



论文

根据孢粉记录和阶地结构分析川西安宁河 I ~ III 级阶地成因

程建武^{①②*}^① 中国地震局地质研究所, 北京 100039;^② 甘肃省地震局, 兰州 730000

* E-mail: chengjw71@163.com

收稿日期: 2009-08-19; 接受日期: 2010-04-08

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2004CB418401)资助

摘要 通过对川西安宁河流域中段 I ~ III 级阶地剖面孢粉特征的研究, 结合全球气候变化的研究结果, 分析安宁河阶地形成时期的气候特征; 同时依据安宁河阶地结构特征来综合剖析其阶地的成因。结果表明: 川西安宁河流域 I ~ III 级阶地的形成反映了青藏高原构造抬升运动对青藏高原边缘地区的影响, 是对青藏高原构造抬升运动的响应; 气候变化并非安宁河阶地成因的主要因素, 只是起到了调节作用, 且不同时期气候对阶地形成的影响程度不同。安宁河河流阶地的研究揭示了青藏高原东缘多次阶段性抬升的事实, 有助于探讨高原的隆升机制。

关键词川西安宁河
阶地成因
孢粉
古气候

河流阶地沉积学和地貌学特征提供了河流系统行为及新构造运动的野外证据^[1~3]。河流阶地的发育和变形特征对构造活动和气候变化的反应比较敏感, 运用河流阶地资料分析区域构造演化与气候变化是地貌学的重要方法之一^[4]。川西安宁河流域位于青藏高原东缘, 具有独特的地理位置和构造背景。该区在第四纪受青藏高原隆升影响较大, 同时全球气候变化、东亚季风演变、冬季风和夏季风在万年尺度上相互交替变化等因素均对该区域地貌的发育演化产生了深刻的影响^[5]。凭借宇宙射线成因核素、古地磁、孢粉等测年手段及地质技术可获得详细解释地貌发展的古环境资料, 通过这些资料, 可以建立综合的地区生物及岩石地层单元, 得到河流阶地形成、演化的较为准确的时段, 进而进一步研究流域环境演变过

程。由于河流阶地成因复杂, 受构造运动、气候变化、基准面升降、河流系统复杂响应等因素单独或共同作用^[6~10]。因此, 本文从较长时间、较大空间尺度河流阶地演化及外因对河流阶地形成控制作用的角度出发, 通过对安宁河流域中段 I ~ III 级阶地剖面孢粉采样, 分析了阶地形成时期的气候特征, 结合阶地结构的研究, 剖析了阶地成因。这将有助于揭示青藏高原东缘多次阶段性抬升的事实, 并对于探讨整个高原的隆升机制有重要意义^[4,11~16]。

1 安宁河河谷阶地研究现状

安宁河位于四川省西南部, 发源于大凉山-螺髻山高地西侧, 属雅砻江支流。流经冕宁、西昌、德昌、

米易等县(市), 干流长 326 km, 流域面积 11150 km² (图 1), 属亚热带气候, 降水丰沛, 年降水量一般为 800~1000 mm. 安宁河深切的河谷成为攀西地区重要的构造地貌特征. 根据河谷形态和阶地发育特征将安宁河河谷分为 3 段: 冕宁以北为上游段, 冕宁和德昌之间为中游段, 德昌与米易之间为下游段^[17]. 本次研究区域位于安宁河中段(图 1).

该区位于新生代的鲜水河-小江断裂系, 断裂切割了青藏高原东部的前新生代构造单元, 包括北西的巴彦喀喇地体、南东的扬子地台和它们之间的龙门山-盐源推覆构造带(图 1)^[18,19]. 安宁河断裂带具有较长的发育历史, 最早开始于前寒武纪, 控制了邻近地区的沉积过程和岩浆活动^[20]. 该断裂穿过了安宁河谷, 并在不同时期形成了 5~6 级阶地. 河谷东西两侧阶地发育不对称, 东侧阶地发育较全, 西侧阶地发育相对弱些, 主要的活动断裂发育于河谷东侧. 其中 I 和 II 级阶地为堆积阶地, III 级阶地为基座阶地^[17,21].

2 安宁河河谷 I~III 级阶地剖面结构特征和形成时代

2.1 安宁河河流阶地剖面结构特征

借助流动 GPS 测量了冕宁泸沽镇附近发育良好的 I~III 级阶地拔河高度(图 2), 并对每级阶地的剖面特征进行了调查, 采集了孢粉和光释光样品(图 3), 分析结果如下:

2.1.1 安宁河 I 级阶地剖面特征

该阶地为堆积阶地, 拔河高度 7.9~9 m, 主要地层特征从上往下依次为:

- (1) 灰黑色表土层, 厚约 0.5 m.
- (2) 灰褐色中-粗砂层, 厚约 1 m.
- (3) 灰色含粗砂砾石层, 砾石直径一般在 10~15 cm, 磨圆度好, 分选性较好, 砾石岩性为花岗岩、流纹岩等, 厚约 3 m.
- (4) 灰色中-粗砾石层, 局部夹砂层透镜体, 砾石

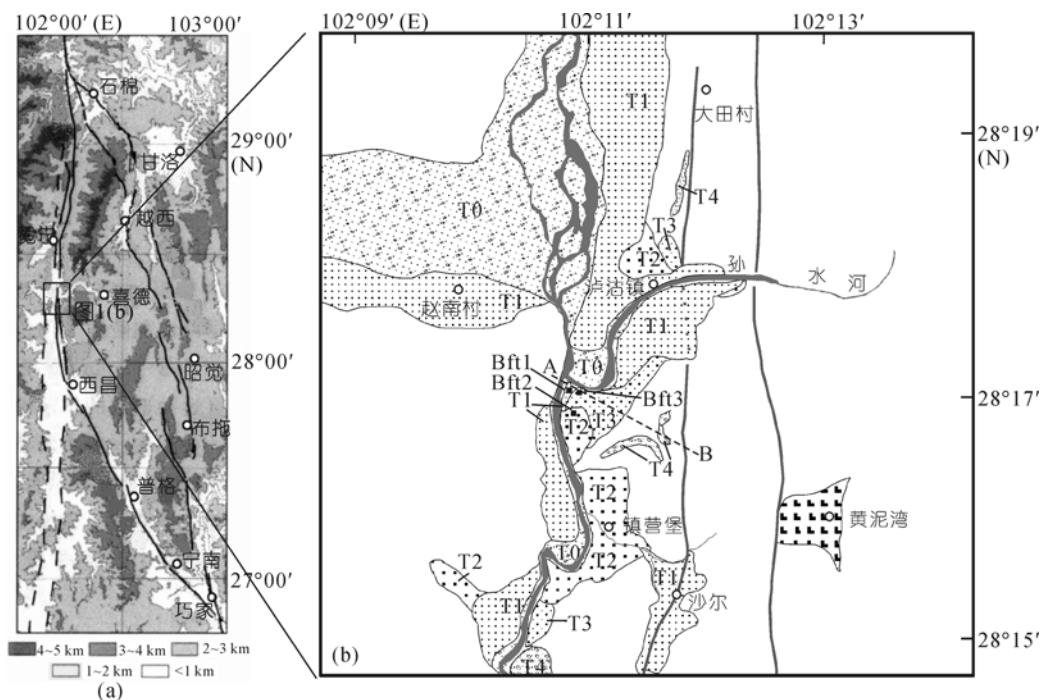


图 1 冕宁泸沽镇附近构造地貌简图及孢粉采样位置

(b)中, T0 为河漫滩, T1 为 I 级阶地, T2 为 II 级阶地, T3 为 III 级阶地, T4 为 IV 级阶地, 图中断裂为野外实际调查和影像解析的结果, Bft1 为 I 级阶地的采样位置, Bft2 为 II 级阶地的采样位置, Bft3 为 III 级阶地的采样位置

直径大小不一,最大的砾径 30~50 cm,一般为 20 cm,分选性差,未见底。

从剖面上来看,该剖面具备完整的二元沉积结构,层(1)和(2)为河漫滩相堆积,层(3)和(4)为河床相堆积,层(4)砾石层粒度比层(3)大,磨圆度比层(3)差。

2.1.2 安宁河 II 级阶地剖面特征

在泸沽镇附近,该阶地为加积-切割型(堆积)阶地,拔河高度 30.3~38.8 m,在其河段大部分地段为堆积阶地,局部可见基座,岩性为灰绿色细砂岩加粘土,局部加砾石层。

(1) 灰色-灰黑色含植物根系表土层,厚约 0.5 m。

(2) 灰色-灰褐色粗砂层,厚度不均匀,厚约 0.5~1 m。

(3) 灰色-灰褐色细砂层,分选性好,厚约 0.5~0.8 m。

(4) 紫色-灰紫色含粗砂砾石层,砾石含量约 60%,砾石磨圆度好,分选性一般,局部夹细砂层透镜体,厚约 10~12 m。

(5) 灰色-灰紫色中粗砂层,厚约 0.4 m。

(6) 灰色-灰黄色中粗砾石层,砾石直径一般在 10 cm 左右,砾石含量 70%,砾石磨圆度较好,分选性一般,剖面未见底。

从剖面图 3 可以看出,该剖面具有阶地的二元沉积结构,层(1)~(3)为河漫滩相堆积,层(4)~(6)为河床相堆积,砾石层的粒度变化不大。层(5)为砾石层中局部夹层,向两端尖灭。

2.1.3 安宁河 III 级阶地剖面特征

该阶地为基座阶地,基座岩性为早更新世昔格达组的湖相堆积物,拔河高度 81.3~96.8 m,阶地地层特征如下:

(1) 灰黄色表土层,厚约 0.5 m。

(2) 灰色-灰褐色含细砾粉砂质粘土层,厚约 2 m。

(3) 灰色砾石(洪积层),砾石成棱角状,磨圆度差,砾石直径一般在 5~10 cm,砾石含量约 60%,局部夹透镜状粉砂层,厚约 2 m。

(4) 灰色中-细砂层,厚约 0.8 m。

(5) 同(3)层,厚约 2 m。

(6) 灰色-深灰色含细砾粉砂层,分选性较好,厚约 1 m。

(7) 紫红色粉砂层,局部夹紫红色粘土层,厚约 0.5~0.3 m。

(8) 灰紫色-褐色砾石层,砾石直径一般在 10~20 cm,为滚圆状,磨圆度好,分选性一般,局部夹灰紫色砂层透镜体,砾石岩性为流纹岩,花岗岩等,砾石风化严重,如花岗岩砾石容易破碎。砾石含量约 60%,该层的砾石的直径从上到下有变小的趋势。厚约 7 m。

(9) 灰色-灰黄色砾石层夹紫灰色砾石层互层。砾石磨圆度较好,分选性好,砾石直径一般在 10~15 cm,砾石含量较(8)层高些。局部夹细砂层透镜体。厚约 7~8 m。

(10) 灰色中-细砂层,分选性好,厚约 0.8 m。

(11) 紫色-灰褐色砾石层,砾石磨圆度较好,砾石直径一般在 15 cm,厚约 1 m。

(12) 灰色中-细砂层,厚约 0.5 m。

(13) 灰紫色砾石层。砾石成滚圆状或次棱角状,砾石直径一般在 10 cm,厚约 0.5 m。

(14) 深灰色-灰绿色粉砂层夹粘土层(未见底)。

由剖面图 3 可以推断,层(1)~(5)为洪积物,可能为阶地形成后洪积扇的堆积。层(6)~(7)为河漫滩相,层(8)~(13)为河床相堆积,层(13)磨圆度相对较差,可能为冰水堆积物;层(11)~(13)为细粒与粗粒交互层,表现为在 III 级阶地堆积初期水动力的不稳定性,反映了气候波动变化特征。层(14)为昔格达组的湖相地层,为阶地的基座。

2.2 安宁河河流阶地形成时代讨论

河流阶地的形成时代问题比较复杂,采样时人们往往选取阶地中某一层位物质的年龄来近似代表阶地的形成年龄,这就造成了因采样位置不同而导致测年结果差异较大,加之目前测年技术的误差,因此,测量结果往往存在很大的不确定性。本研究试图根据前人的研究结果,结合采样分析结果(见表 1),对安宁河阶地的年龄做进一步的讨论,同时通过区域对比来确定安宁河阶地的形成时代。

在安宁河 I 级阶地的细粒层中取光释光样品(见图 2),测年结果为 (7.2 ± 0.7) ka,前人测年结果分布在 $4.1 \sim 1.03$ ka^[21,22],区域上大渡河泸定烹坝 I 级阶地上部粉砂质堆积¹⁴C 年代 (5763 ± 77) a BP 左右,因此通过对比分析,安宁河 I 级阶地的形成时代应该介于 $4.1 \sim 10.3$ ka 之间。

在安宁河Ⅱ级阶地剖面上取了 2 个光释光样品, 测年结果不是很理想, 其中一个样品未给出测年结果, 说明采样位置或测定过程存在很大的偏差. 李兴唐等^[23]通过野外采样获得一组安宁河Ⅱ级阶地¹⁴C 年龄: 如林里村(25350±410) a BP、泸沽镇(15995±205) a BP、黄连关(24075±450) a BP、刘所(25930±700) a BP; 许学汉等^[24]在西昌以北的 4 个¹⁴C 年代显示安宁河Ⅱ级阶地堆积年代为 16~26 ka BP. 王书兵^[25]在大渡河石棉八牌附近Ⅱ级阶地光释光年代为 (30.72±2.92) ka, 徐锡伟等^[26]在林里村附近获得Ⅱ级阶地热释光年龄为(25.35±0.41) ka. 因此, 综合分析认为安宁河Ⅱ级阶地形成时代为 16~26 ka BP.

在安宁河Ⅲ级阶地剖面的细粒层中取 2 个光释光样品, 测年结果显示 LGTLT3-1 为(16.5±1.8) ka, 而下部的 LGTLT3-2 因剂量饱和而超出测年的范围. 可能原因是 LGTLT3-1 样品采样位置在阶地顶部, 测年结果偏小, 因而并不能完全代表阶地的形成时代. 徐锡伟等^[26]在林里村附近获得Ⅲ级阶地热释光年龄为 (31±1.9) ka, 冕宁Ⅲ级阶地剖面底部样品热释光年龄为(46.3±2.8) ka, 何宏林等^[27]在冕宁高山堡附近的

砾石层中测得粉砂质粘土的热释光测年结果为 (29.37±2.29) ka, 由此推论安宁河Ⅲ级阶地形成时代应在 30~46 ka.

3 安宁河 I ~Ⅲ级阶地孢粉记录及其气候特征

3.1 材料和方法

在野外, 对 3 个阶地的剖面都进行了孢粉和剖面地层光释光样品采集(见图 3), 根据 3 个阶地剖面的不同沉积状况、沉积物粒度粗细和剖面的采样情况, 对不同级阶地剖面样品采用了不同的采样间隔, 其中Ⅰ级阶地剖面高度约 5.8 m, 采样间距 0.3 m, 采集孢粉样品 18 个; Ⅱ级阶地剖面高度 18 m, 采样间距 0.5 m, 粗砾石层中适当放稀, 采集孢粉样品 16 个; Ⅲ级阶地剖面高度约 24 m, 采样间距 0.5 m, 粗砾石层中适当放稀, 采集孢粉样品 19 个, 送实验室分析有效样品 50 个.

孢粉样品来自 3 个阶地中上部的河流堆积层, 大部分样品统计到 100~150 粒, 最多统计了 174 粒, 个

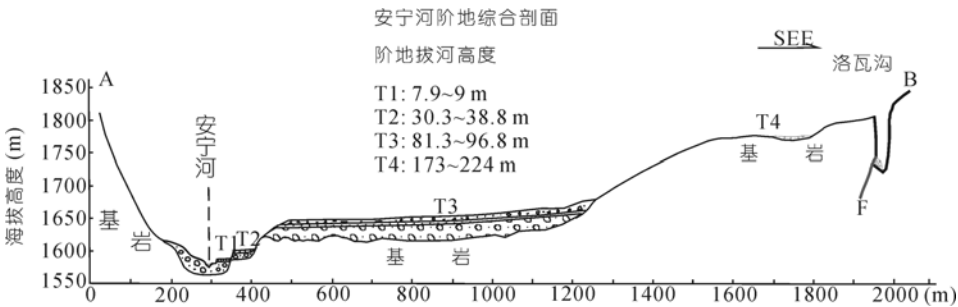


图 2 冕宁泸沽镇附近安宁河河流阶地综合剖面图

图中 T1~T4 分别代表 I ~Ⅳ级阶地, 阶地基座为早更新世昔格达组

表 1 冕宁县泸沽镇安宁河阶地光释光样品测试结果^{a)}

送样编号	埋深(m)	测量技术	剂量率(Gy/ka)	等效剂量(Gy)	年龄(ka)	实验室评估
LGTLT1-1	0.7	SMAR 细颗粒石英 OSL	4.8±0.5	34.2±0.5	7.2±0.7	较可靠
LGTLT1-2	0.9	SMAR 细颗粒石英 OSL	4.8±0.5	40.6±1.3	8.5±0.9	仅供参考
LGTLT2-1	0.7	SMAR 细颗粒石英 OSL	5.8±0.6	268.2±13.7	46.1±5.2	仅供参考
LGTLT2-2	1.2	SMAR 刻蚀后细颗粒混合矿物 Post-IR OSL	6.8±0.6	>400	>100	仅供参考
LGTLT3-1	1.5	SMAR 刻蚀后细颗粒混合矿物 Post-IR OSL	4.4±0.4	72.2±3.6	16.5±1.8	较可靠
LGTLT3-2	3.5	SMAR 细颗粒石英 OSL		>300		建议不使用

a) 样品由中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室测试

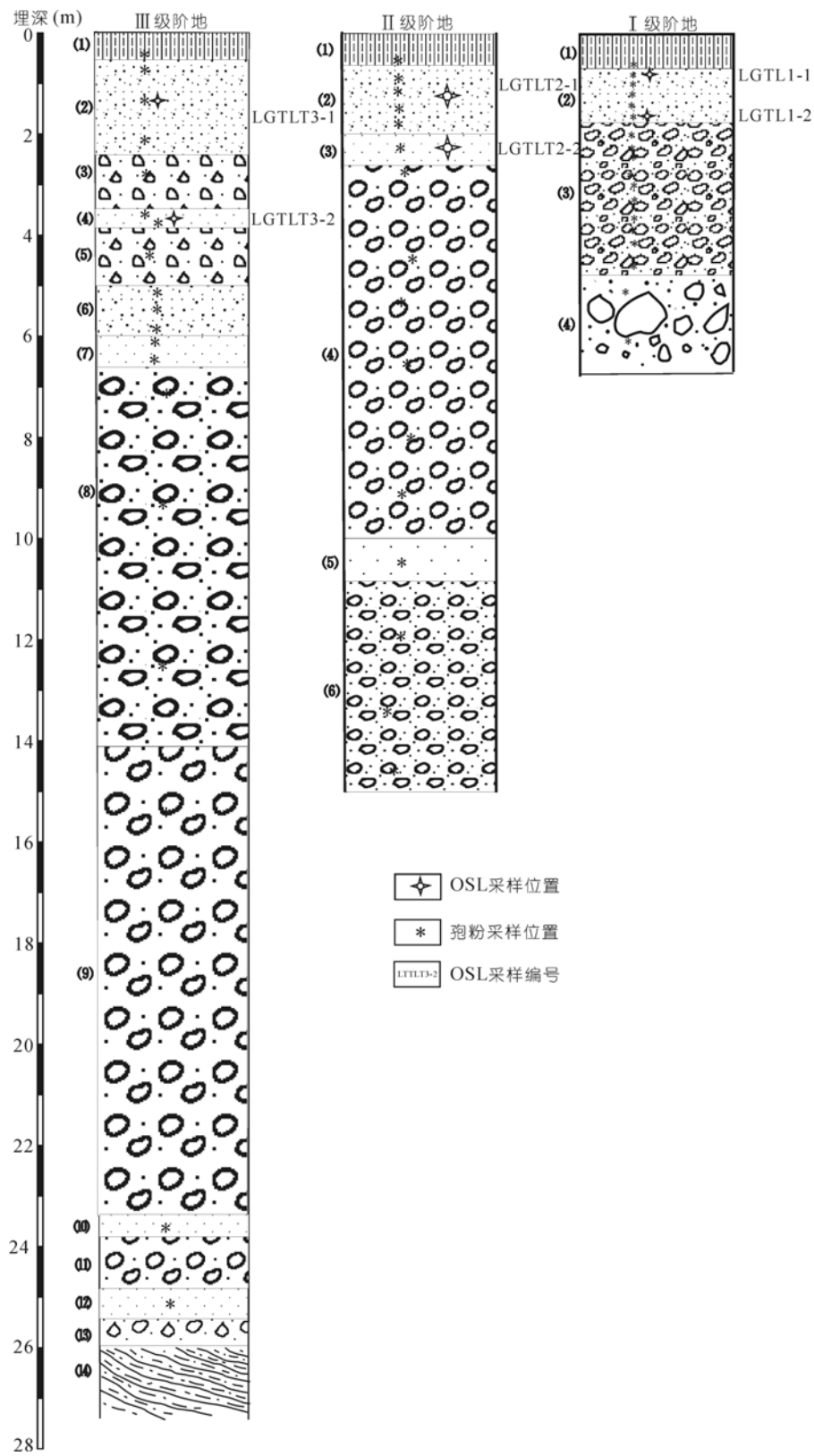


图3 安宁河 I~III级阶地剖面及其采样位置

别样品少于 100 粒. 整个剖面孢粉采样共发现 48 个科属花粉, 其中木本植物花粉主要有松属 *Pinus*, 冷杉属 *Abies*, 铁杉属 *Tsuga*, 桦属 *Betula*, 桤木属 *Alnus*, 胡桃属 *Juglans* 等; 灌木及草本植物花粉主要有蒿属 *Artemisia*, 藜科 *Chenopodiaceae*, 莎草科 *Cyperaceae*, 禾本科 *Gramineae* 等; 蕨类植物孢子主要有水龙骨科 *Polypodium*, 水龙骨科 *Polypodiaceae*, 环纹藻属 *Concentricyates* 等.

3.2 阶地孢粉组合特征及古气候环境分析

3.2.1 泸沽 I 级阶地剖面堆积时期的古气候环境分析

泸沽 I 级阶地剖面的孢粉组合特征是: 乔木植物花粉多, 平均占总数的 80.1%, 其中又以平均占总数 62.1% 的松花粉较多, 还有依次分别平均占总数 5.2%, 5.7% 及 3.5% 的铁杉、冷杉及桦花粉; 灌木及草本植物花粉较少, 平均占总数的 11.2%, 其中又以分别平均占总数 4.1% 及 2.6% 的蒿及莎草科花粉较多; 蕨类植物孢子少, 平均占总数的 8.7%, 其中又以平均占总数 4.0% 的水龙骨科孢子较多.

根据阶地的孢粉组合特征, 可推知在该阶地剖面堆积时期主要植物种类的数量: 乔木植物多, 为灌木及草本植物和蕨类植物数量总和的 4 倍, 且于其中又以温性可占各类植物总数 3/5 的针叶裸子植物松较多, 还有合计可占各类植物总数 1/7 的性喜暖湿、湿润及凉湿环境的针叶裸子植物铁杉、冷杉及阔叶被子植物桦; 灌木及草本植物和蕨类植物均较少及少, 合计仅占各类植物总数的 1/5, 且于其中主要又以合计可占各类植物总数 1/8, 适生温性及温湿性环境的蒿及莎草科等草本植物和水龙骨科等蕨类植物较多. 据这样的各类特性植物及组成可以推论, 该阶地沉积时期的植被以针叶裸子植物松为主组成的常绿针叶林, 气候温和及较湿或轻湿.

3.2.2 泸沽 II 级阶地剖面堆积时期的古气候环境分析

泸沽 II 级阶地剖面的孢粉组合特征是: 乔木植物花粉较多, 平均占总数的 70.6%, 其中又以平均占总数 55.1% 的松花粉较多, 还有依次分别平均占总数 7.1%, 3.7% 及 2.9% 的冷杉、铁杉及桦花粉, 且于该阶地的 5.6 m 处冷杉花粉可占总数的 20.9%; 灌木及草

本植物花粉较少, 平均占总数的 20.6%, 其中又以分别平均占总数 4.2% 及 9.8% 的蒿及藜花粉较多; 且于该阶地的顶部(0.8~1.8 m)及上部(0.5~5.6 m)灌木及草本植物花粉分别可占总数的 58.7% 及 33.1%; 蕨类植物孢子少, 平均占总数的 8.8%, 其中又以平均占总数 3.0% 的水龙骨科孢子较多.

根据阶地中的各类植物孢粉的含量, 可推知其时各类植物的数量; 乔木植物较多, 但少于 I 级阶地, 可占各类植物总数的 2/3 余, 且于其中又以可占超各类植物总数 1/2 的针叶裸子植物松较多, 还有合计可占各类植物总数 1/7, 习性凉湿、湿润及暖湿环境的针叶裸子植物冷杉、铁杉及阔叶被子植物桦, 且冷杉在该阶地的 5.6 m 深处的样中可占各类植物总数的 1/5; 灌木及草本植物较少, 但多于 I 级阶地, 可占总数的 1/5, 且于其中又以可占各类植物总数 1/6 适生温湿及温性环境的藜、蒿及禾本科等草本植物较多, 且在该阶地的顶部(0.8~1.8 m)及上部(0.5~5.6 m), 这类植物(灌木及草本植物)合计分别可占各类植物总数的 1/3 及 3/5; 蕨类植物少. 据这样的各类性质植物及构成, 可以推测: 该阶地顶部(0.8~1.8 m)及上部(0.5~5.6 m)沉积时期的植被, 分别属森林草原及森林或森林草原, 气候温和或温凉轻爽或轻润; 中部至下部(5.6~18.0 m 或 7.5~18.0 m)沉积时期的植被, 属以松为主的常绿针叶林, 气候温和及较湿或轻湿. 据该阶地的一些好暖湿及温湿的桦、桤及胡桃和榆等阔叶被子植物, 在该阶地中无论种类及数量均明显少于 I 级阶地, 也可说明在该阶地沉积时期的温度及湿度均比 I 级阶地时低, 同时还可看出, 在该阶地沉积时期无论植被和气候也曾出现过两次以上比较明显的变化及波动.

3.2.3 泸沽 III 级阶地剖面堆积时期的古气候环境分析

泸沽 III 级阶地剖面的孢粉组合特征是: 乔木植物花粉多, 平均占总数的 82.4%, 其中又以平均占总数 64.9% 的松花粉较多, 还有分别平均占总数 6.7% 及 6.3% 的冷杉及铁杉花粉, 且于该阶地深 12.5 m 处冷杉花粉可占总数的 18.1%; 灌木及草本植物花粉较少, 平均占总数的 10.3%, 其中又以分别平均占总数 2.9%, 1.8% 及 1.7% 的蒿、莎草科及禾本科花粉较多; 蕨类植物孢子少, 平均占总数的 7.3%, 其中又以平均占总数 4.1% 的水龙骨科孢子较多.

该阶地各类植物孢粉含量的分析,可推知在阶地剖面沉积时期各类植物的数量:乔木植物多,多于 II 级阶地,可占灌木及草本植物和蕨类植物数量之和的 4 倍半,且于其中又以可占不足各类植物总数 2/3 的针叶裸子植物松较多,还有合计可占不足各类植物总数 1/7 的针叶裸子植物铁杉、冷杉及阔叶被子植物桦,在该阶地中喜暖湿及温湿的桦、栎、胡桃及榆等阔叶被子植物,无论种类及数量亦均明显比 I 级阶地时少;灌木及草本植物和蕨类植物均较少及少,合计仅占不足各类植物总数的 1/6,且于其中又以蒿、莎草科及禾本科等草本植物和水龙骨属等蕨类植物较多。据这样的各类植物构成及性质,可以推论,该阶地沉积时期的植被应属以松为主森林型的常绿针叶林,气候温和较湿或轻湿。看来该阶地堆积时期的温度及湿度均比 II 级阶地时高,但又均比 I 级阶地时低。

由以上分析可知,阶地堆积时期的温度和湿度相对从大到小的顺序是: I 级阶地大于 III 级阶地,而 III 级阶地大于 II 级阶地。从全球气候变化背景来分析,安宁河流域 I~III 级阶地孢粉采样分析结果与全球气候的冷-暖变化及湿度变化有一定的相似性。

4 安宁河河谷阶地成因分析与讨论

4.1 河流阶地成因解析

河流阶地以地貌和沉积物的方式记录了河流系统行为和过程对内因和外因变化的响应情况^[28]。较长时间尺度的古气候研究表明,第四纪是一个气候呈周期性波动的时期,在高山区表现为垂直气候-植被带的上下迁移,而植被带的变化又可通过河流径流量和沉积物通量的变化反映出来。同时第四纪还是一个构造活动频繁且较为强烈的时期,而多级河流阶地正是这些构造活动的一种表现形式^[29,30]。虽然河流阶地及其相关沉积物通量常被看作是古环境和活动构造研究的一种重要途径。但无论是用河流阶地来反映古气候变化,还是用于构造抬升方面的研究,都涉及到一个至关重要的问题,即河流阶地及其沉积物的形成过程和驱动机制问题。

目前国内外学者对于河流阶地的成因已进行过较为深入的探讨^[10,29-33],具有代表性的成因模式主要有构造模式、气候模式、构造-气候旋回模式。其中构造模式认为,河流阶地的发育主要受控于构造抬

升,气候变化只起一定的调节作用,阶地发育时间并不与特定的气候状态严格对应。气候模式源于对第四纪以来构造相对稳定区河流阶地的研究,其阶地的形成归因于气候的旋回变化。构造-气候旋回模式认为,河流阶地是在构造运动和气候变化共同作用下形成的,导致河流下切的构造抬升和河流加积的构造稳定时期分别与气候转为暖湿的间冰期和干冷的冰期之间存在着紧密的关系。由于抬升速率和抬升形式(比如持续抬升和间歇性抬升)的不同,受气候控制河流加积和下切的表现形式也存在差异(图 4)。对于相对稳定的地区(图 4, I),近似平行的河流沉积物和介于其间的下切过程代表了冰期和间冰期气候旋回,次一级的气候波动(冰阶-间冰阶)则表现为较小规模的河床加积和下切;在垂直构造运动较强烈的区域内(图 4, III),河谷一般较狭窄,形成的阶地以宽谷型阶地为主,且级数较多,阶地基面之间的垂直高差较大,这反映了河谷较高的下切速率;小尺度的气候变化表现为一系列有少量沉积物覆盖或裸露的侵蚀型阶地,对于介于 I 和 III 之间的情形 II,阶地以加积型为主,宽谷面上覆的阶地沉积物较厚,其中可能夹杂着代表冷期的冰缘堆积物或坡积物,阶地之间的高差较情形 III 要小,次级气候波动可形成规模较小的加积-切割型阶地和加积(堆积)型阶地。上述几种类型的阶地成因只是简单的概念模式,实际的河流阶地形态要复杂得多。比如,对于持续抬升且抬升速率非常高的地区,河谷可能主要表现为下切形式,气候的周期性变化对它的影响则难以体现出来^[29-31],这也可能是大部分地区实际阶地级数远远少于气候的冰期-间冰期旋回的一个原因。单一的间歇性构造抬升,即使没有气候变化等其他因素作用也能形成阶地,每级阶地的下切过程有时可能需要多个冰期-间冰期旋回才能完成,阶地的沉积物也可能由多个冰期-间冰期堆积完成。

4.2 安宁河河谷阶地成因初探

Starkel^[30]根据中欧地区河流阶地的研究成果给出了识别气候变化成因阶地的一些标志。例如,各级阶地之间的高差应该较小,砾石层属加积类型,一般具有多个二元结构,沉积砾石中多见坡积物与砾石层交错互层,阶地的底部经常是倾斜状的等。野外调查发现安宁河阶地不具备上述特征,即:气候变化不是安宁河阶地成因的主因素。分析如下:

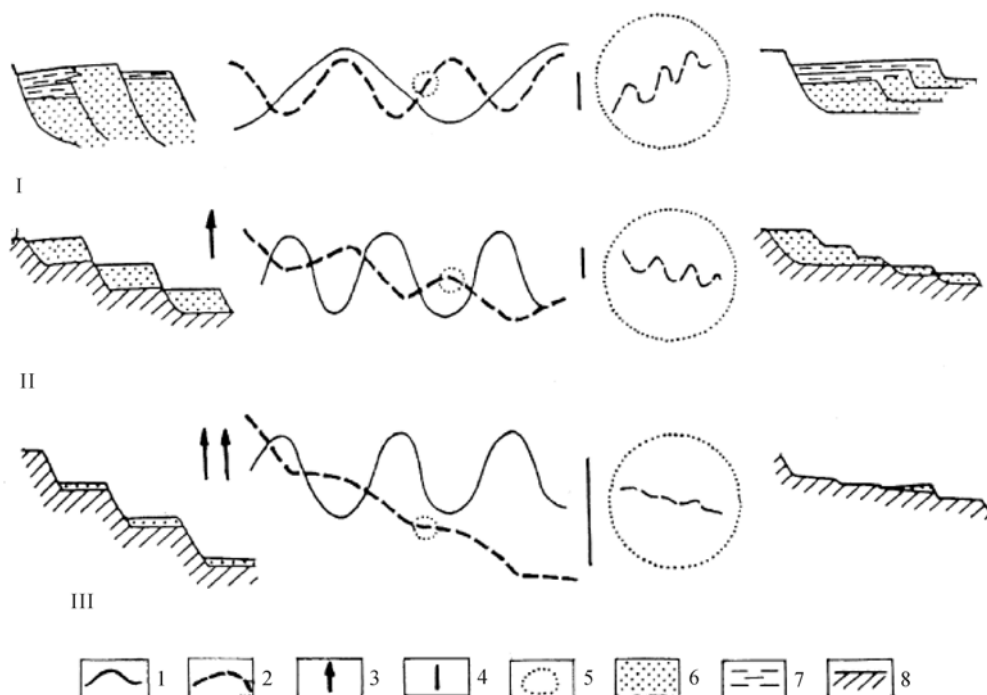


图 4 构造上升区域内河流系统对第四纪气候旋回的响应模式

据Starkel^[29,30]. I. 构造稳定区域内的气候旋回; II. 轻微构造抬升区域内的状况; III. 强烈构造上升区域内的状况; 左列表示典型的阶地序列; 左二列表示冰期-间冰期旋回(向下表示冷期; 向上表示暖期)与河道下切(向下)-加积(向上)交替变化的耦合情况; 右二列表示曲线的放大部分; 右列表示反映次级气候旋回的阶地序列. 1. 温度变化曲线; 2. 沉积物通量变化曲线; 3. 构造抬升趋势; 4. 垂直变化比例; 5. 曲线的放大部分; 6. 河流相沉积物; 7. 河漫滩相沉积物; 8. 基岩

从安宁河Ⅲ级阶地的剖面特征来看(图 3), 剖面由 3 部分组成, 上层位为洪积扇堆积层, 厚度约 5 m, 中层为河流相堆积, 厚度约 21 m, 具备完整的二元结构, 下层为昔格达组的基座, 这种结构的阶地一般认为是以构造抬升为主要因素形成的, 而砾石层中加细砂层表明在Ⅲ级阶地形成过程中已可见气候波动的痕迹. 从全球气候变化的背景来分析, Ⅲ阶地形成时期在末次冰期, 该时期气候变化相对较小, 阶地堆积时期和下切形成阶地时气候表现为温和较湿, 在阶地形成的过程(即堆积-下切-阶地面形成)中, 受气候变化影响较小, 也就是说Ⅲ级阶地形成不是受冷暖变化引起植被变化、降雨增大使水动力增强而河流下切形成的, 而是主要受构造运动背景的控制, 从而使构造抬升引起河流下切才形成的Ⅲ级阶地.

安宁河Ⅱ级阶地为堆积阶地或基座阶地, 局部Ⅱ级阶地可见基座, 具备一个完整的二元结构, 砾石层厚度约 12 m(图 3). 从全球气候变化背景来分析, Ⅱ级阶地是在末次冰盛期堆积, 此时该区气候温凉、

轻湿, 随着寒冷程度加强, 植被覆盖度减小, 它与越来越强的冻融作用相结合, 使得进入河流的沉积物越来越多. 这些沉积物主要由间冰期风化产生的细颗粒物质和冻融作用产生的粗颗粒物质组成; 较高的沉积物通常与较小的河流径流量结合可引起河流堆积^[31], 随后气候由末次冰期向间冰期过渡, 气候转暖, 水动力增强, 河流下切形成阶地, 同时晚更新世是青藏高原抬升的加速期, 由此构造抬升为Ⅱ级阶地形成提供了下切的潜力.

安宁河Ⅰ级阶地为堆积阶地, 剖面结构具有二元结构特征(图 3), 砾石层厚度约 5 m. 该阶地形成是在气候由冷-暖的变化过程中形成的, 堆积时期气候温和较湿, 只是在全新世开始时, 全球大暖期来临, 河流水动力加强, 引起河流下切, 进而形成了Ⅰ级阶地. 在Ⅰ级阶地的形成过程中, 其构造抬升背景为阶地提供了下切的潜力.

由上分析可知, 从安宁河河流阶地形成时期的气候波动来判断, 河流阶地的形成并不完全与气候

的冷暖变化有严格的对应关系,同时安宁河流域由于受第四纪构造运动的影响,因此没有像青藏高原内部那么强烈,属于一般的构造抬升区,从这种意义上分析,安宁河河流阶地形成不但与构造运动有关,而且与气候变化的驱动有联系,特别是 I 和 II 级阶地形成符合 Starkel 给出阶地成因的第二种模式(图 4),而 III 级阶地形成时期气候相对较为稳定,晚更新世是青藏高原抬升的加速期,因此 III 级阶地形成符合 Starkel 给出阶地成因的第三种模式(图 4)。

综上所述,纯粹用单一的构造模式或气候模式很难准确解释安宁河 I~III 级阶地结构和形成时期的气候变化。因为受单一气候变化制约的河流地貌发育模式可以解释河流的反复堆积-侵蚀过程,但它难以解释形成安宁河多级阶地的逐步(或间歇性)下切过程。由此推断安宁河流域多级阶地的形成一定同时受到构造抬升和气候变化的制约。在冰期时,进入河道的搬运物质增加和河流径流量搬运能力减小而产生的抵抗能可能超过由构造抬升引起的河流梯度增加而产生的驱动能,最终导致河谷发生堆积;在冰期-间冰期过渡时段,当河流径流量增加,进入河谷的搬运物质减少,驱动能超过抵抗能时,构造抬升的效应才能释放出来,引起河谷发生下切,如安宁河 II 级阶地就是在全球气候变化冰盛期背景下堆积的,在冰期-间冰期的过渡时期,水动力增强,河流发生下切形成了 I 和 II 级阶地,同时阶地结构也证明,安宁河 III 级阶地(基座阶地)形成时受构造运动的影响要大于 I 和 II 级阶地的形成。

5 结论与讨论

川西安宁河流域 I~III 级阶地的形成,反映了青藏高原构造抬升运动对青藏高原边缘地区的影响,是对青藏高原构造抬升运动的响应。古气候变化并非安宁河阶地成因的主要因素,只是为安宁河阶地

的形成起到了调节作用,并且表现在不同时期气候对阶地形成的影响程度不同。

通过对安宁河河谷阶地孢粉记录的古气候变化特征分析,结果表明,气候的冷暖变化与阶地的形成并无严格的对应关系,同时野外调查发现阶地结构并无明显的气候阶地特征,这就说明安宁河河流阶地的形成主要受区域构造抬升因素的影响,即在阶地形成时期,气候的旋回(冷暖变化)对阶地的形成只起了调节的作用,气候变化对 I 和 II 级阶地影响较大,而对 III 级阶地影响甚微。可见在构造运动频繁的背景下,构造运动是内陆河流阶地形成的驱动力,而气候变化则是这个驱动力的调节剂。构造抬升使安宁河河流具有了强烈下切的潜能,只是在冰期时负载增加,这种下切的潜能没有被完全释放出来或根本没有释放,河流以侧蚀拓宽河谷为主,堆积了砾石层,当间冰期到来时,气候变暖,雨量充沛,植被茂盛,水量增大和负载减少使得构造抬升造成的河流下切潜能充分释放出来,进而使得冰期形成的宽阔河漫滩高出洪水位以上而形成阶地。

安宁河流域构造抬升速率与河流下切速率之间的关系探讨。理论上每一个冰期-间冰期旋回或间歇性的构造抬升都能形成一级阶地,但实际上河流阶地沉积物的堆积和形成阶地的下切过程可能由构造抬升运动和多个冰期-间冰期旋回(或冷-暖变化)来共同完成,这也可能是实际观察到的阶地级数与其它沉积物记录的冰期-间冰期旋回数不一致的原因。由于受下切过程的滞后效应、侵蚀和冰川均衡抬升、河谷的侧向侵蚀过程等诸多因素影响,山地的构造抬升与河谷下切之间并非一种简单的线性关系,目前还没有理想的方法分离出构造因素与气候因素所占的定量比例关系。在活动构造定量研究中,应当慎用河谷的下切速率来代表山地的抬升速率^[34]。因此笔者认为用阶地的拔河高度和形成时代来计算区域构造活动的隆升速率存在一定的误差。

致谢 冉勇康研究员对本文提出了非常好的建议,官会玲硕士参与了本文的部分野外工作,评审专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并致谢。

参考文献

- 1 Tyracek J. Upper Cenozoic fluvial history in the Bohemian Massif. *Quat Int*, 2001, 79: 37—53
- 2 Van Balen R T, Houthast R F, Vander Wateren F M, et al. Sediment budget and tectonic evolution of the Ardennes and Roe valley rift

- system. *Glob Planet Change*, 2000, 27: 113—129
- 3 Maddy D, Bridgland D, Westaway R. Up lift-driven valley incision and climate-controlled river terrace development in the Thames Valley, UK. *Quat Int*, 2001, 79: 23—36
 - 4 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: 229—237
 - 5 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究. *科学通报*, 1998, 43: 1569—1574
 - 6 Schumm S A. *The Fluvial System*. New York: Wiley, 1977. 338
 - 7 Vandenberghe J. Timescale, climate and river development. *Quat Sci Rev*, 1995, 14: 631—638
 - 8 Li J J, Fang X M, Van de Voo R, et al. Magnetostratigraphic dating of river terraces: Rapid and intermittent incision by the Yellow River of the northeastern margin of the Tibetan Plateau during the Quaternary. *J Geophys Res*, 1997, 102: 10121—10132
 - 9 Bridgland D R. River terraces system in north-west Europe: an archive of environmental change uplift and early human occupation. *Quat Sci Rev*, 2000, 19: 1293—1303
 - 10 杨景春, 李有利, 编. *地貌学原理*. 北京: 北京大学出版社, 2005. 20—56
 - 11 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起. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 26: 316—322
 - 12 侯元才, 许伟林, 俞见, 等. 青藏高原东北缘 1.2 Ma BP 以来各阶段古气候演变. *青海地质*, 2001(增刊): 10—16
 - 13 侯康明, 邓起东, 刘百箴. 冬青顶背斜的变形形式/变形幅度及形成机理. 见: 汪一鹏. *活动断裂研究(6)*. 北京: 地质出版社, 1998. 188—196
 - 14 郑文涛, 杨景春, 段锋军. 武威盆地晚更新世河流阶地变形与新构造活动. *地震地质*, 2000, 22: 318—328
 - 15 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: 855—864
 - 16 常宏, 张培震, 安芷生, 等. 昆仑山北坡鸭子泉河阶地发育及其构造-气候意义. *科学通报*, 2005, 50: 912—917
 - 17 张岳桥, 杨农, 孟晖, 等. 四川攀西地区晚新生代构造变形历史与隆升过程初步研究. *中国地质*, 2004, 31: 21—33
 - 18 Wu G, Xiao X, Li T, et al. Lithospheric structure and evolution of Tibetan Plateau: The yadong Golmud geosciences transect. *Tectonophysics*, 1993, 219: 213—221
 - 19 许志琴, 侯立纬, 王宗秀, 等. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社, 1992. 137—169
 - 20 国家地震局西南烈度队. 川滇强震区地震地质调查汇编. 北京: 地震出版社, 1979. 92—103
 - 21 王新民, 张成贵, 裴锡瑜. 安宁河断裂的新活动性. *四川地震*, 1998, (4): 13—33
 - 22 唐荣昌, 韩渭斌, 俞维贤, 等. 四川活动断裂与地震. 北京: 地震出版社, 1993. 237
 - 23 李兴唐, 许学汉, 黄鼎成, 等. 渡口-西昌区域河流冲积层¹⁴C年龄与断裂活动最新地质年代研究. *地质科学*, 1984, 58: 262—275
 - 24 许学汉, 裴静娴. 渡口-西昌区域第四系形成与新构造运动的热发光年龄及发展史研究. *地质科学*, 1987, 61: 374—383
 - 25 王书兵. 川西中部晚更新世地层与环境. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 2004. 24—38
 - 26 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33: 151—162
 - 27 何宏林, 池田安隆. 安宁河断裂带晚第四纪运动特征及模式的讨论. *地震学报*, 2007, 39: 537—550
 - 28 Schumm S A, Mosley M P, Weaver W E. *Experimental Fluvial Geomorphology*. New York: Wiley Interscience, 1987. 11—58
 - 29 Starkel L. Long-term and short-term rhythmicity in terrestrial landforms and deposits. In: Rampino M R, et al, eds. *Climate: History Periodicity and Predictability*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987. 323—332
 - 30 Starkel L. Climatically controlled terraces in uplifting mountain areas, *Quat Sci Rev*, 2003, 22: 2189—2198
 - 31 Maddy D. Up lifts driven valley incision and river terrace formation in Southern England. *J Quat Sci*, 1997, 12: 539—545
 - 32 Bull W B. *Geomorphic Response to Climatic Change*. New York: Oxford University Press, 1991. 1—326
 - 33 潘保田, 邬光剑, 王义祥, 等. 祁连山东段沙沟河阶地的年代与成因. *科学通报*, 2000, 45: 2669—2675
 - 34 许刘兵, 周尚哲. 河流阶地形成过程及其驱动机制再研究. *地理科学*, 2007, 27: 672—677