

西秦岭新生代夷平面发育过程及其对高原隆升的启示

张研博, 王修喜, 刘慧明, 王红

(兰州大学资源环境学院)

摘要: 西秦岭地区是高原西秦岭新生代夷平面发育过程及其对高原隆升的启示西秦岭新生代夷平面发育过程及其对高原隆升的启示东部边界, 存留有大量层状地貌面, 其发育过程与高原隆升研究息息相关。但目前对西秦岭夷平面具体范围的界定工作相对缺乏, 对其发育及解体的年代尚不清楚。本文使用 SRTM DEM 数据 (分辨率 90 米) 在 Arcgis 软件中提取西秦岭地区海拔、坡度和地形起伏度数据, 依据野外实地观测结果, 最终确定夷平面的范围。我们的研究认为, 青藏高原东北部夷平面可分为两级, 山顶面多分布于主夷平面周边的高山顶面, 海拔 3600-4100 米不等, 发育期可能为 52-41Ma。主夷平面在高原主体的分布高度为 3400--3600 米, 而到高原周边降低为 2700--2800 米, 发育期可能为 27-13Ma。夷平面发育期之间可能为高原隆升期。

关键词: 夷平面; 高原隆升; 山顶面; 主夷平面

中图分类号: P54

Development of planation in the West Qinling and its implications for Tibetan Plateau uplift

ZHANG Yanbo, WANG Xiuxi, LIU Huiming, WANG Hong

(Lanzhou University College of Earth and Environment Sciences)

Abstract: The western Qinling region is the eastern boundary of the plateau, which has a large number of stratified landforms, and its development process is closely related to the study of plateau uplift. However, the specific scope of the planation surface in the West Qinling Mountains is relatively lacking, and the age of its development and disintegration is still unclear. In this paper, SRTM DEM data (resolution 90m) was used to extract elevation, slope and topographic relief data in the West Qinling region from ArcGIS software. Based on field observation results, the range of planation surface was finally determined. According to our study, the planation surface in the northeastern part of the Tibetan Plateau can be divided into two levels. The high planation is mostly distributed at the top of the high mountains surrounding the main planation surface, with an elevation of 3,600-4,100 meters, and the development period may be 52-41Ma. The main planation surface is distributed at a height of 3400-3600 m in the main body of the plateau, and decreases to 2700-2800 m in the periphery of the plateau, and the development stage may be 27-13Ma. The plateau uplift may occur between the planation surface development periods.

Key words: Planation; Uplift of plateau; High planation; Main planation

0 引言

夷平面是地貌长期发展的终极产物经抬升破坏或埋藏的结果^[1]。在 Davis^[2]的地貌侵蚀循环学说中, 岩体受内力作用而抬升 (青年期), 之后构造活动相对减弱 (壮年期), 经过

基金项目: 国家自然科学基金 (41671001)

作者简介: 张研博 (1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为构造地貌学

通信联系人: 王修喜 (1980-), 男, 硕士生导师, 副教授, 主要研究方向为构造地貌学. E-mail: wangxiuxi@lzu.edu.cn

长时间地表剥蚀作用和夷平作用（老年期），形成海拔很低，起伏很小，以截面形式横切过

45

一切年龄上先于它的地层和构造的特殊剥蚀地形^[3]，其后另一个循环开始，将这种终极地貌又抬升到不同高度处，是为夷平面。因此，夷平面的发育过程是为内外营力作用于地表的最直观结果，是地质地貌体的形成演化的最佳信号载体。

50

青藏高原及其周边地区夷平面保存完好、广泛分布^[1,4-5]。目前对高原夷平面的研究取得了很多进展：吴珍汉等^[6]认为青藏高原夷平面的侵蚀基准面不是海平面，而是形成于中新世早期古大湖的湖面，夷平面就形成于高海拔地区；刘静等^[7-8]认为戴维斯的旋回式地貌演化条件仍有一定的缺陷，所谓的“夷平面”不过是内流型高原水系下切能力减弱的结果，且及解体不一定意味着高原隆升，也可能是气候变化造成的；Strobl et al.^[9]通过对西藏班戈县附近的基岩准平原的研究认为，出现在不同高度的低起伏面并非意味着多次夷平，而是原始准平原发生抬升并被现代水系切割后的残余物，且班戈县附近的基岩准平原可能在始新世或之后不久出现；高红山^[10]认为高原上各级层状地貌面是构造运动和气候变化共同作用的产物；Van der Beek et al.^[11]将热年代学手段应用于 Deosai 地区夷平面研究，认为该区夷平面的形成并非冰川侵蚀的作用，而是先前地貌的残余，且此区域可能在始新世便到达现今高度。可见，虽然针对高原夷平面的研究取得了巨大进步，但是在夷平面的形成过程方面

55

60

仍然存在分歧，从而也阻碍和深入探讨他们对高原隆升的指示意义。

西秦岭地区既是我国南北分异的天然界线，又是青藏高原的东部边界，该地区型地貌面保存良好。近年来热年代学技术在地貌演化领域取得了较广泛的应用，而西秦岭地区亦是进行此类研究的理想区域。Enkelmann et al.^[12]根据西和县附近地区的基岩磷灰石裂变径迹（AFT）热史模拟认为该区域于 9-4Ma 发生快速剥露事件；Lease et al.^[13-14]通过拉脊山地区获得的 AFT 数据得出山体大约在 22Ma 发生快速剥露的结论；Zattin and Wang^[15]根据西秦岭断裂南北两侧样品 AFT 热史模拟的不同结果，提出西秦岭断裂以北地区从约 200Ma 便保持稳定，而断裂以南约于 150-80Ma 发生部分热重置。对西秦岭地区夷平面的研究可以为青藏高原在其对东北边缘的形成过程具指示意义，也可对上述分歧与争议进行评估和探讨。

65

70

本文在定量分析的基础上，企图获得西秦岭地区夷平面分布范围、期次并综述已有的低温热年代学成果，进行年代学分析，确定夷平面发育的时代，而后探讨高原在该区的隆起过程，因此可以为高原向东北的扩展提供理论依据。

1 区域概况

75

地处我国自然区划的天然分界线的西秦岭位于昆仑-秦岭-大别山纬向构造带的东端（图 1），东北与华北地块相接，西北与祁连山带相连，西临柴达木地块，南部以松潘-甘孜褶皱带与青藏高原、扬子地块毗邻，是构成中国大陆主要造山带及地块的十字交汇区^[16]，也是高原东北向扩展的最前沿。

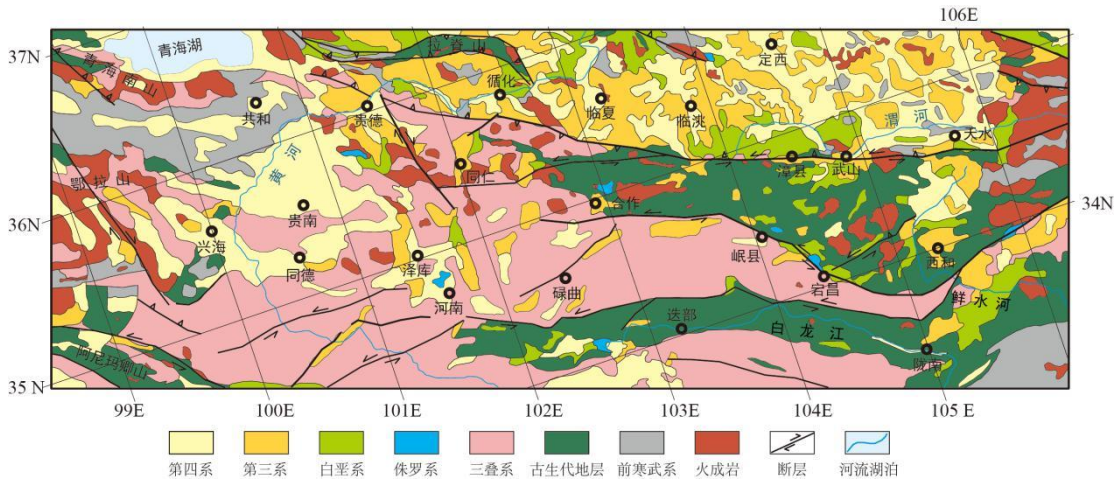


图 1 西秦岭地区地质简图

Fig.1 Simplified geologic map of West Qinling

80

西秦岭造山带主要由古中生代火山岩沉积构成，并有晚三叠-侏罗纪花岗岩侵入^[17]。西秦岭地区北部以西秦岭断裂带与临夏盆地为界^[15]，断裂带以南广布古生代及早中生代地层（主要是三叠系地层，侏罗系及白垩系地层分布范围较小），以北则以新生代沉积为主。西秦岭山区山间盆地及河谷中也有新生代沉积物分布。

85

西秦岭造山带是在不同阶段、不同机制作用下经过漫长的地质过程形成的，自元古代经历多期幕式挤压和拉张，中生代被强烈的陆内造山作用改造，于晚新生代强烈隆起^[16]，最终形成西秦岭的现代面貌。

90

西秦岭地区的层状地貌面主要包括夷平面、剥蚀面、盆地面和河流阶地等。夷平面又可分为两级，分别为主夷平面和山顶面，它们广泛分布于前寒武系、中生代和早第三系地层；剥蚀面与河流系统存在广泛联系，多位于河谷间的高地，海拔高于河流阶地但低于夷平面，分布的地层主要是第四系地层；山区之间分布若干小型盆地，地层主要为老第三系和第四系地层，人类聚落多位于这些盆地中；河流阶地面则分布于河谷地带。

2 方法

95

2.1 地貌面解译

随着数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）的出现，夷平面研究逐渐从定性发展到定量-半定量阶段，而对夷平面范围的准确界定是进行夷平面定量-半定量研究的重要基础^[18]。目前大部分学者对夷平面范围的界定是基于一定的地貌因子指标，即给数个地貌因子指标设定边界值，然后在 Arcgis 等软件中自动提取符合条件的区域，最后结合野外实

100 地观测或高清卫星影像确定夷平面的范围^[11,18-20]。常用的地貌因子有坡度、高程、面积等。

2.2 地貌面定年

105 最近几年,低温热年代学测年技术日臻完善,较可靠的年代数据的获得使更准确地界定夷平面形成年代成为可能,且已经逐渐用于夷平面研究中。王修喜^[21]指出了低温热年代学技术在高原层状地貌研究中的理论基础,由于地温梯度的存在,地质体的埋藏深度与其温度之间可以建立联系,反映在热史模拟的时间-温度曲线中,地质体可能经历的发育过程有四种基本类型,分别为(I)快速“淬火”型,在很短的时间内温度剧烈降低,在此时期内地质体可能快速隆升至现代高度甚至更高;(II)构造平静型,时间-温度曲线几乎为一条斜率为零的直线,表示地质体所在区域处于构造静止期,此阶段中地质体的埋藏深度几乎没有发生变化;110 (III)稳态剥露型,即在较长时间尺度内地质体的时间-温度曲线为一条倾斜的直线,此阶段内构造抬升和外力剥蚀速率相对均衡,与类型II不同的是,此时地貌虽然仍保持稳态,但地质体的埋藏深度仍在减小;(IV)加积埋藏型,此阶段内地质体的时间-温度曲线斜率为负,即地质体的埋藏深度增大。其中类型II、III持续的时间可能为典型地貌面(夷平面或剥蚀面)的发育时间。

115

3 结果

3.1 夷平面的野外观测特征

120 如前文所述,夷平面在形成之初海拔较低,坡度平缓,经后期变形形成夷平面的现代形态。在前期野外实地观测中,我们在岷县、玛曲县、河南蒙古族自治县附近均发现夷平面,其特征如图2。

125 岷县附近,现代夷平面多存留相对平坦的表面,边界由陡坡构成,使夷平面区别于周围地形(图2a)。闰井镇(34° 19' 29" N, 104° 33' 44" E)夷平面分布高度约为海拔3250--3300米,乡村、城镇和道路分布于夷平面周边山谷中,夷平面高出山谷约600米。从形态上看,该处夷平面顶部仍保持水平状,几乎没有岛山分布。据闰井镇夷平面分布海拔高度判断,其对应青藏高原两级夷平面中的主夷平面之一部^[1,4-5]。

130 在玛曲县(33° 59' 59" N, 102° 04' 27" E)附近则能清楚地观察到两级夷平面(图2b)。广阔的主夷平面分布海拔高度约为3450米,有一些岛状山丘分布其上,总体来说夷平面起伏和缓。远处齐平的山顶面,海拔高度约为4100米。主夷平面与山顶面以陡坡相连而几乎不受地层和岩性的限制,说明主夷平面和山顶面不是一个夷平面经后期变异的结果,而是两个夷平阶段分别发育到终极的产物^[1],说明玛曲县附近主夷平面形成时,山顶面比其高出约650米。

135 我们在野外观测时发现许多地区的夷平面表面发育有红色风化壳,其上分布基岩露头(图2c)。不同环境下形成的风化壳特征是不同的,而红色风化壳一般代表了一种热带或亚热带湿热气候特征^[22],而现代高原气候环境显然不可能发育红色风化壳,故夷平面一定不是形成于现代高原高海拔环境中,而是在低海拔湿热环境中形成后被抬升至现代高度的。



图2 西秦岭地区夷平面野外照片

Fig 2 The photos of the planation of West Qinling

140 3.2 夷平面的室内提取

本次研究中对夷平面的提取方法如下：

夷平面平缓的坡度及较小的地形起伏度是其最显著的特征，坡度小且地形起伏度小的区域属于夷平面的可能性就大，故在 Arcgis 中提取坡度（图 3a）及地形起伏度（图 3b），而后对所有数据进行重分类，即将低起伏面区域与非低起伏面区域分离。

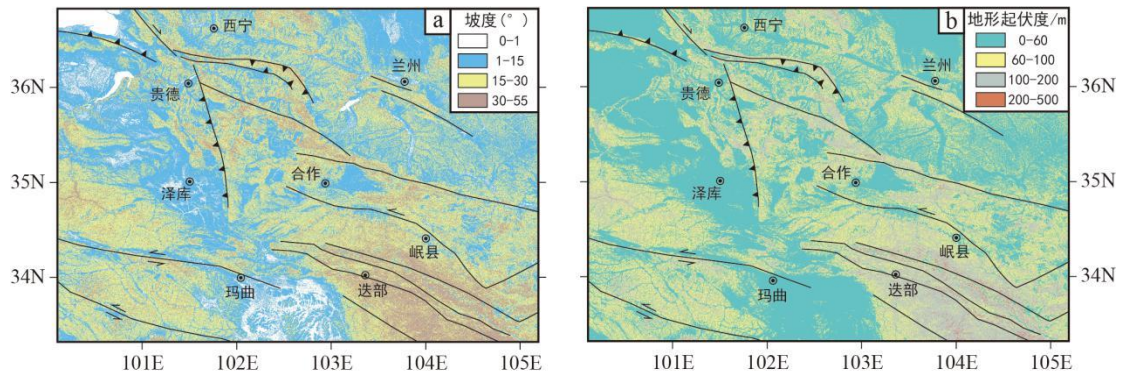


图3 西秦岭地区坡度、地形起伏度图

Fig 3 Slope and relief of West Qinling

145

150

对于夷平面坡度及地形起伏度的边界条件的确定，我们选择了西秦岭地区马衔山、达坂山和拉脊山三个有夷平面分布的典型区域，分别在夷平面、山间岭谷及河道或山间盆地上选取等大的矩形区域，并随机提取 200 个点，读取各点的海拔、坡度及地形起伏度（图 4）。由图 4 可以发现，与夷平面区域对比，山间岭谷区的坡度及地形起伏度范围明显更大，而河

道或山间盆地虽然坡度和地形起伏度也较小，但其海拔明显低于夷平面。第三列图表显示了夷平面区域的坡度及地形起伏度特征，可以看出，其坡度和地形起伏度在 0-15°、0-60m 范围内聚集程度最高，故选择坡度 15°，地形起伏度 60m 为本次夷平面提取的边界条件。冯金良等^[22]将坡度小于等于 7°、连续、大区域分布的平缓面视为夷平面；马振华等^[18]利用高程变点和最小误差法对青藏高原东北缘马衔山夷平面进行了提取，认为对青藏高原两级夷平面识别的最佳坡度边界是 12°；Van der beek et al.^[11]认为西北喜马拉雅地区小于 17° 的地貌面都可能是夷平面。故本文选择 15° 为边界条件是合理的。然后用焦点统计工具分别提取区域中的高点和低点并作差，即得地形起伏度。对于西秦岭地区地形起伏度 < 60m 能较好涵盖夷平面，这与 Clark et al.^[23]对高原东南缘夷平面进行解译时所选择的约 690m 差距较大，这说明夷平面的分布特征具有一定的地域性。将坡度小于 15° 与地形起伏度小于 60m 的区域作交集运算，得到低起伏面区域。再利用属性提取工具将低起伏面区域提取出来并转换为面数据，定义合适的投影坐标系后计算它们的面积。由于本研究范围较广，故将面积大于等于 0.3 平方千米的低起伏面予以保留。最后考虑夷平面分布的区位指标，夷平面应分布于现代水系的上部，主要位于山顶面或现代水系分水岭^[18]，以陡崖区别于周围地形，并结合先前进行的野外实地观测及 LocaSpace 软件中的高清卫星影像，最终确定了夷平面的范围。

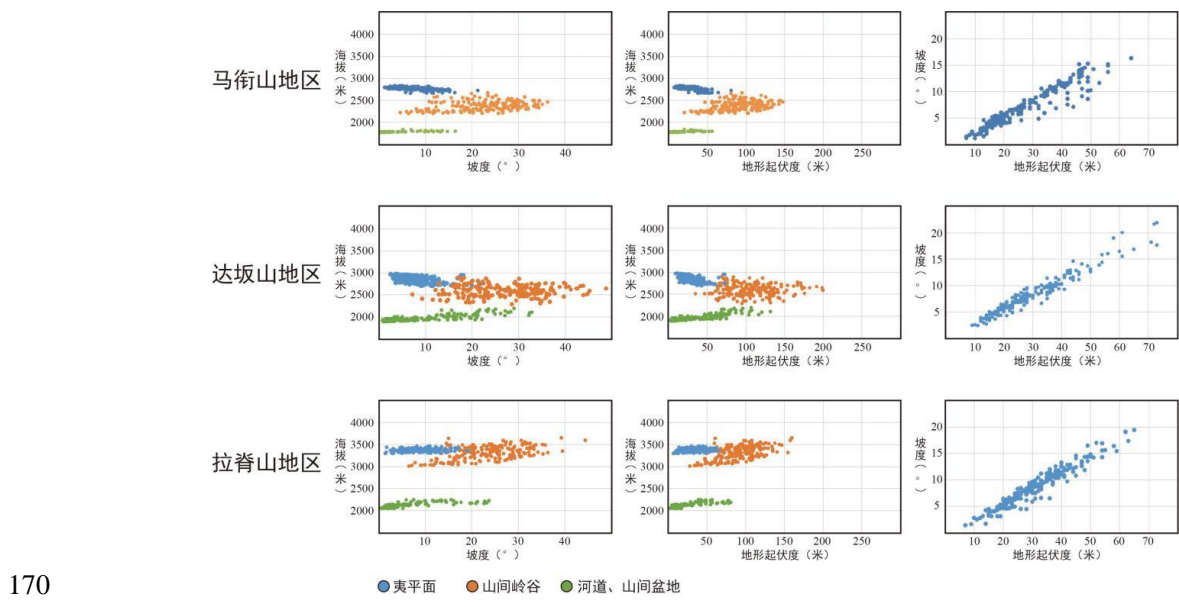


图 4 夷平面与其他地貌单元的对比
Fig 4 Comparison between penplain with other geomorphic unit

根据在 Arcgis 中提取的坡度小于等于 15 度、地形起伏度小于 60m 的区域范围，并结合前期的野外实地观测，基本确定了西秦岭地区存在的两级夷平面及一级剥蚀面的分布范围，结果如图 5。并在其中选择了 a、b、c、d 四个典型区域，将获得的夷平面范围投至高清卫星影像上，可以发现能够较好界定卫星影像中的大面积平坦区域，故该方法是完全正确的。在这四个区域内分别做四条剖面线 AA'、BB'、CC'、DD'，所得剖面图如图 6。

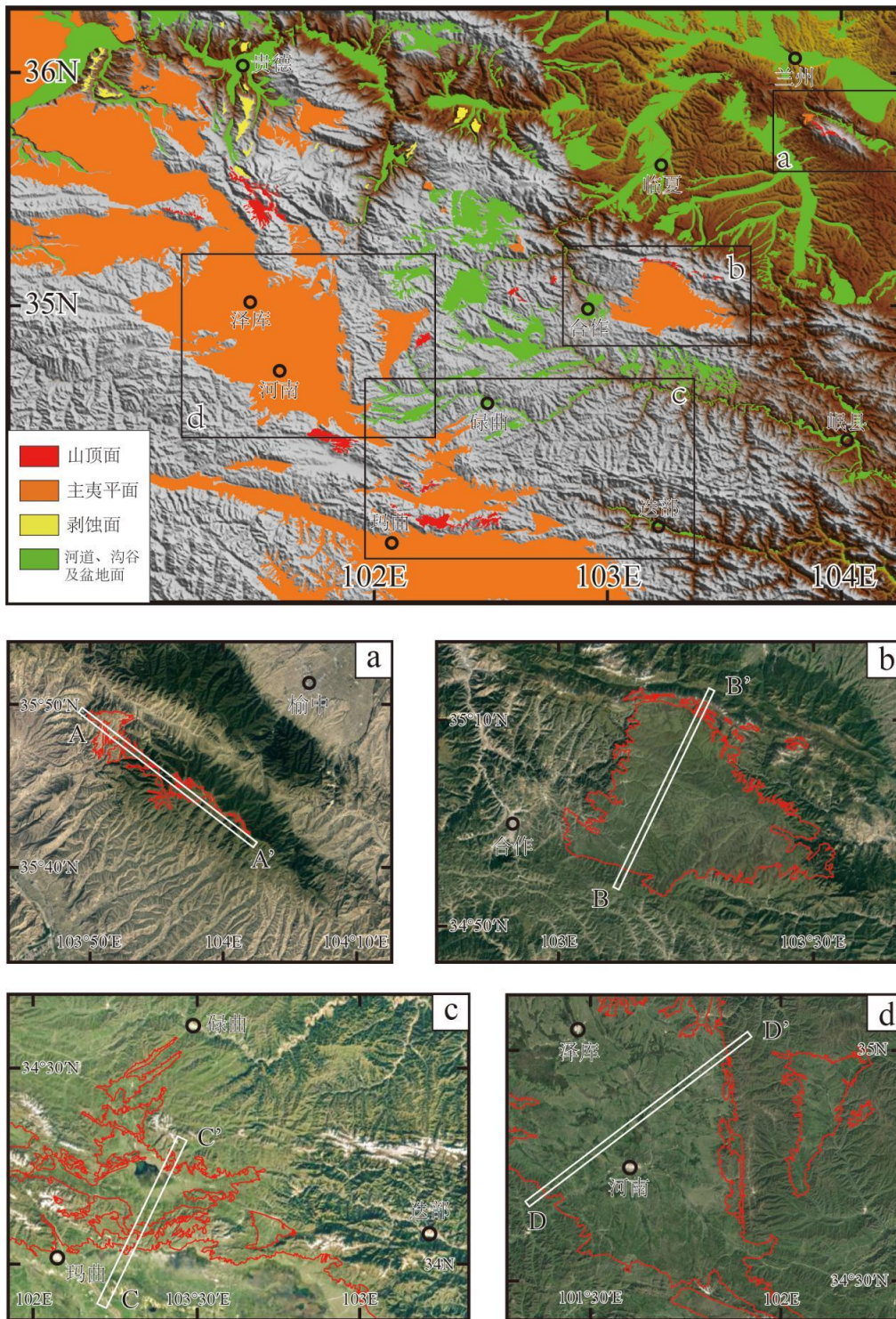


图5 西秦岭地区夷平面的分布

Fig 5 Distribution of the planation of West Qinling

180

185

兰州东南马衔山地区分布两级夷平面（图 5a）。其中主夷平面分布高度为 2700—2800 米，主要保存于马衔山西北部小水子一带，它切过白垩系地层而上覆第四系沉积物；山顶面沿马衔山主体分布，高度约 3300—3600 米。由剖面图（AA'）可知，主夷平面呈倾斜状分布，可能受夷平面南北两侧断层控制^[15]。该处夷平面是青藏高原夷平面系统的最边缘区域，山顶面与主夷平面分布海拔都相对较低。剥蚀面则位于比主夷平面更低的河谷附近，与现代

水系联系，且因所处流域不同分布高度差异较大，从 2300—2600 米均有分布。由剥蚀面在不同流域中缺乏联系可知其并非是地貌循环终极的产物，可能正处于壮年期^[1,4]。

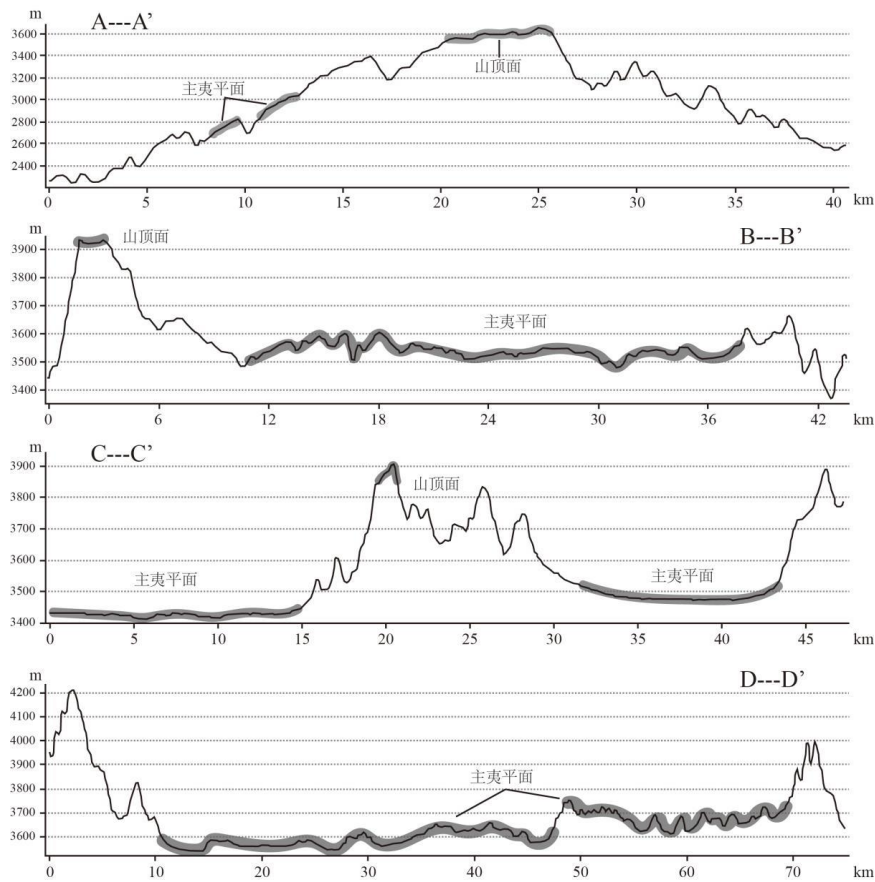


图 6 西秦岭地区夷平面剖面图

Fig 6 Profile map of the planation of West Qinling

190

195

200

美武高原地区主夷平面保存相当完整，是一个典型的四周以陡坡为界的水分高地（图 5b），水系以高原为中心呈放射状流向四周。主夷平面占据美武高原主体，分布高度约 3500—3650 米，其主要切割古生代地层，出露侏罗纪岩浆岩；山顶面分布范围狭小，仅存在于美武高原东北部的高山顶部，海拔约 4000 米。从剖面图 BB’ 可以看到主夷平面以明显的陡坡与周边地形区别。

玛曲县一带两级夷平面均得到较好地保存（图 5c）。该处主夷平面不再以水系间分水岭形式存在，而以陡峻山地围限的山间盆地其特征，人类聚落多位于其上。此处主夷平面分布高度约 3430 米，坡度极为平缓（图 6CC’），切割过三叠系地层而上覆第四系地层。前期野外观测在此处发现的红色风化壳证明主夷平面发育时所处海拔较低。玛曲县北部高山顶部保存山顶面，海拔高度约 3800—4000 米。该区域在地形上表现为主夷平面-陡坡-山顶面，见图 7。

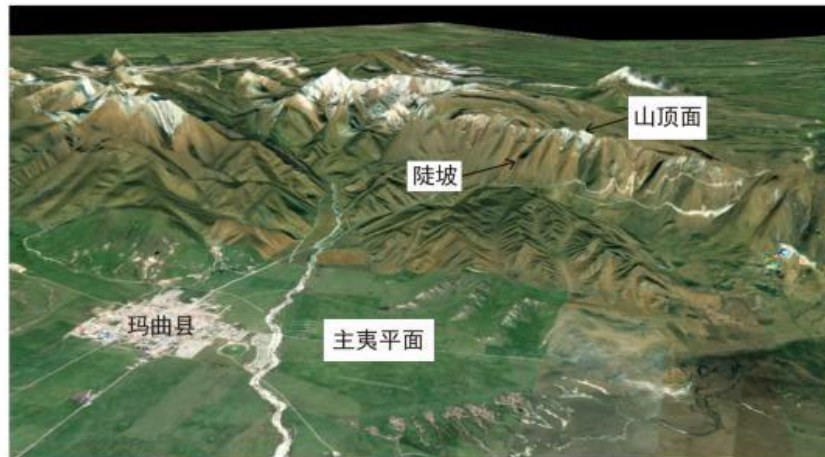


图7 玛曲县附近的两级夷平面

Fig 7 Two-stage planation of Maqu

205

河南-泽库一带也是夷平面保存相对完好的区域(图5d)。主夷平面分布高度为
210 3550--3650米,分布范围较大,占据高原主体,其切割三叠系地层,而上覆的最老沉积层
为上新世地层。该处主夷平面一直向西北方向延伸至贵德盆地附近。主夷平面周边山脉顶部
分布山顶面,海拔高度约4100--4300米,范围较小。剖面图DD'显示同一主夷平面曾受差
异抬升而分布高度略有不同。

据上述两级夷平面分布范围的海拔高度特征可知,在青藏高原东北部夷平面有较好保
215 存,可分为两级。越靠近高原主体,两级夷平面分布海拔越高,反之,远离高原主体处夷平
面分布海拔较低,主夷平面在高原主体的分布高度为3400--3600米,而到高原周边降低为
2700--2800米,呈由西向东倾斜状。主夷平面地势平坦,占据了高原的主体,由于红色风
化壳的出现印证了其形成于低海拔湿热环境地区,且这个准平原意义上的夷平面的抬升代表
了高原真正的隆升^[1,5]。山顶面多分布于主夷平面周边的高山顶部,海拔3600-4100米不等。

220

3.3 夷平面的时代

我们整理了近期部分研究人员在西秦岭地区所做的年代学研究以及磷灰石裂变径迹
(AFT)数据,见图8。图8a中编号对应的参考文献见表1。

225

Wang et al. ^[28]在天水南部西和-礼县盆地附近采集样品的热史模拟发现该处岩体在
78-74Ma、69-57Ma、39-35Ma发生快速剥露事件,可能指示了山体的抬升,剥露期间为构造
不活跃期,直到8-4Ma以来被剥露至地表;而天水以东北西秦岭断裂附近的样品FT8和FT6
的热史模拟显示了断裂带南北所经历的不同的热历史,断裂以北的FT8显示此区域在90Ma
前后通过部分退火带后一直处于构造平静阶段,直到最近约5Ma才被剥露至地表,而断裂以
230 南的FT6显示30-27Ma又发生过一次快速剥露事件。Enkelmann et al. ^[12]在天水-陇南以东
地区较大范围的工作发现该区域在95-88Ma发生快速剥露事件后,在较长时间内处于稳态剥
露或构造平静期,其中一些样品已被剥露至地表;而在9-3Ma发生一次构造沉降,绝大部分
样品被重新埋藏至部分退火带中,但未完全退火,后又快速剥露至地表。Chen et al. ^[49]
在相同区域的工作发现121-105Ma、97-60Ma大量岩体发生快速剥露事件,后经历长时间稳
235 态剥露或构造平静期,至大约13Ma逐渐剥露至地表。Zattin and Wang ^[15]在西秦岭地区西

部循化-同仁-合作-岷县一带得到的 AFT 数据也显示出西秦岭断裂南北两侧不同的热历史，断裂北侧最晚于 90Ma 便剥露至部分退火带以上，后经历了长时间的构造静止期，被匀速剥露至地表；断裂以南则是 120-84Ma 经历一次重新加热事件，后中速剥露至地表。我们本次从武山一带所得样品的热史模拟显示该区域在 63-52Ma 以及 41-32Ma 发生强烈快速剥露事件，两次事件后均经历重新埋藏。

240

综上所述，可以发现西秦岭整体发生过多构造运动，两次运动之间则有相对构造不活跃期，分别为 52-41Ma、32-30Ma 以及 27-13Ma。由于构造活跃期内是不可能形成大规模夷平面的，所以上述三个构造不活跃期可能为西秦岭地区地貌面的发育时期。而形成准平原尺度的夷平面所需的时间至少 10Ma^[1]，32-30Ma 这段构造不活跃期持续时间太短，即使有部分夷平面形成，其发育过程也很快被中断，故可能形成大范围夷平面的时期为 52-41Ma 和 27-13Ma（图 8c 中以阴影表示）。对应西秦岭的两级夷平面，则 52-41Ma 可能为山顶面的形成期，27-13Ma 可能为主夷平面的形成期。

245

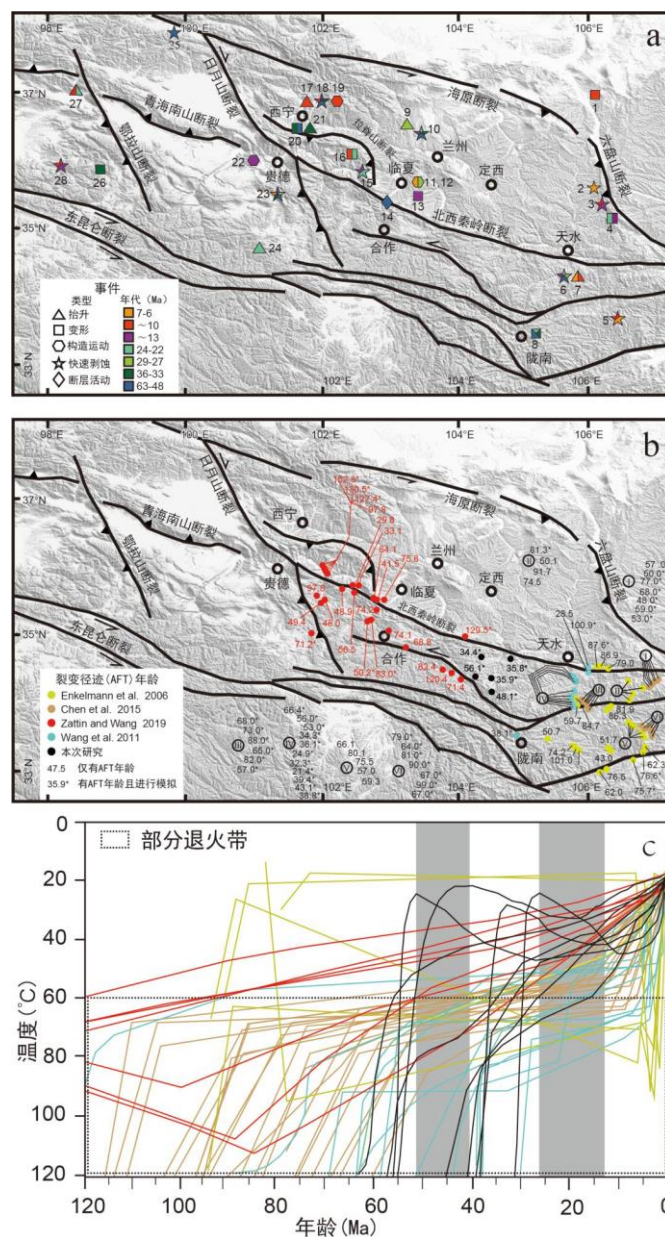


图 8 西秦岭地区事件及年代汇总

Fig 8 Events and age data of West Qinling

250

表 1 西秦岭地区事件及其年代汇总
Table 1 Events and their age of West Qinling

图中编号	参考文献	作者	图中编号	参考文献	作者
1	[24]	Wang et al, 2013	15	[13]	Lease et al, 2011
2	[25]	Zheng et al, 2006	16	[14]	Lease et al, 2012
3	[26]	Lin et al, 2011	17	[37]	Yang et al, 2017
4	[27]	Wu et al, 2019	18	[38]	Zhang et al, 2018
5	[12]	Enkelmann et al, 2006	19	[39]	Zan et al, 2018
6	[28]	Wang et al, 2011	20	[40]	Dai et al, 2006
7	[29]	Wang et al, 2011	21	[41]	Dupont-Nivet et al, 2008
8	[30]	He et al, 2017	22	[42]	Zheng et al, 2010
9	[31]	Miao et al, 2013	23	[43]	Wang et al, 2016
10	[32]	Wang et al, 2017	24	[44]	Hui et al, 2018
11	[33]	Fang et al, 2013	25	[45]	Qi et al, 2016
12	[34]	Fang et al, 2016	26	[46]	Liu et al, 2005
13	[35]	Saylar et al, 2017	27	[47]	Lu et al, 2012
14	[36]	Duvall et al, 2011	28	[48]	Yuan et al, 2006

4 讨论

255 西秦岭地区的层状地貌面可分为山顶面、主夷平面、剥蚀面、河流阶地面等，分别指示了高原不同阶段的隆升。山顶面的形成期可能为 52-41Ma，主夷平面的形成期可能为 27-13Ma。63-52Ma 为一次构造活跃期，陇南武都一带发生快速剥露事件^[30]子山附近断层重新活跃^[36]月山断裂附近发生快速剥露^[45]1-32Ma 及 30-27Ma 为又一次构造活跃期，西宁盆地发生构造抬升^[41]德盆地发生快速剥露^[29]13Ma 以来，宁夏盆地发生变形^[24]六盘山发生快速剥露^[25]西宁盆地发生构造抬升^[39]造活跃期可能为高原隆升期，前两次构造活跃期发生的构造事件多位于高原东北缘各断裂附近，而 13Ma 以来发生的构造事件多位于高原外围，如海原-六盘山断裂附近，可能指示了高原逐渐向东北扩展的过程。

[参考文献] (References)

265 [1] 潘保田, 高红山, 李吉均. 关于夷平面的科学问题——兼论青藏高原夷平面[J]. 地理科学, 2002,22(5): 520-526.
[2] Davis W M. The Geographical Cycle[J]. The Geographical Journal, 1899, 14(A): 481-504.
[3] 徐叔鹰. 论夷平面的成因、年龄与变形[J]. 兰州大学学报, 1963(02): 98-108.
270 [4] 潘保田, 高红山, 李炳元, 等. 青藏高原层状地貌与高原隆升[J]. 第四纪研究, 2004, 024(001): 50-57.
[5] 李吉均, 周尚哲, 赵志军, 等. 论青藏运动主幕[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 000(010): 1597-1608.
[6] 吴珍汉, 吴中海, 胡道功, 周春景, 叶培盛, 张耀玲. 青藏高原古大湖与夷平面的关系及高原面形成演化过程[J]. 现代地质, 2009, 23(6): 993-1002.
[7] 刘静, 丁林, 曾令森, 等. 青藏高原典型地区的地貌量化分析——兼对高原“夷平面”的讨论[J]. 地学前缘, 2006, 13(5): 285-299.
275 [8] 刘静, 曾令森, 丁林, 等. 青藏高原东南缘构造地貌、活动构造和下地壳流动假说[J]. 地质科学, 2009, 44(4): 1227-1255.
[9] Strobl M, Hetzel R, Ding L, et al. Preservation of a large-scale bedrock peneplain suggests long-term landscape stability in southern Tibet[J]. Ztschrift Für Geomorphologie, 2010, 54(4): 453-466.
[10] 高红山. 青藏高原层状地貌面研究——以可可西里和祁连山东段为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2005.
280 [11] Van der Beek P, J´anie Van Melle, St´ephane Guillot, et al. Eocene Tibetan plateau remnants preserved in the northwest Himalaya[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(5): 364-368.

- [12]Enkelmann E, Ratschbacher L, Jonckheere R, et al. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling: is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan basin?[J]. Geological Society of America Bulletin, 2006, 118(5-6): 651-671.
- 285 [13]Lease R.O., Burbank D.W., Clark M.K., et al. Middle Miocene reorganization of deformation along the northeastern Tibetan Plateau[J]. Geology, 2011, 39(4): 359-362.
- [14]Lease R.O, Burbank D.W., Hough B, et al. Pulsed Miocene range growth in northeastern Tibet: Insights from Xunhua Basin magnetostratigraphy and provenance[J]. Geological Society of America Bulletin, 2012, 124(5-6): 657-677.
- 290 [15]Zattin M, Wang X. Exhumation of the western Qinling mountain range and the building of the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Asian earth sciences, 2019, 177(JUN.15):307-313.
- [16]王修喜. 天水-徽成一带磷灰石裂变径迹记录与青藏高原东北缘构造变形过程[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [17]Liu S, Zhang G, Pan F, et al. Timing of Xunhua and Guide basin development and growth of the northeastern Tibetan Plateau, China[J]. Basin Research, 2013, 25(1):74-96.
- 295 [18]马振华, 李小苗, 郭本泓,等. 青藏高原东北缘马衔山夷平面特征指标的提取与分析[J]. 地理学报, 2016, 071(003):400-411.
- [19]刘芬良. 晚新生代金沙江下游段地貌演化与河谷发育研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [20]Haider V L, Kropáček, Jan, Dunkl, István, et al. Identification of peneplains by multi-parameter assessment of digital elevation models[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015,40:1477-1492.
- 300 [21]王修喜. 低温热年代学在青藏高原构造地貌发育过程研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2017, 32(3): 234-244.
- [22]冯金良, 崔之久, 朱立平,等. 夷平面研究评述[J]. 山地学报, 2005, 023(001):1-13.
- [23]Clark M K, Royden L H, Whipple K X, et al. Use of a regional, relict landscape to measure vertical deformation of the eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2006, 111(F3).
- 305 [24]Wang W, Kirby E, Zhang P, Zheng D, et al. Tertiary basin evolution along the northeastern margin of the Tibetan Plateau: Evidence for basin formation during Oligocene transtension[J]. Geological Society of America Bulletin, 2013, 125(3-4): 377-400.
- [25]Zheng D, Zhang P, Wan J, et al. 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[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 248(1-2): 198-208.
- 310 [26]Lin X., Chen H., Wyrwoll K.-H, et al. The Uplift History of the Haiyuan-Liupan Shan Region Northeast of the Present Tibetan Plateau: Integrated Constraint from Stratigraphy and Thermochronology[J]. The Journal of Geology, 2011, 119(4): 372-393.
- [27]Wu J, Guo L, Xiong S, et al. New magnetic constraints on early - middle Miocene uplift of the Liupan Shan, northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2019, 20: 1340-1357.
- 315 [28]Wang X, Zattin M, Li J, et al. Eocene to pliocene exhumation history of the Tianshui-Huicheng region determined by apatite fission track thermochronology: implications for evolution of the northeastern Tibetan plateau margin[J]. Journal of Asian Earth sciences, 2011, 42(1-2): 97-110.
- [29]Wang X, Li J, Song C, et al. Late Cenozoic orogenic history of western qinling inferred from sedimentation of Tianshui basin, northeastern margin of Tibetan plateau[J]. International Journal of Earth sciences, 2011, 101(5): 1345-1356.
- 320 [30]He P, Wang X, Song C, et al. Cenozoic evolution of the western qinling mt. range based on thermochronologic and sedimentary records from the Wudu basin, NE Tibetan plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 138: 484-494.
- 325 [31]Miao Y, Wu F, Herrmann M, et al. Late early Oligocene east Asian summer monsoon in the ne Tibetan plateau: evidence from a palynological record from the Lanzhou basin, china[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 75(oct.5): 46-57.
- [32]Wang X, Deng L, Zattin M, et al. Palaeogene growth of the northeastern Tibetan plateau: detrital fission track and sedimentary analysis of the Lanzhou basin, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 147(oct.1): 322-331.
- 330 [33]Fang X, Garzzone C, Van der Voo R, et al. Flexural subsidence by 29 Ma on the NE edge of Tibet from the magnetostratigraphy of Linxia Basin, China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 210(3-4): 545-560.
- [34]Fang X, Wang J, Zhang W, et al. Tectonosedimentary evolution model of an intracontinental flexural (foreland) basin for paleoclimatic research[J]. Global and Planetary Change, 2016, 145: 78-97.
- 335 [35]Saylor J.E., Jordan J.C., Sundell K.E., et al. Topographic growth of the Jishi Shan and its impact on basin and hydrology evolution, NE Tibetan Plateau[J]. Basin Research, 2017, 30(3): 544-563.
- [36]Duvall A.R., Clark M.K., van der Pluijm B.A., et al. Direct dating of Eocene reverse faulting in northeastern Tibet using Ar-dating of fault clays and low-temperature thermochronometry[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 304(3-4): 520-526.
- 340 [37]Yang R, Fang X, Meng Q, et al. Paleomagnetic Constraints on the Middle Miocene-Early Pliocene Stratigraphy in the Xining Basin, NE Tibetan Plateau, and the Geologic Implications[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2017, 18(11): 3741-3757.
- [38]Zhang J, Wang Y, Zhang B, et al. Evolution of the NE Qinghai-Tibetan Plateau, constrained by the apatite fission track ages of the mountain ranges around the Xining Basin in NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 97: 10-23.
- 345

- [39]Zan J, Kang J, Yan M, et al. A Pedogenic Model for the Magnetic Enhancement of Late Miocene Fluvial-Lacustrine Sediments From the Xining Basin, NE Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018.
- 350 [40]Dai S, Fang X, Dupont-Nivet G, et al. Magnetostratigraphy of Cenozoic sediments from the Xining Basin: Tectonic implications for the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B11): n/a–n/a.
- [41]Dupont-Nivet G, Hoorn C, Konert M. Tibetan uplift prior to the Eocene-Oligocene climate transition: Evidence from pollen analysis of the Xining Basin[J]. *Geology*, 2008, 36(12): 987-990.
- 355 [42]Zheng J, Griffin W, Sun M, et al. Tectonic affinity of the west Qinling terrane (central China): North China or Yangtze?[J]. *Tectonics*, 2010, 29(2): n/a–n/a.
- [43]Wang X, Song C, Zattin M, et al. Cenozoic pulsed deformation history of northeastern Tibetan Plateau reconstructed from fission-track thermochronology[J]. *Tectonophysics*. 2016, 672-673: 212–227.
- [44]Hui Z, Li X, Ma Z, et al. Miocene pollen assemblages from the Zeku Basin, northeastern Tibetan Plateau, and their palaeoecological and palaeoaltimetric implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 511: 419-432.
- 360 [45]Qi B, Hu D, Yang X, et al. Apatite fission track evidence for the Cretaceous–Cenozoic cooling history of the Qilian Shan (NW China) and for stepwise northeastward growth of the northeastern Tibetan Plateau since early Eocene[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 124: 28–41.
- [46]Liu Y, Genser J, Neubauer F, et al. 40Ar/39Ar mineral ages from basement rocks in the Eastern Kunlun Mountains, NW China, and their tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 2005, 398(3-4): 199–224.
- 365 [47]Lu H, Wang E, Shi X, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Elashan range and its surroundings, northern Tibetan Plateau as constrained by paleomagnetism and apatite fission track analyses[J]. *Tectonophysics*, 2012, 580: 150–161.
- [48]Yuan W, Dong J, Wang S, et al. Apatite fission track evidence for Neogene uplift in the eastern Kunlun Mountains, northern Qinghai–Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27(6): 847–856.
- 370 [49]Chen H, Hu J, Wu G, et al. Apatite fission-track thermochronological constraints on the pattern of late Mesozoic-Cenozoic uplift and exhumation of the Qinling Orogen, central China[J]. *Journal of Asian earth sciences*, 2015, 114(Dec.15 Pt.4): 649-673.

375