

克百断裂带上盘石炭系 火山喷发期次划分与火山岩分布规律

高 炎¹, 姚宗全^{2,3}, 汤传意¹, 谢宗瑞¹, 杨远峰¹, 张 欣¹, 刘谨铭¹,
王 威^{2,3}, 牟家园^{2,3}, 陈 建^{2,3}

(1. 中国石油新疆油田分公司 百口泉采油厂, 新疆 克拉玛依 834011; 2. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 3. 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要:克百断裂带上盘石炭系火山岩岩性、岩相复杂多变,不同期次的火山岩叠置,地震反射特征杂乱,油气分布规律不清。根据地球化学分析、岩性、电性和地震等资料,明确研究区构造背景、地质年代及岩石学特征,建立火山岩喷发旋回与期次划分方案,明确火山岩分布规律。结果表明:克百断裂带为岛弧构造背景,年龄约为 (316.8 ± 2.9) Ma,发育一套火山熔岩向火山碎屑岩渐变的岩相序列;研究区发育 1 个喷发旋回,界面主要以不整合面和风化壳为标志。克百断裂带石炭系分为 5 个期次(C1—C5),C1 期次主要为安山岩,顶部以凝灰质砂砾岩为沉积夹层;C2 期次为安山岩与凝灰质砂砾岩互层,顶部以凝灰质砂砾岩为期次界面;C3 和 C4 期次以凝灰质砂砾岩和凝灰岩构成的岩性、岩相为期次标志;C5 期次发育凝灰质砂砾岩,为一套风化壳与侏罗系不整合接触。C1—C5 期次的化学风化指数表现为蚀变强弱交替,平面上的火山熔岩由北向南发育,分布范围逐渐减小,火山喷发强度降低。该结果为研究区火山岩垂向序列刻画和火山岩不同期次空间分布提供指导。

关 键 词:克百断裂带;石炭系;构造环境;火山喷发期次;火山岩;岩性分布规律

中图分类号:P534;TE122

文献标识码:A

文章编号:2095-4107(2026)01-0001-13

0 引言

火山岩是盆地充填序列的重要组成部分^[1],火山地层是源于地下的火山物质,经火山作用及其后期改造过程形成的熔岩、碎屑堆积体。火山物质占火山地层总体积的 90% 以上,搬运与分散方式包括岩浆流、碎屑流、空落堆积及其再搬运作用。火山地层形态多呈层状、似层状、楔状、透镜状、丘状及块状,是火山形成、发展、演化过程中不同阶段与不同喷发方式的地质记录^[2]。沿火山岩找油气是中国石油界的第三次创新^[3]。相对于广泛分布的碎屑岩油气藏,火山岩受火山活动影响,非均质性强,横向变化大,纵向多期叠置,储层预测精度和准确度低,形成时代和构造背景^[4-5]、岩性和储层发育研究受到广泛关注^[6-7]。周勇等建立准噶尔盆地东部石炭系水下和陆上喷发环境的识别标志和喷发模式^[8];基于火山岩在测井曲线上的特殊响应^[9],建立火山岩地质—测井解释模型^[10-11],通过重力、磁性和电性资料识别火山岩岩性^[12];采用叠后去噪、高精度相干、边缘检测、多属性融合和三维可视化方法,精细刻画火山机构与空间分布^[13]。

基于岩性—电性—地震资料,火山岩油藏取得重大发现,但储层预测不确定性和多解性问题突出^[14]。莱伊尔等将火山地层学应用于欧洲第四纪火山研究^[15];Einsele G 明确异化地层是火山层序地层学兴起的主要动因^[16];唐华风等认为火山地层学的重点是刻画火山岩层序界面、地层基本类型、组合类型和充填类型等,分析地层单元和地层对比关系^[17]。陈崇阳等^[18]和夏茂龙等^[19]利用地球物理识别标志,对松辽盆地营城组火山地层进行划分和对比;魏翔宇等提出松辽盆地营城组火山地层的旋回—期次—岩相划分方案,认为营城组期次识别与划分的主要依据为风化壳、岩性界面和再搬运堆积物夹层^[20]。

克百断裂带受多期构造运动影响,火山活动多期叠加,岩性在平面和纵向上的非均质性增加。研究区岩性主要为熔岩和火山碎屑岩,岩相为溢流相、喷发相及火山沉积相^[21]。对地层格架和构造背景的研究

收稿日期:2025-12-05;编辑:任志平 王晓波

基金项目:国家自然科学基金项目(42572181);新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2025A01010-1)

作者简介:高 炎(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事油藏评价、油藏开发及综合地质方面的研究。

通信作者:姚宗全,E-mail: yzq@xju.edu.cn

主要集中于哈山区域^[4]。研究区石炭系受样品位置、数量限制,以年代学资料进行火山期次追踪存在不匹配现象^[22],未建立火山喷发期次划分与岩性分布的关系。基于岩心、镜下薄片、地球化学分析、测井及三维地震资料,笔者明确研究区地质构造环境,厘清期次界面特征,实现火山地层旋回和期次划分,刻画火山岩分布规律,为地区地层划分提供地质依据。

1 区域地质概况

准噶尔盆地西北缘呈三段式构造特征,分别是红车断裂带、克百断裂带及乌夏断裂带^[23]。克百断裂带进一步划分为上盘推覆体主体、上盘地层超覆尖灭带、上盘推覆体前缘断块带及推覆体下盘斜坡区 4 种构造模式^[24]。克百乌大断裂是中枢断裂,形成于石炭纪末,结束于侏罗纪晚期,对上、下盘地层具有控制作用。研究区发育黑油山断裂、大侏罗沟断裂等,将克百断裂带分为一区、九区等区块。整体上,克百断裂带在平面上呈南西—北东向的带状,北部为扎伊尔山和哈拉阿拉特山,南部为红车断裂带和中拐凸起,东部为玛湖凹陷(见图 1(a))。西南—东北向发育两条平行断阶带(见图 1(b))。研究区为白 18 井以北区域至哈山山前,目的层段分为五期次,即 C1—C5,主要钻遇火山熔岩、火山碎屑岩和部分变质岩(见图 1(c))。

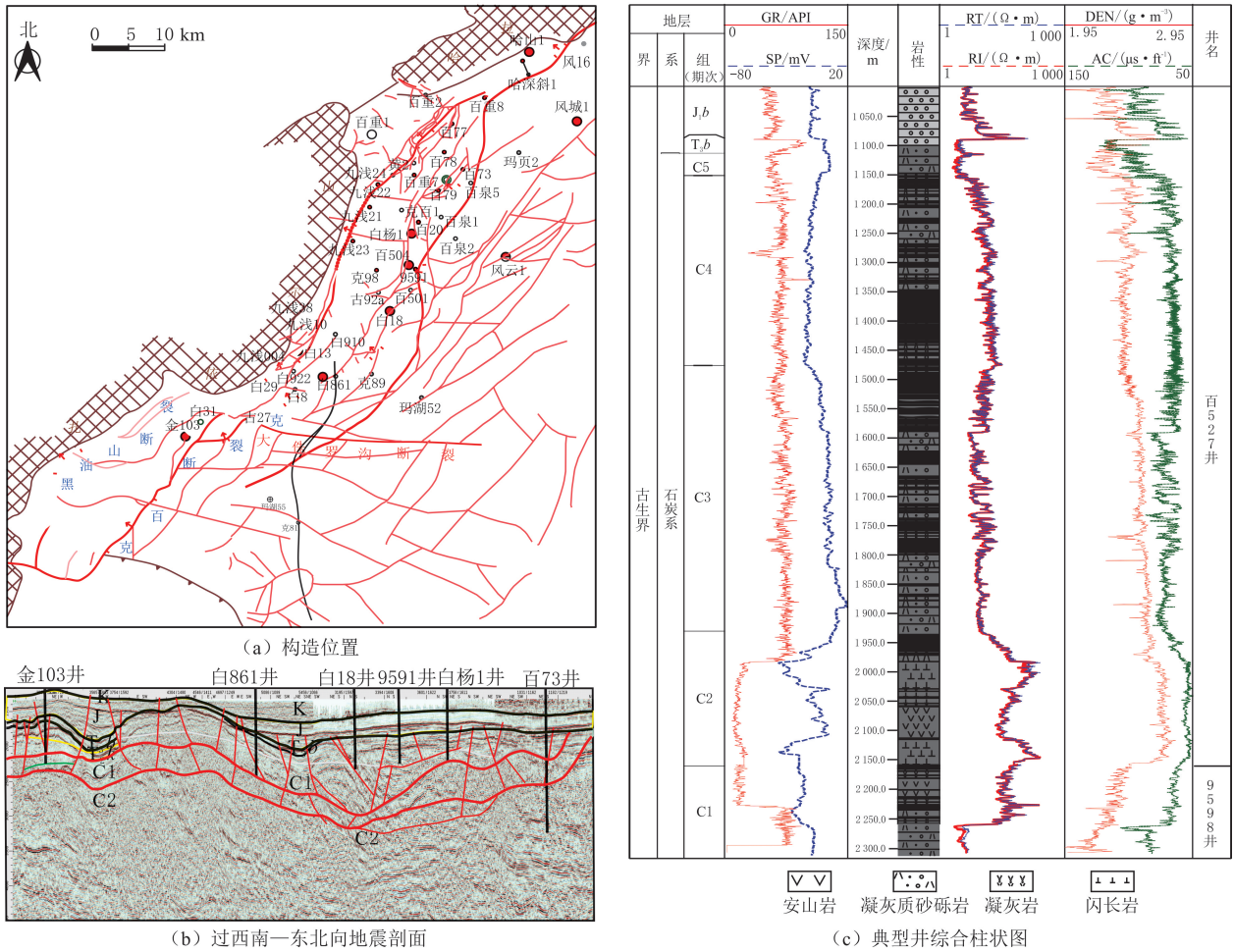
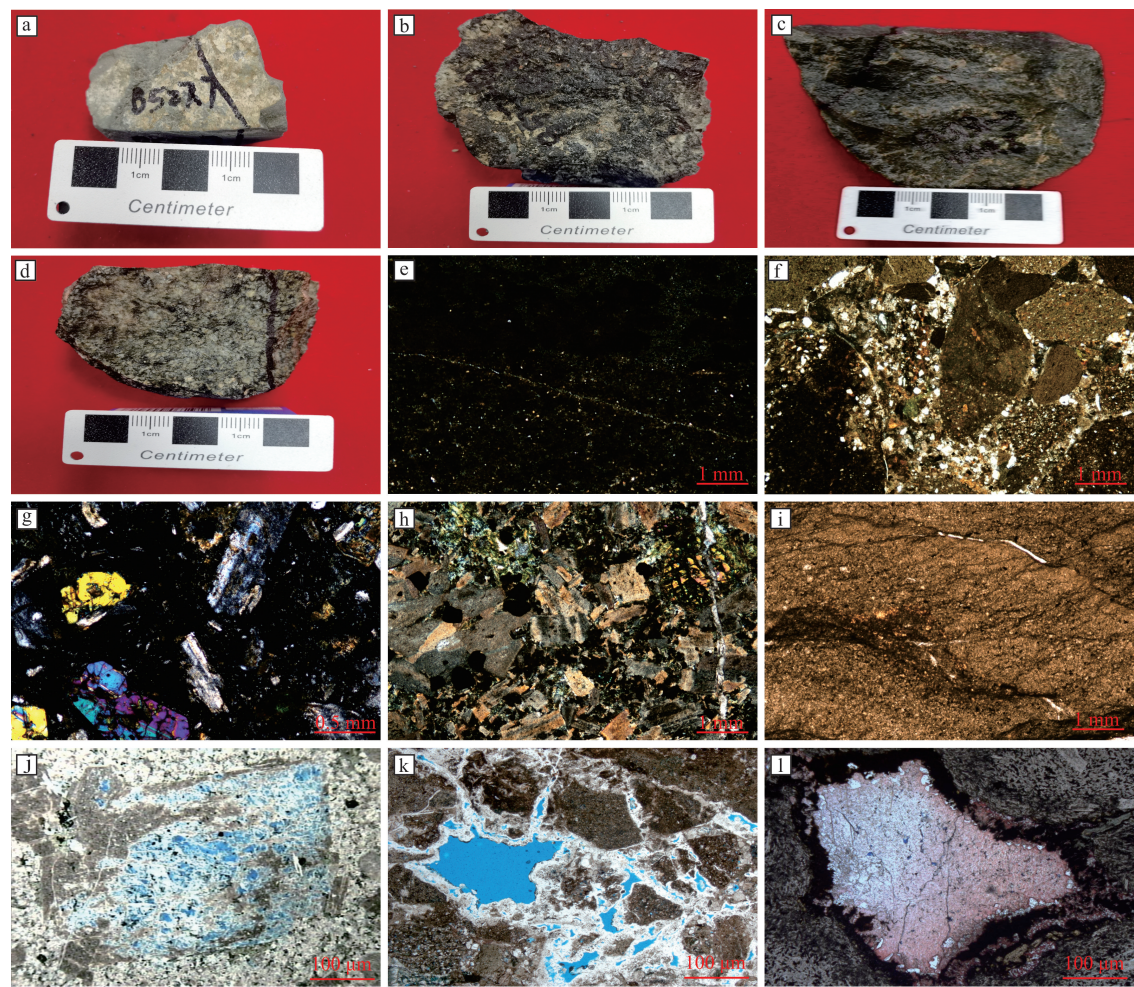


图 1 研究区构造位置、地震剖面 and 综合柱状图
Fig. 1 Tectonic location, seismic profile and comprehensive stratigraphic column of the study area

2 岩石学特征

对研究区 26 口井岩心进行取样,每口井由底至顶每间隔 1.0~1.5 m 取样。克百断裂带石炭系火山岩可划分为火山熔岩类、火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩、浅成侵入岩类及少量变质岩(见图 2)。火山熔岩

类主要为安山岩和少量玄武岩,火山碎屑岩主要为凝灰岩,火山碎屑沉积岩以凝灰质砂砾岩为主。研究区岩性具有分带特征,古 55—百 107—百 80 井以东为安山岩和凝灰岩带,以西为凝灰岩和凝灰质砂砾岩。



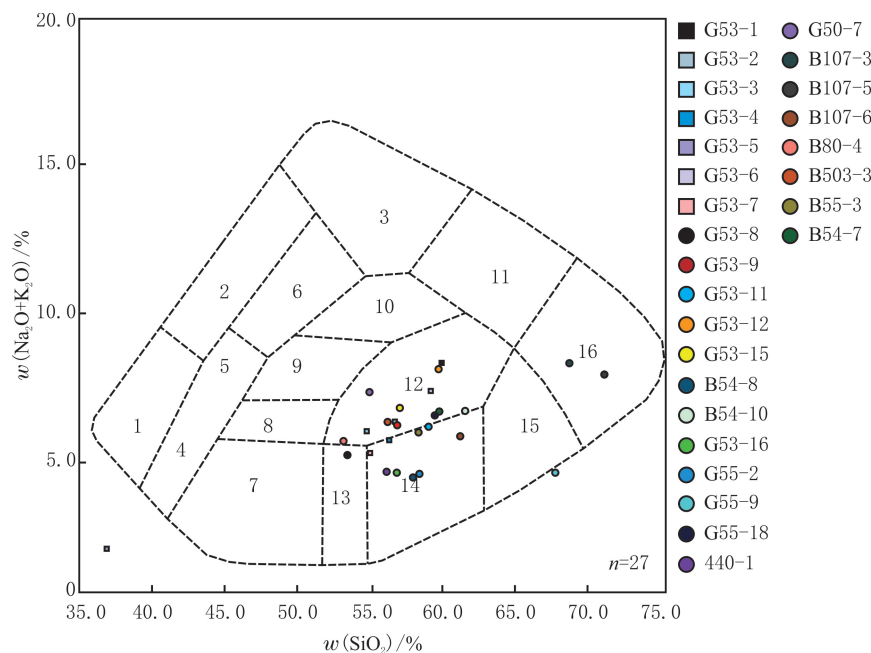
(a) 晶屑凝灰岩, 百527井, 1 133.22 m; (b) 凝灰质砂砾岩, 百527井, 1 183.00 m; (c) 透辉安山岩, 古53井, 1 164.80 m; (d) 蚀变闪长岩, 百107井, 1 130.00 m; (e) 晶屑凝灰岩岩石薄片, 百527井, 1 133.22 m; (f) 凝灰质砂砾岩岩石薄片, 百527井, 1 183.00 m; (g) 透辉安山岩岩石薄片, 古53井, 1 164.80 m; (h) 蚀变闪长岩岩石薄片, 百107井, 1 130.00 m; (i) 千枚状板岩岩石薄片, 古53井, 1 889.80 m; (j) 安山岩, 斑晶溶孔铸体薄片, 百107井, 1 130.32 m; (k) 凝灰质砂砾岩, 粒间溶孔铸体薄片, 百527井, 1 198.55 m; (l) 安山岩, 斑晶溶孔, 白杨1井, 3 470.00 m, 暗化边

图 2 克百断裂带上盘石炭系火山岩岩性特征

Fig. 2 The lithology of the Carboniferous volcanic rocks on the hanging wall of the Kebai Fault Zone

凝灰岩具有凝灰质结构,为块状构造,主要由晶屑、火山灰和少量不透明金属矿物组成(见图 2(a、e))。凝灰质砂砾岩具有凝灰质砂砾结构,为块状构造,主要由岩屑和晶屑组成,岩石主要为粒径大、含量高和种类复杂的岩屑;晶屑主要为石英和长石,石英晶屑边部被熔蚀而呈港湾状、次圆状或不规则状,来源于中酸性火山岩类(见图 2(b、f))。安山岩具有斑状结构,为块状构造,斑晶由斜长石、角闪石及黑云母组成,基质具有交织结构,发育聚片双晶,在半平行微晶颗粒间分布大量不透明金属矿物及透辉石,黑云母呈半自形—他形片状,石英多充填于斜长石微晶周围(见图 2(c、g))。闪长岩具有花岗结构,为块状构造,以斜长石、角闪石、钾长石和石英为主,包括少量黑云母,斜长石和钾长石强烈黏土化,黑云母呈片状,晶体受外力而弯曲变形,呈浅黄—浅绿多色性,整体绿泥石化(见图 2(d、h))。板岩具有隐晶质—显微变晶结构,为弱千枚状构造,主要由显微晶质石英、绢云母和绿泥石组成,常见岩石内穿插后期多条方解石细脉及石英细脉(见图 2(i))。

对研究区典型火山岩岩心进行全碱—硅图解(见图 3),岩心样品落入粗面安山岩区域, SiO_2 质量分数介于 0.96%~69.54%,与镜下岩石定名(安山岩)基本一致,少部分为玄武—安山岩类。



1. 霞岩; 2. 响岩质霞岩; 3. 响岩; 4. 碧玄岩; 5. 碱玄岩; 6. 响岩质碱玄岩; 7. 玄武岩和苦橄玄武岩; 8. 夏威夷岩; 9. 橄榄粗安岩; 10. 粗安岩 (歪长粗面岩); 11. 粗面岩; 12. 粗面安山岩; 13. 玄武安山岩; 14. 安山岩; 15. 英安岩; 16. 流纹岩

图 3 克百断裂带上盘石炭系火山岩全碱—硅图解(据文献[25]修改)

Fig. 3 TAS diagram of the Carboniferous volcanic rocks on the hanging wall of the Kebai Fault Zone(modified by reference[25])

3 构造环境与 U-Pb 年龄

火山岩是研究沉积盆地内构造背景的重要依据^[26]。对研究区典型样品进行主微量元素分析,样品的烧失量(LOI)为 1.85%~7.14%,平均为 3.39%(见表 1),表明多数岩石经历一定程度的蚀变作用,薄片可见大量的溶蚀孔和暗化边(见图 2(g-l))。研究区火山岩属于钙碱性系列岩石,里特曼指数介于 1.44%~5.08%,平均为 2.93%(见表 1),指示岛弧环境^[27](见图 4,黑色线为里特曼指数等值线,绿色线为代表性火山岩组合),与区域发育火山熔岩和火山碎屑岩夹层具有相似的构造背景。

表 1 克百断裂带上盘石炭系火山岩地球化学成分

Table 1 Chemical composition of the Carboniferous volcanic rocks on the hanging wall of the Kebai Fault Zone												
期次	样品编号	深度/m	岩石名称	w(SiO ₂)/ %	w(Al ₂ O ₃)/ %	w(CaO)/ %	w(Na ₂ O)/ %	w(K ₂ O)/ %	LOI	里特曼 指数	CIA	平均 CIA
C5	G55-2	702.00	蚀变闪长岩	57.08	17.51	6.74	3.79	0.72	2.85	1.44	0.61	0.61
C4	B55-3	1 496.30	蚀变玄武岩	54.95	16.83	5.99	5.13	0.53	4.41	2.68	0.59	0.59
C3	G55-18	1 242.50	蚀变安山岩	57.60	15.98	2.48	5.38	0.99	4.59	2.78	0.64	0.64
	B107-6	1 263.50	蚀变安山岩	56.41	13.68	6.26	3.26	2.16	2.25	2.19	0.54	
	G53-1	1 114.70	玄武质安山岩	57.83	15.86	2.51	6.55	1.50	3.06	4.37	0.60	
	G53-2	1 164.40	透辉安山岩	55.42	17.73	6.23	5.06	1.16	2.23	3.12	0.59	
	G53-3	1 164.80	透辉安山岩	53.58	18.98	6.38	5.09	0.82	1.85	3.30	0.61	
C2	G53-4	1 236.30	玄武质安山岩	55.04	18.08	6.77	4.81	0.81	2.21	2.62	0.59	0.59
	G53-6	1 238.35	玄武质安山岩	57.04	16.13	4.18	5.50	1.63	3.58	3.62	0.59	
	G53-7	1 245.80	玄武质安山岩	52.82	16.74	7.78	4.63	0.48	3.55	2.66	0.56	
	G53-8	1 294.80	玄武质安山岩	50.96	16.60	8.71	4.57	0.44	4.32	3.15	0.55	
	G53-9	1 354.90	安山岩	56.74	16.37	2.99	4.43	1.53	3.79	2.59	0.65	

续表 1

期次	样品编号	深度/m	岩石名称	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	LOI	里特曼指数	CIA	平均CIA
	G53-11	1 357.40	玄武质安山岩	54.52	17.50	4.08	4.54	1.45	4.20	3.11	0.63	
	G53-12	1 412.20	玄武质安山岩	57.93	15.84	2.56	6.21	1.68	2.82	4.17	0.60	
	G53-15	1 511.00	玄武质安山岩	55.80	17.03	5.04	5.71	0.97	2.93	3.49	0.59	
	G53-16	1 563.00	蚀变闪长岩	54.79	17.14	6.38	3.86	0.63	2.07	1.71	0.61	
	440-1	1 875.90	蚀变闪长岩	54.53	17.36	6.96	3.46	1.10	3.06	1.80	0.60	
C1	G50-7	1 640.50	蚀变闪长岩	52.84	18.48	4.45	5.37	1.70	2.70	5.08	0.62	0.61
	B80-4	776.53	蚀变闪长岩	51.51	17.69	6.77	4.63	0.91	7.14	3.61	0.59	
	B503-3	1 129.50	杏仁状玄武岩	53.50	15.56	2.59	5.89	0.16	2.25	3.49	0.64	
	G54-7	1 230.30	蚀变杏仁玄武岩	57.90	16.84	5.45	6.35	0.15	5.57	2.84	0.58	
	G54-8	1 280.60	蚀变闪长岩	55.58	18.23	6.25	3.77	0.55	3.04	1.48	0.63	
	G54-10	1 293.10	蚀变安山岩	59.39	17.99	3.32	4.35	2.14	3.43	2.57	0.65	

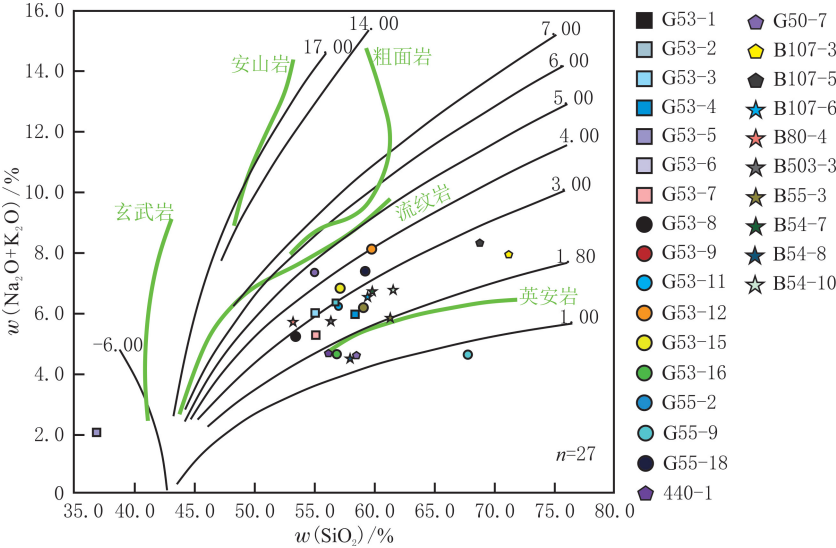


图 4 克百断裂带上盘石炭系火山岩里特曼指数
Fig. 4 Rittmann index of the Carboniferous volcanic rocks on the hanging wall of the Kebai Fault Zone

百 527 井锆石样品 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 304.0~421.8 Ma, 最大年龄误差为 2.9 Ma, 数据点集中分布在谐和曲线附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(316.8 \pm 2.9) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.71$) (见图 5), 代表火山喷发年龄。

4 火山喷发旋回和期次划分

4.1 识别标志

划分火山喷发旋回与期次的关键是火山地层界面识别^[28]。相邻两个旋回之间发育一定厚度的沉积夹层或风化壳, 旋回下界面通常以近火山口相为起始, 与下伏地层之间多为不同规模的间断面; 上界面终止于距火山口相组合较远的位置, 与上覆地层之间多发育不同规模的间断面, 以连续不整合面为标志。相邻两期次之间发育一定厚度的小型间断面, 如风化壳、松散层或沉积夹层等, 期次内部结构特征表现为相序连续或准连续^[29]。根据地质和地球物理资料、地球化学数据, 识别火山地层喷发旋回和期次划分的界面标志。

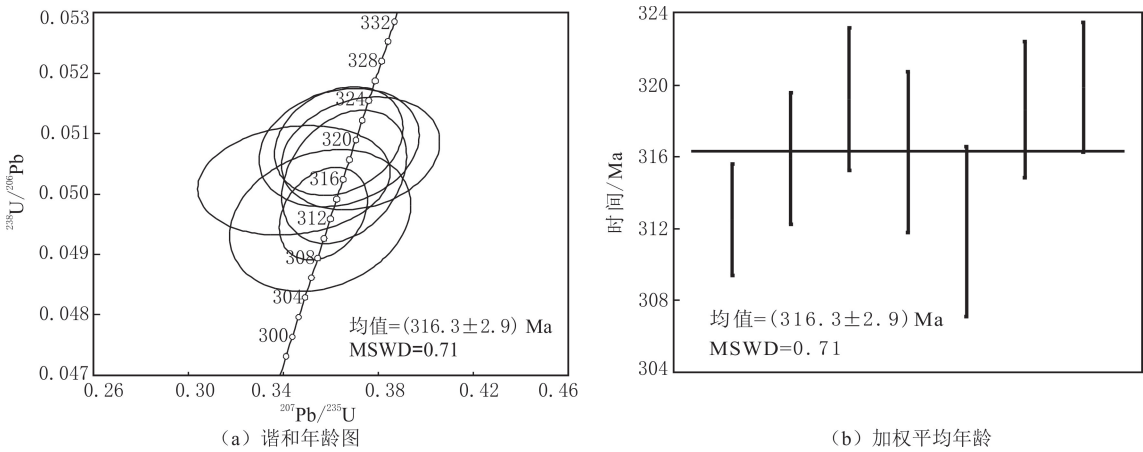


图 5 克百断裂带百 527 井凝灰岩锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图与年龄谱图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordial diagram and age histogram of tuff zircons from well Bai 527 of Kebai Fault Zone

4.1.1 风化壳和不整合面

根据克百断裂带上盘火山岩里特曼指数,研究区为一岛弧构造背景下形成的逆冲推覆体(见图 6),由构造应力场变化引起的火山活动减弱直至停止,表明一次火山喷发结束;克百断裂带发生构造沉降或挤压抬升,地层接受沉积或遭受剥蚀而形成不整合面,表明火山喷发旋回结束。不整合结构在测井曲线、岩性、地震剖面上与上部地层的有明显差异。

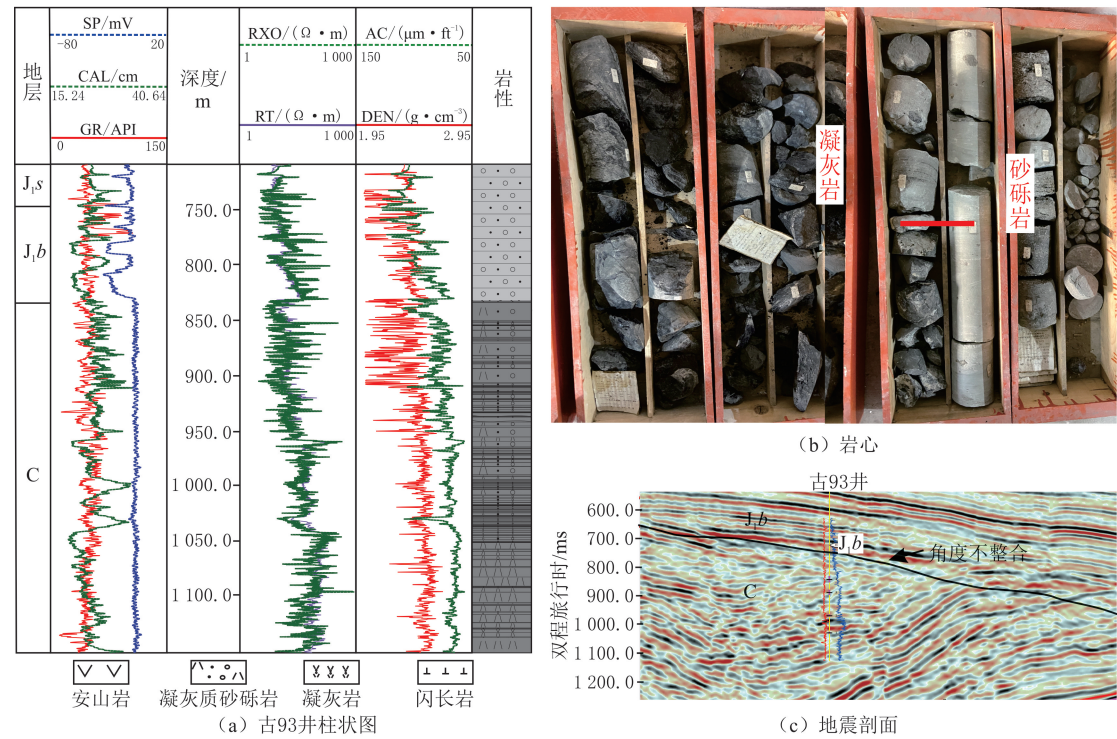


图 6 克百断裂带古 93 井火山旋回划分标志

Fig. 6 Division of volcanic cycles in the well Gu 93 of the Kebai Fault Zone

不整合面下部风化壳地层中黏土成分增加,放射性增强,GR 和 SP 曲线呈增大趋势;流体散失,导电性较弱,RT 呈减小趋势。风化壳的淋滤作用使岩石的弹性波速度减小,AC 曲线呈增大趋势(见图 6(a))。在岩心上,不整合面上覆八道湾组(J₁b)沉积大套灰白色砂砾岩,下伏一套灰黑色凝灰岩(见图 6(b))。在地震剖面上,整个石炭系的顶部具有明显削截和上超特征,界面之下为杂乱反射,界面之上为平行—亚平行反射(见图 6(c))。

4.1.2 沉积夹层

火山爆发间歇期形成的区域或局部沉积可以作为期次顶面^[30]。克百断裂带石炭系上盘具有火山岩与火山碎屑岩互层的特点,且厚度不一。单井、连井和地震剖面对比表明,由压实固结形成的沉积岩和火山沉积岩,多有来自下部厚度大的火山碎屑物,将具有一定的侧向连续性的沉积地层判定为标志性沉积地层,通常在界面的顶部;将沉积厚度小、侧向连续性差、分布局限、由火山活动间歇期接受异源的沉积物构成的薄层夹于火山碎屑岩层视为无效标志层。

4.1.3 岩性和岩相组合突变面

火山活动通常表现为周期性变化,包括喷发强度、喷出物质成分等。研究区同一期次内部岩性包括凝灰岩与凝灰质砂砾岩互层(下部为凝灰岩,上部为凝灰质砂砾岩),以及从底至顶表现为安山岩(玄武岩)—凝灰岩—凝灰质砂砾岩。

基于岩性—组构—成因的火山岩相划分方案划分,以安山岩为主,具有斑状结构的溢流相;以凝灰岩为主,具有凝灰结构的爆发相;以凝灰质砂砾岩为主,发育层理构造和凝灰质砂砾结构的火山沉积相。在地震响应上,溢流相表现为中—强振幅、低频率、中—强连续性、杂乱反射特征;爆发相表现为中强振幅、中等频率、杂乱反射特征;火山沉积相表现为弱振幅、中低频率、透镜状或杂乱反射特征。

一个完整的火山岩相组合由爆发相—侵出相—喷溢相—火山沉积相构成。研究区常见的岩相序列表现为爆发相—火山沉积相或溢流相^[31]。局部区域,火山作用频繁,呈多个岩性序列的叠加或单一岩性类型,从而形成不同的岩相组合。通常一个火山期次包含一个或多个岩性组合,在同一期次内的岩性组合具有一定的相似性。

4.2 旋回和期次划分

一次火山喷发旋回是火山活动从强烈喷发→平静溢流→蒸气涌流→火山活动宁静期的全过程^[32]。火山物质由一系列具有同源性的火山岩构成,化学成分相似。旋回内不同阶段形成的岩性、结构及构造存在差异,在纵向上有序变化。根据火山喷发旋回与期次的火山地层界面识别标志,克百断裂带上盘石炭系划分为1个旋回和5个期次。克百断裂带石炭系化学蚀变指数^[33] CIA 介于 0.54~0.65(见表1),其中,中等风化程度(CIA 介于 0.50~0.60)的样品占 52.17%,强风化程度(CIA>0.60)的样品占 47.83%,表明研究区普遍经历较高程度的风化淋滤作用。C1—C2 期次,火山喷发强度大,火山岩分布广,样品大多取自古 53、古 54 井,属于构造隆起区,顶部经削截后风化沉积上覆侏罗系,表层火山熔岩遭风化剥蚀、深层流体顺层溶蚀,平均 CIA 为 0.60;C3—C5 期次,火山喷发强度降低,火山熔岩局部发育,以垂向风化淋滤为主、顺层溶蚀为辅,平均 CIA 为 0.61,表现为强风化程度。

旋回划分的依据主要是石炭系与上覆八道湾组之间的不整合界面(见图6)。研究区百 527 井的 U-Pb 同位素年龄为(316.8±2.9)Ma,与李永军等厘定的石炭系顶部白杨河组火山岩年龄 287 Ma 属于两个年龄段^[4],表明研究区只发育一个旋回。

克百断裂带经历多期次火山喷发作用,火山岩体纵向叠置,火山岩内幕结构特征复杂,火山期次划分成为分析火山岩内幕特征的基础。根据火山喷发能量由强变弱的过程,形成由喷发期的火山岩与间歇期的火山沉积岩组成的多种岩性的韵律组合。两期火山喷发的间歇期是火山期次划分的关键,测井响应和地震反射特征发生变化。研究区岩性、电性与地震反射特征具有较好的一致性,可以为期次划分提供依据,自下而上可以划分 5 个期次。

C1 期次以一套安山岩为主,顶部为凝灰质砂砾岩,测井曲线表现为中—高 RT、高 DEN、高 AC;地震反射特征显示高频中强振幅、中等连续性,多见薄层火山碎屑岩夹于火山岩,因连续性差、厚度小,在进行期次划分时视为无效标志层(见图7)。C2 期次底部为一套厚度约为 30 m 的安山岩,具有斑状构造,向上过渡为凝灰岩与凝灰质砂砾岩夹层,测井曲线表现为中 RT、中高 DEN、高 AC;地震反射特征显示低频中等振幅、差连续性或杂乱反射(见图8)。C3 期次整体为一套凝灰质砂砾岩,具有凝灰质砂砾状结构,测井曲线表现为中 RT、中—高 DEN;地震反射特征显示中高频振幅、强连续性(见图9)。C4 期次底部发育一套厚度约为 20 m 的玄武岩,中部为一套玄武质安山岩,向上过渡为凝灰岩,顶部为凝灰质砂砾岩,测井曲线表现为中—低 RT、

中—高 DEN;地震反射特征为弱振幅(见图 10)。C5 期次主要为一套凝灰质砂砾岩,测井曲线表现为中—低 RT、低 DEN、中低电阻率;地震反射特征显示弱振幅、中低频率,为透镜状特征(见图 11)。

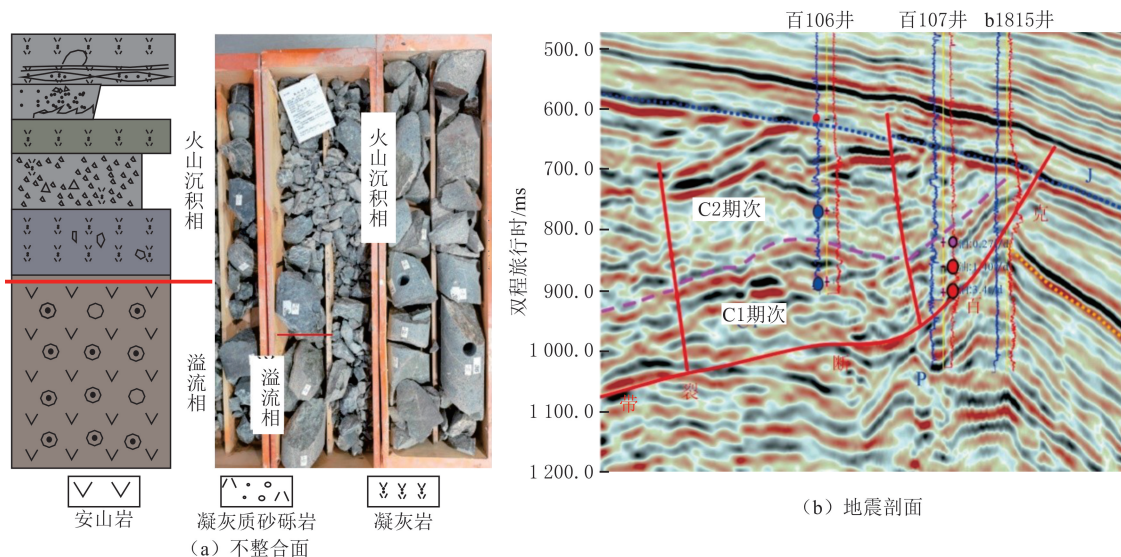


图 7 克百断裂带上盘石炭系不整合面和火山岩岩性、岩相突变界面

Fig. 7 Lithology and lithofacies transition boundary of the Carboniferous volcanic rocks on the hanging wall of the Kebai Fault Zone

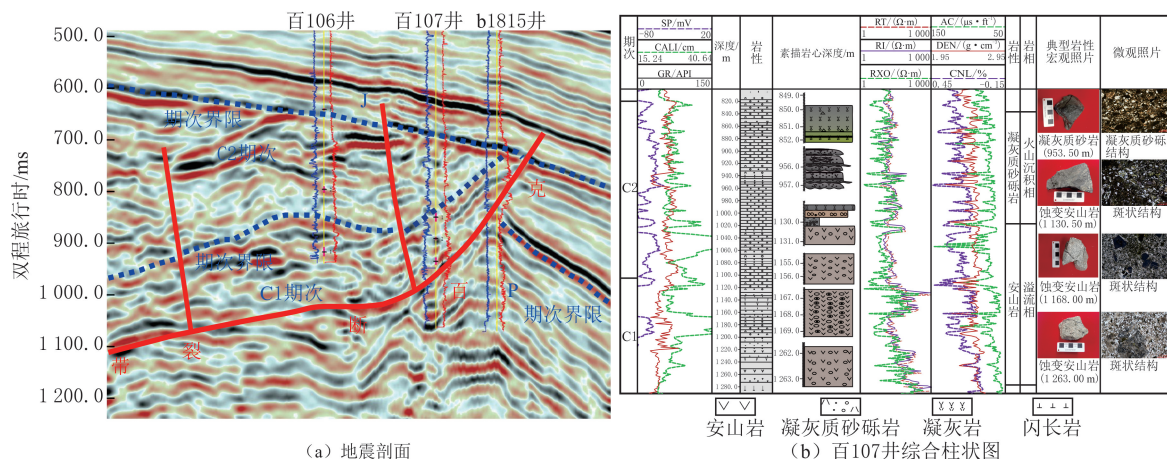


图 8 克百断裂带上盘石炭系 C1 与 C2 期次划分

Fig. 8 Division of the C1 and C2 sequences of the Carboniferous volcanic rocks on the hanging wall of the Kebai Fault Zone

C1—C2 期次测井曲线在 1120.00 m 处突变,岩相由溢流相向火山沉积相过渡,二者属于岩性、岩相的突变界面。C2—C3 期次主要是以沉积夹层为期次界面,出现斑状结构,表明岩浆快速冷却,多在喷出岩中出现;C3 期次的凝灰质砂砾岩与 C4 期次底部的玄武岩表现为不同期次产物,为岛弧背景下裂隙喷发的产物。C4—C5 期次主要表现为岩浆爆发结束后形成的风化剥蚀产物,为不整合面。

5 火山岩分布规律

根据西南—东北向横穿研究区的连井与地震剖面,探讨期次与火山岩分布规律。C1 期次火山岩分布最广,覆盖整个研究区,主要发育安山岩和凝灰岩。西南区域百 503、古 53 代表井未钻穿 C1 期次,东北区域百 107 代表井受构造挤压,期次较薄。C2 期次火山岩发育在 9598—百 524X 井之间,位于低凹,上超于 C1 期次的顶部,两边火山喷发产物顺层分布,主要发育安山岩。C3—C4 期次被 C5 期次削截,具有填平补齐作用。C5 期次形成大量凝灰质砂砾岩构成的风化壳,为火山活动处于最弱期产物,主要以凝灰质砂

砾岩为主(见图 12)。垂向上,安山岩—凝灰岩—凝灰质砂砾岩序列不重复,指示研究区的火山喷发方式为裂隙式喷发。试油结果显示,油气主要分布于 C1 期次安山岩和 C5 期次凝灰质砂砾岩。

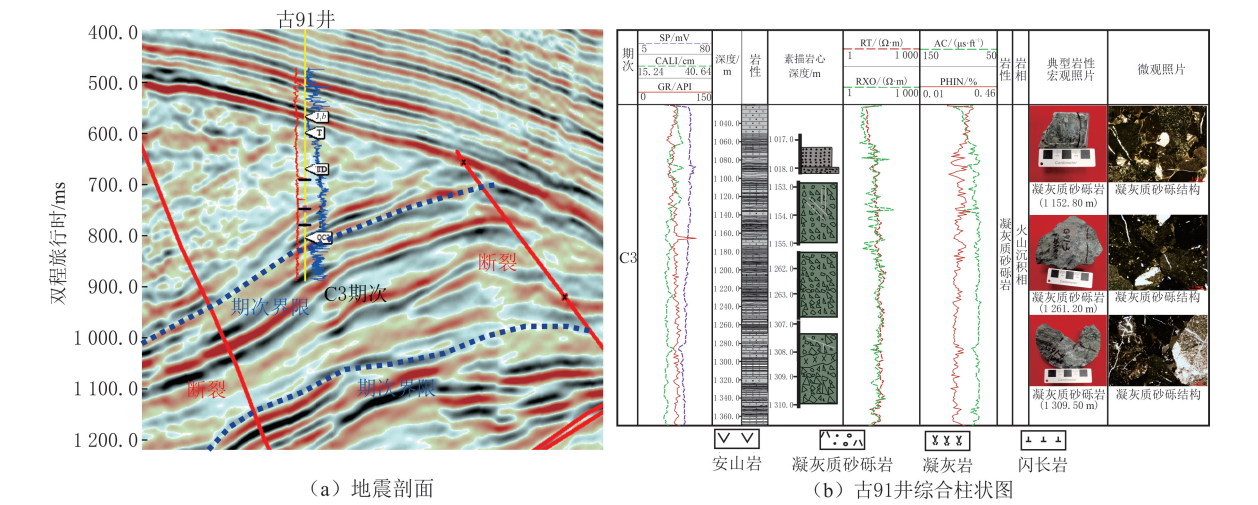


图 9 克百断裂带上盘石炭系 C3 期次划分
Fig. 9 Division of C3 sequences of the Carboniferous volcanic rocks on the hanging wall of the Kebai Fault Zone

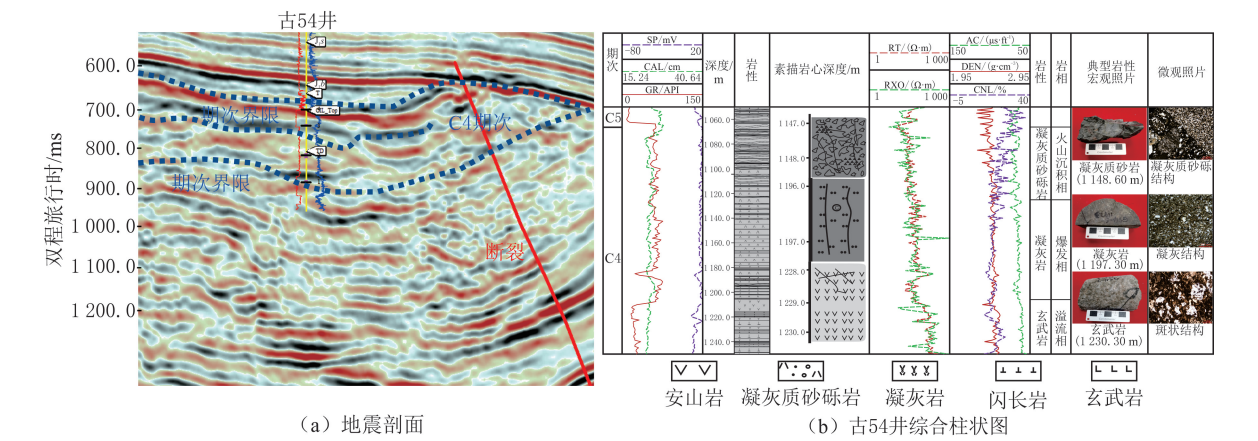


图 10 克百断裂带上盘石炭系 C4 期次
Fig. 10 Division of C4 sequences of the Carboniferous volcanic rocks on the hanging wall of the Kebai Fault Zone

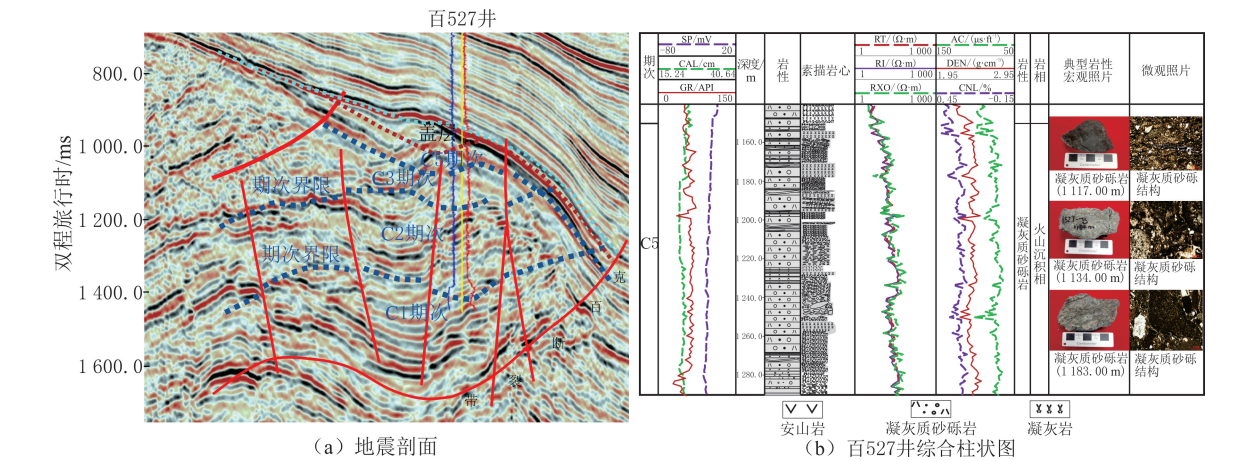


图 11 克百断裂带上盘石炭系 C5 期次
Fig. 11 Division of C5 sequences of the Carboniferous volcanic rocks on the hanging wall of the Kebai Fault Zone
C1—C5 期次火山岩平面分布范围逐渐减小,与研究区呈两边高、中间低分布和 C2—C5 期次逐层超

覆有关。在岩性上,闪长岩、安山岩及板岩主要分布于每个期次的边界—断裂活动较强的区域,凝灰岩全区分布;凝灰质砂砾岩和凝灰岩占优势岩性,全区火山期次范围向南递减(见图 13)。期次、岩性分布与连井剖面具有很好的一致性。地震剖面 and 连井剖面表明,研究区火山喷发呈火山熔岩向火山碎屑岩过渡的垂向序列,火山熔岩呈盾状分布,揭示在岛弧环境下裂隙式喷发的特征。

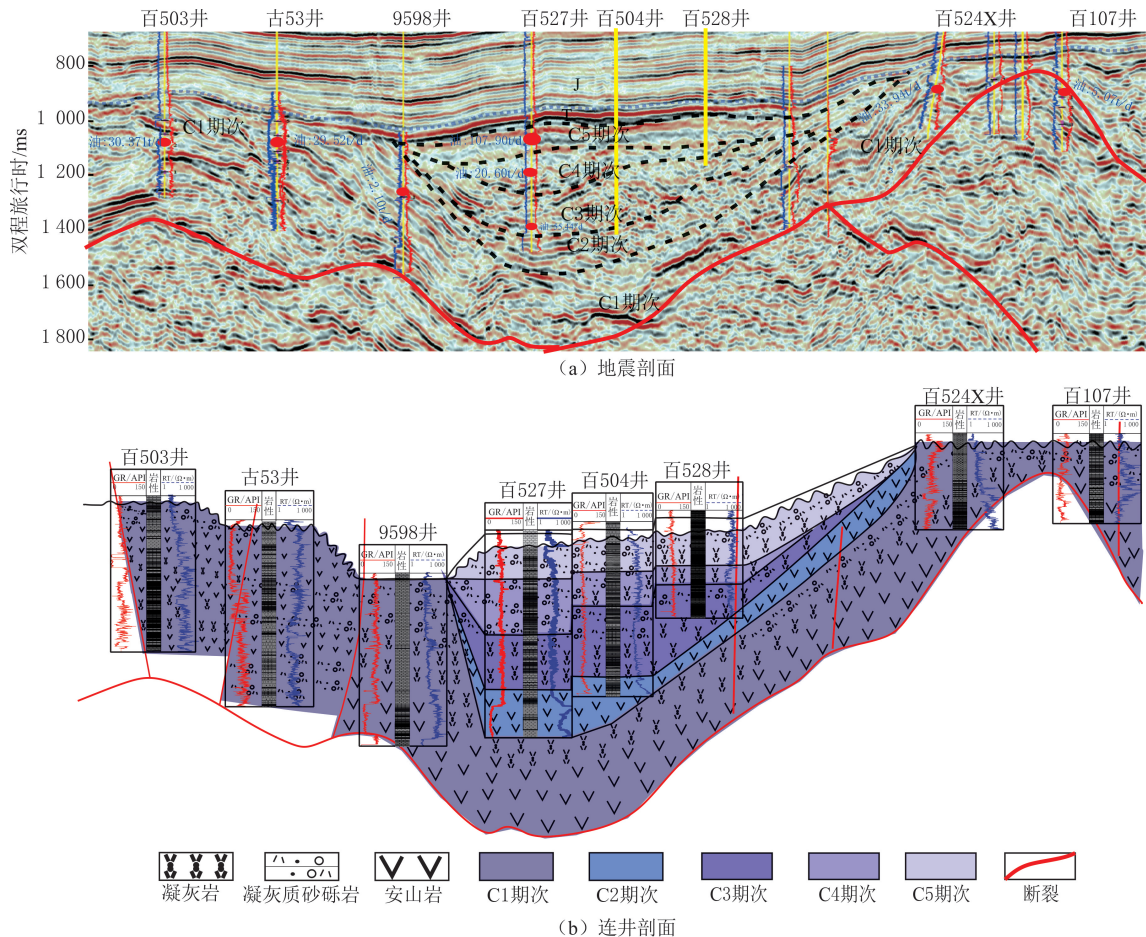
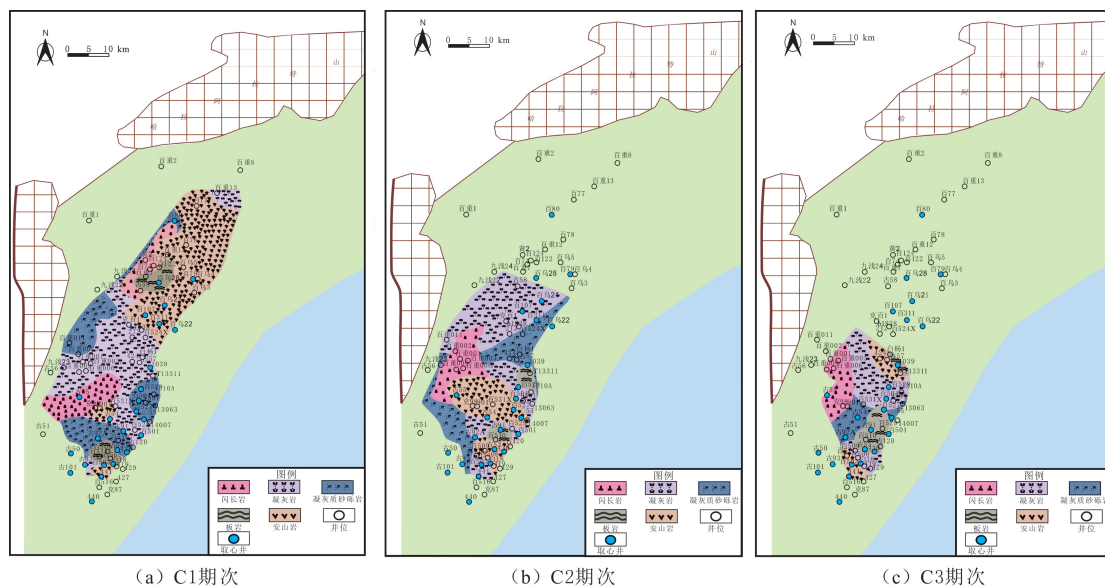


Fig. 12 The crosssection wells of the Carboniferous volcanic rocks on the hanging wall of the Kebai Fault Zone



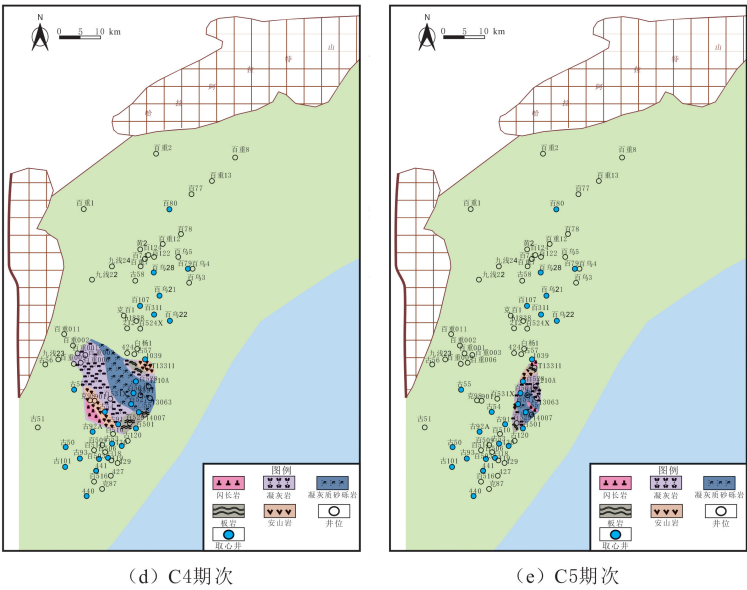


图 13 克百断裂带上盘石炭系期次与火山岩岩性平面分布
Fig. 13 Distribution pattern of the Carboniferous volcanic rocks on the hanging wall of the Kebai Fault Zone

6 结论

(1)克百断裂带上盘石炭系火山岩岩性划分为火山熔岩、火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩、浅成侵入岩及变质岩类。研究区为岛弧构造背景,火山喷发时间为 $(316.8 \pm 2.9)\text{Ma}$ 。

(2)研究区石炭系与上覆侏罗系呈角度不整合接触,是旋回界面的标志;将凝灰质砂砾岩组成的沉积夹层,以及岩性(安山岩、凝灰质砂砾岩、凝灰岩)、岩相(溢流相、爆发相及火山碎屑岩相)变化带作为判断期次的标志,划分为 1 个火山喷发旋回和 5 个期次。C1—C2 期次属于岩性、岩相的突变界面,C3—C5 期次属于沉积夹层的突变界面。整体上,岩相由溢流相向火山沉积相过渡,火山活动逐渐减弱。

(3)垂向上,研究区 C1 期次广泛发育,C2—C5 期次逐层削截,具有填平补齐作用,火山喷发方式为裂隙式喷发。平面上,闪长岩、安山岩及板岩分布于构造活动较强的区域,凝灰质砂砾岩全区分布。整体上,C1—C5 期次范围逐渐南移并呈减小趋势。

参考文献(References):

[1] 刘嘉麒,孟凡超,崔岩,等. 试论火山岩油气藏成藏机理[J]. 岩石学报,2010,26(1):1-13.
Liu Jiaqi, Meng Fanchao, Cui Yan, et al. Discussion on the formation mechanism of volcanic oil and gas reservoirs[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010,26(1):1-13.

[2] 王璞珺,张功成,蒙启安,等. 地震火山地层学及其在我国火山岩盆地中的应用[J]. 地球物理学报,2011,54(2):597-610.
Wang Pujun, Zhang Gongcheng, Meng Qian, et al. Applications of seismic volcanostratigraphy to the volcanic rifted basins of China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011,54(2):597-610.

[3] 赵围,刘嘉麒. 火山岩中找油气:访中国科学院院士刘嘉麒[J]. 中国石油石化,2006(14):38-39.
Zhao Wei, Liu Jiaqi. Looking for oil and gas in volcanic rocks; an interview with Liu Jiaqi, academician of the CAS member[J]. China Petrochem, 2006(14):38-39.

[4] 李永军,王盼龙,支倩,等. 西准噶尔乌尔禾地区哈拉阿拉特组富斑碱性玄武岩年代学、地球化学及地质意义[J]. 岩石学报,2024,40(7):2037-2055.
Li Yongjun, Wang Panlong, Zhi Qian, et al. Geochronology, geochemistry and geological significance of multi-porphyritic alkaline basalt from Hala'alate Formation in Urho Area, West Junggar, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024,40(7):2037-2055.

[5] Cucciniello C, Roex A P L, Gennaro R D, et al. Geochemistry of Cenozoic mafic potassic and sodic volcanic rocks in Southwestern Madagascar: long-lived lithospheric mantle heterogeneities in an extensional tectonic setting[J]. Lithos, 2024,482:17.

[6] 于跃江,李慧,李新鹏,等. 大兴安岭呼中地区满克头鄂博组火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及构造环境[J]. 东北石油大学学报,

- 2025,49(3):29-40.
- Yu Yuejiang, Li Hui, Li Xinpeng, et al. The geochemical characteristics, zircon U-Pb ages, and tectonic environment of the Mantou Ebo Formation volcanic rocks in the Huzhong Area of the Greater Khingan Range[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2025,49(3):29-40.
- [7] Xu Changgui, Yang Haifeng, Chen Lei, et al. Exploration breakthrough and hydrocarbon accumulation conditions of Mesozoic volcanic rocks in Bodong Low Uplift, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025,52(3):600-615.
- [8] 周勇,梁涛,赵祥宇,等. 火山岩不同喷发环境识别标志及喷发模式:以准噶尔盆地东部石炭系为例[J]. 古地理学报,2025,27(2):423-445.
- Zhou Yong, Liang Tao, Zhao Xiangyu, et al. Identification marks and eruption patterns of volcanic rocks in different eruption environments: a case study of the Carboniferous in Eastern Junggar Basin[J]. Journal of Paleogeography, 2025,27(2):423-445.
- [9] Zhang K, Marfurt K J, Wan Z, et al. Seismic attribute illumination of an igneous reservoir in China[J]. Leading Edge, 2011,30(3):266.
- [10] 李永刚. 长岭断陷查干花次凹火山岩相测井响应特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):2061-2074.
- Li Yonggang. Logging response characteristics of subaqueous eruptive volcanic facies of Huoshiling Formation in Chaganhua Sub Depression, Changling Fault Depression[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024,54(6):2061-2074.
- [11] 刘凯,邹正银,王志章,等. 基于机器学习的火山岩岩性智能识别及预测[J]. 特种油气藏,2022,29(1):38-45.
- Liu Kai, Zou Zhengyin, Wang Zhizhang, et al. Intelligent recognition and prediction of volcanic rock lithology based on machine learning[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022,29(1):38-45.
- [12] 杨思林,易治宇,赵千,等. 葛蒲盆地早侏罗世火山岩的古地磁研究:对华南晚中生代岩浆热液重磁化与铀成矿的启示[J]. 地球物理学报,2025,68(4):1394-1416.
- Yang Silin, Yi Zhiyu, Zhao Qian, et al. Paleomagnetism of Early Jurassic volcanic rocks from the Changpu Basin: implications for the Late Mesozoic magmatic-hydrothermal remagnetization and uranium mineralization in South China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2025,68(4):1394-1416.
- [13] 曹磊,蔡峰. 基于地震属性融合技术的火山通道识别研究[J]. 地球物理学进展,2021,36(2):559-564.
- Cao Lei, Cai Feng. Volcanic conduit identification using seismic attribute fusion technology[J]. Progress in Geophysics, 2021,36(2):559-564.
- [14] 潘虹,李晓山,金萍,等. 准噶尔盆地车排子凸起石炭系火山岩体识别及解剖[J]. 东北石油大学学报,2022,46(6):40-51.
- Pan Hong, Li Xiaoshan, Jin Ping, et al. Identification and characterization of Carboniferous volcanic bodies in Chepaizi Uplift, Junggar Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022,46(6):40-51.
- [15] 莱伊尔,徐韦曼. 地质学原理[M]. 北京:北京大学出版社,2008:847.
- Lyell C, Xu Weiman. Principles of geology[M]. Beijing: Peking University Press, 2008:847.
- [16] Einsele G. Sedimentary basins[J]. Springer, 2000,10(8):387-413.
- [17] 唐华风,边伟华,王璞珺,等. 盆地火山岩相分类和模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2023,53(6):1651-1671.
- Tang Huafeng, Bian Weihua, Wang Pujun, et al. Classification and model of volcanic facies in the basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2023,53(6):1651-1671.
- [18] 陈崇阳,高有峰,张晓东,等. 火山地层中的沉积层特征及其地层对比意义:以松辽盆地营城组为例[J]. 地球科学,2018,43(3):812-826.
- Chen Chongyang, Gao Youfeng, Zhang Xiaodong, et al. Characteristics of sedimentary layers in volcanic strata and their stratigraphic correlation significance: taking the Yingcheng Formation in the Songliao Basin as an example[J]. Earth Science, 2018,43(3):812-826.
- [19] 夏茂龙,文龙,李亚,等. 四川盆地简阳地区二叠系火山喷发旋回、环境与模式[J]. 天然气工业,2020,40(9):11-22.
- Xia Maolong, Wen Long, Li Ya, et al. Permian volcanic eruption cycles, environment, and patterns in the Jianyang Area of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020,40(9):11-22.
- [20] 魏翔宇,赵延朋,王璞珺,等. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山地层期次划分及分布规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2023,47(4):12-23.
- Wei Xiangyu, Zhao Yanpeng, Wang Pujun, et al. Division of volcanic eruption stages and distribution patterns of volcanic rocks in Yingcheng Formation of Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2023,47(4):12-23.
- [21] 王剑,靳军,张宝真,等. 克百断裂带内幕火山岩岩石学及岩相学特征[J]. 地质论评,2017,63(增刊 1):283-284.
- Wang Jian, Jin Jun, Zhang Baozhen, et al. Petrology and petrography characteristics of the inner part of the Carboniferous volcanic reservoirs in Kebai Fault Zone[J]. Geological Review, 2017,63(Suppl. 1):283-284.

- [22] 瞿雪姣,王璞珺,姚瑞士,等. 松辽盆地南部火石岭组地层序列划分与区域对比[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(8): 2716-2727.
- Qu Xuejiao, Wang Pujun, Yao Ruishi, et al. Stratigraphic sequence division and regional correlation of Huoshiling Formation in the Southern Songliao Basin[J]. Journal of Central South University(Natural Science Edition), 2014, 45(8): 2716-2727.
- [23] 何登发,尹成,杜社宽,等. 前陆冲断带构造分段特征:以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 91-101.
- He Dengfa, Yin Cheng, Du Shekuan, et al. Structural segmentation characteristics of foreland thrust belt: taking the fault structural belt in the northwest margin of the Junggar Basin as an example[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 91-101.
- [24] 匡立春,薛新克,邹才能,等. 火山岩岩性地层油藏成藏条件与富集规律:以准噶尔盆地克一百断裂带上盘石炭系为例[J]. 石油勘探与开发, 2007, 12(3): 285-290.
- Kuang Lichun, Xue Xinke, Zou Caineng, et al. Reservoir forming conditions and enrichment laws of volcanic lithologic stratigraphic reservoirs: taking the Carboniferous system in the hanging wall of Kebai Fault Zone in the Junggar Basin as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 12(3): 285-290.
- [25] Cox K G, Bell J D, Pankhurst R J. The interpretation of igneous rocks[J]. London: George Allen & Unwin Allen, 1979: 1-450.
- [26] 张亚光,邢伟伟,马梦玲,等. 东天山亚勒曼一带下泥盆统头苏泉组火山岩地质、地球化学特征、U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质论评, 2025, 72(1): 161-176.
- Zhang Yaguang, Xing Weiwei, Ma Mengling, et al. Geological and geochemical characteristics, U-Pb ages, and tectonic significance of the Lower Devonian Tousuquan Formation volcanic rocks in the Yalman Area of the Eastern Tianshan Mountains[J]. Geological Review, 2025, 72(1): 161-176.
- [27] Charvet J, Lapierre H, Yu Yunwen. Geodynamic significance of the Mesozoic volcanism of Southeastern China[J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1994, 9(4): 387-396.
- [28] Rittmann A, Poole G. Volcanoes: windows into the Earth's Crust. (book reviews: Volcanoes and Their Activity, Volcanoes. In history, in theory, in eruption)[J]. 数学物理学报(英文版), 1962, 31(1): 39-48.
- [29] 姜冠一,徐家围子断陷升平—兴城地区深层火山岩岩性、岩相特征及喷发期次[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(4): 9-25.
- Jiang Guanyi. Lithology, lithofacies characteristics and eruption stages of deep volcanic rocks in Shengping-Xingcheng Area of Xujiaweizi Rift[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(4): 9-25.
- [30] 刘翔宇,单玄龙,衣健,等. 渤海湾盆地渤中凹陷义县组火山喷发旋回及其分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 1829-1845.
- Liu Xiangyu, Shan Xuanlong, Yi Jian, et al. Volcanic eruption cycle and distribution of Yixian Formation in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024, 54(6): 1829-1845.
- [31] 冯玉辉,于小健,黄玉龙,等. 辽河盆地新生界火山喷发旋回和期次及其油气地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 14(39): 50-57.
- Feng Yuhui, Yu Xiaojian, Huang Yulong, et al. Eruption cycles and stages of Cenozoic volcanic rocks and their significance to hydrocarbon accumulations in Liaohe Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015, 14(39): 50-57.
- [32] 衣健,王璞珺,唐华风,等. 火山地层界面的地质属性、地质内涵和储层意义:以中国东北地区中生代—新生代火山岩为例[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 324-336.
- Yi Jian, Wang Pujun, Tang Huafeng, et al. Geological properties, geological connotations, and reservoir significance of volcanic stratigraphic interfaces: a case study of Mesozoic Cenozoic volcanic rocks in Northeast China[J]. Acta Petroleum Sinica, 2015, 36(3): 324-336.
- [33] 黄薇,朱映康,肖丽梅. 火山岩期次划分及分布预测方法:以松辽盆地徐家围子断陷安达凹陷为例[J]. 天然气工业, 2015, 35(5): 1-7.
- Huang Wei, Zhu Yingkan, Xiao Limei. Methods of phase division and distribution prediction of volcanic rocks in the Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin: a case study of the Anda Sag[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(5): 1-7.