

# 应用“构造-气候旋回”年代学方法确定 河流阶地形成时代的初步研究

刘小凤, 刘百篪

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**应用“构造-气候旋回”年代学方法确定了祁连山地区河流阶地形成时代和抬升速率, 探讨了应用该方法确定阶地形成时代的可能性. 结果表明: 应用该方法确定河流阶地形成时代基本可行, 只是对于低级阶地形成时代的拟合结果需用实测值来校正. 第四纪以来祁连山地区的构造抬升呈间歇性, 经历了4个较强烈的构造抬升期.

**关键词:**构造-气候旋回; 年代学; 祁连山地区; 河流阶地

**中图分类号:** P315.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0844(2001)04-0395-09

## 0 引言

到目前为止, 确定河流阶地等层状地貌形成时代的方法主要有 $^{14}\text{C}$ 、热释光、古地磁极性倒转法以及电子自旋共振、裂变径迹和砾石钙膜等方法. 这些方法定年精度高, 但受测年时段和采样误差的影响, 所得结果有时相差较大, 导致对许多地质事件的解释出现偏差. 为此, 我们引入了“构造-气候旋回”年代学拟合方法, 建立了河流阶地的拔河高度与形成年代之间的统计关系, 只要能确定阶地的高度, 即可获得其大致的形成年代, 同时利用古土壤层中的古地磁年龄进行校对, 这样就避免了不同人员, 不同时间, 不同样品, 不同方法所造成的误差. 对于无法采集到用于测年的合适样品的地区, 这一方法尤为适用. 本文以祁连山地区为例, 用“构造-气候旋回”年代学方法确定了河流阶地的形成时代.

## 1 “构造-气候旋回”年代学方法简介

“构造-气候旋回”<sup>[1]</sup>是基于第四纪时期全球气候变化与海平面波动的关系提出的. 一般认为第四纪时期海平面的波动在全球范围内具有一致性. 引起该时期海平面变化的主导因素是气候的冷暖变化. 当气候变冷时(冰期)大量的水在全球范围内以陆冰形式储存, 这时海平面就会下降. 当气候变暖时(间冰期)冰雪消融, 海平面就会上升. 因此, 可以根据第四纪以来海平面波动曲线来反推不同时期海岸阶地的形成时代(图1).

海平面的变化与深海钻孔中氧同位素变化曲线十分吻合, 冰期来临时海平面下降与 $\delta^{18}\text{O}$ 负值的减小趋势一致. 所以 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化可以反映海岸阶地的发育过程. 与海岸阶地一样, 内

收稿日期: 2000-11-13

基金项目: 国家重点基础研究项目(95-13-01-04); 中国地震局“九五”重点课题(95-04-10-03)

中国地震局兰州地震研究所论著编号: IC2001041

作者简介: 刘小凤(1965-), 女(汉族), 甘肃宁县人, 副研究员, 主要从事地震地质方面的研究.

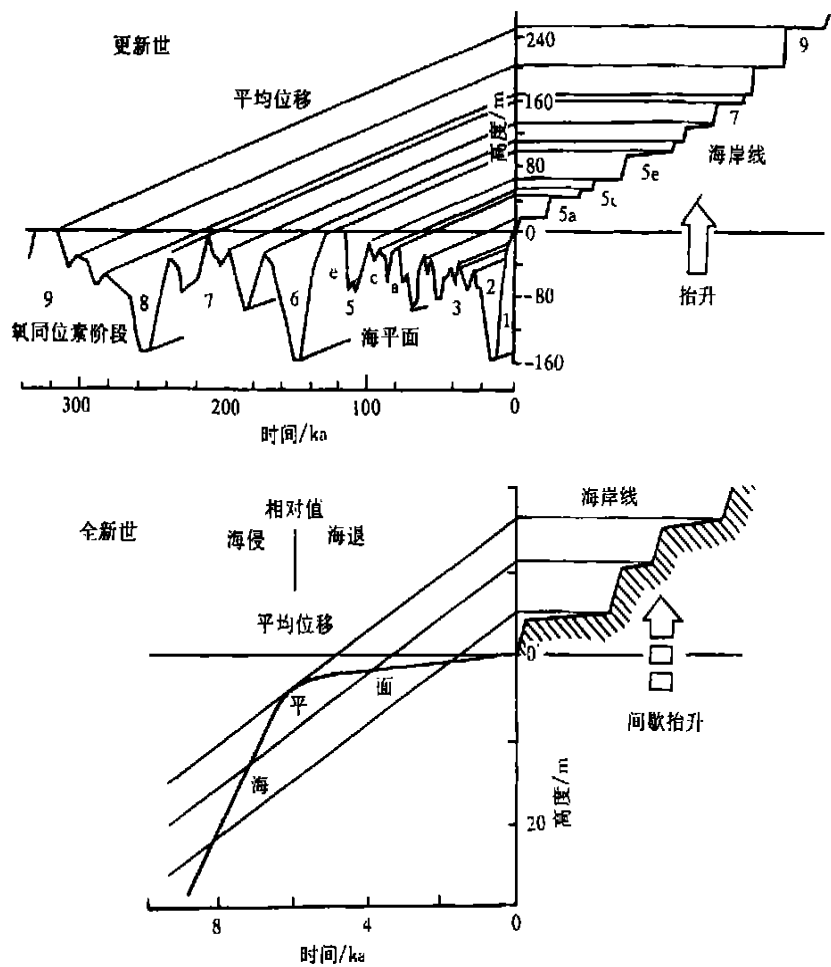


图 1 第四纪海平面的波动和海岸线的形成<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Changes of Quaternary period sea-level and origin of strandlines.

陆河流阶地的形成也受控于构造抬升和气候旋回 2 个因素的联合作用. 不同之处是海岸阶地的下切主要发生在冰期后半期, 而陆地河流阶地的下切则发生在暖期的后半期. 所以气候变暖时期  $\delta^{18}\text{O}$  值的变化趋势可以反映河流阶地的发育过程.

第四纪气候的冷暖交替变化除了造成海平面波动外, 还在陆地上形成了发育在黄土地层中的古土壤层. 许多地区在间冰期时以土壤发育为主, 冰期时则以沉积、侵蚀和坡地堆积为主, 因此黄土—古土壤序列保存了气候变化的信息. 根据黄土—古土壤序列、古土壤磁化率及黄土粒度曲线即可确定相应时期沉积物的形成时代.

近年来对黄河阶地形成年代和黄土剖面的对比研究表明<sup>[2, 3]</sup>, 黄土中古土壤层的年龄与黄河阶地的形成年龄具有极好的对应关系, 而且可以和深海氧同位素, 极地冰岩心等反映的全球气候冷暖变化对比. 我们在老虎山地区所测的阶地年龄和古土壤年代与兰州九州台黄土剖面中的古土壤层也有很好的对应关系<sup>[4, 5]</sup>.

“构造-气候旋回”年代学拟舍方法是在假定河流阶地所在地区最高一级阶地形成以来以稳定速率抬升的基本前提下, 确定河流阶地形成时间的上限, 然后在反映气候变化的深海钻孔氧同位素变化曲线选取对应的时段, 并按照阶地级序和拔河高度与  $\delta^{18}\text{O}$  反映气候变暖的峰值

年代进行线性拟合, 选取相关系数最高的年代为阶地下切的年代, 获得不同阶地的形成时代与阶地拔河高度的统计关系. 根据前人资料, 陇西盆地最早的河流下切时代为  $163 \times 10^4 \text{ a}^{[6]}$ , 中祁连地区大体为  $15 \times 10^4 \text{ a}^{[7]}$ . 在本文的研究中以这 2 个时间作为祁连山地区河流阶地形成时间的上限控制线.

## 2 祁连山地区河流阶地发育特征

该地区发育的主要河流有疏勒河、洪水坝河、北大河、东大河、黑河、梨园河、黄羊河和黄河等(图 2). 这些不同级别的河流的阶地级数、高度和形成时代存在较大差异, 但是它们的流向均为 NE 向, 垂直于 NW 走向的祁连山脉, 因此可以较好地记录祁连山地区构造抬升的各种信息.

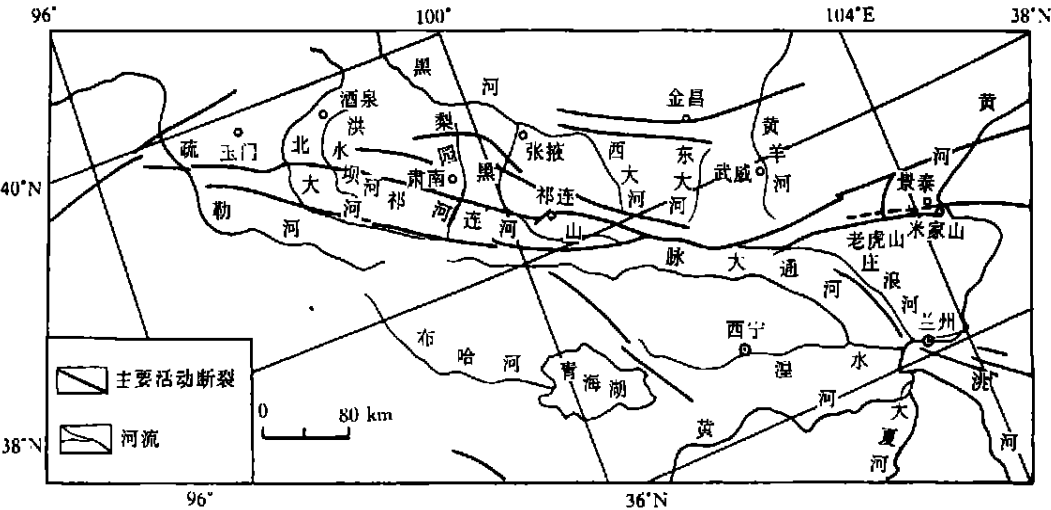


图 2 祁连山地区河流分布及主要活动断裂  
Fig. 2 Distribution of rivers and main active faults in Qilianshan region.

黄河穿越祁连山东段, 河流阶地分布广泛, 在兰州盆地内黄河两岸共发育了 7 级阶地, 以基座阶地为主, 拔河高度分别为: 10、25、70、140、200、230 和 330 m, 形成时代分别为: 0.01、0.05、0.15、0.6、1.2、1.5 和  $1.6 \text{ Ma}^{[6]}$ , 从阶地的平均分布来看, 在  $T_3$ 、 $T_4$  和  $T_7$  阶地形成后, 黄河的下切是最显著的. 黄河米家山段共发育 21 级阶地, 均为基座阶地, 基座为  $D_{1-2}$  深褐色底砾岩或砂岩, 上覆黄河冲积砾石层, 多数阶地顶部砾石层遭受剥蚀, 残留砾石层厚度为 1~3 m. 在剖面底部  $T_3$  阶地上所采样品的热释光年龄为: 0.05 Ma. 剖面顶部为甘肃准平原面, 之下的最高级阶地拔河 450~500 m, 与陇西盆地的区域环境相比, 其形成时代大约为  $160 \times 10^4 \text{ a}$ .

黄羊河位于祁连山中段, 发源于祁连山地, 垂直山脉向 NE 流入武威盆地, 一般发育 5~7 级连续性较好的基座阶地. 由于 NW 向冷龙岭活动断裂的运动, 使河流阶地发生了断错变形. 断裂以南阶地变形幅度较大, 受冲沟侵蚀强烈, 多数高级阶地地面残缺不全, 上覆 1~3 m 厚的砾石层, 无黄土. 断裂以北阶地地面变形轻微, 呈缓坡状, 上覆砾石层及黄土明显增厚. 最高阶地拔河 225 m, 形成于  $110.3 \pm 8.7 \text{ ka}^{[1]}$ , 相当于晚更新世早期, 反映了河流的形成时代大约在中更新世晚期至晚更新世早期.

① 侯康明. 1927 年古浪 8 级大震的发震构造条件、形成机制及区域动力学环境的演化过程研究. 1996. 学位论文.

东大河位于武威盆地西缘, 共发育 7 级阶地, 以基座为主. 根据区域对比资料, 其最高级阶地形成于  $150\text{ ka}^{[7]}$ .

梨园河位于张掖盆地肃南县境内, 发源于祁连山. 在肃南山间盆地梨园河发育 7 级阶地, 在梨园小口只有 5~6 级阶地, 除  $T_1$  外均为基座阶地. 最高级阶地形成于  $446.97\text{ ka}^{[7]}$ .

祁连山西段酒泉盆地和玉门盆地内发育的洪水坝河和北大河由于祁连山北麓山前地带强烈的构造运动, 使河流下切, 形成峡谷, 在河两岸形成多级阶地, 在酒泉盆地内的洪积台地上洪水坝河发育 15 级阶地, 在洪积扇后缘发育 5~6 级阶地, 在盆地内的平坦地区没有阶地发育. 除  $T_1$  为堆积阶地外, 其余均为基座阶地,  $T_3$ ,  $T_6$ ,  $T_8$ ,  $T_{11}$  和  $T_{14}$  级阶地发育广泛, 阶地面延伸性好, 砾石层厚度大, 形成时代分别为  $30.10 \pm 7.22\text{ ka}$ ,  $42.87 \pm 13.72\text{ ka}$ ,  $69.23 \pm 5.54\text{ ka}$ ,  $98.15 \pm 6.87\text{ ka}$  和  $143.27 \pm 14.33\text{ ka}$ , 表明洪积台地是在中更新世晚期才开始大规模抬升的<sup>[7]</sup>. 北大河在玉门盆地内的洪积台地上发育了 12 级阶地, 在洪积扇带发育 5 级阶地, 到盆地边缘发育 4 级阶地, 以基座阶地为主.  $T_{12}$  形成时代为  $145.43 \pm 5.85\text{ ka}^{[7]}$ , 表明洪积台地上最早从  $150\text{ ka}$  开始发育阶地.

3 祁连山地区阶地形成时代及垂直抬升速率分析

黄河在米家山地区由南向北流, 其西侧为米家山隆升区, 东侧为哈思山隆升区, 因而大多数阶地表面遭受剥蚀, 使得阶地的二元结构被破坏, 只有发育较好的  $T_3$ ,  $T_5$ ,  $T_6$ ,  $T_7$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{15}$ ,  $T_{17}$  和  $T_{19}$  级阶地表面残留有 1~3 m 厚的冲积砾石层, 局部有薄层黄土覆盖. 这样一个典型的剖面却无法采集到用于测年的合适样品, 为了解这一区域的构造抬升过程, 我们采用了“构造-气候旋回”年代学方法. 用该方法拟合了黄河米家山段阶地变化与  $\delta^{18}\text{O}$  变化的关系(图 3). 已有的资料表明, 黄河兰州段最早形成于  $163 \times 10^4\text{ a}^{[2]}$ ; 黑山峡段最高级阶地形成于  $130 \times 10^4\text{ a}$ , 其顶部的准平原面形成时代为  $180 \times 10^4\text{ a}^{[9]}$ ; 中卫长流水黄河阶地砾石钙膜年龄为  $158 \times 10^4 \sim 160 \times 10^4\text{ a}^{[10]}$ ; 因此可以认为, 从兰州到中卫黄河阶地的下切最早始于  $163 \times 10^4\text{ a}$ . 根据区域地层对比结果, 黄河米家山段阶地之上的准平原面与兰州地区相当, 因此我们将该处最高级阶地的形成时代定为  $163 \times 10^4\text{ a}$ . 将  $163 \times 10^4\text{ a}$  作为控制点, 利用“构造-气候旋回”年代学方法拟合各级阶地的高度及所对应的古土壤层和氧同位素<sup>[11]</sup> 峰值, 得到各级阶地的下切时代, 见图 4 和

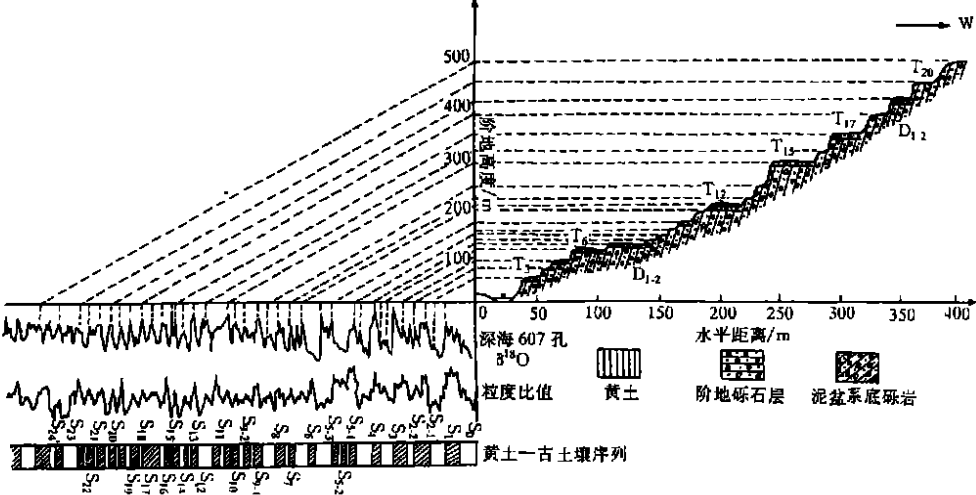


图 3 米家山黄河阶地与古气候变化的对应关系

Fig. 3 Corresponding relation between terraces of the Yellow river at Mijiashan and change of palaeoclimate.

表 1. 在表 1 中同时给出了根据形成时代及高度计算的阶地抬升速率。

为了检验“构造-气候旋回”年代学方法, 我们对祁连山中西段地区几条主要河流的阶地形成时代进行了拟合。选择发育于祁连山区的有代表性的 8 条河流, 这些河流的阶地资料相对完整, 且又有部分实测阶地年龄。采用合适的古土壤层序列和氧同位素阶段及粒度分析所揭示出的时间序列, 根据阶地高度来拟合其形成时代。只要较准确测定各级阶地的拔河高度, 即可获得对应的古土壤层位及相应的形成时代。所得结果见表 2。通过对 32 个阶地的实测年龄和拟合所得年龄的对比, 发现 I ~ II 级阶地拟合年龄与实测值的误差较大, 明显大于实测值, 其它各级阶地的拟合年龄与实测值较为接近。上述结果表明, 晚更新世晚期-全新世祁连山中西段地区气候变化不大, 阶地的下切主要与局部地区构造抬升有关。

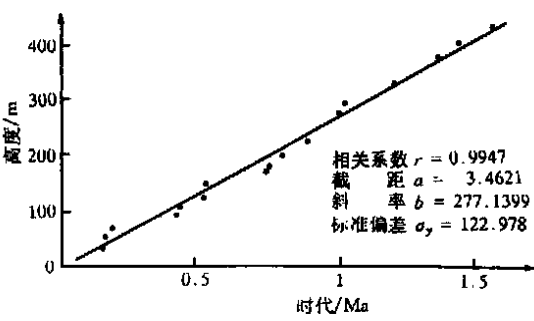


图 4 黄河米家山段阶地高度与下切时代的关系

Fig. 4 Heights and down-cutting ages of terraces of the Yellow river at Mijashan.

拟合所得年龄的对比, 发现 I ~ II 级阶地拟合年龄与实测值的误差较大, 明显大于实测值, 其它各级阶地的拟合年龄与实测值较为接近。上述结果表明, 晚更新世晚期-全新世祁连山中西段地区气候变化不大, 阶地的下切主要与局部地区构造抬升有关。

表 1 米家山黄河阶地参数

| 阶地              | 基座高度   |        | 砾石层厚/m | 阶面宽度/m | 古土壤层             | 年龄/<br>× 10 <sup>4</sup> a | 抬升速率<br>/[mm·a <sup>-1</sup> ] |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|------------------|----------------------------|--------------------------------|
|                 | 海拔高度/m | 拔河高度/m |        |        |                  |                            |                                |
| T <sub>3</sub>  | 1 375  | 35     | 1      | 12~15  | S <sub>2-1</sub> | 14.0                       | —                              |
| T <sub>4</sub>  | 1 395  | 55     | —      | 6~8    | S <sub>2-2</sub> | 14.9                       | 0.22                           |
| T <sub>5</sub>  | 1 410  | 70     | 2~3    | 15     | S <sub>3</sub>   | 18.0                       | 0.48                           |
| T <sub>6</sub>  | 1 435  | 95     | 1~2    | 30~35  | S <sub>4-2</sub> | 40.2                       | 0.11                           |
| T <sub>7</sub>  | 1 447  | 107    | 0.5    | 32~35  | S <sub>4-3</sub> | 41.3                       | 1.1                            |
| T <sub>8</sub>  | 1 455  | 115    | —      | 8~10   | —                | —                          | —                              |
| T <sub>9</sub>  | 1 466  | 126    | —      | 7~8    | S <sub>5-1</sub> | 48.8                       | —                              |
| T <sub>10</sub> | 1 475  | 135    | —      | —      | —                | —                          | —                              |
| T <sub>11</sub> | 1 490  | 150    | 2~3    | 10     | S <sub>5-3</sub> | 50.8                       | —                              |
| T <sub>12</sub> | 1 512  | 172    | —      | 8~10   | S <sub>7-1</sub> | 73.2                       | 0.1                            |
| T <sub>13</sub> | 1 525  | 185    | 1      | 30     | S <sub>7-2</sub> | 74.0                       | 0.16                           |
| T <sub>14</sub> | 1 542  | 202    | —      | —      | S <sub>8-1</sub> | 76.7                       | 0.71                           |
| T <sub>15</sub> | 1 568  | 228    | 0.5~1  | 10     | S <sub>10</sub>  | 88.0                       | 0.23                           |
| T <sub>16</sub> | 1 615  | 275    | 3~4    | 30~40  | S <sub>12</sub>  | 98.6                       | 0.44                           |
| T <sub>17</sub> | 1 637  | 297    | 3~4    | 5      | S <sub>15</sub>  | 107.8                      | 0.24                           |
| T <sub>18</sub> | 1 673  | 333    | —      | 20~30  | S <sub>18</sub>  | 119.9                      | 0.3                            |
| T <sub>19</sub> | 1 715  | 375    | —      | 15~20  | S <sub>20</sub>  | 136.3                      | 0.26                           |
| T <sub>20</sub> | 1 746  | 406    | 2~3    | 20     | S <sub>23</sub>  | 144.3                      | 0.39                           |
| T <sub>21</sub> | 1 781  | 441    | —      | —      | S <sub>24</sub>  | 156.1                      | 0.3                            |

对阶地拔河高度、形成时代和抬升速率的统计分析表明(表 1、表 2), 自  $160\times 10^4$  a 以来祁连山地区河流下切和构造抬升在空间分布上具有一定规律, 发育在祁连山东段的黄河规模较大, 最大下切速率为 1.1 mm/a, 平均为 0.35 mm/a。构造抬升呈现出几个高峰值时段, 分别为:  $15\times 10^4$ 、 $41\times 10^4$ 、 $76\times 10^4$ 、 $98\times 10^4$  和  $144\times 10^4$  a。而祁连山中西段的内流河规模较小, 随所处构造部位的不同阶地的抬升速率也不同。武威地块位于祁连山中段古浪推覆体构造区, 第四纪以来以垂直升降运动为主, NW 向冷龙岭断裂的活动使阶地断错量达 40~50 m, 抬升速率为 1.4~4.9mm/a, 最大值为 3.0mm/a 和 4.9mm/a, 对应的抬升时期为  $3\times 10^4\sim 4\times 10^4$  a 和

表 2 祁连山地区河流阶地特征

| 河流            | 阶地              | 拔河高度/m | 古土壤层             | 实测年龄<br>/ka | 拟合年龄/ka | 误差<br>/% | 抬升速率<br>/[mm°a <sup>-1</sup> ] | 相关系数             |
|---------------|-----------------|--------|------------------|-------------|---------|----------|--------------------------------|------------------|
| 疏勒河           | T <sub>1</sub>  | 4      | S <sub>0</sub>   | 4.0         | 20      | —400     |                                |                  |
|               | T <sub>2</sub>  | 8      | S <sub>0</sub>   | 8.0         | 60      | —650     | 0.1                            |                  |
|               | T <sub>3</sub>  | 15     | S <sub>1</sub>   | 70          | 80      | —14.3    | 0.35                           | $r=0.999\ 5$     |
|               | T <sub>4</sub>  | 35     | S <sub>2-1</sub> | 110.3       | 220     | 99.5     | 0.15                           | $a=0.064$        |
|               | T <sub>5</sub>  | 53     | S <sub>3</sub>   | 217~230     | 320     | 41.5     | 0.18                           | $b=0.163\ 2$     |
|               | T <sub>6</sub>  | 79     | S <sub>5-1</sub> | 420         | 490     | 16.7     | 0.15                           | $\sigma_y=38.11$ |
|               | T <sub>7</sub>  | 115    | —                | 690         | 700     | 1.5      | 0.17                           |                  |
| 洪 watershed 河 | T <sub>1</sub>  | 12     | S <sub>0</sub>   | —           | 10      | —        | —                              |                  |
|               | T <sub>2</sub>  | 76     | —                | —           | 20      | —        | 6.4                            |                  |
|               | T <sub>3</sub>  | 119    | —                | 30.10±7.22  | 35      | 16.3     | 2.87                           |                  |
|               | T <sub>4</sub>  | 138    | —                | —           | 45      | —        | 1.9                            |                  |
|               | T <sub>5</sub>  | 152    | —                | —           | 50      | —        | 2.8                            |                  |
|               | T <sub>6</sub>  | 169    | —                | 42.87±13.72 | 55      | 27.9     | 3.4                            |                  |
|               | T <sub>7</sub>  | 184    | —                | —           | 60      | —        | 3.0                            | $r=0.984\ 4$     |
|               | T <sub>8</sub>  | 201    | S <sub>1</sub>   | 69.23±5.54  | 70      | 1.1      | 1.7                            | $a=12.64$        |
|               | T <sub>9</sub>  | 247    | S <sub>1</sub>   | —           | 82      | —        | 3.83                           | $b=2.905$        |
|               | T <sub>10</sub> | 265    | S <sub>1</sub>   | —           | 90      | —        | 2.25                           | $\sigma_y=133.4$ |
|               | T <sub>11</sub> | 289    | S <sub>1</sub>   | 98.15±6.87  | 100     | 1.9      | 2.4                            |                  |
|               | T <sub>12</sub> | 347    | S <sub>1</sub>   | —           | 120     | —        | 2.9                            |                  |
|               | T <sub>13</sub> | 408    | —                | —           | 140     | —        | 3.05                           |                  |
|               | T <sub>14</sub> | 431    | —                | 143.2±14.33 | 145     | 1.3      | 4.6                            |                  |
|               | T <sub>15</sub> | 498    | —                | —           | 150     | —        | 13.4                           |                  |
| 北大河           | T <sub>1</sub>  | 12     | S <sub>0</sub>   | —           | 10      | —        | —                              |                  |
|               | T <sub>2</sub>  | 36     | —                | —           | 20      | —        | 2.4                            |                  |
|               | T <sub>3</sub>  | 84     | —                | 30          | 35      | 16.7     | 3.2                            |                  |
|               | T <sub>4</sub>  | 103    | —                | —           | 50      | —        | 1.27                           |                  |
|               | T <sub>5</sub>  | 118    | —                | 40          | 55      | 37.5     | 3.0                            | $r=0.994\ 7$     |
|               | T <sub>6</sub>  | 136    | S <sub>1</sub>   | 70          | 70      | 0        | 1.2                            | $a=6.275$        |
|               | T <sub>7</sub>  | 170    | S <sub>1</sub>   | —           | 80      | —        | 3.4                            | $b=1.888$        |
|               | T <sub>8</sub>  | 179    | S <sub>1</sub>   | 100         | 95      | —5       | 0.6                            | $\sigma_y=82.41$ |
|               | T <sub>9</sub>  | 220    | S <sub>1</sub>   | —           | 110     | —        | 2.73                           |                  |
|               | T <sub>10</sub> | 237    | S <sub>1</sub>   | —           | 120     | —        | 1.7                            |                  |
|               | T <sub>11</sub> | 258    | —                | —           | 140     | —        | 1.05                           |                  |
|               | T <sub>12</sub> | 278    | —                | 145.5       | 145     | —0.3     | 4.0                            |                  |
| 梨园河           | T <sub>1</sub>  | 5      | —                | —           | 10      | —        | 0.5                            |                  |
|               | T <sub>2</sub>  | 29     | —                | —           | 74      | —        | 0.38                           |                  |
|               | T <sub>3</sub>  | 48     | S <sub>1</sub>   | 40          | 121     | —220     | 0.4                            | $r=0.999\ 1$     |
|               | T <sub>4</sub>  | 54     | —                | 111.6       | 136     | —22.4    | 0.4                            | $a=2.103\ 2$     |
|               | T <sub>5</sub>  | 102    | —                | 268.14      | 265     | 1.1      | 0.37                           | $b=0.373$        |
|               | T <sub>6</sub>  | 150    | S <sub>4</sub>   | 342.3       | 410     | —20      | 0.33                           | $\sigma_y=58.28$ |
|               | T <sub>7</sub>  | 172    | —                | 446.97      | 446     | 0        | 0.61                           |                  |

(续表 2)

| 河流  | 阶地             | 拔河高度/m | 古土壤层             | 实测年龄/ka   | 拟合年龄/ka | 误差/%      | 抬升速率/[mm·a <sup>-1</sup> ] | 相关系数                                                         |
|-----|----------------|--------|------------------|-----------|---------|-----------|----------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 黑河  | T <sub>1</sub> | 10~12  | —                | 4.13±0.08 | 20      | 384.9     | —                          | $r=0.9409$<br>$a=-15.674$<br>$b=0.8302$<br>$\sigma_y=75.47$  |
|     | T <sub>2</sub> | 18~20  | —                | 9±1       | 35      | 288.9     | 0.53                       |                                                              |
|     | T <sub>3</sub> | 30~35  | —                | 29±16     | 50      | 72.4      | 1.0                        |                                                              |
|     | T <sub>4</sub> | 40~45  | S <sub>1</sub>   | 67±8      | 65      | -2.9      | 0.67                       |                                                              |
|     | T <sub>5</sub> | 60~65  | S <sub>1</sub>   | 101±13    | 92      | -8.9      | 0.74                       |                                                              |
|     | T <sub>6</sub> | 90     | —                | 160±18    | 150     | -6.3      | 0.43                       |                                                              |
|     | T <sub>7</sub> | 110    | —                | 217~236   | 210     | -3.2      | 0.33                       |                                                              |
|     | T <sub>8</sub> | 260    | —                | 378~424   | 283     | 25.1      | 2.06                       |                                                              |
| 东大河 | T <sub>1</sub> | 4      | —                | —         | 10      | —         | 0.4                        | $r=0.9985$<br>$a=-0.0537$<br>$b=0.5826$<br>$\sigma_y=27.097$ |
|     | T <sub>2</sub> | 10     | —                | 30        | 17      | 43        | 0.86                       |                                                              |
|     | T <sub>3</sub> | 17     | —                | —         | 28      | —         | 0.64                       |                                                              |
|     | T <sub>4</sub> | 28     | —                | 70        | 44      | 37        | 0.69                       |                                                              |
|     | T <sub>5</sub> | 42     | —                | 100       | 72      | 28        | 0.5                        |                                                              |
|     | T <sub>6</sub> | 53     | S <sub>1</sub>   | —         | 93      | —         | 0.52                       |                                                              |
|     | T <sub>7</sub> | 88     | —                | 150       | 150     | 0         | 0.61                       |                                                              |
| 黄羊河 | T <sub>1</sub> | 15     | S <sub>0</sub>   | 13.1±1.0  | 8~10    | -22.9     | —                          | $r=0.9983$<br>$a=-8.2579$<br>$b=2.1071$<br>$\sigma_y=74.44$  |
|     | T <sub>2</sub> | 22     | —                | 19.8±1.5  | 15      | -24.2     | 1.4                        |                                                              |
|     | T <sub>3</sub> | 44     | —                | 30.6±2.4  | 28      | -6.5      | 1.7                        |                                                              |
|     | T <sub>4</sub> | 80     | —                | 39.2±3.1  | 40      | 2.1       | 3.0                        |                                                              |
|     | T <sub>5</sub> | 124    | —                | 58.9±4.6  | 60      | 1.9       | 2.2                        |                                                              |
|     | T <sub>6</sub> | 176    | —                | 85.3±6.7  | 90      | 5.5       | 1.73                       |                                                              |
|     | T <sub>7</sub> | 225    | —                | 110.3±8.7 | 100     | -9.1      | 4.9                        |                                                              |
| 老虎山 | T <sub>1</sub> | 5      | S <sub>0</sub>   | 4.0       | 10      | 150       | 0.5                        | $r=0.9971$<br>$a=1.993$<br>$b=0.265$<br>$\sigma_y=35.64$     |
|     | T <sub>2</sub> | 10~20  | S <sub>ma</sub>  | 25        | 35~65   | 40~160    | 0.14~0.23                  |                                                              |
|     | T <sub>3</sub> | 25~35  | S <sub>mc</sub>  | 72        | 95~120  | 31.9~66.7 | 0.13~0.16                  |                                                              |
|     | T <sub>4</sub> | 60~70  | S <sub>2-2</sub> | 217       | 200~220 | -7.8~1.4  | 1.59~1.75                  |                                                              |
|     | T <sub>5</sub> | 100    | S <sub>4</sub>   | 378       | 378     | 0         | 0.79~1.05                  |                                                              |

注: 表中除了黄羊河和老虎山阶地外, 其余的阶地高度和实测年龄均采用杨景春给出的资料

10×10<sup>4</sup> a. 张掖地块处于祁连山中段的大黄山隆起和榆木山隆起之间, 水平运动大于垂直运动, 抬升速率为 0.33~2.06 mm/a, 最大值为 1.0 mm/a 和 2.06 mm/a, 对应的抬升时段分别为 3.5×10<sup>4</sup>~5×10<sup>4</sup> a 和 21×10<sup>4</sup>~28×10<sup>4</sup> a. 西段的酒泉地块位于榆木山和文殊山隆起之间, 南侧为祁连山北缘冲断推覆构造, 以垂直运动为主, 抬升速率为 1.7~13.4 mm/a, 最大值分别为 3.4、3.83、4.6、6.4 和 13.4 mm/a, 对应的抬升时段分别为 1×10<sup>4</sup>~2×10<sup>4</sup>、5×10<sup>4</sup>~5.5×10<sup>4</sup>、7×10<sup>4</sup>~8.2×10<sup>4</sup>、14×10<sup>4</sup>~14.5×10<sup>4</sup> 和 15×10<sup>4</sup> a. 玉门地块位于文殊山隆起和阿爾金断裂之间, 南侧为老君庙冲断推覆体, 以垂直运动为主, 抬升速率为 0.6~4.0 mm/a, 最大值分别为 3.2、3.4 和 4.0 mm/a, 对应的抬升时段分别为 2×10<sup>4</sup>~3.5×10<sup>4</sup>、7×10<sup>4</sup>~8×10<sup>4</sup> 和 14×10<sup>4</sup>~14.5×10<sup>4</sup> a(图 5). 反映了祁连山地区 15×10<sup>4</sup> a 以来曾经历了 1×10<sup>4</sup>~3×10<sup>4</sup>、5×10<sup>4</sup>~6×10<sup>4</sup>、7.5×10<sup>4</sup>~8.5×10<sup>4</sup> 和 14×10<sup>4</sup>~15×10<sup>4</sup> a 4 次较强烈的构造活动期, 其中 15×10<sup>4</sup> a 以来在推覆体地区, 垂直运动较强烈, 抬升速率高, 而走滑活动构造区则以水平运动为主, 抬升速率较低.

可以认为, 利用“构造-气候旋回”方法确定的阶地抬升速率基本上反映了祁连山地区第四纪以来不同区域构造运动的特点.

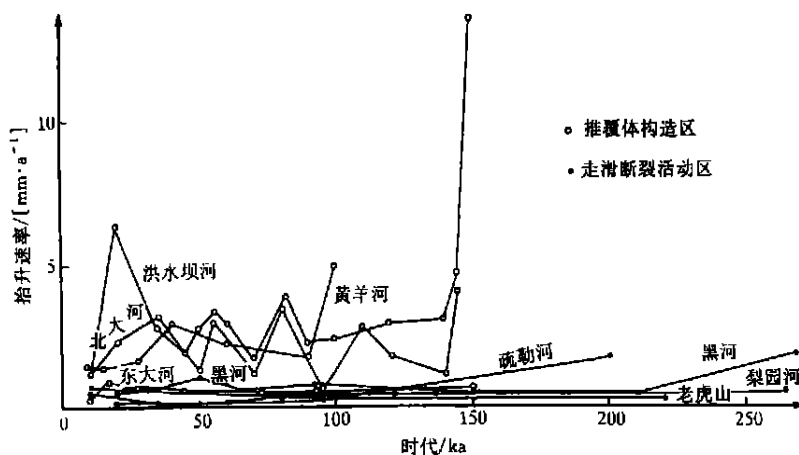


图5 祁连山地区河流阶地地下切速率分布

Fig.5 Distribution of down-cutting rates of rivers in Qilianshan region.

## 4 讨论与结论

对祁连山地区河流阶地的形成时代及抬升速率的研究表明, 自第四纪以来该区构造抬升呈现出4个较明显的时段:  $1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$  a 以来抬升速率最大为  $1.5 \sim 6.4$  mm/a;  $5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$  a 以来为  $1 \sim 3.5$  mm/a;  $7.5 \times 10^4 \sim 8.5 \times 10^4$  a 以来为  $1.2 \sim 3.83$  mm/a;  $14 \times 10^4 \sim 15 \times 10^4$  a 以来抬升速率为  $13.4$  mm/a, 这么大的抬升速率除构造抬升外不能排除洪积物存在的影响. 在空间分布上表现为: 祁连山东段河流最大下切速率为  $4.9$  mm/a, 中段为  $13.4$  mm/a, 西段又下降到了  $0.35$  mm/a.

“构造-气候旋回”年代学方法使用的前提是假定河流下切和构造抬升以均匀速度进行, 但事实上构造运动是不均匀的, 不同时期有不同的抬升速率. 从分析结果可以看出, 晚更新世以前阶地形成年龄的实测值与拟合值十分接近, 结果较理想, 而晚更新世晚期~全新世全球气候变化不大, 阶地的下切主要与局部地区构造抬升有关, 因此用该方法确定的阶地形成时代比实际值明显偏大, 计算的抬升速率高于平均速率, 所以用本文方法确定的低级阶地的年龄需要用实测值来校正. 对于没有或无法采集年代样品的地区的阶地年龄的估计, 用“构造-气候旋回”年代学方法是比较合适的, 但最终确定阶地年龄还应该参考邻近地区阶地的有关资料和整个区域的构造演化规律.

本文仅仅给出了应用“构造-气候旋回”年代学方法确定阶地形成年龄的初步研究结果. 对于位于祁连山东段兰州盆地的黄河阶地的形成时代用该方法拟合的结果不理想, 与实际测年资料相差较大, 目前还无法进行解释. 疏勒河阶地年龄是通过与其他区域对比所得, 拟合结果误差较大. 诸如此类问题还有待今后进一步研究.

## [参考文献]

- [1] Chappell J. A revised sea level record for the last 300 000 years from Papua New Guinea[J]. Search, 1983, 14(3-4): 99-101.
- [2] 潘保田, 李吉均, 朱俊杰, 等. 兰州地区黄河阶地发育与地貌演化[A]. 见: 中国西部第四纪冰川与环境[C]. 北京: 科学出版社, 1991. 271-277.
- [3] 朱俊杰, 曹继秀, 钟巍, 等. 兰州地区黄河最高级阶地与最老黄土沉积的发现及其古地磁年代学的研究[A]. 见: 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究[C]. 北京: 科学出版社, 1995. 77-90.

- [4] 刘小凤, 刘百箴, 吕太已, 等. 老虎山活动断裂研究[J]. 华南地震, 1994, 14(4): 9—16.
- [5] 袁道阳, 刘百箴, 吕太已, 等. 利用黄土剖面的古土壤年龄研究毛毛山断裂的滑动速率[J]. 地震地质, 1997, 19(1): 1—8.
- [6] 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.
- [7] 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[J]. 第四纪研究, 1998, (3): 229—237.
- [8] 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.
- [9] 韩文峰. 黄河黑山峡大柳树松动岩体工程地质研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 77—83.
- [10] 田勤俭, 沈旭辉. 海源断裂带内第三纪老龙湾拉分盆地的地质特征[J]. 地震地质, 2000, 22(3): 329—336.
- [11] 刘东生, 等. 第四纪环境[M]. 北京: 科学出版社, 1997, 50—60.

## A PRELIMINARY STUDY ON TERRACES FORMED AGES WITH THE CHRONOLOGICAL METHOD OF TECTONIC-CLIMATE CIRCLE

LIU Xiao-feng, LIU Bai-chi

(Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The formed ages and uplift rates of river terraces of Qilianshan region are determined with the chronological method of tectonic-climate circle. The determined ages of the terraces are tested and compared with the results determined by using other methods. The studies indicate the method is practical to determine formed ages of terraces, but the results for low terraces need correcting with field measure data. Tectonic uplift is intermittent and go through four powerful stages since Quaternary period in Qilianshan region.

**Key words:** Tectonic-climate circle; Chronology; Qilianshan region; Terrace of river