

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.01.002

川西北碧口地块中新生代隆升及构造扩展特征

金文正^{1,2}, 白万奎³, 王俊鹏⁴, 叶治续⁵

JIN Wen-Zheng^{1,2}, BAI Wan-Kui³, WANG Jun-Peng⁴, YE Zhi-Xu⁵

1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257000; 4. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023;
5. 中国石油天然气股份有限公司冀东油田分公司, 河北 唐山 063200

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for Petroleum Resource and Prospecting, Beijing 102249, China; 3. Geophysical Research Institute of Sinopec Shengli Oilfield Branch, Dongying 257000, Shandong, China; 4. Hangzhou Institute of Petroleum Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 5. Jidong Oilfield Branch Company, PetroChina, Tangshan 063200, Hebei, China

摘要:青藏高原东北缘的向东构造扩展特征是地质热点问题之一,为了精确厘定该扩展速率及变化特征,本文对碧口地块及其东西两侧地层的磷灰石和锆石样品开展了裂变径迹测定和分析。结果表明:磷灰石裂变径迹长度在11.5~12.6 μm 之间,绝大部分磷灰石和锆石裂变径迹年龄分别为古近纪(66.9~45.4 Ma)和侏罗纪—早白垩世(201.5~105.9 Ma)。研究区热史演化总体上具有阶段性,其中碧口地块构造隆升具一致性,而东侧地区热史演化相似且明显滞后于碧口地块,即碧口地块在27~15 Ma之间急剧隆升,而东侧区域不同位置随后在12 Ma和4 Ma开始发生急剧构造隆升。这种构造隆升时间差异是因为碧口地块在随青藏高原地块向东南构造挤压过程中,构造应力向东南方向传递且发生构造扩展所致,构造扩展速率由西至东递减显著,由碧口地块内部的20 km/Ma逐渐降至四川盆地边缘的1.40 km/Ma。构造扩展速率受到地层岩性及构造变形样式等多种因素影响,碧口地块内部的构造扩展速率大约是东侧区域的12倍,构造扩展至四川盆地边缘逐渐减弱并在盆地内消失。

关键词: 磷灰石; 锆石; 裂变径迹; 扩展速率; 碧口地块; 青藏高原

中图分类号: P597+3

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2023)01-0024-13

Jin W Z, Bai W K, Wang J P and Ye Z X. 2023. Meso–Cenozoic Uplift and Tectonic Expansion of the Bikou Block, Northwest Sichuan. *South China Geology*, 39(1):24–36.

Abstract: The eastward tectonic expansion of the northeast margin of the Qinghai-Tibet Plateau is one of the important geological issues. In order to accurately determine the expansion rate and its variation, fission track measurement and analysis has been carried out on apatite and zircon samples from the strata of Bikou Block and its east and west sides, the results of which show that the fission track length of apatite is between 11.5 μm and 12.6 μm , and most of the fission track ages of apatite and zircon are distributed in Paleogene (45.4–66.9 Ma) and Early Jurassic–Cretaceous (105.9–201.5 Ma), respectively. The thermal history evolution can be generally phased, in which the tectonic uplift of Bikou Block is consistent, while the thermal history evolution in the east is similar and obviously lags behind Bikou Block, that is, Bikou block rises sharply between 27 Ma and 15 Ma, then the sharp tectonic uplift occurred at different locations in the eastern region bet-

收稿日期: 2023-1-1; 修回日期: 2023-2-7

基金项目: 国家自然科学基金项目(41002072)、油气资源与探测国家重点实验室开放课题基金(PRP/open-1307)

第一作者: 金文正(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事油气地质和含油气盆地分析专业方向的研究及教学, E-mail: jwz@cugb.edu.cn

wteen 12 Ma and 4 Ma. This differential tectonic uplift is due to the tectonic stress transmitted to the south-east resulting in tectonic expansion in the process of tectonic compression of Bikou block with the Qinghai-Tibet Plateau Block to the southeast, and the tectonic expansion rate decreases significantly from west to east, from 20 km/Ma in the Bikou Block to 1.40 km/Ma in the edge of Sichuan Basin. The rate inside the Bikou Block is about 12 times that in the east, which is affected by many factors such as formation lithology and structural deformation styles. The tectonic expansion gradually weakened on the edge of Sichuan Basin and then disappeared.

Key words: apatite; zircon; fission track; tectonic expansion rate; the Bikou Block; Qinghai-Tibet Plateau

众所周知,青藏高原作为世界屋脊,多年来一直是基础地质研究的热点地区之一,而其东北缘由于与华北板块及上扬子板块拼接而具有更为重要的地质研究意义,目前国内外众多学者已经对青藏高原东北缘与上扬子板块碰撞机制(许志琴等, 2006, 2016)、构造变形及隆升的时空演化模式(Liu Z et al., 2017; 张怀惠等, 2021)、深部壳幔结构及分布(Wang X et al., 2018; 李贞等, 2019; 史克旭等, 2020)等诸多方面开展研究并取得了大量研究成果。在研究方法及手段方面,不仅有野外地质调查(Fan L G et al., 2019)、层序地层分析(陈洪德等, 2011)和砂箱物理模拟(罗强等, 2020; 邓宾等, 2021)等传统的基础方法,同时基于计算机技术的定量化和可视化(虚拟化或数字化)已经成为现今地质研究的主要特色,比如高精度地球物理探测技术(郝识杰等, 2020; 史克旭等, 2020)、三维GPS技术(潘正洋等, 2020)等,但无机地球化学,包括各类同位素精准定年研究(如锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素年龄)仍然是目前青藏高原东北缘研究的主要方法(刘康等, 2020; 李朝鹏, 2021; 张怀惠等, 2021),其中低温热年代学(比如磷灰石和锆石裂变径迹测定及分析)是研究中新生代构造隆升的重要方法(丁汝鑫等, 2007),利用上述多种方法研究造山带构造扩展率是热点问题之一,对于青藏高原东北缘(包括龙门山冲断带)而言,邓宾等(2019)利用区域低温热年代学和褶皱冲断带-前陆盆地系统稳态冲断剥蚀热模型估算出青藏高原向东扩展速率为 5~10mm/a,此外,陈竹新等(2005)通过平衡剖面恢复认为龙门山北段(即本文中的碧口地块东侧区域)在晚三叠世已经形成雏形,构造缩短率

为 31.7%,而新生代构造缩短率为 10.5%,这与林茂炳和吴山(1991)通过平衡剖面原理计算获得的缩短率 42%(L55 测线)接近。而板块边缘的构造变形及演化是一个长期地质作用的复杂过程,地质体本身不仅具有非均质性,并且其所产生的各类构造在时空上也会发生演化,平面上的构造缩短必定与纵向上的构造升降具有“前因一后果”联系,基于此点,本文尝试通过磷灰石和锆石裂变径迹年龄和热史模拟研究,结合前人通过平衡剖面的研究成果,分析和探讨碧口地块及其周缘垂向上构造隆升和横向上构造缩短二者之间的相关性。

1 区域地质背景

碧口地块大地构造上位于青藏高原东北端,地处青藏板块与华北板块及华南板块(即上扬子西北缘)三者拼合的部位(图 1),是多个造山带构造衔接的地区(张国伟等, 2004; 段其发等, 2022),北侧有西秦岭造山带推覆其上,西侧以岷山断裂带为界(杨晨, 2011),东南侧以青川断裂带与龙门山冲断带相邻(金文正等, 2007)。研究区内元古代至新生代各地层均有出露(宁蒙, 2015),主体由元古界构成,多处分布的花岗岩类侵入岩脉形成时间多为印支期和新元古代(骆金诚等, 2010; 袁士松等, 2013; 许晨光, 2016; 邱啸飞等, 2022)。关于碧口地块构造属性及成因,众多学者观点不一,比如有学者认为是孤立于扬子和华北板块之外的残余洋盆或者独立微型板块(刘铁庚和叶霖, 1999),但是大多数学者认为是扬子板块的西北缘(赵祥生等, 1990; 张宏

飞等,2007;杨晨,2011;惠博,2021),本文也支持此观点。碧口地块由于其特殊的构造位置,致使其具有长期复杂的构造演化历史(惠博,2021),从晋宁

期形成基础地质体,经过加里东期的板块脱离和印支期及燕山期的构造格局雏形,最终在喜马拉雅时期定型(杨晨,2011)。

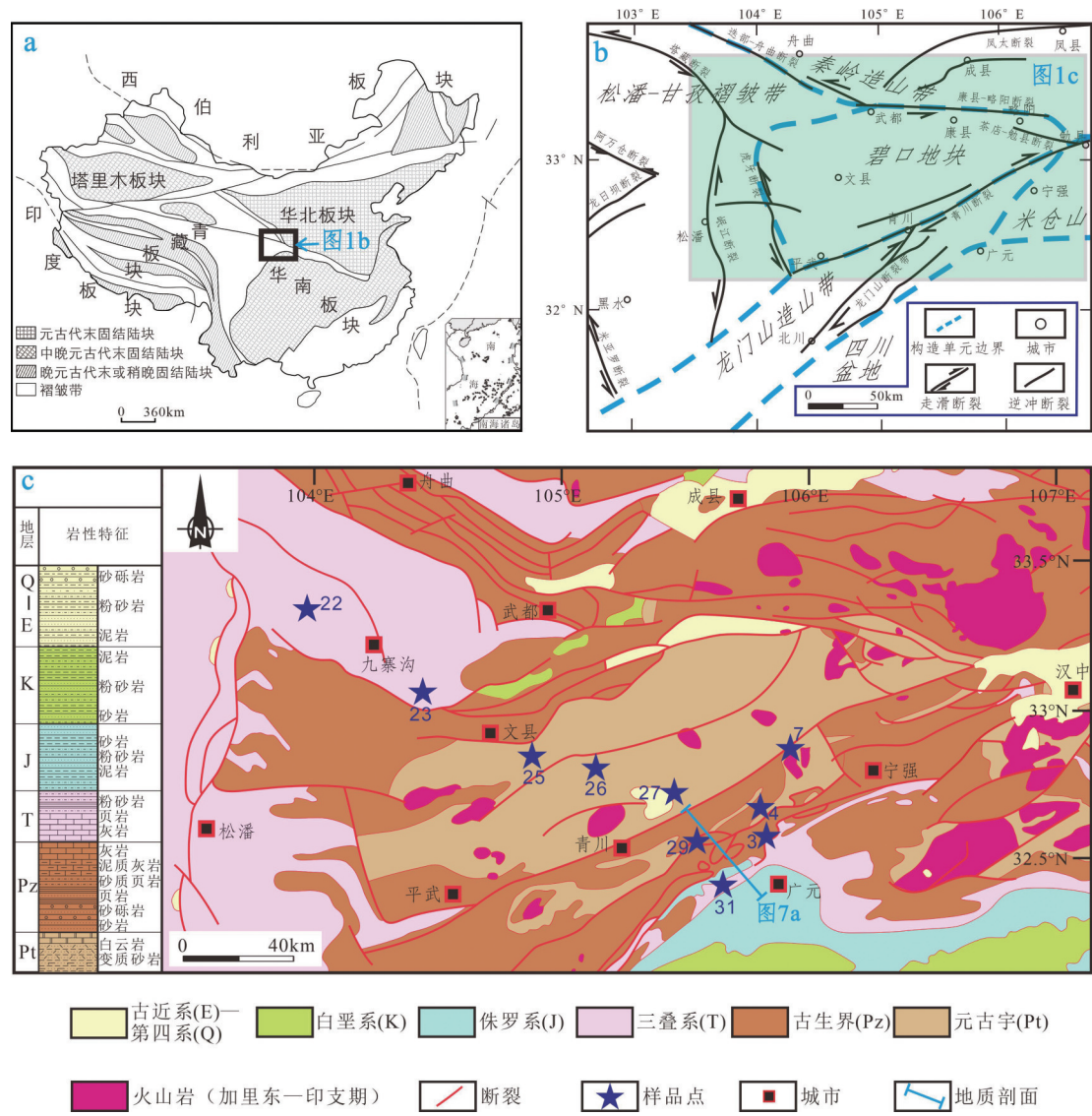


图1 碧口地块的大地构造位置及基础地质特征

Fig. 1 Geotectonic location and basic geological characteristics of the Bikou Block

2 样品采集及分析方法

针对碧口地块及东西两侧区域共取样 10 件 (图1), 多为古生代地层样品, 个别样品为三叠纪和元古代地层, 为方便后期对比分析, 此次样品在平面上尽量呈直线展布, 但由于交通不便等多种因素造成 3、4 和 7 号样品分散展布, 所以在后期分

析对比过程中, 将这三个样品投影在 NW-SE 主方向上。

测试工作在北京安普泰德科技有限公司进行, 岩石样品经过预处理后挑选出磷灰石和锆石单颗粒矿物, 然后分别制作成环氧树脂样片和聚全氟乙丙烯塑料样片, 再研磨和抛光成为光玻片。磷灰石在恒温 25℃ 的 6.6% HNO₃ 溶液中蚀刻 30 秒, 锆石在 220℃ 的 NaOH 与 KOH (1:1) 溶液中蚀刻 30 小时,

此过程用于观测矿物的自发裂变径迹。测试过程采用外探测器法进行(Hurford and Gleadow, 1977),将低铀白云母分别粘贴在磷灰石和锆石光玻片上,与CNS标准铀玻璃(磷灰石和锆石分别为CN_5和CN_2)一起构成定年组件,送至中国原子能科学研究院反应堆(磷灰石和锆石照射批号分别为A1309和Z1309Sun)进行照射,静置后将云母和光玻片分离,将云母外探测器置于25℃、40%的HF溶液中蚀刻35分钟,用于显示诱发裂变径迹。年龄计算采用Zeta标定方法,磷灰石和锆石Zeta常数分别为 386.8 ± 18.1 和 86.2 ± 2.7 ,测试流程与Li M et al. (2015)相同。

3 测试结果

对10个样品分别进行了磷灰石和锆石的裂变径迹长度及年龄测定,得到磷灰石有效结果5个(表1),锆石有效结果9个(表2)。

磷灰石的5个有效年龄分布在45.4~66.9 Ma之间,裂变径迹长度在11.5~12.6 μm 之间(图2),锆石裂变径迹年龄分布在105.9~201.5 Ma之间,裂变径迹年龄值均小于样品所在地层年龄,可以认为所有样品均经历了完全退火过程。所有磷灰石样品的测试结果检验概率 $P(\chi^2)$ 均大于5%,表明单颗粒矿物年龄属于同组年龄,测试年龄采用池年龄(Pooled Age)(罗梦等,2012),但是如果 $P(\chi^2)$ 均小于5%,则表明该年龄不属于同组年龄,意为所测颗粒来源多样,或经历了多期构造热事件,测试年龄采用中值年龄(Central Age)。本次测试中只有26号和31号锆石样品未通过概率 $P(\chi^2)$ 检验。

对概率 $P(\chi^2)$ 检验值低于5%的两个样品进行年龄分解(表3,图3),所采用软件为Binomfit(Brandon, 1996),26号样品的裂变径迹年龄在73.1~143.4 Ma之间,并具有2个明显的裂变径迹年龄值,分别为88.8 Ma(占比49.9%)和127.6 Ma(占比50.1%);31号样品年龄为114.6~216.8 Ma,同样具有两个明显的年龄峰值,分别为136.9 Ma(占比39.9%)和168.8 Ma(占比60.1%)。对于这两个样品的双峰年龄现象,本文认为26号样品分别在88.8 Ma和127.6 Ma经历了两次冷却抬升(热事件),而

31号样分别在136.9 Ma和168.8 Ma经历了两次冷却事件。

4 热史模拟

4.1 模拟条件

通过软件Hefty(版本1.5.6)对研究区4个磷灰石样品(4号、7号、25号、31号)进行热史模拟,模拟所需参数主要有磷灰石裂变径迹长度、磷灰石裂变径迹数量及密度(包括自发裂变和诱发裂变)、Dpar值,以及研究区锆石样品最小年龄值(105.9 Ma)和退火温度(250摄氏度)作为温度下限约束条件,地温梯度设为30℃/km,地表温度20℃,退火模型选择Laslett et al. (1987)模型,数据拟合采用Monte Carlo法,初始径迹长度定为16.3 μm ,尝试次数10000次。模拟过程结果有分别针对于年龄和径迹长度的GOF检验,该检验值表示模拟值与实测值的吻合程度(Ketcham, 2005),当这两个检验值都大于5%,所模拟的结果才是可以接受的,当检测结果大于50%时候,认为模拟结果是高质量的(Ketcham, 2005; 沈传波等, 2009; 林锦荣等, 2019; 张昭杰, 2019)。

4.2 模拟结果

对4个磷灰石样品进行热史模拟的结果表明,研究区自中侏罗世以来阶段性隆升特征明显(图4),具体表现为:

4号样品在100 Ma之前长期处于较高地温阶段,并且基本上未发生明显冷却过程,100~40 Ma期间经历了快速冷却过程,从高于120℃速降至50℃;在40~12 Ma之间为缓慢冷却阶段,地层温度缓慢冷却至45℃;从12 Ma到现今,再次经历快速冷却过程,地层温度从45℃降至现今地表温度(20℃)。

7号样品在155 Ma已经开始发生冷却,该冷却过程一直持续到25 Ma,地温从110℃持续冷却至60℃;在25~15 Ma之间,发生了明显冷却过程,地温冷却至30℃,之后又是较为缓慢的冷却过程,地温降至目前的地表温度20℃。

25号样品在27 Ma之前基本上一直处于冷却过程,温度从最高的130℃降至60℃;在27~22 Ma

表 1 碧口地块磷灰石裂变径迹分析结果
Table 1 Apatite fission track analysis results of the Bikou Block

样品号	经度	纬度	海拔/m	地层	岩性	颗粒数(n)	$\rho_s(10^5/cm^2)$ (Ns)	$\rho_i(10^5/cm^2)$ (Ni)	$\rho_a(10^5/cm^2)$ (Nd)	$P(\chi^2)$ (%)	中值年龄 (Ma) ($\pm 1\sigma$)	池年龄 (Ma) ($\pm 1\sigma$)	长度(μm) (N)	铀含量 ($\times 10^{-6}$)
4	32°40.9964'	105°54.0633'	521	ϵ_{iq}	板岩	5	2.165(53)	7.517(184)	9.754(7380)	40.3	55.5 $\pm$ 9.2	54.1 $\pm$ 8.8	12.0 $\pm$ 1.8(18)	9.87 $\pm$ 0.71
7	32°51.7957'	105°54.4789'	540	Z_{iq}	板岩	14	5.615(154)	17.174(471)	10.642(7380)	98.5	66.9 $\pm$ 7.0	66.9 $\pm$ 7.0	12.1 $\pm$ 2.1(40)	21.19 $\pm$ 0.65
25	32°50.6612'	104°52.7751'	775	Pz	砂岩	32	2.945(218)	18.63(1379)	14.886(7380)	7.7	44.9 $\pm$ 4.8	45.4 $\pm$ 4.0	12.6 $\pm$ 1.8(102)	16.58 $\pm$ 0.83
26	32°48.4751'	105°08.1985'	724	Pt	粉砂岩	14	0.799(41)	5.009(257)	15.182(7380)	42.5	45.7 $\pm$ 8.8	46.7 $\pm$ 8.2	—	4.29 $\pm$ 0.68
31	32°25.2802'	105°38.8289'	489	T_{xx}	砂岩	8	4.487(217)	22.372(1082)	15.972(7380)	11.3	65.5 $\pm$ 7.1	61.7 $\pm$ 5.5	11.5 $\pm$ 2.5(47)	15.972 $\pm$ 0.62

表 2 锆石裂变径迹分析结果
Table 2 Zircon fission track analysis results of the Bikou Block

样品号	经度	纬度	海拔/m	地层	岩性	颗粒数 (n)	$\rho_s(10^5/cm^2)$ (Ns)	$\rho_i(10^5/cm^2)$ (Ni)	$\rho_a(10^5/cm^2)$ (Nd)	$P(\chi^2)$ (%)	中值年龄(Ma) ($\pm 1\sigma$)	池年龄(Ma) ($\pm 1\sigma$)	铀含量 ($\times 10^{-6}$)
3	32°32.5365'	105°50.3851'	510	T_{if}	页岩	13	142.421(1372)	37.474(361)	10.511(8136)	5.0	172.5 $\pm$ 15.1	169.9 $\pm$ 11.5	131.05 $\pm$ 0.39
7	32°51.7957'	105°54.4789'	540	Z_{iq}	板岩	27	104.541(4090)	29.982(1173)	10.793(8136)	6.8	159.3 $\pm$ 8.3	160.2 $\pm$ 7.5	104.84 $\pm$ 0.31
22	33°18.7445'	103°57.5354'	1857	P_1	砂岩	12	146.236(1495)	62.798(642)	13.381(8136)	49.4	133.2 $\pm$ 7.9	132.9 $\pm$ 7.7	170.35 $\pm$ 0.19
23	33°03.6461'	104°26.1163'	1128	P_1	砂岩	10	129.445(1247)	54.498(525)	13.606(8136)	75.1	137.8 $\pm$ 8.5	137.8 $\pm$ 8.5	154.29 $\pm$ 0.26
25	32°50.6612'	104°52.7751'	775	Pz	砂岩	25	63.218(2436)	32.465(1251)	13.494(8136)	100	112.3 $\pm$ 5.4	112.3 $\pm$ 5.4	90.5 $\pm$ 0.18
26	32°48.4751'	105°08.1985'	724	Pt	粉砂岩	25	65.521(3098)	37.266(1762)	14.281(8136)	0.1	105.9 $\pm$ 5.8	107.3 $\pm$ 4.8	105.39 $\pm$ 0.42
27	32°43.3022'	105°27.7226'	974	Pz	砂岩	5	162.352(782)	49.411(238)	14.45(8136)	25.1	201.9 $\pm$ 17.2	201.5 $\pm$ 16.3	123.81 $\pm$ 0.21
29	32°33.7326'	105°32.8235'	715	D_g	粉砂岩	11	140.514(1326)	65.064(614)	14.844(8136)	56.3	137.3 $\pm$ 8.4	136.7 $\pm$ 8.1	156.22 $\pm$ 0.21
31	32°25.2802'	105°38.8289'	489	T_{xx}	砂岩	27	115.146(5716)	45.688(2268)	14.394(8136)	1.4	155.0 $\pm$ 7.2	154.5 $\pm$ 6.4	118.92 $\pm$ 0.31

注:n为测试的颗粒数; ρ_s 为自发径迹密度;Ns为自发径迹数量; ρ_i 为外探测器诱发径迹密度;Ni为外探测器诱发径迹数量; ρ_a 为标准玻璃的诱发径迹数量;Nd为标准玻璃的诱发径迹数量; $P(\chi^2)$ 是在自由度为(Nc-1)时得到的 χ^2 值的概率。

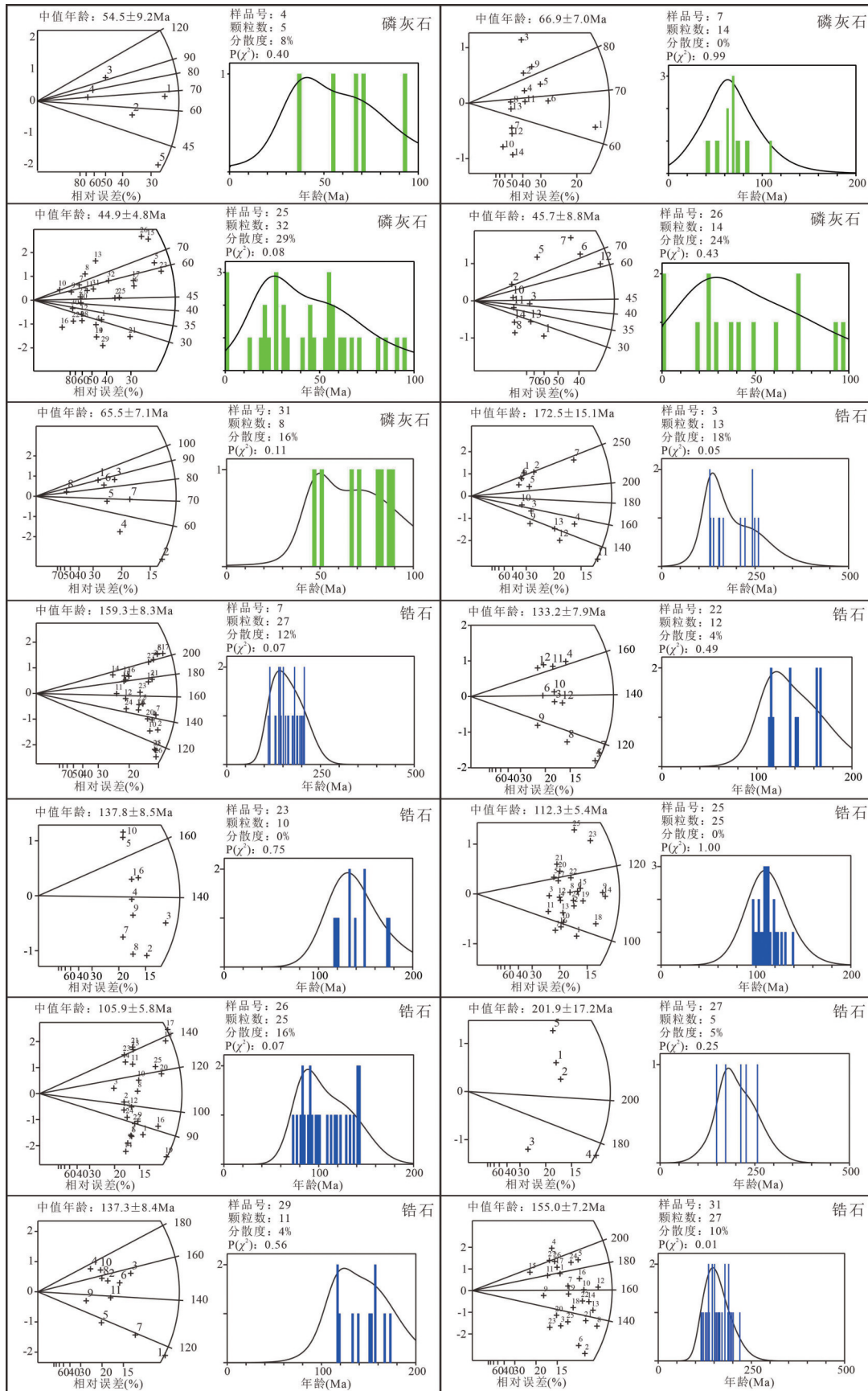


图2 研究区样品的磷灰石及锆石单颗粒年龄放射图和直方图

Fig. 2 Single particle age radiographs and histograms of apatite and zircon in the study area

表3 锆石裂变径迹年龄分解结果
Table 3 Zircon fission track age decomposition results

样品号	颗粒数/个	年龄范围(Ma)	较年轻的峰年龄(Ma)(所占比例)	较老的峰年龄(Ma)(所占比例)
26	25	73.1~143.4	88.8(49.9%)	127.6(50.1%)
31	31	114.6~216.8	136.9(39.9%)	168.8(60.1%)

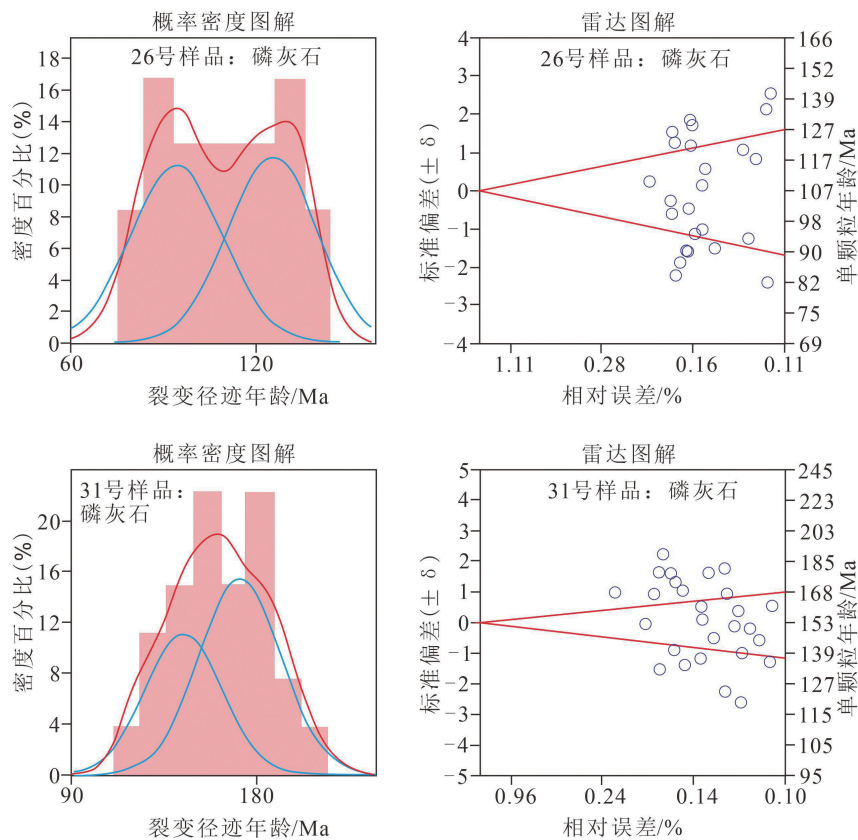


图3 $P(\chi^2) < 5\%$ 部分样品的裂变径迹年龄分解图
Fig. 3 Some zircon fission track age decomposition results

期间,冷却过程加速,由 60℃降至 28℃,之后在 22 Ma 以来这段时间为较为缓慢的冷却过程。

31 号样品在 100 Ma 之前冷却过程不明显,结合前述的该样品裂变径迹年龄分解,推测本样品在中侏罗世期间至少发生了两次较为明显的冷却过程,即 136.9 Ma 和 168.8 Ma;在 100 ~ 85 Ma 发生了一次快速冷却过程,地温从 112℃降至 78℃;在 85~4 Ma 之间进入缓慢冷却过程;在 4 Ma 到现今又表现为急速冷却。

综合分析来看,由于磷灰石裂变径迹年龄均低于 70 Ma,并且磷灰石的退火温度最低为 70℃,所以对热史模拟的阶段划分主要考虑 100 Ma 以来的演化特征,100 Ma 之前的阶段仅做参考分析。总体上这几个样品的热史演化可以划分为三个阶段(图 4),但是每个样品在各阶段的起止时间差异明显。

5 讨论

5.1 裂变径迹年龄与地表海拔的关系

通过裂变径迹年龄与海拔关系图可以看出,磷灰石裂变径迹年龄与海拔高度的变化相关性明显(图 5),拟合后的线性关系为 $y=-0.0605x+91.844$ ($R^2=0.710$),表明随着海拔的增高,磷灰石裂变径

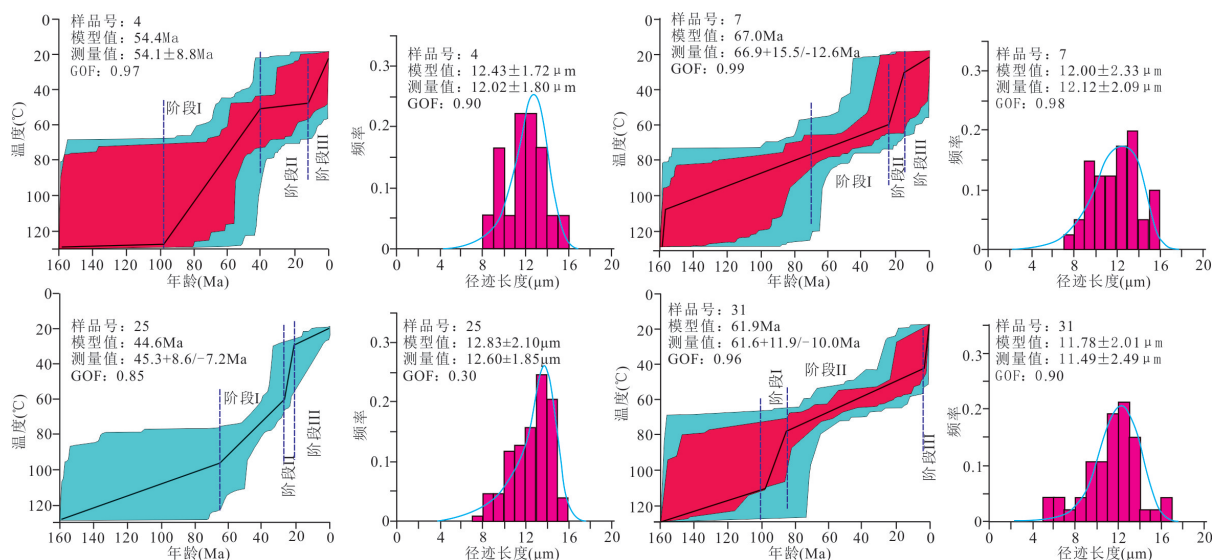


图4 研究区磷灰石裂变径迹热史模拟结果

Fig. 4 Simulation results of apatite fission track thermal history in the study area

热史模拟结果中,红色部分为高质量的模拟路径,蓝色部分为可以接受的模拟路径,黑色折线为最佳的模拟路径。

迹年龄明显减小,即构造隆升时间较晚;锆石裂变径迹年龄随海拔的线性变化关系为 $y=-0.0104x+154.74$ ($R^2=0.023$),虽然二者之间相关性较弱,但是总体上也与磷灰石裂变径迹类似,具有一定负相关。

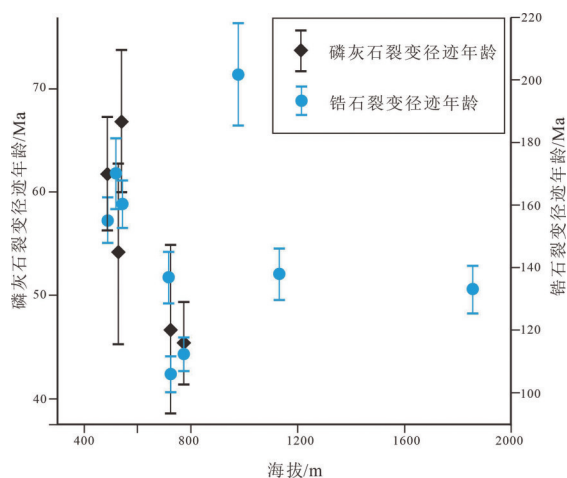


图5 裂变径迹年龄与海拔关系图

Fig. 5 Relationship between fission track age and altitude

5.2 冷却速率和剥蚀速率

本文应用年龄—封闭温度法求取不同样品的冷却速率,该方法主要是利用磷灰石和锆石裂变径迹封闭温度和裂变径迹年龄之间的差值进行计算,

再结合研究区的地温梯度来计算样品的剥蚀速率 (Yuan W M et al., 2011; 袁万明, 2016; 杨莉等, 2021), 所依据公式 (Wagner and Van den haute, 1992; Zeitler et al., 1982) 为:

$$C_r(^{\circ}\text{C}/\text{Myr}) = (T_m - T_{\text{surf}}) / t_m$$

式中 T_m 为样品裂变径迹封闭温度 (磷灰石和锆石裂变径迹封闭温度分别为 100°C 和 250°C), T_{surf} 为地表温度 (研究区地表温度取值 20°C), t_m 为现在出露地表样品的年龄 ($P(\chi^2) > 5\%$ 的样品选择中值年龄, $P(\chi^2) < 5\%$ 的样品选择池年龄)。

对于剥蚀速率的求取,采用冷却速率与地温梯度的比值作为剥蚀速率 (袁万明, 2016), 对于同时具有磷灰石和锆石裂变径迹年龄的样品而言,采取加权平均的方法计算获得单个样品总体的冷却速率和剥蚀速率,计算结果见表4。

5.3 碧口地块隆升及构造—沉积响应特征

5.3.1 构造隆升时间序列

对比分析研究区自北西至南东方向多个磷灰石和锆石裂变径迹年龄,可以发现碧口地块及两侧区域均发生2次以上明显的构造隆升过程 (图6A)。其中碧口地块第一次隆升时限为 $105.9 \sim 201.5 \text{ Ma}$ (即侏罗纪—早白垩世),第二次时限为 $45.4 \sim 66.9 \text{ Ma}$ (即古近纪),总体上碧口地块构造隆升较早,且构造隆升持续时间较长,碧口地块东侧区域 (样品29

表4 样品冷却速率及剥蚀速率数据表

Table 4 Data sheet of sample cooling rate and denudation rate

样品号	地质阶段(Ma)	年龄差值(Myr)	不同地质阶段速率		加权平均速率	
			冷却速率(℃/Myr)	剥蚀速率(mm/y)	冷却速率(℃/Myr)	剥蚀速率(mm/y)
3	169.9~0	169.9	1.38	0.046	1.38	0.046
4	54.1~0	54.1	1.76	0.059	1.76	0.059
7	160.2~66.9	93.3	2.52	0.084	2.06	0.069
	66.9~0	66.9	1.42	0.047		
22	132.9~0	132.9	1.77	0.059	1.77	0.059
23	137.8~0	137.8	1.71	0.057	1.71	0.057
25	112.3~45.4	66.9	3.51	0.117	2.95	0.098
	45.4~0	45.4	2.09	0.070		
26	105.9~46.7	59.2	3.97	0.132	3.11	0.104
	46.7~0	46.7	2.03	0.068		
27	201.5~0	201.5	1.17	0.039	1.17	0.039
29	136.7~0	136.7	1.72	0.057	1.72	0.057
31	155~61.7	152.5	1.54	0.051	1.54	0.051
	61.7~0	61.7	1.54	0.051		

号、4号、3号、31号)和西侧区域(样品22号、23号) 蚀速率较大,平均为0.0775 mm/y,其东西区域隆升 隆升的时间相对较晚且持续时间短(图6A)。此外 速率总体上接近,东侧区域为0.0533 mm/y,西侧地 剥蚀速率对比图表明,碧口地块中生代以来构造剥 区为0.058 mm/y(图6B)。

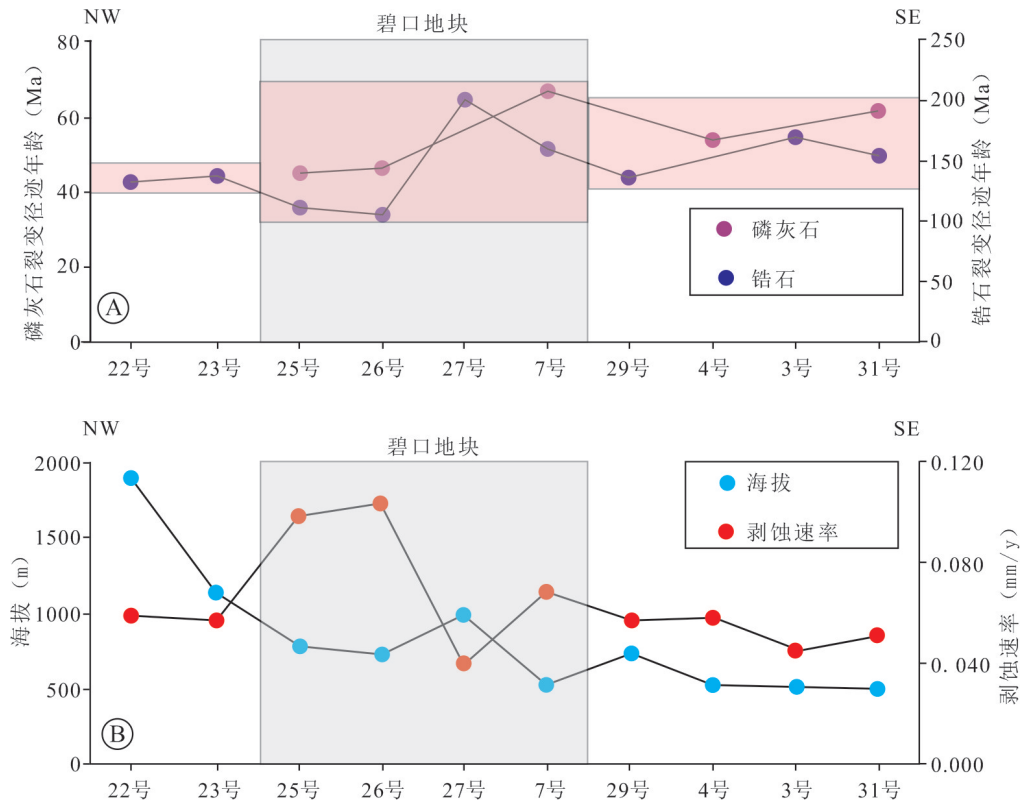


图6 研究区自西向东各样品裂变径迹年龄对比图(A)、海拔与剥蚀速率对比图(图B)

Fig. 6 Comparison diagram of fission track ages of samples from west to East in the study area (A), comparison diagram of altitude and denudation rate (B)

5.3.2 构造—沉积响应特征

如前所述,磷灰石热史模拟结果表明了碧口地块与其东西两侧区域具有较为明显构造隆升差异,位于碧口地块的7号和25号样品构造隆升阶段具有一致性,而位于东侧地区的4号和31号样品具有一定相似性(图4),碧口地块在25Ma之前发生长时间构造隆升(阶段I),持续时间至少为135 Ma,而4号样品和31号样品在100 Ma才开始发生显著构造抬升过程,并且距离碧口地块较近的4号样品具有更长的构造隆升时间(100~40 Ma)(阶段I),冷却速率达到了 $1.167^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$,距离稍远的31号样品此次隆升过程至少持续了15 Ma(阶段I),冷却速率为 $2.267^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$,4号样品和31号样品之后便进入了较为缓慢的构造隆升期,4号样品的缓慢隆升期(阶段II)持续了28 Ma,而31号样品的阶段II却持续了81Ma;碧口地块在27~15 Ma之间发生了急剧构造隆升,两个样品(7号和25号)冷却速率分别为 $3^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ 、 $6.4^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$,同样,距离较近的4号样品随后在12 Ma开始发生急剧隆升直至现今位置,而相对较远的31号样品直到4 Ma才开始发生急剧构造隆升直至现今海拔(图4)。碧口地块内部也存在这样的差异性构造隆升过程,比如位于碧口地块

西侧的25号样品在27~22 Ma进入了快速冷却过程,而位于碧口地块东缘的7号样品点却在25~15 Ma之间发生明显构造隆升过程。综合分析认为,造成该种差异性隆升的主要原因是碧口地块在随青藏高原地块向东南发生构造挤压的过程中,构造应力向东南方向发生构造扩展所致,构造扩展会受到区域内地层岩性及变质作用强弱等多种因素的制约和影响,致使距离碧口地块近的区域受碧口地块运动影响明显且持续时间长,而靠近四川盆地的31号样品受到的影响相对较晚且较小。

结合各样品的海拔、冷却速率和剥蚀速率,本文认为碧口地块在至少长达135 Ma的地质历史中(J-K₁),主要发生垂向构造隆升,具有显著增大的冷却速率和剥蚀速率,致使碧口地块成为四川盆地的陆相沉积物源之一。广元市北部地区发育典型的中侏罗统遂宁组斜层理构造(图7)(田小彬, 2009),其层理面倾角为 64° ,倾向东南,地层为中厚层状,未发生倒转,恢复该地层为水平状态后表明该地区的沉积物源为来自西北方向的龙门山造山带(或碧口地块),陈竹新等(2008)通过层序地层等方法也认为在中侏罗世期间,龙门山北段为四川盆地西北部地区的主要物源。

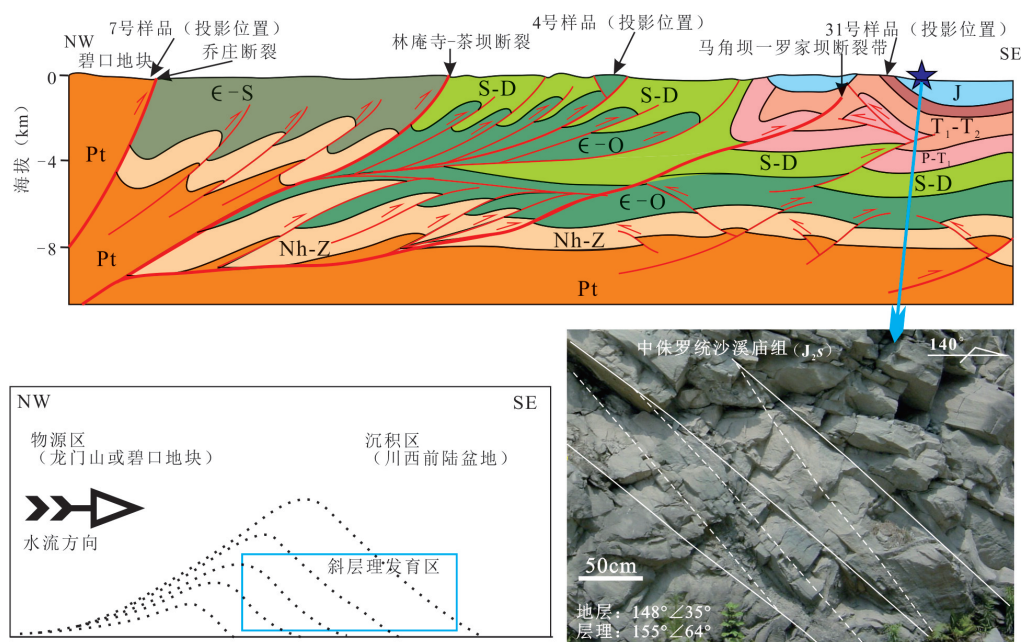


图7 碧口地块东缘深部构造变形(L55测线)及广元市北部沙溪庙组内部斜层理特征

Fig. 7 Deep structural deformation (L55 survey line) in the eastern margin of Bikou Block and the internal oblique bedding characteristics of Shaximiao Formation in the north of Guangyuan City

5.4 构造扩展速率

前已述及,碧口地块的隆升过程对其东西两区域具有明显的控制和影响,本文认为碧口地块热史演化中的阶段Ⅱ与东侧地区热史演化的阶段Ⅲ具有“因果联系”,即构造由西向东扩展的表现形式,故选取热史模拟结果中碧口地块发生显著构造隆升的阶段Ⅱ作为“起因构造事件”,分别读取4号样

品和31号样品发生显著构造隆升的阶段Ⅲ作为“结果构造事件”,将4个样品在NW-SE剖面上进行投影,并估算在27 Ma时投影后4个样品的水平距离,其中考虑到喜马拉雅构造运动在研究区内的构造作用(范增辉等,2018),综合选择10.5%作为新生代以来的构造缩短率(林茂炳和吴山,1991;陈竹新等,2005),最终计算结果见表5。

表5 碧口地块及东侧区域构造扩展速率估算表
Table 5 Estimation of tectonic expansion rate of the Bikou Block and its east side

构造位置	碧口地块		东侧区域
样品分布区域	25号样品	7号样品	4号样品
	与7号样品	与4号样品	与31号样品
新生代沿NW-SE方向投影距离(km)	40	22.35	11.17
构造扩展起止时间(用时)(Ma)	27~2(2)	25~12(13)	12~4(8)
构造扩展速率(km/Ma)	20	1.72	1.40

计算结果表明在新生代以来(尤其从新近纪以来)构造扩展速率由西至东递减显著,碧口地块由于其本身岩性及变质程度的均一性而作为统一构造变形单元向东南方向挤压,其内部构造扩展速率约为20 km/Ma,但是在东侧地区的构造扩展相对迟缓很多,仅为1.72 km/Ma,这主要是因为7号样品与4号样品之间区域的地层以下古生界为主(图7),并且发育了大量逆冲断裂和褶皱,形成多种相关构造变形样式,如叠瓦冲断带、双重构造等,这些构造很大程度上吸收了构造应力并且减小了构造变形结果,变形强度由西至东逐渐减弱,在4号样品和31号样品之间的构造扩展速率更低,仅为1.40 km/Ma,构造变形样式已经由逆冲断裂带转变为断层相关褶皱(图7),这几个不同地区的构造扩展速率与邓宾等(2019)通过获得了青藏高原东缘扩展速率(5~10 mm/a)具有较好的一致性。在接近四川盆地(即斜层理发育地区),构造变形已经主要为单斜构造,来自碧口地块的构造扩展效应至此已经十分缓慢并向盆地内逐渐衰减直至减弱为零。

6 结论

(1)碧口地块及其东西两侧地层的磷灰石和锆

石裂变径迹年龄分别分布在45.4~66.9 Ma之间和105.9~201.5 Ma之间,且裂变径迹年龄值均小于样品所在地层年龄,对概率 $P(\chi^2)$ 检验值低于5%的两个样品进行年龄分解,各得到两个裂变径迹年龄峰值,即88.8 Ma和127.6 Ma,以及136.9 Ma和168.8 Ma,指示了该样品各自经历了两次构造隆升冷却事件。

(2)样品热史演化总体可划分为三个阶段,碧口地块构造隆升具一致性,而其东侧地区具有一定相似性,且相对于碧口地块明显滞后;碧口地块在27~15 Ma之间急剧隆升,而东侧区域随后在12 Ma和4 Ma开始发生急剧构造隆升直至现今海拔,构造隆升的差异性致使碧口地块至少在中侏罗世开始变成为四川盆地的陆相沉积物源区之一。

(3)差异性构造隆升的主要原因是碧口地块在随青藏高原地块向东南发生构造挤压的过程中构造应力向东南方向传递发生构造扩展所致,构造扩展速率由西至东递减显著,在碧口地块内部的速率大约是东侧区域的12倍,构造扩展速率受到地层岩性及构造变形样式等多种因素影响,构造扩展至四川盆地边缘逐渐减弱并在盆地内消失。

在此特别感谢中国地质大学(北京)科学研究院袁万明教授在样品测试过程中所提供的帮助,也

要感谢中国地质科学院地质研究所同位素热年代学实验室喻顺副研究员在裂变径迹年龄分析方面所给出的建议。

参考文献:

- 陈洪德,徐胜林,林良彪,侯明才,陈安清.2011.龙门山造山带晚三叠世构造隆升的分段性及层序充填响应[J].沉积学报,29(4):622-630.
- 陈竹新,贾东,张愷,魏国齐,李本亮,魏东涛,沈扬.2005.龙门山前陆褶皱冲断带的平衡剖面分析[J].地质学报,79(1):38-45.
- 陈竹新,贾东,魏国齐,李本亮,雷永良.2008.川西前陆盆地中—新生代沉积迁移与构造转换[J].中国地质,35(3):472-481.
- 邓宾,何宇,黄家强,杨荣军,周政,赖冬,罗强,郑文鑫,李智武,刘树根.2019.龙门山褶皱冲断带扩展生长过程—基于低温热年代学模型证据[J].地质学报,93(7):1588-1600.
- 邓宾,何宇,黄家强,罗强,杨荣军,于豪,张静,刘树根.2021.前陆盆地形成与演化砂箱物理模拟启示—以四川盆地西部龙门山为例[J].石油与天然气地质,42(2):401-415.
- 丁汝鑫,周祖翼,王玮.2007.利用低温热年代学数据计算造山带剥露速率[J].地球科学进展,22(5):447-455.
- 段其发,曹亮,周云,吴年文,邹先武,方喜林.2022.扬子陆块南部新元古代煌斑岩锆石U-Pb年龄及构造背景[J].华南地质,38(4):583-595.
- 范增辉,刘树根,范存辉,胡林辉,李文佳,米鸿,韩翀,韩小俊.2018.龙门山褶皱冲断带典型地震剖面平衡剖面恢复及构造演化分析[J].地质论评,64(2):347-360.
- 郝识杰,黄周传,王良书,徐鸣洁,米宁,于大勇.2020.青藏高原东北缘瑞利面波成像:射线理论与程函方程结果的比较[J].高校地质学报,26(6):712-720.
- 惠博.2021.扬子西北缘碧口地块新元古代构造演化[D].西北大学博士学位论文.
- 金文正,汤良杰,杨克明,万桂梅,吕志洲,余一欣.2007.川西龙门山褶皱冲断带分带性变形特征[J].地质学报,81(8):1072-1080.
- 李朝鹏.2021.青藏高原东北缘新生代扩展过程[D].中国地震局地质研究所博士学位论文.
- 李贞,郭飏,刘启元,陈九辉,李顺成,齐少华.2019.青藏高原东北缘上地幔多尺度层析成像[J].地球物理学报,62(4):1244-1255.
- 林锦荣,胡志华,陶意,王勇剑,王峰.2019.相山矿田邹家山铀矿床成矿热事件的锆石裂变径迹年龄响应[J].铀矿地质,35(4):193-198.
- 林茂炳,吴山.1991.龙门山推覆构造变形特征[J].成都地质学院学报,18(1):46-54.
- 刘康,王伟涛,赵旭东,庞建章,俞晶星.2020.青藏高原东北缘柴达木盆地红沟剖面物源分析及其构造意义[J].地质学报,94(3):716-740.
- 刘铁庚,叶霖.1999.碧口群形成的地质构造环境探讨[J].矿物学报,19(4):446-452.
- 骆金诚,赖绍聪,秦江锋,胡瑞忠.2011.扬子板块西北缘碧口地块南一里花岗岩成因研究[J].地球学报,32(5):559-569.
- 罗梦,朱文斌,郑碧海,朱晓青.2012.库车盆地中新世构造演化磷灰石裂变径迹证据[J].地球科学,37(5):893-902.
- 罗强,何宇,黄家强,张静,梁霄,于豪,杨荣军,邓宾.2020.川西北前陆扩展砂箱物理模拟及其深层晚期扩展变形特征[J].石油实验地质,42(6):1031-1040.
- 宁蒙.2015.青藏高原东北缘碧口地块逆冲推覆构造结构与运动学研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 潘正洋,周云,赵国强.2020.基于弹性薄片格林函数的GPS应变求解方法对青藏高原东北缘三维构造变形特征的研究[J].大地测量与地球动力学,40(4):351-356.
- 邱啸飞,陈伟雄,徐大良,赵小明,童喜润.2022.扬子陆核崆岭杂岩太古宙地壳演化[J].华南地质,38(1):56-66.
- 沈传波,梅廉夫,刘昭茜,徐思煌.2009.黄陵隆起中-新生代隆升作用的裂变径迹证据[J].矿物岩石,29(2):54-60.
- 史克旭,张瑞青,肖勇.2020.利用虚拟地震测深法约束青藏高原东北缘及周边地区地壳厚度[J].地球物理学报,63(12):4369-4381.
- 田小彬.2009.龙门山北段构造特征及油气前景探讨[D].成都理工大学硕士学位论文.
- 许晨光.2016.扬子板块北缘碧口地块蓝片岩变质条件及年代学约束[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 许志琴,李海兵,杨经绥.2006.造山的高原—青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型[J].地学前缘,13(4):1-17.
- 许志琴,杨经绥,侯增谦,张泽明,曾令森,李海兵,张建新,李忠海,马绪宣.2016.青藏高原大陆动力学研究若干进展[J].中国地质,43(1):1-42.
- 杨晨.2011.碧口地块构造演化[D].西北大学硕士学位论文.
- 杨莉,袁万明,朱传宝,洪树炯,李世昱,冯子睿,张爱奎.2021.东昆仑中生代隆升剥露历史[J].岩石学报,37(12):3781-3796.
- 袁士松,阎凤增,齐金忠,葛良胜,郭晓东,喻万强,杨玉霞,余金元,吴春俊.2013.碧口地块北缘花岗岩脉地球化学特

- 征、成因机制及与金成矿关系探讨[J].矿物岩石, 33(4): 29-41.
- 袁万明. 2016. 矿床保存变化研究的热年代学技术方法[J]. 岩石学报, 32(8): 2571-2578.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 11(3): 23-32.
- 张宏飞, 肖 龙, 张 利, 袁洪林, 靳兰兰. 2007. 扬子陆块西北缘碧口块体印支期花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成: 限制岩石成因及其动力学背景[J]. 中国科学(D 辑), 37(4): 460-470.
- 张怀惠, 张志诚, 李建锋, 唐建洲. 2021. 青藏高原东北缘中生代构造演化: 来自磷灰石和锆石裂变径迹的证据[J]. 地球物理学报, 64(6): 2017-2034.
- 张昭杰. 2019. 磷灰石裂变径迹退火过程反演方法分析[D]. 西北大学硕士学位论文.
- 赵祥生, 马少龙, 邹湘华, 修泽雷. 1990. 秦巴地区碧口群时代层序, 火山作用及含矿性研究[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊第 29 号, 1-144.
- Brandon M T. 1996. Probability density plot for fission-track grain-age samples [J]. Radiation Measurements, 26: 663-676.
- Fan L G, Meng Q R, Wu G L, Wei H H, Du Z M, Wang E. 2019. Paleogene crustal extension in the eastern segment of the NE Tibetan plateau [J]. Earth and Planetary Science Letters, 514: 62-74.
- Hurford A J, Gleadow A J W. 1977. Calibration of fission track dating parameters[J]. Nuclear Track Detection, 1: 41-48.
- Ketcham R A. 2005. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data [J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 58: 275-314.
- Laslett G M, Green P F, Duddy I R, Gleadow A J W. 1987. Thermal annealing of fission tracks in apatite; 2: a quantitative analysis [J]. Chemical Geology (Isotope Geoscience Section), 65: 1-13.
- Li M, Tang L J, Yuan W M. 2015. Middle Miocene–Pliocene activities of the North Altyn fault system: evidence from apatite fission track data [J]. Arabian Journal Of Geosciences, 8: 9043-9054.
- Liu Z, Tian X B, Gao R, Wang G C, Wu Z B, Zhou B B, Tan P, Nie S T, Yu G P, Zhu G H. 2017. New images of the crustal structure beneath eastern Tibet from a high-density seismic array [J]. Earth and Planetary Science Letters, 480: 33-41.
- Wagner G A, Van den haute P. 1992. Fission-Track Dating [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher.
- Wang X, Chen L, Ai Y S, Xu T, Jiang M M, Ling Y, Gao Y F. 2018. Crustal structure and deformation beneath eastern and northeastern Tibet revealed by P-wave receiver functions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 497: 69-79.
- Yuan W M, Yang Z Q, Zhang Z C, Deng J. 2011. The uplifting and denudation of main Huangshan Mountains, Anhui Province, China [J]. Science China (Earth Sciences), 54(8): 1168-1176.
- Zeitler P K, Tahirkheli R A K, Naeser C W, Johnson N M. 1982. Unroofing history of a suture zone in the Himalaya of Pakistan by means of fission-track annealing ages [J]. Earth and Planetary Science Letters, 57: 227-240.