

重庆万州长江岸坡陡崖后退速率的估计

韩志勇, 李徐生, 任雪梅, 胥勤勉, 陈可锋, 杨达源
(南京大学城市与资源学系, 江苏 南京 210093)

摘 要: 重庆万州的长江岸坡发育剥蚀基岩平台与陡崖, 我们采用三角坡面法估计了陡崖的后退速率。采用该方法的依据是, 铺垭口的陡崖下存在形成时代不同的坡面, 同时该地点的地层近水平, 所以我们假定陡崖的后退过程类似干旱-半干旱环境中的平顶岩屑堆地貌的形成过程。通过对前一阶段残留坡面的函数拟合, 可以估计陡崖的后退距离。如将残留坡面上 T3 阶地的年龄近似为崩坡积的形成年龄, 则计算出的陡崖后退速率大约是 0.51 m/ka 。这个数据表明, 该地区最高的 450 m 的剥蚀基岩平台大约在 2.3 Ma 前左右被长江切穿, 推测 2.3 Ma 可能是三峡贯通年龄的上限。

关键词: 万州; 陡崖后退; 阶地; 三角坡面法; 平顶岩屑堆

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

陡崖后退 (Scarp retreat) 速率问题的研究一直受到关注, 因为这关系到定量地恢复地貌的演化过程, 并且是查明地貌演化驱动机制的关键。这项研究的主要困难之处在于, 既难以估算准确的陡崖后退的距离, 也难以获得精确的年代数据^[1]。

测定陡崖后退速率可以采用不同的方法, 大致可以分为岩屑堆体积法 (talus volume)^[2]、三角坡面法 (triangular slope facet)^[3]、水系网法 (drainage network)^[4]。此外, 还有一些应用于特殊条件下的方法。岩屑堆体积法的研究对象主要是高山区、寒区的陡崖^[5-6]。这些环境中, 陡崖通常与岩屑堆相伴。由于可以通过岩屑堆的体积来推测陡崖被剥蚀的量, 如果还能够测定岩屑堆的堆积年龄, 就可以估算陡崖的后退速率了。三角坡面法主要用于研究干旱、半干旱区的陡崖^[1, 7], 该方法不通过岩屑堆的体积就可以推算陡崖的后退距离, 但只能用于一类独特的坡地, 即地层是水平的。如果坡地上残留有不同坡面阶段的岩屑堆, 就可以通过三角坡面分析, 恢复出陡崖的后退距离, 进而算出陡崖的后退速率。

国内研究陡崖后退的报道很少, 而且局限于利

用区域性构造抬升的速率来研究丹霞地貌区的陡崖演化^[8]。长江川江段岸坡的陡崖比较发育, 恢复陡崖的形成过程, 既有益于了解岸坡的演化, 也有益于对三峡贯通、川江倒流等重大问题的解答^[9-10]。但这一地区有其特殊性, 使得相关的研究非常不利。一方面, 坡地的人为扰动程度很大, 改变了原始的坡地物质组成与分布; 另一方面, 这个地区水热条件良好, 除了物理风化外, 化学风化也很活跃, 相当多的物质风化成细颗粒被径流带走。所以利用岩屑堆来估计陡崖的后退速率困难很大。

利用三角坡面法来研究陡崖的后退, 困难似乎要小一点。因为三角坡面法不考虑岩屑堆的体积, 这样可以避免引入一系列的假设和校正, 排除了各种可能出现的误差, 问题是能否找到平顶岩屑堆组合的岸坡。我们在对三峡库区做第四纪堆积物调查时, 发现重庆万州的长江沿岸地层近水平。尽管地貌与干旱、半干旱地区典型的平顶岩屑堆组合有所不同, 但局部地段的地貌还是类似平顶岩屑堆组合。所以我们尝试利用三角坡面法来估计这个地区陡崖的后退速率。

收稿日期 (Received date): 2005-11-20 改回日期 (Accepted): 2006-01-03

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (编号 40272126)。[National Natural Science Foundation of China (No. 40272126).]

作者简介 (Biography): 韩志勇 (1968-), 男, 江苏人, 副教授, 博士, 主要从事地表过程与年代学研究。[Han Zhiyong (1968-), male, born in Jiangsu, Ph.D., Associate Professor. Research interest on Surface Process and Geochronology. E-mail: zhyhan@nju.edu.cn]

1 研究区

万州位于长江三峡库区腹地(图 1 中黑点指示本文研究的陡崖所在的地点),是重庆市滑坡等山地地质灾害发生最为频繁的区县之一,地质上属于川东褶皱束东部的一部分,出露的地层为侏罗系遂宁组与沙溪庙组。总体来看,沙溪庙组可概括为厚层砂岩与泥岩、粘土岩互层,上覆的遂宁组主要为钙质泥岩、粉砂质钙质泥岩、粉砂岩。地层倾角很小,一般都在 10°以下。上覆的遂宁组由于岩性偏软,很难形成陡崖,而下伏的沙溪庙组由于具有软硬岩层互层的特点,差异侵蚀产生了很多陡崖。

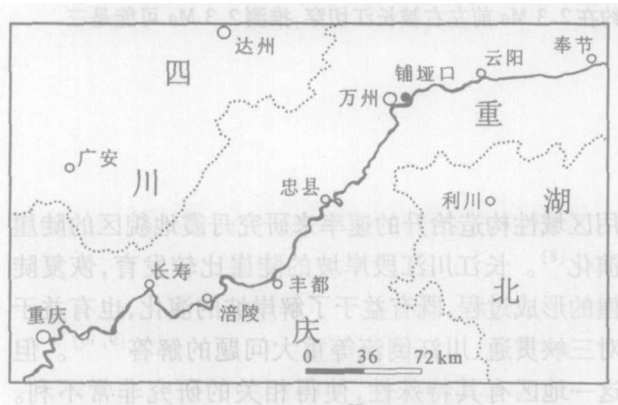
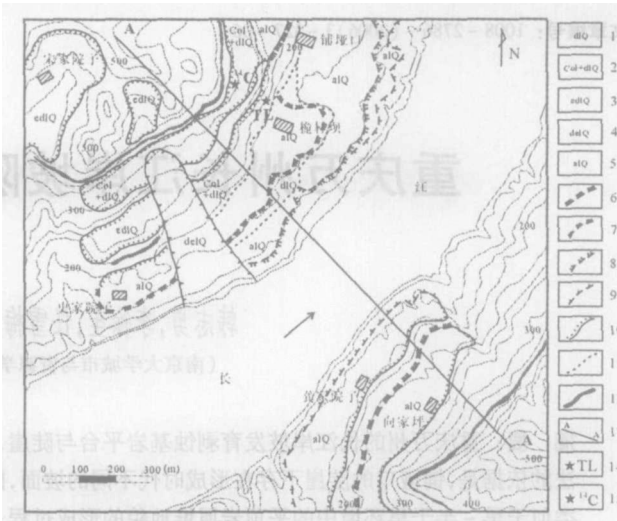


图 1 研究区地理位置图
Fig 1 Location of study area

万州地区的长江岸坡,有三级剥蚀基岩平台。三级剥蚀基岩平台在两岸的高度大致相同,海拔高度分别为 450 m、275 m、235 m^[11]。部分剥蚀基岩平台之下出现陡崖。铺垭口位于万州以东约 8 km,这里主要出现 450 m 的剥蚀基岩平台,平台面略有起伏(图 2),平台之下发育一个高约 40 m 的陡崖。北岸 275 m 的剥蚀基岩平台可能对应于地形较缓的崩坡积的位置,即靠近陡崖下的崩坡积区域。235 m 的剥蚀基岩平台可能对应于更低的残坡积或崩坡积的缓坡,离陡崖较远,向下与第三级阶地相接(见图 2)。第三级阶地的前缘高程大约是 175 m,第二级阶地的前缘高程大约是 150 m,两者之间是坡积。在 235 m 的剥蚀基岩平台的边缘,局部还可见小规模的陡崖,即史家院子村的北边。南岸也存在 450 m 的剥蚀基岩平台。在与北岸相似的高度,即 400 m 以下,出现一个高约 35 m 的陡崖,但与北岸不同的是,该陡崖下未出现崩坡积,这可能与这里的坡度较大,崩坡积不易堆积有关。这里第四级阶地的前



1 坡积, 2 崩坡积, 3 残坡积, 4 滑坡体, 5 冲积, 6 第四级阶地, 7 第三级阶地, 8 第二级阶地, 9 第一级阶地, 10 堆积体边界, 11 堆积体界线, 12 陡崖, 13 剖面位置, 14 热释光样品位置, 15 ¹⁴C 样品位置

图 2 万州铺垭口地区的长江岸坡地貌简图
Fig 2 Geomorphological map of bank slope of Changjiang River in Puyakou, Wanzhou

缘高程大约是 220 m, 阶地位置可能相当于 235 m 的剥蚀基岩平台。

坡地上堆积物发育特点: 崩积与坡积不易区分, 一般只能笼统地称为崩坡积; 多数缓坡上以坡积物为主, 向陡崖方向渐变为崩坡积, 且厚度一般也增加; 冲积不典型, 未见河床相的砾石堆积, 也没有发现河漫滩相较纯净、厚层的砂、粉砂堆积, 例如, 在第三级阶地上, 发现的是含砾粉砂质粘土; 推测未发现典型冲积物的一个原因可能是原始的冲积物非常少, 加上后期被人为扰动及自然侵蚀, 已经面目全非; 坡地上堆积物的厚度总体上较小, 一般 1~3 m。

2 样品的采集与测量

测定不同坡面阶段的堆积年龄对估算陡崖后退速率是必不可少的。严格来讲, 热释光法不适合测定崩坡积的年龄, 因为这些堆积物在形成时曝光条件差。但如果是细的坡积物, 矿物颗粒在地表被搬运时, 有较大的机会曝光。从而在一定程度上符合热释光法测年的要求。混在堆积体中的某些岩块, 风化后可产生未曝光的矿物颗粒^[12], 这个现象在三峡地区常出现。所以我们在采集热释光样品时, 特别留意是否有岩块风化的迹象, 只有无任何迹象时才采样。

热释光样品采自北岸离陡崖较远的崩坡积中(见图 2)。在距陡崖约 120 m 的位置, 地表有一巨大的岩块, 厚约 0.5 m, 长、宽各约 1.5 m, 似乎未受人为干扰。岩块所压的是黄褐色的夹碎石的沙土, 在岩块下面 30 cm 的位置, 采了一件热释光样品。¹⁴C 样品采自北岸靠近陡崖的崩坡积中, 距陡崖约 5 m。这里的堆积物是灰黑色的夹碎石的沙土, 样品采自地表 30 cm 以下, 尽量避免出现植物的根系。

热释光的测量由中国地震局地壳应力研究所完成, 测量对象是样品中的粗颗粒矿物集合体, 使用附加剂量法测量等效剂量, 年剂量根据核工业北京地质研究院测量样品的放射性元素而确定。正常情况下, 由于样品曝光条件不好, 且测量对象又是粗颗粒矿物集合体, 按上述技术测量的热释光年龄一般会出现较大误差, 所以我们将这个年龄视为样品的参考年龄。¹⁴C 样品由中国科学院南京地理与湖泊研究所采用液体闪烁计数法分析。

3 三角坡面法

如果坡地由三部分构成, 即陡崖、岩屑堆和麓原 (pediment), 就构成了平顶岩屑堆组合 (talus flat-ion)^[13]。平顶岩屑堆出现于地层近水平的地区, 剖面形态呈三角形或梯形(图 3)。当早期的坡面遭受侵蚀后, 陡崖后退, 形成残留岩屑堆的顶 (apex)。所以顶所对应的是一个早期的坡面阶段 (S_{n+1})。平顶岩屑堆坡的形成涉及交替的堆积与深切过程, 堆积过程中出现岩块的崩落。

三角坡面法可以用于估计平顶岩屑堆地貌的陡崖后退速率^[14]。该方法是基于测定不同麓原的堆积年龄及确定被侵蚀陡崖的相对位置。通过残留岩

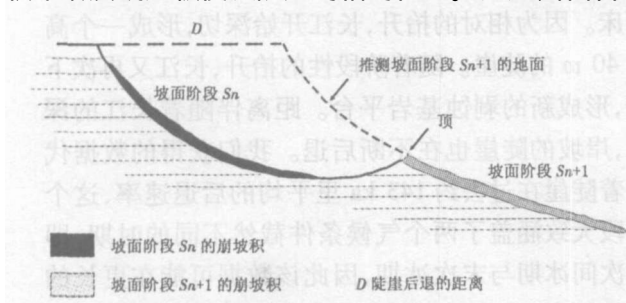


图 3 平顶岩屑堆陡崖后退过程的示意图

(据 Gutierrez et al. 1998 修改)

Fig 3 Sketch map showing the process of scarp retreat for a slope forming talus flat-ion (modified after Gutierrez et al. 1998)

屑堆的顶的平移绘图可以估算陡崖的后退速率^[15]。另一个改进的方法是, 以数学统计函数外推确定过去的崖面位置, 在考古年代或¹⁴C 测年的基础上, 得到陡崖的后退速率^[1, 16]。

严格的岸坡结构面测量需要采用标准的水准测量技术^[1]。被侵蚀的崖面通过回归分析的对数方程拟合而确定。依据该方程的曲线与目前陡崖延长线的交点就可以估计陡崖的后退距离 (D)。这样, 如果知道不同坡面阶段的形成时间 (T_n, T_{n+1}), 陡崖的后退速率 (R) 就可以按下述的公式计算

$$R = D / (T_{n+1} - T_n)$$

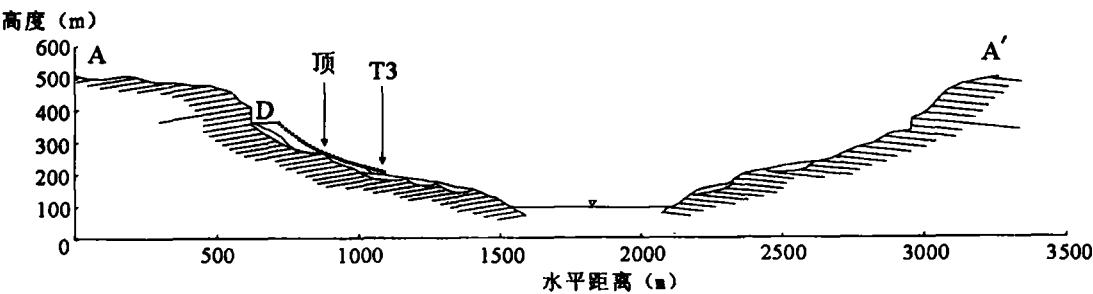
实际研究中, 一般坡面阶段 S_n 就是指现在, 所以, 上述公式可以简化为

$$R = D / T_{n+1}$$

4 万州陡崖的后退速率

典型的平顶岩屑堆地貌出现在干旱或半干旱的地区, 而万州的平台陡崖岸坡出现在湿润的地区, 主要由河流底蚀作用产生。尽管两者的形成环境不同, 万州的平台陡崖岸坡却与典型的平顶岩屑堆地貌类似, 只是坡地的结构有所差别, 具体表现为岩屑堆被崩坡积所取代, 而麓原被阶地取代(图 4)。关键的问题是陡崖之下是否存在不同的坡面阶段, 这需要根据以下两个因素来判断。首先, 陡崖以下的坡面是否出现了残留坡面的顶。如果是平滑的坡面, 那么, 就难以确定是否存在顶。其次, 顶存在的另一个要求是其两侧的堆积物应该形成于截然不同的两个阶段, 也就是堆积物的年龄明显不同。

铺垭口地区长江两岸的情况略有不同。首先我们分析北岸的坡地。坡地上共有两条呈带状分布的崩坡积(见图 2), 靠近陡崖的崩坡积带分布于较缓的坡地之上, 它与远离陡崖的崩坡积带被基岩相隔, 而且远离陡崖的崩坡积带与基岩过渡处的坡度较大(图 4)。远离陡崖的崩坡积带与第三级阶地相接。采自靠近陡崖的崩坡积带中的两个¹⁴C 样品的年龄分别是 1271 ± 117 a BP, 753 ± 135 a BP, 而采自远离陡崖的崩坡积带中的热释光样品的年龄是 3610 ± 306 ka。由此可见, 两个崩坡积带的形成时代截然不同, 所以我们认为这两个崩坡积带代表着两个坡面阶段。而之间坡度变化最大的位置就是顶(图 4)。南岸的情况有所不同, 主要反映在陡崖之下缺



图中虚线是顶以下地形按对数曲线拟合的, D是陡崖后退的距离

图 4 长江万州铺垭口段陡崖后退的三角坡面分析结果

Fig 4 Scarp retreat at Puyakou ofW anzhou detem ined by analyzing triangular slope facets

少崩坡积,所以无法通过不同时代的崩坡积来区分不同的坡面阶段。

根据以上对坡面阶段的分析,我们认为可以将三角坡面法应用到万州的陡崖后退研究中。这里我们以在剖面上的坡面作为回归分析的对象,在顶的

位置以下取 4 个点,使用对数曲线拟合^[11],通过曲线与陡崖延长线的交点就可以确定陡崖后退的距离。拟合结果显示,北岸的陡崖后退距离是 73 m (表 1)。

表 1 万州铺垭口按对数函数拟合得到的陡崖后退距离

Table 1 Distance of scarp retreat calculated by using logarithmic function fitting at Puyakou ofW anzhou

位置	坡面阶段	函数	R ²	p 值	陡崖后退距离 (m)
北岸	第三级阶地以上	$y = -376.7 \ln(x) + 2824.5$	0.955	0.022 4	73

我们在北岸的第二崩坡积带中获得一个热释光的年龄,但正如前面所讲的,因为热释光方法不适合崩坡积测年,所以年龄数据可能存在很大的误差。为了获得这一坡面阶段准确的年龄,就需要采用其他途径。这里我们提出一个间接的方法,即按第三级阶地的堆积年龄来计算。最近光释光测年显示,第三级阶地的年龄大约为 143 ka^[17]。以铺垭口陡崖后退平均距离 73 m 计,陡崖后退速率是 0.51 m/ka 这个数值是陡崖在过去 143 ka 里的平均后退速率。

5 讨论

造成陡崖后退的驱动力是风化剥蚀。影响一个具体地点陡崖后退速率的因素很多,内在的因素包括岩性、构造和陡崖的厚度等,外在的因素主要是气候、水准面的下降和人类活动等^[1]。此外,碎屑物的产生与崩坡积的侵蚀之间的平衡也会影响到陡崖后退速率。所以,今后可能在附近地区得到差别比较大的陡崖后退速率数据,但只要这个数据与其他地貌过程的数据相吻合,就可以认为是合理的。

按三角坡面法计算长江岸坡陡崖的后退速率还是初步的尝试,获得的数据受多种因素的影响,可能存在误差。例如,坡地受到人类改造,形态已发生了变化,这会导致通过曲线拟合得到的陡崖后退距离不够准确;另外,一个坡面阶段的形态不一定符合理想的函数;残留坡面的顶的位置不明显,以顶以下阶地的年龄作为残留坡面的堆积年龄也是近似的。

可以设想,万州铺垭口的长江两岸的 450 m 的剥蚀基岩平台最初是相连的,这可能是当时长江的河床。因为相对的抬升,长江开始深切,形成一个高约 40 m 的陡崖。随着阶段性的抬升,长江又再次下切,形成新的剥蚀基岩平台。距离伴随着长江的深切,岸坡的陡崖也在不断后退。我们获得的数据代表着陡崖在过去约 143 ka 里平均的后退速率,这个阶段大致涵盖了两个气候条件截然不同的时期,即末次间冰期与末次冰期,因此该数据可能在更长的时间尺度上仍适用,即它可能指示了陡崖形成后的平均后退速率。目前两岸陡崖的距离大约是 2 340 m,按照目前的平均后退速率 (0.51 m/ka) 计,那么,长江切穿陡崖所在的地层,这一事件发生的时间是 $(2\,340 \div 2 \div 0.51 = 2\,294\text{ ka})$ 即约在 2.3 M a 以前。

在万州地区普遍发育的三级剥蚀基岩平台中, 450 m 的剥蚀基岩平台是最高的。目前暂不讨论导致其形成的是古长江抑或现代长江, 但该平台被切穿, 就可以视为是现代长江作用的结果。这样, 如果根据陡崖后退速率所估计的该平台被切穿的年龄是基本正确的, 则在该地区现代长江出现于 2 3 Ma 以前。三峡贯通是现代长江出现的标志, 所以也就可以这样讲, 三峡贯通也应该在这个时间前后。前人的研究显示, 三峡贯通的时代大约是 1 ~ 2 Ma^[10 18 19]。这样看来, 我们推测的时代稍微偏早。这可能是由于随着河床下切深度加大, 陡崖的后退速率逐步下降。如果推测成立, 则目前测量到的是最近的陡崖后退速率, 这个值应该小于早期的后退

速率。所以, 450 m 的剥蚀基岩平台被切穿后的平均陡崖后退速率要 > 0 51 m /ka。由此看来, 2 3 Ma 应该视为三峡贯通的时代的上限。

由于没有其他可靠的数据, 尚不能评价我们估算的陡崖后退速率在多大程度反映实际的情况。但可以与其他地区采用不同方法得到的陡崖后退数据作对比(表 2)。国外的研究得到介于 0 32 m /ka 到 10 5 m /ka 的后退速率, 我们的数据在这个范围内。一项研究得到我国南方的陡崖后退速率是 0 061~ 0 114 m /ka^[8], 这个数据比我们的低很多, 究其原因, 可能是我们的地点位于长江的岸坡, 这里的江水侵蚀作用要强很多。

表 2 世界各地据不同方法获得的陡崖后退速率
Table 2 Rates of scarp retreat obtained by using different methods in the world

地点	岩性	后退速率 (m /ka)			方法
		最小	平均	最大	
central Spain	灰岩		10 5		三角坡面法 ^[7]
NE Spain	灰岩		0 95		三角坡面法 ^[1]
West Greenland	玄武岩	0 03	1 04	4 17	岩屑堆体积法 ^[20]
Norway	石英岩	0 10	0 70	1 58	岩屑堆体积法 ^[5]
Bavarian Alps	灰岩	0 16	0 46	0 73	岩屑堆体积法 ^[6]
Scotland	玄武岩	0 25	0 32	0 45	岩屑堆体积法 ^[2]
Wales	砂岩	0 42	0 58	0 90	岩屑堆体积法 ^[21]

6 结论

重庆万州的长江岸坡有三级剥蚀基岩平台, 其中最高的 450 m 的平台之下发育了陡崖。铺垭口地区的陡崖之下有两条崩坡积带, 其形成时代不同, 两者之间坡度出现较大转折, 这被认为代表着两个不同的坡面演化阶段。这种地貌形成过程与干旱、半干旱地区的平顶岩屑堆的发育过程相似, 所以我们尝试采用三角坡面法来研究陡崖的后退速率。

结果显示, 铺垭口陡崖后退速率大约是 0 51 m /ka。这个数据表明 450 m 的剥蚀基岩平台可能在 2 3 Ma 以前被切穿, 这个时间应该被视为三峡贯通年代的上限。三角坡面法或许适用于研究非干旱地区陡崖后退的问题, 不过需要能识别出不同的坡面形成阶段, 而其中残留坡面的顶的确立至关重要。

[1] Gutierrez M, Sancho C, Arauzo T. Scarp retreat rates in semiarid environments from talus flatirons (Ebro Basin, NE Spain) [J]. *Geomorphology*, 1998, 25: 111 ~ 121

[2] Hinchliffe S, Balkanyne C K. Talus accumulation and rockwall retreat Trotternish Isle of Skye Scotland [J]. *Scottish Geographical Journal*, 1999, 115: 53 ~ 70

[3] Sancho C, Gutierrez M, Pea J L, et al. A quantitative approach to scarp retreat starting from triangular slope facets central Ebro Basin, Spain [J]. *Catena Suppl* , 1988, 13: 139 ~ 146

[4] Young R A. Geomorphic evolution of the Colorado Plateau margin in West-Central Arizona: a tectonic model to distinguish between the causes of rapid symmetrical scarp retreat and scarp dissection [A]. In: Morisawa M, Hack J T. Eds. *Tectonic Geomorphology* [C]. Boston: Allen and Unwin, 1985: 261 ~ 278

[5] Andr  M F. Holocene rockwall retreat in Svalbard: a tripartite evolution [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22: 423 ~ 440

[6] Sass O, Wolhly K. Investigations regarding alpine talus slopes using ground-penetrating radar (GPR) in the Bavarian Alps, Germany [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26: 1071 ~ 1086

[7] Gutierrez M E, Sesv  H M. Multiple talus flatirons: variations of scarp retreat rates and the evolution of slopes in Arazn  Basin (semiarid central Spain) [J]. *Geomorphology*, 2001, 38: 19 ~ 29

[8] Huang J in. Quantitative survey of several important issues concerning the formation of the Danxia landforms [J]. *Tropical Geography*,

参考文献 (References)

- 2004 24(2): 127~ 130[黄进. 丹霞地貌发育几个重要问题的定量测算[J]. 热带地理, 2004, 24(2): 127~ 130]
- [9] Yang Dayuan, Li Xusheng, Zhang Zhenke. Study on the backflow of Chuanjiang River [A]. In: *Geomorphology, Environment, Development* [C]. Beijing: China Environment Science Press, 1999. 134~ 137[杨达源, 李徐生, 张振克. 长江川江段倒流的研究[A]. 见: 中国地理学会地貌与第四纪专业委员会编. 地貌·环境·发展[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999. 134~ 137]
- [10] Li J, Xi S, Kuang M. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation [J]. *Geomorphology*, 2001, 41: 125~ 135
- [11] Yang Dayuan, Li Xusheng, Feng Linjie *et al*. Pilot study on the collapses and landslides of the Three Gorges Reservoir of the Changjiang River [J]. *Journal of Geomechanics*, 2002, 8(2): 173~ 178[杨达源, 李徐生, 冯立梅, 等. 长江三峡库区崩塌滑坡的初步研究[J]. 地质力学学报, 2002, 8(2): 173~ 178]
- [12] Roberts R G, Bird M, Olley J M, *et al*. Optical and radiocarbon dating at Jimmim rock shelter in northern Australia [J]. *Nature*, 1998, 393: 358~ 362
- [13] Koons D. Cliff retreat in the southwestern United States [J]. *Am. J. Sci.*, 1955, 253: 44~ 52
- [14] B del J. Climatic Geomorphology [M]. Princeton: Princeton Univ. Press, 1982. 443
- [15] Schmidt K H. Factors influencing structural landform dynamics on the Colorado Plateau about the necessity of calibrating theoretical models by empirical data [J]. *Catena Suppl.*, 1987, 10: 51~ 66
- [16] Arauzo T, Gutierrez M, Sancho C. Facetas triangulares de ladera como indicadores paleoclimáticos en ambientes semiaridos Depresin Ebro [J]. *Geogaceta*, 1996, 20: 1093~ 1095
- [17] Chen Fuyou, Gao Xing, Pei Shu-wen *et al*. Preliminary study on Ranjialikou Paleolithic site, Three Gorges region, South China [J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 2004, 23(4): 292~ 306 [陈福友, 高星, 裴树文, 等. 冉家路口旧石器遗址初步研究[J]. 人类学学报, 2004, 23(4): 292~ 306]
- [18] Wu X hao. On morphologic boundary of the southeast Qinghai-Xizang Plateau and development of Jinsha River system [J]. *Mountain Research*, 1989, 7(2): 75~ 84 [吴锡浩. 青藏高原东南部地貌边界与金沙江水系发育[J]. 山地研究, 1989, 7(2): 75~ 84]
- [19] Yang Dayuan, Lu Guonian. The time and geologic significance of the breakthrough of Three Gorges [A]. In: Li Dongsheng, An Zhisheng Eds. *Loess· Quaternary Geology · Global change (Third)* [C]. Beijing: Science Press, 1992. 140~ 143 [杨达源, 闾国年. 长江三峡贯通的时代及其地质意义的研究[A]. 见: 刘东生, 安芷生. 黄土·第四纪地质·全球变化(三)[C]. 北京: 科学出版社, 1992. 140~ 143]
- [20] Humlum O. The geomorphic significance of rock glaciers: estimates of rock glacier debris volumes and headwall recession rates in West Greenland [J]. *Geomorphology*, 2000, 35: 41~ 67
- [21] Curry A M, Morris C J. Lateglacial and Holocene talus slope development and rock wall retreat on Mynydd Du, UK [J]. *Geomorphology*, 2004, 58: 85~ 106

Rate Estimation of Scarp Retreat on Bank Slope at Wanzhou of Chongqing

HAN Zhiyong, LI Xusheng, REN Xuemei, XU Qimian, CHEN Kefeng, YANG Dayuan

(Department of Urban and Resources Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract Three denuded bedrock platforms at elevations of 450 m, 275 m and 235 m respectively develop on the bank slope of Changjiang River in Wanzhou of Chongqing. A scarp of height of about 40 m occurs on the edge of the 450 m platform. The process of the scarp retreat is a key to understand the evolution of the Changjiang River. But quantitatively estimating the retreat rate remains as an unsolved issue. We found the geomorphic characters at Puyakou are comparable to that of the talus flatiron formed in arid and semi-arid environments, e.g. almost horizontal strata colluvia. Another evidence to assume the forming process of the scarp at Puyakou is similar to that of the talus flatiron is that we can distinguish different slope stages below the scarp, and the position of the apex of residual slope can be figured out. Different slope stages are mainly determined by applying ^{14}C and TL dating of deposits. Based on this viewpoint, we estimate the retreat rate of the scarp by analyzing triangular slope facets. We calculate the retreat distance of the scarp by using the function fitting of the residual slope. The retreat distance is 73 m. Since the age of deposits cannot be accurately determined, we put forward an indirect approach, i.e. the age of T3 terrace is used as an approximation of the forming age of the colluvium. Thus, we obtain a retreat rate of about 0.51 m/ka for the past 143 ka. This result implies that the highest denuded bedrock platform was possibly cut off 2.3 Ma ago, and remarkable changes of the water system took place at that time. This age is close to the estimated time of the first appearance of Three Gorges.

Key words Wanzhou; scarp retreat; terrace; triangular slope facet; talus flatiron