

doi:10.12029/gc20220306001

龙门山冲断带中—新生代隆升及扩展的热年代学证据

金文正^{1,2}, 白万奎³, 叶治续⁴

(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. 中国石油天然气股份有限公司冀东油田分公司, 河北唐山 063200)

摘要:【研究目的】为探讨龙门山冲断带中—新生代垂向构造隆升与横向构造扩展之间的关系, 本文开展了低温热年代学测试及分析工作。【研究方法】通过磷灰石和锆石裂变径迹测定及结果分析, 剖析构造变形演化特征。【研究结果】磷灰石裂变径迹长度介于 $11.4\pm 2.6\sim 12.2\pm 2.2\mu\text{m}$, 有效反映本地构造隆升史; 热史模拟结果表明本地区样品经历了“构造快速隆升期—构造稳定期—构造快速隆升期”三个阶段, 且构造隆升具有北早南晚的特征; 研究区内各岩石样品冷却速率介于 $1.211\sim 6.053^\circ\text{C}/\text{Myr}$, 自南东向北西构造隆升速率逐渐增加, 构造隆升时间逐渐变晚。【结论】龙门山冲断带在中—新生代(150 Ma)以来表现出后展式扩展, 此后分别在晚白垩世—始新世(70~50Ma)和渐新世以来(尤其约 20Ma), 又再次表现为后展式特征, 龙门山冲断带中西部地区具有多期构造隆升叠加的特征。

关键词: 构造隆升; 构造扩展; 裂变径迹; 热年代学; 中—新生代; 地质调查工程; 龙门山

创新点: 通过磷灰石和锆石裂变径迹年代学测试, 探讨了龙门山冲断带垂向构造隆升速率及横向构造扩展方式, 建立了构造变形时序并揭示出造山带的垂向构造隆升与横向构造扩展密切相关。

Thermochronology of Meso-Cenozoic uplift and tectonic growth of the Longmenshan Thrust Belt

JIN Wenzheng^{1,2}, BAI Wankui³, YE Zhixu⁴

(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. Jidong Oilfield Branch Company, PetroChina, Tangshan 063200, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] In order to discuss the relationship between the vertical tectonic uplift and the lateral tectonic expansion happened in Meso-Cenozoic in the Longmenshan thrust belt, this paper carries out low-temperature thermal chronology testing and analysis. **[Methods]** Through the determination and analysis of apatite and zircon fission track age, the characteristics of tectonic evolution are studied. **[Results]** The study shows that the lengths of apatite fission tracks are within the range of $11.4\pm 2.6\sim 12.2\pm 2.2\mu\text{m}$, which can effectively reflect the local tectonic uplift history; the results of thermal history simulation show that the apatite samples have experienced three critical stages, including the rapid tectonic uplift, the stable tectonic stage and the rapid tectonic uplift. Besides, the uplifting events happened in the northern area were earlier than those in the southern area. The cooling rate of each rock sample is within the range of $1.211\sim 6.053^\circ\text{C}/\text{Myr}$. The tectonic uplift rate gradually increases from southeast to northwest, and the time of uplifting gradually becomes late in the same direction. **[Conclusions]** The tectonic deformation of Longmenshan thrust belt has had the characteristics of piggyback propagation from northwest to

基金项目: 国家自然科学基金项目“龙门山冲断带构造分段变形机制研究”(41002072)和油气资源与探测国家重点实验室开放课题基金“川北碧口地块中生代以来构造隆升的热年代学研究”(PRP/open-1307)联合资助。

作者简介: 金文正, 男, 1978年生, 博士, 讲师, 主要从事油气地质和含油气盆地分析专业方向研究工作; E-mail: jwz@cugb.edu.cn。

southeast since Meso-Cenozoic (150Ma), and it has showed these characteristics again from late Cretaceous to Eocene (70~50Ma), even Oligocene (about 20Ma). The central and western regions of the Longmenshan thrust belt are characterized by multi-stage tectonic uplift and superposition.

Key words: tectonic uplift; tectonic extension; fission track; thermochronology; Meso-Cenozoic; geological survey engineering; Longmenshan

Highlights: Through the determination and analysis of apatite and zircon fission track age, we discuss the characteristics of vertical uplift and lateral expansion of Longmenshan thrust belt, and establish the tectonic deformation sequence, which indicates that the vertical tectonic uplift of the orogenic belt is closely related to the lateral tectonic expansion.

About the first author: JIN Wenzheng, male, born in 1978, doctor, lecturer, mainly engaged in research of petroleum geology and basin analysis; E-mail: jwz@cugb.edu.cn.

Fund support: Supported by the project of National Natural Science Foundation of China “Study on the Mechanism of Structural Segmental Deformation in Longmenshan Thrust Belt” (No.41002072) and Open Fund of the State Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration “Thermochronological study on tectonic uplift of Bikou block since Mesozoic in northern Sichuan”(No.PRP/open-1307).

1 引言

通过中、低温热年代学测试与分析技术来探讨造山带的构造隆升是近些年来地质学领域的重要研究方向之一 (Yuan et al., 2011; 袁万明, 2016; 杨莉等, 2021; Wang et al., 2021), 由于磷灰石和锆石裂变径迹长度与地温的响应关系清晰明显, 所以众多学者已利用该方法对龙门山冲断带进行了卓有成效的研究: 比如在构造隆升时间方面, 青藏高原东缘龙门山地区多封闭系统低温年代学年龄总体上具有逐渐由 SE 向 NW 减小趋势, 且走向上由 NE 向 SW 也具微弱减小趋势 (邓宾等, 2009, 2019; 田云涛等, 2011; Wang et al., 2012), 其中龙门山北段、中段和南段具有依次降低的磷灰石裂变径迹年龄 (Jia et al., 2020), ; 在地层冷却速率方面, 晚新生代以来南部地区 (宝兴杂岩) 高于中北部地区 (彭灌杂岩) (谭锡斌等, 2013); 在垂向多期次隆升方面, 刘树根等 (2019) 通过红参 1 井样品进行了多重低温热年代学, 揭示了若尔盖地块分别在白垩纪中期经历了 2 次快速的冷却事件并已进入高原演化阶段。也有学者认为青藏高原东南缘在新生代期间至少发生了 6 次快速剥露事件 (刘方斌, 2021), 并且垂向上的构造隆升与横向上的构造扩展在造山带形成演化过程中有机统一, 存在“准同步性” (谭锡斌等, 2015; 李煜航, 2018; 陶亚玲等, 2020), 对此, 有学者通过低温热年代学确定了四川盆地锦屏山在渐新世和中中新世的两期快速隆升剥露过程比腹地断裂晚近 15~10 Myr, 揭示了高原东边界向外横向扩展的过程 (陶亚玲, 2021)。此外, 已有研究表明, 龙门山的构造扩展方式不仅有前展式, 并且也具有后展式, 关于构造扩展方式的研究多通过区域地质调查和地球物理勘探解释及平衡剖面等方法 (陈竹新等, 2005; 范增辉等, 2018), 而通过热年代学测试与分析技术来精细分析构造扩展方式的研究较为薄弱, 基于此点, 本文通过磷灰石和锆石裂变径迹测试分析手段, 将垂向构造运动与横向构造扩展相结合, 探讨龙门山冲断带自中新生代以来构造隆升与构造扩展的相互关系。

2 区域地质概况

龙门山冲断带位于四川盆地西缘, 为上扬子地块与松潘甘孜地块碰撞衔接带 (赵静等, 2018; Tang et al., 2020; 孙立静等, 2021), 位于冲断带南端的鲜水河断裂带为一条大型的左行走滑断裂 (Su et al., 2016; 颜丹平等, 2020), 在龙门山冲断带内部主要发育 4 条大型

北西倾向的逆冲断裂带，断裂带将龙门山冲断带划分为多个构造带，使得研究区在平面上具有分带性特征，总体上在东南方向冲断带与川西前陆盆地相接，海拔相对较低（图 1），从东南方向至北西方向，构造变形强度逐渐增大、构造样式逐渐复杂，并且海拔也随之明显升高，其形成机制为先形成于太平洋和特提斯两大构造域在中生代的相互碰撞，之后又在新生代由于协调青藏高原的隆升和水平生长，从而形成现今的地质地貌格局（王二七和孟庆仁，2008；Wang, 2017；王二七等，2018），磁组构等分析结果也揭示了龙门山在新生代早期已经形成（Burchfiel et al., 1995；张帅等，2021）。在深部地壳结构方面，龙门山冲断带是在中、下地壳韧性流壳层的主导下，扬子地块基底被动楔入其中，从而形成多层拆离的韧性流变构造组合（颜丹平等，2010），在沉积地层方面，研究区内出露了从震旦纪起至新生界等多套岩层（图 1），其中侏罗系主要分布在龙门山冲断带山前带，呈条带状展布，白垩系及以上地层基本上都分布在侏罗系东侧，三叠系在龙门山冲断带两侧均有发育，古生代及更老地层则主要分布在龙门山冲断带主体部位，多期岩浆侵入体则呈点状大量在研究区内出露，由于研究区构造位置特殊且经历了多期构造活动和沉积环境转变（郭旭升，2010；金文正等，2012；Liu et al., 2013），致使多套地层层序具有相变特征（陈洪德等，2021）、接触变质特征、劈理化特征等，且多处节理和裂缝具有长英质充填现象，这些地质现象是青藏高原东缘隆升和向东扩展的沉积和构造响应，比如在位于龙门山冲断带中南段的大邑砾岩可以反映出青藏高原东缘大规模隆升的时间可能在晚中新世（8~13Ma）（王二七和孟庆仁，2008）。

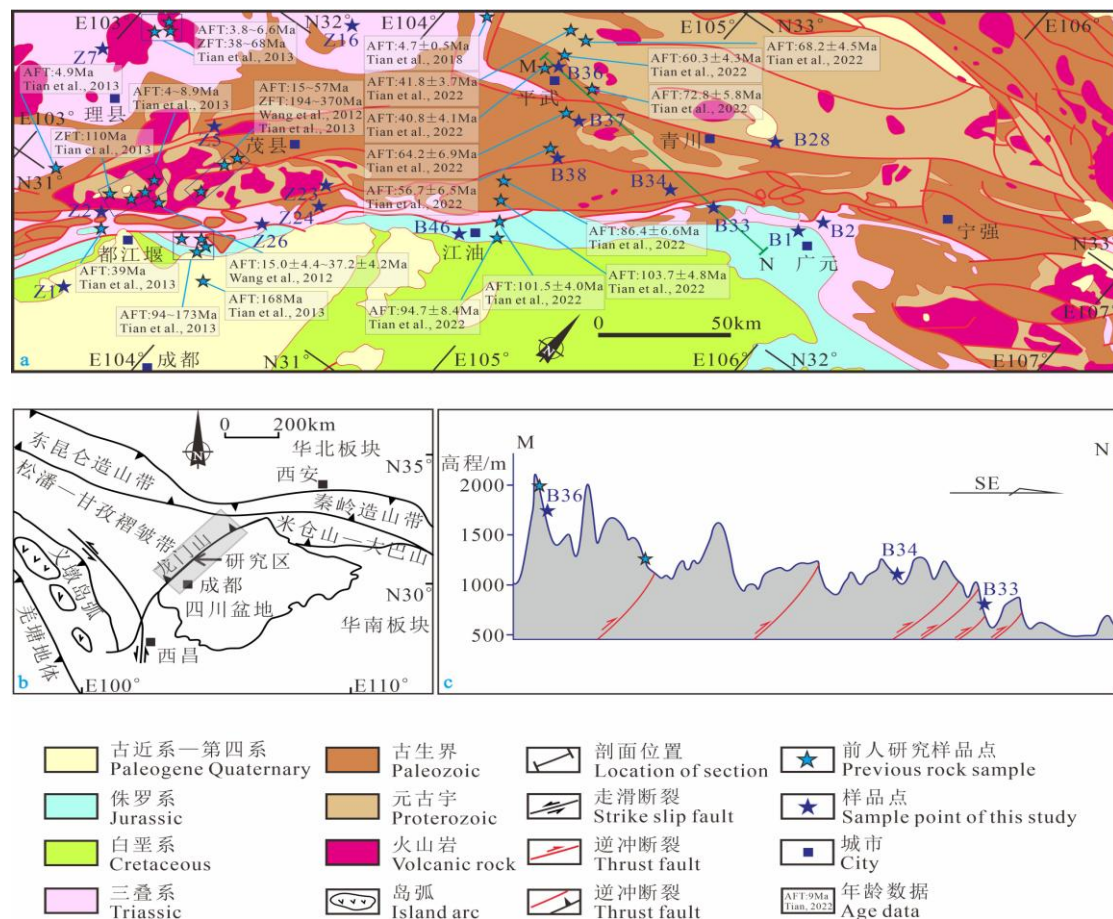


图 1 研究区基础地质及样品分布图

a-研究区地质及样品数据分布图；b-区域构造背景图；c-地形与样品分布

Fig.1 Geological map and sample locations of the study area

a-Geological map and sample locations; b-Regional tectonic background; c- Topography and sample distribution

3 分析方法

本次测试工作在北京安普泰德科技有限公司进行,首先在经过预处理的岩石中挑选出磷灰石和锆石单颗粒矿物,再分别制成环氧树脂样片和聚全氟乙丙烯塑料样片,之后经过研磨和抛光成为光玻片。磷灰石在恒温 25℃的 6.6mol/L 硝酸溶液中蚀刻 30 s, 锆石在 220℃的 NaOH 与 KOH (1:1) 溶液中蚀刻 30 h, 此过程中观测矿物自发裂变径迹。测试过程采用外探测器法定年 (Hurford and Gleadow, 1977), 将低铀白云母分别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 (样品号以 B 为首的样品磷灰石和锆石照射批号分别为 A1309 和 Z1309Sun, 样品号以 Z 为首的样品磷灰石和锆石照射批号分别为 A1405 和 Z1405) 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 min, 用于显示诱发裂变径迹。年龄计算采用 Zeta 标定方法, 样品号以 B 为首的样品磷灰石和锆石 Zeta 常数分别为 386.8±18.1 和 86.2±2.7, 样品号以 Z 为首的样品磷灰石和锆石 Zeta 常数分别为 410.8±17.6 和 96.82±3.56, 测试流程与 Li et al. (2015) 相同。

4 样品分布及测试结果

前人在该区域已经有若干研究工作 (Tian et al., 2013, 2018, 2022; Wang et al., 2012), 结合前人岩石样品在平面上的分布特征, 尽量避免与前人岩石样品的重复获取, 所以本文样品共 17 个, 均匀分布于研究区域 (图 1)。在构造方面, 样品在龙门山冲断带主干断裂带及其两侧均有所分布样品岩性多为砂岩及粉砂岩, 少量为板岩、灰岩及砾岩 (表 1), 样品所属地层的年代跨度较大, 包括震旦系至古近系之间多个不同地质时代的地层, 其中中生代地层样品 9 个, 占比 52.9%, 古生代地层样品 7 个, 占比 41.2%,。

表 1 岩石样品位置、岩性及所属地层

Table 1 Sample locations, lithology and stratum of rock samples

样品号	海拔/m	经度	纬度	岩性	地层
B1	510	E105°50.9674'	N32°28.8581'	砂岩	J
B2	502	E105°51.0681'	N32°30.0785'	砂岩	T ₃
B28	630	E105°28.3507'	N32°40.7565'	砾岩	E
B33	948	E105°26.8822'	N32°20.1112'	砂岩	T ₃
B34	597	E105°16.6763'	N32°17.4941'	砂岩	D ₂
B36	868	E104°31.5042'	N32°25.2379'	砂岩	D ₂
B37	750	E104°44.9799'	N32°18.3751'	砂岩	∈ _{1y}
B38	676	E104°47.9201'	N32°10.2420'	粉砂岩	∈ _{1y}
B46	529	E104°41.3768'	N31°42.0479'	粉砂岩	K _j
Z1	613	E103°32.0622'	N30°41.3491'	粉砂岩	K
Z2	894	E103°28.5814'	N30°59.1777'	砂岩	T _{3x}
Z5	1368	E103°34.2993'	N31°30.0655'	砂岩	S
Z7	2234	E102°58.3640'	N31°30.0724'	灰岩	T _{3zh}
Z16	1858	E103°44.0767'	N32°07.8980'	板岩	S _{mx}
Z23	938	E104°06.5794'	N31°34.0174'	灰岩	Z
Z24	768	E104°08.8564'	N31°29.5380'	砂岩	T ₁
Z26	737	E104°01.2653'	N31°18.4734'	砂岩	J

本次研究分别对 17 个样品进行了两种矿物的裂变径迹年龄测定, 获得了 10 个磷灰石裂变径迹年龄和 17 个锆石裂变径迹年龄, 其中磷灰石裂变径迹年龄均小于岩石地层年龄 (表 2), 并且裂变径迹长度介于 11.4±2.6~12.2±2.2μm 之间, 都小于原始径迹长度 (16.3±0.9μm), 认为其经历了较强的退火过程, 可有效反映本地构造隆升史, 而锆石裂变径迹年龄中, 有 B28、B33 和 B46 的年龄明显大于岩石地层年龄 (表 3), 表明该年龄不属于同组年龄, 推测为所测颗粒来源多样, 可能为经过长距离搬运的远源碎屑颗粒, 所以在下文的年龄及相关分析时, 这三个裂变径迹年龄不作考虑。

对裂变径迹测试结果进行检验概率，即 $P(\chi^2)$ 检验，结果发现 7 个样品年龄检验值小于 5%，即磷灰石年龄 B46、Z24、Z26，锆石年龄 B1、B2、B38、Z7，表明这 7 个样品可能经历了多期构造隆升和沉降，在后文中关于年龄分析时选用中值年龄 (Central Age)，其它年龄检验值均大于 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)。通过 Binomfit 软件 (Brandon, 1996) 对该 7 个样品进行年龄分解，可以发现这 7 个样品均经历了 2 期构造热事件 (即构造沉降过程) (表 4, 图 2)，且分解后的裂变径迹年龄小于样品所属地层年龄，揭示出此次年龄分解结果可以作为参考分析。

表 2 磷灰石裂变径迹分析结果

Table 2 Results of apatite fission track

样品号	颗粒数/n	$\rho_s/(10^5/\text{cm}^2)$ (Ns)	$\rho_i/(10^5/\text{cm}^2)$ (Ni)	$\rho_d/(10^5/\text{cm}^2)$ (Nd)	$P(\chi^2)$ /%	中值年龄 /Ma ($\pm 1\sigma$)	池年龄 /Ma ($\pm 1\sigma$)	铀含量 / 10^{-6}	径迹长度 / $\mu\text{m(N)}$
B2	28	4.229 (673)	11.75 (1870)	9.359 (7380)	45.8	66 \pm 4.7	65 \pm 4.3	14.51	12.2 \pm 2.2(125)
B28	11	0.65 (47)	4.243 (307)	15.379 (7380)	82.8	45 \pm 7.7	45 \pm 7.4	3.87	—
B33	7	3.505 (82)	15.345 (359)	15.774 (7380)	47.9	70 \pm 9.3	69 \pm 9.1	12.48	11.7 \pm 1.6(10)
B38	28	0.647 (29)	9.816 (440)	14.392 (7380)	49.3	19 \pm 3.9	18 \pm 3.6	7.92	—
B46	28	2.89 (433)	12.923 (1936)	13.889 (7380)	0	60 \pm 5.9	60 \pm 4.3	11.11	12.2 \pm 1.9(100)
Z1	27	3.951 (600)	18.463 (2804)	12.077 (5782)	14.7	52 \pm 4	53 \pm 3	20.49	12.1 \pm 1.9(106)
Z2	31	1.266 (158)	18.832 (2351)	12.962 (5782)	98.8	18 \pm 2	18 \pm 2	18.06	12.0 \pm 2.1(53)
Z5	36	0.133 (26)	2.343 (459)	13.552 (5782)	57.1	17 \pm 4	16 \pm 3	2.93	—
Z24	21	4.845 (361)	18.078 (1347)	10.896 (5782)	0.1	50 \pm 6	60 \pm 4	21.75	11.4 \pm 2.6(54)
Z26	29	2.781 (395)	15.798 (2244)	12.667 (5782)	0	41 \pm 5	46 \pm 3	18.06	11.7 \pm 2.4(105)

表 3 锆石裂变径迹分析结果

Table 3 Results of zircon fission track

样品号	颗粒数/n	$\rho_s/(10^5/\text{cm}^2)$ (Ns)	$\rho_i/(10^5/\text{cm}^2)$ (Ni)	$\rho_d/(10^5/\text{cm}^2)$ (Nd)	$P(\chi^2)$ /%	中值年龄/Ma ($\pm 1\sigma$)	池年龄/Ma ($\pm 1\sigma$)	铀含量 / 10^{-6}
B1	22	133.396 (4183)	40.341 (1265)	10.905 (8136)	3.4	154 \pm 8	154 \pm 7	134.27
B2	25	133.022 (6878)	43.361 (2242)	10.68 (8136)	0	142 \pm 9	140 \pm 6	148.66
B28	25	69.847 (3330)	32.763 (1562)	14.619 (8136)	9.3	132 \pm 7	133 \pm 6	84.27
B33	26	108.127 (4783)	22.652 (1002)	13.944 (8136)	7.3	280 \pm 15	281 \pm 14	62.53
B34	24	95.484 (3501)	29.237 (1072)	13.719 (8136)	18.1	191 \pm 10	190 \pm 9	83.99
B36	26	103.047 (3049)	44.578 (1319)	13.268 (8136)	31.2	131 \pm 6	131 \pm 6	128.51
B37	5	124.06 (500)	67.985 (274)	13.099 (8136)	17.2	102 \pm 10	102 \pm 8	350.02
B38	23	133.445 (3122)	50.95 (1192)	12.921 (8136)	0	145 \pm 9	144 \pm 7	145.33
B46	23	108.49 (3402)	45.156 (1416)	14.394 (8136)	24.5	148 \pm 7	147 \pm 7	120.38
Z1	14	137.91 (1559)	58.384 (660)	12.568 (7846)	82.9	142 \pm 9	142 \pm 9	181.53
Z2	27	144.277 (4198)	64.131 (1866)	13.124 (7846)	5.8	142 \pm 7	141 \pm 7	187.72
Z5	7	95.872 (311)	89.399 (290)	14.792 (7846)	36.0	76 \pm 7	76 \pm 7	221.44
Z7	4	52.177 (318)	81.219 (495)	15.348 (7846)	0	38 \pm 18	48 \pm 4	194.97
Z16	3	128.179 (252)	80.875 (159)	12.985 (7846)	46.8	99 \pm 11	99 \pm 11	213.51
Z23	15	178.962 (2199)	83.499 (1026)	14.236 (7846)	47.0	146 \pm 8	146 \pm 8	205.22
Z24	16	156.288 (2581)	64.852 (1071)	14.792 (7846)	48.3	170 \pm 9	170 \pm 9	154.72
Z26	28	152.666 (4262)	64.512 (1801)	15.904 (7846)	8.1	179 \pm 9	180 \pm 9	155.86

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_d 为标准玻璃的诱发径迹密度; 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。

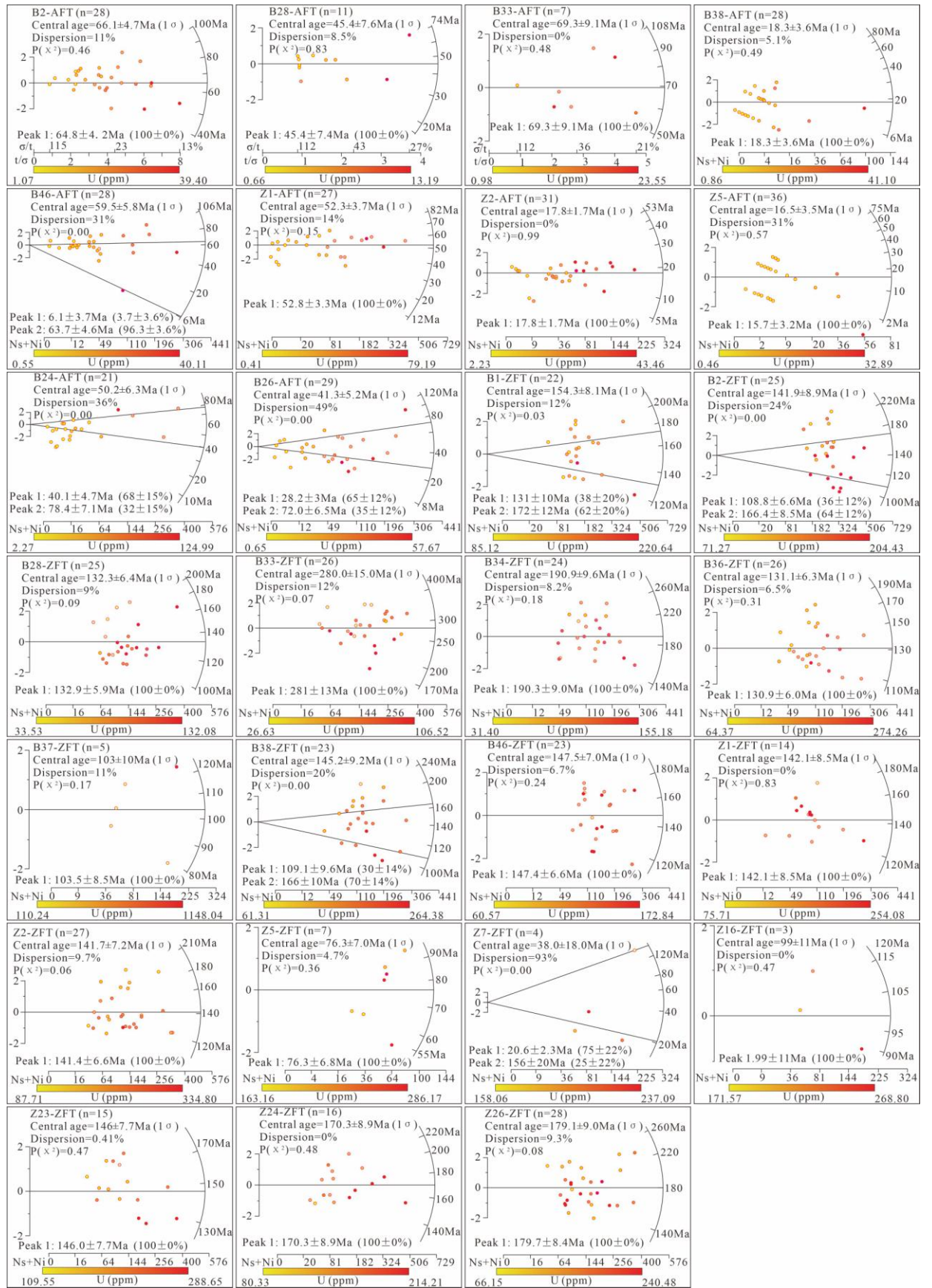


图 2 磷灰石和锆石单颗粒年龄放射图
Fig. 2 Single grain age radiogram of apatite and zircon

表 4 裂变径迹年龄分解结果

Table 4 Decomposed results of fission track age

样品号	年龄类型	较年轻的峰年龄/Ma (所占比例)	较老的峰年龄/Ma (所占比例)
B46	磷灰石	6.1±3.7 (3.7±3.6%)	63.7±4.6 (96.3±3.6%)
Z24	磷灰石	40.1±4.7 (68±15%)	78.4±7.1 (32±15%)
Z26	磷灰石	28.2±3 (65±12%)	72±6.5 (35±12%)
B1	锆石	131±10 (38±20%)	172±12 (62±20%)
B2	锆石	108.8±6.6 (36±12%)	166.4±8.5 (64±12%)
B38	锆石	109.1±9.6 (30±14%)	166±10 (70±14%)
Z7	锆石	20.6±2.3 (75±22%)	156±20 (25±22%)

5 热史模拟

5.1 模拟条件

本次研究中利用 Hefty (版本 1.5.6) 对研究区 5 个磷灰石样品进行了热史模拟 (图 2), 模拟过程中需设置不同参数, 其中主要包括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 值以及磷灰石岩石样品中锆石颗粒最小年龄值和稍大于磷灰石退火温度 (本文取值 120~150°C) 作为温度下限约束条件 (田云涛等, 2009), 地温梯度为 30°C/km, 地表温度 20°C, 退火模型选择 Laslett et al. (1987) 模型, 数据拟合采用 Monte Carlo 法, 初始磷灰石裂变径迹长度为 16.3μm, 每个样品热史计算机模拟次数 10000 次, 模拟之后有关于年龄和径迹长度的 GOF 检验 (Ketcham, 2005), 只有两个值都大于 5%, 模拟结果认为可接受, 为但若检验值大于 50%, 认为模拟结果高质量 (Ketcham, 2005; 沈传波等, 2009; 林锦荣等, 2019; 张昭杰, 2019)。

5.2 模拟结果

模拟结果如图 3 所示, 统计了 5 个样品的磷灰石裂变径迹长度的频率分布特征, 可以发现长度峰值总体上右偏, 表明在模拟的地质时期内, 各磷灰石样品经历较单一的构造隆升过程, 包括构造相对稳定阶段, 所以图 3 中所模拟出的各样品构造事件也都是隆升特征。

结合样品在研究区内平面位置分布 (图 1), 热史模拟结果表明在本区构造隆升过程具有北早南晚、西早东晚的总体特征。

5.2.1 北早南晚构造隆升特征

热史模拟结果表明, 这 5 个样品均经历了“构造快速隆升期—构造稳定期—构造快速隆升期”三个阶段, 对于第一个构造快速隆升期而言: 位于北端的 B2 样品在 149~137Ma 发生显著的构造隆升阶段, 地层温度从 148°C 快速降至 103°C, 此期间冷却速率达到了 3.750°C/Myr; 位于其西南方向的 B33 样品在 150~77Ma 发生明显构造隆升, 冷却速率为 1.068°C/Myr; 再有 B46 样品在 148~103Ma 发生快速隆升, 冷却速率为 1.400°C/Myr, 位于最南端的 Z1 和 Z2 样品分别在 149~100Ma 和 100~46Ma 发生了显著构造抬升, 其冷却速率分别为 1.878°C/Myr 和 1.426°C/Myr。所以自北向南表现出构造隆升的结束时间逐渐变晚, 并且冷却速率也逐渐减小, 即由 B2 样品的 2.923°C/Myr 变为 Z2 样品的 1.370°C/Myr (表 5)。

对于第二个快速构造隆升阶段而言, 同样 B2 样品发生的时间的较早 (即 43Ma), 冷却速率为 1.279°C/Myr, 位于其西南方向各样品构造隆升时间总体上表现为相对较晚, 其中 B33 为 5Ma, B46 为 20Ma, Z1 为 36Ma (表 5)。

5.2.2 东早西晚构造隆升特征

由于 Z1 样品和 Z2 样品平面距离较近, 且其连接线与龙门山冲断带主构造线呈大角度相交, 所以这两个样品的热史模拟结果可以在一定程度上反映出龙门山冲断带东西两侧构造隆升差异特征。位于东侧的 Z1 样品分别在 100Ma 和 36Ma 是三个垂向构造运动阶段的转折点, 而位于西侧 Z2 样品的两个转折点分别为 46Ma 和 7Ma, 本文认为形成这种构造隆升时间上的主要原因, 是在热史模拟的这段地质时期内, 即中晚侏罗世 (150Ma) 以来, 位于龙

门山冲断带的构造变形扩展方式为“后展式”。

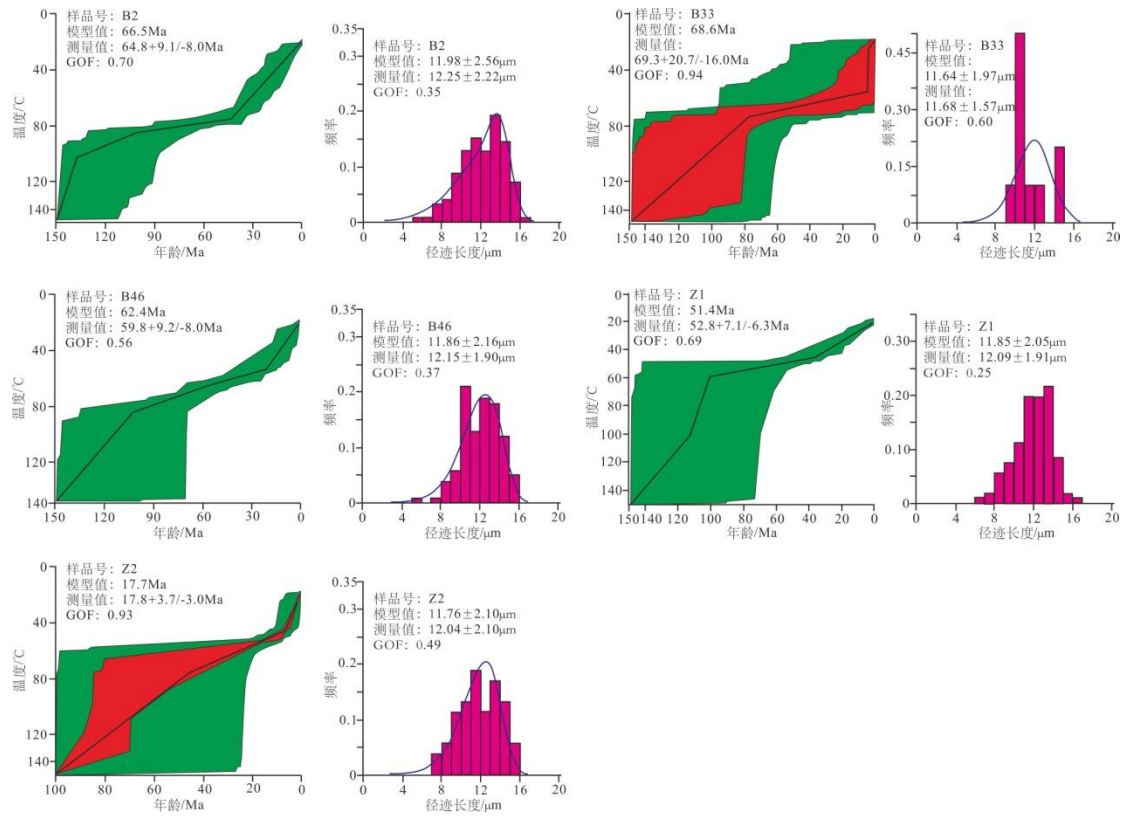


图 3 研究区样品热史模拟图

Fig. 3 Thermal history simulation diagram of samples in the study area

6 讨论

6.1 不同方法获得的冷却速率及其对比

在本文 4.2 部分已经通过热史模拟法分析了个别样品的冷却速率(表 5), 对于其它没有热史模拟的样品, 本文采取了“磷灰石裂变径迹年龄—封闭温度方法”和“锆石裂变径迹年龄—封闭温度方法”。

表 5 通过热史模拟方法获得样品冷却速率参数计算表格

Table 5 Parameters for calculating the sample cooling rate by thermal history simulation

样品号	阶段划分	冷却阶段(Ma~Ma)	温度区间/(°C~°C)	冷却速率/(°C/Myr)
B2	I	149~137	148~103	3.750
	II	137~43	103~75	0.298
	III	43~0	75~20	1.279
B33	I	150~77	150~72	1.068
	II	77~5	72~55	0.236
	III	5~0	55~20	7.000
B46	I	148~103	148~85	1.400
	II	103~20	85~52	0.398
	III	20~0	52~20	1.600
Z1	I	149~100	150~58	1.878
	II	100~36	58~45	0.203
	III	36~0	45~0	1.250
Z2	I	100~46	149~72	1.426
	II	46~7	72~48	0.615
	III	7~0	48~20	4.000

所谓年龄—封闭温度法，即利用锆石（或磷灰石）裂变径迹封闭温度和裂变径迹年龄之间差值进行计算，本文选择锆石裂变径迹年龄进行冷却速率计算，依据公式（Wagner and Van den Haute, 1992; Zeitler et al., 1982）：

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

式中 T_m 为锆石裂变径迹封闭温度 250 $^{\circ}\text{C}$ ，或者磷灰石裂变径迹封闭温度 120 $^{\circ}\text{C}$ ， T_{surf} 为地表温度 20 $^{\circ}\text{C}$ ， t_m 为锆石或者磷灰石裂变径迹年龄。

通过磷灰石裂变径迹年龄—封闭温度方法计算了不同样品的冷却速率（表 6），可以发现冷却速率与热史模拟法所获得的冷却速率基本一致，比如 B2 样品冷却速率为 1.538 $^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ ，而通过热史模拟方法获得冷却速率介于 0.298~3.750 $^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ 之间，B33 样品同样一致，而 B46 样品冷却速率（1.667 $^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ ）稍大于热史模拟计算获得的数据（0.398~1.600 $^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ ），这主要是因为该样品的年龄可以分解为两个年龄，如果取占比 96.3 \pm 3.6% 的年龄值（63.7Ma），则冷却速率为 1.570 $^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$ ，也介于热史模拟的冷却速率区间，虽然 Z1 和 Z2 样品冷却速率的两种计算结果略有差异，但是也都可以对比，在误差范围之内，应该是与最佳热史模拟曲线选择有关。由此可见，通过热史模拟方法与裂变径迹年龄—封闭温度法所计算的冷却速率基本保持一致。

表 6 通过磷灰石裂变径迹年龄—封闭温度方法获得样品冷却速率参数计算表格

Table 6 Parameters for calculating the sample cooling rate by apatite fission track age closure temperature

样品号	年龄差值/Myr/	冷却阶段(Ma~Ma)	冷却速率/($^{\circ}\text{C}/\text{Myr}$)
B2	65	65~0	1.538
B28	45	45~0	2.222
B33	69	69~0	1.449
B38	18	18~0	5.556
B46	60	60~0	1.667
Z1	53	53~0	1.887
Z2	18	18~0	5.556
Z5	16	16~0	6.250
Z24	50	50~0	2.000
Z26	41	41~0	2.439

注：磷灰石退火温度为 120 $^{\circ}\text{C}$ ，现今地表温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 。

之后再通过对比分析同一个样品磷灰石冷却速率和锆石冷却速率是否一致，来判断“锆石裂变径迹年龄—封闭温度方法”是否可以应用于那些仅有锆石裂变径迹年龄的岩石样品来计算冷却速率。故通过上述方法再次计算了所有样品的冷却速率（不包括样品 B28、B38 和 Z7），结果如表 7 所示。对比表 6 与表 7，可以发现，虽然个别样品的两种冷却速率算法结果一致，比如样品 B2 和 Z1，但是其它样品的两种冷却速率数值都表现为由“锆石裂变径迹年龄—封闭温度方法”的结果偏小，个别数值仅为“磷灰石裂变径迹年龄—封闭温度方法”数值的 30% 不到，比如 B38 和 Z2。分析形成这种对比结果，本文认为是两种计算方法的参数，即磷灰石和锆石退火温度不同所致（图 4），同时也反映出本地区在晚侏罗世以来总体表现为构造隆升，而在晚侏罗世之前在主要表现为构造稳定期。

由此可以判断，通过磷灰石单颗粒裂变径迹年龄所模拟的冷却速率更能清晰的反映出不同地质历史阶段的构造隆升特征，该特征与“磷灰石裂变径迹年龄—封闭温度方法”所获得的冷却速率基本一致，但是后者未能有效揭示不同具体的构造事件，而由“锆石裂变径迹年龄—封闭温度方法”所获得的冷却速率为上述两种方法的下限值。

表 7 通过锆石裂变径迹年龄—封闭温度方法获得样品冷却速率参数计算表格

Table 7 Parameters for calculating the sample cooling rate by zircon fission track age closure temperature

样品号	年龄差值/Myr	冷却阶段/(Ma~Ma)	冷却速率/(°C/Myr)
B1	154	154~0	1.494
B2	142	142~0	1.620
B34	190	190~0	1.211
B36	131	131~0	1.756
B37	102	102~0	2.255
B38	145	145~0	1.586
Z1	142	142~0	1.620
Z2	141	141~0	1.631
Z5	76	76~0	3.026
Z7	38	38~0	6.053
Z16	99	99~0	2.323
Z23	146	146~0	1.575
Z24	170	170~0	1.353
Z26	180	180~0	1.278

注：锆石退火温度为 250°C，现今地表温度 20°C。

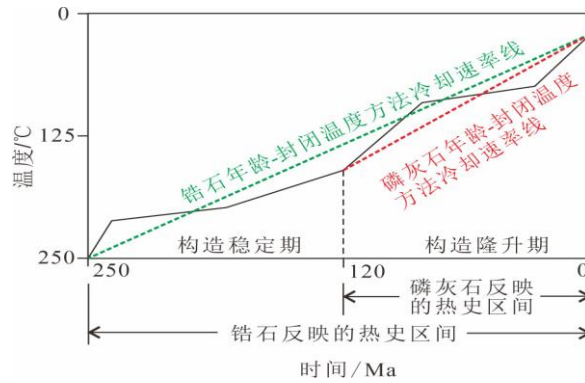


图 4 两种冷却速率计算原理对比图

Fig. 4 Compared diagrams of principles for calculating two kinds of cooling rates

6.2 冷却速率与海拔

从磷灰石和锆石冷却速率与海拔关系对比图可以看出（图 5），整个研究区内岩石样品的冷却速率介于 1.211~6.053°C/Myr，总体上表现为随着海拔升高，磷灰石和锆石冷却速率都具有增大的趋势，由于自东向西海拔总体升高，所以可以认为龙门山冲断带自东南的山前带向北西方向，构造隆升速率逐渐增加。

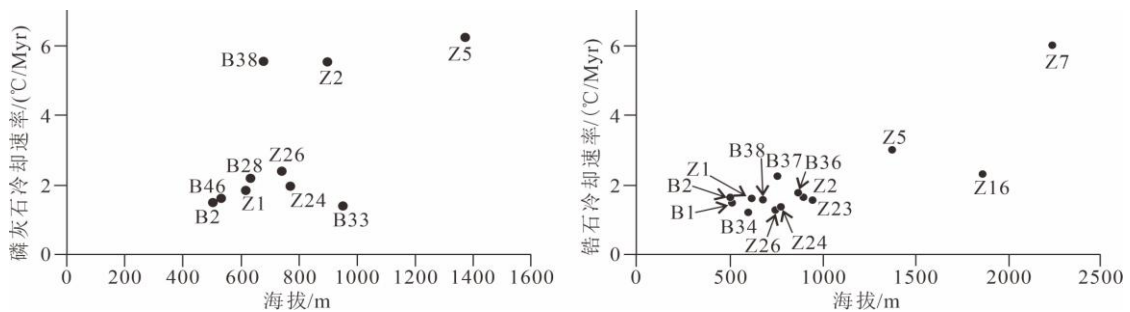


图 5 磷灰石和锆石冷却速率对比图

Fig. 5 Comparison diagrams showing the cooling rates of apatite and zircon

6.3 裂变径迹年龄与海拔

对比分析裂变径迹年龄与海拔的关系（图 6），可以发现，随着海拔增加，磷灰石裂变径迹年龄及锆石裂变径迹年龄都随之降低，再结合海拔在研究区内变化特征（贾秋鹏等，2007），可以认为自东南向北西方向，构造隆升时间逐渐变晚，即龙门山冲断带在中新生代时期的构造变形从北西至南东方向，表现出后展式扩展特征。

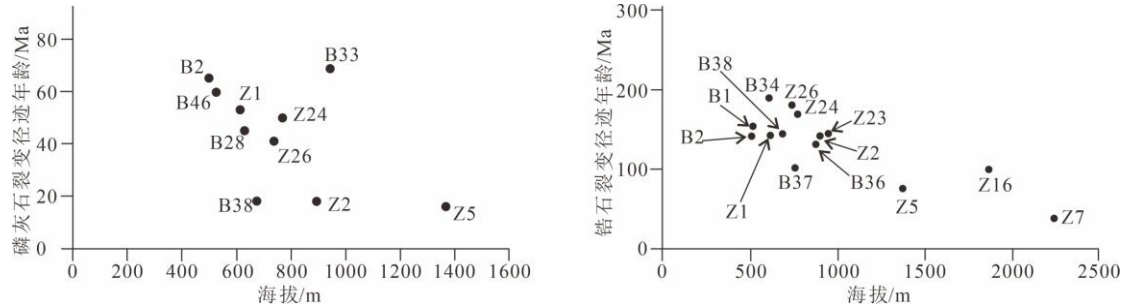


图 6 裂变径迹年龄与海拔关系对比图

Fig. 6 Comparison diagrams showing the correlation between fission track age and altitude

6.4 构造扩展方式的改变及差异构造隆升

综合分析冷却速率随海拔的变化特征、裂变径迹年龄随海拔的变化特征、以及磷灰石热史模拟结果，认为龙门山冲断带在中新生代以来构造变形及扩展过程中，应该经历了多次构造扩展作用，即前展式与后展式作用的交替出现，其中大约 150Ma 为重要分界点，此时期研究区内已经完成了海陆沉积环境的改变（中一晚三叠世为海陆过渡时期），由早期的伸展构造背景转变为了陆内造山环境，目前数据所表现出来的后展式特征较为明显，这可能是由于构造应力在到达东部的扬子地块后，由前展式扩展转变为后展式扩展的时间间隔较短，后期构造对前期构造进行较大程度的改造所致。在中一晚白垩世（70~50Ma），研究区内再次表现为后展式构造变形特征。在渐新世（尤其是中新世，大约 20Ma）以来，研究区内又再次表现为后展式构造特征。按照此应力变化模型，则龙门山冲断带中西部地区则具有多期构造隆升叠加的特征，即经历了前展式扩展和后展式扩展交互的多期隆升，才表现出在中西部地区具有明显增大的构造隆升特征。这种构造扩展方式的转换不仅发生在本研究区，在研究区东部的四川盆地内部同样具有类似构造扩展特征（Jia et al., 2020），其发生扩展方式反转的表现特征与本文具有一定的时空衔接性。

结合前人研究成果，本文认为在早一中侏罗世期间（约 190~154Ma），龙门山北段已经开始发生显著构造隆升，而龙门山中南段则于中一晚侏罗世（约 180~141Ma）发生显著隆升，而后在古近纪（65~45Ma）龙门山北段再次发生显著构造隆升，同样，龙门山中南段随后在古近纪中后期至中新世期间发生显著构造隆升，在南北向发生这种差异隆升的同时，研究区内发生了多次上文所述的构造扩展方式的转换。

6.5 差异性构造隆升的地质证据

6.5.1 大型断裂带对构造活动的影响

龙门山南部紧邻鲜水河断裂带，该断裂带现今表现为左行走滑（孙立静等，2021），并且为青藏高原上构造活动最为剧烈的断裂之一（赵静等，2018；白明坤等，2022），其动力源自始于古近纪的印度板块与欧亚大陆之间的南北向碰撞，形成了大量走滑断裂带（王二七等，2001，2009；唐渊等，2022），并且位于龙门山冲断带南段（芦山地区）的磁组构记录也反映出新生代早期龙门山冲断带南段及川西南盆地受 NW-SE 向的最大主应力控制，该地区新生代晚期及现今应力场与新生代早期一致（张帅等，2021）。在经历了中、新生代的构造变形中，来自青藏高原的物质不断向东流动挤压，也使得龙门山南段的构造活动性明显强

于并早于北段区域 (徐东卓等, 2016), 在南段的宝兴杂岩地区磷灰石裂变径迹年龄为 4.3~8.9Ma (Cook et al., 2013)。相比之下, 龙门山冲断带北段及周缘区域, 比如碧口地块的主要构造隆升期为中生代—新生代早期 (刘鹤等, 2008; 许晨光等, 2018)。

6.5.2 自北东至南西方向地层构成的差异

目前在龙门山冲断带中南段地区地表出露大量三叠系, 而中北段则大面积区域被元古代或者古生代地层所覆盖, 表明三叠纪之后这段漫长的地质历史时期内, 研究区总体表现为陆相环境, 并且长期遭受剥蚀状态, 少有新生代地层沉积, 再结合海拔特征, 可以发现, 龙门山冲断带北段海拔较低但地层相对较老, 而中南段则海拔高且地层相对较新, 可以认为北段隆升时间较早, 但隆升幅度较小, 而中南段, 尤其在靠近鲜水河等断裂带附近, 则隆升较晚, 但是隆升幅度大。

6.5.3 现今地质灾害分布的不均衡

龙门山中南部及其以西地区构造活动持续至今地质灾害频发, 主要包括天然地震和地质滑坡及泥石流等, 反映出新构造运动在龙门山中南部及南部区域的强烈地质表现 (杨志华等, 2022), 这些地质现象与其周缘地质构造背景密切相关, 比如前文中提及的鲜水河断裂带地震活动十分强烈, 并在有记录以来业已发生过几十次大型地震 (孙立静等, 2021)。

6.5.4 现今油气资源分布的不均衡

现今油气勘探结果表明, 位于龙门山冲断带东南缘的川西前陆盆地以及四川盆地内部具有丰富的油气资源, 在其多个油气成藏要素中, 油气的运移和保存受构造影响尤为明显 (洪海涛等, 2020), 主要分布于龙门山中南部及其以西地区地质流体受构造破坏严重, 未发现工业性油气区, 而在北段地区则相对经历了较少的构造隆升过程, 同时也经历了较短距离的构造横向扩展。这些基础地质条件对油气聚集成藏有利, 如在成都以北的前缘凹陷带及周边地区具有大量的烃类富集并形成多个天然气田或者油田 (范赛华等, 2022); 如四川省自然资源厅 2020 年在龙门山北段的广元发现一处达到工业性标准的天然沥青矿 (张君等, 2022)。

7 结论

(1) 磷灰石裂变径迹年龄大部分小于地层年龄, 裂变径迹长度介于 $11.4 \pm 2.6 \sim 12.2 \pm 2.2 \mu\text{m}$ 之间, 经历了较强退火过程, 可有效反映本地构造隆升史, 热史模拟结果表明, 在模拟的地质时期内, 磷灰石样品经历了单一的构造隆升过程, 均经历了“构造快速隆升期—构造稳定期—构造快速隆升期”三个阶段, 且构造隆升具有北早南晚的特征。

(2) 通过热史模拟法、磷灰石裂变径迹年龄—封闭温度方法、锆石裂变径迹年龄—封闭温度方法分别计算了各样品的冷却速率, 研究区内岩石样品的冷却速率介于 $1.211 \sim 6.053 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Myr}$, 并且认为通过磷灰石单颗粒裂变径迹年龄热史模拟结果获得的冷却速率更能清晰反映不同地质历史阶段构造隆升特征, 该特征与“磷灰石裂变径迹年龄—封闭温度方法”所获得的冷却速率基本一致, 由“锆石裂变径迹年龄—封闭温度方法”所获得的冷却速率为上述两种方法的下限值。

(3) 研究区随着海拔升高, 磷灰石和锆石冷却速率增大, 龙门山冲断带自东南的山前带向北西方向构造隆升速率逐渐增加, 且构造隆升时间逐渐变晚, 认为龙门山冲断带在中—新生代 (150Ma) 以来的构造变形从北西至南东方向, 表现出后展式扩展特征, 此后分别在中—晚白垩世 (70~50Ma) 和渐新世以来 (尤其约 20Ma), 研究区内又再次表现为后展式构造特征, 龙门山冲断带中西部地区具有多期构造隆升叠加的特征, 即经历了前展式扩展和后展式扩展交互的多期隆升。

致谢

在此特别感谢中国地质大学 (北京) 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,另外也感谢本论文的二位审稿人及编辑部老师提出的修改意见及辛苦付出。

References

- Bai Mingkun, Chevalier Marie-Luce, Li Haibing, Pan Jiawei, Wu Qiong, Wang Shiguang, Liu Fucui, Jiao Liqing, Zhang Jinjiang, Zhang Lei, Gong Zheng. 2022. Late Quaternary slip rate and earthquake hazard along the Qianning segment, Xianshuihe fault[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(7): 2312–2332 (in Chinese with English abstract).
- Brandon M T. 1996. Probability density plot for fission-track grain-age samples[J]. *Radiation Measurements*, 26: 663–676.
- Burchfiel B C, Chen Zhiliang, Liu Yuping, Royden L H. 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China[J]. *International Geology Review*, 37: 661–735.
- Chen Hongde, Liu Lei, Lin Liangbiao, Wang Xinglong, Wang Zhiwei, Yu Yu, Zeng Jian, Li Pengwei. 2021. Depositional responses of Xujiahe Formation to the uplifting of Longmenshan during the late Triassic, western Sichuan Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(4): 801–815 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhuxin, Jia Dong, Zhang Qie, Wei Guoqi, Li Benliang, Wei Dongtao, Shen Yang. 2005. Balanced cross-section analysis of the fold-thrust belt of the Longmen Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 38–45 (in Chinese with English abstract).
- Cook K L, Royden L H, Burchfiel B C, Lee Y H, Tan X. 2013. Constraints on Cenozoic tectonics in the southwestern Longmen Shan from low-temperature thermochronology[J]. *Lithosphere*, 5(4): 393–406.
- Deng Bin, He Yu, Huang Jiaqiang, Yang Rongjun, Zhou Zheng, Lai Dong, Luo Qiang, Zheng Wenxin, Li Zhiwu, Liu Shugen. 2019. Eastward growth of the Longmenshan fold-and-thrust belt: evidence from the low temperature thermochronometer model[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(7): 1588–1600 (in Chinese with English abstract).
- Deng Bin, Liu Shugen, Li Zhiwu, Liu Shun. 2009. Uplifting characteristics in eastern margin area of Tibetan Plateau: evidence from low temperature thermochronology[J]. *Quaternary Sciences*, 29(3): 574–585 (in Chinese with English abstract).
- Fan Saihua, Xie Hui, Li Binwen, Liu Yuan, Li Weiping, Xu Weina, Zhao Hu, Mou Lei. 2022. Controlling effect of Shaximiao Formation fault on gas accumulation in eastern slope area of western Sichuan Depression[J]. *Geology in China*, 49(4): 1275–1284 (in Chinese with English abstract).
- Fan Zenghui, Liu Shugen, Fan Cunhui, Hu Linhui, Li Wenjia, Mi Hong, Han Chong, Han Xiaojun. 2018. Analysis of typical seismic profile and balanced cross-section recovery and tectonic evolution in the Longmenshan Fold-Thrust Belt[J]. *Geological Review*, 64(2): 347–360 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xusheng. 2010. Litho-paleogeographic evolution in the middle-late Triassic in western Sichuan Province and its significance for petroleum exploration[J]. *Oil & Gas Geology*, 31(5): 610–620 (in Chinese with English abstract).
- Hong Haitao, Tian Xingwang, Sun Yiting, Ma Kui, Li Geng, Wang Yunlong, Yang Dailin, Peng Hanlin, Luo Bing, Zhou Gang, Xue Jiuhuo, Ye Mao, Shan Shujiao. 2020. Hydrocarbon enrichment regularity of marine carbonate in Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 47(1): 99–110 (in Chinese with English abstract).
- Hurford A J, Gleadow A J W. 1977. Calibration of fission track dating parameters[J]. *Nuclear Track Detection*, 1: 41–48.
- Jia Dong, Li Yiquan, Yan Bing, Li Zhigang, Wang Maomao, Chen Zhuxin, Zhang Yong. 2020. The Cenozoic thrusting sequence of the Longmen Shan fold-and-thrust belt, eastern margin of the Tibetan plateau: insights from low temperature thermochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 198, 104381,

<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104381>.

- Jia Qiupeng, Jia Dong, Zhu Ailan, Chen Zhuxin, Hu Qianwei, Luo Liang, Zhang Yuanyuan, Li Yiquan. 2007. Active tectonics in the Longmen thrust belt to the eastern Qinghai–Tibetan Plateau and Sichuan Basin: evidence from topography and seismicity[J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 42(1): 31–44 (in Chinese with English abstract).
- Jin Wenzheng, Wan Guimei, Cui Zehong, Wang Junpeng, Yang Xiaoqun, Bai Wankui. 2012. Key tectonic change epoch and hydrocarbon accumulation periods of continental clastic reservoir in Sichuan Basin[J]. *Fault–Block Oil & Gas Field*, 19(3): 273–277 (in Chinese with English abstract).
- 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 Meng, Tang Liangjie, Yuan Wanming. 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.
- Li Yuhang. 2018. A study on the lateral spreading movement of the northeastern Tibetan Plateau[D]. Beijing: Institute of geology, China earthquake administration.
- Lin Jinrong, Hu Zhihua, Tao Yi, Wang Yongjian, Wang Feng. 2019. The Response of zircon fission track age on the metallogenic thermal events of Zoujiashan uranium deposit in Xiangshan orefield[J]. *Uranium Geology*, 35(4): 193–198 (in Chinese with English abstract).
- Liu Fangbin. 2021. Thermochronological constraints on Cenozoic exfoliation history in the Southeast margin of the Qinghai–Tibet plateau: a case study of Lincang granite area[D]. Lanzhou: Lanzhou University.
- Liu He, Yan Danping, Wei Guoping. 2008. Deformation and metamorphism sequence of Bikou terrane in the northwest margin of Yangtze plate: implications for extension collapse and transition of Songpan–Garze orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 464–474 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shugen, Deng Bin, Li Zhiwu, Luba Jansa, Liu Shun, Wang Guozhi, Sun Wei. 2013. Geological evolution of the Longmenshan intracontinental composite orogen and the eastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Journal of Earth Science*, 6: 874–890.
- Liu Shugen, Li Zhiwu, Peter J J, Kamp R B, Li Jinxi, Deng Bin, Wang Guozhi, XU Ganqing, Martin Danis k, Yang Di, Wang Zijian, Li Xianghui, Liu Shun, Li Juchu. 2019. Discovery of the Mesozoic Zoige paleo–plateau in eastern Tibetan plateau and its geological significance[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 46(1): 1–28 (in Chinese with English abstract).
- Luo Meng, Zhu Wenbin, Zheng Bihai, Zhu Xiaoqing. 2012. Mesozoic–Cenozoic tectonic evolution of the Kuqa basin: evidence from apatite fission–track data[J]. *Earth Science–Journal of China University of Geosciences*, 37(5): 893–902 (in Chinese with English abstract).
- Shen Chuanbo, Mei Lianfu, Liu Zhaoqian, Xu Sihuang. 2009. Apatite and zircon fission track data, evidences for the Mesozoic–Cenozoic uplift of Huangling dome, central China[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 29(2): 54–60 (in Chinese with English abstract).
- Su Zhe, Wang Erchie, Wang Gang, Fan Chun. 2016. GPS strain rate and seismic activity before the Ludian earthquake (Ms 6.5), northeast Yunnan, China: new implications for eastward Chuan–Dian block extrusion[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 27(6): 837–851.
- Sun Lijing, Zhao Zhongbao, Pan Jiawei, Liang Fenghua, Zhang Lei, Zhang Jinjiang. 2021. The stress and strain state of Yalaha fault in the Kangding segment of the Xianshuihe fault zone and its seismogenic environment[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(10): 3225–3240 (in Chinese with English abstract).
- Tian Yuntao, Kohn B P, Gleadow A J W, Hu Shengbiao. 2013. Constructing the Longmen Shan eastern Tibetan

- Plateau margin: insights from low-temperature thermochronology[J]. *Tectonics*, 32, 576–592.
- Tian Yuntao, Li Rui, Tang Yuan, Xu Xiao, Wang Yuejun, Zhang Peizhen. 2018. Thermochronological constraints on the late Cenozoic morphotectonic evolution of the Min Shan, the eastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Tectonics*, 37, 1733–1749.
- Tian Yuntao, Liu Yimin, Li Rui, Sun Xilin, Zhang Zengjie, Carter A. 2022. Thermochronological constraints on Eocene deformation regime in the Longmenshan: implications for the eastward growth of the Tibetan plateau[J]. *Global and Planetary Change*, 21: 103930, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103930>.
- Tian Yuntao, Yuan Yusong, Hu Shengbiao. 2009. New progress in apatite fission track analysis[J]. *Progress in Geophysics*, 24(3): 909–920 (in Chinese with English abstract).
- Tian Yuntao, Zhu Chuanqing, Xu Ming, Rao Song, Barry P K, Hu Shengbiao. 2011. Post-early Cretaceous denudation history of the northeastern Sichuan Basin: constraints from low-temperature thermochronology profiles[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(3): 807–816 (in Chinese with English abstract).
- Tan Xibin, Li Yuanxi, Xu Xiwei, Chen Wenyu, Xu Chong, Yu Guihua. 2013. Cenozoic fault activity of the southern segment of the Longmenshan thrust belt: evidence from low-temperature thermochronology data[J]. *Seismology and Geology*, 35(3): 506–517 (in Chinese with English abstract).
- Tan Xibin, Xu Xiwei, Li Yuanxi, Yuan Renmao, Yu Guihua, Xu Chong. 2015. Differential late-Cenozoic vertical motions of the Beichuan–Yingxiu fault and the Jiangyou–Guanxian fault in the central Longmenshan range and their tectonic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(1): 143–152 (in Chinese with English abstract).
- Tang Yuan, Qin Yadong, Gong Xiaodong, Duan Yaoyao, Chen Gang, Yao Hongyou, Liao Junxiong, Liao Shiyong, Wang Dongbing, Wang Baodi. 2020. Discovery of eclogites in Jinsha River suture zone, Gonjo county, eastern Tibet and its restriction on paleo-tethyan evolution[J], *China Geology*, 3, 83–103.
- Tang Yuan, Wang Peng, Deng Hong, Liu Yuping, Tang Wenqing. 2022. Petrological records of major tectono-magmatic events since Oligocene in the southeastern segment of Xianshuihe fault zone in the eastern margin of Tibetan plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(7): 1121–1143 (in Chinese with English abstract).
- Tao Yaling. 2021. Cenozoic uplift and exhumation of the Yalong River thrust belt on the eastern margin of the Qinghai Tibet Plateau and its implications for plateau expansion[D]. Beijing: Institute of geology, China earthquake administration.
- Tao Yaling, Zhang Huiping, Ge Yukui, Pang Jianzhang, Yu Jingxing, Zhang Jiawei, Zhao Xudong, Ma Zifa. 2020. Cenozoic exhumation and fault activities across the eastern Tibet: constraints from low-temperature thermochronological data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(11): 4154–4167 (in Chinese with English abstract).
- Wagner G A, Van den Haute P. 1992. *Fission track dating*[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher.
- Wang Erchie. 2017. Timing of the initial collision between the Indian and Asian continents[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(4): 626–634.
- Wang E, Kirby E, Furlong K P, Soest M V, Xu G, Shi X, Kamp P J J, Hodges K V. 2012. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic[J]. *Nature Geoscience*, 5: 640–645.
- Wang Erchie, Meng Qingren. 2008. Discussion on the Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of Longmenshan[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 38(10): 1221–1233 (in Chinese).
- Wang Erchie, Su Zhe, Xu Guang. 2009. A case study on lateral extrusion occurred along some orogenic belts in China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 44(4): 1266–1288 (in Chinese with English abstract).
- Wang Erqi, Meng Kai, Xu Guang, Fan Chun, Su Zhe. 2018. Cenozoic two-stage obduction of the Indian subcontinent: On the interaction between the Indian Ocean, Tethyan and Eurasian plates[J]. *Acta Petrologica*

- Sinica, 34(7): 1867–1875 (in Chinese with English abstract).
- Wang Erqi, Meng Qingren, Chen Zhiliang, Chen Liangzhong. 2001. Early Mesozoic left–lateral movement along the Longmenshan fault belt and its tectonic implication[J]. *Earth Science Frontiers*, 8(1): 375–384 (in Chinese with English abstract).
- Wang Nan, Zhang Zhiyong, Malus àMarco G, Wu Lin, Chew D, Zhang Jien, Xiang Dunfeng, Xiao Wenjiao. 2021. Pulsed Mesozoic exhumation in Northeast Asia: New constraints from zircon U–Pb and apatite U–Pb, fission track and (U–Th)/He analyses in the Zhangguangcai Range, NE China[J]. *Tectonophysics*, 5: DOI: 10.1016/j.tecto.2021.229075.
- Xu Chenguang, Yan Danping, Gu Shuhang, Meng Xiangkun, Qiu Liang, Wells M L, Wang Jibin, Ma Fang. 2018. Deformation sequence and geochronological constraints on the metamorphism of the Bikou terrane, northwestern margin of the Yangtze Block[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(1): 80–94 (in Chinese with English abstract).
- Xu Dongzhuo, Li Shenghu, Meng Xian'gang, Zhu Wenwu, Sun Qikai. 2016. The deformation analysis of main fault zone in eastern part of Bayankala block before and after the Lushan earthquake[J]. *North China Earthquake Sciences*, 34(2): 50–56 (in Chinese with English abstract).
- Yan Danping, Li Shubing, Cao Wentao, Zhang Weichen. 2010. Multi layer detachment crustal structure in the Longmen mountains: evidences from neo–tectonic deformation and geophysical data[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(5): 106–116 (in Chinese with English abstract).
- Yan Danping, Sun Ming, Gong Lingxiao, Zhou Meifu, Qiu Liang, Li Shubing, Zhang Sen, Gu Shuhang, Mu Hongxu. 2020. Composite structure and growth of the Longmenshan foreland thrust belt in the eastern margin of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(5): 615–633 (in Chinese with English abstract).
- Yang Li, Yuan Wanming, Zhu Chuanbao, Hong Shujiong, Li Shiyu, Feng Zirui, Zhang Aikui. 2021. Mesozoic uplift exhumation history of East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(12): 3781–3796 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhihua, Wu Ruian, Guo Changbao, Zhang Yongshuang, Lan Hengxing, Ren Sanshao, Yan Yiqiu. 2022. Geo–hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan[J]. *Geology in China*, 49(2): 355–368 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Wanming. 2016. Thermochronological method of revealing conservation and changes of mineral deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2571–2578 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Wanming, Yang Zhiqiang, Zhang Zhaochong, Deng Jun. 2011. The uplifting and denudation of main Huangshan Mountains, Anhui Province, China[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 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.
- Zhao Jing, Ren Jinwei, Jiang Zaisen, Yue Chong. 2018. Three dimensional deformation characteristics of the Xianshuihe fault zone[J]. *Seismology and Geology*, 40(4): 818–831 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jun, Chen Min, He Yong, You Xuejun, Zhao Wei, Ling Maoqian, Zhang Qingui, Zhu Jianhua. 2022. First discovery of the tectono–strata–bound type natural asphaltite in the Guangyuan, Sichuan Province[J/OL]. *Geology in China*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220314.1839.004.html> (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuai, Tian Yuntao, Tian Ye, Liu Yimin, Tang Yuan, Qin Yonghui, Yan Zhaokun, Li Shihu, Shen Zhongshan, Zhang Zengjie. 2021. Early Cenozoic paleo–stress field in the eastern margin of the Tibetan Plateau: magnetic fabric records in the southwestern part of Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(5): 1643–1653 (in Chinese with English abstract).

Zhang Zhaojie. 2019. Analysis of inversion method for apatite fission track annealing process[D]. Xi'an: Northwest University.

附中文参考文献

- 白明坤, Chevalier Marie-Luce, 李海兵, 潘家伟, 吴琼, 王世广, 刘富财, 焦利青, 张进江, 张蕾, 龚正. 2022. 鲜水河断裂带乾宁段晚第四纪走滑速率及区域强震危险性研究[J]. 地质学报, 96(7): 2312–2332.
- 陈洪德, 刘磊, 林良彪, 王兴龙, 王志伟, 余瑜, 曾剑, 李朋威. 2021. 川西坳陷西部龙门山隆升时期上三叠统须家河组沉积响应[J]. 石油与天然气地质, 42(4): 801–815.
- 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.
- 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, 刘树根, 李智武, 刘顺. 2009. 青藏高原东缘地区隆升作用特征—低温年代学证据[J]. 第四纪研究, 29(3): 574–585.
- 范赛华, 谢辉, 李彬文, 刘媛, 李卫平, 许维娜, 赵虎, 牟蕾. 2022. 川西坳陷东坡地区沙溪庙组断裂对天然气富集的控制作用[J]. 中国地质, 49(4): 1275–1284.
- 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.
- 郭旭升. 2010. 川西地区中、晚三叠世岩相古地理演化及勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 610–620.
- 洪海涛, 田兴旺, 孙奕婷, 马奎, 李庚, 王云龙, 杨岱林, 彭瀚霖, 罗冰, 周刚, 薛玖火, 叶茂, 山述娇. 2020. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气富集规律[J]. 中国地质, 47(1): 99–110.
- 贾秋鹏, 贾东, 朱艾斓, 陈竹新, 胡潜伟, 罗良, 张元元, 李一泉. 2007. 青藏高原东缘龙门山冲断带与四川盆地的现今构造表现: 数字地形和地震活动证据[J]. 地质科学, 42(1): 31–44.
- 金文正, 万桂梅, 崔泽宏, 王俊鹏, 杨孝群, 白万奎. 2012. 四川盆地关键构造变革期与陆相油气成藏期次[J]. 断块油气田, 19(3): 273–277.
- 李煜航. 2018. 青藏高原东北横向扩展运动研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 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.
- 刘方斌. 2021. 青藏高原东南缘新生代剥露历史的热年代学约束—以临沧花岗岩地区为例[D]. 兰州: 兰州大学.
- 刘鹤, 颜丹平, 魏国庆. 2008. 扬子板块西北缘碧口地块变形变质作用序列—松潘—甘孜造山带伸展垮塌事件的意义[J]. 地质学报, 82(4): 464–474.
- 刘树根, 李智武, Kamp P J J, 冉波, 李金玺, 邓宾, 王国芝, XU Ganqing, Danis k Martin, 杨迪, 王自剑, 李祥辉, 刘顺, 李巨初. 2019. 青藏高原东缘中生代若尔盖古高原的发现及其地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 46(1): 1–28.
- 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(中国地质大学学报), 37(5): 893–902.
- 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.
- 孙丽静, 赵中宝, 潘家伟, 梁凤华, 张磊, 张进江. 2021. 鲜水河断裂带康定段雅拉河断裂深部应力应变状态及其孕震环境[J]. 岩石学报, 37(10): 3225–3240.
- 田云涛, 袁玉松, 胡圣标. 2009. 磷灰石裂变径迹分析新进展[J]. 地球物理学进展, 24(3): 909–920.
- 田云涛, 朱传庆, 徐明, 饶松, Kohn B P, 胡圣标. 2011. 晚白垩世以来川东地区的剥蚀历史—多类低温热年代学数据综合剖面的制约[J]. 地球物理学报, 54(3): 807–816.

- 谭锡斌, 李元希, 徐锡伟, 陈玟禹, 许冲, 于贵华. 2013. 低温热年代学数据对龙门山推覆构造带南段新生代构造活动的约束[J]. 地震地质, 35(3): 506–517.
- 谭锡斌, 徐锡伟, 李元希, 袁仁茂, 于贵华, 许冲. 2015. 龙门山中段中央断裂和前山断裂的晚新生代垂向活动性差异及其构造意义[J]. 地球物理学报, 58(1): 143–152.
- 唐渊, 王鹏, 邓红, 刘宇平, 唐文清. 2022. 青藏高原东缘鲜水河断裂带南东段渐新世以来主要构造岩浆事件的岩石记录[J]. 地质通报, 41(7): 1121–1143.
- 陶亚玲. 2021. 青藏高原东缘雅砻江逆冲带新生代隆升剥露及其对高原扩展的启示[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 陶亚玲, 张会平, 葛玉魁, 庞建章, 俞晶星, 张佳伟, 赵旭东, 马字发. 2020. 青藏高原东缘新生代隆升剥露与断裂活动的低温热年代学约束[J]. 地球物理学报, 63(11): 4154–4167.
- 王二七, 孟恺, 许光, 樊春, 苏哲. 2018. 印度陆块新生代两次仰冲事件及其构造驱动机制: 论印度洋、特提斯和欧亚板块相互作用[J]. 岩石学报, 34(7): 1867–1875.
- 王二七, 孟庆任. 2008. 对龙门山中生代和新生代构造演化的讨论[J]. 中国科学 D 辑 (地球科学), 38(10): 1221–1233.
- 王二七, 孟庆仁, 陈智樑, 陈良忠. 2001. 龙门山断裂带印支期左旋走滑运动及其大地构造成因[J]. 地学前缘, 8(2): 375–384.
- 王二七, 苏哲, 许光. 2009. 我国的一些造山带的侧向挤出构造[J]. 地质科学, 44(4): 1266–1288.
- 许晨光, 颜丹平, 古术航, 孟祥坤, 邱亮, Wells M L, 王继斌, 马芳. 2018. 扬子板块西北缘碧口地块中一新世代变质、变形与年代限定[J]. 地学前缘, 25(1): 80–94.
- 徐东卓, 李胜虎, 孟宪纲, 朱文武, 孙启凯. 2016. 芦山地震前后巴颜喀拉地块东部断裂带形变分析[J]. 华北地震科学, 34(2): 50–56.
- 颜丹平, 李书兵, 曹文涛, 张维宸. 2010. 龙门山多层分层拆离地壳结构: 新构造变形与深部构造证据[J]. 地学前缘, 17(5): 106–116.
- 颜丹平, 孙铭, 巩凌霄, 周美夫, 邱亮, 李书兵, 张森, 古术航, 木红旭. 2020. 青藏高原东缘龙门山前陆逆冲带复合结构与生长[J]. 地质力学学报, 26(5): 615–633.
- 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.
- 杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 张永双, 兰恒星, 任三绍, 闫怡秋. 2022. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征[J]. 中国地质, 49(2): 355–368.
- 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.
- 赵静, 任金卫, 江在森, 岳冲. 2018. 鲜水河断裂带三维变形特征[J]. 地震地质, 40(4): 818–831.
- 张君, 陈敏, 贺勇, 游学军, 赵伟, 凌茂前, 张芹贵, 祝建华. 2022. 四川广元地区首次发现构造一层控型天然沥青矿[J/OL]. 中国地质. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220314.1839.004.html>.
- 张帅, 田云涛, 田野, 刘一珉, 唐苑, 秦咏辉, 颜照坤, 李仕虎, 沈中山, 张增杰. 2021. 青藏高原东缘新生代早期古应力环境: 来自四川盆地西南缘磁组结构的记录[J]. 地球物理学报, 64(5): 1643–1653.
- 张昭杰. 2019. 磷灰石裂变径迹退火过程反演方法分析[D]. 西安: 西北大学.