

doi:10.3799/dqkx.2013.071

循化—化隆盆地晚白垩世以来盆山耦合过程:来自物源与磷灰石裂变径迹年代学分析的证据

张远泽^{1,2}, 王国灿^{1,2*}, 王 岸^{1,2}, 张克信^{1,3}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 循化—化隆盆地新生代沉积及盆地基底和周缘山系磷灰石裂变径迹年代学分析揭示了青藏高原东北缘晚白垩世以来经历过 3 期隆升剥露事件: (1) 盆地基底及拉脊山和西秦岭北缘构造带磷灰石裂变径迹年龄分析普遍记录了晚白垩世—始新世中期相对快速的区域性的隆升剥露事件, 西秦岭北缘快速抬升的起始时间为 84 Ma, 受控于向北的逆冲抬升; 向北到循化—化隆盆地中部的拉目峡抬升的起始时间为 69 Ma; 更北的拉脊山一带快速抬升期主要为 40~50 Ma, 从而反映晚白垩世—始新世中期的快速抬升由南向北逐渐扩展。这一期构造隆升事件导致循化—化隆盆地和临夏盆地缺失了北部西宁—民和盆地古近纪所具有的西宁群沉积。隆升剥露结束于 31 Ma 左右, 此时化隆—循化盆地向东与同时期的临夏盆地相连为一个统一的大型西秦岭山前盆地, 两者具有相同的构造、沉积演化史, 因此循化—化隆盆地他拉组底部地层年龄最老不会超过临夏盆地最老地层的古地磁年龄, 即 29 Ma。 (2) 渐新世晚期约 26 Ma 拉脊山开始双向逆冲隆升, 并可能延续到中新世早期约 21 Ma, 隆升作用使循化—化隆盆地成为挟持于拉脊山逆冲带和西秦岭构造带之间的山前挤压型前陆盆地, 循化—化隆盆地开始大规模沉积巨厚的他拉组冲积扇相粗碎屑岩。 (3) 通过循化—化隆盆地咸水河组和临夏组的沉积相分析、古流方向和砾石成分分析, 揭示出拉脊山构造带在中新世 8 Ma 左右发生的最大规模的双向逆冲隆升事件, 这次事件直接导致循化—化隆盆地由前陆挤压盆地转变为山间盆地, 形成现今青藏高原东北缘的盆山地貌基本格局。

关键词: 循化—化隆盆地; 物源; 裂变径迹; 拉脊山; 西秦岭。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2013)04-0725-20

收稿日期: 2013-01-28

Coupling Processes of Xunhua-Hualong Basin-Orogenic Belt Since Late Cretaceous: Evidence from Apatite Fission Track Geochronology and Source Analysis

ZHANG Yuan-ze^{1,2}, WANG Guo-can^{1,2*}, WANG An^{1,2}, ZHANG Ke-xin^{1,3}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Xunhua-Hualong basin Cenozoic sedimentary strata, basement and surrounding mountains analysis of apatite fission track geochronology reveals the Northeast margin of Qinghai-Tibet plateau experienced three periods of uplift and exhumation events since Late Cretaceous: (1) Basin basement, Laji mountain and West Qinling orogenic belt apatite fission track ages generally record a Late Cretaceous-Eocene relatively rapid regional uplift and exhumation event. Northern margin of West Qinling rapidly uplift at 84 Ma, which was controlled by the uplift of the northward thrust; to the North Lamu Gorge in central of Xunhua-Hualong basin uplift at 69 Ma; further north rapid uplift stages along Laji mountain is mainly between 40—50 Ma, reflecting Paleocene-Eocene rapid uplift gradually extending from south to north. This tectonic uplift event resulted in Xunhua-Hualong basin and Linxia basin missing Paleogene Xining group sedimentary strata that deposits in northern Xining-Minhe ba-

基金项目: 中国地质调查局项目“青藏高原新生代地质作用过程与第四纪环境演变综合研究”(No. 1212010610103); “青藏高原新近纪隆升过程与地质事件群研究”(No. 1212011121261)。

作者简介: 张远泽(1986—), 男, 硕士, 主要从事构造年代学及造山带地质研究。E-mail: zyz011051@163.com

* **通讯作者:** 王国灿, E-mail: wgcan@cug.edu.cn

sin. The first period of uplift and exhumation ended at about 31 Ma, when Xunhua-Hualong basin connected with eastern Linxia basin to a large unified foreland basin of West Qinling, both experience the same tectonic and sedimentary evolution history, therefore Cenozoic oldest Tala group sedimentary strata age in Xunhua-Hualong basin won't exceed the oldest sedimentary strata with Paleomagnetic age of 29 Ma in Linxia basin. (2) Late Oligocene about 26 Ma Laji mountain began bi-directionally thrust-uplift and may have continued to Early Miocene about 21 Ma, and uplifting made Xunhua-Hualong basin become piedmont extrusion foreland basin between Laji mountain and West Qinling, when Xunhua-Hualong basin began to deposit Tala group alluvial fan of thick coarse clastic rocks. By analyzing sedimentary facies, the ancient flow direction and gravel composition of Xianshuihe group and Linxia group sedimentary strata in Xunhua-Hualong basin, it is concluded that Laji mountains experienced the largest bi-directional thrust-uplift event in the Miocene about 8 Ma, which led directly to the event of Xunhua-Hualong piedmont extrusion foreland basin turning into mountain basin, which formed basic pattern of basin-mountain landform in northeastern margin of Qinghai-Tibet plateau nowadays.

Key words: Xunhua-Hualong basin; source; fission-track; Laji mountain; West Qinling.

0 引言

青藏高原东北缘南以东昆仑—西秦岭断裂带、西以阿尔金断裂带、北以祁连山—海原—六盘山断裂带 3 条巨型左旋走滑断裂和夹于其间的大型菱形盆地组成,是高原向东北方向拓展的最新前缘部位,构造运动非常活跃,是研究隆升时代和隆升过程有利区域(图 1a)。

20 世纪 80 年代开始围绕青藏高原东北缘地层序列、地形地貌、沉积相、古生物、环境演化、构造变形等问题前人取得诸多重要研究成果(孙秀玉等, 1984; 谷祖纲等, 1992; 刘梦儒, 1992; 潘保田 1994; 李吉均等, 1996). 方小敏等(1997, 2004, 2007)和 Fang *et al.* (2005)先后对临夏盆地、西宁盆地和贵德盆地的新生代沉积给出了全面系统的磁性地层学时代约束. 在此基础上, 诸多学者从植物群落、沉积环境、沉积速率以及裂变径迹热年代学等多角度的研究表明东北缘的盆山格局的形成是多阶段、非均变的复杂过程, 揭示出中新世以来的多阶段隆升信息(陈怀录等, 1996; 邓中林等, 2000; 宋春晖等, 2001, 2003a, 2003b; 方小敏等, 2002; 郑德文等, 2003, 2006; 鹿化煜等 2004; 王修喜等, 2006; 张培震等, 2006; 刘少峰等, 2007; 袁道阳等, 2005, 2007; 张克信等, 2008; 王国灿等, 2010). 概括起来, 东北缘盆地与周缘造山带盆山耦合过程大致划分为 3 个阶段: 古近纪时期, 东北缘盆地为一个统一的昆仑山前挤压型前陆盆地; 中新世早期拉脊山隆升分隔了贵德盆地和西宁盆地; 中新世中期约 8 Ma 拉脊山和积石山强烈隆升形成了现今山间盆地的地貌格局. 其中, 古新世—渐新世阶段的构造隆升过程和盆山格局的揭示相对有限, 对于东北缘盆地广泛存在的西宁群沉积的南部边界为拉脊山还是昆仑山存在较

多的争议; 由于缺失古近纪地层, 拉脊山在此时期是否经历过构造隆升这一关键问题也尚未解决; 同时基于古生物群落和沉积相的盆山耦合研究缺乏确切的年龄信息; 此外, 东北缘循化—化隆盆地中新世以来的沉积物源研究相对于周缘盆地的研究程度较低. 因此, 笔者选择循化—化隆盆地和周缘造山带作为研究区, 应用磷灰石裂变径迹低温热演化历史结合盆地的沉积物源分析, 揭示循化—化隆盆地记录的青藏高原东北缘新生代隆升的更多信息.

1 研究区地质概况

循化—化隆盆地位于青藏高原东北缘与黄土高原交汇处, 属于祁连、昆仑和秦岭三大褶皱系结合地带的新生代沉降盆地, 盆地长约 130 km, 宽约 40 km, 平均海拔约 2 000~2 500 m, 由北西向展布的拉脊山、西秦岭北缘逆冲带和北北西向展布的积石山所围限, 形成盆山相间的菱形构造地貌格局(图 1b), 盆地中部的德恒隆—加吾力隆起带分为东西两个次级盆地(潘保田等, 1996). 黄河是循化—化隆盆地主要河流, 由西部的贵德盆地流入, 下切形成多级阶地, 经积石峡向东进入陇西黄土高原的临夏盆地(黄长生等, 1998). 循化—化隆盆地的基底为元古界化隆岩群, 主要为片麻岩、角闪岩、大理岩、片岩和伟晶石英岩脉. 不整合沉积于基岩之上的新生代地层为山麓相、河湖相红色碎屑岩系, 累计厚达 2 700 余米(邓中林等, 2000). 划分为古近系他拉组(张克信等, 2010), 为一套砾岩、砂岩等粗碎屑岩组合; 新近系贵德群, 进一步划分为咸水河组和临夏组, 咸水河组以钙质泥岩为主夹少量砂砾岩, 临夏组以粗砾岩、石英砂岩为主夹少量钙质泥岩; 第四系为一套冲积扇砾岩沉积, 不整合覆盖于新近系地层之上.

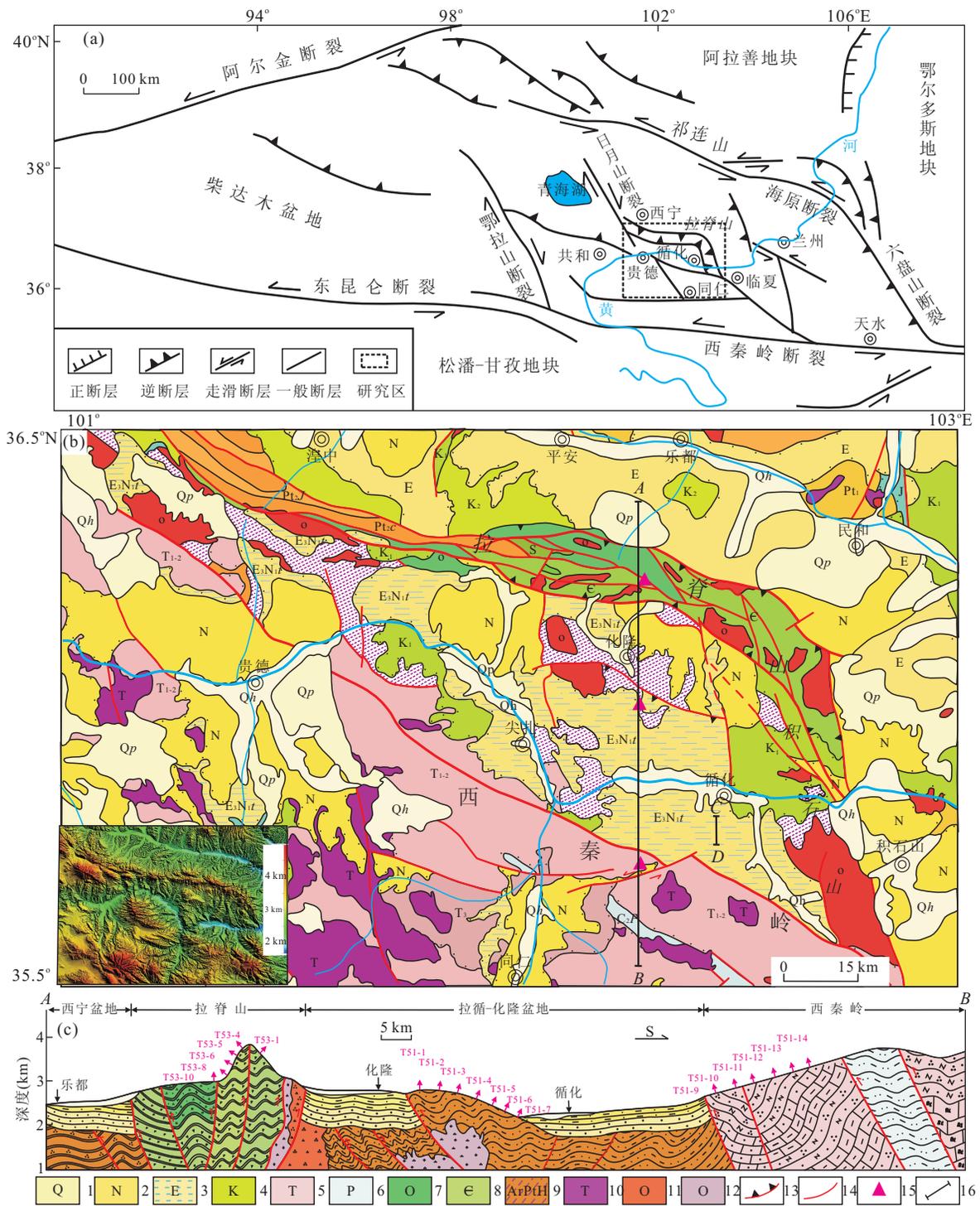


图1 青藏高原东北缘构造分区(a)、研究区地质简图(b)和样品分布图(c)

Fig. 1 Tectonic framework of northeast Qinghai-Tibet plateau (a), Geological sketch map (b) and sample locations of research area (c)
1. 第四系; 2. 新近系; 3. 古近系; 4. 白垩系; 5. 三叠系; 6. 二叠系; 7. 奥陶系; 8. 寒武系; 9. 元古太古界; 10. 三叠纪侵入岩; 11. 奥陶纪石英闪长岩; 12. 奥陶纪花岗岩闪长岩; 13. 主要逆冲断层; 14. 一般断层; 15. 裂变径迹采样位置; 16. 剖面位置

循化—化隆盆地北部海拔 3 500 m 的拉脊山属于中祁连造山带, 祁连山带主体构造格架奠定于早古生代, 后经历了中生代、新生代的多期强烈构造变形改造(曾广策等, 1997; 王二七等, 2000; 左国朝等,

2001). 拉脊山主要由一套震旦系、寒武系、奥陶系和志留系的超基性岩、中基性火山岩、海相沉积岩以及加里东花岗岩组成(图 1b). 主体构造变形格架是由南北两条挤压逆冲断裂带组成的一组弧形断裂构造

带,剖面上断层组合构成背冲的花状构造。

循化—化隆新生代盆地南界为西秦岭北缘逆冲带,逆冲带以南主要由石炭系、二叠系和三叠系的复理石碎屑岩、硅质岩、碳酸盐岩以及印支期、燕山期花岗岩组成(郭进京和韩文峰,2008),向北逆冲于循化—化隆盆地之上,此外有部分白垩系紫红色陆相碎屑岩分布于西秦岭逆冲带北侧附近。

2 分析方法及样品分布

2.1 分析方法

盆地沉积是剥蚀源区长期演化的产物,记录了造山带构造隆升和剥露过程的大量信息,因此,通过盆地沉积相分析恢复循化—化隆盆地沉积环境演化过程,进而对循化盆地他拉组、咸水河组等不同时代的层位以及盆地不同地区的沉积岩中的碎屑成分组成结构与造山带地层的岩性对比,结合对应层位的古流向分析,构建出造山带剥露和构造演化的基本框架。

在此基础上为精细刻画循化—化隆盆地新生代盆山耦合过程,笔者采用高差—裂变径迹年代学方法对盆地相邻造山带进行系列磷灰石裂变径迹年代学分析,磷灰石具有较低的封闭温度,因此为揭示山带隆升、剥露和冷却速率、断裂演化、盆山耦合过程和盆地热演化提供了定量化的方法。裂变径迹是放射性 ^{238}U 自发裂变对矿物晶格产生的电离损伤痕迹,升温时先前记录的径迹发生退火消失,温度下降到封闭温度后,径迹重新累积,即“时钟”重新开始计时,从而记录了岩石冷却通过等温面以来的时代(Naeser,1979)。磷灰石和锆石是两种常见的测试矿物,锆石的封闭温度为 $240\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,磷灰石的封闭温度为 $110\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Gleadow *et al.*,1981; Hurford,1986; Brandon *et al.*,1998; Bernet *et al.*,2002; 王国灿,2002)。

磷灰石裂变径迹测试工作在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,采用外探测器法制样,磷灰石样品用环氧树脂固定,并用 5 mol/L 的 HNO_3 蚀刻 22 s ,然后用低铀白云母作为外探测器与磷灰石制成定年组件,样品在中国原子能科学研究院进行热中子辐射,磷灰石辐射剂量为 $8\times 10^{15}\text{ cm}^{-2}$,白云母的诱发裂变径迹用 40% HF室温条件下蚀刻 18 min 。径迹统计在 Zeiss Axiolpan2 显微镜和 Autoscan 系统中放大 $1\ 000$ 倍条件下完成测试,基岩、碎屑样品分别统计 15 和 50 个

磷灰石颗粒年龄。计算的 Zeta 参数采用美国国家标准局 SRM612 铀标准玻璃和标准磷灰石(Durango, $31.4\pm 0.6\text{ Ma}$)多次标定值 $Zeta=346.28\pm 14.19$,径迹年龄以国际通用高斯拟合软件 Binomfit 处理,进行年龄组二项式拟合和频度分析。

2.2 样品分布

本文磷灰石裂变径迹采样位置见图 1c,为了揭示循化—化隆盆地及周缘山系的隆升剥露历史,由北向南依次系统采集了地形高差较大的北部拉脊山、中部循化—化隆盆地拉目峡、南部西秦岭北缘逆冲带的 3 个剖面。

拉脊山主峰东侧的化隆—乐都公路旁的 6 件样品,采样系统穿越了拉脊山主脊,其中 T53-1 位于拉脊山南坡逆冲断层的下盘,岩性为花岗闪长岩;其余样品为拉脊山北坡的寒武纪变质砂岩、花岗斑岩。

循化—化隆盆地循化县南部拉目峡谷的 7 件样品,位于南倾的逆冲推覆构造带上盘,岩性为元古界接触变质的基底片麻岩、混合岩化花岗岩,岩石 U-Pb 年龄为 $754.8\pm 1.8\text{ Ma}$ ($1:25$ 万临夏幅),采样海拔 $2\ 100\sim 2\ 700\text{ m}$ 。

西秦岭尕楞口附近的 6 件样品,位于一系列向北部循化—化隆盆地逆冲的西秦岭北缘逆冲断裂带,海拔向南从主断裂处的 $2\ 600\text{ m}$ 逐渐增高到近高原面的 $3\ 200\text{ m}$,岩性以三叠系长石石英砂岩、粉砂质板岩为主,其中 T51-13 为侵入于三叠系的灰白色细粒花岗岩。

3 循化—化隆盆地新生代沉积物源分析

循化—化隆盆地新生代第三系河湖相沉积厚千余米,地层由渐新统的他拉组、新近系中新统、上新统的咸水河组、临夏组(相当于贵德群)组成,不整合沉积于元古宙接触变质的化隆岩群基岩或白垩系砾岩之上,与上覆的第四系为平行不整合接触。咸水河组从下而上划分为中庄段、上庄段和东乡段;临夏组划分为柳树段和何王家段。关于盆地第三系的古地磁年代学取得重要进展(季军良等,2010),研究显示他拉组年代为 $23.1\sim 21.2\text{ Ma}$,咸水河组年代为 $21.2\sim 9.6\text{ Ma}$ (中庄段为 $21.2\sim 16.0\text{ Ma}$ 、上庄段为 $16.0\sim 14.6\text{ Ma}$ 、东乡段为 $14.6\sim 9.6\text{ Ma}$),临夏组年代为 $9.6\sim 5.0\text{ Ma}$ (柳树段 $9.6\sim 7.3\text{ Ma}$ 、何王家段 $7.3\sim 5.0\text{ Ma}$)。

3.1 盆地沉积特征及沉积相分析

对循化县西南的羊圈贡拜村古近系渐新统一上新世地层进行了实测(图 2)(张克信等,2010). 根据岩性和沉积特征划分出 11 个沉积相,这些沉积相总体呈现出由底部粗碎屑向上渐变为细碎屑和泥质、膏盐层沉积的规律旋回变化,结合沉积环境的特点合并划分为 4 个演化阶段:他拉组,咸水河组的中庄段、上庄段、东乡段和临夏组的柳树段,临夏组的何王家段和全新统。

3.1.1 他拉组冲积扇相 他拉组的下部为巨厚层中一粗砾岩,中部砾石含量减少,石英砂岩含量增多,明显表现出砾岩和砂岩的交替沉积,上部中一薄层钙质含细砾粉砂岩、钙质结核泥岩明显增多,表明后期水动力条件明显减弱(图 2a). 沉积特征表明他拉组为一套冲积扇相沉积环境,说明他拉组当时是近物源的山麓的深水冲积环境形成的,这种环境揭示了在他拉组前期的约 23 Ma 循化—化隆盆地北缘开始受到造山隆升作用影响,大型冲积扇受拉脊山大断裂控制,导致多个山口地带形成冲积扇群,活动一直持续到约 21 Ma.

3.1.2 咸水河组、临夏柳树段河湖相 咸水河组的中庄段下部为以砂、砾岩为主的粗碎屑流的沉积和较好的定向排列构造组合代表了扇三角洲相沉积体系;上部总体以粉砂、泥为主的细碎屑流,发育水平层理、波纹层理为特征的沉积组合代表了典型淡水湖泊沉积体系. 因此,中庄组是由扇三角洲相环境—淡水浅湖相环境这样 2 个沉积旋回组成. 上庄段以中一薄层钙质、膏质泥岩为主,这种含较多膏盐层的沉积组合代表了微咸水湖沉积相环境(图 2c). 东乡段下部是由夹石膏层钙质膏泥岩,代表半咸水湖相和咸水湖相互层组成的交替沉积环境(图 2d). 临夏组的柳树段为中一细砾岩(图 2e),是一套扇三角洲相沉积为主的地层.

咸水河组的中庄—东乡段和临夏组的柳树沟段沉积总体由冲积扇环境变为扇三角洲和湖相沉积为主,表明 21.0~7.3 Ma 之间的循化—化隆盆地一直为较稳定的剥蚀夷平期.

3.1.3 临夏组何王家段冲积扇相 临夏组何王家段下部为中一粗砾岩,属于冲积扇相沉积环境(图 2f). 中部为砾粗砂岩和中一薄层状长石石英中砂岩,属于辫状河相沉积. 上部是钙质泥岩夹有灰白色含粉砂质钙质结核,为淡水湖相沉积(图 2g). 临夏组何王家段由冲积扇环境变为辫状河相和湖相沉积为主,揭示了约 7.3 Ma 开始循化—化隆盆地边缘

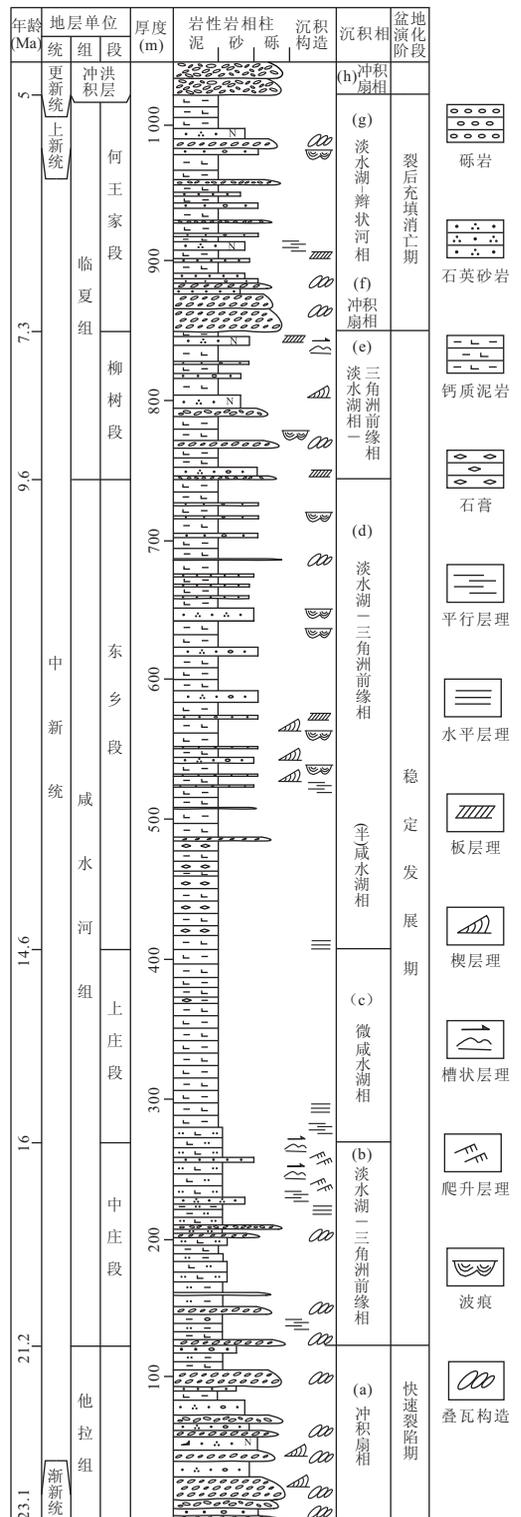


图 2 循化县渐新统一上新统地层序列(据张健钰等,2010 修改)
Fig. 2 Stratigraphic sequence of Oligocene-Pliocene in Xunhua

山系经历过小幅快速隆升,后来隆升趋于平缓进入稳定期.

3.1.4 全新统 全新统与临夏组何王家段之间为不整合接触,何王家段为厚—巨厚层状复成分砾岩

夹长石石英粗砂岩,为冲积扇沉积环境(图 2h). 这期间地层的缺失和沉积大量厚层的砾石层,说明进入更新统以来循化—化隆盆地的周缘山系进一步快速剧烈隆升.

3.2 盆地沉积物源分析及其对盆山演化的指示

盆地沉积物是盆地与山脉的“纽带”,通过盆地沉积物物源的分析,可以有效的揭示剥蚀源区山脉剥露过程和构造隆升事件(刘少峰等,2007). 因此,笔者对循化—化隆盆地不同地区他拉组、咸水河组和临夏组柳树段的沉积地层中的砾石成分与周缘山系地层岩性对比,结合砾石扁平面的大量统计恢复古流向(陈妍等,2008),探讨分析西秦岭北缘逆冲带和拉脊山的隆升构造的具体过程.

3.2.1 他拉组时期(23.1~21.2 Ma) 他拉组主要分布于西宁—民和盆地、化隆—循化盆地和拉脊山西段(图 3). 循化南部他拉组底部的 4 个砾石成分统计点主要为灰色的变质砂岩、砂岩、灰岩、少量硅泥质板岩和大理岩,砂岩占砾石的 65%~90%,

砂砾层中富含泥质,砂粒中富含长石粘土矿物,粘土泥质含量高反映了沉积时化学风化较强,物源显示为近源的特点(图 4). 往北砾石中出现少量的深灰色—灰绿色蛇绿岩、花岗岩、伟晶岩、脉石英.

化隆南部拉目村的 T51-8 他拉组中粗粒砂岩夹含砾砂岩,砾石含量 40%左右,成分主要为灰色变质细砂岩,约占 75%,还有板岩、脉石英及花岗岩,未见来自北部的元古界片麻岩,斜层理前积纹层指示水流方向由南至北西.

尖扎南部隆务大桥北的 T52-4、T52-5 他拉组复成分砾岩中灰—灰绿色砂岩约占 70%,脉石英约占 20%,少量板岩、硅质岩、花岗岩,该点砾石成分中同样未见片麻岩、混合变质岩.

通过以上 7 个观测点分析表明他拉组同沉积时期,盆地中部和南部的砾石成分与盆地南部的西秦岭北缘逆冲带的三叠系的岩性组合特征一致,砂岩、板岩、脉石英主要来自古浪提组、果木沟组,灰岩来自江里沟组(1:25 万临夏幅). 他拉组时期冲积扇

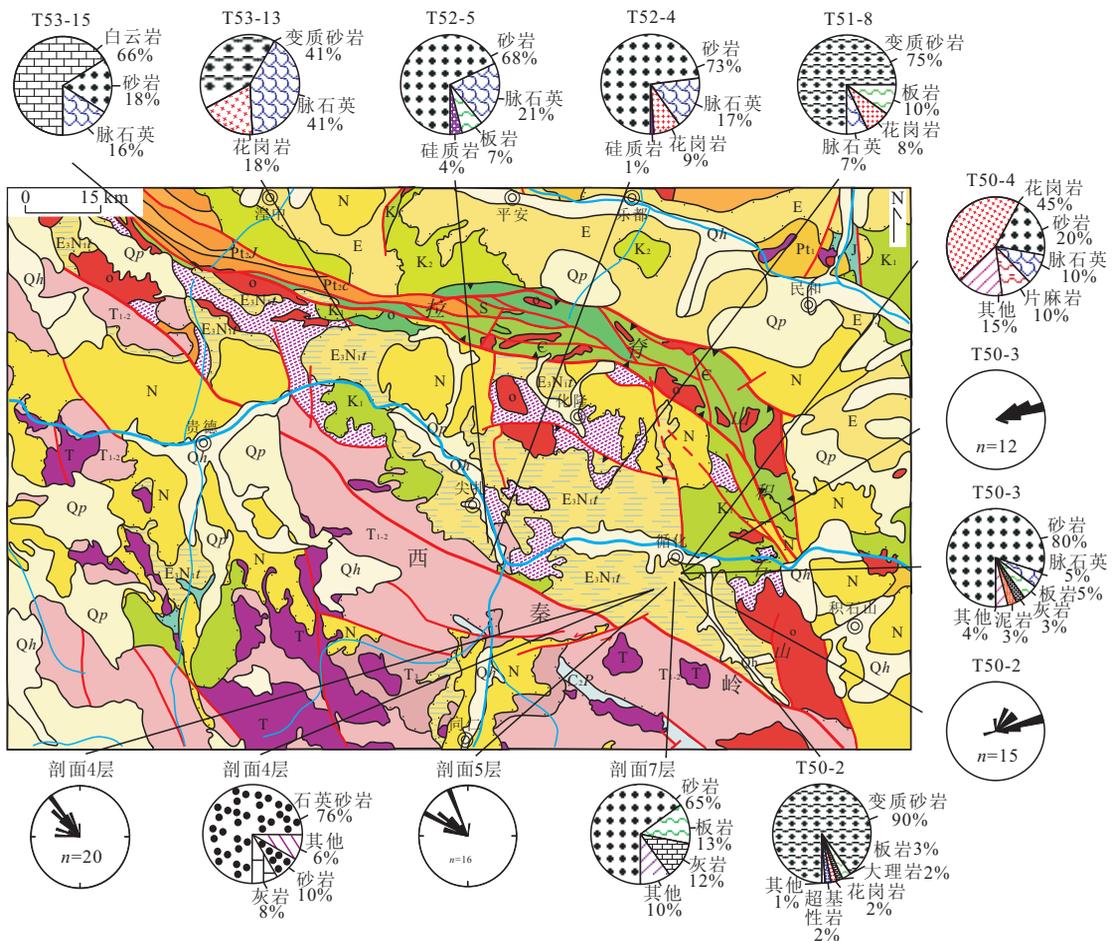


图 3 循化—化隆盆地他拉组时期砾石成分及古流向分布

Fig. 3 Distribution of gravel composition and paleocurrent direction during Tala formation in Xunhua-Hualong basin

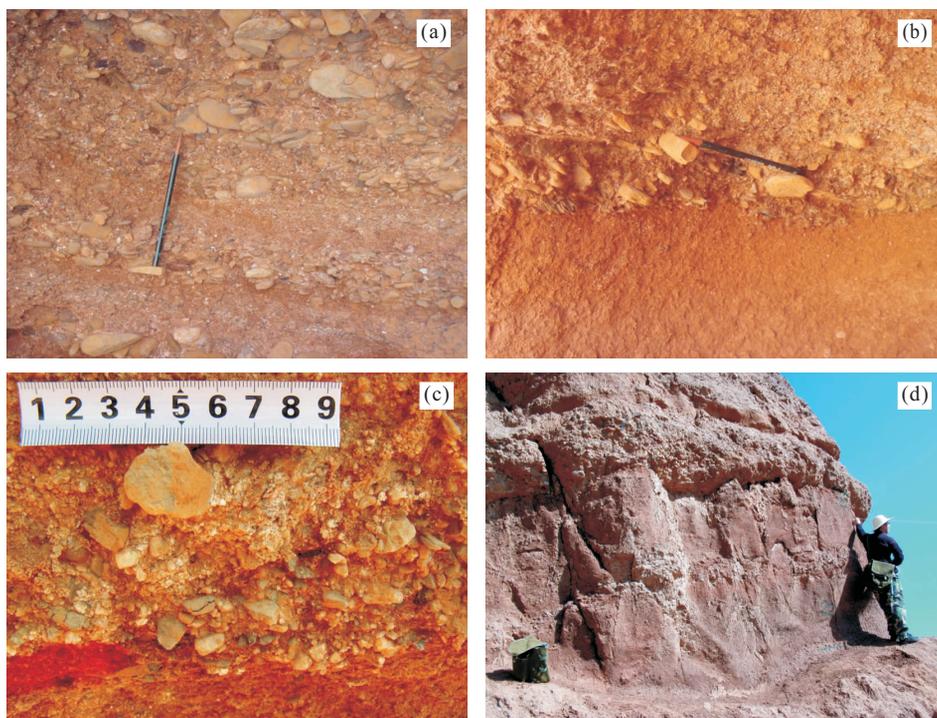


图4 循化—化隆盆地他拉组时期砾石层及砾石形态

Fig. 4 Map showing gravel layer and gravel shape during Tala formation in Xunhua-Hualong basin

a. 循化县南 T50-2, 他拉组下部层位的复成分砾岩层; b. 循化县南 T50-3, 他拉组上部含砾砂岩层, 砾石层减少, 砂岩层比例增大; c. 积石镇剖面第4层, 冲积扇相的扇根沉积, 叠瓦状砾石; d. 积石镇剖面第7层, 紫红色砂岩层夹砾石层

相的砾岩的古流方向主要为 NW 向、NE 向, 反映出他拉组同沉积时期盆地地势南高北低的特征, 这之前砾石成分的分析一致, 沉积物的物源来自于南部三叠系。

而同样位于循化南部的 T50-4 白垩纪早期河口群为一套巨厚层状灰紫色砾岩, 砾石成分: 花岗岩约 45%、灰绿色砂岩约 20%、片麻岩 13%、脉石英 12%、其他约 10%, 与他拉组的砾石成分相比, 砾石结构有明显不同, 物源区主要来自下伏的前寒武基底变质岩系而非西秦岭北缘逆冲带的三叠系复理石建造, 说明白垩纪早期西秦岭北缘逆冲带还未隆起。

盆地北部雄乡县出露的 T53-13、T53-15 他拉组湖相沉积的砾岩砾石成分: 白云岩约 66%、变质砂岩脉约 18%~40%、石英岩约 16%~41%, 花岗岩约 18%, 白云岩、石英岩和变质砂岩含量较高的岩石组合特征与拉脊山的中元古代蓟县纪花石山群和长城纪湟中群岩性构成一致, 反映物源来自北部拉脊山地区, 意味着他拉组时期拉脊山已经成为隆起区, 遭受剥蚀向循化—化隆盆地提供物源。

3.2.2 咸水河组、临夏组柳树段时期 (21.2~7.3 Ma) 咸水河组和临夏组柳树段主要分布于贵德盆地, 此外在循化—化隆盆地西北部、同仁盆地、

临夏盆地和西宁—民和盆地局部沉积(图 5)。循化—化隆盆地的南缘咸水河组和临夏组柳树段不发育, 西秦岭尕楞口的垭口盆地沉积中 T51-13 和 T51-15 的咸水河组和临夏组柳树段细砾复成分砾岩砾石成分组成: 脉石英约 50%~70%、灰绿色砂岩 10%~25%、黑色硅质岩 15%、板岩约 10%、花岗岩 6%~10%, 砾石成分显示有较好的成分分选, 反映物源相对较远, 经历一定距离的搬运; 砾石成分与三叠纪的古浪提组、果木沟组、江里沟组岩性组合相似, 物源仍然来自于南部, 由于靠近的 NE 向区域性左旋走滑断层活动时间为 56~60 Ma, 可能伴随大量热液沿裂隙贯入形成岩脉, 为垭口盆地提供沉积物源, 因此 2 个统计点的脉石英含量总体较高。

同仁盆地北部到同仁县北 T51-16、T51-17 和 T52-1 的咸水河组和临夏组柳树段复成分砾岩中, 砾石成分中灰色砂岩、变质砂岩约 65%、粉砂质板岩约 5%~27%、脉石英约 13%、灰白色花岗岩约 11%、灰岩约 11%。此外还有少量的硅质岩、泥岩等, 不同地点含量有所变化, 但成分结构基本一致, 物源显示出近源特点, 与尕楞口垭口盆地的物源显示出同源性。循化—化隆盆地南部咸水河组和临夏组柳树段的洪冲积相古流向以 NE、N 向为主, 反映

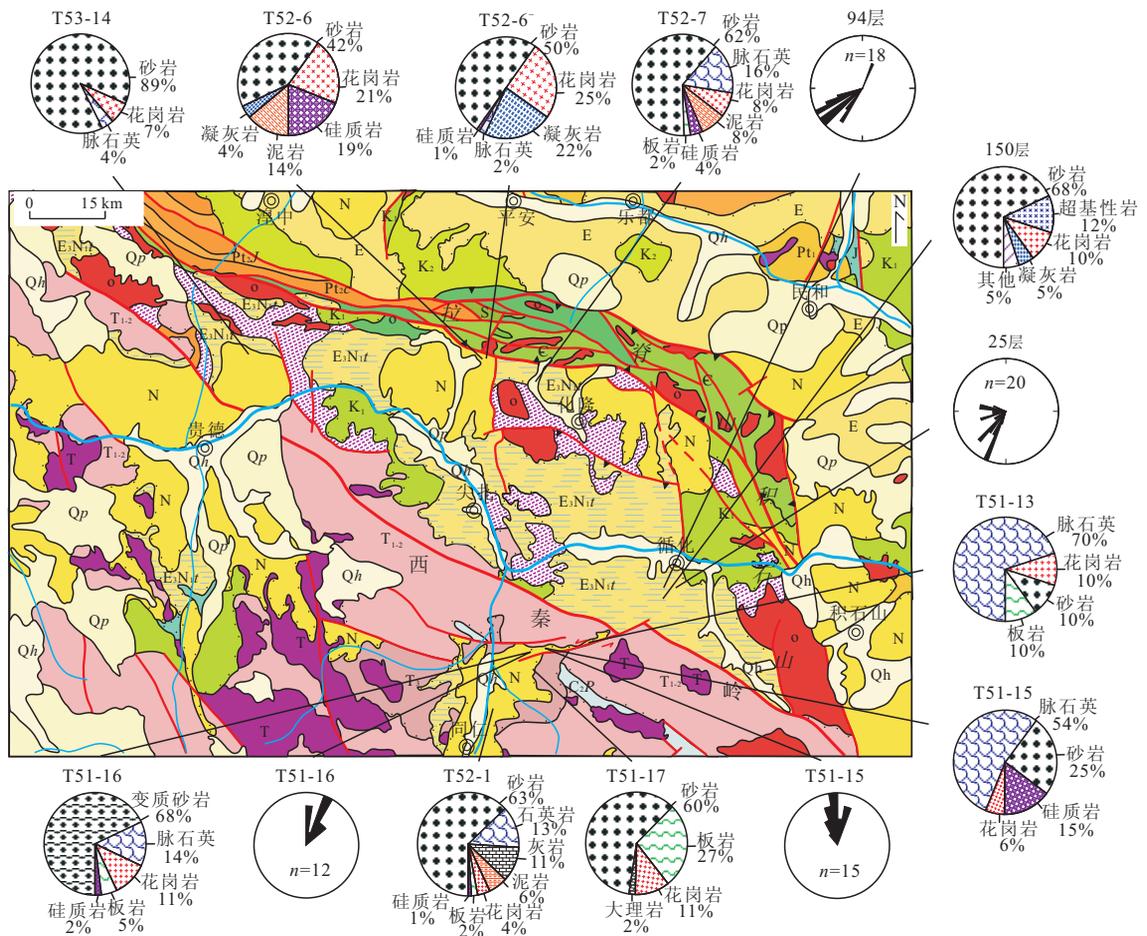


图 5 循化—化隆盆地咸水河组和临夏组柳树段时期砾石成分及古流向分布

Fig. 5 Distribution of gravel composition and paleocurrent direction during Xianshuihe formation and Linxia Liushu segment in Xunhua-Hualong basin

出咸水河组和临夏组柳树段时期继承了他拉组时期盆地地势南高北低的特征,这与之前砾石成分的分析一致,说明了咸水河组和临夏组柳树段南部的物源区为西秦岭北缘逆冲带。

循化县南部咸水河组和临夏组柳树段的砾石成分统计点砾石成分中砂岩约 68%、超基性岩约 12%、花岗岩 10%、凝灰岩 5%,砾石的岩石组合明显区别于尕楞口的咸水河组和临夏组柳树段的砾石结构特征,大量超基性、中性火山岩砾石和火山碎屑岩含量的明显增加,与盆地北部的拉脊山东段的寒武纪六道沟组、深沟组的岩性组合特征一致(1:25 万民和幅)。

循化盆地北缘阿岱三岔路口的拉脊山垭口 T52-6 和 T52-7 的咸水河组和临夏组柳树段砾石成分中砂岩 40%~60%、花岗岩 6%~25%、凝灰岩 4%~22%、石英岩 16%、硅质岩 4%~19%和泥质岩 8%~14%,大量火山岩砾石、火山碎屑岩、石英

岩砾石的增多,此外有一定量的硅质岩、花岗质岩石、泥岩.与拉脊山古生代的奥陶纪药水泉组、阿夷山组、花抱山组和寒武纪六道沟组、深沟组的岩性组合特征一致.而这一时期循化—化隆盆地中部咸水河组和临夏组柳树段的古流向以 SSW、SW 向为主,这与之前砾石成分的分析相统一,说明了咸水河组和临夏组柳树段中部以北的物源区皆来自拉脊山地区,反映出循化—化隆盆地的地势由他拉组时期南高北低的特征转变为咸水河组和临夏组柳树段时期北高南低的特征,揭示出在他拉组至向咸水河组和临夏组柳树段过渡的时间段内,拉脊山发生了较大规模的隆升,从而反转了盆地整体的地貌格局。

综上所述,循化—化隆盆地沉积岩的物源特征由下白垩统河口群的前寒武纪基底单一物源变为渐新统他拉组的周缘造山带岩系多物源,说明西秦岭北缘逆冲带的隆升时限介于早白垩世与渐新统他拉组的沉积时代之间,沉积相所记录的山麓洪积相以

及古流向的反转则揭示了拉脊山经历过渐新世晚期—中新世早期和中新世晚期两次幕式抬升作用。由于循化—化隆盆地缺失古近纪地层,对于西秦岭北缘逆冲带的隆升时代以及拉脊山是否发生过更早期的隆升作用这两个关键问题,笔者结合热年代学进一步研究。

4 磷灰石裂变径迹测年结果及分析

循化—化隆盆地周缘山系不同部位磷灰石裂变径迹年龄测试结果见表 1。

4.1 西秦岭北缘逆冲带裂变径迹年龄的地质意义 对来自循化—化隆盆地南部的西秦岭北缘逆冲

表 1 循化—化隆盆地磷灰石裂变径迹样品及年龄测试结果
Table 1 Apatite fission track dating ages in Xunhua basin

采样位置	样品号	高程 (m)	颗数 (N)	ρ_d (10^6 cm^{-2}) (Nd)	ρ_s (10^5 cm^{-2}) (Ns)	ρ_i (10^5 cm^{-2}) (Ni)	U ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	$P(\chi^2)$ (%)	P1 ($\text{Ma} \pm 1\sigma$) (%)	P2 ($\text{Ma} \pm 1\sigma$) (%)	P3 ($\text{Ma} \pm 1\sigma$) (%)	中值年龄 ($\text{Ma} \pm 1\sigma$)	岩性
拉目峡	T51-1	2 705	15	3.449 (3 524)	19.0 (705)	16.3 (606)	58	45.3				69.0±4.8	砂岩
	T51-2	2 698	15	3.431 (3 520)	6.69 (297)	7.82 (326)	23	79.2				50.6±4.7	片麻岩
	T51-3	2 567	15	3.413 (3 516)	24.4 (2 007)	26.0 (2 138)	89	1.4				54.6±3.4	片麻岩
	T51-4	2 425	15	3.396 (3 511)	7.57 (635)	10.2 (854)	34	1.7				42.7±3.6	片麻岩
	T51-5	2 303	15	3.378 (3 507)	6.02 (377)	7.12 (446)	24	53.6				49.2±4.0	片麻岩
	T51-6	2 195	15	3.360 (3 503)	7.21 (398)	10.6 (587)	38	4.7				39.3±3.7	混合花岗岩
	T51-7	2 115	15	3.343 (3 498)	9.98 (581)	18.4 (1 070)	67	0				31.0±2.9	片麻岩
西秦岭杂楞口	T51-9	2 624	50	3.325 (3 494)	28.1 (4 982)	16.9 (2 989)	62	0	69.3±6.8 (22.3)	97.0±8.0 (57.2)	144.4±18.9 (20.5)	97.0±5.9	砂岩
	T51-10	2 703	51	3.307 (3 490)	17.7 (4 862)	10.2 (2 817)	38	0	60.6±5.1 (9.5)	95.1±6.3 (55.3)	121.7±9.3 (35.2)	98.5±5.8	砂岩
	T51-11	2 794	55	3.289 (3 486)	16.1 (4 681)	7.50 (2 178)	29	0	55.7±8.7 (7.2)	112.7±12.6 (56.2)	146.9±24.7 (36.2)	118.8±6.9	砂岩
	T51-12	2 959	50	3.272 (3 481)	23.8 (4 332)	13.9 (2 531)	52	0	73.5±5.6 (32.1)	109.6±6.5 (67.9)		96.2±5.6	砂岩
	T51-13	3 097	15	3.254 (3 477)	34.3 (2 100)	26.0 (1 591)	97	0.1				73.9±4.0	花岗岩
T51-14	3 205	50	3.236 (3 473)	11.3 (2 753)	7.15 (1 741)	27	53.7	88.0±4.6 (100)			88.0±4.6	砂岩	
拉脊山	T53-1	3 670	15	3.219 (3 468)	28.5 (1 926)	15.2 (1 029)	58	24.5				103.4±5.9	花岗闪长岩
	T53-4	3 700	50	3.165 (3 456)	6.09 (1 048)	5.65 (972)	22	28.5	50.1±6.4 (51.6)		71.9±10.9 (48.4)	59.9±4.0	砂岩
	T53-5	3 603	48	3.148 (3 451)	6.95 (1 185)	7.29 (1 243)	27	11.8	40.7±2.7 (92)		81.2±15.0 (8)	43.2±3.1	砂岩
	T53-6	3 480	15	3.112 (3 443)	2.87 (199)	3.49 (242)	14	95.6				44.2±4.6	花岗斑岩
	T53-8	3 227	51	3.077 (3 434)	6.44 (1 134)	6.96 (1 225)	28	91.6	49.1±2.9 (100)			49.1±2.9	砂岩
	T53-10	2 935	50	3.041 (3 426)	9.14 (1 373)	11.6 (1 744)	46	0	25.8±4.5 (23.6)	43.7±3.3 (70.3)	81.9±13.2 (6.1)	40.4±2.9	砂岩

注: N 样品测试颗粒数; ρ_d 铀标准玻璃径迹密度, Nd 铀标准玻璃诱发径迹数; ρ_s 自发径迹密度, Ns 自发径迹数; ρ_i 诱发径迹密度, Ni 诱发径迹数; $P(\chi^2)$ 自由度为 N-1 时 χ^2 值的概率。

带砾楞口剖面的 1 件花岗岩磷灰石裂变径迹样品作为单一年龄处理,其余 5 件三叠系砂岩样品的颗粒裂变径迹年龄均使用 Binomfit 软件进行峰值拟合,除 T51-14 为单峰外,其他 4 件砂岩样品的磷灰石裂变径迹的 $P(\chi^2)$ 检验大都小于 1%,表明样品的裂变径迹年龄具有多组分特征,颗粒来自不同的源区.进行二项式峰值年龄拟合分组(如图 6),均具有 2~3 个峰值年龄, $P1: 55.7 \sim 88.0 \text{ Ma}$, $P2: 95.1 \sim 112.7 \text{ Ma}$, $P3: 121.7 \sim 146.5 \text{ Ma}$. 上述碎屑样品年龄范围介于早白垩世至始新世初,明显小于相应早三叠系沉积地层的年龄,说明了样品沉积后经历了热退火作用,但多组分的年龄结构特征反映样品沉积后只经历部分差异性退火作用,不同碎屑颗粒受

到后期热事件不同程度的改造,其中,裂变径迹的中值年龄和较老的 $P2$ 、 $P3$ 峰值年龄区间为受后期热事件影响的混合年龄,并不具有明确的地质意义,而最年轻的 $P1$ 峰值年龄可代表低退火温度颗粒完全退火后记录的最近构造热重置事件的年龄 (Brandon and Vance, 1992).

基于 5 件碎屑磷灰石裂变径迹都出现集中于 88.0~55.7 Ma 的 $P1$ 峰值年龄以及花岗岩样品 T51-13 年龄的 73.9 Ma 年龄值进行年龄-高程分析(图 7). 年龄-高程图所示(图 7),西秦岭北缘逆冲带白垩纪晚期到新生代隆升过程的规律性较为明显,存在一个折点将磷灰石裂变径迹年龄-高程曲线分为两段,处于折点之上的样品指示早期存在一

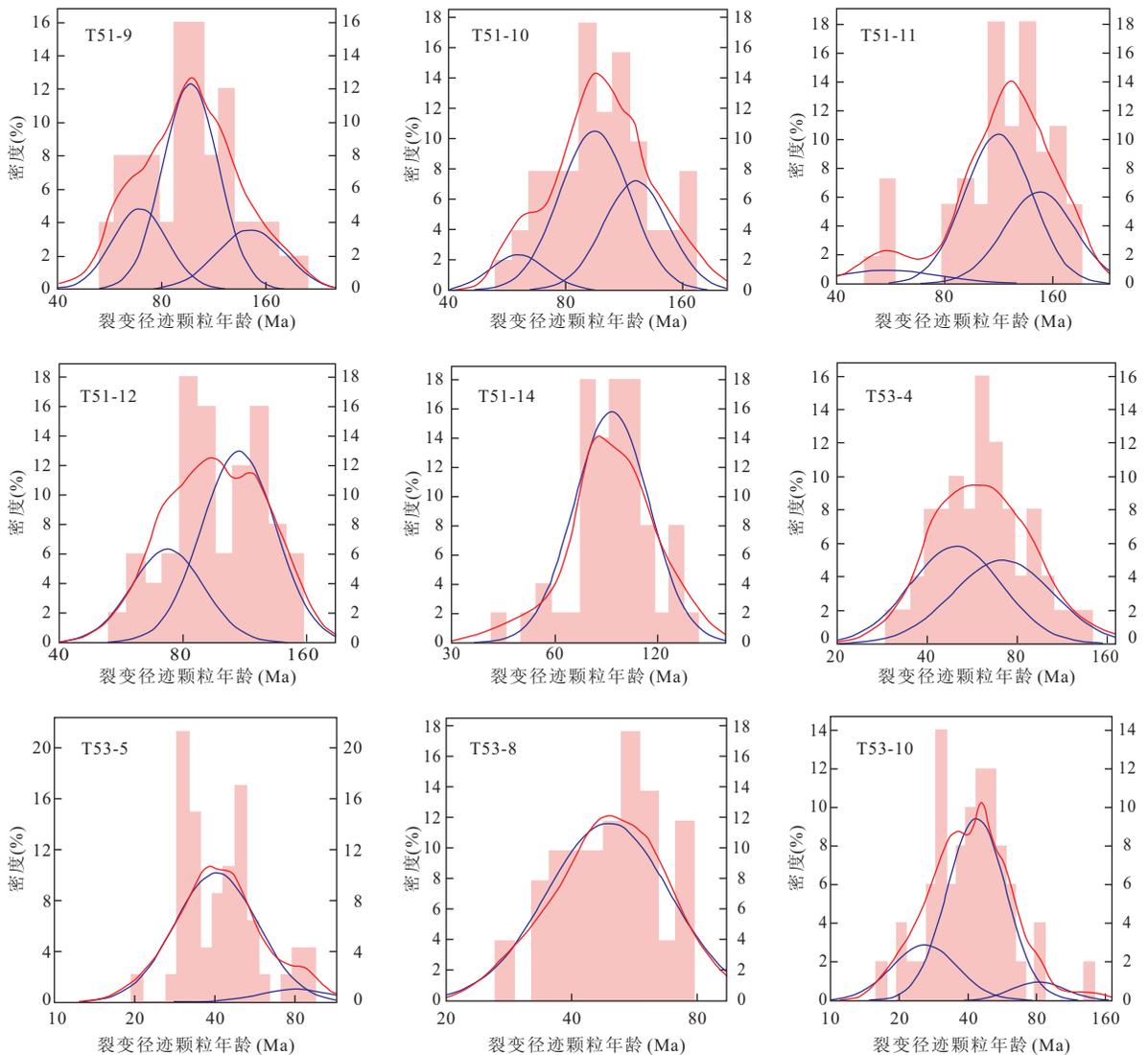


图 6 砂岩样品的碎屑磷灰石裂变径迹年龄峰值分布

Fig. 6 Peak fitting and distributions of sandstone detrital apatite fission track dating ages

红线为实际年龄分布,蓝线为二项式拟合峰值年龄分布

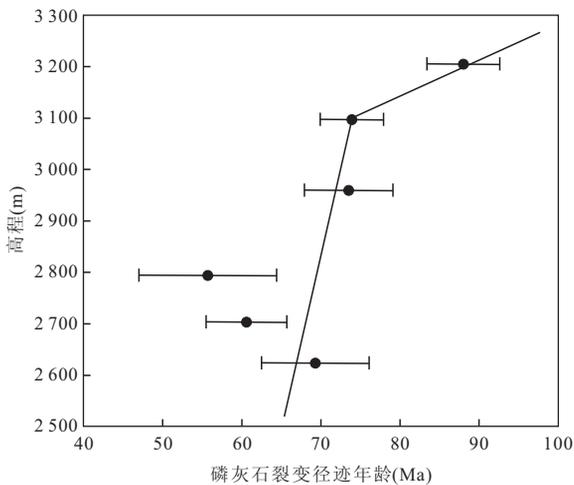


图7 尕楞口磷灰石裂变径迹年龄—高程曲线

Fig. 7 Profile of Galengkou apatite fission track age-elevation

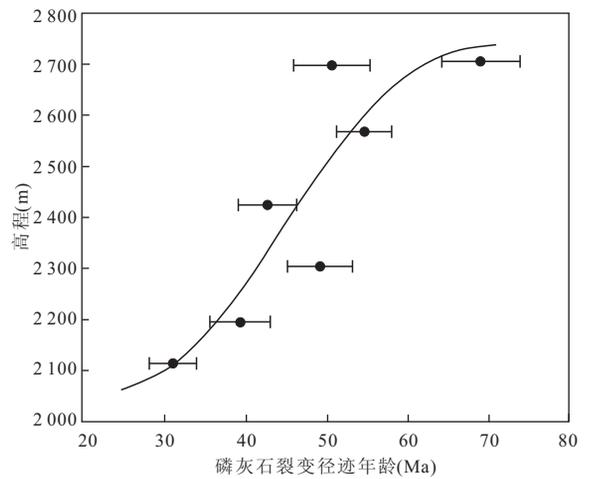


图8 拉目峡磷灰石裂变径迹年龄—高程曲线

Fig. 8 Profile of Lamuxia apatite fission track age-elevation

个相对长期的缓慢隆升过程,处于折点之下的样品反映了后期快速隆升的过程,折点指示的时间大致反映隆升的开始时间,由于经过部分退火带磷灰石会有一定程度的退火,真正的隆升时间略早于折点指示的时间(Green *et al.*, 1989)。假设样品以恒定的冷却速率经过部分退火带,样品开始隆升的时间 t_1 与折点样品表面年龄 t_2 存在如下关系: $t_1 = t_2 + T_{PAZ}/2V_c$, 其中: T_{PAZ} 部分退火带顶底部的温差为 $70\text{ }^\circ\text{C}$; V_c 为样品冷却速度(Wagner *et al.*, 1989)。

西秦岭北缘逆冲带磷灰石裂变径迹年龄—高程曲线显示出一个缓慢隆升被相对快速隆升更替的过程,前期的视隆升速率约为 8 m/Ma ,冷却速度为 $0.28\text{ }^\circ\text{C/Ma}$;后期的视隆升速率约为 93 m/Ma ,冷却速度为 $3.26\text{ }^\circ\text{C/Ma}$,折点样品表面年龄为 73.9 Ma ,可知开始快速隆升的时间约为 84 Ma 。表明西秦岭北缘逆冲带在约 84 Ma 之前为缓慢隆升期, $84.0\sim 55.7\text{ Ma}$ 间为相对快速隆升期,快速视隆升速度约为 93 m/Ma ,折点样品在 84 Ma 以前位于磷灰石早期部分退火带底部,现今被抬升至高出地表 3.1 km ,因此 84 Ma 以来西秦岭北缘逆冲带总体隆升幅度约为 6.1 km 。

其中的两件样品出现 55.7 Ma 和 60.6 Ma 的较年轻峰值年龄,并且均靠近 NE 向的区域性左旋走滑断层,可能反映近南北向挤压抬升期该区域性断裂活动的局部热影响。

4.2 盆地中部拉目峡裂变径迹年龄的地质意义

循化—化隆盆地中部拉目峡是一套以化隆岩群片麻岩为主的基底剥露区,不同高程的 7 件样品出现大约相对较集中的 $31\sim 69\text{ Ma}$ 的中心年龄,总体

上磷灰石裂变径迹年龄与高程呈现明显的正相关关系,即年龄随海拔的增高而增大(表 1,图 8),具体分为早期缓慢隆升、中期相对快速隆升和后期隆升速率减慢 3 个阶段的过程。

其中,早期 $51\sim 69\text{ Ma}$ 间的隆升速率极为缓慢约为 0.38 m/Ma ;中期 $39\sim 51\text{ Ma}$ 间隆升速率明显加快,根据“年龄—地形高差法”,可以给出同一块体内片麻岩相应年龄段的视隆升速率,通过线性回归分析得出线性方程为: $H(\text{m}) = 23.191 \times T(\text{Ma}) + 1341.147$,高程与年龄两者之间的相关性系数 $R = 0.713$,极为显著的线性相关性说明受到了同一构造隆升作用的事件的影响, $39\sim 51\text{ Ma}$ 间的平均隆升速率为 23 m/Ma ;进入后期约 $31\sim 39\text{ Ma}$ 隆升速率仅为 9 m/Ma ,隆升作用呈减慢趋势,反映这一期构造隆升逐渐衰退。

综上所述,循化—化隆盆地地区隆升开始于白垩纪末期约 69 Ma ,始新世约 51 Ma 开始进入相对较剧烈的抬升剥露期并且一直持续到始新世中期约 39 Ma ,之后隆升作用逐渐减弱,结束于渐新世约 31 Ma 。

4.3 拉脊山裂变径迹年龄的地质意义

拉脊山中脊两侧的磷灰石裂变径迹测年分析结果显示(表 1,图 9),拉脊山南坡 1 件花岗岩闪长岩年龄较老为 $103.4 \pm 5.9\text{ Ma}$;北坡 1 件花岗斑岩年龄为 44.2 Ma ,3 件砂岩碎屑样品的 P_1 年龄介于 $40.7\sim 50.1\text{ Ma}$,颗粒占测年磷灰石 50% 以上,为最大峰值;最北部的 1 件样品 T53-10 获得最年轻的 P_1 峰值年龄为 25.8 Ma 。砂岩样品较老的 P_2 、 P_3 峰值年龄反映了低铀含量的古老磷灰石在后期构造热事件中裂变径迹未受到彻底的热重置,峰值年龄不具有明显的地

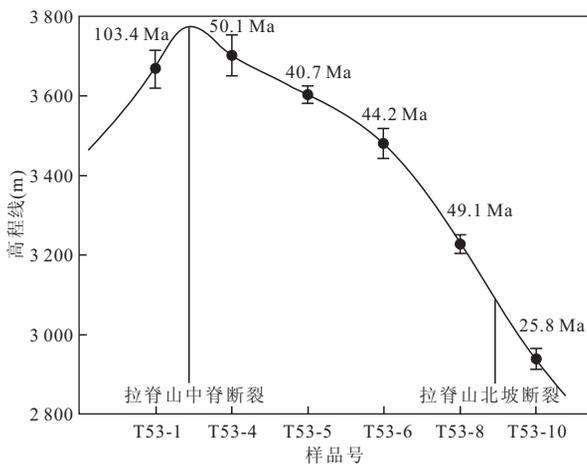


图 9 拉脊山磷灰石裂变径迹年龄分布

Fig. 9 Distribution of Laji mountain apatite fission track age

质意义,而 $P1$ 则反映了样品因剥露冷却或构造热事件后离开磷灰石裂变径迹封闭温度等温面的时间。

如图 9 的 $P1$ 峰值年龄—高程的关系所示,样品高程由南向北逐渐降低,但是磷灰石裂变径迹的 $P1$ 峰值年龄与高程无相关性,位于拉脊山主脊逆冲断裂下盘的样品 T53-1 具有明显较老的年龄为 103.4 Ma,而位于主脊逆冲断裂与拉脊山北坡断裂之间断块的 4 件样品,高差近 500 m,但其磷灰石裂变径迹的 $P1$ 峰值年龄相对一致,集中于约 40~50 Ma。这种特殊的空间分布规律表明,拉脊山主脊逆冲断裂带在 40~50 Ma 间发生强烈的逆冲活动,导致上盘岩石的快速冷却。6 件样品中位于拉脊山北坡逆冲断裂北侧上盘的样品同样出现了最年轻的 25.8 Ma 的 $P1$ 峰值年龄,位于逆冲断裂上盘的样品年龄明显小于下盘的样品,揭示出该逆冲断裂在渐新世 25 Ma 左右发生过逆冲活动,清楚地反映了拉脊山在古近纪末期的又一期断块构造隆升作用。

综上所述,拉脊山进入新生代先后经历过两期构造隆升:第一期始新世的年龄样品覆盖了拉脊山造山带的主体,揭示出拉脊山造山带始新世阶段存在快速构造隆升,更南的循化—化隆盆地中部拉目峡在始新世同样处于相对较剧烈的抬升剥露阶段,证实了循化—化隆盆地至拉脊山一带在始新世期间处于的隆升剥露阶段;第二期则是在前一期隆升作用的基础上在渐新世晚期发生的又一次更大规模的构造隆升作用。

5 盆山耦合过程的讨论

系统分析循化—化隆盆地及周缘造山带的裂变

径迹年代学的证据,结合盆地沉积环境、古流向和物源区分析,揭示出青藏高原东北缘的循化—化隆盆地基底、西秦岭北缘逆冲带和拉脊山经历过几次明显的构造抬升剥露冷却事件,控制了循化—化隆盆地的发育和演化。

5.1 白垩纪晚期—始新世中期青藏高原东北缘构造隆升剥露阶段(84~39 Ma)

第一期相对较强的构造隆升大约开始于白垩纪晚期约 84 Ma 并一直持续到始新世中期约 39 Ma。

最初,西秦岭尕楞口磷灰石裂变径迹峰值 $P1$ 年龄表明在约 84 Ma 之前缓慢隆升,隆升速率约为 8 m/Ma;84~56 Ma 间为相对快速隆升期,相当于晚白垩世—古新世晚期,快速隆升速度约为 93 m/Ma。郑德文等(2003)对于循化—化隆盆地东部的临夏盆地的热年代学研究,测得盆地中部位于下部相当于他拉组 and 咸水河组地层的浅埋藏未发生退火的碎屑磷灰石裂变径迹年龄 $P1$ 峰值年龄多介于 60.8~80.9 Ma,这种年龄组成与西秦岭尕楞口的峰值 $P1$ 年龄基本一致;物源分析也表明循化—化隆盆地白垩纪早期河口群物源主要来自下伏前寒武纪基底而非西秦岭三叠系复理石建造,都说明在晚白垩世—古新世时期 NW-SE 延伸长达 250 km 以上的西秦岭北缘逆冲带发生过大规模的整体性的构造隆升活动,之后成为循化—化隆盆地和临夏盆地的南部边界和蚀源区。西秦岭构造隆升受控于一系列的逆冲断层,形成前陆褶皱—冲断带,由于其隆升活动时间大致在晚白垩世—古新世晚期,因此最早的逆冲作用错断了循化—化隆盆地西南缘的白垩纪河口群并强烈地主导了其构造变形,但对盆地南缘文都大寺和隆务峡附近渐新世晚期沉积的他拉组变形影响不明显(图 1c, 10a),从而限制了逆冲活动的下限时间,即他拉组沉积的最老地层时代,这期构造隆升导致盆地新生代他拉组底部的角度不整合面的形成。Clark *et al.* (2010)通过对临夏盆地以南的西秦岭北缘构造带深成岩的磷灰石(U-Th)/He 测年结果也揭示出西秦岭北缘构造带在始新世 45~50 Ma 发生过构造隆升活动。

向北循化—化隆盆地中部的拉目峡隆升时间稍晚于西秦岭,开始于晚白垩世末期约 69 Ma 并延续到 31 Ma。始新世约 51 Ma 之前是极为缓慢的隆升期,隆升速率为 0.38 m/Ma;自 51 Ma 后进入了相对较剧烈的抬升剥露期并且持续到 39 Ma,隆升速率约为 23 m/Ma;之后的隆升作用明显减弱,结束于约 31 Ma。循化—化隆盆地拉目峡顶部可见渐新

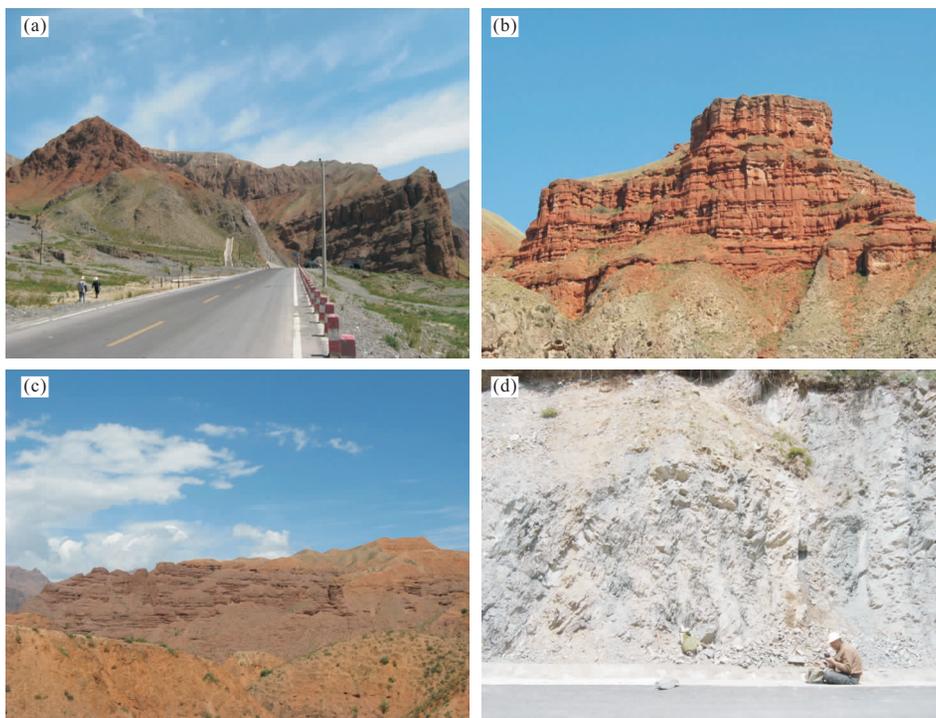


图 10 循化—化隆盆地地层角度不整合接触关系及逆冲褶皱构造

Fig. 10 Map showing stratigraphic angular unconformity and thrust fold in Xunhua-Hualong basin

a. 西南缘隆务峡三叠系复理石建造向北逆冲于他拉组紫红色复成分砾岩层上; b. 中部拉目峡紫红色他拉组角度不整合沉积于化隆岩群基底之上; c. 循化县附近山顶紫红色他拉组角度不整合沉积于白垩纪河口群灰紫红色砂砾岩层之上; d. 西秦岭构造带尕楞口的隆务河群砂板岩背斜褶皱(SW翼缓 NE翼陡)

世中期—中新世早期的他拉组红色河湖相碎屑岩角度不整合沉积于元古界化隆岩群和白垩纪河口群之上(图 10b 和 10c), 两者的角度不整合也证明了他拉组沉积前存在由于构造隆升所致的一个较长的沉积间断期。盆地中部的拉目峡化隆岩群基底的隆升时间滞后西秦岭北缘逆冲带的隆升时间约 15 Ma 的原因与应力由南向北的扩展传递有关。王志才等(2006)的研究表明西秦岭北缘逆冲带由南向北具有明显的分带特征: 后缘基底冲断带发育由三叠系隆务河群砂板岩组成的倒转褶皱强变形构造, 其中东山沟背斜 SW 翼缓且 NE 翼陡(图 10d); 向北的前缘褶皱冲断带, 发育白垩纪粉砂质泥岩夹砂砾岩组成的宽缓褶皱; 北部他拉组地层组成的前缘褶皱变形带, 明显变形主要发生在断裂面附近; 循化—化隆盆地内部地层变形逐渐变弱。西秦岭北缘前陆褶皱—冲断带构造变形南强北弱, 变形历史南长北短, 反映了区域应力在由南向北传递的过程中逐渐减弱。

更北的拉脊山主脊逆冲断裂带的这一期活动开始于始新世 50 Ma 左右并一直持续到约 40 Ma。拉脊山剖面 P1 峰值年龄相对一致, 集中于约 40~50 Ma, 这种特殊的空间分布规律是由于拉脊山主

脊逆冲断裂在始新世发生逆冲活动, 挟持于断裂间的断块整体构造隆升, 同时快速通过封闭等温面快速冷却所致。拉脊山造山带始新世阶段存在快速的构造隆升, 这与循化—化隆盆地内部拉目峡晚白垩纪约 69 Ma 发生了相对较剧烈的隆升时间相比, 滞后了约 19 Ma, 同样反映出整个青藏高原东北缘受到由南向北挤压的区域应力传递的滞后效应。

青藏高原东北缘这一期区域广泛存在的构造抬升事件可能与印度板块和欧亚板块初始俯冲碰撞的汇聚作用有关, 随着 SSW-NNE 向主应力的挤压作用进一步增强, 东北缘发生了构造变形, 强烈的构造运动使西秦岭逆断层持续活动向北逆冲, 这期构造抬升在青藏高原的东北缘具有一定的普遍性。Yin *et al.* (2002) 沉积地层学的研究证明青藏高原北部的地壳增厚发生时间早于渐新世, 在柴达木盆地南北缘的祁漫塔格和柴北逆冲断裂大约为 49 Ma。Jolivet *et al.* (2001) 对柴达木盆地周缘裂变径迹研究结果揭示出沿东昆仑断裂和阿尔金断裂在始新世—早渐新世(40±10 Ma) 发生了剥露速率的快速增加。Dupont-Nivet *et al.* (2004) 和 Horton *et al.* (2004) 通过古地磁研究认为西宁—民和盆地在晚古

近纪 29~45 Ma 发生了 24° 的顺时针旋转。王岸等 (2010) 和袁万明等 (2005) 研究, 发现古新世—始新世阶段东昆仑造山带存在区域性的构造隆升。因此, 包括循化—化隆盆地及周缘山系在内的青藏高原东北缘地区应该是印度—欧亚板块碰撞同时期的变形前缘, 导致两者具有隆升时间上的一致性。

这期构造隆升作用在循化—化隆盆地中部的拉日峡后期一直持续到约 31 Ma, 青藏高原东北部普遍记录了同时代的构造运动, 陇东、陇西盆地发育此时期的平行不整合或角度不整合 (甘肃地质志); 兰州盆地在约 32 Ma 发生基底隆升, 沉积环境由盐湖环境转变为山前洪积与辫状河流沉积, 形成巨厚的标志性的黄色砂岩层, 其与下伏地层呈平行不整合接触 (岳乐平等, 2000), 表明这一期的抬升过程也具有区域整体性。此时拉脊山东部的积石山还未隆起, 化隆—循化盆地向东与同时期的临夏盆地相连为一个统一的轻微弯折的大型西秦岭山前挠曲盆地, 两者具有相同的构造演化历史 (范马洁和宋春晖, 2003), 临夏盆地古地磁测年表明厚层红色风化壳的夷平面基底是在约 30 Ma 解体断陷沉积, 最老地层的古地磁年龄约为 29 Ma (方小敏等, 1997), 与循化—化隆盆地隆升作用的结束时间一致, 由此推测循化—化隆盆地拗陷接受沉积的初始时代应该在 30 Ma 左右, 循化—化隆盆地他拉组地层底部年龄最老应该不超过 30 Ma, 由他拉组上部实测剖面的沉积速率外延估算他拉组的总厚度约 700 m。

综合上述, 渐新世前的古近纪时期, 从西秦岭北缘逆冲带至拉脊山逆冲带的循化—化隆地区处于整体构造相对抬升阶段。西秦岭北缘逆冲带的隆升使之成为循化—化隆盆地和临夏盆地的南部边界和物源区; 拉脊山的隆升分割了西宁—民和盆地和循化—化隆盆地, 控制了两侧盆地形成不同的沉积演化并提供物源, 北部的西宁—民和盆地在此时期广泛沉积了巨厚的古近纪西宁群 E_{1-2x} (30~52.5 Ma) (刘梦儒, 1992; 方小敏等, 2007), 南部的循化—化隆地区受区域隆升作用的影响缺失了古新世—始新世的西宁群, 循化—化隆盆地拗陷沉积的初始时代为 30 Ma, 仅沉积了渐新世中期—中新世早期的他拉组 E_3N_{1r} (29.0~21.2 Ma) (图 11b)。

5.2 渐新世晚期—中新世早期拉脊山双向逆冲隆升阶段 (26~21 Ma)

第二期为拉脊山的双向逆冲隆升, 隆升开始于渐新世晚期约 26 Ma, 并可能延续到中新世早期约 21 Ma。

拉脊山中段北坡逆冲断裂的上盘样品出现了最

年轻 25.8 Ma 的 P_1 峰值年龄; 循化—化隆盆地他拉组物源分析表明北部物源多来自于拉脊山; 同时他拉组沉积环境为一套洪冲积扇相, 说明他拉组当时是近物源的山麓深水冲积环境形成的, 共同揭示了拉脊山构造带在古近纪末期约 26 Ma 开始的又一期构造隆升事件。隆升作用受控于逆冲断裂活动使被断层分隔的古生代寒武纪、奥陶纪的岩片开始双向逆冲隆升, 形成对冲的花状构造, 古近纪时期处于隆升剥蚀的原始夷平面也因此遭到破坏 (图 11c), 循化—化隆盆地受到隆升作用的影响快速拗陷接受沉积, 隆升持续到他拉组冲积扇相结束沉积, 约为 21 Ma。Lease *et al.* (2011) 对拉脊山东段进行了磷灰石 (U-Th)/He 研究, 中部主脊的测年结果多介于 21.6~22.7 Ma 之间, 也揭示出拉脊山构造带在中新世初期约 22 Ma 开始发生大规模的加速构造隆升剥蚀, 冷却速率达到了 10~20 °C/Ma, 剥蚀速率达到了 500~1 000 m/Ma。

此次隆升作用使循化—化隆盆地成为挟持于拉脊山逆冲带和西秦岭构造带之间的山前挤压型前陆盆地, 随着盆缘造山带的持续挤压导致循化—化隆盆地继续沉降, 盆地沉积范围逐渐扩大并过渡到淡水浅湖相环境, 21 Ma 以后拉脊山逆冲带和西秦岭构造带由构造隆升进入构造的相对稳定时期, 盆地进入补偿型前陆盆地沉积时期。

5.3 中新世晚期拉脊山快速隆升山间盆地加速充填阶段 (8~5 Ma)

第三期是拉脊山—积石山强烈的构造隆升, 隆升期约为 5~8 Ma。

循化—化隆盆地沉积相分析表明, 临夏组柳树段的湖相沉积转变为何王家段 (7.3~5.0 Ma) 下部的山麓洪积扇相沉积环境, 盆地的沉积速率明显增加, 沉积厚度加深, 指示中新世晚期约 8 Ma 拉脊山开始强烈的构造隆升并双向逆冲挤压于盆地的他拉组、咸水河组地层之上, 造成拉脊山南北两侧盆缘他拉组、咸水河组的地层变形和遭受剥蚀, 循化—化隆盆地也由山前盆地转变为山间盆地, 之后为何王家段上部的淡水湖相沉积所替代, 沉积表明经历了快速隆升, 后来隆升趋于平缓, 进入稳定沉积期。宋春晖等 (2001) 研究也表明了青藏高原东北缘 8 Ma 左右持续隆升, 贵德盆地剥蚀速率增加。Lease *et al.* (2011) 对拉脊山东部积石山的磷灰石 (U-Th)/He 研究结果显示年龄多介于 5.4~10.6 Ma 之间, 通过热模拟分析揭示出积石山石在中新世晚期约 13 Ma 开始发生大规模隆升剥蚀, 冷却速率达到了 5~

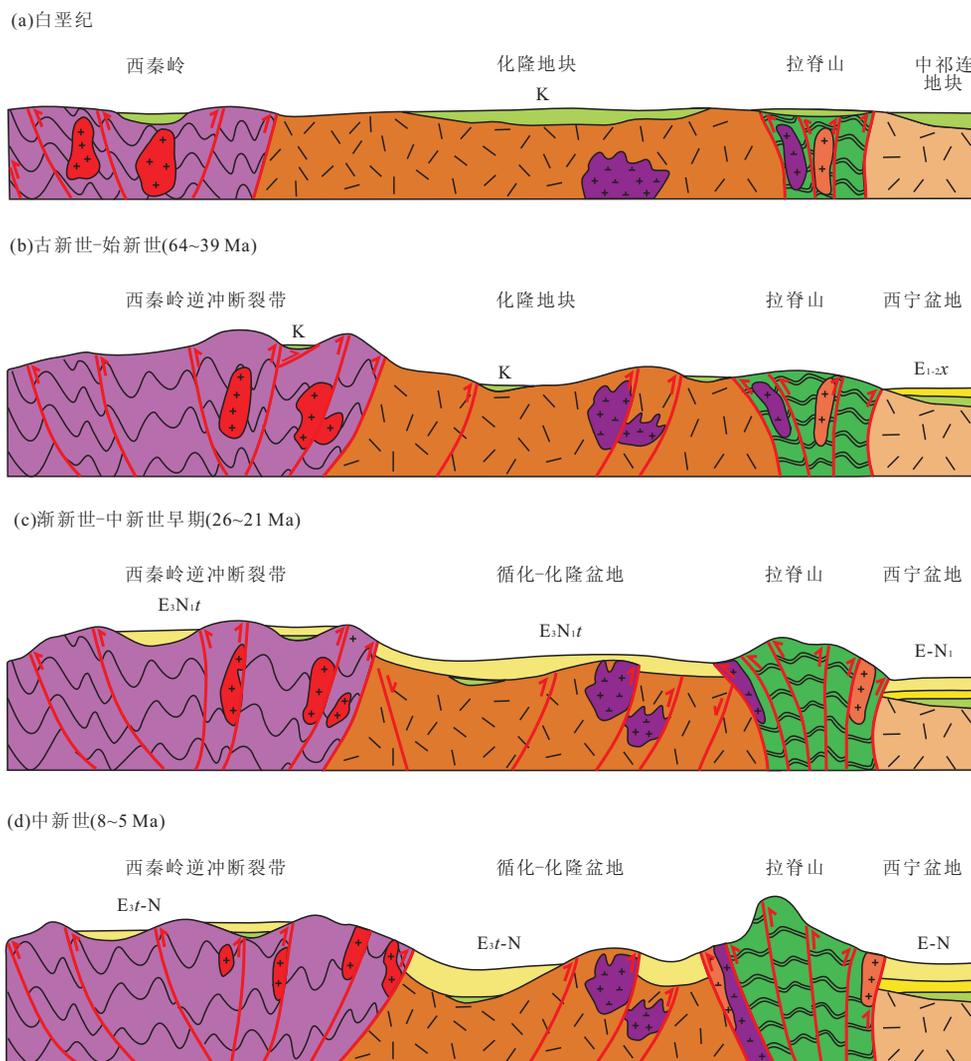


图 11 青藏高原东北缘循化—化隆盆地新生代的形成演化与盆地周缘山系隆升过程

Fig. 11 Schematic diagram on cenozoic formation and evolution of Xunhua-Hualong basin and uplifting of surrounding mountains in Northeast Qinghai-Tibet plateau

6 °C/Ma, 剥蚀速率达到了约 200 m/Ma. 郑德文等 (2003, 2006) 对临夏盆地和磷灰石裂变径迹研究也揭示出记录的两次青藏高原隆升时间, 分别约为 14 Ma 和 5.4~8.0 Ma. 郑德文等 (2005) 六盘山的裂变径迹研究表明约 8 Ma 发生过强烈的逆冲褶皱和断裂活动. 万景林等 (2001) 对阿尔金断裂北部阿克塞—当金山口的裂变径迹研究揭示出阿尔金断裂在约 8 Ma 发生强烈的快速剥蚀作用. 循化县南部的沉积物源由他拉组时期的西秦岭三叠系复理石建造转变为咸水河组和临夏组柳树段时期的拉脊山古生代岩系, 古流向也揭示出古地势由他拉组时期南高北低的特征转变为咸水河组和临夏组柳树段时期北高南低, 反映了此次隆升作用的强度和规模均大于前一期.

综上所述, 青藏高原东北缘的日月山—拉脊山—积石山造山带在内的约 8 Ma 发生一期影响广泛的构造隆升活动, 导致山体快速隆升, 使得循化—化隆盆地沉积范围的急剧缩小, 从而基本形成现今的盆山地貌格局.

6 结论

通过循化—化隆盆地新生代沉积及盆地基底和周缘山系磷灰石裂变径迹年代学分析揭示青藏高原东北缘新生代经历过 3 期隆升剥露事件:

(1) 循化—化隆盆地基底及拉脊山和西秦岭北缘构造带磷灰石裂变径迹年龄分析普遍记录了晚白垩世—始新世中期相对快速的区域性第一期隆升剥

露事件,西秦岭北缘快速抬升的起始时间为 84 Ma,受控于向北的逆冲抬升;向北到循化—化隆盆地中部拉目峡抬升的起始时间为 69 Ma;更北的拉脊山一带快速抬升期主要为 40~50 Ma,从而反映古新世—始新世中期的快速抬升由南向北逐渐扩展。

此次隆升作用结束于约 39 Ma,使西秦岭北缘构造带成为循化—化隆盆地的南部边界,拉脊山则分隔了西宁—民和盆地和循化—化隆盆地,此阶段循化—化隆盆地和临夏盆地为西秦岭山前统一的大型盆地,区域的整体抬升导致循化—化隆盆地和临夏盆地都缺失了北部西宁—民和盆地古近纪广泛沉积的西宁群,两个盆地形成于 30 Ma 左右并开始沉积他拉组地层。

(2)第二期隆升事件为拉脊山双向逆冲隆升,开始于渐新世晚期约 26 Ma,并可能延续到中新世早期约 21 Ma,古近纪时期处于隆升剥蚀的原始夷平面也因此遭到破坏,隆升作用使循化—化隆盆地成为挟持于拉脊山逆冲带和西秦岭构造带之间的山前挤压型前陆盆地,循化—化隆盆地开始大规模沉积巨厚的他拉组冲积扇相粗碎屑岩。

(3)通过循化—化隆盆地咸水河组和临夏组的沉积相分析、古流方向和砾石成分分析可知,第三期隆升事件是拉脊山构造带在约 8 Ma 发生的最大规模的双向逆冲隆升事件,这次事件直接导致循化—化隆盆地由前陆挤压盆地转变为山间盆地,并反转了前期南高北低的古地势,形成现今青藏高原东北缘的盆山地貌基本格局。

References

- Bernet, M., Brandon, M., Garver, J., et al., 2002. Determining the Zircon Fission-Track Closure Temperature. *Abstracts with Programs-Geological Society of America*, 34(5): 18.
- Brandon, M. T., Roden-Tice, M. K., Garver, J. I., 1998. Late Cenozoic Exhumation of the Cascadia Accretionary Wedge in the Olympic Mountains, Northwest Washington State. *Geological Society of America Bulletin*, 110(8): 985—1009. doi:10.1130/0016-7606(1998)110<0985:LCEOTC>2.3.CO;2
- Brandon, M. T., Vance, J. A., 1992. Age and Tectonic Evolution of the Olympic Subduction Complex as Inferred from Fission-Track Ages for Detrital Zircons. *Abstracts with Programs-Geological Society of America*, 24(5): 9.
- Chen, H. L., Fang, X. M., Li, J. J., et al., 1996. Fission Track Dating of Cenozoic Strata in Linxia Basin. *Nuclear Techniques*, 19(10): 632—634(in Chinese with English abstract).
- Chen, Y., Chen, S. Y., Zhang, P. F., et al., 2008. Discussion on Research Methods of Paleocurrent Direction. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 15(1): 37—40(in Chinese with English abstract).
- Clark, M. K., Farley, K. A., Zheng, D. W., et al., 2010. Early Cenozoic Faulting of the Northern Tibetan Plateau Margin from Apatite (U-Th)/He Ages. *Earth and Planetary Science Letters*, 296(1—2): 78—88. doi:10.1016/j.epsl.2010.04.051
- Deng, Z. L., Hou, Y. C., Gu, F. B., et al., 2000. Filling Characteristics, Sporopollen Assemblage and Palaeoclimate Variation of Tertiary Basins in the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Qinghai Geology*, (1): 43—53(in Chinese with English abstract).
- Dupont-Nivet, G., Horton, B. K., Butler, R. F., et al., 2004. Paleogene Clockwise Tectonic Rotation of the Xining-Lanzhou Region, Northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research, B (Solid Earth and Planets)*, 109(4): B04401. doi:10.1029/2003JB002620
- Fan, M. J., Song, C. H., 2003. A Sedimentary Environment Analysis and the Tectonic Uplift of Linxia Basin in the Northeast Margin of Tibetan Plateau. *Journal of Lanzhou University*, 39(3): 84—89(in Chinese with English abstract).
- Fang, X. M., Li, J. J., Zhu, J. J., et al., 1997. Cenozoic Sedimentary Strata Dating and Division of Linxia Basin in Gansu Province. *Chinese Science Bulletin*, 42(14): 1457—1471(in Chinese).
- Fang, X. M., Song, C. H., Dai, S., et al., 2007. Cenozoic Deformation and Uplift of the NE Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from High-resolution Magnetostratigraphy and Basin Evolution. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 230—242(in Chinese with English abstract).
- Fang, X. M., Song, C. H., Gao, J. P., et al., 2002. Late Cenozoic Mammalian Fossil Magnetostratigraphy in the Northeast Margin of Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 47(23): 1824—1828(in Chinese).
- Fang, X. M., Song, C. H., Yan, M. D., et al., 2004. High-precision Magnetic Stratigraphy of Guide Basin in Qinghai Records Late Cenozoic Uplift Stage of the Process in Northeastern Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Geophysical Society 20th Annual Meeting, Xi'an (in Chinese).
- Fang, X. M., Yan, M. D., Van der Voo, R., et al., 2005. Late Cenozoic Deformation and Uplift of the NE Tibetan Plateau: Evidence from High-resolution Magne-

- tostratigraphy of the Guide Basin, Qinghai Province, China. *Geological Society of America Bulletin*, 117 (9—10): 1208—1225. doi:10.1130/B25727.1
- Gansu Province Bureau of Geology and Mineral Resources, 1989. Regional Geology of Gansu Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Gleadow, A. J. W., Duddy, I. R., Vella, P., 1981. Early Cretaceous Volcanism and the Early Breakup History of Southeastern Australia: Evidence from Fission Track Dating of Volcaniclastic Sediments. *International Gondwana Symposium*, (5): 295—300.
- Green, P. F., Duddy, I. R., Laslett, G. M., et al., 1989. Thermal Annealing of Fission Tracks in Apatite 4. Quantitative Modelling Techniques and Extension to Geological Timescales. *Chemical Geology, Isotope Geoscience Section*, 79(2): 155—182. doi:10.1016/0168-9622(89)90018-3
- Gu, Z. G., Bai, S. H., Zhang, X. T., et al., 1992. Division and Correlation of the Neogene Rocks in the Guide and Hualong Basins in Qinghai Province. *Journal of Stratigraphy*, 16(2): 96—104(in Chinese).
- Guo, J. J., Han, W. F., 2008. Division of the Tectonic Sequences and Tectonic Evolution of Late Mesozoic-Cenozoic in Western Qinling. *Geological Survey and Research*, 31(4): 285—290(in Chinese with English abstract).
- Horton, B. K., Dupont-Nivet, G., Zhou, J., et al., 2004. Mesozoic-Cenozoic Evolution of the Xining-Minhe and Dangchang Basins, Northeastern Tibetan Plateau; Magnetostratigraphic and Biostratigraphic Results. *Journal of Geophysical Research, B (Solid Earth and Planets)*, 109(4): B04402. doi:10.1029/2003JB002913
- Huang, C. S., Li, C. A., Tang, X. M., et al., 1998. Asymmetric Landform in Huangshui River Basin and Uplift of Qinghai-Tibet Plateau-Qilian Mountains. *Jiangxi Geology*, 12(4): 251—256(in Chinese with English abstract).
- Hurford, A. J., 1986. Cooling and Uplift Patterns in the Lepontine Alps, South-Central Switzerland, and an Age of Vertical Movement on the Insubric Fault Line. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(4): 413—427. doi:10.1007/BF00374424
- Ji, J. L., Zhang, K. X., Qiang, T., et al., 2010. Magnetostratigraphy of the Neogene Strata in Xunhua Basin, Qinghai Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 803—810(in Chinese with English abstract).
- Jolivet, M., Brunel, M., Seward, D., et al., 2001. Mesozoic and Cenozoic Tectonics of the Northern Edge of the Tibetan Plateau: Fission-Track Constraints. *Tectonophysics*, 343(1—2): 111—134. doi:10.1016/S0040-1951(01)00196-2
- Lease, R. O., Burbank, D. W., Clark, M. K., et al., 2011. Middle Miocene Reorganization of Deformation along the Northeastern Tibetan Plateau. *Geology*, 39(4): 359—362. doi:10.1130/G31356.1
- Li, J. J., Fang, X. M., Ma, H. Z., et al., 1996. Late Cenozoic Landscape Evolution of the Yellow River and Uplift of Qinghai-Tibet Plateau. *Science in China (Series D)*, 26(4): 316—322(in Chinese).
- Liu, M. R., 1992. Stratigraphic Sequence and Fossil Assemblage of Neogene System in Xining-Minhe Basin. *Qinghai Geology*, (2): 1—18(in Chinese with English abstract).
- Liu, S. F., Zhang, G. W., Heller, P. L., 2007. Cenozoic Basin Development and Indication of Plateau Growth in Xunhua-Guide. *Science in China (Series D)*, 37(S1): 235—248(in Chinese).
- Lu, H. Y., An, Z. S., Wang, X. Y., et al., 2004. Recent 14 Ma Geomorphological Evidence Staged Uplift in Northeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau. *Science in China (Series D); Earth Sciences*, 34(9): 855—857(in Chinese).
- Naeser, C. W., 1979. Thermal History of Sedimentary Basins; Fission-track Dating of Subsurface Rocks. *Special Publication Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, (26): 109—112.
- Pan, B. T., 1994. A Study on the Geomorphic Evolution and Development of the Upper Reaches of Yellow River in Guide Basin. *Arid Land Geography*, 17(3): 43—50(in Chinese with English abstract).
- Pan, B. T., Li, J. J., Cao, J. X., et al., 1996. Study on the Geomorphic Evolution and Development of the Yellow River in the Hualong Basin. *Mountain Research*, 14(3): 153—158(in Chinese with English abstract).
- Song, C. H., Fang, X. M., Gao, J. P., et al., 2001. Tectonic Uplift and Sedimentary Evolution of the Guide Basin in the Northeast Margin of Tibetan Plateau in Cenozoic Era. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(4): 493—500(in Chinese with English abstract).
- Song, C. H., Fang, X. M., Li, J. J., et al., 2003a. Pliocene Sedimentary Environment of the Guide Basin on the Northeast Margin of the Qinghai-Tibet Plateau and Its Significance. *Quaternary Sciences*, 23(1): 92—102(in Chinese with English abstract).
- Song, C. H., Fang, X. M., Li, J. J., et al., 2003b. Sedimenta-

- ry Evolution of the Guide Basin in the Late Cenozoic and the Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Review*, 49(4): 337—346 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. Y., Zhao, Y. N., He, Z. S., 1984. The Oligocene-Miocene Palynological Assemblages from the Xining-Minhe Basin, Qinghai Province. *Geological Review*, 30(3): 207—216 (in Chinese with English abstract).
- Wagner, G. A., Gleadow, A. J. W., Fitzgerald, P. G., 1989. The Significance of the Partial Annealing Zone in Apatite Fission-Track Analysis: Projected Track Length Measurements and Uplift Chronology of the Transantarctic Mountains. *Chemical Geology, Isotope Geoscience Section*, 79(4): 295—305. doi: 10.1016/0168—9622(89)90035—3
- Wan, J. L., Wang, Y., Li, Q., et al., 2001. FT Evidence of Northern Altyn Uplift in Late-Cenozoic. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 20(4): 222—224 (in Chinese with English abstract).
- Wang, A., Wang, G. C., Zhang, K. X., et al., 2010. An Early Cenozoic Tectonic Event in Eastern Kunlun Orogen, Evidence from Detrital Fission Track Geochronology. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 737—746 (in Chinese with English abstract).
- Wang, E. Q., Zhang, Q., Burchfiel, C. B., 2000. The Lajishan Fault Belt in Qinghai Province: A Mult-Staged Uplifting Structural Window. *Scientia Geologica Sinica*, 35(4): 493—500 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., 2002. A New Approach to Determine the Exhumation History of the Sediment Provenance: Detrital Zircon and Apatite Fission-Track Thermochronology. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 35—40 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., Zhang, K. X., Cao, K., et al., 2010. Expanding Processes of the Qinghai-Tibet Plateau during Cenozoic: An Insight from Spatio-Temporal Difference of Uplift. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 713—727 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. X., Li, J. J., Song, C. H., et al., 2006. Cenozoic Uplift of West Qinling, Northeast Margin of Tibetan Plateau: The Record of Detrital Apatite Fission Track Data in Tianshui Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(6): 783—789 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. C., Zhang, P. Z., Zhang, G. L., et al., 2006. Tertiary Tectonic Activities of the North Frontal Fault Zone of the West Qinling Mountains: Implications for the Growth of the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 119—135 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. X., 1993. On the Overthrust Zone in the North Margin of the Lajishan, the Southern Qilian Mountains. *Petroleum Geology & Experiment*, 15(2): 138—145 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Rumelhart, P. E., Butler, R., et al., 2002. Tectonic History of the Altyn Tagh Fault System in Northern Tibet Inferred from Cenozoic Sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 114(10): 1257—1295. doi: 10.1130/0016—7606(2002)114<1257:THOTAT>2.0.CO;2
- Yuan, D. Y., Zhang, P. Z., Fang, X. M., et al., 2007. Late Cenozoic Tectonic Deformation of the Linxia Basin, Northeastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 243—250 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, D. Y., Zhang, P. Z., Lei, Z. S., et al., 2005. A Preliminary Study on the New Activity Features of the Lajishan Mountain Fault Zone in Qinghai Province. *Earthquake Research in China*, 21(1): 93—102 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, W. M., Dong, J. Q., Wang S. C., et al., 2005. Apatite Fission Track Analysis for Revealing Tectonic Evolution of the South-Block in Eastern Kunlun Mountains, Northern Qinghai-Tibet Plateau. *Nuclear Techniques*, 28(9): 707—711 (in Chinese with English abstract).
- Yue, L. P., Heller, F., Qiu, Z. X., et al., 2000. Tertiary Magnetostratigraphy and Paleoclimatic Records in Lanzhou Basin. *Chinese Science Bulletin*, 45(18): 1998—2003 (in Chinese).
- Zeng, G. C., Qiu, J. X., Zhu, Y. H., 1997. Ophiolitic Suite of Lajishan Orogenic Belt and Its Paleotectonic Setting. *Qinghai Geology*, (1): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Y., Zhang, K. X., Ji, J. L., et al., 2010. Oligocene-Pliocene Sedimentary Facies Analysis and Sedimentary Evolution of Xunhua Basin in Northeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 774—788 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Cao, K., et al., 2008. Cenozoic Main Uplift Event of the Tibetan Plateau: Sedimentary Response and Record of Thermochronology. *Science in China (Series D)*, 38(12): 1575—1588 (in Chinese).
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Ji, J. L., et al., 2010. Paleogene-Neogene Stratigraphic Realm and Sedimentary Sequence

- of the Qinghai-Tibet Plateau and Their Response to Uplift of the Plateau. *Science in China (Series D)*, 40 (12): 1632—1654(in Chinese).
- Zhang, P. Z., Zheng, D. W., Yin, G. M., et al., 2006. Discussion on Late Cenozoic Growth and Rise of Northeastern Margin of the Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 26 (1): 5—13(in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. S., Feng, G. S., Gao, S., et al., 2003. Metamorphic Core Complex Structure and Uplifting Mechanism in Lajishan-Hualong Area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(4): 407—413(in Chinese with English abstract).
- Zheng, D. W., Zhang, P. Z., Wan, J. L., et al., 2003. Late Cenozoic Tectonic Deformation Sequence in the Northeast Margin of Qinghai-Tibet Plateau-Debris Apatite Fission Track Record of Linxia Basin. *Science in China (Series D)*, 33(S1): 190—198(in Chinese).
- Zheng, D. W., Zhang, P. Z., Wan, J. L., et al., 2005. Apatite Fission Track Evidence for the Thermal History of the Liupanshan Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 48 (1): 157—164(in Chinese with English abstract).
- Zheng, D. W., Zhang, P. Z., Wan, J. L., et al., 2006. Tectonic Events, Climate and Conglomerate: Example from Jishishan Mountain and Linxia Basin. *Quaternary Sciences*, 26 (1): 63—69 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, G. Z., Li, Z. L., 2001. Feature and Evolution History of Lajishan Rift Zone. *Acta Geologica Gansu*, 10(1): 26—31(in Chinese with English abstract).
- Zuo, G. Z., Li, Z. L., Zhang, C., 2001. Lajishan Tectonic Zone of Qinghai Province: Rift or Tectonic Window? —To Discuss with Prof. Wang Erqi. *Geological Review*, 47(6): 561—566(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈怀录, 方小敏, 李吉均, 等, 1996. 临夏盆地新生代地层裂变径迹年龄测定. *核技术*, 19(10): 632—634.
- 陈妍, 陈世悦, 张鹏飞, 等, 2008. 古流向的研究方法探讨. *断块油气田*, 15(1): 37—40.
- 邓中林, 侯元才, 古风宝, 等, 2000. 青海东北部第三纪西宁—贵德—化隆盆地充填特征、孢粉组合方式与古气候演变. *青海地质*, (1): 43—53.
- 范马洁, 宋春晖, 2003. 青藏高原东北缘临夏盆地王家山地区沉积环境分析与构造隆升. *兰州大学学报*, 39(3): 84—89.
- 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等, 1997. 甘肃临夏盆地新生代地层绝对年代测定与划分. *科学通报*, 42(14): 1457—1471.
- 方小敏, 宋春晖, 戴霜, 等, 2007. 青藏高原东北部阶段性变形隆升: 西宁、贵德盆地高精度磁性地层和盆地演化记录. *地学前缘*, 14(1): 230—242.
- 方小敏, 宋春晖, 高军平, 等, 2002. 青藏高原东北边缘晚新生代哺乳动物化石的磁性地层学. *科学通报*, 47(23): 1824—1828.
- 方小敏, 宋春晖, 颜茂都, 等, 2004. 青海贵德盆地高精度磁性地层记录的晚新生代青藏高原东北部阶段性隆起过程. 西安: 中国地球物理学会第二十届年会.
- 甘肃省地质矿产局, 1989. 甘肃省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 谷祖纲, 白生海, 张显庭, 等, 1992. 青海省贵德、化隆两盆地新第三系的划分与对比. *地层学杂志*, 16(2): 96—104.
- 郭进京, 韩文峰, 2008. 西秦岭晚中生代—新生代构造层划分及其构造演化过程. *地质调查与研究*, 31(4): 285—290.
- 黄长生, 李长安, 唐小明, 等, 1998. 湟水河流域不对称地貌与青藏高原—祁连山隆升. *江西地质*, 12(4): 251—256.
- 季军良, 张克信, 强泰, 等, 2010. 青海循化盆地新近纪磁性地层学. *地球科学—中国地质大学学报*, 35(5): 803—810.
- 李吉均, 方小敏, 马海洲, 等, 1996. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起. *中国科学(D辑)*, 26(4): 316—322.
- 刘梦儒, 1992. 西宁—民和盆地上第三系层序及所含化石. *青海地质*, (2): 1—18.
- 刘少峰, 张国伟, Heller, P. L., 2007. 循化—贵德地区新生代盆地发育及其对高原增生的指示. *中国科学(D辑)*, 37(S1): 235—248.
- 鹿化煜, 安芷生, 王晓勇, 等, 2004. 最近 14 Ma 青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据. *中国科学(D辑)*, 34(9): 855—857.
- 潘保田, 1994. 贵德盆地地貌演化与黄河上游发育研究. *干旱区地理*, 17(3): 43—50.
- 潘保田, 李吉均, 曹继秀, 等, 1996. 化隆盆地地貌演化与黄河发育研究. *山地研究*, 14(3): 153—158.
- 宋春晖, 方小敏, 高军平, 等, 2001. 青藏高原东北部贵德盆地新生代沉积演化与构造隆升. *沉积学报*, 19(4): 493—500.
- 宋春晖, 方小敏, 李吉均, 等, 2003a. 青藏高原东北部贵德盆地上新世沉积环境分析及其意义. *第四纪研究*, 23(1): 92—102.
- 宋春晖, 方小敏, 李吉均, 等, 2003b. 青海贵德盆地晚新生代沉积演化与青藏高原北部隆升. *地质论评*, 49(4): 337—346.
- 孙秀玉, 赵英娘, 何卓生, 1984. 青海西宁—民和盆地渐新世至中新世孢粉组合. *地质论评*, 30(3): 207—216.
- 万景林, 王瑜, 李齐, 等, 2001. 阿尔金山北段晚新生代山体抬

- 升的裂变径迹证据. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 222—224.
- 王岸, 王国灿, 张克信, 等, 2010. 东昆仑造山带新生代早期构造事件的碎屑裂变径迹年代学证据. 地球科学——中国地质大学学报, 35(5): 737—746.
- 王二七, 张旗, Burchfiel, C. B., 2000. 青海拉鸡山: 一个多阶段抬升的构造窗. 地质科学, 35(4): 493—500.
- 王国灿, 2002. 沉积物源区揭露历史分析的一种新途径——碎屑锆石和磷灰石裂变径迹热年代学. 地质科技情报, 21(4): 35—40.
- 王国灿, 张克信, 曹凯, 等, 2010. 从青藏高原新生代构造隆升的时空差异性看青藏高原的扩展与高原形成过程. 地球科学——中国地质大学学报, 35(5): 713—727.
- 王修喜, 李吉均, 宋春晖, 等, 2006. 青藏高原东北缘西秦岭新生代抬升——天水盆地碎屑颗粒磷灰石裂变径迹记录. 沉积学报, 24(6): 783—789.
- 王志才, 张培震, 张广良, 等, 2006. 西秦岭北缘构造带的新生代构造活动——兼论对青藏高原东北缘形成过程的指示意义. 地学前缘, 13(4): 119—135.
- 杨中轩, 1993. 南祁连拉脊山北缘逆冲推覆构造带. 石油实验地质, 15(2): 138—145.
- 袁道阳, 张培震, 方小敏, 等, 2007. 青藏高原东北缘临夏盆地晚新生代构造变形及过程. 地学前缘, 14(1): 243—250.
- 袁道阳, 张培震, 雷中生, 等, 2005. 青海拉脊山断裂带新活动特征的初步研究. 中国地震, 21(1): 93—102.
- 袁万明, 董金泉, 王世成, 等, 2005. 东昆仑南部带磷灰石裂变径迹分析的地质意义. 核技术, 28(9): 707—711.
- 岳乐平, Heller, F., 邱占祥, 等, 2000. 兰州盆地第三系磁性地层年代与古环境记录. 科学通报, 45(18): 1998—2003.
- 曾广策, 邱家骧, 朱云海, 1997. 拉鸡山造山带的蛇绿岩套及古构造环境. 青海地质, (1): 1—6.
- 张槌钰, 张克信, 季军良, 等, 2010. 青藏高原东北缘循化盆地渐新世—上新世沉积相分析与沉积演化. 地球科学——中国地质大学学报, 35(5): 774—788.
- 张克信, 王国灿, 曹凯, 等, 2008. 青藏高原新生代主要隆升事件: 沉积响应与热年代学记录. 中国科学(D辑), 38(12): 1575—1588.
- 张克信, 王国灿, 季军良, 等, 2010. 青藏高原古近纪—新近纪地层分区与序列及其对隆升的响应. 中国科学(D辑): 地球科学, 40(12): 1632—1654.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 等, 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论. 第四纪研究, 26(1): 5—13.
- 张旺生, 冯光胜, 高山, 等, 2003. 拉脊山—化隆变质核杂岩构造及其隆升机制探讨. 地球科学——中国地质大学学报, 28(4): 407—413.
- 郑德文, 张培震, 万景林, 等, 2003. 青藏高原东北边缘晚新生代构造变形的时序——临夏盆地碎屑颗粒磷灰石裂变径迹记录. 中国科学(D辑), 33(S1): 190—198.
- 郑德文, 张培震, 万景林, 等, 2005. 六盘山盆地热历史的裂变径迹证据. 地球物理学报, 48(1): 157—164.
- 郑德文, 张培震, 万景林, 等, 2006. 构造、气候与砾岩——以积石山和临夏盆地为例. 第四纪研究, 26(1): 63—69.
- 左国朝, 李志林, 2001. 拉鸡山裂谷带特征及演化. 甘肃地质学报, 10(1): 26—31.
- 左国朝, 李志林, 张崇, 2001. 青海拉鸡山构造带是裂谷还是构造窗——与王二七研究员商榷. 地质论评, 47(6): 561—566.