

太行山南缘晚更新世以来河流阶地的发育 及其新构造运动意义

张 蕾^{1,2}, 张绪教¹, 武法东¹, 何泽新¹, 田 珺¹, 于 航¹, 王春林³, 刘江红³

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 国土资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201;
3. 山西陵川县国土资源局, 山西 陵川 048300)

摘要: 太行山南缘的武家湾河流经太行山与华北平原两大地貌单元的过渡地带, 较太行山内部其他水系对新构造运动的响应更为敏感, 能较好地记录区域地壳抬升历史。以武家湾河下游平甸河为研究重点, 通过野外河流阶地级序及沉积特征的调查并结合光释光(OSL)测年结果, 厘定了平甸河4级河流阶地, T_4 、 T_3 、 T_2 及 T_1 阶地河拔高度分别为61~96 m、35~54 m、19~43 m、3~5 m, 分别形成于97.4 kaB. P.、73.9 kaB. P.、48.3 kaB. P.、2.3 kaB. P., 根据对阶地成因的探讨, 认为 T_4 、 T_3 、 T_2 阶地为构造阶地, T_1 阶地为气候阶地, 阶地资料揭示晚更新世(Qp³)太行山南缘经历3次间歇性构造抬升后至少隆升了90 m: 第一次抬升26~42 m、抬升速率1.11~1.79 mm/a, 第二次抬升11~27 m、抬升速率0.43~1.05 mm/a, 第三次抬升16~39 m、抬升速率0.35~0.85 mm/a。本研究为河流阶地对新构造运动的响应研究提供了实际材料, 对晚更新世太行山的形成及演化研究具有重要的参考价值。

关键词: 太行山; 平甸河; 晚更新世(Qp³); 河流阶地; 光释光(OSL)测年; 新构造运动

中图分类号: P534.63⁺1; P546

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2013)04-0791-08

River Terraces' Development and Significance of Neotectonic Movement on the Southern Margin of Taihang Mountains since Late Pleistocene

ZHANG Lei^{1,2}, ZHANG Xu-jiao¹, WU Fa-dong¹, HE Ze-xin¹, TIAN Jun¹, YU Hang¹,
WANG Chun-lin³, LIU Jiang-hong³

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Cores and Samples Center of Land and Resources, China Geological Survey, Sanhe, Hebei 065201, China; 3. Lingchuan Bureau of Land and Resources, Lingchuan, Shanxi 048300, China)

Abstract: The responding to neotectonic movement in Wujiawan River, which runs through transition area of two geomorphic units of Taihang Mountains and the North China Plain, is more sensitively than other water systems in Taihang Mountains, so it can record the history of uplift better. By the field investigation of sequence and sedimentary features, dating of optical stimulated luminescence(OSL), the conclusions can be reached that there are four levels of river terraces in Pingdian River, the lower reaches of Wujiawan River, T_4 , T_3 , T_2 and T_1 terraces' heights are 61-96 m, 35-54 m, 19-43 m and 3-5 m, and ages are 97.4 kaB. P., 73.9 kaB. P., 48.3 kaB. P. and 2.3 kaB. P. respectively. After investigation the causes of river terraces, T_4 , T_3 , T_2 terraces should be the results of tectonic uplift, otherwise T_1 is climatic terrace. It reveals that the amplitude of uplift of the area is 90 m at least after three stages of stable sedimentation and rapid uplift since Late Pleistocene(Qp³), the amplitude and the rate of uplift are 26-42 m and 1.11-1.79 mm/a, 11-27 m and 0.43-1.05 mm/a, 16-39 m and 0.35-0.85 mm/a. This study is of great value, which provides actual material for

收稿日期: 2013-01-29; 改回日期: 2013-05-08; 责任编辑: 楼亚儿。

基金项目: 国家财政部与国土资源部“2011年国家级地质遗迹保护”项目(1212010712910)。

作者简介: 张蕾, 女, 硕士, 1988年出生, 第四纪地质学专业, 从事地貌与新构造运动、地质公园方面的研究。Email: zhanglei871126@126.com。

通信作者: 张绪教, 男, 副教授, 1964年出生, 第四纪地质学专业, 从事地貌与第四纪地质、新构造运动的教学及科研工作。Email: zhangxj@cugb.edu.cn。

the research of river terrace and neotectonic movement on the southern margin of Taihang Mountains.

Key words: Taihang Mountains; Pingdian River; Late Pleistocene (Qp^3); river terrace; OSL dating; neotectonic movement

0 引言

河流阶地是河流地貌系统的重要组成部分,它的形成与侵蚀基准面下降所导致的河流快速下切密切相关,新构造运动和气候变化是控制侵蚀基准面下降的两个重要因素,二者通过改变河流流量和沉积物通量来控制河流阶地的形成^[1-4]。在构造运动相对稳定的地区,气候变化控制着河流阶地的发育,即间冰期或冰期向间冰期的过渡期有利于河流阶地的形成^[5-8];而在构造运动强烈的地区,构造抬升导致河流侵蚀基准面相对下降,造成河流溯源侵蚀及下蚀作用的加强,进而形成河流阶地^[9-15]。因此,关于河流阶地级序、成因及形成年代的研究对反演第四纪以来新构造运动特征和气候变化具有重要意义。

太行山隆起是中国华北地区重要的构造地貌单元,其南缘和东缘构成了重要的构造地貌边界带^[16],发育了众多的层状地貌(如夷平面、岩溶洞穴、河流阶地),河流阶地作为太行山地区第四纪阶段性隆升的地貌学证据已受到普遍关注^[17-23]^①,但前人对横跨太行山与华北平原这两大地貌单元的河流及通过阶地资料来定量计算太行山南缘隆升速率的研究较少,笔者在山西陵川王莽岭国家地质公园研究造景地貌与新构造运动关系时,重点对武家湾河下游的平甸河河流阶地级序及沉积特征进行了系统的野外调查,结合光释光(OSL)年代测定结果,对河流阶地的级序、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,获得的研究成果为太行山晚更新世(Qp^3)的隆升研究提供了较重要的参考材料。

1 研究区概况

1.1 研究区地理位置及水系概况

武家湾河发源于山西省晋城市陵川县里沟一带,是县内的第二大河,经双底村、榆树湾村、武家湾村等地,流入河南辉县,全长约50 km,流域面积约672 km²。其大地构造位置处于太行山南

缘,由北向南流经快速隆升的太行山和相对沉降的华北平原这两大地貌单元之间的过渡带,由于该过渡带受到山前断裂带的影响,新构造运动快速、剧烈,故武家湾河较太行山内部其他河流对新构造运动的响应更为敏感。武家湾河上游(里沟至路村一带)又称小磨河,河床弯曲幅度较大,河谷走向为NEE—SWW;中游(路村至榆树湾村一带)又称大磨河,河床弯曲幅度较大、下切较深,且河床纵比降变化较大,河谷走向为NNE—SSW,河流阶地保存较少;下游(榆树湾村至辉县一带)又称平甸河,河床弯曲幅度不大,河谷走向为南北向(图1),河流阶地保存较完整、沉积特征及级序明显。因此,平甸河为河流阶地级序、成因、形成年代及新构造运动等方面研究的理想河段。

1.2 区域地质概况

研究区出露地层由老到新依次为新太古界、中元古界长城系、下古生界寒武系、奥陶系及新生界第四系。其中岩性以灰岩、白云岩为主的寒武系、奥陶系和以亚砂土、亚粘土为主的第四系广泛出露,新太古界变质岩和中元古界长城系石英砂岩分布面积较小。中晚元古代,华北地台构造活动较弱,大部分地区处于稳定的滨浅海相沉积环境,沉积了长城系碎屑岩。早古生代,该区处于陆表海沉积环境,沉积了一套产状近水平的碳酸盐岩。中生代以来,区内构造变形表现为一系列不同方向、不同性质、不同期次的脆性断裂和褶皱变形,在太行山南侧山前形成了一系列近东西向、北东向断裂褶皱组合,研究区即位于中生代形成的太行山复背斜西翼,总体构造轮廓清楚,构造线呈北东向。新生代以来喜马拉雅构造运动十分活跃,地壳以间歇性抬升为主要运动形式,造就了现今的地貌景观和水系格局。

2 平甸河河流阶地的发育特征及年代格架的建立

2.1 河流阶地的发育特征

平甸河流经陵川县榆树湾村、老后湾村、大

^① 张绪教,李宗敏,贾丽云,等. 云台山新构造运动与造景地貌的关系研究报告. 中国地质大学(北京). 2011.

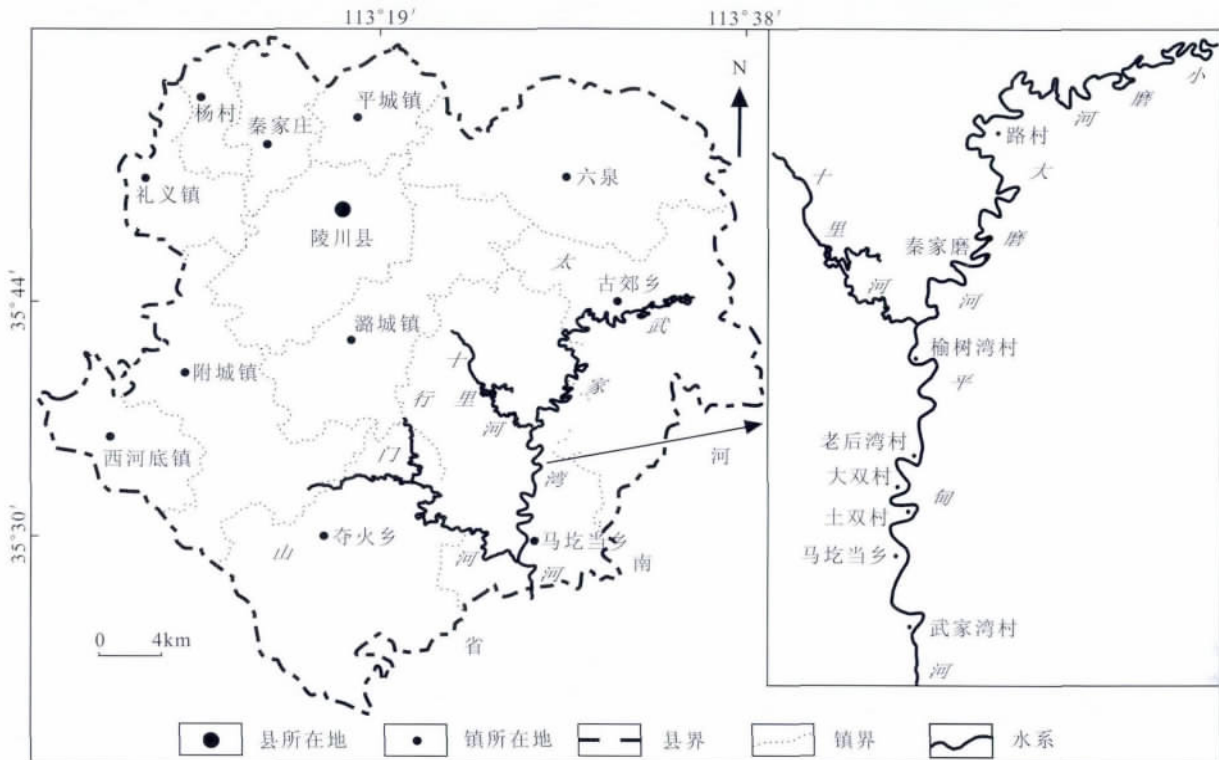


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Map showing location of the study area

双村、土双村、武家湾村等地(图1),发育多级河流阶地,根据对不同河段河谷横剖面的实际测量,可观察到河流阶地的级数大体一致,均表现为稳定的4级阶地,低阶地以堆积阶地为主,高阶地以基座或侵蚀阶地为主,堆积物主要为河流相砾石及粘土、粘土质粉砂、粉砂、细砂物质,基座岩性以灰岩为主。

表1列出了平甸河河流阶地发育特征: T_1 阶地面河拔3~5 m,为堆积阶地,沉积物为含砾石的粉砂、粘土,砾石呈次棱角状; T_2 阶地面河拔19~43 m,在榆树湾村至大双村一带为基座阶地,在土双村至马圪当乡政府一带为堆积阶地,沉积物主要为河流冲积物砂砾石,砾石层下部砾石的

砾径20~30 cm,向上逐渐减小至3~5 cm,砾石有一定磨圆,定向排列较明显,砾石中充填粉砂、粘土。由于榆树湾村靠近红豆杉大峡谷, T_2 阶地在深切河曲影响下河拔高出其下游同级阶地20 m左右; T_3 阶地面河拔35~54 m,同样在榆树湾村河拔达到最大。该级阶地在榆树湾村至土双村一带为基座阶地,在马圪当乡政府河段为堆积阶地,沉积物由含粘土质粉砂、细砂的砾石层组成,砾石呈圆形、次圆形,定向排列明显; T_4 阶地面河拔61~96 m,在榆树湾村至大双村一带为侵蚀阶地,在土双村至武家湾村一带为基座阶地,其中土双村的 T_4 阶地沉积物由钙质胶结紧密的灰岩角砾石层组成,基座以灰岩为主。

不同河段河谷的实测横剖面显示河谷形态、阶地类型及沉积物厚度等各不相同(图2)。

从河谷形态来看,平甸河河谷沿河流流向逐渐变宽,宽度由榆树湾村的200 m左右逐渐拓宽至马圪当乡政府一带的320 m左右,值得一提的是,图2(a)中展现了被离堆山分隔的古宽谷和现今河谷的谷底形态,古宽谷的谷底宽约80 m,代表当时相当长时间的构造稳定,之后,河流改道且快速向下侵蚀,使之前由河流侧方侵蚀形成的

表1 陵川县平甸河河流阶地发育特征

Table 1 The characteristics of river terraces of Pingdian River in Lingchuan

阶地 级序	阶地类型	河拔高度/ m	沉积物特征
T_1	堆积阶地	3~5	含砾石的粉砂、粘土
T_2	堆积或基座阶地	19~43	含粉砂、粘土的砾石层
T_3	堆积或基座阶地	35~54	含粘土质粉砂、细砂的砾石层
T_4	基座或侵蚀阶地	61~96	钙质胶结紧密的灰岩角砾石层

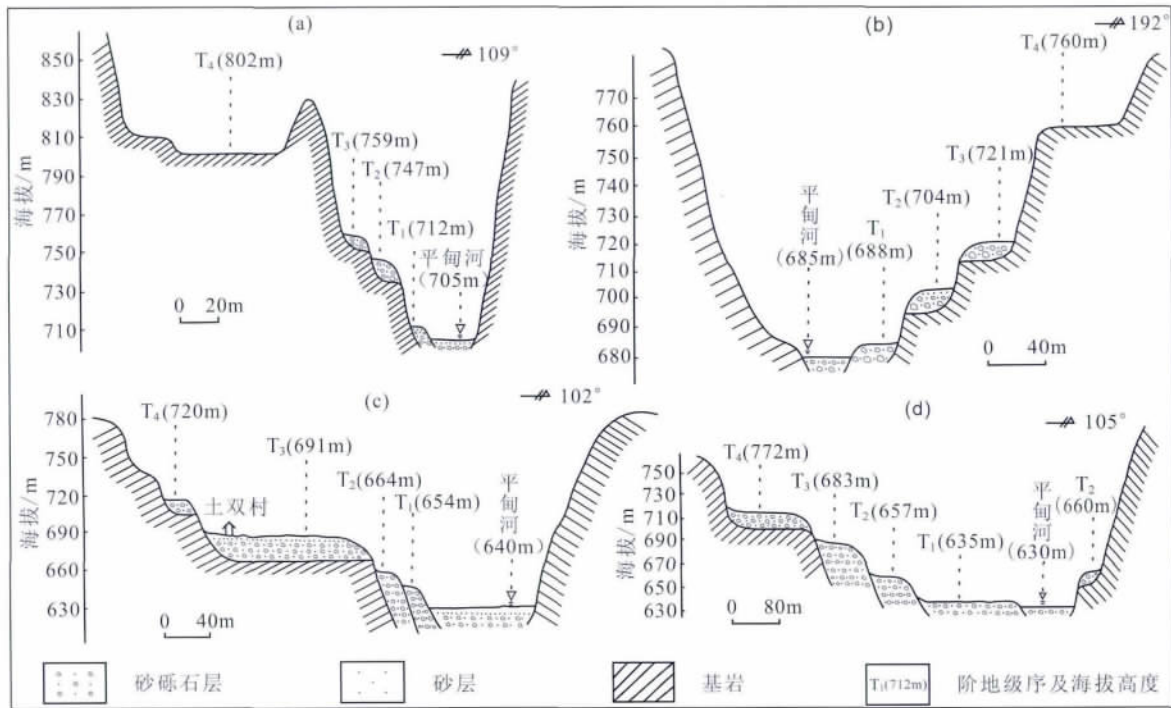


图2 陵川县平甸河河谷横剖面示意图

Fig. 2 Schematic profiles of river terraces of Pingdian River in Lingchuan

(a) 榆树湾村平甸河河谷横剖面图; (b) 老后湾村平甸河河谷横剖面图; (c) 土双村平甸河河谷横剖面图; (d) 马圪当乡政府平甸河河谷横剖面图

宽阔谷底成为古河道,因此,这种双底谷中谷是河道变迁的证据^[24];从河流阶地类型及沉积物厚度来看, T_4 阶地由上游的侵蚀阶地逐渐过渡为中下游的基座阶地,且基座阶地的上覆沉积物厚度逐渐增大,同样, T_3 和 T_2 阶地由上游的基座阶地逐渐过渡为中下游的堆积阶地,阶地沉积物厚度由10 m左右逐渐增至40 m以上。上述河谷宽度、阶地类型及沉积物厚度沿河流流向的变化体现了研究区北部至南部河流下切能力的减弱。

2.2 河流阶地年代格架的建立

野外通过对平甸河不同地段、不同级序河流阶地的河拔高度及沉积物特征的分析,初步推断平甸河4级阶地形成年代可能为晚更新世(Qp^3)以来,因此采用光释光(OSL)测年方法建立河流阶地的年代格架。

光释光样品均采自河流阶地沉积中上部未被扰动的粉砂或粘土,野外采样时避免阳光直射,使用直径约5 cm的钢管,距自然露头30 cm的深部取样,用黑色塑料袋扎口封装,以避免曝光及保持天然湿度。室内测试于中国地震局地质研究所释光年代学实验室完成。暗室内先用浓度为30%的 H_2O_2 和浓度为37%的HCl对样品进行处理,以去除有机质和碳酸盐类,之后采用静水沉

降法分离出粒径 $4 \sim 11 \mu m$ 的细颗粒多矿物组分,再用30%的氟硅酸反复浸泡以提取细颗粒石英,最后采用简单多片再生法(SMAR)将提取的石英在Riso TL/OSL-DA-20型自动测量系统上进行蓝光释光的等效剂量测量。LED12-360样品的光释光信号衰减曲线和生长曲线见图3。

从释光衰减曲线来看,该样品信号特别强,第1 s的光子计数可达几万甚至几十万,经蓝光激发,光释光信号在前5 s内已完全衰减至本底值,说明所测石英满足释光测年要求。从释光生长曲线来看,感量变化得到矫正,曲线拟合较好,满足SMAR法测量要求,等效剂量测量结果比较可靠。根据石英矿物吸收环境剂量率与环境中的铀和钍含量(α 计数率)、钾含量等之间的转换关系^[25],并考虑样品含水量及宇宙射线对环境剂量率的贡献^[26],选用Daybreak 583型厚源 α 计数仪对样品进行U、Th含量的测定,K含量采用火焰光度计分析方法测定,以计算各样品环境剂量率。最后通过各样品的等效剂量和环境剂量率计算出样品所在层位的沉积年龄。

一般将河流阶地表层沉积物的年龄近似视为阶地的形成年代,即河流废弃并开始下切的年代^[27]。如表2所列,本批样品均采自平甸河不同

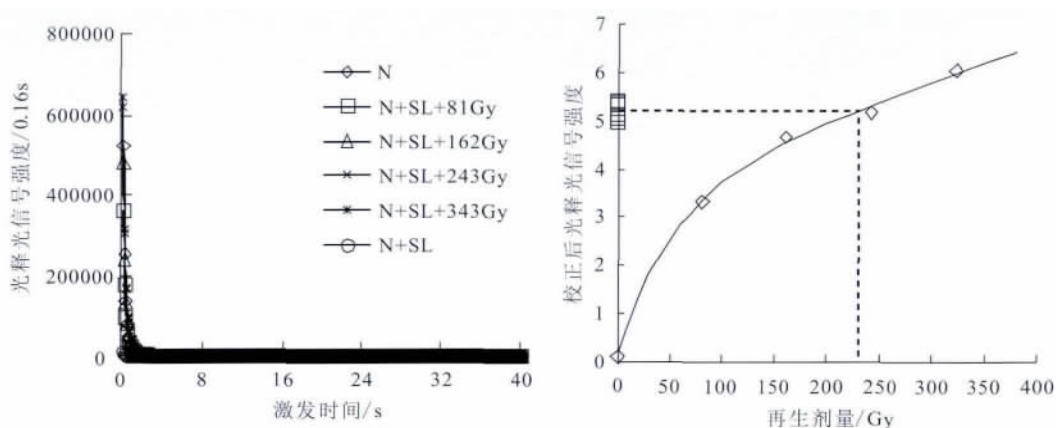


图3 样品 LED12-360 光释光信号衰减曲线和生长曲线

Fig. 3 OSL decay and growth curves of sample LED12-360

表2 研究区不同级序河流阶地沉积物光释光(OSL)测年结果

Table 2 Results of OSL for river terrace sediments from different grades in the study area

室内编号	采样位置	海拔/m	α 计数率/cpks	$w(K)/\%$	含水量/%	环境剂量率/(Gy/ka)	等效剂量/Gy	年龄/ka
LED12-353	榆树湾村 T ₁ 中部	705	11.4 ± 0.4	2.0	17	5.0 ± 0.2	3.9 ± 0.2	0.4 ± 0.1
LED12-354	榆树湾村 T ₃ 上部	765	9.7 ± 0.2	2.1	17	3.5 ± 0.2	257.1 ± 13.0	73.9 ± 8.2
LED12-359	土双村 T ₄ 上部	697	9.2 ± 0.2	1.9	15	3.3 ± 0.1	321.5 ± 14.1	97.4 ± 6.3
LED12-360	武家湾村 T ₂ 中部	593	13.0 ± 0.4	2.8	15	4.8 ± 0.2	231.1 ± 21.7	48.3 ± 6.3

河段的不同阶地的中部、上部, 样品年龄大体代表阶地的形成年代, 即平甸河在不同时期开始下切的年代。测试结果显示, 平甸河发育的 T₄、T₃、T₂ 阶地分别形成于 97.4 kaB. P.、73.9 kaB. P.、48.3 kaB. P., 而 T₁ 阶地形成于 0.4 kaB. P., 时代过于年轻, 推测样品可能采自河漫滩沉积物, 不能代表 T₁ 阶地的形成年代, 故不予采用。考虑到王莽岭与邻区云台山同处相似的大地构造背景, 且本区 T₁ 阶地的河拔及沉积特征与云台山地区同级阶地大体相当, 所以采用云台山子房河 T₁ 阶地的形成年代 2.3 kaB. P.^① 作为本区 T₁ 阶地的形成年代。

3 河流阶地对新构造运动的响应及与太行山南缘隆升的关系

3.1 河流阶地成因分析

河流阶地的分类存在诸多方案^[1 28-29], 按照其成因的不同可划分为构造阶地、气候阶地及曲流阶地, 其中构造阶地与区域性地壳抬升密切相关^[30], 一般表现为深切的基座阶地或侵蚀阶地, 具有重要的构造指示意义; 气候阶地一般表现为沿河流两岸呈对称分布的堆积阶地^[3 30], 并可与区域性或全球性的气候事件进行对比^[31]。

从平甸河河流阶地的结构及形态特征来看, T₄、T₃、T₂ 阶地各级之间高差普遍较大、冲积层较薄、上游至下游同级阶地的河拔高度大体相同, 由此推断阶地类型主要为基座阶地; T₄ 阶地在榆树湾村至大双村一带甚至表现为深切至基岩的侵蚀阶地。无论是侵蚀阶地还是基座阶地, 都应发育于构造强烈抬升的地区。因此, 平甸河发育的这 3 级阶地 (T₄、T₃、T₂ 阶地) 均形成于太行山强烈抬升的新构造运动背景下。

华北地区在 3 000 ~ 2 500 aB. P. 的晚全新世初曾发生过一次环境变化, 其主要表现为气候变干凉、降水减少、河流改道频繁、山地强烈切割、海岸线后退^[32]。该区第四纪以来新构造运动频繁剧烈^[18 33], 但晚全新世初, 由于气候变化引起的海平面下降速度超过华北平原的地壳下降速度, 因而引起河流的普遍下切, 所以说气候变化是晚全新世环境变化的主要原因, 而新构造运动对河流的下切起到了加速的作用^[32]。平甸河沿岸连续分布、高差较小的 T₁ 阶地均表现为堆积阶地, 阶地形成年代与此次气候事件时间也大体一致, 因此 T₁ 阶地的形成可与华北地区晚全新世初气候变化事件对比, 推断 T₁ 阶地属于气候阶地。

3.2 晚更新世河流阶地对新构造运动的响应

通过平甸河上游到下游的 6 条实测横剖面综

合绘制的河流阶地位相图(图4)显示,本区晚更新世经历了3次间歇性构造抬升,抬升幅度分别为26~42 m、11~27 m、16~39 m,其中第一次抬升幅度最大,第三次抬升幅度最小,不同时期的地壳抬升幅度呈现逐渐减小的趋势。另外,从位相图可以看出马圪当乡一带各级阶地及现代河床均发生了上拱变形,说明马圪当乡一带地壳局部隆起,这种变形特征自晚更新世一直持续到现在, T_2 阶地形成之隆起有减弱的趋势。

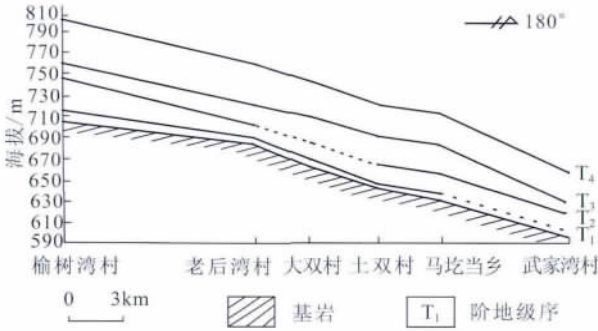


图4 太行山南缘平甸河阶地位相图
Fig. 4 Longitudinal profile of river terraces along Pingdian River on the southern margin of Taihang Mountains

对老后湾村、土双村、马圪当乡政府一带3个不同河段,分别计算了不同时期河流下切侵蚀速率。计算结果(图5)表明晚更新世(Qp^3)平甸河的下切过程可分为3个阶段:第①阶段,大约于97 kaB. P. 河流开始以1.23~1.66 mm/a的速率强烈下切,形成深切的 T_4 基座阶地或侵蚀阶地,上游的老后湾村河流下切速率为1.66 mm/a,而中、下游的土双村、马圪当乡政府一带河流下切速率为1.23 mm/a,这种上游侵蚀速率大于中、下游的现象,表明该阶段本区在整体隆升过程中,平甸河上游较中、下游的地壳抬升速度快,具有掀斜式抬升的性质;第②阶段,大约于74 kaB. P. 河流开始以0.66~1.05 mm/a的速率再次侵蚀下切,形成 T_3 基座阶地或堆积阶地,此阶段的上游侵蚀速率大幅减小至0.66 mm/a,而中、下游侵蚀速率基本不变。这种中、下游侵蚀速率远大于上游的现象,表明该阶段河流上游的地壳抬升速率明显减缓,表现出下游抬升快、上游抬升慢的反向掀斜特点;第③阶段,大约于48 kaB. P. 河流开始以0.35~0.48 mm/a的速率第三次下蚀,形成 T_2 基座阶地或堆积阶地,此阶段上、中、下游的河流侵蚀速率均减至上一阶段的一半左右,中、下游侵蚀速率略大于上游,表明该阶段本区的地壳

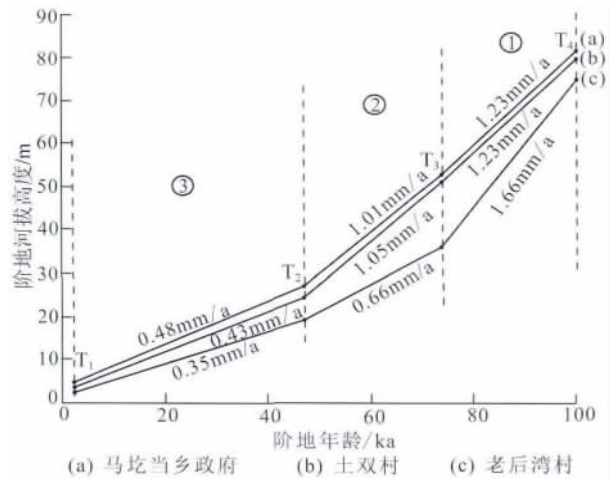


图5 不同河段不同时期河流下切侵蚀速率
Fig. 5 Incision rate of different stages in different areas

抬升速度趋于缓慢,掀斜式抬升的性质已不明显。

通过对河流下切速率的对比分析可知:同一河段不同时期地壳的抬升幅度和抬升速度呈现出逐渐减小的趋势,说明平甸河流域晚更新世新构造运动呈逐渐减缓的趋势;同一时期上、下游地壳抬升幅度和抬升速度的差异,则表明新构造运动具有掀斜式抬升的性质。

3.3 河流阶地与太行山南缘隆升的关系

新生代以来太平洋板块与欧亚板块的持续俯冲碰撞,导致太行山地区水平方向缩短,垂直方向加厚,造成太行山脉的隆升^[34-40]。在这种构造抬升活跃的地区,河流地貌会对山体的隆升产生响应,在河谷中形成与不同隆升阶段相对应的多级河流阶地。河流阶地的类型、结构及沉积物特征能较好地记录山脉的隆升和侵蚀过程,因此,可以通过河流阶地的研究来探讨太行山的隆升。

隆升速率是太行山隆升研究的重要问题之一,对其进行计算时,可用河流的下切速率近似代替太行山的隆升速率。虽然河流下切速率并不能精确反映地面抬升速率,但其大小受到地面抬升快慢的影响,所以能够反映地面总的变化趋势,甚至能反映地面的抬升速率^[41-43]。

利用平甸河河流阶地数据计算的不同时期太行山南缘隆升幅度和隆升速率(表3)表明,晚更新世(Qp^3)太行山南缘至少隆升了90 m:约97 kaB. P. 开始的第一次隆升幅度为26~42 m、速率为1.11~1.79 mm/a,此阶段本区强烈抬升,在榆树湾村达到最大,并伴随马圪当乡政府等地的局部隆起;约74 kaB. P. 开始的第二次隆升幅度为11~27 m、速率为0.43~1.05 mm/a,此阶段本区

表3 不同时期太行山南缘隆升幅度和隆升速率
Table 3 Extent and speed of uplift on the southern margin of Taihang Mountains in different stages

河流下切 年代/kaB. P.	太行山南缘 隆升幅度/m	太行山南缘 隆升速率/(mm/a)
97.4	26~42	1.11~1.79
73.9	11~27	0.43~1.05
48.3	16~39	0.35~0.85

抬升幅度不如前一次强烈, 抬升幅度在土双村达到最大, 并伴随马圪当乡政府等地的局部隆起; 约48 kaB. P. 开始的第三次隆升幅度为16~39 m、速率为0.35~0.85 mm/a, 此阶段本区抬升程度继续减弱, 抬升幅度在榆树湾村达到最大, 仍伴随马圪当乡等地面的上拱。综合以上数据, 晚更新世太行山南缘不同时期的隆升幅度和隆升速率呈现出逐渐减小的趋势, 同一时期南、北部表现出掀斜抬升的性质, 山脉隆升过程中一直伴随着地壳的局部隆起。

4 结论与讨论

4.1 结论

通过对平甸河河流阶地的发育特征、级序、年代及形成机制等方面的综合研究, 探讨了河流阶地对新构造运动的响应及其与太行山南缘隆升的关系, 得到以下结论:

(1) 平甸河晚更新世(Qp³)以来发育4级河流阶地, 其中3级构造阶地(T₄、T₃、T₂阶地)河拔高度分别为61~96 m、35~54 m、19~43 m, 分别形成于97.4 kaB. P.、73.9 kaB. P.、48.3 kaB. P., 说明太行山南缘晚更新世经历了3次间歇性构造抬升; 而河拔3~5 m的T₁阶地为气候阶地, 形成于晚全新世初, 反映的主要是气候变化。

(2) 本区晚更新世经历了3次相对稳定和3次快速抬升的交替过程, 构造运动呈现出下列特征: ①3次间歇性构造运动中, 同一河段不同时期的地壳抬升幅度和抬升速率呈现出逐渐减小的趋势; ②同一时期不同河段表现出掀斜抬升的性质; ③整体抬升过程中伴随地壳的局部隆起, 这种变形特征自晚更新世一直持续到现在。

(3) 太行山南缘晚更新世至少隆升了90 m: 第一次隆升幅度和隆升速率分别为26~42 m、1.11~1.79 mm/a; 第二次隆升幅度和隆升速率分别为11~27 m、0.43~1.05 mm/a; 第三次隆升幅度和隆升速率分别为16~39 m、0.35~0.85

mm/a。山脉的隆升幅度和隆升速度呈现逐渐减弱的趋势。

4.2 讨论

笔者对太行山地区晚更新世河流阶地的发育、新构造运动的期次、太行山隆升幅度的研究结论与前人存在一定差异, 其原因主要有以下两方面:

一是对河流阶地级序厘定的不同。有的学者认为太行山区晚更新世仅发育1级河流阶地(T₂阶地)^[17-19], 有的学者认为太行山南缘的云台山区晚更新世发育4级河流阶地(T₄、T₃、T₂、T₁阶地)^[21], 本次野外调查及年代测试结果表明太行山南缘晚更新世发育3级河流阶地。河流阶地的发育级序与河流所处的地貌及大地构造位置有关, 晚更新世为太行山最新构造运动时期^[17], 该时期华北山地处于低海平面时期, 新构造运动和低海平面共同促进了河流的溯源侵蚀, 而每一次的河流溯源侵蚀作用都是首先从地形高差较大的两大地貌单元的过渡带或山前断裂带附近开始的。因此, 流经太行山山前断裂带的平甸河对新构造运动的响应更加敏感, 能够更为全面地记录新构造运动的期次, 其河流阶地的级数也应多于太行山内部其他河流。同样, 晚更新世河流在溯源侵蚀过程中, 位于平甸河下游的子房河发育4级阶地^[21], 向上游阶地级数逐渐减少至3级也是可以解释的。由此可见, 平甸河阶地发育级序与研究区所处的地貌及大地构造位置是相吻合的。

二是采用的定年手段不同导致测年数据的不同, 从而对新构造运动的期次划分存在一定的分歧。由于不同学者研究的地区和选取的测年材料不同, 且不同测年方法精度也相差较大, 导致测年数据存在一定差异。尽管如此, 本次研究的王莽岭地区平甸河与云台山地区的子房河河流阶地的河拔高度及年代具有一定的可比性: 平甸河的T₂阶地河拔19~43 m、形成于48.3 kaB. P., 与子房河河拔约10 m、形成于50~30 kaB. P.的T₂阶地^①及河拔26~29 m、形成于54.4 kaB. P.的T₃阶地^[21]可进行对比; 平甸河的T₃阶地河拔35~54 m、形成于73.9 kaB. P., 与子房河河拔约38 m、形成于78.3 kaB. P.的T₄阶地^[21]可进行对比。

参考文献:

- [1] 杨景春. 地貌学教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1985: 60-64.
- [2] 程绍平, 邓起东, 李传友, 等. 流水下切的动力学机制、

- 物理侵蚀过程和影响因素: 评述和展望 [J]. 第四纪研究, 2004, 24(4): 421-429.
- [3] Bull W B. Stream-terrace genesis: Implications for soil development [J]. *Geomorphology*, 1990, 3(3/4): 351-367.
- [4] Bridgland D R. River terraces system in north-west Europe: An archive of environmental change uplift and early human occupation [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 1293-1303.
- [5] 常宏, 安芷生, 强小科, 等. 河流阶地的形成及其对构造与气候的意义 [J]. 海洋地质动态, 2005, 21(2): 8-11.
- [6] Maddy D, Bridgland D, Westaway R. Uplift-driven valley incision and climate-controlled five development in the Thames Valley, UK [J]. *Quaternary International*, 2001, 79(1): 23-26.
- [7] 李有利, 史兴民, 傅建利, 等. 山西南部 1.2 MaB. P. 的地貌转型时间 [J]. 地理科学, 2004, 24(3): 292-297.
- [8] 邱维理, 张家富, 周力平, 等. 山西河曲黄河阶地序列初步研究 [J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 544-552.
- [9] 胡春生, 潘保田, 高红山, 等. 最近 150 ka 河西地区河流阶地的成因分析 [J]. 地理科学, 2006, 26(5): 603-608.
- [10] 李吉均, 方小敏, 马海洲, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起 [J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(4): 316-322.
- [11] 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响 [J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 381-391.
- [12] 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究 [J]. 科学通报, 1998, 43(15): 1569-1574.
- [13] 鹿化煜, 安芷生, 王晓勇, 等. 最近 14 Ma 青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据 [J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34(9): 855-864.
- [14] 刘小丰, 刘洪春, 高红山, 等. 渭河陇西段第七级阶地年代的确定及其构造意义 [J]. 西北地震学报, 2010, 32(2): 144-149.
- [15] 刘兴旺, 袁道阳, 葛伟鹏. 兰州黄河阶地高精度 GPS 测量与构造变形研究 [J]. 西北地震学报, 2007, 29(4): 341-351.
- [16] 张岳桥, 杨农, 马寅生. 太行山隆起南段新构造变形过程研究 [J]. 地质力学学报, 2003, 9(4): 313-329.
- [17] 吴忱, 张秀清, 马永红. 华北山地形貌面与新生代构造运动 [J]. 华北地震科学, 1996, 14(4): 40-50.
- [18] 吴忱, 张秀清, 马永红. 太行山燕山主要隆起于第四纪 [J]. 华北地震科学, 1999, 17(3): 1-7.
- [19] 吴忱, 张秀清, 赵英魁. 中国华北山地的层状地貌与喜马拉雅构造运动 [J]. 地理学与国土研究, 2000, 16(3): 82-86.
- [20] 程绍平, 冉勇康. 滹沱河太行山山峡段河流阶地和第四纪构造运动 [J]. 地震地质, 1981, 3(1): 29-39.
- [21] 马寅生, 赵逊, 赵希涛, 等. 太行山南缘新生代的隆升与断陷过程 [J]. 地球学报, 2007, 28(3): 219-233.
- [22] 龚明权. 新生代太行山南段隆升过程研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2010: 1-142.
- [23] 刘成如. 山西省地区新生代构造变形特征 [J]. 华北国土资源, 2011(1): 17-19.
- [24] 常宏, 金维群, 王世昌, 等. 鄂西清江下游中更新世晚期以来的河流演化 [J]. 现代地质, 2012, 26(1): 99-106.
- [25] Aitken M J. An Introduction to Optical Dating [M]. New York: Oxford University Press, 1998: 39-50.
- [26] Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations [J]. *Radiation Measurements*, 1994, 23(2/3): 497-500.
- [27] 王永, 王军, 肖序常, 等. 西昆仑山前河流阶地的形成及其构造意义 [J]. 地质通报, 2009, 28(12): 1779-1785.
- [28] 沈玉昌, 龚国元. 河流地貌学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 56-71, 85-153.
- [29] 陆中臣, 贾绍凤, 黄克新, 等. 流域地貌系统 [M]. 大连: 大连出版社, 1991: 77-107, 166-272, 313-336.
- [30] 曹伯勋. 地貌学及第四纪地质学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995: 254-273.
- [31] Molnar P, Brown E T, Burchfiel B C, et al. Quaternary climate change and the formation of river terraces across growing anticlines on the north flank of the Tien Shan, China [J]. *The Journal of Geology*, 1994, 102: 583-602.
- [32] 吴忱, 魏福利. 华北地区晚全新世初期环境变化分析 [J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(2): 97-101.
- [33] 郭旭东, 严富华. 北京西山新构造运动的分期 [J]. 现代地质, 1995, 9(1): 50-59.
- [34] 张存德, 向家翠. 华北地区的现代构造运动 [J]. 地震地质, 1990, 12(3): 265-271.
- [35] 苏刚, 许绍燮, 麻水歧, 等. 大华北新构造运动和地震活动“成片迁移”的成因探讨 [J]. 地球物理学报, 1990, 33(3): 278-297.
- [36] 王亚妹, 万天丰. 中国东部新生代岩石圈构造滑脱、岩浆活动和地震 [J]. 现代地质, 2008, 22(2): 207-229.
- [37] 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征 [J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(12): 1020-1030.
- [38] 鄢家全, 时振梁, 汪素云, 等. 中国及邻区现代构造应力场的区域特征 [J]. 地震学报, 1979, 1(1): 9-24.
- [39] 黄礼良. 中国大陆新生代构造应力场的研究 [J]. 地震, 1993(3): 68-76.
- [40] 汪素云, 许忠淮, 俞言祥, 等. 中国及其邻区周围板块作用力的研究 [J]. 地球物理学报, 1996, 39(6): 764-771.
- [41] Maddy D, Bridgland D, Green C P. Crustal uplift in southern England: Evidence from the river terrace records [J]. *Geomorphology*, 2000, 33(3/4): 167-181.
- [42] Burbank D W, Leland J, Filding E, et al. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwestern Himalayas [J]. *Nature*, 1996, 379: 505-510.
- [43] Leland J, Reid M R, Burbank D W, et al. Incision and differential bedrock uplift along the Indus River near Nanga Parbat, Pakistan Himalaya, from ^{10}Be and ^{26}Al exposure age dating of bedrock straths [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 154(1/4): 93-107.