文章编号:1000-0550(2025)01-0349-12

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.159

# **滇东北筇竹寺组极低级变质作用及古地温研究** ——伊利石和镜质体反射率的证据

刘建清,赵瞻,何利,陆俊泽,冉敬,胡志中 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心),成都 610213

摘 要【目的】极低级变质作用处于石油一湿气一干气以及泥煤一烟煤一无烟煤的演化阶段,与古地温有着极其密切的关系,因而,极低级变质作用及古地温的研究对于油气、煤等能源矿产的勘探具有重要的现实意义。与已取得勘探突破的上扬子地区 龙马溪组相比,下寒武统牛蹄塘组(筇竹寺组)页岩有机质丰度和热演化程度更高,具有更大的沉积厚度和更广泛的分布面积, 页岩气资源潜力巨大,是中国页岩气勘探开发的另一个重点层系。目前,筇竹寺组这套高成熟度烃源岩尚未开展系统的极低级 变质作用及古地温研究,有必要揭示古地温等技术参数及其对油气成藏的影响。【方法】在剖面实测基础上,通过伊/蒙混层矿物 结构有序度、伊利石结晶度和烃源岩镜质体反射率等技术被首次开展了滇东北地区筇竹寺组极低级变质作用及古地温研究。 【结果】(1)筇竹寺组粉砂质泥岩中伊/蒙混层矿物中伊利石含量达95%。自生伊利石及伊/蒙混层矿物中伊利石结晶度介于0.24~ 0.35;由沥青反射率计算的烃源岩镜质体反射率(*R*。)介于2.22%~2.65%,低于扬子东南缘(*R*。介于3.18%~3.43%)及海相干酪根天 然气生成成熟度上限(*R*。=3%);(2)滇东北地区筇竹寺经历最高古地温确定在200℃~227.57℃,低于扬子东南缘(211℃~ 246℃)及烃类死亡最高温度(230℃~300℃)。早白垩世一新近纪最大埋深期古地温梯度介于2.53~2.91℃/100m,与扬子东南 缘接近;(3)综合考虑各变质作用划分标准及方案,滇东北地区筇竹寺组分别属于极低级变质A带—B带、近变质带、低级近变带 一高级近变带,系葡萄石一绿纤石相。【结论】滇东北地区筇竹寺期处于由沉积凹陷向隆起过渡的有利指向区,该区筇竹寺组经 历了较低的最高古地温,且有机质成熟度相对于扬子其他地区成熟度更低,具有油气形成条件和物质基础。目前尚未发现古油 藏出露,后期构造保存条件较好,滇东北地区筇竹寺组的油气远景应予以关注。

关键词 滇东北;筇竹寺组;伊利石;镜质体反射率;极低级变质作用;古地温

**第一作者简介** 刘建清,男,1969年出生,教授级高级工程师,岩石学,E-mail: ljianqing0813@163.com 通信作者 赵瞻,男,教授级高级工程师,E-mail: zhaozhan1982@163.com

中图分类号 P618.13 文献标志码 A

# 0 引言

极低级变质作用是变质地质学研究的前沿领域 之一,指很低温的一种变质作用,即从成岩作用向低 级变质的转变过程,与石油、天然气、煤等能源矿产密 切相关。在成岩一极低级变质作用阶段,石油演化阶 段从石油一湿气一干气变化,煤则经历由泥煤一烟 煤一无烟煤的变化。这些过程有着较多评价指标,例 如可依据伊利石结晶度KI(°Δ2θ)0.42和0.25将极低 级变质作用划分为成岩带、近变质带和浅变质带。因 此,通过对沉积盆地成岩一极低级变质作用研究,对 于明确成岩一变质界限,阐明盆地一构造一热演化 史,指导油气勘探,具有重要的理论和现实意义<sup>[15]</sup>。 国际上极低级变质作用的主要标志有:(1)标志 矿物及组合;(2)伊利石和伊/蒙转换,如伊利石结晶 度、多型,伊/蒙混层可膨胀层的百分比,伊利石有序 度、晶畴大小、b。值等;(3)有机质参数,如镜质体反射 率、笔石反射率、牙形刺颜色蚀变指数、孢粉颜色 等<sup>[6-15]</sup>。在油气的生成和转变过程中,含油气盆地古 地温及古地温梯度是热史、生烃史研究的重要基础, 不仅可以重塑油藏历史演化过程,而且可以预测其 发展演化趋势。近年来的研究,可依据上述指标开 展烃源岩埋藏过程古地温定量计算,精准标定其经 历的最高古地温,为热史、生烃史研究奠定基础。

中上扬子地区下寒武统筇竹寺组(牛蹄塘组)普 遍发育一套黑色烃源岩,厚度大、有机碳含量高,是

收稿日期:2022-10-08;修回日期:2022-12-10;录用日期:2023-02-23;网络出版日期:2023-02-23 基金项目:中国地质调查局油气调查专项(DD20190080)[Foundation: Oil and Cas Survey Project of China Geological Survey, No. DD20190080]

四川盆地众多下古生界油气藏的烃源岩,受到石油 地质界的广泛关注。以往对于该套烃源岩成熟度的 工作,主要根据镜质体反射率(*R*。)进行成熟、过成熟 的定性评价,未曾开展较为系统的低级变质作用及其 相关热历史的研究。滇东北昭通地区位于上扬子地 区,筇竹寺组烃源岩镜质体反射率低于扬子东南 缘<sup>169</sup>,成熟度较低,更具油气勘探的现实意义。该区 沉积盆地的研究缺乏古地温资料,制约了盆地生烃史 的研究。在滇东北昭通地区锌厂沟筇竹寺组剖面测 量基础上,开展了筇竹寺组黑色页岩黏土矿物组成、 伊利石结晶度、镜质体反射率研究及与变质程度和古 地温定量计算,旨在揭示该区筇竹寺组烃源岩经历的 最大古地温,为盆地生烃史的研究提供基础资料,深 化该区筇竹寺组的研究,服务于油气勘探。

1 地质背景

## 1.1 地质构造背景

根据云南省地质志的划分,研究区在一级构造 单位为扬子准地台,二级构造单元为滇东台褶带<sup>117</sup>。 经过晋宁运动之后的加里东、海西、印支、燕山、喜马 拉雅各构造期,该区沉积了震旦系、古生界、中生界、 新生界的巨厚盖层(图1)。区内出露的震旦系一白 垩系均为整合或平行不整合接触,下白垩统与新近 系之间为角度不整合接触,表明该区沉积盖层于晚 燕山一早喜山期褶皱定型。其中上古生界与下古生 界的广西运动造成的平行不整合是区内最大的沉积 间断<sup>[18]</sup>。

早寒武世筇竹寺期是上扬子地区早古生代最大的一次海侵,普遍发育了厚度较大的黑色页岩。滇东北地区位于上扬子康滇古陆东缘,筇竹寺期接受来自该古陆的剥蚀和沉积。同时,受新元古代裂谷盆地的持续影响,筇竹寺组沉积基底凹凸不平,自该区至镇雄一带筇竹寺组沉积厚度300~500 m,各地黑色页岩累计厚度30~60 m,沉降中心位于镇雄一带。自晚寒武世开始,在华南加里东幕式造山作用背景下,上扬子地区呈现隆、凹相间的格局,发育一系列的古隆起。滇东北昭通地区位于其中的黔中隆起,区内奥陶系一志留系缺失或发育不完整,而往北渐入黔北凹陷<sup>[19]</sup>。



Fig.1 Regional geology of the study area

## 1.2 剖面特征

为开展下寒武统筇竹寺组的极低级变质作用及 相关最高古地温研究,实测了云南省昭通市昭阳区锌 厂沟筇竹寺组剖面。剖面位于金沙江东岸一支沟(锌 厂沟)(剖面起点坐标:103°13′46.21″E,27° 34'13.29" N;终点坐标:103°14'04.03" E,27° 34′10.60″N),见顶、底,底与下寒武统麦地坪组厚层 粉晶白云岩为平行不整合接触,顶与中寒武统沧浪铺 组紫红色泥岩呈整合接触。剖面共分29层,0层麦地 坪组,29层为沧浪铺组,除7~8层局部风化和掩盖较 强外,其余露头连续出露,剖面质量较好。剖面纵向 上两分明显(图2),底部(1~5层)为灰黑色—黑色中 厚层状---薄层状炭质泥岩、炭质粉砂岩、含炭质泥岩、 为烃源岩层(图3),沉积相分析为深水陆棚环境,厚 19.57 m;上部(6~28 层)为灰一深灰色泥质粉砂岩、深 灰色泥岩、钙泥质粉砂岩夹粉砂质泥岩,风化面略带 浅黄灰色、浅黄绿色,普遍发育水平层理,局部(27 层)见浪成对称波痕(图3)。其中17层、27层深灰色 泥岩为较差烃源岩层,厚度分别为6.46m和13.17m。 沉积相主要为浅水陆棚,局部(17层、27层)为深水陆 棚环境,反映上部有两次短暂的水体加深过程<sup>[19]</sup>。

## 2 样品采集与分析方法

为开展滇东北地区筇竹寺组的极低级变质作用 及相关热历史研究,在锌厂沟筇竹寺组剖面采集泥 页岩进行黏土矿物X射线衍射分析、伊利石结晶度 分析,对筇竹寺组底部黑色泥质粉砂岩及中上部深 灰色页岩采集样品进行沥青反射率分析。样品在四 川省科源工程技术测试中心(页岩气评价与开采四 川省重点实验室)完成。



Fig.2 Column diagram of section of the Qiongzhusi Formation in the Xinchanggou section

黏土矿物的提取、制备及分析流程按《SYT5163-208:沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法》进行开展。黏土矿物X射线衍射分析在 DMX-Ⅲ型X射线衍射仪上完成,测试条件为Cu 靶,电压35 kV,电流15 mA,步宽0.02°20,扫描范围 2°~36°20。黏土矿物含量利用衍射峰强度计算方法获得<sup>[20]</sup>。



图 3 锌厂沟剖面典型野外照片 (a)1~5层炭质泥岩;(b)27层浪成对称波痕 Fig.3 Typical field photos of the Xinchanggou section (a) carbonaceous mudstone of layers 1-5; (b) the symmetrical ripple marks formed by billows in the 27th layer

伊利石结晶度测试仪器为X'pert Powder,测 试条件为Cu靶,电压40kV,电流40mA;发射狭缝与 散射狭缝均为1°,接收狭缝0.3mm,扫描速度:20为 2°/min;采样步宽:20为0.02°;扫描范围5°~45°(自 然定向片,饱和乙二醇片)。

干酪根分选、制备流程依据国家标准 GB/T 19144—2010《沉积岩中干酪根分离方法》开展。 沥青反射率仪器为 Axio Scope.A1显微镜、J&M分光 光度计,放大倍数 500 倍,反射率量程 0.1%~10%。 测试条件:环境温度 23±3 °C,相对湿度小于 70% RH, 光线波长 546 nm±5 nm。标准物质:钆镓石榴石, 浸油反射率 1.72%,氧化锆,浸油反射率 3.16% (在 23 °C±1 °C,546 nm 波长的绿波下,折射率为 1.518 0± 0.000 4)。测试执行标准为 SY/5124—2012《沉积岩 中镜质体反射率测定方法》<sup>[5]</sup>。

## 3 分析结果

### 3.1 岩石学特征

锌厂沟剖面筇竹寺组泥质粉砂岩、粉砂质泥岩 主要由石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、黏土 矿物组成(表1)。全岩X射线衍射显示,石英含量 33%~45%,平均40%,钾长石含量0~14%,平均 6.6%,斜长石含量0~30%,平均14.4%,方解石含量 0~18%,平均6.3%,白云石含量0~15%,平均6.60%, 黏土矿物含量12%~39%,平均26.30%。显微镜下, 石英呈棱角状或次棱角状,粒径0.05 mm左右,颗粒

## 表1 锌厂沟剖面筇竹寺组泥页岩全岩矿物 X射线衍射含量(%)

 Table 1 X-ray diffraction content (%) of whole rock

 in the mud-shale of the Qiongzhusi Formation in the

 Xinchanggou section

Annenanggou section								
样品编号	石 英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黏土矿物		
zxp-1xy1	41	14	29			16		
zxp-4xy1	45	12	23			20		
zxp-9xy1	42	11	30	2	3	12		
zxp-11xy1	42	13	28			17		
zxp-13xy1	41	12	24		5	18		
zxp-15xy1	38	3	6	9	7	37		
zxp-17xy1	37		10	11	8	34		
zxp-19xy1	36	3	8	6	13	34		
zxp-21xy1	38		10	18	5	29		
zxp-23xy1	41	4		18	14	23		
zxp-25xy1	33	2	5	9	15	36		
zxp-27xy1	45	5		2	9	39		

间充填泥质、碳质等成分;长石颗粒,棱角状,粒径 0.05 mm左右,局部可见聚片双晶;方解石和白云石 呈泥晶一微晶集合体,为沉积期沉淀的碳酸盐矿物; "泥质"呈基底式胶结石英碎屑,呈隐晶质状或重结 晶形成雏晶状,为沉积期沉淀并经成岩一极低级转 变黏土矿物和自生黏土矿物,其中夹杂少量碳质成 分<sup>[19]</sup>(图4)。镜下筇竹寺组泥质粉砂岩、粉砂质泥岩 见清晰的层理构造(S<sub>0</sub>),无置换性变质面理(S<sub>1</sub>),长 石、方解石颗粒亦无明显的压扁、拉长等变质作用的 特征,反映构造挤压作用并不强烈,岩石尚处于成 岩一极低级变质作用,未达到浅变质作用阶段。

锌厂沟剖面筇竹寺组泥页岩黏土矿物分析结果 如表2所示。黏土矿物主要为伊利石,含量58%~ 94%,次为绿泥石(含量1%~35%)及伊/蒙混层(2%~ 6%),另含少量蒙脱石(0~7%)及高岭石(0~16%)。 伊/蒙混层中伊利石占95%,蒙脱石占5%。伊利石结 晶度 KI(°Δ2θ)0.24~0.35。

筇竹寺组物源来自康滇古陆古—中元古界东 川群、会理群浅变质绿片岩相火山—沉积岩系18,最 低级的变质泥质矿物为绢云母及白云母,而锌厂沟 剖面黏土矿物组成为经历成岩作用及极低级变质 作用的伊利石、伊/蒙混层、高岭石及绿泥石等形成 温度、压力较低的矿物,最高级的变质矿物为伊利 石,与源区黏土矿物明显不同。同时,从物源区绿 片岩相的变质程度可知,其所夹碳质R。可超过4%。 在化学风化过程中钾长石、绢云母、白云母可彻底 转化为高岭石,蒙脱石在风化带相当稳定,可带至 沉积盆地,黑云母可转化为蒙脱石。而基性岩风化 过程中铁、镁、钙质大多呈溶液状态被带走四。滇东 北地区筇竹寺烃源岩沥青反射率换算的R.明显低 于4%,表明源区泥质矿物经历了较为彻底的化学 风化作用生成如高岭石、蒙脱石等新的矿物,搬运 至康滇古陆东缘沉积、埋藏,经历成岩和极低级变 质。换言之,源区黑云母、白云母、绢云母等成熟度 较高古老黏土矿物在到达沉积盆地时已转化为高 岭石、蒙脱石等成熟度较低的黏土矿物,源区高成 熟度黏土矿物对沉积盆地黏土矿物成熟度的影响 可以忽略。

#### 3.2 有机质成熟度特征

镜质体反射率是确定烃源岩有机质成熟度的 有效指标。由于镜质组分源于高等植物,该方法明 显受到生物演化及母质来源类型的限制。碳酸盐



图 4 锌厂沟剖面典型岩石显微照片 (a)1层泥质粉砂岩显微照片;(b)23层泥质粉砂岩显微照片

Fig.4 Micrograph of typical rocks in the Xincanggou section

(a) micrograph of argillaceous siltstone of layer 1; (b) micrograph of argillaceous siltstone of layer 23

#### 表2 锌厂沟剖面筇竹寺组泥页岩黏土矿物分析结果及温度计算结果

 Table 2 Results of clay mineral analysis and temperature calculation of mud-shale in the Qiongzhusi Formation in the Xinchanggou section

- 44	1-14 July	黏土矿物含量/%			伊/蒙混层比/%		伊利石	温	温度		
件亏	右性	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	伊/蒙混层	蒙脱石层	伊利石层	结晶度	T1/°C	T2/°C
zxp-1xy1	炭质粉砂岩	2	85	0	7	6	5	95	0.31	222.14	221.32
zxp-4xy1	炭质泥岩	0	81	2	12	5	5	95	0.29	222.14	223.10
zxp-9xy1	钙泥质粉砂岩	0	94	2	1	3	5	95	0.33	222.14	219.53
zxp-11xy1	泥质粉砂岩	2	90	2	1	5	5	95	0.35	222.14	217.75
zxp-13xy1	泥质粉砂岩	7	82	4	2	5	5	95	0.35	222.14	217.75
zxp-15xy1	粉砂质泥岩	0	58	16	24	2	5	95	0.26	222.14	225.78
zxp-17xy1	钙质泥岩	0	58	8	31	3	5	95	0.25	222.14	226.68
zxp-19xy1	粉砂质泥岩	0	58	6	34	2	5	95	0.24	222.14	227.57
zxp-21xy1	粉砂质泥岩	0	60	5	33	2	5	95	0.24	222.14	227.57
zxp-23xy1	粉砂质泥岩	0	62	6	28	4	5	95	0.28	222.14	224.00
zxp-25xy1	粉砂质泥岩	0	58	4	35	3	5	95	0.29	222.14	223.10
zxp-27xy1	泥岩	0	68	4	25	3	5	95	0.34	222.14	218.64

注:T1、T2由公式(1)、(2)计算得出。

烃源岩或下古生界烃源岩中缺乏陆相高等植物来源的镜质体,一般采用海相镜质体或原生沥青来代替<sup>[22]</sup>。锌厂沟筇竹寺组剖面沥青反射率*R<sub>man</sub>*介于2.81%~3.45%(表3)。刘德汉等<sup>[23]</sup>针对我国海相高演化碳酸盐岩烃源岩提出了沥青反射率(*R<sub>man</sub>*)与等效镜质体反射率(*R<sub>o</sub>*)的换算公式:

 $R_{0} = 0.668 \times R_{ran} + 0.346$  (1)

式中:*R*。为镜质体反射率,*R*<sub>ran</sub>为沥青体反射率。这 一方法也广泛应用于寒武系一志留系等缺乏陆相 高等植物来源地层烃源岩镜质体反射率的转换计 算,并取得较好的应用效果<sup>[16]</sup>。计算表明,锌厂沟剖 面筇竹寺组烃源岩镜质体反射率介于2.22%~2.65% (表3)。

## 4 温度计算结果

#### 4.1 伊/蒙混层温度计算结果

伊(I)/蒙(S)间层矿物中伊利石含量与温度的相 关性,相关学者研究结果如表4所示。锌厂沟剖面筇 竹寺组泥页岩伊/蒙混层矿物伊利石层占95%,综合 表4各学者的研究结果,该区伊/蒙混层矿物形成温 度应在200℃以上。

王强<sup>[28]</sup>曾应用 Chi *et al*.<sup>[29]</sup>根据 Harvey *et al*.<sup>[27]</sup>的原 始数据建立了伊/蒙混层中伊利石含量与形成温度的 线性表达式开展黏土矿物研究,取得较好成效,该表 达式如下:

 $Y=0.342+2.737\times10^{-3}T$  (2)

## 表3 筇竹寺组烃源岩镜质体反射率及温度计算结果 Table 3 Vitrinite reflectance and its temperature calculation results for the Qiongzhusi Formation source rocks

样号	岩性	$R_{ m ran}/\%$	$R_{o}/\%$	T3/°C	T4/°C	T5/°C	Т6/°С
zxp-1sy1	炭质粉砂岩	2.81	2.22	256.27	254.18	199.91	199.76
zxp-1sy2	炭质泥岩	3.26	2.52	272.53	269.84	210.14	205.29
zxp-1sy3	炭质泥岩	3.31	2.56	274.21	271.46	211.20	205.91
zxp-2sy1	炭质泥岩	3.18	2.47	269.78	267.20	208.41	204.31
zxp-2sy2	炭质泥岩	3.34	2.58	275.21	272.43	211.83	206.28
zxp-2sy3	炭质泥岩	3.37	2.60	276.21	273.39	212.45	206.65
zxp-3sy1	炭质泥岩	3.28	2.54	273.20	270.49	210.56	205.54
zxp-3sy2	含炭质泥岩	3.41	2.62	277.52	274.65	213.28	207.14
zxp-4sy1	炭质泥岩	3.27	2.53	272.87	270.17	210.35	205.42
zxp-4sy2	炭质泥岩	3.45	2.65	278.82	275.90	214.10	207.63
zxp-5sy1	含炭质泥岩	3.25	2.52	272.19	269.51	209.92	205.17
zxp-17sy1	钙质泥岩	3.24	2.51	271.85	269.19	209.71	205.05
zxp-27sy1	泥岩	3.22	2.50	271.16	268.53	209.28	204.80

注:T3、T4、T5、T6由公式(3)、(4)、(5)、(6)计算得出。

表4 伊/蒙混层矿物结构与温度的关系

Table 4	Structure o	f illite/montmorillonite	interbedded	minerals	and	its	relationship	with	temperature
---------	-------------	--------------------------	-------------	----------	-----	-----	--------------	------	-------------

	Nadeau et al. <sup>[24]</sup>		Hofman et al. <sup>[25]</sup>	Jenning	; et al. <sup>[26]</sup>	Harve	y et al. <sup>[27]</sup>
矿物类型	伊利石含量	稳定存在温度/℃	转变温度/℃	伊利石含量	出现温度/℃	伊利石含量	出现温度/℃
R <sub>0</sub> I/S	<60%	<130		13%	68		
R <sub>1</sub> I/S	60%~80%	130~160	$R_0 \sim R_1 (100 \sim 110)$	63%	129	60%	100
R <sub>3</sub> I/S	>85%	150~180	$R_1 \sim R_3 (170 \sim 178)$	90%	176	90%	170
				100%	208	伊利石	>200

式中:Y为伊/蒙混层中伊利石的百分含量(%),T表示伊/蒙混层矿物的形成温度(℃)<sup>[30]</sup>。计算结果如表 2中T1所示,为222.14℃。

## 4.2 伊利石结晶度温度计算结果

Weaver<sup>[31]</sup>首先观察到,伊利石的X射线衍射峰的 锐度随着成岩及变质程度的增高而增高,在此基础 上提出了伊利石结晶度的概念。当前国际上通用 Kübler<sup>[10-11]</sup>提出的测量伊利石第一级底面反射峰001 峰的半高宽(又称Kübler指数)来反映伊利石的结晶 度,用*KI*(°Δ2θ)表示,*KI*值越小,峰形越尖锐,伊利石 的结晶度越好。

胡大千等<sup>[5]</sup>、毕先梅等<sup>[32]</sup>归纳总结了伊利石结晶 度与形成温度之间的关系,提出了成岩一极低级变 质作用的划分方案:晚成岩带(高级成岩带),伊利石 结晶度介于1.00~0.42,温度上限200℃;低级近变质 带(极低级变质带A),伊利石结晶度介于0.42~0.30; 高级近变质带(极低级变质带B),伊利石结晶度变化 介于0.30~0.25,温度上限300 ℃~350 ℃。锌厂沟剖 面筇竹寺组泥质粉砂岩伊利石结晶度介于0.24~0.35 (表2),据此分析,该区泥质粉砂岩处于极低级变质 带A带—B带,伊利石形成温度介于200 ℃~300 ℃。

Chi et al.<sup>[33]</sup>研究了 Wairakei 地热系统沉积物中各种组分与结构的黏土矿物,包括碎屑伊利石、绿泥石、伊/蒙混层矿物等,他们对该区自生伊利石的结晶度值和测井温度进行了系统研究,表明两者之间有明显的线性关系,即随着母岩温度或深度的增加,自生的伊利石结晶度值 KI(°Δ2θ)降低。在实测数据基础上,提出了以下线性表达式<sup>[30]</sup>:

*T*=249-89.3×*KI* (*R*<sup>2</sup>=0.92) (3) 式中:*T*表示伊利石形成温度(℃),*KI*表示伊利石结 晶度(°Δ2θ),*R*<sup>2</sup>表示相关系数。这个公式适用范围 为90℃~230℃。对锌厂沟剖面筇竹寺组泥页岩伊 利石结晶度利用式(3)计算表明,伊利石形成温度T2 介于217.75℃~227.57℃(表2)。

### 4.3 镜质体反射率温度计算结果

Frey<sup>16</sup>研究认为:成岩带, R.小于2.0%, 温度上限 200℃;近变质带, R。为2.0%~4.0%, 温度上限300℃~ 350 ℃;浅变质带, R 大于 4.0%, 温度大于 300 ℃~ 350 ℃。早寒武世,由于缺乏高等植物,镜质体反射 率由沥青反射率换算[21]。锌厂沟剖面筇竹寺组黑色 页岩沥青反射率换算成镜质体反射率介于2.22%~ 2.65%(表3)。据此,认为该区筇竹寺组烃源岩处于 近变质带,粗略估计经历的温度上限为200 ℃~ 300℃。镜质体反射率3%被认为是海相干酪根天然 气生成成熟度上限134。在扬子东南缘,筇竹寺组(牛 蹄塘组)烃源岩镜质体反射率介于3.18%~3.43%<sup>16</sup>, 高于3%的极限值,而在锌厂沟剖面镜质体反射率低 于3%。因此,开展滇东北地区筇竹寺组页岩气勘探 具有现实意义。显微镜下显示,锌厂沟剖面干酪根 组分呈黑色(图5),但并未完全呈深黑色,表明可能 其仍具一定的生烃潜力。一般而言,干酪根显微组 分由腐泥组、壳质组、镜质组、惰质组组成。腐泥组 原始有机质为藻类及其他低等水生生物及细菌,为 腐泥化产物;壳质组原始有机质为陆生植物孢粉、花 粉、角质层、树脂、蜡和木栓层等;镜质组原始有机质 来自高等植物的结构和无结构木质纤维;惰质组原 始有机质来源于森林火灾后丝炭化的木质纤维或再 沉积有机质。寒武纪时期无高等植物,干酪根显微 组分无镜质组,由于时代老,也不是惰质组和壳质 组。该区干酪根显微组分形态为不均匀棉絮状结 构,可能为较典型的腐泥无定形体。

Barker et al.<sup>113</sup>统计研究了镜质体反射率与古地 温之间的相互关系,提出了镜质体反射率地质温 度计:

In(	$R_{\circ}\%$ )=0.007	$8T_{max} - 1.2$	(4)

Barker et al.<sup>[35]</sup>确立了镜质体反射率与古地温的 关系,给出的地质温度计:

 $T = ((In(R_{\circ}\%) + 1.26)/0.008 \ 11 \tag{5})$ 

Barker *et al*.<sup>114</sup>修正后的镜质体反射率地质温度计:

 $T = (\ln(R_{\circ}\%) + 1.68)/0.0124$  (6)

 Mullis *et al.*<sup>[36]</sup>建立的镜质体反射率地质温度计:

  $T = (R.\% + 8.623.8)/0.054.3^{[5]}$  (7)

上述式(4)至式(7)古温度计算结果,分别以 T3至T6列于表3。可以看出,T3介于256.27℃~ 278.82℃,T4介于254.18℃~275.90℃,T5介于 199.91℃~214.10℃,T6介于199.76℃~207.63℃。

## 5 讨论

#### 5.1 最高古地温及地温梯度

锌厂沟剖面筇竹寺组伊/蒙混层矿物中伊利石含 量为95%,根据Nadeau et al.<sup>[24]</sup>、Hofman et al.<sup>[25]</sup>、 Jenning et al.<sup>[26]</sup>、Harvey et al.<sup>[27]</sup>关于伊/蒙混层矿物中 伊利石含量与温度关系的相关性描述(表4),认为该 区泥质粉砂岩中伊/蒙混层矿物形成温度在200℃ 以上。

潍北凹陷研究表明应用黏土矿物相关参数可较 有效计算恢复古地温<sup>[28]</sup>。式(2)、式(3)是这些方法在 滇东北地区的又一实践。式(2)根据伊/蒙混层矿物 中伊利石含量计算其形成温度T1为222.14℃。式 (3)根据伊利石结晶度计算伊利石形成温度T2介于 217.75℃~227.57℃。



图 5 锌厂沟剖面筇竹寺组干酪根显微照片 (a)1层黑色泥质粉砂岩干酪根显微照片;(b)3层黑色泥质粉砂岩干酪根显微照片 Fig.5 Microscopic picture of the Qiongzhusi Formation kerogen in the Xinchanggou section (a) micrograph of black argillaceous siltstone kerogen in layer 1; (b) micrograph of black argillaceous siltstone kerogen in layer 3

应用镜质体反射率开展烃源岩最大古地温计算 及温度的取舍,已在内蒙古锡林郭勒有较成功的实 践<sup>15]</sup>。T3至T6为依据这些方法和烃源岩镜质体反射 率计算的古地温,其中T3和T4温度较高,且较为接 近,温度介于254.18℃~278.82℃。T5和T6温度较 低,介于199.76℃~214.10℃,与式(2)、式(3)及依据 伊/蒙混层矿物结构有序度估算的温度(200℃以上) 接近。注意到式(4)、式(6)均是Barker *et al*.<sup>[13-14]</sup>提 出,式(6)是式(4)修正后的公式,且式(6)与式(2)、 式(3)、式(7)及伊/蒙混层矿物结构有序度估算的温 度接近和吻合,因此,式(6)及(2)、式(3)、式(7)计算 结果及伊/蒙混层矿物结构有序度估算的温度可能更 可信,式(4)、式(5)计算温度可能偏高。

将式(2)、式(3)、式(6)、式(7)计算结果及伊/蒙 混层矿物结构有序度估算的温度综合考虑,分析锌 厂沟剖面筇竹寺组泥页岩经历的最大古地温介于 200℃~227.57℃,并未经历太高的古地温。该区寒 武系一下白垩统均为整合或平行不整合接触,奥陶 系一志留系受黔中隆起影响部分缺失,地层序列为 连续的沉积或水平抬升;下白垩统与新近系之间为 角度不整合接触,盖层褶皱之后,地表再次下降接受 新近系沉积;之后,地表抬升至现今形态,因此,早白 垩世—新近纪为最大埋深期。根据该区奥陶—志留 系部分缺失及其余地层厚度<sup>①</sup>,按地表平均温度 20℃<sup>166</sup>估算,该区筇竹寺组早白垩世—新近纪最大 埋深期古地温梯度介于2.53~2.91℃/100 m。

## 5.2 极低级变质作用

对极低级变质作用的理解及它与成岩作用和低 级变质作用间界线的认识,目前没有取得共识,而 且,石油地质学者、煤岩地质学者、沉积和岩石学者的 理解,也相差甚远,所用术语也极不统一,如晚成岩作 用(带)、埋藏变质作用(带),及上述低级近变质作用 (带)、高级变质作用(带)、近变质作用(带)、浅变质作 用(带)等。但成岩阶段一极低级变质一浅变质作用 是个连续的过程,在岩石类型、黏土矿物组成、岩石结 构构造特征、镜质体反射率等方面呈连续的变化,因 此,可根据连续变化特点,选择代表性学者研究成果 开展极低级变质作用及油气地质意义研究。

一般而言,随着变质级的增加,在变质泥岩中出 现二八面体矿物系列,即蒙脱石一伊/蒙混层一伊利 石一白云母,而在变质镁铁质岩石中出现三八面体 系列矿物,即蒙脱石—绿泥石/蒙脱石混层—绿泥石; 高岭石呈高岭石—地开石—叶腊石的变化;其他标 志也同步变化,微构造由S<sub>0</sub>层理发展为S<sub>1</sub>面理;岩石 类型由页岩、泥岩变化为笔状构造泥岩、瓦板岩、千 枚岩;镜质体反射率由0.5%经2%增至4%。

Frey et al.<sup>99</sup>根据伊利石结晶度、伊/蒙混层中伊利 石的含量、蒙脱石—绿泥石系列的变化、高岭石—叶 腊石系列的变化、岩石类型、微构造特征将成岩阶段 至浅变质阶段划分为早期成岩带、晚期成岩带、低级 近变带、高级近变带、浅变质带。滇东北地区筇竹寺 组伊利石结晶度介于0.24~0.35,伊/蒙混层伊利石含 量 95%, 黏土矿物组合高岭石 0~16%、绿泥石 1%~ 35%、伊利石58%~94%,仍有少量早成岩带一低级近 变带的黏土矿物存在,换算的镜质体反射率2.22%~ 2.65%,岩石为泥质粉砂岩,未出现置换性面理S<sub>1</sub>,根 据Frey et al.<sup>19</sup>的研究,将其划分在低级近变带一高级 近变带。索书田等四将成岩阶段一浅变质阶段划分 为沸石相(<200 ℃)、葡萄石--绿纤石相(200 ℃~ 370 ℃)、绿片岩相(>370 ℃),本次计算筇竹寺组经 历的最大古地温为200 ℃~227.57 ℃,属葡萄石一绿 纤石相。而按照毕先梅等<sup>[32]</sup>、Frev<sup>16</sup>伊利石结晶度及 镜质体反射率的划分,则属极低级变质A带-B带、 近变质带,岩石未达到浅变质阶段。

### 5.3 油气地质意义

滇东北昭通地区筇竹寺组烃源岩镜质体反射率 (R<sub>0</sub>)介于2.22%~2.65%,处于近变质带及干气阶段, 明显低于扬子东南缘(R\_介于3.18%~3.43%)<sup>[16]</sup>及海 相干酪根天然气生成成熟度上限(R=3%);显示其经 历的最大古地温(200℃~227.57℃)也低于扬子东南 缘筇竹寺组经历的最高古地温(211 ℃~246 ℃)<sup>166</sup>及 烃类生烃死亡温度(230 ℃~300 ℃)<sup>[31]</sup>,表明该区烃源 岩可能尚具微弱的生烃能力,这和扬子其他地区截 然不同的。筇竹寺组(牛蹄塘组)烃源岩的研究,目 前更多地集中在扬子东南缘,对于滇东北这套较低 成熟度的烃源岩,目前尚未予以应有的关注。该区 晚侏罗世一古近纪最大埋深期古地温梯度介于 2.53~2.91 ℃/100m,与扬子东南缘这一时期古地温梯 度(2.61 ℃/100m)接近<sup>[16]</sup>,滇东北地区现今地温梯度 (2.10 ℃/100m)<sup>[38]</sup>,其古地温梯度的变化显示滇东北 地区晚侏罗世—古近纪古地温梯度高于现今地温梯 度。该区烃源岩成熟度及经历的古地温较低,或与 该区处于黔中隆起,奥陶纪一志留纪部分地层缺失、 盖层总厚度减少以及筇竹寺组最大埋深减少、经历 的最大古地温和烃源岩热演化降低有关。

该区新近系茨营组与下白垩统之间为角度不整 合接触,震旦系一下白垩统盖层褶皱及断裂系统在 晚燕山期一早喜山期形成,是区内最强烈的一次构 造运动。褶皱作用导致圈闭的形成,断裂的疏导和 破坏可导致油气的运移、调整、散失和破坏,并可能 造成油气藏的破坏,在地表形成一些古油藏。值得 关注的是,滇东北地区褶皱及断裂系统目前未有筇 竹寺组古油藏的发现和报道,明显不同于扬子东南 缘断裂已破坏油气藏,有麻江、金沙岩孔众多下古生 界古油藏分布的特点。这是否意味着该区构造作用 较弱,筇竹寺组有较好的构造保存条件? 滇东北地 区筇竹寺组是康滇古陆东缘寒武纪初期海侵沉积, 处于由凹陷向隆起的过渡地带,是油气生成和运移 的有利指向区,具有油气生成基础和物质条件。同 时,按不同学者划分方案分别属于极低级变质A 带---B带、近变质带、低级近变带--高级近变带、葡萄 石一绿纤石相。滇东北筇竹寺组烃源岩具较低成熟 度,经历的最大古地温较低,未达到浅变质阶段,对 于油气藏和圈闭可能尚具较弱的补给能力,但其较 好的构造保存条件及有利的油气运移指向区,使得 这一地区筇竹寺组的勘探前景值得关注。

此次极低级变质作用及古地温和地温梯度的研究,为该区筇竹寺组油气成藏史的研究奠定了一定的基础。未来可开展滇东北其他烃源岩地层古地温研究,获取其经历的最大古地温及各时代古地温梯度,并结合本文的研究和各时代地层厚度、古水深、剥蚀量,建立该区筇竹寺组沉降史、热史及生烃史。综合构造演化历史,分析油气生成、调整、运移、破坏等成藏史,预测油气发生、发展规律。

# 6 结论

(1) 滇东北地区筇竹寺组泥页岩黏土矿物主要为伊利石,少量绿泥石、伊/蒙混层矿物、蒙脱石及高岭石。伊/蒙混层矿物中伊利石含量达95%。自生伊利石及伊/蒙混层矿物中伊利石结晶度介于0.24~0.35;由沥青反射率计算的烃源岩镜质体反射率(*R*。)介于2.22%~2.65%,低于扬子东南缘(*R*。介于3.18%~3.43%)及海相干酪根天然气生成成熟度上限(*R*。=3%)。该区部分烃源岩尚具微弱的生烃能力。

(2) 滇东北地区筇竹寺最高古地温确定在 200 ℃~227.57 ℃,低于扬子东南缘(211 ℃~246 ℃) 及烃类死亡最高温度(230 ℃~300 ℃),部分烃源岩 尚具微弱生烃能力。该区晚早白垩世至新近纪最大 埋深期古地温梯度介于2.53~2.91 ℃/100 m。筇竹寺 组经历的最高古地温低于扬子东南缘,古地温梯度 与扬子东南缘接近。

(3) 滇东北地区筇竹寺组可分别划分为极低级 变质A带—B带、近变质带、低级近变带—高级近变 带、葡萄石—绿纤石相,岩石均未达到浅变质阶段。

(4)研究区筇竹寺组经历的最高古地温较低与 位于黔中隆起北缘奥陶系一志留系部分沉积缺失、 盖层总厚度及经历的最大埋深降低有关。筇竹寺组 沉积处于由凹陷向隆起过渡的有利指向区,经历了 较低的最高古地温和极低级变质作用,具较低的成 熟度,具有油气形成的条件和物质基础,无破坏性古 油藏显示,构造保存条件较好,滇东北筇竹寺组的油 气远景应予以关注。

### 参考文献(References)

- [1] 沈其韩,耿元生,宋会筷.加强极低级变质作用研究[J]. 岩石矿 物学杂志,2018,37(2):342-348. [Shen Qihan, Geng Yuansheng, Song Huixia. Strengthening the study of very low-grade metamorphism[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2018, 37(2): 342-348. ]
- [2] 汤艳,张云鹏,齐先茂,等. 很低级变质作用研究及其在沉积盆 地中的应用[J]. 岩石矿物学杂志,2015,34(3):353-364. [Tang Yan, Zhang Yunpeng, Qi Xianmao, et al. A study of the very lowgrade metamorphism and its application to the sedimentary basin [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2015, 34(3): 353-364. ]
- [3] Jiang W T, Peacor D R, Essene E J. Clay minerals in the Macadams Sandstone, California: Implications for substitution of H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> and H<sub>2</sub>O and metastability of illite[J]. Clays and Clay Minerals, 1994, 42(1): 35-45.
- [4] Essene E J, Peacor D R. Clay mineral thermometry: A critical perspective[J]. Clays and Clay Minerals, 1995, 43(5): 540-553.
- [5] 胡大千,韩春元,马瑞,等.内蒙古锡林郭勒地区上古生界极低 级变质作用:伊利石和镜质体反射率的证据[J]. 岩石学报, 2012,28(9):3042-3050. [Hu Daqian, Han Chunyuan, Ma Rui, et al. The very low grade metamorphism in the Upper Paleozoic in Xinlingol area of Inner Mongolia, NE China: Evidence from studies of illite and vitrinite reflectance[J]. Acta Perologica Sinica, 2012, 28(9): 3042-3050.]
- [6] Frey M. Very low-grade metamorphism of clastic sedimentary rocks[M]//Frey M. Low temperature metamorphism. Glasgow: Blackie and Son Ltd., 1987: 9-58.

- [7] Pollastro R M. The illite/smectite geothermometer-concepts, methodology, and application to basin history and hydrocarbon generation[M]//Nuccio V F, Barker C E. Applications of thermal maturity studies to energy exploration. Rocky Mountain Section: SEPM, 1990: 1-18.
- [8] Huang W L, Longo J M, Pevear D R. An experimentally derived kinetic model for smectite-to illite conversion and its use as a geothermometer[J]. Clays and Clay Minerals, 1993, 41(2): 162-177.
- [9] Frey M, Robinson D. Low-grade metamorphism[M]. Oxford: Blackwell Science, 1999: 10-26.
- [10] Kübler B. La cristallinité de l'Ilite et les zones tout à fait supérieures du métamorphism[M]//de la Baconnière. Etages tectoniques, colloque de neuchâtel 1966. Neuchâtel, Switzerland: Université Neuchátel, à la Baconnière, 1967: 105-121.
- [11] Kübler B. Anchimétamorphisme et schistosité[J]. Bull Centre Rech Pau-SNPA, 1967, 1: 259-278.
- [12] Kübler B. Evaluation quantitative du métamorphisme par la cristallinité de l'illite[J]. Bull Centre Rech Pau-SNPA, 1968, 2: 385-397.
- Barker C E, Pawlewicz M J. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter[M]// Buntebarth G, Stegena L. Paleogeothermics: Evaluation of geothermal conditions in the geological past. Berlin: Springer, 1986: 79-93.
- [14] Barker C E, Pawlewicz M J. Calculation of vitrinite reflectance from thermal histories and peak temperatures: A comparison of methods[M]//Mukhopadhyay P K, Dow W G. Vitrinite reflectance as a maturity parameter: Applications and limitations. Washington: American Chemical Society, 1994: 216-229.
- [15] Stasiuk L D, Lockhart G D, Nassichuk W W, et al. Thermal maturity evaluation of dispersed organic matter inclusions from kimberlite pipes, Lac de Gras, Northwest Territories, Canada[J]. International Journal of Coal Geology, 1999, 40(1): 1-25.
- [16] 杨平,谢渊,汪正江,等. 黔北震旦系灯影组流体活动与油气成藏期次[J]. 石油勘探与开发,2014,41(3):313-322,335.
  [Yang Ping, Xie Yuan, Wang Zhengjiang, et al. Fluid activity and hydrocarbon accumulation period of Sinian Dengying Formation in northern Guizhou, South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 313-322, 335.]
- [17] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京:地质出版 社,1982:18-23. [Yunnan Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Yunnan province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982:18-23. ]
- [18] 刘建清,何利,陈风霖,等. 滇东北盐津地区中三叠统关岭组 底部绿豆岩年代学及地球化学研究[J]. 岩石学报,2021,37 (7):2245-2255. [Liu Jianqing, He Li, Chen Fenglin, et al. Studies on the chronology and geochemistry of the green pisolites at the bottom of the Middle Triassic Guanling Formation in Yanjin area, northeastern Yunnan province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(7): 2245-2255.]

- [19] 刘建清,何利,何平,等. 康滇古陆东缘筇竹寺组地球化学特 征及意义:以云南省昭通市昭阳区锌厂沟剖面为例[J]. 沉积学 报,2021,39(5):1305-1319. [Liu Jianqing, He Li, He Ping, et al. Geochemical characteristics and significance of the Qiongzhusi Formation on the eastern margin of the ancient Kangding-Yunnan Land: Taking the Xinchanggou section of Zhaoyang district, Zhaotong city, Yunnan province as an example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(5): 1305-1319. ]
- [20] 赵明,陈小明,季峻峰,等.山东昌潍古近系原型盆地粘土矿物的成岩演化与古地温[J]. 岩石学报,2006,22(8):2195-2204.
  [Zhao Ming, Chen Xiaoming, Ji Junfeng, et al. Diagenetic and paleogeothermal evolution of the day minerals in the Paleogene Changwei prototype basin of Shandong province, China
  [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2195-2204.
- [21] 冯增昭. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社,1982:6.
   [Feng Zengzhao. Sedimentary petrology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982:6.]
- [22] 古伟,陈义才,王长城,等. 川东涪陵地区长兴组烃源岩地球 化学特征及生烃能力评价[J]. 天然气勘探与开发,2013,36
  (2):23-53. [Gu Wei, Chen Yicai, Wang Changcheng, et al. Geochemical characteristics of source rock in Changxing Formation and its hydrocarbon-generating potential, Fuling area, eastern Sichuan[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2013, 36(2): 23-53. ]
- [23] 刘德汉,史继扬. 高演化碳酸盐烃源岩非常规评价方法探讨 [J]. 石油勘探与开发,1994,21(3):113-115. [Liu Dehan, Shi Jiyang. Discussion on unconventional evaluation methods of highly evolved carbonate source rocks[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(3): 113-115. ]
- [24] Nadeau P H, Reynolds Jr C R. Burial and contact metamorphism in the Mancos shale[J]. Clays and Clay Minerals, 1981, 29(4): 249-259.
- [25] Hoffman J, Hower J. Clay mineral assemblages as low grade metamorphic geothermometers: Application to the thrust faulted disturbed belt of Montana, U. S. A. [M]//Schoole P A, Schluger P R. Aspects of diagenesis. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1979: 55-79.
- [26] Jennings S, Thompson G R. Diagenesis of Plio-Pleistocene sediments of the Colorado River Delta, southern California[J]. Journal of Sedimentary Research, 1986, 56(1): 89-98.
- [27] Harvey C C, Browne P R L. Mixed-layer clay geothermometry in the Wairakei geothermal field, New Zealand[J]. Clays and Clay Minerals, 1991, 39(6): 614-621.
- [28] 王强.粘土矿物地温计研究与应用[D]. 青岛:中国石油大学 (华东), 2004:9. [Wang Qiang. Clay minerals research and application: As geothermometers[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2004: 9. ]
- [29] Chi Ma, Browne P R L. Alteration mineralogy of sediments in the Huka Falls Formation of the Te Mihi area, Walrakel[C]//Proceedings of the 13th Zealand geothermal workshop. Wairakei,

1991: 185-191.

- [30] 王丹萍,杨风丽,江裕标,等.粘土矿物地温计在沉积盆地热演化研究中的应用[J].四川地质学报,2010,30(3):351-355.
  [Wang Danping, Yang Fengli, Jiang Yubiao, et al. The application of clay mineral geothermometer to the study of sedimentary basin thermal evolution[J]. Sichuan Geological Journal, 2010, 30 (3): 351-355.]
- [31] Weaver C E. Possible uses of clay minerals in search for oil[J]. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 1960, 44(9): 1505-1508.
- [32] 毕先梅,莫宣学.成岩—极低级变质—低级变质作用及有关 矿产[J].地学前缘,2004,11(1):287-294. [Bi Xianmei, Mo Xuanxue. Transition from diagenesis to low-grade metamorphism and related minerals and energy resources[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 287-294. ]
- [33] Chi Ma, Browne P R L, Harvey C C. Crystallinity of subsurface clay minerals in the Te Mihi sector of Wairakei geothermal system, New Zealand[C]//Proceedings of the 14th New Zealand geothermal workshop. Wairakei, 1992: 267-272.
- [34] 陈建平,赵文智,王招明,等.海相干酪根天然气生成成熟度 上限与生气潜力极限探讨:以塔里木盆地研究为例[J].科学通 报,2007,52(增刊1):95-100.[Chen Jianping, Zhao Wenzhi,

Wang Zhaoming, et al. Upper limit of maturity and hydrocarbon generation potential of marine kerogen natural gas: Take the Tarim Basin as an example[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(Suppl. 1): 95-100. ]

- [35] Barker C E, Goldstein R H. Fluid-inclusion technique for determining maximum temperature in calcite and its comparison to the vitrinite reflectance geothermometer[J]. Geology, 1990, 18 (10): 1003-1006.
- [36] Mullis J, Wolf M, Ferreio M, et al. Temperature determination through fluid inclusion microthermometry and vitrinite reflectance values in the Diagenetic-and Anchi–Zones. Conf. Abstr. [C]//EUG XI. Strassbourg, 2001: 30.
- [37] 索书田,游振东,周汉文.极低级变质作用和极低级变质带综述 [J]. 地质科技情报,1995,14(1):1-8. [Suo Shutian, You Zhendong, Zhou Hanwen. Very-low-grade metamorphism and metamorphic belt: A review[J]. Geological Science and Technology Information, 1995, 14(1):1-8.]
- [38] 袁玉松,马永生,胡圣标,等.中国南方现今地热特征[J].地球 物理学报,2006,49(4):1118-1126. [Yuan Yusong, Ma Yongsheng, Hu Shengbiao, et al. Present-day geothermal characteristics in South China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49 (4):1118-1126.]

# Extremely Low Grade Metamorphism and Paleotemperature of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Northeastern Yunnan Province: Evidence from illite and vitrinite reflectance

LIU JianQing, ZHAO Zhan, HE Li, LU JunZe, RAN Jing, HU ZhiZhong

Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of the Southwest China), Chengdu 610213, China

Abstract: [Objective] The extremely low grade metamorphism is in the evolution stage of petroleum, wet gas, dry gas and peat, bituminous coal, and anthracite and is closely related to paleotemperature. Therefore, the study of extremely low grade metamorphism and paleotemperature is of great practical significance for the exploration of energy resources such as oil, gas, and coal. Compared with the Longmaxi Formation shale gas, the study of which has led to exploration breakthroughs, the lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale has higher organic matter abundance and thermal evolution in the Upper Yangtze region. Furthermore, the Qiongzhusi Formation has a larger sedimentary thickness and wider distribution area compared with the Longmaxi Formation; therefore, it has huge shale gas exploration potential. It is another key shale gas exploration and development layer in China. At present, there has been no systematic study on the extremely low grade metamorphism and paleotemperature of this high maturity source rock in the Qionghzhusi Formation. It is necessary to reveal the technical parameters such as paleotemperature and its influence on oil and gas accumulation. [Methods] Based on profile measurements, a study on the ultralow grade metamorphism and paleotemperature of Qiongzhusi Formation in northeast Yunnan was conducted for the first time with the mineral structure order degree, crystallinity degree of illite, and vitrinite reflectance of source rocks. [Results] (1) The illite content in the illite/Mongolian mixed layer is 95%. The crystallinity of illite in authigenic illite and Illite/Mengzi mixed layer minerals ranges from 0.24 to 0.35. The vitreous reflectance (Ro) of source rocks calculated by bitumen reflectance is between 2.22%-2.65%, lower than that of the southeastern margin of the Yangtze region (the vitrinite reflectance, Ro, in this area was calculated by the asphalt reflectance between 3.18%-3.43%) and the upper limit of maturity for marine kerogen gas generation (vitrinite reflectance  $R_{2}$  3%); (2) The maximum palaeotemperature of the Qiongzhusi Formation in northeastern Yunnan ranged from 200 to 227.57 °C, lower than that of the southeastern margin of the Yangtze River (211 °C-246 °C) and the maximum hydrocarbon death temperature (230 °C -300 °C ). The paleotemperature gradient from the Early Cretaceous to Neogene maximum burial depth ranged from 2.53-2.91 °C / 100 m, close to the southeastern margin of the Yangtze. (3) Based on the comprehensive classification standard and scheme of metamorphism, the Qiongzhusi Formation in northeastern Yunnan belonged to lower metamorphic zone A-B, near metamorphic zone, and lower near metamorphic zone to high near metamorphic zone, and belonged to the Vitiite-chlorospar facies. The Qiongzhusi stage in northeastern Yunnan province was in the favorable transition from sedimentary sag to uplift. [Conclusions] The Qiongzhusi Formation experienced a lower highest paleotemperature and maturity. In addition, the maturity of organic matter in the Qiongzhusi Formation in northeastern Yunnan province was lower than that in other parts of the Yangtze region, with hydrocarbon formation conditions and material basis. At present, no paleooil reservoir has been found, and the structural preservation conditions were good. The oil and gas prospect of the Qiongzhusi Formation in northeastern Yunnan should be given significant attention.

**Key words**: northeastern Yunnan; Qiongzhusi Formation; illite; vitrinite reflectance; ultralow grade metamorphism; paleogeotemperature