

文章编号: 1009-3850(2015)01-0068-08

羌塘盆地双湖地区曲色组冷泉碳酸盐岩及其地质意义

夏国清¹, 伊海生^{1,2}

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 油气藏地质与勘探开发国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 羌塘盆地南部双湖地区曲色组地层发育大量碳酸盐岩结核, 这些结核多呈丘状、椭球状、透镜状、似层状、脉状、树枝状产出。其物质组分主要为泥微晶碳酸盐矿物, 少量粘土矿物、石英及草莓状、半自形黄铁矿等。草莓状黄铁矿平均粒径在 $5.0\mu\text{m}$ 左右, 内部可见葵花状构造。发育凝块状、气孔状和渗漏孔等特殊构造。产双壳类、菊石类、蠕虫状或树枝状生物及超微生物化石, 生物密度极高。碳同位素明显负偏, 硫同位素则明显正偏, 其特征与现代海底天然气水合物的渗漏、释放所形成的冷泉碳酸盐岩机理一致, 因而推测为古代海底天然气渗漏喷发形成。大量海底天然气泉口的存在, 可能表明羌塘盆地双湖地区早侏罗世大洋缺氧事件与海底天然气水合物喷发存在极大关联。

关键词: 羌塘盆地; 双湖地区; 碳酸盐岩结核; 同位素; 大洋缺氧事件

中图分类号: P588.24⁺5

文献标识码: A

羌塘盆地双湖地区广泛发育有早侏罗世土阿辛期(Toarcian)曲色组黑色岩系, 这些黑色页岩多以极薄层叶片状产出, 具典型微细纹层理, 单层厚度在数十厘米至数十米不等, 局部夹薄层状粉砂岩、泥灰岩层。其有机质含量较高(最高可达26.1%), 底栖生物缺乏, 盛产菊石类、双壳类、腕足类生物化石群落及颗石藻超微化石, 被认为是欧洲广泛出现的土阿辛期大洋缺氧事件在东特提斯洋的响应^[1-3], 该期缺氧事件主要由海平面上升、高生产率及颗石藻大勃发等因素产生。在后续的野外调查中, 我们同时注意到在该套黑色岩系中发育有大量的碳酸盐岩结核。通过对这些结核的野外地质构

造、物质成分、微观组构及碳、氧同位素特征的研究, 发现这些碳酸盐结核内部含有大量气孔状及渗漏孔通道。碳同位素表现出明显负偏, 硫同位素则明显正偏, 其特征与现代海底天然气水合物的渗漏、释放所形成的冷泉碳酸盐岩机理一致, 进而认为是早侏罗世海底天然气水合物渗漏所形成的冷泉碳酸盐结核, 可能暗示了侏罗纪早期大洋缺氧事件与海底天然气水合物喷发有关。本文对双湖地区毕洛错、甘贝夏玛、索布查等多处出露的下侏罗统曲色组碳酸盐岩结核的野外产状、岩石结构及碳、氧、硫稳定同位素特征进行了对比与研究, 讨论了结核成因机制, 并初步探讨了其与早侏罗世东特

收稿日期: 2014-08-30; 改回日期: 2014-09-30

作者简介:



夏国清, 男, 1982年生, 博士, 讲师。主要从事沉积学及青藏高原地质研究。主持或主研国家自然科学基金项目、国家专项等5项。近年来, 在《Chinese Science Bulletin》、《Oil Shale》、《SCIENCE CHINA Earth Sciences》等期刊上发表专业论文22篇(第一作者8篇, 含通讯作者1篇), 其中SCI检索论文3篇(第一作者1篇, 国际2篇, 含通讯作者2篇)

资助项目: 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室开放基金(zdsys2014002)和国家自然科学基金基金项目(41402099)

提斯域大洋缺氧事件的关系。

1 区域地质背景

羌塘盆地位于青藏高原中北部,南北宽 300km,东西长 640km,面积 $18.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地夹于冈底斯念青唐古拉板块与可可西里-巴颜喀拉板块之间,是在前古生界结晶基底和古生界褶皱基底之上发育起来的以中生界海相沉积为主的残留盆地。大地构造位置位于特提斯构造域东段,南北边界分别为班公湖-怒江缝合带和可可西里-金沙江缝合带。盆地内构造较为复杂,总体上具有两拗一隆的构造格架,即北羌塘拗陷、南羌塘拗陷和中央隆起带。羌塘盆地南部双湖地区主要发育侏罗系、少量上三叠统和第三系地层。侏罗系自下而上分为下侏罗统曲色组(J_1q)、中侏罗统色哇组(J_2s)、莎巧木组(J_2sq)、布曲组(J_2b)、夏里组(J_2x)、上侏罗

统索瓦组(J_3s)。

冷泉碳酸盐岩结核主要产于南羌塘拗陷南部双湖地区曲色组地层中,该套地层地表出露广泛,近东西向展布。在毕洛错南东加塞扫莎、昂达尔错南甘贝夏玛、昂权、其香错北松可尔、索布查等地均广泛出露(图1),东西线长度超过 150km,向东可继续追索至安多,岩性为深灰-黑色泥页岩为主夹灰岩。毕洛错地区岩性特殊,主要为深褐色、黄褐色油页岩。产菊石类、双壳类和颗石藻类化石。根据前人的资料,该套地层时代为早侏罗世 Toarcian 期^[1,4-5,11-13],其下和其上分别与上三叠统一下侏罗统索布查组和中侏罗统色哇组均呈整合接触(西藏 1/25 万《昂达尔错幅》区域地质调查报告,吉林省地质调查院,2006)。该套地层中,在毕洛错油页岩剖面中下部、甘贝夏玛剖面中部、松可尔剖面中部、索布查剖面中部均有大量碳酸盐结核分布。

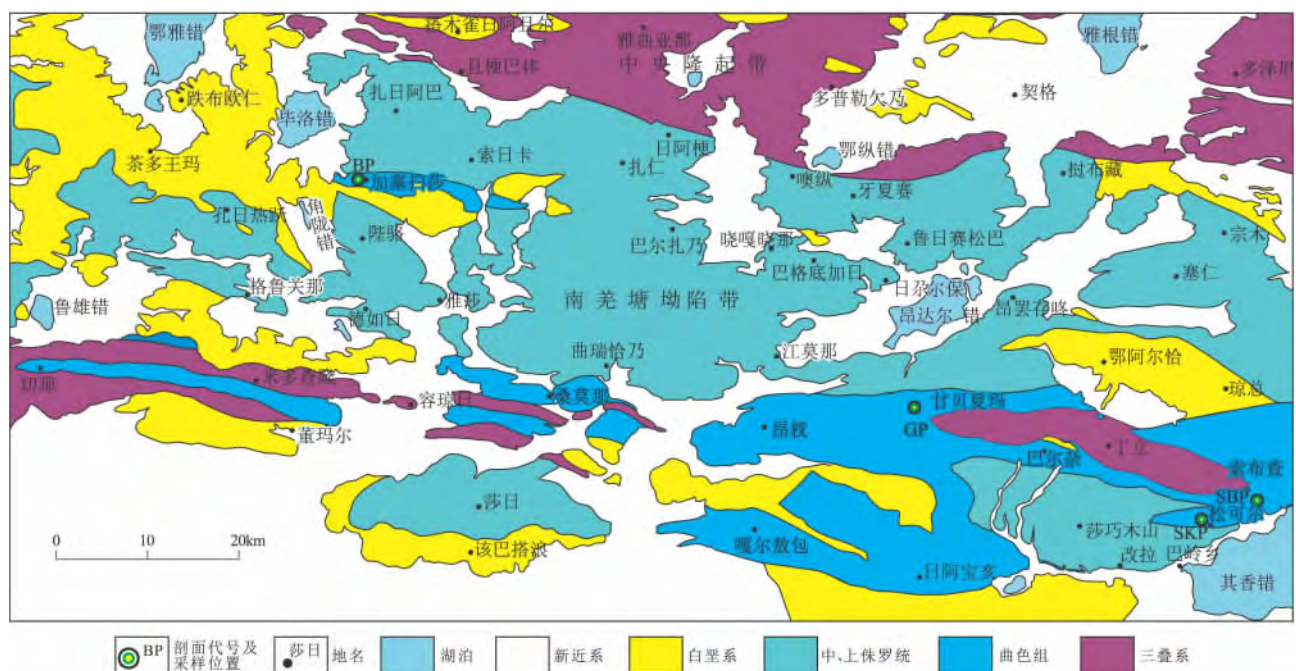


图1 羌塘盆地双湖地区曲色组黑色岩系分布范围及碳酸盐岩结核采样位置(据西藏 1/25 万《昂达尔错幅》区域地质图修改)

Fig.1 Distribution of the black rock series and sampling sites of the carbonate concretions from the Quse Formation in the Shuanghu area, Qiangtang Basin

2 碳酸盐岩结核的沉积特征

碳酸盐岩结核多分布于曲色组中、下部地层中。风化面为黄灰色、土黄色,新鲜面为深灰色。外形形态多样,丘状、椭球状、透镜状、脉状、树枝状皆有。结核大小不等,其长轴长一般在数厘米到数十厘米,最大可见 5~10m。结核多顺层线状分布,但与页岩围岩界线清楚,结核上、下页岩微层理围

绕生长。差异风化作用易导致结核裸露地表(图2)。

碳酸盐结核主要由泥微晶碳酸盐矿物组成(含量>70%),少量粘土矿物、石英及草莓状、半自形晶粒状黄铁矿等(图3A、B)。碳酸盐岩结核多呈致密块状,局部具藻团块或凝块结构,气孔状构造或渗漏气管构造发育(图3A、B、C)。气孔大小一般 2~5mm,外壁圆滑。渗漏气管大小一般 0.5~2cm,

多上大下细,垂直层理分布,常被同生沉积物或黄铁矿颗粒不完全充填(图 3F、G)。其内部常含大量双壳类、菊石类、蠕虫状或树枝状生物及超微生物化石,生物密度极高。破裂断面的扫描电镜观察显示内部保存有直径 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 的管状微生物丝体和粪球粒。微生物丝体具有明显生物结构,内壁可见大量规则排列的体腔孔(图 3H);粪球粒表面可见大量蓝菌或钙藻纹饰(图 3I)。碳酸盐岩内部或渗

漏孔通通常含大量黄铁矿颗粒。内部黄铁矿一般为草莓状黄铁矿颗粒,个体较小,粒径 $2.9 \sim 8.9 \mu\text{m}$,平均粒径在 $5.0 \mu\text{m}$ 左右,内部可见葵花状构造(图 3D、E);渗漏孔通道内黄铁矿可以为草莓状和半自形立方体状,颗粒粒径普遍较粗大。草莓状黄铁矿颗粒粒径一般在 $10 \sim 20 \mu\text{m}$,个别颗粒可达 $40 \mu\text{m}$;立方体黄铁矿颗粒更加粗大,一般在 $1 \sim 4 \text{mm}$ 不等。



图 2 羌塘盆地双湖地区曲色组碳酸盐岩结核野外发育特征

A. 毕洛错丘状碳酸盐岩结核; B. 毕洛错椭圆形碳酸盐岩结核,围岩(油页岩)微层理绕过结核发育; C. 毕洛错油剖面丘状结核内部可见火焰状构造及双壳类生物化石; D. 毕洛错碳酸盐岩结核,内部可见大量气孔构造,被黄铁矿或灰白色灰泥不完全充填; E、F. 甘贝夏玛球形结核,风化后裸露地表,内部可见大量双壳类生物化石,丰度极高; G. 索布查椭圆形结核,风化后裸露地表,内部可见大量菊石类、双壳类化石; H. 索布查结核,风化后裸露地表,发育蠕虫状或树枝状生物化石

Fig. 2 Field occurrence of the carbonate concretions from the Quse Formation in the Shuanghu area, Qiangtang Basin

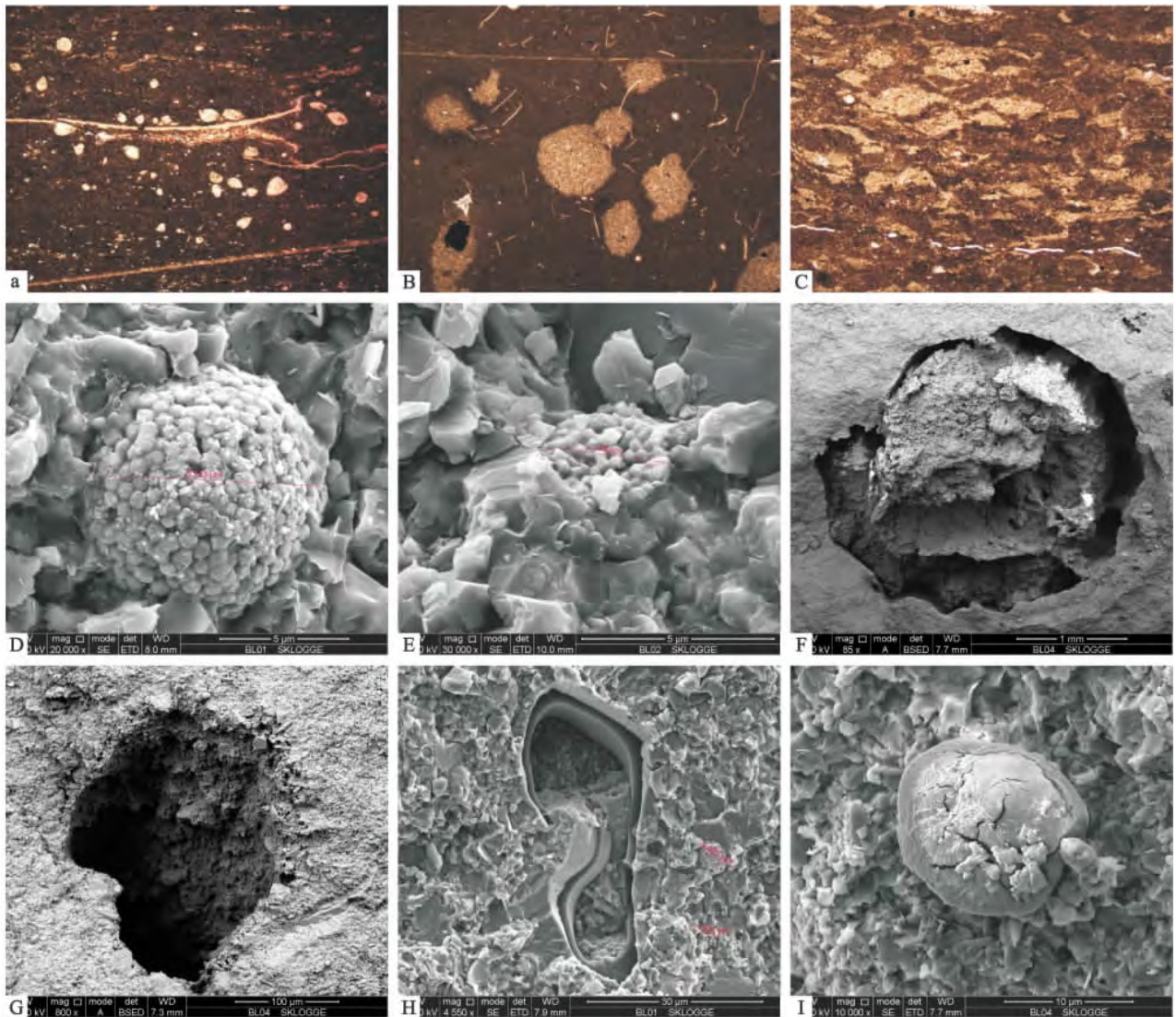


图3 毕洛错曲色组碳酸盐岩显微结构特征

A. 致密块状结核, 主要由微晶碳酸盐矿物基质组成, 其间分布有少量黄铁矿、半充填气孔及石英碎屑, 可见密集双壳类化石及微裂缝; B. 致密块状结核, 发育大量被黄铁矿或黄灰色泥晶质半充填的气孔, 另见少量线状微生物化石; C. 凝块状结核, 发育微裂缝及黄铁矿颗粒; D. 草莓状黄铁矿颗粒, 直径 $8.9\mu\text{m}$, 由大量圆球状细小颗粒构成; E. 草莓状黄铁矿颗粒, 直径 $3.2\mu\text{m}$, 具葵花状结构, 其外壳圈层颗粒相对较大, 中心颗粒相对较小; F、G. 半充填或未充填渗漏孔通道; H. 超微生物丝体, 具有生物结构, 内壁发育大量规则密集体腔孔; I. 粪球粒, 表面可见大量蓝菌或钙藻纹饰

Fig. 3 Microscopic features of the carbonate concretions from the Quse Formation in the Biluoco area, Qiangtang Basin

3 碳、氧同位素特征

分别对毕洛错 (BL)、甘贝夏玛 (GP)、松可尔 (SKP)、索布查温泉 (SBP) 曲色组碳酸盐岩结核进行了碳、氧同位素测试。将样品清洗、晾干, 选择新鲜样品进行微钻取样并粉碎至 200 目。采样点尽量避开气孔或发生明显成岩作用环边。碳酸盐岩碳、氧同位素测试在中石化西南石油局完成。测试方法为磷酸法, 取 30 ~ 50mg 粉末样品在 110°C 恒温水塔中与 100% H_3PO_4 平衡反应, 收集反应生成的 CO_2 通过 MAT251 同位素质谱仪测定, 分析精度(质量分

数) 优于 0.1‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据均相当于 PDB 标准给出, 结果见表 1。

结果显示, 双湖地区曲色组黑色岩系中碳酸盐岩结核的碳、氧同位素普遍负偏。 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -21.3‰ ~ -6.0‰ , 平均值 -10.8‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.4‰ ~ -1.7‰ , 平均值 -5.6‰ 。但不同剖面碳酸盐岩结核碳、氧同位素组成存在一定差异: 甘贝夏玛剖面 (GP) 显示了最轻的碳同位素组成, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -19.4‰ ~ -8.4‰ , 平均值 -14.2‰ ; 索布查剖面 (SBP) 结核 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -21.3‰ ~ -7.2‰ , 平均值 -12.6‰ ; 松可尔 (SKP) 为 -11.1‰ ~ -6.8‰ , 平均

-9.0‰; 毕洛错(BP)为-12‰~-6.0‰,平均-7.6‰。几个剖面中结核的氧同位素组成普遍较轻:毕洛错结核的 $\delta^{18}\text{O}$ 值-9.7‰~-1.7‰,平均值-4.2‰;甘贝

夏玛为-10.4‰~-1.7‰,平均值-5.2‰;松可尔为-10.4‰~-3.1‰,平均值-6.3‰;索布查为-10.4‰~-3.1‰,平均值为-6.8‰。

表1 双湖地区碳酸盐岩结核稳定碳、氧同位素测试结果(‰)

Table 1 Stable carbon and oxygen isotopic data (‰) for the carbonate concretions from the Quse Formation in the Shuanghu area, Qiangtang Basin

序号	样品编号	采样地点	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	序号	样品编号	采样地点	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
1	BL-01	毕洛错	-8.2	-3.9	12	GP-06	甘贝夏玛	-9.6	-3.9
2	BL-02	毕洛错	-6.0	-9.7	13	SKP-01	松可尔	-8.7	-4.2
3	BL-03	毕洛错	-6.1	-3.9	14	SKP-02	松可尔	-11.1	-8.8
4	BL-04	毕洛错	-6.5	-3.8	15	SKP-03	松可尔	-10.4	-9.6
5	BL-05	毕洛错	-12.0	-2.1	16	SKP-04	松可尔	-6.8	-4.7
6	BL-06	毕洛错	-6.6	-1.7	17	SKP-05	松可尔	-8.1	-4.4
7	GP-01	甘贝夏玛	-17.6	-4.7	18	SBP-01	索布查	-11.6	-10.4
8	GP-02	甘贝夏玛	-19.4	-8.5	19	SBP-02	索布查	-9.3	-8.6
9	GP-03	甘贝夏玛	-18.0	-10.4	20	SBP-03	索布查	-21.3	-5.6
10	GP-04	甘贝夏玛	-8.4	-2.2	21	SBP-04	索布查	-7.2	-3.1
11	GP-05	甘贝夏玛	-12.3	-1.7	22	SBP-05	索布查	-13.5	-6.3

4 硫同位素特征

分别对上述剖面碳酸盐岩结核内部黄铁矿颗粒开展了硫同位素测试。测试由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。挑选黄铁矿颗粒时,首先将结核表面清洗、晾干后,逐级破碎至60~80目,然后在体视显微镜下手工挑选,单矿物纯度均在99%以上。将黄铁矿颗粒与氧化亚铜(Cu_2O)按一定比例研磨、混合均匀后,进行氧化反应,生成 SO_2 并用冷冻法收集,然后用MAT21气体同位素质谱仪分析硫同位素组成,测量结果以VCDT为标准,分析精度优于0.2‰。其结果显示双湖地区曲色组碳酸盐岩结核黄铁矿颗粒硫同位素均显示正偏, $\delta^{34}\text{S}$ 值为22.98‰~31.12‰,详见表2。

表2 双湖地区碳酸盐岩结核 $\delta^{34}\text{S}$ 值测试结果(‰)

Table 2 $\delta^{34}\text{S}$ values (‰) for the carbonate concretions from the Quse Formation in the Shuanghu area, Qiangtang Basin

序号	样品编号	采样地点	测定对象	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)
1	BL-02	毕洛错	黄铁矿	24.13
2	BL-06	毕洛错	黄铁矿	26.85
3	GP-01	甘贝夏玛	黄铁矿	22.98
4	GP-02	甘贝夏玛	黄铁矿	23.93
5	GP-05	甘贝夏玛	黄铁矿	23.47
6	SKP-04	松可尔	黄铁矿	31.12
7	SKP-05	松可尔	黄铁矿	24.86
8	SBP-05	索布查	黄铁矿	29.18

5 讨论

冷泉碳酸盐岩是分布于大陆边缘海底沉积界面之下、在天然气渗漏过程中由于硫酸盐还原细菌作用于泉口周围使甲烷气体发生缺氧氧化所形成的自生碳酸盐沉积物^[4-15]。其特征包括以下几个方面:(1)外形上多以丘状、结核状、透镜状、凝块状及不规则状等产出,且碳酸盐岩多呈线性或线性群分布;(2)成分上以微晶碳酸盐矿物(微晶方解石、文石、白云石)为主,含少量草莓状黄铁矿和外来碎屑沉积物(粘土质、石英等),草莓状黄铁矿通常由微米级的黄铁矿小球构成;(3)沉积组构上大部分碳酸盐岩为均质的,局部可见特殊沉积组构,如凝块构造、叠层构造、示底构造等;(4)发育泥火山、底劈、渗漏孔、黑烟囱等特殊构造;(5)生物群落方面表现为分异度极低,但生物密度极高,以厌氧型双壳类、腹足类、掘足纲类、蠕虫类、细菌席等化学自养生物群为主;(6)最为重要的是具有独特的碳氧硫同位素组成,碳同位素常表现为强烈负偏, $\delta^{13}\text{C}$ 值通常为-5‰~-60‰,而 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-2‰~-7‰,以正值为主,其内部黄铁矿颗粒硫同位素值则可正可负。其原因在于冷泉碳酸盐岩的碳通常来源于冷泉流体中以甲烷为主的烃类化合物,且烃类化合物主要有生物成因和热解成因甲烷及石油中烃类化合物。生物成因甲烷严重亏损 ^{13}C ,其 $\delta^{13}\text{C}$ 为-110‰~-50‰^[4],热解成因甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-50‰~-30‰^[7],石油中烃类化合物的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-35‰~

-25‰^[13]。其 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显与海相碳酸盐岩的碳同位素组成有很大的差异,特别负的碳同位素值是区别正常海相碳酸盐岩与冷泉碳酸盐岩最重要的地球化学标志。如墨西哥湾北部的冷泉碳酸盐岩结核的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-15‰~-55‰^[13]、美国俄勒冈大陆边缘所发育的冷泉碳酸盐岩结核 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-40.6‰~-54.2‰^[23]、美国蒙特里海湾大陆坡 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-2.01‰~-55.1‰^[21]、意大利 Tuscan 及 Romagna 半岛 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-16‰~-58‰^[22]、我国南海北部的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-18.24‰~-36.07‰^[23]、西沙海槽的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-13.3‰~-29.59‰^[24]、东沙群岛、神狐海区等海洋的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-18.24‰~-40.18‰^[25]、东沙东北海域的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-43.79‰~-56.33‰^[26]等。与此同时,由于天然气水合物在结晶时发生氧同位素分馏,晶格中更富集¹⁸O^[27-28],使得现代冷泉碳酸盐岩的氧同位素常显示富¹⁸O。但由于受沉积时温度等外部因素的影响,其氧同位素值变化较大^[14]。古代碳酸盐岩受大气降水的影响,使得原有 $\delta^{18}\text{O}$ 值发生明显改变。而硫同位素分馏则主要跟硫酸盐还原细菌活动和海水源硫酸根离子有关。如果只有海水源的硫酸根离子参与了甲烷厌氧氧化过程,那么理论上所有黄铁矿产物中硫同位素值均应为负值。然而硫酸盐还原细菌的多次或反复还原作用则使得硫酸盐具有更为正的硫同位素值^[15]。古代冷泉碳酸盐岩具有与现代冷泉碳酸盐岩相似的特征。

双湖地区曲色组大量发育的碳酸盐结核与现代冷泉碳酸盐岩特征一致,表现为:(1)野外产状以丘状、椭球状、透镜状、脉状、树枝状为主,结核之间多呈线状分布;(2)成分上主要由泥微晶碳酸盐矿物组成(含量>70%),少量粘土质、石英及草莓状、半自形晶粒状黄铁矿等。且草莓状黄铁矿平均粒径在5 μm 左右,具有葵花状内部结构,与现代冷泉环境产出的具有外壳结构的草莓状黄铁矿结构类似^[29-33];(3)具有冷泉沉积所特有的沉积构造,如凝块构造、气孔状、渗漏孔等构造;(4)具有明显负偏碳同位素比值,硫同位素则发生正偏移,与现代天然气渗漏所形成的冷泉碳酸盐岩地球化学特征一致。另外,结核中可见大量双壳类、菊石类、蠕虫状或树枝状生物及超微生物化石,生物密度极高,但分异度较低。故曲色组广泛发育的碳酸盐岩结核应是早侏罗世古海洋海底天然气渗漏所形成的冷泉碳酸盐沉积。

该时期古冷泉的大量存在对于认识东特提斯域早侏罗世缺氧事件及油气勘探均具有重要的意

义。土阿辛期是全球早侏罗世海侵的高峰期,在欧洲大洋及特提斯洋广泛发育含沥青页岩,如在加拿大西部、日本、马达加斯加、阿根廷和西伯利亚北部以及北极地区与之相当层位均发育黑色页岩。Jenkyns(1986,1988)认为这种全球性的、富含有机质黑色页岩相即与白垩纪大洋缺氧事件(oceanic anoxic event,简称为OAE)相类似,意味着早侏罗世土阿辛期存在全球缺氧事件。南羌塘双湖、色哇地区至安多一线均广泛发育该时期相当层位的黑色页岩相,其分布于南羌塘坳陷南部深水区域,以薄层水平层理发育、有机质含量较高(毕洛错油页岩有机碳含量最高可达26.1%)、缺乏底栖生物和生物扰动为特征,产双壳类 *Bositra* 生物化石^[34]。在欧洲,双壳类 *Bositra* 黑色页岩相统称为“海螂蛤页岩”相沉积,是重要的生物沉积相,以大量出现富有机质的薄层水平层理为特点,主要由于晚普林斯巴赫期到早土阿辛期的快速海平面上升所致^[35],为缺氧事件的一个重要标识性生物相。曲色组广泛分布的“海螂蛤页岩”相沉积同样可以指示东特提斯域区域性缺氧事件的存在,冷泉碳酸盐岩结核的产生也是在该沉积环境下形成。在富有机碳、缺氧的环境下,海底天然气容易逐渐产生并富集。该套地层沉积厚度较大,在长期的压实作用下易发生脱水作用,从而导致流体排溢活动的发生。在气体渗漏、运移过程中,在冷泉渗漏活动区的浅表层甲烷缺氧氧化,形成大量碳酸盐岩沉积,进一步加重了还原环境的产生,最终导致东特提斯洋区域性缺氧事件的发生。由此可以肯定,地处东特提斯域的羌塘盆地双湖地区早侏罗世土阿辛期缺氧事件,极有可能与天然气水合物释放甲烷气体的古气候效应存在极大关联。

6 结论

通过对羌塘盆地南部双湖地区下侏罗统曲色组碳酸盐岩结核的野外地质构造、物质成分、微观组构和碳、氧同位素特征的研究,发现其特征与现代海底天然气水合物的渗漏、释放和环境突变所形成的冷泉碳酸盐岩特征一致,推测该套碳酸盐结核是早侏罗世特提斯洋海底天然气水合物渗漏所形成。同时,大量冷泉碳酸盐岩沉积的存在说明东特提斯洋在早侏罗世土阿辛期海底存在众多天然气冷泉喷口,可能暗示该地区早侏罗世大洋缺氧事件与海底天然气水合物喷发存在极大关联。

参考文献:

- [1] 伊海生,林金辉,赵兵,等. 藏北羌塘地区地层新资料 [J]. 地质论评,2003,49(1):59-65.
- [2] 陈兰,伊海生,胡瑞忠. 藏北羌塘盆地侏罗纪颗石藻化石的发现及其意义 [J]. 地质学前沿,2003,10(4):613-618.
- [3] 陈兰,伊海生,夏敏全,等. 藏北双湖地区早 Toarcian 期大洋缺氧事件: 沉积学、古生物学及地球化学特征 [J]. 生态学杂志,2007,26(11):1793-1797.
- [4] 阴家润,孙立新,白志达,等. 藏北双湖-安多地区侏罗纪菊石新资料及地层评述 [J]. 地层学杂志,2005,29(1):7-41.
- [5] 阴家润,高金汉,王永胜,等. 西藏北部色哇-安多地区侏罗纪菊石类与缺氧黑色页岩相 [J]. 古生物学报,2006,45(3):311-331.
- [6] 王成善,伊海生,刘池洋,等. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义 [J]. 石油与天然气地质,2004,25(2):139-143.
- [7] 黄继钧. 羌塘盆地基底构造特征 [J]. 地质学报,2001,75(3):333-337.
- [8] 李才,和钟铨,杨德明. 西藏羌塘盆地几个地质构造问题 [J]. 世界地质,1996,15(3):18-23.
- [9] 赵政璋,李永铁,叶和飞,等. 青藏高原大地构造特征与盆地演化 [M]. 北京: 科学出版社,2001. 23-25.
- [10] 王剑,谭富文,李亚林,等. 青藏高原重点沉积盆地油气潜力分析 [M]. 北京: 地质出版社,2004. 34-88.
- [11] 王永胜,郑春子. 藏北色哇地区索布查组、曲色组岩石地层、层序地层、生物地层特征及三叠系与侏罗系界线 [J]. 地层学杂志,2007,31(4):377-384.
- [12] 王永胜,张树岐,郑春子,等. 藏北南羌塘盆地曲瑞恰乃地区中侏罗世色哇组、莎巧木组、布曲组的生物地层特征 [J]. 地质通报,2008,27(1):92-100.
- [13] 王永胜,郑春子. 藏北南羌塘盆地毕洛错地区下侏罗统曲色组石膏岩层 [J]. 地层学杂志,2008,32(3):321-326.
- [14] 陈多福,陈先沛,陈光谦. 冷泉流体沉积碳酸盐岩的地质地球化学特征 [J]. 沉积学报,2002,20(1):34-40.
- [15] 陈祈,王家生,魏清,等. 综合大洋钻探计划 311 航次沉积物中自生黄铁矿及其硫同位素研究 [J]. 现代地质,2008,22(3):402-406.
- [16] WHITICAR M J, FABER E, SCHOELL M. Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO₂ reduction versus acetate fermentation-isotopic evidence [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,1986,50(5):693-709.
- [17] SACKETT W M. Carbon and hydrogen isotope effects during the thermocatalytic production of hydrocarbons in laboratory simulation experiments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,1978,42(2):571-580.
- [18] ROBERTS H H, AHARON P. Hydrocarbon-derived carbonate buildups of the northern Gulf of Mexico continental slope: A review of submersible investigations [J]. Geo-Marine Letters,1994,14(2-3):135-148.
- [19] ROBERTS H H, CARNEY R S. Evidence of episodic fluid, gas, and sediment venting on the northern Gulf of Mexico continental slope [J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists,1997,92(7-8):863-879.
- [20] BOHRMANN G, GREINERT J, SUESS E, et al. Authigenic carbonates from the Cascadia subduction zone and their relation to gas hydrate stability [J]. Geology,1998,26(7):647-65.
- [21] ORANGE C L, GREENE H G, REED D, et al. Widespread fluid expulsion on a translational continental margin: Mud volcanoes, fault zones, headless canyons, and organic-rich substrate in Monterey Bay, California [J]. Geological Society of America Bulletin,1999,111(7):992-1009.
- [22] TERZI C, AHARON P, RICCI LUCCHI F, et al. Petrography and stable isotope aspects of cold-vent activity imprinted on Miocene-age "calcarei aLucina" from Tuscan and Romagna Apennines, Italy [J]. Geo-Marine Letters,1994,14(2-3):177-184.
- [23] 陆红锋,刘坚,陈芳,等. 南海台西南区碳酸盐岩矿物学和稳定同位素组成特征—天然气水合物存在的主要证据之一 [J]. 地质学前沿,2005,12(3):268-276.
- [24] 陈忠,黄奇瑜,颜文,等. 南海西沙海槽的碳酸盐结壳及其对甲烷冷泉活动的指示意义 [J]. 热带海洋学报,2007,26(2):26-33.
- [25] 陈忠,杨华平,黄奇瑜,等. 南海东沙西南海洋冷泉碳酸盐岩特征及其地质意义 [J]. 现代地质,2008,22(3):382-389.
- [26] 韩喜球,杨克红,黄永祥. 南海东沙东北冷泉流体的来源和性质: 来自烟囱状冷泉碳酸盐岩的证据 [J]. 科学通报,2013,58(19):1865-1873.
- [27] SLOAN E D. Clathrate Hydrates of Natural Gases [M]. New York: Marcel Dekker Incorporation,1998. 1-628.
- [28] USSLER W, PAULL C K. Effects of ion exclusion and isotopic fractionation on pore water geochemistry during gas hydrate formation and decomposition [J]. Geo-Marine Letters,1995,15(1):37-44.
- [29] CHEN D F, FENG D, Su Z, et al. Pyrite crystallization in seep carbonates at gas vent and hydrate site [J]. Materials Science and Engineering C,2006,26(4):602-605.
- [30] 张美,孙晓明,芦阳,等. 南海台西南盆地自生管状黄铁矿矿物学特征及其对天然气水合物的示踪意义 [J]. 矿床地质,2011,30(4):725-734.
- [31] JENKYN H C. The early Toarcian and Cenomanian-Turonian anoxic events in Europe: comparisons and contrasts [J]. Geologische Rundschau,1985,74(3):505-518.
- [32] JENKYN H C. The early Toarcian (Jurassic) anoxic event; stratigraphic, sedimentary and geochemical evidence [J]. American Journal of Science,1988,288:101-105.

Characteristics and significance of the cold-vent carbonate rocks from the Quse Formation in the Shuanghu area, Qiangtang Basin, northern Xizang

XIA Guo-qing¹, YI Hai-sheng^{1,2}

(1. *Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*; 2. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610059, Sichuan, China*)

Abstract: The carbonate concretions occur in large numbers in the Quse Formation, Shuanghu area, Qiangtang Basin, northern Xizang, and display hummocky, ellipsoidal, lenticular, stratoid, vein, dendritic, clotted, vesicular and seepage textures and structures. These nodules consist dominantly of micritic carbonate minerals with minor amount of clay minerals, quartz, framboidal and subhedral pyrite with an average grain size of about 5.0 μm , in which the sun-flower structures may be observed. The organic fossils such as bivalves, ammonites, worm-like or dendritic fossils and ultra-microbial fossils are found to be arranged with a higher density. The carbon isotopes in the analyzed samples are noticeably negative excursion while the sulfur isotopes in the analyzed samples exhibit a markedly distinct positive excursion. The results of research outlined above are in good agreement with the mechanisms for the formation of the cold-vent carbonate rocks produced by the seepage and release of the modern submarine natural gas. It is inferred from this reason that the carbonate concretions in the study area may be originated from the seepage and eruption of ancient natural gas. The presence of numerous submarine natural gas vents implies that there is a direct correlation between the oceanic anoxic events and the eruption of the submarine natural gas hydrates in the Shuanghu area, Qiangtang Basin during the Early Jurassic.

Key words: Qiangtang Basin; Shuanghu; carbonate concretion; isotope; oceanic anoxic event