



凝灰岩成因及储集空间类型——以川西北大坪剖面二叠系吴家坪组为例

杨凤英, 张云峰, 曾琪, 潘清川, 范存辉, 李一苇, 尹宏, 张本健

引用本文:

杨凤英, 张云峰, 曾琪, 等. 凝灰岩成因及储集空间类型——以川西北大坪剖面二叠系吴家坪组为例[J]. 沉积学报, 2025, 43(1): 182-197.

YANG FengYing, ZHANG YunFeng, ZENG Qi, et al. Formation and Types of Tuff Reservoirs: A case study of Permian Wujiaping Formation at Daping section, northwestern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, 43(1): 182-197.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

羌塘盆地晚三叠世岩相古地理特征与烃源岩

Lithofacies Palaeogeography and Source Rock of the Late Triassic in the Qiangtang Basin

沉积学报. 2020, 38(4): 876-885 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.093>

湘中—湘南烟溪组沉积特征及页岩气勘探潜力

Sedimentary Characteristics and Exploration Potential for Shale Gas in Yanxi Formation, Central and Southern Hunan

沉积学报. 2020, 38(1): 218-230 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.026>

玛湖凹陷夏子街地区三叠系百口泉组砂砾岩储层特征及控制因素

The Characteristics and Controlling Factors of Glutenite Reservoir in the Triassic Baikouquan Formation, Xiazijie Area, Mahu Depression

沉积学报. 2019, 37(5): 945-956 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.002>

柴西缘阿尔金山前下侏罗统层序地层与岩相古地理研究

Sequence Stratigraphy and Lithofacies Paleogeography of the Lower Jurassic in Southern Altyn Tagh, Western Qaidam Basin

沉积学报. 2019, 37(2): 356-370 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.130>

准噶尔盆地玛北地区三叠系百口泉组储层成岩相特征

Diagenetic Facies of Triassic Baikouquan Formation in Mabei Area, Junggar Basin

沉积学报. 2018, 36(2): 354-365 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.030>

文章编号:1000-0550(2025)01-0182-16

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.011

凝灰岩成因及储集空间类型 ——以川西北大坪剖面二叠系吴家坪组为例

杨凤英¹,张云峰¹,曾琪²,潘清川³,范存辉¹,李一苇⁴,尹宏²,张本健⁵

1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

2. 中国石油西南油气田分公司川西北气矿, 四川江油 621700

3. 西南石油大学科学技术发展研究院, 成都 610500

4. 中国石油东方地球物理勘探有限责任公司西南物探分公司, 成都 610000

5. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 成都 610041

摘要 【目的】川西北地区二叠系吴家坪组海相碳酸盐岩中广泛分布厚度不等的凝灰岩,并具有一定的天然气储集能力。川西北大坪剖面吴家坪组剖面厚45.02 m,在吴一段和吴二段中发育单层厚5~55 cm的凝灰岩,分布稳定,为研究该区凝灰岩成因及储集空间类型提供了良好的素材。【方法】基于野外剖面实测,并采集凝灰岩样品进行全岩矿物含量、地球化学特征、锆石微量元素、U-Pb年龄等分析对比,探讨凝灰岩成因及储集空间类型。【结果】吴家坪组凝灰岩以火山尘凝灰岩为主,由粒径小于0.05 mm的玻屑组成;矿物成分以伊利石、伊蒙混层为主,含少量石英、石膏;吴一段凝灰岩具有 Al_2O_3/TiO_2 高的比值(23.36~34.56)、 SiO_2/Al_2O_3 的低比值(1.84~2.75)及Eu、Ba、Sr、Ti元素明显亏损等特征,吴二段凝灰岩具有 Al_2O_3/TiO_2 高的比值(21.140~53.049)、 SiO_2/Al_2O_3 的低比值(1.829~2.682)及Eu弱亏损、亏损Nb、Ti等高场强元素。【结论】吴家坪组凝灰岩受到蚀变程度较高,其来源均与峨眉山大火成岩省的多期酸性火山作用有关,形成于板内拉张环境,且吴二段凝灰岩受到壳幔混合的影响。凝灰岩中储集空间类型包括洞、不规则溶孔、粒内溶孔、有机质孔、粒间溶孔、裂缝等,凝灰岩中热液锆石测得的U-Pb年龄为 132.37 ± 0.53 Ma,其形成受早白垩世热液、构造活动等多种因素影响。

关键词 凝灰岩成因;储集空间类型;峨眉山大火成岩省;吴家坪组;二叠系;川西北地区

第一作者简介 杨凤英,女,1998年出生,硕士,储层地质学,E-mail: yangfengying1122@163.com

通信作者 张云峰,男,副教授,沉积学、储层地质学,E-mail: zhyf@swpu.edu.cn

中图分类号 P588.14 **文献标志码** A

0 引言

凝灰岩是火山喷发过程中产生细粒碎屑物质,通过风或者水的搬运作用及固结压实作用形成的一类火山碎屑岩,因其在大气中滞留的时间较短(1~3年),且横向上具有连续性,是极好的地层对比标志层^[1],其纵横向分布亦可约束火山活动时限及规模^[2-3]。四川盆地及华南地区晚二叠世凝灰岩广泛分布^[4],成分以伊利石、伊蒙混层、高岭石等黏土矿物为主,含少量石英、黄铁矿等^[5-6];主要分布于四川盆地的西北部、西部、南部^[7-9]、重庆南川^[10]等。前人基于锆石U-Pb年龄、矿物组分、微量元素分析等,认为上二叠统凝灰岩

成因与峨眉山大火成岩省酸性火山活动^[11-12]、华南板块西南缘古特提斯二叠纪大陆岩浆弧^[13-14]、西伯利亚大火成岩省相关的基性火山活动^[15]等相关,并广泛用于火山喷发活动时间及期次的确定。

受沉积及成岩作用的影响,凝灰岩中普遍存在不同尺度原生孔隙及次生孔隙,前者包括收缩孔、晶间孔等,其发育程度受岩性及火山喷发旋回的控制^[16-17],后者包括溶蚀孔洞、粒内溶孔、粒间溶孔、有机质孔、脱玻化孔、裂缝等,发育程度受热液作用、脱玻化作用、多期溶蚀、破裂作用^[18-19]等的影响。国内目前已在四川盆地^[20]、三塘湖盆地^[21]、鄂尔多斯盆地^[22-23]等多个地区发现凝灰岩储层及油气藏。近年

收稿日期:2022-11-09;修回日期:2023-02-13;录用日期:2023-03-19;网络出版日期:2023-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41702122);中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目(2020CX010301) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41702122; Science and Technology Cooperation Project of the CNPC-SWPU Innovation Alliance, No. 2020CX010301]

来,川西北地区S101、元坝7、YS1等井的上二叠统凝灰岩发现规模凝灰岩孔隙型、溶洞型、裂缝型储层及工业气流^[24-26],显示了较大的储集能力及天然气工业产出价值;与此同时,由于钻井实物资料的缺乏,该区凝灰岩成因、储层形成机制等缺乏系统研究。

选取出露条件好、特征典型的川西北大坪剖面二叠系吴家坪组凝灰岩作为研究对象,基于剖面实测及密集采样,开展了岩石学、地球化学等方面的测试,获取了凝灰岩发育位置、厚度、矿物类型、微量元素、锆石U-Pb年龄、不同尺度储集空间类型等数据,明确了凝灰岩的岩石类型及矿物组成、成因、不同岩石类型的储集性等,以期为川西北地区上二叠统凝灰岩成因、分布、储集性及天然气勘探提供支撑。

1 地质背景及剖面特征

川西北大坪剖面构造上位于四川盆地的西北部川北拗陷低缓处的龙门山断层北段的东缘(图1a),地理位置位于旺苍县双汇镇大坪村西河边公路一侧(图1b;起点坐标30°40′33.79″N,104°03′32.39″E,终点坐标30°40′33.58″N,104°03′32.85″E),剖面顶底界线清楚,无植被覆盖。受中一晚二叠世峨眉地裂运动影响,整个四川盆地及云南部分地区发育厚度巨大的玄武岩^[11,27-29](图1a),并在四川盆地表现为中下部铁玄武岩、顶部酸性火山岩的火山序列^[30]。晚二叠世吴家坪阶在川西北称为“吴家坪组”,为一套浅海相碳酸盐岩夹凝灰岩地层^[30],自下而上可分为吴一段—吴三段三个岩性段,碳酸盐岩中珊瑚、海百合、有孔虫等常见,具备一定的造礁能力;四川盆地及周缘吴家坪期凝灰岩在各段均有不同程度的分布,主要分布在吴一段—吴二段,呈多个薄层状产出(图1c)^[31],具多个形成年龄,如宾川地区峨眉山火山序列酸性熔结凝灰岩年龄为259.1±0.5 Ma^[32]和259.2±0.3 Ma^[33],广元朝天剖面吴家坪组凝灰岩年龄为260.1±2.8 Ma^[8]等锆石U-Pb年龄,指示了峨眉山大火成岩省的火山活动的多阶段性。

川西北大坪剖面二叠系共实测22层,其中第1~7层为茅口组,第8~22层为吴家坪组(厚45.02 m)。剖面呈近南北走向、南西西倾向、倾角40°左右,分布稳定。岩性以泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩、泥质泥晶灰岩、泥岩为主,夹薄层凝灰岩,共识别出12层凝灰岩,单层厚度5~54 cm(图1d)。

2 样品采集及分析方法

基于野外剖面实测,对该剖面进行了分层,描述了各层岩石类型、沉积构造、颜色等。对凝灰岩发育层位、层厚、颜色等进行了详细描述,采集凝灰岩样品22件(DP1~22,采样位置见图1d),制作薄片22件,全岩及黏土矿物含量、主量元素、微量元素、扫描电镜各20件,锆石U-Pb年龄样品11件。

薄片制备执行石油天然气行业标准《岩石薄片制备方法》(SY/T 5913—2021);显微成分、组构及储集空间观察采用偏光显微镜(Zeiss AXIO SCOPE. A1);超微成分、组构鉴定及能谱分析采用场发射环境扫描电镜(Quanta650FEG);主量元素测试采用电感耦合等离子体发射光谱仪(PE5300V);全岩及黏土矿物测定采用X射线衍射仪(Ultima IV),电压为40 kV,电流为40 mA,取样品磨成粉末放在载物台进行XRD分析,全岩矿物鉴定与含量计算采用矿物特征衍射峰值和K值法^[34],黏土矿物具体步骤为取样品磨成粉末,用蒸馏水进行脱气,再进行沉淀和离心法分离小于2 μm的颗粒,接着对黏土矿物样品在空气干燥、乙二醇溶剂化24 h和在490 °C下加热2 h后,进行三次XRD测试^[35],X射线衍射数据处理使用软件HighScore在乙二醇曲线上进行,不同物质的X射线吸收指数不一样,黏土矿物吸收指数较低,黏土矿物的相对含量主要使用(001)晶面衍射峰的面积比,伊利石使用1 nm(001)晶面,蒙脱石使用1.7 nm(001)晶面,高岭石(001)和绿泥石(002)采用0.7 nm叠加峰,计算出来的矿物相对含量误差约为5%^[34]。关键矿物的鉴定依据单晶矿物卡片库与实测谱图对比,一一对应就能检索出样品的全部物相;微量元素、稀土测试均采用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent Technologie s7700 Series),测试方法与文献[36]相同;以上测试在西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室和天然气地质四川省重点实验室完成。

锆石U-Pb年龄测试过程包括锆石样品挑选、清洗、热液锆石分选、测试等步骤:首先将凝灰岩样品清洗晾干、全岩碎样和锆石挑选,挑选出晶形完好和色泽度较好的锆石用环氧树脂固定于样品靶上,样品靶抛光后在超纯水中超声清洗至表面可能的污染除去;其次对锆石进行阴极发光图像观察及拍照,根据热液锆石无明显震荡环带、晶形通常为半

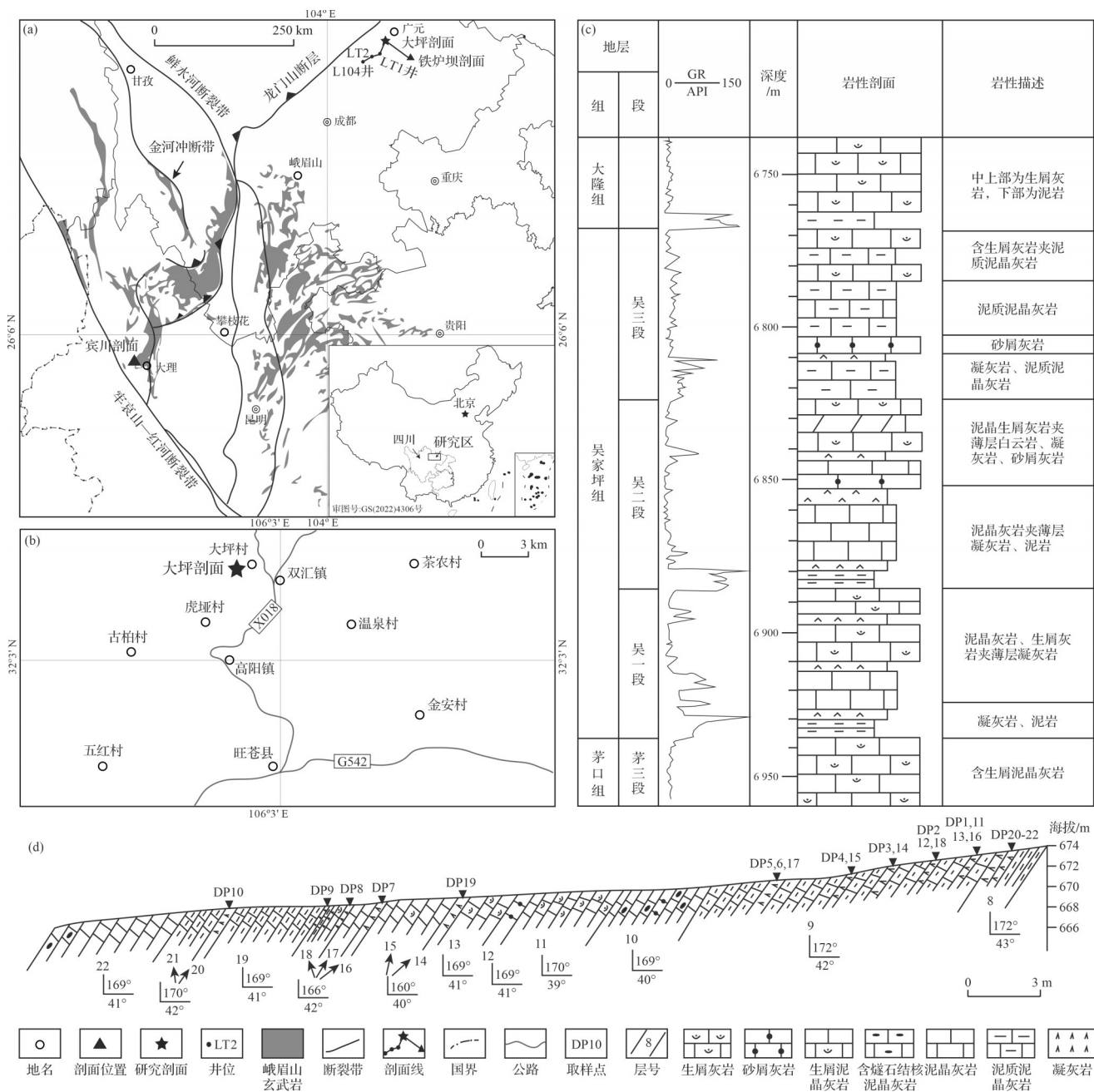


图1 川西北区域位置图及大坪剖面吴家坪组地层剖面

(a)峨眉山大火成岩省地质简图(据文献[11]修改);(b)大坪剖面交通简图;(c)川西北上二叠统吴家坪组岩性柱状图(据文献[31]修改);(d)大坪剖面吴家坪组地层剖面

Fig.1 Location map of northwestern Sichuan and Wujiaping Formation stratigraphic profile at Daping section

自形—他形、其棱线也不显著等特征^[37-38]挑选出热液锆石;最后以NIST610作为外标、⁹¹Zr作为内标,采用激光剥蚀—电感耦合等离子体质谱仪(Resolution SE+Agilent7900)进行年龄测试;数据处理用Iolite程序^[39],协和图绘制采用Isoplot R程序^[40],同位素比值误差为2σ,年龄采用²⁰⁷Pb/²³⁵U和²⁰⁶Pb/²³⁸U比值和年龄;锆石U-Pb年龄测试在南京宏创地质勘查技术服务有限公司微区分析实验室完成。

3 凝灰岩岩石学及分布特征

通过野外剖面实测,将第8~9层划分为吴一段,第10~20层划分为吴二段,第21~22层划分为吴三段,根据取样点位置(图1d),将DP1~6, DP11~18, DP20~22称为吴一段凝灰岩样品,将DP7~10, DP19称为吴二段凝灰岩样品。

大坪剖面二叠系吴家坪组中凝灰岩除第8层厚

度相对较大(54 cm)外,其他层厚度一般小于20 cm,夹于灰岩地层之间,展布稳定。颜色呈灰黑色、土黄色、灰绿色等,且在同一层内可见多种颜色变化,单层顶底多与临近地层颜色相近,可能是受多种蚀变或成岩作用影响所致(图2a1~c1, a2~c2)。薄片、扫描电镜及XRD测试结果表明,吴一段凝灰岩样品的

矿物组成以黏土为主(69.9%~88.0%)(图3a),同时存在数量不等的石英(3.2%~16.3%)、钾长石(0~7.2%)、黄铁矿(0~12.5%)、半水石膏(0~8.7%)、黄钾铁矾(2.0%~19.4%)、金红石(0.6%~2.3%)、石膏(0~1.9%)(图3c)等矿物(表1);黏土矿物以伊利石(22.9%~73.7%)、伊/蒙混层(26.3%~77.1%)为主,伊/蒙混层

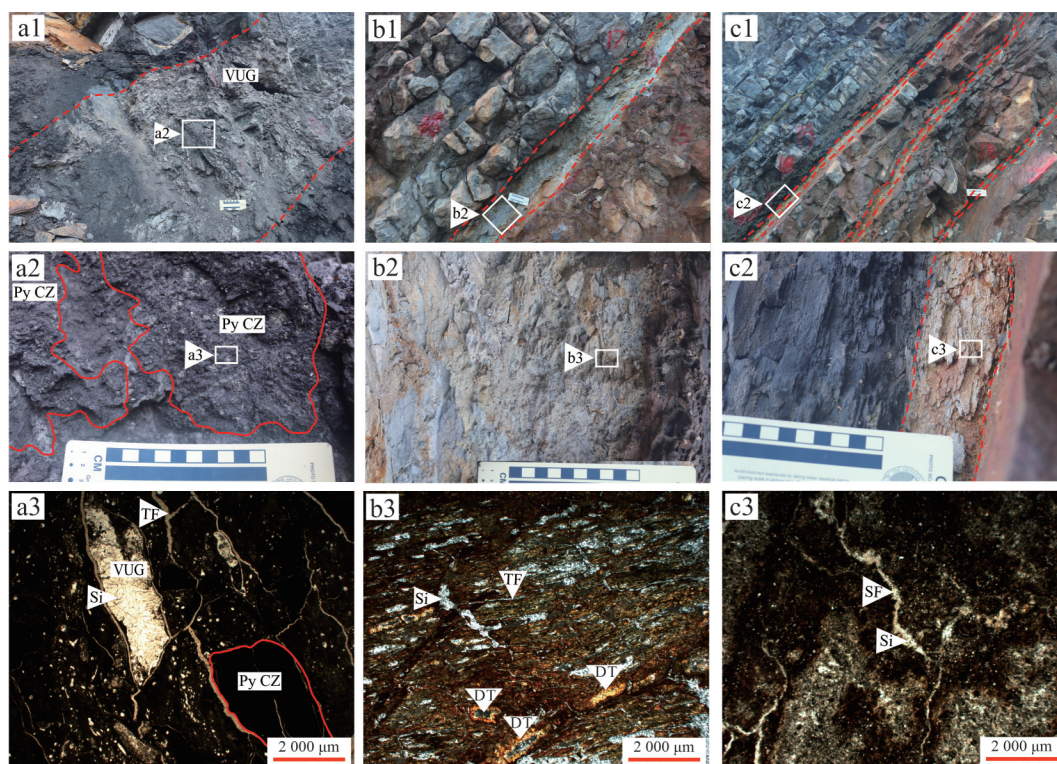


图2 大坪剖面凝灰岩野外特征

(a1~a3)灰黑色火山尘凝灰岩,溶蚀作用发育,形成洞及不规则溶蚀充填区,溶蚀区黄铁矿充填普遍,微观下可见构造缝及黄铁矿、方解石充填的溶蚀孔洞,第8层;(b1~b3)杂色火山尘凝灰岩薄夹层,底部被侵染成褐色,微观下构造微缝及溶蚀作用发育,被硅质充填,具脱玻化作用形成的拉长状透镜体,内部具靠细脱玻结构,第16层;(c1~c3)三个火山尘凝灰岩薄夹层,单个厚度5~10 cm,呈土黄色,微观下可见硅质充填的扩溶缝及脱玻化作用的不均匀斑斑,第18层;VUG.洞、溶蚀孔洞,Py CZ.溶蚀区被黄铁矿充填,Cal.方解石,Si.硅质,DT.脱玻化作用,TF.构造缝,SEF.扩溶缝

Fig.2 Field characteristics of tuffs at Daping section

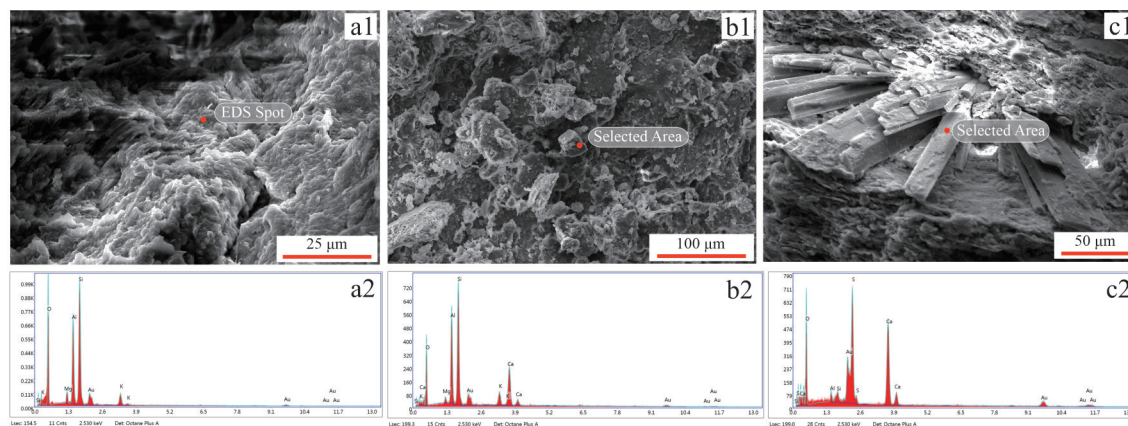


图3 凝灰岩扫描电镜及能谱图

(a1~a2)伊利石,样品DP3,第9层;(b1~b2)伊/蒙混层,样品DP9,第18层;(c1~c2)石膏,样品DP6,第9层

Fig.3 Scanning electron microscopy and energy spectra of tuffs

表1 大坪剖面二叠系凝灰岩全岩矿物成分及含量(%)

Table 1 Whole-rock mineral composition and content of Permian tuffs at Daping section(%)

层位	样品编号	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	半水石膏	黄钾铁矾	金红石	石膏	黏土矿物
吴一段	DP1	6.0	0	0	0	0	0	1.8	4.6	1.0	0	86.6
	DP2	16.3	0	0	0	0	7.2	0	2.0	2.1	0	72.4
	DP3	7.7	0	0	0	0	0	2.1	19.4	0.9	0	69.9
	DP4	5.3	0	0	0	0	0	1.6	4.1	1.0	0	88.0
	DP5	9.7	6.9	0	0	0	1.2	0	3.5	0.7	0	78.0
	DP6	7.5	3.1	0	0	0	0	5.0	8.0	2.3	0	74.1
	DP11	5.0	0	0	0	0	0	3.1	7.9	1.1	0	82.9
	DP12	4.9	0	0	0	0	0	0	7.8	0.7	0	86.6
	DP13	4.4	0	0	0	0	0	8.7	5.0	0.6	1.9	79.4
	DP14	8.1	1.9	0	0	0	0	1.5	2.8	1.0	0	84.7
	DP15	8.4	0	0	0	0	0	0	5.8	1.3	0	84.5
	DP16	4.5	7.2	0	0	0	3.2	3.7	10.3	0.7	0	70.4
	DP17	3.2	0	0	0	0	2.7	2.7	6.3	0.9	0	84.2
	DP20	4.8	0	0	0	0	12.5	3.5	6.7	0.8	0	71.7
吴二段	DP7	6.4	0	1.8	4.7	0	0	0	6.2	1.0	0	79.9
	DP8	5.3	0	0	61.4	0	0	0	0	0.4	0	32.9
	DP9	10.0	0	0	2.9	0	0	0	0	1.0	0	86.1
	DP10	5.4	3.8	0	1.9	0	0	0	3.0	1.1	0	84.8
	DP19	6.2	0	0	0	0	0	2.5	3.1	0.7	0	87.5

比中蒙皂石层和伊利石层均为10%和90%(表2);吴二段凝灰岩样品的矿物组成以黏土为主(32.9%~87.5%)(图3b),同时存在数量不等的石英(5.3%~10.0%)、钾长石(0~3.8%)、斜长石(0~1.8%)、方解石(0~61.4%)、半水石膏(0~2.5%)、黄钾铁矾(0~

6.2%)、金红石(0.4%~1.1%)等(表1);黏土矿物以伊利石(0~71.8%)、伊/蒙混层(28.2%~100%)为主,伊/蒙混层比中蒙皂石层和伊利石层均为10%和90%(表2)。凝灰岩可分为晶屑凝灰岩、玻屑凝灰岩及火山尘凝灰岩,晶屑凝灰岩中晶屑类型主要为长石、石

表2 大坪剖面二叠系凝灰岩黏土类型及含量(%)

Table 2 Clay types and contents of Permian tuffs at Daping section (%)

层位	样品编号	黏土矿物含量/%				伊/蒙混层比/%		绿/蒙混层比/%			
		蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	伊/蒙混层	绿/蒙混层	蒙皂石层	伊利石层	蒙皂石层	绿泥石层
吴一段	DP1	0	73.7	0	0	26.3	0	10	90	—	—
	DP2	0	61.7	0	0	38.3	0	10	90	—	—
	DP3	0	59.5	0	0	40.5	0	10	90	—	—
	DP4	0	62.3	0	0	37.7	0	10	90	—	—
	DP5	0	65.6	0	0	34.4	0	10	90	—	—
	DP6	0	56.3	0	0	43.7	0	10	90	—	—
	DP11	0	41.5	0	0	58.5	0	10	90	—	—
	DP12	0	47.5	0	0	52.5	0	10	90	—	—
	DP13	0	22.9	0	0	77.1	0	10	90	—	—
	DP14	0	26.4	0	0	73.6	0	10	90	—	—
	DP15	0	30.7	0	0	69.3	0	10	90	—	—
	DP16	0	29.2	0	0	70.8	0	10	90	—	—
	DP17	0	43.7	0	0	56.3	0	10	90	—	—
	DP20	0	45.4	0	0	54.6	0	10	90	—	—
吴二段	DP7	0	0	0	0	100	0	10	90	—	—
	DP8	0	0	0	0	100	0	10	90	—	—
	DP9	0	0	0	0	100	0	10	90	—	—
	DP10	0	43.0	0	0	57.0	0	10	90	—	—
	DP19	0	71.8	0	0	28.2	0	10	90	—	—

英晶屑等,粒径一般介于0.2~0.5 mm;玻屑灰岩中玻屑多呈气泡的浮岩状,部分呈镰刀状,粒度一般介于0.1~0.8 mm;火山尘主要由粒径小于0.05 mm玻屑组成,可含少量晶屑、玻屑。大坪剖面吴家坪组凝灰岩以火山尘凝灰岩为主,火山尘显微镜下整体为深灰色、点状,可见脱玻化作用的不均匀斑团以及形成微晶长石、石英等(图2a3,b3,c3)。矿物学以富含伊/蒙混层和伊利石的黏土为主,含量一般大于70%;长石、石英以晶屑、孔洞充填物、脱玻化作用产物等存在;黄铁矿、石膏、方解石等以溶蚀孔洞、裂缝中充填物存在(图2a1~a3);黄钾铁矾系黄铁矿氧化分解后的次生矿物,可能是暴露期形成。

为分析研究剖面凝灰岩与邻近区域分布的共性及差异性,结合钻井岩屑鉴定及电性曲线特征,建立了钻井与野外剖面凝灰岩分布图(图4)。可以看出,层位上,凝灰岩均分布在吴一段、吴二段,垂向上发育6~10层,反映了凝灰岩分布的时限性;厚度上,大坪剖面西侧单井的凝灰岩单层厚度(1~8 m)及累积厚度均较大,与凝灰岩物源来自西南侧相吻合,大坪剖面和邻近的铁炉坝剖面凝灰岩单层厚度显著减薄;横向上,凝灰岩各层整体具有比较好的可比性。

4 凝灰岩元素地球化学特征及成因

4.1 全岩主量元素特征

大坪剖面凝灰岩全岩主量元素变化较大(表3),吴一段凝灰岩烧失量介于9.010%~14.454%; SiO_2 含

量介于46.185%~55.748%,大多数在50%以上; Al_2O_3 的含量介于20.26%~26.51%; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 介于1.84~2.75; TiO_2 的含量0.723%~1.069%;全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量介于4.802%~6.561%; $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 介于0.028 9~0.045 6, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 介于0.008 7~0.056 5。吴二段凝灰岩样品烧失量介于9.521%~22.354%; SiO_2 含量介于32.677%~55.352%,大多数在50%以上; Al_2O_3 的含量介于17.52%~25.47%; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为1.829~2.682; TiO_2 的含量介于0.367%~1.204%;全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量介于3.375%~6.221%; $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 介于0.019~0.047; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 介于0.015 5~0.040 3。凝灰岩主量元素 TiO_2 - SiO_2 图解^[41](图5)显示,吴一段、吴二段凝灰岩数据均在火成岩区域,指示大坪剖面凝灰岩主要为火成岩特性。

4.2 微量及稀土元素特征

根据微量元素数据绘制了原始地幔标准化微量元素蛛网图(图6a)^[42-43],可知大部分样品大离子亲石元素处于波谷,有明显的Ba、Sr、Ti元素负异常。元素Ba、Sr的负亏损与斜长石有关,这是由于岩浆分离结晶作用过程中斜长石的强分离结晶作用^[44]。吴二段样品DP9的Sr处于波峰,显示Sr的正异常和Nb、Ti负异常,DP10显示Nb、Ti负异常,可能源区受到地壳、地幔混合作用。

球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图6b)^[42-43]显示,吴一段凝灰岩样品具明显的Eu负异常(Eu/Eu^* 值介于0.165~0.422)、无Ce异常。这是由于斜长石能对Eu分配,在岩浆分离结晶过程中,斜长石

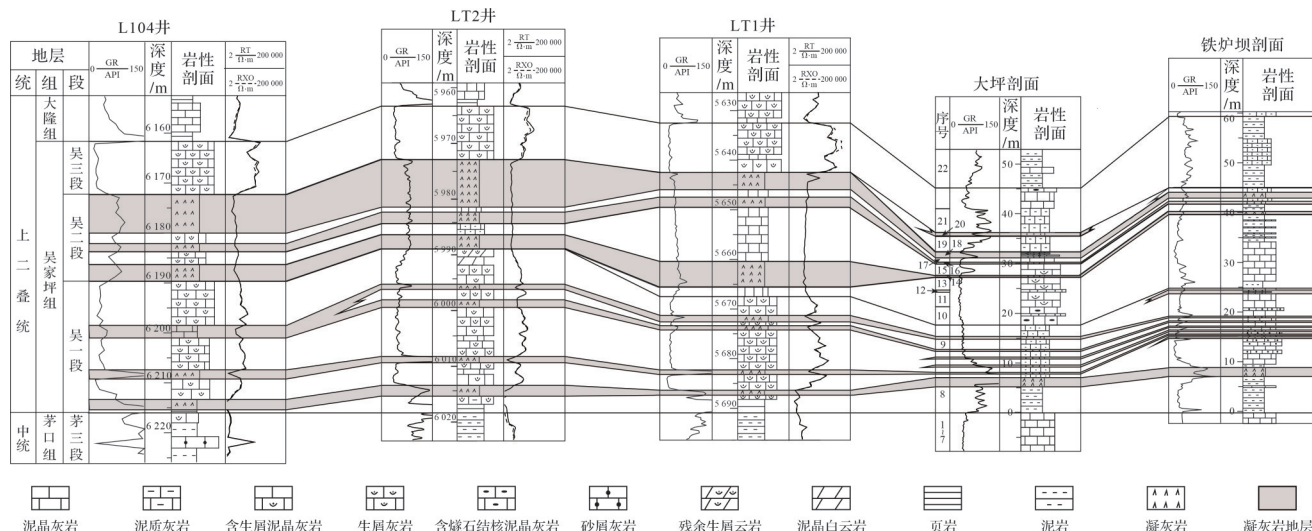


图4 川西北地区典型井凝灰岩地层对比图

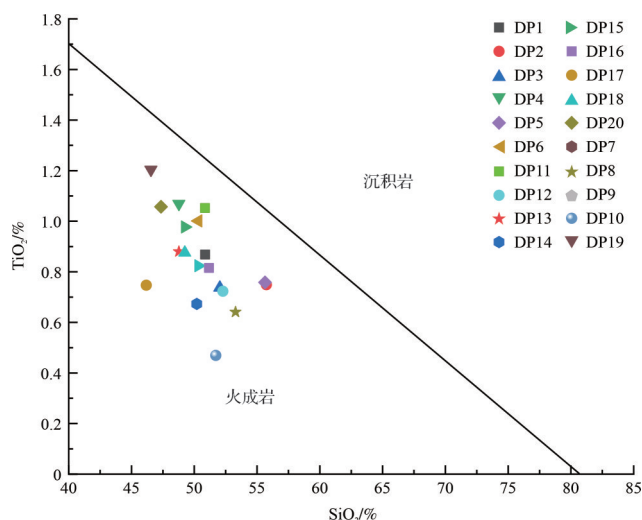
铁炉坝剖面数据来自实测,钻井剖面数据来自岩屑薄片鉴定

Fig.4 Stratigraphic correlation of typical tuffs at wells in northwest Sichuan

表3 大坪剖面二叠系凝灰岩全岩主量元素含量(%)

Table 3 Content of major elements in whole-rock Permian tuffs at Daping section (%)

层位	样品编号	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total
吴一段	DP1	50.866	5.99	0.052	1.250	2.833	24.77	1.96	0.002	0.868	0.080	10.774	99.445
	DP2	55.748	4.62	0.182	0.231	2.956	20.26	4.89	0.002	0.749	0.053	9.488	99.179
	DP3	52.037	5.94	0.053	0.951	3.330	25.47	1.58	0.002	0.737	0.088	9.028	99.216
	DP4	48.780	5.93	0.122	0.752	3.235	26.51	2.06	0.003	1.069	0.108	10.341	98.910
	DP5	55.632	5.17	0.190	1.119	3.024	20.38	2.64	0.002	0.758	0.044	10.396	99.355
	DP6	50.320	5.65	0.169	0.794	2.882	24.16	2.01	0.018	1.001	0.249	11.669	98.922
	DP11	50.859	6.20	0.116	0.720	2.596	24.58	3.26	0.003	1.052	0.312	9.395	98.093
	DP12	52.284	4.92	0.058	0.784	3.084	22.35	2.43	0.015	0.723	0.066	12.500	99.214
	DP13	48.774	6.00	0.065	1.881	2.734	24.49	3.94	0.001	0.880	0.142	10.515	99.422
	DP14	50.205	5.42	0.082	2.311	2.956	22.37	3.80	0.003	0.673	0.129	11.508	99.457
	DP15	49.254	5.67	0.167	0.779	2.893	25.01	2.04	0.003	0.977	0.291	11.768	98.852
	DP16	51.172	6.12	0.060	0.595	2.980	25.40	2.86	0.002	0.815	0.191	9.010	99.205
	DP17	46.185	5.05	0.191	0.913	2.995	22.11	6.61	0.003	0.747	0.061	14.454	99.319
	DP18	49.251	5.36	0.055	0.970	3.312	22.94	2.41	0.002	0.876	0.058	13.900	99.134
	DP20	47.352	6.21	0.351	1.052	2.587	23.15	6.86	0.007	1.057	0.064	11.540	100.231
吴二段	DP7	55.352	4.67	0.185	0.574	2.269	20.63	1.85	0.012	0.824	0.098	13.358	99.831
	DP8	53.292	4.64	0.170	2.191	2.280	25.47	1.25	0.008	0.641	0.217	9.521	99.680
	DP9	32.677	3.27	0.105	20.66	1.567	17.52	0.93	0.034	0.367	0.103	22.354	99.584
	DP10	51.721	4.89	0.076	1.410	2.460	24.88	3.88	0.003	0.469	0.031	9.916	99.736
	DP19	46.547	5.98	0.241	2.865	2.995	25.45	1.86	0.004	1.204	0.048	13.201	100.412

图5 火成岩与沉积岩 TiO₂-SiO₂图解 (底图据文献[41])Fig.5 TiO₂ vs. SiO₂ content in igneous and sedimentary rocks (after reference [41])

的大量晶出将导致残余熔体中形成明显 Eu 负异常^[44],因此凝灰岩中 Eu 负异常可以认为与火山作用有关。(La/Sm)_N值介于 1.17~5.58,平均为 3.46;(La/Yb)_N值介于 4.64~26.99,平均为 12.97,(Gd/Lu)_N值介于 1.66~5.16,平均为 3.24。稀土元素配分图显示吴一段所有样品的配分模式相似,总体表现为 LREE 富集、HREE 亏损。吴二段样品显示具 Eu 负异常(Eu/Eu*值介于 0.41~0.77);(La/Sm)_N值介于 0.57~

2.45,平均为 1.21,其中 DP9、DP10 样品的 (La/Sm)_N 值均小于 1; (La/Yb)_N 值介于 0.38~4.49,平均为 1.86, DP9、DP10 样品的 (La/Yb)_N 值小于 1, (Gd/Lu)_N 值介于 0.95~1.37,平均为 1.23。因此,吴二段 DP9、DP10 表现为 LREE 亏损、HREE 平缓,DP8 表现与吴一段相似的配分模式。

4.3 凝灰岩来源

高场强元素(Nb、Ti、Zr、Ta、Hf、Sc、Th)具有抗蚀变性及 Al₂O₃/TiO₂ 的比值可以用来解释岩浆的来源^[45],基性、中性、酸性岩浆 Al₂O₃/TiO₂ 值分别介于 3~8、8~21、21~70^[46]。大坪剖面吴一段凝灰岩样品 Al₂O₃/TiO₂ 值介于 23.36~34.56(图 7a)^[6,11,42,47-50],吴二段凝灰岩样品 Al₂O₃/TiO₂ 值介于 39.70~53.04,均高于峨眉山玄武岩,范围在酸性岩浆 21~70 内,与宾川酸性熔结凝灰岩、峨眉山流纹岩、上寺剖面下部凝灰岩相似,表明大坪剖面吴家坪组凝灰岩可能与酸性火山喷发有关。凝灰岩在蚀变和风化过程中,表现为 Si 的释放和 Al 的累积,因此 SiO₂/Al₂O₃ 用以指示火山玻璃转化为黏土矿物过程中受风化和蚀变作用影响的程度^[51],大坪剖面吴一段样品 SiO₂/Al₂O₃ 含量介于 1.84~2.75,吴二段样品 SiO₂/Al₂O₃ 介于 1.829~2.682,明显低于宾川酸性熔结凝灰岩样品的比值(5.47~6.31)^[47],表明其受到蚀变、风化程度较高。

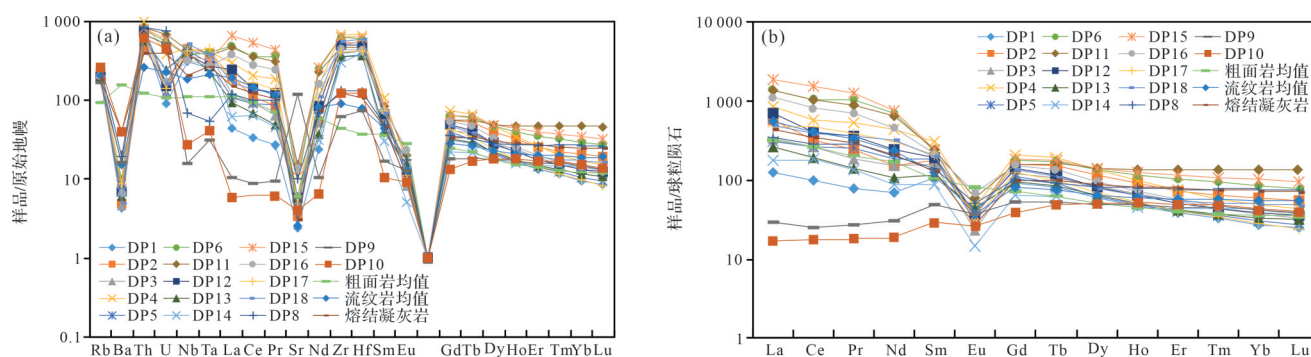


图6 (a)原始地幔标准化微量元素蛛网图;(b)球粒陨石标准化稀土元素配分模式

峨眉山粗面岩、峨眉山流纹岩、峨眉山熔结凝灰岩数据引自文献[42],原始地幔数据(a)和球粒陨石数据(b)引自文献[43]

Fig.6 (a) Spidergram of primitive mantle-normalized trace elements; (b) chondrite-normalized REE patterns

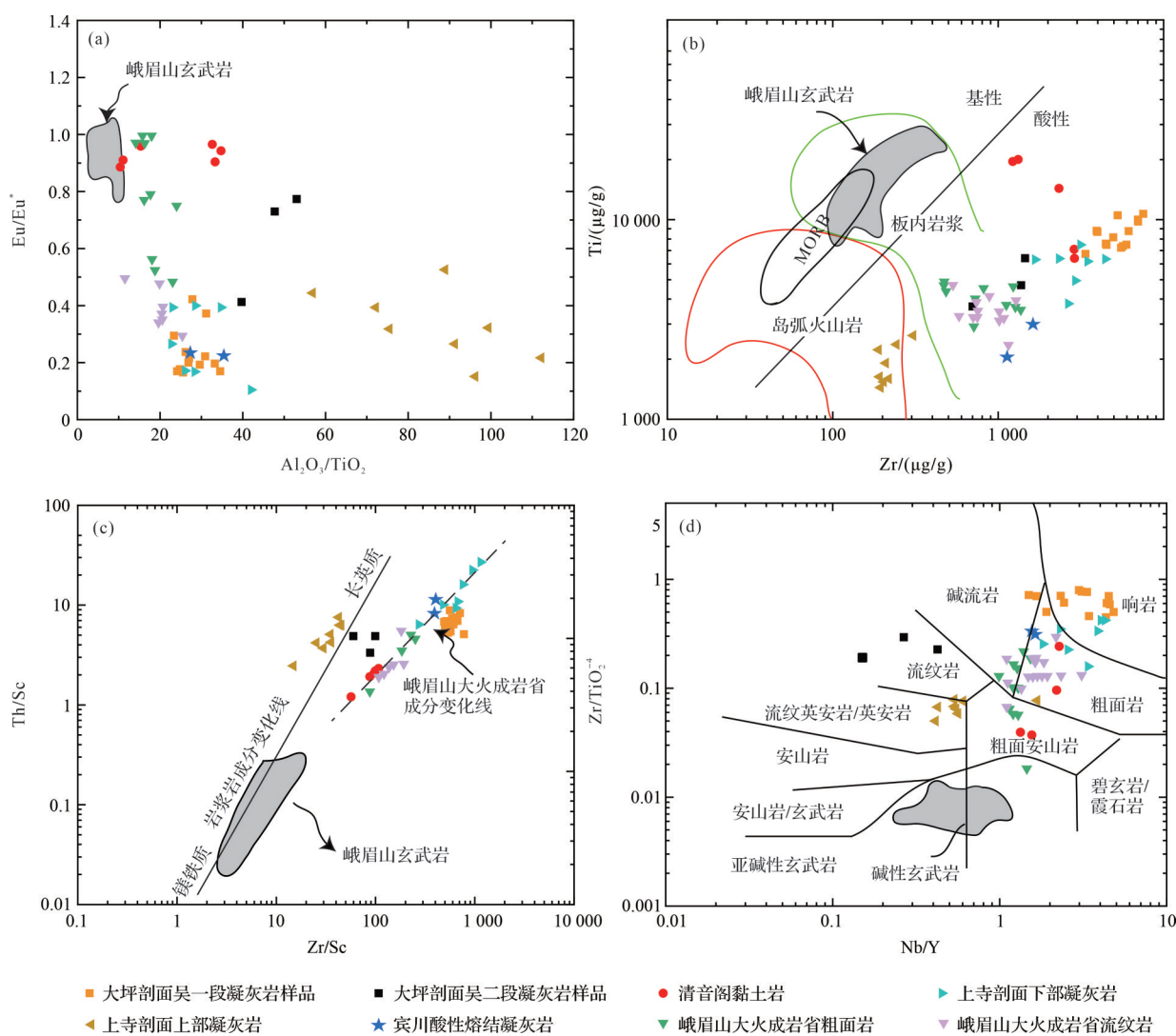


图7 (a) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - Eu/Eu^* 图解;(b) Zr - Ti 图解(底图引自文献[52]);(c) Zr/Sc - Th/Sc 图解(底图引自文献[53]);(d) Nb/Y - Zr/TiO_2 图解(底图引自文献[54])

图中清音阁王坡页岩层黏土岩数据引自文献[11];上寺剖面凝灰岩数据引自文献[6];宾川酸性熔结凝灰岩数据引自文献[47];峨眉山流纹岩及峨眉山粗面岩的平均值引自文献[42,48-50]

Fig.7 (a) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - Eu/Eu^* ; (b) Zr - Ti (base map from reference [52]); (c) Zr/Sc - Th/Sc (base map from reference [53]); (d) Nb/Y - Zr/TiO_2 (base map from reference [54])

Zr-Ti 判别图(图 7b)^[6,11,42,47-50,52]中,大坪剖面吴一段、吴二段凝灰岩样品落在板内岩浆内,表明其与板内岩浆地球化学特征具有相似性;Zr/Sc-Th/Sc 图解(图 7c)^[6,11,42,47-50,53]中,大坪剖面吴一段凝灰岩样品与宾川酸性熔结凝灰岩、峨眉山流纹岩、上寺剖面下部凝灰岩沿峨眉山大火成岩省成分变化线分布,吴二段凝灰岩样品也邻近峨眉山大火成岩省成分变化线,暗示其与这几者具有相同的来源;在 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解(图 7d)^[6,11,42,47-50,54]中,吴一段凝灰岩样品点大多落入响岩之间,说明其来源为酸性岩;吴二段凝灰岩样品落在流纹岩中,其原岩可能为中性酸性流纹岩;进一步通过 Rb、Sr、Nb、Ta、Nd、Th、Zr、Hf 等具有源区指示意义的微量元素对吴二段样品进行源区分析,地壳的 Nb/Ta 平均值为 11,地幔为 17.8^[55-56];地壳的 Rb/Sr 大于 0.5,地幔值小于 0.05,壳幔混合为 0.05~0.5;地壳的 Nd/Th 约为 3^[57],地幔则高于 15^[58];地壳的 Zr/Hf 为

33,而地幔的为 37^[55-56]。吴二段凝灰岩样品中 Nb/Ta 介于 8.59~22.04,平均值为 13.95,平均值介于地壳值和地幔值;Rb/Sr 介于 0.04~1.93,平均值为 0.92,平均值更接近地壳值;Nd/Th 介于 0.17~1.30,平均值为 0.57,平均值与壳源接近;Zr/Hf 介于 31.12~36.58,平均值为 34.69,样品值既有接近地壳值,也有接近地幔值,表明吴二段样品为壳幔混合特征。

在 Y+Nb-Rb 判别图中(图 8a),吴一段、吴二段凝灰岩样品均落在板内区域;在 Yb+Ta-Rb 判别图中(图 8b),吴一段、吴二段凝灰岩样品也均落在板内区域;在 Y-Nb 判别图中(图 8c),吴一段凝灰岩样品落在板内区域,吴二段落在板内与洋脊交界处、洋脊区域;在 Yb-Ta 判别图中(图 8d),吴一段凝灰岩样品落在板内区域,吴二段凝灰岩样品落在板内与洋脊交界处,由此显示吴一段、吴二段凝灰岩显示出与形成于板内伸展环境下花岗岩类岩石相似的特征。

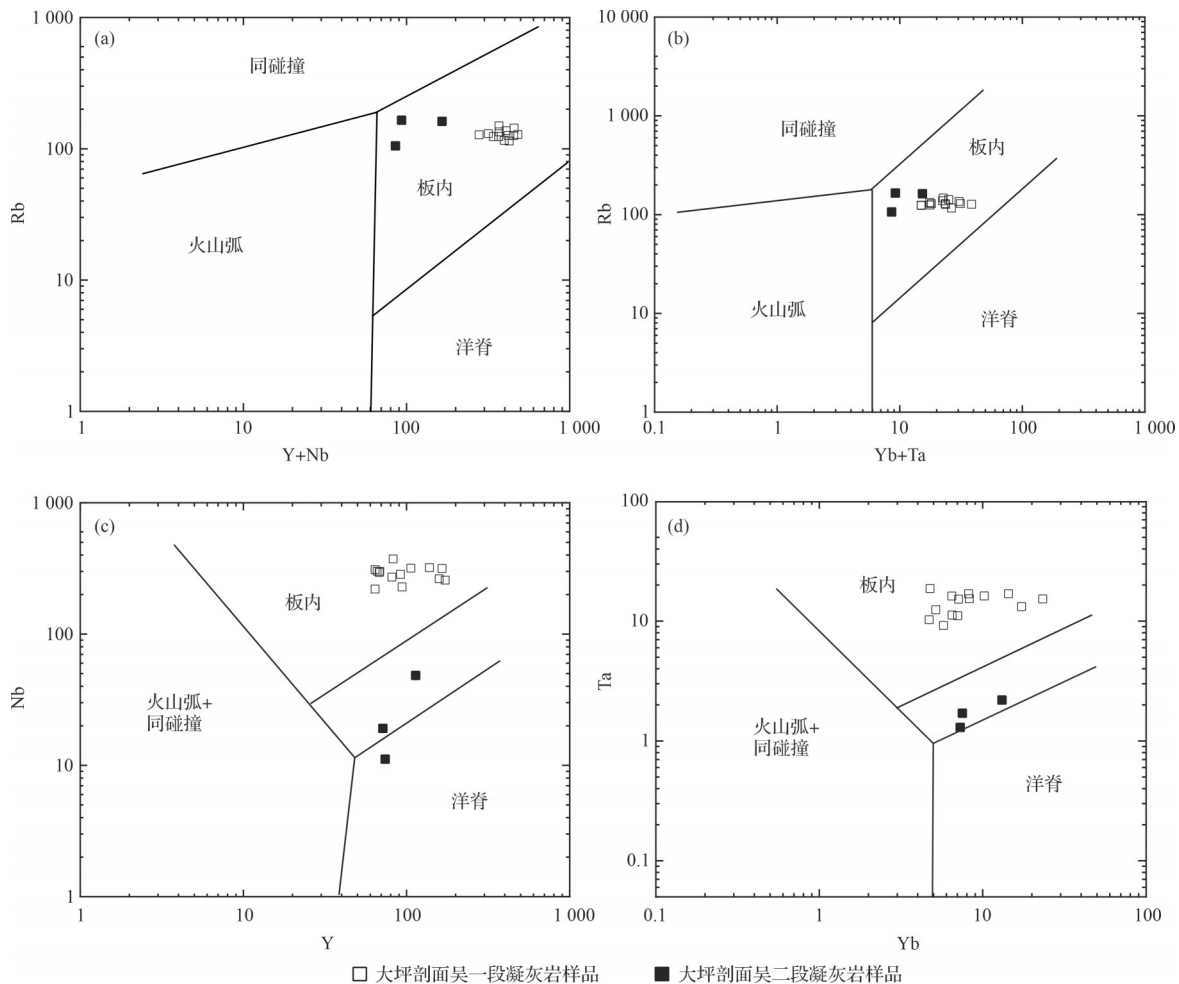


图 8 凝灰岩构造环境判别图^[59]

(a)凝灰岩的 Y+Nb-Rb 判别图; (b)凝灰岩的 Yb+Ta-Rb 判别图; (c)凝灰岩的 Y-Nb 判别图; (d)凝灰岩的 Yb-Ta 判别图

Fig.8 Discriminant diagrams for tuff tectonic environments^[59]

综上,大坪剖面吴一段、吴二段凝灰岩源岩区为中酸性火山岩,但吴一段、吴二段凝灰岩的微量、稀土元素配分模式表示两者之间有一定的差异性,暗示两者的成因存在一定的差异。吴一段凝灰岩微量元素、稀土元素均与宾川酸性熔结凝灰岩、峨眉山流纹岩、上寺剖面下部凝灰岩特征相似,指示了这几者为同时同源产物,因此认为吴一段凝灰岩可能是峨眉山大火成岩省酸性火山活动的产物。吴二段凝灰岩样品 Zr-Ti 图中显示与上寺剖面下部凝灰岩、峨眉山大火成岩省相关岩石具有相似特征(图 7b),且样品沿峨眉山火成岩成分变化线分布(图 7c),指示该凝灰岩也可能是峨眉山大火成岩省酸性火山活动的产物,形成于板内伸展环境;但其微量元素和稀土元素与吴一段凝灰岩有不同的特征,微量元素表示富集 Rb、Th、U,亏损 Nb、Ti 以及 Eu 弱亏损,可能受到大陆地壳的混染^[60],稀土元素球粒陨石标准化配分模式呈较平坦的左倾型,与洋中脊岩石相似,且在 Y-Nb、Yb-Ta 判别图(图 8c,d)中样品投在板内和洋中脊交界处,暗示其源区可能是 DMM 源的岩浆经分离结晶作用和受地壳混染的分离结晶混染作用^[61];Nb/Ta、Rb/Sr、Nd/Th、Zr/Hf 等值也表明样品主要为壳幔混合作用的成因,对应的峨眉山大火成岩省酸性火山作用与壳幔混合有关。据此推测,吴家坪组吴一段、吴二段凝灰岩是峨眉山大火成岩省不同期火山作用的产物,均形成于板内拉张环境,但吴二段凝灰岩形成可能是 DMM 源的岩浆受到地壳物质的混合作用。

5 凝灰岩储集空间类型及成岩作用

5.1 凝灰岩储集空间类型

凝灰岩自身可存在晶间孔等原生孔隙,受成岩作用改造可形成各类溶蚀孔隙^[16,18-19,62]。根据野外观察、薄片及扫描电镜等鉴定,在研究剖面凝灰岩中识别出洞、不规则溶孔、粒内溶孔、有机质孔、粒间溶孔、裂缝等储集空间类型。洞主要见于第 8 层,洞径 3 cm×5 cm~30 cm×47 cm,呈不规则状,未充填或黄铁矿、石英、石膏、锆石等充填(图 2a1~a3、图 9a),多与裂缝相伴生,形成缝洞复合体;从洞的形态、充填物判断其成因与埋藏期来自深部的热液溶蚀作用相关。裂缝为流体主要运移通道,形成沿缝分布的大小不等的不规则扩溶洞,部分被黄铁矿、石英、石膏等热液矿物充填。不规则溶孔一般常与裂缝相伴生,溶孔多被硅质、方解石等充填(图 2a3、图 9d,f),

发育较为普遍,第 8、14、16、20 层凝灰岩中均可见。粒内溶孔主要为长石晶屑、伊利石、石膏等粒内溶孔,多呈圆形—椭圆形、蜂窝形或不规则状,孔径细小,多呈微米级(图 9g)。有机质孔系有机质生烃演化过程中体积收缩或者被破坏而形成的孔隙(图 10h,i),孔隙细小,常密集分布。粒间溶孔多形成于黏土、石英长石、石膏、黄铁矿等晶粒间,多为多边形或者不规则状,为纳米—微米级孔隙,矿物边缘部分具港湾状溶蚀边(图 9j~l)。裂缝可见构造缝、扩溶缝,前者较细小平直,局部呈密集分布,宽一般小于 100 μm (图 2a3~c3、图 9b,d,e);扩溶缝系构造缝基础上溶蚀扩大形成,相较于构造缝张开度明显增大,可至厘米级,缝边缘不规则,港湾状溶蚀边显著(图 9b,c,e,f);裂缝未充填或硅质、方解石充填。

5.2 成岩作用对储集性的影响

1) 溶蚀作用

如前所述,大坪剖面凝灰岩储集空间以次生成因为主,溶蚀作用是其主要成因,凝灰岩内部矿物被溶蚀,如石膏、石英等,根据溶蚀强度的大小,可形成包括洞、不规则溶孔、粒间溶孔、粒内溶孔以及沿缝发生扩溶形成扩溶缝等不同尺度的储集空间类型(图 9),这些孔洞、缝具有较强的储集性。从充填物类型来看,包括黄铁矿、石英、方解石、隐晶硅质等,指示溶蚀作用以埋藏期为主。

2) 热液作用

通过对 11 个样品的 10 个锆石颗粒(测试点位为 9~18)的测试分析,确定凝灰岩受到热液作用的影响。稀土元素球粒陨石标准化配分模式表现为亏损轻稀土、重稀土异常富集的左倾型,Ce 正异常和 Eu 负异常(图 10),Th、U 值含量相对较高,U 的含量介于 422~3 293 $\mu\text{g/g}$,Th 的含量介于 25.4~115.6 $\mu\text{g/g}$,Th/U 介于 0.034~0.083,Th、U 含量及 Th/U 值不能很好地指示热液锆石,锆石显示较强的 Ce 正异常、重稀土富集是热液锆石另一种不常见的热液锆石特征,以澳大利亚 Mole 花岗岩为代表^[38],与澳大利亚 Boggy Plain 岩体微量元素具有不同的特征^[63]。

阴极发光图像显示,大坪剖面凝灰岩中锆石形状多为柱状,半自形—他形晶,锆石不发光,呈灰白色或黑色,锆石一般不发育岩浆的震荡环带或少数模糊环带,局部出现震荡环带可能是由于热液改造不彻底,且棱线不明显(图 11a),与岩浆型锆石明显震荡环带的特征存在差异,应为热液锆石特征^[37-38],

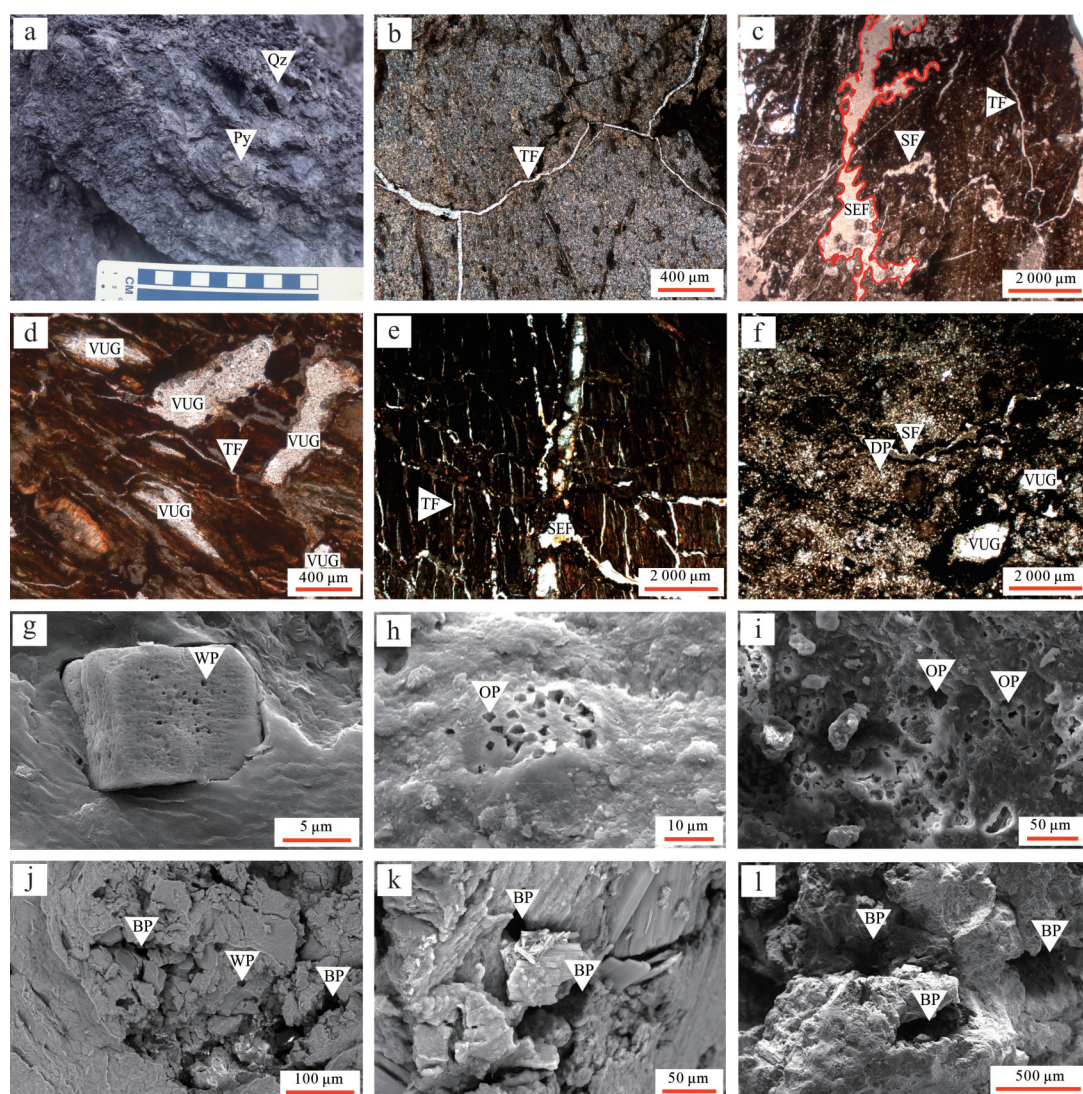


图9 大坪剖面凝灰岩储集空间类型

(a)不规则洞,黄铁矿、石英充填,第8层;(b)未充填构造缝,局部具扩溶,第20层;(c)构造缝、扩溶缝,硅质充填,第9层;(d)溶蚀孔洞、构造缝,硅质充填,第8层;(e)未充填构造缝、扩溶缝,密集分布,第8层;(f)未充填溶蚀孔洞、扩溶缝、晶间溶孔,第18层;(g)石膏粒内孔,未充填,DP2,第9层;(h)有机质生烃残留孔,未充填,DP4,第9层;(i)有机质生烃残留孔,未充填,DP10,第20层;(j)脱玻化作用形成的石英间溶孔,DP8,第18层;(k)粒间溶孔,未充填,DP11,第9层;(l)粒间溶孔,未充填,DP5,第9层;Qz.石英,Py.黄铁矿,VUG.洞、溶蚀孔洞,TF.构造缝,SEF.扩溶缝,BP.粒间溶孔,WP.粒内溶孔,OP.有机质孔

Fig.9 Types of tuff reservoir space at Daping section

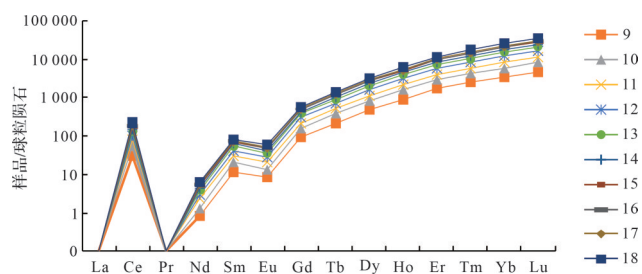


图10 锆石稀土元素球粒陨石配分模式

Fig.10 Zircon chondrite-normalized REE patterns

表明其具有热液锆石的特性。热液锆石的U-Pb同位素平均年龄为 132.37 ± 0.53 Ma(图11b),显示凝灰岩热液流体活动为早白垩世(96~137 Ma);该期热液

在四川乐山^[64]、滇东北^[65]等地峨眉山玄武岩次生杏仁体及不规则溶蚀孔洞中均有响应,充填物包括黄铁矿、铜、绿泥石等。热液改造是大坪剖面凝灰岩形成规模性储层的重要因素,形成的储集空间类型以不规则洞为主,洞径 $3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \sim 30 \text{ mm} \times 47 \text{ mm}$,常与构造缝相伴生,充填物包括黄铁矿、隐晶硅质等;该期溶蚀在川西北葛底坝剖面^[31]、铁炉坝剖面^[62]凝灰岩中均有分布,且溶蚀特征类似,经热液溶蚀改造的凝灰岩储集性能显著提升;该期热液亦是四川盆地原油大量裂解生气时间^[66-67],对天然气运聚成藏具有重要影响。

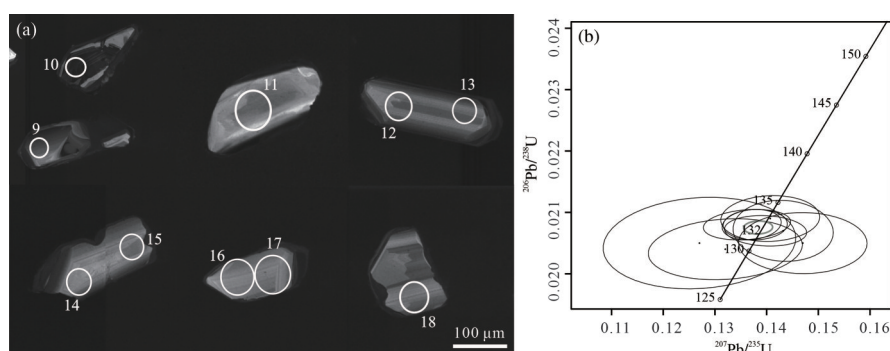


图 11 锆石阴极发光图像(a)及 U-Pb 年龄谐和图(b)

Fig.11 (a) Zircon cathode luminescence image; (b) zircon U-Pb concordia diagrams

3) 构造破裂作用

区域上多次构造运动及其形成的如龙门山构造带、大巴山构造带等多条断裂带是大坪剖面凝灰岩中构造缝发育的主要作用力,裂缝多呈北东—南西向展布的特征与主构造力基本一致,表明构造带应力常对裂缝的展布具有控制作用。薄片中可见平直细小的多期构造缝(图 9b~f)。裂缝既是重要的储集空间类型,又能连通先期形成的孔隙,改善了孔隙连通网络,并为后期流体改造提供了良好的通道,整体上较大提高了凝灰岩的储渗性能。

4) 脱玻化作用

火山玻璃受到外界环境的影响转化为晶体,形成微晶石英、斜长石,该过程会伴随着颗粒体积缩小,形成晶间微孔及脱玻化孔^[68]。在埋藏前或者埋藏期,都可能发生脱玻化作用。研究区可见脱玻化作用的不均匀斑团(图 2b3)以及脱玻化作用导致石英颗粒间形成石英间溶孔(图 9j)。脱玻化作用形成较细小孔隙,进一步改善凝灰岩的储集性能。

6 结论

(1) 大坪剖面吴家坪组凝灰岩主要分布在吴一段、吴二段,呈薄层状;岩石类型以火山尘凝灰岩为主,矿物以伊利石、伊/蒙混层等黏土矿物为主,存在数量不等的石英、钾长石、斜长石、方解石、黄铁矿、石膏、黄钾铁矾、金红石等;区域上厚度向西南地区增大,发育期次与钻井剖面具有较好的可对比性。

(2) 大坪剖面凝灰岩与峨眉山大火成岩省多期酸性火山活动有关,吴一段和吴二段凝灰岩均形成于板内拉张性构造环境,吴二段可能受到地壳地幔混合的影响。

(3) 大坪剖面凝灰岩储集空间类型包括洞、不规

则溶孔、粒内溶孔、有机质孔、粒间溶孔、裂缝等,裂缝与不同尺度的孔、洞形成性能良好的储渗体,储集空间未充填或黄铁矿、石英、方解石、隐晶硅质等充填;其次生储集空间受多期构造活动及热液流体等的综合改造,寻找二者联合作用区应是川西北地区二叠系吴家坪组凝灰岩储层勘探的关键。

致谢 衷心感谢评审专家和编辑提出的建设性修改意见,对本文的改进带来了极大的帮助。

参考文献(References)

- [1] Königer S, Lorenz V, Stollhofen H, et al. Origin, age and stratigraphic significance of distal fallout ash tuffs from the Carboniferous-Permian continental Saar-Nahe Basin (SW Germany)[J]. International Journal of Earth Sciences, 2002, 91(2): 341-356.
- [2] He B, Xu Y G, Chung S L, et al. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 213(3/4): 391-405.
- [3] 王曼,钟玉婷,侯莹玲,等. 华南地区二叠纪—三叠纪界线酸性火山灰的源区与规模[J]. 岩石学报, 2018, 34(1): 36-48. [Wang Man, Zhong Yuting, Hou Yingling, et al. Source and extent of the felsic volcanic ashes at the Permian-Triassic boundary in South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(1): 36-48.]
- [4] 殷鸿福,黄思骥,张克信,等. 华南二叠纪—三叠纪之交的火山活动及其对生物绝灭的影响[J]. 地质学报, 1989, 63(2): 169-180. [Yin Hongfu, Huang Siji, Zhang Kexin, et al. Volcanism at the Permian-Triassic boundary in South China and its effects on mass extinction[J]. Acta Geologica Sinica, 1989, 63(2): 169-180.]
- [5] 雒洋冰. 川东川南晚二叠世煤及凝灰岩中微量元素地球化学研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2014. [Luo Yangbing. The study of trace elements geochemistry in Late Permian coal and tuff samples from east and south Sichuan province, China [D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2014.]
- [6] 张晗. 四川广元晚二叠世凝灰岩地球化学特征及其地质意义

- [D]. 成都: 成都理工大学, 2020. [Zhang Han. Geochemical characteristics of the Late Permian tuffs in Guangyuan and its geological significance[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.]
- [7] 向芳, 肖倩, 喻显涛, 等. 四川盆地元坝地区上二叠统海相凝灰沉积储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 889-901. [Xiang Fang, Xiao Qian, Yu Xiantao, et al. Reservoir characteristics of the Upper Permian marine tuffaceous deposits in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 889-901.]
- [8] 张哈, 黄虎, 侯明才. 四川广元地区朝天剖面上二叠统吴家坪组凝灰岩成因及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(1): 36-48. [Zhang Han, Huang Hu, Hou Mingcai. Origin of tuffs from Upper Permian Wujiaping Formation in Chaotian section of Guangyuan area, Sichuan, China and its geological significance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(1): 36-48.]
- [9] Mahoney J J, Coffin M F. Large igneous provinces: Continental, oceanic, and planetary flood volcanism[M]. Washington: American Geophysical Union, 1997: 1-438.
- [10] 田和明, 代世峰, 李大华, 等. 重庆南川晚二叠世凝灰岩的元素地球化学特征[J]. 地质论评, 2014, 60(1): 169-177. [Tian Heming, Dai Shifeng, Li Dahua, et al. Geochemical features of the Late Permian tuff in Nanchuan district, Chongqing, southwestern China[J]. Geological Review, 2014, 60(1): 169-177.]
- [11] Huang H, Cawood P A, Hou M C, et al. Silicic ash beds bracket Emeishan large igneous province to <1 m. y. at ~260 Ma[J]. Lithos, 2016, 264: 17-27.
- [12] Huang H, Huyskens M H, Yin Q Z, et al. Eruptive tempo of Emeishan large igneous province, southwestern China and northern Vietnam: Relations to biotic crises and paleoclimate changes around the Guadalupian-Lopingian boundary[J]. Geology, 2022, 50(9): 1083-1087.
- [13] Gao Q L, Zhang N, Xia W C, et al. Origin of volcanic ash beds across the Permian-Triassic boundary, Daxiakou, South China: Petrology and U-Pb age, trace elements and Hf-isotope composition of zircon[J]. Chemical Geology, 2013, 360-361: 41-53.
- [14] Yang J H, Cawood P A, Du Y S, et al. Large igneous province and magmatic arc sourced Permian-Triassic volcanogenic sediments in China[J]. Sedimentary Geology, 2012, 261-262: 120-131.
- [15] Xu L, Lin Y T, Shen W J, et al. Platinum-group elements of the Meishan Permian-Triassic boundary section: Evidence for flood basaltic volcanism[J]. Chemical Geology, 2007, 246(1/2): 55-64.
- [16] 白国帅, 蒋有录, 侯帅, 等. 龙凤山地区火石岭组火山岩优质储层主控因素及成因机制[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1748-1761. [Bai Guoshuai, Jiang Youlu, Hou Shuai, et al. Main controlling factors and genetic mechanism of high-quality volcanic reservoirs in Huoshiling Formation of Longfengshan area[J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1748-1761.]
- [17] 马剑. 马朗凹陷条湖组含沉积有机质凝灰岩致密油成储—成藏机理[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. [Ma Jian. Mechanism of reservoir formation and hydrocarbon accumulation of sedimentary organic-matter-bearing tuffaceous tight oil in the Malang Sag, northwest China[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.]
- [18] 李壮. 马朗凹陷卡拉岗组致密凝灰岩储层特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018. [Li Zhuang. Study on the characteristics of the tight tuff reservoir in the Kalagang Formation in the Malang Sag[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.]
- [19] 刘小洪, 王委委, 冯明友, 等. 准噶尔盆地克拉美丽气田滴西14井区石炭系蚀变凝灰岩储层热液作用过程及时限[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1694-1710. [Liu Xiaohong, Wang Weiwei, Feng Mingyou, et al. Hydrothermal process and duration of Carboniferous altered tuff reservoir in well Dixi 14 area of Kelameili gas field (Junggar Basin), NW China[J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1694-1710.]
- [20] 曾琪, 胡欣, 屈海洲, 等. 川西北部地区上二叠统吴家坪组的地层划分及有利储集岩分布[J]. 天然气勘探与开发, 2020, 43(4): 33-47. [Zeng Qi, Hu Xin, Qu Haizhou, et al. Division of strata and distribution of favorable reservoir rocks of the Upper Permian Wujiaping Formation in the northwestern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020, 43(4): 33-47.]
- [21] 陈旋, 刘俊田, 龙飞, 等. 三塘湖盆地二叠系凝灰岩致密油勘探开发实践及认识[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 771-780. [Chen Xuan, Liu Juntian, Long Fei, et al. Practical experience and understanding of exploration and development of Permian tight tuff reservoir in the Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 771-780.]
- [22] 邱欣卫, 刘池洋, 毛光周, 等. 鄂尔多斯盆地延长组火山灰沉积物岩石地球化学特征[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 36(1): 139-150. [Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Mao Guangzhou, et al. Petrological-geochemical characteristics of volcanic ash sediments in Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(1): 139-150.]
- [23] 卢浩. 鄂尔多斯盆地南部长7段凝灰岩储层特征及形成机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020. [Lu Hao. Study on tuff reservoir characteristics and formation mechanism of the Chang 7 member in the southern Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.]
- [24] 曾琪, 田云英, 郑超, 等. 川西北部上二叠统吴家坪组凝灰岩分布及地质意义[J]. 天然气技术与经济, 2020, 14(3): 20-26. [Zeng Qi, Tian Yunying, Zheng Chao, et al. Distribution of sedimentary tuff in Wujiaping Formation, northwestern Sichuan Basin and its geological significance[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2020, 14(3): 20-26.]
- [25] 徐敏, 梁虹, 邓绍强, 等. 四川盆地二叠系火山岩地震响应特

- 征及分布规律[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(29): 27-32. [Xu Min, Liang Hong, Deng Shaoqiang, et al. Seismic response characteristics and distribution of Permian volcanic rocks in Sichuan Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(29): 27-32.]
- [26] 陆建林, 左宗鑫, 师政, 等. 四川盆地西部二叠系火山作用特征与天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2019, 39(2): 46-53. [Lu Jianlin, Zuo Zongxin, Shi Zheng, et al. Characteristics of Permian volcanism in the western Sichuan Basin and its natural gas exploration potential[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(2): 46-53.]
- [27] 罗志立. 峨眉地裂运动观对川东北大气区发现的指引作用[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(4): 401-407. [Luo Zhili. Guidance function of Emei taphrogenesis viewpoint on discovery of large gas province in northeastern Sichuan[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(4): 401-407.]
- [28] Zhu B, Guo Z J, Zhang S N, et al. Low-Ti gabbroic pluton in Dali, SW China: New evidence for back-arc lithospheric melting inducing early-stage magmatism of the Emeishan large igneous province[J]. Journal of the Geological Society, 2021, 178(6): jgs2020-224.
- [29] Zhu B, Guo Z J, Zhang S N, et al. What triggered the early-stage eruption of the Emeishan large igneous province[J]. GSA Bulletin, 2019, 131(11/12): 1837-1856.
- [30] Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: Implications for plume-lithosphere interaction[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 228(3/4): 525-546.
- [31] 张云峰, 黄泓森, 曾琪, 等. 川西北葛底坝剖面上二叠统吴家坪组石灰岩微相[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(2): 287-297. [Zhang Yunfeng, Huang Hongsen, Zeng Qi, et al. Microfacies of limestones from Upper Permian Wujiaping Formation at Gediba section in the northwestern Sichuan, southwest China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(2): 287-297.]
- [32] 钟玉婷. 晚二叠世火山活动与生物灭绝事件的时间关系[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013. [Zhong Yuting. Temporal relationship between Late Permian volcanisms and mass extinctions [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.]
- [33] Zhong Y T, He B, Mundil R, et al. CA-TIMS zircon U-Pb dating of felsic ignimbrite from the Binchuan section: Implications for the termination age of Emeishan large igneous province[J]. Lithos, 2014, 204: 14-19.
- [34] 陈积权, 高远, 秦健铭, 等. 松辽盆地东缘嫩江组一二段黏土矿物和主量元素地球化学特征及其古气候意义[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(8): 17-24. [Chen Jiquan, Gao Yuan, Qin Jianming, et al. Clay mineral and major element geochemical features and their paleoclimate significance in Nenjiang Formation 1st and 2nd members, eastern margin of Songliao Basin[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(8): 17-24.]
- [35] Gao Y, Wang C S, Liu Z F, et al. Clay mineralogy of the middle Mingshui Formation (Upper Campanian to Lower Maastrichtian) from the SKIn borehole in the Songliao Basin, NE China: Implications for palaeoclimate and provenance[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 385: 162-170.
- [36] 文俊, 任光明, 庞维华, 等. 四川沐川地区中三叠统凝灰岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 矿床地质, 2022, 41(3): 585-597. [Wen Jun, Ren Guangming, Pang Weihua, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological significance of tuff from Middle Triassic in Muchuan area, Sichuan province[J]. Mineral Deposits, 2022, 41(3): 585-597.]
- [37] 张丁宁, 陶中一. 热液锆石形成机制、特征及地质意义研究[J]. 中国锰业, 2017, 35(3): 31-33. [Zhang Dingning, Tao Zhongyi. Formation & characteristics of hydrothermal zircon and its geological significance[J]. China's Manganese Industry, 2017, 35(3): 31-33.]
- [38] 蔡宏明, 刘桂萍, 展新忠. 热液锆石鉴定特征及在热液型金矿床年代学研究中的应用[J]. 中国金属通报, 2019(9): 270-271. [Cai Hongming, Liu Guiping, Zhan Xinzhong. Characteristics of hydrothermal zircon identification and its application in geochronology of hydrothermal gold deposits[J]. China Metal Bulletin, 2019(9): 270-271.]
- [39] Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, et al. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2010, 11(2): Q0AA06.
- [40] Vermeesch P. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology[J]. Geoscience Frontiers, 2018, 9(5): 1479-1493.
- [41] Tarney J. Geochemistry of Archaean high-grade gneisses, with implications as to the origin and evolution of the Precambrian crust[M]. London: Wiley, 1976: 405-417.
- [42] Xu Y G, Chung S L, Shao H, et al. Silicic magmas from the Emeishan large igneous province, southwest China: Petrogenesis and their link with the end-Guadalupian biological crisis[J]. Lithos, 2010, 119(1/2): 47-60.
- [43] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [44] 张宏飞, 高山. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 137-140. [Zhang Hongfei, Gao Shan. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 137-140.]
- [45] Dai S F, Nechaev V P, Chekryzhov I Y, et al. A model for Nb-Zr-REE-Ga enrichment in Lopingian altered alkaline volcanic ashes: Key evidence of H-O isotopes[J]. Lithos, 2018, 302-303: 359-369.
- [46] Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. Geochemistry of

- ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(19): 4115-4137.
- [47] Huang H, Cawood P A, Hou M C, et al. Provenance of Late Permian volcanic ash beds in South China: Implications for the age of Emeishan volcanism and its linkage to climate cooling[J]. *Lithos*, 2018, 314-315: 293-306s.
- [48] Anh T V, Pang K N, Chung S L, et al. The Song Da magmatic suite revisited: A petrologic, geochemical and Sr-Nd isotopic study on picrites, flood basalts and silicic volcanic rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(6): 1341-1355.
- [49] Cheng L L, Wang Y, Herrin J S, et al. Origin of K-feldspar megacrysts in rhyolites from the Emeishan large igneous province, southwest China[J]. *Lithos*, 2017, 294-295: 397-411.
- [50] Shellnutt J G, Jahn B M. Formation of the Late Permian Panzhihua plutonic-hypabyssal-volcanic igneous complex: Implications for the genesis of Fe-Ti oxide deposits and A-type granites of SW China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 289(3/4): 509-519.
- [51] Hong H L, Fang Q, Wang C W, et al. Clay mineralogy of altered tephra beds and facies correlation between the Permian-Triassic boundary stratigraphic sets, Guizhou, South China[J]. *Applied Clay Science*, 2017, 143: 10-21.
- [52] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[M]//Thorpe R S. *Orogenic andesites and related rocks*. Chichester: John Wiley and Sons, 1982: 528-548.
- [53] McLennan S M, Hemming S R, McDaniel D K, et al. *Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics*[M]. Boulder: Geological Society of America, 1993.
- [54] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325-343.
- [55] McDonough W F, Sun S S. The composition of the earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 223-253.
- [56] Gibbs A K. The continental crust: Its composition and evolution [J]. *The Journal of Geology*, 1986, 94(4): 632-633.
- [57] 姜春发, 王宗起, 李锦轶. 中央造山带开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1-107. [Jiang Chunfa, Wang Zongqi, Li Jinyi. Open-close tectonics of the central orogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1-107.]
- [58] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1-294. [Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. The ways of investigation on granitoids[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 1-294.]
- [59] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [60] 刘秀. 天山东段晚古生代火山岩南北对比及其大地构造意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [Liu Xiu. Late Paleozoic volcanic rocks tectonic evolution and its north-south comparison in the eastern Tianshan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.]
- [61] 赵振华. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(1): 92-103. [Zhao Zhenhua. How to use the trace element diagrams to discriminate tectonic settings[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(1): 92-103.]
- [62] 李一苇. 川西北地区上二叠统吴家坪组凝灰岩特征及储集性[D]. 成都: 西南石油大学, 2022. [Li Yiwei. Characteristics and reservoir property of tuffs of Upper Permian Wujiaping Formation in northwest Sichuan[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2022.]
- [63] 雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展[J]. *地学前缘*, 2013, 20(4): 273-284. [Lei Weiyan, Shi Guanghai, Liu Yingxin. Research progress on trace element characteristics of zircons of different origins[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 273-284.]
- [64] 郑江, 郝爱华, 葛玉辉, 等. 峨眉山玄武岩蚀变年龄及其对扬子西缘热事件的响应[J]. *科学通报*, 2022, 67(36): 4415-4428. [Zheng Jiang, Xi Aihua, Ge Yuhui, et al. Alteration age of Emeishan basalt and its response to thermal events on the western margin of the Yangtze Block[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(36): 4415-4428.]
- [65] 朱炳泉, 戴樟漠, 胡耀国, 等. 滇东北峨眉山玄武岩中两阶段自然铜矿化的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 与U-Th-Pb年龄证据[J]. *地球化学*, 2005, 34(3): 235-247. [Zhu Bingquan, Dai Tongmo, Hu Yaoguo, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and U-Th-Pb dating for native copper mineralizations of two stages from the Emeishan flood basalts in northeastern Yunnan province, China[J]. *Geochimica*, 2005, 34(3): 235-247.]
- [66] 李建忠, 白斌, 白莹, 等. 川西北地区二叠系栖霞组超深层气藏流体演化过程与成藏模式[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(4): 627-636. [Li Jianzhong, Bai Bin, Bai Ying, et al. Fluid evolution and hydrocarbon accumulation model of ultra-deep gas reservoirs in Permian Qixia Formation of northwest Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(4): 627-636.]
- [67] 管树巍, 姜华, 鲁雪松, 等. 四川盆地中部走滑断裂系统及其控油气作用[J]. *石油学报*, 2022, 43(11): 1542-1557. [Guan Shuwei, Jiang Hua, Lu Xuesong, et al. Strike-slip fault system and its control on oil & gas accumulation in central Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(11): 1542-1557.]
- [68] 刘书强, 姚孟多, 冯亚琴, 等. 马朗凹陷条湖组凝灰岩脱玻化孔影响因素与油气关系[J]. *特种油气藏*, 2018, 25(1): 16-19. [Liu Shuqiang, Yao Mengduo, Feng Yaqin, et al. Influencing factor analysis of devitrification pore and its relationship with hydrocarbon in Tiaohu Formation of Malang Depression[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2018, 25(1): 16-19.]

Formation and Types of Tuff Reservoirs: A case study of Permian Wujiaping Formation at Daping section, northwestern Sichuan Basin

YANG FengYing¹, ZHANG YunFeng¹, ZENG Qi², PAN QingChuan³, FAN CunHui¹, LI YiWei⁴,
YIN Hong², ZHANG BenJian⁵

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Branch of Chuanxibei Gasfield, Southwest Oil and Gasfield Company, PetroChina, Jiangyou, Sichuan 621700, China

3. Academy of Science and Technology Development, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

4. BGP Southwest Geophysical Branch, PetroChina, Chengdu 610000, China

5. Exploration and Development Research Institute, Southwest Oil and Gasfield Company, PetroChina, Chengdu 610041, China

Abstract: [Objective] Marine carbonates of the Permian Wujiaping Formation commonly occur in tuffs in northwest Sichuan. The tuff beds vary in thickness, and therefore have different natural gas storage capacities. The Wujiaping Formation at the Daping section is 45.02 m thick, and subdivided into two members. Individual tuff beds are 5-55 cm thick. Measurements of geochemical parameters were conducted on tuff samples, taking their reservoir types into account. [Methods] A synthetic database of microfacies was developed for major and trace elements and zircon U-Pb using XRD and scanning electron microscopy (SEM). [Results] The tuffs are mainly volcanic dust composed of glass chips smaller than 0.05 mm. The mineral composition of the tuffs is mainly illite and illite/montmorillonite mixtures, and they contain small amounts of quartz and gypsum. The Wu 1 member contains a high $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ratio (23.36-34.56), a low $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio (1.84-2.75) and obvious negative anomalies of Eu, Ba, Sr and Ti. The Wu 2 member has a high $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ratio (21.140-53.049), a low $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio (1.829-2.682) and a moderately negative Eu anomaly, with strong depletion of elements such as Nb and Ti. [Conclusions] These element profiles indicate that the volcanic debris has undergone strong secondary alteration. The tuffs were sourced from multiple acid volcanic eruptions in Emeishan large igneous province, and were formed in an intraplate extensional environment. The Wu 2 member tuffs were also affected by crust-mantle mixing. Reservoir space types include cavities, irregular dissolution pores, intra- and intergranular dissolution pores, organic matter pores, fractures, etc. The U-Pb age of hydrothermal zircon is dated at 132.37 ± 0.53 Ma. The tuff reservoirs have also been influenced by various other factors such as Lower Cretaceous hydrothermal fluid and tectonic activity.

Key words: forming of tuffs; reservoir types; Emeishan large igneous province; Wujiaping Formation; Permian; northwestern Sichuan Basin