

· 成果简介 ·

冈底斯山的隆升过程与青藏高原古高度研究

许强^{1,2} 丁林^{1,2**}

(1. 中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

[关键词] 氧同位素; 古高度; 冈底斯; 青藏高原
DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2015.01.015

青藏高原古高度不仅是其深部变形的结果,也是地表风化剥蚀作用的产物。古高度是约束青藏高原隆升模式最重要的独立变量。传统观点认为,印度板块与欧亚大陆碰撞之后,青藏高原一直处于低海拔的状态,于新近纪时期约 3 Ma 才开始整体逐渐隆升形成的。但越来越多的证据表明青藏高原不同的块体之间存在着显著的差异隆升,甚至同一块体不同区域也存在着明显的高差,并且其主体隆升时间比传统认识要早得多。

冈底斯山主体位于雅鲁藏布江-印度河北侧、怒江-班公湖南侧,是青藏高原和欧亚大陆南缘最为醒

目的构造单元之一。它从缅甸西部掸邦高原进入我国滇西腾冲地区后,再向北经西藏察隅转向西,一直西延至印度西北部的拉达克(Ladakh)和巴基斯坦北部科希斯坦(Kohistan)地区,绵延 4000 余公里(图 1A)。作为欧亚大陆碰撞的最南缘,冈底斯山的高度变化历史一直是青藏高原地球科学关注的焦点^[1-7],它不仅是认识青藏高原新生代形成演化的基础,也是探索亚洲气候演化的关键。本文主要回顾和总结了冈底斯古高度的研究历史、研究方法和最新研究进展。

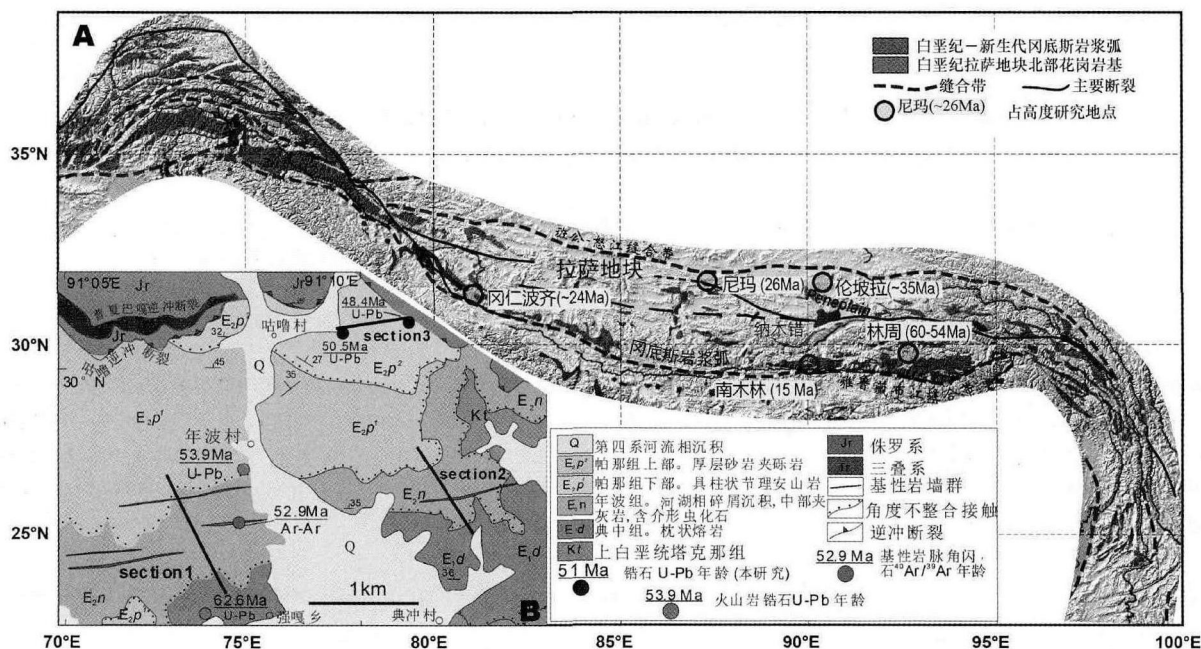


图 1 A. 青藏高原拉萨地块大地构造简图(图中圆圈表示拉萨地块上目前古高度研究地点及达到现今高度的时间); B. 林周盆地地质简图^[57](图中黑色线段表示测量年波组和帕那组沉积剖面的位置)。

收稿日期:2014-09-21; 修回日期:2015-01-09

* 通信作者: dinglin@itpcas.ac.cn

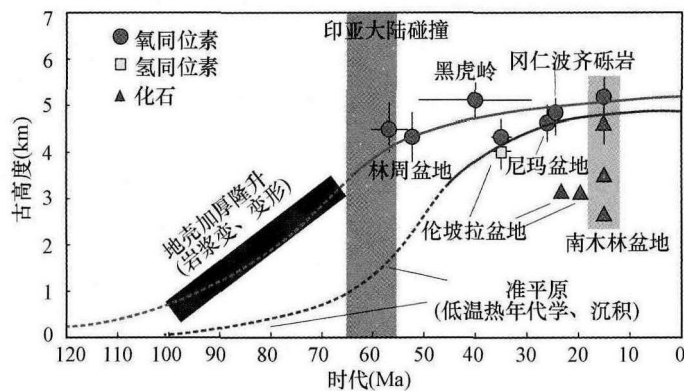


图 2 冈底斯和拉萨地块北部晚白垩世以来地表抬升历史(图中显示在伦坡拉盆地和南木林盆地, 氢氧同位素古高度计重建的古高度和动植物化石重建的古高度表现出显著的差异, 这可能与不同的古高度计记录的高度性质不同。氢氧同位素古高度计记录的是盆地流域的平均高度, 而动植物化石可能更多地与盆地底部高度相关。图中古高度结果及参考文献见文中描述)。

1 冈底斯古高度研究历史

冈底斯山广泛出露的晚三叠世-始新世岩浆岩组成了绵延上千公里的冈底斯巨型岩浆弧。早在上世纪 80 年代, 根据 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年龄、锆石 U-Pb 年龄及地球化学数据, 结合区域地质背景分析提出 90—60 Ma 花岗岩基是欧亚板块与印度板块之间的新特提斯洋洋壳向北俯冲到欧亚大陆南缘形成的巨型岩浆弧^[2,8-10], 类似于现在由于太平洋洋壳向东俯冲到南美大陆形成的南美安第斯岩浆弧^[11-15]。此后的几十年, 围绕着这条规模巨大的安第斯型岩浆带的形成演化与隆升进行了大量的构造地质学、地球化学和古高度等方面的研究(图 2)。

三叠纪末-侏罗纪早期, 大约从 200 Ma 开始, 新特提斯洋壳开始高角度俯冲在拉萨地块之下, 在其最南缘开始形成安第斯型岛弧^[2]。直到~110 Ma, 拉萨地块大部分地区仍然处于海平面以下, 并在南部和北部分别沉积了晚白垩世塔克那组及郎山组含大有孔虫灰岩为代表的海相地层。最南缘的冈底斯山当时的高度一般不高于 200 m^[16], 显示了一个正常大陆地壳厚度特征。它的地貌特征推测可能与现今的苏门答腊岛相似, 这被认为是拉萨地块开始隆升的起点。110—80 Ma, 岛弧火山岩不仅分布在拉萨地块南缘, 还扩展到整个拉萨地块, 其虽广泛分布, 但数量较少^[17]。这可能是由于新特提斯洋洋壳的平板俯冲而造成的, 与现今受纳兹卡大洋板块平板俯冲造成安第斯山地区广泛存在火山岩的现象一致。新特提斯洋低角度或者平板俯冲到拉萨

地块之下, 使拉萨地块岩石圈的厚度和强度都大大降低。强度降低的拉萨地块岩石圈可能发生相对快速的缩短加厚, 加之岛弧岩浆的增厚作用^[12], 由于艾利均衡作用冈底斯地表从早白垩世接近海平面的位置快速抬升, 到晚白垩世(~99 Ma) 已达到 3—4 km 的高度^[4], 从而形成早期的安第斯型冈底斯高原。

与此同时, 拉萨地块发生显著的构造缩短变形。直到晚白垩世末期, 措勤、尼玛、那曲、马区和林周等地区构造缩短达 60%, 并被古新世变形微弱的林子宗群火山岩不整合覆盖^[18-22]。根据上述观测事实, 结合对比现今安第斯山脉, 提出由于拉萨地块地壳晚白垩世进一步加厚, 在印度与亚洲大陆碰撞前可能形成一个相对窄(~300 km) 而平坦、海拔高度大约为 3000 m、特征类似于现今 Altiplano-Puru 高原的拉萨高原^[19-24](图 2)。

地壳发生显著缩短变形和地表抬升必然会加剧地表物质的剥蚀、搬运和沉积作用。随着新特提斯洋的持续俯冲以及拉萨与羌塘地块的碰撞, 拉萨地块北部早白垩世到晚白垩世早期形成的盆地, 无论是拉张型的裂谷盆地^[25], 还是挤压型的弧背前陆盆地^[21,26,27], 其内部沉积物都有大量来自南侧冈底斯岩浆弧的剥蚀物质。而同一时期的冈底斯南侧晚白垩世-早始新世日喀则弧前盆地也堆积了大量来自冈底斯岩浆弧的物质^[28,29]。这进一步表明早白垩世冈底斯作为剥蚀源区而具有正地形特征, 同时向其南北两侧沉积盆地提供物源。

上述岩浆活动、地壳变形、地表剥蚀和沉积等证据虽然揭示了冈底斯在晚白垩世发生了显著的隆

升,但还不足以刻画冈底斯山晚白垩世甚至新生代以来高度究竟是如何变化的,因此对冈底斯山古高度定量化的研究显得尤为必要。最早用于冈底斯山古高度定量研究的是古植物化石(图2)。徐仁(1982)^[30]根据冈底斯山南木林盆地保存的中新世常绿栎、杜鹃和落叶阔叶树,及柳、杨、桦、鹅耳枥和榆等古植物化石推测当时的气候温暖湿润,平均高度为1500 m。而 Spicer(2003)^[5]等人对同样的化石群落通过叶相多变量方法进行分析获得中新世平均温度为 6.8 ± 3.4 °C,并推算出南木林(冈底斯)海拔高度为 4689 ± 895 m,与盆地现今高度无异。同一套地层中产出的古土壤结核氧同位素平均值为 -19.6% ,以西瓦里克盆地中新世古土壤氧同位素作为参考,通过氧同位素分馏模型建立的古高度计计算获得南木林盆地15 Ma的古高度为 $5200 (+340/-450)$ m^[1],与植物化石叶相分析结果一致^[5]。这两种方法估算的结果颠覆了对青藏高原隆升的传统观点,并且第一次对冈底斯山古高度进行量化研究。而周浙昆等(2007)^[31]对叶相多变量分析方法和参数选择提出了质疑,并利用共存分析法计算出南木林盆地中新世的古高度为2500—3000 m; Song等^[32](2010)进一步通过温度校正把高度修正为3000—3150 m之间,15 Ma以来仍然上升了至少1.5 km。针对叶相多变量分析方法的质疑,结合近年来在喜马拉雅山前低海拔地区的研究成果,对叶相多变量分析方法的参数选择进一步优化(选取喜马拉雅南部相应时代的焓作为参考),并经过古纬度变化校正后,南木林盆地的古高度重新调整为 5540 ± 728 m,与氧同位素获得的古高度在误差范围内完全一致^[33]。这说明南木林盆地自15 Ma以来降低了大约1 km左右,而不是上升。在冈底斯西部的冈仁波齐地区冈仁波齐砾岩中的古土壤氧同位素揭示了更早的隆升历史,24 Ma左右冈底斯山已与现代高度无异^[34]。尽管这些古高度结果有助于我们认识冈底斯的古高度变化,但仍然无法得知冈底斯岩浆弧在碰撞前后(65—55 Ma)^[35-38]的古高度,是否如前人所说的具有安第斯型山脉特征,这才是认识青藏高原新生代隆升过程的起点和关键。

2 古新世冈底斯山的古高度

位于拉萨北部30 km紧邻冈底斯岩浆弧北侧的林周盆地发育一套含火山碎屑岩的古近纪林子宗群

(图1B)。林子宗群底部典中组不整合覆盖在晚白垩世设兴组和塔克那组陆相沉积之上,以玄武岩、玄武安山岩及火山碎屑岩为主。锆石U-Pb年龄限定的火山岩形成时代为69—60 Ma^[18]。中部年波组为河流相、三角洲及湖相沉积,夹数层火山凝灰岩,并发育含土壤结核的古土壤层和含介形虫化石的灰岩层。火山凝灰岩和侵入其中的辉长岩脉及上部帕那组火山岩限定的沉积时代为60—54 Ma^[18,39,40]。顶部的帕那组分布在盆地北部,下部为具柱状解理的熔结凝灰岩和流纹岩,喷发时代为54—48 Ma;上部为一套厚约90 m的冲积扇—辫状河沉积地层,古土壤,夹数层火山碎屑岩,其中火山碎屑岩夹层的锆石U-Pb限定的沉积时代为51—48 Ma。因此林周盆地是利用氧同位素重建冈底斯碰撞前后的古高度最有利的地区之一。

利用稳定同位素质谱仪对年波组和帕那组三个沉积剖面的古土壤和湖相灰岩进行碳氧同位素测试,结果显示年波组古土壤和湖相钙质碳酸盐最小 $\delta^{18}\text{O}_c$ 值为 -19.2% ,平均值为 $-18.2 \pm 0.8\%$,平均 $\delta^{13}\text{C}_c$ 值为 $-2.2 \pm 1.1\%$;年波组中部湖相灰岩平均 $\delta^{18}\text{O}_c$ 值为 $-14.2 \pm 1.7\%$,平均 $\delta^{13}\text{C}_c$ 值为 $-4.0 \pm 1.5\%$,并且呈正相关变化关系;帕那组古土壤氧同位素比值比年波组要偏正,最小 $\delta^{18}\text{O}_c$ 值为 -16.2% ,平均值为 $-13.7 \pm 1.1\%$,平均 $\delta^{13}\text{C}_c$ 值为 $-6.4 \pm 0.8\%$,也具有正相关的变化关系。

利用CAMECA NanoSIMS 50L对年波组介形虫化石进行了氧同位素和Mg/Ca比值分析。通过对介形虫化石进行 $^{12}\text{C}^{14}\text{N}$ 含量扫描图像能清晰分辨出至少5层壳层,并对每一层进行氧同位素和Mg/Ca比值原位分析,结果显示介形虫壳 $\delta^{18}\text{O}_{oc}$ 值在 -15.1 和 -12.6% 范围之间有规律地变化,最大值和最小值相差2.4%,并且氧同位素比值的范围在湖相碳酸盐变化范围之内。

年波组碳氧同位素特征表明钙质碳酸盐和古土壤沉积在开放的水体环境^[41],能够反映当地当时的降水同位素特征,这与它们辫状河—开放湖泊沉积环境一致。而湖相碳酸盐碳氧同位素呈明显的正相关关系,氧同位素值变化达到 $\sim 6\%$,但介形虫化石壳的Ca/Mg比值达到20,表明年波组湖相灰岩沉积在较浅的长期滞留的、但仍然开放的水体环境中^[42]。尽管帕那组上部地层沉积在冲积扇—辫状河环境中,但它们的自生碳酸盐碳氧同位素呈正相关关系,这表明土壤水可能经历很强的蒸发富集和较

弱的土壤呼吸作用。

碳酸盐氧同位素是否被重置是利用氧同位素重建古高度的关键,除了传统的薄片观察、碳酸盐砾石同位素检验外,本文创新性利用介形虫壳保存的结构特征和氧同位素特征来检验潜在的同位素重置。在显微照片下,年波组介形虫壳层的白色方解石层和暗色富含有机质层相间排列,显示清晰的原生微结构特征,说明介形虫经历较浅的埋藏过程^[43]。不同壳层的氧同位素能真实地记录水体氧同位素和温度的变化,而在浅水环境中,氧同位素主要受季节性温度变化。如前所述,介形虫壳不同壳层氧同位素呈有规律地减低和增加,变化幅度达 2.4‰,这与现生介形虫氧同位素受季节温度变化值一致(~2.0‰)^[44-46]。因此年波组介形虫壳氧同位素季节变化证实了与介形虫同时沉积的古土壤、湖相钙质碳酸盐、湖相灰岩以及晚于介形虫沉积的帕那组古土壤氧同位素既没有受到后期的成岩作用改造,也未受到后期埋藏和地温的重置作用。

我们利用年波组和帕那组古土壤最小氧同位素值(分别为: -19.2‰和 -16.2‰)来重建 60—54 Ma 和 51—48 Ma 冈底斯山的古高度。通过已有的资料^[5,47]推断上述两个时段内的温度为 18.5 ± 8.0℃和 13.8 ± 8.0℃,从而通过碳酸盐水岩交换公式计算出年波组和帕那组沉积时古地表水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{psw}}$ 分别为 -18.2‰和 -16.3‰。为了和现代氧同位素与高度关系相比较,还需要对古地表水氧同位素进行古纬度(-0.7‰)、古海水(1.5~2.0‰)等变化的校正,最后结果分别为 -16.9‰和 -15.0‰。而喜马拉雅山前低海拔氧同位素参考值自始新世以来变化很小^[48],这里选取新德里多年平均降水氧同位素值 -5.8‰为低海拔参考值。因此通过热动力学分馏模型建立的氧同位素与高度的关系^[49]重建林周盆地 60—54Ma 的古高度为 4500 ± 400 m; 51—48 Ma 时的古高度为 4000 ± 500 m。考虑到古新世-始新世全球大暖期,冈底斯古纬度比现今要低,喜马拉雅山尚未隆起,来自新特提斯残留洋或者印度洋水汽同位素分馏效应不如现在显著,从而减少氧同位素随高度变化梯度;同时考虑到不可避免的土壤氧同位素的蒸发作用,因此重建的古高度代表冈底斯的最小平均高度。

3 古地貌意义

由于新特提斯洋的俯冲作用,冈底斯岩浆弧在

130—110 Ma 左右形成类似于现今苏门答腊岩浆弧一样的地貌,海拔高度不超过 500 m^[3,16]。随着拉萨地块与羌塘地块的碰撞以及新特提斯洋的持续俯冲,拉萨地块包括冈底斯在 110—60 Ma 发生强烈的地壳加厚和缩短变形,在印度与亚洲大陆碰撞前形成海拔 3000 m 以上安第斯型高原^[4,19-21],而印度与亚洲大陆碰撞时冈底斯山可能已经达到 4500 m^[57]。

伴随着冈底斯山隆升的同时,剥蚀作用也在不断加强。剥蚀的物质分别沉积在冈底斯弧前和弧后盆地^[26-29]。而弧后盆地-这里称为尼玛-伦坡拉盆地-同时还有来自北部早始新世海拔可能达到 5000 m 的羌塘高原的剥蚀物质^[27,50],在碰撞前后可能为海拔高度约 1000 m 左右的准平原^[51],碰撞后快速隆升,直到 26Ma 达到现今高度^[52-54](图 2)。因此,印度与亚洲大陆碰撞时在高海拔的羌塘和冈底斯之间可能存在一个海拔高度可能为 1000 m 左右的山间走廊带,而不是平坦的类似于 Altiplano 的拉萨高原或者“原高原”^[57],直到晚渐新世才隆升到现今高度^[52-54],但到中新世仍然存在局部相对高差达 1000 m 以上的内陆盆地^[32,55,56]。

致谢 本文受到国家自然科学基金项目(批准号: 41490615)、中国科学院先导专项(批准号: XDB03010401)的资助。

参 考 文 献

- [1] Currie BS, Rowley DB, Tabor N J. Middle Miocene paleoaltimetry of southern Tibet: Implications for the role of mantle thickening and delamination in the Himalayan orogen. *Geology*, 2005, 33: 81-184.
- [2] Harris N. The elevation history of the Tibetan Plateau and its implications for the Asian monsoon. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 241: 4-15.
- [3] Harris N, Ronghua X, Lewis C, Hawkesworth C, Yuquan Z. Isotope geochemistry of the 1985 Tibet geotraverse, Lhasa to Golmud. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1988, 327: 263-285.
- [4] Murphy MA, Yin A, Harrison TM, Durr SB, Chen Z, Ryerson FJ, Kidd WS, Wang X, Zhou X. Did the Indo-Asian collision alone create the Tibetan plateau? *Geology*, 1997, 25: 719-722.
- [5] Spicer RA, Harris NBW, Widdowson M, Herman AB, Guo S, Valdes PJ, Wolfe JA, Kelley SP. Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years. *Nature*, 2003, 421: 622-624.

- [6] Tapponnier P, Xu ZQ, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang JS. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 2001, 294: 1671—1677.
- [7] Copeland P, Mark Harrison T, Kidd Wea, Xu R, Zhang Y. Rapid early Miocene acceleration of uplift in the Gangdese Belt, Xizang (southern Tibet), and its bearing on accommodation mechanisms of the India-Asia collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 86: 240—252.
- [8] Maluski H, Proust F, Xiao XC. $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating of the trans-Himalayan calc-alkaline magmatism of southern Tibet. *Nature*, 1982, 298: 152—154.
- [9] Schärer U, Xu RH, Allègre C. J. U-Pb geochronology of Gangdese (Transhimalaya) plutonism in the Lhasa-Xigaze region, Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 69: 311—320.
- [10] Xu RH, Schärer U, Allègre C. J. Magmatism and metamorphism in the Lhasa block (Tibet): a geochronological study. *The Journal of Geology*, 1985, 93: 41—57.
- [11] Chu MF, Chung SL, Song B, Liu D, O'Reilly SY, Pearson NJ, Ji J, Wen DJ. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet. *Geology*, 2006, 34: 745—748.
- [12] Ding L, Lai QZ. New geological evidence of crustal thickening in the Gangdese block prior to the Indo-Asian collision. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48: 1604—1610.
- [13] Wen DR, Liu D, Chung SL, Chu MF, Ji J, Zhang Q, Song B, Lee TY, Yeh MW, Lo CH. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Gangdese Batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet. *Chemical Geology*, 2008, 252: 191—201.
- [14] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 嵇少丞, 张泽明, 刘焰. 印度-亚洲碰撞大地构造. *地质学报*, 2011, 85: 1—33.
- [15] Ji WQ, Wu FY, Chung SL, Li JX, Liu CZ. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet. *Chemical Geology*, 2009, 262: 229—245.
- [16] Fielding EJ. Tibet uplift and erosion. *Tectonophysics*, 1996, 260: 55—84.
- [17] Coulon C, Maluski H, Bollinger C, Wang S. Mesozoic and cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ^{39}Ar — ^{40}Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 79: 281—302.
- [18] He S, Kapp P, DeCelles PG, Gehrels GE, Heizler M. Cretaceous-Tertiary geology of the Gangdese Arc in the Linzhou area, southern Tibet. *Tectonophysics*, 2007, 433: 15—37.
- [19] Kapp P, DeCelles PG, Gehrels GE, Heizler M, Ding L. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, 119: 917—932.
- [20] Kapp P, Yin A, Harrison TM, Ding L. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117: 865—878.
- [21] Pullen A, Kapp P, Gehrels GE, DeCelles PG, Brown EH, Fabijanic JM, Ding L. Gangdese retroarc thrust belt and foreland basin deposits in the Damxung area, southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 33: 323—336.
- [22] Volkmer JE, Kapp P, Guynn JH, Lai Q. Cretaceous-Tertiary structural evolution of the north central Lhasa terrane, Tibet. *Tectonics*, 2007, 26: TC6007.
- [23] Wang C, Dai J, Zhao X, Li Y, Graham, S. A., He, D., Ran, B., Meng, J. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review. *Tectonophysics*, 2014, 621: 1—43.
- [24] Wang CS, Zhao XX, Liu ZF, Lippert PC, Graham SA, Coe RS, Yi HS, Zhu LD, Liu S, Li YL. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105: 4987—4992.
- [25] Zhang KJ, Zhang YX, Tang XC, Xia B. Late Mesozoic tectonic evolution and growth of the Tibetan plateau prior to the Indo-Asian collision. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114: 236—249.
- [26] DeCelles PG, Kapp P, Ding L, Gehrels GE. Late Cretaceous to middle Tertiary basin evolution in the central Tibetan Plateau: Changing environments in response to tectonic partitioning, aridification, and regional elevation gain. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, 119: 654—680.
- [27] Zhang QH, Ding L, Cai FL, Xu XX, Zhang LY, Xu Q, Willems H. Early Cretaceous Gangdese retroarc foreland basin evolution in the Selin Co basin, central Tibet: evidence from sedimentology and detrital zircon geochronology. *Geological Society, London, Special Publications*, 2011, 353: 27—44.
- [28] Dürr SB. Provenance of Xigaze fore-arc basin clastic rocks (Cretaceous, south Tibet). *Geological Society of America Bulletin*, 1996, 108: 669—684.
- [29] Wu FY, Ji WQ, Liu CZ, Chung SL. Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic data from the Xigaze fore-arc basin: Constraints on Transhimalayan magmatic evolution in southern Tibet. *Chemical Geology*, 2010, 271: 13—25.
- [30] 徐仁. 西藏古植被的演变与青藏高原的隆起. *植物分类学报*, 1982, 204: 385—391.
- [31] 周渐昆, 杨青松, 夏珂. 栎属高山栎组植物化石推测青藏高原的隆起. *科学通报*, 2007, 52: 249—257.
- [32] Song XY, Spicer RA, Yang J, Yao YF, Li CS. Pollen evidence for an Eocene to Miocene elevation of central southern Tibet predating the rise of the High Himalaya. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 297: 159—168.
- [33] DeCelles PG, Kapp P, Quade J, Gehrels GE. Oligocene-Miocene Kailas basin, southwestern Tibet: Record of postcollisional upper-plate extension in the Indus-Yarlung suture zone. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123: 1337—1362.
- [34] Khan MA, Spicer RA, Bera S, Ghosh R, Yang J, Spicer TEV, Guo SX, Su T, Jacques F, Grote PJ. Miocene to Pleistocene floras and climate of the Eastern Himalayan Siwaliks, and new palaeoelevation estimates for the Namling-Oiyug Basin, Tibet. *Global Planetary Change*, 2014, 113: 1—10.
- [35] DeCelles PG, Kapp P, Gehrels GE, Ding L. Paleocene-Eocene foreland basin evolution in the Himalaya of southern Tibet and Nepal: Implications for the age of initial India-Asia collision. *Tectonics*, 2014, 33: 2014TC003522.
- [36] Ding L, Kapp P, Wan X. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India - Asia collision, south central Tibet. *Tectonics*, 2005, 24: TC3001.
- [37] Wu FY, Ji WQ, Wang JG, Liu CZ, Chung SL, Clift PD. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the onset time of India-Asia collision. *American Journal of Science*, 2014, 314: 548—579.

- [38] Zhang Q, Willems H, Ding L, Gräfe KU, Appel E. Initial India-Asia continental collision and foreland basin evolution in the Tethyan Himalaya of Tibet: Evidence from stratigraphy and paleontology. *The Journal of Geology*, 2012, 120: 175—189.
- [39] 李皓扬, 钟孙霖, 王彦斌, 朱弟成, 杨进辉, 宋彪, 刘教一, 吴福元. 藏南林周盆地林子宗火山岩的时代、成因及其地质意义: 锆石-铀年龄和同位素证据. *岩石学报*, 2007, 23: 493—500.
- [40] 岳雅慧, 丁林. 西藏林周基性岩脉的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学, 地球化学及其成因. *岩石学报*, 2006, 4: 855—867.
- [41] Talbot MR. A Review of the Paleohydrological Interpretation of Carbon and Oxygen Isotopic-Ratios in Primary Lacustrine Carbonates. *Chemical Geology*, 1990, 80: 261—279.
- [42] Garziona CN, Dettman DL, Horton BK. Carbonate oxygen isotope paleoaltimetry: evaluating the effect of diagenesis on paleoelevation estimates for the Tibetan plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 212: 119—140.
- [43] Bennett CE, Williams M, Leng MJ, Siveter DJ, Davies SJ, Sloane HJ, Wilkinson, IP. Diagenesis of fossil ostracods: Implications for stable isotope based palaeoenvironmental reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 305: 150—161.
- [44] von Grafenstein U, Erlernkeuser H, Trimborn P. Oxygen and carbon isotopes in modern fresh-water ostracod valves: assessing vital offsets and autecological effects of interest for palaeoclimate studies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 148: 133—152.
- [45] Xia J, Engstrom D, Ito E. Geochemistry of ostracode calcite: Part 2. The effects of water chemistry and seasonal temperature variation on *Candona rawsoni*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61: 383—391.
- [46] Xia J, Ito E, Engstrom D. Geochemistry of ostracode calcite: Part 1. An experimental determination of oxygen isotope fractionation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61: 377—382.
- [47] Zachos JC, Stott LD, Lohmann KC. Evolution of Early Cenozoic Marine Temperatures. *Paleoceanography*, 1994, 9: 353—387.
- [48] Quade J, Breecker DO, Daeron M, Eiler J. The Paleoaltimetry of Tibet: An Isotopic Perspective. *American Journal of Science*, 2011, 311: 77—115.
- [49] Rowley DB. Stable isotope-based paleoaltimetry: Theory and validation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, 66: 23—52.
- [50] Xu Q, Ding L, Zhang L, Cai F, Lai Q, Yang D. Paleogene high elevations in the Qiangtang Terrane, central Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 362: 31—42.
- [51] Hetzel R, Dunkl I, Haider V, Strobl M, von Eynatten H, Ding L, Frei D. Peneplain formation in southern Tibet predates the India-Asia collision and plateau uplift. *Geology*, 2011, 39: 983—986.
- [52] DeCelles PG, Quade J, Kapp P, Fan MJ, Dettman DL, Ding L. High and dry in central Tibet during the Late Oligocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 253: 389—401.
- [53] Polissar PJ, Freeman KH, Rowley DB, McInerney FA, Currie BS. Paleoaltimetry of the Tibetan Plateau from D/H ratios of lipid biomarkers. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 287: 64—76.
- [54] Rowley DB, Currie BS. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet. *Nature*, 2006, 439: 677—681.
- [55] Deng T, Wang SQ, Xie GP, Li Q, Hou SK, Sun BY. A mammalian fossil from the Dingqing Formation in the Lunpola Basin, northern Tibet, and its relevance to age and paleoaltimetry. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56: 2873—2880.
- [56] Sun J, Xu Q, Liu W, Zhang Z, Xue L, Zhao P. Palynological evidence for the latest Oligocene? early Miocene paleoelevation estimate in the Lunpola Basin, central Tibet. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 399: 21—30.
- [57] Ding L, Xu Q, Yue Y, Wang H, Cai F, Li S. The Andean-type Gangdese Mountains: Paleoelevation record from the Paleocene-Eocene Linzhou Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 392: 250—264.

Paleoelevation research on Gangdise Mountains and Qinghai Tibet Plateau

Xu Qiang Ding Lin

(Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift,
Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Key words oxygen isotope; paleoelevation reconstruction; Gangdise Mountains; Qinghai Tibet Plateau