

川东北地区 WT1 井 7590~8060 m 段地层归属的确定及其对油气勘探的启示

和源¹, 周刚^{1*}, 李堃宇¹, 王启宇², 范毅¹, 王文之¹, 邓思思¹, 李亚丁¹

HE Yuan¹, ZHOU Gang^{1*}, LI Kunyu¹, WANG Qiyu², FAN Yi¹, WANG Wenzhi¹, DENG Sisi¹, LI Yading¹

1. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041;

2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081

1. Exploration and Development Research Institute, Petro China Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China

摘要: WT1 井完钻井深 8060 m, 刷新了中国石油陆上井深纪录。但其灯影组下伏地层归属问题一直悬而未决, 前期由于油基泥浆的影响一直被认为是南华系。利用岩石学、碎屑锆石 U-Pb 年代学及地球化学方法, 对该井 7590~8060 m 段地层进行对比研究。WT1 井为泥岩、粉砂岩、砂岩夹白云岩组合, 见硅质岩、磷块岩及硅磷质条带等夹层。碎屑锆石最年轻的年龄峰值分别为 654.5 ± 7.1 Ma, 644 ± 5 Ma。岩屑及岩石的化学蚀度指数(CIA)大于 60。结果表明, WT1 井 7590~8060 m 段地层岩石组合与区域上陡山沱组岩石组合极相似; 其沉积时代应晚于 644 ± 5 Ma, 且沉积时期的气候属温暖潮湿型。研究结果综合限定了 WT1 井灯影组之下 7590~8060 m 段应属震旦系陡山沱组, 预示着川东北地区可能存在陡山沱期的裂谷, 有利于打开川东北地区震旦系—下古生界的油气勘探局面。

关键词: WT1 井; 油气勘探; 碎屑锆石 U-Pb 年龄; CIA; 川东北地区

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)09-1502-12

He Y, Zhou G, Li K Y, Wang Q Y, Fan Y, Wang W Z, Deng S S, Li Y D. Stratigraphic attribution of 7590~8060 m sect of WT1 Well in northeastern Sichuan and its enlightenment to oil and gas exploration. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(9): 1502-1513

Abstract: The completion depth of the WT1 Well is 8060 m, refreshing the onshore well depth record of CNPC. However, the attribution of the lower strata of the Dengying Formation has not been determined, and it has been considered to be the Nanhua System due to the influence of oil-base mud. Petrology, detrital zircon U-Pb chronology and geochemical methods were used to study the strata between 7590~8060 m in this well. The rocks include mudstone, siltstone, sandstone and dolomite, with intercalation of siliceous rocks, phosphorous rocks, siliceous and phosphorous bands. The youngest peak ages of detrital zircons are 654.5 ± 7.1 Ma and 644 ± 5 Ma respectively. The CIA (chemical index of alteration) value in cuttings and rocks is great than 60. The results show that the lithologic assemblage in 7590~8060 m sect of WT1 Well is very similar to that of the Doushantuo Formation in the region. The deposition age should be later than 644 ± 5 Ma, and the climate during the deposition period was warm and humid. The research results show that 7590~8060 m sect below the Dengying Formation of Wutan 1 Well belongs to the Doushantuo Formation of Sinian System. This indicates that the existence of a rift developed in the period of Doushantuo, which is conducive to the mineralization of Sinian and Lower

收稿日期: 2020-08-19; 修订日期: 2021-01-12

资助项目: 国家科技重大专项课题《四川盆地及邻区下古生界—前寒武系成藏条件研究与区带目标评价》(编号: 2016ZX05004-005) 与中国石油西南油气田分公司科技项目《四川盆地前震旦系沉积岩展布特征及烃源条件研究》(编号: 20200301-06)

作者简介: 和源(1991-), 男, 工程师, 从事石油地质综合研究工作。E-mail: heyuan2017@petrochina.com.cn

* 通信作者: 周刚(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 从事沉积储层方面的石油地质工作。E-mail: zhougang29@petrochina.com.cn

Paleozoic oil and gas in northeastern Sichuan.

Key words: WT1 Well; oil and gas exploration; detrital zircon U-Pb chronology; CLA; northeastern Sichuan

近年来,由于宣汉—开江古隆起的新发现^[1-2]及震旦系—早寒武世隆坳相间构造—沉积新格局的逐渐确立^[3-4],四川盆地北东缘有望成为川中安岳特大气田后又一重要的战略接替勘探领域,区域内的前寒武系—下古生界成为油气勘探的热点层系。为探索该地区宣汉—开江古隆起及周缘震旦系—下古生界储层发育及其含油性,在开江县西南地区部署了一口风险探井——WT1井(图1),于2018年完钻,最终钻至井深8060 m,底未见岩浆岩,刷新了四川盆地陆上井深记录。通过地震标定、测井曲线、岩石组合、地球化学标志等手段综合厘定了

WT1井~7590 m段为震旦系灯影组的底界,对于7590~8060 m段地层的归属则存在较大的争议:①初期研究中,由于油基泥浆的影响,一直将该套地层划分为南华系。且将该井段的岩石组合与原1:20万区域地质调查资料中划分为南华系的明月组对比,但实际上现有的研究已经将明月组解体。那么两者进行对比的基础已经不存在;②后期研究中,又根据测井曲线的差异提出7590~8060 m段发育陡山沱组,陡山沱组厚约200 m,之下为南华系南沱组。但两者之间的界线没有具体的标定,证据也不充分。③7590~8060 m段地层全部归属于南华系南

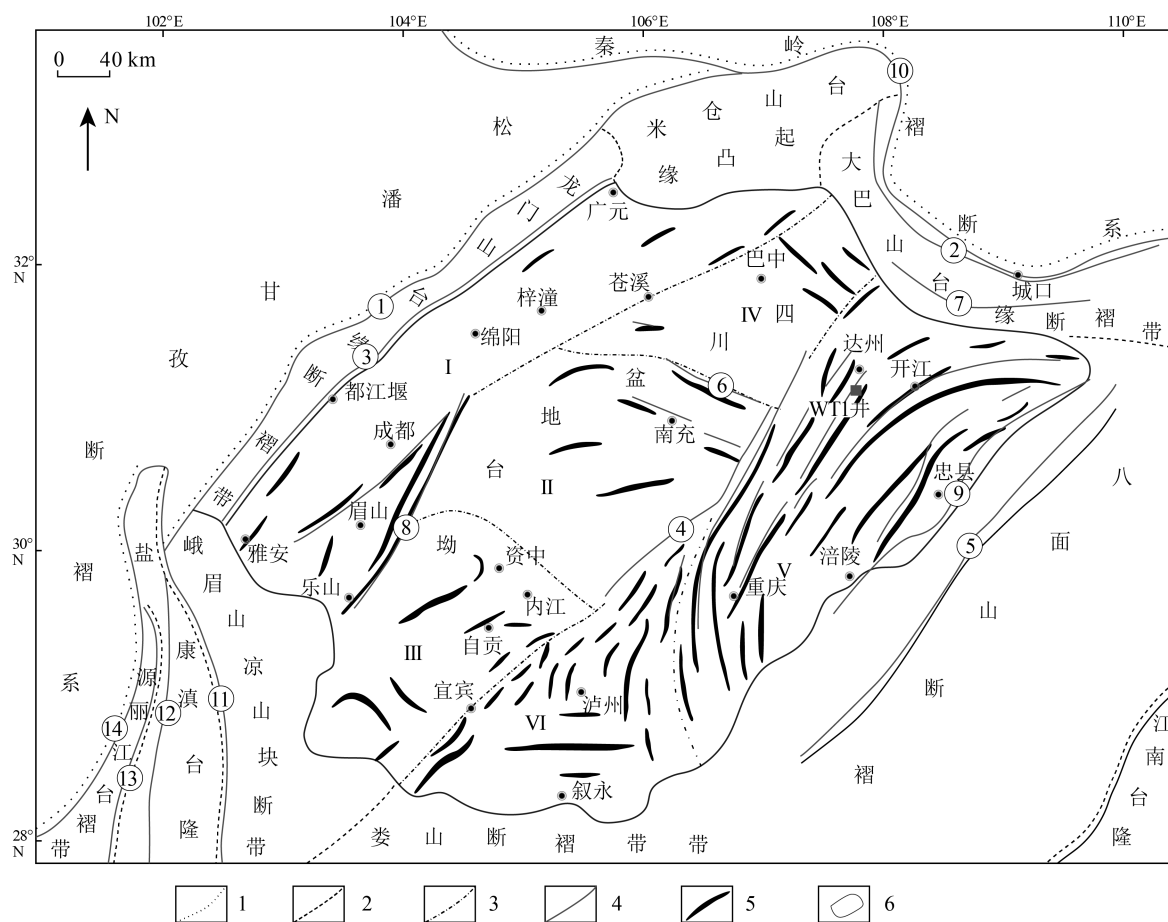


图1 四川盆地及邻区构造单元分区图及WT1井位置图(据参考文献[3]修改)

Fig. 1 Tectonic unit division of Sichuan Basin and its adjacent areas showing location of WT1 Well

- 1—一级构造分区线;2—二级构造分区线;3—三级构造分区线;4—断裂;5—背斜;6—四川盆地边界;①—龙门山断裂;②—城口断裂;
③—彭灌断裂;④—华蓥山断裂;⑤—建始—郁江断裂;⑥—营山断裂;⑦—万源断裂;⑧—龙泉山断裂;⑨—齐岳山断裂;⑩—南秦岭断裂;
⑪~⑭—扬子西缘断裂群;I—川西坳陷带;II—川中低缓褶皱带;III—川西南低陡褶皱带;IV—川北低陡褶皱带;V—川东高陡构造带;
VI—川南低陡断褶皱带

沱组,陡山沱组不发育。

地层及其年代是研究地球演化历史及油气勘探的基础^[5]。WT1 井是四川盆地内部首次钻获厚度大于 450 m 的震旦系灯影组之下地层的钻井,为整个四川盆地内部及盆缘基础地质、油气地质、盆地结构、沉积-构造演化等的对比研究提供了极为珍贵的素材,具有极重要的科学研究意义。也是四川盆地前震旦系油气勘探潜力研究达州-开江古隆起深层源储配置研究的关键,能够支撑决策者对该地区油气勘探方向的进一步判断及工作部署,打开川东北地区震旦系一下古生界油气勘探困局,具有极重要的勘探实践意义。所以,解决 WT1 井 7590~8060 m 段地层归属问题迫在眉睫。

由于 WT1 井 7590~8060 m 段没有全取心,未采集到凝灰岩夹层及可用于地层对比的古生物化石,对该井段地层归属带来较大的难度,地层精细划分与对比受到极大的限制,造成前文所述的争议。该难点也是整个扬子地区震旦系陡山沱组地层划分和对比面临的困局。因此,在有限的资料下,本文利用区域地层学、碎屑锆石 U-Pb 年代学,以及在震旦系地层划分与对比中发挥重大作用的化学地层学^[6]等手段,综合限定 WT1 井 7590~8060 m 段地层的归属,以期四川盆地南华纪-陡山沱期内部及盆缘基础地质对比研究、油气勘探部署等提供资料和科学依据。

1 岩石地层组合及序列对比

1.1 区域陡山沱组发育特征

中国华南地区的震旦系陡山沱组,相比该系的灯影组研究程度偏低,但其顶底界线十分清楚,南沱组冰碛岩之上的“盖帽白云岩”是其开始沉积的典型标志,也是南华系冰消后大量释放二氧化碳的结果,其与南华系南沱组冰碛岩之间呈假整合接触;顶部以黑色页岩与灯影组白云岩为界^[5,7]。峡东及邻区的震旦系剖面与国际上 2004 年新建层型剖面——澳大利亚南部佛林德斯山脉伊诺雷玛溪剖面可以完全对比,且更完善。标准剖面上,两者之间普遍发育一层厚度不等的风化壳粘土层,一般呈黄褐色、棕褐色,代表初始海侵和海平面快速上升。之上则为典型的 4 分,一段和三段为白云岩段,二段和四段以黑色页岩、粉砂岩为主,夹少量砂岩及白云岩段^[8]。但是,受基底差异性隆升或基底构造格

架和古地理背景的共同影响,陡山沱组岩石地层序列及组合特征在盆地的各个方向有显著的地区差异性。其中,北东缘与东南缘四分岩性出露相对齐全,可进行区域对比。西缘和北缘主要出露一套细碎屑岩,局部层段夹碳酸盐岩,可进行小区域对比;盆地内部的发育情况则不明,大多依据地震资料的标定进行区域对比。汪泽成等^[9]认为,盆地内部残留有陡山沱组四段及部分三段地层,厚度较薄,盆地外围厚度较大。但不论出露完整性及厚度差别如何显著,其岩石地层序列及组合特征都相似,可分区域对比。

1.2 WT1 井 7590~8060 m 段发育特征

(1) 岩石组合及序列

WT1 井 7590~8060 m 段的岩性主要为一套灰色、深灰色,局部灰黑色的泥页岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩组合,局部层段夹灰色薄层状泥粉晶白云岩。组合序列详见图 2。镜下特征与钻井取心岩性特征基本相同,可识别出细粒岩屑砂岩、泥质粉砂岩、泥岩、白云岩等。其中,细砂岩具细粒砂状结构,块状构造,主要由长石、石英和岩屑组成。岩屑呈次圆-次棱角状,以安山岩和流纹岩屑为主,在热液蚀变和构造作用联合控制下,已难以清晰观察其内部矿物组成。可见绿泥石、大量粘土矿物、碳酸盐矿物、不透明暗色矿物等分布。绿泥石推测为凝灰质物质蚀变而成。另外,还在镜下发现较多的凝灰质成分,为黄褐色隐晶质的火山灰。与区域上扬子北缘地区陡山沱组的岩石地层组合及序列相似,特别是与城口高燕、明月及万源大竹剖面极相似。

(2) 特殊岩性

本次在有限的取心段(8040~8044 m)识别出薄层硅质岩、磷块岩、含硅质泥岩、含硅质结核、铁锰质结核、硅磷质条带、硅化六水碳钙石假晶^[10]等特殊岩性层或矿物(图版 I)。以上特殊岩性层或矿物,与城口高燕、城口明月、万源大竹等地产磷矿、锰矿的陡山沱组所含特殊岩性或矿物相同,如硅质结核、铁锰质结核、硅磷质条带等。而硅化六水碳钙石假晶与宜昌樟树坪、宜昌 ZK312、ZK407 钻孔中陡山沱组的特征一致,也是磷矿、锰矿产地^[10]。另外,硅质岩、磷块岩等是典型的深水、热液作用下沉积的产物,也与 WT1 井岩屑砂岩中安山岩和流纹岩岩屑在镜下显示出明显的受热液蚀变作用

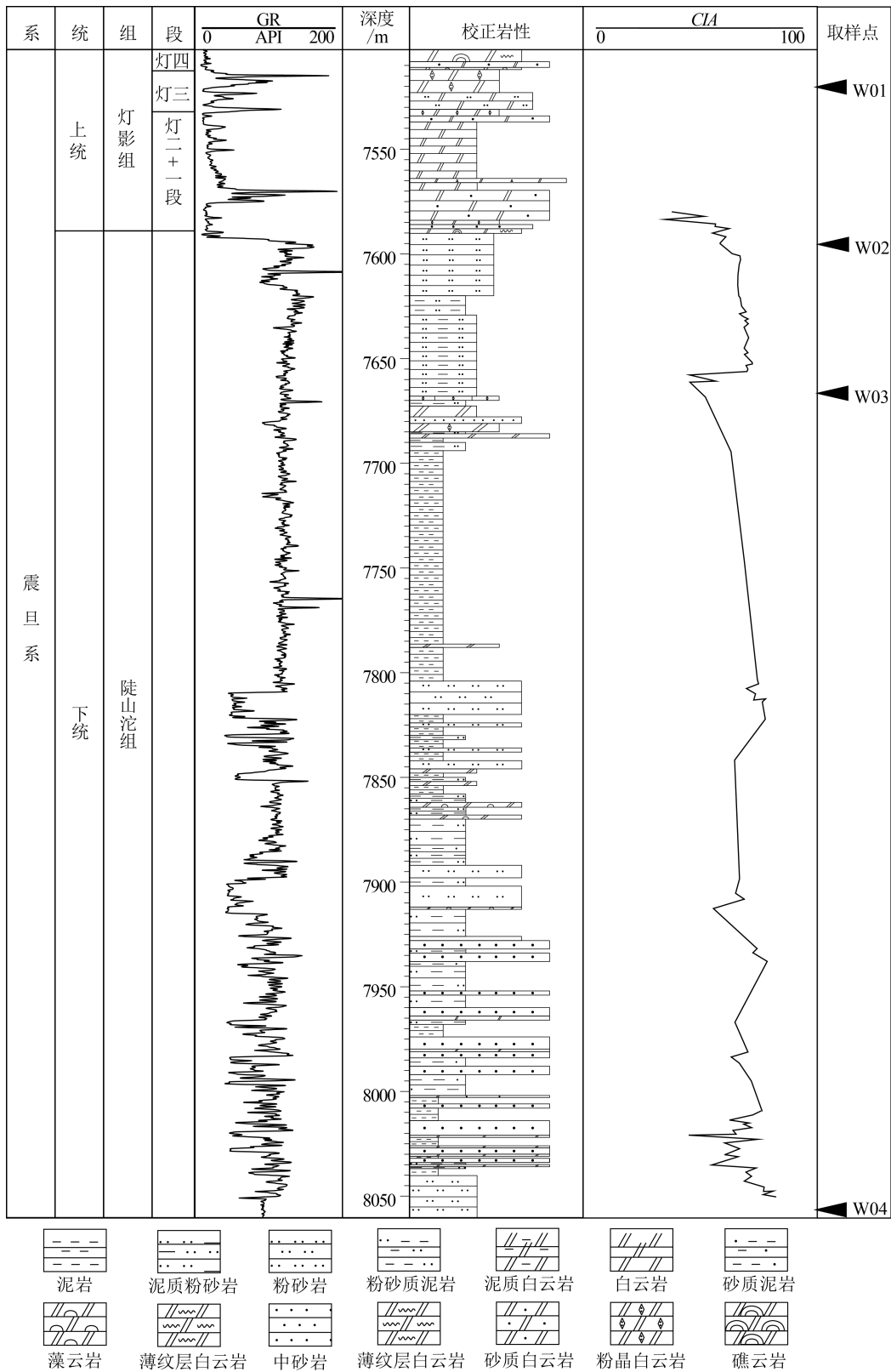


图 2 WT1 井 7590~8060 m 段钻井岩心柱状图

Fig. 2 Core column of 7590~8060 m sect in WT1 Well

的特征相吻合。结合区域构造特征分析,推测与城口高燕等地发育的同沉积断裂构造活动密切相关。

(3) 沉积环境

在 WT1 井 8040~8044 m 取心段,粉砂岩中发育丰富的软沉积变形及撕裂状泥砾,而非冰碛砾石(图版 I),反映重力流沉积。与城口地区、镇巴地区的陡山沱组剖面重力流沉积特征相似^[4]。结合岩石中普遍发育的水平层理及硅质岩-泥岩-粉砂岩组合特征,综合判断 WT1 井底部层段发育于相对深水的环境中,热液作用痕迹明显。与盆缘万源大竹、城口明月、高燕陡山沱组下部发育于受同沉积断裂控制、热液影响明显的滞留闭塞深水环境相似^[1,4],指示裂陷构造活动在盆地内部可能存在。

笔者选择川北-川东北 7 条剖面建立了 WT1

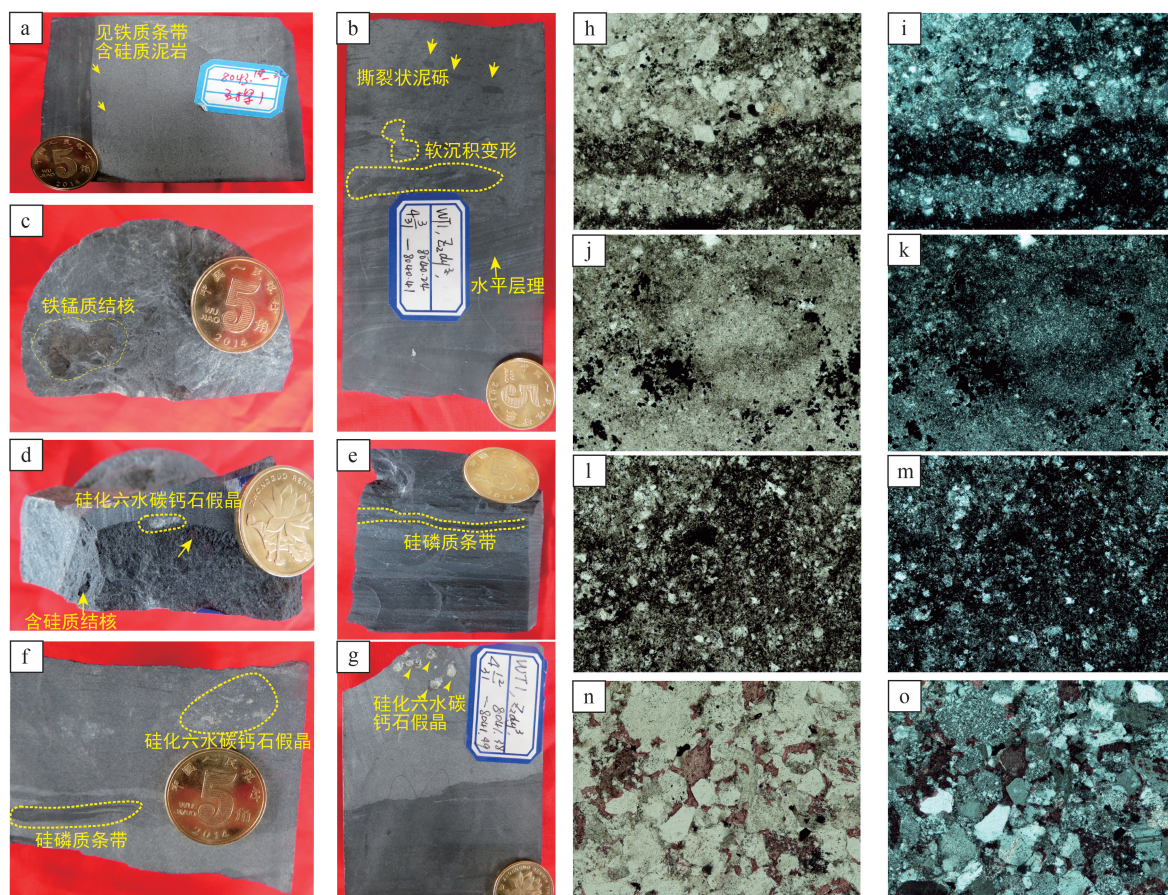
井与区域剖面的对比图(图 3)。可以看出,无论是岩石组合特征、特殊岩性夹层及特征矿物标志,还是沉积环境、区域构造-沉积的响应,WT1 井 7590~8060 m 段都与区域上盆缘陡山沱组发育特征极相似。特别是与万源大竹、城口明月剖面基本相同;高燕剖面除地层厚度有差异外,岩石组合及类型相似,而向东至宜昌樟树坪、宜昌 ZK312、ZK407 钻孔等地,地层厚度及岩石组合类型又与万源大竹、城口明月相似,进一步体现出震旦系陡山沱组隆坳相间的沉积格局^[4]。

1.3 与南沱组差异性分析

(1) 出露的岩石类型差异较大

南沱组在整个华南地区发育较完整,为 Marinoan 冰期沉积,主要发育一套冰碛砾岩,岩石

图版 I Plate I



a. 灰色粉砂岩与灰黑色泥岩组合,粉砂岩中见铁质条带,泥岩含少量硅质;b. 灰色略带灰黑色泥质粉砂岩,见水平层理,软沉积变形及泥岩撕裂屑;c. 深灰色粉砂质泥岩,见铁锰质结核;d. 灰色泥质粉砂岩,硅质结核及硅化六水碳钙石假晶;e. 深灰色,略带灰黑色含粉砂质泥岩,硅质条带;f. 灰色粉砂岩,见硅质条带及硅化六水碳钙石假晶;g. 灰色粉砂岩与深灰色粉砂质泥岩组合,粉砂岩中见硅化六水碳钙石假晶,发育水平层理;h. 含粉砂质泥岩,钙质胶结,见硅质条带(单偏光);i. 含粉砂质泥岩,钙质胶结,见硅质条带(正交偏光);j. 磷块岩,具一定变质(单偏光);k. 磷块岩,具一定变质(正交偏光);l. 泥质粉砂岩,见硅质团块(单偏光);m. 泥质粉砂岩,见硅质团块(正交偏光);n. 粉砂岩,钙质胶结(单偏光);o. 粉砂岩,钙质胶结(正交偏光)

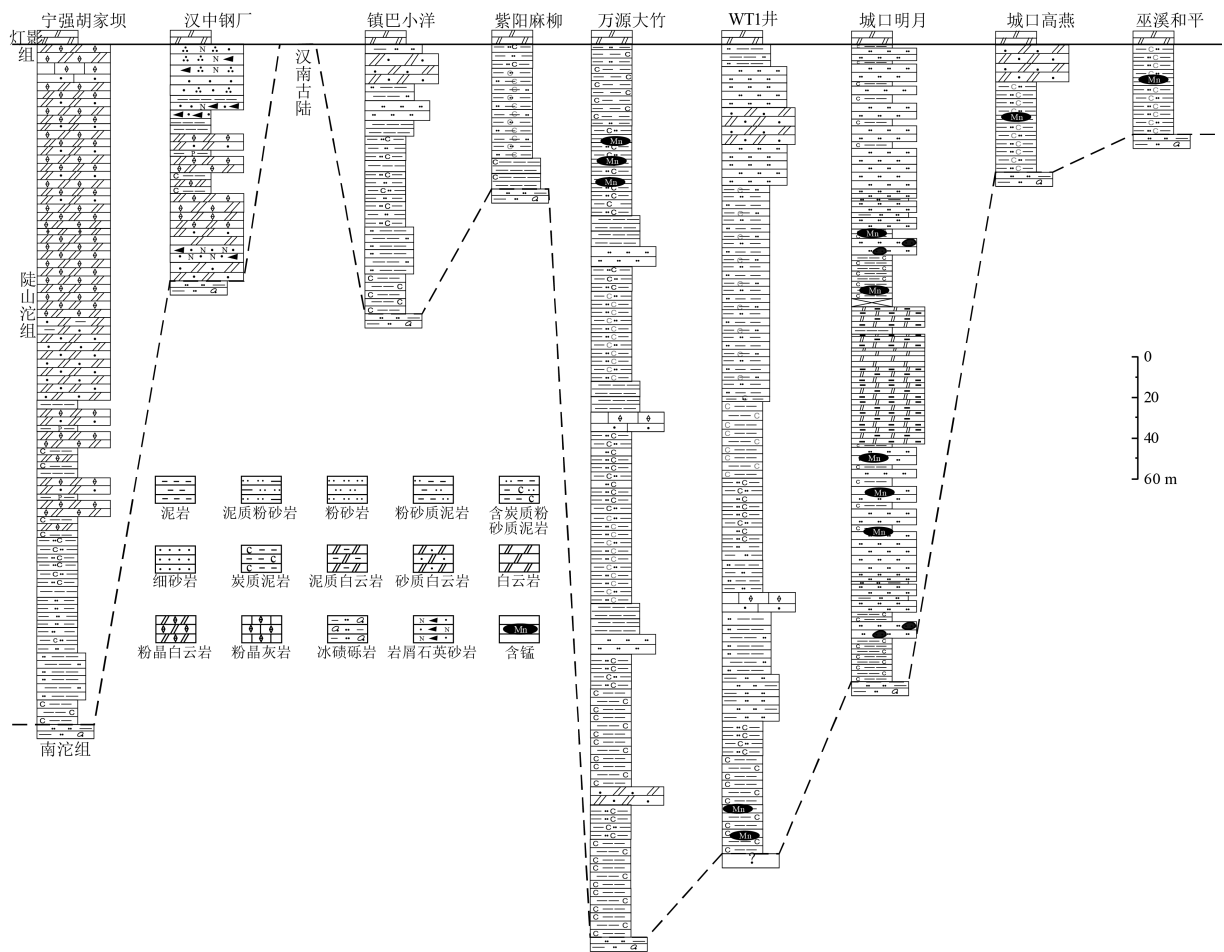


图 3 四川盆地北缘-北东缘野外剖面与 WT1 井柱状对比图

Fig. 3 Contrast of profile of north-eastern margin of Sichuan Basin and column of 7590~8060 m sect in WT1 Well

类型及组合主要为灰绿色冰碛砾岩、含砾粉砂质泥岩、含砾泥岩及少量厚度不大的泥质砂岩、粉砂岩夹层,杂基支撑,砂泥质胶结,发育泥包砾结构。砾石具有排列杂乱、无分选、磨圆度极差等特征;部分砾石表面见磨光面、压痕、擦痕等。局部地区或者剖面可见不含砾石的砂岩或含砾砂岩,镜下显示长石含量较高,为 20%~50%,而且表面干净,新鲜、棱角状,未受风化、蚀变、磨蚀,表明冰川发育地区气候寒冷、干燥,少化学风化和磨蚀,显示近源快速堆积埋藏的沉积环境。而 WT1 井 7590~8060 m 段取心中未见冰碛砾石发育,室内镜下观察也未见砾石和高含量的长石颗粒。前期研究中识别出的极少量“砾石”其实是硅化六水碳钙石假晶及部分硅磷质结核。岩石类型及组合特征也无近源快速堆积沉积的特征。

(2) 特殊岩石或者矿物成分差异大

区域上南沱组镜下成分很少识别出凝灰质成

分,剖面上也很少发育凝灰岩夹层。而 WT1 井中部分层段的泥质粉砂岩、粉砂岩中凝灰质成分发育;区域上,野外多条陡山沱组剖面中也识别出多层凝灰岩夹层。另外,WT1 井 7590~8060 m 段的中下部及顶部出现较多的白云岩夹层,这是南沱组不具备的岩石类型。而硅质岩、硅磷质条带、铁锰质结核等特征岩石及矿物在南沱组中不发育。

(3) 岩石地层序列差异较大

南沱组出露岩石地层序列大多为一套冰碛砾岩,夹厚度较小的含砾粉砂岩、粉砂岩、泥岩组合,岩石序列上大都不能划分到“段”。哪怕能够识别出相对明显的亚段来,也主要表现为下部和上部的冰碛砾岩层段和中部粉砂岩、泥岩组合段,冰碛砾石含量少。但整体上,中部层段的厚度一般不超过 10 m。如在出露较好的宜昌青林口剖面 and 宋洛剖面,可分为 3 段,一段与三段都为灰绿色泥质杂砾

岩,为典型的重力流沉积物,与陡山沱组不同,是典型的碎屑流沉积物;二段分别为灰绿色的钙质页岩和黑色炭质页岩,基本不含砾,厚度较小,一般小于等于 6 m,且区域上不可对比,只在少数剖面发育。而 WT1 井 7590~8060 m 段根据白云岩夹层的出现、岩石粒度的变化及测井曲线(图 2)可以明显地划分出 2 段。虽然由于缺乏全井段岩心而未进一步划分,但总体上与区域上陡山沱组二段、四段的岩石组合及序列相似,而与区域上南沱组的序列截然不同。

综合以上分析,从岩石地层组合及序列特征看,WT1 井 7590~8060 m 段发育特征与陡山沱组发育特征极相似,而与南沱组显著不同。

2 碎屑锆石年代学限定

WT1 井 7590~8060 m 段属于缺乏古生物资料和火山岩夹层的“哑地层”段,可以利用碎屑锆石年代学数据限定其地层时代,即沉积岩碎屑锆石中最年轻的锆石年龄应大于地层的沉积时代^[11-12],为 WT1 井 7590~8060 m 段沉积时代提供了约束。同时还可以利用相关研究成果反映川东北地区重要的地质事件,为整个盆地的演化过程研究提供信息。

2.1 碎屑锆石 U-Pb 年代学样品挑选与测试

在 WT1 井 7590~8060 m 段共采集了 3 件砂岩进行碎屑锆石 U-Pb 测年,井段分别位于 7594~7597 m、7665~7668 m 及 8057~8060 m。挑选、制靶和测试工作都委托北京锆年领航实验室完成,过程符合 Ludwig^[13]提出的科学程序。

2.2 碎屑锆石形态特征

3 件砂岩样品分别位于井深 7594 m(WT2)、7665 m(WT3)、8057 m(WT4),每件砂岩挑选了 300 粒锆石进行制靶与阴极发光(CL)图像分析。CL 图像显示,锆石大多具有环带,少部分呈板状结构并发育变质增生边,但后者的边距大都较小,不符合锆石定年的点位测试要求。另外,绝大多数锆石的磨圆度一般,或者较小,大都保存锆石原始结晶时的晶体形态,说明岩石沉积时物源较近(图 4)。另外,锆石微量元素 Th、U 含量结果显示,3 个样品的 Th/U 值大多数大于 0.4,是典型的岩浆成因锆石,变质成因锆石所占比例极少,这与 CL 图像指示的特征一致。因此,它们的年龄能够限定该井段地层的沉积时代,同时还能够反映重要的地质事件。

2.3 碎屑锆石 U-Pb 年代学特征

碎屑锆石 U-Pb 定年结果显示,样品 WT2 中最年轻的峰值年龄为 654.5 ± 7.1 Ma,直方分布图上形成一个峰值波峰,且都处于谐和线上,对该样品的沉积时代具重要的限定作用,指示其沉积时代应晚于 654.5 ± 7.1 Ma。样品 WT3 中最年轻的峰值年龄为 622.3 ± 4 Ma,邻近峰值年龄为 683.7 ± 7.3 Ma。前者在整个年龄值中占有一定的比例,对该样品代表的沉积岩的沉积时代具有一定的限定作用。样品 WT4 最年轻峰值年龄为 644 ± 5 Ma,指示其沉积时限应晚于 644 ± 5 Ma(图 5)。

在引言部分已指出,3 个砂岩样品代表的 7590~8060 m 段地层是限定在灯影组之下的,而主要的争议在南沱组和陡山沱组之间。结合碎屑锆石 U-Pb

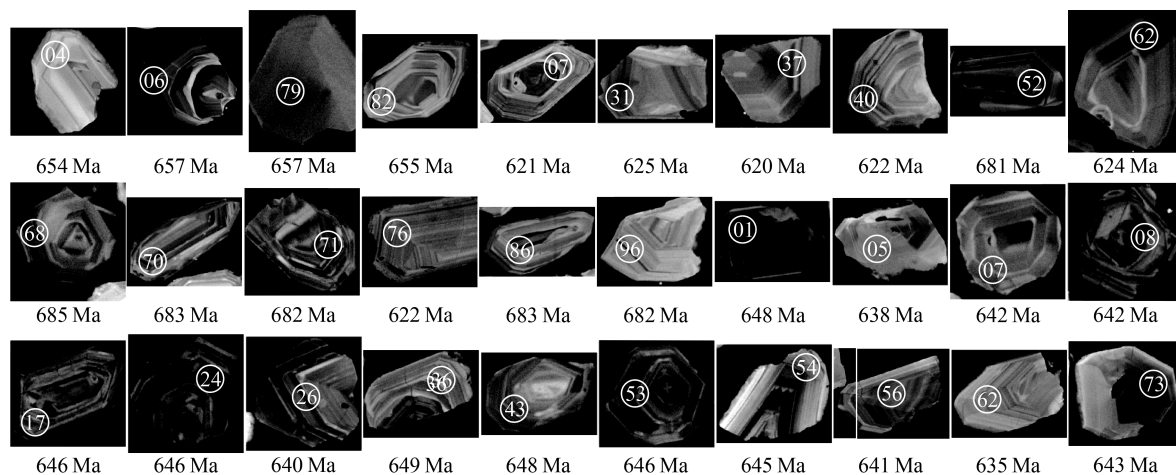


图 4 WT1 井 7590~8060 m 段 3 个砂岩样品部分锆石阴极发光(CL)图像及年龄值

Fig. 4 CL images and age values of some zircons of the 3 sandstone samples from 7590~8060 m sect in WT1 Well

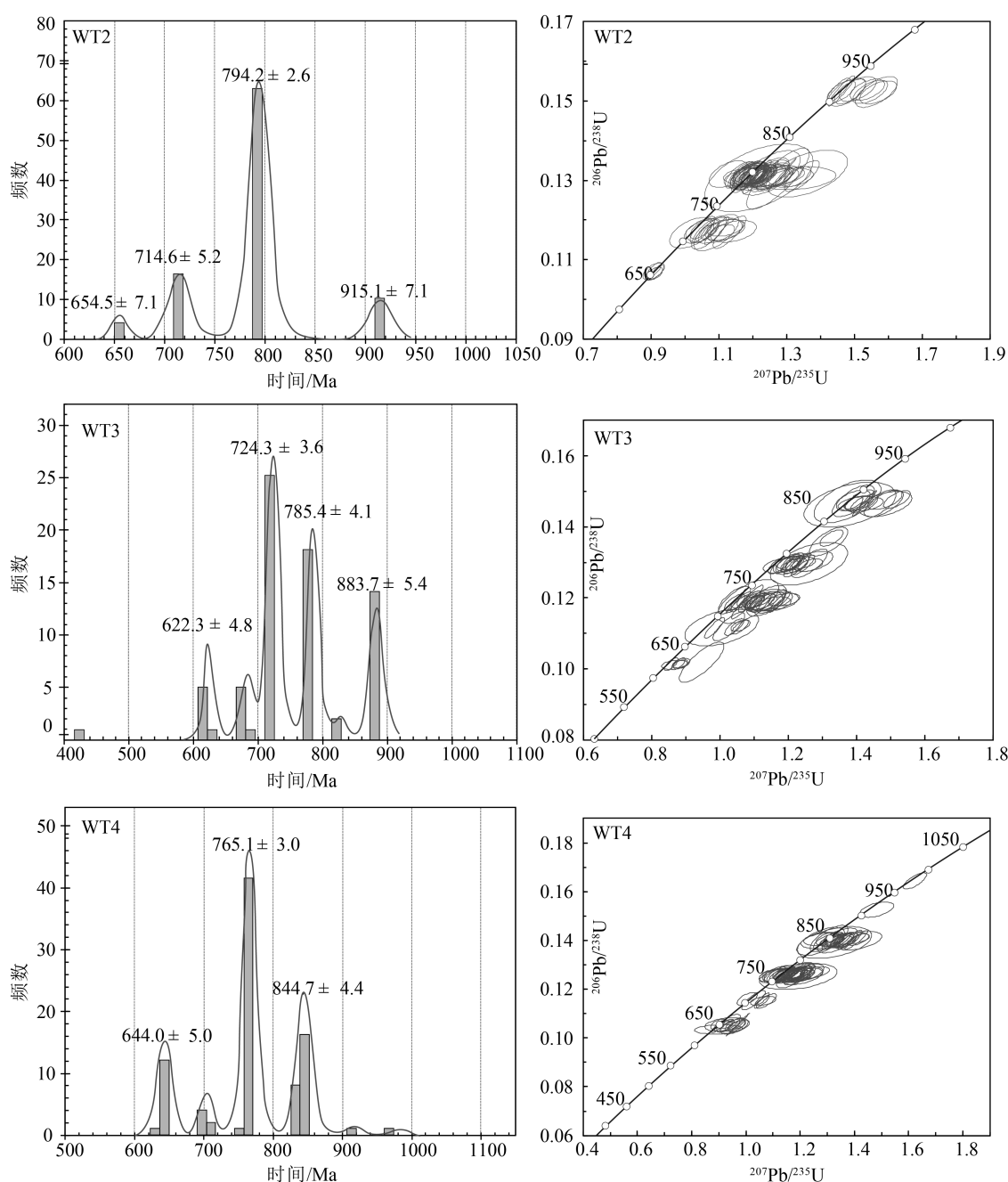


图5 WT1井7590~8060 m段3个砂岩锆石年龄直方分布图及年龄谐和图

Fig. 5 Age square distribution and age harmonics of the 3 sandstone samples of WT1 Well in section 7590~8060 m

年龄结果,该井段地层沉积时代应晚于最底部的1个砂岩最年轻的锆石年龄,即 644 ± 5 Ma,即晚于南沱组沉积时代。其实,锆石 CL 图像、Th/U 值及锆石定年综合分析结果显示,除样品 WT3 中有5颗锆石的峰值年龄为 622.3 ± 4 Ma 外,其他2个样品最年轻的峰值都小于 644 Ma。 622.3 ± 4 Ma 的年龄值可能由于是该样品所代表的井深段未取岩心,是采取的岩屑进行的锆石实验,推测在取样中可能混染

了上覆地层的少量样品。结合其所处的井深及该年龄段锆石颗粒数在整个测点年龄值中的比例,应忽略。综合看,样品 WT2、WT3、WT4 代表的沉积岩的沉积时代都晚于 644 ± 5 Ma,即晚于南沱组沉积时代。综合限定表明,该井段地层为震旦系陡山沱组。

3 地球化学指标的限定

随着传统地层学向多学科相互渗透的综合地

层学方向的发展,化学地层学的方法在解决疑难地层归属方面具有极为重要的辅助作用,特别是在事件地层的厘定方面具有关键性的作用。

3.1 化学蚀变指数(CIA)

华南地区有关南华系冰期寒冷事件及地层的限定,越来越多地利用到地球化学手段,特别是化学蚀变指数(CIA)的利用,可以确定沉积岩物源区风化程度,根据风化程度变化能够判断沉积物源区的古气候演化。所以,通过CIA值的研究,在一定程度上也可限定地层的归属。通常情况下,CIA值介于50~100之间,不同CIA值反映不同的气候条件^[14]。80~100反映炎热潮湿的热带气候条件下的强烈风化;60~80代表温暖湿润气候条件下的中等风化;50~60代表寒冷干燥气候条件下低等化学风化强度形成的冰碛岩和冰碛粘土^[15](表1)。根据Nesbitt计算结果^[15],可总结出主要沉积物和矿物在某些典型气候下的CIA参数,厘清其气候演化过程,判断相关的事件,从而限定区域性的地层划分与对比。

华南南华纪古气候大致经历了由Sturtian全球冰期到Marinoan冰期的寒冷—温暖—寒冷过程,其岩石地层的CIA值有很好的对应变化趋势。特别是在三峡地区及邻区,有关南沱组CIA值的研究较多,近年也开始了针对南沱组和陡山沱组CIA值的对比变化研究^[16]。结果显示,从南沱组冰川寒冷气候到陡山沱组的温暖气候,CIA值也有显著的变化,

数值与对应的气候一致。

3.2 CIA样品挑选与测试

WT1井7590~8060 m段测试了424个岩石地球化学样品,大部分来自钻井岩屑,少部分来自取心段。无论是在磨制薄片还是地球化学分析之前,均利用特殊试剂进行清洗,并进行严格挑选,避免样品受到钻井液的影响或挑选不均一。岩石地化测试在西南油气田分公司勘探开发研究院实验中心完成,测试过程严格按照相关流程进行,测试结果科学有效。

3.3 结果与讨论

对424个岩石地球化学进行分析与计算,得出的化学蚀变指数(CIA)结果表明(岩性为泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩等细粒沉积物,满足CIA值的计算前提):有385件样品的CIA值大于60,特别是在底部的8060 m井段开始出现较多的70~80的值(图2;表2)。在385件CIA>60的数据中,其最小值为61.2,最大值为82,平均值为72.1,表明7590~8060 m井段所代表的沉积地层发育时期的气候主要为温暖潮湿的气候环境。其余39件样品的CIA值在50~60之间,并非连续出现,层段以7590~7614 m之间的为主,靠近中上部。区域上,陡山沱组内部发生了Gaskiers冰期事件,地区差异性极大。但WT1井出现此类变化,推测可能是Gaskiers冰期事件在四川盆地内部的一种表现,也可作为未来区域地层格架及构造演化研究的重要方向之一。需要

表1 上地壳各类岩石、矿物CIA值^[8]

Table 1 CIA values of various rocks and minerals in the upper crust

岩石	矿物	CIA 值	气候和风化程度
平均上地壳	钠长石	50	反映寒冷干燥气候下低等风化程度
更新世冰碛岩基质	钙长石	50	
更新世冰期粘土岩	钾长石	50~55	
		60~65	
平均页岩	白云母	70~75	反映温暖湿润气候下中等风化程度
		75	
	伊利石	75~85	
亚马逊泥岩	蒙脱石	75~85	反映炎热、潮湿的热带、亚热带气候下高等风化程度
		80~90	
残留粘土	绿泥石	85~100	
		100	
	高岭石	100	

注: $CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O) \times 100$, CaO^* 指岩石中与硅酸盐相结合的 CaO 含量

表 2 WT1 井 7590~8060 m 段取样井段的 CIA 值(部分)

Table 2 CIA value of 7590~8060 m sect in WT1 Well

%

取样深度/m	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	CaO *	CIA	取样深度/m	Al ₂ O	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	CaO *	CIA
7628	37.46	8.01	6.30	0.01	0.01	72.34	7973	37.49	5.07	6.61	0.65	0.65	75.23
7636	32.57	6.81	11.43	0.24	0.24	63.81	7974	36.28	4.97	8.32	0.33	0.33	72.71
7637	33.70	7.20	10.41	0.14	0.14	65.50	7975	36.50	4.94	8.39	0.48	0.48	72.55
7642	38.50	7.45	6.16	0.36	0.36	73.37	7976	36.26	4.98	8.32	0.58	0.58	72.31
7643	38.67	7.44	6.20	0.40	0.40	73.36	7977	36.11	4.98	8.28	0.44	0.44	72.49
7644	38.79	7.46	6.21	0.24	0.24	73.61	7978	26.06	1.84	10.46	1.38	1.38	65.58
7646	38.78	7.30	3.61	0.38	0.38	77.46	7979	25.89	1.84	10.48	1.44	1.44	65.29
7647	35.92	6.88	7.27	0.30	0.30	71.32	7980	25.99	1.84	10.52	1.14	1.14	65.81
7648	35.46	6.85	7.24	0.29	0.29	71.15	7981	25.99	1.85	10.46	1.18	1.18	65.83
7649	35.52	6.87	7.23	0.33	0.33	71.11	7982	31.01	3.41	9.59	0.91	0.91	69.03
7650	35.67	6.86	7.30	0.12	0.12	71.42	7983	30.79	3.41	9.71	0.85	0.85	68.78
7651	35.16	6.68	7.60	0.03	0.03	71.07	7984	33.47	3.76	7.58	0.93	0.93	73.17
7654	35.28	6.34	8.44	0.48	0.48	69.80	7985	33.18	3.78	7.57	1.01	1.01	72.86
7655	35.48	6.35	8.44	0.45	0.45	69.96	7986	33.32	3.78	7.52	0.85	0.85	73.29
7656	35.29	6.66	7.25	0.19	0.19	71.44	7987	31.77	2.75	7.11	1.35	1.35	73.92
7657	35.65	6.26	6.74	0.22	0.22	72.95	7988	31.44	2.76	7.12	1.23	1.23	73.89
7658	36.85	6.48	7.15	0.48	0.48	72.31	7989	32.80	3.21	6.90	1.05	1.05	74.63
7659	38.34	6.75	5.60	0.57	0.57	74.79	7990	32.94	3.22	6.89	1.37	1.37	74.17
7660	39.06	6.72	4.21	0.49	0.49	77.38	7991	32.81	3.21	6.94	1.29	1.29	74.15
7661	40.02	7.02	3.51	0.47	0.47	78.43	7992	36.62	5.00	6.77	0.52	0.52	74.88
7662	38.31	6.86	5.00	0.53	0.53	75.57	7993	36.55	5.00	6.73	0.20	0.20	75.39
7664	37.75	7.03	7.21	0.19	0.19	72.33	7994	36.47	5.01	6.78	0.45	0.45	74.88
7672	35.93	6.19	8.75	0.04	0.04	70.57	7995	36.41	5.02	6.77	0.42	0.42	74.87
7673	35.03	6.14	8.86	0.34	0.34	69.56	7996	36.03	4.80	6.33	0.42	0.42	75.73
7674	32.72	5.47	9.65	0.54	0.54	67.64	7997	36.06	4.80	6.31	0.73	0.73	75.29
7675	30.87	4.86	10.22	0.67	0.67	66.21	7998	35.92	4.81	6.44	0.39	0.39	75.53
7678	27.95	4.75	15.01	0.19	0.19	58.35	7999	28.08	3.04	14.68	1.12	1.12	59.85
7679	27.98	4.75	14.96	0.04	0.04	58.61	8000	34.50	4.15	6.08	1.13	1.13	75.24
7685	32.55	5.75	13.04	0.01	0.01	63.38	8001	25.74	3.11	12.59	0.11	0.11	61.96
7686	31.45	5.59	11.83	0.14	0.14	64.17	8002	32.89	4.32	9.67	0.70	0.70	69.11
7687	31.15	5.58	11.75	0.20	0.20	63.98	8003	32.72	3.71	9.89	0.95	0.95	69.23
7688	31.38	5.58	11.82	0.04	0.04	64.28	8004	37.11	4.93	4.10	0.69	0.69	79.25
7690	31.21	5.57	11.93	0.10	0.10	63.95	8005	36.95	4.70	5.31	0.78	0.78	77.40
7691	33.39	5.50	7.13	0.63	0.63	71.57	8006	34.37	4.46	6.01	0.61	0.61	75.63
7693	37.36	6.01	6.06	0.33	0.33	75.07	8007	36.08	4.37	6.41	1.09	1.09	75.24
7694	37.88	6.07	6.07	0.71	0.71	74.67	8008	27.75	2.15	11.05	2.12	2.12	64.44
7696	36.13	6.00	8.02	0.31	0.31	71.61	8009	35.57	4.80	7.74	0.58	0.58	73.05
7697	36.04	5.96	8.00	0.08	0.08	71.97	8010	33.97	4.76	8.65	0.55	0.55	70.88

续表 2

取样深度/m	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	CaO *	CI _A	取样深度/m	Al ₂ O	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	CaO *	CI _A
7698	35.98	5.99	8.06	0.25	0.25	71.57	8011	36.59	5.09	6.86	0.70	0.70	74.31
7699	36.11	5.99	8.09	0.38	0.38	71.40	8012	30.52	2.48	6.98	2.07	2.07	72.58
7700	39.24	6.26	3.59	0.77	0.77	78.71	8013	23.09	1.54	9.29	1.10	1.10	65.93
7701	39.25	6.24	3.52	0.68	0.68	78.99	8014	27.29	1.85	9.50	2.02	2.02	67.13
7704	35.10	5.98	8.40	0.19	0.19	70.65	8015	18.25	2.47	19.68	0.10	0.10	45.06
7705	34.92	5.98	7.26	0.13	0.13	72.31	8016	32.28	4.16	8.41	0.79	0.79	70.71
7708	34.03	5.58	8.33	0.15	0.15	70.77	8017	37.15	5.20	4.91	0.88	0.88	77.17
7709	34.65	5.35	8.43	0.32	0.32	71.08	8018	28.60	3.69	13.54	0.40	0.40	61.86
7710	36.02	5.30	6.59	0.43	0.43	74.52	8019	28.66	3.70	13.53	0.68	0.68	61.54
7712	37.85	5.98	3.55	0.36	0.36	79.29	8020	28.82	3.69	13.52	0.52	0.52	61.91
7715	40.17	6.54	3.06	0.21	0.21	80.37	8021	27.64	1.46	9.01	2.31	2.31	68.39
7716	40.93	6.66	3.29	0.41	0.41	79.79	8022	30.93	3.81	11.17	0.63	0.63	66.47
7717	39.61	6.56	3.53	0.05	0.05	79.61	8023	31.56	4.09	12.16	0.77	0.77	64.96
7718	40.90	6.50	3.56	0.29	0.29	79.81	8024	28.79	3.60	13.42	0.53	0.53	62.14
7720	38.90	6.33	3.68	0.25	0.25	79.12	8025	32.81	4.72	10.54	0.32	0.32	67.80
7722	37.83	6.19	2.63	0.14	0.14	80.85	8030	38.33	5.65	5.59	0.62	0.62	76.37
7723	39.82	6.31	2.57	0.25	0.25	81.36	8031	38.47	5.66	5.60	0.64	0.64	76.37
7724	41.25	6.50	2.87	0.56	0.56	80.61	8032	34.67	3.50	7.68	2.17	2.17	72.20
7725	40.15	6.25	3.58	0.20	0.20	80.00	8033	34.45	3.50	7.69	2.21	2.21	72.00
7726	37.77	6.01	6.19	0.18	0.18	75.32	8034	37.86	5.65	7.23	0.26	0.26	74.25
7728	40.69	6.36	0.56	0.80	0.56	84.04	8035	36.46	5.39	8.44	0.29	0.29	72.08
7728.1	40.32	6.45	3.43	0.37	0.37	79.72	8036	34.80	4.77	8.75	0.30	0.30	71.57
7729	39.63	6.26	3.32	0.50	0.50	79.72	8037	37.94	5.49	6.84	0.42	0.42	74.85
7730	40.25	6.42	3.50	0.14	0.14	80.01	8038	38.88	5.73	4.36	0.19	0.19	79.09
7731	40.52	6.22	2.90	0.48	0.48	80.84	8039	40.37	5.82	3.60	0.41	0.41	80.41
7734	39.10	6.14	3.18	0.37	0.37	80.13	8040	40.45	5.96	3.75	0.28	0.28	80.18
7735	37.89	6.12	0.90	0.26	0.26	83.90	8042	37.03	4.17	3.86	0.94	0.94	80.50
7737	38.82	6.12	4.39	0.13	0.13	78.50	8043	43.08	4.98	0.94	1.15	0.94	85.92

说明的是,成岩过程中钾交代作用会带入新的 K 元素(钾蚀变),导致 CI_A 值偏低,因此需要对其进行校正。本文对 CI_A 值进行计算时,已对 K 元素进行了校正,并且应用化学风化图解进行了综合判断,A-CN-K 图解(另文发表)显示,95%的样品风化趋势近于平行 A-CN 线,且位于 Panahi^[17] 风化图解的钾未交代区域,少量位于钾交代区域。

综上,WT1 井 7590~7800 m 段地层发育于温暖潮湿的气候环境中, CI_A 值指示为非冰期沉积,与

南华系南沱组冰川寒冷气候有显著的差别。从地球化学指标方面进一步限定了该井段的地层应归属于陡山沱组。

4 对油气勘探的启示

在基础地质研究方面,WT1 井 7590~7800 m 段地层应归属于震旦系陡山沱组的认识,不仅为进一步认识及研究 WT1 井和川东北地区盆地地质结构提供了新素材、新思路,更为川东北地区存

在隆凹相间的格局(延伸至盆内)提供了关键的证据(图3),对基础地质研究具有极重要的科学意义。

在油气勘探方面,川东北地区震旦系陡山沱组和寒武系筇竹寺组黑色炭质泥页岩具有未来可能形成大气田的烃源岩物质基础及有利的隆拗相间的沉积格局。WT1井7590~8060 m层段确定为陡山沱组,进一步指示该地区盆缘与盆地内部可能存在一个连通的、陡山沱组沉积期就开始发育的克拉通内裂隙构造及相对深水沉积环境。进一步丰富了该地区隆拗相间的沉积格局,限定了它们的空间分布范围,还与达州-开江古隆起形成了极好的源储空间匹配关系,初步具备类似于川中安岳特大型油气田发现与突破一致的“四古”油气成藏要素,具有较大的油气勘查及勘探潜力,并有望成为四川盆地继威远、安岳大气田之后又一油气突破的前寒武纪地区和领域,有利于打开川东北地区震旦系一下古生界的油气勘探局面。

5 结 论

(1)WT1井7590~7800 m段岩石地层组合及序列特征与区域上陡山沱组发育特征极相似,与南华系南沱组具有显著的区别。

(2)WT1井7590~7800 m段3个砂岩碎屑锆石U-Pb年龄中最年龄的峰值分别为 654.5 ± 7.1 Ma、 683.7 ± 7.3 Ma、 644 ± 5 Ma。最底部的砂岩最年轻的为 644 ± 5 Ma,限定了该井段的沉积时代应晚于 644 ± 5 Ma,即晚于南沱组沉积时代。

(3)WT1井7590~7800 m段424个岩石地球化学样品中,有385个CIA值大于60,指示其沉积于温暖潮湿的气候环境,显著区别与南华系南沱组冰川寒冷气候。

(4)从岩石地层组合及序列特征、碎屑锆石U-Pb年代学特征及CIA值的综合限定,认为WT1井7590~7800 m段地层应归属于震旦系陡山沱组。

致谢:感谢西南油气田公司、成都理工大学等单位的大力支持,感谢审稿老师们付出的辛苦劳动

及提出的宝贵修改意见。

参考文献

- [1] 杨跃明,文龙,罗冰,等.四川盆地达州-开江古隆起沉积构造演化及油气成藏条件分析[J].天然气工业,2016,36(8): 1-10.
- [2] 谷志东,殷积峰,姜华,等.四川盆地宣汉-开江古隆起的发现及意义[J].石油勘探与开发,2016,43(6): 893-904.
- [3] 赵文智,魏国齐,杨威,等.四川盆地万源-达州克拉通内裂陷的发现及勘探意义[J].石油勘探与开发,2017,44(5): 659-669.
- [4] 李智武,冉波,肖斌,等.四川盆地北缘震旦纪-早寒武世隆-拗格局及其油气勘探意义[J].地质前缘,2019,26(1): 59-85.
- [5] 孙枢,王铁冠.中国东部中-新元古界地质学与油气资源[M].北京:科学出版社,2016: 125-147.
- [6] Lu M, Zhu M, Zhang J, et al. The DOUNCE event at the top of the Ediacaran Doushantuo Formation of South China: wide stratigraphic occurrence and non-diagenetic origin[J]. Precambrian Research, 2013, 225: 86-109.
- [7] 刘鹏举,尹崇玉,陈寿铭,等.华南峡东地区埃迪卡拉(震旦)纪年代地层划分初探[J].地质学报,2012,86: 849-866.
- [8] 汪啸风,陈孝红,王传尚,等.震旦系底界及内部年代地层单位划分[J].地层学杂志,2001,23(增刊): 370-376.
- [9] 汪泽成,刘静江,姜华,等.中-上扬子地区震旦纪陡山沱组沉积期岩相古地理及勘探意义[J].石油勘探与开发,2019,46(1): 39-51.
- [10] 安志辉,童金南,叶琴,等.湖北宜昌樟树坪地区陡山沱组地层划分与对比[J].地球科学,2018,43(7): 2206-2221.
- [11] 余振兵.中上扬子上元古界-中生界碎屑锆石年代学研究[D].中国地质大学(武汉)博士学位论文,2016.
- [12] 宋高源,史晓颖.扬子地台东南缘新元古代地层碎屑锆石年龄及其意义[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2017.
- [13] Ludwig K. R. User's Manual for Isoplot 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center, 2003: 1-70.
- [14] 冯连君,储雪蕾,张启锐,等.化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J].地质前缘,2003,10(4): 539-543.
- [15] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [16] 胡蓉,陈福坤.三峡地区南沱组与陡山沱组地球化学特征及意义[D].中国科学技术大学博士学位论文,2016.
- [17] Panahi A, Young G, Rainbird R. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(13): 2199-2220.