

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2014.03001

# 地形地貌发育时间与古地形反演

吕红华<sup>1</sup>, 张天琪<sup>1</sup>, 常艳春<sup>2</sup>, 王玮<sup>3</sup>, 周祖翼<sup>3</sup>, 郑祥民<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241;  
2. 浙江湖州市环境保护监测中心站, 湖州 313000;  
3. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**地形地貌是构造过程与地表过程等相互竞争的结果,古地形重建与地貌演化研究将有助于理解这些过程及其相互作用关系。传统的地形地貌演化研究多基于<sup>14</sup>C、释光、磁性地层等定年手段,定性或半定量地分析构造活动与地表侵蚀对地形地貌发育的影响。随着相关技术手段的发展,低温热年代学方法已不仅仅局限于构造地质学领域的造山带构造-热演化历史研究,目前已用于重建地形地貌演化历史。基于这一背景,在概述低温热年代学基本原理的基础上,结合自己的研究,主要介绍了该方法在地形地貌发育时间、古地形反演等方面的研究进展以及研究中需要注意的一些问题。文章最后指出,寻求具有更低封闭温度的低温热年代学测年体系是这方面研究的努力方向。

**关键词:**构造;气候;地表侵蚀;剥露;地形与地貌

**中图分类号:**P736.2 **文献标识码:**A **文章编号:**0256-1492(2014)03-0001-00

构造过程与地表过程之间的竞争与平衡,共同塑造地形地貌。在过去的十多年时间里,已有相当多的研究着眼于这些共同塑造地球表面形态的因素之间的复杂关系<sup>[1-16]</sup>。最近,在美国国家研究委员会筛选的地表科学领域九大重要科学挑战与机遇中,“地形地貌如何影响并记录气候和构造”就位列其中<sup>[17]</sup>。可见,如何通过地形地貌演化定量研究来揭示过去气候变化与构造活动历史以及它们之间的相互作用关系,已成为地貌学、构造地貌学以及地表科学等学科领域的重要研究任务之一。

在新构造与构造地貌学或地貌学等学科领域,传统的分析方法多结合光释光(OSL)、热释光(TL)、电子自旋共振测年(ESR)、<sup>14</sup>C、宇宙成因核素(CN)以及磁性地层(MS)等定年手段进行地形地貌演化研究,并进而探讨古气候变化与构造活动历史以及其在地形地貌演化过程中的作用<sup>[9-10,16,18-21]</sup>。由于定年技术手段、定年材料等方面的限制,以往这方面的研究所涉及的地质时间尺度多局限于第四纪。更重要的是,传统方法大多难以定量分析构造、气候与地表侵蚀之间的相互作用关系。随着相关技术手段的发展,低温热年代学方法已逐步成为开

展这一研究的新途径。最近十来年,以磷灰石、锆石(U-Th)/He为代表的低温热年代学方法用于量化造山带剥露速率已逐渐发展成为一个成熟的方法<sup>[22-30]</sup>,而由于其封闭温度较低,如磷灰石(U-Th)/He的封闭温度为70℃<sup>[31]</sup>,因此容易受到浅部地壳变化过程与近地表条件的影响,最近几年已被越来越多地应用于量化的地形地貌演化与古地形反演研究<sup>[32-37]</sup>。鉴于此,本文在概述低温热年代学方法基本原理的基础上,主要评述了该方法在古地形发育时间、古地形反演等方面的研究进展,文章最后简要指出了应用低温热年代学方法进行地形地貌演化研究需要注意的主要问题及该方法的发展趋势。

## 1 低温热年代学基本原理

低温热年代学定年体系根据矿物中放射性元素的衰变或裂变产物(如子体同位素或裂变损伤即裂变径迹)在矿物晶体内的产出和累积来求<sup>0.1-100</sup>冷却年龄<sup>[26,38]</sup>,其定年的时间尺度多为0.1~100 Ma<sup>[39]</sup>。在低于某一温度条件下(此温度称为封闭温度),衰变产物就会保留在矿物晶格中,从而开始计时、获得矿物的冷却年龄(也称热年龄),即矿物的冷却年龄就是矿物颗粒自通过其封闭温度以来的时间<sup>[26,38]</sup>。根据矿物衰变产物的封闭温度,低温年代学方法主要包括磷灰石、锆石(U-Th)/He与磷灰石、锆石裂变径迹等。依赖于目标矿物(如磷灰石、

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41001002,41371031);中国博士后科学基金特别资助项目(201003277)

**作者简介:**吕红华(1978—) **缺少at符号** 事构造地貌学与第四纪地质学研究,E-mail: hhlv@geo.ecnu.edu.cn

**收稿日期:**2013-03-12; **改回日期:**2013-10-20. 周立君编辑

锆石)以及待测衰变产物(如裂变径迹、子体同位素 $^4\text{He}$ ),低温热年代学各定年体系的封闭温度存在明显差异,如磷灰石裂变径迹(AFT)的封闭温度为 $110\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[40-41]</sup>,磷灰石(U-Th)/He(AHe)的封闭温度为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[31]</sup>,这导致在岩石向上剥露过程中不同矿物冷却计时存在先后。因此,采用的低温热年代学温度计不同(如锆石裂变径迹与磷灰石(U-Th)/He),所聚焦的地质问题的时间尺度也就存在一定程度上的差异。通过一定的分析方法和步骤<sup>[42]</sup>,借助于特定的测试仪器,就可以分析得到岩石样品中所测目标矿物衰变产物的相关信息,从而依据相关年龄公式就可以计算采样岩石的裂变径迹年龄<sup>[40]</sup>或者(U-Th)/He年龄<sup>[31]</sup>。由于低温热年代学各定年体系的封闭温度较低,容易受到地壳浅部岩石的剥露过程以及在此过程中外界环境因素的影响,因此,基于低温热年代学分析所获得的信息能用于反演古地形特征(如古地形位置、起伏等),约束地形发育时间,即用于古地形地貌研究。对于地形地貌演化研究而言,现阶段常用的低温热年代学定年体系包括磷灰石裂变径迹、磷灰石与锆石(U-Th)/He以及 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 等<sup>[32-34,36-37]</sup>。

目前,运用低温热年代学方法开展地貌演化与古地形反演研究主要针对于基岩样品。Stock和Montgomery<sup>[43]</sup>发现,在剥露速率已知的情况下(可基于年龄-高程剖面或矿物对<sup>[26,39]</sup>的方法获得),可以利用沉积物中的碎屑矿物(未退火,即记录源区基岩的剥露冷却历史)冷却年龄分布特征来恢复源区古地形。与基岩样品相比,碎屑矿物热年代学方法可进行更长时间尺度上的剥露<sup>(1)</sup>历史分析,但这一方法需要多个假设条件<sup>(2)</sup>如:<sup>(1)</sup>研究区域在研究时间段处于热稳定状态;<sup>(2)</sup>仅存在垂直剥露;<sup>(3)</sup>地表侵蚀所导致的剥露速率在空间上和研究时间<sup>(3)</sup>保持一致。鉴于此,目前碎屑矿物热年代学方法应用于古地形研究主要限于小尺度流域,对于造山带尺度而言,还需要探索更加适用的方法。因此,本文主要评述基于对基岩样品的低温热年代学分析开展地形地貌演化与古地形反演研究的方法。在野外,基<sup>3-4</sup>样品采于新鲜基岩露头,样品用布袋包装,一般重<sup>3~4</sup> kg。每个采样点用便携式GPS进行定位、标高。室内矿物挑选利用磁选和重液分选技术。挑选好的矿物颗粒然后用于裂变径迹、(U-Th)/He等分析。对于裂变径迹分析而言,需要做好样品制备、蚀刻等环节,尤其是抛光、云母片叠合及坐标标定等步骤,以免对后续的镜下径迹统计带来不便甚至较大误差、影响分析结果。

## 2 地形地貌发育时间

### 2.1 基于采样地形的基岩冷却年龄分布模式:大型河谷地形发育时间

在一定条件下(如没有断层作用以及岩浆侵入等热事件的影响),基岩样品的冷却年龄空间分布模式受地形起伏影响(假定地形为一波长为 $\lambda$ 、振幅为 $A$ 的地形波)。浅部地壳地温场等温面一般呈现与地表地形相似的形态:在山脊部位发生向上拱曲变形,而在山谷部位则向下弯曲;越接近地壳表层,这种影响越显著(图1)。而且,在剥露速率一定的情况下,地形振幅越大、波长越长,其对等温面形状的影响深度越大、范围越广<sup>[26,44]</sup>。因此,在低温热年代学体系内,由于等温面受到地形起伏影响而相应发生起伏变形,山脊与山谷部位同高程岩石样品通过同一封闭温度等温面的深度则会不同,从而在时间上就存在先后关系,即:山谷部位岩石样品要先通过封闭温度等温面,因此,其冷却年龄要比山脊部位同高程样品的冷却年龄偏老(如样品a1与a2,图1),而且,这种冷却年龄上的差异与封闭温度等温面的振幅( $h$ )正相关(图1)<sup>[45]</sup>。

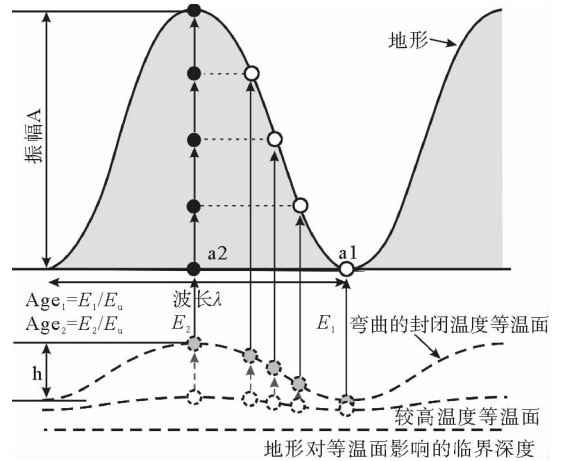


图1 波长为 $\lambda$ 、振幅为 $A$ 的地形起伏背景下的基岩冷却年龄空间分布模式

实心圆点代表山脊部位的岩石样品,空心圆点代表靠近山谷部位的岩石样品, $h$ 为弯曲的封闭温度等温面的振幅, $E_1$ 与 $E_2$ 、 $\text{Age}_1$ 与 $\text{Age}_2$ 分别为样品a1与a2的剥露量、冷却年龄, $E_0$ 为采样地区的平均剥露速率。

Fig. 1 Cooling age distribution of rock samples from topography with the wave length of  $\lambda$  and the amplitude of  $A$

缺:

利用采样剖面地形与基岩样品冷却年龄分布间的关系(图1),可约束较大空间尺度河谷地形发育的时间。House等<sup>[32]</sup>在美国加州Sierra Nevada山

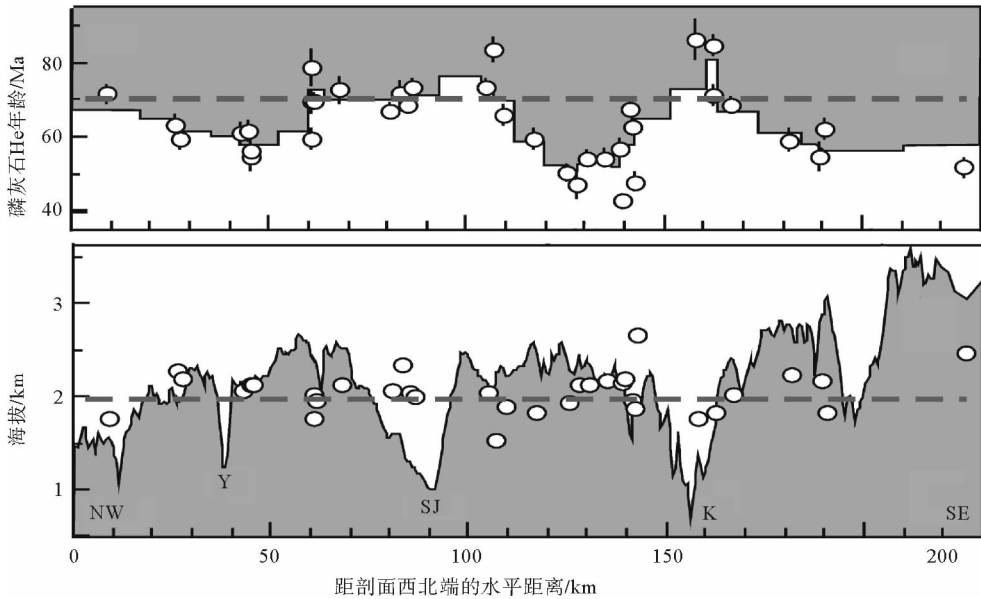


图 2 美国加州 Sierra Nevada 山脉中南部地区采样剖面地形与磷灰石(U-Th)/He 年龄分布(据参考文献[32])

Fig. 2 Topography of the sampled section and (U-Th)/He age data from the central-southern Sierra Nevada of California, USA (after the reference [32])

脉的工作是这方面研究的经典实例之一。在 Sierra Nevada 山脉中南部地区, House 等<sup>[32]</sup>沿北西-南东向的山脉走向采集同高程的磷灰石(U-Th)/He 样品。采样剖面横穿包括 San Joaquin(SJ)、Kings(K) 等几个大型的、与山脉走向近于直交的峡谷,并在整体上表现为一个波长为 50 km 的长波地形(图 2)。通过对冷却年龄进行采样高程差异的校正以及山脉大尺度的倾斜校正,发现采样剖面地形与(U-Th)/He 年龄呈明显的镜像关系,而且峡谷部位样品的(U-Th)/He 年龄主要集中于(70±10)Ma(图 2)。这种样品年龄与其高程间的镜像关系被归因于封闭温度等温面的起伏变形,封闭温度等温面变形导致沿剖面各采样点封闭温度等温面埋深产生差异,从而导致各点剥露冷却通过封闭温度等温面的时间存在先后(图 1)。而封闭温度等温面的起伏变形受控于当时的地表地形(图 1)。因此,峡谷部位样品较为一致的冷却年龄说明河流下切形成现今 Sierra Nevada 山脉中南部地区峡谷地形的时间应该不晚于(70±10)Ma<sup>[32]</sup>。

## 2.2 基于年龄-高程剖面的剥露速率分析:河流下切增速与高原生长

对于采样水平间距小而高差较大的基岩样品,可用年龄-高程法进行热年龄数据拟合分析以揭示剥露速率的变化特征<sup>[39,46]</sup>。由于采样水平间距小,从而可忽略各样品所通过的另一封闭温度等温面深

度的差异,因此,样品的采样高程差可近似代表各样品剥露量的差别。如图 1 中空心圆点代表的自山底到山顶的基岩样品,若它们的水平间距变小,则各样品通过同一封闭温度等温面的深度将大致相当,从而两样品间的高程差与它们的实际剥露量的差异也就基本一致。因此,利用各样品的冷却年龄差和高程差就可以计算得到剥露速率,此为样品所限定时间范围内的山体平均剥露速率。理论上,只需顶底两个样品即可确定剥露速率。但考虑到存在定年误差(特别是 AFT 分析)、高程测量误差等影响计算结果的因素,实际研究中一般利用多个样品的年龄、高程数据进行线性拟合,拟合线的斜率即为平均剥露速率<sup>[39,46]</sup>。若拟合结果显示斜率在某点明显变大(如图 3),则表明自斜率拐点对应的开始剥露作用增速(图 3)。应用年龄-高程法拟合求解剥露速率要求采样剖面的水平宽度较小,以保证各基岩样品大致在同一深度通过古封闭温度等温面,否则计算得到的剥露速率可能会严重失真<sup>[47]</sup>。

若年龄-高程剖面的样品采于高原周缘深切峡谷,则观察到的剥露速率增大应该反映河流下切加剧,据此可进一步推断高原强烈隆升的起始时间。Clark 等<sup>[48]</sup>在青藏高原的东南部进行了 9-13 Ma 研究,磷灰石 He 年龄与样品高程关系显示:在 9-13 Ma 存在明显的斜率变化,即剥露速率增大,反映河流在此期 9-13 Ma 下切,他们据此认为青藏高原隆升与扩展在 9-13 Ma 存在明显增强的趋势<sup>[48]</sup>。相似的结

论来自 Kirby [5-12] 在青藏高原东缘的研究,他们认为青藏高原在 5~12 Ma 存在明显的生长扩展。

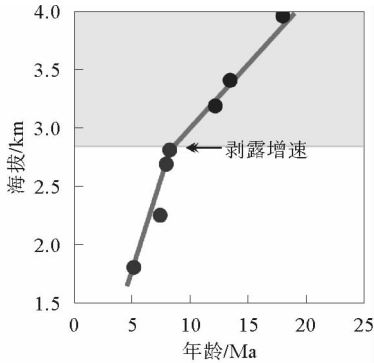


图3 年龄-高程数据揭示的剥露速率变化  
Fig. 3 Exhumation rates based on the age-elevation relief method

需要指出的是,尽管高原隆升可导致高原周缘的河流快速下切,剥露增速,但气候变化(如冰期—间冰期气候转型期)也可产生相似的结果<sup>[1,3,10,16,18]</sup>。不过,合适的采样策略应该有助于分析构造与气候因素对地形地貌发育演化的差异化作用。若某一河流流经多个构造区,在这些构造区开展基于年龄-高程剖面的低温热年代学研究,分析各剖面的热年龄-高程关系,揭示剥露速率的变化特征(特别是识别拐点,如图3),并进行剖面间的对比分析,可以以此揭示河流下切过程的时空分异特征。若某一快速剥露过程(河流快速下切)仅存在于某一构造区,而不是沿河流不同构造区的高程剖面中均有发现,那么,应该可以认为该快速剥露过程(剥露速率增加)主要缘于构造因素,而不是气候变化。

### 2.3 矿物晶体大小与冷却年龄分布:地形地貌演化阶段

矿物的热动力学性质与其晶体颗粒大小相关<sup>[50]</sup>,不同晶体大小的矿物在部分保留带中保存衰变或裂变产物(如子体同位素或裂变损伤即裂变径迹)的能力存在差异。以磷灰石(U-Th)<sup>[45-85]</sup>为例,当磷灰石颗粒在<sup>4</sup>He的部分保留带(45~85℃)中滞留较长时间(>10 Ma)的情况下(即缓慢剥露过程),其颗粒大小将对(U-Th)/He定年结果产生明显影响,并在一定情况下磷灰石(U-Th)/He年龄与其颗粒大小呈正相关关系<sup>[50]</sup>。这说明:对于经历缓慢剥露过程的磷灰石颗粒,其保存放射性成因的<sup>4</sup>He的能力取决于颗粒大小,颗粒越大,越易保存<sup>4</sup>He。对于经历快速剥露过程的岩石样品,其中不同大小的矿物颗粒的冷却年龄没有明显区别<sup>[50]</sup>。

矿物晶体大小与其冷却年龄之间的这种相关性可以用于限定地形地貌演化阶段等。Hansen和Reiners<sup>[34]</sup>在格陵兰东南部的海湾进行了详细的磷灰石裂变径迹<sup>[0.6-2.1]</sup>/He分析。他们采集的基岩样品海拔为0.6~2.1 km,样品测试获得的磷灰石裂变径迹年龄范围为64~836 Ma<sup>[64-836]</sup>h)/He年<sup>[55-230]</sup>为55~230 Ma。进一步分析发现:高海拔样品的(U-Th)/He年龄偏老,并且与矿物颗粒大小不存在相关关系,说明样品经历了中生代早期的快速剥露冷却过程;而两个低海拔样品的颗粒(U-Th)/He年龄<sup>[100-170]</sup>分散(海拔较高的样品颗粒年龄范围为100~170 Ma,海拔最低的样品年龄范围为20~100 Ma),且颗粒年龄与颗粒大小存在明显的<sup>[20-100]</sup>,这表明至少在20 Ma之前采样剖面最底部基岩中的磷灰石仍处于<sup>4</sup>He的部分退火带,随后才快速剥露冷却而开始计时。据此,Hansen和Reiners<sup>[34]</sup>进一步认为,格陵兰东南部中生代早期的剥露作用过程较快,造就了该地区低起伏的地形特征;而在晚新生代,长期而缓慢的冰川侵蚀与剥露过程塑造了现代地形,产生了海湾地貌。

## 3 古地形反演

构造过程与地表过程均会造成岩石相对于地表的位移,即岩石剥露,也就是指岩石由于受到构造抬升作用或者地表侵蚀作用而从地下某一深度处相对地表逐步向上运动并最终出露于地表。因此,岩石剥露可能是构造剥露和/或侵蚀剥露共同作用的结果。从地质演化的角度,岩石剥露的过程就是各种内外地质营力塑造地形地貌的过程。对于古地形反演而言,仅考虑侵蚀剥露这一情况(若存在构造剥露如正断层作用,则会造成地温场不稳定,导致等温面形态变异)。

### 3.1 古封闭温度等温面形态法

古地形反演的古封闭温度形态法利用地温场等温面形态与地形之间的相似性反演古地形。在低温热年代学定年体系内,岩石剥露就是岩石通过某一特定的古封闭温度等温面而逐渐冷却到地表温度的过程<sup>[26,38]</sup>(图1和4)。因此,岩石剥露量( $E_u \times t_{age}$ ,  $E_u$ 与 $t_{age}$ 分别为岩石的剥露速率与冷却年龄)就等于某定年体系下古封闭温度等温面的埋深 $Z_{paleo}$ (取决于古等温面形态)和样品的采样高程 $R_{present}$ (取决于采样地形)之和(图4):

$$E_u \times t_{age} = Z_{paleo} + R_{present} \quad (1)$$

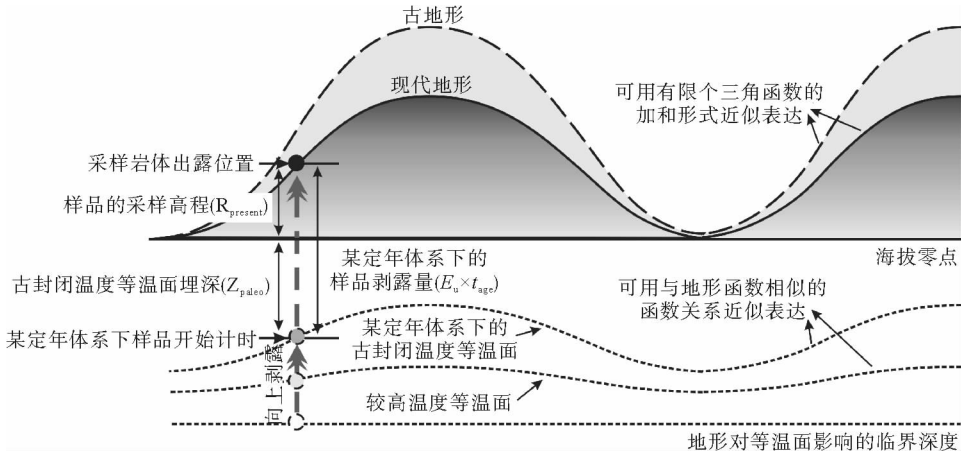


图 4 热稳定状态下岩石剥露量与样品采样高程及古封闭温度等温面埋深间的关系

$E_u$  与  $t_{age}$  分别为岩石的剥露速率与冷却年龄

Fig. 4 Relationships between exhumation, elevation of sampled rock and paleodepth of closure-temperature

一般而言,地表地形可用有限个三角函数的加和形式近似表达<sup>[45,51]</sup>:

$$Top(x) \approx \sum_{n=0}^N [a_n \cos(2n\pi x/\lambda) + b_n \sin(2n\pi x/\lambda)] \quad (2)$$

在上述地形的影响下,浅部地壳地温场可描述如下<sup>[36]</sup>:

$$T(x, z) = T_0(z) + \sum_{n=0}^N [a_n \cos(2n\pi x/\lambda) + b_n \sin(2n\pi x/\lambda) \cdot \exp(m_n z) \cdot (\frac{\partial T_0(z)}{\partial z} |_{z=0} - \varphi)] \quad (3)$$

其中,  $x, z$  分别为水平与垂直方向的距离;  $a_n, b_n$  为地形参数;  $T_0(z)$  为无地形起伏条件下的地温随深度变化的函数;  $\varphi$  为地表温度在垂直方向的变化梯度;

$m_n = \frac{1}{2} [-E_u/\kappa - \sqrt{(E_u/\kappa)^2 + (4n\pi/\lambda)^2}]$ , 其中  $E_u$  为剥露速率, 表征地壳热对流, 而  $\kappa$  代表岩石热扩散率, 表征地壳热传导。**式(1)中**

式(3)中的  $z$  即为**式(1)中**的  $Z_{paleo}$ 。从而, 将实测的基岩样品冷却年龄  $t_{age}$  及其采样高程  $R_{present}$  代入式(1), 联合式(1)、(2)、(3) 组成方程组, 该方程组则包含 3 个未知变量, 即地形参数  $a_n, b_n$  和剥露速率  $E_u$ 。因此, 可由获得的低温热年代学数据来反演古地形参数  $a_n, b_n$ , 从而可确定古地形形态。计算时首先假定剥露速率  $E_u$ , 然后通过多重线性回归的方法求解联合方程组, 得到地形参数  $a_n$  和  $b_n$  的估计值(此两参数决定古地形形态); 在  $a_n$  和  $b_n$  确定的情况下, 根据以上函数关系就可以计算出相对于此古地形和假定剥露速率的样品冷却年龄值(称预测年龄); 改变假定的剥露速率  $E_u$  的数值, 按同样的方法

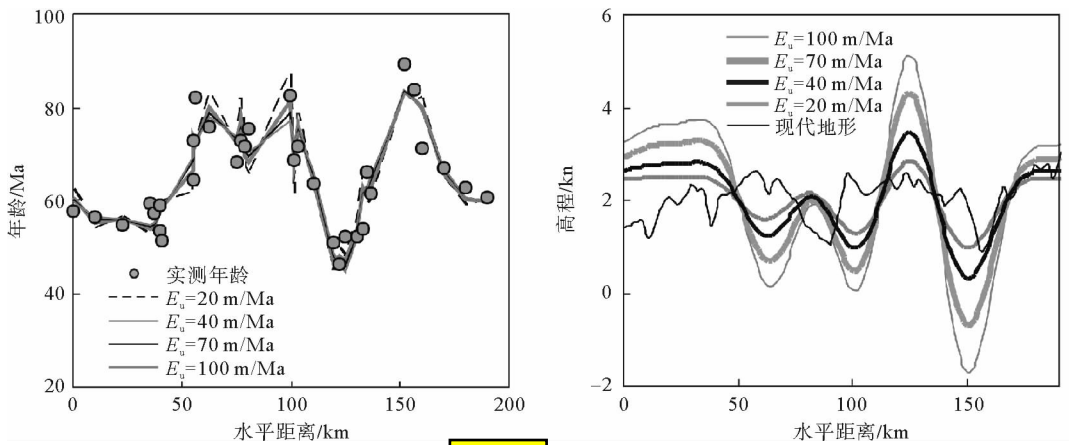
就能够得到一系列古地形和对应的预测年龄, 通过比较样品实测年龄和预测年龄之间的差距, 依此评价古地形反演和假定剥露速率的可靠性与准确性, 从而最终确定地形参数  $a_n$  和  $b_n$  的最佳估计值, 完成古地形反演<sup>[36]</sup>。

### 3.2 应用研究实例

美国加州 Sierra Nevada 地区是一个构造相对简单、向西倾斜的地块, 未发现明显的褶皱和断层作用, 因此是进行地形演化研究的理想场所。利用**50-80**等<sup>[32]</sup>在该地区取得热年龄数据(年龄范围为**50~80** Ma) 及相应的样品高程, Wang 和 Zhou<sup>[36]</sup> 根据上述方法进行了古地形反演研究。首先设定系列参数: 地表温度 = 0 °C,  $\varphi = -4.5$  °C, 地温梯度 = 25 °C, 岩石热扩散率  $\kappa = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, 磷灰石(U-Th)/He 的封闭温度取**40-100**。考虑到 Sierra Nevada 地区的剥露速率为**40~100** m/Ma<sup>[32,52]</sup>, Wang 和 Zhou<sup>[36]</sup> 分别取剥露速率为 20、40、70、100 m/Ma, 对式(1)、(2) **80-50** 或方程组进行多重线性回归, 得到了对应的**80~50** Ma 期间的古地形及相应的预测年龄(图 5)。基于 40 **2-3** a 的剥露速率反演的古地形, 其地势起伏为**2~3** km; 基于 100 m **4-6** 的剥露速率反演的古地形, 其地势起伏为**4~6** km(图 5)。不管何种情况, 相对于现代地形, 反演得到的古地形起伏均偏大(图 5), 这表明现代地形是造山带经历长期侵蚀作用的结果。

## 4 应用前提与发展趋势

应用上述方法进行地形地貌演化研究(如地形



80-50

图5 美国加州 Sierra Nevada 地区 80~50 Ma 期间的古地形反演结果(据参考文献[36])

(a) 预测年龄, (b) 反演的古地形

Fig. 5 (a) Apatite (U-Th)/He ages and the predicted ages and (b) the present-day topography and the reconstructed topographies at 80 ~ 50 Ma for different exhumation rates at the Sierra Nevada area of California, USA (after the reference [36])

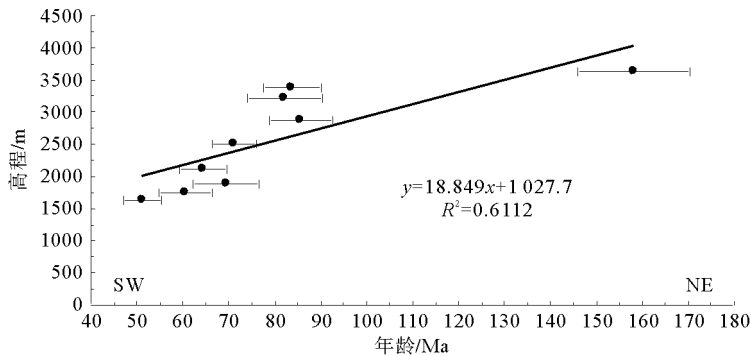


图6 乌鲁木齐-库尔勒库公路胜利达坂以南沿线基岩样品 AFT 年龄与高程关系

Fig. 6 Relationship between AFT age and elevation of rock samples from the Wu-Ku Road

发育时间、古地形反演)时,需要注意几个前提。一是空间上一致的基岩抬升速率,不均一的基岩抬升可导致产生不一样的冷却年龄空间分布模式;二是稳定的地温场和热流,因为预期的地形和等温面之间的关系可能会被包括放射性生热、岩浆活动以及地下水流体等在内的诸多因素的影响而改变<sup>[35]</sup>,从而不利于冷却年龄数据的解释。我们曾沿乌鲁木齐-库尔勒公路(以下简称乌库公路)胜利达坂以南采集过基岩磷灰石样品<sup>[53]</sup>,所取得的裂变径迹数据显示(图6),沿乌库公路自 NE 往 SW 方向,磷灰石裂变径迹(AFT)年龄随着样品海拔高度的降低而减小,即样品 AFT 年龄与其高程存在较好的正相关关系。基于郭召杰等<sup>[54]</sup>在乌库公路后峡至胜利达坂段取得的磷灰石裂变径迹年龄数据(见参考文献<sup>[54]</sup>中的表2),发现该段天山裂变径迹年龄与高程也大致存在同样的相关关系。因此,从造山带尺度来看,沿乌库公路的磷灰石裂变径迹年龄在天山核部高海拔处偏大,向南北随着海拔的降低而减小。

考虑到采样区发育北天山断裂、青布拉克断裂等重要断裂,上述年龄分布模式可能受到这些断裂引起的构造热事件的影响,因此暂未用这些热年龄数据反演古地形。尽管存在这些约束条件,但以(U-Th)/He 为代表的低温热年代学方法的应用和不断完善,已极大地促进了定量化的地形地貌演化研究<sup>[32-36]</sup>。

从造山带体系来看,虽然构造、气候与地形三者之间在理论上存在明显的联系,并已受到地学界的普遍关注,但目前对于它们之间关系的理解仍需深入,定量化的研究也较为欠缺,低温热年代学的发展则为揭示这种关系创造了条件。为了更好地揭示近地表条件在更近地质历史时期的变化过程,寻求具有更低封闭温度的低温热年代学定年体系是这方面研究的努力方向。最近, Herman 等<sup>[37]</sup>开展了一些前瞻性工作,他们把封闭温度的概念应用于光释光测年(OSL)中,并认为,在一定条件下(如在冷却速率为 10 °C/Ma 的情况下),石英光释光信号的封闭

30-35

温度为 $30\sim 35^{\circ}\text{C}$ 。据此,Herman等<sup>[37]</sup>通过一系列光释光-热年代学分析与模拟,认为即使在晚第四纪冰期-间冰期气候强烈变化期间,新西兰南阿尔卑斯山的地形演化亦主要受控于构造因素。

**致谢:**感谢北京大学杨景春先生和李有利教授一直给予帮助和指导!

### 参考文献(References)

- [1] Molnar P, England P. Late Cenozoic tectonic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg [J]. *Nature*, 1990, 346: 29-34.
- [2] Molnar P, England P, Martinod J. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon [J]. *Review of Geophysics*, 1993, 31(4): 357-396.
- [3] Molnar P. Late Cenozoic increase in accumulation rates of terrestrial sediment: How might climate change have affected erosion rates [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2004, 32: 67-89.
- [4] Li Y L, Yang J C, Xia Z K, et al. Tectonic geomorphology in the Shanxi Graben System, northern China [J]. *Geomorphology*, 1998, 23(1): 77-89.
- [5] Li Y L, Yang J C. Tectonic geomorphology in the Hexi Corridor, north-west China [J]. *Basin Research*, 1998, 10: 345-352.
- [6] 李吉均,方小敏,潘保田,等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响 [J]. *第四纪研究*, 2001, 21(5): 381-391. [LI Jijun, FANG Xiaomin, PAN Baotian, et al. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 381-391.]
- [7] Poisson B, Avouac J P. Impact of Climatic Change on Fluvial Incision in North Tian Shan (Northwestern China) [C]. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2001*, abstract # H42D-0381.
- [8] Poisson B, Avouac J P. Holocene hydrological changes inferred from alluvial stream entrenchment in North Tian Shan (Northwestern China) [J]. *The Journal of Geology*, 2004, 112: 231-249.
- [9] 周尚哲,焦克勤,赵井东,等. 乌鲁木齐河谷地貌与天山第四纪抬升研究 [J]. *中国科学 D辑*, 2002, 32(2): 157-163. [ZHOU Shangzhe, JIAO Keqin, ZHAO Jindong, et al. Fluvial geomorphology of Urumqi River and Quaternary uplift of Tian Shan Mountains [J]. *Sciences in China (Series D)*, 2002, 32(2): 157-163.]
- [10] Pan B T, Burbank D W, Wang Y, et al. A 900 k. y. record of strath terrace formation during glacial-interglacial transitions in northwest China [J]. *Geology*, 2003, 31(11): 957-960.
- [11] Kitoh A. Effects of mountain uplift on East Asian summer climate investigated by a coupled atmosphere-ocean GCM [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(4): 783-802.
- [12] Thiede R C, Bookhagen B, Arrowsmith J R, et al. Climatic control on rapid exhumation along the Southern Himalayan Front [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(3-4): 791-806.
- [13] Burbank D W. Cracking the Himalaya [J]. *Nature*, 2005, 434: 963-964.
- [14] 郑德文,张培震,万景林,等. 构造、气候与砾岩—以积石山和临夏盆地为例 [J]. *第四纪研究*, 26(1): 63-69. [ZHENG Dewen, ZHANG Peizhen, WAN Jinglin, et al. Tectonic events, climate and conglomerate: Example from Jishishan Mountain and Linxia basin [J]. *Quaternary Sciences*, 26(1): 63-69.]
- [15] 方小敏,徐先海,宋春晖,等. 临夏盆地新生代沉积物高分辨率岩石磁学记录与亚洲内陆干旱化过程及原因 [J]. *第四纪研究*, 27(6): 989-1000. [FANG Xiaomin, XU Xianhai, SONG Chunhui, et al. High-resolution rock magnetic records of Cenozoic sediments in the Linxia Basin and their implications on drying of Asian Inland [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 989-1000.]
- [16] Lu H H, Burbank D W, Li Y L, et al. Alluvial sequence in the north piedmont of the Chinese Tian Shan over the past 550 kyr and its relationship to climate change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 285(3-4): 343-353.
- [17] Committee on Challenges and Opportunities in Earth Surface Processes & National Research Council. *Landscapes on the Edge: New Horizons for Research on Earth's Surface* [M]. The National Academies Press, Washington, D C, 2010:3.
- [18] Molnar P, Brown E T, Burchfiel B C, et al. Quaternary climate change and the formation of river terraces across growing anticlines on the north flank of the Tianshan, China [J]. *Journal of Geology*, 1994, 102: 583-602.
- [19] Hu X M, Li Y L, Yang J C. Quaternary paleolake development in the Fen River basin, North China [J]. *Geomorphology*, 2005, 65(1-2): 1-13.
- [20] 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 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(10-11): 1279-1286.
- [21] Chen Y X, Li Y K, Zhang Y, et al. Late Quaternary deposition and incision sequences of the Golmud River and their environmental implications [J]. *Quaternary International*, 2011, 236: 48-56.
- [22] Bullen M E, Burbank D W, Garver J I, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the northwestern Tien Shan: New age estimates for the initiation of mountain building [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, 113(12): 1544-1559.
- [23] Bullen M E, Burbank D W, Garver J I. Building the northern Tien Shan: Integrated thermal, structural, and topographic constraints [J]. *The Journal of Geology*, 2003, 111: 149-165.
- [24] Reiners P W, Zhou Z Y, Ehlers T A, et al. Post-orogenic evolution of the Dabie Shan, eastern China, from (U-Th)/He

- and fission-track thermochronology [J]. *American Journal of Science*, 2003, 303: 489-518.
- [25] Zhou Z Y, Xu C H, Reiners P W, et al. Late Cretaceous-Cenozoic exhumation of Tiantangzhai region of Dabieshan orogen; Constraints from (U-Th)/He and fission track analysis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(11): 1151-1156.
- [26] Burbank D W, Brewer I D, Sobel E R, et al. Single-crystal dating and the detrital record of orogenesis [C]// Nichols G, Williams E, Paola C, eds. *Sedimentary Processes, Environments and Basin: a tribute to Peter Friend*. Special Publication of the International Association of Sedimentologists, 2007, 38: 253-281.
- [27] 许长海, 周祖翼, Van Den Haute P, 等. 大别造山带磷灰石裂变径迹(AFT)年代学研究 [J]. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(7): 622-634. [XU Changhai, ZHOU Zuyi, Van Den Haute P et al. Apatite fission track (AFT) thermochronological study of the Dabie orogene [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(7): 622-634.]
- [28] 汪新伟, 汪新文, 马永生. 新疆博格达山晚中生代以来的差异剥露史 [J]. *地质学报*, 2007, 81(11): 1507-1517. [WANG Xinwei, WANG Xinwen, MA Yongsheng. Differential exhumation history of Bogda Mountain, Xinjiang, Northwestern China since Late Mesozoic [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11): 1507-1517.]
- [29] 杜治利, 王清晨. 中生代天山地区隆升历史的裂变径迹证据 [J]. *地质学报*, 2007, 81(8): 1081-1101. [DU Zhili, WANG Qingchen. Mesozoic and Cenozoic uplift history of the Tianshan region: Insight from apatite fission track [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(8): 1081-1101.]
- [30] 沈传波, 梅廉夫, 刘麟, 等. 新疆博格达山中新生代隆升—热历史的裂变径迹记录 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(3): 87-92. [SHEN Chuanbo, MEI Lianfu, LIU Ling, et al. Evidence from apatite and zircon fission track analysis for Mesozoic-Cenozoic uplift thermal history of Bogeda Mountain of Xinjiang, Northwest China [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 26(3): 87-92.]
- [31] Farley K A. (U-Th)/He dating; Techniques, calibrations, and applications [J]. *Review Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 47: 819-844.
- [32] House M A, Wernicke B P, Farley K A. Dating topography of the Sierra Nevada, California, using apatite (U-Th)/He ages [J]. *Nature*, 1998, 396: 66-69.
- [33] Shuster D W, Ehlers T A, Rusmore M E, et al. Rapid Glacial Erosion at 1.8 Ma Revealed by  $^4\text{He}/^3\text{He}$  thermochronometry [J]. *Science*, 2005, 310: 1668-1670.
- [34] Hansen K, Reiners P W. Low temperature thermochronology of the southern East Greenland continental margin; Evidence from apatite (U-Th)/He and fission track analysis and implications for intermethod calibration [J]. *Lithos*, 2006, 92: 117-136.
- [35] Reiners P W. Thermochronologic Approaches to Paleotopography [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2007, 66: 243-267.
- [36] Wang W, Zhou Z Y. Reconstruction of palaeotopography from low-temperature thermochronological data [C]// Lisker F, Ventura B, Glasmacher U A, eds. *Thermochronological methods; From palaeotemperature constraints to landscape evolution models*. Geological Society, London, Special Publications, 2009, 324: 99-110.
- [37] Herman F, Rhodes E J, Braun J, et al. Uniform erosion rates and relief amplitude during glacial cycles in the Southern Alps of New Zealand, as revealed from OSL-thermochronology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, doi: 10.1016/j.epsl.2010.06.019.
- [38] Reiners P W. Low-temperature Thermochronology: Techniques, Interpretations, and Applications [M]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry* (58), Mineralogical Society of America, 2005.
- [39] 常远, 周祖翼. 利用低温热年代学数据计算剥露速率的基本方法 [J]. *科技导报*, 2010, 28(21): 86-94. [CHANG Yuan, ZHOU Zuyi. Basic methods to inverse exhumation rates using low-temperature thermochronological data [J]. *Review of Science & Technology*, 2010, 28(21): 86-94.]
- [40] Donelick R A, O'Sullivan P B, Ketcham R A. Apatite fission-track analysis [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2005, 58: 49-94.
- [41] Ketcham R A, Donelick R A, 缺: III D. Variability of apatite fission track annealing Kinetics III: Extrapolation to geological time scales [J]. *American Mineralogist*, 1999, 84: 1 235-1 255.
- [42] 丁汝鑫. 大别造山带晚白垩世以来的剥露作用及古地形再造 [D]. 上海: 同济大学, 2006. [DING R X. Exhumation and paleotopography reconstruction in Dabie orogen since late Cretaceous [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.]
- [43] Stock J D, Montgomery D R. Estimating paleorelief from detrital mineral age ranges [J]. *Basin Research*, 1996, 8: 317-327.
- [44] Braun J, van der Beek P, Batt G. Quantitative thermochronology numerical methods for the interpretation of thermochronological data [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [45] Braun J. Quantifying the effect of recent relief changes on age-elevation relationship [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 200: 331-343.
- [46] 丁汝鑫, 周祖翼, 王玮. 利用低温热年代学数据计算造山带剥露速率 [J]. *地球科学进展*, 2007, 22(5): 447-455. [DING Ruxin, ZHOU Zuyi, WANG Wei. Modeling exhumation rates of orogenic belts with low-temperature thermochronological data [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(5): 447-455.]
- [47] 常远, 王玮, 周祖翼. 采样地形对年龄-高程法应用的限制 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(8): 1 868-1 874. [CHANG Yuan, WANG Wei, ZHOU Zuyi. Age-elevation relationship method limited by the topography relief over the sampling transect [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(8): 1 868-1 874.]



- [48] Clark M K, House M A, Royden L H, et al. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet [J]. *Geology*, 2005, 33: 525-528.
- [49] Kirby E, Reiners P W, Krol M, et al. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and (U-Th)/He thermochronology [J]. *Tectonics*, 2002, 21(1), doi: 10. 1029/2000TC001246.
- [50] Reiners P W, Farley K A. Influence of crystal size on apatite (U-Th)/He thermochronology: An example from the Big-horn Mountains, Wyoming [J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 2001, 188: 413-420.
- [51] Braun J. Quantitative constraints on the rate of landform evolution derived from low-temperature [C]// Reiners P W, Ehlers T A, eds. *Low-temperature Thermochronology: Techniques, Interpretations, and Applications*. Mineralogical Society of America, Geochemical Society. 2005: 351-374.
- [52] Braun J. Estimating exhumation rate and relief evolution by spectral analysis of age-elevation datasets [J]. *Terra Nova*, 2002, 14: 210-214.
- [53] 吕红华, 王玮, 常远, 周祖翼. 新疆天山造山带 812-822 Ma 期次剥露作用过程 [J]. *第四纪研究*, 2013, 33(4): 1-11. [Lü Honghua, WANG Wei, CHANG Yuan, ZHOU Zuyi. Cenozoic episodic exhumation of the Tianshan Mountain, NW China [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(4): 1-11.]
- [54] 郭召杰, 吴朝东, 张志诚, 等. 乌鲁木齐后峡地区侏罗系沉积特征、剥露过程及中生代盆山关系讨论 [J]. *高校地质学报*, 2005, 11(4): 558-567. [GUO Zhaojie, WU Chaodong, ZHANG Zhicheng, et al. Mesozoic-Cenozoic relationships between Tianshan Mountain and peripheral basins: Evidences from sedimentology and exhumation of Jurassic in Houxia area, Urumqi [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(4): 558-567.]

## TIMING OF PALEOTOPOGRAPHIC AND GEOMORPHOLOGIC EVOLUTION AND PALEOTOPOGRAPHIC RECONSTRUCTION BY LOW-TEMPERATURE THERMOCHRONOLOGIC APPROACHES

Lü Honghua<sup>1</sup>, ZHANG Tianqi<sup>1</sup>, CHANG Yanchun<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>,  
ZHOU Zuyi<sup>3</sup>, ZHENG Xiangmin<sup>1</sup>

(1 College of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241;

2 Huzhou Environmental Monitoring Center, Huzhou 313000, Zhejiang Province, China;

3 State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Tectonism together with surface processes create terrain (topography and geomorphology), and thus paleotopographic reconstruction and geomorphologic studies are helpful to the understanding of these processes and their co-relationships. Usually geomorphological dating methods such as optically stimulated luminescence dating, thermoluminescence dating, radiocarbon dating, and magnetostratigraphy are used to qualitatively or semiquantitatively define the tectonic activation and climate change in the evolutionary history of geomorphology and topography. As mineral grains, such as apatite and zircon, are considered, low-temperature thermochronology is the choice to define the cooling age of the rocks. Popular applications of this method has contributed greatly to the study of tectonic-thermal history and provenance analysis as well as paleotopographic reconstruction. Here we first review the principles of low-temperature thermochronology and then illustrate the application of this method in the following fields related with paleotopography: (1) Timing of paleotopographic evolution and (2) Paleotopographic reconstruction. We also note that low-temperature thermochronometry with the lower closure temperature will be the important mean for resolving the problem on the evolution of shallow crust associated with surface processes.

**Key words:** Tectonism; Climate; Surface erosion; Exhumation rate; Topography and geomorphology