南秦岭大巴山和米仓山-汉南穹隆中生代隆升幅度

李永东, 熊熊*, 冯雅杉

中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074

* 通讯作者, E-mail: xxiong@cug.edu.cn

收稿日期: 2021-08-07; 收修改稿日期: 2021-10-22; 接受日期: 2021-11-04; 网络版发表日期: 2021-12-28

国家自然科学基金项目(批准号: 41731072、41574095)资助

摘要 确定大陆造山带在地质时期的隆升幅度对认识大陆造山过程、动力学机制, 以及气候环境变化等问题具有重要的科学意义. 秦岭造山带是中国大陆主要造山带之一, 对其隆升过程的认识是理解中国, 乃至东亚大陆构造格局及深部动力学的关键. 研究表明, 南秦岭造山带大巴山和米仓山-汉南穹隆在中生代发生隆起, 但是, 隆起的幅度缺乏定量约束. 文章基于四川盆地北缘中生代山前盆地沉积数据, 通过模拟岩石圈挠曲变形, 获得南秦岭造山带大巴山和米仓山-汉南穹隆中生代山体隆升量及相应的山前盆地岩石圈有效弹性厚度(T_e). 结果显示, 大巴山和米仓山-汉南穹隆在中侏罗世和早白垩世分别隆升了~1220和~880m. 山体的现今高程是在此基础上于新生代继承性构造隆升的结果. 不同构造单元隆升时限和幅度的差异表明南秦岭造山带中生代和新生代的隆升进程和驱动机制是不同的: 中生代隆升受控于自东向西的华北-华南陆块汇聚, 新生代隆升则由西南-东北向的印度板块对欧亚大陆的挤压驱动. 四川盆地北缘从中侏罗世到早白垩世岩石圈强度发生了弱化, T_e 由73km减小为57km, 其机制可能源于山体作用下的挠曲应力加载.

关键词 南秦岭造山带, 大巴山, 米仓山-汉南穹隆, 中生代, 隆升

1 引言

秦岭造山带地处中国大陆内腹, 是连接青藏高原、华北克拉通和华南陆块的陆内造山带, 在中国大陆形成演化中占有重要地位(张国伟等, 1996), 对其构造演化历史的认识也是我们理解东亚大陆构造动力学的关键(Mattauer等, 1985). 秦岭造山带经历了前寒武纪基底形成过程、古生代和中生代板块俯冲碰撞构造过程, 以及中、新生代陆内构造过程等阶段, 具有多期次漫长的演化历史(张国伟等, 1996; 孟庆任, 2017). 研究表明, 晚三叠纪以来, 随着古特提斯洋的彻底关闭和

华北与华南陆块的碰撞汇聚, 秦岭造山带经历了长期的岩石圈变形和地表隆升(Enkelmann等, 2006; Hu等, 2006, 2012; 董树文等, 2010; 李建华等, 2010; Chen等, 2015), 厘定其不同地质时期的隆升进程对我们认识中国乃至东亚大陆构造演化过程、动力学机制, 以及气候环境变化等科学问题具有重要意义.

针对秦岭造山带隆升的时限和构造演化问题, 很多学者开展了大量的构造变形、磷灰石和锆石的裂变径迹以及U-Th/He热年代学等研究, 取得了长足的进展, 形成了一系列重要的认识. 总体上, 秦岭造山带在中-新生代经历了复杂的隆升和剥露过程, 不同构造单

中文引用格式: 李永东, 熊熊, 冯雅杉. 2022. 南秦岭大巴山和米仓山-汉南穹隆中生代隆升幅度. 中国科学: 地球科学, 52(3): 462–473, doi: [10.1360/SSTe-2021-0240](https://doi.org/10.1360/SSTe-2021-0240)

英文引用格式: Li Y, Xiong X, Feng Y. 2022. Mesozoic uplift of the Dabashan and Micangshan-Hannan Dome in the South Qinling orogenic belt. Science China Earth Sciences, 65(3): 426–436, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9863-6>

元的隆升显示出明显的时空差异(Yin等, 2001; Enkelmann等, 2006; 李建华等, 2010; 许长海等, 2010; Tian等, 2012; Hu等, 2012; Yang等, 2013; Chen等, 2015). 一般认为, 北秦岭造山带的隆升始于新生代(Enkelmann等, 2006; Hu等, 2006; Liu等, 2013; 王斌等, 2013; 孟庆任, 2017), 而南秦岭的隆升则始于中生代(沈传波等, 2007; 许长海等, 2010; Hu等, 2012; Yang等, 2013).

大巴山和米仓山-汉南穹隆是南秦岭造山带两个地形剧烈起伏的构造单元(图1), 其早期隆升历史可追溯到中生代(Shi等, 2012; Hu等, 2012; Yang等, 2017). 对大巴山构造形式、形成机制及动力学过程的研究(Liu等, 2005; Dong等, 2008; Shi等, 2012; Dong等, 2013; Yang等, 2017)表明, 受扬子板块向秦岭俯冲汇聚的作用, 大巴山形成于中侏罗世末期, 持续至早白垩世(Shi等, 2012; Hu等, 2012; Yang等, 2017). 米仓山-汉南穹隆在三叠纪末期开始隆升(田云涛等, 2010), 其快速剥露的时段主要集中在早白垩世和新生代第三纪(常远等, 2010; Yang等, 2013, 2017). 这些研究极大地深化了我们对秦岭造山带隆升过程的认识, 但仍存在很多的不足和问题. 目前的认识主要源自岩石热年代学研究, 较之北秦岭, 南秦岭大巴山和米仓山-汉南穹隆隆升年代更为久远, 对其隆升进程的约束更为模糊, 尤其是关于隆升的幅度. 由于岩石热年代学确定的山体剥露速率与山体的高度之间缺乏定量关系(England和Molnar, 1990), 因此, 基于岩石热年代学的研究难以给出南秦岭大巴山和米仓山-汉南穹隆中生代隆升幅度的定量约束, 而毗邻的四川盆地的沉积地层记录为我们探究这一问题提供了新的线索.

研究表明, 在块体汇聚俯冲过程中, 上覆块体发生剧烈的地壳变形和地表隆升, 而下伏块体在地形载荷作用下向下挠曲变形, 形成前陆盆地(Turcotte和Schubert, 2014), 其几何形状受控于岩石圈的强度和其前端承受的山体地形的载荷(Watts, 2001; Allen和Allen, 2013). 由于向下弯曲形成的凹陷被沉积物填充, 因此, 通过沉降区的沉积地层分析, 可以解译盆地的几何形态, 获取岩石圈挠曲变形信息. 而基于不同地质时期岩石圈的挠曲量, 通过岩石圈挠曲数值模拟, 即可获得不同地质时期山体的隆升幅度和盆地的岩石圈强度(Curry等, 2019).

地震反射剖面探测(李秋生等, 2011; Dong等, 2013)揭示了南秦岭造山带下华南陆块向秦岭造山带

图1 南秦岭及四川盆地地形图

黑色线条表示断层和构造线, 黑色数字表示新生代山体快速剥露的时段(Arne等, 1997; Kirby等, 2002; Enkelmann等, 2006; Zheng等, 2006; Godard等, 2009; Tian等, 2012; Yang等, 2017), 蓝色数字表示米仓山-汉南穹隆中生代快速剥露的时段(Yang等, 2017)和大巴山主要形成时段(Zhang等, 2001; Ratschbacher等, 2003; Li等, 2015)

的俯冲, 而四川盆地的沉积地层研究表明, 盆地北部在中侏罗世到早白垩世沿大巴山、米仓山-汉南穹隆前缘发生了大规模的挠曲沉降, 形成沉积前渊, 而山体的剥蚀为前陆盆地的沉积提供了物源(Li等, 2003; Meng等, 2005; 李智武, 2006; 田云涛等, 2010). 目前, 基于钻井、地震探测等地球物理方法, 人们获得了四川盆地不同地质时期清晰的沉积地层结构, 建立了完整的地层层序(郭正吾等, 1996), 为我们开展进一步的研究提供了重要的数据基础.

本文基于四川盆地北缘大巴山和米仓山-汉南穹隆山前的中生代沉积层厚度数据, 基于岩石圈挠曲理论, 通过模拟中生代不同地质时期四川盆地的岩石圈挠曲变形, 确定南秦岭造山带大巴山和米仓山-汉南穹隆中生代的隆升量, 为研究秦岭造山带构造演化历史及动力学机制提供定量约束.

2 南秦岭山前盆地沉积

秦岭造山带是华北和华南陆块在三叠纪碰撞后形成的(Meng和Zhang, 1999). 在形成过程中, 华南陆块相对华北陆块顺时针旋转, 碰撞汇聚由东向西推进(Zhao和Coe, 1987; Gilder和Courillot, 1997; Zhang, 1997; Ratschbacher等, 2003; Meng等, 2005), 使秦岭缝合带在

中-晚侏罗世完全闭合(Huang和Opdyke, 1991; Gilder和Courtillet, 1997). 碰撞后的持续俯冲、汇聚导致南秦岭造山带大巴山和米仓山-汉南穹隆发生剧烈变形和隆升(Mattauer等, 1985; Wang等, 2003; Dong等, 2013). 同时, 下伏的华南陆块北缘, 即四川盆地北缘发生大规模的挠曲沉降, 沿大巴山和米仓山-汉南穹隆前缘形成沉积前渊, 盆地沉降剧烈的时段分别在中侏罗世和早白垩世, 沉积厚度沿沉积中心向外逐渐减小, 呈现典型的前陆盆地挠曲沉积特征(郭正吾等, 1996; Meng等, 2005; Richardson等, 2008).

大巴山前陆盆地沉积对应的时段是中侏罗世沙溪庙沉积期(郭正吾等, 1996; Richardson等, 2008), 其沉积特点是沉积范围广、沉积厚度大, 沉积中心围绕大巴山主要物源山地的前缘, 沉积中心厚度达2800m, 由中心向外减小, 厚度一般约1200~2000m(图2a). 沙溪庙

期沉积呈过饱和沉积特征, 覆盖了盆地的挠曲前隆(见图3a), 沉积岩相主要为砂岩(郭正吾等, 1996). 华南陆块相对华北陆块顺时针旋转持续至早白垩世(Meng等, 2005), 导致华南陆块向南秦岭的斜俯冲活跃区域向西迁移, 四川盆地沿米仓山-汉南穹隆前缘发生剧烈挠曲沉降, 同时也使沉积中心向四川盆地西北角迁移(图2b). 沉积对应的时段是早白垩世天马山沉积期(郭正吾等, 1996; Li等, 2016), 沉积范围较大巴山前小, 主要集中在四川盆地西北缘, 最大沉积厚度~1200m, 沉积岩相为泥岩夹多层砂岩(郭正吾等, 1996).

3 方法

岩石圈在垂向载荷作用下的挠曲变形可用弹性薄板挠曲一般方程描述(Watts, 2001; Turcotte和Schubert,

图2 四川盆地北缘中侏罗世(a)和早白垩世(b)沉积地层厚度等值线分布及垂直大巴山(c)和米仓山-汉南穹隆(d)剖面地形图
图(a)和(b)中的蓝色直线表示挠曲模拟所取的地层剖面位置, 剖面上红色线段表示盆地前缘山体加载的宽度范围; 图(c)和(d)中灰色阴影区表示沿剖面50km范围内((a)和(b)中的蓝绿色条带间)地形变化区间, 浅红色条带对应于(a)和(b)中剖面上红色线段所示的空间位置, 横坐标0点为加载山体北界(参见图3)

图3 前陆盆地单期(a)和多期(b)挠曲沉积示意图

图中 L 为某一地质时期山体载荷的高度, h 为该时期山体隆升量, w 为该时期岩石圈挠曲量, l 为山体宽度, x_c 为山体加载的中心位置, d 为过饱和和沉积盖层厚度. 在多次沉积过程中, 受上覆年代较新沉积地层的压实作用, 年代较老地层的厚度会减小. 图(c)给出了沉积层去压实校正示意图, 校正计算过程详见4.1节

2014):

$$D \nabla^4 w + p = -q, \quad (1)$$

式中, ∇ 为微分算子, w 为弹性板的挠曲量, q 为载荷, p 为浮力, D 为挠曲刚度, 是岩石圈强度的表征, 通常表示为岩石圈有效弹性厚度 T_e ($D = ET_e^3 / [12(1 - \nu^2)]$), 杨氏模量 E 和泊松比 ν 通常取为常数 ($E = 10 \text{ GPa}$, $\nu = 0.25$). 基于方程(1)即可研究不同构造环境和动力加载下的岩石圈挠曲问题.

四川盆地与秦岭造山带在中生代主要的构造模式为俯冲汇聚(Dong等, 2013), 四川盆地之于秦岭造山带的挠曲形态为半无限空间挠曲变形. 因此, 本文选用半无限空间薄板模型来模拟四川盆地与秦岭山盆体系的挠曲沉积记录.

如图3所示, 将山体等效为宽度为 l 、高度为 L 的棱柱, 在某一地质时期, 加载于半无限弹性薄板(岩石圈)上, 加载中心位于 x_c , 岩石圈产生向下的挠曲, 挠曲量为 w , 加载山体高 L 是挠曲量 w 和地表隆升量 h 之和 ($L = w + h$). 其中, 挠曲量 w 的数值解可表示为(Hetényi和Hetényi, 1946; Watts, 2001)

$$w(x) = \frac{-Y \rho_c g h l}{2(\rho_c - \rho_s) g \alpha}, \quad (2)$$

式中,

$$Y = (C_{x_c} + 2F_{x_c})A_x - 2(C_{x_c} + F_{x_c})B_x + \left\{ e^{(-k-x)/\alpha} \left[\cos(|x-x_c|/\alpha) + \sin(|x-x_c|/\alpha) \right] \right\}, \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} A = e^{(-x/\alpha)} [\cos(x/\alpha) + \sin(x/\alpha)], \\ B = e^{(-x/\alpha)} \sin(x/\alpha), \\ C = e^{(-x/\alpha)} [\cos(x/\alpha) - \sin(x/\alpha)], \\ F = e^{(-x/\alpha)} \cos|x/\alpha|, \\ \alpha = \{4D / [(\rho_m - \rho_s)g]\}^{1/4}, \end{cases} \quad (4)$$

式中, g 为重力加速度, ρ_c 为山体的密度, ρ_s 为沉积层的密度, ρ_m 为地幔的密度. 力学上, 岩石圈挠曲可视为岩石圈介质对载荷的力学响应, 它取决于岩石圈介质的力学强度(T_e)和山体的载荷(Watts, 2001). 因此, T_e 和山体载荷是控制前陆盆地挠曲的主要参数. 山体载荷与其高度和宽度有关, 如果山体宽度已知, 盆地挠曲便受控于山体的高度和盆地的 T_e . 而盆地在特定地质时期内的挠曲量取决于同一时期山体的隆升量 h 和 T_e .

我们计算模型挠曲量与观测挠曲量的拟合度来确定最优模型, 拟合度 $\theta = 1 - \langle \text{RMSE} \rangle$ (Gao等, 2016), $\text{RMSE} = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2] / n}$ 是盆地观测挠曲量 O_i 和模型挠曲量 M_i 之间均方根差, $\langle \rangle$ 表示归一化, n 为观测挠曲数据点数量. θ 为1或100%时即为完全拟合. 通过迭代模拟, 取拟合度最高的模型值为模拟结果.

4 结果

4.1 沉积地层厚度校正

本文采用的中侏罗世和早白垩世沉积层厚度数据

是通过对Richardson等(2008)和Li等(2016)论文中的图片进行数字化获取的. 如图2所示, 我们沿垂直大巴山、米仓山-汉南穹隆走向和地层等值线的方向分别取两条地层剖面进行研究.

在地质演化过程中, 前陆盆地中年代较老的沉积地层上会覆盖新的地层, 受较新地层的压实作用, 年代较老地层的厚度会减小(图3). 因此, 现今获得的沉积层厚度不是原始前陆盆地挠曲形态的表征, 需要通过沉积层去压实校正来重建前陆盆地沉积期的挠曲形态. 四川盆地不同地质时期沉积层厚度分布(郭正吾等, 1996; Wang等, 2016)显示, 盆地北缘沉积顶层是白垩纪沉积, 所以米仓山-汉南穹隆山前的白垩纪沉积没有经历压实过程, 无需去压实校正. 但是, 大巴山前的沉积为中侏罗世沉积, 上覆有晚侏罗世和早白垩世沉积, 需要进行去压实校正.

如图3c所示, 设某沉积层现今的深度范围是从 z_1 到 z_2 , 现今的厚度与沉积时期的厚度(原始厚度) z_0 的关系为(Sclater和Christie, 1980; Allen和Allen, 2013)

$$z_0 = z_2 - z_1 - \frac{\phi_0(e^{-cz_1} - e^{-cz_2})}{c} + \frac{\phi_0(1 - e^{-cz_0})}{c}, \quad (5)$$

式中, ϕ_0 为沉积岩的地表孔隙度, c 为空隙度随深度变化的系数. 方程(5)通过数值迭代, 即可获得原始沉积厚度 z_0 .

基于沉积层厚度校正结果, 我们求取沉积期沉积层的密度分布. 原始沉积层的孔隙度 ϕ 为(Sclater和Christie, 1980; Allen和Allen, 2013)

$$\phi = \phi_0(1 - e^{-cz}) / (cz), \quad (6)$$

$$z \in (0, z_0).$$

相应地, 原始沉积物的密度 ρ_s 可表示为

$$\rho_s = \phi\rho_w + (1 - \phi)\rho_{sg}, \quad (7)$$

其中, ρ_{sg} 为沉积物的晶粒密度, ρ_w 为水的密度.

大巴山山前盆地侏罗纪和白垩纪沉积地层的沉积岩相主要为砂岩(Li等, 2003; 李智武, 2006; Wang等, 2016; Liu等, 2021), 已知砂岩地表孔隙度 $\phi_0=0.49$, 随深度变化的系数 $c=0.27\text{km}^{-1}$ (Sclater和Christie, 1980). 基于晚侏罗世沉积厚度(Meng等, 2005; Richardson等, 2008), 我们对中侏罗世沉积层进行去压实校正. 校正前后的地层厚度如图4所示, 现今观测的中侏罗世最大

图4 沉积地层剖面及校正结果

图中点为剖面与地层厚度等值线的交点(见图2), 横轴坐标原点为加载山体北界, 方向指向四川盆地内部

沉积厚度为~2600m, 校正后为~3200m. 另外, 已知砂岩的晶粒密度 $\rho_{sg}=2650\text{kg m}^{-3}$ (Allen和Allen, 2013), 水的密度 $\rho_w=1030\text{kg m}^{-3}$, 我们依据公式(6)和(7)可计算原始沉积物的密度, 取其平均值为前陆盆地沉积物的密度, 中侏罗世沉积物的平均密度约 2100kg m^{-3} , 早白垩世沉积物的平均密度约为 1950kg m^{-3} .

此外, 四川盆地中侏罗世大巴山前陆盆地沉积为过饱和沉积(郭正吾等, 1996), 由于覆盖于挠曲前隆之上的沉积地层与挠曲无关, 需要对其做基准面校正(Jordan, 1981; Liu等, 2014; Saylor等, 2020). 沙溪庙期挠曲前隆处的沉积厚度为1400m(郭正吾等, 1996), 经去压实校正后对应的原始沉积厚度为1610m. 我们将中侏罗世沉积厚度减去1610m实现基准面改正, 并将校正后的沉积层厚度用于挠曲模拟.

我们沿地层剖面取沉积前缘与大巴山和米仓山-汉南穹隆北界的距离为加载山体的宽度(图1和图2). 大巴山的北界为安康断裂(Li等, 2015), 而米仓山-汉南穹隆的北界为宁陕断裂(Tian等, 2012), 从沉积前缘沿两条剖面至这两断裂的水平距离分别为135和100km(图2), 即大巴山的宽度取为135km, 米仓山-汉南穹隆的宽度取为100km. 山体密度取为 2750kg m^{-3} . 这些参数选取对结果的影响我们将在4.3节详细介绍.

4.2 模拟结果

基于校正后的沉积地层厚度数据, 我们沿图2所示的两条剖面进行岩石圈挠曲模拟. 我们将每条剖面与地层等值线的交点作为挠曲控制点(图5a, 5b), 将 T_c 和隆升量 h 的取值范围分别设定为 $[2\text{km}, 120\text{km}]$ 和

图 5 四川盆地北缘岩石圈挠曲模拟结果((a)、(b))及拟合度((c)~(f))分布图

图(a)和(b)模型与观测挠曲的对比图, 图中横坐标与图4一致, 十字为剖面(图2)与地层等值线的交点, 灰色线条表示拟合度大于0.7的所有模型计算的挠曲线, 实线表示拟合度最高的模型对应的挠曲线, 虚线表示由拟合度大于0.7的所有模型计算的挠曲的上下界。(c)和(d)分别为大巴山前陆盆地中侏罗世和米仓山-汉南穹隆前陆盆地早白垩世岩石圈挠曲拟合度随山体隆升量 h (浅绿色)和 T_e (橙色)变化的收敛情况。图中红色五角星表示拟合度最高的点, 其对应的 T_e 和山体隆升量 h 即为最优模型结果。(e)和(f)为拟合度随山体隆升量 h 和 T_e 变化的二维分布, 黄色五角星表示最优拟合度, 矩形点表示盆地挠曲 $\pm 5\%$ 的模拟结果, 圆圈表示山体密度 $\pm 50 \text{ kg m}^{-3}$ 后的模拟结果, 浅蓝色为减, 紫色为加。三角形表示山体宽度变化的影响。黑色虚线为0.7拟合度等值线

[100m, 5000m], 空间采样间隔 T_c 取为1km、隆升量 h 取为10m, 构建模型空间. 采用网格搜索方法, 对模型空间进行逐个模型的正演模拟, 将计算的挠曲值与观测值比对, 计算模型与观测值的拟合度, 选择拟合度最高的模型为最优模型.

垂直于大巴山的剖面模拟结果(图5c, 5e)显示, 模型与观测间的拟合度随山体隆升量和 T_c 的变化具有明显的优势分布(图5c), 而拟合度最高的挠曲线几乎与观测挠曲线完全重合(图5a), 拟合度值达到0.96(图5c, 5e). 拟合度最高的挠曲线对应的隆升量为1220m, 即大巴山在中侏罗世隆升了1220m. 相应地, 四川盆地 T_c 为73km. 沿垂直米仓山-汉南穹隆剖面的拟合度优势分布也很明显, 最大拟合度为0.86(图5d, 5f), 对应的隆升量为880m, 即米仓山-汉南穹隆早白垩世隆升了880m. 相应地, 四川盆地 T_c 为57km. 两条剖面的最大拟合度均高于0.7的模型可接受拟合度(Gao等, 2016).

4.3 结果不确定性分析

模拟结果的不确定性主要来自沉积地层厚度数据的误差和模型参数选取的不确定性. 如前所述, 本文采用的沉积层厚度数据取自Richardson等(2008)和Li等(2016), 其数据源自郭正吾等(1996)基于钻井资料, 并结合地震反射剖面方法获得的沉积地层资料. 由于数据来源未提供误差信息, 我们采用其使用的方法推断. 以钻井资料为约束的地震反射剖面方法确定的沉积层界面深度误差一般不大于5%. 引入 $\pm 5\%$ 的误差将导致大巴山隆升幅度 $-30\sim 70$ m和四川盆地 T_c $-3\sim 2$ km的偏差, 约为隆升幅度的2~6%和 T_c 幅值的6%(图5e). 对米仓山-汉南穹隆, 这一影响分别为 $-30\sim 30$ m和 $-1\sim 3$ km, 约为隆升幅度的4%和 T_c 幅值的2~5%(图5f). 均小于70%的模型拟合度.

模型参数的影响主要源于山体宽度和山体岩石密度的不确定度. 文中我们所取的山体宽度是现今的山体尺度(图2), 分别为135km(大巴山)和100km(米仓山-汉南穹隆), 并非是两个山体隆升时的山体宽度. 综合岩石热年代学、地层学及地震探测的研究(Li等, 2015)表明, 大巴山自三叠纪古特提斯洋关闭以来总共发生了 $\sim 28\%$ 的水平缩短. 由于不同时段的地壳缩短量缺乏约束, 我们采用保守估计, 假定所有的地壳缩短量发生在中侏罗世之后, 根据大巴山现今的山体宽度推算, 大巴山中侏罗世隆升时山体宽度最大不超过185km. 由

此得到的最优模型隆升量为1180m, 四川盆地 T_c 为75km. 相对本文模拟结果, 山体隆升量和 T_c 分别变化 ~ 40 m和 ~ 2 km(图5e).

米仓山-汉南穹隆早白垩世以来的地壳水平缩短缺乏定量约束, 我们依据一些观测证据进行推断. 岩石热年代学研究表明米仓山-汉南穹隆经历了两期快速隆升, 继早白垩世隆升之后, 在15Ma以来发生了快速剥露(Tian等, 2012; Yang等, 2017). 因此, 其新生代地壳缩短主要发生在15Ma以来. GPS观测表明四川盆地周缘造山带的现今地壳缩短率非常小, 几乎难以探测(Hao等, 2021). 而GPS解算的速度场与MORVEL模型(Argus等, 2011)给出的速度场的一致性表明, 地壳运动速率在地质时期是有延续性的. 观测表明, 米仓山-汉南穹隆的应变速率小于龙门山地区(Hao等, 2021), 我们采取保守估计, 采用龙门山地区的地壳汇聚率($< 3\text{mm a}^{-1}$)(Shen等, 2005)来估算米仓山-汉南穹隆的地壳缩短量. 15Myr地壳缩短量约为45km, 相应的地壳缩短率约为30%. 考虑到青藏高原 ~ 60 Ma碰撞以来的地壳缩短率约为50%(Harrison等, 1992), 远离碰撞带的米仓山-汉南穹隆在15Myr的缩短率取为30%, 这一估算是保守的. 山体宽度取145km时得到的山体隆升量为840m, 四川盆地 T_c 为60km, 相比本文最优模型分别变化40m和3km(图5f).

此外, 山体载荷的密度一般取为2700或2800 kg m^{-3} (Li等, 2003; Jiang和Jin, 2005; Gao等, 2016; Curry等, 2019; Saylor等, 2020), 本文取中值2750 kg m^{-3} 也可能使结果产生偏差. 为此, 我们对山体载荷密度加减50 kg m^{-3} , 即分别使用2700和2800 kg m^{-3} 进行模拟, 结果表明, 50 kg m^{-3} 的山体载荷密度变化会导致大巴山山体隆升量变化 ~ 40 m, 四川盆地 T_c 变化 ~ 3 km. 对米仓山-汉南穹隆, 影响分别为 ~ 80 m和 ~ 2 km. 总体上, 数据误差和模型参数不确定性对模拟结果的影响不超过10%, 均在0.7的可接受拟合度范围(图5e, 5f).

5 讨论

造山带山体的建造过程对我们认识其演化动力学机制和古气候、古环境等问题具有重要的科学价值. 研究表明, 南秦岭造山带不同构造单元的隆升过程在时间进程上是不均匀的. 中侏罗世是华南陆块和华北陆块强烈汇聚时段, 受控于两个块体的汇聚, 大巴山

经历了地壳缩短增厚和地表隆升(Ratschbacher等, 2003), 因此, 中侏罗世被认为是大巴山形成的主要时段(Yang等, 2017). 米仓山-汉南穹隆的隆升时代有所滞后, 磷灰石裂变径迹研究表明, 米仓山-汉南穹隆在早白垩世经历了快速剥露(田云涛等, 2010; 许长海等, 2010; Tian等, 2012; Yang等, 2013), 表明该地区这一时段经历了地壳的缩短和地表隆升, 地形起伏剧烈(Chen等, 2015; Yang等, 2017). 这一过程可能源于华南陆块的顺时针旋转, 以及进而向秦岭下方的倾斜汇聚(Meng等, 2005). 本文模拟结果显示, 大巴山和米仓山-汉南穹隆分别在中侏罗世和早白垩世发生了~1220和~880m的隆升. 这两个山体以北的秦岭中部在侏罗纪和白垩纪地壳厚度约为45km(Hu等, 2017), 基于Airy均衡原理推断, 其高程不超过~650m, 小于南部的大巴山和米仓山-汉南穹隆的隆升量. 而北秦岭的隆升主要发生在新生代(Enkelmann等, 2006; Hu等, 2006; Liu等, 2013; 孟庆任, 2017). 这些结果表明秦岭造山带不同构造单元的隆升时段和隆升幅度均存在差异, 时间上南秦岭隆升早于中秦岭和北秦岭. 隆升幅度上, 南秦岭的大巴山和米仓山-汉南穹隆均大于中秦岭. 隆升时段和幅度的差异表明其驱动力可能源自华北、华南陆块自东向西的汇聚作用. 东部的大巴山更早开始隆升过程, 西部的米仓山-汉南穹隆随后启动, 并且, 在隆升的幅度上, 前者也大于后者.

从隆升幅度在现今高程中的占比来看, 大巴山中侏罗世的隆升量(~1220m)(图5c, 5e)约为现今高度(~1600m)的四分之三(图2c). 如果山体的隆升是随着造山过程逐渐叠加累积的, 我们可以推断大巴山的高度建立时段主要是中生代, 新生代的隆升幅度较小(~400m). 米仓山-汉南穹隆经历了两期快速隆升, 前期在早白垩世, 后期在新生代~15Ma(田云涛等, 2010; Yang等, 2013). 本文结果显示米仓山-汉南穹隆早白垩世的隆升量(~880m)(图5d, 5f)约为现今高度(~1900m)(图2d)的二分之一, 幅度上不及大巴山中侏罗世的隆升量(~1200m), 但其新生代的隆升幅度比较显著(~1000m), 远大于大巴山的新生代隆升量(~400m). 这个结果表明南秦岭造山带的现今高程是继承性的, 大巴山高度的四分之三和米仓山-汉南穹隆高度的二分之一在中生代就已经建立起来了.

本文结果不足以厘清大巴山和米仓山-汉南穹隆剩余高程的建造过程和驱动机制, 结合前人研究, 我们

进行有限的分析和讨论. 热年代学研究表明, 两个山体在新生代均经历了快速剥露过程, 剩余高程应该是在这个时段建立起来的(沈传波等, 2007; 田云涛等, 2010; Tian等, 2012; Yang等, 2013). 新生代东亚大陆最重要的构造事件无疑是印度板块与欧亚大陆的碰撞. 在印度板块碰撞及持续北漂的挤压作用下, 青藏高原快速隆起, 并向外生长. 大量研究表明青藏高原的隆升变形呈现显著的东向外延生长(Burchfiel等, 1995; Royden等, 1997; Clark和Royden, 2000; Tapponnier等, 2001; Kirby等, 2002; Zhang等, 2004). 低温热年代学研究表明, 新生代青藏高原东缘快速剥露的启动时间从东昆仑地区的~20Ma(Yuan等, 2006)至秦岭造山带的约9~4Ma(Enkelmann等, 2006), 呈现向东北、向东逐渐变新的趋势, 反映了青藏高原隆升向东北、向东的传导(田云涛等, 2010). 米仓山-汉南穹隆快速剥露始于15Ma(田云涛等, 2010), 而大巴山则始于年代较近的10~6Ma(沈传波等, 2007). 这一趋势与青藏高原向外生长发展的趋势是一致的. 位于西侧的米仓山-汉南穹隆距青藏高原较近, 受其侧向生长影响较早, 而远离青藏高原的大巴山受影响较晚. 在隆升幅度上, 前者(~900m)约为后者(~400m)的两倍. 我们认为, 南秦岭造山带中生代和新生代的隆升进程和驱动机制是不同的, 中生代隆升受控于自东向西的华北-华南陆块汇聚, 新生代隆升则由西南-东北向的印度板块对欧亚大陆的挤压驱动.

四川盆地不同地质时期岩石圈强度(或 T_c)是青藏高原构造动力学研究的一个重要问题, 受到大家的广泛关注. 目前, 关于四川盆地现今和新生代岩石圈强度研究取得了许多成果(Jiang和Jin, 2005; Mao等, 2012; Chen等, 2013; 李永东等, 2013; 谢媛等, 2020), 但关于中生代岩石圈强度的研究却非常匮乏. 本文基于岩石圈挠曲分析, 获得了四川盆地北缘中生代中侏罗世和早白垩世的 T_c , 分别为中侏罗世大巴山前的73km和早白垩世米仓山-汉南穹隆山前的57km. 由于两者的差值大于 T_c 的不确定度, 因此, 这一差异是客观存在的. 此外, 从力学上分析, 强度更大的岩石圈挠曲变形的空间尺度更大, 沉积范围更广, 而强度较弱的岩石圈则相反. 因此, 两个山前盆地的沉积范围(图2)也印证了岩石圈强度的差异.

不同区域、不同地质时期岩石圈强度的差异可能表征了时间上、或空间上、或时空两个维度上的变

化。两个区域相距小于100km, 从挠曲变形范围来看, 两个山体山前盆地有很大的区域是重叠的, 考虑到四川盆地岩石圈强度较大, 并且现今内部结构未见明显差异, 从力学上分析, 一个块体内部如此小的空间尺度上 T_c 不太可能存在约15km的巨大变化。因此, 这种差异更大可能是时间维上的变化, 换言之, 从中侏罗世到早白垩世, 四川盆地北缘岩石圈强度发生了弱化。控制岩石圈强度变化的因素很多, 相较而言, 大洋岩石圈相对简单, 其强度取决于加载时的岩石圈年龄, 大小则与300~600℃等温线的深度相对应(Burov和Diament, 1995; Watts和Burov, 2003)。但是, 对于构造演化复杂的大陆岩石圈, 这一简单对应关系并不存在。大陆岩石圈的强度可能受控于岩石圈热年龄、温度结构、组分结构、壳幔耦合状态及应力加载等多种因素(Burov和Diament, 1995)。现今地球物理观测并未显示出大巴山和米仓山-汉南穹隆山前盆地岩石圈结构、组分存在显著的横向差异, 所以我们推测岩石圈强度的差异更大可能源自应力的加载。研究表明, 山体加载导致的挠曲应力会使山体正下方的 T_c 减少30~80%, 也会使相邻区域岩石圈强度产生弱化, 尽管这种影响随距离很快衰减(Burov和Diament, 1995)。由此, 我们推断中侏罗世大巴山山体加载产生的挠曲应力可能弱化其邻区米仓山-汉南穹隆山前盆地的岩石圈强度, 导致两个时段 T_c 的显著差异。反过来, 米仓山-汉南穹隆的应力加载也可能导致大巴山山前盆地岩石圈强度的弱化, 但这有待后续研究的验证。此外, 本文两条剖面的空间取向是不同的, T_c 的差异也可能是中生代岩石圈强度各向异性的表现(Mao等, 2012; 李永东等, 2013), 但我们目前掌握的证据尚无法验证这一可能性。如果地震波各向异性研究能甄别出历史构造的“化石各向异性”, 无疑将有助于对这一问题更深入的认识。

6 结论

本文基于岩石圈挠曲理论, 通过模拟南秦岭造山带大巴山和米仓山-汉南穹隆山前盆地在侏罗世和早白垩世岩石圈挠曲分布, 获得这两个山体相应地质构造时段的山体隆升量和盆地 T_c 。结果显示, 大巴山在中侏罗世隆升了~1220m, 米仓山-汉南穹隆在早白垩世隆升~880m。这表明南秦岭造山带大巴山和米仓山-汉南穹隆在中生代已发生了隆升, 现今的高程是在中

生代隆升基础上于新生代继承性构造隆升的结果。综合不同构造单元隆升的时限和幅度, 可推断南秦岭造山带中生代和新生代的隆升进程和驱动机制是不同的, 中生代隆升受控于自东向西的华北-华南陆块汇聚, 新生代隆升则由西南-东北向的印度板块对欧亚大陆的挤压驱动。四川盆地北缘从中侏罗世到早白垩世岩石圈强度发生了弱化, T_c 由73km减小为57km, 其机制可能源于山体作用下的挠曲应力加载。

致谢 感谢审稿专家和编委提出的建设性意见和建议。文中大部分图件由GMT绘制。

参考文献

- 常远, 许长海, 周祖翼. 2010. 米仓山-汉南隆起白垩纪以来的剥露作用: 磷灰石(U-Th)/He年龄记录. 地球物理学报, 53: 912-919
- 董树文, 施炜, 张岳桥, 胡健民, 张忠义, 李建华, 武红岭, 田蜜, 陈虹, 武国利, 李海龙. 2010. 大巴山晚中生代陆内造山构造应力场. 地球学报, 31: 769-780
- 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 刘应楷, 殷建棠, 王庆国, 梁恩宇, 李国建, 陈昭国, 刘宗正, 吴春生, 赵泽江. 1996. 四川盆地形成与演化. 北京: 地质出版社. 200
- 李建华, 张岳桥, 董树文, 施炜, 李海龙. 2010. 大巴山凤凰山基底隆起晚中生代构造隆升历史——磷灰石裂变径迹测年约束. 地质科学, 45: 969-986
- 李秋生, 高锐, 王海燕, 张季生, 李鹏武, 卢占武, 管焯, 候贺晟. 2011. 川东北-大巴山盆地体系岩石圈结构及浅深变形耦合. 岩石学报, 27: 612-620
- 李永东, 郑勇, 熊熊, 胡祥云. 2013. 青藏高原东北部岩石圈有效弹性厚度及其各向异性. 地球物理学报, 56: 1132-1145
- 李智武. 2006. 中-新生代大巴山前陆盆地-冲断带的形成演化. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学. 1-246
- 孟庆任. 2017. 秦岭的由来. 中国科学: 地球科学, 47: 412-420
- 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 汤济广, 田鹏. 2007. 大巴山中-新生代隆升的裂变径迹证据. 岩石学报, 23: 2901-2910
- 田云涛, 朱传庆, 徐明, 饶松, 胡圣标. 2010. 白垩纪以来米仓山-汉南穹隆剥蚀过程及其构造意义: 磷灰石裂变径迹的证据. 地球物理学报, 53: 920-930
- 王斌, 郑洪波, 王平, 何忠. 2013. 渭河盆地新生代地层与沉积演化研究: 现状和问题. 地球科学进展, 28: 1126-1135
- 谢媛, 李永东, 熊熊. 2020. 控制龙门山地区地形的动力学机制. 中国科学: 地球科学, 50: 79-89
- 许长海, 周祖翼, 常远, Guillot F. 2010. 大巴山弧形构造带形成与两侧隆起的关系: FT和(U-Th)/He低温年代约束. 中国科学: 地球科学, 40: 1684-1696

- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. *中国科学D辑: 地球科学*, 26: 193–200
- Allen P A, Allen J R. 2013. *Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment*. Hoboken: John Wiley & Sons. 551–554
- Argus D F, Gordon R G, DeMets C. 2011. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochem Geophys Geosyst*, 12: Q11001
- Arne D, Worley B, Wilson C, Chen S F, Foster D, Luo Z L, Liu S G, Dirks P. 1997. Differential exhumation in response to episodic thrusting along the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 280: 239–256
- Burchfiel B C, Chen Z, Liu Y, Royden L H. 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China. *Int Geol Rev*, 37: 661–735
- Burov E B, Diament M. 1995. The effective elastic thickness (T_e) of continental lithosphere: What does it really mean? *J Geophys Res*, 100: 3905–3927
- Chen B, Chen C, Kaban M K, Du J, Liang Q, Thomas M. 2013. Variations of the effective elastic thickness over China and surroundings and their relation to the lithosphere dynamics. *Earth Planet Sci Lett*, 363: 61–72
- Chen H, Hu J, Wu G, Shi W, Geng Y, Qu H. 2015. Apatite fission-track thermochronological constraints on the pattern of late Mesozoic–Cenozoic uplift and exhumation of the Qinling Orogen, central China. *J Asian Earth Sci*, 114: 649–673
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28: 703
- Curry M E, van der Beek P, Huisman R S, Wolf S G, Muñoz J A. 2019. Evolving paleotopography and lithospheric flexure of the Pyrenean Orogen from 3D flexural modeling and basin analysis. *Earth Planet Sci Lett*, 515: 26–37
- Dong S W, Gao R, Yin A, Guo T L, Zhang Y Q, Hu J M, Li J H, Shi W, Li Q S. 2013. What drove continued continent-continent convergence after ocean closure? Insights from high-resolution seismic-reflection profiling across the Daba Shan in central China. *Geology*, 41: 671–674
- Dong Y P, Zhou M F, Zhang G W, Zhou D W, Liu L, Zhang Q. 2008. The Grenvillian Songshugou ophiolite in the Qinling Mountains, Central China: Implications for the tectonic evolution of the Qinling orogenic belt. *J Asian Earth Sci*, 32: 325–335
- England P, Molnar P. 1990. Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks. *Geology*, 18: 1173
- Enkelmann E, Ratschbacher L, Jonckheere R, Nestler R, Fleischer M, Gloaguen R, Hacker B R, Zhang Y Q, Ma Y S. 2006. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling: Is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan Basin? *Geol Soc Am Bull*, 118: 651–671
- Gao M, Fan M, Moucha R. 2016. Southwestward weakening of Wyoming lithosphere during the Laramide orogeny. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 6219–6234
- Gilder S, Courtillot V. 1997. Timing of the north-South China collision from new middle to late Mesozoic paleomagnetic data from the North China Block. *J Geophys Res*, 102: 17713–17727
- Godard V, Pik R, Lavé J, Cattin R, Tibari B, de Sigoyer J, Pubellier M, Zhu J. 2009. Late Cenozoic evolution of the central Longmen Shan, eastern Tibet: Insight from (U-Th)/He thermochronometry. *Tectonics*, 28: TC5009
- Hao M, Li Y, Wang Q, Zhuang W, Qu W. 2021. Present-day crustal deformation within the western Qinling Mountains and its kinematic implications. *Surv Geophys*, 42: 1–19
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, Yin A N. 1992. Raising Tibet. *Science*, 255: 1663–1670
- Hetényi M, Hetényi M I. 1946. *Beams on Elastic Foundation: Theory with Applications in the Fields of Civil and Mechanical Engineering*. Ann Arbor MI: University of Michigan Press
- Hu F, Ducea M N, Liu S, Chapman J B. 2017. Quantifying crustal thickness in continental collisional belts: Global perspective and a geologic application. *Sci Rep*, 7: 7058
- Hu J, Chen H, Qu H, Wu G, Yang J, Zhang Z. 2012. Mesozoic deformations of the Dabashan in the southern Qinling orogen, central China. *J Asian Earth Sci*, 47: 171–184
- Hu S, Raza A, Min K, Kohn B P, Reiners P W, Ketcham R A, Wang J, Gleadow A J W. 2006. Late Mesozoic and Cenozoic thermotectonic evolution along a transect from the north China craton through the Qinling orogen into the Yangtze craton, central China. *Tectonics*, 25: TC6009
- Huang K, Opdyke N D. 1991. Paleomagnetism of Jurassic rocks from southwestern Sichuan and the timing of the closure of the Qinling Suture. *Tectonophysics*, 200: 299–316
- Jiang X, Jin Y. 2005. Mapping the deep lithospheric structure beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau from gravity anomalies. *J Geophys Res*, 110: B07407
- Jordan T E. 1981. Thrust loads and foreland basin evolution, Cretaceous, Western United States. *AAPG Bull*, 65: 2506–2520
- Kirby E, Reiners P W, Krol M A, Whipple K X, Hodges K V, Farley K A, Tang W, Chen Z. 2002. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics*, 21: 1–1–1–20
- Li J, Dong S, Yin A, Zhang Y, Shi W. 2015. Mesozoic tectonic evolution of the Daba Shan Thrust Belt in the southern Qinling orogen, central China: Constraints from surface geology and

- reflection seismology. *Tectonics*, 34: 1545–1575
- Li Y, Allen PA, Densmore A L, Xu Q. 2003. Evolution of the Longmen Shan foreland basin (western Sichuan China) during the Late Triassic Indosinian orogeny. *Basin Res*, 15: 117–138
- Li Y, He D, Li D, Wen Z, Mei Q, Li C, Sun Y. 2016. Detrital zircon U-Pb geochronology and provenance of Lower Cretaceous sediments: Constraints for the northwestern Sichuan pro-foreland basin. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 453: 52–72
- Liu J, Zhang P, Lease R O, Zheng D, Wan J, Wang W, Zhang H. 2013. Eocene onset and late Miocene acceleration of Cenozoic intracontinental extension in the North Qinling range-Weihe graben: Insights from apatite fission track thermochronology. *Tectonophysics*, 584: 281–296
- Liu S, Nummedal D, Gurnis M. 2014. Dynamic versus flexural controls of Late Cretaceous Western Interior Basin, USA. *Earth Planet Sci Lett*, 389: 221–229
- Liu S, Steel R, Zhang G. 2005. Mesozoic sedimentary basin development and tectonic implication, northern Yangtze Block, eastern China: Record of continent-continent collision. *J Asian Earth Sci*, 25: 9–27
- Liu S, Yang Y, Deng B, Zhong Y, Wen L, Sun W, Li Z, Jansa L, Li J, Song J, Zhang X, Peng H. 2021. Tectonic evolution of the Sichuan Basin, Southwest China. *Earth-Sci Rev*, 213: 103470
- Mao X, Wang Q, Liu S, Xu M, Wang L. 2012. Effective elastic thickness and mechanical anisotropy of South China and surrounding regions. *Tectonophysics*, 550–553: 47–56
- Mattauer M, Matte P, Malavieille J, Tapponnier P, Maluski H, Qin X Z, Lun L Y, Qin T Y. 1985. Tectonics of the Qinling belt: Build-up and evolution of eastern Asia. *Nature*, 317: 496–500
- Meng Q R, Wang E, Hu J M. 2005. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Sichuan basin: Implication for continued clockwise rotation of the South China block. *Geol Soc Am Bull*, 117: 396–410
- Meng Q R, Zhang G W. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. *Geology*, 27: 123–126
- Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, Webb L E, Grimmer J C, McWilliams M O, Ireland T, Dong S, Hu J. 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): Tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. *Tectonophysics*, 366: 1–53
- Richardson N J, Densmore A L, Seward D, Fowler A, Wipf M, Ellis M A, Yong L, Zhang Y. 2008. Extraordinary denudation in the Sichuan Basin: Insights from low-temperature thermochronology adjacent to the eastern margin of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 113: B04409
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, Wang E, Chen Z, Shen F, Liu Y. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 276: 788–790
- Saylor J E, Rudolph K W, Sundell K E, van Wijk J. 2020. Laramide orogenesis driven by Late Cretaceous weakening of the North American lithosphere. *J Geophys Res-Solid Earth*, 125: e2020JB019570
- Sclater J G, Christie P A F. 1980. Continental stretching: An explanation of the Post-Mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea Basin. *J Geophys Res*, 85: 3711–3739
- Shen Z K, Lü J, Wang M, Bürgmann R. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 110: B11409
- Shi W, Zhang Y, Dong S, Hu J, Wiesinger M, Ratschbacher L, Jonckheere R, Li J, Tian M, Chen H, Wu G, Ma L, Li H. 2012. Intracontinental Dabashan orocline, southwestern Qinling, Central China. *J Asian Earth Sci*, 46: 20–38
- Tapponnier P, Zhiqin X, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Jingsui Y. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294: 1671–1677
- Tian Y, Kohn B P, Zhu C, Xu M, Hu S, Gleadow A J W. 2012. Post-orogenic evolution of the Mesozoic Micang Shan Foreland Basin system, central China. *Basin Res*, 24: 70–90
- Turcotte D L, Schubert G. 2014. Geodynamics. Cambridge: Cambridge University Press. 133–161
- Wang E, Meng Q, Clark Burchfiel B, Zhang G. 2003. Mesozoic large-scale lateral extrusion, rotation, and uplift of the Tongbai-Dabie Shan belt in east China. *Geology*, 31: 307–310
- Wang M, Hubbard J, Plesch A, Shaw J H, Wang L. 2016. Three-dimensional seismic velocity structure in the Sichuan basin, China. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 1007–1022
- Watts A B, Burov E B. 2003. Lithospheric strength and its relationship to the elastic and seismogenic layer thickness. *Earth Planet Sci Lett*, 213: 113–131
- Watts A B. 2001. Isostasy and Flexure of the Lithosphere. Cambridge: Cambridge University Press
- Yang Z, Ratschbacher L, Jonckheere R, Enkelmann E, Dong Y, Shen C, Wiesinger M, Zhang Q. 2013. Late-stage foreland growth of China's largest orogens (Qinling, Tibet): Evidence from the Hannan-Micang crystalline massifs and the northern Sichuan Basin, central China. *Lithosphere*, 5: 420–437
- Yang Z, Shen C, Ratschbacher L, Enkelmann E, Jonckheere R, Wauschkuhn B, Dong Y. 2017. Sichuan Basin and beyond: Eastward foreland growth of the Tibetan Plateau from an integration of Late Cretaceous-Cenozoic fission track and (U-Th)/He ages of the eastern Tibetan Plateau, Qinling, and Daba Shan. *J Geophys Res-Solid Earth*, 122: 4712–4740
- Yin G, Lu Y, Zhao H, Li W, Li L, Guo S. 2001. The tectonic uplift of

- the Hua Shan in the Cenozoic. *Chin Sci Bull*, 46: 1665–1668
- Yuan W, Dong J, Shicheng W, Carter A. 2006. Apatite fission track evidence for Neogene uplift in the eastern Kunlun Mountains, northern Qinghai-Tibet Plateau, China. *J Asian Earth Sci*, 27: 847–856
- Zhang G, Zhang B, Yuan X, Xiao Q. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press. 1–855
- Zhang K J. 1997. North and South China collision along the eastern and southern North China margins. *Tectonophysics*, 270: 145–156
- Zhang P Z, Shen Z, Wang M, Gan W, Bürgmann R, Molnar P, Wang Q, Niu Z, Sun J, Wu J, Sun H, You X. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 32: 809–812
- Zhao X, Coe R S. 1987. Palaeomagnetic constraints on the collision and rotation of North and South China. *Nature*, 327: 141–144
- Zheng D, Zhang P Z, Wan J, Yuan D, Li C, Yin G, Zhang G, Wang Z, Min W, Chen J. 2006. Rapid exhumation at ~8 Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission-track thermochronology: Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin. *Earth Planet Sci Lett*, 248: 198–208

(责任编辑: 刘丽军)