

内蒙古二连盆地白音查干凹陷热水沉积白云岩的发现及其地质与矿产意义

钟大康¹,姜振昌¹,郭强²,孙海涛¹,杨喆¹

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 2. 核工业部北京地质研究院,北京 100029)

摘要:根据钻测井及各种分析测试数据阐明内蒙古二连盆地白音查干凹陷下白垩统腾格尔组深-半深湖相白云岩的成因。根据岩心观察和薄片鉴定,结合电子探针与能谱、微量元素及X-衍射分析白云岩的矿物成分与岩石结构及构造,在此基础上确定白云岩成因。结果表明:研究区白云岩为一套单层厚0.2~1.5 m的沸石质白云岩和沸石岩,白云岩层系由铁白云石(含FeO.5%~5%)、钠沸石、方沸石、水镁铁石、重晶石、黄铁矿组成。白云石晶体10~200 μm,波状消光,鞍状特征,具裂纹。岩石具泥粉晶结构和内碎屑结构,内碎屑为白云岩和沸石岩。发育纹层构造、同生变形构造、网脉状构造、角砾构造。自然伽马700~1 100 API,为正常泥岩的2~4倍,铀和钍含量分别高达(40~60)×10⁻⁶和(60~100)×10⁻⁶。Cu、Ni、Co、Fe、Mn等微量元素组成和分布与现代红海海底热水沉积一致。平面上沿基底断裂分布。多种资料表明这是一套“白烟型”热水沉积成因的白云岩。目前国内外对这类沉积报道较少,研究程度低,同时也缺乏相应成熟的沉积模式,通过此研究,有助于丰富和完善现有的沉积学理论,寻找更多与热水沉积有关的矿床。

关键词:白烟型;热水沉积;热水沉积白云岩;二连盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Discovery of hydrothermal dolostones in Baiyinchagan sag of Erlian Basin, Inner Mongolia, and its geologic and mineral significance

Zhong Dakang¹, Jiang Zhenchang¹, Guo Qiang², Sun Haitao¹, Yang Zhe¹

(1. State Key Lab of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. CNNC Beijing Research Institution of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on drilling, logging and various test data, this paper studied the origin of deep-semi deep lacustrine dolostones of the Lower Cretaceous Tenggeer Formation in Baiyinchagan sag of Erlian Basin, Inner Mongolia. Core observation and thin section analysis data in combination with electron probe, energy spectrum, trace element and X-ray diffraction were used to analyze mineral composition and texture, structure of the rock. On this basis, we identified the origin of the dolostones. The results show that the dolostones (zeolitic dolostones and zeolite with single layer thickness of 0.2–1.5 m) in the study area are composed of ankerite (proportion of Fe is 0.5%–5%), natrolite, analcite, sjogrenite, barite and pyrite. The dolomite crystals feature in size of 10–200 μm, wavy extinction, saddle morphology and development of fissures. These dolostones have muddy-micritic or intraclast (mainly from dolomites and zeolites) structures. Laminated, contemporaneous deformation, net-veined, and brecciated structures are common. GR is 700–1 100 API, which is 2–4 times as large as that of normal mudstones. U and Th content is up to 40–60 ppm and 60–100 ppm respectively. Trace elements, including Cu, Ni, Co, Fe and Mn, have a similar composition and distribution with the modern hydrothermal sediments on the Red Sea floor. The dolostones are distributed along the basement faults laterally. It is concluded that this is a set of ‘white smoke chimney’ hydrothermal dolostones. However, these sediments are rarely reported. The study of the chemical and thermodynamics process is deficient, and the deposition mechanism is not very clear. This research will be helpful for enriching the theory of sedimentology and discovering more mineral resources associated with hydrothermal sediments.

Key words: white smoke chimney, hydrothermal sediment, hydrothermal dolostone, Erlian Basin

收稿日期:2014-12-20;修订日期:2015-06-20。

第一作者简介:钟大康(1961—),男,教授,沉积储层。E-mail:Zhongdakang@263.net。

基金项目:国家自然科学基金项目(41472094)。

2010年3月中石化中原油田分公司在我国内蒙古二连盆地西南部的白音查干凹陷下白垩统腾格尔组深-半深湖相深灰色泥岩中钻遇一套单层厚0.2~1.5 m、累计厚300~450 m的富含油的缝洞型白云岩(图1),以盆地中央的锡26井为例,其单井试油日产油26 t,取心发现这套缝洞型白云岩为浅灰色,夹一些灰白色纹层和条带以及呈星散状分布的灰白色砂砾级碎屑颗粒。根据现场滴酸实验和薄片分析,初步确定这套含油岩层为膏质白云岩和泥质白云岩。其中所夹的白色纹层和条带以及灰白色砂砾级碎屑为石膏,就其颜色和硬度以及与白云岩的共生组合关系来看,前人认为这是属于湖泊碳酸盐沉积,是淡水碎屑岩向碳酸盐及膏盐湖演化的必然结果。

后来经过一年多的研究,通过常规岩石薄片、电子探针、能谱、全岩X-衍射、微量元素、放射性元素等多种手段分析,认为这是一套受热液影响的热液沉积白云岩,从广义的角度说叫热液沉积岩、或也有人称之为“喷流岩”,而不是湖泊蒸发环境下形成的白云岩。这类热液沉积目前在国内外报道均较少,研究程度低,对其沉积机理与沉积过程缺乏深入了解,没有统一的沉积模式。这套热液沉积岩的发现以及开展对这类岩石的研究不仅具有重要的沉积学理论意义,而且还具有

重要的矿产意义,因为它在有一定油气来源及圈闭与保存条件下不仅蕴藏着大量的石油与天然气,而且在这类岩石的沉积形成过程中,在适当的成矿条件下常常还可以伴生许多金属与非金属矿床。

1 热液沉积岩与热液沉积白云岩的研究历史与现状

热液沉积白云岩实际上属于热液沉积中的一种类型。热液沉积作用对于许多沉积学工作者或岩石学工作者来说可能有些陌生,但是通过大量的文献调研和检索发现,对热液沉积的研究实际上已有70多年的历史了,甚至更长。早在20世纪40年代瑞典海洋考察工作者在红海考察时就发现了红海海底的热液沉积。到了60年代美国、英国和德国的科考船在红海海底发现一些富含Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Ag的沉积物,当时,他们认为这些沉积物可能与局部的水温和盐度异常有关,可能是由海底热液与海水混合后沉淀(积)下来的。直到1978年,美国阿尔文(Alvin)号深潜器在东太平洋洋中脊轴部(21°N)水深1 650~2 610 m的海底发现数十个正冒着白色和黑色烟雾的喷口、在这些喷口附近堆积了一定厚度的丘形沉积物时,人们才

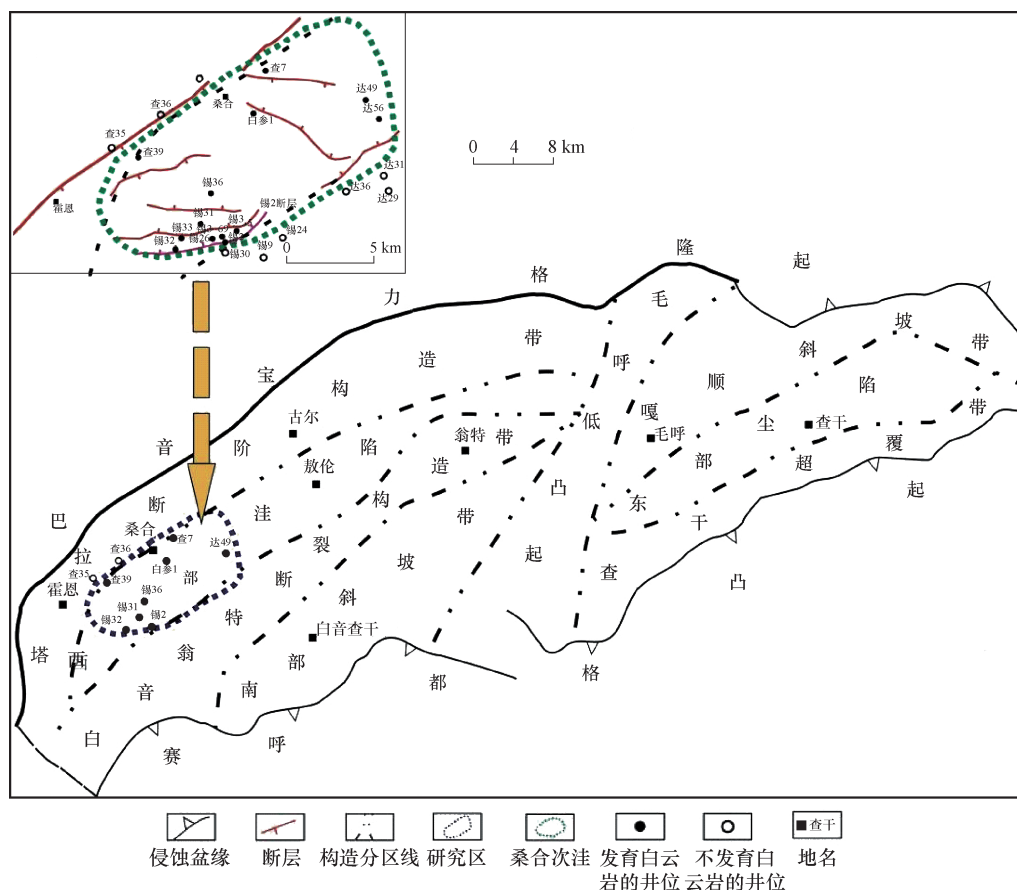


图1 研究区位置及钻井与断裂分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of wells and faults

比较正式的提出了“热水沉积作用”这一概念。其中冒着黑色烟雾的叫“黑烟囱”,它是海底喷发的较高温度($>350\text{ }^{\circ}\text{C}$)的热液与较冷的海水($2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右)混合后形成的一些富含 Fe, Cu, Zn 的黑色硫化物微粒^[1-3]。“白烟囱”是在温度稍低($32\sim 330\text{ }^{\circ}\text{C}$)一些的地方喷出的一些含 $\text{BaSO}_4 \cdot \text{SiO}_2$ 的清澈流体与海水混合后形成了一些白色沉淀物,本文所研究的属于此类。在 1982—1986 年期间, Hekinian^[4], Edmond^[5-6], Rona^[7-11] 对这一概念进行了补充完善,认为“热水沉积作用”应该定义为“循环流动在海洋盆地基底岩石中的热水体系达到并涌出界面附近时所发生的沉积作用”。这种沉积作用可以形成许多矿床,叫热水沉积矿床,它不同于人们常说的“热液矿床”,这类矿床是同生沉积成因的,是热液与冷水(海/湖水)混合后发生的沉淀或沉积作用形成的。而“热液矿床”是地下热液侵入已经固结的围岩后冷却形成或对围岩发生交代、蚀变形成,具有后期充填交代特征,它是后生的,它的形成没有海/湖水参与。许多人将两者混为一谈。国外对热水沉积研究较多,近 40 年来也涌现了大量关于海相^[12-24]和陆相^[25-27]热水沉积的成果。

国内最早发现并提出热水沉积的是涂光炽^[28-31]和陈先沛^[32-33]等人,比较系统的阐述热水沉积的是陈先沛,他 1992 年在《沉积学报》上发表了一篇名为“热水沉积作用的概念和几个岩石学标志”的文章,把“热水沉积作用”定义为“沉积界面之下循环流动的热水喷溢出界面以后所发生的沉积作用,以及界面之下的围岩的交代(蚀变)充填作用”。之后国内的许多学者在我国不同地区也陆续发现了不同时代的海相和陆相热水沉积^[34-36],其中的主要代表有地科院薛春纪^[37-40],他分别在北祁连和南秦岭下古生界发现了海底喷流热水沉积铜矿、铅锌矿;北京大学李江海^[41-43]在华北地区发现了中元古硫化物黑烟囱型热水沉积;成都理工大学郑荣才等人^[44-45]在酒泉盆地白垩系发现了热水沉积白云岩;西北大学柳益群等人^[46-47]和李红等人^[48-50]在新疆三塘湖盆地发现了热水沉积白云岩和沸石岩;等^[51-54]。

国内目前发现的热水沉积白云岩相对较少,仅有内蒙古狼山地区中上元古界^[55]、内蒙古中部白云鄂博地区中上元古界^[56]和酒西盆地下白垩统下沟组^[44-45,57-59]以及新疆三塘湖盆地二叠系芦苇沟组^[46,49]有发现。内蒙古的两例热水沉积^[60]白云岩主要为铁白云岩,伴生的热水沉积岩为钠长石岩,绿泥石岩,电气石岩,其厚度很薄,一般仅几米,分布也非常局限,一般在几平方千米,它们常形成一些热水沉积矿床,与本文发现的热水沉积白云岩有一些差异。

目前国内外对热水沉积研究程度较低,对热水沉积的概念有了初步定义,但对其过程和沉积机理认识不够,缺乏对热水沉积的成熟分类方案和沉积模式。

2 热水沉积白云岩的成分特征

本次研究中对取心段中的白云岩段进行了随机采样制作普通岩石薄片,然后对相应薄片中的沸石内碎屑和白云石进行电子探针和能谱分析,余下的部分进行全岩 X 衍射和常量与微量元素分析,这样以保证分析结果具有可对比性。

首先,根据对这套热水沉积白云岩的岩心与薄片观察,岩石在岩心上表现为灰色—深灰白云岩,厚 $30\sim 50\text{ cm}$,其上下均为深灰—灰黑色泥岩,自下而上一级构成深灰色泥岩—深灰色沸石质白云质泥岩—泥质沸石质白云岩—泥质白云岩—深灰色泥岩沉积序列。这类白云岩中夹一些灰白色纹层和条带以及呈星散状分布的灰白色砂砾级碎屑颗粒,薄片分析发现岩石主体为泥晶—粉晶白云岩,白云石晶体细小,糙面显著,突起极高,染色为浅灰蓝—不染色,高级白干涉色,能谱分析为白云石(图 2)。然而岩心中所看到的白色条带和纹层以及星散状分布的白色砂砾级碎屑却不是石膏,它们在单偏光下无色,低负突起,正交偏光下为一级灰干涉色,部分为全消光的均质体,晶形呈粒状、长柱状和板柱状,为钠沸石矿物的特征(图 3)。

通过对 7 口井的 42 块薄片观察均未发现“石膏”类矿物,于是我们怀疑早期“膏质白云岩”的结论。因此,我们对 42 块薄片下观察到的白色纹层条带及砂砾碎屑进行了电子探针和能谱分析,其成分为铝硅酸盐,能谱图显示为钠沸石和方沸石,而不是石膏。同时,又对锡 3—69 井和锡 31 井两口井 35 个含白色纹层和砂砾碎屑样品进行了全岩 X 衍射分析,其结果发现,岩石由白云石、粘土矿物,长石和沸石矿物组成,含少量石英和黄铁矿,不含任何石膏和硬石膏矿物(表 1)。因此,综合岩石薄片,全岩 X 衍射和能谱分析结果,我们彻底否定了这套岩石属蒸发环境下“膏质白云岩”的这一结论。综合岩石薄片、能谱分析、全岩 X 衍射分析等多种手段认为,这套白云岩层系在矿物组成上,主要是铁白云石(含量在 $25\%\sim 75\%$,含 Fe 量为 $0.5\%\sim 5\%$)、粘土矿物($15\%\sim 60\%$)、沸石($10\%\sim 40\%$)、泥级钾长石($5\%\sim 20\%$)和斜长石($15\%\sim 30\%$),其次含少量石英、黄铁矿、水镁铁石、重晶石,沸石—水镁铁石—重晶石是较典型的低温热液矿物组合。而白云石晶体粗大一点的在显微镜下可以见到其裂纹发育,波状消光,晶面不直,具明显的鞍状特征。

从表 1 可以得到这套白云岩系地层的岩石矿物组

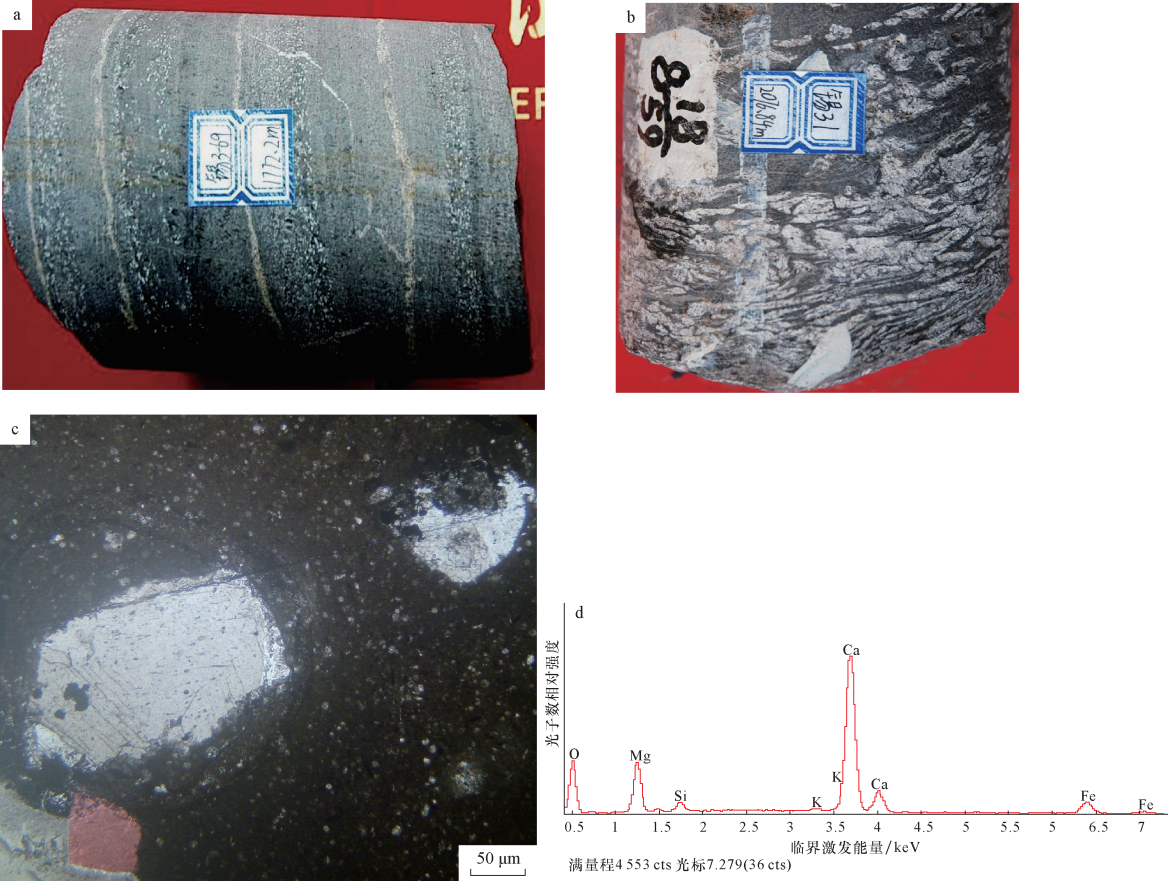


图2 热水沉积白云岩的岩心与镜下及能谱特征

Fig. 2 Core, microscopic and energy spectrum characteristics of hydrothermal sedimentary dolostones

a, b. 热水沉积白云岩岩心照片; c. 热水沉积白云岩镜下薄片特征; d. 热水沉积白云石能谱图

合有以下几种:白云石-斜长石组合-钾长石、白云石-斜长石-钾长石-方沸石组合、白云石-斜长石-菱铁矿-钾长石组合、白云石-斜长石-钾长石-黄铁矿组合。白云石属于碳酸盐矿物,斜长石与钾长石及沸石均属于铝硅酸盐矿物,加之部分样品中存在的重晶石、水镁铁石,这类组合是较典型的与低温热液有关的矿物。

3 热水沉积白云岩的结构及构造特征

在岩石结构上,具备两种结构,一种是粒度较细的泥质结构和泥粉晶结构,另一种为内碎屑结构,即在前者的泥质或泥粉晶结构中呈散状分布一些白色内碎屑颗粒,这些颗粒的矿物成分主要为方沸石和钠沸石,有时为沸石与白云石的共生体,粒径在2~30 mm,大的可达50 mm(图2)。暗色部分为暗色泥岩。在岩石构造上,发育若干较清楚的从薄片下的毫米级到岩心规模的厘米级(大多为3~5 cm厚)沸石纹层及条带(形成沸石岩),这些纹层和条带具有同生变形层理和揉皱构造,角砾构造、网脉构造(图2),角砾和前述内碎屑的成分相同,为沸石岩角砾,即沸石纹层破坏形成。

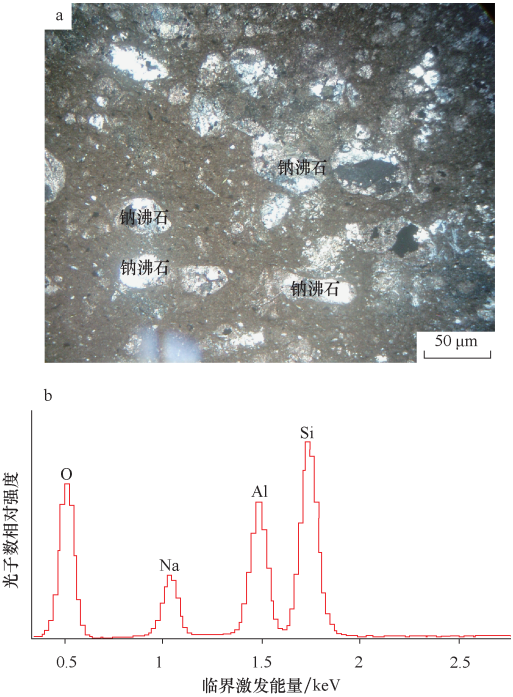


图3 热水沉积白云岩中白色沸石颗粒的镜下及能谱特征

Fig. 3 Microscopic and energy spectrum characteristics of

white zeolite grains in hydrothermal dolomite

a. 热水沉积白云岩中的沸石镜下特征;

b. 热水沉积白云岩中钠沸石的能谱图

表 1 热水沉积白云岩全岩 X-衍射分析的矿物成分
Table 1 Mineral composition of hydrothermal dolostones from X-ray diffraction

井号	编号	深度/m	矿物成分含量/%					
			钾长石	斜长石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	方沸石
锡 3-69	1	1 767.85	7.4	28.3	64.3			
	2	1 770.57	9.1	16.9	63.9			10.1
	3	1 774.84	9.1	20.6	70.3			
	4	1 776.02	18	16.7	51.9		13.3	
	5	1 777.83	18.3	29.1	47.3		5.4	
	6	1 781.66	15	46.1	38.8			
	7	1 786.08	12.3	26	47.9	8.7		5.1
	8	1 788.57	15.9	34.3	41.1		2.6	6.1
	9	1 793.15	15	35.9	29.1	14.9	2.2	2.8
	10	1 796.07	7.7	25.2	43	10.6	1.7	11.8
	11	1 803.08	10.4	36.5	32.3		1.7	19.1
	12	1 806.03	9.4	38.1	30.5	5.8		16.1
	13	1 811.66	4.5	25.6	69.9			
	14	1 815.32	11.6	30.7	56.5			1.2
	15	1 820.38	13.5	25.5	49.7	2.9		8.4
	16	1 825.14	8.7	15.3	45.3		5.8	24.9
	17	1 828.35	39.5	15.6	39.4	5.5		

4 热水沉积白云岩的微量元素及放射性特征

通过放射性测井发现,在测井曲线上,下白垩统腾格尔组这套白云岩显示出异常高的自然伽马($GR = 700 \sim 1\,100$ API),为正常白云岩的几十~几百倍,是泥岩伽马值的 2~4 倍,放射性元素测井表明其铀(U)含量高达 $40 \sim 60 \times 10^{-6}$,钍(Th)高达 $60 \sim 100 \times 10^{-6}$ (图 4)。在稀土元素组成与分布上,对 4 口井的 74 个样品的常量与微量元素分析表明,所有样品的 Fe, Mn, Cu, Ni, Co 等元素的组成和分布都落入 Bostrom 等人 1979 年提出的区分正常沉积与热水沉

积的三角形图版中的热水沉积区,且与现代红海海底热水沉积很接近(图 5)。

另外,在空间分布上,根据钻井资料的纵横向对比和地震属性分析发现,这套热水沉积白云岩沿盆地基底断裂呈条带状分布,远离断层的井一般不发育这套白云岩或很薄,不具环带状分布特点。

因此,综合这套白云岩系的矿物组合、岩石结构与构造、微量元素、放射性异常、与沸石岩纹层共生关系、空间上沿断裂分布等特点初步认为这是一套“热水沉积岩”,有人也叫“喷流岩”,准确地说应该叫“白烟囱”型热水沉积岩^[32-33,61-62],它是由深部热液涌出后与湖水混合后形成的。

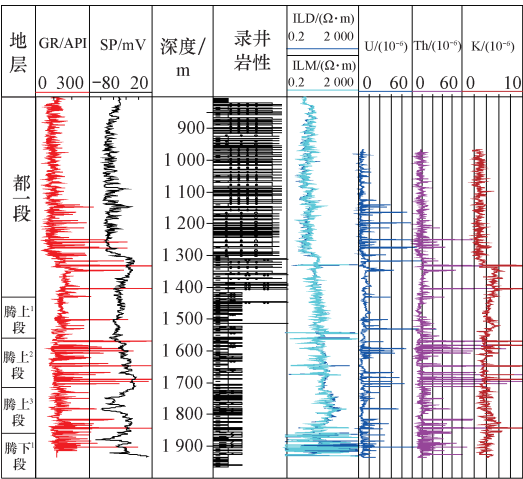


图 4 锡 37 井热水沉积白云岩的放射性测井特征
Fig. 4 Radioactive logging characteristics of hydrothermal dolostones in Well Xi37

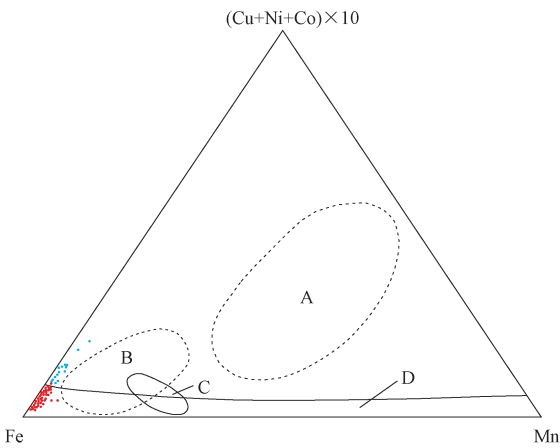


图 5 热水沉积岩的 Fe-Mn-(Cu+Ni+Co) × 10 三角图
Fig. 5 Fe-Mn-(Cu+Ni+Co) × 10-ternary diagram of hydrothermal dolostones
A. 水成沉积区; B. 红海热水沉积区;
C. 东太平洋中脊沉积区; D. 热水沉积物区

5 热水沉积白云岩研究的地质与矿产意义

首先,本次研究的这一发现的理论意义表现在对岩石成因的再认识。因为这类岩石既不是单纯的岩浆热液成因也不是单纯的冷水化学沉积成因。它是可能属于地下热液与冷水混合共同作用成因,既有热液成因的一面也有冷水化学沉积成因的一面。应该属于岩浆岩与沉积岩之间的过渡类型。目前对这类岩石的成因研究较少,报道也较少,国内也仅发现少数几例(详见前面研究现状部分)。这对于沉积学、岩石学和岩理学的研究来说具有非常重要的理论意义,它将丰富我们的沉积学理论和岩石成因理论。

因此,该研究的理论意义在于:①丰富和完善现有的沉积学理论。热水沉积岩的发现使早期建立的正常湖水或海水中的化学沉积理论受到了冲击,需要补充和完善,热水沉积岩的发现在正常化学沉积岩与岩浆岩之间建立了一座桥梁。本人认为热水沉积岩实际上是介于正常化学沉积岩与岩浆岩之间的一种过渡类型。当喷出的热液很少时,对正常的沉积过程影响不大,形成热水矿物较少,基本上还是形成正常化学沉积岩和正常碎屑沉积岩,随着地下岩浆喷溢规模的加大,热液带出的物质增多,热液与湖水/海水混合后便出现热水化学沉积,形成热水化学沉积岩,如果存在陆源碎屑如粘土矿物、陆源石英与长石,便形成陆源碎屑与正常海湖水及热水的混合沉积,形成更复杂的岩石类型。当大规模岩浆热液喷出进入海底/湖底时将形成水下的岩浆熔岩,如海底玄武岩。②这一研究的第二个理论意义在于丰富和完善现有的白云岩成因理论。目前关于白云岩的成因有潮坪环境蒸发泵和渗透回流准同生白云岩、海水-淡水混合白云岩、埋藏交代白云岩等等^[63-64],这些都是常温常压下形成的白云岩;与热液有关的白云岩是热液交代灰岩形成的白云岩,而本次研究的白云岩则是热液与海湖水混合形成的,其形成机理均不同于上述几种,对这种白云岩成因的研究有助于扩大我们关于对白云岩成因的视野,丰富和完善现有的白云岩成因理论。

其次,该研究具有非常重要的矿产意义:①可以帮助我们许多热水沉积矿床如铅锌矿、闪锌矿等稀有金属矿床的成因与分布进行更深入的了解,帮助我们有效地寻找各种热水沉积矿床;②许多热水矿床在工业上是一些很好的原料,具有广泛的工业用途,如沸石矿物是一种很好的分子筛和净水剂与去污剂;③这类热水沉积岩在后期受到溶蚀改造可以形成大量孔洞,富存大量石油和天然气,形成大型油气藏,通过此项研

究可以帮助我们找到大量的油气(本文研究的就是这种情况);④我国东海沿海由于太平洋板块的俯冲作用,造成岩浆热液上涌,具备形成各种海底热水沉积矿床的条件,在目前海域激烈争夺的今天开展对这类热水沉积的研究,对于我国海底热水沉积矿床资源的勘探与开发和利用,具有十分重要的战略意义和实际意义。

6 “白烟型”热水沉积白云岩研究中存在的问题

虽然目前国内外对热水沉积白云岩的产出状态、厚度、矿物组合、岩石结构、构造、白云石的C、O同位素和稀土元素等进行了较详细的研究,取得了许多较好的成果^[65-70]。但是由于这类沉积与正常沉积岩相比毕竟所占的比例极少(当然也还有一些没有认识到或没有被发现),因此对其的研究程度还不深,对其认识还很肤浅,对热水白云石的沉积机理还不清楚,研究还不系统,还存在许多问题需要去解决,比如:①研究区铁白云石-水镁铁石-沸石-重晶石矿物组合代表一种什么热液性质?水镁铁石的存在是否代表这种热液富 Mg^{2+} ?②这种热液与湖/海水混合时是否直接形成白云石?如果是,这是否算原生白云石?如果不是,那么其间经历了一个什么中间环节?是不是像准同生环境一样经历一个交代过程?③这类白云岩中的白云石有哪些特征?与正常的湖泊或潮坪准同生及后生交代白云石如何区别?与热液交代围岩中的灰岩形成的热液交代白云石又有什么异同?其晶体形态、C、O、Sr同位素、稀土元素、有序度如何?④一次深部热液过程中随着温度的降低,热液性质的变化,从喷流~溢流过程中,在纵向上将会形成如何的热水沉积岩性序列,这种序列规模(厚度)有多大?⑤不同性质的热液将会形成哪些矿物组合类型?形成哪些岩石类型?⑥能否归纳出一种或几种热水白云岩形成模式等,这些都将需要进一步研究。

7 结论

1) 综合这套白云岩系的矿物组合、岩石结构与构造、微量元素、放射性异常、与沸石岩纹层共生关系、空间上沿断裂分布等特点初步认为这是一套“热水沉积白云岩”,或“喷流岩”,它是由深部热液涌出后与湖水混合后形成的。

2) 热水沉积白云岩的研究无论是在沉积学理论上还是在矿产资源的寻找与勘查方面都具有十分重要的意义,它既可以丰富和完善我们现有的沉积学尤其

是白云岩成因理论,也可以帮助我们寻找到更多的金属与非金属矿产。

3) 热水沉积是介于岩浆作用与沉积作用之间的一种地质过程,目前在这一领域的研究程度较低,其中还有许多问题没有搞清楚,比如热水沉积的化学过程、化学动力学条件、热水沉积规律与模式等等,这些都需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Scott S D. Minerals on land, minerals in the sea[J]. *Geotims*, 2002, 47: 797 – 935.
- [2] Scott S D. Submarine hydrothermal systems and deposits[M]. New York: Wiley, 1997: 797 – 935.
- [3] Fouquet Y. Where are the large hydrothermal sulphide deposit in the oceans? [J]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 211 – 224.
- [4] Hekinian R. Petrology of ocean floors [M]. Amsterdam: Elsevier, 1982: 1 – 382.
- [5] Edmond J M, Von Damm K L, McDuff R E. Chemistry of hot spring on the East Pacific Rise and their effluent dispersal [J]. *Nature*, 1982, 279(5863): 187 – 191.
- [6] Edmond. The hot spring on the ocean floors [J]. *Science*, 1983, 8: 37 – 50.
- [7] Rona P A. Hydrothermal processes at seafloor spreading centers[M]. New York: Plenum Press, 1983.
- [8] Rona P A. Mineral deposits from seafloor hot spring [J]. *Scientific American*, 1986, 254: 84 – 92.
- [9] Rona P A. Hydrothermal mineralization at oceanic ridges [J]. *The Canadian Mineralogist-Seafloor Hydrothermal Mineralization*, 1988, 26(3): 431 – 466.
- [10] Rona P A, Scott S D. A special issue of seafloor hydrothermal mineralization; new perspective [J]. *Economic Geology*, 1993, 88(8): 1935 – 2078.
- [11] Rona P A. Marine minerals for the 21st century [J]. *Episodes*, 2002, 25: 2 – 12.
- [12] Russell M J. Major sediment-host exhalative zinc-lead deposits: Formation from hydrothermal convection cells that deepen during crustal extension [M]. Canada: Victoria, 1983.
- [13] Russell M J. The generation at hot springs of sedimentary ore deposits, microbialites and life [J]. *Ore Geology Reviews*, 1996, 10(3 – 6): 199 – 214.
- [14] Zierenberg R A, Fouquet Y, Miller D J, et al. The deep structure of a seafloor hydrothermal deposit [J]. *Nature*, 1998, 392: 485 – 488.
- [15] Ronde C R J, Stoffers P. Discovery of active hydrothermal venting in Lake Taupo, New Zealand [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2002, 115(3 – 4): 257 – 275.
- [16] Halbach R M, Halbach P. Sulfide-impregnated and pure silica precipitates of hydrothermal origin from the central Indian Ocean [J]. *Chemical Geology*, 2002, 182(2 – 4): 357 – 375.
- [17] Schardt C, Yang J, Large R. Formation of massive sulfide ore deposits on the seafloor: Constraints from numerical heat and fluid flow modeling [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2003, 78 – 79: 257 – 259.
- [18] Reyes A G, Massoth G, Ronde, et al. Hydrothermal mineralization in arc-type submarine volcanoes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(18): A528.
- [19] Al-Ausm I S, Lonnée J S, Clarke J. Multiple fluid flow events and the formation of saddle dolomite; case studies from the Middle Devonian of the Western Canada Sedimentary Basin [J]. *Marine Petroleum Geology*, 2003, 19: 209 – 217.
- [20] Al-Ausm I S. Origin and characterization of hydrothermal dolomite in the Western Canada Sedimentary Basin [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2002, 78 – 79: 9 – 15.
- [21] Boni M, Parente G. Hydrothermal dolomites in SW Sardinia (Italy): Evidence for a widespread late-Variscan fluid flow event [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 131: 181 – 200.
- [22] Boni M, Iannace A, Beechstädt T, et al. Hydrothermal dolomites in SW Sardinia (Italy) and Cantabria (NW Spain): evidence for late to Post-Variscan widespread fluid-flow events [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69 – 70: 225 – 228.
- [23] Stoffers P, Botz R. Formation of hydrothermal carbonate in Lake Tanganyika, East Central Africa [J]. *Chemical Geology*, 1994, 115(1 – 2): 117 – 122.
- [24] Miloje Ilich. Hydrothermal-Sedimentary dolomite: the Missing Link? [J]. *AAPG Bulletin*, 1974, 58(7): 1331 – 1347.
- [25] Tiercelin J J, Pflumio C, Castrec M. Hydrothermal vents in Lake Tanganyika, East African rift system [J]. *Geology*, 1993, 21(6): 499 – 500.
- [26] Crane K. Hydrothermal vents in Lake Baikal [J]. *Nature*, 1991, 350: 281.
- [27] Renaut R W, Jones B. Sublacustrine precipitation of hydrothermal silica in rift lakes: Evidence from Lake Baringo, central Kenya Rift Valley [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 148(1 – 2): 235 – 257.
- [28] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学·第一卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 70 – 128.
- [29] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学·第二卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 131 – 168.
- [30] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学·第三卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 157 – 196.
- [31] 涂光炽. 我国南方几个特殊的热液沉积矿床: 中国矿床学 [C] // 纪念谢家荣诞辰 90 周年文集. 北京: 学术期刊出版社, 1989: 197.
- [32] 涂光炽. Several special hydrothermal sedimentary deposits of southern China-Ore deposit of China [C] // Commemorate Xie Jiarong 90th anniversary anthology. Beijing: Academic Periodicals Publisher, 1989: 197.
- [33] 陈先沛, 高计元, 陈多福, 等. 热水沉积作用的概念和几个岩石学标志 [J]. *沉积学报*, 1987, 10(3): 124 – 131.
- [34] Chen Xianpei, Gao Jiuyuan, Chen Duofu, et al. The concept of hydrothermal sedimentation and its petrological criteria [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1987, 10(3): 124 – 131.
- [35] 陈先沛. 热水沉积成岩成矿作用的研究进展 [J]. *岩石矿物地球*

- 化学通讯,1988,1(12):102-104.
- Chen Xianpei. Advances of diagenesis and mineralization of hydrothermal deposits[J]. *Petromineral Geochemistry Bulletin*,1988,1(12):102-104.
- [34] 陈多福,陈先沛. 热水沉积作用与成矿效应[J]. *地质地球化学*,1997,4(4):7-12.
- Chen Duofu, Chen Xianpei. Hydrothermal sedimentation and mineralization effect[J]. *Geology-Geochemistry*,1997,4(4):7-12.
- [35] 李朝阳,王京彬,肖荣阁,等. 滇西地区陆相热水沉积成矿作用[J]. *铀矿地质*,1993,9(1):14-22.
- Li Chaoyang, Wang Jingbin, Xiao Rongge, et al. Metallogenesis of continental hydrothermal sedimentation in western Yunnan region[J]. *Uranium Geology*,1993,9(1):14-22.
- [36] 王江海,颜文. 陆相热水沉积作用—以云南地区为例[M]. 北京:地质出版社,1998.
- Wang Jianghai, Yan Wen. Continental hydrothermal sedimentation in Yunnan[M]. Beijing:Geology Publishing House,1998.
- [37] 薛春纪,姬金生,张连昌,等. 北祁连镜铁山海底喷流沉积铁铜矿床[J]. *矿床地质*,1997,16(1):21-30.
- Xue Chunji, Ji Jinshen, Zhang Lianchang, et al. The Jingtieshan submarine exhalative-sedimentary iron-copper deposit in North Qilian mountain[J]. *Mineral Deposits*,1997,16(1):21-30.
- [38] 薛春纪,祁思敬,郑明华,等. 热水沉积研究及相关科学问题[J]. *矿物岩石地球化学通报*,2000,19(3):155-163.
- Xue Chunji, Qi Sijing, Zheng Minghua, et al. Hydrothermal sediment research and associated scientific problems[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*,2000,19(3):155-163.
- [39] 薛春纪,刘淑文,冯永忠,等. 南秦岭旬阳盆地地下古生界热水沉积成矿地球化学[J]. *地质通报*,2005,24(10-11):927-934.
- Xue Chunji, Liu Shuwen, Feng Yongzhong, et al. Geochemistry of hydrothermal sedimentary South Qinling, China[J]. *Geological Bulletin of China*,2005,24(10-11):927-934.
- [40] 薛春纪,刘淑文,王涛,等. 南秦岭下古生界铅锌矿床成矿环境[M]. 北京:科学出版社,2004.
- Xue Chunji, Liu Shuwen, Wang Tao, et al. Metallogenesis condition of lead and zinc deposits of Lower Palaeozoic in South Qinling[M]. Beijing:Science Press,2004.
- [41] 李江海,冯军,牛向龙,等. 华北中元古代硫化物黑烟囱发现的初步报道[J]. *岩石学报*,2003,19(1):167-168.
- Li Jianghai, Feng Jun, Niu Xianglong, et al. The preliminary report on the discovery of black smoker chimney within Mesoproterozoic sulphide deposit of North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*,2003,19(1):167-168.
- [42] 李江海,牛向龙,冯军. 海底黑烟囱的识别研究及其科学意义[J]. *地球科学进展*,2004,19(1):17-24.
- Li Jianghai, Niu Xianglong, Feng Jun. The identification of the seafloor black smoker chimney and its implication for scientific research[J]. *Advance in Earth Sciences*,2004,19(1):17-24.
- [43] 李江海,初凤友,牛向龙,等. 河北兴隆中元古代硫化物黑烟囱群发现及其地质成因[J]. *自然科学进展*,2005,15(2):179-191.
- Li Jianghai, Chu Fengyou, Niu Xianglong, et al. Discovery and geologic origin of Mesoproterozoic sulphide "Black Smoke" groups in Xinglong, Hebei[J]. *Progress in Natural Science*,2005,15(2):179-191.
- [44] 郑荣才,王成善,朱利东,等. 酒西盆地首例湖相“白烟型”喷流岩—热水沉积白云岩的发现及其意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*,2003,30(1):1-7.
- Zheng Rongcai, Wang Chengshan, Zhu Lidong, et al. Discovery of the first example of "White Smoke Type" of exhalative rock (hydrothermal sedimentary dolostone) in Jiuxi Basin and its significance[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*,2003,30(1):1-7.
- [45] 郑荣才,文华国,范铭涛,等. 酒西盆地地下沟组湖相白烟型喷流岩石学特征[J]. *岩石学报*,2006,22(12):3028-3038.
- Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Fan Mingtao, et al. Lithological characteristics of sublacustrine white smoke type exhalative rock of the Xiaogou Formation in Jiuxi Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*,2006,22(12):3028-3038.
- [46] 柳益群,李红,朱玉双,等. 白云岩成因探讨:新疆三塘湖盆地发现二叠系湖相喷流型热水白云岩[J]. *沉积学报*,2010,28(5):861-867.
- Liu Yiqun, Li Hong, Zhu Yushuang, et al. Permian lacustrine eruptive hydrothermal dolomites, Santanghu Basin, Xinjiang Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2010,28(5):861-867.
- [47] 柳益群,周鼎武,焦鑫,等. 一类新型沉积岩:地幔热液喷积岩—以中国新疆三塘湖地区为例[J]. *沉积学报*,2013,31(5):773-781.
- Liu Yiqun, Zhou Dingwu, Jiao Xin, et al. A new type of sedimentary rocks: Mantle-originated hydroclastites and hydrothermal exhalites, Santanghu Area, Xinjiang, NW of China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2013,31(5):773-781.
- [48] 李红,柳益群,朱玉双. 新疆三塘湖盆地二叠系湖相白云岩形成机理初探[J]. *沉积学报*,2007,25(1):75-81.
- Li Hong, Liu Yiqun, Zhu Yushuang. Primary study on the origin of lacustrine dolostones of Permian Santanghu Basin, Xinjiang[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2007,25(1):75-81.
- [49] 李红,柳益群,梁浩,等. 三塘湖盆地二叠系陆相热水沉积方沸石岩特征及成因分析[J]. *沉积学报*,2012,30(2):205-218.
- Li Hong, Liu Yiqun, Liang Hao, et al. Lithology and origin analysis of sublacustrine hydrothermal deposits characterized by analcime, sanidine, dolomite, quartz, etc. in Lucaogou Formation, Middle Permian, Santanghu Basin, Northeast Xinjiang, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2012,30(2):205-218.
- [50] 李红,柳益群. “白云石(岩)问题”与湖相白云岩研究[J]. *沉积学报*,2013,31(2):302-314.
- Li Hong, Liu Yiqun. "Dolomite problem" and research of ancient lacustrine dolostones[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2013,31(2):302-314.
- [51] 夏菲,马东升,潘家永,等. 贵州天柱大河边和玉屏重晶石矿床热水沉积成因的锶同位素证据[J]. *科学通报*,2004,49(24):2592-2595.
- Xia Fei, Ma Dongsheng, Pan Jiayong, et al. The strontium isotope evidence of hydrothermal barite in Yuping and Dahebian of Tianzhu, Guizhou[J]. *Chinese Science Bulletin*,2004,49(24):2592-2595.
- [52] 夏学惠. 辽东地区硫铁矿床中电气石岩热水沉积剖面结构序列[J]. *岩石学报*,1997,13(2):215-226.
- Xia Xuehui. Occurring order of tourmaline rocks associated with pyrite deposits in east Liaoning: An indicator of hot-water deposition at seafloor[J]. *Acta Petrologica Sinica*,1997,13(2):215-226.
- [53] 杨海生,周永章,杨志军,等. 华南热水成因硅质岩建造的稀土元

- 素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1): 61 – 64.
- Yang Haisheng, Zhou Yongzhang, Yang Zhijun, et al. REE geochemical characteristics of hydrothermal cherts from south China[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2003, 22(1): 61 – 64.
- [54] 杨海生, 周永章, 杨志军, 等. 热水沉积硅质岩地球化学特征及意义 – 以华南地区为例[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(6): 111 – 115.
- Yang Haisheng, Zhou Yongzhang, Yang Zhijun, et al. Geochemical characteristics and significance of hydrothermal Cherts – A case study of south China[J]. Journal of Sun Yatsen University (Natural Science Edition), 2003, 42(6): 111 – 115.
- [55] 王思源, 王海明. 狼山造山带喷溢成矿研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 104 – 113.
- Wang Siyuan, Wang Haiming. Analysis of effusion metallogenesis in Langshan Foldbelt [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993: 104 – 113.
- [56] 杨子元. 论白云鄂博矿床含矿围岩 – 白云岩的热水沉积成因[J]. 地质找矿论丛, 1994, 9(1): 39 – 48.
- Yang Ziyuan. On the hot-water sedimentary origin of dolomite – host rock of Bayan Obo deposits Inner Mongolia, China[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1994, 9(1): 39 – 48.
- [57] 罗平, 杨式升, 马龙, 等. 酒西坳陷青西坳陷湖相纹层状泥质白云岩中泥级斜长石成因、特征与油气勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 32 – 33.
- Luo Ping, Yang Shisheng, Ma Long, et al. Origin, feature and its significance to the petroleum exploration of the clay-size plagioclase in lacustrine laminated argillaceous dolomite, Qingxi depression in Jiuxi basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(6): 32 – 33.
- [58] 罗平, 杨式升, 苏丽萍. 酒西盆地湖相纹层状泥质白云岩储层的形成条件与特征[C]//油气储层重点实验室论文集. 北京: 石油工业出版社, 2002: 32 – 44.
- Luo Ping, Yang Shisheng, Su Liping. Formation conditions and characteristic of lacustrine laminated argillaceous dolomite reservoir in Jiuxi Basin Key Laboratory of [C]//Oil & Gas Reservoir Memoir. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002, 32 – 44.
- [59] 文华国. 酒泉盆地青西凹陷湖相“白烟型”热水沉积岩地质地球化学特征及成因[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- Wen Huaguo. Geochemical characteristics and genesis of lacustrine “White Smoke Type” hydrothermal sedimentary rock in Qingxi Sag, Jiuxi Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [60] 郭强, 钟大康, 张放东, 等. 内蒙古二连盆地白音查干凹陷下白垩统湖相白云岩成因[J]. 古地理学报[J]. 2012, 14(1): 59 – 68.
- Gun Qiang, Zhong Dakang, Zhang Fangdong, et al. Origin of the Lower Cretaceous lacustrine dolostones in Baiyinchagan Sag of Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 59 – 68.
- [61] Miloje Ilich. Hydrothermal-sedimentary dolomite: the missing link? [J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(7): 1331 – 1347.
- [62] 焦鑫, 柳益群, 周鼎武, 等. “白烟型”热液喷流岩研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(2): 221 – 231.
- Jiao Xin, Liu Yiqun, Zhou Dingwu, et al. Progress of research on “White Smoke Type” exhalative hydrothermal rocks[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(2): 221 – 232.
- [63] 冯增昭. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- Feng Zengzhao. Sedimentary petrology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.
- [64] 梅冥相. 从3个科学理念简论沉积学中的白云岩问题[J]. 古地理学报, 2012, 14(1): 1 – 12.
- Mei Mingxiang. Brief introduction of “dolostone problem” in sedimentology according to three scientific ideas [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 1 – 12.
- [65] 胡作维, 黄思静, 李志明, 等. 白云石方解石氧同位素温度计在川东北地区飞仙关组白云岩成因研究中的尝试[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(1): 1 – 9.
- Hu Zuowei, Huang Sijing, Li Zhiming, et al. Preliminary application of the dolomite-calcite oxygen isotope thermometer in studying the origin of dolomite in Feixianguan Formation, Northeast Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2012, 39(1): 1 – 9.
- [66] 黄思静, 李小宁, 黄可可, 等. 四川盆地西部栖霞组热液白云岩中的自生非碳酸盐矿物[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(4): 343 – 352.
- Huang Sijing, Li Xiaoning, Huang Keke, et al. Authgenic noncarbonate minerals in hydrothermal dolomite of Middle Permian Qixia Formation in the west of Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2012, 39(4): 343 – 352.
- [67] 刘铁庚, 张正伟, 叶霖, 等. 白云鄂博白云岩地质地球化学特征及成因讨论[J]. 地质学报, 2012, 86(5): 723 – 734.
- Liu Tiegeng, Zhang Zhengwei, Ye Lin, et al. Geological and geochemical characteristics and genesis of “Dolomite” at Bayan Obo, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(5): 723 – 734.
- [68] 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩稀土元素地球化学特征[J]. 吉林大学学报(自然科学版), 2012, 42(增刊): 53 – 61.
- Su Zhongtang, Chen Hongde, Xu Fenyan, et al. REE characters of the Majiagou dolomites in Ordos Basin [J]. Journal of Jilin University (Natural Science Edition), 2012, 42(S): 53 – 61.
- [69] 王珏, 刘金海, 陈云名. 黔北桑木场背斜灯影组热液白云岩稀土元素地球化学特征[J]. 贵州地质, 2013, 30(2): 132 – 146.
- Wang Jue, Liu Jinhai, Chen Yunming. REE geochemical characters of hydrothermal dolomite of Dengying Formation of Sangmuchang Anticline in North Guizhou [J]. Guizhou Geology, 2013, 30(2): 132 – 146.
- [70] 时国, 田景春, 张翔, 等. 南华北盆地上寒武统白云岩岩石学与地球化学特征及其成因探讨[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(2): 168 – 174.
- Shi Guo, Tian Jingchun, Zhang Xiang, et al. Petrographic and geochemistry characteristics of the Upper Cambrian dolomites and dolomitization mechanism in Southern North China Basin [J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition), 2013, 36(2): 168 – 174.

(编辑 张亚雄)