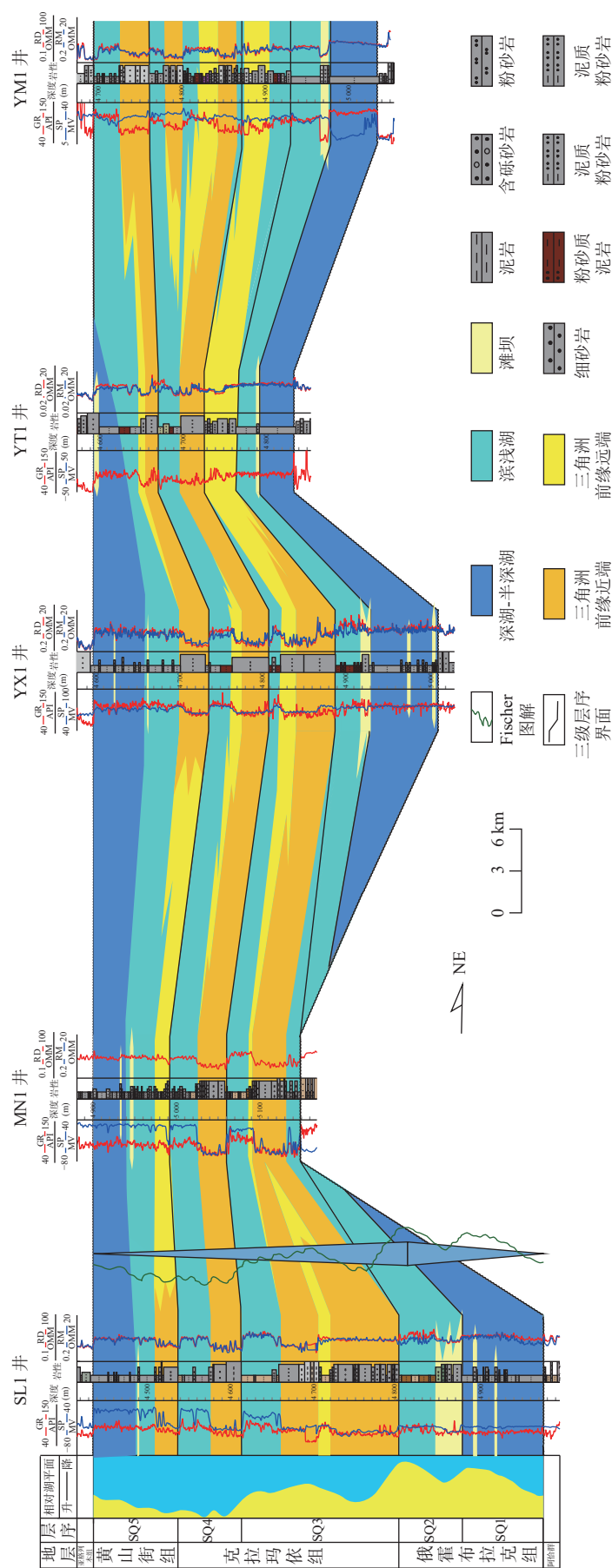


图 8 英买力地区三叠系沉积相剖面图

Fig. 8 Sedimentary facies profile of Triassic in Yingmaili area

4 结论

(1) 基于小波变换定量层序划分的方法, 在英买力地区三叠系分别识别出长期层序 5 个, 中期层序 13 个, 短期层序 62 个, 超短期层序 256 个。其中, 长周期层序与三级层序相对应。

(2) 对超短期层序进行统计, 计算得到的平均厚度累积偏移曲线可以反映相对湖平面的变化趋势。三叠系时期, 相对湖平面的变化呈现大规模的湖退到湖侵的特征, 识别出的 5 个三级层序内部分别存在一次湖侵到湖退。SQ1 时期, 缓慢湖退; SQ2 时期, 短暂湖侵→缓慢湖退; SQ3 时期, 缓慢湖侵→缓慢湖退→低幅缓慢湖侵; SQ4 时期, 快速湖侵→低幅缓慢湖退; SQ5 时期, 短暂湖侵→缓慢湖退。晚期湖平面维持在高水位频繁动荡。

(3) 将湖平面变化曲线投影到综合柱状图上, 并结合连井沉积相进行综合对比分析, 可以验证层序划分的可靠性, 并提高相对湖平面变化曲线的准确性。湖平面升降变化与沉积相在垂向上的演变密切相关, 随湖平面的变化, 沉积相带呈现辫状河三角洲前缘近端、远端与滨浅湖沉积交替演变的特征。

参考文献(References):

- 陈茂山. 测井资料的两种深度域频谱分析方法及在层序地层学研究中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(1): 57-64.
- CHEN Maoshan. Two novel depth-domain frequency spectrum analysis methods for logging data and their application to sequence stratigraphy research[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1999, 34(1): 57-64.
- 崔海峰, 郑多明, 张年春, 等. 英买力地区复合潜山的地层分布及意义[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(5): 1514-1519.
- CUI Haifeng, ZHENG Duoming, ZHANG Nianchun, et al. Stratigraphic Distribution of Complex Buried Hill and Its Significance in the Yingmaili Area[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(5): 1514-1519.
- 崔海峰, 郑多明. 英买力—牙哈地区复式油气藏油气分布规律[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(4): 445-450.
- CUI Haifeng, ZHENG Duoming. Hydrocarbon distribution rule of complex reservoir in Yingmaili-Yaha area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(4): 445-450.
- 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派——高分辨率层序地层学[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 89-97.
- DENG Hongwen. A New School of Thought in Sequence Stratigraphic Studies in U. S. : High-Resolution Sequence Stratigraphy[J]. Oil & Gas Geology, 1995, 16(2): 89-97.
- 董长虹. Matlab 小波分析工具箱与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 20.
- DONG Changhong. Matlab Wavelet Analysis Toolbox and Its Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 20.
- 冯斌, 李华, 何幼斌, 等. 深水等深流沉积中记录的米兰科维奇特性——以陕西富平地区上奥陶统赵老峪组为例[J]. 地球科学与环境学报, 2019, 41(1): 69-82.
- FENG Bin, LI Hua, HE Youbin, et al. Characteristics of Milankovitch Cycles in Deep Water Contourites[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(1): 69-82.
- 顾家裕, 张兴阳. 陆相层序地层学进展与在油气勘探开发中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(5): 484-490.
- GU Jiayu, ZHANG Xingyang. Progress in Continental Sequence Stratigraphy and its Application in Petroleum Exploration and Development[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(5): 484-490.
- 胡书毅, 文玲, 田海芹. 卫城油田卫 81 断块沙四段高分辨率层序地层学研究[J]. 西北地质, 2002, 35(2): 46-54.
- HU Shuyi, WEN Ling, TIAN Haiqin. Study of the high resolution sequence stratigraphy of Sha-4member in Wei-81 fault block, Weicheng oil field[J]. Northwestern Geology, 2002, 35(2): 46-54.
- 黄克难, 詹家祯, 邹义声, 等. 新疆库车河地区三叠系和侏罗系沉积环境及古气候[J]. 古地理学报, 2003, (2): 197-208.
- HUANG Kenan, ZHAN Jiazhen, ZOU Yisheng, et al. Sedimentary Environments and Palaeoclimate of the Triassic and the Jurassic in Kuqa River, Xinjiang[J]. Journal of Palaeogeography, 2003, (2): 197-208.
- 黄少英, 杨文静, 卢玉红, 等. 塔里木盆地天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(10): 1497-1505.
- HUANG Shaoying, YANG Wenjing, LU Yuhong, et al. Geological conditions, resource potential and exploration direction of natural gas in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(10): 1497-1505.
- 纪友亮, 吴胜和, 张锐. 自旋回和异旋回的识别及其在油藏地层对比中的作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 1-6.
- JI Youliang, WU Shenghe, ZHANG Rui. Recognition of Auto-cycle and Allo-cycle and Its Role in Stratigraphic Correlation of Reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(4): 1-6.
- 贾承造. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(3): 177-183.
- JIA Chengzao. Structural Characteristics and Oil/Gas Accumulative Regularity in Tarim Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(3): 177-183.
- 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 320-343.

- JIA Chengzao. Tectonic Characteristics and Petroleum Tarim Basin China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 320-343.
- 康玉柱. 塔里木盆地油气资源潜力及勘探方向[J]. 石油科学通报, 2018, 3(4): 369-375.
- KANG Yuzhu. The resource potential and exploration for oil and gas in the Tarim Basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2018, 3(4): 369-375.
- 李凤杰, 王多云. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组高分辨率层序地层学研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(3): 339-344.
- LI Fengjie, WANG Duoyun. The High-Resolution Sequence Stratigraphic Feature of Yanchang Formation in Xifeng Oilfield, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(3): 339-344.
- 李相博, 郭彦如, 刘化清, 等. 浅谈小波分析在鄂尔多斯盆地延长组层序地层划分中的应用[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(6): 779-782.
- LI Xiangbo, GUO Yanru, LIU Huaqing, et al. The Application of Wavelet Analysis in Sequence Stratigraphic Subdivision of the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(6): 779-782.
- 李曰俊, 杨海军, 张光亚, 等. 重新划分塔里木盆地塔北隆起的次级构造单元[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2466-2478.
- LI Yuejun, YANG Haijun, ZHANG Guangya, et al. Redivision of the tectonic units of Tabei Rise in Tarim Basin, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2466-2478.
- 林孝先, 侯中健. 松辽盆地中部扶余油层相对湖平面变化定量研究[J]. 地层学杂志, 2014, 38(2): 170-180.
- LIN Xiaoxian, HOU Zhongjian. A Quantitative Analysis Research on Relative Lacustrine Level Changes in the Lower Cretaceous Fuyu Reservoir in the Songliao Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2014, 38(2): 170-180.
- 刘波. 基准面旋回与沉积旋回的对比方法探讨[J]. 沉积学报, 2002, 20(1): 112-117.
- LIU Bo. Discussion on the Correlation Methods of Base-level Cycle and Sedimentary Cycle Sequence[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(1): 112-117.
- 刘辰生. 塔里木盆地阿克库勒地区三叠系层序地层学与沉积相研究[D]. 湖南: 中南大学, 2006.
- LIU Chensheng. Study of Sequence Stratigraphy and Sedimentary Facies of Triassic System of Akekule Area in Tarim Basin[D]. Hunan: Central South University, 2006.
- 刘亚雷, 胡秀芳, 王道轩, 等. 塔里木盆地三叠纪岩相古地理特征[J]. 断块油气田, 2012, 19(6): 696-700.
- LIU Yalei, HU Xiufang, WANG Daoxuan, et al. Characteristics of Triassic lithofacies palaeogeography in Tarim Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19(6): 696-700.
- 刘景彦, 曲爱英, 刘元贵, 等. 辽河东部凹陷红星地区古近系高精度层序地层和沉积体系研究[J]. 西北地质, 2008, 41(2): 73-80.
- LIU Jingyan, QU Aiyang, LIU Yuanguai, et al. The High-Resolution Sequence Stratigraphy and Depositional System Study of Eocene Hongxing Area, Eastern Depression of Liaohe[J]. North-western Geology, 2008, 41(2): 73-80.
- 吕雪雁, 朱筱敏, 申银民, 等. 塔里木盆地台盆区三叠系层序地层研究和有利勘探区预测[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 32-35.
- LÜ Xueyan, ZHU Xiaomin, SHEN Yinmin, et al. The Triassic Sequence Stratigraphy and the Prediction of the Favourable Exploration Targets in Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(1): 32-35.
- 马瑶, 李文厚, 王若谷, 等. 鄂尔多斯盆地子洲地区上古生界沉积相及演化特征[J]. 地质科学, 2015, 50(1): 286-302.
- MA Yao, LI Wenhui, WANG Ruogu, et al. Sedimentary facies and its evolution of the Upper Palaeozoic in Zizhou area of Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(1): 286-302.
- 孟祥化, 葛铭. 中朝板块层序·事件·演化: 天文周期的沉积响应和意义[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- MENG Xianghua, GE Ming. Sequence stratigraphy and event evolution of the Sino Korean plate: sedimentary response and significance of the astronomical cycle[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- 钱利军, 时志强, 欧莉华. 二叠纪—三叠纪古气候研究进展——泛大陆巨型季风气候: 形成、发展与衰退[J]. 海相油气地质, 2010, 15(3): 52-58.
- QIANG Lijun, SHI Zhiqiang, OU Lihua. Research Advances in Permian-Triassic Paleoclimate: Formation, Development and Decline of Pangaea Megamonsoon[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(3): 52-58.
- 苏德辰, 李庆谋, 罗光文, 等. Fischer 图解及其在旋回层序研究中的应用——以北京西山张夏组为例[J]. 现代地质, 1995, (3): 279-283.
- SU Dechen, LI Qingmou, LUO Guangwen, et al. Method for Drawing Fischer Plots and Its Applications on Studying Cyclic Sequences: Example from Middle Cambrian Zhangxia Formation, Western Hills of Beijing[J]. Journal of Graduate School, China University of Geosciences, 1995, (3): 279-283.
- 唐武, 仲米虹, 田建华, 等. 塔北地区黄山街组湖盆滩坝砂体沉积模式[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(3): 299-303.
- TANG Wu, ZHONG Mihong, TIAN Jianhua, et al. Depositional Model for Lacustrine Beach Bars of Huangshanjie Formation in Tabei Area, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(3): 299-303.
- 田军, 王清华, 杨海军, 等. 塔里木盆地油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 272-282.
- TIAN Jun, WANG Qinghua, YANG Haijun, et al. Petroleum Exploration History and Enlightenment in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 272-282.
- 王熠哲, 吴朝东, 马健, 等. 准噶尔盆地白垩纪——新近纪地层颜色韵律与古环境和古气候演化[J]. 古地理学报, 2019, 21(3): 451-468.
- WANG Yizhe, WU Chaodong, MA Jian, et al. Strata color rhythm of the Cretaceous-Neogene and evolution of palaeoenvironment and palaeoclimate in Junggar Basin[J]. 2019, 21(3): 451-468.

- 王志坤, 王多云, 宋广寿, 等. 测井信号小波分析在高分辨率层序地层划分中的应用[J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29(6): 17-20.
- WANG Zhikun, WANG Duoyun, SONG Guangshou, et al. Application of Wavelet Analysis to Sequence Stratigraphic Division of High Resolution Sequence Stratigraphy[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2005, 29(6): 17-20.
- 温立峰, 吴胜和, 岳大力, 等. 胜二区沙二段 7 砂组地层基准面旋回与沉积微相研究[J]. 中国地质, 2010, 336(1): 144-151.
- WEN Lifeng, WU Shenghe, YUE Dali, et al. Stratigraphic base-level cycles and sedimentary microfacies of Es₂₋₇ Formation in the Shengtuo Oilfield[J]. Geology in China, 2010, 336(1): 144-151.
- 吴艳宏, 李世杰. 湖泊沉积物色度在短尺度古气候研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2004, (5): 789-792.
- WU Yanhong, LI Shijie. Significance of Lake Sediment Color for Short Time Scale Climate Variation[J]. Advances in Earth Science, 2004, (5): 789-792.
- 夏辉, 林畅松, 刘永福, 等. 塔里木盆地英买力地区白垩系舒善河组相对湖平面变化[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(11): 1579-1589.
- XIA Hui, LIN Changsong, LIU Yongfu, et al. A Research on Relative Lacustrine Level Changes of Cretaceous Shushanhe Formation in the Yingmaili Area of Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(11): 1579-1589.
- 杨小萍, 刘桂侠, 马文杰. 层序地层学研究现状及发展趋势[J]. 西北地质, 2001, 34(2): 16-20.
- YANG Xiaoping, LIU Guixia, MA Wenjie. Current situation and developing tendency of sequence stratigraphy[J]. Northwestern Geology, 2001, 34(2): 16-20.
- 余继峰, 李增学. 测井数据小波变换及其地质意义[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(3): 336-339.
- YU Jifeng, LI Zengxue. Wavelet Transform of Logging Data and Its Geological Significance[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(3): 336-339.
- 余瑜, 林良彪, 蓝彬桓, 等. 基于小波分析的层序地层划分及识别——以川东地区上二叠统龙潭组为例[J]. 西北地质, 2018, 51(4): 43-52.
- YU Yu, LIN Liangbiao, LAN Binheng, et al. Sequence Stratigraphic Division and Recognition Based on Wavelet Analysis: Example from the Upper Permian Longtan Formation in Eastern Sichuan Basin[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(4): 43-52.
- 翟永红. 用 Fischer 图解研究山西临汾中奥陶世马家沟组旋回层序[J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 18(2): 128-133.
- ZHAI Yonghong. The Application of Fischer Plots to the Analysis of Cycles in Middle Ordovician Majiagou Formation in Linfen, Shanxi Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1999, 18(2): 128-133.
- 张荣茜. 塔北隆起西南部白垩系沉积层序演化及有利储层相带预测[D]. 北京: 中国地质大学, 2013: 47-70.
- ZHANG Rongqian. Deposition and Stratigraphic Sequence Development and Evolution of Cretaceous of the Southwestern Tabei Uplift and Potential Reservoir Prediction[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013: 47-70.
- 张坦, 张昌民, 瞿建华, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组相对湖平面升降规律研究[J]. 沉积学报, 2018, 36(4): 684-694.
- ZHANG Tan, ZHANG Changmin, QU Jianhua, et al. A Research on Relative Lacustrine Level Changes of the Lower Triassic Baikouquan Formation in Mahu Sag of Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(4): 684-694.
- 赵军龙, 谭成仟, 李娜, 等. 小波分析在高分辨率层序地层研究中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(1): 90-94.
- ZHAO Junlong, TAN Chengqian, LI Na, et al. Application of Wavelet Analysis in High Resolution Sequence Analysis[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(1): 90-94.
- 赵伟, 邱隆伟, 姜在兴, 等. 小波分析在高精度层序单元划分中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(2): 18-22.
- ZHAO Wei, QIU Longwei, JIANG Zaixing, et al. Application of wavelet analysis in high-resolution sequence unit division[J]. Journal of China University of Petroleum, 2009, 33(2): 18-22.
- 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. 沉积学报, 2001, 16(2): 249-255.
- ZHENG Rongcai, PENG Jun, WU Zhaorong. Grade Division of Base-Level Cycles of Terrigenous Basin and Its Implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 16(2): 249-255.
- 郑荣才, 吴朝容, 叶茂才. 浅谈陆相盆地高分辨率层序地层研究思路[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(3): 241-244.
- ZHENG Rongcai, WU Zhaorong, YE Maocai. Research Thinking of High-Resolution Sequence Stratigraphy about a Terrigenous Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2000, 27(3): 241-244.
- 周统顺. 中国三叠纪植物群、植物地理分区及古气候[J]. 地层古生物论文集, 1999, (00): 212-224.
- ZHOU Tongshun. Triassic Floras, Photogeographic Divisions and Palaeoclimate in China[J]. Professional Papers of Stratigraphy and Palaeontology, 1999, (00): 212-224.
- Cross T A, Lessenger M A. Sediment volume partitioning: rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation[J]. Predictive High Resolution Sequence Stratigraphy: Norwegian Petroleum Society, Special Publication, 1998, 8: 171-196.
- Fischer A G. The Lofer cyclothems of the alpine Triassic[J]. Kansas Geological Survey Bulletin, 1964, 169(1): 107-149.
- Koerschner W W, Read J F. Field and modeling studies of Cambrian carbonate cycles, Virginia Appalachians[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1989, 59: 654-687.
- Osleger D A, Read J F. Relation of eustasy to stacking patterns of meter-scale carbonate cycles, Late Cambrian, U S A[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1961, 61: 1225-1252.