

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.02.08

引用格式: 殷志强, 屈天月, 庞明非, 等. 大凉山地区比尔河晚更新世以来阶地级序及其演化[J]. 中国地质调查, 2023, 10(2): 64–71. (Yin Z Q, Qu T Y, Pang M F, et al. Terrace sequences and its evolution since the Late Pleistocene in Bier River of Daliang Mountain area [J]. Geological Survey of China, 2023, 10(2): 64–71.)

大凉山地区比尔河晚更新世以来阶地级序及其演化

殷志强¹, 屈天月², 庞明非^{1,3}, 邵海¹, 丁一¹

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 德克萨斯农工大学, 德克萨斯州 77840;

3. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要: 河流阶地详细记录了区域构造活动和地貌演化信息, 可为第四纪地貌阶段性隆升提供证据。位于四川大凉山地区的昭觉河流域及其支流地处青藏高原东南部, 横断山脉与四川盆地西南缘的过渡带, 发育了河流阶地等层状地貌。以昭觉河的支流比尔河为研究对象, 通过野外河流阶地级序及阶地沉积物调查, 结合¹⁴C测年结果, 厘定了比尔河的3级河流阶地, 其中T₂和T₃为基座阶地, T₁为堆积阶地, 形成时间为27.75 ka B. P.、12.20 ka B. P.以及6.65 ka B. P., 其中T₃阶地与T₂阶地的河流下切速率分别为0.59~1.29 mm/a和1.26~4.50 mm/a。认为川西大凉山地区30 000 a以来地貌至少经历了2次间歇性抬升, 在整体隆升过程中, 河流上游较中下游的地壳抬升速度更快, 具有掀斜式抬升特征。T₃、T₂、T₁阶地的形成与研究区气候变化有一定相关性, 但新构造运动是比尔河河流阶地形成的主导因素, 这对了解川西地区晚更新世以来河流阶地的级序展布及演化具有重要意义。

关键词: 河流阶地; 级序; 地貌演化; 晚更新世; 比尔河

中图分类号: P512.2; P534.63

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2023)02–0064–08

0 引言

河流阶地的形成是构造运动和古气候变化的综合体现, 记录了构造与气候的有关信息, 在构造运动、古气候变化、河流阶地三者之间存在着密切联系, 同时河流阶地是反映区域地壳垂直运动的重要标志^[1–8]。前人对河流阶地级序、成因及形成年代的研究对反演第四纪以来的新构造运动特征及古气候变化具有重要意义^[9–20]。

昭觉河流域及其支流位于大凉山, 地处青藏高原东南部的横断山脉与四川盆地西南缘的过渡带, 属金沙江支流, 发育了众多河流阶地等层状地貌, 河流阶地作为川西地区第四纪阶段性隆升的地貌学证据受到关注^[21], 然而前人尚未开展昭觉河支流比尔河的河流阶地特征及比尔河下切速率的基础研究工作, 比尔河晚更新世以来的阶地级序及其演化历史等科学问题有待解决。

本文重点对比尔河的河流阶地级序及其上覆沉积物特征进行了详细的野外调查, 结合¹⁴C测年结果, 对比尔河河流阶地的级序、成因、形成年代及其反映的新构造运动期次、幅度进行了探讨, 研究成果可为比尔河晚更新世以来的阶地级序及其演化历史提供借鉴与参考。

1 研究区概况

昭觉河发源于四川省凉山彝族自治州越西县蘑菇山, 自北向南依次流经越西县保石乡、昭觉县央摩租乡、比尔乡、库依乡, 流经区内长度约32 km, 流域总面积约300 km², 其处于安宁河断裂带、龙门山断裂带、马边—盐津断裂和宁南—莲峰断裂带所挟持的凉山断块中部, 普雄河断裂带呈SN向展布于整个昭觉河流域, 为逆冲性质, 由4条近平行展布的断层构成, 其中沿昭觉河支流比尔河河谷分布的分支断裂基本与比尔河河床重

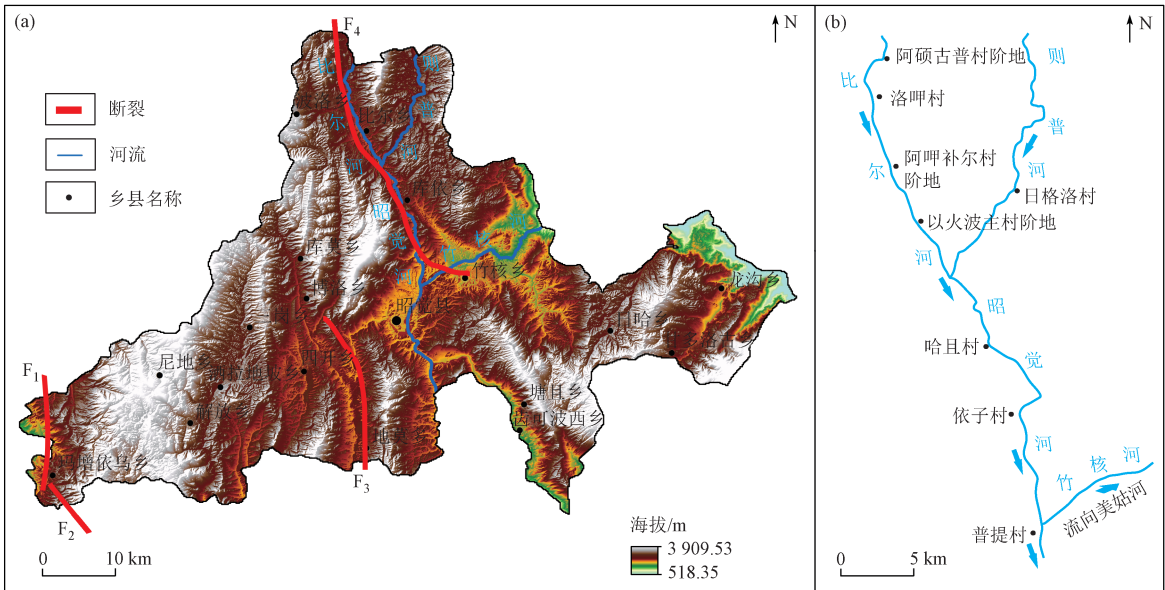
收稿日期: 2022–05–22; 修订日期: 2023–02–27。

基金项目: 国家自然科学基金“构造差异隆升影响下顺构造地貌发育强度对大型滑坡的控制机理和孕灾模式——以美姑河流域为例(编号: 41977258)”项目资助。

第一作者简介: 殷志强(1980—), 男, 正高级工程师, 主要从事第四纪地貌演化研究工作。Email: yinzhiquang@mail.cgs.gov.cn。

合,显示由断裂控制了河谷的发育^[22-27](图1(a))。比尔河受到普雄河断裂带分支断裂的影响,新构造运动快速、剧烈,因此比尔河较区域内其他河流对构造运动的响应更为敏感。比尔河河

床弯曲幅度不大,河谷走向为近SN向(图1(b)),河流阶地的沉积特征与级序明显。因此,比尔河是研究河流阶地的级序、成因、形成年代及新构造运动等方面的理想河段。



F₁. 安宁河断裂; F₂. 木则河断裂; F₃. 碧鸡山—木佛断裂; F₄. 普雄河断裂

图1 研究区地貌(a)与水系分布图(b)

Fig.1 Landscapes (a) and rivers (b) map of the study area

研究区出露地层由老到新依次为古生界二叠系阳新组(P_{2y})、峨嵋山玄武岩组(P_{3em}),中生界三叠系东川组(T_{1-2d})、须家河组(T_{3x})、侏罗系自流井组(J_{1z})、新田沟组(J_{2x})、沙溪庙组(J_{2s}),遂宁组(J_{3s}),此外还有分布于河谷及缓坡地带的第四系全新统,多以松散的卵砾石、砂砾石、砂泥、岩块为主。全新统在主要河流的两岸形成多级阶地,局部发育以砂砾石为主的冲洪积堆积物。研究区岩性以砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、灰岩、玄武岩为主,区内构造以SN向褶皱和逆冲断裂为主,区域性的SN向逆冲断裂带往往由数条雁列式断层组成,受喜马拉雅造山运动的多期次、不同方向应力场的影响,在此基础上叠加了NE向和NW向的褶皱与断裂构造,3个方向的构造基本构成了区内的总体构造框架。

2 河流阶地发育特征

在比尔河河段自下游至上游依次选取3个河谷阶地横剖面,分别为以火波主村阶地、阿呷补尔村阶地、阿硕古普村阶地(图1(b))。通过详细的野外调查和实地测绘工作,发现比尔河流域主

要发育稳定的3级阶地,即T₁、T₂和T₃,拔河高度分别为1~2 m、9~26 m及17~41 m。其中,I级阶地主要为堆积阶地,可见明显的二元结构,顶部常被玉米地等覆盖;II级和III级阶地主要为基座阶地(表1)。

表1 比尔河河流阶地发育特征

Tab.1 Characteristics of river terraces of Bier River				
阶地级序	阶地类型	拔河高度/m	沉积物及基座岩性	
T ₁	堆积阶地	1~2	黏土、砂砾石、砂砾石夹粉砂、砾石层等,砾石磨圆度较好	
T ₂	基座阶地	9~26	砂岩及粉砂岩,灰色、灰黄色块状巨厚层状细粒砂岩	
T ₃	基座阶地	17~41	砂岩及粉砂岩,灰色、灰黄色块状巨厚层状细粒砂岩	

2.1 以火波主村阶地剖面

以火波主村河流阶地发育有3级河流阶地(图2)。T₁上沉积物主要为含砂砾石和卵石,表层为黏土,砂砾石夹粉砂,砾石磨圆度好。河漫滩与T₁阶地高差为0.98 m,沉积物主要为砂卵砾石夹粉砂,表层为黏土,上部覆盖物为草地和玉米地,二元结构不明显,磨圆度好、分选差,粒径8~23 mm,本研究在T₁阶地采集¹⁴C测年样品

BER-01。 T_2 为基座阶地,海拔2 246 m,基座为灰黄色块状巨厚层细粒砂岩,岩层产状 $141^{\circ}\angle 68^{\circ}$,上覆堆积物中可见砾石部分磨圆,顶部磨

圆较好的砾石层厚约 2 m,因此推测 I 级阶地形成时河水漫过了下部大片砂岩; T_3 阶地也为基座阶地,其岩性特征与 T_2 阶地相同,海拔 2 267 m。

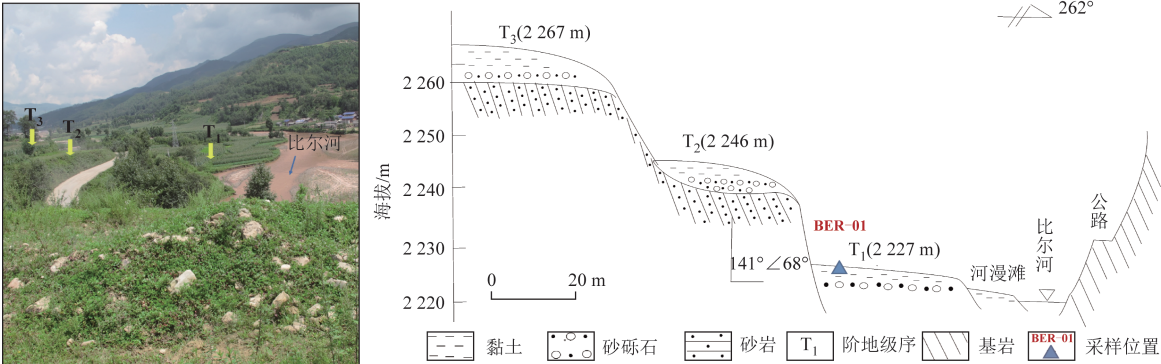


图 2 以火波主村阶地分布(左)及剖面图(右)
Fig.2 Terraces distribution (left) and profile (right) of Yihuobozhu Village

2.2 阿呷补尔村阶地

阿呷补尔村阶地位于比尔河左岸,现场调查时可见有 3 级阶地(图 3)。 T_1 为堆积阶地,沉积物分

为 2 层,厚 2 m,上部黏土层厚 1.1 m,下部砂砾石层厚 0.9 m,磨圆度较高,分选性较好。 T_2 和 T_3 均为基座阶地,其上种植有大量农作物。

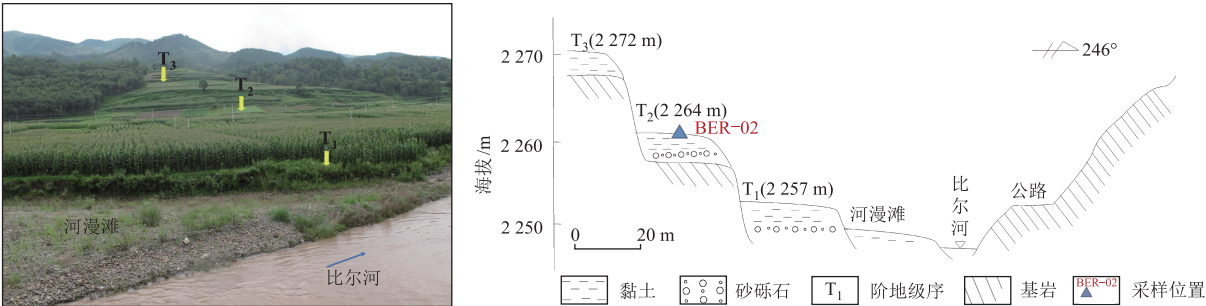


图 3 比尔河阿呷补尔村阶地分布(左)及剖面图(右)
Fig.3 Terraces distribution (left) and profile (right) of Agabuer Village

2.3 阿硕古普村阶地剖面

阿硕古普村阶地发育比尔河Ⅲ级阶地,阶地堆积物呈现明显的河流相二元结构,底部为河床砾石层,顶部为黏土,可见磨圆度较好的砾石(图 4)。

阶地顶面卵石层厚度约 2.5 m,目前顶部已被改造为玉米地。剖面中部砂砾石层磨圆度较好,下部为基座阶地,岩性为须家河组砂岩、粉砂岩、泥岩互层。

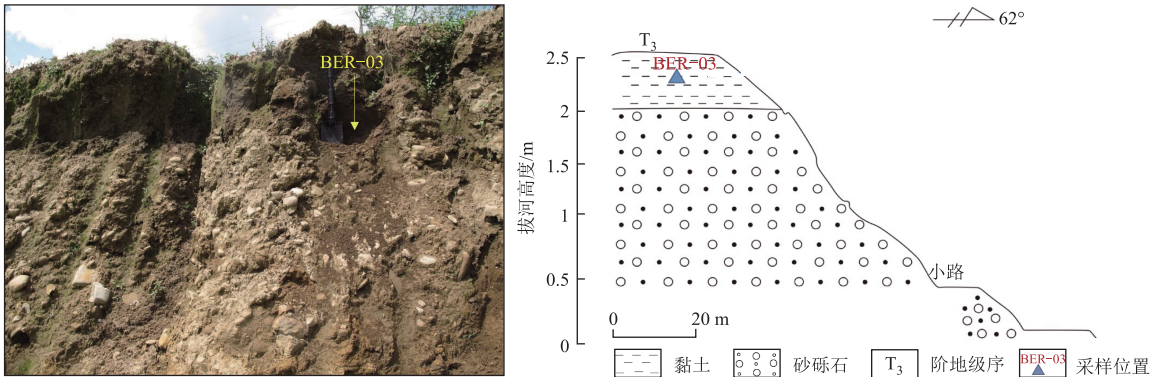


图 4 阿硕古普村Ⅲ级阶地分布(左)及剖面图(右)
Fig.4 The third terrace distribution (left) and profile (right) of Ashuogupu Village

3 年代学样品测试

一般将河流阶地顶部河漫滩相沉积物的年龄近似地视为阶地开始形成的年代,即河流废弃并开始下切的时间。为进一步分析比尔河河流阶地的

形成时代和成因机制,分别在 T₁、T₂ 和 T₃ 阶地沉积物中上部含碳较高的黏土层采集¹⁴C 测年样品并测试,得到 BER-01、BER-02 和 BER-03 样品的有机碳¹⁴C 年龄结果(表 2),所用¹⁴C 半衰期为 5 568 a,由美国 Beta 实验室进行年龄测定,年龄校正曲线采用 IntCal^[28]。

表 2 阶地沉积物样品的年龄数据
Tab.2 Chronological data of terraces sediment samples

样品号	阶地级数	采样位置	样品类型	拔河高度/m	¹⁴ C 年龄/ka B. P.	¹⁴ C 校正年龄/ka B. P.
BER-01	T ₁ 阶地	距地表 0.3 m 处	粉砂黏土	1	(7.72 ± 0.03)	(6.65 ± 0.05)
BER-02	T ₂ 阶地	距地表 0.15 m 处	红黏土	6	(12.30 ± 0.03)	(12.20 ± 0.08)
BER-03	T ₃ 阶地	距地表 0.1 m 处	黏土	27	(25.48 ± 0.12)	(27.75 ± 0.25)

4 河流阶地对构造运动和古气候变化的响应

4.1 河流阶地对新构造运动的响应

通过计算比尔河河流阶地的下切速率得知阿硕古普村、阿呷补尔村、以火波主村在 T₃ 阶地形成时河流的下切速率分别为 0.96 mm/a、0.51 mm/a、1.29 mm/a,在 T₂ 阶地形成时比尔河的下切速率分别为 4.50 mm/a、1.26 mm/a、3.42 mm/a(图 5)。

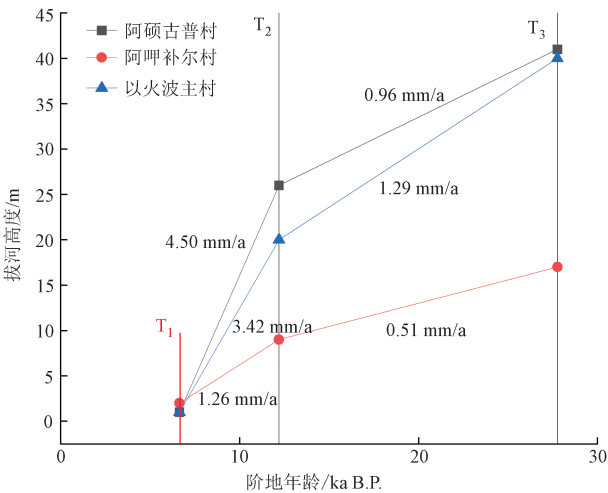


图 5 比尔河河流阶地下切速率

Fig.5 Incision rate of river terraces of Bier River

通过分析比尔河上游至下游的阿硕古普村、阿呷补尔村及以火波主村的河流阶地拔河高度与阶地年代数据,得知不同时期比尔河下切速率的变化特征,具体数据见表 3。

表 3 不同时期比尔河下切速率

Tab.3 Incision rate of Bier River under different periods

河流下切年代/ka B. P.	河流下切速率/(mm · a ⁻¹)
27.75 ~ 12.20	0.51 ~ 1.29
12.20 ~ 6.65	1.26 ~ 4.50

根据比尔河下切速率的计算结果,可将河流的下切过程分为 2 个阶段:

第一阶段开始于约 27.75 ka B. P.,河流以 0.51 ~ 1.29 mm/a 的速率下切,形成 T₃ 基座阶地。

第二阶段开始于约 12.20 ka B. P.,河流下切速率迅速增大,以 1.26 ~ 4.50 mm/a 的速率急剧侵蚀下切,形成了 T₂ 基座阶地。上游阿硕古普村阶地所在的河段下切速率迅速增大至 4.50 mm/a,中游和下游的阿呷补尔村和以火波主村一带,下切速率增大的幅度小于上游阿硕古普村河段,表明该阶段河流上游的地壳抬升速率明显增加,表现出上游抬升快、下游抬升慢的特点,说明该阶段本区在整体隆升过程中具有掀斜式抬升的性质。此外,晚更新世晚期河流的下切速率明显小于全新世后的河流,说明随时间推移河流下切幅度呈增大的趋势。

根据阿硕古普村、阿呷补尔村和以火波主村的实测剖面,绘制了比尔河河流阶地相位图(图 6)。由于阿硕古普村位于比尔河上游,以火波主村位于比尔河下游,阶地相位图显示阿呷补尔村河段以上 3 级阶地纵降比大,阿呷补尔村河段以下纵降比明显减小,上下游河段纵降比差异较大,比尔河上游河段经历了一次显著的河流下切侵蚀过程,而进入下游河段后河流下切幅度变缓,河流下切有减弱的趋势。因此本文认为比尔河所在区域晚更新世晚期以来经历了 2 次明显的地壳抬升过程,抬升幅度

分别为 8~21 m 和 9~25 m。

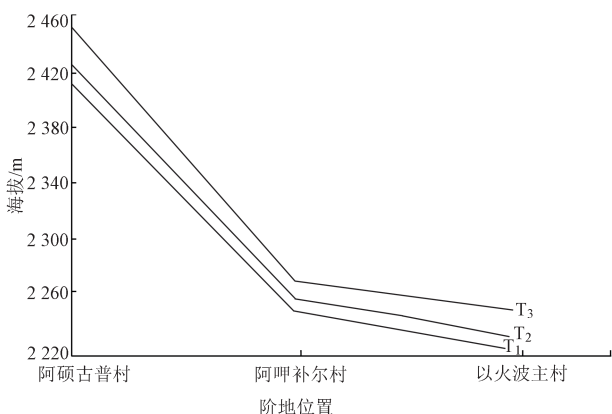


图6 比尔河河流阶地相位图

Fig.6 Phase diagram of river terraces of Bier River

根据比尔河河流阶地和相邻研究区新构造运动的特征,本文将比尔河地区新构造运动划分为3个地壳抬升阶段。

第一阶段:晚更新世晚期本区经历了一次强烈的地壳抬升运动,形成了 T_3 阶地。由 ^{14}C 年代数据分析可知, T_3 测年数据结果为27.75 ka B. P.,此时研究区的地壳处于升降过程,并因地壳抬升形成了 T_3 阶地,抬升之后侵蚀期开始,形成台面,随后阶地台面开始有堆积物堆积。在研究区内阶地沉积物多可见磨圆度高、定向性好的砾石,说明该阶段河流作用明显。

第二阶段: T_2 阶地形成于研究区地壳第二次抬升时期,根据 ^{14}C 测年数据,约12.20 ka B. P. 比尔河发生了第二次下切运动。从下切速率分析, T_2 阶地形成时研究区地壳抬升幅度比 T_3 阶地形成时更大,说明 T_2 阶地形成速度较快,侵蚀期相对较短。研究区自晚更新世晚期新构造运动以来,下切速率逐渐增大,表现出地壳运动振荡频率增强、2次地壳抬升之间的稳定时间越来越短的趋势。

第三阶段:由于 T_2 阶地形成时间较短,很快就开始了研究区的第三次地壳抬升。根据 ^{14}C 的测年结果, T_1 阶地形成于约6.65 ka B. P.,地壳抬升使比尔河再次下切,并对 T_1 阶地的形成提供了驱动作用。由于3个阶地剖面的 T_1 阶地均为堆积阶地,说明此次地壳抬升的强度要小于前2个阶段。

美姑河位于比尔河东侧18 km(图1(b)),同属金沙江支流,且同为南北流向,结合前人研究资料^[29],美姑河流域的新构造运动以差异性升降为

主,总体表现为大面积、整体性的间歇震荡性急速抬升。自上新世末夷平面解体以来,河谷地貌经历了宽谷期和峡谷期2个阶段的发展。

宽谷期:夷平期以后,研究区地壳呈阶段性的间歇性隆升运动,发育了2级宽谷地貌,宽谷期河流的平均下切速率约0.5 mm/a。I级宽谷面(1600~2000 m)形成于早更新世前中期(相当于区域上的“元谋运动”)至约1.2 Ma;此后,地壳快速抬升使得本区进入了II级宽谷面(1400~1200 m)形成时期。

峡谷期:中更新世本区地壳隆升速率增大,金沙江开始强烈下切,本区进入峡谷期,总体表现为间歇性的快速隆升,在河谷中形成多级河谷阶地。峡谷期河流的平均下切速率约1.2 mm/a。区域内夷平面以下可归为2组宽谷地貌或2级山麓剥蚀面,一般为侵蚀阶地或基座阶地。河谷阶地沿宽谷、峡谷河段的两岸零星分布,一般可见3~5级阶地残留,其中I级和II级阶地以堆积阶地为主,II级以上多为基座阶地,区域内及邻区部分河段河流的下切速率见图7。

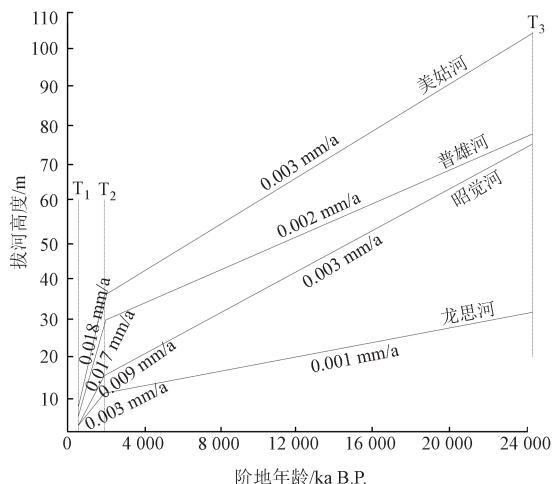


图7 美姑河及临近河流下切速率(据文献[29]修改)

Fig.7 Incision rate of Meigu River and adjacent rivers (modified by references [29])

4.2 河流阶地对古气候变化的响应

气候变化是影响河流下切速率的重要驱动因素,对于河流阶地来说,暖湿条件下河流的下切速率要远大于干冷条件^[30-31]。寒冷气候下植被覆盖率较低,冻融作用加强,进入河流的沉积物大大增加,当河流搬运能力小于沉积物的增加量时,较为容易发生堆积;当气候转暖时,植被覆盖度增加,

沉积物相对减少,径流量加大,河流下切加速^[32],即气候寒冷下更易发生堆积,而气候转暖时更易发生强烈的河流下切。

西昆仑山古里雅冰心的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录了研究区晚更新世以来的温度变化^[33],本文将 T_3 、 T_2 、 T_1 阶地的形成时期与古里雅冰芯气候变化曲线进行对比分析。根据 ^{14}C 测年数据可知, T_3 、 T_2 、 T_1 阶地分别形成于晚更新世晚期(27.75 ka B. P. 和 12.20 ka B. P.) 和全新世中期(6.65 ka B. P.)。结合其形成时间及河流阶地对气候变化的响应,可知 T_3 阶地形成时期研究区处于末次冰盛期,气候寒冷但高度不稳定,根据冰期河流易发生堆积、间冰期河流易下切的观点,推测此时研究区气候存在寒冷-温暖旋回使得河流下切,该气候旋回波动在古里雅冰心的气候变化曲线中也有较明显的记录^[33], T_2 阶地形成时研究区处于末次冰期到全新世的过渡时期,气候由冷转暖, T_1 阶地形成于全新世中期,在一定时间尺度下研究区可能存在由寒冷向温暖转变的气候变化。

构造运动和气候变化都是控制河流阶地形成的主要因素,两者都通过影响河流水力来改变河流的堆积和下切过程。在构造较为稳定的中欧地区,气候变化是阶地形成的主导因素^[34],而比尔河阶地高度较大,阶地形成期间强烈的河流下切应由构造隆升主导,构造运动是该河流阶地形成的主导因素。研究区河流阶地的构造-气候耦合作用过程还需要进一步研究。

5 结论

在野外地质调查的基础上,本文通过对比尔河河流阶地的发育特征、级序、样品的地质年代及形成机制开展研究,结合前人研究资料,探讨了比尔河河流阶地对新构造运动和气候变化的响应。

(1) 比尔河晚更新世以来发育3级河流阶地,其中 T_1 为堆积阶地, T_2 、 T_3 为基座阶地,分别形成于 6.65 ka B. P.、12.20 ka B. P. 及 27.75 ka B. P., T_3 、 T_2 、 T_1 阶地的形成与研究区气候变化有一定相关性,但新构造活动是比尔河河流阶地形成的主导因素。

(2) 在 T_3 阶地形成时,比尔河河流下切速率为 0.59~1.29 mm/a, T_2 阶地形成时,河流下切速率为 1.26~4.50 mm/a,上游阿硕古普村阶地所在的河段下切速率迅速增大至 4.50 mm/a,中游和下游

的阿呷补尔村、以火波主村河段下切速率增大的幅度小于上游的阿硕古普村河段。

(3) 比尔河所在区域经历了2次强烈的间歇性构造抬升,在整体隆升过程中,河流上游比中游和下游的地壳抬升速度快,具有掀斜式抬升的特征。

参考文献(References):

- [1] Gong Z J, Li S H, Li B. The evolution of a terrace sequence along the Manas River in the northern foreland basin of Tian Shan, China, as inferred from optical dating [J]. *Geomorphology*, 2014, 213: 201–212.
- [2] Vandenberghe J. River terraces as a response to climatic forcing: Formation processes, sedimentary characteristics and sites for human occupation [J]. *Quat Int*, 2015, 370: 3–11.
- [3] Zhang J F, Qiu W L, Wang X Q, et al. Optical dating of a hyperconcentrated flow deposit on a Yellow River terrace in Hukou, Shaanxi, China [J]. *Quat Geochronol*, 2010, 5(2/3): 194–199.
- [4] 吴环环, 吴学文, 李玥, 等. 黄河共和—贵德段河流阶地对青藏高原东北缘晚期隆升的指示 [J]. *地质学报*, 2019, 93(12): 3239–3248.
- [5] Wu H H, Wu X W, Li Y, et al. River terraces in the Gonghe—Guide section of the Yellow River: Implications for the late uplift of the northeastern margin of the Qinghai—Tibet Plateau [J]. *Acta Geol Sin*, 2019, 93(12): 3239–3248.
- [6] Erkens G, Dambeck R, Volleberg K P, et al. Fluvial terrace formation in the northern Upper Rhine Graben during the last 20 000 years as a result of allogenic controls and autogenic evolution [J]. *Geomorphology*, 2009, 103(3): 476–495.
- [7] 于航, 步凡, 胡道功, 等. 祁连山大通河河流阶地形成时代及地质意义 [J]. *中国地质调查*, 2018, 5(3): 43–48.
- [8] Yu H, Bu F, Hu D G, et al. Ages and geological significance of the river terrace of Datong River in Qilian Mountains [J]. *Geol Surv China*, 2018, 5(3): 43–48.
- [9] Stokes M, Cunha P P, Martins A A. Techniques for analysing Late Cenozoic river terrace sequences [J]. *Geomorphology*, 2012, 165–166: 1–6.
- [10] Wang X Z, Chun X, Zhou H J, et al. Application of standardised growth curves in quartz OSL dating of lacustrine sediments on the Mongolian Plateau [J]. *Quat Int*, 2021, 592: 51–59.
- [11] 张克旗, 吴中海, 吕同艳, 等. 光释光测年法——综述及进展 [J]. *地质通报*, 2015, 34(1): 183–203.
- [12] Zhang K Q, Wu Z H, Lv T Y, et al. Review and progress of OSL dating [J]. *Geol Bull China*, 2015, 34(1): 183–203.
- [13] Méndez—Quintas E, Santonja M, Pérez—González A, et al. A multidisciplinary overview of the lower Miño River terrace system (NW Iberian Peninsula) [J]. *Quat Int*, 2020, 566–567: 57–77.
- [14] Guo X H, Forman S L, Marin L, et al. Assessing tectonic and climatic controls for Late Quaternary fluvial terraces in Guide,

- Jianzha, and Xunhua Basins along the Yellow River on the north-eastern Tibetan Plateau[J]. *Quat Sci Rev*, 2018, 195: 109 – 121.
- [12] Gao H S, Liu X F, Pan B T, et al. Stream response to Quaternary tectonic and climatic change: Evidence from the upper Weihe River, central China[J]. *Quat Int*, 2007, 186(1): 123 – 131.
- [13] Olszak J, Alexanderson H. Post – IR IRSL dating the oldest (?) river terrace sediments in the Polish Outer Carpathians: Insights into the landscape evolution[J]. *Geomorphology*, 2020, 371: 107436.
- [14] 王迎国, 常宏, 周卫健. 渭河盆地河流阶地演化及其构造 – 气候意义[J]. *地质论评*, 2021, 67(4): 1033 – 1049.
Wang Y G, Chang H, Zhou W J. Fluvial terrace evolution and its tectonic – climatic significance in the Weihe Basin[J]. *Geol Rev*, 2021, 67(4): 1033 – 1049.
- [15] Singh A K, Pattanaik J K, Gagan, et al. Late Quaternary evolution of Tista River terraces in Darjeeling – Sikkim – Tibet wedge; Implications to climate and tectonics[J]. *Quat Int*, 2017, 443: 132 – 142.
- [16] 刘海金, 龚志军, 罗明, 等. 沉积物含水量及误差变化对光释光测年精度的影响研究[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(1): 123 – 135.
Liu H J, Gong Z J, Luo M, et al. Study the effect of water content and its error on the precision of optical age results for sediments[J]. *Quat Sci*, 2021, 41(1): 123 – 135.
- [17] Singh A K, Pattanaik J K, Gagan, et al. Late Quaternary evolution of Tista River terraces in Darjeeling – Sikkim – Tibet wedge; Implications to climate and tectonics[J]. *Quat Int*, 2017, 443: 132 – 142.
- [18] Jia L Y, Hu D G, Wu H H, et al. Yellow River terrace sequences of the Gonghe – Guide section in the northeastern Qinghai – Tibet; Implications for plateau uplift[J]. *Geomorphology*, 2017, 295: 323 – 336.
- [19] He Z X, Zhang X J, Bao S Y, et al. Multiple climatic cycles imprinted on regional uplift – controlled fluvial terraces in the lower Yalong River and Anning River, SE Tibetan Plateau[J]. *Geomorphology*, 2015, 250: 95 – 112.
- [20] 蒋玺, 陈文奇, 宁凡, 等. 贵州高原北部河流阶地发育与喀斯特地貌演化[J]. *地理研究*, 2021, 40(1): 81 – 92.
Jiang X, Chen W Q, Ning F, et al. River terraces in the northern Guizhou Plateau and their implications for karst landform evolution[J]. *Geogr Res*, 2021, 40(1): 81 – 92.
- [21] 殷志强, 孙东, 张瑛, 等. 美姑河流域滑坡时空展布及成生机制研究[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(6): 1358 – 1368.
Yin Z Q, Sun D, Zhang Y, et al. Study on spatial – temporal distribution characteristics and forming mechanism of landslides in the Meigu River basin[J]. *Quat Sci*, 2018, 38(6): 1358 – 1368.
- [22] 殷志强, 孙东, 魏昌利, 等. 美姑河流域地质灾害与防灾减灾研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Yin Z Q, Sun D, Wei C L, et al. Study on Geological Hazards and Disaster Prevention and Reduction in Meigu River Basin[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [23] 殷志强, 邵海, 马娟, 等. 金沙江支流美姑河流域地质灾害调查成果报告[R]. 北京: 中国地质环境监测院, 2017.
Yin Z Q, Shao H, Ma J, et al. Report on geological hazard investigation results of Meigu River Basin, a tributary of Jinsha River[R]. Beijing: China Institute of Geo – environment Monitoring, 2017.
- [24] 胡云鹏, 邵海, 冯文凯, 等. 四川美姑洛高依达流域泥石流灾害分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2017, 28(1): 67 – 74.
Hu Y P, Shao H, Feng W K, et al. Analysis on the debris flow hazard of Luogaoyida gully in Meigu county of Sichuan Province[J]. *Chin J Geol Hazard Control*, 2017, 28(1): 67 – 74.
- [25] 马吉福, 殷志强, 魏刚, 等. 黄河上游贵德盆地二连村泥流堆积扇发育过程分析[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(4): 78 – 83.
Ma J F, Yin Z Q, Wei G, et al. An analysis of the developmental process of the Erlan mud flow fans in the eastern Guide Basin in the upper reaches of the Yellow River[J]. *Hydrogeol Eng Geol*, 2016, 43(4): 78 – 83.
- [26] 赵希涛, 张永双, 曲永新, 等. 玉龙山西麓更新世冰川作用及其与金沙江河谷发育的关系[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(1): 35 – 44.
Zhao X T, Zhang Y S, Qu Y X, et al. Pleistocene glaciations along the Western foot of the Yulong Mountains and their relationship with the formation and development of the Jinsha River[J]. *Quat Sci*, 2007, 27(1): 35 – 44.
- [27] 唐川, 黄润秋, 黄达, 等. 金沙江美姑河牛牛坝水电站库区泥石流对工程影响分析[J]. *工程地质学报*, 2006, 14(2): 145 – 151.
Tang C, Huang R Q, Huang D, et al. Impacts of debris flows on the reservoir of a Hydropower station in the Meigu River of Jinshajiang[J]. *J Eng Geol*, 2006, 14(2): 145 – 151.
- [28] Heaton T J, Köhler P, Butzin M, et al. Marine20 – the marine radiocarbon age calibration curve (0 ~ 55,000 cal BP)[J]. *Radiocarbon*, 2020, 62(4): 779 – 820.
- [29] 崔杰. 美姑河坪头电站岸坡特殊地质现象与地下工程[D]. 成都: 成都理工大学, 2009: 95 – 106.
Cui J. Special Geological Environment of Bank Slope and Underground Engineering about Pingtou Hydroelectric Station of Meigu River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009: 95 – 106.
- [30] Stinchcomb G E, Driese S G, Nordt L C, et al. A mid to late Holocene history of floodplain and terrace reworking along the middle Delaware River valley, USA[J]. *Geomorphology*, 2012, 169 – 170: 123 – 141.
- [31] Sridhar A, Chamyal L S, Bhattacharjee F, et al. Early Holocene fluvial activity from the sedimentology and palaeohydrology of gravel terrace in the semi arid Mahi River Basin, India[J]. *J Asian Earth Sci*, 2013, 66: 240 – 248.
- [32] 许刘兵, 周尚哲. 河流阶地形成过程及其驱动机制再研究[J]. *地理科学*, 2007, 27(5): 672 – 677.
Xu L B, Zhou S Z. Formation process and driving mechanisms of fluvial terrace[J]. *Sci Geogr Sin*, 2007, 27(5): 672 – 677.
- [33] 姚檀栋, Thompson L G, 施雅风, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究[J]. *中国科学(D 辑)*, 1997, 27(5):

447–452.

(Ser D), 1997, 27(5): 447–452.

Yao T D, Thompson L G, Shi Y F, et al. Abrupt climatic changes on the Tibetan Plateau during the Last Ice Age [J]. *Sci China*

[34] Starkel L. Climatically controlled terraces in uplifting mountain areas [J]. *Quat Sci Rev*, 2003, 22(20): 2189–2198.

Terrace sequences and its evolution since the Late Pleistocene in Bier River of Daliang Mountain area

YIN Zhiqiang¹, QU Tianyue², PANG Mingfei^{1,3}, SHAO Hai¹, DING Yi¹

(1. *China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081, China.* 2. *Texas A&M University, College Station, Texas 77840, America;* 3. *China University of Geosciences (Wuhan), Hubei Wuhan 430074, China*)

Abstract: The detailed information of regional active structures and geomorphic evolution were recorded by river terraces, which can provide evidence for the phased uplift of the Quaternary geomorphology. Zhaojue River Basin and its tributaries in Daliang Mountain of Sichuan Province are located in the transitional zone between Hengduan Mountains in the southeast of Qinghai–Tibet Plateau and the southwestern edge of Sichuan Basin, with the development of many river terraces and other layered landforms. The authors took a tributary of Zhaojue River – Bier River in the area as a case study to identify the three river terraces of Bier River, through the investigation of the terrace sequences, river alluvial sediments and ¹⁴C dating results. The T₂ and T₃ are the rock-seated terraces and T₁ is a constructional terrace, with formation times of 27.75 ka B. P., 12.20 ka B. P., and 6.65 ka B. P.. The river incision rates of T₃ and T₂ are 0.59–1.29 mm/a and 1.26–4.50 mm/a respectively. The landform in the Daliangshan area of Western Sichuan has experienced at least two intermittent uplifts in the past 30 000 years, and the crustal uplift rate in the upper reaches of the river is faster than that in the middle and lower reaches of the river during the overall uplift process, with characteristics of tilting uplift. The terraces formation of T₃, T₂ and T₁ has a certain correlation with the climate change in the study area, but the neotectonic activity is the dominant factor in the terraces formation of Bier River, which is of great significance for the river terraces sequence distribution and evolution in Western Sichuan since the Late Pleistocene.

Keywords: river terrace; terrace sequences; geomorphological evolution; Late Pleistocene; Bier River

(责任编辑: 魏昊明)