

doi: 10.12029/gc20200906001

王茜, 黄永建, 张治锋, 王长红, 李祥, 刘伟. 2024. 上扬子地区新地 1 井五峰组—龙马溪组下段高分辨化学层序地层学与页岩气关系分析[J]. 中国地质, 51(4): 1355–1367.

Wang Qian, Huang Yongjian, Zhang Zhifeng, Wang Changhong, Li Xiang, Liu Wei. 2024. High resolution chemical sequence stratigraphy analysis of Wufeng Formation and Lower Longmaxi Formation in the Well Xindi 1, Upper Yangtze region[J]. Geology in China, 51(4): 1355–1367(in Chinese with English abstract).

上扬子地区新地 1 井五峰组—龙马溪组下段高分辨 化学层序地层学与页岩气关系分析

王茜¹, 黄永建², 张治锋², 王长红², 李祥², 刘伟³

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610082)

摘要:【研究目的】本文旨在综合地球化学、高分辨层序地层学理论和方法, 探索厚层页岩地层划分对比的化学层序地层新方法, 建立上扬子地区新地 1 井五峰组—龙马溪组下段高精度化学层序地层格架, 为研究区页岩气勘探提供科学依据。【研究方法】本研究利用上扬子地区新地 1 井的岩心、测井及样品分析测试资料, 优选出陆源输入强度相关元素组合、自生沉淀强度相关元素组合、有机质吸附及还原强度相关元素组合作为指标体系, 进而划分四级化学层序地层。【研究结果】新地 1 井五峰组划分为 LCW 层序, 龙马溪组下段自下而上细分为 MCL1-1、MCL1-2、MCL1-3、MCL1-4 四级层序。陆源输入强度相关元素组合总量在层序界面附近相对较高, 而最大海泛面附近相对较低; 自生沉淀强度及有机质吸附及还原强度相关元素组合总量在层序界面附近相对较低, 而在最大海泛面附近相对较高。【结论】不同地化指标体系代表了不同的成因意义, 陆源碎屑输入强度和自生沉淀强度越小、有机质吸附及还原强度越大的沉积环境有利于页岩中有机质富集, 其旋回性变化对区域海平面变化有相应响应, 具有区域一致性, 是区域地层对比的重要依据和有力手段。

关键词: 上扬子地区; 新地 1 井; 五峰组; 龙马溪组; 化学层序地层学; 地质调查工程

创新点: 探索了化学层序地层方法在页岩层段开展等时精细划分对比的新思路, 建立了基于不同成因的地球化学元素组合为指标体系的化学层序地层理论模型。

中图分类号: P618.13; P539.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)04-1355-13

High resolution chemical sequence stratigraphy analysis of Wufeng Formation and Lower Longmaxi Formation in the Well Xindi 1, Upper Yangtze region

WANG Qian¹, HUANG Yongjian², ZHANG Zhifeng², WANG Changhong², LI Xiang², LIU Wei³

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610082, Sichuan, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

收稿日期: 2020-09-06; 改回日期: 2020-12-13

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05029-001)资助。

作者简介: 王茜, 女, 1990 年生, 博士, 主要从事沉积学、地球化学研究; E-mail: 944085175@qq.com。

通讯作者: 黄永建, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 主要从事沉积学、地球化学研究; E-mail: haungyj@cugb.edu.cn。

[Objective] The purpose of this paper is to synthesize the theories and methods of comprehensive geochemistry and high resolution sequence stratigraphy. The high-precision chemical sequence stratigraphic framework of Wufeng Formation and Lower Longmaxi Formation in Xindi 1 Well, Upper Yangtze region was established to provide scientific basis for shale gas exploration in the study area. **[Methods]** We use the core, logging and sample analysis data of Well Xindi 1 in Upper Yangtze region to optimize the indicators system which can divide the chemical sequence stratigraphic. The indicators system contains three elements assemblages: the terrigenous input intensity(TII), the autogenetic precipitation intensity(API), and the organic matter adsorption and deoxidation intensity(ODI). Then the fourth-order chemical sequence stratigraphy is divided by these three elements assemblages. **[Results]** Based on the above indicators system, Wufeng Formation of Liutang section is divided into LCW sequence, the lower part of Longmaxi Formation is divided into MCL1-1, MCL1-2, MCL1-3, MCL1-4 fourth-order sequences upwardly. The total amount of elements assemblages related to TII is relatively high near the sequence boundary, but relatively low near the maximum oceanic flooding surface. However, the total amount of element assemblages related to API and ODI are generally lower near the sequence boundary and higher near the maximum flooding surface. **[Conclusions]** Representing different genetic significance, the cyclic variation of element assemblages is respond to regional sea level change, and has regional consistency. The sedimentary environment with smaller TII, smaller API and larger ODI is conducive to organic matter enrichment in shale. So it can be used as the basis for regional stratigraphic correlation.

Key words: Upper Yangtze region; Well Xindi 1; Wufeng Formation; Longmaxi Formation; chemical sequence stratigraphy; geological survey engineering

Highlights: A new idea of chemical sequence stratigraphy in the development of isochronous fine division and correlation of shale segments is explored. A theoretical model of chemical sequence stratigraphy based on the combination of geochemical elements of different origin is established.

About the first author: WANG Qian, female, born in 1990, doctor, engaged in sedimentology and geochemistry; E-mail: 944085175@qq.com.

About the corresponding author: HUANG Yongjian, male, born in 1974, doctor, associate professor, engaged in sedimentology and geochemistry; E-mail: haungyj@cugb.edu.cn.

Fund support: Supported by National Science and Technology Major Project (No.2016ZX05029-001).

1 引 言

上扬子地区是近年来页岩气研究和勘探的热点地区,上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组是重点层系(梁兴等, 2016; 马新华和谢军, 2018; 马永生等, 2018; 邱振等, 2019; 杨平等, 2019)。经过 10 余年页岩气勘探和研究,发现了威远、长宁—昭通、涪陵、泸州、东溪—丁山、叙永、巫溪等重要勘探潜力区(赵全民等, 2019; 梁兴等, 2020)。到 2018 年 4 月五峰组—龙马溪组页岩气累计探明地质储量超 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (邱振等, 2019);同时,在地层特征、空间分布、岩相古地理特征、页岩气富集规律等方面取得了丰富的研究成果(Pan et al., 2015; 梁兴等, 2016; 郭旭升, 2017; 陆扬博等, 2017; 王玉满等, 2017; 马新华和谢军, 2018; 马永生等, 2018; 邱振等, 2019; 杨平等, 2019; 姜振学等, 2020)。

龙马溪组分布广,厚度多超过 200 m(郭旭升,

2017; 邱振等, 2019; 蒲泊伶等, 2020),根据岩性、地球物理资料很难对地层进一步细分,亟需建立可操作的高精度地层格架,从而准确识别和厘定页岩气有利层段。由于地球化学指标的普遍性和易得性,及其对沉积环境条件变化的敏感性,使得高精度化学地层学研究成为龙马溪组研究的重要课题。

等时地层格架的建立是区域性页岩气富集规律及甜点预测的重要基础。层序地层单元界面划分的关键理论依据是海平面(基准面)升降变化的区域性,乃至全球的一致性(Haq et al., 1988; Posamentier and Vail, 1988; Haq and Schutter, 2008; Catuneanu et al., 2009)。基准面升降及其转折形成的地质记录在地球物理、岩性、矿物、地球化学、有机质富集等方面有不同程度的响应(Posamentier and Vail, 1988; Catuneanu et al., 2009)。对于岩性较为单一的泥页岩层系高精度层序地层学分析,地球物理和岩性资料因分辨率低而很难满足要求,需要利用对沉积环

境较为敏感的地球化学资料开展化学层序地层学分析。

针对中国南方五峰组—龙马溪组泥页岩,国内众多学者开展了层序地层学研究,但在层序地层单元的认识上存在一定争议:李一凡等(2012)将龙马溪组划分为3个三级层序,各三级层序进一步分出海侵体系域(TST)和高位体系域(HST);Chen et al.(2015)和Wang et al.(2015)将龙马溪组划分为2个三级层序,Chen et al.(2015)把龙马溪组下段层序进一步分为TST、早期高位体系域(EHST)和晚期高位体系域(LHST);王同等(2015)把五峰组划分为一个三级层序,龙马溪组划分2个三级层序,每个三级层序细分为TST和海退体系域(RST)。郭旭升(2017)把五峰组划分为一个由TST和HST组

成三级层序(SQ1),龙马溪组划分2个三级层序(SQ2、SQ3),其中,SQ2细分为TST、EHST、LHST,SQ3细分为LST(低位体系域)、TST、HST。上述层序地层划分主要依据是地震、测井、宏观岩性资料,对于以泥页岩为主的五峰组—龙马溪组,资料分辨率较低,很可能是造成层序地层划分差异的重要原因。当地层对比研究分歧较大时,页岩气有利地层将很难准确判别,进而对页岩气甜点预测及产量评估有较大影响。

2 区域地质背景及样品测试方法

新地1井位于四川盆地川西南隆起构造带五角堡背斜北西翼,宜宾西偏南约60 km(图1),由老到新连续揭露了上奥陶统宝塔组、临湘组、五峰组,

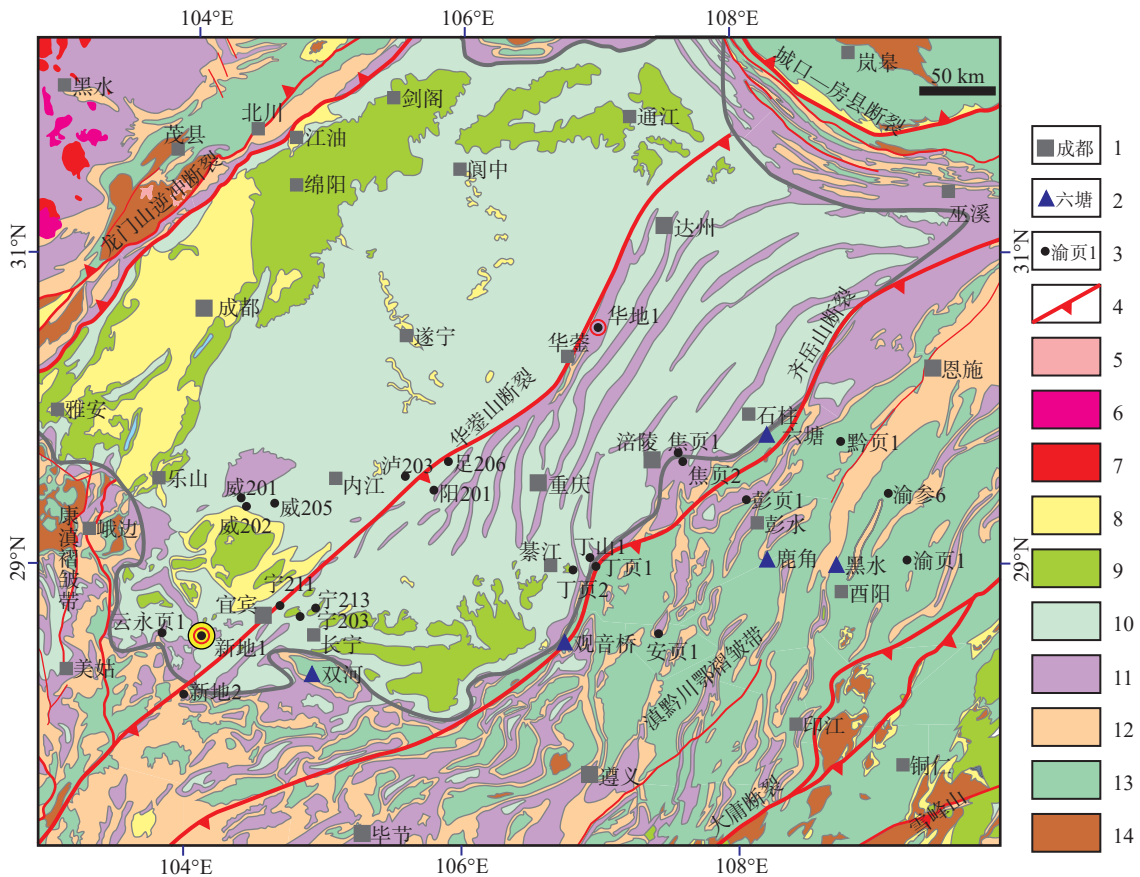


图1 区域地质简图及新地1井位置

1—城镇;2—剖面位置及名称;3—井位及井名;4—逆冲断裂;5—新生代侵入岩;6—侏罗纪侵入岩;7—三叠纪侵入岩;8—新生代;9—白垩系;10—侏罗系;11—三叠系;12—上古生界;13—下古生界;14—前寒武系

Fig.1 Regional geological map and location of the Well Xindi 1

1—City; 2—Section location and name; 3—Well location and name; 4—Thrust faults; 5—Cenozoic intrusive rock; 6—Jurassic intrusive rock; 7—Triassic intrusive rock; 8—Cenozoic; 9—Cretaceous; 10—Jurassic; 11—Triassic; 12—Upper Paleozoic; 13—Lower Paleozoic; 14—Precambrian

志留系龙马溪组、石牛栏组,下二叠统梁山组、中统栖霞组、茅口组,上覆第四系浮土碎石。新地 1 井五峰组—龙马溪组揭露完整,且连续取心,为开展高分辨化学层序地层学研究提供了良好条件。研究过程中,对岩心进行了详细观察描述,系统采样 88 件。按照高精度化学地层学研究要求,一般采样间距为 0.25 m,实际取样过程中,在砂质成分较高的层位适当放宽了采样间距,最大采样间距 3.08 m,平均采样间距 1.38 m。进行了矿物学、地球化学测试,样品的矿物学分析采用薄片鉴定和 X 衍射分析相结合的方法,主量和微量元素采用波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF)测定,获得了高分辨化学层序地层学研究的基础数据。

3 数据处理、数据分析及元素组合优选

3.1 数据处理

数据处理包括零值处理、异常值处理和数据变换。

3.1.1 零值处理

数据中的零值(缺测值)并非真实零值,是由于样品中某些化学元素含量小于检测仪器最小探测值造成的缺测值(Craigie, 2018; Zhai et al., 2019)。零值的存在对参数评价,数据结构分析具有重要影响,甚至有时会破坏各成分或变量之间的真实关系,尤其不能进行数据的对数变换(Martín-Fernández et al., 2003, 2005),因此首先需要处理数据中的零值。

处理数据中零值的方法主要有相关变量校正法(Martín-Fernández et al., 2003, 2005; Palarea-Albaladejo et al., 2007)、最大期望算法(Palarea-Albaladejo and Martín-Fernández, 2008; Zhai et al., 2019)、经验值法(Sandford et al., 1993)。本文采用相关变量校正法,即根据测得值计算与其他元素的相关性,选择相关系数高、无缺测值的元素建立相关关系,计算相关缺测值,用计算出的缺测值乘以给定系数得出合理值从而替代缺测值。

3.1.2 异常值处理

异常值可能会对统计计算结果产生明显影响,尤其是基于协方差的计算(Pison et al., 2003; Filzmoser and Hron, 2008)。处理异常值一般采用多元方法。

最普遍采用的多元分析方法都假设变量数值为正态或对数正态分布(Reiman and Filmoser, 1999)。本文经零值处理后的数据未发现明显的异常值。

3.1.3 数据变换

沉积岩(物)中的元素富集机制主要有 4 种:①陆源碎屑输入,②矿物自生沉淀或结晶,③生物作用富集,以及④海底热液(火山)输入(程文斌等, 2008; 李关清等, 2014)。通过样品实测所获得的元素地球化学数据是上述 4 种机制差异综合作用的结果,有的机制处于主导地位,有的机制处于次要地位。数据变换的目的是削弱次要信息,放大有效主导信息。泥页岩层系化学地层学研究中,数据变换一般采用元素 AI-标准化变换和元素富集系数变换(程文斌等, 2008; Pearce et al., 2010; Sano et al., 2013; 李关清等, 2014; Ratcliffe et al., 2015)。

由于与古海洋环境关系密切,自生沉淀矿物和生物作用富集指示性元素数据需要去除或削弱陆源碎屑输入的影响。大量研究表明, AI 元素主要来自陆源碎屑矿物,是陆源碎屑的指标性元素,采用 AI-标准化能够明显削弱陆源碎屑输入的影响,明显放大非陆源输入元素(自生沉淀矿物和生物作用富集指示性元素)信息的相对强度(Calvert and Pedersen, 1993; Turgeon and Brumsack, 2006; 程文斌等, 2008; 李关清等, 2014; Ratcliffe et al., 2015)。

计算公式: AI-标准化值=元素/AI

元素的富集系数(EF 元素)是指任一泥页岩样品中某一元素的 AI-标准化值与世界平均页岩同一元素 AI-标准化值的比值(Wedepohl, 1991; Li and Schoonmaker, 2003; 李关清等, 2014)。

计算公式: EF 元素=(元素/AI)_{样品}/(元素/AI)_{AS}, 式中 AS 为世界平均页岩。

由公式可知, EF 元素值等于 1, 该元素的富集程度与世界平均页岩相同; EF 元素值小于 1, 该元素的富集程度比世界平均页岩亏; EF 元素值大于 1, 该元素的富集程度比世界平均页岩富。

3.2 数据分析

沉积岩地球化学元素是解释原始沉积物和环境条件的重要指标(Li and Schoonmaker, 2003; Tribovillard et al., 2006; Craigie, 2018; Zhai et al., 2019)。前人的研究结果(表 1)表明, AI、K 与陆源长石、黏土矿物有关, Ti 与陆源重矿物有关。Ca、

表 1 元素与矿物的亲缘关系 (据 Craigie, 2018; Zhai et al., 2019 修改)

Table 1 Genetic relationship between elements and minerals (modified from Craigie, 2018; Zhao et al., 2019)

元素	相关矿物	主要成因意义
Si	石英, 其他硅酸盐	陆源或自生
Al、Ga	主要是黏土矿物, 少量与长石有关	陆源
K、Rb	钾长石、云母和黏土矿物 (特别是伊利石)	陆源
Cs、Sc	黏土矿物和长石	陆源
V	主要是黏土矿物。V 在缺氧条件下吸附在黏土矿物上	还原
Ca	主要是方解石和白云石, 也与石膏和硬石膏有关, 少量与蒙脱石和斜长石有关	自生为主
Mg	主要是白云石、方解石和/或黏土矿物 (尤其是绿泥石)	自生为主
Fe、Mn	各种黏土和碳酸盐矿物以及黄铁矿	陆源或自生
Na	主要是斜长石, 但有些钠与石盐和/或黏土矿物 (如蒙脱石) 有关	陆源或自生
Ti、Ta、Nb	钛磁铁矿、磁铁矿、钛铁矿、金红石、锐钛矿和/或闪锌矿	陆源
Th	重矿物, 特别是独居石、锆石和磷灰石	陆源
REE	轻稀土元素在黏土矿物和长石中最为丰富, 而重稀土元素则存在于重矿物中	陆源
U	重矿物和有机物, 还原环境	陆源或还原
Cr	重矿物, 如铬尖晶石	陆源
Zr、Hf	锆石	陆源
P	生物磷、含磷重矿物 (磷灰石和独居石), 少量磷与碳酸盐和黏土矿物有关	自生
Zn、Ni、Mo、Co、Cu	黄铁矿、氢氧化铁、碳酸盐和/或黏土矿物	自生或陆源
Ba	碳酸盐, 如重晶石	自生
Sr	长石、黏土矿物、碳酸盐	陆源或自生

Sr、Ba 与碳酸盐自生沉淀有关, P 与磷酸盐沉淀有关。V、Ni、Mo 都可在局限海条件下富集, 但 Mo 的富集需要相对平静海洋环境, 而 V、Ni 的富集只需要缺氧条件 (Li and Schoonmaker, 2003; Tribovillard et al., 2006; Ramkumar, 2015; Craigie, 2018; Zhai et al., 2019)。

新地 1 井五峰组—龙马溪组样品检出矿物有石英、长石、方解石、黏土矿物、黄铁矿, 检出主量元素氧化物有 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、K₂O、Na₂O、MnO、TiO₂, 微量元素有 V、Cr、Ni、Zn、Cu、Ba、P、As、Pb、Sr、S、Cl。石英既有陆源碎屑成因的, 也有化学、生物成因的; 微斜长石、斜长石、伊利石、绿泥石主要是陆源成因; 方解石、白云石、黄铁矿为化学和生物成因的。与石英具有良好正相关性的 SiO₂ 化学地层学意义不明确, 因为既可能是陆源碎屑石英的响应, 也可能是化学和生物成因的石英的响应, 这两类成因的石英化学地层意义截然不同。陆源成因主要矿物是黏土矿物、长石, 与其明显正相关的 Al₂O₃、K₂O、TiO₂ 是陆源供应强度的响应。与化学和生物成因的主要矿物方解石、白云石、黄铁矿呈明显正相关的 CaO、MnO、MgO 等是化学和生物沉积作用的反映。黏土矿物与陆源输入标志性元素 Al 相关性最强 (R²=0.913), 方解石与自生沉淀标志性元素 Ca 相关系数最大 (R²=

0.926), 总有机碳含量 (TOC) 与有机质吸附和还原强度指标性元素 V、Ni 的相关系数最高 (R² 分别为 0.661、0.648)。

3.3 元素组合优选

利用 SPSS (Statistical Product and Service Solutions) 软件对新地 1 井主量和微量元素进行了相关分析、主成分分析、聚类分析等多元统计分析。根据分析结果, 从 20 余项元素中筛选出: ①陆源输入强度相关元素组合: Al、K、Fe、Ti; ②自生沉淀强度相关元素组合: Ca、Mg、Mn、Sr; ③有机质吸附及还原强度相关元素组合: V、Ni、Ba、Zn。通常, 同一成因意义的元素组合具有相关分析结果相关性强、主成分分析结果载荷值高、聚类分析结果欧氏距离值小等特征 (Tribovillard et al., 2006; Ramkumar, 2015; Craigie, 2018; Zhai et al., 2019)。新地 1 井五峰组—龙马溪组下段主量、微量元素相关分析结果见表 2, 主成分分析结果见表 3 和表 4, 聚类分析结果见图 2。

Al 是陆源输入标志性元素。在元素相关分析结果中, Al 与 K、Fe、Ti、Ba 的相关系数分别为 0.96、0.92、0.90、0.67, Ba 与 TiO₂ 的相关系数为 0.86 (表 2)。在主量元素主成分分析结果中, Al₂O₃、K₂O、Fe₂O₃、TiO₂ 在主成分 1 中的载荷分别为 0.972、0.974、0.915、0.915 (表 3); 在微量元素主成

表 2 新地 1 井五峰组—龙马溪组下段元素相关系数 (R^2) 数据表

	Al	Fe	K	Mg	Ti	Zr	Ca	Na	Mn	V	Cr	Ni	Zn	Cu	Si	Ba	P	As	Pb	Sr	S	Cl	
Al	1.00																						
Fe	0.92	1.00																					
K	0.96	0.84	1.00																				
Mg	0.27	0.18	0.39	1.00																			
Ti	0.90	0.81	0.89	0.17	1.00																		
Zr	0.48	0.41	0.49	0.19	0.49	1.00																	
Ca	-0.47	-0.52	-0.29	0.49	-0.49	-0.12	1.00																
Na	0.22	0.21	0.14	0.03	0.27	0.18	-0.21	1.00															
Mn	0.08	0.10	0.17	0.56	-0.05	-0.01	0.43	-0.24	1.00														
V	0.67	0.58	0.74	0.11	0.89	0.30	-0.35	0.21	-0.13	1.00													
Cr	0.22	0.09	0.36	0.55	0.28	0.06	0.44	0.05	0.21	0.44	1.00												
Ni	-0.02	0.01	-0.07	-0.24	0.02	-0.11	-0.27	0.20	-0.23	0.19	0.04	1.00											
Zn	0.12	0.12	0.09	-0.13	0.08	0.09	-0.22	-0.03	-0.13	0.21	0.08	0.55	1.00										
Cu	-0.33	-0.28	-0.29	0.12	-0.35	-0.13	0.45	-0.02	-0.03	-0.36	0.06	-0.37	-0.38	1.00									
Si	-0.46	-0.40	-0.62	-0.71	-0.40	-0.30	-0.50	-0.04	-0.47	-0.35	-0.52	0.24	0.11	-0.14	1.00								
Ba	0.61	0.49	0.68	0.14	0.86	0.21	-0.31	0.23	-0.15	0.93	0.40	0.02	-0.01	-0.32	-0.33	1.00							
P	-0.69	-0.57	-0.71	-0.61	-0.57	-0.43	0.01	-0.26	-0.22	-0.34	-0.32	0.16	0.10	0.06	0.63	-0.40	1.00						
As	0.09	0.13	0.13	0.22	0.00	-0.22	0.23	-0.01	0.35	0.04	0.15	-0.12	0.10	0.18	-0.34	-0.03	-0.10	1.00					
Pb	0.23	0.31	0.11	-0.36	0.21	0.16	-0.45	0.34	-0.07	0.05	-0.33	0.31	0.08	-0.23	0.18	0.01	-0.04	-0.09	1.00				
Sr	-0.44	-0.52	-0.28	0.26	-0.45	-0.11	0.86	-0.20	0.28	-0.30	0.40	-0.29	-0.26	0.40	-0.36	-0.27	0.12	0.15	-0.40	1.00			
S	-0.04	-0.17	0.00	0.13	-0.16	-0.09	0.15	-0.46	0.43	-0.13	-0.07	-0.26	0.05	-0.11	-0.05	-0.13	0.00	0.27	-0.32	0.19	1.00		
Cl	-0.20	-0.13	-0.24	-0.17	-0.16	-0.17	-0.01	0.55	-0.19	-0.16	-0.26	0.09	-0.07	0.13	0.06	-0.11	0.03	0.14	0.45	-0.02	-0.16	1.00	

表 3 新地 1 井五峰组—龙马溪组下段主量元素主成分矩阵

主量元素	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4	主成分5
Fe ₂ O ₃	0.915	-0.192	-0.123	0.122	-0.076
Al ₂ O ₃	0.972	-0.142	-0.082	-0.001	0.016
K ₂ O	0.974	0.038	-0.085	-0.112	-0.005
Na ₂ O	0.260	-0.275	0.887	0.250	-0.082
MgO	0.400	0.774	0.187	0.045	0.448
TiO ₂	0.915	-0.233	-0.003	-0.116	0.003
CaO	-0.344	0.868	0.189	-0.234	-0.146
SiO ₂	-0.601	-0.699	-0.137	0.259	0.211
MnO	0.173	0.748	-0.259	0.560	-0.142

表 4 新地 1 井五峰组—龙马溪组下段微量元素主成分矩阵

微量元素	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4	主成分5
V	0.864	0.314	0.010	0.171	-0.005
Cr	0.288	0.686	0.201	0.331	-0.370
Ni	0.416	-0.533	0.427	0.230	-0.317
Zn	0.396	-0.299	0.649	0.075	0.052
Cu	-0.611	0.269	-0.341	0.259	-0.220
Ba	0.785	0.379	-0.144	0.147	0.013
P	-0.440	-0.421	0.402	-0.055	-0.307
As	-0.157	0.241	0.227	0.625	0.520
Pb	0.295	-0.664	-0.403	0.197	0.127
Sr	-0.548	0.508	0.095	0.174	-0.260
S	-0.254	0.271	0.424	-0.212	0.668
Cl	-0.144	-0.446	-0.380	0.599	0.175
Zr	0.436	0.161	-0.369	-0.420	0.089

分析结果中, Ba在主成分 1 中的载荷值为 0.785(表 4)。在聚类分析结果中, Al 与 K 的平方欧

氏距离约为 1, Ti 与 Fe 的平方欧氏距离约为 3, Al、K、Fe、Ti 组合的平方欧氏距离在 4 以内, Al、

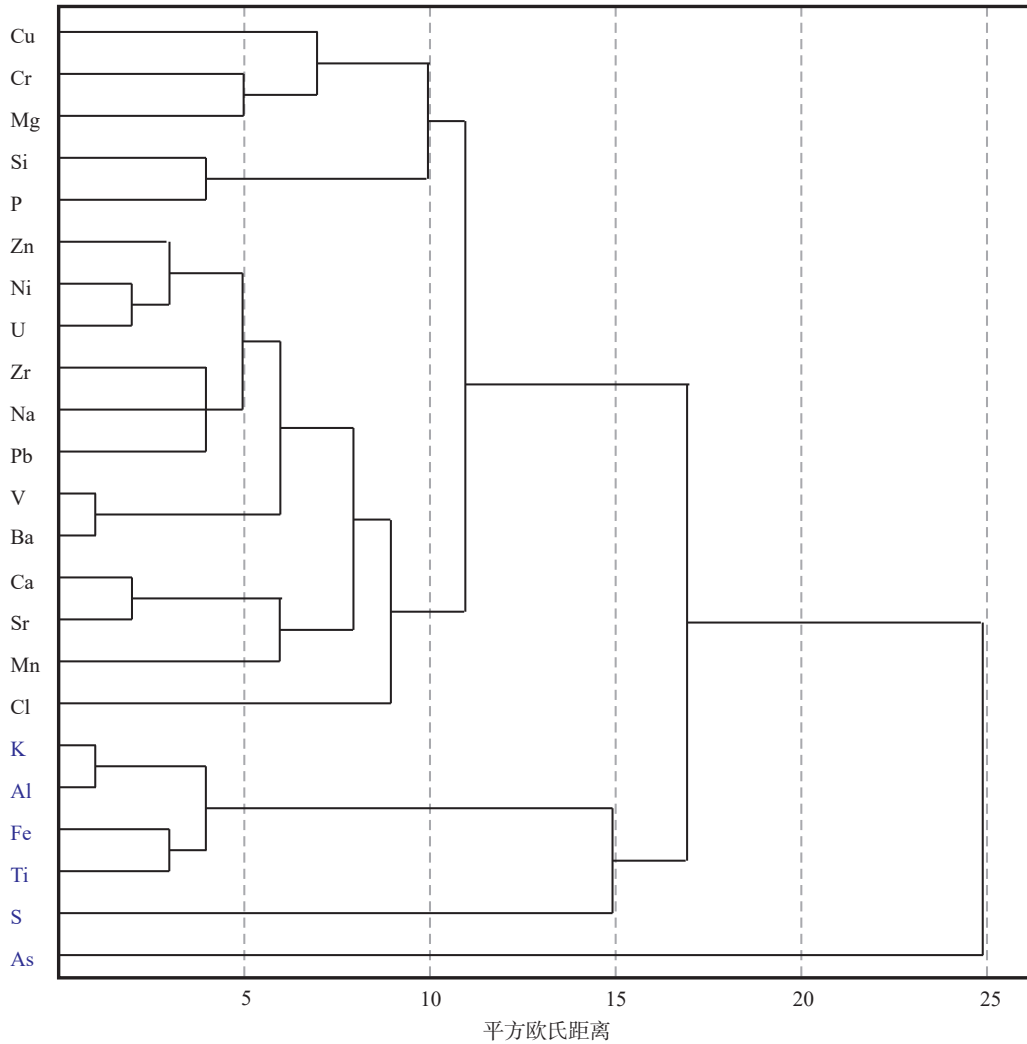


图 2 新地 1 井五峰组—龙马溪组下段元素聚类分析树状图
Fig.2 Dendrogram of element cluster analysis of Wufeng–Lower Longmaxi Formation in the Well Xindi 1

K、Fe、Ti 组合与 Ba 的平方欧氏距离为 17(图 2)。

Ca 是自生沉淀标志性元素。在元素相关分析结果中, Ca 与 Mg、Mn、Sr 的相关系数分别为 0.49、0.43、0.86, 而 Mg 与 Mn 的相关系数达 0.56(表 2)。在主量元素主成分分析结果中, CaO、MgO、MnO 在主成分 2 中的载荷值分别为 0.868、0.774、0.748(表 3); 在微量元素主成分分析结果中 Sr 在主成分 2 中的载荷值为 0.508(表 4)。在聚类分析结果中, Ca 与 Sr 的平方欧氏距离为 2, Ca、Sr 与 Mn 的平方欧氏距离为 6, Ca、Sr、Mn 与 Mg 的平方欧氏距离为 11(图 2)。

V、Ni 作为有机质吸附及还原强度标志性元素。在元素相关分析结果中, V 与 Ba 的相关系数较大, 为 0.93; Ni 与所有元素的相关系数均未达到

0.5(表 2)。在微量元素主成分分析结果中, V、Ni、Ba 在主成分 1 中的载荷值分别为 0.864、0.461、0.785(表 4)。在聚类分析结果中, V 与 Ba 的平方欧氏距离最短, 为 1, Ni、Zn 的平方欧氏距离最短, 为 3; V、Ba、Ni、Zn 总体的平方欧氏距离在 6 以内(图 2)。

4 高分辨化学层序地层学分析

层序地层学分析最重要的工作是层序关键界面的识别(Haq et al., 1988; Posamentier and Vail, 1988; Haq and Schutter, 2008; Catuneanu et al., 2009)。陆源输入强度相关元素组合与海平面升降的响应最为敏感, 因此可以用陆源输入强度相关元素组合总量变化来识别层序界面和最大海泛面。海

平面上升,海水覆盖区域增大,暴露剥蚀区减小,一般陆源输入强度减弱,陆源输入强度相关元素组合总量减少;海平面下降,海水覆盖区域减小,暴露剥蚀区增大,一般陆源输入强度增强,陆源输入强度相关元素组合总量增大。本文化学层序地层分析中,陆源输入强度的相关元素组合总量采用原始实测数据之和。自生沉淀强度、有机质吸附及还原强度的相关元素组合对海平面的升降变化也有一定响应,通常与陆源碎屑输入强度呈互为消长的关系,但其影响因素更为复杂,如水体的活动性、pH值、Eh值等,最大的干扰因素是陆源输入。为削弱陆源输入影响,在本文分析中,与自生沉淀强度的相关元素组合总量采用Al-标准化值之和,有机质吸附及还原强度的相关元素组合采用EF之和。

新地1井五峰组—龙马溪组下段高分辨化学层序地层学分析中,通过陆源输入强度、自生沉淀强度、有机质吸附及还原强度相关元素组合总量变化趋势综合分析,在五峰组识别出1个层序(LCW),龙马溪组下段识别出4层序,自下而上命名为MCL1-1、MCL1-2、MCL1-3、MCL1-4;层序的底边界依次命名为SBW、SBL1、SBL1-2、SBL1-3、SBL1-4;识别了各层序最大海泛面,依次命名为mfsW、mfsL1-1、mfsL1-2、mfsL1-3、mfsL1-4。陆源输入强度相关主量、微量元素组合总量在层序界面附近相对较高,而最大海泛面附近相对较低,具有元素总量减少→增加旋回性变化特征。而自生沉淀强度相关主量元素组合总量和微量元素组合总量、有机质吸附及还原强度相关微量元素组合总量在层序界面附近一般较低,在最大海泛面附近一般较高,具元素总量增多→减少旋回性变化特征。这种不同成因意义的元素组合总量旋回性变化是区域海平面变化的响应,具有区域一致性,可作为区域地层对比依据。参照层序级次研究成果(林畅松等,2000; Catuneanu et al., 2009; 郑荣才等, 2010; 余瑜等, 2018),根据厚度和时间跨度分析,这些层序级次相当于四级基准面升降旋回(中周期基准面升降旋回)形成的层序,LCW是由一个四级层序组成的三级层序。各层序的不同元素组合总量变化特征见图3和表5。

4.1 LCW 层序

LCW层序陆源输入强度相关的Al+K+Fe+Ti

主量元素组合总量和Al富集系数相对较低,二者平均值分别为20.14%和0.67;层序底界面SBW附近,二者的总量分别为25.76%、0.88;向上,二者减小,在最大海泛面mfsW附近,二者总量分别为9.42%、0.30;从mfsW向上,二者含量有增大趋势,到层序顶边界SBL1附近,二者总量分别为20.14%、0.65。自生沉淀强度相关的Ca+Mg+Mn主量元素组合及Sr微量元素总量的Al标准化值、有机质吸附及还原强度相关V+Ni+Ba+Zn微量元素组合总量及其富集系数均较高,平均值分别为1.16及 30.32×10^{-4} 、 1266.4×10^{-6} 及6.65;层序底界面SBW附近,四者数值分别为0.86及 22.01×10^{-4} 、 1339×10^{-6} 及5.28;向上四者数值大体呈增大趋势,在最大海泛面mfsW附近,四者数值分别为1.22及 49.17×10^{-4} 、 1833×10^{-6} 及10.70;从mfsW向上,四者数值有减小的趋势,到层序顶边界SBL1附近,四者数值分别为0.98及 45.43×10^{-4} 、 1048×10^{-6} 及5.34,见图3和表5。

4.2 MCL1-1 层序

MCL1-1层序陆源输入强度相关的Al+K+Fe+Ti主量元素组合总量和Al富集系数相对较低,二者平均值分别为13.48%和0.44;由层序底界面SBL附近向上,二者减小,在最大海泛面mfsL1-1附近,二者总量分别为6.31%、0.15;从mfsL1-1向上,二者数量有增大趋势,到层序顶边界SBL1-2附近,二者总量分别为22.31%、0.86。自生沉淀强度相关的Ca+Mg+Mn主量元素组合及Sr微量元素总量的Al标准化值、有机质吸附及还原强度相关V+Ni+Ba+Zn微量元素组合总量及其富集系数均较高,平均值分别为2.28及 63.79×10^{-4} 、 1333.42×10^{-6} 及11.62;由层序底界面SBL附近向上,四者数值大体呈增大趋势,在最大海泛面mfsL1-1附近,四者数值分别为4.09及 145.6×10^{-4} 、 1142×10^{-6} 及22.48;从mfsL1-1向上,除V+Ni+Ba+Zn微量元素组合总量外,其余三者数值有减小的趋势,到层序顶边界SBL1-2附近,四者数值分别为0.45及 18.31×10^{-4} 、 1892×10^{-6} 及7.74。具体见图3和表5。

4.3 MCL1-2 层序

MCL1-2层序陆源输入强度相关的Al+K+Fe+Ti主量元素组合总量和Al富集系数相对较高,二者平均值分别为24.61%和0.83;由层序底界面SBL1-2附近向上,二者减小,在最大海泛面mfsL1-2

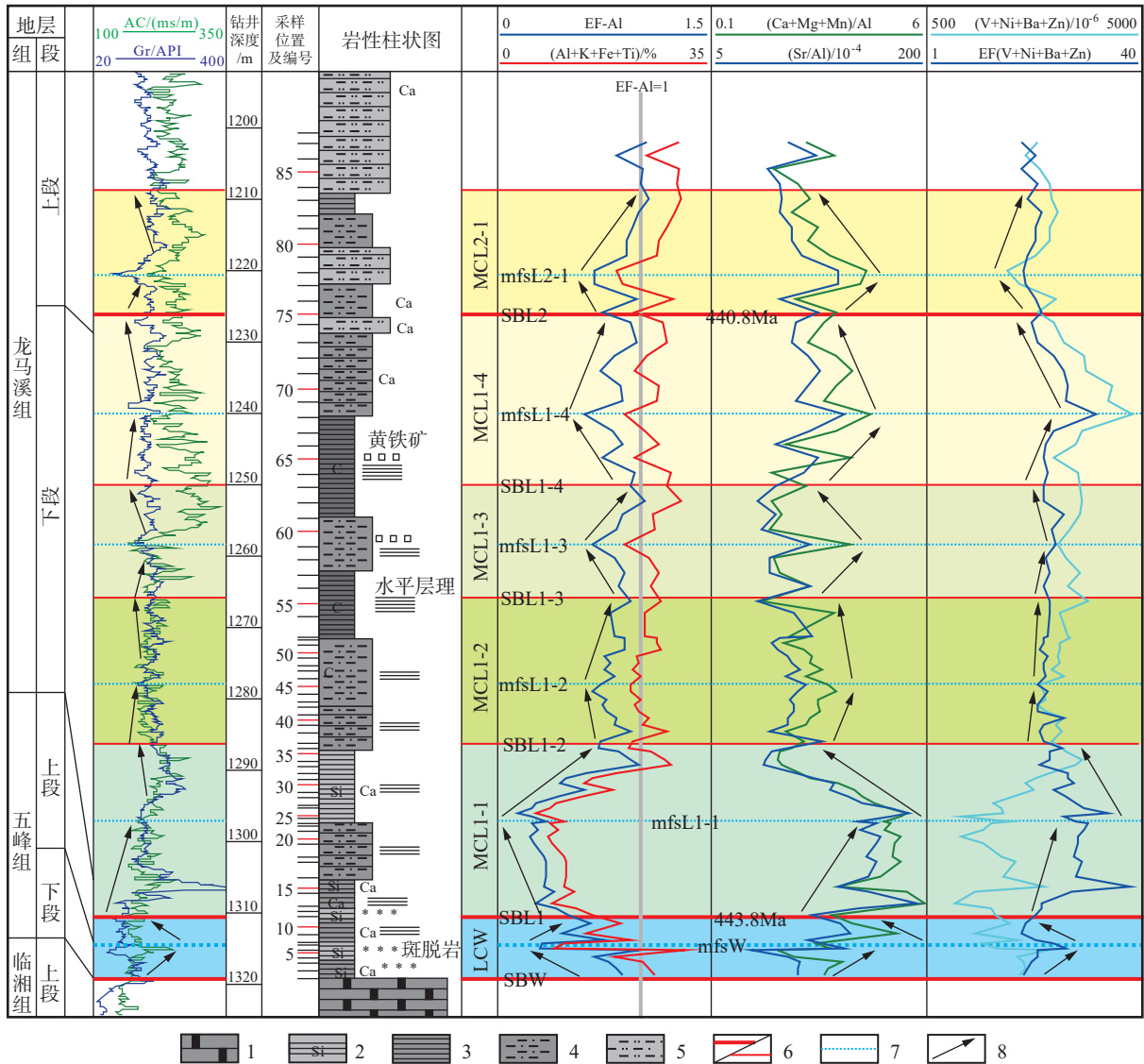


图 3 新地 1 井五峰组—龙马溪组下段化学层序地层分析柱状图

1—瘤状灰岩; 2—硅质泥岩; 3—泥岩或页岩; 4—粉砂质泥岩; 5—泥质粉砂岩; 6—三级/四级层序界面; 7—最大海泛面; 8—变化趋势

Fig.3 Histogram of chemical sequence stratigraphic analysis of Wufeng-Lower Longmaxi Formation in the Well Xindi 1
1-Nodular limestone; 2-Siliceous mudstone; 3-Mudstone or shale; 4-Silty mudstone; 5-Argillaceous siltstone; 6-Tertiary/quaternary sequence boundaries; 7-Maximum flooding surface; 8-Variation tendency

附近,二者总量分别为 21.83%、0.73;从 mfsL1-2 向上,二者数量有增大趋势,到层序顶边界 SBL1-3 附近,二者总量分别为 26.77%、0.93。自生沉淀强度相关的 Ca+Mg+Mn 主量元素组合及 Sr 微量元素总量的 Al-标准化值、有机质吸附及还原强度相关 V+Ni+Ba+Zn 微量元素组合总量及其富集系数平均值分别为 0.66 及 19.80×10^{-4} 、 2022.47×10^{-6} 及 7.59;由层序底界面 SBL1-2 附近向上,四者数值大体呈增大趋势,在最大海泛面 mfsL1-2 附近,四者数值分

别为 1.06 及 25.08×10^{-4} 、 2149×10^{-6} 及 7.98;从 mfsL1-2 向上,四者数值有减小的趋势,到层序顶边界 SBL1-3 附近,四者数值分别为 0.26 及 11.00×10^{-4} 、 2053×10^{-6} 及 7.44。见图 3 和表 5。

4.4 MCL1-3 层序

MCL1-3 层序陆源输入强度相关的 Al+K+Fe+Ti 主量元素组合总量和 Al 富集系数相对较高,二者平均值分别为 26.13% 和 0.88;由层序底界面 SBL1-3 附近向上,二者减小,在最大海泛面 mfsL1-3 附近,

表5 新地1井五峰组—龙马溪组下段化学层序地层特征数据

Table 5 Chemical sequence stratigraphic characteristics of Wufeng-Lower Longmaxi Formation in the Well Xindi 1

层序	陆源输入指标元素		自生沉淀指标元素		有机质吸附及还原强度指标元素	
	(Al+K+Fe+Ti) /%	EF-Al	(Ca+Mg+Mn)/Al	Sr/Al /10 ⁻⁴	(V+Ni+Ba+Zn) /10 ⁻⁶	EF(V+Ni+Ba+Zn)
SBL2	26.99	0.98	0.87	16.45	1640.00	7.12
mfsL1-4	20.08	0.61	2.05	48.19	3432.00	10.76
SBL1-4	28.36	0.96	0.31	15.38	1938.00	8.03
MCL1-4(均值)	24.64	0.82	1.09	27.30	2698.18	9.35
mfsL1-3	20.93	0.66	1.39	27.06	2310.00	9.10
SBL1-3	26.77	0.93	0.26	11.00	2053.00	7.44
MCL1-3(均值)	26.13	0.88	0.52	17.61	2399.56	8.28
mfsL1-2	21.83	0.73	1.06	25.08	2149.00	7.98
SBL1-2	22.31	0.86	0.45	18.31	1892.00	7.74
MCL1-2(均值)	24.61	0.83	0.66	19.088	2022.47	7.59
mfsL1-1	6.31	0.15	4.09	145.6	1142.00	22.48
SBL1	20.14	0.65	0.98	45.43	1048.00	5.34
MCL1-1(均值)	13.48	0.44	2.28	63.79	1333.42	11.62
mfsW	9.42	0.30	1.22	49.17	1833.00	10.07
SBW	25.76	0.88	0.86	20.01	1339.00	5.28
LCW(均值)	20.14	0.67	1.16	30.32	1266.40	6.65

二者总量分别为 20.93%、0.66; 从 mfsL1-3 向上, 二者数量有增大趋势, 到层序顶边界 SBL1-4 附近, 二者总量分别为 28.36%、0.96。自生沉淀强度相关的 Ca+Mg+Mn 主量元素组合及 Sr 微量元素总量的 Al-标准化值、有机质吸附及还原强度相关 V+Ni+Ba+Zn 微量元素组合总量及其富集系数平均值分别为 0.52 及 17.61×10^{-4} 、 2399.56×10^{-6} 及 8.28; 由层序底界面 SBL1-3 附近向上, 四者数值大体呈增大趋势, 在最大海泛面 mfsL1-3 附近, 四者数值分别为 1.39 及 27.06×10^{-4} 、 2310×10^{-6} 及 9.10; 从 mfsL1-3 向上, 四者数值有减小的趋势, 到层序顶边界 SBL1-4 附近, 四者数值分别为 0.31 及 15.38×10^{-4} 、 1938×10^{-6} 及 8.03。见图 3 和表 5。

4.5 MCL1-4 层序

MCL1-4 层序陆源输入强度相关的 Al+K+Fe+Ti 主量元素组合总量和 Al 富集系数相对较高, 二者平均值分别为 24.64% 和 0.82; 由层序底界面 SBL1-4 附近向上, 二者减小, 在最大海泛面 mfsL1-4 附近, 二者总量分别为 20.08%、0.61; 从 mfsL1-4 向上, 二者数量有增大趋势, 到层序顶边界 SBL2 附近, 二者总量分别为 26.99%、0.98。自生沉淀强度相关的 Ca+Mg+Mn 主量元素组合及 Sr 微量元素总量的 Al-标准化值、有机质吸附及还原强度相关

V+Ni+Ba+Zn 微量元素组合总量及其富集系数平均值分别为 1.09 及 27.30×10^{-4} 、 2698.18×10^{-6} 及 9.35; 由层序底界面 SBL1-4 附近向上, 四者数值大体呈增大趋势, 在最大海泛面 mfsL1-4 附近, 四者数值分别为 2.05 及 48.19×10^{-4} 、 3432×10^{-6} 及 10.76; 从 mfsL1-4 向上, 四者数值有减小的趋势, 到层序顶边界 SBL1-4 附近, 四者数值分别为 0.87 及 16.45×10^{-4} 、 1640×10^{-6} 及 7.12。见图 3 和表 5。

4.6 与页岩气关系分析

由于陆源碎屑输入强度越小、自生沉淀强度越小、有机质吸附及还原强度越大的沉积环境, 越有利于页岩中有机质的富集。因此, 根据各层序关键界面的三种元素组合总量变化趋势(图 3)可知, mfsW 附近页岩气潜力较好, MCL1-1 绝大部分尤其是 mfsL1-1 附近页岩气潜力较好, mfsL1-3 附近页岩气潜力较好, SBL1-4 层序界面附近至 mfsL1-4 附近页岩气潜力较好, 其余各层序界面附近页岩气潜力一般。

5 结论

(1) 新地 1 井五峰组—龙马溪组下段深水陆架含有机质沉积岩主要由黏土矿物、石英、方解石组成。黏土矿物主要来自陆源输入, 石英的成因既有

陆源输入, 也有自生沉淀, 方解石为自生沉淀矿物。Al 为陆源输入标志性元素, Ca 是自生沉淀标志性元素, V、Ni 为有机质吸附及还原强度标志性元素。

(2) 新地 1 井五峰组—龙马溪组下段优选出: ①陆源输入强度相关元素组合: Al、K、Fe、Ti; ②自生沉淀强度相关元素组合: Ca、Mg、Mn、Sr; ③有机质吸附及还原强度相关元素组合: V、Ni、Ba、Zn。

(3) 利用元素组合及元素化学指标将五峰组划分为 LCW 一个层序, 龙马溪组下段自下而上划分为 MCL1-1、MCL1-2、MCL1-3、MCL1-4 共 4 个层序, 这些层序级次相当于四级基准面升降旋回形成的层序。陆源输入强度相关主、微量元素组合总量在层序界面附近相对较高, 而在最大海泛面附近相对较低; 自生沉淀强度相关主、微量元素组合总量及有机质吸附及还原强度相关微量元素组合总量在层序界面附近一般较低, 而在最大海泛面附近一般较高。这种不同成因意义的元素组合总量旋回性变化是区域海平面变化的响应, 可作为区域地层对比依据。

(4) 有机质一般富集于陆源碎屑输入强度小、自生沉淀强度小、有机质吸附及还原强度大的沉积地层中。因而, 在各层序中最大海泛面附近的潜力普遍优于各层序界面附近, 尤其是 mfsL1-1、mfsL1-4 附近, 为新地 1 井页岩气有利层段。

致谢: 本文研究、写作过程中, 得到了中国地质调查局成都地调中心“四川盆地页岩气基础地质综合调查”课题相关专家、中国地质大学(北京)吴昊的帮助。在此, 向他们表示衷心的感谢!

References

- Calvert S E, Pedersen T F. 1993. Geochemistry of recent oxic and anoxic sediments: Implications for the geological record[J]. *Marine Geology*, 113: 67–88.
- Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, Blum M D, Dalrymple R W, Eriksson P G, Fielding C R, Fisher W L, Galloway W E, Gibling M R, Giles K A, Holbrook J M, Jordan R, Kendall C G, Macurda B, Martinsen O J, Miall A D, Neal J E, Nummedal D, Pomar L, Posamentier H W, Pratt B R, Sarg J F, Shanley K W, Steel R J, Strasser A, Tucker M E, Winker C. 2009. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. *Earth-Science Reviews*, 92(1/2): 1–33.
- Chen L, Lu Y C, Jiang S, Li J Q, Guo T L, Luo C. 2015. Heterogeneity of the Lower Silurian Longmaxi marine shale in the Southeast Sichuan Basin of China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 65: 232–246.
- Cheng Wenbin, Gu Xuexiang, Hu Xiumian, Li Youhe, Dong Shuyi. 2008. Comparative element geochemistry of recent oceanic red clay and cretaceous oceanic red bed[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(1): 37–47 (in Chinese with English abstract).
- Craigie N. 2018. Principles of Elemental Chemostratigraphy A Practical User Guide[M]. Springer, 1–177.
- Filzmoser P, Hron K. 2008. Outlier detection for compositional data using robust methods[J]. *Mathematical Geosciences*, 40(3): 233–248.
- Guo Xusheng. 2017. Sequence stratigraphy and evolution model of the Wufeng–Longmaxi shale in the upper Yangtze area[J]. *Earth Science*, 42(7): 1069–1082 (in Chinese with English abstract).
- Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. 1988. Mesozoic and cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change[C]//Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C, et al. (ed.). *Sea Level Changes — An Integrated Approach*. SEPM Special Publication, 42: 71–108.
- Haq B U, Schutter S R. 2008. A chronology of paleozoic sea-level changes[J]. *Science*, 322: 64–68.
- Jiang Zhenxue, Song Yan, Tang Xianglu, Li Zhuo, Wang Xingmeng, Wang Guozhen, Xue Zixin, Li Xin, Zhang Kun, Chang Jiaqi, Qiu Hengyuan. 2020. Controlling factors of marine shale gas differential enrichment in southern China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47(3): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Li Guanqing, Gu Xuexiang, Cheng Wenbin, Zhang Yongmei, Zhang Yan, Dai Hongzhang, Lü Pengrui, Zhang Xingguo, Xia Baoben. 2014. Geochemical characteristics and their geologic significance of the Lower Jurassic Ridang Formation Host Strata from the Zhaxikang Sb–Pb–Zn–Ag polymetallic ore-concentrated district, South Tibet[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(5): 598–608 (in Chinese with English abstract).
- Li Yifan, Fan Tailiang, Gao Zhiqian, Zhang Jinchuan, Wang Xiaomin, Zeng Weite, Zhang Junpeng. 2012. Sequence stratigraphy of Silurian black shale and its distribution in southeastern area of Chongqing[J]. *Natural Gas Geoscience*, 23(2): 299–306 (in Chinese with English abstract).
- Li Y H, Schoonmaker J E. 2003. Chemical composition and mineralogy of marine sediments[C]//Rudnick R L(ed.). *Sediments, Diagenesis, and Sedimentary Rocks. Treatise on Geochemistry*, New York: Elsevier Sciences, 1–35.
- Liang Xing, Wang Gaocheng, Xu Zhengyu, Zhang Jiehui, Chen Zhipeng, Xian Chenggang, Lu Huili, Liu Chen, Zhao Chunduan, Xiong Shaoyun. 2016. Comprehensive evaluation technology for shale gas sweet spots in the complex marine mountains, South China: A case study from Zhaotong national shale gas demonstration zone[J]. *Natural Gas Industry*, 36(1): 33–42.
- Liang Xing, Zhang Tingshan, Shu Honglin, Min Huajun, Zhang Zhao, Zhang Lei. 2020. Evaluation of shale gas resource potential of

- Longmaxi Formation in Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area in the Northern Yunnan-Guizhou[J]. *Geology in China*, 47(1): 72–87
- Lin Changsong, Zhang Yanmei, Liu Jingyan, Pang Baocheng. 2000. High resolution sequence stratigraphy and reservoir prediction[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 111–117 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yangbo, Ma Yiquan, Wang Yuxuan, Lu Yongchao. 2017. The sedimentary response to the major geological events and lithofacies characteristics of Wufeng Formation–Longmaxi Formation in the Upper Yangtze Area[J]. *Earth Science*, 42(7): 1169–1184 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xinhua, Xie Jun. 2018. The progress and prospects of shale gas exploration and exploitation in southern Sichuan Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1): 161–169 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. 2018. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4): 561–574 (in Chinese with English abstract).
- Martín-Fernández J, Barceló-Vidal C, Pawłowsky-Glahn V. 2003. Dealing with zeros and missing values in compositional data sets using nonparametric imputation[J]. *Mathematical Geology*, 35(3): 253–278.
- Martín-Fernández J, Barceló-Vidal C, Pawłowsky-Glahn V. 2005. Subcompositional patterns in Cenozoic volcanic rocks of Hungary[J]. *Mathematical Geology*, 37(7): 729–752.
- Palarea-Albaladejo J, Martín-Fernández J. 2008. A modified EM algorithm for replacing rounded zeros in compositional data sets[J]. *Computers & Geosciences*, 34: 902–917.
- Palarea-Albaladejo J, Martín-Fernández J, Gómez-García J. 2007. A parametric approach for dealing with compositional rounded zeros[J]. *Mathematical Geology*, 39(7): 625–645.
- Pan S Q, Zou C N, Yang Z, Dong D Z, Wang Y M, Wang S F, Wu S T, Huang J L, Liu Q, Wang D L, Wang Z Y. 2015. Methods for shale gas play assessment: A comparison between Silurian Longmaxi Shale and Mississippian Barnett Shale[J]. *Journal of Earth Science*, 26(2): 285–294.
- Pearce T J, Martin J H, Cooper D. 2010. Chemostratigraphy of upper carboniferous (Pennsylvanian) sequences from the southern North Sea (United Kingdom)[C]//Ratcliffe K T, Zaitlin B A (ed.). *Modern Alternative Stratigraphic Techniques, Theory and Case Histories*, SEPM Special Publication No. 94, 109–129.
- Pison G, Rousseeuw P, Filzmoser P. 2003. Robust factor analysis[J]. *Journal of Multivariate Analysis*, 84: 145–172.
- Posamentier H W, Vail P R. 1988. Eustatic controls on clastic deposition II — sequence and systems tract models[C]// Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C, et al. (eds.). *Sea Level Changes — An Integrated Approach*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), Special Publication, 42, 125–154.
- Pu Boling, Dong Dazhong, Wang Fengqin, Wang Yuman, Huang Jinliang. 2020. The effect of sedimentary facies on Longmaxi shale gas in southern Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 47(1): 111–120.
- Qiu Zhen, Zou Caineng, Wang Hongyan, Dong Dazhong, Lu Bin, Chen Zhenhong, Liu Dexun, Li Guizhong, He Jianglin, Wei Lin. 2019. Discussion on characteristics and controlling factors of differential enrichment of Wufeng–Longmaxi shale gas in South China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 31(2): 163–175 (in Chinese with English abstract).
- Ramkumar M. 2015. *Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications*[M]. Elsevier, 1–432.
- Ratcliffe K T, Wilson A, Payenberg T, Rittersbacher A, Hildred G V, Flint S S. 2015. Ground truthing chemostratigraphic correlations in fluvial systems[J]. *AAPG Bulletin*, 99: 155–180.
- Reiman C, Filmoser P. 1999. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: Death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data[J]. *Environmental Geology*, 39: 1001–1014.
- Sandford R F, Pierson C T, Crovelli R A. 1993. An objective replacement method for censored geochemical data[J]. *Mathematical Geology*, 25(1): 59–80.
- Sano J L, Ratcliffe K T, Spain D. 2013. Chemostratigraphy of the Haynesville Shale[C]// Hammes U, Gale J (ed.). *Geology of the Haynesville Gas Shale in East Texas and West Louisiana*. USA: AAPG Memoir 105, 137–154.
- Tribovillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. *Chemical Geology*, 232: 12–32.
- Turgeon S, Brumsack H J. 2006. Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian–Turonian Boundary Event (Cretaceous) in the Umbria–Marche Basin of central Italy[J]. *Chemical Geology*, 234: 321–339.
- Wang Tong, Yang Keming, Xiong Liang, Shi Hongliang, Zhang Quanlin, Wei Limin, He Xianli. 2015. Shale sequence stratigraphy of Wufeng–Longmaxi Formation in Southern Sichuan and their control on reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 36(8): 915–925 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y M, Dong D Z, Li X J, Huang J L, Wang S F, Wu W. 2015. Stratigraphic sequence and sedimentary characteristics of Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its peripheral areas[J]. *Natural Gas Industry B*, 2(2/3): 222–232.
- Wang Yuman, Li Xinjing, Dong Dazhong, Zhang Chenchen, Wang Shufang. 2017. Main factors controlling the sedimentation of high-quality shale in Wufeng–Longmaxi Fm, Upper Yangtze region[J]. *Natural Gas Industry*, 37(4): 9–20 (in Chinese with English abstract).
- Wedepohl K H. 1991. The composition of the upper Earth's crust and the natural cycles of selected metals[C]//Merian E (ed.). *Metals and their Compounds in the Environment*. VCH-Verlagsgesellschaft,

- Weinheim, 3-17.
- Yang Ping, Wang Zhengjiang, Yu Qian, Liu Wei, Liu Jiahong, Xiong Guoqing, He Jianglin, Yang Fei. 2019. An resources potential analysis of Wufeng-Longmaxi Formation shale gas in the southwestern margin of Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 46(3): 601-614 (in Chinese with English abstract).
- Yu Yu, Lin Liangbiao, Lan Binheng, Hong Wei, Guo Yan. 2018. Sequence stratigraphic division and recognition based on wavelet analysis: Example from the Upper Permian Longtan Formation in eastern Sichuan Basin[J]. *Northwestern Geology*, 51(4): 43-52 (in Chinese with English abstract).
- Zhai G Y, Li J, Jiao Y, Wang Y F, Liu G H, Xu Q, Wang C, Chen R, Guo X B. 2019. Applications of chemostratigraphy in a characterization of shale gas Sedimentary Microfacies and predictions of sweet spots: Taking the Cambrian black shales in Western Hubei as an example[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 109: 547-560.
- Zhao Quanmin, Zhang Jincheng, Liu Jinge. 2019. Status of Chinese shale gas revolution and development proposal[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 46(8): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Li Fengjie. 2010. High-resolution Sequence Stratigraphy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-404 (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 程文斌, 顾雪祥, 胡修棉, 李有核, 董树义. 2008. 现代大洋红色黏土与白垩纪大洋红层元素地球化学对比[J]. *地质学报*, 82(1): 37-47.
- 郭旭升. 2017. 上扬子地区五峰组-龙马溪组页岩层序地层及演化模式[J]. *地球科学*, 42(7): 1069-1082.
- 姜振学, 宋岩, 唐相路, 李卓, 王幸蒙, 王国臻, 薛子鑫, 李鑫, 张昆, 常佳琦, 仇恒远. 2020. 中国南方海相页岩气差异富集的控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 47(3): 1-12.
- 李关清, 顾雪祥, 程文斌, 章永梅, 张岩, 代鸿章, 吕鹏瑞, 张兴国, 夏抱本. 2014. 藏南扎西康 Sb-Pb-Zn-Ag 多金属矿集区下侏罗统日当组赋矿地层元素地球化学特征及地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33(5): 598-608.
- 李一凡, 樊太亮, 高志前, 张金川, 王小敏, 曾维特, 张俊鹏. 2012. 渝东南地区志留系黑色页岩层序地层研究[J]. *天然气地球科学*, 23(2): 299-306.
- 梁兴, 王高成, 徐政语, 张介辉, 陈志鹏, 鲜成钢, 鲁慧丽, 刘臣, 赵春段, 熊绍云. 2016. 中国南方海相复杂山地页岩气储层甜点综合评价技术——以昭通国家级页岩气示范区为例[J]. *天然气工业*, 36(1): 33-42.
- 梁兴, 张廷山, 舒红林, 闵华军, 张朝, 张磊. 2020. 滇黔北昭通示范区龙马溪组页岩气资源潜力评价[J]. *中国地质*, 47(1): 72-87.
- 林畅松, 张燕梅, 刘景彦, 庞保成. 2000. 高精度层序地层学和储层预测[J]. *地学前缘*, 7(3): 111-117.
- 陆扬博, 马义权, 王雨轩, 陆永潮. 2017. 上扬子地区五峰组-龙马溪组主要地质事件及岩相沉积响应[J]. *地球科学*, 42(7): 1169-1184.
- 马新华, 谢军. 2018. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景[J]. *石油勘探与开发*, 45(1): 161-169.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 2018. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. *石油勘探与开发*, 45(4): 561-574.
- 蒲泊伶, 董大忠, 王凤琴, 王玉满, 黄金亮. 2020. 沉积相带对川南龙马溪组页岩气富集的影响[J]. *中国地质*, 47(1): 111-120.
- 邱振, 邹才能, 王红岩, 董大忠, 卢斌, 陈振宏, 刘德勤, 李贵中, 何江林, 魏琳. 2019. 中国南方五峰组—龙马溪组页岩气差异富集特征与控制因素探讨[J]. *天然气地球科学*, 31(2): 163-175.
- 王同, 杨克明, 熊亮, 史洪亮, 张全林, 魏力民, 何显莉. 2015. 川南地区五峰组-龙马溪组页岩层序地层及其对储层的控制[J]. *石油学报*, 36(8): 915-925.
- 王玉满, 李新景, 董大忠, 张晨晨, 王淑芳. 2017. 上扬子地区五峰组—龙马溪组优质页岩沉积主控因素[J]. *天然气工业*, 37(4): 9-20.
- 杨平, 汪正江, 余谦, 刘伟, 刘家洪, 熊国庆, 何江林, 杨菲. 2019. 四川盆地西南缘五峰—龙马溪组页岩气资源潜力分析[J]. *中国地质*, 46(3): 601-614.
- 余瑜, 林良彪, 蓝彬恒, 洪薇, 郭炎. 2018. 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*, 51(4): 43-52.
- 赵全民, 张金成, 刘劲歌. 2019. 中国页岩气革命现状与发展建议[J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 46(8): 1-9.
- 郑荣才, 文华国, 李凤杰. 2010. 高分辨率层序地层学[M]. 北京: 地质出版社, 1-404.