

龙门山北段平通河流域地貌演化过程

颜照坤¹ 李 勇¹ 黄润秋² 李奋生¹ 闫 亮¹ 赵国华¹ 张自力¹ 张 威¹ ,
Densmore A L³ , Hilton R G³

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学) 四川 成都 610059;

2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学) 四川 成都 610059;

3. Inst. of Hazard and Risk Research and Dept. of Geography , Durham Univ. , Durham DH1 3LE , UK)

摘 要: 龙门山位于青藏高原东缘,是青藏高原周缘山脉中陡度变化最大的山脉,也是全球气候和构造活动最为强烈的地区之一,因此成为研究构造、气候如何影响山脉地貌演化过程这一科学问题的良好素材。在位于龙门山北段的平通河流域,汶川地震导致该区强烈的隆升、剥蚀作用,对研究该区地貌演化过程具有重要的启示意义。通过对平通河流域基于 DEM 数据的地形坡度、水系分布、河流发育程度等的分析,并综合研究区构造特征和岩性特征,获得该流域不同区域的地貌演化方向,其中两个区域的地貌演化最为剧烈:1. 平通河流域位于北川-映秀断裂和彭灌断裂之间的地区,未来将发生较快的隆升,地貌向高、陡的方向演化,河流下切作用使河谷两岸形成更加陡峭的地形;2. 在北川-映秀断裂上盘附近地区,在构造和气候作用下侵蚀、搬运作用强烈,山体将被快速剥蚀削低,但在河谷两岸也会形成更加陡峭的地形。

关键词: 龙门山; 平通河流域; 地貌演化; 构造; 气候

中图分类号: P31

文献标识码: A

众所周知,地球表面的所有地貌都不是一成不变的,它们总是处于发展变化之中。地球表面的地貌是构造和气候共同作用的结果,作为地球表面主要地貌之一的山脉,它的演化是隆升-剥蚀。位于青藏高原东缘的龙门山,是青藏高原周缘山脉中陡度变化最大的山脉,说明该地区新构造活动相对强烈。2008 年在龙门山构造带发生的 8.0 级特大地震印证了这一特征。另外,夏季东亚副热带夏季风及西南季风形成的暖湿气流在此处形成强降雨,强烈的降水过程使得该地区河流搬运能力加强。因此,龙门山地区是全球气候和构造活动最为强烈的地区之一,正处于地貌演化最为迅速的时期,进而成为研究构造、气候如何影响山脉地貌演化过程这一科学问题的良好素材。

龙门山是位于青藏高原东缘边界的山脉,前接成都平原,后临青藏高原,它北起广元,南至天全,呈北东-南西向展布,长约 500 km,宽 30 ~ 50 km(图 1)。龙门山的最高峰九顶山海拔 4 984 m,而山前的成都盆地海拔高程仅为 450 ~ 710 m,地形陡度变化的宽度仅为 15 ~ 20 km,这样的地形陡度比青藏高原南缘的喜马拉雅山脉的地形陡度变化还要大,显示了该区域为青藏高原边缘山脉中陡度变化最大的地区^[1]。平通河流域位于龙门山北段,龙门山北段与中、南段最大的差异是,平均海拔不足 2 000 m(图 1)。

2008-05-12 T14:28,四川省汶川县映秀镇发生了 Ms8.0 级特大地震。地震导致龙门山构造带中的映秀-北川断裂和彭灌断裂发生地表破裂,形

收稿日期(Received date): 2011-12-11; 改回日期(Accepted): 2012-02-18。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41172162, 40972083, 49803013, 40372084, 40841010)。[National Natural Science Foundation of China (41172162, 40972083, 49803013, 40372084, 40841010).]

作者简介(Biography): 颜照坤(1983-),男,博士研究生,研究方向:构造地貌学、造山带与沉积盆地动力学。[Yan Zhaokun(1983-), male, Ph D student, research direction: structural geomorphology, orogenic belt and sedimentary basin dynamics.] E-mail: yzk517@163.com, Tel: 028-84074002

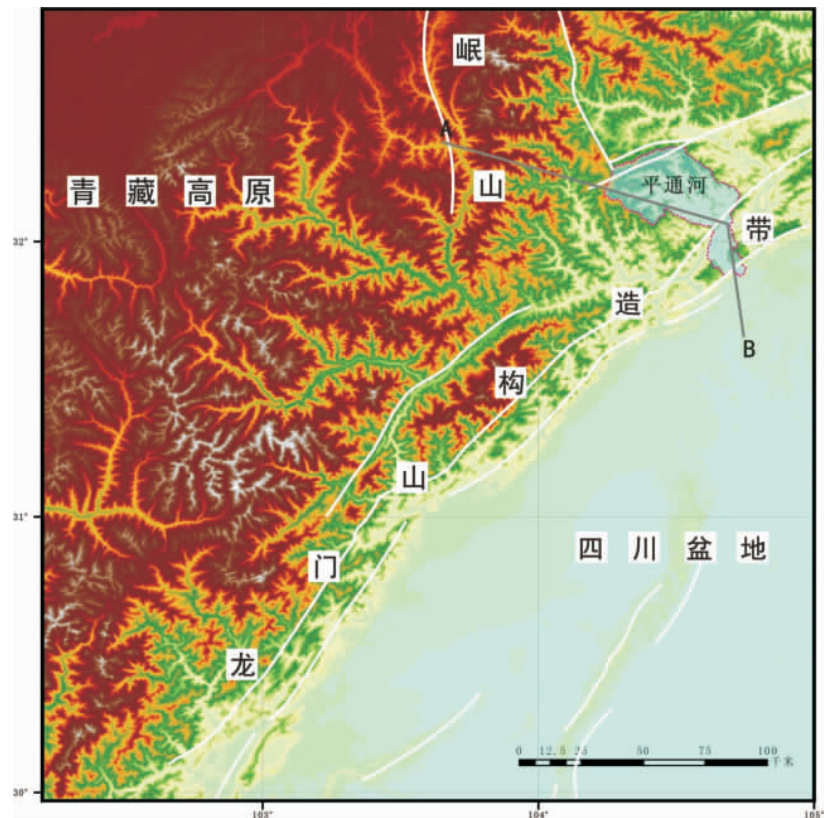


图 1 龙门山及其周边地区地形地貌图

Fig.1 Topographic and physiognomic maps of Longmen Shan and neighborhoods

成了长达 300 km 的地表破裂带,并造成龙门山地区基岩的同震隆升变形^[2-4]。同时,强震触发了大量的崩塌、滑坡,其数量之多、分布之广、类型之复杂、破坏之巨大,举世罕见^[5-8]。汶川地震导致龙门山地区约 46 560 处崩塌、滑坡和泥石流的发生,覆盖面积约达 687.1 km²^[9]。汶川地震导致的基岩隆升和山体破坏,必将对龙门山地区未来地貌演化产生重要影响。

1 地形特征对地貌演化的影响

平通河为涪江流域的一级支流,发源于岷山东麓平武县、松潘县与北川县三县交界处的六角顶,穿越龙门山构造带北段,在江油汇入涪江。平通河上游流域被夹持在平武-青川断裂和彭灌断裂之间(图 1),地形由北西南东逐渐降低,最高海拔超过 3 200 m,最低海拔仅为 600 m(图 2,图 3),落差达 2 688 m,河道平均比降 25‰。

本次研究将基于 DEM 数据对平通河流域地形特征和水系网络特征进行分析,作为研究该流域地貌演化的基本资料。

1.1 地形坡度

利用 ArcGIS10.0 软件,基于 DEM 数据(1:5 万 DEM 栅格大小为 25 m),经过多次选取栅格窗口计算窗口内地面坡度的平均值,获得平通河流域平均坡度区间为 0°~51.1°的坡度分布图,并将平均坡度范围分为四个等级,获得平均坡度为 0°~11.6°、11.7°~20.8°、20.9°~28.8°和 28.9°~51.1°四个坡度区间的分布范围图(图 4)。

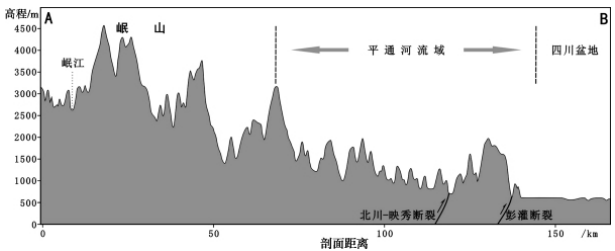


图 2 平通河流域纵剖面图

Fig.2 Longitudinal Profile of Pingtong river watershed

根据流域范围内地形坡度的分布范围,可以更直观的获得研究区宏观地貌特征(图 4)。在彭灌断裂的上盘,距彭灌断裂约 10 km 的范围内平均坡度较

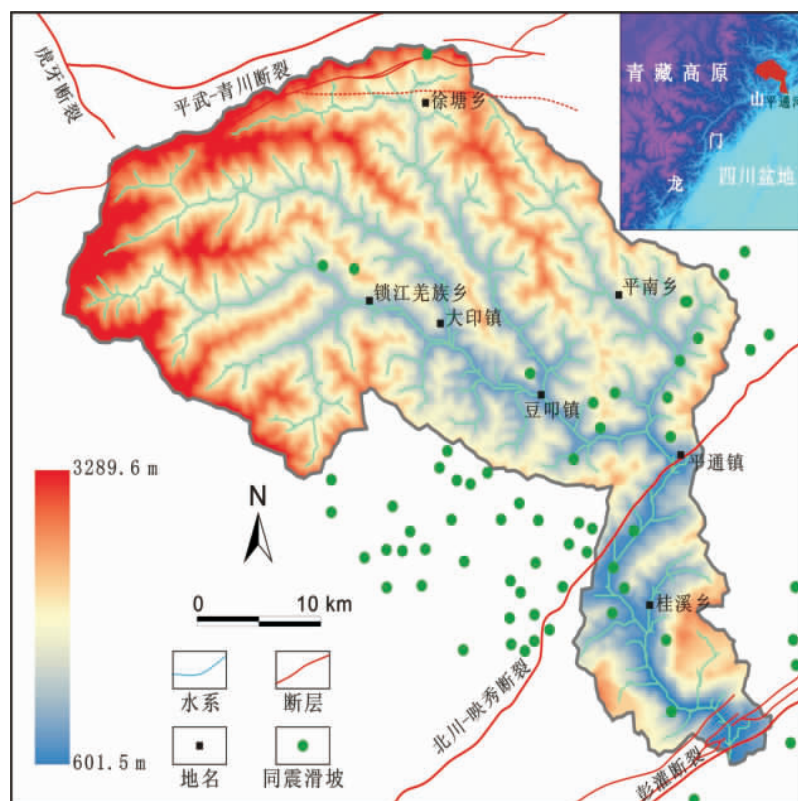


图3 平通河流域地形与水系图

Fig.3 Topographic and water system of Pingtong river watershed

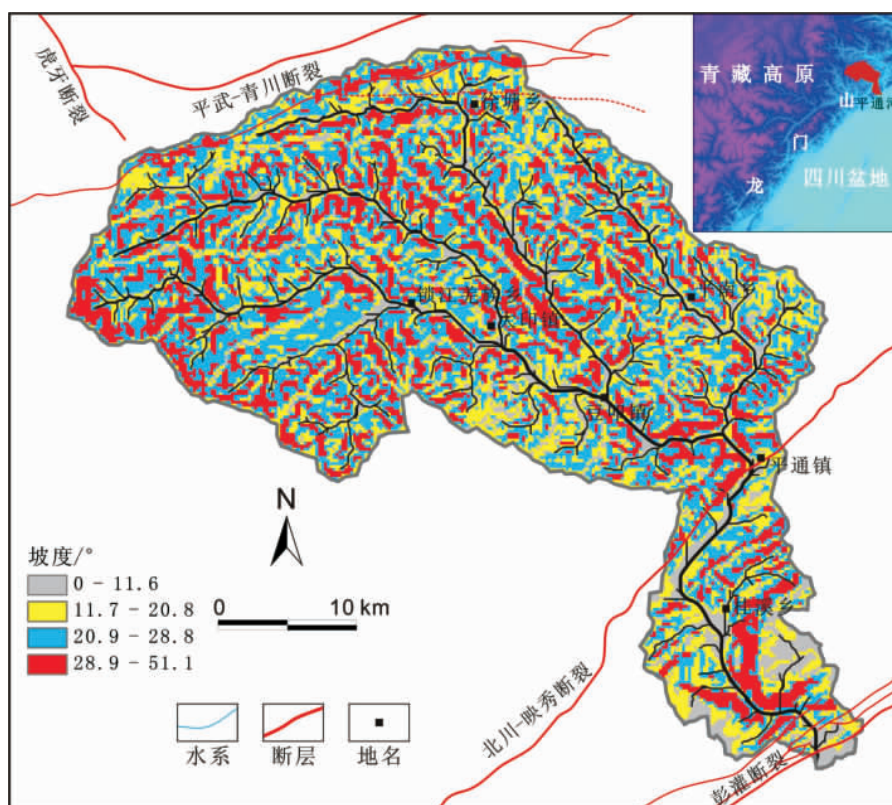


图4 平通河流域平均坡度分布图

Fig.4 Average slope distribution map of Pingtong river watershed

大,多介于 $28.9^{\circ} \sim 51.1^{\circ}$;在北段北川-映秀断裂上盘,距北川-映秀断裂约 7 km 的范围内平均坡度较大,多介于 $28.9^{\circ} \sim 51.1^{\circ}$ 。而在上游地区,坡度分布较为复杂,根据次级 4 个小流域范围整体上可以分为两部分,西部两个小流域坡度多集中在 $11.7^{\circ} \sim 20.8^{\circ}$ 和 $20.9^{\circ} \sim 28.8^{\circ}$ 两个区间,仅在源头地区坡度以 $28.9^{\circ} \sim 51.1^{\circ}$ 为主,东部的两个小流域坡度多集中在 $20.9^{\circ} \sim 28.8^{\circ}$ 和 $28.9^{\circ} \sim 51.1^{\circ}$ 两个区间(图 4)。

由于山脉坡度也与地层岩性密切相关,因此,本次对研究区的坡度图(图 4)和地质图(图 5)进行了对比分析。研究发现,在彭灌断裂与北川-映秀断裂之间同样以石炭系和泥盆系灰岩为主要岩性的地区,靠近彭灌断裂一侧的坡度明显较大(图 4、图 5)。对北川-映秀断裂西侧地区坡度和岩性的对比分析表明,高坡度地区的岩性以千枚岩为主,在距离北川-映秀断裂相对较远的志留系茂县群结晶灰

岩出露区则坡度较小。另外,由于研究区范围较小,应该具有相同的气候条件,因此,对构造、气候和岩性的综合分析表明,该地区地形坡度主要受构造活动的控制。

根据对研究区坡度分布和岩性的对比分析,断裂(北川-映秀断裂、彭灌断裂)上下盘附近的坡度差异极大,位于两条断层上盘的 7~10 km 范围内,为地形较陡的地区,说明这两条断裂的逆冲运动使上盘隆升,导致断裂上盘附近(7~10 km)正在经历相对较快的河流侵蚀下切作用。

1.2 水系网络

本次利用 ArcGIS10.0 软件,基于 DEM 数据对平通河流域范围内水系网络进行提取,采用阈值为 200,获得平通河流域水系分布图(图 3)。平通河上游主要发育 4 个较大的支流,为了方便研究 4 个支流的发育情况,本文对其进行编号,自西向东依次为支流 1、支流 2、支流 3 和支流 4。下面将分别对平通

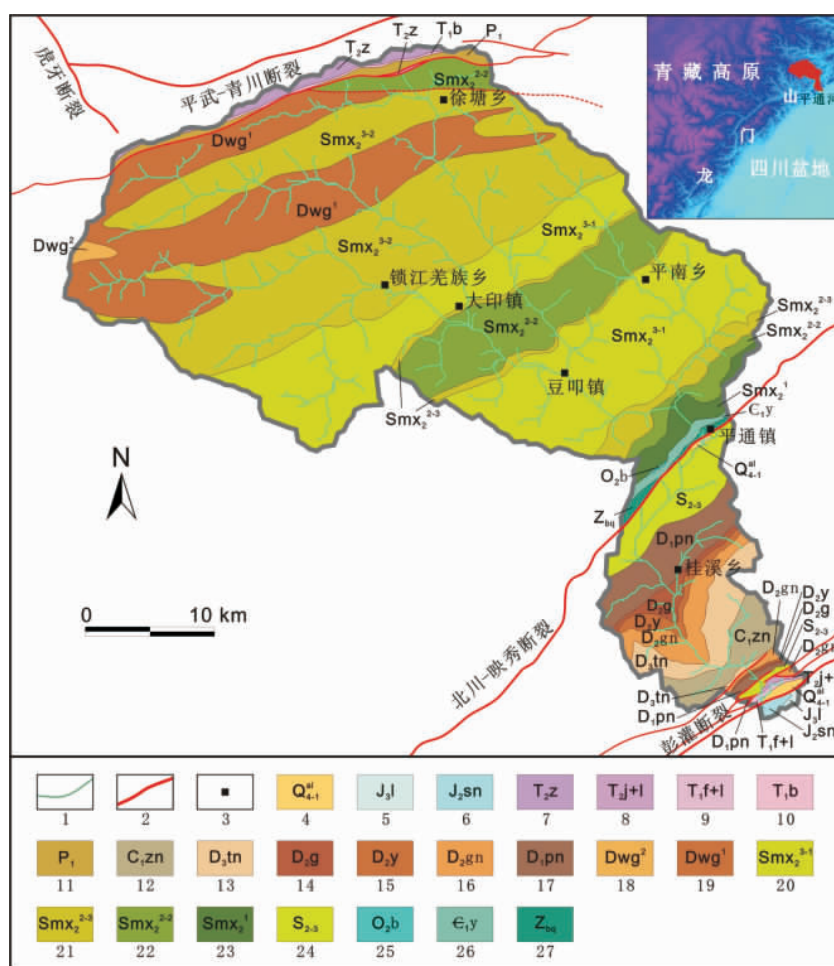


图 5 平通河流域地质构造简图

Fig. 5 The simplified geological and structural map of Pingtong river watershed

河河流纵剖面(图6)和横剖面(图7)特征进行分析。

1.2.1 河流纵剖面

河流纵剖面的形态受流域内河道基岩类型、地质构造、降雨量大小等多种因素的综合影响^[10],由于研究区范围较局限,各个支流的气候条件具有相似性,并且各支流流向均近垂直于地层走向,河道基岩岩性也比较相似(图5)。因此,在气候和基岩岩性相似的情况下,对河流纵剖面特征的分析有助于评估平通河流域地貌特征对构造抬升的响应,并判断流域内地貌演化趋势。

前人对地貌演化的大量研究^[11-12]表明:在造山运动不是很强烈、气候变化不剧烈的条件下,河流纵剖面的演化趋势为:线性→指数→对数→乘幂。由于平通河流域内各支流具有相似的气候和岩性特征,因此构造活动可以作为流域内河流纵剖面形态的唯一影响因素。对平通河上游流域4条支流纵剖面形态的研究表明,各支流纵剖面均表现为下凹形(图6),其中,支流1、2、3更接近于对数剖面,表明该3条支流流域内河流演化接近于均夷平衡剖面,说明此3条支流流域相对支流4流域构造活动较弱,山脉隆升较慢。支流4的下凹程度最低,接近于线性剖面,表明此支流最“年轻”,考虑到在岩性和气候条件相似的情况下,该支流流域更靠近活动断裂(北川-映秀断裂),很可能是由于该支流流域构造活动相对强烈导致山脉持续隆升,形成了这种接近线性的河流纵剖面(图6)。

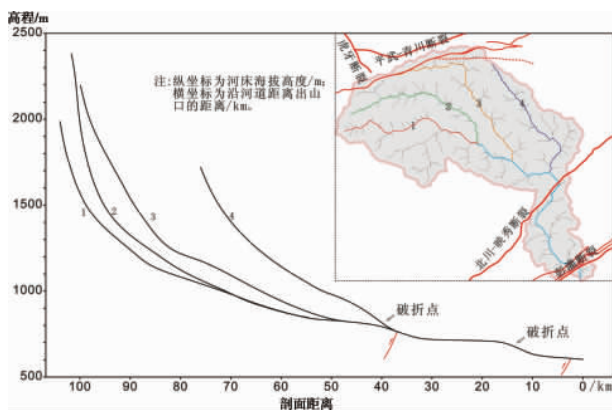


图6 平通河及其主要支流河流纵剖面

Fig. 6 Longitudinal profile of Pingtong river and its main tributaries

1.2.2 河流横剖面

对各支流河谷横剖面对比研究表明,支流1、支流2和支流3河谷较宽阔,说明此3条河流已经具

有对河谷进行侧向侵蚀的特征。由于一般情况下河流先进行纵向调整使得纵向剖面优先达到平衡状态,然后再进行侧向侵蚀^[13],进一步印证了支流1、2、3三条支流的侵蚀下切作用较弱,地质构造相对稳定,山脉隆升较慢,未来的地貌演化将不会很剧烈。在岩性和气候条件相似的情况下,与上述3条支流相比,支流4河谷深窄,表明支流4正经历着较为快速的侵蚀下切作用,表明该支流流域范围内正经历了相对较快的隆升作用(隆升速率大于河流侵蚀下切速率),地貌演化相对强烈。

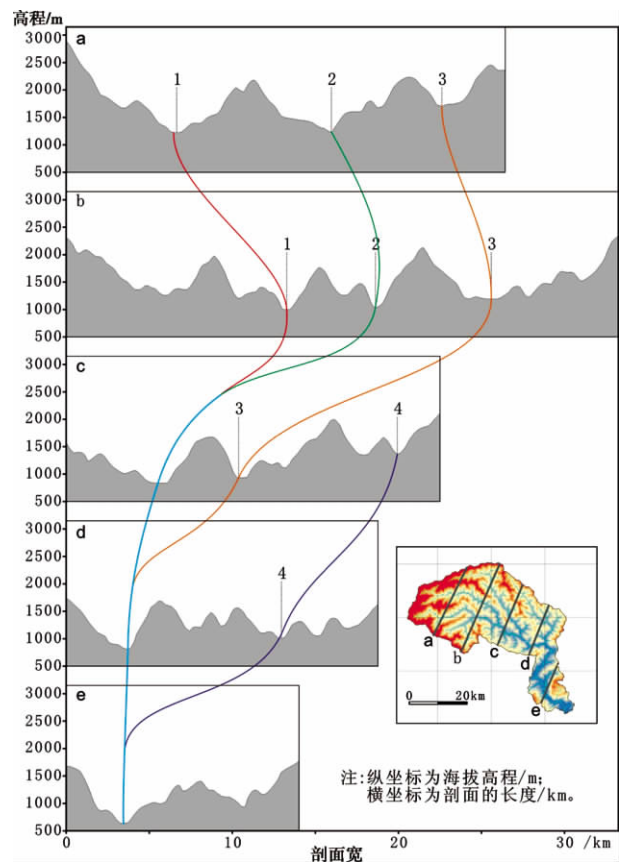


图7 平通河流域河流横剖面分析图

Fig. 7 Transverse section of Pingtong river watershed

2 构造活动对地貌演化的影响

2008年发生在龙门山地区的汶川特大地震,一方面造成龙门山基岩的隆升,另一方面也驱动了大量的崩塌、滑坡和泥石流等剥蚀作用。对龙门山同震变形区的研究表明,汶川地震驱动的同震崩塌、滑坡和泥石流等松散堆积物体积的估算值为 $5 \sim 15 \text{ km}^3$ ^[14],远大于同震岩石隆升增加的山脉体积 $2.6 \pm 1.2 \text{ km}^3$ ^[15],虽然汶川地震导致的巨量松散堆积

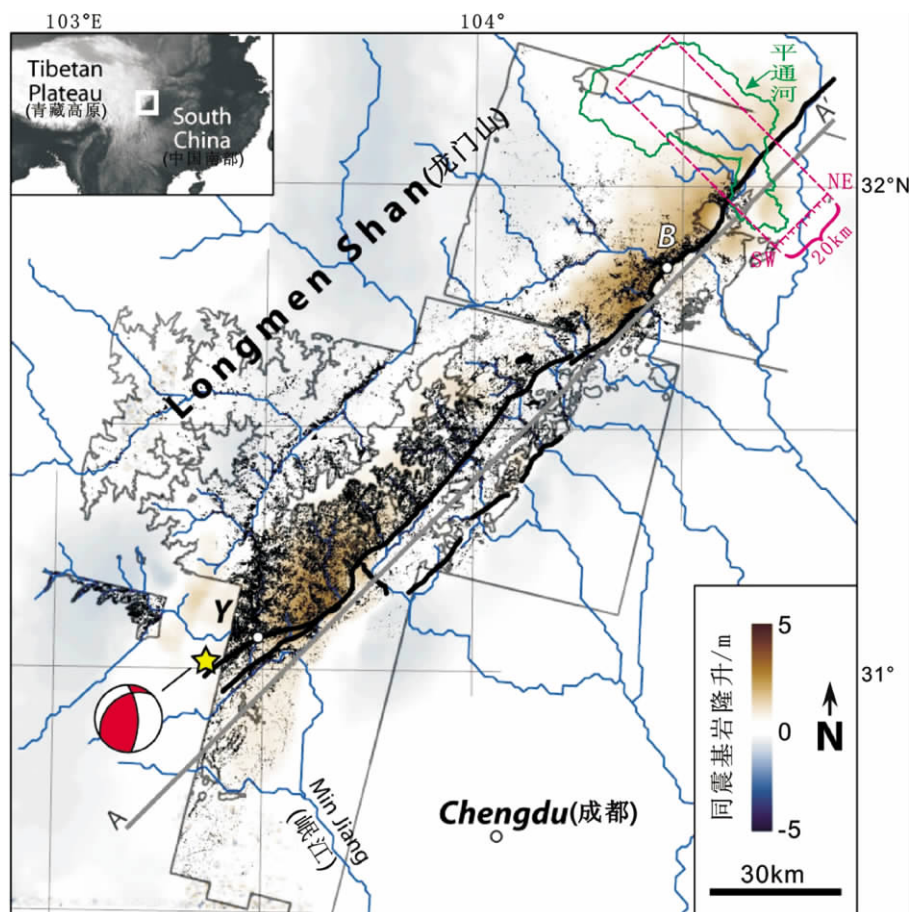
物大部分仍保留在龙门山地区,但是这些松散堆积物较容易被河流搬运至下游,因此,汶川地震实际上将导致了龙门山体积的“亏损”。在沿断层方向上,只有局部地区的同震岩石隆升增加的山脉体积大于汶川地震导致的松散堆积物体积,即山脉体积增加^[14]。而平通河流域的部分地区恰好发生山脉体积增加(图8)。因此,对比分析汶川地震导致的平通河流域基岩隆升和剥蚀作用,将是研究这一地区构造活动如何控制地貌演化最直接的题材。

本次根据汶川地震导致的地表同震形变数据和同震崩塌、滑坡和泥石流等松散堆积物体积数据等^[14],对平通河地区沿断层20 km范围内,垂直于断层方向的每2 km宽的条带区域内同震形变引起的岩石抬升体积数值和剥蚀量(同震崩塌、滑坡和泥石流等松散堆积物体积)等进行统计,并计算出

基岩隆升幅度、剥蚀厚度和实际隆升幅度(表1)。研究表明,由南西向北东可明显划分为两段:南西段基岩隆升幅度远大于剥蚀厚度,山脉发生隆升;北东段基岩隆升幅度基本均低于剥蚀厚度,山脉平均高程被削低,但部分山顶高程可能有所增加(图9)。

3 气候对地貌演化的影响

2008-09-24北川县暴雨导致区域性泥石流的发生,暴雨诱发的泥石流共有72处^[16]。实地考察表明,此次群发性泥石流几乎均是在09-24傍晚的强降雨过程中暴发。2010-08-12-14,四川省部分地区降大到暴雨,局部地区大暴雨,本次降雨主要分布在成都、绵阳、广元、德阳、阿坝等“5·12”汶川地震的重灾区,导致绵竹市清平乡、汶川县映秀镇



(黑多边形表示单个的同震滑坡;黑线表示汶川地震的地表破裂;五角星为震中;灰色:背景是基于SAR分析获得的同震垂直位移;黑灰色线表示与地表破裂基本平行的线;蓝色方框表示根据同震垂直位移将研究区在北东南西方向上被划分为三段;B为北川;Y为映秀)

(Black polygons show individual landslides. Heavy black lines show surface rupture traces and the star indicates the epicentre. Grey outlines show the extent of imagery used in landslide mapping. Background is the coseismic rock uplift field based on SAR analysis, modified from de Michele and colleagues. Heavy grey line shows the rupture-parallel section line onto which the results are projected. Beichuan (B); Yingxiu (Y).)

图8 汶川地震触发的滑坡分布与同震抬升(据文献[14]修改)

Fig. 8 Coseismic uplift and landslides triggered by the Wenchuan earthquake (Modification according to [14])

表 1 平通河流域汶川地震驱动的同震隆升和滑坡数据

Table 1 Date of coseismic uplift and landslides triggered by the Wenchuan earthquake in the Pingtong river watershed

统计类别	南 西					北 东					平均值
滑坡面积 / $\times 10^6 \text{ m}^2$	3.200	2.500	1.940	0.480	0.280	0.120	0.240	0.080	0.060	0.040	——
滑坡体积 / $\times 10^8 \text{ m}^3$	0.320	0.240	0.020	0.020	0.040	0.520	0.340	0.240	0.080	0.008	——
同震形变 / $\times 10^8 \text{ m}^3$	0.640	0.740	0.760	0.740	0.520	0.380	0.320	0.260	0.040	-0.140	——
净体积变化 / $\times 10^8 \text{ m}^3$	0.320	0.520	0.740	0.720	0.480	-0.140	-0.020	0.020	-0.040	-0.140	——
样本区面积 / $\times 10^6 \text{ m}^2$	141.600	143.000	140.400	124.600	104.400	93.400	96.200	91.200	70.800	38.200	——
基岩隆升幅度/m	0.452	0.517	0.541	0.594	0.498	0.407	0.333	0.285	0.056	-0.366	0.332
剥蚀厚度/m	0.226	0.168	0.014	0.016	0.038	0.557	0.353	0.263	0.113	0.021	0.177
实际隆升幅度/m	0.113	0.182	0.264	0.289	0.230	-0.075	-0.010	0.011	-0.028	-0.183	0.079

注: 此表数据来源于参考文献[11], 数据为图 8 中红色虚线框范围内, 由南西北东每 2 km 范围内的同震隆升、剥蚀数据。

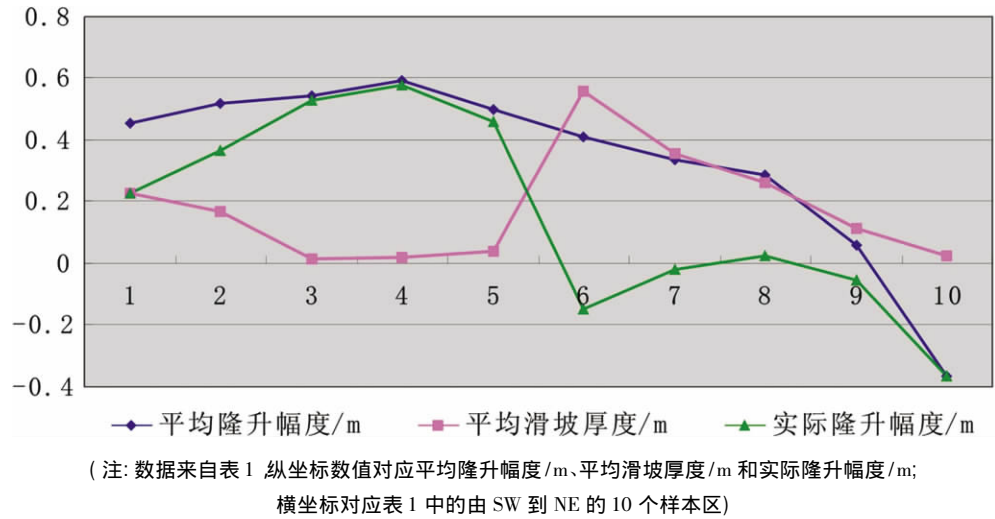


图 9 平通河地区汶川地震驱动的同震隆升和滑坡体积对比分析

Fig. 9 Comparative analysis of coseismic uplift and landslides triggered by the Wenchuan earthquake in the Pingtong river watershed

和都江堰市龙池镇遭受了极为严重的泥石流灾害。此次泥石流被称为“8.13”特大泥石流灾害, 相关研究表明, “8.13”泥石流具有沿发震断裂呈带状分布的特征, 物源主要来自于汶川地震触发的崩滑堆积物^[17]。因此, 汶川地震之后, 在强烈气候作用(强暴雨)下, 地震导致的松散堆积物的存在导致龙门山地区容易形成破坏性极大的群发性泥石流。相关研究表明: 地震灾区多起大型泥石流的临界雨强为 35~40 mm/h, 最低仅为 15 mm/h^[17]。

虽然强烈的构造活动(汶川地震)破坏了山体, 导致山脉中大量的松散堆积物, 但这些物质绝大部分(极少部分通过风的作用搬离或通过化学反应进入空气)将在水的作用下被搬运到下游地区, 即在降水作用下, 山脉中的物质主要通过河流系统被搬

走, 进而影响山脉地貌特征。因此, 气候(以降水为主)影响地貌演化的最直接的表现便是河流中输沙率的变化。

汶川地震导致了平通河流域大量的同震崩塌、滑坡和泥石流^[18], 造成了大量的松散堆积物, 绝大部分将通过河流系统输移到下游。根据平通河下游甘溪站 1964—2009 年输沙率数据统计数据(图 10), 输沙率较大的几个年份均对应研究流域降雨量的峰值, 如 1964 年、1992 年和 2005 年。而根据 2000—2009 年 10 a 年间平通河月平均输沙率和平通河主要流经区——平武县的月降水量(表 2)对比分析表明: 虽然降雨量与输沙率不具有很好的线性关系, 但是可以确定降雨量与输沙率具有正相关关系。

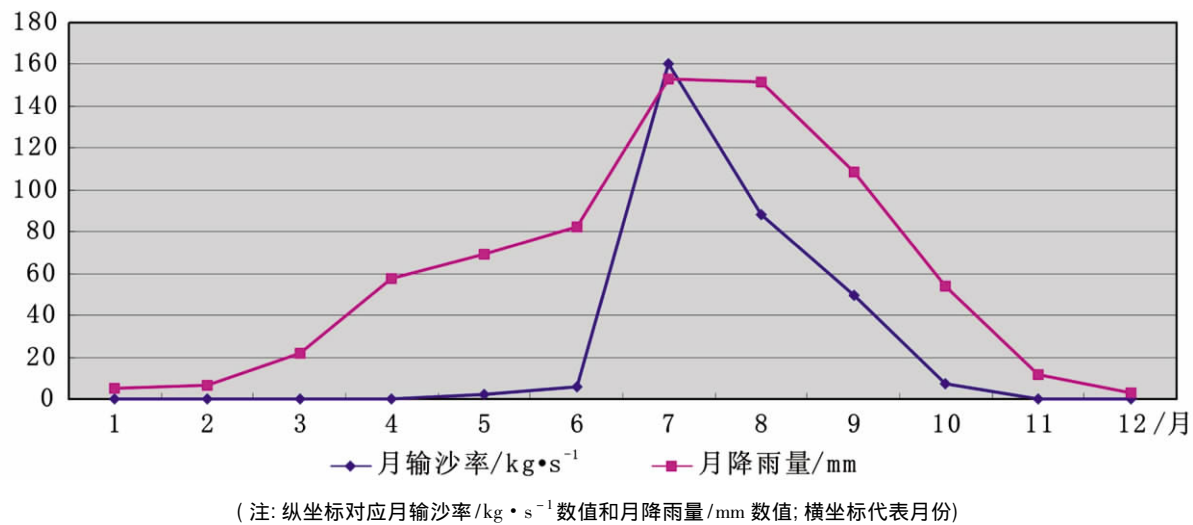


图 10 1—12 月平通河月平均输沙率与平武县的月降水量对比分析(2000—2009 年)

Fig. 10 Comparative analysis of the average sediment transport rate of Pingtong river and precipitation from January to December (from 2000 to 2009)

鉴于前人通过岷江紫坪铺水文站输沙量观测数据对岷江上游流域输沙量的计算,获得岷江上游地区剥蚀速率^[1,19],本次将对平通河流域输沙量、剥蚀速率进行估算,以获得该流域宏观地貌演化趋势。据平通河下游甘溪站 1964—2009 年输沙率数据,可以获得平通河年输沙量为 $1.103 \times 10^6 \text{ t}$,即 $0.735 \times 10^6 \text{ m}^3$ (盆地沉积物密度取 1.67 t/m^3)。根据平通河流域面积 $1\,381 \text{ km}^2$,可以计算出平通河流域剥蚀速率为 0.532 mm/a 。考虑到其他侵蚀作用(风力搬运作用、化学溶蚀作用),平通河流域实际剥蚀速率应该远 $>0.532 \text{ mm/a}$,假设平通河流域保持这一剥蚀速率,据上文对汶川地震导致的平通河流域平均隆升幅度为 0.332 m (表 1),那么汶川地震导致的山脉体积增加量约在未来不到 624 a 的时间内被剥蚀掉。这一时间尺度远小于前人对该地区研究获得的强震复发周期。因此,在不考虑非地震期间缓慢隆

升的情况下,由强烈构造活动(大地震)导致的平通河流域山脉物质增加量,会很快在该区气候背景下,被河流搬运至河流下游。

前人对龙门山在非地震期间的隆升速率已经进行了大量研究。葛培基^[20]依据测量资料获得龙门山断裂带的垂直运动速率 $<0.1 \text{ mm/a}$;刘树根等^[21]根据地表面形变资料获得龙门山逆冲推覆构造带的九顶山正以 $0.3 \sim 0.4 \text{ mm/a}$ 的速率隆升;而王庆良等^[22-23]根据 1970 年代至 1997 年的观测资料研究获得,在理县附近的隆升速率最大,可达到 3.5 mm/a 。可见前人对龙门山非地震期间的垂直隆升速率方面的认识尚有较大分歧,大致范围为 $0.1 \sim 3.5 \text{ mm/a}$ 。因此,目前尚无法确定平通河流域的隆升速率($0.1 \sim 3.5 \text{ mm/a}$)和剥蚀速率($>0.532 \text{ mm/a}$)之间的大小关系,也就无法获得宏观上该流域平均海拔是增大还是减小。

表 2 平武县 2000—2010 年逐月降水量

Table 2 Date of monthly precipitation from 2000 to 2009 in Pingwu county												/mm
时间	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
2000	8	6	16	88	35	124	106	115	62	57	9	1
2001	3	7	15	60	38	69	139	129	245	67	4	3
2002	7	2	15	61	81	51	70	91	50	52	24	2
2003	3	7	18	29	85	112	158	324	91	30	7	5
2004	4	1	15	68	41	78	192	136	83	51	26	2
2005	8	21	32	61	111	109	348	105	108	31	16	4
2006	3	7	16	44	72	45	101	136	100	46	12	2
2007	2	6	17	41	83	77	132	221	81	112	8	7
2008	8	5	49	25	57	116	75	148	184	40	7	2
2009	7	2	23	99	86	43	211	111	80	55	4	1

4 地貌演化分区

综合上文对影响地貌演化各种因素的分析,将平通河流域划分成3个区域(图11),分别讨论其地貌演化过程。

4.1 A区(快速隆升区)

A区位于北川-映秀断裂和彭灌断裂之间,具有地形坡度较大的特点,但由于处于主干发震断裂(北川-映秀断裂)的下盘,并未发生大规模的崩塌、滑坡。平通河河流纵剖面(图6)显示,河流在A区有一个较明显的破折点,对地质图的分析表明此破折点处于较坚硬的石炭系和泥盆系灰岩分布区,说明该区域的基岩隆升导致河流的强烈下切作用,而在河道基岩较坚硬地区形成破折点。此外,汶川大地震虽然未导致该区域较大的同震隆升幅度(图8),但也未导致该区域发生大规模的崩塌、滑坡(图3),据此可以判断该区在强地震的情况下不会引起强烈的剥蚀作用,所以地震导致的同震隆升和非地震期间的缓慢抬升,均可导致该区平均海拔增高。因此,从广泛分布的石炭系和泥盆系灰岩和构造活动特征可以推断该区处于较快的隆升状态,并以彭灌断裂和桂溪乡之间地区最为典型(图11)。

4.2 B区(快速削低区)

B区处于北川-映秀断裂上盘附近,汶川地震导致具有较大的隆升幅度,此外,河流纵剖面在北川-映秀断裂与河流交汇处有一个明显的破折点,说

明此地区正处于较强的隆升状态和河流下切状态,但在这种构造背景下,并未形成较高海拔的山脉(图2、图11)。因此,该区的基岩隆升将引起河流强烈的侵蚀下切作用,导致河谷两岸仍可以保持陡峭的地形,但剥蚀速率大于基岩隆升速率的状态将导致该区处于快速的剥蚀削低的状态。

4.3 C区(缓慢隆升区)

C区远离主干断裂(北川-映秀断裂),河流横剖面显示该区域河谷较宽阔(图7),表明该区域并未发生较强烈的基岩隆升。此外,该区域平均海拔虽然高于B区,但仍保存有泥盆系地层(B区无泥盆系地层),说明此区域剥蚀作用相对较弱。汶川特大地震导致了该区域基岩隆升,但并未在该区形成大量的松散物源,这也印证了剥蚀作用较弱的特点。因此,可以推断该区域地貌可能向缓慢隆升的方向发展。

5 结论

通过对龙门山北段平通河流域地貌特征、构造特征和气候特征的分析,可以初步获得以下几点认识:

1. 在现今平通河流域的构造和气候背景下,河流系统中沉积物的快速搬运,将导致该流域地貌整体上处于剥蚀削低的状态。
2. 在平通河流域位于北川-映秀断裂和彭灌断裂之间的地区,将发生较快的隆升,地貌向高、陡的

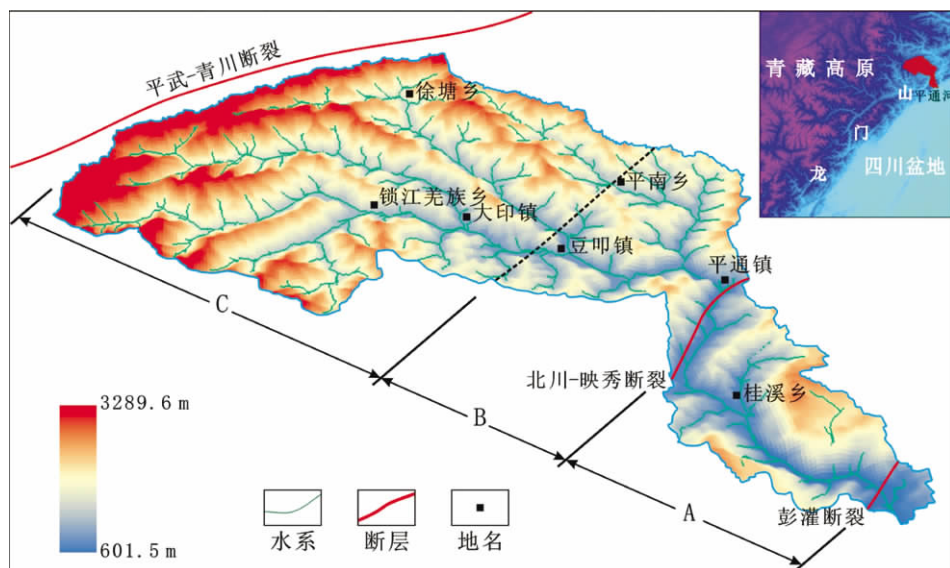


图11 平通河流域地貌演化分区

Fig. 11 Division of geomorphic evolution in the Pingtong river watershed

方向演化,并且在河谷两岸形成更加陡峭的地形。

3. 在平通河流域北川—映秀断裂上盘附近地区,在构造和气候作用下,将被快速剥蚀削低,但在河谷两岸会形成更加陡峭的地形。

4. 在平通河上游平南乡和豆叩镇以西地区,由于构造活动相对较弱,构造活动引起的地貌缓慢隆升可能不会被剥蚀作用完全抵消,因此平通河上游地区将发生缓慢隆升。

致谢:感谢四川省水文水资源勘测局为本文提供甘溪站1964—2009年输沙率数据,感谢审稿专家及编辑对本文提出了宝贵的修改意见!

参考文献(References)

- [1] Li Yong, Zhou Rongjun, Densmore A L, et al. Continental dynamics and geological responses of the eastern margin of Qinghai—Tibet Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 10—16, 106—116, 125—129 [李勇, 周荣军, Densmore A L, 等. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应 [M]. 北京: 地质出版社, 2006: 10—16, 106—116, 125—129]
- [2] Li Yong, Zhou Rongjun, Dong Shunli, et al. Surface rupture, thrusting and strike—slipping in the Wenchuan earthquake of Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2008, 35(4): 404—413 [李勇, 周荣军, 董顺利, 等. 汶川特大地震的地表破裂与逆冲—走滑作用 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 35(4): 404—413]
- [3] Li Yong, Zhou Rongjun, Alexander L Densmore, et al. Surface rupture and deformation of the Yingxiu—Beichuan fault by the Wenchuan earthquake [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(12): 1688—1705 [李勇, 周荣军, Alexander L DENSMORE, 等. 映秀—北川断裂的地表破裂与变形特征 [J]. 地质学报, 2008, 82(12): 1688—1705]
- [4] Li Yong, Huang Runqiu, Zhou Rongjun, et al. Geological background of Longmen Shan Seismic Belt and surface ruptures in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 3—16 [李勇, 黄润秋, 周荣军, 等. 龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂 [J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 3—16]
- [5] Huang Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239—1249 [黄润秋. 汶川8.0级地震触发崩塌灾害机制及其地质力学模式 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239—1249]
- [6] Huang Runqiu. Characteristics of geological disasters of 5·12 Wenchuan earthquake and recommendation on its impact on reconstruction [J]. Chinese Geological Education, 2008, (2): 21—24 [黄润秋. “5.12”汶川大地震地质灾害的基本特征及其对灾后重建影响的建议 [J]. 中国地质教育, 2008, (2): 21—24]
- [7] Huang Runqiu, Li Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2585—2592 [黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震震触地质灾害的发育分布规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585—2592]
- [8] Huang Runqiu, Li Weile. Analysis on the number and density of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, China [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(3): 1—7 [黄润秋, 李为乐. 汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析 [J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(3): 1—7]
- [9] Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Kin. Incidence number and affected area of Wenchuan earthquake induced landslides [J]. Science & Technology Review, 2009, 27(11): 79—81 [许冲, 戴福初, 姚鑫. 汶川地震诱发滑坡灾害的数量与面积 [J]. 科技导报, 2009, 27(11): 79—81]
- [10] Zhao Hongzhuang, Li Youli, Yang Jingchun, et al. The longitudinal profiles of the Ten Rivers in north Tianshan Mountains and their tectonic significance [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(5): 563—570 [赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等. 天山北麓河流纵剖面与基岩侵蚀模型特征分析 [J]. 地理学报, 2009, 64(5): 563—570]
- [11] Snow R S, Slingerland R L. Mathematical modeling of graded river profile [J]. Journal of Geology, 1987, 95: 15—33
- [12] Rădoane M, Dumitriu D. Geomorphologic evolution of longitudinal river profiles in the Carpathians [J]. Geomorphology, 2003, 50: 293—306
- [13] Ni Jinren, Ma Ainai. Streams dynamic geomorphology [M]. Beijing: Peking University Press, 1998: 84—198 [倪晋仁, 马蔼乃. 河流动力地貌学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1998: 84—198]
- [14] Robert N Parker, Alexander L Densmore, Nicholas J Rosser, et al. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth [J]. Nature Geoscience, 2011, 4: 449—452
- [15] de Michele M, Raucoules D, de Sigoyer J, et al. Three—dimensional surface displacement of the 2008 May 12 Sichuan earthquake (China) derived from Synthetic Aperture Radar: evidence for rupture on a blind thrust [J]. Geophys. J. Int., 2010, 183: 1097—1103
- [16] Tang Chuan, Liang Jingtao. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan earthquake triggered by rainstorm on September 24, 2008 [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 751—758 [唐川, 梁京涛. 汶川震区北川9.24暴雨泥石流特征研究 [J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 751—758]
- [17] Xu Qiang. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan Province: characteristics, genetic mechanism and suggestions [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 596—608 [许强. 四川省8.13特大泥石流灾害特点、成因与启示 [J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596—608]
- [18] Qin Xuwen, Zhang Zhi, Yang Junjie, et al. Analysis on the secondary geological disaster in Pingwu of 5.12 Wenchuan earthquake, Sichuan based on remote sensing information [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(2): 12—15 [秦绪文, 张志, 杨军杰, 等. 5.12汶川地震四川省平武县次生地质灾害遥感分析 [J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 12—15]

- [19] Li Yong, Li Bing, Zhou Rongjun et al. The quantitative correlation between denudation volume and sedimentary flux in the denudation - accumulation system: examples from Minjiang River drainage system [J]. *Journal of Geology*, 2007, 81 (3): 332 - 343 [李勇, 黎兵, 周荣军, 等. 剥蚀 - 沉积体系中剥蚀量与沉积通量的定量对比研究——以岷江流域为例 [J]. *地质学报*, 2007, 81 (3): 332 - 343]
- [20] Ge Peiji. The fault motions and the vertical deformations in Chengdu area and its vicinity [J]. *Earthquake Research in Sichuan*, 1991 (1): 6 - 12 [葛培基. 成都及其邻近地区的断层活动和垂直形变 [J]. *四川地震*, 1991 (1): 6 - 12]
- [21] Liu Shugen. The formation and evolution of Longmen Shan Thrust Zone and western Sichuan Foreland Basin, China [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1993 [刘树根. 龙门山冲断带与川西前陆盆地的形成演化 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993]
- [22] Wang Qingliang, Cui Duxin, Zhang Xi, et al. Studies on surface vertical deformation of the Longmenshan and the Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. *Recent Developments In World Seismology*, 2010, (6): 11 [王庆良, 崔笃信, 张希, 等. 龙门山及汶川 Ms8.0 级地震垂直形变研究 [J]. *国际地震动态*, 2010 (6): 11]
- [23] Wang Qingliang, Cui Duxin, Zhang Xi. Coseismic vertical deformation of the Ms 8.0 Wenchuan earthquake from repeated levelings and its constraint on listric fault geometry [J]. *Earth Sciences*, 2009, 22: 595 - 602

Geomorphic Evolution Process of Pingtong River Watershed in the North Longmenshan, China

YAN Zhaokun¹, LI Yong¹, HUANG Runqiu², LI Fensheng¹, YAN Liang¹, ZHAO Guohua¹,
ZHANG Zili¹, ZHANG Wei¹, Densmore A L³, Hilton R G³

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (CDUT), Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (CDUT), Chengdu 610059, China;

3. Inst. of Hazard and Risk Research and Dept. of Geography, Durham Univ., Durham DH1 3LE, UK)

Abstract: The Longmenshan is located in the eastern edge of Qinghai - Tibet Plateau, its gradient change is greatest in the mountains in periphery of Qinghai - Tibet Plateau, its climate and tectonics is one of the most intensive areas in the world, so the Longmenshan is a good stuff to study the scientific problems. In the Pingtong river watershed, Wenchuan earthquake lead to the stronger uplift and denudation, which is a important enlightenment to the geomorphic evolution of the area. Based on the structural feature, the lithologic feature, the analysis on the topographic slope, stream distribution and the growth degree of river in the Pingtong river watershed with DEM data, we could get the geomorphic evolution direction in the different area of Pingtong river watershed. The geomorphic two areas have the strongest change: 1. the area between Beichuan - Yingxiu fault and Pengguan fault in the Pingtong river watershed will rapid uplift, whose geomorphic will become higher and steeper, the valley will become steeper with downcutting of the Pingtong river; 2. at the condition of tectonics and climate, the denudation and transportation will get stronger in the other area, which near Beichuan - Yingxiu fault and at the up wall of fault. The mountains will be rapidly denudated and become lower, but the valley will also become steeper.

Key words: Longmenshan; Pingtong river watershed; geomorphic evolution; tectonics; climate