

# 五台山北麓第四纪麓原面与河流阶地的共生关系

张世民 任俊杰 聂高众

( 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085. E-mail: [shiminzh@gmail.com](mailto:shiminzh@gmail.com))

**摘要** 通过 1:1 万地貌填图调查了五台山北麓麓原面与河流阶地的共生关系, 分析了构造因素、气候变化和流域因素在两类地貌共生关系中的作用. 五台山北麓的第四纪麓原面和河流阶地构成了 6 级联合地貌面, 断块阶段性隆升对联合地貌面的形成起主导作用, 但气候变化与流域差异导致了联合地貌面的起伏. 羊眼河的 T2 阶地形成于末次冰期最盛期, 阶地面形成时河流处于加积状态; 第 3 级至第 5 级阶地(T3~T5)形成于间冰期, 阶地面形成时河流处于侵蚀或均衡状态. 分析认为气候对构造隆升导致的河流下切影响不大. 根据河流阶地的断代结果认为五台山断块山地第四纪以来经历了 6 次快速隆升事件, 最近 4 次事件的起始年代分别是距今 1.2, 0.6, 0.13 和 0.02 Ma.

**关键词** 断层崖 麓原面 河流阶地 构造隆升 黄土

复合断层崖与河流阶地是断块隆起山区常见的两类地貌, 在研究新生代构造隆升历史中经常得到应用<sup>[1-8]</sup>. 复合断层崖由麓原面与后退的断层崖构成, 被认为是断块阶段性隆升形成的特征地貌<sup>[9-12]</sup>. 断层崖形成以后长期处于剥蚀后退状态, 通常难以取得代表断层崖形成时代的测年样品. 构成河流阶地的冲积物中经常能取得理想的断代样品, 但河流阶地的多成因特点<sup>[13-15]</sup>使得通过河流阶地确定构造隆升事件存在不确定性. 受到下降盘盆地地表这一共同侵蚀基准面的控制, 同一构造期形成的麓原面与河流阶地在出山口一带处于大致相当的高度, 并在空间上连续, 而后期的构造隆升作用会将先期形成的麓原面与河流阶地同步抬升到较高的位置, 使得二者在时空上有可能存在一定的共生关系, 构成多级联合地貌面. 探索这种共生关系有助于判定河流阶地的构造因素, 并通过阶地反推断层崖的准确年代, 进而重建构造隆升历史.

五台山是汾渭地堑系北部典型的断块山地<sup>[16,17]</sup>, 其北侧为繁代盆地, 新生代以来持续的构造隆升使五台山成为华北的屋脊, 其北台顶海拔 3058 m, 是著名的北台期夷平面命名地<sup>[18]</sup>. 五台山北麓自海拔 1600 m 左右的唐县期山麓夷平面往下发育了 6 级第四纪麓原面, 冲沟中发育了多达 7 级第四纪河流阶地, 是开展麓原面与河流阶地共生关系研究的理想地点.

## 1 五台山北麓的麓原面

在南峪口附近的基岩山麓地带, 自海拔 1200 m 的断层崖坡脚至海拔 1600 m 的唐县期山麓夷平面(Pt)之间共发育了 6 级麓原面(P1~P6)(图 1~3, 表 1), 自下向上, 逐级抬高, 沿五台山北麓呈带状展布, 并被横向冲沟分割. 每一级麓原面由其前缘陡坎与低一级麓原面相连. 第 1 级麓原面(P1)的前缘陡坎为最新断层崖, 断层崖的坡脚为五台山北麓断裂地表出露位置; 第 2 级以上麓原面是先成断层崖后退和抬升的结果, 其前缘陡坎为后退的断层崖. P6 麓原面向上经过一个高 80 m 左右的斜坡转为平缓的唐县期夷平面(Pt)(图 3). 6 级麓原面指示了第四纪期间 6 期快速构造隆升事件.

在羊眼河东侧, P1 仅表现为明显的断层崖坡折, 其相对高度为 15 m 左右, 坡折之下为最新的断层崖, 坡度为 45°~60°(图 2(c)), 仅较坡脚下埋藏的断层面缓 10°左右, 其上后退的断层崖坡度为 30°~40°. P1 尚没有发育为麓原面, 代表了短暂的构造稳定期. P2 至 P4 麓原面表现为明显的缓坡地貌, 指示了较长的构造稳定期. P5 与 P6 麓原面仅残存于 R7 冲沟东侧. 唐县期夷平面是发育最宽的麓原面, 在羊眼河东侧的石鸡梁一带, 宽度达 1 km, 高出盆地 400 m 左右, 夷平面上残存有几十厘米厚的上新统静乐组含砾紫红色黏土和十余米厚的下更新统黄土地层.

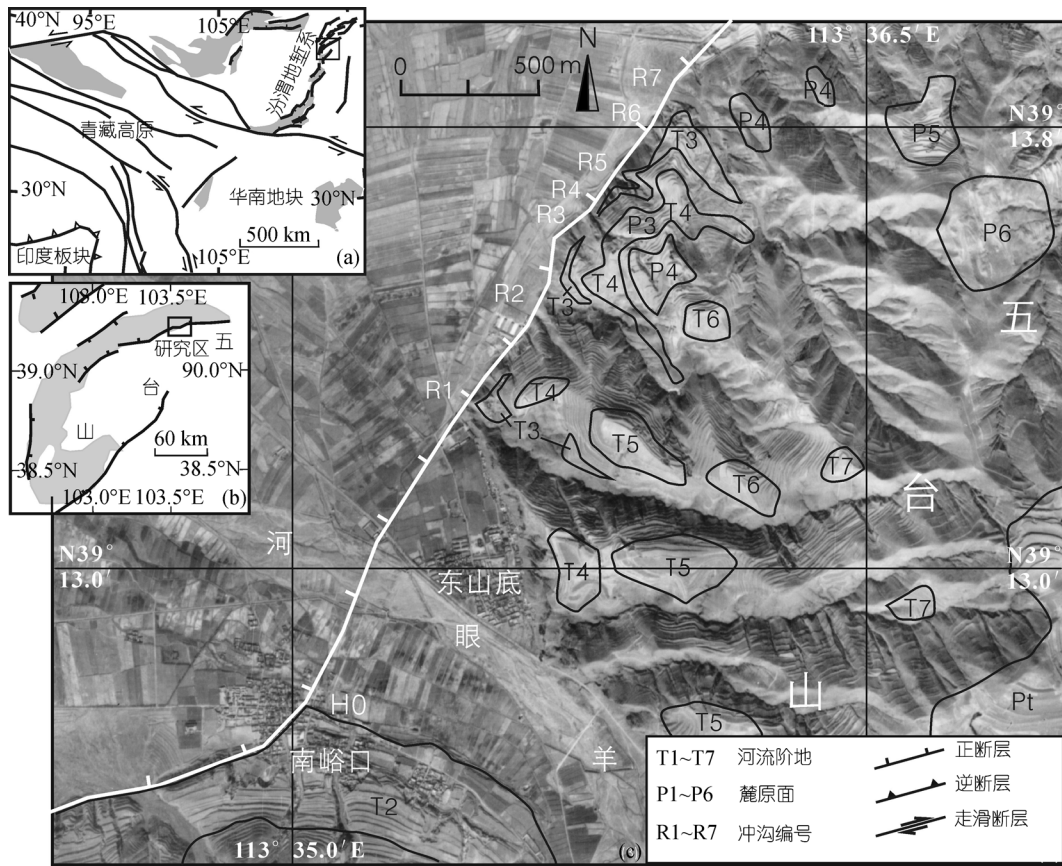


图1 五台山北麓南峪口一带地貌图

表1 五台山北麓麓原面几何特征

麓原面编号	高出山前洪积扇/m	麓原面宽度/m	麓原面坡度/(°)	前缘陡坎高度/m	前缘陡坎坡度/(°)	在出山口对应的河流阶地
P1	10~15			10~15	45~60	T2
P2	30~50	3~20	5~15	15~30	27~58	T3
P3	95~110	70~120	12~25	40~50	30~52	T4
P4	130~140	100~330	3~15	30~40	26~51	T5
P5	200~210	130~250	5~25	50~80	22~39	T6
P6	300~310	230~330	3~10	20~50	21~25	T7
Pt	400~405	>1000	0~5	80~100	14~17	

## 2 五台山北麓的河流地貌

在山前断裂的正倾滑作用下,五台山北麓发育了一系列横向冲沟.长度小于0.5 km的冲沟,通常只发育了3级阶地(如R5冲沟,图2),这些冲沟的沟床坡度较大,流域面积小,物源匮乏,一般发育侵蚀阶地,沟口洪积扇不发育;而长度大于1.0 km的冲沟,通常发育4级以上阶地(如R7冲沟与羊眼河,图4),这些冲沟的沟床坡度较小,流域面积大,物源丰富,一般发育基座阶地或堆积阶地,且山口发育一定规

模的洪积扇.各冲沟同一级阶地的拔河高度相差不大,T1~T4阶地分别为4~5,7~13,25~30和92~96 m,说明侵蚀基准面的变化具有区域一致性.

羊眼河发源于五台山东段,其源头切入北台期夷平原面,向北流向盆地(图1),全长达18.5 km,在山区发育了7级阶地(图4,表2),阶地的同期沉积在盆地一侧被埋藏.T1与T2为堆积阶地,T3~T5为基座阶地,T6与T7为侵蚀阶地.羊眼河除T1阶地外,其余各级阶地上覆厚度不等的黄土层(表2,图4),为地貌断代提供了方便.T4和T5阶地上黄土层厚度大,时代跨度大,定年采用地层对比和古地磁地层学方法.对T5阶地上的黄土层采集了磁化率样品(采样间距10 cm),并采集了古地磁定向样品(采样间距30 m深度以上为50~100 cm,以下为20 cm).古地磁测试在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室的2G超导磁力仪上完成,磁化率测试在英国Bartington MS2磁化率仪上完成.根据野外观察、释光测年和古地磁学分析,研究区的黄土地层可与经典的洛川黄土地层剖面对比<sup>[19-21]</sup>,其命名自上而下

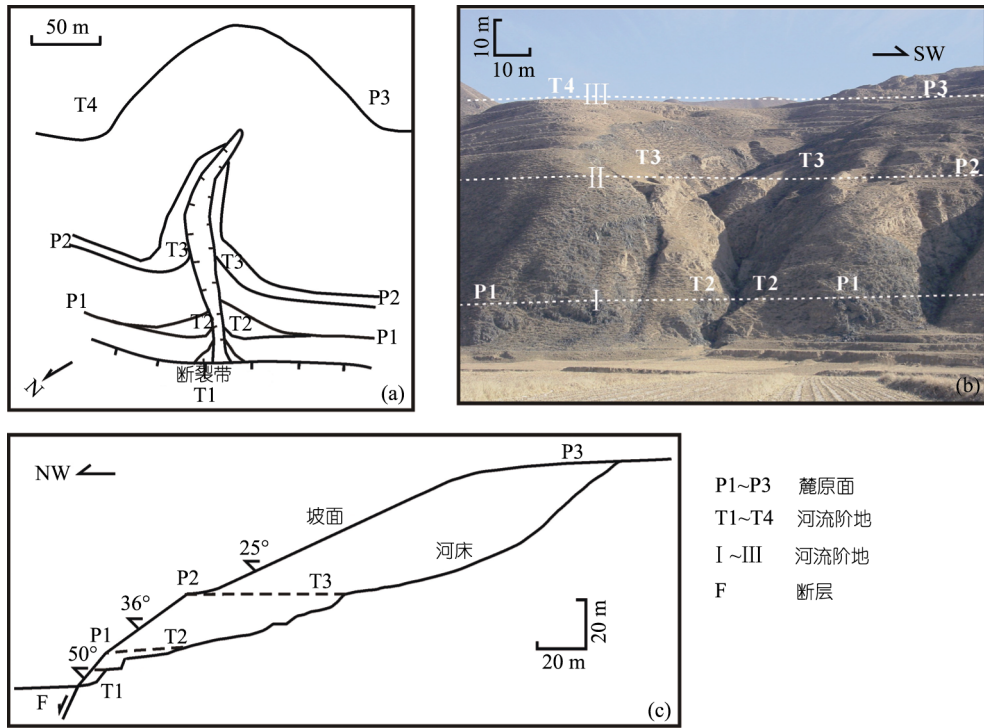


图 2 R5 冲沟阶地与麓原面地貌

(a) 冲沟地貌平面图; (b) 冲沟地貌照片; (c) 冲沟阶地及其东侧麓原面剖面图

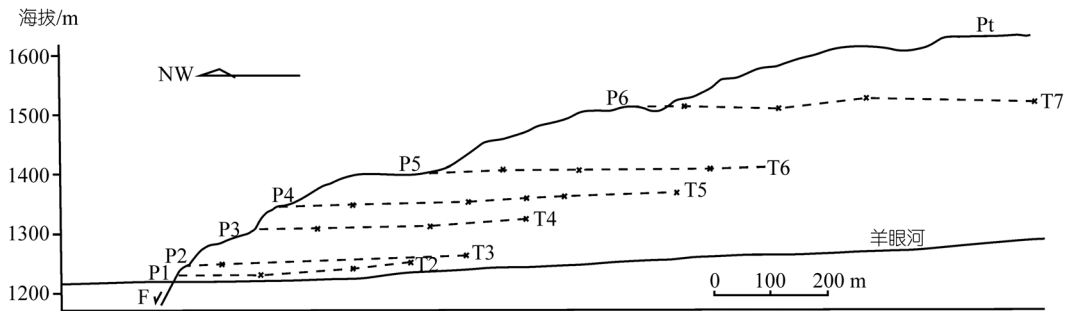


图 3 羊眼河东侧麓原面与河流阶地的空间关系

实线为坡面与河床, 虚线为阶地面, 虚线上的叉点为阶地测点; T2~T7 为冲沟阶地, P1~P6 为麓原面, Pt 为唐县期夷平面, F 为五台山北麓断裂

依次为 S0, L1, S1, L2, S2, L3 等。

T2 阶地上覆黄土的下部为 1 m 厚的灰黄色黄土 L1, 上部为 1.5 m 厚的灰黑色黑垆土 S0(图 4), 黄土底部光释光测年为  $(18.7 \pm 0.9)$  ka, 阶地前缘中下部砂层热释光测年为  $(54.82 \pm 4.39)$  ka. 南峪口南侧第 2 级洪积台地上覆黄土的地层结构相似, 黄土底部的光释光测年为  $(19.1 \pm 1.0)$  ka, 洪积台地下部冲积砂层热释光测年为  $(84.47 \pm 7.18)$  ka. 说明 T2 阶地堆积于末次冰期, 下切于末次冰期最盛期(LGM) [22,23].

T3 砾石层上覆 1 m 厚的褐红色古土壤 S1, 其上

为 1.5 m 厚的灰黄色黄土 L1(图 4). 在古土壤底部的热释光测年为  $(134.41 \pm 11.42)$  ka.

T4 阶地砾石层之上保存了完整的 S0~S5 黄土-古土壤序列, S5 古土壤直接覆盖于砾石层之上. S0 古土壤为灰黑色, 其他古土壤为浅褐红色至褐红色, S5 最深. S1 和 S5 均由三层古土壤复合而成; S2 由两层古土壤复合而成. L1~L5 黄土均呈灰黄色. 据文献[24]的研究, S5 发育于 0.58~0.48 MaBP 之间, 估计 T4 阶地面形成于距今 0.6 Ma 左右.

在 T5 阶地的上覆黄土层中采集了 124 块定向古

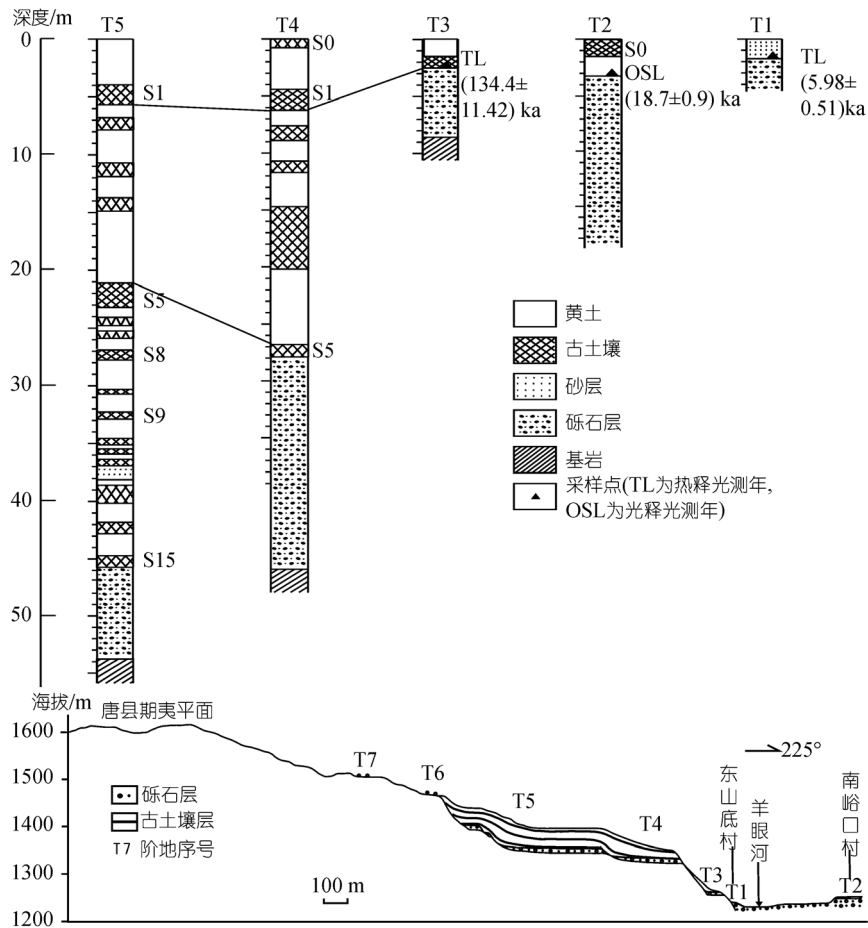


图4 羊眼河阶地横剖面

年代样品 TL 和 OSL 分别由中国地震局地壳应力研究所年代实验室、中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质实验室测定

表2 羊眼河河流阶地序列

阶地	阶地面海拔高度/m	冲积物性状	冲积层厚度/m	黄土层厚度/m	最老黄土	阶地年龄/Ma BP
T1	4.2	下部为砂砾石, 次棱角至次圆状, 结构松散; 上部为粉细砂	4.2(可见厚度)	无	无	0.006
T2	11~18	砂砾石, 次棱角至次圆状, 分选差, 结构松散	8~15(可见厚度)	3.0	L1	0.02
T3	30	砂砾石, 次棱角至次圆状, 钙质胶结明显	6~8	2.5~8.0	S1	0.13
T4	96	砂砾石, 多韵律, 分选较好, 次圆状至圆状, 钙质胶结好	14~18	27.9	S5	0.60
T5	122	砂砾石, 次圆状至圆状, 钙质胶结好	8~10	45.7	S15	1.20
T6	250	残留砾石, 次圆状	无	3~5		
T7	310	残留砾石, 次圆状	无	3~5		

地磁样品。样品首先进行系统热退磁, 温度从 150~500 以 50 步长, 温度从 500~585 以 25 步长, 并对部分样品退磁至 610。当退磁温度达到 200~350 时次生剩磁基本得以清洗, 原生特征剩磁得以呈现。古地磁测试结果与标准古地磁年表<sup>[25]</sup>对比发现(图 5), B/M界线位于L8 的下部, Jaramillo正极性亚时位于S10 中部至L13 顶部, 与黄土高原其他地

点的黄土磁性地层学研究是一致的<sup>[26~29]</sup>。T5 阶地之上保存了L1 至S15 黄土-古土壤序列, S15 古土壤直接覆盖于砾石层之上。古土壤为褐色至褐红色, S5 最红, 厚度也最大。S1 和S5 均呈三分特征。L9 和L15 颗粒较粗, 其中L9 中有一层弱发育古土壤。据文献<sup>[24]</sup>的研究, S15 发育于 1.180~1.199 MaBP之间, 估计T5 阶地面形成于距今 1.2 Ma左右。



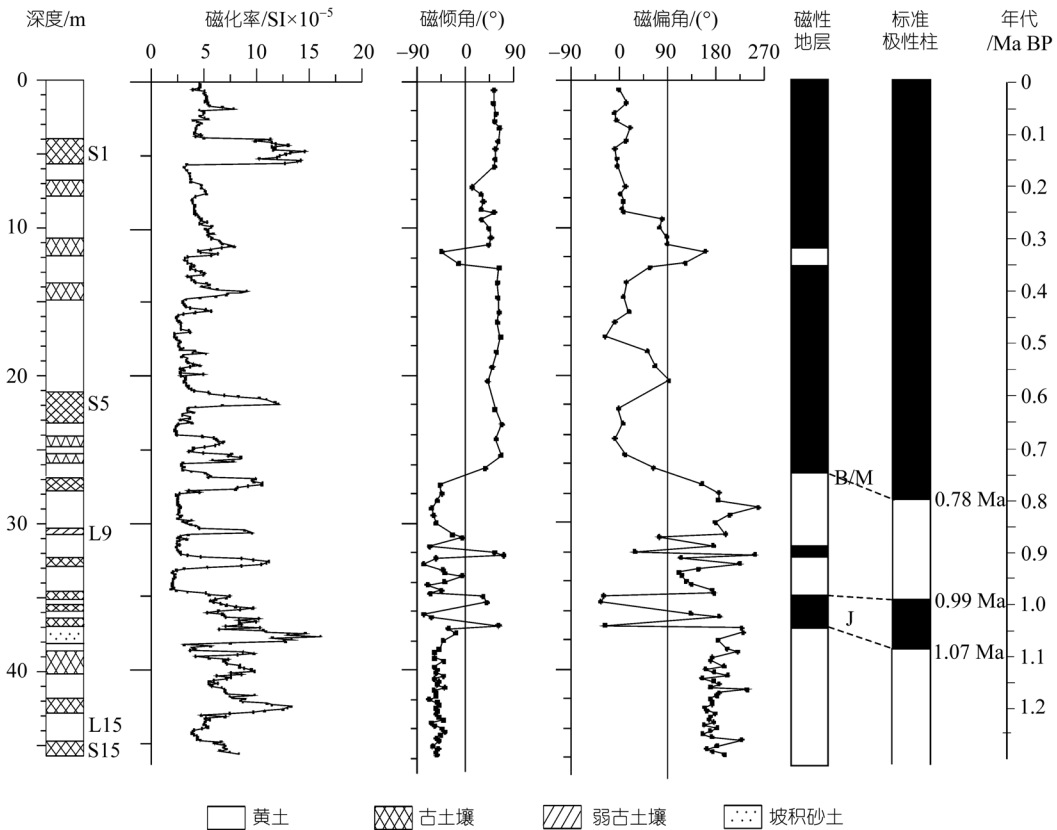


图 5 羊眼河 T5 阶地上覆黄土的磁性地层

羊眼河的T3, T4 与T5 三级阶地的冲积层之上直接披盖古土壤, 指示河流的下切均发生在间冰期; 而T2 阶地冲积层之上直接披盖L1 黄土的上段, 河流下切发生在末次冰期最盛期. 根据阶地的沉积结构推断阶地形成时的水动力状态<sup>[14]</sup>, T1 阶地冲积层呈二元结构, 分选较好, 河流处于均衡状态; T2 阶地由砂砾石组成, 多韵律, 分选较差, 砾石的磨圆度低, 河流处于加积状态; T3~T5 阶地冲积层的顶部主要由河床相砂砾石组成, 不发育细粒漫滩相, 风尘堆积直接披盖于砾石层之上, 指示河流下切之前处于侵蚀状态. 以上说明羊眼河的水动力状态与气候环境有一定的对应关系, 间冰期河流处于侵蚀状态或均衡状态, 冰期河流处于加积状态.

### 3 麓原面与河流阶地的共生关系表现

根据经典的断层崖演化理论<sup>[9-12]</sup>, 断块隆升形成断层崖(图 6(a)); 随后, 断层崖上的冲沟下切侵蚀形成“V”字型峡谷(图 6(b)); 进入构造平静期后, 沟床展宽形成“U”字型宽谷, 而断层崖遭受剥蚀而坡度降低, 如果平静期足够长, 断层崖后退形成麓原面

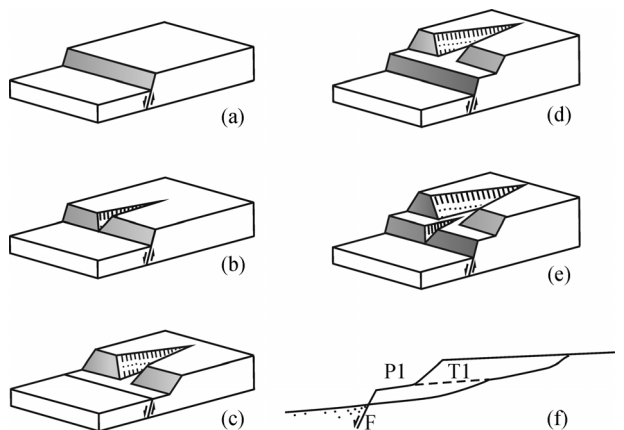


图 6 正断层作用下麓原面与河流地貌演化模式图 (a)~(e)图表示了正断层作用下麓原面与河流地貌演化过程中的一个轮回, (f) 地貌剖面图, T1 为河流阶地, P1 为麓原面

P1(图 6(c)); 受下降盆地地表这一共同侵蚀基准面的控制, 麓原面与宽谷谷底在山麓地带处在大致相同的高度; 后期的断块隆升形成新的断层崖, 原先的麓原面 P1 和宽谷被抬升(图 6(d)), 冲沟从断层崖开始溯源侵蚀形成阶地 T1(图 6(e)). 在山麓地带, T1 与 P1

连成一级地貌面，二者在空间上连续、在高度上可比(图 6(f)). 多个构造旋迴可以形成一系列由河流阶地和麓原面组成的多级联合地貌.

在五台山北麓的南峪口一带，麓原面与横向冲沟的阶地面在沟口一带存在逐级联合的关系，构成了6级层状地貌面(图 3). 联合地貌面沿山麓走向带状延伸、两端伸向冲沟上游，平面上呈“U”字型，且逐级抬高，环环相套，在 R2~R7 冲沟之间有典型的表现(图 1).

麓原面与阶地面逐级对应关系具有区域一致性. 在羊眼河至 R7 冲沟之间，P1 断层崖坡折与 T2 阶地相联合、P2 麓原面与 T3 阶地相联合(图 2, 图 7(c)), 分

别构成了第一级、第二级联合地貌面. 在 R2 与 R7 冲沟之间，P3 麓原面与 T4 阶地构成了第三级联合地貌面(图 1). 从麓原面与冲沟的切割关系以及冲沟中发育的最高阶地判断，R1~R7 冲沟均形成于 P4 麓原面抬升之后. 从平面展布与海拔高度判断，P4 麓原面与羊眼河的 T5 阶地构成了第四级联合地貌面. P5 与 P6 麓原面、T6 与 T7 阶地时代较老，海拔高度分别位于 1400 和 1500 m 附近，遭受剥蚀较严重，其空间组合关系不如低级地貌面清楚，但在高程上是位于唐县期夷平原面与第四级联合地貌面之间的两级地貌面，可能代表第五级和第六级联合地貌面(图 1, 3).

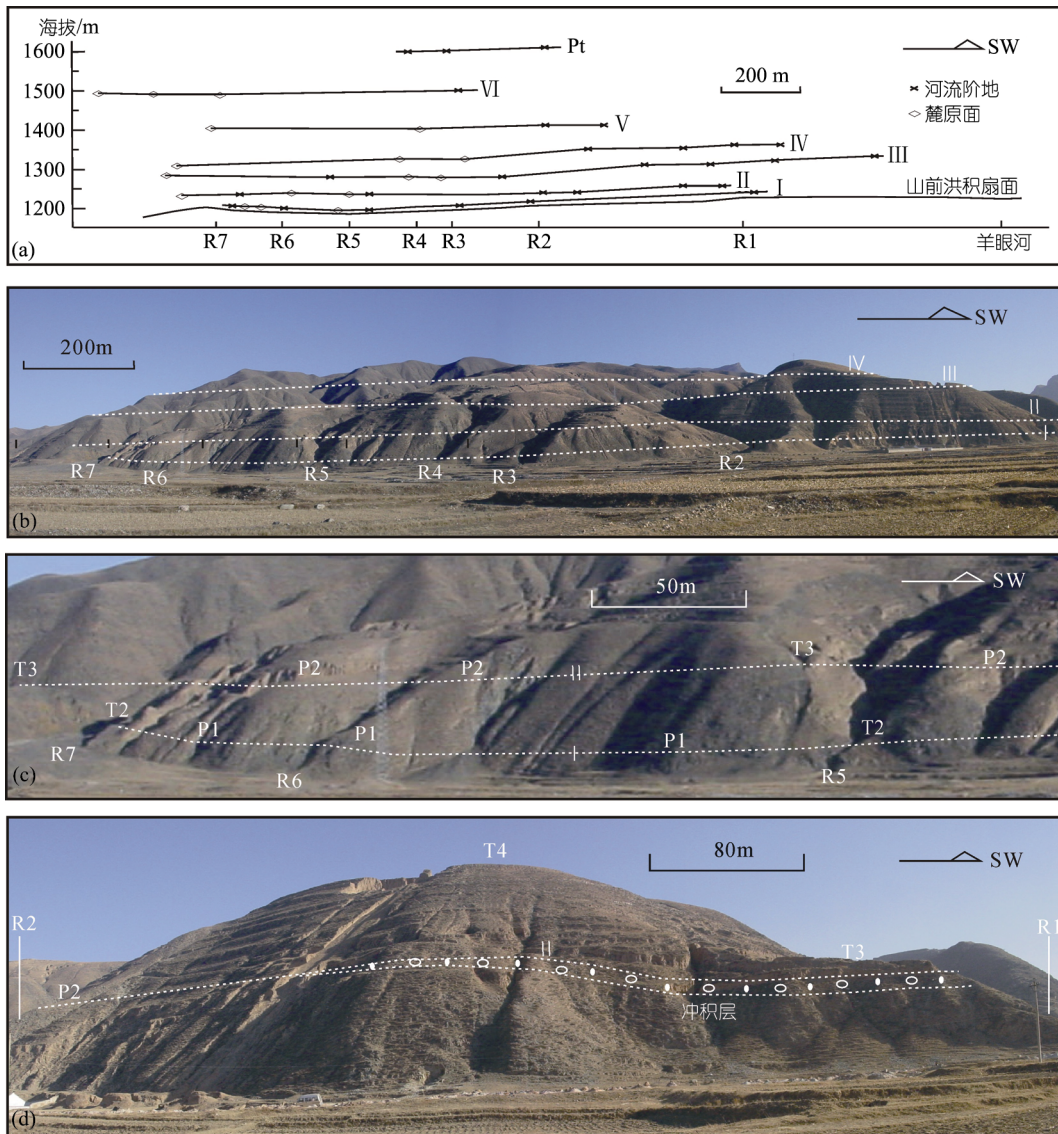


图 7 五台山北麓麓原面与河流阶地构成的联合地貌面  
T1~T7 为冲沟阶地，P1 为断层崖坡折，P2~P6 为麓原面，Pt 为唐县期夷平面，~ 为联合地貌面，R1~R7 为冲沟编号

联合地貌面在结构上表现为水平相变。以第二级联合地貌面为例, R1 冲沟东侧的 T3 阶地在沟口处的冲积层厚 6~8 m, 向外侧至 110 m 处尖灭, 而过渡为 P2 麓原面(图 7(d))。

联合地貌面的起伏与羊眼河山前洪积扇地形有一致性, 即从羊眼河向东侧逐渐降低, 但第一级联合地貌面受 R7 冲沟山前洪积扇的影响, 在东端略有抬高(图 7(a)~(c))。联合地貌面的起伏以最高点与最低点的高差计, 并扣除上覆黄土地层的厚度, 则第一级与第六级联合地貌面起伏分别为 30, 15, 30, 25, 10 和 10 m。第一级与第三级联合地貌面的起伏较大, 主要原因是羊眼河的 T2 与 T4 阶地上发育了厚层冲积物(图 4, 表 2)。

由于麓原面上崩坡积层厚度小, 联合地貌面的起伏主要由基座的起伏和阶地面上冲积层厚度两部分组成。如果扣除阶地上冲积层的厚度(主要是羊眼河阶地, 表 2), 得到各级联合地貌面基座的起伏为 10~15 m, 并从羊眼河向东逐渐降低。联合地貌面的基座代表了当时的侵蚀下限, 受到山前侵蚀基准面的控制, 因此这一起伏可以指示羊眼河山前古地形的起伏。据此推测每经过一定的构造稳定期后, 羊眼河山前洪积扇起伏一般会趋于和缓, 高差稳定在 10~15 m。

## 4 讨论

### 4.1 共生关系的影响因素

在五台山北麓地区, 断块阶段性隆升对联合地貌面的形成起主导作用, 但气候变化与横向冲沟的流域差异导致了联合地貌面的起伏。羊眼河是调查区最大的河流, 丰富的物源和较大的流量在山前形成了以山口为顶点的巨大的洪积扇, 使得联合地貌面的发育保持了自山口向东侧逐渐降低的趋势。末次冰期导致了羊眼河河床的加积作用, 水量的减少使大量物质停滞在扇顶附近, 加大了扇顶与扇缘的高差; 相比之下, 羊眼河东侧的 R1~R6 冲沟规模小、物源匮乏、河床坡降大, 沟床加积作用不明显, 山前洪积扇不发育。冰期与流域因素的联合作用加剧了山前地形的差异, 导致了第一级联合地貌面的大起伏。

第一级联合地貌面仅有断层崖坡折, 而第二级以上联合地貌面有明显的麓原面, 说明足够长的构造平静期是形成联合地貌面的必要条件。断层崖的后退与河流的演化是两类不同的地貌过程, 从野外调查结果来看(图 2, 3), 河流的溯源侵蚀速度通常远

大于断层崖的后退速度。如果平静期非常短暂, 尽管冲沟达到了均衡状态并发生了河床的侧蚀展宽, 但断层崖没有明显的变缓或后退, 随之而来的构造隆升会导致河流下切并形成阶地, 但不会有对应的麓原面或断层崖坡折。T1 阶地没有对应的麓原面, 其在断层下降盘的同期沉积被埋藏于现代洪积扇之下, 是短暂构造变动的结果, 还是冰后期气候变化的产物, 值得进一步探讨。

### 4.2 共生关系的时代涵义

河流的水动力状态决定了阶地下切与麓原面抬升是否同步。如果河流处在侵蚀状态或均衡状态, 断块隆升导致侵蚀基准面的下降, 河流会迅速下切, 阶地的形成与麓原面的抬升可认为是同时代的; 如果河流处于加积状态, 加积作用可能会延迟河流的下切。羊眼河及其东侧冲沟的 T3~T5 阶地形成时河流处于侵蚀状态或均衡状态, 因此这几级阶地与山前相应的麓原面可以看作是等时的。羊眼河 T2 阶地形成时河流处于加积状态, 而此时末次冰期最盛期的干旱气候未能阻止河流的下切, 可以推断气候因素对构造隆升导致的下切作用影响不大, 如果下切时间稍有滞后的话, 也不会太长。而羊眼河东侧 R1~R6 冲沟的 T2 阶地没有明显的加积作用, 可以不考虑末次冰期对河流下切的影响。所以, 第一级联合地貌面也可以看作是等时的。

### 4.3 共生关系的构造意义

基于麓原面与河流阶地的共生关系研究, 认为五台山断块山地第四纪期间发生了 6 期较强的构造隆升过程, 其中最后 4 次隆升过程的起始时代分别为距今 1.2, 0.60, 0.13 和 0.02 Ma。鉴于距今 0.13~0.02 Ma 之间的构造稳定期持续时间短暂, 认为距今 0.02 Ma 前后的构造变动是前一构造期内的次一级事件。但从断层崖高度与河流阶地的下切深度来看, 五台山北麓在距今 0.02 Ma 以来的隆升幅度与距今 0.13~0.02 Ma 之间的 10 万多年内隆升幅度大致相当, 说明本地区目前正处在最新构造运动以来的最活跃期。

汾渭地堑系中南部距今 1.2, 0.60 Ma 发生过显著的差异升降运动<sup>[5,30]</sup>, 汾渭地堑系西南端<sup>[8]</sup>和黄河上游地区<sup>[1,31]</sup>距今 1.2, 0.60 和 0.15 Ma 发生了 3 次强烈的差异隆升运动, 祁连山东段距今 1.2, 0.80 和 0.15 Ma 经历了 3 次强烈的隆升<sup>[3]</sup>。由此推测五台山地区与汾渭地堑系南部乃至青藏高原东北缘之间在第四纪期间存在构造运动的同步性(图 1)。



## 5 结论

五台山北麓的第四纪麓原面和河流阶地构成了6级联合地貌面,断块阶段性隆升对联合地貌面的形成起主导作用,而气候变化与流域差异导致了联合地貌面的起伏。

气候对构造隆升导致的河流下切影响不大,联合地貌面是等时的。在间冰期河流处于均衡状态或侵蚀状态,断块隆升会导致河流的迅速下切,阶地的形成与麓原面的抬升可认为是同时代的。在冰期显著的河床加积作用仅限于较大的河流,末次冰期最盛期的干旱气候没能阻止构造隆升导致的河流下切,推论如果加积作用导致河床下切时间稍有滞后的话,也不会太长。

五台山断块山地第四纪以来经历了6次快速隆升事件,其中最近4次事件的起始年代分别是距今1.2, 0.6, 0.13和0.02 Ma。

致谢 释光测年得到了中国科学院地球环境研究所王旭龙博士和中国地震局地壳应力研究所王焕贞高级工程师的帮助,黄土古地磁测试得到了中国科学院地质与地球物理研究所张睿博士、魏莹女士的帮助,古地磁分析得到了中国地质科学院地质力学研究所傅建利和姚海涛博士的帮助,谨致深切的谢意。

## 参 考 文 献

- 李吉均, 方小敏, 马海州, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆升. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26(4): 316—322
- 杨景春, 谭利华, 李有利, 等. 祁连山北麓河流阶地与新构造演化. 第四纪研究, 1998, 18(3): 229—237
- 潘保田, 邬光剑, 王义祥, 等. 祁连山东段沙河阶地的年代与成因. 科学通报, 2000, 45(24): 2669—2675
- Yang D, Fang X M, Song Y G, et al. Development of a pediment on western slopes of Liupan Mountain related to the neotectonic uplift. Chin Sci Bull, 2001, 46(Supp.): 11—15
- 李有利, 史兴民, 傅建利, 等. 山西南部 1.2 Ma B. P. 的地貌转型事件. 地理科学, 2004, 24(3): 292—297
- 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. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(9): 855—864
- Peulvast J P, Claudino Sales V. Stepped surfaces and palaeolandforms in the northern Brazilian Nordeste: constraints on models of morpho-tectonic evolution. Geomorphology, 2004, 62: 89—122[DOI]
- Sun J M. Long-term fluvial archives in the Fen Wei Graben, central China, and their bearing on the tectonic history of the India-Asia collision system during the Quaternary. Quat Sci Rev, 2005, 24: 1279—1286 [DOI]
- Hamblin W K. Patterns of displacement along the Wasatch fault. Geology, 1976, 4: 619—622
- Wallace R E. Profile and ages of young fault scarps, north-central Nevada. Geol Soc Am Bull, 1977, 88: 1267—1281
- Wallace R E. Geometry and rates of change of fault-generated range fronts, north-central Nevada. J Res US Geol Sur, 1978, 6: 637—650
- 杨景春, 郭正堂, 曹家栋. 用地貌学方法研究贺兰山山前断层全新世活动状况. 地震地质, 1985, 7(4): 23—31
- Maddy D, Bridgland D R, Green C P. Crustal uplift in southern England: evidence from the river terrace records. Geomorphology, 2000, 33: 167—181[DOI]
- 杨景春, 李有利. 地貌学原理. 北京: 北京大学出版社, 2005. 48—54, 195—198
- Starkel L. Climatically controlled terraces in uplifting mountain areas. Quat Sci Rev, 2003, 22: 2189—2198[DOI]
- 王乃梁, 杨景春, 夏正楷, 等. 山西地堑系新生代沉积与构造地貌. 北京: 科学出版社, 1996. 73—119
- 刘光勋, 于慎谔, 张世民, 等. 山西五台山北麓活动断裂带. 见: 邓起东, 主编. 活动断裂研究 1. 北京: 地震出版社, 1991. 118—130
- 吴忱, 马永红, 张秀清, 等. 华北山地地形面地文期与地貌发育史. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1999. 92—108
- 刘东生, 主编. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 44—61
- 鹿化煜, 安芷生, 刘洪滨, 等. 洛川黄土记录的最近 2500 ka 东亚冬夏季风变化周期. 地质论评, 1998, 44(5): 553—558
- 陈骏, 王永进, 季峻峰, 等. 陕西洛川黄土剖面的 Rb-Sr 值及其气候地层学意义. 第四纪研究, 1999, 19(4): 350—356
- 聂高众, 刘嘉麒, 郭正堂. 渭南黄土剖面十五万年以来的主要地层界线和气候事件——年代学方面的证据. 第四纪研究, 1996, 16(3): 221—231
- Bard E. Ice age temperatures and geochemistry. Nature, 1999, 284: 1133—1134
- Williams M A J, Dunkerley D L, DeDeckker P, 等. 刘东生等, 编译. 第四纪环境. 北京: 科学出版社, 1997. 189—239
- Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. J Geophys Res, 1995, 100: 6093—6096[DOI]
- Kukla G, An Z S. Loess stratigraphy in central China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 1989, 72: 203—225[DOI]
- Liu X M, Liu T S, Shaw J, et al. Paleomagnetic and paleoclimatic studies of Chinese loess. In: Liu T S, ed. Loess, Environment and Global Change. Beijing: Science Press, 1991. 61—81
- Rutter N W, Ding Z L, Evans M E, et al. Baoji-type pedostratigraphic section, Loess Plateau, north-central China. Quat Sci Rev, 1991, 10: 1—22[DOI]
- Zhu R X, Laj C, Mazaud A. The Matuyama-Brunhes and upper Jaramillo transitions recorded in a loess section at Weinan, north-central China. Earth Planet Sci Lett, 1994, 125: 143—158[DOI]
- 李有利, 傅建利, 胡小猛, 等. 山西南部河流湖泊沉积与黄土转型事件及其意义. 见: 卢演侑, 高维明, 陈国星, 等主编. 新构造与环境. 北京: 地震出版社, 2001. 84—91
- 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 1—11