第63卷　第3期　地　质　论　评　GEOLOGICAL REVIEW　Vol. 63　No. 3
2017年5月　May　2017

川中地区须家河组自生绿泥石成分演化及其形成温度计算

戴朝成[1,2]，刘晓东[1]，饶强[1]，张怀胜[1]

1)东华理工大学地球科学学院，南昌，330000；2)东华理工大学核资源与环境重点实验室，南昌，330000

内容提要：四川盆地川中地区上三叠统须家河组砂岩中自生绿泥石广泛发育，近年来，绿泥石的特征、化学组成、形成温度、与储层之间的关系等方面研究在地学中越来越受到重视。针对该地区自生绿泥石，本文在详细野外地质调查的基础上，通过电子探针、扫描电镜、X-衍射等测试方法，结果表明须家河组主要有蠕绿泥石、铁绿泥石、铁镁绿泥石、假鳞绿泥石等；埋藏深度由浅至深，绿泥石种属主要表现为由蠕绿泥石向铁镁绿泥石种属转变，经计算绿泥石形成温度在157～231℃之间，古地温梯度为34℃/km，经过和前人研究成果相对比，得出经砂岩中自生绿泥石所计算的古地温可靠性高。川中地区古地温明显比现今温度高的多，高古地温促进致密化作用的化学过程，同时有机质从固态的Ⅲ型干酪根热解生成以CH_4为主的气态烃，该地区须家河组存在大量油气田，高的古地温也应是其形成的一个重要因素。

关键词：四川盆地；上三叠统须家河组；自生绿泥石；成分演化；古地温

绿泥石广泛存在于各种岩石和地质环境中，它既是低级变质岩、热液蚀变岩中的主要矿物之一（Deer et al.，1962；De Caritat et al.，1993；Xie，1997；杨超等，2015；夏菲等，2016），也是沉积岩中的常见产物之一（潘燕宁等，2001），绿泥石广泛分布于国内外不同构造背景下含油气盆地中，特别是在中新生代陆相含油气盆地的储层砂岩中呈孔隙环边衬里产出（黄思静等，2004；田建锋等，2008）。前人通过对各种地热体系、热液体系中绿泥石的研究，总结出了利用绿泥石的成分和结构的变化特征来估算其形成时的物理化学条件的经验公式，并建立了一系列的定量研究模型（Cathelineau et al.，1985，1988；Bryndzia et al.，1987；Bevins，1991；Stefano，1999；Jeffry，2001；Tóth，2007；Gould et al.，2010），如MacDowell（1980）和Jahren（1989）研究表明随着成岩深度增加，绿泥石中的（$Si^{Ⅳ}$）减少且（$Al^{Ⅳ}$）增加，并表现出良好的相关性。在这些温度计中，绿泥石成分温度计以其简单易行的特点受到广大地质学者的欢迎。绿泥石的特征、化学组成及温度研究在沉积盆地热演化、储层预测、矿床成因等方面的研究中正发挥着越来越重要的作用（李忠等，2000；Ji et al.，2001；Jeffry，2001；黄思静等，2004；赵明等，2007a；Zhao et al.，2007b；Klein et al.，2007；张展适等，2007）。然而其适用性仍存在一些争议。因为在不同的地质环境中，绿泥石的化学成分变化较大。影响绿泥石化学成分的物理化学参数主要有温度、氧逸度、水溶液pH值、全岩Fe/(Fe＋Mg)等。因此部分学者提出需对绿泥石地质温度计进行Fe/(Fe＋Mg)校正（Stefano，1999）。

四川盆地的构造、地层、沉积、地球化学及油气等方面前人曾做了大量的研究（郑荣才等，2009；张研等，2015；邓祖林等，2016；冯动军等，2016；魏祥峰等，2017），该盆地中部地区上三叠统须家河组砂岩中发育有大量自生绿泥石（兰大樵等，2002；李士祥等，2007；Peng Jun et al.，2009；朱如凯等，2009；谢继容等，2009；谢武仁等，2010；戴朝成等，2011），前人研究主要集中在绿泥石形成与储层利害关系上，而针对绿泥石分布区域性、绿泥石成分演化特征、绿泥石对该沉积盆地热演化的示踪研究相对薄弱，鉴于此，本文通过岩石薄片、扫描电镜、X衍射和电子探针等手段，对四川盆地川中地区须家河组纵横向上绿泥石种属、赋存状态和形成机制进行研究，分析成岩作用过程中绿泥石形成时的物理化学环境，探讨绿泥石形成时成岩流体性质、古地温梯度，为盆地热

注：本文为国家自然科学青年基金资助项目（编号：41402085）和核资源与环境重点实验室开放基金项目（编号：NRE1403）的成果。

收稿日期：2016-09-04；改回日期：2017-04-22；责任编辑：刘志强。Doi：10.16509/j.georeview.2017.03.021

作者简介：戴朝成，男，1980年生。博士，讲师，主要从事沉积学研究。Email：daichaocheng@qq.com。

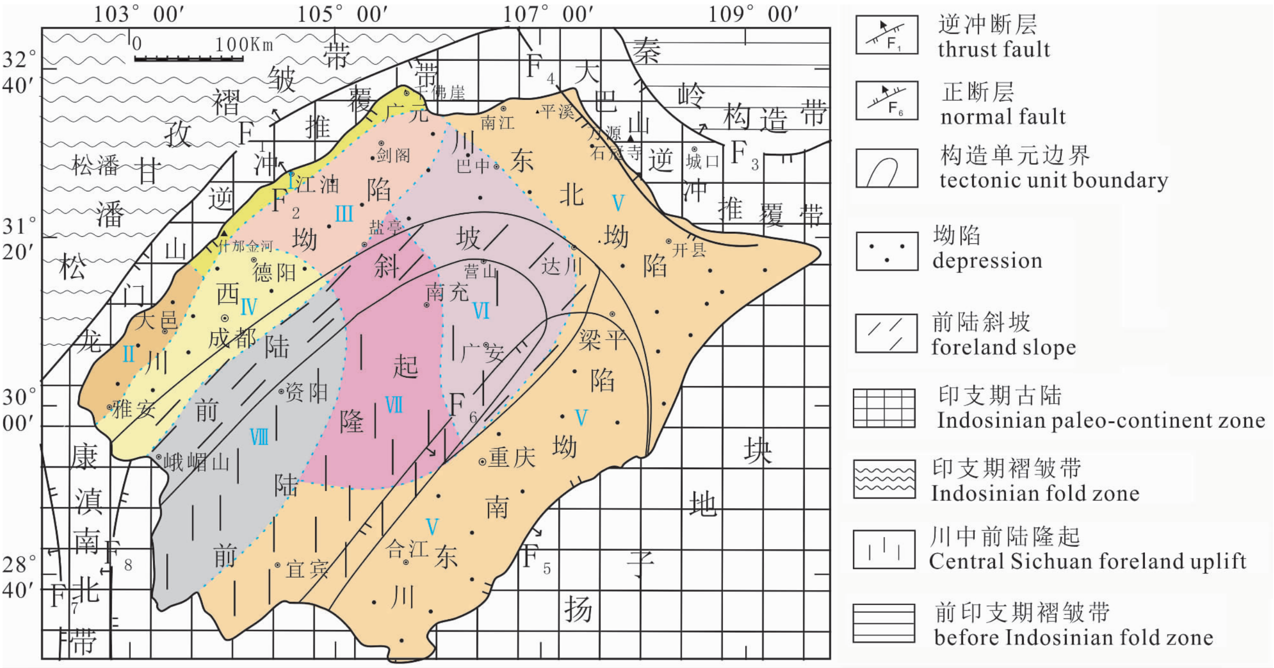

图 1 四川前陆盆地构造简图及须家河组成岩相展布（底图据郑荣才等，2009）

Fig. 1 Simplified geological map of Sichuan foreland basin and diagenetic facies map of Xujiahe Formation (base map from Zheng Rongcai et al., 2009&)

Ⅰ—压实—破裂—钙质—硅质胶结成岩相；Ⅱ—压实—破裂—钙质胶结成岩相；Ⅲ—绿泥石环边胶结—自生石英成岩相；Ⅳ—压实—自生石英成岩相；Ⅴ—强压实—硅质胶结成岩相；Ⅵ—绿泥石环边胶结成岩相；Ⅶ—绿泥石环边胶结—次生溶孔成岩相；Ⅷ—压实—硅质胶结成岩相

Ⅰ—diagenetic facies of compaction—fracture—calcium—silica cement; Ⅱ—diagenetic facies of compaction—fracture—calcium cement; Ⅲ—diagenetic facies of chlorite cement — authigenic quartz; Ⅳ—diagenetic facies of compaction— authigenic quartz; Ⅴ—diagenetic facies of intense compaction— siliceous cement; Ⅵ—diagenetic facies of chlorite cement; Ⅶ—diagenetic facies of chlorite cement—secondary pore; Ⅷ—diagenetic facies of compaction—siliceous cement

演化和储层预测提供依据。

1 地质背景

四川盆地现今的构造格局于印支运动后期开始出现雏形，经燕山至喜马拉雅运动的多次叠加改造后才得以定形（郭正吾等，1996；郑荣才等，2009），以龙门山断裂为西界、七曜山断裂为东界、城口断裂为北界、峨眉－瓦山断裂为南界的菱形构造兼地貌盆地，面积约 $18\times10^4\mathrm{km}^2$。已有研究成果业已证明该盆地是位于扬子地块西部的一个多旋回构造叠合盆地，在中三叠世末发生的印支早幕构造运动中，由构造挤压使扬子地块西部西缘和北缘开始缓慢上升，从岛链逐渐演化为强烈逆冲推覆的造山带（童崇光，1985；邓康龄，1992）。晚三叠世初期，组成四川前陆盆地沉积基底的中、下三叠统海相碳酸盐岩和盐层发生构造隆升和遭受强烈剥蚀（赵霞飞等，2013；周家云等，2015；周训等，2015；龚大兴等，2015；罗良等，2015），在结束上扬子地块被动大陆边缘盆地海相沉积史的同时，于晚三叠世早期逐渐进入挤压构造背景条件下的陆内汇聚盆地，相继发生晚三叠世马鞍塘组、小塘子组和须家河组由海相到陆相的沉积超覆作用，并延续到早侏罗世—晚白垩世的红层碎屑岩建造（郭正吾等，1996）。川中地区位于四川前陆盆地中部隆起带，呈“∩”形鼻状沿资阳—营山—广安—宜宾分布（图 1）。该地区须家河组地层厚近千米至数千米，岩性为砾岩、含砾砂岩、砂岩、粉砂岩和泥岩夹煤层组合，自下而上可划分为须二段至须六段（$T_3x^2\sim T_3x^6$）5 个岩性段，其中须二、须四、须六段以三角洲相的砂岩、砾岩与泥岩不等厚互层为主，为储层发育层位，而须三和须五段以湖泊—沼泽相的大套暗色泥岩夹粉—细粒砂岩组合为主，为烃源岩和区域性盖层（或隔层）发育层位。

据大量薄片和 X 衍射数据表明，四川盆地须家河组砂岩中胶结物主要由石英、绿泥石和方解石组

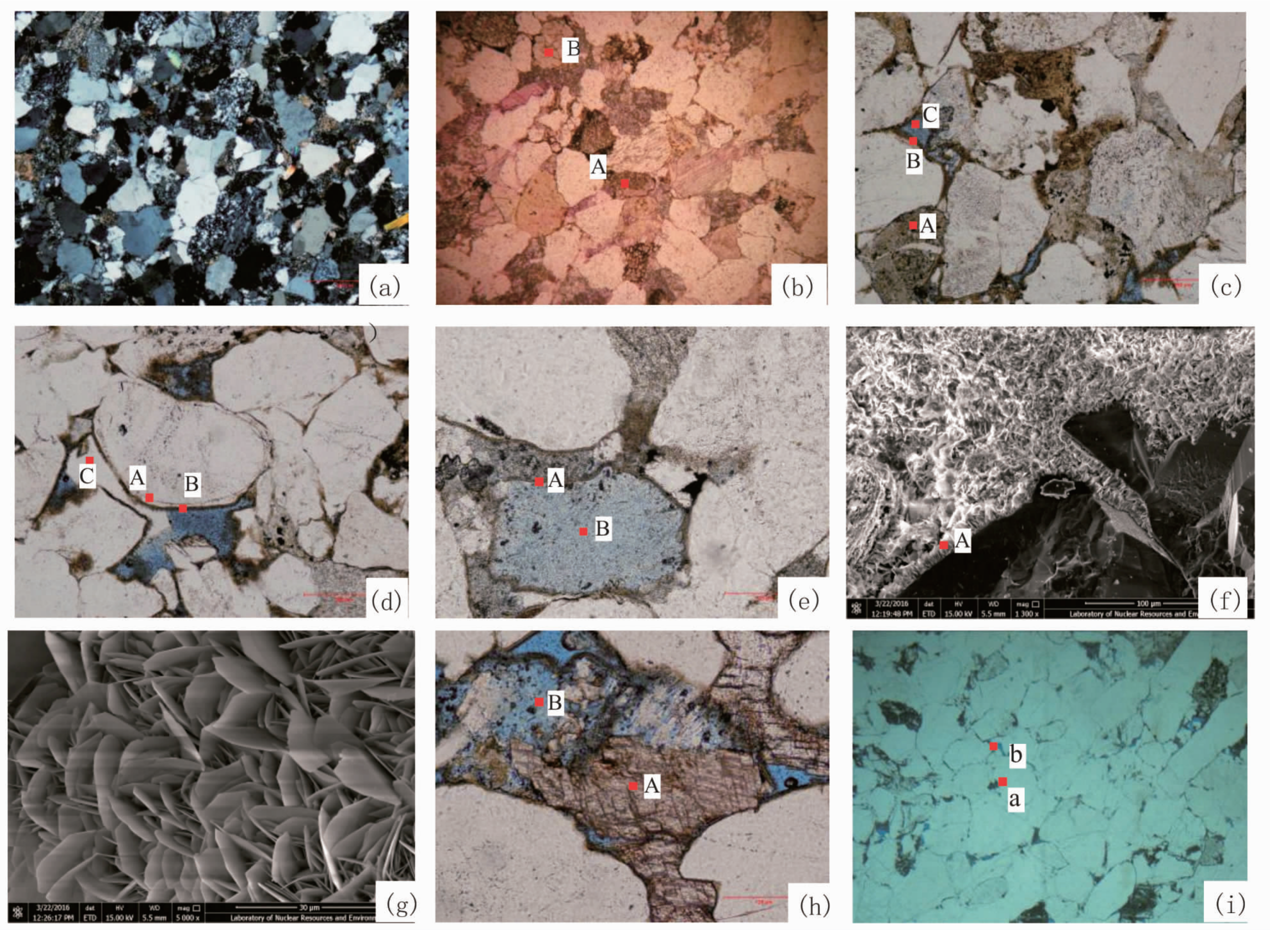

图 2　四川盆地中西部须家河组砂岩显微照片

Fig. 2　Sandstone microscopic photos of Xujiahe Formation in central-west Sichuan Basin

(a)—细粒岩屑石英砂岩，碎屑以点—线接触为主，压实强度中等，安居 1 井，2168. 79 m，T_3x^4；(b)—细粒岩屑砂岩，碎屑以凹凸接触为主，压实强度高，胶结物以方解石为主(A)，可见方解石交代长石现象(B)，狮子山剖面，T_3x^2；(c)—岩屑石英砂岩，具文象结构的花岗岩和玻基斑状结构酸性喷出岩岩屑(A)，见绿泥石包膜(B)及残余原生粒间孔(C)，广安 130 井，2337. 39 m，T_3x^4；(d)—石英的 1 期次生加大(A)，之后为绿泥石包膜的形成(B)，之后为硅质充填残余原生粒间孔(C)，广安 130 井，2309. 48 m，T_3x^4；(e)—绿泥石包膜(A)及长石铸模孔(B)，广安 101 井，2304. 62 m，T_3x^4；(f)—扫描电镜下环边衬里的绿泥石(A)，莲深 101 井，2663. 28 m，T_3x^4；(g)—照片(f)(扫描电镜)局部放大玫瑰花形绿泥石，莲深 101 井，2663. 28 m，T_3x^4；(h)—方解石(A)充填在颗粒溶蚀形成的孔隙中(B)，为晚期方解石胶结，合川 5 井，2105. 2 m，T_3x^4；(i)—中粒石英砂岩，石英次生加大强烈，可见三级加大边(A)，残留少量粒间孔隙(B)，磨 24 井，2017. 94 m，T_3x^4

(a) fine-grained lithic quartz sandstone, the main debris is point to line contact, medium compaction, Anju 1 well, 2168. 79 m, T_3x^4; (b) fine-grained lithic sandstone, the debris is mainly concave to convex contact, high compaction, main cement is calcite(A), calcite can replace feldspar (B), Lion Mountain profile, T_3x^2; (c) lithic quartz sandstone, debris of graphic texture granite and acid extrusive rock(A), chlorite coatings(B) and residual primary intergranular pore(C), Guangan 130 well, 2337. 39 m, T_3x^4; (d) 1 phase secondary enlargement of quart(A), then chlorite coatings formation(B), siliceous filled in residual primary intergranular pore(C), Guangan 130 well, 2309. 48 m, T_3x^4; (e) chlorite coatings (A) and feldspar moldic pore(B), Guangan 101 well, 2304. 62 m, T_3x^4; (f) chlorite coatings in scanning electron microscope (A), Lianshen 101 well, 2663. 28 m, T_3x^4; (g) rosettes chlorite, local magnification of Photo (f), Lianshen 101 well, 2663. 28 m, T_3x^4; (h) calcite(A) filled in pores of particle dissolution(B), it is late calcite cementation, Hechuan 5 well, 2105. 2 m, T_3x^4; (i) medium-grain quartz sandstone, secondary outgrowth cementation of quartz is intense(A), only a few intergranular pore retains, Mo 24 well, 2017. 94 m, T_3x^4

成(表 1)，其中川西坳陷主要为方解石胶结；川中隆起则主要为绿泥石胶结；而川东北和川东南坳陷以石英胶结为主。胶结物由早到晚形成的相对顺序：方解石→石英Ⅰ期加大→一世代绿泥石→二世代绿

泥石→石英Ⅱ期加大→石英Ⅲ期加大。在成岩矿物研究基础上，将四川盆地须家河组成岩相大体划分为压实—破裂—胶结成岩相组合、压实成岩相组合、胶结—溶蚀成岩相组合（张响响，2011；戴朝成，2011），每个成岩相组合根据填隙物和孔隙发育特征可再细分成 8 种不同类型（图 1）：①压实—破裂—钙质—硅质胶结成岩相；②压实—破裂—钙质胶结成岩相；③绿泥石环边胶结—自生石英成岩相；④压实—自生石英成岩相；⑤压实成岩相；⑥绿泥石环边胶结成岩相；⑦绿泥石环边胶结—次生溶孔成岩相；⑧压实—硅质胶结成岩相，本次工作选取绿泥石环边胶结较为发育的川中地区为研究对象。

2 岩石学特征

川中地区须家河组砂岩为一套成分成熟度较低而结构成熟度较高的陆源碎屑岩，成分成熟度较低表现在石英含量较低，而长石、岩屑颗粒含量较高（图 2a、b），成分成熟度指数（Q/F + R）一般在 1.5 ~4.0 之间，少数可达 6.0 ~7.0。结构成熟度较高表现在碎屑颗粒分选、磨圆较好，杂基含量较少（谢继容等，2009）。石英含量一般在 30.0% ~70.0% 之间，平均 58.0%。以单晶石英为主，另有少量多晶石英和燧石；长石含量一般在 0 ~15.0% 之间，平均为 8.0%，总体上含量较低。岩屑含量较高，一般在 8.0% ~60.0% 之间，平均 21.0%，组分复杂，包括火成岩、变质岩、沉积岩三大类岩石均有特点。

须家河组砂岩中的填隙物由胶结物和杂基组成，常见胶结物有 3 类，其一为环边衬里产出自生绿泥石，这种绿泥石的产出状态具有如下几个特点：①在颗粒接触处，通常缺乏绿泥石胶结物，颗粒的接触关系主要为点接触和线接触（图 2c、d）；②这种孔隙环边衬里的绿泥石通常是定向的和近于等厚的（图 2e、f、g）；③在绿泥石胶结作用发生的地方，很少有自生石英的生长，更没有石英胶结物在绿泥石环边胶结物之上生长的现象；④绿泥石沉淀后会继续生长，因而在不同时间生长的绿泥石可具有不同的元素构成，呈现出不同世代绿泥石成分上具有一定差异（黄思静等，2004），相对早期的绿泥石较为富铁，而相对晚期的绿泥石铁含量相对较低，Fe/Mg + Fe 比值逐渐降低特点。根据川中地区砂岩样品 X 衍射分析结果（表 1），绿泥石含量介于 1.0% ~8.4% 之间，平均值为 3.2%。其二为方解石，一般发育有方解石胶结物的砂岩中孔隙大多数被完全充填（图 2h），方解石含量 0 ~12.4%，平均值为 1.8%；其三为石英，在须家河组须二段、须四段和须六段砂岩中广泛发育，多呈次生加大边形式出现（图 2i），含量 2.0% ~8.0%，须家河组砂岩的致密化，大多数由石英胶结作用形成。

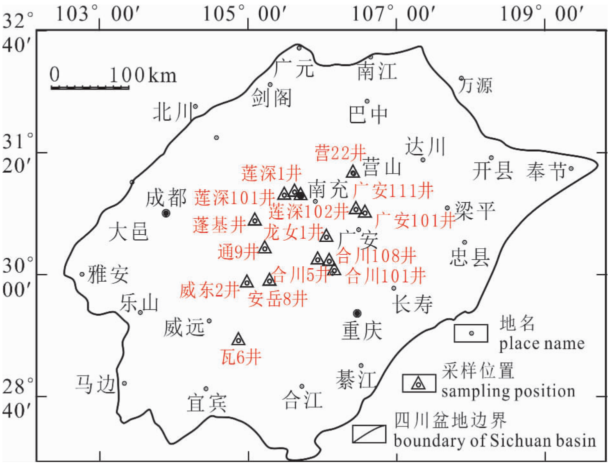

图 3 采样位置分布图（底图据郑荣才等，2009）

Fig. 3 Sampling position distribution map

（base map from Zheng Rongcai et al. , 2009&）

3 样品制备和分析方法

样品采自四川盆地川中地区不同深度钻井岩心（图 3），扫描电镜和电子探针分析均为胶结物中呈环边衬里产出自生绿泥石。扫描电镜在东华理工大学核资源与环境重点实验室完成。X-射线衍射在奥实分析检测（广州）有限公司完成的，其测试条件为 Cu 靶，电压 35 kV，电流 15 mA。另将岩石样品制成探针薄片，绿泥石的化学成分分析在东华理工大学核资源与环境重点实验室的 JEOLJXA-8800M 型电子探针仪器上进行测试，使用的测试标样为美国国家标准局的矿物标样，工作条件为：加速电压 15 kV，探针电流 10 mA，束斑直径 <1 μm。

4 分析结果

由 X 射线衍射分析结果表明川中地区上三叠统须家河组砂岩中各个井位不同深度的各个样品普遍含有绿泥石（表 1），粘土矿物以绿泥石和伊利石为主，高岭石和伊利石/蒙脱石混层相对较少，随深度加深伊/蒙混层逐渐减少，表现出伊/蒙混层向伊利石转化特征，根据矿物的镜下特征和形成深度可推测样品中的绿泥石主要形成于成岩阶段不同期次，环边衬里的绿泥石则为典型成岩阶段自生矿物。

表 1 须家河组砂岩 X 衍射分析数据表(%)

Table 1 X diffraction analysis data of Xujiahe Formation sandstone(%)

样品号	层位	井深(m)	粘土矿物				方解石	白云石	石英	钾长石	斜长石
			绿泥石	高岭石	伊利石	伊/蒙混层					
包浅 001-1	T_3x^6	1458.14	2.7	5.2	2.9	2.4	0	0	68.1	3.8	14.8
莲深 101-4	T_3x^4	2803.38	6.3	0	5.4	1.2	5.5	0	65.6	6.9	9.2
莲深 1-1	T_3x^4	2663.28	8.4	0	2.9	0.4	5.1	0	59.6	9.6	12.9
莲深 1-2	T_3x^4	2680.60	1.4	0.1	2.5	0.3	0.6	0	78.6	6.5	8.6
莲深 1-4	T_3x^4	2695.60	3.6	0.2	0.7	0.2	12.4	0	62.9	8.3	11.4
莲深 102-2	T_3x^4	2704.34	1.0	0.3	4.8	0.5	7.9	0	64.5	8.3	12.1
莲深 102-3	T_3x^4	2719.60	2.1	0.0	1.4	0.3	0.7	0	77.4	7.7	9.6
合川五-3	T_3x^2	2258.41	2.0	0.1	1.4	0.2	0.3	0	70.5	12.2	12.8
合川 101-1	T_3x^2	2072.73	3.0	0.1	5.8	1.5	0 0	0.5	66.6	8.8	13.3
合川 108-2	T_3x^4	2045.20	1.1	0.0	0.7	0.1	0 0	0	84.3	6.5	6.7
合川 109-2	T_3x^2	2231.00	3.6	0.1	3.2	0.5	0.3	0.6	67.5	10.6	13.0
合川 109-3	T_3x^2	2237.40	2.8	0.1	4.3	0.8	0.1	2.4	67.7	9.1	12.0
蓬莱 7-1	T_3x^2	3271.03	2.1	0.1	2.5	0.5	0 0	0	75.0	8.7	10.7
岳 8-1	T_3x^4	2118.39	3.4	0.2	1.3	0.7	0 0	0	77.1	8.5	8.3
营 22-4	T_3x^4	2490.00	1.7	0.1	3.5	0.3	0 0	0	78.5	6.7	8.8
广安 101-2	T_3x^6	2038.01	5.6	0.2	6.2	0.8	0 0	0	62.8	7.1	16.3
广安 101-8	T_3x^4	2289.91	4.8	0.1	1.4	0.1	1.1	0	71.8	7.8	12.2
广安 101-13	T_3x^2	2426.90	5.0	0.2	3.2	0.6	0.7	0	66.2	10.1	13.6
广安 111-1	T_3x^4	2187.42	2.5	0.5	3.5	0.5	0.5	0	71.6	6.6	13.6
通 9-2	T_3x^2	2306.50	1.5	0.0	2.1	0.3	0.6	0	80.8	5.8	8.9

注:样品由奥实分析检测(广州)有限公司完成。

4.1　绿泥石总类和成分演化

绿泥石电子探针成分分析结果见表 2,其成分投影在绿泥石分类图上可得到相应的种类(图 4)。并具有如下规律:因埋藏深度差异,绿泥石种属表现出多样性,主要有蠕绿泥石、铁绿泥石、铁镁绿泥石、假鳞绿泥石等;且同一个井位中,绿泥石分布的深度范围不同,其成分亦存在差异,如莲深 1 井、莲深 102 井中,埋藏深度由浅至深,绿泥石种属主要表现为由蠕绿泥石向铁绿泥石种属转变,这可能与矿物中的 Fe、Mg 含量之间的变化有关。

随着埋藏深度的增加,各井之间的绿泥石成分也有规律的变化,由表 2 可以看出绿泥石成分中的 Si^{4+}、Al^{IV}、Fe^{2+} 特征为:Si^{4+} 的含量随深度加深逐渐减少,而 Al^{IV} 的含量随深度加深逐渐增多,Fe^{2+} 的含量变化不稳定,尤其在埋藏较深的莲深 1 井、莲深 102 井表现明显。

以上离子随深度变化的规律与塔里木沉积盆地中绿泥石成分的变化规律相一致(潘燕宁,2001),Si^{4+} 和 Al^{IV} 离子的含量明显受到温度的制约。

4.2 绿泥石的形成温度

对于绿泥石化学成分地质温度计前人已做了大量的研究,发现在成岩和地热系统中,随着埋藏深度的增加,绿泥石的 Al^{IV} 的含量逐步增加,Si^{IV} 的含量逐步降低。Cathelineau(1985)等通过对墨西哥 LosAzufres 和 Salton Sea 地热体系中绿泥石的系统

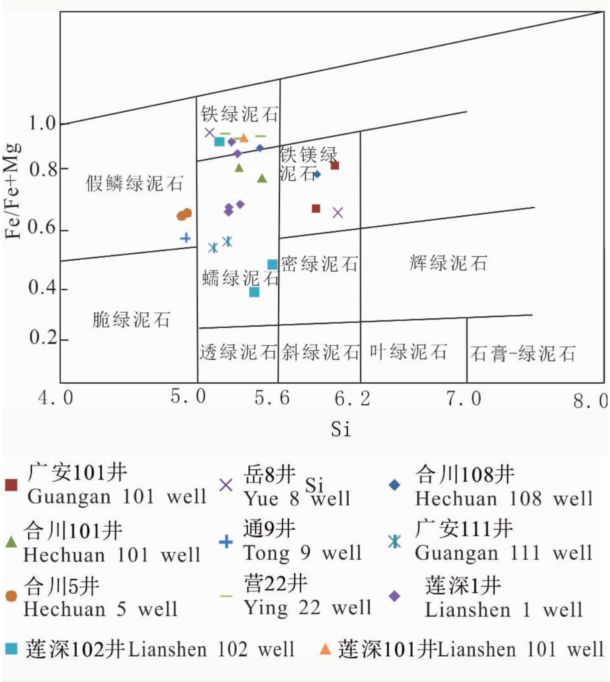

图 4 四川盆地绿泥石的分类图解

Fig 4. Classification diagram of chlorites of Sichuan basin

研究，认为绿泥石的 $\mathrm{Al}^{\mathrm{IV}}$ 与形成温度间存在正相关关系，并提出了可以利用 $\mathrm{Al}^{\mathrm{IV}}$ 作为绿泥石地质温度计使用，并拟合了温度方程：

$$t = 212\ n(\mathrm{Al}^{\mathrm{IV}}) + 18$$

1988 年在增加了 Salton Sea 地热体系的数据后修正的公式为：

$$t = -61.92 + 321.98\ n(\mathrm{Al}^{\mathrm{IV}})$$

Cathelineau 的公式只考虑了 $\mathrm{Al}^{\mathrm{IV}}$ 与温度的关系，没有考虑全岩其他因素，Kranidiotis 和 MacLean（1987）在考虑 Fe^{2+}、Mg^{2+} 对温度影响的基础上，提出了修正后的公式：

$$t = 106\left[n(\mathrm{Al}^{\mathrm{IV}}) + \frac{0.35\ n(\mathrm{Fe}^{2+})}{n(\mathrm{Mg}^{2+}) + n(\mathrm{Fe}^{2+})}\right] + 18 \tag{1}$$

该式只能用于铝饱）和类型的绿泥石，Jowett（1991）同样考虑了 Fe^{2+}、Mg^{2+} 的影响提出修正公式：

$$t = 319\left[n(\mathrm{Al}^{\mathrm{IV}}) + \frac{0.1\ n(\mathrm{Fe}^{2+})}{n(\mathrm{Mg}^{2+}) + n(\mathrm{Fe}^{2+})}\right] - 69 \tag{2}$$

该公式适用的前提是 $\frac{n(\mathrm{Fe}^{2+})}{n(\mathrm{Mg}^{2+}) + n(\mathrm{Fe}^{2+})} < 0.6$。

Rausell Colom 等在 1991 的研究中提出了基于面网间距 d_{001} 与绿泥石化学成分之间的关系，经 Nieto（1997）修改的绿泥石化学成分与 d_{001} 之间的关系式来计算 d_{001} 值：

$$d_{001} = 14.339 - 0.1155n(\mathrm{Al}^{\mathrm{IV}}) - 0.0201n(\mathrm{Fe}^{2+}) \tag{3}$$

Stefano 在 1999 年提出了利用 XRD 射线衍射数据探讨绿泥石地质温度计的方法，获得了面网间距 d_{001} 和温度之间的线性方程：

$$t/℃ = (14.339 - d_{001})/0.001,\ R^2 = 0.95 \tag{4}$$

由于 Cathelineau 的公式未考虑到 Fe^{2+}、Mg^{2+} 对温度的影响，同时从表 2 可以看出，川中地区自生绿泥石中的 $\frac{n(\mathrm{Fe}^{2+})}{n(\mathrm{Mg}^{2+}) + n(\mathrm{Fe}^{2+})}$ 绝大部分大于 0.6，Jowett 公式也不适用于此处，因此本文采用 Stefano B 和 Rausell Colom 的公式计算绿泥石的形成温度（表 2），并据此来反演其古地温梯度。

根据公式（3）、（4），计算出川中地区须家河组绿泥石形成温度在 157 ~ 231℃之间，最高古地温为莲深 102 井须四段砂岩样品，最低古地温为广安 101 井须六段砂岩样品，且随着埋深加大古地温相应增加，并表现出明显的线性关系，古地温和深度的斜率为 34℃/km，代表川中地区须家河组古地温梯度为 34℃/km，按照古地温梯度推算须家河组绿泥石形成时埋深约 6000 m，现今埋深约 2500 ~ 3000 m，剥蚀量在 3000 m 以上（朱传庆；2011）。经自生绿泥石计算温度与伍大茂等（1998）通过大量样品获得 R_m^o 值方法确定的四川盆地须家河组古地温（图 5），以及王一刚等（1998）通过流体包裹体计算的三叠统古地温梯度为 3.5℃/100 m 非常吻合，验证自生绿泥石地质温度计在沉积盆地古地温计算中的可靠性。

5 讨论

5.1 绿泥石地质温度计在盆地热演化中应用

沉积盆地古地温是控制油气及层控矿床形成的重要因素之一，已成为近年来地质科学的一重要组成部分，在以往的研究中，地质学家主要采用有机质成熟度指标、矿物流体包裹体、粘土矿物的成岩转变和裂变径迹分析等方法，但镜质体反射率随着煤化程度的逐渐增加其分辨率会变小；磷灰石裂变径迹方法中当样品所处深度太深时，可导致磷灰石裂变径迹已基本退火，无法测量，因此多具有一定的局限性，本次工作在埋藏深度较大的四川盆地川中地区首次采用绿泥石计算古地温，获得须家河组绿泥石形成温度在 157 ~ 231℃之间，古地温梯度为 34℃/km，经过和前人研究成果相对比（伍大茂等，1998；

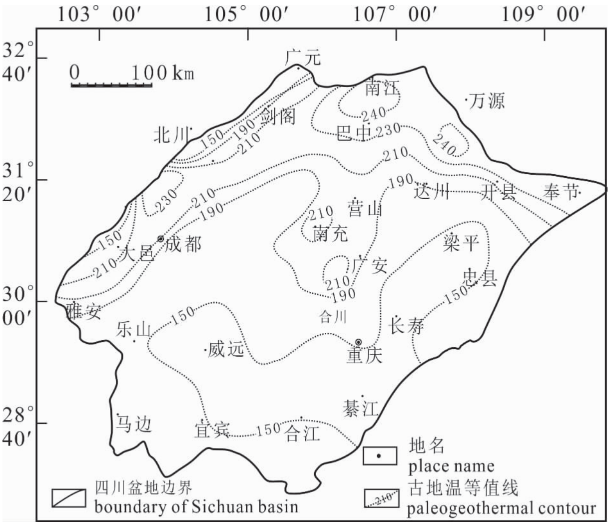

图 5 上三叠统中部最高古地温等值线图（底图据伍大茂等，1998）

Fig. 5 Contour lines of the highest paleogeotemperature in the middle of Upper Triassic (base map from Wu Damao et al., 1998&)

表 2 川中地区须家河组砂岩中绿泥石电子探针分析结果及特征值

Table 2 Chlorite electron microprobe analyses and characteristic values of Xujiahe Formation sandstone

井号	广安 101 井		合川 108 井		合川 101 井		岳 8 井		广安 111 井		合川 5 井		通 9 井
井深(m)	2038.1	2426.9	2045.2		2072.73		2118.39		2187.42		2258.41		2306.5
层位	须六段	须二段	须四段		须二段		须四段		须六段		须六段		须二段
SiO_2	28.81	27.13	26.25	25.69	25.87	25.65	21.88	29.73	24.13	24.60	22.85	24.40	23.60
TiO_2	0.03	0.00	0.01	0.04	0.09	0.01	0.00	0.04	0.03	0.03	0.01	0.04	4.66
Al_2O_3	24.47	22.70	23.96	24.02	23.45	25.55	22.17	19.11	23.81	23.65	23.75	26.38	21.17
Cr_2O_3	0.06	0.12	0.04	0.08	0.08	0.07	0.11	0.05	0.09	0.05	0.05	0.03	0.11
FeO	25.59	24.86	25.87	31.90	33.64	32.73	37.42	31.36	26.59	26.77	30.51	30.36	26.22
MnO	0.03	0.05	0.05	0.02	0.07	0.07	0.05	0.39	0.05	0.07	0.22	0.26	0.13
MgO	3.22	7.58	3.45	4.35	6.05	5.53	3.83	10.59	13.08	13.00	9.54	9.98	12.73
CaO	0.14	0.14	0.04	0.29	0.16	1.63	0.01	0.11	0.03	0.07	0.03	0.01	0.03
Na_2O	0.34	0.12	0.22	0.32	0.18	0.20	0.13	0.47	0.12	0.10	0.13	0.10	0.10
K_2O	1.78	1.79	1.81	1.22	0.28	0.20	0.27	0.76	0.10	0.05	0.05	0.14	0.14
阳离子数(以氧原子数 28 为基准计算)													
总量	84.47	84.49	81.69	87.93	89.87	91.62	85.87	92.61	88.02	88.38	87.14	92.71	88.89
Si	3.03	2.9	2.91	2.74	2.73	2.65	2.53	3.01	2.55	2.58	2.50	2.5	2.47
Al^{iv}	0.97	1.1	1.09	2.26	1.27	1.36	1.47	0.99	1.46	1.42	1.51	1.5	1.53
Al^{vi}	2.167	1.83	2.12	1.83	1.68	1.78	1.57	1.32	1.51	1.51	1.56	1.694	1.09
Ti	0.0025	0	0.0009	0.0032	0.007	0.0008	0	0.0031	0.0024	0.0024	0.0009	0.0031	0.37
Cr	0.005	0.01	0.0035	0.0071	0.0069	0.0057	0.0098	0.004	0.0076	0.0042	0.0044	0.0024	0.009
Fe^{2+}	2.25	2.23	2.39	2.63	2.97	2.82	3.62	2.65	2.35	2.35	2.79	2.61	2.29
Mn	0.0027	0.005	0.0047	0.0018	0.0063	0.03	0.0049	0.0334	0.0044	0.0062	0.02	0.02	0.01
Mg	0.51	1.21	0.57	0.69	0.95	0.85	0.66	1.59	2.06	2.03	1.55	1.52	1.98
Ca	0.02	0.02	0.0047	0.03	0.02	0.18	0.0012	0.01	0.0034	0.0079	0.0035	0.0011	0.0031
Na	0.14	0.05	0.09	0.13	0.07	0.08	0.06	0.19	0.0482	0.0403	0.06	0.04	0.04
K	0.49	0.49	0.51	0.33	0.08	0.05	0.08	0.19	0.03	0.01	0.01	0.037	0.04
Fe/(Fe+Mg)	0.79	0.65	0.79	0.81	0.76	0.77	0.85	0.62	0.53	0.54	0.64	0.63	0.54
*d*001/0.1nm	14.18	14.17	14.17	14.14	14.17	14.17	14.1	14.17	14.12	14.13	14.11	14.11	14.11
T(℃)	157	172	174	198	166	174	243	168	216	210	229	226	229
平均值(℃)	157	172	186		170		206		214		228		229

井号	营 22 井			莲深 1 井						莲深 102 井			莲深 101 井
井深(m)	2490			2663.28		2680.6		2695.6		2704.34		2719.6	2803.38
层位	须四段			须四段		须四段		须四段		须四段		须四段	须六段
SiO_2	24.14	23.45	27.27	23.77	23.05	23.65	23.90	31.65	21.73	26.48	25.69	23.48	22.72
TiO_2	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02	0.04	0.08	0.01	0.04	0.02	0.05	0.03	0.04
Al_2O_3	23.78	23.57	26.38	21.58	22.51	22.68	23.07	26.56	21.23	22.24	21.02	23.83	22.00
Cr_2O_3	0.06	0.09	0.06	0.13	0.15	0.02	0.02	0.30	0.07	0.06	0.05	0.04	0.05
FeO	35.83	36.80	34.36	32.13	34.28	30.95	29.93	20.82	34.02	22.44	20.15	35.52	34.00
MnO	0.07	0.07	0.08	0.98	0.04	0.21	0.16	0.05	0.07	0.16	0.21	0.08	0.07
MgO	4.05	3.87	3.96	8.47	4.45	9.52	10.19	2.82	3.95	14.54	18.70	4.14	3.85
CaO	0.02	0.04	0.04	0.30	0.19	0.00	0.03	0.45	0.19	0.15	0.08	0.07	0.46
Na_2O	0.12	0.21	0.17	0.27	0.30	0.02	0.16	0.18	0.24	0.10	0.08	0.50	0.39
K_2O	0.38	0.32	1.11	0.06	0.16	0.24	0.30	3.36	0.21	0.62	0.07	0.34	0.35
阳离子数(以氧原子数 28 为基准计算)													
Total	88.49	88.41	93.45	87.68	85.15	87.32	87.84	86.18	81.75	86.79	86.09	88.03	83.94
Si	2.64	2.59	2.74	2.66	2.63	2.59	2.58	3.15	2.61	2.79	2.69	2.57	2.63
Al^{iv}	1.36	1.41	1.26	1.35	1.38	1.42	1.43	0.85	1.39	1.21	1.32	1.43	1.37
Al^{vi}	1.73	1.69	1.92	1.46	1.68	1.51	1.53	2.39	1.63	1.54	1.27	1.7	1.67
Ti	0.0025	0	0.0015	0	0.0021	0.0033	0.0065	0.0008	0.008	0.002	0.004	0.003	0.0035
Cr	0.0052	0.008	0.0048	0.012	0.013	0.002	0.002	0.024	0.007	0.0038	0.0042	0.004	0.0046
Fe^{2+}	3.28	3.4	2.89	2.73	3.27	2.83	2.71	1.73	3.4	1.95	1.77	3.28	3.3
Mn	0.0065	0.0066	0.0067	0.093	0.0041	0.019	0.015	0.0042	0.0072	0.014	0.02	0.007	0.01
Mg	0.66	0.64	0.59	1.41	0.75	1.55	1.64	0.42	0.71	2.26	2.91	0.68	0.67

（续表 2）

Ca	0.0024	0.0047	0.0043	0.037	0.02	0	0.0032	0.05	0.024	0.02	0.01	0.01	0.06
Na	0.051	0.09	0.07	0.12	0.13	0.008	0.07	0.07	0.11	0.04	0.03	0.21	0.18
K	0.11	0.09	0.14	0.02	0.05	0.07	0.08	0.85	0.07	0.17	0.02	0.09	0.11
Fe/(Fe+Mg)	0.83	0.84	0.83	0.66	0.81	0.65	0.62	0.81	0.83	0.46	0.38	0.83	0.83
*d*001/0.1nm	14.12	14.11	14.14	14.13	14.11	14.12	14.12	14.21	14.11	14.16	14.15	14.11	14.12
平均值(℃)	217	218	220		181		183		231		224		

王一刚等，1998、朱传庆等，2011），结果表明经砂岩中自生绿泥石所计算的古地温可靠性高。这一研究成果表明绿泥石地质温度计在沉积盆地古地温计算中具可推广性，在我国中新生代陆相含油气盆地的储层砂岩中大多含有自生绿泥石，如鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、塔里木盆地等盆地（曾伟，1996；潘燕宁等，2001；黄思静等，2004；赵明等，2007；马世忠等，2014；毕明威等，2015），通过对绿泥石形成温度的计算来反演盆地热演化史，为沉积盆地热力学研究提供一种新的方法。

5.2 川中须家河组古地温对成岩作用影响

上三叠统须家河组是四川前陆盆地重要的烃源岩系和油气储集单元，但储层普遍致密化，大多为非常规低孔低渗和特低孔特低渗裂缝—孔隙型储层，高的古地温对成岩作用是否存在影响，笔者认为是肯定的，古地温等值线图和成岩相展布基本一致，在古地温高川中地区以绿泥石环边胶结成岩相为主；而在古地温低川东南地区以硅质胶结成岩相为主，除古地温外成岩流体来源、性质和砂岩中碎屑颗粒差异亦会对胶结物成分造成影响。

伍大茂等（1998）通过实测井温数据和岩石热导率值分别计算了不同构造部位三口深井的今地温梯度，数值介于 1.93～2.57℃/100m 之间，角 51 井 6000 m 深度现今温度为 159℃，古地温明显比现今温度高的多，从化学角度来看，高地温促进致密化作用的化学过程。温度每增加 10℃，化学反应速度可增加一倍。无论是胶结、充填或次生加大，温度都是一个最积极、最活跃的因素。温度、特别是温差，还能加速层间介质的流动或循环，不断带入新的物质，发生水—岩反应，为岩石致密化提供必要的化学能。从物理角度考虑，高温和快速增温，产生爆发式的生烃过程，有机质从固态的Ⅲ型干酪根热解生成以 CH_4 为主的气态烃，在四川盆地川中地区须家河组存在大量油气田，高的古地温也应是其形成的一个重要因素。

6 结论

（1）四川盆地须家河组砂岩中胶结物主要由石英、绿泥石和方解石组成，其中川西坳陷主要为方解石胶结；川中隆起则主要为绿泥石胶结；而川东北和川东南坳陷以硅质胶结为主。胶结物由早到晚形成的相对顺序：方解石→石英Ⅰ期加大→一世代绿泥石→二世代绿泥石→石英Ⅱ期加大→石英Ⅲ期加大。

（2）自生绿泥石呈环边衬里产出，在颗粒接触处，通常缺乏绿泥石胶结物，孔隙环边衬里的绿泥石通常是定向的和近于等厚，相对早期的绿泥石较为富铁，而相对晚期的绿泥石铁含量相对较低。

（3）因埋藏深度差异，绿泥石种属表现出多样性，主要有蠕绿泥石、铁绿泥石、铁镁绿泥石、假鳞绿泥石等；埋藏深度由浅至深，绿泥石种属主要表现为由蠕绿泥石向铁镁绿泥石种属转变，Si^{4+} 的含量随深度加深逐渐减少，而 Al^{IV} 的含量随深度加深逐渐增多。

（4）川中地区须家河组绿泥石形成温度在 157～231℃之间，且随着埋深加大古地温相应增加，并表现出明显的线性关系，古地温梯度为 34℃/km，经过和前人研究成果相对比，得出经砂岩中自生绿泥石所计算的古地温可靠性高。这一研究成果表明绿泥石地质温度计在沉积盆地古地温计算中具可推广性。

（5）川中地区古地温明显比现今温度高的多，从化学角度来看，高地温促进致密化作用的化学过程。从物理角度考虑，高温和快速增温，产生爆发式的生烃过程，有机质从固态的Ⅲ型干酪根热解生成以 CH_4 为主的气态烃，在四川盆地川中地区须家河组存在大量油气田，高的古地温也应是其形成的一个重要因素。

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

毕明威，陈世悦，周兆华，郑国强，张满郎，高立祥，钱爱华，谷江锐，石石，刘金. 2015. 鄂尔多斯盆地苏里格气田苏6区块二叠系下石盒子组8段砂岩储层致密成因模式. 地质论评，61(3)：599～613.

戴朝成，郑荣才，朱如凯，李凤杰，高志勇. 2011. 四川前陆盆地中西部须家河组成岩作用与成岩相. 成都理工大学学报(自然科学版)，38(2)：211～219.

邓康龄. 1992. 四川盆地形成演化与油气勘探领域. 天然气工业，12(5)：7～12.

邓祖林，晏中海，林洋，庄景遗，张亮. 2016. 四川盆地砂岩型铀矿远景预测及找矿方向. 地质论评，62(S1)：29～30.

冯动军，胡宗全，高波，彭勇民，杜伟. 2016. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气成藏条件分析. 地质论评，62(6)：1521～1532.

龚大兴，周家云，吴驰华，李萌. 2015. 四川盆地早中三叠世成盐期岩相古地理及成盐模式. 地质学报，89(11)：2075～2086.

郭正吾，邓康龄，韩永辉. 1996. 四川盆地形成与演化. 北京：地质出版社.

黄思静，谢连文，张萌，武文慧，沈立成，刘洁. 2004. 中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系. 成都理工大学学报：自然科学版，31(3)：273～282.

兰大樵，邱宗恬. 2002. 川西坳陷平地落坝气田须二段气藏成藏研究. 石油勘探与开发，29(3)：8～11.

李士祥，胡明毅，李浮萍. 2007. 川西前陆盆地上三叠统须家河组砂岩成岩作用及孔隙演化. 天然气地球科学，18(4)：535～539.

李忠，寿建峰，王生朗. 2000. 东濮凹陷砂岩储层成岩作用及其对高压致密气藏的制约. 地质科学，35(1)：96～104.

罗良，漆家福，张明正. 2015. 四川盆地周缘冲断带构造演化及变形差异性研究. 地质论评，61(3)：525～535.

马世忠，王海鹏，孙雨，吕品岐，满维光. 2014. 松辽盆地扶新隆起带北部扶余油层超低渗储层粘土矿物特征及其对敏感性的影响. 地质论评，60(5)：1085～1092.

潘燕宁，周凤英，陈小明，季峻峰，王汝成. 2001. 埋藏成岩过程中绿泥石化学成分的演化. 矿物学报，21(2)：174～178.

田建锋，陈振林，凡元芳，李平平，宋立军. 2008. 砂岩中自生绿泥石的产状、形成机制及其分布规律. 矿物岩石地球化学通报，27(2)：200～206.

童崇光. 1985. 四川盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京：地质出版社.

王一刚，余晓锋，杨雨，张静. 1998. 流体包裹体在建立四川盆地古地温剖面研究中的应用. 地球科学(中国地质大学学报)，23(3)：285～288.

魏祥峰，赵正宝，王庆波，刘珠江，周敏，张晖. 2017. 川东南綦江丁山地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气地质条件综合评价. 地质论评，63(1)：153～164.

伍大茂，吴乃苓，郜建军. 1998. 四川盆地古地温研究及其地质意义. 石油学报，19(1)：18～23.

夏菲，孟华，聂逢君，严兆彬，张成勇，李满根. 2016. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床绿泥石特征及地质意义. 地质学报，90(12)：3473～3482.

谢继容，李国辉，罗凤姿. 2009. 四川盆地上三叠统须家河组储集特征. 成都理工大学学报(自然科学版)，36(1)：13～18.

谢武仁，杨威，赵杏媛，魏国齐，谢增业，金惠，陈刚. 2010. 川中地区须家河组绿泥石对储集层物性的影响. 石油勘探与开发，37(6)：674～679.

杨超，唐菊兴，宋俊龙，张志，李玉彬，孙兴国，王勤，丁帅，方向，李彦波，卫鲁杰，王艺云，杨欢欢，高轲，宋扬，林彬. 2015. 西藏拿若斑岩型铜(金)矿床绿泥石特征及其地质意义. 地质学报，89(5)：856～872.

曾伟. 1996. 张强凹陷上侏罗统成岩作用及储层分布. 西南石油学院学报，18(4)：9～15.

张响响，邹才能，朱如凯，陶士振，杨式升. 2011. 川中地区上三叠统须家河组储层成岩相. 石油学报，32(2)：257～246.

张研，李萌，龚大兴，陈科贵，丁峰. 2015. 四川盆地三叠系隐伏钾盐层识别与预测方法研究. 地质学报，89(11)：1970～1982.

张展适，华仁民，季峻峰，张彦春，郭国林，尹征平. 2007. 201 和 361 铀矿床中绿泥石的特征及其形成环境研究. 矿物学报，27(2)：161～172.

赵明，陈小明，季峻峰，张哲，张耘. 2007a. 济阳坳陷古近系原型盆地中绿泥石的成分演化特征及其盆地古地温梯度. 中国科学 D 辑：地球科学，37(9)：1141～1149.

赵霞飞，胡东风，张闻林，张银德，林杭杰，唐波. 2013. 四川盆地元坝地区上三叠统须家河组的潮控河口湾与潮控三角洲沉积. 地质学报，87(11)：1748～1762.

郑荣才，戴朝成，朱如凯，翟文亮，高红灿，耿威. 2009. 四川类前陆盆地须家河组层序—岩相古地理特征. 地质论评，55，(4)：484～495.

周家云，龚大兴，李萌. 2015. 四川盆地三叠纪蒸发岩特征、盐盆迁移及其构造控制. 地质学报，89(11)：1945～1952.

周训，曹琴，尹菲，郭娟，王晓翠，张永帅，王黎栋，沈晔. 2015. 四川盆地东部高褶带三叠系地层卤水和温泉的地球化学特征及成因. 地质学报，89(11)：1908～1920.

朱传庆，饶松，徐明，胡圣标. 2011. 四川盆地中生代地热特征与前陆盆地构造、沉积作用. 地质科学，46(1)：194～202.

朱如凯，邹才能，张鼐，王雪松，程荣，刘柳红，周川闽，宋丽红. 2009. 致密砂岩气藏储层成岩流体演化与致密成因机理. 中国科 D 辑：地球科学，39(3)：327～339.

Bevins R E, Robinson D, Rowbotham G. 1991. Compositional variations in mafic phyllosilicates from regional low-grade metabasites and application of the chlorite geothermometer. Journal Metamorphic Geology, 9：711～721.

Bi Mingwei, Chen Shiyue1, Zhou Zhaohua, Zheng Guoqiang, Zhang Manlang, Gao Lixiang, Qian Aihua, Gu Jiangrui, Shi Shi, Liu Jin. 2015&. Densification Modes of Sandstone Reservoir in the 8th Member of the Lower Shihezi Formation, Permian, in Su-6 Area of Sulige Gas Field, Ordos Basin. Geological Review, 61(3)：599～613.

Bryndzia L T, Steven D S. 1987. The composition of chlorite as a function of sulfur and oxygen fugacity：an experimental study. American Journal of science. 287：50～76.

Cathelineau M. 1988. Catio site occupancy in chlorites and illite as a function of temperature. Clay minerals, 23：471～485.

Cathelineau M & Nieva D A. 1985. chlorite solid solution geothermometer：the Los Azufres (Mexico) geothermal system. Contribution to Mineralogy and Petrology, 91：235～244.

Dai Chaocheng, Zheng Rongcai, Zhu Rukai, Li Fengjie, Gao Zhiyong. 2011&. Diagenesis and diagenetic facies of the Xujiahe Formation in central-west Sichuan Foreland Basin. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 38(2)：211～219.

De Caritat P, Hutcheon L, Walshe J L. 1993. Chlorite geothermometry：a review. Clays and Clay Minerals, 41(2)：219～239.

Deer W A, Howie R A & Iussman J. 1962. Rock-Forming Minerals：Sheet Silicates. London：Longman, 270.

Deng Zulin, Yan Zhonghai, Lin Yang, Zhuang Jingyi, Zhang Liang. 2016&. Prospective forecasting of sandstone-type uranium deposit and its prospecting direction in Sichuan. Geological Review, 62(S1)：29～30.

Dun Kangling. 1992&. Formation and Evolution of Sichuan Basin and Domains for Oil and Gas Exploration, Natural Gas Industry, 12

(5):7 ~12.

Feng Dongjun, Hu Zongquan, Gao Bo, Peng Yongmin, Du Wei. 2016&. Analysis of Shale Gas Reservoir——Forming Condition of Wufeng Formation — Longmaxi Formation in Southeast Sichuan Basin. Geological Review, 62(6):1521 ~1532.

Gong Daxing, Zhou Jiayun, Wu Chihua, Li Meng. 2015&. Lithofacies Paleogeography and Salt forming Model of Lower Middle Triassic in the Sichuan Basin. Acta Geologica Sinica, 89(11):2075 ~2086.

Gould K, Pe-Piper G, Piper D J W. 2010. Relationship of diagenetic chlorite rims to depositional facies in Lower Cretaceous reservoir sandstones of the Scotian Basin. Sedimentology, 57:587 ~610.

Guo Zhengwu, Dun Kangling, Han Yonghui. 1996 # , Formation and Evolution of Sichuan Basin. Beijing: Geological Publishing House.

Huang Sijing, Xie Lianwen, Zhang Meng, Wu Wenhui, Shen Licheng, Liu Jie. 2004&. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 31(3) :273 ~ 282.

Jahren J S, Aagaard P. 1989. Compositional variations in diagenetic chlorites and illites, and relationships with formation——water chemistry. Clay Mineral, 24:157 ~170.

Jeffry D G. 2001. Origin and growth mechanism of authigenic chlorite in sandstones of the lower Vicksburg Formation, South Texas. Journal of Sedimentary Research, 71(1):27 ~36.

Ji J F, Balsam W & Chen J. 2001. Mineralogic and climatic interpretations of the Luochuan loess section (China) based on diffuse reflectancespec trophotometry. Quaternary Research, 56,23 ~30.

Jowett E C. 1991. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting,16.

Klein E L, Harris C, Giret B. 2007. The Cipoeiro gold deposit, Gurupi Belt, Brazil Geology, chlorite geochemistry, and stable isotope study. Journal of South American Earth Sciences, 23:242 ~255.

Kranidiotis P, MacLean W H. 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sufide deposit, Matagami, Quebec. Econmic Geology, 82: 1898 ~1991.

Lan Daqiao, Qiu Zongtian. 2002&. The research on the formation of Upper Triassic Xuer gas reservoir of Pingluoba gas field in Chuanxi depression. Petroleum Exploration and Development, 29(3): 8 ~ 11.

Li Shixiang, Hu Mingyi, Li Fuping. 2007&. Diagenesis and Porosity evolution of Upper Triassic Xujiahe Formation sandstone in western Sichuan Foreland Basin. Natural Gas Geoscience, 18(4):535 ~ 539.

Li Zhong, Shou Jianfeng, Wang Shenglang. 2000&. Diagenesis of sandstone reservoirs: constraints on high- pressure tight gas deposits in Dongpu Depression,North China. Scientia Geologica Sinica, 35 (1):96 ~104.

Luo Liang, Qi Jiafu, Zhang Mingzheng. 2015&. Difference Study on Evolution and Deformation of the Fold—thrust Belts Surrounding Sichuan Basin. Geological Review, 61(3):525 ~535.

MA Shizhong, WANG Haipeng, SUN Yu, LU Pinqi, MAN Weiguang. 2014&. Clay Mineral Characteristics and Its Effect on Sensitivity of Fuyu Ultra-low Permeability Reservoirs in Northern of Fuxin Uplift. Geological Review, 60(5): 1085 ~1092.

MacDowell S D. 1980. Elders W. A. Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore Ⅰ. Salton Sea geothermal field. California. USA Contribution to Mineralogy and Petrology,. 74:293 ~310.

Nieto F. 1997. Chemical composition of metapelitic chlorites: X-ray diffraction and optical property approach. Eur J Mineral, 9: 829 ~ 841.

Pan Yanning, Zhou Fengying, Chen Xiaoming, Ji Junfeng, Wang Rucheng. 2001&. Compositional variation of chlorites in burial diagenetic processes. Acta Mineralogica Sinica, 21(2): 174 ~178.

Peng Jun, Liu Jinku, Wang Yan, Liu Jianfeng. 2009. Origin and controlling factors of chlorite coatings——an example from the reservoir of T_3x Group of the Baojie area, Sichuan Basin, China. Pet. Sci, 6:376 ~382.

Rausell-Colom J A, Wiewiora A, Matesanz E. 1991. Relation between composition and d001 for chlorite. Am Miner, 76: 1373 ~1379.

Stefano B. 1999. Applying X- ray geothermometer diffraction to a chlorite. Clays and Clay Minerals, (47): 54 ~63.

Tang Juxing, Song Junlong, Zhang Zhi, LI Yubin, Sun Xingguo, Wang Qin, Ding Shuai, Fang Xiang, Li Yanbo, Wei Lujie, Wang Yiyun, Yang Huanhuan, Gao Ke, Song Yang, Lin Bin. 2015&. Chlorite Characteristic of the Naruo Porphyry Cu (Au) Deposit in Tibet and Its Geological Significance. Acta Geologica Sinica, 89(5):856 ~ 872.

Tian Jianfeng, Chen Zhenlin, Fan Yuanfang, Li Pingping, Song Lijun. 2008&. The Occurrence, Growth Mechanism and Distribution of Authigenic Chlorite in Sandstone. Bulletin of Mineralogy , Petrology and Geochemistry, 27(2) :200 ~ 206.

Tong Chongguang. 1985 # . Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation in Sichuan Basin. Beijing: Geological Publishing House.

Tóth T, Horváth D, Tóth A. 2007. Thermal effects in the density fingering of the chlorite - tetrathionate reaction. Chemical Physics Letters, 442:289 ~292.

Wang Yigang, Yu Xiaofeng,Yang Yu, Zhang Jing. 1998&. Applications of fluid inclusions in the study of paleo-geotemperature in Sichuan Basin. Earth Science——Journal of China University of Geosciences,23(3):285 ~288.

Wei Xiangfeng, Zhao Zhengbao, Wang Qingbo, Liu zhujiang, Zhou Min,Zhang Hui. 2017&. Comprehensive Evaluation on Geological Conditions of the Shale Gas in Upper Ordovician Wufeng Formation—Lower Silurian Longmaxi Formation in Dingshan Area, Qijiang, Southeastern Sichuan. Geological Review, 63(1):153 ~ 164.

Wu Damao, Wu Nailing, Gao Jianjun. 1998&. Paleogeotemperature in Sichuan Basin and its geological significance. Acta Petrolei Sinica, 19(1):18 ~23.

Xia Fei, Meng Hua, Nie Fengjun, Yan Zhaobing, Zhang Chengyong, Li Mangeng. 2016&. Characteristics of Chlorite from the Nalinggou Uranium Deposit in the Ordos Basin and Its Geological Significance. Acta Geologica Sinica, 90(12):3473 ~3482.

Xie Jirong, Li Guhui, Luo Fengzi. 2009&. Reservoir characteristics of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin , China. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 36(1):13 ~18.

Xie Wuren, Yang Wei, Zhao Xingyuan, Wei Guoqi, Xie Zengye, Jin Hui, Chen Gang. 2010&. Influences of chlorite on reservoir physical properties of the Xujiahe Formation in the central part of Sichuan Basin. Petroleum Exploration and Development, 37(6): 674 ~679.

Xie X G. 1997. IIb trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt: crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry. Contrib Mineral Petrol, 126: 275 ~ 291.

Zeng Wei. 1986&. Diagenesis and Reservoir Distribution of Upper Jurassic Series in Zhangqiang Hollow. Journal of Southwest Petroleum Institute, 18(4): 9 ~ 15.

Zhang Xiangxiang, Zou Caineng, Zhu Rukai, Tao Shizhen, Yang Shisheng. 2011&. Reservoir diagenetic facies of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the central Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica. 32(2):257 ~ 246.

Zhang Yan, Li Meng, Gong Daxing, Chen Kegui, Ding Feng. 2015&. Research on identification and prediction method ofthe Triassic potash deposits in Sichuan basin. Acta Geologica Sinica, 89(11): 1970 ~ 1982.

Zhang Zhanshi, Hua Renmin, Ji Junfeng, Zhang Yanchun, Guo Guolin, Yin Zhengping. 2007&. Characteristics and formation conditions of chlorite in no. 201 and No. 361 uranium deposits. Acta Mineralogica Sinica, 27(2):161 ~ 172.

Zhao K D, Jiang S Y, Jiang Y H. 2007b. Mineral chemistry of the Qitianling granitoid and the Furong tin ore deposit in Hunan province, South China: implieation for the genesis of granite related tin mineralization. Eur. J. Mineral, 17:635 ~ 648.

Zhao Ming, Chen Xiaoming, Ji Junfeng, Zhang Zhe, Zhang Yun. 2007a # . The characteristics of chlorite compositional evolution and Paleo-geothermal gradient in Jiyang Depression Basin. Science China D (Earth Sciences), 37 (9):1141 ~ 1149.

Zhao Xiafei, Hu Dongfeng, Zhang Wenlin, Zhang Yinde, Lin Hangjie, Tang Bo. 2013&. Tide-dominated Estuarine and Deltaic Deposits of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Yuanba Area, Sichuan Basin. Acta Geologica Sinica, 87(11):1748 ~ 1762.

Zheng Rongcai, Dai Chaocheng, Zhu Rukai, Zhai Wenliang, Gao Hongcan, Geng Wei. 2009&. Sequence——based on Lithofacies and Paleogeographic Characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin, Geologica l Review, 55, (4):484 ~ 495.

Zhou Jiayun, Gong Daxing, Li Meng. 2015&. The Characteristic of Evaporite, Migration of Salt Basins and Its Tectonic Control in Triassic Sichuan Basin. Acta Geologica Sinica, 89 (11): 1945 ~ 1952.

Zhou Xun, Cao Qin, Yin Fei, Guo Juan, Wang Xiaocui, Zhang Yongshuai, Wang Lidong, Shen Ye. 2015&. Characteristics of the Brines and Hot Springs in the Triassic Carbonates in the High and Steep Fold Zone of the Eastern Sichuan Basin. Acta Geologica Sinica, 89(11):1908 ~ 1920.

Zhu Chuanqing, Rao Song, Xu Ming, Hu Shengbiao. 2011&. The M esozoic therm al regime of the Sichuan Basin and the relationship between it and the structural and sedimentary action of the foreland basin evolution. Chinese Journal of Geology, 46, (1):194 ~ 202.

Zhu Rukai, Zou Caineng, Zhang Nai, Wang Xuesong, Liu Liuhong, Zhou Chuanmin, Song Lihong. 2009 # . Diagenetic fluid evolution and formation mechanism of tight sandstone gas reservoirs. Science China D(Earth Sciences), 39(3):327 ~ 339.

Authigenic Chlorite Compositional Evolution and Temperature Calculation of Xujiahe Formation Sandstone in Central Sichuan Basin

DAI Chaocheng[1,2], LIU Xiaodong[1], RAO Qiang[1], ZHANG Huaisheng[1]

1) *East China Institute of Technology, College of Earth Sciences, Nanchang, Jiangxi*, 330013;

2) *State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi*, 330013

Objective: In the central of Sichuan Basin, Xujiahe Formation sandstone of Upper Triassic existence a large number of authigenic chlorite, recent years, it has given more and more attention about chlorite characteristics, chemical composition, formation temperature, the relationship between chlorite and reservoirs in geology. In this paper, authigenic chlorite is the research object, On the basis of detailed geological survey, through the method of electron microprobe, scanning electron microscopy, X-diffraction to Identify chlorite characteristics and chemical composition.

Methods: Using X-ray diffraction to determine the content of chlorite, The test conditions is Cu target, voltage 35kV, current 15mA. Using electron microprobe to analysis chemical composition of the authigenic chlorite, the equipment is JEOLJXA-8800M type electronic probe instrument, working conditions are: accelerating voltage 15kV, probe current 10mA, beam spot diameter < 1μm. Using scanning electron microscope to see chlorite crystal.

Results: Xujiahe formation authigenic chlorite contains chlorophaeite aphrosiderite and Fe—Mg chlorite, With the burial depth from shallow to deep, chlorite species change from chlorophaeite to Fe—Mg chlorite, The temperatures calculated by authigenic chlorite have a good relation with burial depth (from 157 to 231℃). Thus it is estimated that the temperature gradient of the area is 34℃/km, the results show great consistent with the previous study paleogeotemperature dates, so paleogeotemperature calculating from chlorite is credible.

Conclusions: The paleotemperature is much higher than current temperature in this area, high paleogeotemperature promote chemical densification effect, while it is more easier changed Solid type III cheese to gaseous hydrocarbons, like CH_4. There are a large number of oil and gas fields in the area, high paleotemperature should be an important factor to its formation.

Keywords: Sichuan Basin; Upper Triassic Xujiahe Formation; authigenic chlorite; compositional evolution; Paleogeotemperature

Acknowledgements: This research was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41402085) and Open fund of Key Laboratory of nuclear resources and environment (No. NRE1403). The Editor Liu Zhiqiang, and anonymous referees are thanked for their constructive comments and their significant improvements to the manuscript.

First author: DAI Chaocheng, male, born in 1980, doctor, lecture. Mainly engaged in sedimentoloy. Address: No. 418, Guanglan Road, Economic Development Zone, Nanchang, 330000. Email: daichaocheng@qq.com

Manuscript received on: 2016-09-04; Accepted on: 2017-04-22; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.03.021