doi:10.3799/dqkx.2017.100

鄂西—渝东地区下侏罗统东岳庙段泥岩地球化学特征及有机质富集模式

郭来源[1],张士万[2],解习农[1*],李忠生[1,3],黄传炎[1],陈北辰[1]

1.中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室,湖北武汉 430074
2.中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司勘探开发研究院,湖北武汉 430079
3.澳大利亚联邦科学与工业研究院地球科学与资源工程学部,Sydney 2113

摘要: 我国不同地区页岩非均质性研究是亟待解决的基础地质问题,且四川盆地陆相页岩气的研究十分薄弱.通过对鄂西—渝东地区下侏罗统自流井组东岳庙段剖面和钻井岩心的岩石学特征、地球化学等方面的精细分析,结合测井曲线,查明了该层段地球化学垂向变化特征及有机质富集模式.结果表明,东岳庙段脆性矿物含量高,粘土矿物含量较少,下部有机质含量高于上部.地球化学指标所反映的古气候、古生产力、古氧化还原、古盐度表明东岳庙段垂向上具有明显差异;东岳庙段下部为干旱炎热古气候、贫氧—偏咸化水体和高古生产力,而东岳庙段上部为温暖湿润古气候、淡化水体和低古生产力,故东岳庙段下部更有利于有机质富集.

关键词: 鄂西—渝东地区;泥岩;东岳庙段;地球化学;沉积环境;石油地质.

中图分类号: P618.13 **文章编号:** 1000—2383(2017)07—1235—12 **收稿日期:** 2017—02—10

Geochemical Characteristics and Organic Matter Enrichment of the Dongyuemiao Member Mudstone of Lower Jurassic in the Western Hubei-Eastern Chongqing

Guo Laiyuan[1], Zhang Shiwan[2], Xie Xinong[1*], Li Zhongsheng[1,3], Huang Chuanyan[1], Chen Beichen[1]

1. *Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*
2. *Exploration and Development Research Institute of Jianghan Oilfield Branch Company of SINOPEC, Wuhan* 430079, *China*
3. *Division of Earth Science and Resource Engineering of CSIRO, Sydney* 2113, *Australia*

Abstract: The shale heterogeneity in different regions of China is the basic geological issue to be addressed urgently. However, the study of continental shale gas in the Sichuan basin is very weak. Based on analysis of the petrology and geochemistry of the Dongyuemiao member of lower Jurassic Ziliujing Formation in western Hubei-eastern Chongqing area, and combined with the logging curve, the vertical variation of geochemical characteristics and organic matter enrichment have been discussed. The results show that the Dongyuemiao member has high brittle mineral content and low clay mineral content, and higher organic matter content at the lower part than that at the upper part. Geochemical index, such as paleoclimate, paleoproductivity, paleoredox, paleosalinity has obvious vertical differences in the Dongyuemiao member. The lower part of Dongyuemiao member shows dry paleoclimate, dysoxic water column, saline water and high paleoproductivity, but the upper part of Dongyuemiao member shows warm and humid paleoclimate, low salination water and low paleoproductivity. It is concluded that the lower part of Dongyuemiao member has been more favourable for organic matter enrichment.

Key words: western Hubei-eastern Chongqing area; mudstone; Dongyuemiao member; geochemistry; sedimentary environment; petroleum geology.

基金项目: 中国地质调查局油气基础性公益性地质调查项目(No.DD20160185);国家重大油气专项(No.2016ZX05034-002-003).
作者简介: 郭来源(1989—),男,博士研究生,主要从事非常规油气研究工作.ORCID: 0000-0002-3288-6905. E-mail: Guoly0117@163.com
* **通讯作者:** 解习农,ORCID: 0000-0003-1960-9417. E-mail: xnxie@cug.edu.cn

引用格式: 郭来源,张士万,解习农,等,2017.鄂西—渝东地区下侏罗统东岳庙段泥岩地球化学特征及有机质富集模式.地球科学,42(7):1235—1246.

随着我国经济快速发展,石油及天然气等战略资源日益短缺,为了缓解能源问题,页岩油气等非常规油气资源成为石油工业的重要勘探领域和目标(邹才能等,2011;张东晓和杨婷云,2013;王道富等,2013;张毅等,2017).继北美页岩气的开采取得巨大成功之后,页岩油气迅速成为油气领域的勘探热点(陈尚斌等,2010;邹才能等,2010).以此为契机,2005 年我国就开始了页岩油气地质评价和勘探开发的前期工作,近年来不断取得了页岩气重大突破(董大忠等,2011).我国页岩不仅分布范围广,如松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、南襄盆地以及南方扬子地台均广泛发育泥页岩,而且沉积环境多样,从海相、海陆过渡相到陆相均有发育,页岩气保存条件十分复杂(邹才能等,2011;王道富等,2013).毫无疑义,我国不同地区页岩非均质性研究是亟待解决的基础地质问题.作为页岩气勘探开发的先导试验区,如四川盆地的长宁、涪陵焦石坝和威远海相地层均取得了单井突破(郭旭升等,2014).

地球化学元素作为富有机质页岩沉积环境变化的重要指标(Loucks and Ruppel, 2007; Ma *et al*., 2016),已经被成功应用于海相(Dymond *et al*., 1992)和湖相沉积环境(Smol and Cumming, 2000).然而四川盆地陆相页岩气的研究却十分薄弱,本文以鄂西一渝东地区下侏罗系自流井组东岳庙段泥岩为解剖对象,试图通过其地球化学特征揭示陆相泥页岩有机质分布的差异,为页岩非均质性分析提供地质依据.

1　研究区概况

四川盆地是我国南方最大的陆相沉积盆地,基底为古生代一早三叠世海相地层,沉积盖层为晚三叠世一第四纪陆相沉积.该盆地油气资源丰富,勘探潜力巨大,是我国重要的含油气盆地之一(陈洪德等,2009;吴月先等,2009;范昱,2011).鄂西一渝东地区位于四川盆地东部,构造位于扬子准地台川东褶皱带方斗山复背斜以东和齐岳山复背斜以西(图1).下侏罗统自流井组东岳庙段时期为浅湖一半深湖沉积(雍云乔,2013;黄江庆等,2014;冯荣昌等,2015),代表一个完整三级层序沉积.岩心资料显示,东岳庙早期低位体系域沉积时期发育介壳层与深灰色、黑色页岩高频互层,且可见薄煤层,说明其底部为沼泽一滨浅湖沉积.随着湖水进一步加深,湖扩体系域沉积相变为浅湖一半深湖相,在岩相剖面上表现为大量中一厚层介壳层快速变薄、介壳变小,岩相变为深灰色、灰色泥页岩夹介壳灰岩.上部高位体系域,沉积一套含小型介壳的灰色泥页岩及少量粉砂质泥岩,说明在高位域水体变浅,适合介壳生物生长

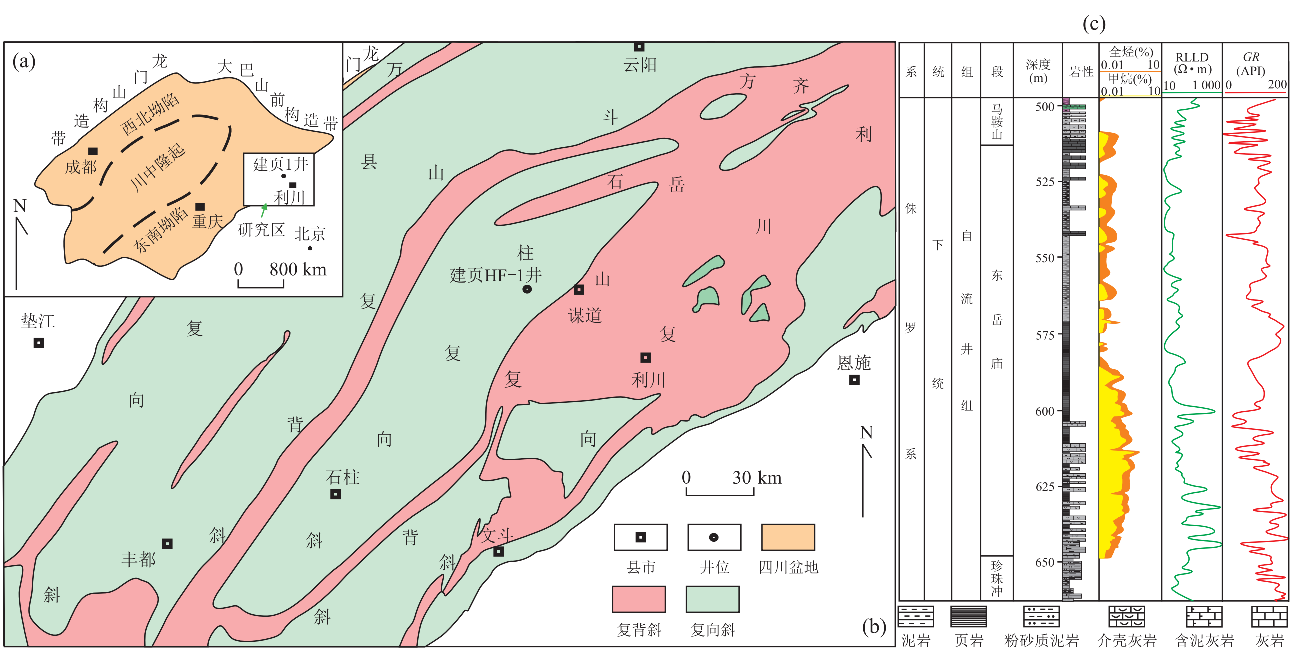

图 1　鄂西一渝东地区综合地质图

Fig.1　The comprehensive geologic map of western Hubei-western Chongqing

a.四川盆地地理图;b.鄂西一渝东地区地理位置;c.建页 HF-1 井综合柱状图;据黄江庆等(2014)

(倪超等，2012；梁榜等，2015).

2　东岳庙段泥页岩地球化学特征

2.1　样品采集及测试

文中共 40 块样品取自东岳庙段露头剖面的新鲜面，样品受风化和氧化作用影响微弱，全岩衍射分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成.常量元素和微量元素分析采用便携式 X 荧光仪 EDX-P730S，选择矿产常用模式，采取步距为 10 cm×1 cm 对钻井岩心进行测试，快速得到 Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Co、Nb、Zn、Cu、Zr、Cs、K、Cd、Ag、Mo、As、K、Pb、Sn、Bi 共 22 种元素.采用等温吸附试验获取页岩气含量，并根据 Langmuir 方程在对应压力和温度条件下进行换算(梁榜等，2015).

2.2　泥页岩矿物组成

东岳庙段下部岩性主要以深色泥岩为主，上部岩性主要为浅色粉砂质泥岩或浅色泥岩，硅质含量多.建页 1 井样品 XRD 衍射全岩分析表明，其主要矿物成分为石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿等脆性矿物以及绿泥石、伊利石、高岭石等粘土矿物(图 2)，其中石英平均含量为 42.0%、长石含量为 4.1%、碳酸盐含量为 12.3%，脆性矿物含量超过 50.0%，粘土矿物含量为 30.0%，其他矿物含量较少.我国的建页 1 井页岩矿物含量分布与北美 Haynesville、Ohio、Marcellus 页岩矿物含量相差较大，但与北美 Fayetteville、Woodford、Barnett 页岩矿物含量接近，脆性矿物含量较高(图 2).综上所述，东岳庙段泥页岩脆性矿物含量高，易于形成天然缝和压裂缝，有利于页岩油气开采.

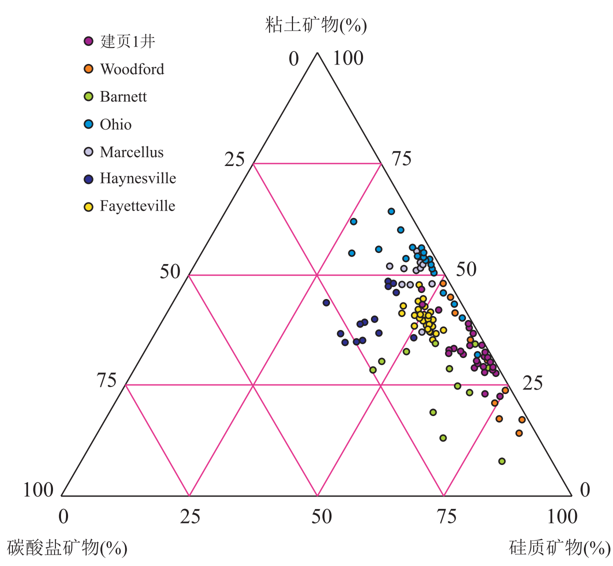

图 2　建页 1 井和北美主要页岩气盆地泥页岩的矿物三角图

Fig.2　Mudstone and shale mineral ternary diagram of wells in major shale gas basins in North America and well Jianye 1

2.3　有机质丰度特征

有机碳含量常被用来评价烃源岩的有机质丰度，是页岩油气富集最重要的因素之一(秦建中等，2007；李吉君等，2014).建页 1 井 TOC 在纵向上的分布具有明显差异，下段(592～644 m，样品 87 块)TOC 的变化范围为 1.28%～3.28%，平均含量为 2.14%，为高有机碳含量段；上段(560～592 m，样品 71 块)TOC 的变化范围为 0.23%～0.53%，平均含量为 0.40%(黄江庆等，2014；梁榜等，2015).显然，建页 1 井下部介壳灰岩发育的层位为高有机碳含量段.此外，测井曲线上也显示明显差异，在东岳庙下部 *GR*、RLLD 等曲线值偏高，在东岳庙上部，这些测井曲线值明显降低(梁榜等，2015).在岩性上东岳庙段下部主要是灰岩、含泥灰岩、灰质页岩与黑色—深灰色泥页岩夹介壳灰岩，向上介壳变小，含量也逐渐减少，上述变化特征与 TOC 值垂向上的变化具有很好的一致性(图 3).

2.4　地球化学特征

主量元素可以表征沉积物的岩石学特征，元素含量的变化受控于矿物组成，指示沉积物来源，在一定程度上也反映古气候的演化(邓宏文和钱凯，1990；王吉茂和李恋，1997；Sheldon and Tabor，2009).沉积物中的微量元素含量在一定程度上也可以有效反映沉积环境的变化(Raiswell and Plant，1980；Sinha *et al*.，2006；Li *et al*.，2008；de Oliveira *et al*.，2009).因此，地球化学特征可以直观有效地反映古沉积环境变化.岩样测试分析表明东岳庙段上、下部一些元素及元素比值具有明显变化(图 3).

东岳庙段下部(592～644 m)：岩性主要是介壳灰岩或介壳层与黑色、深灰色的泥页岩互层.古气候指标 Sr/Cu 和 Fe/Mn 的变化范围分别为 0.3～2.8 和 13～153，古生产力指标 Ba、Cu、Ni 的变化范围分别为 0.03%～0.10%、0.012%～0.080%和 0.03%～0.10%，古盐度指标 Sr/Ba、Sr/Ca、Ca/(Ca+Fe)的变化范围分别为 0～2.5、0～0.012 和 0～1.2，古氧化还原指标 V/Cr、V/(V+Ni)的变化范围分别为 0.8～5.0 和 0.27～0.62，指示物源影响的指标 Zr/Al

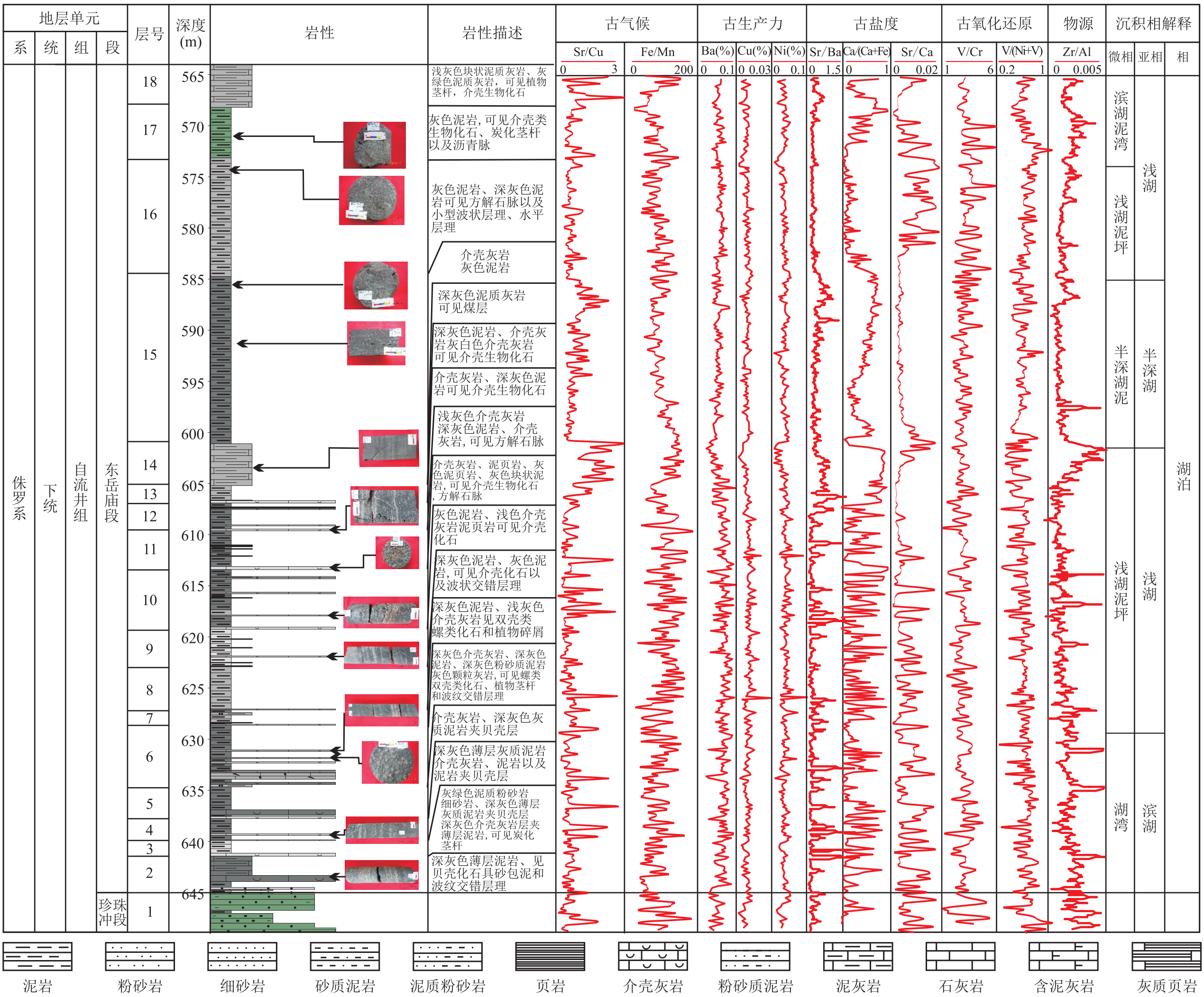

图 3　建页 HF-1 井地球化学指标垂向变化

Fig.3　Comprehensive column showing the vertical change of geochemical indicators in well HF-1

值的变化范围为 0.000 3～0.004 0(图 3).这些值在东岳庙段下部变化较大,结合其岩性,笔者认为在该阶段由于湖水面频繁变化,形成了多个小旋回,在每个小旋回内这些指标从底部到顶部均显示规律性变化.上述指标变化特征总体指示了自下而上湖水逐渐加深,如 Zr/Al 比值从下向上逐渐减小;同时介壳含量向上也具有快速递减的变化趋势,该沉积层顶部介壳消失,主要沉积深色泥页岩.

东岳庙段上部(560～592 m):深水沉积,主要沉积了一套黑色、深灰色到灰色的泥页岩,介壳类生物不发育,不含介壳灰岩或介壳层,但在东岳庙段顶部偶尔可见小介壳.上部元素含量及其比值也与下部高频旋回变化特征明显不同,除该层顶部外,上部元素含量及其比值相对稳定,很少见小旋回式波动,说明进入高位体系域,高湖水面背景条件下沉积环境变化较小.

3　有机质富集影响因素及形成模式

3.1　有机质富集影响因素

3.1.1　古盐度条件　Sr 和 Ba 是地壳中分布范围较广的微量元素,在淡化水环境中,水介质酸性较强,矿化度较低,SO_4^{2-} 含量偏少,Sr 和 Ba 都以重碳酸盐的形式存在于湖水中.当湖水发生咸化,而且矿化度不断增高时,Ba 以硫酸钡的形式沉淀,当湖水进一步咸化、浓缩到一定程度之后 Sr 才会以硫酸锶的形式沉淀;因此 Sr/Ba 通常被用来划分淡水环境和咸水环境(Raiswell and Plant, 1980).一般而言,Sr/Ba 值大于 1 代表咸水环境、小于 1 代表淡化水体(冯洪真等,1993).Sr/Ca 比值可以反映古盐度的变化,高值代表高盐度、低值代表低盐度(Li *et al*., 2008).D'Elia *et al*.(1983)和 Fisher *et al*.(1988)通过实测拉帕哈若克河口(Rappahannock)、约克

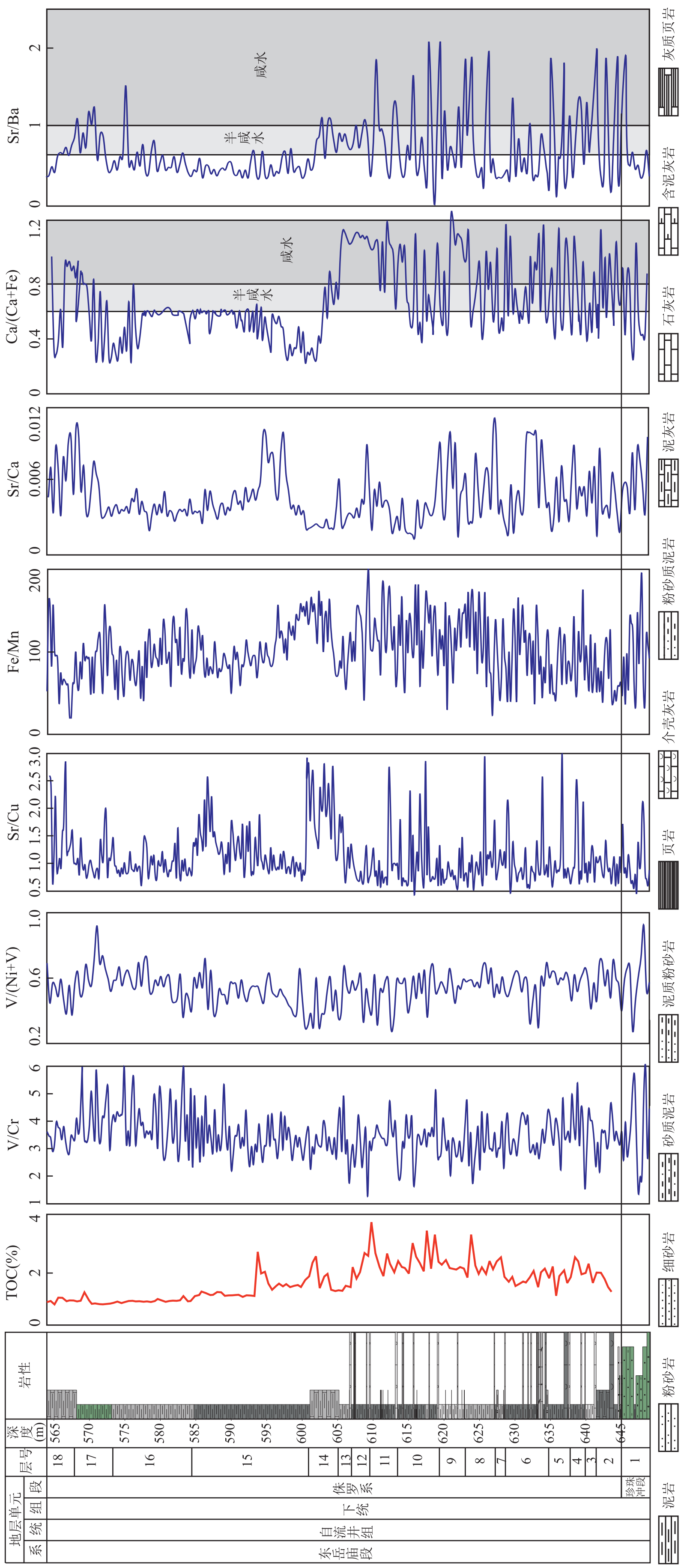

图 4　东岳庙段古氧化还原、古气候和古盐度指标垂向变化

Fig. 4　Vertical variations of paleoredox index, paleoclimate index and paleosalinity index in the Dongyuemiao member

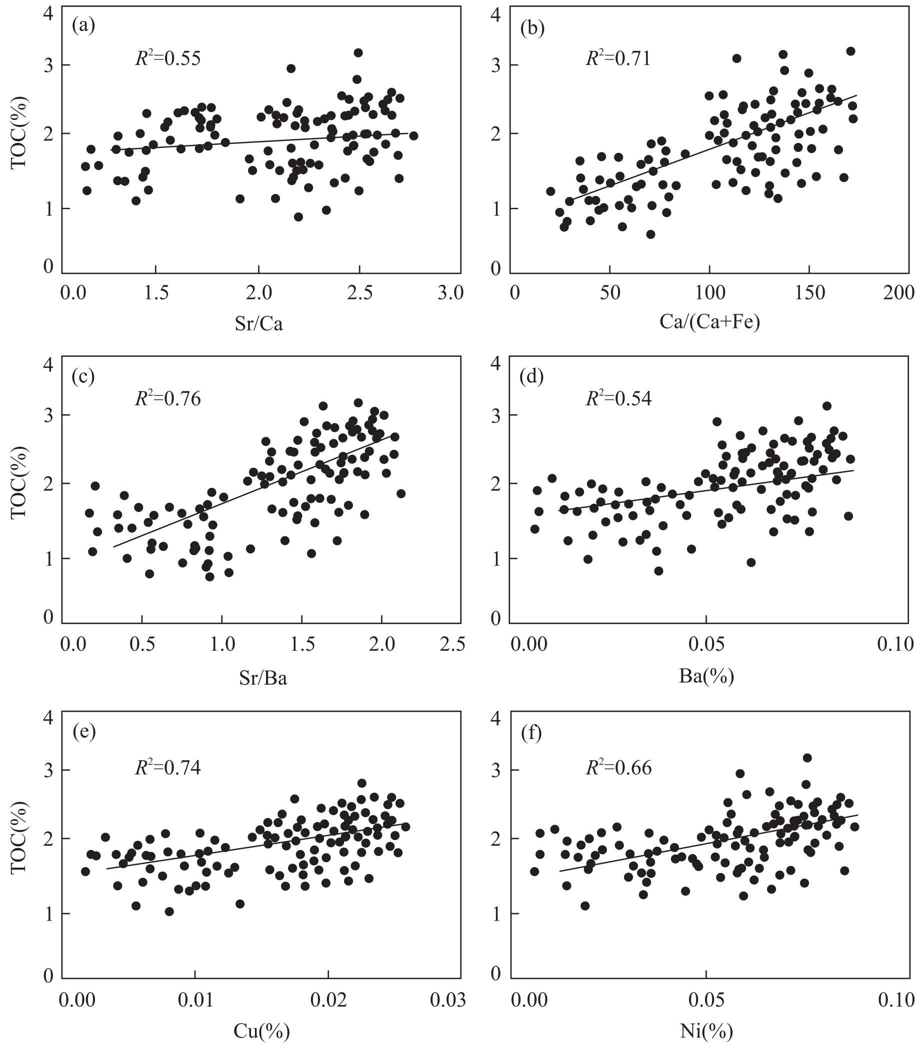

图5 东岳庙段古盐度指标和古生产力指标与TOC的关系

Fig.5 Paleosalinity index vs. TOC and paleoproductivity index vs. TOC of the Dongyuemiao member

(Yolk)河以及切萨皮克(Chesapeake)湾支流的现代沉积磷酸钙组分,以及奥陶纪密西西比河页岩、宾夕法尼亚纪海相到淡水煤层的沉积磷酸钙组分Ca/(Ca+Fe),证实了磷酸钙组分与盐度成正比;一般而言,海相环境其比值大于0.8,陆相淡水环境比值小于0.6(Nelson, 1967).东岳庙下部Sr/Ba的变化范围为0.3~2.3(图4),显示沉积环境主要为半咸水—咸水;上部该比值大部分小于半咸水临界值,属于淡水沉积环境.同样,Ca/(Ca+Fe)为0.40~0.99,也指示下部为半咸化—咸化沉积环境.Sr/Ca的变化规律与Sr/Ba和Ca/(Ca+Fe)相似,下部该比值较大表明其水体盐度高于上部.古盐度指标变化规律表明,东岳庙下部主要为半咸水—咸水环境,当湖水面较低时更容易造成沉积旋回变化并形成高频旋回;而东岳庙上部随着淡水注入,湖平面上升,水深增大,盐度降低水体淡化.古盐度指标Sr/Ca、Ca/Ca+Fe、Sr/Ba与TOC之间的相关系数分别为0.55、0.71和0.76(图5a~5c),表现出较高的正相关性.有机质在盐度较高的咸化水体中易于保存.

3.1.2 古气候和氧化还原条件 如前所述,Sr/Cu和Fe/Mn为古气候指标.一般1.3<Sr/Cu<5.0代表温暖、潮湿气候,Sr/Cu>5.0指示干热气候;Fe/Mn高值为温湿气候,低值代表干热气候(宋明水,2005).研究区测试结果显示Sr/Cu值为0.4~5.5,表明了当时气候温暖、湿润,但图4显示下部Sr/Cu有多个高值点,说明下部古气候在干热与湿润之间交替变化.同样,下部的Fe/Mn比值高于上部(图4).显然,古气候指标表明东岳庙段下部为干热—湿润交替气候,上部为湿润气候.

Sr/Cu和Fe/Mn与TOC之间的相关系数分别为0.46和0.51(图6),表现出较低的相关性.这是因为古气候可以引起藻类勃发,导致高的初级生产力,

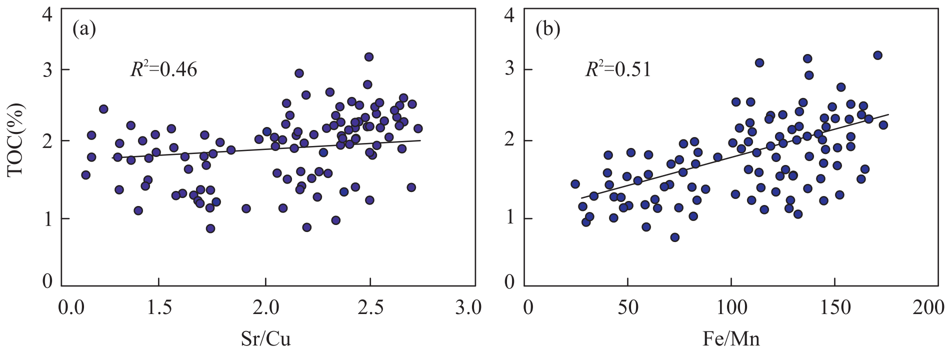

图 6　古气候指标 Sr/Cu(a)和 Fe/Mn(b)与 TOC 的关系

Fig.6　Sr/Cu vs. TOC (a) and Fe/Mn vs. TOC (b) of Dongyuemiao member

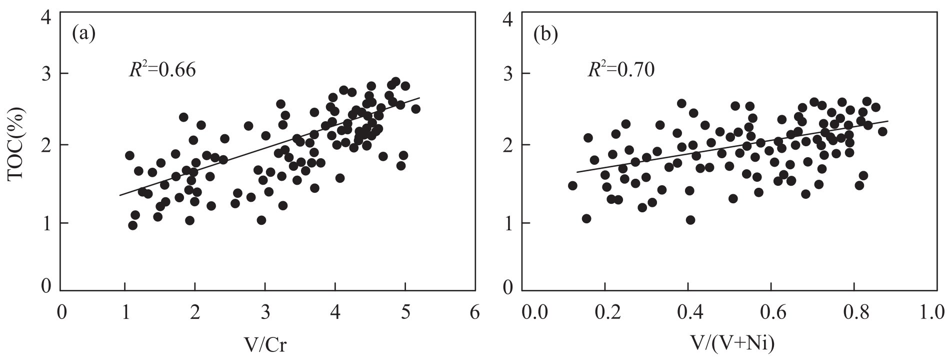

图 7　古氧化还原指标 V/Cr(a)和 V/(V+Ni)(b)与 TOC 的关系

Fig.7　V/Cr vs. TOC (a) and V/(V+Ni) vs. TOC (b) of the Dongyuemiao member

但是温暖湿润的气候也导致了大量淡水注入，湖盆因此不断扩张，引起沉积水体氧含量增加，不利于有机质的保存(Sageman *et al*., 2003).

Cr 在氧化海水中以六价态的铬元酸盐阴离子($CrO_4{}^{2-}$)形式存在，在还原水体中 $CrO_4{}^{2-}$ 被还原为 Cr^{3+}，与腐殖酸或富里酸结合形成复杂的化合物；V 在四价态时与有机质结合，并在还原条件下沉积，因此 V/Cr 通常被用作古氧化还原指标. $V/Cr<2$ 代表氧化环境，$2<V/Cr<4.25$ 为贫氧条件，$V/Cr>4.25$ 为缺氧条件(Jones and Manning, 1994). Hatch and Leventhal(1992)研究美国宾夕法尼亚上统海相黑色页岩时认为黄铁矿矿化度(DOP)和 V/(V+Ni)正相关，$0.54<V/(V+Ni)<0.72$ 代表缺氧环境，$0.46<V/(V+Ni)<0.60$ 为贫氧水体. 图 4 显示测试结果 $0.8<V/Cr<5.6$，绝大部值为 $2<V/Cr<4$，表示沉积水体为贫氧条件；$0.2<V/(V+Ni)<0.84$，V/(V+Ni)比值主要为 0.4～0.6. 因此，说明当时沉积环境主要为贫氧环境.

氧化还原指标 V/Cr 和 V/(V+Ni)与 TOC 之间的相关系数分别为 0.66 和 0.70(图 7)，两者之间的相关性较高，说明氧化还原条件对有机质的保存具有重大的影响，水体越缺氧越有利于有机质的保存.

4.1.3　古生产力条件　Ba、Cu 和 Ni 通常可作为古生产力有效替代指标(Dehairs *et al*., 1980; Dymond *et al*., 1992; Hatch and Leventhal, 1992; Francois *et al*., 1995; McManus *et al*., 1998; Eagle *et al*., 2003; Tribovillard *et al*., 2006; Algeo and Rowe, 2012). Cu 在氧化水体中以有机金属配位体的形式存在，少数以二价离子存在，随有机质沉降而到达海底，形成各自的硫化物而沉积下来，沉积物中 Cu 含量与有机质的沉降量有密切关系(Calvert and Pedersen, 1993; Whitfield, 2001). Ni 在有机质腐化之后与其形成的络合物在沉积物中富集，因此 Ni 作为古生产力指标(Piper and Perkins, 2004). Tribovillard *et al*.(2006)指出在对古生产力评价中，通常采用元素富集因素($EF_X=(X/Al)_{样品}/(X/Al)_{平均页岩}$)对元素进行标准化；如果 EF_X 大于 1 则相对平均页岩富集，小于 1 相对平均页岩耗损. 笔者计算得到 EF_{Ba} 平均值为 0.92(接近 1)，EF_{Cu} 平均值为 3.70(大于 1)，EF_{Ni} 平均值为 5.60(远大于 1)，指示了高的初级生产力. 图 8 显示东岳庙段古生产力指标(Ba、Cu、Ni)自下而上有减小趋势，说明下部

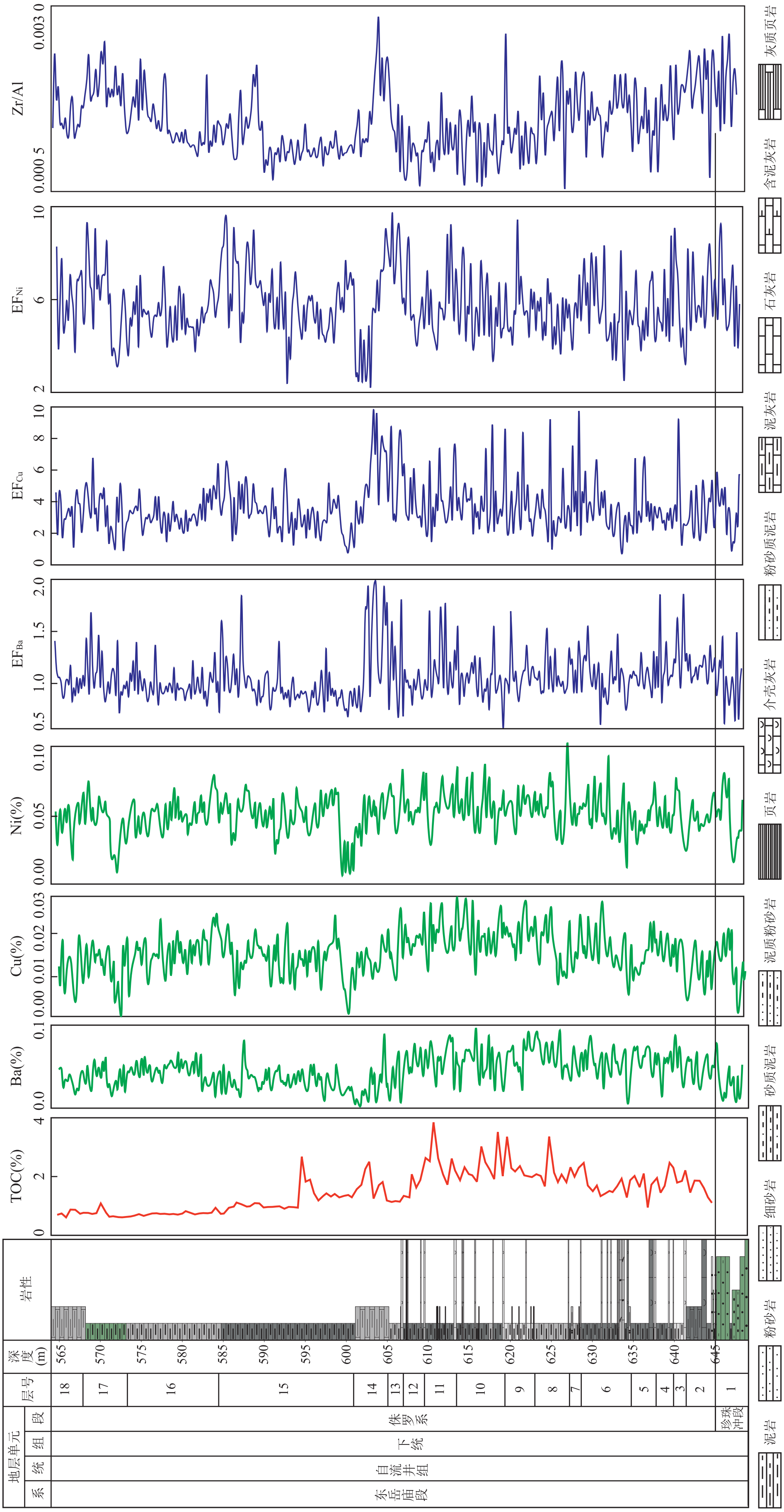

图 8 东岳庙段古生产力指标和对应的富集因素指标的垂向变化

Fig. 8 Vertical variations of paleoproductivity index and its enrichment factors in the Dongyuemiao member

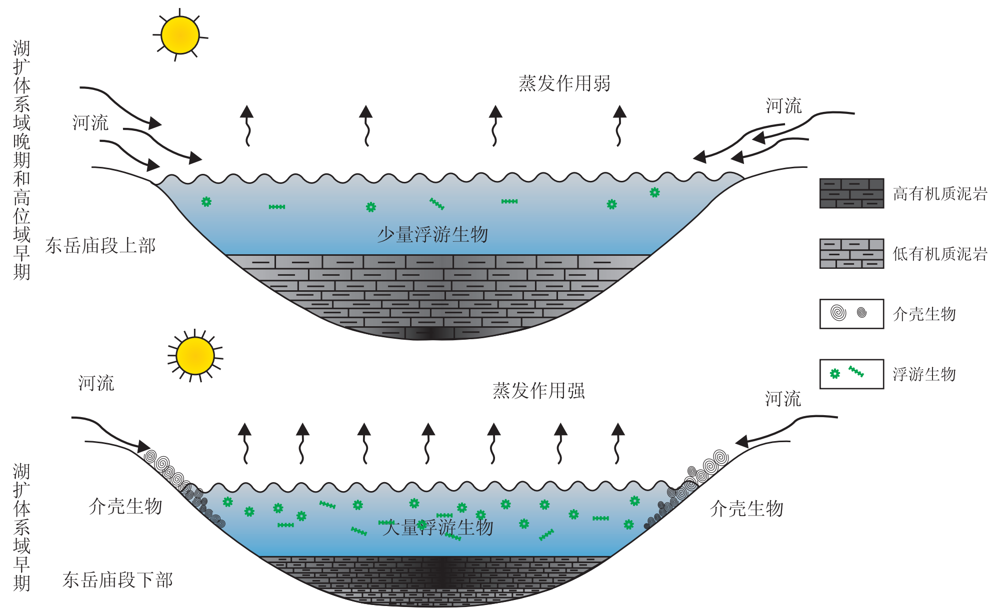

图 9　东岳庙段有机质富集模式

Fig.9　Organic matter enrichment model of the Dongyuemiao member

古生产力条件明显好于上部.Ba、Cu 和 Ni 与 TOC 之间的相关系数分别为 0.54、0.74 和 0.66(图 5d～5f)，表现出高的正相关性.东岳庙段下部发育大量介壳类化石，表明此阶段水体较浅、发育了大量生物，形成了高的初级生产力，并在后期的有利保存环境中形成了高 TOC 层段.

4.2　有机质富集模式

东岳庙段沉积环境分析显示沉积水深经历了浅—深—浅过程.Zr 作为典型的亲陆源性元素，不容易随粘土等细小碎屑沉积物远距离搬运，以机械迁移为主，沉积于离岸较近的区域，因此通常作为指示物源区远近的指标.越靠近陆源区，沉积岩中的 Zr 含量越高，反之越低；通常 Zr/Al 被用来反映陆相湖盆沉积物搬运的距离远近(魏志强等，2015).图 8 表明 Zr/Al 值在东岳庙下部湖扩体系域中逐渐减小，到上部进入高位体系域其逐渐增大，显然指示了湖盆水深的变化情况.正是由于东岳庙段上、下部沉积环境的差异，导致了有机质的差异富集.

东岳庙段下部，在湖扩体系域早期，湖平面较低，蒸发作用较强、气候偏干旱，水体盐度较高，导致丰富的有机质被保存下来.而东岳庙段上部以潮湿气候为主，大量淡水注入使得湖平面上升，形成半深湖沉积环境，水体盐度进一步减低而逐渐淡化，古生产力明显降低，最终导致了有机碳含量明显减少.

综上所述，古气候和相对湖平面控制下水体化学条件和初始生产力是控制有机质富集的重要因素.高古生产力以及咸化水体所形成的良好保存条件是东岳庙段下部泥页岩有机质富集的主要控制因素，低古生产力导致了东岳庙段上部有机碳含量低.因此，根据有机碳含量垂向变化的影响因素在湖扩和高位体系域中的差异，笔者建立了东岳庙段有机质富集模式(图 9)，即咸化水体、高古生产力条件下的湖盆泥岩有机质富集模式.

5　结论

(1)东岳庙段形成于湖相沉积环境、距离物源较近，因此陆源碎屑矿物含量较高，而粘土矿物含量相对较低，与北美页岩对比笔者认为东岳庙段泥页岩脆性高，易于形成压裂缝，有利于开采.

(2)东岳庙段上部曲线相对平缓，而下部表现为频繁小幅度变化，指示东岳庙段下部湖平面变化频繁，而上部水体变化不显著.古气候指标(Sr/Cu、Fe/Mn)指示东岳庙段下部为偏干旱气候；古盐度指标(Sr/Ca、Sr/Ba、Ca/(Ca+Fe))表明下部为咸水—半咸水环境，而上部为淡水环境；古生产力指标(Cu、Zn、Ni)指示下部生产力好于上部；古氧化还原指标(V/Cr、V/(V+Ni))表明下部水体为贫氧条件.

(3)鄂西—渝东地区下侏罗统自流井组东岳庙段富有机质页岩主要形成于半咸水—咸水贫氧环境的湖扩体系域早期.古气候和相对湖平面控制下的水体化学条件和初始生产力是控制有机质富集的重

要因素.在湖扩体系域晚期,大量淡水注入,湖泊水体盐度进一步降低,古生产力明显降低,导致有机碳含量明显减少.

致谢:感谢江汉油田分公司勘探开发研究院在岩心观察过程中提供的帮助,同时感谢两位匿名审稿人的宝贵意见和建议!

References

Algeo,T.J.,Rowe,H.,2012.Paleoceanographic Applications of Trace-Metal Concentration Data.*Chemical Geology*,324-325:6-18.doi:10.1016/j.chemgeo.2011.09.002

Calvert,S.E,Pedersen,T.F,1993.Geochemistry of Recent Oxic and Anoxic Marine Sediments:Implications for the Geological Record.*Marine Geology*,113(1-2):67-88.doi:10.1016/0025-3227(93)90150-t

Chen,H.D.,Huang,F.X.,Xu,S.L.,et al.,2009.Distribution Rule and Main Controlling Factors of the Marine Facies Hydrocarbon Substances in the Middle and Upper Parts of Yangtze Region,China.*Journal of Chengdu University of Technology* (*Science & Technology Edition*),36(6):569-577 (in Chinese with English abstract).

Chen,S.B.,Zhu,Y.M.,Wang,H.Y.,et al.,2010.Research Status and Trends of Shale Gas in China.*Acta Petrolei Sinica*,31(4):689-694 (in Chinese with English abstract).

de Oliveira,S.M.B.,Saia,S.E.M.G.,Pessenda,L.C.R.,et al.,2009.Lacustrine Sediments Provide Geochemical Evidence of Environmental Change during the Last Millennium in Southeastern Brazil.*Chemie der Erde-Geochemistry*,69(4):395-405.doi:10.1016/j.chemer.2009.03.002

Dehairs,F.,Chesselet,R.,Jedwab,J.,1980.Discrete Suspended Particles of Barite and the Barium Cycle in the Open Ocean.*Earth and Planetary Science Letters*,49(2):528-550.doi:10.1016/0012-821x(80)90094-1

D'Elia,C.F.,Nelson,D.M.,Boynton,W.R.,1983.Chesapeake Bay Nutrient and Plankton Dynamics:Ⅲ.the Annual Cycle of Dissolved Silicon.*Geochimica et Cosmochimica Acta*,47(11):1945-1955.doi:10.1016/0016-7037(83)90212-0

Deng,H.W.,Qian,K.,1990.The Genetic Types and Association Evolution of Deep Lacustrine Facies Mudstones.*Acta Sedimentologica Sinica*,8(3):1-21 (in Chinese with English abstract).

Dong,D.Z.,Zou,C.N.,Li,J.Z.,et al.,2011.Resource Potential,Exploration and Development Prospect of Shale Gas in the Whole World.*Geological Bulletin of China*,30(2):324-336 (in Chinese with English abstract).

Dymond,J.,Suess,E.,Lyle,M.,1992.Barium in Deep-Sea Sediment:A Geochemical Proxy for Paleoproductivity.*Paleoceanography*,7(2):163-181.doi:10.1029/92pa00181

Eagle,M.,Paytan,A.,Arrigo,K.R.,et al.,2003.A Comparison between Excess Barium and Barite as Indicators of Carbon Export.*Paleoceanography*,18(1):163-181.doi:10.1029/2002PA000793

Fan,Y.,2011.The Characteristics of Sequence Stratigraphy and Sedimentary Filling of Lower Jurassic Ziliujing Formation in the Northeast Area of Sichuan Basin (Dissertation).Chengdu University of Technology,Chengdu (in Chinese with English abstract).

Feng,H.Z.,Yu,J.H.,Fang,Y.T.,et al.,1993.Analysis of Paleosalinity during the Wufeng Age in Upper Yangtze Sea.*Journal of Stratigraphy*,17(3):179-185 (in Chinese with English abstract).

Feng,R.C.,Wu,Y.Y.,Tao,S.Z.,et al.,2015.Sedimentary Microfacies Characteristics and their Control on Reservoirs in Daanzhai Member,Lower Jurassic,Sichuan Basin.*Petroleum Geology & Experiment*,37(3):320-327 (in Chinese with English abstract).

Fisher,T.R.,Harding,L.W.,Stanley,D.W.,et al.,1988.Phytoplankton,Nutrients,and Turbidity in the Chesapeake,Delaware,and Hudson Estuaries.*Estuarine,Coastal and Shelf Science*,27(1):61-93.doi:10.1016/0272-7714(88)90032-7

Francois,R.,Honjo,S.,Manganini,S.J.,et al.,1995.Biogenic Barium Fluxes to the Deep Sea:Implications for Paleoproductivity Reconstruction.*Global Biogeochemical Cycles*,9(2):289-303.doi:10.1029/95gb00021

Guo,X.S.,Hu,D.F.,Wen,Z.D.,et al.,2014.Major Factors Controlling the Accumulation and High Productivity in Marine Shale Gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and Its Periphery:A Case Study of the Wufeng-Longmaxi Formation of Jiaoshiba Area.*Geology in China*,41(3):893-901 (in Chinese with English abstract).

Hatch,J.R.,Leventhal,J.S.,1992.Relationship between Inferred Redox Potential of the Depositional Environment and Geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone,Wabaunsee County,Kansas,U.S.A..Chemical Geology,99(1-3):65-82.doi:10.1016/0009-2541(92)90031-y

Huang,J.Q.,Liang,B.,Che,S.Q.,et al.,2014.The Main Factors Controlling the Continental Shale Gas Accumulation in Dongyuemiao Section of Western Hubei-Eastern Chongqing Area.*Journal of Oil and Gas Technology*,36(4):30-33 (in Chinese with English abstract).

Jones, B., Manning, D. A. C., 1994. Comparison of Geochemical Indices Used for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mudstones. *Chemical Geolology*, 111(1－4): 111－129. doi: 10.1016/0009－2541(94)90085－X

Li, J. J., Shi, Y. L., Zhang, X. W., et al., 2014. Control Factors of Enrichment and Producibility of Shale Oil: A Case Study of Biyang Depression. *Earth Science*, 39(7): 848－857 (in Chinese with English abstract).

Li, M. H., Kang, S. C., Zhu, L. P., et al., 2008. Mineralogy and Geochemistry of the Holocene Lacustrine Sediments in Nam Co, Tibet. *Quaternary International*, 187(1): 105－116. doi: 10.1016/j.quaint.2007.12.008

Liang, B., He, S., Chen, X. H., et al., 2015. Exploration Potential of Dongyuemiao Member Shale Gas in Western Hubei-Eastern Chongqing Area. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 22(1): 36－41 (in Chinese with English abstract).

Loucks, R. G., Ruppel, S. C., 2007. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and Depositional Setting of a Deep-Water Shale-Gas Succession in the Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 91(4): 579－601. doi: 10.1306/11020606059

Ma, Y. Q., Fan, M. J., Lu, Y. C., et al., 2016. Geochemistry and Sedimentology of the Lower Silurian Longmaxi Mudstone in Southwestern China: Implications for Depositional Controls on Organic Matter Accumulation. *Marine and Petroleum Geology*, 75: 291－309. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2016.04.024

McManus, J., Berelson, W. M., Klinkhammer, G. P., et al., 1998. Geochemistry of Barium in Marine Sediments: Implications for Its Use as a Paleoproxy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(21－22): 3453－3473. doi: 10.1016/s0016－7037(98)00248－8

Nelson, B., 1967. Sedimentary Phoshate Method for Estimating Paleosality. *Science*, 158(3803): 917－920. doi: 10.1126/science.158.3803.917

Ni, C., Hao, Y., Hou, G. F., et al., 2012. Cognition and Significance of Lower Jurassic Daanzhai Organic Muddy Shell Limestone Reservoir in Central Sichuan Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 17(2): 45－56 (in Chinese with English abstract).

Piper, D. Z., Perkins, R. B., 2004. A Modern vs. Permian Black Shale—the Hydrography, Primary Productivity, and Water-Column Chemistry of Deposition. *Chemical Geology*, 206(3): 177－197. doi: 10.1016/j.chemgeo.2003.12.006

Qin, J. Z., Zheng, L. J., Tenger, 2007. Study on the Restitution Coefficient of Original Total Organic Carbon for High Mature Marine Hydrocarbon Source Rocks. *Earth Science*, 32(6): 853－860 (in Chinese with English abstract).

Raiswell, R., Plant, J., 1980. The Incorporation of Trace Elements into Pyrite during Diagenesis of Black Shales, Yorkshire, England. *Economic Geology*, 75(5): 684－699. doi: 10.2113/gsecongeo.75.5.684

Sageman, B. B., Murphy, A. E., Werne, J. P., et al., 2003. A Tale of Shales: The Relative Roles of Production, Decomposition, and Dilution in the Accumulation of Organic-Rich Strata, Middle-Upper Devonian, Appalachian Basin. *Chemical Geology*, 195(1－4): 229－273. doi: 10.1016/s0009－2541(02)00397－2

Sheldon, N. D., Tabor, N. J., 2009. Quantitative Paleoenvironmental and Paleoclimatic Reconstruction Using Paleosols. *Earth-Science Reviews*, 95(1－2): 1－52. doi: 10.1016/j.earscirev.2009.03.004

Sinha, R., Smykatz-Kloss, W., Stüben, D., et al., 2006. Late Quaternary Palaeoclimatic Reconstruction from the Lacustrine Sediments of the Sambhar Playa Core, Thar Desert Margin, India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 233(3－4): 252－270. doi: 10.1016/j.palaeo.2005.09.012

Smol, J. P., Cumming, B. F., 2000. Tracking Long-Term Changes in Climate Using Algal Indicators in Lake Sediments. *Journal of Phycology*, 36(6): 986－1011. doi: 10.1046/j.1529－8817.2000.00049.x

Song, M. S., 2005. Sedimentary Environment Geochemistry in the Shasi Section of Southern Ramp, Dongying Depression. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(1): 67－73 (in Chinese with English abstract).

Tribovillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., et al., 2006. Trace Metals as Paleoredox and Paleoproductivity Proxies: An Update. *Chemical Geology*, 232(1－2): 12－32. doi: 10.1016/j.chemgeo.2006.02.012

Wang, D. F., Gao, S. K., Dong, D. Z., et al., 2013. A Primary Discussion on Challenges for Exploration and Development of Shale Gas Resources in China. *Natural Gas Industry*, 33(1): 8－17 (in Chinese with English abstract).

Wang, J. M., Li, L., 1997. Recovery Method and Application for Primary State of Source Rock Richness and Type. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(2): 45－48 (in Chinese with English abstract).

Wei, Z. Q., Zhong, W., Chen, Y. Q., et al., 2015. Supergene Geochemical Elements of Swampy Basin in the Subtropical Monsoon Region: A Case Study of Dingnan Dahu in Jiangxi Province. *Progress in Geography*, 34(7): 909－917 (in Chinese with English abstract).

Whitfield, M., 2001. Interactions between Phytoplankton and Trace Metals in the Ocean. *Advances in Marine Biology*, 41(3):1－128.doi:10.1016/S0065－2881(01)41002－9

Wu,S.T.,Zou,C.N.,Zhu,R.K.,et al.,2015.Reservoir Quality Characterization of Upper Triassic Chang 7 Shale in Ordos Basin.*Earth Science*,40(11):1810－1823 (in Chinese with English abstract).

Wu,Y.X.,Zhong,S.Q.,Pan,Y.P.,et al.,2009.Stereoscopic Exploration New Progress of Natural Gas in Sichuan Basin.*Lithologic Reservoirs*,21(1):128－132 (in Chinese with English abstract).

Yong,Y.Q.,2013.Research on Sedimentary Facies of the Lower Jurassic Ziliujing Group in the Yuanba Area of the Northeast Sichuan Basin (Dissertation).Chengdu University of Technology,Chengdu (in Chinese with English abstract).

Zhang,D.X.,Yang,T.Y.,2013.An Overview of Shale-Gas Production.*Acta Petrolei Sinica*,34(4):792－801 (in Chinese with English abstract).

Zhang,L.Y.,Li,J.Y.,Li,Z.,et al.,2015.Development Characteristics and Formation Mechanism of Intra-Organic Reservoir Space in Lacustrine Shales.*Earth Science*,40(11):1824－1833 (in Chinese with English abstract).

Zhang,Y.,Zheng,S.C.,Gao,B.,et al.,2017.Distribution Characteristics and Enrichment Factors of Organic Matter in Upper Permian Dalong Formation of Shangsi Section,Guangyuan,Sichuan Basin.*Earth Science*,42(6):1008－1025 (in Chinese with English abstract).

Zou,C.N.,Dong,D.Z.,Wang,S.J.,et al.,2010.Geological Characteristics,Formation Mechanism and Resource Potential of Shale Gas in China.*Petroleum Exploration and Development*,37(6):641－653 (in Chinese with English abstract).

Zou,C.N.,Dong,D.Z.,Yang,H.,et al.,2011.Conditions of Shale Gas Accumulation and Exploration Practices in China.*Natural Gas Industry*,31(12):26－39,125 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈洪德,黄福喜,徐胜林,等,2009.中上扬子地区海相成烃物质聚集分布规律及主控因素.成都理工大学学报(自然科学版),36(6):569－577.

陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等,2010.中国页岩气研究现状与发展趋势.石油学报,31(4):689－694.

邓宏文,钱凯,1990.深湖相泥岩的成因类型和组合演化.沉积学报,8(3):1－21.

董大忠,邹才能,李建忠,等,2011.页岩气资源潜力与勘探开发前景.地质通报,30(2):324－336.

范昱,2011.川东北地区下侏罗统自流井组层序地层及沉积充填特征研究(硕士学位论文).成都:成都理工大学.

冯洪真,俞剑华,方一亭,等,1993.五峰期上扬子海古盐度分析.地层学杂志,17(3):179－185.

冯荣昌,吴因业,陶士振,等,2015.四川盆地下侏罗统大安寨段沉积微相特征及对储层的控制.石油实验地质,37(3):320－327.

郭旭升,胡东风,文治东,等,2014.四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素——以焦石坝地区五峰组－龙马溪组为例.中国地质,41(3):893－901.

黄江庆,梁榜,车世琦,等,2014.鄂西渝东地区东岳庙段陆相页岩气富集主控因素分析.石油天然气学报,36(4):30－33.

李吉君,史颖琳,章新文,等,2014.页岩油富集可采主要控制因素分析:以泌阳凹陷为例.地球科学,39(7):848－857.

梁榜,何生,陈学辉,等,2015.鄂西渝东地区东岳庙段页岩气勘探潜力研究.断块油气田,22(1):36－41.

倪超,郝毅,厚刚福,等,2012.四川盆地中部侏罗系大安寨段含有机质泥质介壳灰岩储层的认识及其意义.海相油气地质,17(2):45－56.

秦建中,郑伦举,腾格尔,2007.海相高演化烃源岩总有机碳恢复系数研究.地球科学,32(6):853－860.

宋明水,2005.东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征.矿物岩石,25(1):67－73.

王道富,高世葵,董大忠,等,2013.中国页岩气资源勘探开发挑战初论.天然气工业,33(1):8－17.

王吉茂,李恋,1997.烃源岩原始有机质丰度和类型的恢复方法.沉积学报,15(2):45－48.

魏志强,钟巍,陈永强,等,2015.亚热带季风区湖沼流域表生地球化学元素研究——以江西定南大湖为例.地理科学进展,34(7):909－917.

吴松涛,邹才能,朱如凯,等,2015.鄂尔多斯盆地上三叠统长7段泥页岩储集性能.地球科学,40(11):1810－1823.

吴月先,钟水清,潘用平,等,2009.四川盆地天然气"立体勘探"新进展.岩性油气藏,21(1):128－132.

雍云乔,2013.川东北元坝地区下侏罗统自流井组沉积相特征研究(硕士学位论文).成都:成都理工大学.

张东晓,杨婷云,2013.页岩气开发综述.石油学报,34(4):792－801.

张林晔,李钜源,李政,等,2015.湖相页岩有机质储集空间发育特点与成因机制.地球科学,40(11):1824－1833.

张毅,郑书粲,高波,等,2017.四川广元上寺剖面上二叠统大隆组有机质分布特征与富集因素.地球科学,42(6):1008－1025.

邹才能,董大忠,王社教,等,2010.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力.石油勘探与开发,37(6):641－653.

邹才能,董大忠,杨桦,等,2011.中国页岩气形成条件及勘探实践.天然气工业,31(12):26－39,125.