

文章编号: 1001-6112(2009)03-0270-05

# 塔河油田岩溶作用元素地球化学的特征响应

刘显凤<sup>1,2,3</sup>, 蔡忠贤<sup>1,3</sup>, 云露<sup>4</sup>, 徐微<sup>5</sup>

(1. 中国地质大学 资源学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学 研究生院, 武汉 430074;  
3. 中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074; 4. 中国石化 西北分公司  
勘探开发规划设计研究院, 乌鲁木齐 830001; 5. 中海石油研究中心 勘探研究部, 北京 100027)

**摘要:**塔河油田位于塔里木盆地北部阿克库勒凸起西南缘。该区自加里东中晚期到海西早期经历多次构造抬升, 奥陶系碳酸盐岩地层长期暴露地表, 遭受了强烈的大气淡水淋滤溶蚀作用, 形成了一套复杂的表生岩溶系统。通过对塔河油田主体区溶洞砂泥质充填物硼、砷、镓、铷等微量元素以及稀土元素的研究, 大部分样品表现出淡水岩溶特征, 但 T615 井等 4 口井溶洞充填物元素地球化学具有海水成因特征, 表明石炭纪早期广泛海侵期间产生的混合水(淡水—海水)岩溶作用可能对塔河地区奥陶系岩溶体系具有一定程度的叠加改造作用。

**关键词:**微量元素; 稀土元素; 砂泥质充填物; 岩溶作用; 奥陶系; 塔河油田

**中图分类号:** TE122.2

**文献标识码:** A

## ELEMENT GEOCHEMISTRY CHARACTERISTIC RESPONSE FOR KARSTIFICATION IN THE TAHE OILFIELD

Liu Xianfeng<sup>1,2,3</sup>, Cai Zhongxian<sup>1,3</sup>, Yun Lu<sup>4</sup>, Xu Wei<sup>5</sup>

(1. *China University of Geosciences, Faculty of Resources, Wuhan, Hubei 430074, China*; 2. *China University of Geosciences, Graduate School, Wuhan, Hubei 430074, China*; 3. *China University of Geosciences, Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430074, China*;  
4. *Design and Planning Institute of Northwest Petroleum Bureau, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China*;  
5. *Exploration Research Dept. CNOOC Research, Beijing 100027, China*)

**Abstract:** The Tahe Oilfield is located in the southwest margin of Akekule Uplift in north Tarim Basin. It went through several times tectonic uplift from the late Caledonian to the early Hercynian, this lead to Ordovician carbonate formation be exposed to the surface for a long time and suffering from intense air fresh-water weathering, leaching and dissolving and developed a set of complicated superficial karst system. Throuth research of arenaceous and pelitic karstic cave deposit about its' trace element such as B, V, Ga, Rb, etc, and REE characteristic in the main region of the Tahe Oilfield, it indicated that most samples took on characteristic of fresh-water corrosion. While, samples of the four wells such as T615 showed influenced by seawater, it can be indicated that seawater—freshwater mixing corrosion caused by widely marine transgression in early of Carboniferous Period probably overlay and improved the Ordovician karst system in the Tehe Oilfield.

**Key words:** trace element; rare earth element; arenaceous and pelitic karstic cave deposit; karstification; Ordovician; Tahe Oilfield

塔河油田位于塔里木盆地塔北隆起阿克库勒凸起的西南部(图 1)。阿克库勒凸起在加里东中晚期和海西早期多次抬升, 其奥陶系碳酸盐岩地层长期裸露地表遭受淋滤作用, 形成了一套复杂结构的溶洞系统<sup>[1~5]</sup>。石炭纪早期, 塔北地区由西向东

的广泛海侵作用, 在一些地区存在淡水—海水混合溶蚀作用形成的洞穴<sup>[6]</sup>。因此, 在阿克库勒凸起地区除大气淡水岩溶作用外, 可能还存在其他因素的岩溶作用。本文试图从洞穴充填物元素地球化学角度来分析和阐述岩溶作用的成因。

收稿日期: 2008-03-16; 修订日期: 2009-04-02。

作者简介: 刘显凤(1980—), 女, 博士研究生, 能源地质工程专业。E-mail: i\_amlxf@126.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB422105)资助。

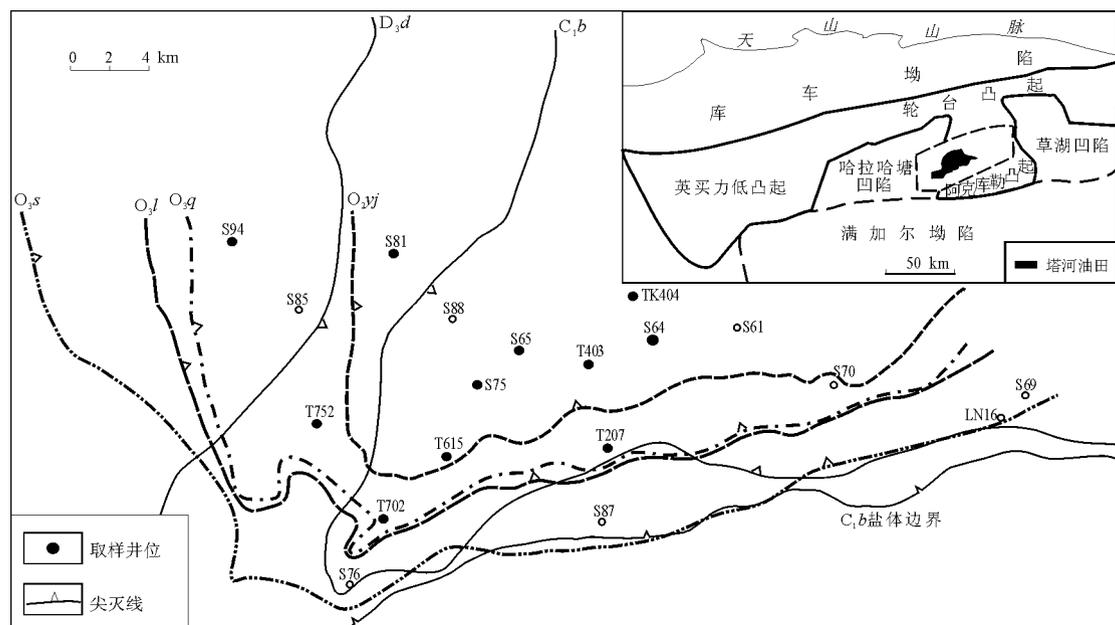


图1 塔河油田位置与取样井分布

Fig. 1 The location of Tahe Oilfield and the wells of sampling

岩溶环境下的水岩相互作用会引起元素及物质的携出、转移和再沉积<sup>[7]</sup>,导致岩溶充填物的元素地球化学特征发生变化,因此在岩溶充填物中记录有可指示古岩溶发育环境标志的地球化学信息。目前,碳氧同位素<sup>[8~11]</sup>、锶同位素<sup>[12,13]</sup>、方解石包裹体<sup>[14]</sup>以及微量<sup>[15]</sup>和稀土元素<sup>[16,17]</sup>等地球化学方法被广泛应用于岩溶环境及沉积物物源的分析中。研究中通过对溶洞砂泥质充填物的微量元素含量和稀土元素分布及比值特征分析,探讨了塔河地区奥陶系大气淡水岩溶作用及可能的淡水—海水混合溶蚀作用。

## 1 样品采集与实验

判别海水与淡水环境的元素有 B, Sr, Ba, Ga, K, V 及 Ni 等,同时稀土元素作为一种有效的分析沉积物源及环境的方法应用广泛<sup>[18]</sup>。经现场岩心观察后,研究中选取采集了来源于塔河工区的 11 口井不同深度的溶洞砂泥质充填物共 33 个样品,并对其进行了 ICP-MS 微量元素及稀土元素含量测试,数据的实验测试工作全部在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。

样品处理与测试流程如下:(1)选取目标井溶洞砂泥质充填物,碎样至合格的溶样要求,将碎样记录完整待处理。(2)样品预处理全过程(称样、溶解、提纯)在超净实验室里进行。样品的称取(50±0.01)mg,用不同浓度的由优级纯 HNO<sub>3</sub> 和 HF

经亚沸蒸馏装置制得的高纯试剂溶解清洗数次,分离后待上机测定。(3)实验仪器型号为 Agilent7500a 等离子体质谱仪。从称样至测定全过程,随机选用 5 个样品为重复样,以检验样品的分析结果的准确性。

## 2 溶洞充填物元素地球化学特征

### 2.1 溶洞充填物硼、钒含量关系

Potter 等<sup>[19]</sup>应用多元统计中因子分析的方法探讨了不同时代海相和淡水相的泥质沉积物中的 B, Co, Cr, Cu, Ga, Ni, Pb, Zn, V 等元素含量特征,研究发现 B, Cr, Cu, Ga, Ni, V 等元素能较好地地区分海水和淡水环境,其中元素 B 和 V 是最大的影响因素,由此建立了 Potter B-V 图版用以区分沉积物的淡水与海水沉积环境。赵振华<sup>[20]</sup>在对河北卢龙寒武—奥陶系剖面沉积岩的研究过程中,应用 Potter 图版对沉积物中的硼—钒含量关系进行了分析,有效区分出其沉积物的海、陆相不同来源。本次研究统计分析了塔河油田 33 个溶洞充填物样品硼、钒含量关系,在 Potter 图版上 78.79% 的样品位于淡水区(图 2),表明塔河油田的岩溶作用主要为大气淡水溶蚀作用;另一方面, T207-M20, T615-M4, T615-M7, T615-M8 和 S81-M1 等 5 个样品位于海相区,样品 T615-M5 和 T615-M6 位于海水—淡水区分界线附近,表明在岩溶作用中,这些取样点的岩溶充填物不同程度受海水的影响,可能是混合水溶蚀的产物。

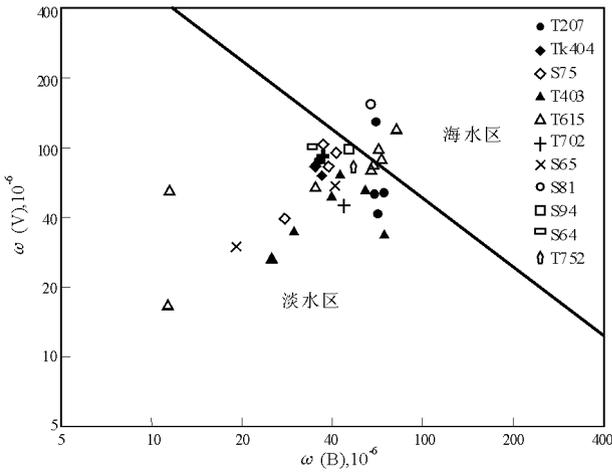


图 2 塔河地区奥陶系溶洞砂泥质充填物硼—矾含量关系<sup>[19]</sup>

Fig. 2 The figure of B—V content of arenaceous and pelitic karstic cave deposit in the Ordovician, Tahe area of the Tarim Basin

### 2.2 充填物的锶/钡、硼/镓比值特征

Sr/Ba; 锶钡比值的原理在于 Sr 和 Ba 在元素周期表中同为第二主族元素, 具相似的化学性质, 但与元素 Sr 相比 Ba 的化合物溶解度偏低。淡水与海水混合时淡水中的 Ba<sup>2+</sup> 与海水中的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 结合生成 BaSO<sub>4</sub> 沉淀, 而 SrSO<sub>4</sub> 的溶解度较大可以继续迁移至远海, 通过生物途径沉淀下来。因此可以用 Sr/Ba 的比值来区分海相与陆相的沉积环境。一般认为淡水沉积物中 Sr/Ba < 1, 而在海相沉积物中 Sr/Ba > 1, 但也有资料表明海相地层中的锶钡比值不一定都大于 1。如刘宝珺<sup>[21]</sup> 研究认为海相 Sr/Ba 为 1~0.8, 海陆交互相 Sr/Ba 为 0.16~0.8, 陆相 Sr/Ba < 0.16, 但从淡水向海相过渡沉积物中锶钡的比值急剧增大的趋势是明显的(表 1)。根据研究需要, 在对实验样品锶、钡数据的统计分析中选取 Sr/Ba = 0.5 用以区分淡水与半咸水环境。

B/Ga; B 为变价元素, 其化学性质活泼, 在水中可以发生长距离迁移, 在沉积水体中随盐度的增加而增加, 而 Ga 的迁移能力则相对弱得多, 这主要是由于 Ga 元素活动性较差, Ga 的氢氧化物在 pH = 5 时很容易沉淀; B 和 Ga 化学性质的差异是

表 1 不同相中的锶钡比<sup>[21]</sup>

Table 1 Sr/Ba of different facies

地区	层位	Sr/Ba		
		淡水	半咸水	海水
西西伯利亚北部	J—K	0.148	0.462	0.575
沿里海同期凹陷区	J—K	0.35	0.714	0.818
中国	现代泥炭沼泽	0.1~0.5	0.7~1.2	>1.3

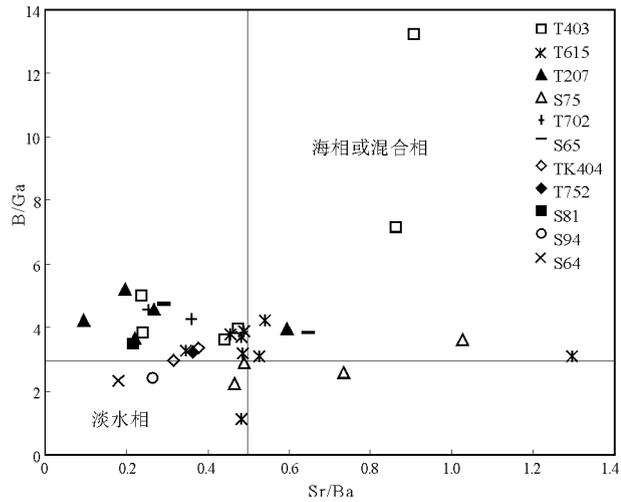


图 3 塔河地区奥陶系溶洞砂泥质充填物 Sr/Ba—B/Ga 比值交汇分析

Fig. 3 Crossplot between Sr/Ba and B/Ga of arenaceous and pelitic karstic cave deposit in the Ordovician, Tahe area of the Tarim Basin

其区分盐度的基础。张金亮<sup>[22]</sup> 提出 B/Ga < 1.5 表征沉积环境为淡水相, B/Ga 为 5~6 为近岸相, B/Ga > 7 为海相; 戴塔根等<sup>[23]</sup> 认为 B/Ga < 3 反映淡水相, B/Ga > 4 为海相。笔者应用 B/Ga = 3 来区分淡水和半咸水。通过对实验样品 Sr/Ba 和 B/Ga 的交汇分析(图 3), 其中样品 T615—M2, T615—M4, T615—M9, T403—M13, T403—M15, T207—M19, S75—M22, S65—M21 位于海相或混合相, 表明其溶洞充填物受海水的影响, 岩溶作用可能为混合水所致。

### 2.3 溶洞充填物的镓—硼—铷三元素的含量关系

Dengens<sup>[24]</sup> 应用 B, Ga, Rb 3 种元素的含量关系对来源于海水和淡水相的 78 个页岩和灰岩样品进行了区分, 元素分析得出的结果与地层和岩石学分析的结果一致。严钦尚<sup>[25]</sup> 应用 Dengens B—Ga—Rb 含量关系三角图分析研究了苏北地区的海侵情况和沉积环境; 彭海艳等<sup>[26]</sup> 亦用此方法合理解释了鄂尔多斯盆地山西组泥岩的沉积环境。

研究中以 Dengens B—Ga—Rb 含量关系三角图为底图, 将实验测得的 33 个样品数据进行投点分析, 结果显示, 除 T403—M13 样品分布在海相区, T403—M15 的样品分布接近于不确定区, 塔河地区大部分样品元素 B—Ga—Rb 含量的关系反映出淡水溶蚀作用特征(图 4)。值得注意的是 T207 井、S81 井等样品数据点位于淡水区, 这与元素 B—V 含量关系以及 Sr/Ba 所表现出的溶蚀特征并不一致, 推测认为, 这些地区在早期淡水溶蚀作用的基础上, 叠加了海水—淡水的混合水溶蚀作用。

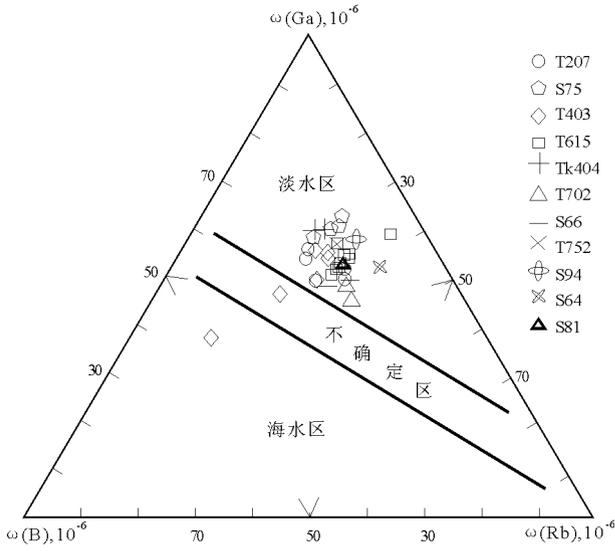


图 4 塔河地区奥陶系溶洞砂泥质充填物 B-Ga-Rb 含量三角关系<sup>[24]</sup>

三角投点中的 Ga 元素, 投点时为乘以 10 后再投点。

Fig. 4 The triangle figure for the content of B, Ga, Rb of arenaceous and pelitic karstic cave deposit in the Ordovician, Tahe area of the Tarim Basin

### 2.4 溶洞砂泥质充填物的稀土元素(REE)特征

稀土元素是一组特殊的微量元素, 由于其原子序数相近, 因此具有相似的化学性质且活动具有整体性。Taylor 等<sup>[27]</sup>认为稀土元素的配分模式可以反映源区的特征。陈衍景<sup>[28]</sup>则认为源区不是决定 REE 配分模式的唯一因素, REE 是物源和沉积环境及沉积过程共同作用的结果。同时, 在溶液的迁移过程中, 由于重稀土元素(HREE)迁移能力高于轻稀土(LREE)使得海水中的重稀土元素稍富集。

研究中, 首先对实验测得的塔河油田 33 个稀土元素数据进行球粒陨石标准化<sup>[27]</sup>和北美页岩标准化<sup>[29]</sup>。球粒陨石标准化后的配分模式(图 5)与 Martin (1976) 统计的河水的稀土元素配分模式<sup>[30]</sup>相近, 表明塔河油田奥陶系地层在海西期长期暴露于地表, 其岩溶作用主要受大气淡水影响。另一方面, 从北美页岩标准化后的各井样品重、轻稀土元素含量看(图 6), S81 井、T207 井、T403 井的全部样品和 T615 井的部分样品  $\sum HREE > \sum LREE$ , 表明其溶洞充填物不同程度的受海水影响, 这与上

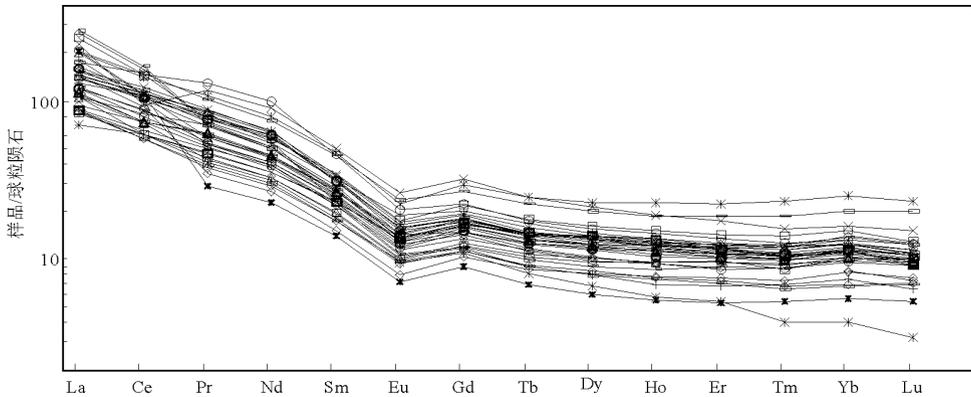


图 5 塔河地区奥陶系溶洞砂泥质充填物不同样品的稀土元素经球粒陨石标准化后含量配分模式

Fig. 5 Distribution patterns of samples REE content normalized to chondrite of arenaceous and pelitic karstic cave deposit in the Ordovician, Tahe area of the Tarim Basin

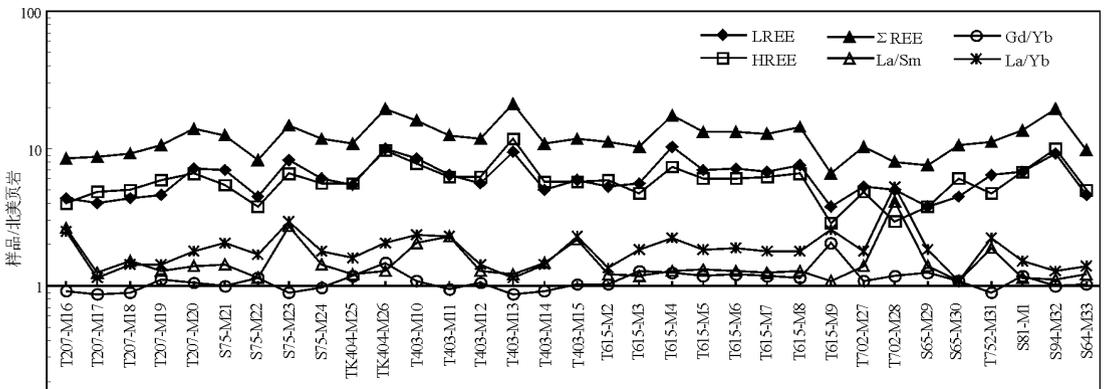


图 6 塔河地区奥陶系溶洞砂泥质充填物不同样品的稀土元素含量经北美页岩标准化后的分布

Fig. 6 The values of samples REE content normalized to North American Shale composite of arenaceous and pelitic karstic cave deposit in the Ordovician, Tahe area of the Tarim Basin

述微量元素的分析结果是一致的。对于 T615 井虽只有一个样品重稀土富集,但是从反映轻重稀土内部的分馏程度 La/Sm, Gd/Yb 及轻重稀土间的分馏程度 La/Yb(图 6)发现,T615 井的轻稀土和重稀土内分馏并不很大,而轻重稀土之间分馏很大,也表明在岩溶作用过程中环境的 Eh,pH 及阴阳离子的活度等复杂因素的影响造成其 REE 内部分馏的复杂性。

### 3 结果与讨论

通过对岩溶洞穴中砂泥质充填物的 B-V, B-Ga-Ra 及 Sr/Ba-B/Ga 等微量元素的含量和比值及 REE 稀土元素特征的统计分析,综合认为研究区大部分样品表现出淡水沉积特征,表明塔河地区岩溶作用主要以大气淡水溶蚀作用为主,但 S81,T403,T207,T615 等井不同程度地受到海水影响,对应区域可能发生过混合水溶蚀作用。同时,样品微量元素 B-V 含量和 B-Ga-Ra 含量分析结果并不完全一致,推测这些地区混合水溶蚀作用并不强烈,对先期淡水岩溶作用具一定程度的叠加改造效应。关于塔河地区混合水溶蚀范围及程度等问题有待于进一步的研究。

#### 参考文献:

- 1 饶丹,马绪杰,贾存善等. 塔河油田主体区奥陶系缝洞系统与油气分布[J]. 石油实验地质,2007,29(6):589~592
- 2 肖玉茹,何峰煜,孙义梅. 古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究:以塔河油田奥陶系古洞穴为例[J]. 石油与天然气地质,2003,24(1):75~80
- 3 陈强路,何治亮,李思田. 塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层与油气聚集带[J]. 石油实验地质,2007,29(4):367~372
- 4 阎相宾. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征[J]. 石油与天然气地质,2002,23(3):262~265
- 5 康玉柱. 塔里木盆地古生代海相碳酸盐岩储集岩特征[J]. 石油实验地质,2007,29(3):217~223
- 6 郭建华. 塔北、塔中地区下古生界深埋藏古岩溶[J]. 中国岩溶,1996,15(3):207~216
- 7 袁道先. 岩溶学词典[M]. 北京:地质出版社,1988
- 8 刘小平,吴欣松,张祥忠. 轮古西地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶储层碳、氧同位素地球化学特征[J]. 西安石油大学学报,2004,19(4):69~76
- 9 张云峰,王清晨. 济阳坳陷奥陶系碳酸盐岩及缝洞充填方解石 C、

- O 同位素特征及其意义[J]. 地质科学,2007,42(3):570~578
- 10 舒勇,郑永飞,魏春生. 白云鄂博碳酸岩墙碳氧同位素地球化学[J]. 地球化学,2001,30(2):169~175
- 11 王大瑞,白自强. 广西及邻区泥盆系碳酸盐岩碳氧同位素组成特征及意义[J]. 北京大学学报,1995,31(4):460~466
- 12 黄思静,刘树根,李国蓉. 奥陶系海相碳酸盐岩同位素组成及受成岩流体的影响[J]. 成都理工大学学报,2004,30(1):1~7
- 13 刘存革,李国蓉,张一伟. 锶同位素在古岩溶研究中的应用:以塔河油田奥陶系为例[J]. 地质学报,2007,81(10):1398~1406
- 14 夏日元,唐建生,邹胜章等. 塔里木盆地北缘古岩溶充填物包裹体特征[J]. 中国岩溶,2006,25(3):246~249
- 15 刘刚,周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用:以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质,2007,29(3):307~314
- 16 郑荣才,陈洪德,张哨楠等. 川东黄龙组古岩溶储层的稳定同位素和流体性质[J]. 地球科学,1997,22(4):424~428
- 17 郑荣才,陈洪德. 川东黄龙组古岩溶储层微量和稀土元素地球化学特征[J]. 成都理工学院学报,1997,24(1):1~7
- 18 杨守业,李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展[J]. 地球科学进展,1999,14(2):164~167
- 19 Potter P E, Shimp N F, Witters J. Trace elements in marine and fresh-water argillaceous sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1963,27:669~694
- 20 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京:科学出版社,1997
- 21 刘宝珺. 岩相古地理基础和工作方法[M]. 北京:地质出版社,1985
- 22 张金亮. 塔里木盆地志留系古海洋沉积环境的元素地球化学特征[J]. 中国海洋大学学报,2006,36(2):200~208
- 23 戴塔根. 应用地球化学[M]. 长沙:中南大学出版社,2005
- 24 Degens E T, Williams E G, Keith M L. Application of geochemical criteria [Pennsylvania], Part 2 of environmental studies of Carboniferous sediments [J]. AAPG Bulletin, 1958,42:981~997
- 25 严钦尚,张国栋,顶立嵩等. 苏北金湖凹陷阜宁群的海侵和沉积环境[J]. 地质学报,1979,(1):74~83
- 26 彭海艳,陈洪德. 微量元素分析在沉积环境识别中的应用 [J]. 新疆地质,2006,2(2):202~205
- 27 陈衍景. 环境对沉积物微量元素含量和配分型式的制约[J]. 地质地球化学,1996,3(97):97~105
- 28 Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution: an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [M]. Oxford:Blackwell Scientific Pub,1985. 312
- 29 韩吟文,马振东. 地球化学[M]. 北京:地质出版社,2003
- 30 强子同. 碳酸盐岩储层地质学[M]. 东营:中国石油大学出版社,2007

(编辑 徐文明)