

四川盆地东南部茅口组古岩溶特征及识别*

施泽进^{1,2} 夏文谦² 王勇³ 田雪松² 王长城²

SHI ZeJin^{1,2}, XIA WenQian², WANG Yong³, TIAN XueSong² and WANG ChangCheng²

1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都理工大学, 成都 610059

2. 成都理工大学能源学院, 成都 610059

3. 成都理工大学核技术与自动化工程学院地球化学系, 成都 610059

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, CDUT, Chengdu 610059, China

2. College of Energy Resources, CDUT, Chengdu 610059, China

3. Department of Geochemistry, College of Nuclear Technology and Automation Engineering, CDUT, Chengdu 610059, China

2013-07-11 收稿, 2013-12-21 改回.

Shi ZJ, Xia WQ, Wang Y, Tian XS and Wang CC. 2014. Characteristics and identification of paleokarst in the Maokou Formation in the southeastern Sichuan basin. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3):622–630

Abstract The palaeokarst in the Maokou Formation in the southeastern Sichuan basin can be recognized through field observation and geochemical methods. The palaeokarst developed into four main types: (a) depositional-period karst; (b) supergene karst; (c) buried karst; and (d) fold karst. There are several differences between the four types of palaeokarst in terms of the macroscopic and microscopic features. Homogenization temperatures and cathode ray analysis of both carbon and strontium isotopes may be used to identify and study the different types of paleokarsts in the Maokou Formation of the research area. The depositional-period karst shows small scale development, mainly selective dissolution, and no light characteristics under the cathode rays. Supergene karst developed in large scale and occurred mainly in the middle and upper parts of the Maokou Formation, showing a large number of party spots and dissolved-collapsed breccias. The fillings in the dissolved pores and vugs are mainly medium-coarse-grained calcites and a small amount of local filtrated sands which show dark brown or dark reddish orange light under cathode rays. When the calcites and filtrated sands exist together, zoning is very clear. The carbon isotope of the cement fillings is between 0.26‰ ~ 3.43‰, strontium isotope ranges between 0.7044 ~ 0.7049, and the homogenization temperatures range between 57 ~ 65°C. Buried karst is small scale in development and the cement fillings in the dissolved pores and vugs contain organic matter which often coexists with asphalt remains. The cement fillings are composed of mostly fine-medium grained calcites which show dark brown light under cathode rays. The carbon isotope falls between -1.44‰ ~ -0.92‰, strontium isotopes range between 0.7037 ~ 0.7049, and the homogenization temperatures ranges between 108 ~ 135°C. Fold karst develops universally, often occurring in cracks or party spots communicated with cracks or dissolution-enlarged fractures. The cement fillings are mostly fine-medium grained calcites, showing dark brown light or no light under cathode rays. The carbon isotope is between 1.58‰ ~ 4.07‰, the strontium isotope ranges between 0.7050 ~ 0.7082, and the homogenization temperatures ranges between 58 ~ 110°C. The correct identification of palaeokarst types in different regions holds great significance for understanding the mechanism of reservoir development and oil and gas exploration.

Key words Characteristics of paleokarst; Identification of paleokarst; Maokou Formation; Southeastern Sichuan basin

摘要 以野外观察结合地球化学方法可以对四川盆地东南部茅口组的古岩溶进行较好的识别。该区茅口组主要发育四种类型的古岩溶,分别为沉积期岩溶、表生期岩溶、埋藏期岩溶和褶皱期岩溶,这四种类型的古岩溶在宏观特征、微观特征、包裹体均一温度、阴极射线及碳同位素和锶同位素上都表现出了一定的差异性,这些差异性综合起来可作为研究区茅口组不同类型古岩溶的识别标志。沉积期岩溶具有发育规模小,以选择性溶蚀为主及在阴极射线下发光的特征;表生期岩溶发育规模大,且主要出现在茅口组的中上部,可见大量的方斑及溶塌角砾,溶蚀孔洞充填物以中-粗晶方解石为主,局部可见少量渗

* 本文受国家自然科学基金重点项目(40739903)资助。

第一作者简介: 施泽进,男,1965年生,教授,博导,从事沉积学和石油地质方面的教学和科研工作, E-mail: szj@cdut.edu.cn

滤砂,阴极射线下发暗褐色光或暗橙红色光,或两者共有而具环带结构,胶结充填物的碳同位素介于 $0.26‰ \sim 3.43‰$ 之间,铈同位素介于 $0.7044 \sim 0.7049$ 之间,包裹体均一温度为 $57 \sim 65^\circ\text{C}$;埋藏期岩溶发育规模不大,溶蚀孔洞中的胶结充填物被有机质侵染严重,常与残存的沥青共存,胶结充填物多为细-中晶方解石,阴极射线下发暗褐色光,碳同位素介于 $-1.44‰ \sim -0.92‰$ 之间,铈同位素介于 $0.7037 \sim 0.7049$ 之间,包裹体均一温度为 $108 \sim 135^\circ\text{C}$;褶皱期岩溶的发育具有普遍性,常以裂缝或与裂缝沟通的方斑或裂缝溶蚀扩大缝的形式出现,溶蚀孔洞充填物以细-中晶方解石为主,阴极射线不发光或发暗褐色光,碳同位素介于 $1.58‰ \sim 4.07‰$ 之间,铈同位素介于 $0.7050 \sim 0.7082$ 之间,包裹体均一温度为 $58 \sim 110^\circ\text{C}$ 。正确判断不同区域的古岩溶类型,对理解储层的形成机制及油气勘探部署具有重要的意义。

关键词 古岩溶特征;古岩溶识别;茅口组;四川盆地东南部

中图分类号 P618.13

鉴于古岩溶在世界油气勘探中的重要地位,其一直是石油地质工作者关注的重点和热点(Wang and Al-Aasm, 2002; Sean *et al.*, 2007; Kang *et al.*, 2012)。中国的诸多盆地,如塔里木盆地(Zhang *et al.*, 2004; 郭光辉等, 2012)、柴达木盆地(Feng *et al.*, 2013)、鄂尔多斯盆地(夏明军等, 2007)及四川盆地(张兵等, 2011)等均发现了大量的古岩溶型储层,并且建成了诸如塔河、轮南、长庆及威远等大中型油气田,因此开展古岩溶的研究对海相油气勘探具有重要意义(贾振远和蔡忠贤, 2004; 刘光鼎, 2007; 苏中堂等, 2010)。四川盆地茅口组古岩溶普遍发育,一直是川东南探区一个重要的油气勘探目的层,经过几十年的勘探曾在赤水取得过重大的突破(马东洲等, 2009),近期LS1井、FS1井(向斜区)在茅口组相继获得勘探突破,表明研究区茅口组具有较大的勘探潜力(郭旭升等, 2012)。

由于茅口组古岩溶的发育规模普遍较小,沉积后遭受风化剥蚀的时间仅为 $3 \sim 5\text{Myr}$ (李兴平等, 2008),并且经历了构造及成岩等地质作用的改造,使得对茅口组古岩溶型储层的认识经历了一个缓慢而不断修正的过程。在20世纪90年代以前,认为茅口组主要为裂缝型气藏,储层主要由喜山期构造运动形成的裂缝及沿裂缝溶蚀形成的孔洞构成(吴康, 1989),90年代至2000年期间,人们逐步认识到在茅口组可能存在古岩溶,并且古岩溶的发育情况与天然气的聚集有着密切的关系;2000年以后,茅口组存在古岩溶的观点已经被人们普遍接受(陈宗清, 2007; 胡明毅等, 2012; 郭旭升等, 2012),并且认为茅口组发育了沉积期岩溶、风化期岩溶、埋藏期岩溶及褶皱期岩溶等多种不同类型的古岩溶。此后石油地质工作者在油气勘探过程中都无不强调古岩溶对茅口组油气勘探的重要性(He *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2012)。对古岩溶型储集体的勘探来讲,核心是如何寻找、识别和预测它们(王勇等, 2011)。然而,不同类型古岩溶的发育规模不同,造成它们对油气勘探的重要程度亦有所不同,但在野外及钻井中,除非遇到比较典型的岩溶发育带,否则很难做到对每个地方的古岩溶类型都能做出准确地判断,尤其是在有多种古岩溶同时发育、经历了较为复杂的构造及成岩作用改造叠加的区域,这一问题就显得更为突出。以野外工作为基础进行地球化学方面的研究,建立不同岩溶类型的地球化学响应模式,可以较为准确地判断古岩溶的类型。对古岩溶类

型的准确识别,无疑对理解茅口组储层的发展演化过程及判断其发育规模具有重要的现实意义。

文中样品包裹体测试完成于油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学),仪器为英国Renishaw invia系列新型激光共焦显微拉曼光谱仪;同位素分析方法可参阅文献(施泽进等, 2011, 2013)。

1 区域地质背景

四川盆地的大地构造位置处于扬子准地台偏西北一侧,是扬子准地台的一个次一级构造单元。本次研究区位于四川盆地东南部,属于扬子准地台的三级大地构造单元,构造主体位置跨越四川盆地川东南弧形高陡褶皱带和南部的低陡褶皱区(图1)。在加里东期及海西期,地壳运动以与张裂活动伴生的升降运动为特征,未发生过与挤压活动有关的断褶运动(张渝昌等, 1989)。晚加里东运动使地壳持续抬升,发育近东西向的拉张断陷盆地,致使川东拗陷基底起伏不平,总体特征是西高东低,存在“三隆三洼”的古地貌特征(胡光灿和杜尚明, 1992)。二叠纪早期全球性海侵,淹没了整个上扬子陆块,沉积了正常浅海相的栖霞组及茅口组灰岩。茅口期末,由于受东吴运动的波动和影响,整个上扬子盆地大部分地区地壳隆起,形成泸州和开江两个大型古隆起的雏形,造成了上下二叠统之间的沉积间断(张渝昌等, 1989)。随后印支期的地壳运动由张裂活动转变为压扭活动,使整个四川盆地结束了海相沉积阶段,变为陆相沉积盆地。燕山运动造成褶皱抬升,再次隆起,形成与褶皱伴生的燕山期裂缝,最后喜山运动使盆地内的沉积地层发生了强烈的断褶作用,形成如今的构造面貌。

茅口组整合于栖霞组之上,上与龙潭组不整合接触,沉积相为开阔台地相。岩性主要为灰白、灰、深灰色微晶灰岩、方解石斑晶灰岩、生物碎屑灰岩,含燧石结核(团块)灰岩。茅口灰岩在研究区内沉积厚度变化不大(一般为 $200 \sim 300\text{m}$),后经历风化剥蚀及构造运动等作用形成了多种不同类型的古岩溶。

2 茅口组古岩溶的地质特征

据前人研究(颜其彬和庞雯, 1993; 陈宗清, 2007)及野外

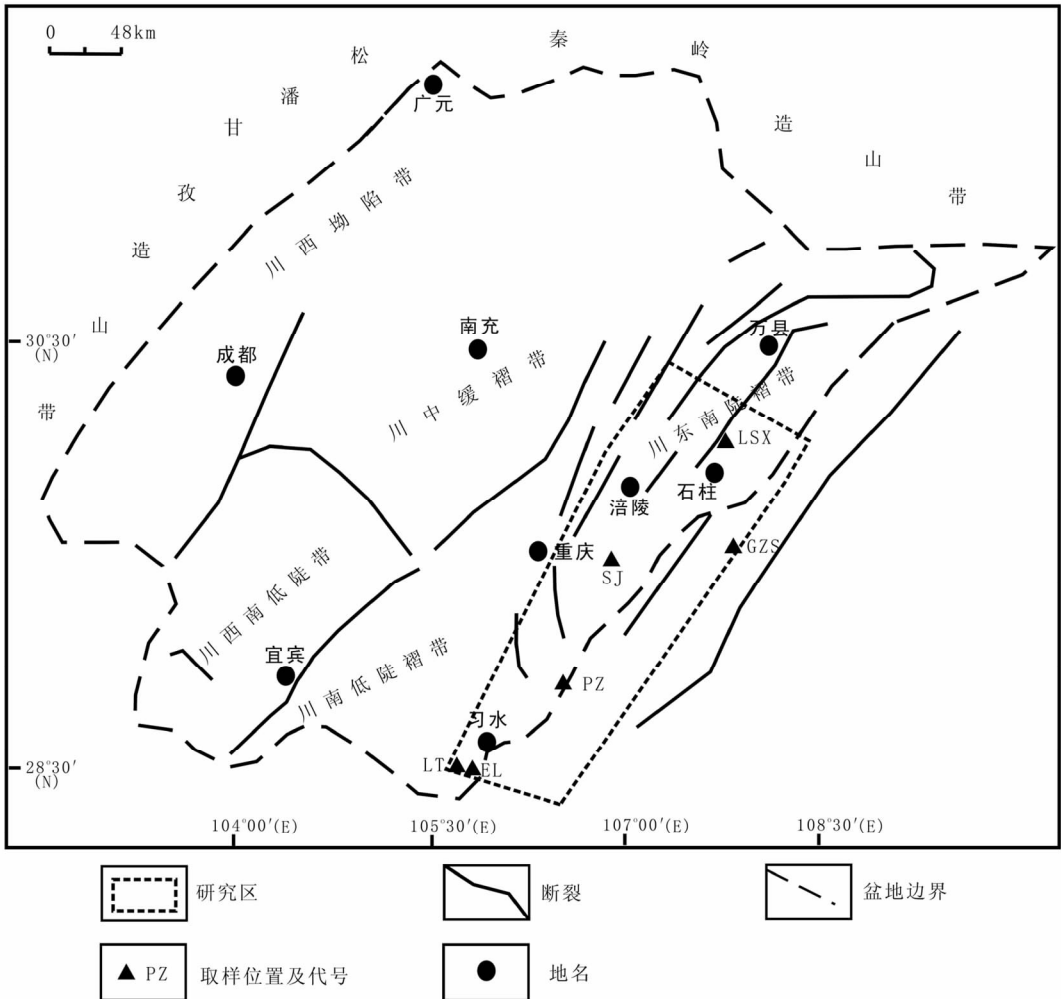


图1 研究区位置及构造简图(据郭川等,2011 修编)

Fig.1 Position of the research area and structural graph (modified after Guo *et al.*, 2011)

剖面观察,茅口组主要存在四种类型的古岩溶,分别为沉积期岩溶、表生期岩溶、埋藏期岩溶及褶皱期岩溶。

2.1 沉积期岩溶

四川盆地东南部茅口组灰岩在沉积过程中,因短暂暴露地表,多次遭受大气水淋滤(颜其彬和庞雯,1993),伴随淡水渗透作用而发生了小规模的岩溶,每个岩溶带上界面为岩相或岩性的突变面,为沉积间断暴露面(溶蚀),岩性为深灰色微晶灰岩;下界面为岩相或岩性的渐变面,岩性为浅色微晶灰岩。在南川水江、习水二郎和丰都狗子水等剖面的浅灰褐色灰岩中可看到形态各异、大小不等的溶蚀孔洞,这些溶蚀孔洞的形成具有明显的选择性,大多数被方解石充填,形成形似鸟眼构造的方斑(图2a, b),在阴极射线下发暗褐色或者暗橙红色光,局部可见少量的渗滤砂,包裹体均一温度为 $57 \sim 65^{\circ}\text{C}$ (表1)。此类岩溶发育规模较小,对茅口组储层的意义不大。

2.2 表生期岩溶

茅口组沉积之后,受东吴运动的影响,茅口组整体抬升,

开始接受大气淡水的淋滤,这一淋滤过程大约持续了 $3 \sim 5\text{Myr}$ (李兴平等,2008),剥蚀厚度为 $50 \sim 350\text{m}$ (何斌等,2004)。在茅口组的中上部形成了一定数量的溶蚀孔洞。该类岩溶产生的地质背景较沉积期岩溶有重大变化,其碳酸盐沉积物已固结成岩,孔渗显著变差。这类岩溶的宏观特征主要表现为:①溶解作用不受结构限制,形成不规则的溶洞、溶缝和少量溶孔,溶蚀型溶洞和溶塌型溶洞均发育;②洞穴中的塌积物主要由岩石角砾、泥铁质及风化铝土质构成(图2d);③主要分布于茅口组顶部。镜下可见大面积的孔洞,以充填中-粗晶方解石为主(图2e),在阴极射线下发暗褐色或者暗橙红色光,或两者共有而具环带结构(图2f),局部可见少量的渗滤砂,包裹体均一温度为 $57 \sim 65^{\circ}\text{C}$ (表1)。此类岩溶发育规模大,是茅口组油气勘探关注的重要岩溶类型。

2.3 埋藏期岩溶

大约在晚三叠世时,二叠系烃源岩(龙潭组以及茅口组本身)开始成熟生烃(朱光有等,2006;腾格尔等,2008;龚浩

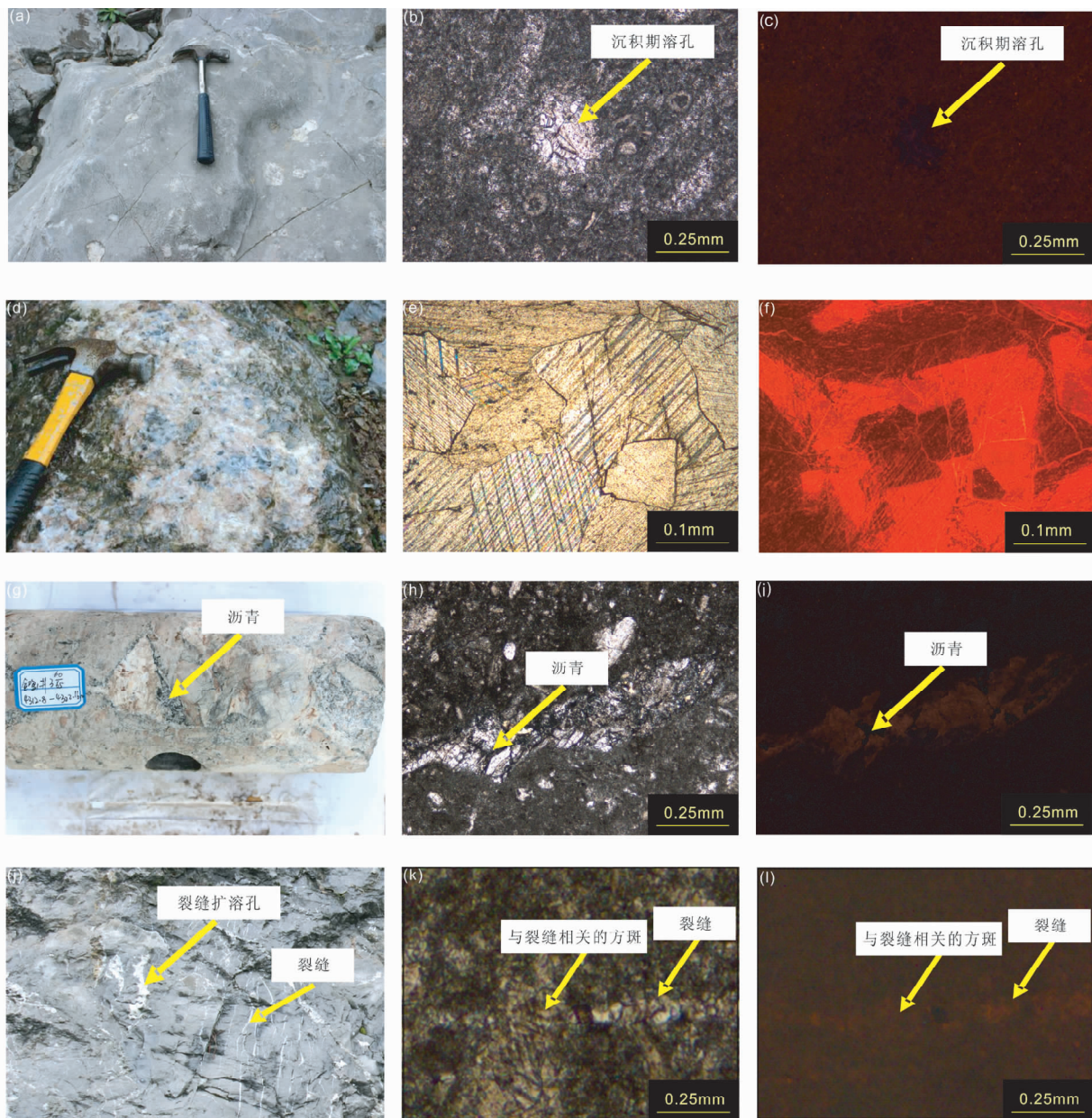


图2 不同类型古岩溶的宏观、微观及阴极发光特征

(a)-选择性溶蚀形成的方斑,太平渡剖面;(b)-选择性溶孔被细-中晶方解石充填,单偏光,林滩场剖面;(c)与(b)同视域,阴极发光;(d)-溶蚀形成的溶蚀角砾岩,鸡公岭剖面;(e)-表生期岩溶被粗晶方解石充填,单偏光,太平渡剖面;(f)与(e)同视域,阴极发光;(g)-埋藏期岩溶沿早期方斑边缘发生,金鸡1井;(h)-埋藏溶孔被细-中晶方解石充填,单偏光,狗子水剖面;(i)与(h)同视域,阴极发光;(j)沿裂缝形成的溶蚀扩大溶孔,林滩场剖面;(k)-与裂缝相关的溶孔被细-中晶方解石充填,单偏光,水江剖面;(l)与(k)同视域,阴极发光

Fig.2 Macroscopic, microscopic, and cathodoluminescent features of different types of karst

等,2010),有机酸运移(主要在早期的溶蚀孔洞中及裂缝中),使得早期的溶蚀孔洞及裂缝进一步扩大,并形成了少量新的溶孔。这类岩溶多沿早期的薄弱部位如缝合线、溶缝及方斑边缘发生,有机质浸染严重,常与残存的沥青共存(图2g)。溶孔中以充填细-中晶方解石为主(图2h),局部可被同期的白云石充填,阴极射线下发暗褐色光为主(图2i),包裹体均一温度为 $108 \sim 135^{\circ}\text{C}$ (表1)。此类岩溶总体发育规

模不大。

2.4 褶皱期岩溶

四川盆地在褶皱过程中(主要指喜山期)由于断层、裂缝大量形成,导致地层水互串,大气淡水进入深部循环,进而形成了一定规模的古岩溶。该期岩溶主要沿着断层、裂缝进行,形成构造溶蚀缝和少量孔洞。溶蚀多与裂缝相关,多形成

表1 不同类型古岩溶包裹体均一温度测试结果

Table 1 Homogenization temperature test results of different types of karst

样品号	性质	包裹体均一温度(°C)
LTm02-1	表生期岩溶	57
LTm02-2		65
LTm04-1		60
LTm04-2		60
ELm11-1	埋藏期岩溶	115
ELm11-2		108
ELm14-1		135
ELm14-2		127
ELm15-1		115
ELm15-2		126
LTm03-1	褶皱期岩溶	134
LTm03-2		135
GZSm33-1		110
LSXm20-1		105
LTm01-1		58
LTm01-2		68
SJm19-1		69
ELm01-1		78
ELm01-2		92

沿裂缝的溶蚀扩大缝或与裂缝相通的方斑(图2j, k), 阴极射线线下不发光或发暗褐色光(图2l), 包裹体均一温度为58~110°C(表1), 均一温度分布范围较广, 可能与褶皱期岩溶的流体来源相对复杂有关, 因构造运动形成的断层不仅沟通了地表淡水, 也沟通了茅口组地层与其他地层流体。此类岩溶发育具有普遍性, 也是茅口组中所需关注的另一类重要的古岩溶类型。

3 同位素地球化学特征及讨论

古岩溶的碳、氧、锶同位素地球化学特征对研究碳酸盐岩的沉积环境、成岩作用、胶结充填物的起源和形成条件具有重要意义(张兵等, 2011)。不同类型的岩溶在形成过程中经历了不同的流体环境, 因此用地球化学的方法可以较好地识别和区分溶蚀作用的类型。由于沉积期岩溶发育规模较小, 对茅口组储层的意义不大, 因此本文重点讨论后面3种类型的古岩溶。

3.1 碳同位素特征

对于碳同位素来说, 由于自然界碳基本上储藏在有机碳(还原碳)和无机碳(氧化碳)两大碳库内, 两者的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值相差大约25‰(陈锦石等, 1995)。因此, 在影响海相碳酸盐岩碳同位素的众多因素中, 当时的有机碳氧化与相对埋藏量是最重要的(黄思静, 1997), 此外, 大气降水、沉积水介质盐度及生物发育状况都会引起碳同位素组成的变化(Clayton and Degens, 1959; Keith and Weber, 1964)。

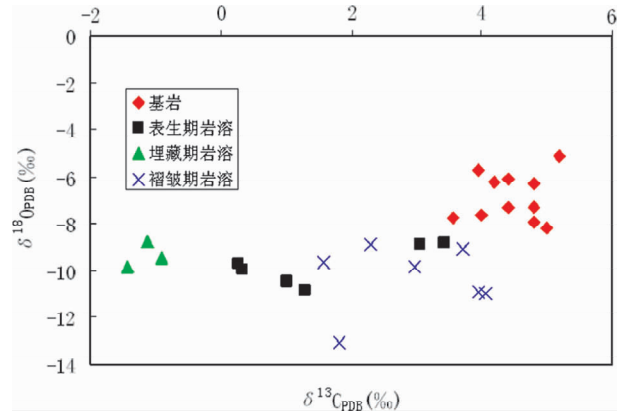


图3 不同类型岩溶充填物碳氧同位素散点图

Fig. 3 Scatter diagram of C and O isotopes of different types of karst

从所测的碳同位素数据来看(图3), 基岩的碳同位素值介于3.56‰~5.20‰, 表生期岩溶充填物的碳同位素值介于0.26‰~3.43‰, 埋藏期岩溶充填物的碳同位素值介于-1.44‰~-0.92‰, 而褶皱期岩溶充填物的碳同位素值则介于1.58‰~4.07‰。不同类型的岩溶充填物的碳同位素和茅口组基岩的碳同位素相比均有负偏移的特征, 其中埋藏期岩溶充填物的碳同位素值负偏移明显, 均为负值, 可与表生期岩溶和褶皱期岩溶充填物很好地区分开, 但表生期岩溶和褶皱期岩溶充填物的碳同位素值有较大的重叠区域, 难以完全区分。

对于埋藏期岩溶来讲, 由于溶蚀作用发生在有机质大量成熟排烃之后, 因其形成于有机质成熟排烃的环境中, 其形成过程必然会受到有机碳的影响, 而有机碳是一个低 $\delta^{13}\text{C}$ 的碳源。诸多学者曾测试过天然气中的碳同位素, 其数值都非常低, 例如樊然学等(2005)测得的川西坳陷南段天然气藏甲烷的同位素大多小于-33‰, 而普光气田甲烷碳同位素值则主要在-29.0‰~-34‰范围内, 平均值为-31‰(马永生, 2008), 也具有非常低的碳同位素值。因此在有机碳大量存在的环境下形成的埋藏溶蚀孔洞胶结物, 其必然会有较低的碳同位素值。

表生期岩溶和褶皱期岩溶两者都受到了大气淡水的影响, 并且表生期岩溶发育带因岩层相对薄弱, 容易受到褶皱期岩溶的叠加改造, 因此, 在野外或岩芯上已经很难完全将两者区分开来, 两者的碳同位素值也具有较大的分布范围, 且相互重叠, 难以单独划分出分布范围, 但两者的碳同位素值还是明显小于茅口组围岩的碳同位素值, 应当是受到大气淡水的影响所致。

3.2 锶同位素特征

由于锶同位素的特殊性, 其被广泛地应用于海相地层定年(Dingle *et al.*, 1997; Denison *et al.*, 1998)、全球地质事件对比(Crame *et al.*, 1999; 江茂生等, 2002)、成岩流体分析

表 2 不同类型岩溶的锶同位素测试结果

Table 2 Sr isotope test results of different types of karst

样品号	性质	锶同位素比值
ELm1-1	围岩	0.703801 ± 0.000035
PZm1-1		0.703810 ± 0.000059
ELm1-17	表生期岩溶	0.704856 ± 0.000089
ELm1-20		0.704537 ± 0.000077
ELm1-21		0.704495 ± 0.000074
PZm1-6	埋藏期岩溶	0.704384 ± 0.000054
ELm1-6		0.703727 ± 0.000075
ELm1-15		0.704854 ± 0.000072
ELm1-9	褶皱期岩溶	0.708258 ± 0.000125
ELm1-11		0.705789 ± 0.000152
ELm1-12		0.706172 ± 0.000111
ELm1-18		0.705014 ± 0.000092
PZm1-18		0.705152 ± 0.000141

表 3 不同类型岩溶的识别模式

Table 3 Recognition model for different types of karst

类型	宏观	微观	阴极发光	碳同位素 (‰)	锶同位素 比值	均一温度 (℃)
沉积期 岩溶	干裂缝、鸟眼构造及小范围溶沟等形式出现	以颗粒(主要是生屑)的选择性溶蚀为主,溶蚀后被细-中晶方解石充填	不发光	-	-	-
表生期 岩溶	发育于茅口组的中上部,以方斑及溶塌角砾的形式出现,局部可见风化铝土质及溶积、淀积物	可见大面积的孔洞,以中-粗晶方解石充填为主,局部可见少量渗滤砂	发暗褐色或暗橙红色光,或两者共有而具环带结构	0.26 ~ 3.43	0.7044 ~ 0.7049	57 ~ 65
埋藏期 岩溶	溶蚀多沿早期的薄弱部位如缝合线、溶缝及方斑边缘发生,有机质浸染严重,常与残存的沥青共存	溶孔以细-中晶方解石充填为主,局部可被埋藏白云岩充填,被有机质浸染严重,常与黄铁矿共存	发暗褐色光为主	-1.44 ~ -0.92	0.7037 ~ 0.7049	108 ~ 135
褶皱期 岩溶	常以裂缝或与裂缝沟通的方斑或裂缝溶蚀扩大缝的形式出现	以细-中晶方解石充填为主	不发光或发暗褐色光	1.58 ~ 4.07	0.7050 ~ 0.7082	58 ~ 110

上面并未有其他地层沉积,因此表生溶蚀孔洞中的充填物的锶同位素比值虽然有所升高,但仍然相对较低。

经历了 3 ~ 5 Myr 的风化之后,茅口组开始接受沉积,被上覆地层龙潭组覆盖,茅口组开始进入埋藏阶段。大约在晚三叠世时,二叠系烃源岩(龙潭组以及茅口组本身)开始成熟生烃,有机酸运移(主要在早期的溶蚀孔洞中及裂缝中),使得早期的溶蚀孔洞及裂缝进一步扩大,并形成少量的新的溶孔。由于埋藏期溶蚀发生时,有机酸主要来源于茅口组本身和上覆地层龙潭组(李兴平等,2008),因此其物质交换也主要集中在茅口组本身和上覆地层龙潭组之间,其锶同位素比值也基本反映了茅口组和龙潭组的锶同位素特征。

褶皱期溶蚀充填物的锶同位素比值明显高于围岩和其他类型的岩溶充填物。经过大量的野外及镜下观察,并未发现茅口组有被深部流体改造的迹象,包裹体均一温度测试结

(黄思静等,2004; Roger *et al.*, 2004)及古气候古海洋环境分析(黄思静等,2002;史忠生等,2005;刘静和季宏兵,2008)等领域。近年来亦有学者(文华国等,2009;郑荣才等,2009)将其运用于古岩溶的分析和研究,取得了较好的效果。

从茅口组锶同位素比值测试结果来看(表 2),两个茅口组围岩样品具有非常低的锶同位素值,都在 0.7038 左右。由于在茅口组沉积的时候,峨眉山地幔柱活动加剧,峨眉山玄武岩已经开始喷发(何丽娟等,2011),造成大量的幔源物质进入海水,使同时期的海水锶同位素比值明显降低,低于正常碳酸盐岩 0.708 的锶同位素比值组成。

表生期岩溶充填的锶同位素比值主要集中在 0.7044 ~ 0.7049 之间,相比围岩有所升高。茅口组沉积之后受东吴运动的影响整体抬升,开始接受大气淡水的溶蚀,尽管溶蚀和胶结充填物沉淀的流体主要为大气淡水,但溶蚀孔洞充填物的物质来源应该主要来自茅口组本身,因为此时茅口组地层

果也显示,褶皱期溶蚀充填物的形成环境温度接近或低于茅口组在深埋藏时(埋藏期岩溶)的温度,因此可以排除褶皱期岩溶受到深部硅铝质地层的流体影响的可能。褶皱期溶蚀充填物的锶同位素比值偏高且分布范围较宽,可能是由于褶皱期岩溶发生时,茅口组之上已经有多套地层沉积,地表淡水及不同地层的流体被断层沟通后,对茅口组进行溶蚀和方解石的沉淀作用,由于流体来源较复杂,造成褶皱期岩溶充填物的锶同位素组成比较复杂,分布范围较宽。锶同位素比值整体高于其他类型的岩溶充填物,则与上覆地层都具有较高的锶同位素组成及可能与受到壳源硅铝质岩石风化产物的影响有关。

综上所述,不同类型的古岩溶的识别可总结如表 3 所示。对不同类型古岩溶的识别无疑具有重要的意义,但仅靠野外观察难以完全准确地进行识别。将野外观察及地球化

学方法结合起来,可以取得较好的识别效果,但要求在野外观察取样的过程中必须做到仔细观察、细致取样,尤其是在地质条件复杂、多种古岩溶叠加发育的区域,更要注意判断所取样品的代表性,否则可能造成漏判,甚至可能获取错误的结果进而影响到对古岩溶的识别效果。

4 结论

(1)川东南地区茅口组主要发育沉积期岩溶、表生期岩溶、埋藏期岩溶及褶皱期岩溶四种类型的古岩溶,其中表生期岩溶和褶皱期岩溶发育规模较大,是茅口组油气勘探关注的重点。表生期岩溶发育区可见大量的溶蚀孔洞,孔洞以充填中-粗晶方解石为主,在阴极射线下常具环带结构,包裹体均一温度为57~65℃;褶皱期岩溶发育区可见大量裂缝及与裂缝相关的溶蚀扩大缝或方斑,裂缝及方斑在阴极射线下不发光或发暗褐色光,包裹体均一温度介于58~110℃。

(2)埋藏期岩溶因其常与有机质共存,且其碳同位素明显偏负,易与其它类型的古岩溶进行区分。表生期岩溶通常被褶皱期岩溶叠加改造,溶蚀孔洞充填物的碳同位素及包裹体均一温度在分布范围上都有一定的重叠,难以将两者完全区分开,但通过宏观特征结合锶同位素比值可以将两者加以区分。

(3)表生期岩溶与埋藏期岩溶孔洞充填物的物质来源主要来自茅口组本身及上覆地层龙潭组,因此这两类岩溶充填物的锶同位素比值都较低,并且与茅口组围岩的锶同位素比值基本相似;而褶皱期岩溶的溶蚀孔洞充填物因物质来源比较复杂,锶同位素比值分布范围较大,且比值相对较高。褶皱期岩溶充填物具有较高的锶同位素比值是其与表生期岩溶进行区分的重要标志。

References

- Chen JS, Wen CF, Zhong H and Liu PL. 1995. Carbon isotope variation of Paleozoic marine carbonate sequences. *Scientia Geologica Sinica*, 30(4): 338-347 (in Chinese with English abstract)
- Chen ZQ. 2007. Exploration for natural gas in Middle Permian Maokou Formation of Sichuan basin. *China Petroleum Exploration*, 12(5): 1-11 (in Chinese with English abstract)
- Clayton RN and Degens ET. 1959. Use of carbon isotope analyses of carbonates for differentiating fresh-water and marine sediments. *AAPG Bulletin*, 43(4): 889-897
- Crame JA, McArthur JM, Pirrie D and Riding JB. 1999. Strontium isotope correlation of the basal Maastrichtian Stage in Antarctica to the European and US biostratigraphic scheme. *Journal of the Geological Society*, 156(5): 957-964
- Denison RE, Kirkland DW and Evans R. 1998. Using strontium isotopes to determine the age and origin of gypsum and anhydrite beds. *Journal of Geology*, 106(1): 1-17
- Dingle RV, McArthur JM and Vroon P. 1997. Oligocene and Pliocene interglacial events in the Antarctic Peninsula dated using strontium isotope stratigraphy. *Journal of the Geological Society*, 154(2): 257-264
- Fan RX, Zhou HZ and Cai KP. 2005. Carbon isotopic geochemistry and origin of natural gases in the southern part of the western Sichuan depression. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(2): 157-162 (in Chinese with English abstract)
- Feng JL, Cao J, Hu K, Peng XQ, Chen Y, Wang YF and Wang M. 2013. Dissolution and its impacts on reservoir formation in moderately to deeply buried strata of mixed siliciclastic carbonate sediments, northwestern Qaidam basin, Northwest China. *Marine and Petroleum Geology*, 39(1): 124-137
- Gong H, Zhu CQ, Xu M, Shan JN, Hu SB and Yuan YS. 2010. Thermal history and hydrocarbon source rock evolution in the northwestern Sichuan basin. *Progress in Geophysics*, 25(3): 1031-1036 (in Chinese with English abstract)
- Guo C, Li GR, Yang YY, Xie FC, Dong WY and Tang M. 2011. Characteristics of sedimentary facies and sequence stratigraphy of Changxing Formation in Fuling area, southeastern Sichuan basin. *Lithologic Reservoirs*, 23(4): 41-47 (in Chinese with English abstract)
- Guo XS, Li YP and Wei QC. 2012. Palaeokarst reservoirs and exploration areas of Maokou Formation in the southeast of Sichuan basin. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 34(6): 1-8 (in Chinese with English abstract)
- He B, Wang YM and Jiang XW. 2004. Paleo-karst landforms on top of limestone of the Maokou Formation in the west of the Upper Yangtze platform and its geological significance. *Geology in China*, 31(1): 46-50 (in Chinese with English abstract)
- He B, Xu YG, Guan JP and Zhong YT. 2010. Paleokarst on the top of the Maokou Formation: Further evidence for domal crustal uplift prior to the Emeishan flood volcanism. *Lithos*, 119(1-2): 1-9
- He LJ, Xu HH and Wang JY. 2011. Thermal evolution and dynamic mechanism of the Sichuan basin during the Early Permian-Middle Triassic. *Scientia Sinica (Terrae)*, 41(12): 1884-1891 (in Chinese)
- Hu GC and Du SM. 1992. A discussion on the exploration program and method of the gas fields with different types in East Sichuan. *Natural Gas Industry*, 12(3): 1-6 (in Chinese with English abstract)
- Hu MY, Hu ZG, Wei GQ, Yang W and Liu MC. 2012. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(1): 45-55 (in Chinese with English abstract)
- Huang SJ. 1997. A study on carbon and strontium isotopes of Late Paleozoic carbonate rocks in the Upper Yangtze. *Acta Geologica Sinica*, 71(1): 45-53 (in Chinese with English abstract)
- Huang SJ, Shi H, Mao XD, Zhang M, Shen LC and Wu WH. 2002. Evolution of Sr isotopes of the Cambrian sections in Xiushan, Chongqing and related global correlation. *Geological Review*, 48(5): 509-516 (in Chinese with English abstract)
- Huang SJ, Liu SG, Li GR, Zhang M and Wu WH. 2004. Strontium isotope composition of marine carbonate and the influence of diagenetic fluid on it in Ordovician. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(1): 1-7 (in Chinese with English abstract)
- Jia ZY and Cai ZX. 2004. Carbonate paleo-weathered crust reservoirs (body). *Geological Science and Technology Information*, 23(4): 94-104 (in Chinese with English abstract)
- Jiang MS, Zhu JQ, Chen DZ, Zhang RH and Qiao GS. 2001. Carbon and strontium isotope variations and responses to sea-level fluctuations in the Ordovician of the Tarim basin. *Science in China (Series D)*, 32(1): 36-42 (in Chinese)
- Kang YS, Li PJ, Qi XF, Wen YH and Li SJ. 2012. Mechanism of petroleum migration and accumulation in western China's superposed basins. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(2): 267-271
- Keith ML and Weber JN. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 28(10-11): 1786-1816
- Li XP, Meng XW and Liu TM. 2008. Characters and the exploration potential analyses of oil and gas accumulation in Chishui of Guizhou.

- Guizhou Geology, 25(4): 265–269, 275 (in Chinese with English abstract)
- Liu GD. 2007. Suggestions on secondary pioneering of Chinese oil and gas resources. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 14(1): 1–4 (in Chinese with English abstract)
- Liu J and Ji HB. 2008. Sr isotope characteristics and its indicative significance for biogeochemistry. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 29(4): 67–73 (in Chinese with English abstract)
- Ma DZ, Shi ZJ, Wang CC and Du ZL. 2009. Fine structural interpretation and favorable reservoir distribution of the Maokou Formation in Guandu structure of South Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(2): 133–137 (in Chinese with English abstract)
- Ma YS. 2008. Geochemical characteristics and origin of natural gases from Puguang Gas Field on eastern Sichuan basin. *Natural Gas Geoscience*, 19(1): 1–7 (in Chinese with English abstract)
- Roger JB, Gregg CO and Guo QG. 2004. Strontium isotopic signatures of oil-field waters: Applications for reservoir characterization. *AAPG Bulletin*, 88(12): 1677–1704
- Sean AG, Mark G, Daniel GC, Andrew MG, Steven LB and David AV. 2007. Karst and early fracture networks in carbonates, Turks and Caicos Islands, British West Indies. *Journal of Sedimentary Research*, 77(6): 508–524
- Shi ZJ, Liang P, Wang Y, Hu XQ, Tian YM and Wang CC. 2011. Geochemical characteristics and genesis of grapestone in Sinian Dengying Formation in southeastern Sichuan basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2263–2271 (in Chinese with English abstract)
- Shi ZJ, Wang Y, Tian YM and Wang CC. 2013. Cementation and diagenetic fluid of algal dolomites in the Sinian Dengying Formation in southeastern Sichuan basin. *Science China (Earth Sciences)*, 56(2): 192–202
- Shi ZS, Chen KY and He S. 2005. Strontium, sulfur and oxygen isotopic compositions and significance of paleoenvironment of paleogene of Dongpu Depression. *Earth Science*, 30(4): 430–436 (in Chinese with English abstract)
- Su ZT, Chen HD, Lin LB, Zhao JX and Xu Q. 2010. Character of palaeokaest and its reservoirs significance of Ordovician in Tabamiao area, Ordos. *Xinjiang Geology*, 28(2): 180–185 (in Chinese with English abstract)
- Teng GE, Qin JZ, Fu XD, Li W, Rao D and Zhang MZ. 2008. Basic conditions of marine hydrocarbon accumulation in Northwest Sichuan basin: High quality source rocks. *Petroleum Geology and Experiment*, 30(5): 478–483 (in Chinese with English abstract)
- Wang BQ and Al-Aasm IS. 2002. Karst-controlled diagenesis and reservoir development: Example from the Ordovician main-reservoir carbonate rocks on the eastern margin of the Ordos basin, China. *AAPG Bulletin*, 86(9): 1639–1658
- Wang Y, Shi ZJ and Hong CY. 2011. Research review and developmental trends of technology in karst reservoir exploration in China. *Carsologica Sinica*, 30(3): 334–340 (in Chinese with English abstract)
- Wen HG, Zheng RC, Shen ZM, Zhang B, Cai JL, Luo AJ and Zhu YX. 2009. Geochemical characteristics of strontium isotope of the paleokarst reservoirs in the Huanglong Formation at the margin of southern Daba Mountain. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(5): 789–795 (in Chinese with English abstract)
- Wu GH, Li HH, Zhang LP, Wang CL and Zhou B. 2012. Reservoir-forming conditions of the Ordovician weathering crust in the Maigaiti slope, Tarim basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 39(2): 144–153 (in Chinese with English abstract)
- Wu K. 1989. Primary discussion on the fault effects of the reservoirs in Yangxin Series in Southeast Sichuan. *Natural Gas Industry*, 9(4): 15–18 (in Chinese with English abstract)
- Xia MJ, Dai JX, Zou CN, Wang ZC and Tao SZ. 2007. Caledonian karst palaeogeomorphology and the forming condition of gas pool, southern Ordos basin. *Petroleum Exploration and Development*, 34(3): 291–298, 315 (in Chinese with English abstract)
- Yan QB and Pang W. 1993. Relationship between oil/gas accumulation and karst features of Maokou Formation in Luzhou area, Sichuan. *Journal of Southwest Petroleum University*, 15(3): 11–16 (in Chinese with English abstract)
- Zhang B, Zheng RC, Wang XB, Luo Y, Li W, Wen HG and Hu ZG. 2011. Paleokarst and reservoirs of the Huanglong Formation in eastern Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 38(3): 257–267 (in Chinese with English abstract)
- Zhang K, Wang DR and Bryan GH. 2004. Reservoir characterization of the Ordovician oil and gas pools in the Tahe oilfield, Tarim basin, Northwest China. *Petroleum Exploration and Development*, 31(1): 123–126
- Zhang YC, Qin DY, Ding DG, Lu GX, Shan XL and Xu XH. 1989. A view on tectonics of Paleozoic basins of the Yangtze region and its implication of hydrocarbons. *Petroleum Geology & Experiment*, 11(3): 205–218 (in Chinese with English abstract)
- Zheng RC, Zheng C, Hu ZG and Chen SC. 2009. Strontium isotopic geochemical behaviors of the Carboniferous palaeo-karst reservoirs in East Sichuan basin. *Natural Gas Industry*, 29(7): 4–8 (in Chinese with English abstract)
- Zhu GY, Zhang SC, Liang YB, Ma YS, Dai JX, Li J and Zhou GY. 2006. The characteristics of natural gas in Sichuan basin and its sources. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 234–248 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈锦石, 闻传芬, 钟华, 刘培伦. 1995. 古生代海洋碳同位素演化. *地质科学*, 30(4): 338–347
- 陈宗清. 2007. 四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探. *中国石油勘探*, 12(5): 1–11
- 樊然学, 周洪忠, 蔡开平. 2005. 川西坳陷南段天然气来源与碳同位素地球化学研究. *地球学报*, 26(2): 157–162
- 龚浩, 朱传庆, 徐明, 单竞男, 胡圣标, 袁玉松. 2010. 四川盆地西北地区热流史及烃源岩演化. *地球物理学进展*, 25(3): 1031–1036
- 郭川, 李国蓉, 杨莹莹, 解发川, 董文玉, 唐锰. 2011. 川东南涪陵地区长兴组层序地层及沉积相演化特征. *岩性油气藏*, 23(4): 41–47
- 郭旭升, 李宇平, 魏全超. 2012. 川东南地区茅口组古岩溶发育特征及勘探领域. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 34(6): 1–8
- 何斌, 王雅玫, 姜晓玮. 2004. 上扬子西部茅口组灰岩顶部古喀斯特地貌的厘定及地质意义. *中国地质*, 31(1): 46–50
- 何丽娟, 许鹤华, 汪集咏. 2011. 早二叠世-中三叠世四川盆地热演化及其动力学机制. *中国科学(地球科学)*, 41(12): 1884–1891
- 胡光灿, 杜尚明. 1992. 川东地区不同类型气田的勘探程序与方法探讨. *天然气工业*, 12(3): 1–6
- 胡明毅, 胡忠贵, 魏国齐, 杨威, 刘满仓. 2012. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测. *石油勘探与开发*, 39(1): 45–55
- 黄思静. 1997. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究. *地质学报*, 71(1): 45–53
- 黄思静, 石和, 毛晓冬, 张萌, 沈立成, 武文慧. 2002. 重庆秀山寒武系锶同位素演化曲线及全球对比. *地质论评*, 48(5): 509–516
- 黄思静, 刘树根, 李国蓉, 张萌, 武文慧. 2004. 奥陶系海相碳酸盐锶同位素组成及受成岩流体的影响. *成都理工大学学报(自然*

- 科学版), 31(1): 1-7
- 贾振远, 蔡忠贤. 2004. 碳酸盐岩古风化壳储集层(体)研究. 地质科技情报, 2004, 23(4): 94-104
- 江茂生, 朱井泉, 陈代钊, 张任祜, 乔广生. 2002. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩的碳、锶同位素特征及其对海平面变化的响应. 中国科学(D辑), 32(1): 36-42
- 李兴平, 孟宪武, 刘特明. 2008. 贵州赤水地区油气成藏特征及勘探潜力分析. 贵州地质, 25(4): 265-269, 275
- 刘光鼎. 2007. 关于中国油气资源的第二次创业的建议. 特种油气藏, 14(1): 1-4
- 刘静, 季宏兵. 2008. 锶及其同位素在环境地球化学研究中的应用. 首都师范大学学报(自然科学版), 29(4): 67-73
- 马东洲, 施泽进, 王长城, 杜增利. 2009. 川南官渡构造茅口组精细构造解释与有利储层分布. 成都理工大学学报(自然科学版), 36(2): 133-137
- 马永生. 2008. 普光气田天然气地球化学特征及气源探讨. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 1-7
- 施泽进, 梁平, 王勇, 胡修权, 田亚铭, 王长城. 2011. 川东南地区灯影组葡萄石地球化学特征及成因分析. 岩石学报, 27(8): 2263-2271
- 施泽进, 王勇, 田亚铭, 王长城. 2013. 四川盆地东南部震旦系灯影组藻云岩胶结作用及其成岩流体分析. 中国科学(地球科学), 43(2): 317-328
- 史忠生, 陈开远, 何生. 2005. 东濮凹陷古近系锶、硫、氧同位素组成及古环境意义. 地球科学, 30(4): 430-436
- 苏中堂, 陈洪德, 林良彪, 赵俊兴, 许强. 2010. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区奥陶系古岩溶发育特征及储层意义. 新疆地质, 28(2): 180-185
- 腾格尔, 秦建中, 付小东, 李武, 饶丹, 张美珍. 2008. 川西北地区海相油气成藏物质基础——优质烃源岩. 石油实验地质, 30(5): 478-483
- 王勇, 施泽进, 洪成云. 2011. 中国岩溶型储集体的勘探技术进展及发展趋势. 中国岩溶, 30(3): 334-340
- 文华国, 郑荣才, 沈忠民, 张兵, 蔡家兰, 罗爱军, 朱宜新. 2009. 南大巴山前缘黄龙组古岩溶储层锶同位素地球化学特征. 吉林大学学报(地球科学版), 39(5): 789-795
- 邬光辉, 李洪辉, 张立平, 王成林, 周波. 2012. 塔里木盆地麦盖提斜坡奥陶系风化壳成藏条件. 石油勘探与开发, 39(2): 144-153
- 吴康. 1989. 川东南地区阳新统气藏断层效应初探. 天然气工业, 9(4): 15-18
- 夏明军, 戴金星, 邹才能, 汪泽成, 陶士振. 2007. 鄂尔多斯盆地南部加里东期岩溶古地貌与天然气成藏条件分析. 石油勘探与开发, 34(3): 291-298, 315
- 颜其彬, 庞雯. 1993. 川南茅口灰岩岩溶特征与油气关系. 西南石油学院学报, 15(3): 11-16
- 张兵, 郑荣才, 王绪本, 罗媛, 李伟, 文华国, 胡忠贵. 2011. 四川盆地东部黄龙组古岩溶特征与储集层分布. 石油勘探与开发, 38(3): 257-267
- 张渝昌, 秦德瑜, 丁道桂, 陆国新, 单翔麟, 徐旭辉. 1989. 扬子地区古生代盆地构造格架和油气关系的若干初步认识. 石油实验地质, 11(3): 205-218
- 郑荣才, 郑超, 胡忠贵, 陈守春. 2009. 川东石炭系古岩溶储层锶同位素地球化学特征. 天然气工业, 29(7): 4-8
- 朱光有, 张水昌, 梁英波, 马永生, 戴金星, 李剑, 周国源. 2006. 四川盆地天然气特征及气源. 地学前缘, 13(2): 234-248