

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.579>



古代深海硅质岩—粘土岩—碳酸盐岩系列 (SAC)的岩石学分类

曾子轩^{1,3}, 刘晓峰^{2*}, 楼章华¹, 金 宠³, 高 磊⁴

1. 浙江大学海洋学院,浙江舟山 316021

2. 中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

3. 浙江省地质矿产研究所,浙江杭州 310007

4. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京 100871

摘要:古代深海硅质岩—粘土岩—碳酸盐岩系列(SAC)是沉积在远洋或深海的硅质岩、粘土岩和碳酸盐岩及其过渡岩石类型的统称。在借鉴现有相关分类的基础上,提出了基于三端元矿物组成的 SAC 岩石系列的三角图分类新方案,以碳酸盐矿物—粘土矿物—石英作为三端元组分,按照“纯”(>90%)、“主”(50%~90%)、“质”(50%~25%)、“含”(<25%)的定量分类标准,并利用等边三角形中线,将 SAC 岩石系列划分为 4 大类 21 类。利用新的分类方案,将下扬子地区寒武统 SAC 岩石系列划分出硅质岩大类、碳酸盐岩大类和混合泥岩大类,描述了它们的岩石学特征。该 SAC 岩石系列体现了自下而上由硅质岩端元向碳酸盐岩端元混合沉积演化的趋势。对国内外典型 SAC 岩石系列重新分类的结果表明,新的分类方案能够清晰反映端元矿物之间混合沉积演化的趋势。SAC 岩石系列的分类和命名是定量描述古代深海或远洋沉积作用的基础,也是探索其沉积环境演变的重要依据。

关键词:硅质岩;碳酸盐岩;粘土岩;混合泥岩;岩石。

中图分类号: P67

文章编号: 1000-2383(2019)02-0475-14

收稿日期: 2018-12-01

Petrological Classification of Ancient Deep-Marine Siliceous-Argillaceous-Carbonate Rock Series (SAC)

Zeng Zixuan^{1,3}, Liu Xiaofeng^{2*}, Lou Zhanghua¹, Jin Chong³, Gao Lei⁴

1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Zhejiang Institute of Geology and Mineral Resource, Hangzhou 310007, China

4. Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, MOE, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Ancient deep-marine siliceous-argillaceous-carbonate rock series (SAC) are general name of silicalite, argillite, carbonate rock and their mixed deposit rocks which are all pelagic and hemipelagic sediments. In this paper, it proposes a new mineralogy-based classification scheme of the SAC rock series based on existing classifications. According to quantitative classification standard [“pure (>90%)”, “dominate(50%~90%)”, “rich(50%~25%)”, “bearing (<25%)”] and using triangular midlines of the ternary plot, the SAC rock series are divided into 4 primary classes and 21 classes. By using the new classification, silicalite, carbonate rock and mixed mudstone primary classes are present in the Lower-Middle Cambrian in the Lower

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41603026);国家科技重大专项(No.2017zx05049004);浙江省地勘资金项目(No.2014006);浙江地勘局科技项目(Nos.201490,201703)。

作者简介:曾子轩(1993—),女,在读硕士研究生,主要从事海洋沉积学方面的研究工作。ORCID: 0000-0001-9919-7234. E-mail: TsengZixuan@163.com

* 通讯作者:刘晓峰,ORCID: 0000-0003-4690-194X. E-mail: xfliu@cug.edu.cn

引用格式:曾子轩,刘晓峰,楼章华,等,2019.古代深海硅质岩—粘土岩—碳酸盐岩系列(SAC)的岩石学分类.地球科学,44(2):475—488.

Yangtze region and their petrological features are described by optical microscope observation. The SAC rock series of the Lower-Middle Cambrian show the sedimentary evolution trend from siliceous end to carbonate end. The results of classification of three typical SAC rock series indicate that the new classification scheme clearly reflects the mixed sedimentary evolution trend among three terminal minerals. The classification of the SAC rock series may help provide a significant foundation to quantitative description of the ancient pelagic and hemipelagic sedimentation, and also provide an important basis for exploring the evolution of sedimentary environment.

Key words: silicalite; argillite; carbonate rock; mixed mudstone; rock.

0 引言

在深海或远洋环境,粘土岩、碳酸盐岩、硅质岩等常常共生,特别是这 3 种岩石的主要组分,即粘土矿物、碳酸盐矿物和硅质矿物,常互相混合,构成许多过渡类型的岩石。本文称之为深海硅质岩—粘土岩—碳酸盐岩系列(siliceous-argillaceous-carbonate rock series,简称 SAC)。前人利用 SAC 矿物组合作为端元矿物进行岩石学分类(Shipboard Scientific Party, 1984; Stow, 2005),但没有学者提出以 SAC 岩石系列为研究对象进行岩石特征和沉积环境演化的研究。SAC 岩石系列受陆源碎屑沉积作用的影响较小,以化学、生物沉积作用为主,往往由细粒的基质(粒度<0.003 9 mm),包括粘土、粘土级碎屑、隐晶质石英、细有机质等成分和漂浮的粉砂级(粒度<0.006 3 mm)及更少量的砂级颗粒组成,包括粉砂级石英、长石等陆源碎屑颗粒、碳酸盐岩颗粒、生物碎屑颗粒、重结晶颗粒、有机质颗粒等。SAC 岩石系列包括了通常使用的泥岩或页岩、硅质岩、粘土岩、(泥晶)碳酸盐岩等细粒沉积岩。

目前对 SAC 系列岩石学特征与分类及其成因机制的研究较薄弱。Shipboard Scientific Party (1984) 针对现代远洋一半远洋沉积物提出了生物成因硅质矿物—生物成因碳酸盐矿物—粘土矿物三角图的分类方案。Stow(2005) 将这种分类思想应用到了泥岩的分类。这些有益的尝试为 SAC 系列岩石类型的划分提供了初步可借鉴的标准。

近年来,随着页岩气工业的成功,人们对富有机质页岩的研究达到了空前的高度。许多研究成果证实 SAC 岩石系列在富有机质页岩层序中具有普遍性。因此,许多学者开始尝试利用硅质矿物组合—碳酸盐矿物组合—粘土矿物组合三角图进行页岩类型或岩相类型的划分。但是,有关 SAC 岩石系列分类的三元图的端元矿物组分的选择、岩石类型的划分标准与命名等方面尚存在值得探讨的问题。主要体现在:

一方面,三端元分类图中硅质端元矿物的组成

尚不统一。目前所采用的三端元矿物组合中,对碳酸盐矿物和粘土岩矿物两个端元的矿物组成的选择基本趋向一致,但对硅质矿物端元的构成却没有共识。一些学者(Shipboard Scientific Party, 1984; Stow, 2005; Jarvie *et al.*, 2007; Hackley, 2012; Gross *et al.*, 2015; Hennissen *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017)强调硅质矿物组合仅包括石英。其中仅 Shipboard Scientific Party (1984) 和 Stow(2005) 强调生物成因石英作为端元组分,其他学者并未强调区分内源生物成因的石英和陆源的碎屑石英。深海 SAC 系列形成于远离陆源输入的相对封闭的深水环境,只有内源的生物的或化学成因的石英才能反映岩石的沉积环境。另外一些学者(Chalmers *et al.*, 2012; Wang and Carr, 2012a; Tian *et al.*, 2013; Chermak and Madeline, 2014; Gasparik *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2016; Hou *et al.*, 2017; 蒋恕等, 2017; Wang *et al.*, 2018)强调硅质矿物组合包括石英和长石。此外,少数学者还主张硅质矿物尚包括黄铁矿、云母等。Helena *et al.*(2013a, 2013b) 使用石英+长石+云母作为硅质矿物端元。Wei *et al.*(2018) 使用石英+长石+黄铁矿作为硅质端元。他们的目的是为了突出脆性矿物的含量,而并非探讨岩石的分类。硅质矿物的选择成为 SAC 岩石系列分类差异的主要原因之一。

另一方面,三端元分类图的差异还表现在矿物含量的标准和岩石的命名尚不统一。有些学者强调端元矿物组分含量分界标准为 75% 和 25% (Shipboard Scientific Party, 1984; Stow, 2005);其他的分类标准是 80%、50%、20% (Helena *et al.*, 2013b)。有关 SAC 系列岩石类型的划分和命名也存在很大差异。Shipboard Scientific Party (1984) 将远洋沉积物划分为 7 种类型; Stow(2005) 提出的泥岩分类三角图划分出 8 个岩性类型; Wang and Carr (2012b, 2013; Wang *et al.*, 2014) 划分的富有机质页岩岩相类型只有 4 个大类; Helena *et al.*(2013b) 划分的有机质页岩类型为 3 大类 16 个亚类。吴蓝宇

等(2016)将富页岩划分出4个岩相组合(大类)和16个岩相(类)。

“硅质页岩”、“钙质页岩”等与SAC系列相关的岩石类型的界定缺乏确定性(余素玉和何镜宇,1989;姜在兴,2003).例如,对硅质页岩的一般定义是:一种富含游离 SiO_2 的页岩.若岩石中游离 SiO_2 含量增高(>75%,或70%~80%不等),即向生物化学成因的硅质岩过渡(Ross *et al.*, 2008; Götze and Möckel, 2012).该术语一方面强调了硅质页岩与硅质岩的过渡关系,另一方面,游离 SiO_2 含量的定量分类标准也不统一.

随着页岩气革命带动的页岩研究热,越来越多的古代深海SAC岩石系列进入了研究视野,期待一个科学的分类方案.论文的研究目的是在借鉴前人相关分类的基础上,构建一个关于古代深海硅质岩—粘土岩—碳酸盐岩系列(SAC)的新分类方案.利用新的分案对下扬子地区下寒武统SAC岩石系列进行系统分类,描述每类岩石的特征;最后重新对国内外典型SAC岩石系列进行了系统分类,验证了新分类方案的合理性.

1 SAC系列岩石分类方案

1.1 三端元组分的确定

SAC岩石系列分类使用的三端元组分包括粘土矿物、硅质矿物和碳酸盐岩矿物端元.其中粘土矿物端元是指高岭石、伊利石、绿泥石、蒙脱石、伊/蒙混层等全部矿物总和,主要反映陆源沉积物的输入(部分来自海洋火山).碳酸盐岩矿物端元主要指泥晶方解石和白云石,属于化学或生物成因.目前对这两个端元的矿物组合普遍达成共识.

有争议的是硅质矿物端元是指石英和长石的总和,还是仅为石英.长石主要是陆源的,少数来源于火山.一般在页岩中长石平均含量小于10%,可以不参与岩石的分类.下扬子地区寒武系SAC岩石系列中长石含量为3%~12%,平均为7.33%.若页岩中夹有粉砂岩纹层,则长石含量可达到10%~20%.另外,长石属于硅酸盐矿物,不属于硅质矿物.若将长石与石英合并作为一个端元,无疑增加了“硅质矿物”的含量,导致岩石偏向硅质.前人之所以强调把长石和石英作为硅质矿物端元,多数是为了展示以石英和长石代表的脆性矿物组合的含量,而不考虑岩石的成因和分类.考虑到SAC岩石系列沉积于远洋深水环境,内生长石含量一般小于10%,对岩石

分类结果影响很小.因此,本文仅采用石英作为硅质矿物端元.

深海SAC岩石系列中的硅质岩是指内源自生石英(火山、生物、化学成因)占主体的,而不包括陆源碎屑石英.一般硅质岩的主要成分是蛋白石、玉髓和石英.蛋白石容易脱水重结晶变成隐晶质玉髓,玉髓进一步脱水重结晶而变成微晶—细晶石英.因此在古老的硅质岩中主要矿物成分是微晶—细晶石英,少量为隐晶质石英(玉髓和蛋白石).陆源的碎屑石英一般是由浊流或等深流等带入的,呈纹层状粉砂岩或泥质粉砂岩存在于硅质岩层内.受后期成岩作用的影响,陆源碎屑石英与内生石英不易区分.一般泥岩或页岩中碎屑石英含量可达到40%~60%,若含量大于75%则考虑是自生的石英,特别是具有生物聚集作用(如硅藻和放射虫等).

下扬子地区寒武统SAC岩石系列中的硅质岩主要矿物是微晶石英和隐晶质石英.微晶石英为微晶结构或纤维状微晶结构(图1a,1b).微晶石英呈两种状态产出:一种呈集合体构成海绵骨针等浮游生物的骨骼(图1c,1d),反映其具有生物成因或来源.另一种呈密集的分散状自形一半自形颗粒,与有机质、粘土矿物以及碳酸盐矿物混合(图1b).隐晶质石英集合体多成絮状,正交镜下全消光,常与分散状微晶石英混合在一起(图1a,1b,1e,1f).这些分散状微晶石英可能来源于蛋白石或玉髓的重结晶.此外,可见呈纤维状、放射球粒状的玉髓(图1e,1f).极少见陆源碎屑(石英、长石等).

综合薄片镜下矿物鉴定,在下扬子地区中一下寒武统的SAC岩石系列中,除了粘土矿物外,硅质矿物的石英,包括碳酸盐岩矿物主要是内源自生的(化学、生物成因).论文采用石英—碳酸盐岩矿物—粘土矿物内生矿物作为三端元组分,能够反映岩石的沉积物来源与沉积环境.值得注意的是,受浊积、等深流等的影响,许多深海SAC系列层序中夹有纹层状粉—细砂岩,其中含有大量陆源碎屑石英和长石等,在进行测试或分类时应该剔除.

1.2 三角图分类方案

论文采用前文厘定的石英(Q)—粘土矿物(CAL)—碳酸盐矿物(CAR)三端元图进行SAC岩石系列的分类(图2).

1.2.1 定量分类标准 三端元组分含量标准借鉴了石灰岩—粘土岩系列(朱筱敏,2008)和石灰岩—白云岩系列(余素玉和何镜宇,1989),混合的细粒沉积岩粘土—砂—粉砂系列(Macquaker and Adams,

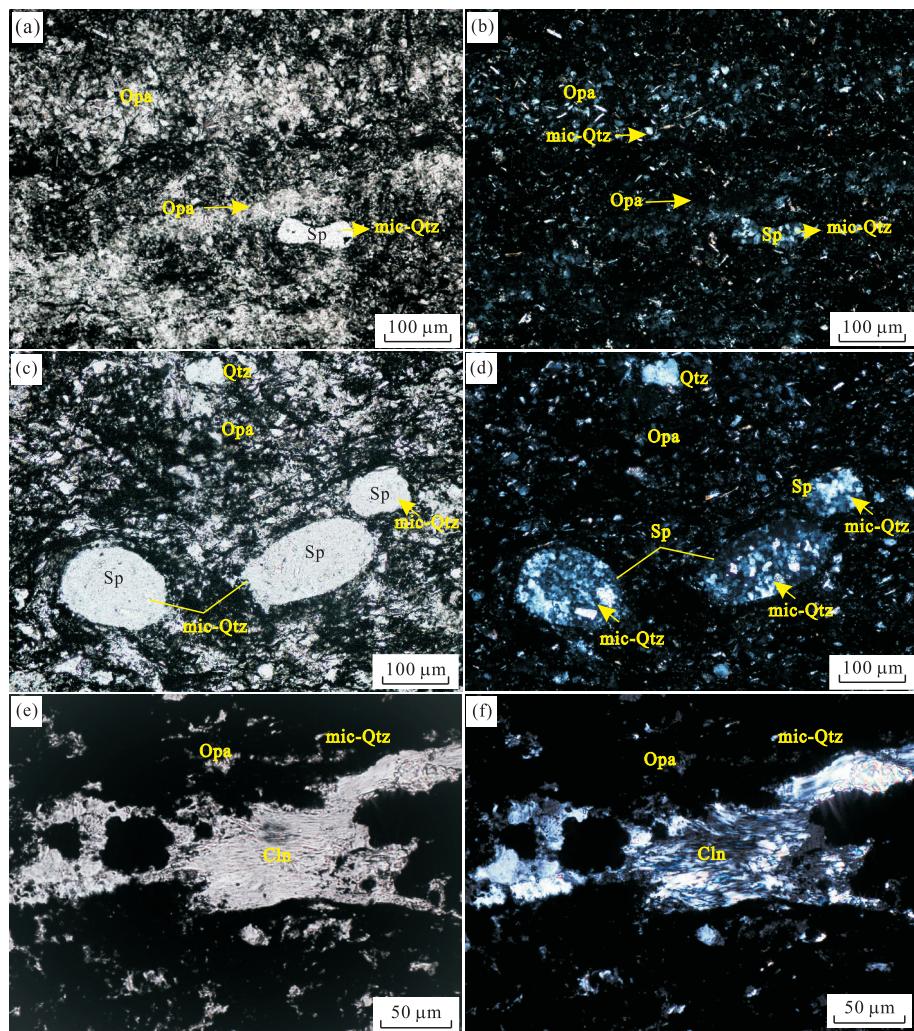


图 1 下扬子地区下—中寒武统硅质矿物镜下照片

Fig.1 Thin section photographs of the siliceous minerals of the Middle-Lower Cambrian in the Lower Yangtze region
 a,b.大陈岭组(样号 17-37-07),深度 2 512.43 m,絮状隐晶质石英(Opa),微晶石英颗粒(mic-Qtz),海绵骨针化石(Sp);c,d.大陈岭组(样号 15-35-01),深度 2 425.81 m,微晶石英(mic-Qtz)集合体构成海绵骨针化石(Sp),隐晶质石英(Opa);e,f.荷塘组(样号 18-33-12),深度 2 842.91 m,纤维状玉髓(Cln),絮状蛋白石(Opa)全消光,微晶石英颗粒(mic-Qtz)

2003)的分类标准:

(1) 凡某端元矿物组分含量 $\geq 50\%$ 的,即用它定义“岩石基本名称”,以“×岩”表示;若某端元组分含量 $\geq 90\%$,以“纯×岩”表示(“纯”通常省略);(2)凡某端元组分含量 $\geq 25\% < 50\%$ 的,用它作为另外岩石基本名称的形容词,以“×质”表示,写在基本名称之前;(3)凡某端元组分含量 $\geq 10\% < 25\%$,用它来定另外岩石基本名称的形容词,以“含×(的)”表示;(4)凡某端元组分含量 $< 10\%$ 的,一般不反映在岩石名称中。

1.2.2 岩石分类与命名 (1)大类.根据端元组分含量 $\geq 50\%$,划分为 3 个大类,分别为粘土岩大类、硅质岩大类、碳酸盐岩大类.如果在三端元组分中,任意一个组分不大于 50%,则划分为混合泥岩大类.

(2)类.类的划分根据端元组分含量以及三角图中等边三角形的中线(角平分线),在 4 个大类中再继续划分类.除了混合泥岩大类外,每个大类可按照 50%、75%、90% 和等边三角形的中线(角平分线)划分出 5 类(大于 90% 不再细分).50% 的数值线结合等边三角形的中线(角平分线)将混合泥岩大类均分为 6 个类.每类按照含量高的 2 个端元命名,且按照含量由低到高顺序依次排列命名,之间用连接符.例如硅质—粘土质混合泥岩(硅质矿物、粘土矿物、碳酸盐岩矿物含量均小于 50%,且硅质矿物含量小于粘土矿物含量,碳酸盐岩矿物含量最低).

最终三角图将 SAC 岩石系列划分出 4 大类 21 类,具体岩石名称与端元矿物含量见图 2.与现存的分类相比,新的方案强调了等边三角形中线作为一种分

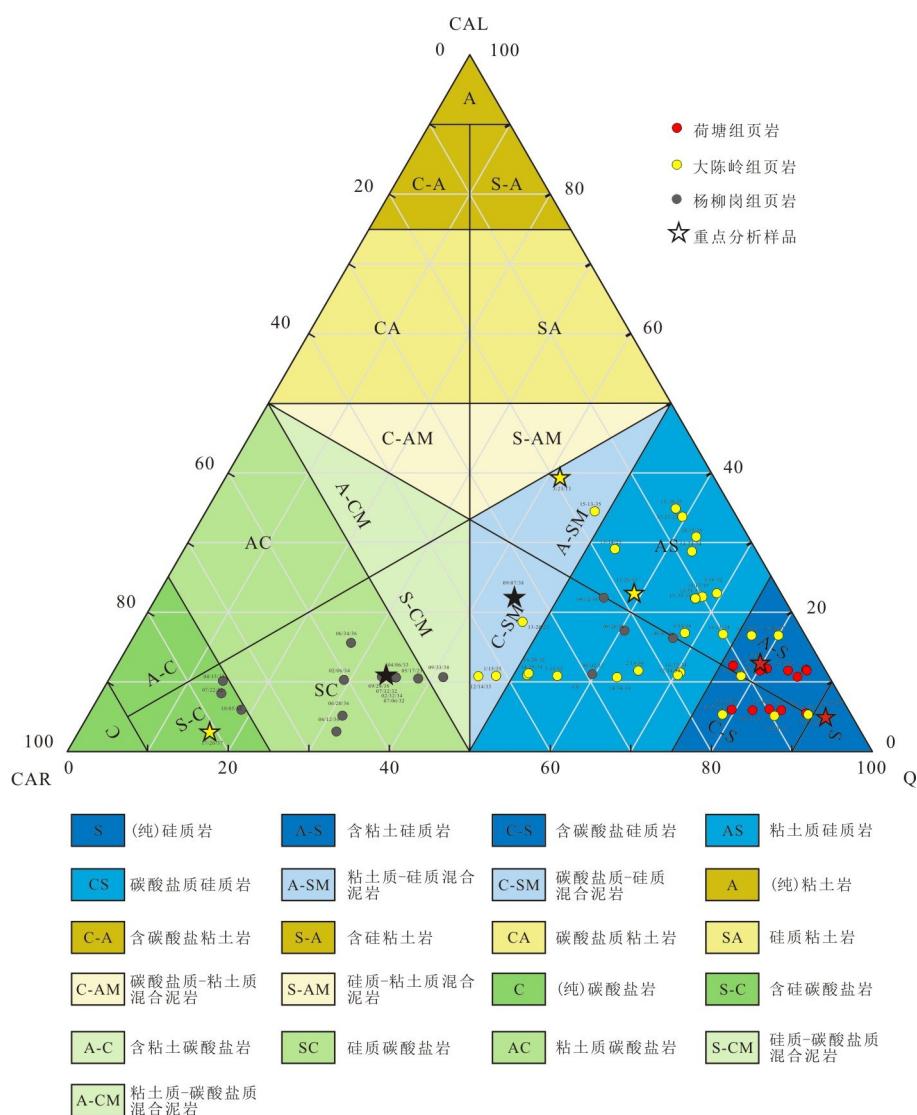


图2 下扬子地区下—中寒武统 SAC 岩石系列分类三角图

Fig.2 Ternary plot of SAC rock series of the Lower-Middle Cambrian in the Lower Yangtze region

界线,能够反映三端元之间矿物混合沉积的趋势。

1.2.3 相关术语的厘定 分类中的“粘土岩”强调成分,即粘土矿物含量大于50%,也常被归属于泥岩类。“泥岩”一般指的是粒度<0.0625 mm的颗粒含量大于50%的沉积岩。“混合泥岩”是指三端元成分均不大于50%,且粒度<0.0625 mm的颗粒含量大于50%的沉积岩。“页岩”强调的是页理发育的泥岩,不是依据矿物组成的分类术语。硅质岩是以具有化学、生物、生物化学、火山成因的二氧化硅颗粒为主的细粒沉积岩。普遍认为该术语等同于燧石。本文认为该术语包括通常使用的硅质页岩和燧石。通常意义的“硅质页岩”属于新方案中的硅质岩大类的含粘土硅质岩(A-S)、粘土质硅质岩(AS),含碳酸盐硅质岩(C-S)、硅质碳酸盐岩(SC)区间;通常意义的

“钙质页岩”属于粘土岩大类的含碳酸盐粘土岩(C-A)。此外,碳酸盐岩中,若以方解石为主,则定名为灰岩。如果以白云石为主,定名为白云岩。

2 下扬子地区寒武统 SAC 岩石系列的类型与特征

2.1 样品来源与方法

本文研究的63个样品来自下扬子地区安徽宣城XY1井下—中寒武统荷塘组、大陈岭组和杨柳岗组。荷塘组可进一步划分为荷塘组下段和上段,荷塘组下段厚114.40 m,以黑色硅质泥岩、硅质岩为主,夹黑色硅质泥岩及硅质灰岩薄层;荷塘组上段厚141.90 m,主要为黑色含海绵骨针硅质页岩、碳质页

岩,顶部夹少量薄层状灰质泥岩、泥质灰岩。大陈岭组厚 212.41 m,底部为灰色中一厚层状纹层泥质灰岩夹黑色含海绵骨针页岩,中一上部为黑色灰质泥岩、含海绵骨针页岩夹薄层灰色泥质灰岩。杨柳岗组厚 322.51 m,主要为灰黑色页岩、灰黑色灰质泥岩、灰黑色炭质硅质页岩。

系统对岩心的颜色、岩性、沉积结构、生物特征等进行了细致的研究。63 个薄片被应用于岩石学鉴定。应用 X 射线分析仪(X'Pert MPD Pro),在温度为 22 °C、湿度为 65% 的检测环境下,对研究区的 63 个岩样进行 X 衍射分析(XRD)。样品的分析测试是在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成的。

2.2 分类结果与描述

根据 X 衍射获得的矿物含量,利用新的分类三角图,将下扬子地区 XY1 井寒武统 SAC 岩石系列划分出 3 大类 10 类(图 2)。为了展示古代深海 SAC 岩石系列典型特征,本文详细描述了硅质岩大类的(纯)硅质岩(S)、含粘土硅质岩(A-S)、粘土质硅质岩(AS),混合泥岩大类的粘土质—硅质混合泥岩(A-SM)、碳酸盐质—硅质混合泥岩(C-SM)以及碳酸盐岩大类的含硅质碳酸盐岩(S-C)、硅质碳酸盐岩(SC)的镜下岩石学特征。

2.2.1 硅质岩大类 寒武系硅质岩大类包括(纯)硅

质岩(S),含粘土硅质岩(A-S),含碳酸盐硅质岩(C-S),碳酸盐质硅质岩(CS),粘土质硅质岩(AS)5 类。

(1)(纯)硅质岩(S)。仅发育于荷塘组。呈黑色,多为块状构造,偶见水平层理构造;基质为泥质,存在较大(2~4 mm)的漂浮状石英颗粒,为硅质海绵骨针碎屑(图 3a)。单偏光镜下见大量絮状蛋白石,正交镜下全消光,其间可见粒状的微晶石英(图 3b,3c),以及呈放射状的玉髓(图 3d)。该岩石以富含硅质海绵骨针和放射虫化石为特征(图 3e,3f)。前人研究已证实荷塘组放射虫和海绵骨针的存在(胡杰等,2002;Xiao *et al.*, 2005; Zhou and Jiang, 2009),并基于黑色硅岩及页岩的 Ge/Si 比值提出了荷塘组硅质岩为生物成因(Zhang *et al.*, 2013)。根据 X 衍射结果,石英含量 87%、粘土矿物总量 5%,方解石含量 3%,长石含量 5%。可见,硅质岩以隐晶质石英和微晶石英为主要组成,富含硅质海绵骨针和放射虫,反映其具有生物成因。

(2)含粘土硅质岩(A-S)。普遍发育于荷塘组和大陈岭组。灰黑色,基质主要为隐晶质石英,正交镜下全消光(图 4b,4c),黄铁矿自形晶较大(10~30 μm)(图 4b,4c)。微晶石英集合体呈条带产出(图 4b,4c),或是充填于海绵骨针内(图 4d,4e),可见玉髓(图 4f)。此外,偶见白云母(图 4f)。X 衍射分析(XRD)结果显示石英含量 63%,方解石和白云石

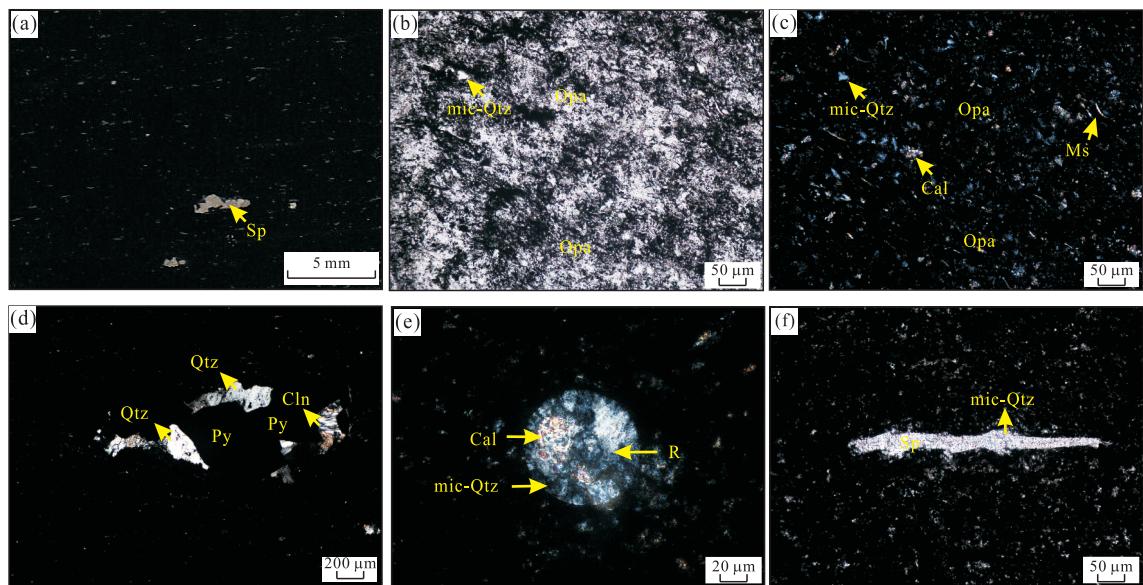


图 3 下扬子地区下—中寒武统(纯)硅质岩(S)镜下照片

Fig.3 Thin section photographs of silicalites of the Lower-Middle Cambrian in the Lower Yangtze region

a.薄片扫描,荷塘组(样号 21-39-45),深度 2 555.91 m,块状构造,大颗粒为硅质海绵骨针(Sp);b.单偏光,大量絮状蛋白石(Opa),微晶石英(mic-Qtz);c.正交,蛋白石(Opa)全消光,微晶石英颗粒(mic-Qtz),柱状云母(Ms);d.正交,微晶石英集合体(Qtz),放射状玉髓(Cln)环绕黄铁矿(Py)晶体;e.正交,放射虫(R)横截面,微晶石英(mic-Qtz),局部被方解石(Cal)交代;f.单偏光,由微晶石英(mic-Qtz)构成的硅质海绵骨针化石(Sp)

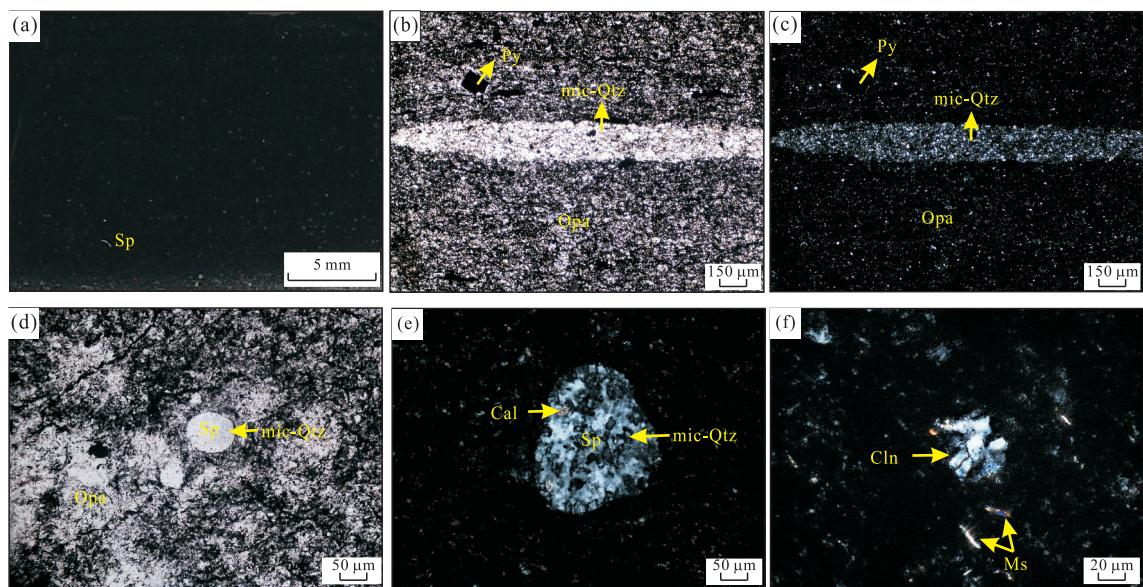


图4 下扬子地区下—中寒武统含粘土硅质岩(A-S)镜下照片

Fig.4 Thin section photographs of argillaceous-siliciclastics of the Lower-Middle Cambrian in the Lower Yangtze region
a.薄片扫描,荷塘组(样号20-36-01),深度2606.91 m;块状构造,漂浮的颗粒为海绵骨针化石(Sp);b,c.微晶石英透镜状条带(mic-Qtz),隐晶质石英(Opa),自形黄铁矿(Py);d.单偏光,微晶石英集合体的海绵骨针(mic-Qtz),絮状蛋白石(Opa);e.正交,硅质海绵骨针(Sp)横切面,可见局部被方解石(Cal)交代;f.放射状结构的玉髓(Cln),柱状云母(Ms)

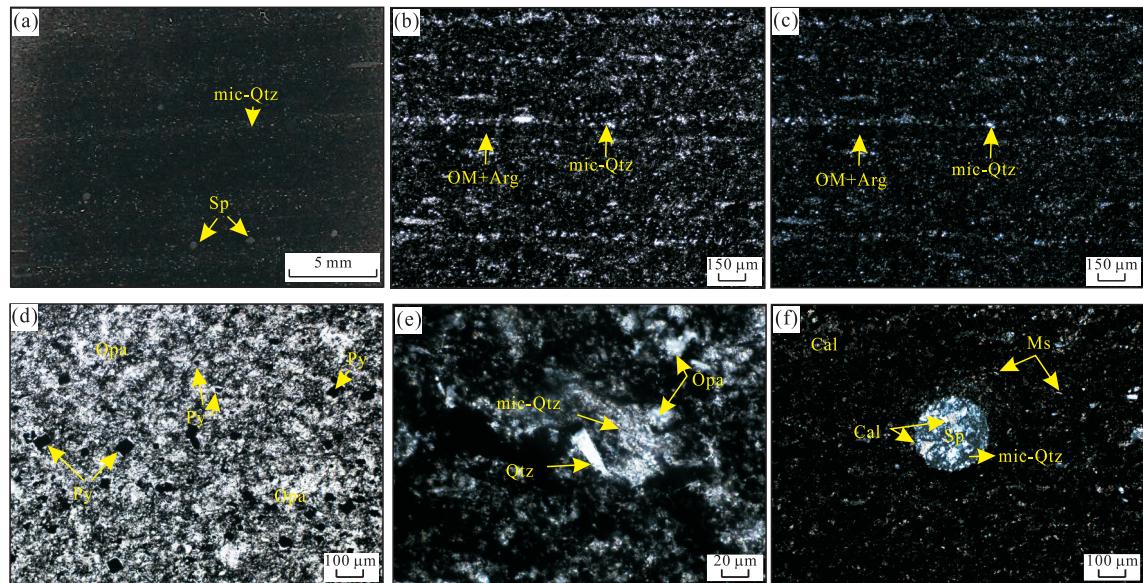


图5 下扬子地区下—中寒武统粘土质硅质岩(AS)镜下照片

Fig.5 Thin section photographs of argillaceous siliciclastics of the Lower-Middle Cambrian in the Lower Yangtze region
a.薄片扫描,大陈岭组(样号12-26-33),深度2393.57 m,微弱的水平层理,漂浮颗粒为海绵骨针化石(Sp);b,c.水平层理,亮色条带为微晶石英(mic-Qtz),暗色为有机质和粘土矿物(OM+Arg);d.单偏光,絮状蛋白石(Opa),分散状自形黄铁矿(Py);e.正交,微晶石英(mic-Qtz)、隐晶质石英(Opa)、自形石英颗粒(Qtz);f.正交,硅质海绵骨针(Sp)横截面,微晶石英(mic-Qtz),局部被泥晶方解石(Cal)交代,见微量细柱状云母(Ms)

含量分别为2%,4%,长石含量12%,黄铁矿含量7%,粘土矿物总量12%。与(纯)硅质岩相似,其主要矿物依然为隐晶质和微晶石英,不同的是粘土矿物

含量增高。

(3)粘土质硅质岩(AS)。普遍发育于荷塘组和大陈岭组。灰黑色,见由扁平透镜状石英条带(含极

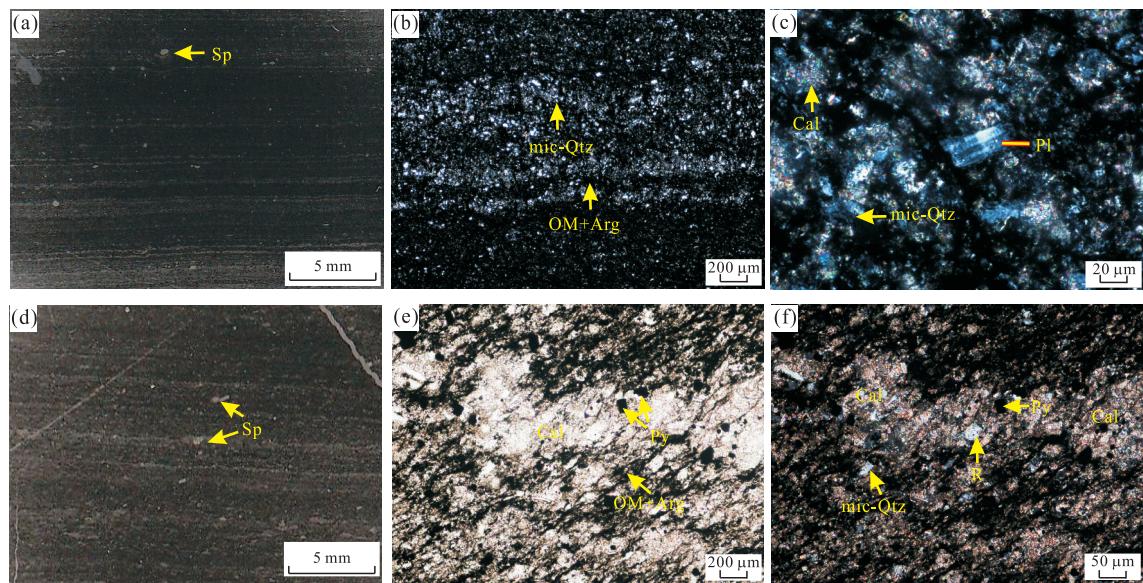


图 6 下扬子地区下—中寒武统粘土质—硅质混合泥岩(A-SM)与碳酸盐质—硅质混合泥岩(C-SM)镜下照片

Fig.6 Thin section photographs of argillaceous-siliceous mixed mudstones and carbonate-siliceous mixed mudstones of the Lower-Middle Cambrian in the Lower Yangtze region

a.薄片扫描,大陈岭组(样号 13-03-23),深度 2 397.49 m,清晰的水平层理,海绵骨针化石(Sp);b.单偏光,水平层理发育,亮色条带为微晶石英集合体(mic-Qtz),暗色物质为有机质和粘土矿物(OM+Arg);c.方解石集合体(Cal)与微晶石英(Qtz)集合体,斜长石具卡氏双晶(Pl);d.薄片扫描,大陈岭组(样号 12-33-14),深度 2 390.49 m,可见显著的水平层理,漂浮的颗粒为海绵骨针化石(Sp);e.单偏光,方解石集合体(Cal)和黄铁矿(Py),暗色条带为粘土矿物和有机质(OM+Arg);f.正交镜,方解石集合体(Cal)含有微晶石英(mic-Qtz)和放射虫化石(R)

细粒自生黄铁矿)构成的断续的水平层理(图 5a, 5b, 5c),明亮的条带富含石英,宽的暗色条带富集粘土和有机质.絮状蛋白石和分散的微晶石英为主要组成(图 5d, 5e);黄铁矿以极细粒($3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$)自形晶的形式存在(图 5d).海绵骨针化石由微晶石英集合体构成,少量被方解石交代(图 5f).X 衍射分析(XRD)结果显示该岩石石英含量 52%,粘土矿物总量 20%,方解石和白云石含量分别为 10% 和 6%,长石含量 7%,黄铁矿含量 5%.粘土质硅质岩在宏观特征上相似于(纯)硅质岩和含粘土硅质岩,其主要矿物隐晶质和微晶石英,依然与生物聚集作用有关,但是粘土矿物含量较高.

2.2.2 混合泥岩大类

(1) 粘土质—硅质混合泥岩(A-SM).主要发育于大陈岭组.水平层理非常发育(图 6a, 6b).亮色条带富集微晶石英集合体和泥晶方解石混合沉积,暗色条带富集有机质和粘土矿物.出现较大长石颗粒(20 mm)(图 6c),可能指示沉积物质来源受陆源影响.根据 X 衍射结果,石英含量 37%,粘土矿物总量 35%,碳酸岩矿物含量 17%,长石含量 8%,黄铁矿含量 3%.粘土质—硅质混合泥岩(A-SM)表现为泥晶方解石与微晶—隐晶质石英混合沉积,石英>粘土矿物>碳酸盐矿物含量,但均

未超过 50%.

(2) 碳酸盐质—硅质混合泥岩(C-SM).主要发育于大陈岭组和杨柳岗组.呈块状构造或弱水平层理(图 6d, 6e),亮色矿物为方解石集合体和微晶石英,暗色矿物为有机质及粘土,自形的黄铁矿和硅质放射虫发育(图 6e, 6f).X 衍射结果表明石英含量 42%、方解石含量 16%、白云石含量 24%,粘土矿物总量 10%,长石含量 5%,黄铁矿含量 3%.

2.2.3 碳酸盐岩大类

在下扬子地区寒武系 SAC 岩石系列中碳酸盐岩大类主要包括远洋或半远洋沉积的泥晶碳酸盐岩和含生物碎屑泥晶碳酸盐岩.在新的分类图中包括硅质碳酸盐岩和含硅质碳酸盐岩.

(1) 硅质碳酸盐岩(SC).该类中碳酸盐岩矿物含量大于 50%,且白云岩含量明显高于方解石,故可命名为硅质白云岩.主要分布在杨柳岗组.水平层理发育(图 7a),亮色宽条带主要为泥晶—微晶白云石和方解石(图 7b, 7c),暗色窄条带主要为粘土和有机质.可见硅质海绵骨针,微晶白云石呈集合状,混杂有自形程度较好的颗粒石英(图 7e)以及黄铁矿(图 7b).见同心圆构造的硅质海绵骨针(图 7d, 7e).根据 X 衍射结果,白云石和方解石含量分别为 47% 和 4%,石英含量为 32%,粘土矿物总量 10%,长石

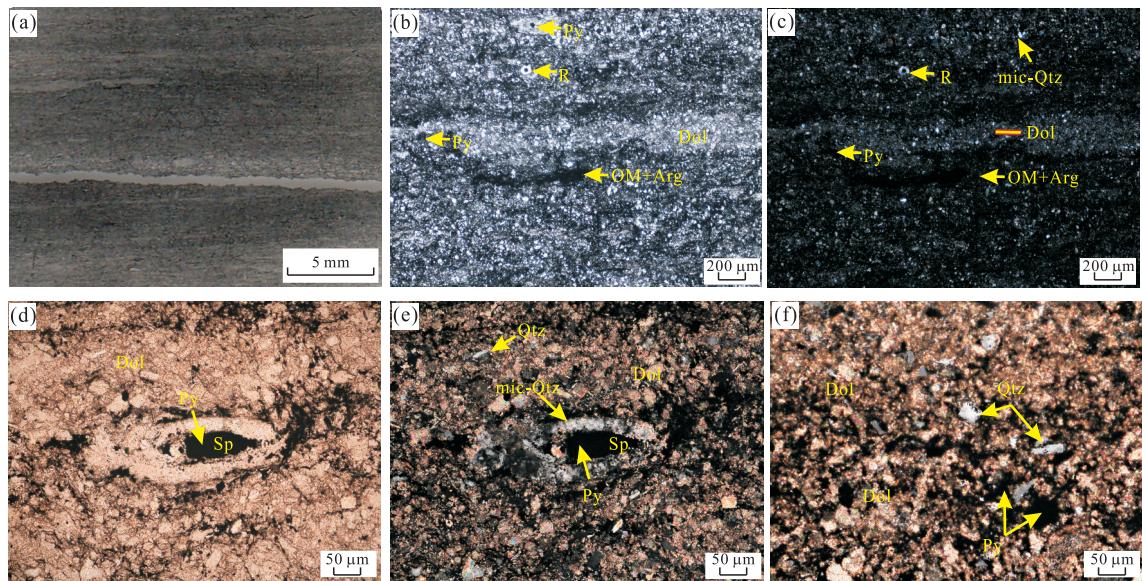


图7 下扬子地区下—中寒武统硅质碳酸盐岩(SC)镜下照片

Fig.7 Thin section photographs of siliceous carbonatites of the Lower-Middle Cambrian in the Lower Yangtze region
a.薄片扫描,杨柳岗组(样号07-32-32),深度2218.09 m,水平层理发育;b,c.水平层理,放射虫(R),白云石纹层(Dol),分散状黄铁矿(Py)和微晶石英颗粒(mic-Qtz);d,e.硅质海绵骨针化石(Sp),内部充填黄铁矿晶体(Py);f.泥晶白云石(Dol),零星的自形一半自形石英颗粒(Qtz),自形黄铁矿发育(Py)

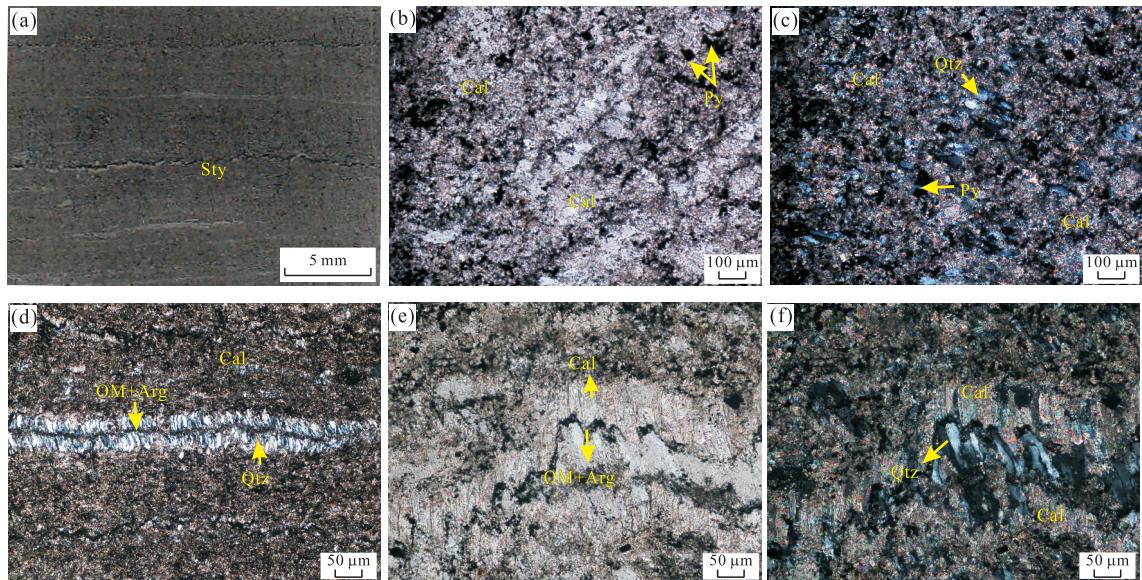


图8 下扬子地区中—下寒武统含硅碳酸盐岩(S-C)镜下照片

Fig.8 Thin section photographs of siliceous-carbonatites of the Lower-Middle Cambrian in the Lower Yangtze region
a.薄片扫描,大陈岭组(样号17-37-26),深度2517.19 m,水平层理和缝合线(Sty);b,c.基质为泥晶方解石(Cal),含少量微晶石英(mic-Qtz)和黄铁矿晶体(Py);d,e,f.缝合线,带状结构,石英颗粒(Qtz),垂直缝合线,内侧为粘土和有机质(Om+Arg)

5%,黄铁矿2%.该类岩石宏观上以碳酸盐岩矿物占主导(总含量50%~75%),石英含量大于20%,主要为硅质生物骨架的微晶石英和分散的微晶石英,粘土矿物含量略少。

(2)含硅碳酸盐岩(S-C).具体定名为含硅灰岩,

发育于大陈岭组上部,水平纹层发育,具有齿状一波状的缝合线构造(图8d,8e,8f).镜下以泥晶方解石占主体,夹杂少量石英颗粒和黄铁矿(图8b,8c).缝合线放大显示,见有带状结构中呈镶嵌状石英晶体垂直缝合线,可能是先存石英颗粒经压溶重结晶而

成。缝合带内部为暗色有机质和粘土(图 8e, 8f)。X 衍射分析结果表明该岩石类型方解石含量 81% (白云石), 石英含量 16%, 粘土矿物总量 3%。该类岩石碳酸盐岩矿物含量占主导, 主要为泥晶方解石或白云石; 石英含量一般小于 25%, 多成分散的微晶石英, 少数为重结晶的较大颗粒的石英。粘土矿物和有机质构成了水平层理的暗色细纹。

综上所述, 下扬子寒武系 SAC 岩石系列主要包括硅质岩大类—混合泥岩大类—碳酸盐岩大类, 体现了硅质矿物与碳酸盐岩矿物之间的混合沉积, 且由荷塘组、大陈岭组到杨柳岗组, 自下而上形成由硅质岩向碳酸盐岩演化的趋势。樊佳莉(2017)研究表明, 荷塘组早期以深水盆地相的硅质岩沉积为主, 大陈岭组晚期开始出现碳酸盐岩夹层, 属于碳酸盐岩台地下斜坡环境, 水体开始变浅至碳酸盐岩补偿深度之上或附近。新的分类方案对岩石的分类结果恰好体现了这一沉积演化的趋势。

3 分类效果分析

为了验证新分类方案的合理性, 论文选择了国内外几个常见的 SAC 岩石系列(在文献中常被称为富有机质页岩或页岩), 分别应用本文的 SAC 三角图 Stow(2005)和 Helena et al.(2013b)的三角图进行了分类。选择的 SAC 岩石系列包括中国四川盆地五峰组—龙马溪组页岩、美国伏特沃斯盆地密西西比系 Barnett 页岩和美国德克萨斯州南部马弗里盆地的 Pearsall 页岩。

3.1 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩的分类

四川盆地上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组富有机质页岩是中国页岩气勘探开发的目的层系。论文选择焦石坝地区 JY-B 井的 X 衍射数据(吴蓝宇等, 2016), 对五峰组—龙马溪组黑色页岩进行了分类(图 9a)。在 SAC 三元图中, 五峰组一下志留统龙马溪组富有机质页岩主要类型为硅质岩大类的粘土质硅质岩(AS), 混合泥岩大类的粘土质—硅质混合泥岩(A-SM)和硅质—粘土质混合泥岩(S-AM)和粘土岩大类的硅质粘土岩(SA)。投点主要分布在 Q 端元和 CAL 端元角分线的右侧, 可以反映出岩石由硅质矿物端元向粘土质矿物端元混合沉积演化。郭旭升等(2014, 2017)指出四川盆地焦石坝气田五峰组—龙马溪组沉积于陆棚相滞流缺氧环境。黑色页岩中石英主要来源并不是陆源碎屑, 而可能是由各种浮游生物、底栖生物或细菌等成烃生物的遗

骸和残片经各种成岩作用后演化而来。符合本论文强调的 SAC 岩石系列的石英主要为内源的原则。吴蓝宇等(2016)揭示了从五峰组到龙马溪组二段, 粉砂岩夹层增加, 有机质页岩的硅质矿物含量逐渐减少, 粘土质逐步增加。新的岩石分类和命名体现了这一演化趋势。

在 Stow(2005)的分类中(图 9b), 五峰组—龙马溪组黑色页岩集中在含灰硅质泥岩、含粘土硅质泥岩和灰质硅质混合泥岩。相比本文的 SAC 岩石系列划分的岩石类型, 含灰硅质泥岩和灰质硅质混合泥岩应该属于含粘土的, 即粘土矿物含量大于碳酸盐岩矿物含量。在 Helena et al.(2013b)的分类中(图 9c), 五峰组—龙马溪组黑色页岩类型包括含粘土硅质泥岩、混合硅质泥岩、含粘土/硅混合泥岩、含硅粘土质泥岩、混合粘土质泥岩。与本文分类相比, 该分类中“混合”类的岩性划分过于繁杂; 粘土硅质泥岩与混合硅质泥岩的界线也过于牵强。

3.2 美国伏特沃斯盆地 Barnett 页岩的分类

Miliken et al.(2012)提供的样品主要为 Barnett 页岩层序中的碳酸盐岩, 少量为硅质泥岩。在 SAC 岩石系列三元图中(图 9d), Barnett 页岩主要岩石类型为碳酸盐岩大类的(纯)碳酸盐岩(C)、含硅碳酸盐岩(S-C)、含粘土碳酸盐岩(A-C)、粘土质硅质岩(AS)以及过渡的混合泥岩大类。总体呈现出硅质矿物端元和碳酸盐岩矿物端元混合演化的趋势, 与下扬子地区中下寒武统页岩相似。Loucks 和 Ruppel(2007)指出 Barnett 页岩主要为硅质泥岩、泥质灰泥岩和骨架泥质泥粒灰岩, 沉积于深水斜坡—盆地环境。硅质来源主要来源于海绵骨针和放射虫, 碳酸盐岩主要来自于大陆斜坡, 以碎屑流和浊流的形式搬运。

Stow(2005)的分类中(图 9e), Barnett 页岩主要分布在灰质泥岩(泥晶灰岩)、灰质硅质混合泥岩、含粘土硅质泥岩、硅质泥岩(硅质岩)。Pearsall 页岩和 Barnett 页岩同分布在灰质硅质混合泥岩中, 但实际上前者偏粘土质, 后者偏碳酸盐质, 岩石特征相差较大, 故该区还有待细分。在 Helena et al.(2013b)分类方案中(图 9f), 除了泥质灰岩区投点集中外, 大多数投点都散落在各岩石类型分区的界线附近, 不能有效地划分岩石类型。

3.3 美国马弗里盆地 Pearsall 页岩的分类

Pearsall 页岩在 SAC 系列三元图解中主要岩石类型包括: 碳酸盐岩大类中的粘土质碳酸盐岩(AC), 混合泥岩大类中的粘土质—碳酸盐质混合泥

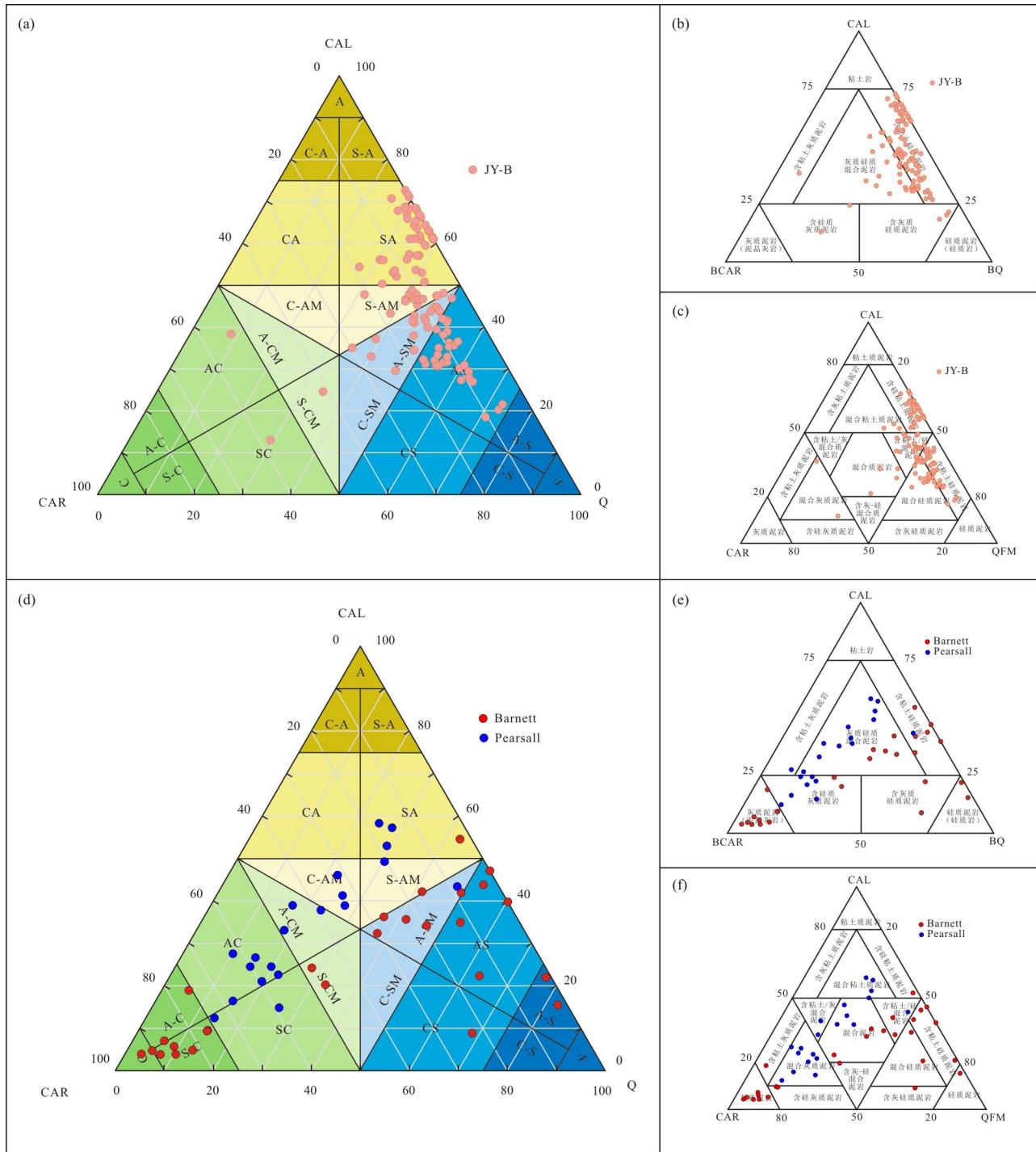


图9 典型的SAC岩石系列三角投图比较

Fig.9 The comparison of the ternary diagrams of typical SAC rock series

JY-B井五峰—龙马溪组页岩X衍射数据引自吴蓝宇(2016);Barnett页岩X衍射数据引自 Miliken(2012);Pearsall页岩X衍射数据引自 Hackley(2012)

岩(A-CM)和碳酸盐质—粘土质混合泥岩(C-AM)和粘土岩大类的硅质粘土岩(SA)(图9d).Pearsall页岩属于碳酸盐岩矿物与粘土矿物之间的混合沉积,新分类中岩石类型体现了混合矿物比例的连续变化.这种变化趋势反映了由深水陆架边缘碳酸盐

岩和碳酸盐质泥岩向碳酸盐岩台地—开放陆架浅水碳酸盐岩的过渡(Hackley, 2012).

Stow(2005)的分类中(图9e),Pearsall页岩主要类型为灰质硅质混合泥岩、含硅质灰质泥岩.另外在含粘土灰质泥岩和含粘土硅质泥岩区也有样点分

布。相比本文划分的岩石类型,该分类的主要岩石类型不能体现 Pearsall 页岩是粘土质的和碳酸盐质的混合沉积的特点;此外,灰质硅质混合泥岩的命名中包含硅质组分,而该页岩贫硅质,这与实际情况不符。在 Helena *et al.*(2013b)分类中(图 9f),主要岩石类型有混合灰质泥岩、混合质泥岩、混合粘土质泥岩、含粘土/灰混合质泥岩。混合灰质泥岩分区与样品投点的自然聚类相吻合,但是投点在混合质泥岩和含粘土/灰混合泥岩的界限较为牵强,且混合质泥岩的术语含义不确切。

综合上述,Stow(2005)的分类没有采用 50% 的定量划分标准,不能体现占主导的矿物组分,模糊了岩石大类的界线。Helena *et al.*(2013b)的三元图中,一方面采用 20%、80% 的分类标准不符合通用的习惯,特别是 20% 的界线与投影点的自然聚类存在较大矛盾(投点有很多落在岩石类型的边界上,对于岩性的判断比较模糊);另一方面,该分类对“混合”类的划分和命名比较混杂。更重要的是,二者的分区或岩石命名均不能准确反映端元矿物之间混合沉积的趋势。相比这两种先存的方案,本文的三端元图不仅采用了通用的 25%、50%、75% 等的定量标准,而且采用了三角图中等边三角形中线作为界线,符合端元矿物之间混合沉积的自然趋势。因此,岩石类型分区界线与样品自然聚类的吻合程度明显高于先存的分类。此外,对过渡性岩石类型的命名也完全遵循了三端元矿物组分之间混合比例的系统性变化。

4 结论

论文提出了基于岩石矿物组成的 SAC 岩石系列三角图分类方案:三端元要素为碳酸盐矿物(CAR)一粘土矿物(CAL)一石英(Q),按照“纯(>90%)”、“主(50%~90%)”、“质(<50%,>25%)”、“含(<25%)”的定量分类标准,强调石英和碳酸盐岩矿物主要为内源的生物或化学成因。

下扬子地区寒武统 SAC 岩石系列包括的主要岩石类型有 3 大类 8 类:硅质岩大类的(纯)硅质岩(S)、含粘土硅质岩(A-S)、含碳酸盐硅质岩(C-S)、粘土质硅质岩(AS)、碳酸盐质硅质岩(CS);碳酸盐岩大类的含硅碳酸盐岩(S-C);混合泥岩大类的粘土质—硅质混合泥岩(A-SM)和碳酸盐质—硅质混合泥岩(C-SM)。这样的岩石分类与命名反映了下扬子地区寒武统 SAC 岩石系列由硅质岩向碳酸盐岩混合沉积演化的趋势。

利用新方案对国内外典型 SAC 系列岩石分类的结果表明,新的分类定量标准和三角形中线所划分的岩石类型更符合样品的自然聚类分区,因而比以往的方案更加合理。SAC 岩石系列的新分类方案符合三端元矿物组分之间混合比例的系统性变化,能够定量区分不同的岩石类型,确保分类和命名的合理性。同时,新的分类方案可以反映 SAC 岩石系列端元矿物的来源和沉积演化趋势,为探索深海 SAC 岩石系列沉积环境的变迁提供了依据。

References

- Chalmers, G.R., Bustin, R.M., Power, I.M., 2012. Characterization of Gas Shale Pore Systems by Porosimetry, Pycnometry, Surface Area, and Field Emission Scanning Electron Microscopy/Transmission Electron Microscopy Image Analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig Units. *AAPG Bulletin*, 96(6): 1099–1119. <https://doi.org/10.1306/1017111052>
- Chermak, J.A., Madeline, E.S., 2014. Mineralogy and Trace Element Geochemistry of Gas Shales in the United States: Environmental Implications. *International Journal of Coal Geology*, 126: 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.12.005>
- Fan, J.L., 2017. Lithofacies and Depositional Setting of the Lower Cambrian Organic-Rich Shale of the Lower Yangtze Region, China. *Geological Science and Technology Information*, 36(5): 156–163 (in Chinese with English abstract).
- Gasparik, M., Bertier, P., Gensterblum, Y., et al., 2014. Geological Controls on the Methane Storage Capacity in Organic-Rich Shales. *International Journal of Coal Geology*, 123: 34–51. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.06.010>
- Götze, J., Möckel, R., 2012. Quartz: Deposits, Mineralogy and Analysis. *Springer Geology*, 10: 978–1007.
- Gross, D., Sachsenhofer, R.F., Bechtel, A., et al., 2015. Organic Geochemistry of Mississippian Shales (Bowland Shale Formation) in Central Britain: Implications for Depositional Environment, Source Rock and Gas Shale Potential. *Marine and Petroleum Geology*, 59: 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.07.022>
- Guo, X.S., 2017. Sequence Stratigraphy and Evolution Model of the Wufeng–Longmaxi Shale in the Upper Yangtze Area. *Earth Science*, 42(7): 1069–1082 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X.S., Hu, D.F., Wen, Y.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).
- Hackley, P.C., 2012. Geological and Geochemical Characterization of the Lower Cretaceous Pearsall Formation, Maverick Basin, South Texas: A Future Shale Gas Resource?.*AAPG Bulletin*, 96(8):1449—1482. <https://doi.org/10.1306/11221111071>
- Helena, G.D., Camron, M., Richard, L., et al., 2013a. Evaluating the Impact of Mineralogy on Reservoir Quality and Completion Quality of Organic Shale Plays. *Proceedings-SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, (3):2465—2481.
- Helena, G.D., Camron, M., Richard, L., et al., 2013b. Score: A Mineralogy Based Classification Scheme for Organic Mudstones. *Proceeding-SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, (3):2465—2481.
- Hennissen, J.A.I., Hough, E., Vane, C.H., et al., 2017. The Prospectivity of a Potential Shale Gas Play: An Example from the Southern Pennine Basin (Central England, UK).*Marine and Petroleum Geology*, 86:1047—1066. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.033>
- Hou, H.H., Shao, L.Y., Li, Y.H., et al., 2017. Geochemistry, Reservoir Characterization and Hydrocarbon Generation Potential of Lacustrine Shales: A Case of YQ-1 Well in the Yuqia Coalfield, Northern Qaidam Basin, NW China. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 458—471. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.08.030>
- Hu, J., Chen, Z., Xue, Y.S., et al., 2002. Sponge Spicules in Early Cambrian Hetang Formation, Xiuning, Southern Anhui. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 19(1):53—62(in Chinese with English abstract).
- Jarvie, D.M., Hill, R.J., Ruble, T.E., et al., 2007. Unconventional Shale-Gas Systems: The Mississippian Barnett Shale of North-Central Texas as One Model for Thermogenic Shale-Gas Assessment. *AAPG Bulletin*, 91(4):475—499. <https://doi.org/10.1306/12190606068>
- Jiang, S., Tang, X.L., Osborne, S., et al., 2017. Enrichment Factors and Current Misunderstanding of Shale Oil and Gas: Case Study of Shale in U.S., Argentina and China. *Earth Science*, 42(7): 1083—1091 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z.X., 2003. *Sedimentology*. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- 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. <https://doi.org/10.1306/11020606059>
- Macquaker, J.H.S., Adams, A.E., 2003. Maximizing Information from Fine-Grained Sedimentary Rocks: An Inclusive Nomenclature for Mudstones. *Journal of Sedimentary Research*, 73(5): 735—744. <https://doi.org/10.1306/012203730735>
- Miliken, K.L., Stirrat, R.J.D., Papazis, P.K., et al., 2012. Carbonate Lithologies of the Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas. Shale Reservoirs—Giant Resources for the 21st Century. *AAPG Memoir*, 97:290—321.
- Ross, D.J.K., Bustin, R.M., 2008. Characterizing the Shale Gas Resource Potential of Devonian-Mississippian Straits in the Western Canada Sedimentary Basin: Application of an Integrated Formation Evaluation. *AAPG Bulletin*, 92(1): 87—125. <https://doi.org/10.1306/09040707048>
- Shipboard Scientific Party, 1984. Introduction and Explanatory Notes. In: Hay, W.W., Sibuet, J.C., eds. *Initial Reports Deep Sea Drilling Project*, 75(1):3—25.
- Stow, D.A.V., 2005. *Sedimentary Rocks in the Field: A Color Guide*. Elsevier Academic Press, Burlington.
- Tian, H., Pan, L., Xiao, X.M., et al., 2013. A Preliminary Study on the Pore Characterization of Lower Silurian Black Shales in the Chuandong Thrust Fold Belt, Southwestern China Using Low Pressure N₂ Adsorption and FE-SEM Methods. *Marine and Petroleum Geology*, 48: 8—19. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.07.008>
- Wang, G.C., Carr, T.R., 2012a. Marcellus Shale Lithofacies Prediction by Multiclass Neural Network Classification in the Appalachian Basin. *Mathematical Geosciences*, 44(8): 975—1004. <https://doi.org/10.1007/s11004-012-9421-6>
- Wang, G.C., Carr, T.R., 2012b. Methodology of Organic-Rich Shale Lithofacies Identification and Prediction: A Case Study from Marcellus Shale in the Appalachian Basin. *Computers & Geosciences*, 49: 151—163. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.07.011>
- Wang, G.C., Carr, T.R., 2013. Organic-Rich Marcellus Shale Lithofacies Modeling and Distribution Pattern Analysis in the Appalachian Basin. *AAPG Bulletin*, 97(12): 2173—2205. <https://doi.org/10.1306/05141312135>
- Wang, G.C., Carr, T.R., Ju, Y.W., et al., 2014. Identifying Organic-Rich Marcellus Shale Lithofacies by Support Vector Machine Classifier in the Appalachian Basin. *Computers & Geosciences*, 64: 52—60. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.12.002>

- Wang, P. F., Jiang, Z. X., Yin, L. S., et al., 2017. Lithofacies Classification and Its Effect on Pore Structure of the Cambrian Marine Shale in the Upper Yangtze Platform, South China: Evidence from FE-SEM and Gas Adsorption Analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 156: 307–321. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.011>
- Wang, Y., Wang, L. H., Wang, J. Q., et al., 2018. Characterization of Organic Matter Pores in Typical Marine and Terrestrial Shales, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 49: 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.11.002>
- Wei, Z. F., Wang, Y. L., Wang, G., et al., 2018. Pore Characterization of Organic-Rich Late Permian Da-Long Formation Shale in the Sichuan Basin, Southwestern China. *Fuel*, 211: 507–516. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.068>
- Wu, L. Y., Hu, D. F., Lu, Y. C., et al., 2016. Advantageous Shale Lithofacies of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling Gas Field of Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 43 (2): 189–197 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, S. H., Hu, J., Yuan, X. L., et al., 2005. Articulated Sponges from the Lower Cambrian Hetang Formation in Southern Anhui, South China: Their Age and Implications for the Early Evolution of Sponges. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 220 (1/2): 89–117. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2002.02.001>
- Yang, F., Ning, Z. F., Wang, Q., et al., 2016. Pore Structure of Cambrian Shales from the Sichuan Basin in China and Implications to Gas Storage. *Marine and Petroleum Geology*, 70: 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.11.001>
- Yu, S. Y., He, J. Y., 1989. Sedimentary Petrology. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhang, L., Danelian, T., Feng, Q. L., et al., 2013. On the Lower Cambrian Biotic and Geochemical Record of the Hetang Formation (Yangtze Platform, South China): Evidence for Biogenic Silica and Possible Presence of Radiolaria. *Journal of Micropalaeontology*, 32 (2): 207–217. <https://doi.org/10.1144/jmpaleo2013-003>
- Zhou, C. M., Jiang, S. Y., 2009. Palaeoceanographic Redox Environments for the Lower Cambrian Hetang Formation in South China: Evidence from Pyrite Framboids, Redox Sensitive Trace Elements, and Sponge Biota Occurrence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 271 (3–4): 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.10.024>
- Zhu, X. M., 2008. Sedimentology (Fourth Edition). Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 樊佳莉, 2017. 下扬子地区下寒武统富有机质页岩的岩相与沉积环境. 地质科技情报, 36(5): 156–163.
- 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. 地球科学, 42(7): 1069–1082.
- 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.
- 胡杰, 陈哲, 薛耀松, 等, 2002. 皖南早寒武世荷塘组海绵骨针化石. 微体古生物学报, 19(1): 53–62.
- 蒋恕, 唐相路, Steve, O., 等, 2017. 页岩油气富集的主控因素及误辩: 以美国、阿根廷和中国典型页岩为例. 地球科学, 42(7): 1083–1091.
- 姜在兴, 2003. 沉积学. 北京: 石油工业出版社.
- 吴蓝宇, 胡东风, 陆永潮, 等, 2016. 四川盆地涪陵气田五峰组—龙马溪组优势岩相. 石油勘探与开发, 43(2): 189–197.
- 余素玉, 何镜宇, 1989. 沉积岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 朱筱敏, 2008. 沉积岩石学(第四版). 北京: 石油工业出版社.