

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0013

GE Runze, ZHANG Wei, LI Yapeng, et al. Morphological characteristics and influencing factors of glacial troughs in the middle section of Tenasserim Mountains based on V-index[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(3):714-723. [葛润泽, 张威, 李亚鹏, 等. 基于V指数的他念他翁山中段冰川槽谷形态特征及影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(3):714-723.]

基于V指数的他念他翁山中段冰川槽谷 形态特征及影响因素分析

葛润泽¹, 张威¹, 李亚鹏¹, 赵贺¹, 唐倩玉¹, 柴乐²

(1. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁大连116029; 2. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌330127)

摘要: 冰川槽谷作为冰川作用区分布最典型的冰川地貌之一, 对其形态特征及影响因素的研究, 有助于揭示冰川发育的动力学过程。基于V指数模型及MATLAB半自动提取方法, 分析并探讨了他念他翁山中段冰川槽谷形态发育特征及造成槽谷形态差异的影响因素。结果表明: 研究区共发育206条冰川槽谷, 大多为“U”形或偏“U”形, 长4.5~26 km之间, 平均宽度1.8 km, 深200~500 m, 海拔高度介于5 730~3 274 m。槽谷形态横向分布规律: V指数多为0.2~0.3, 北东向发育V指数大于0.3的谷地多于西南向, 说明东坡槽谷侵蚀程度强于西坡。V指数沿槽谷纵向主要有两种变化趋势: V指数增大, 冰川槽谷横剖面“U”形发育特点逐渐增强; V指数减小, 冰川槽谷横剖面“U”形发育特点减弱。研究区冰川槽谷发育以侧蚀为主, 形态的差异性是冰川自身特性、冰川作用区地形与基岩岩性等多种因素共同作用的结果。其中, 冰川作用区的平均坡度、平均地形起伏度与古冰川作用区面积是造成这种分布差异的主要因素。

关键词: 他念他翁山; 冰川槽谷; V指数; 形态特征; 影响因素

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)03-0714-10

0 引言

冰川槽谷被认为是冰川作用区中分布最明显的冰蚀地貌之一。研究冰川槽谷的形态, 可以了解冰川的发育机制, 理解冰川侵蚀过程, 对恢复冰川规模以及原始地表形态等方面具有重要意义, 也是恢复冰川规模进而研究气候变化的重要依据^[1-4]。

冰川地貌学者最初是从冰川槽谷的定性描述开始, 逐步认识谷地的形态发育特征。早期是通过谷地的形状和规模直观判断是否存在冰川活动。1883年, 国外著名学者McGee^[5]首次使用“U”形一词描述冰川槽谷的地貌形态, 并分析冰川槽谷的形成原因。随后, 其他学者采取定性方法, 简单的区分河流与冰川谷地形态上的差异, 前者为“V”形, 后者为“U”形^[6-10]。20世纪初期, Davis^[11]将冰川槽谷

描述为近似垂曲线(悬链线)形态。Svensson^[12]提出首次尝试运用幂函数($y=ax^b$)模型, 量化描述冰川槽谷近似抛物线形态。然而, 该方法对于非对称冰川谷地, 无法很好解决谷地横断面深和宽的相关性及沿程变化特点, 20世纪中期, Graf^[13]以贝尔图斯山(Beartooth)作为研究区, 提出一种形态比率研究方法, 即深宽比(FR), 使冰川槽谷形态量化描述更为科学。随后, Bull等^[14]提出谷宽与谷深之比的概念, 完善并补充了对形态比率的研究。Wheeler^[15]针对幂函数模型需对槽谷两个斜坡分别进行拟合以及选取坐标原点的问题, 提出了二次多项式($y=A+Bx+Cx^2$)法。到本世纪初, 李英奎等^[16]、Li等^[17]利用梯级宽深比模型($f=W/y-y_0$), 对天山中、西部冰川槽谷的形态发育特征进行了研究, 并描述了沿程的形态发育特点。张威等^[18-19]对白马雪山的冰川槽

收稿日期: 2021-05-15; 修订日期: 2021-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671005)资助

作者简介: 葛润泽, 硕士研究生, 主要从事环境演变研究. E-mail: 771495594@qq.com

通信作者: 张威, 教授, 主要从事冰川与灾害地貌研究. E-mail: zhangweilnu@163.com

谷形态进行了研究,发现 $b \sim FR$ 图的结果与 Rocky 山模型相反,后又对螺髻山清水沟冰川槽谷进行了研究,发现岩性差异与河流溯源侵蚀是影响研究区槽谷发育的主要原因。姚盼等^[20]、Wang 等^[21]分析冰川槽谷横剖面定量化研究方法及其影响因素,总结了幂函数与二次多项式的优势与局限性,发现冰川平均坡度、冰川作用区面积、基岩性质等因素影响 b 值。然而研究者对冰川槽谷的研究多以数个谷地,或多条谷地选取少量剖面为研究对象,大范围多数量剖面的提取方法与定量化优化研究的局限性值得进一步关注。

2018 年, Zimmer 等^[22]以内华达山脉作为研究区,基于谷地形态提出了 V 指数(V-index)的概念,作为判断河流和冰川侵蚀谷地的一种替代参数,并使用 MATLAB 和 ArcMap 软件环境编写的自定义脚本提取出 27 000 个横截面,分析了 V 指数在表达“U”形谷特征方面的优势。本文将应用此方法,对他念他翁山中段冰川槽谷的形态特征进行研究,共分析 3 127 条横截面,并结合形态比率值,探讨该区冰川槽谷发育模式,分析影响其发育的主要因素。

1 研究区概况

他念他翁山中段($30^{\circ}40' \sim 30^{\circ}11' N$, $96^{\circ}39' \sim 97^{\circ}16' E$)(图 1),位于我国云贵高原向西藏东南部的过渡地带,属于高原温带半干旱季风气候区,主

要受西南季风影响^[23]。地势总体呈现北高南低,西高东低的特点,是海洋性冰川发育区。岩性主要以花岗岩、板岩、片岩、砂岩为主,部分区域含超镁铁质岩类及粉砂岩。在构造上,研究区位于昌都准地台,西侧为怒江断裂带,东侧为瓦合-邦达-察瓦龙断裂带^[24]。现代冰川共 88 条,总面积 12.955 km^2 。

研究区发生倒数第二次冰期、末次冰期中期、末次冰盛期、全新世新冰期或小冰期四次冰川作用^[25]。形成的“U”形槽谷沿主山脊两侧分布在怒江和玉曲沿岸。由于主谷与支谷的发育条件不同,使研究区主谷两侧多发育冰川悬谷,形成规模不等的复合型山谷冰川。怒江沿岸冰川槽谷地势陡峭,玉曲沿岸冰川槽谷坡度较缓。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文通过地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),下载覆盖整个他念他翁山中段地区 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)图,作为分析的主要信息数据源,分析数据采用 WGS-84 椭球模型,高程精度约 16 m,基本上能够满足对不同槽谷横剖面的提取与后期处理的精度要求。此外,基于分辨率较高的 LocaSpace Viewer 影像,人工判读并选取合适的槽谷横剖面位置,从而降低其他因素对拟合精度带来的影响。

2.2 研究方法

2.2.1 槽谷横截面定量数据提取步骤

基于 LocaSpace Viewer 影像和 SRTM 数据,首先,确认整个冰川槽谷的大致形状、分布区域、范围以及其相应的下限位置。其次,为了便于槽谷的识别,从 ArcMap10.2 上利用 Spatial Analyst Tools→hydrology 工具,在 DEM 数据文件上提取出研究区内所有谷地矢量化数据,输出为 KML 格式文件后,加载于 LocaSpace Viewer 影像上。然后,将调整后的矢量化数据生成一个河流矢量数据,或直接导入国家水文地理数据集文件。之后使用 ArcMap 中的 ET Geowizards 站线工具^[22],沿每个河流主流线生成指定的标准间距和宽度的横截面线。为确保创建的横截面线垂直于山谷,使用 ArcMap 中的平滑线工具,对主流线应用平滑功能以移除栅格衍生的正交线段,提供更真实的河流几何图形。通过与地质和水文制图数据集进行比较,人工移除位于湖泊或山谷中覆盖基岩的大量冲积层的横截面。

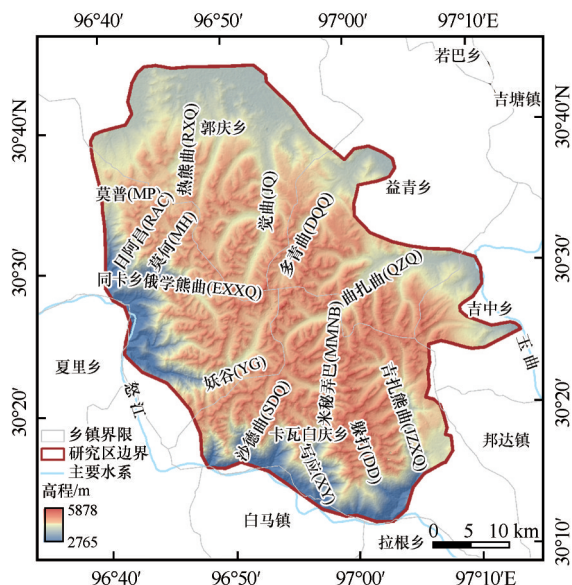


图 1 研究区位置及典型槽谷分布图

Fig. 1 Location of the study area and distribution of typical troughs and valleys

2.2.2 V指数与形态率数据获取

首先,从DEM中设置一定间隔提取山谷的横截面,并导出到MATLAB中。在MATLAB中,自定义脚本会识别区分每个横截面中的目标山谷,并计算一定高度以下横截面的形态参数,包括幂函数模型中的 b 值、形态比率^[14](谷地横截面的宽深比)、功率曲线拟合使用 Levenberg-Marquardt 最小二乘法^[26-27]以及山谷宽度、起伏度、山谷底部高程、与V指数值等(脚本和文档可在<http://dx.doi.org/10.17632/5j6BFM8f4p.1>上下载)。然后,将处理后的横截面数据导回 ArcMap,并与代表每个横截面中心的点数据集进行关联,便于其他数据(岩性或其他属性)添加到点数据集进行比较与空间分析。

结合谷地发育特点,将横截面的宽度设置为2 km,该宽度能有效覆盖全区冰川作用谷地宽度。沿冰川作用谷地纵向以不同间距设置横截面,为对比截面间距的选取效果,截面间距分别设置为100 m、250 m、500 m进行对比,发现以100 m为间距的横截面数量过多,运算过程中的干扰因素较多,500 m为间距的横截面数量较少,无法包含更多发育较小的支谷,所以,本文以250 m作为横截面间距进行数据计算,能减少错误数据的数量且包含大多数较小支谷。最终,共分析了3 127条横截面,提取位置如图2所示。每条横截面以100 m为距离生成构造点,共获取128 132个构造点的高程数据进行计算分析。

2.2.3 V指数计算方法

抛物线拟合已被证明是描述山谷形状的有用工具,Svensson^[12]、Graf^[13]是幂律方法的最早支持者。相比之下,Wheeler^[15]、James^[28]认为,由二次方程 $y=A+Bx+Cx^2$ 描述的抛物线可能更适合某些山谷

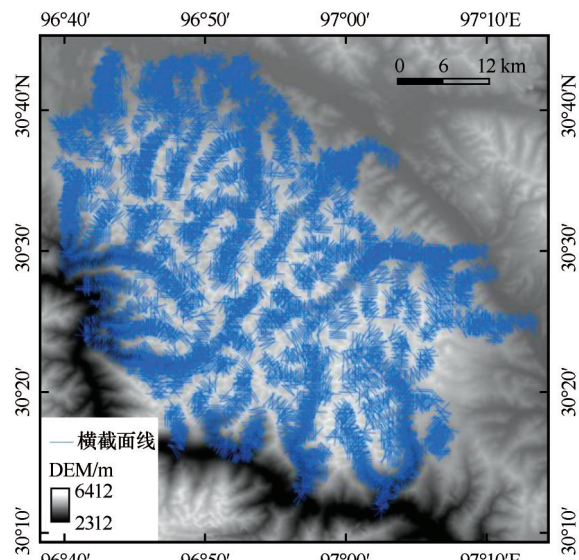


图2 在ArcMap中创建的横截面位置示例图(间距为250 m)

Fig. 2 Sample cross-section positions created in ArcMap (250 m apart)

横截面。这些曲线拟合技术依赖于平滑函数,可能不适用于不规则形状的横截面^[29]。作为一种替代方法,Zimmer等^[22]提出了V指数,这一新指标计算公式为:

$$V\text{-index}=(A_x/A_v)-1, \quad (1)$$

式中: A_x 为谷底和谷底上方特定高度横截面的面积; A_v 为与其具有相同高度和宽度的理想“V”形横截面的面积。该表达式是对理想“V”形谷的偏差度量,其中平直谷壁的理想“V”形横截面 $V\text{-index}=0$;“U”形谷 $V\text{-index}>0$;凸谷壁 $V\text{-index}<0$ (图3)。该方法首次应用于内华达山脉,通过对计算后得出的横截面样品数据进行随机检查,保证人工剔除的错误样本无误后,发现整个横截面的错误率约为2%,保证了该方法的可用性。

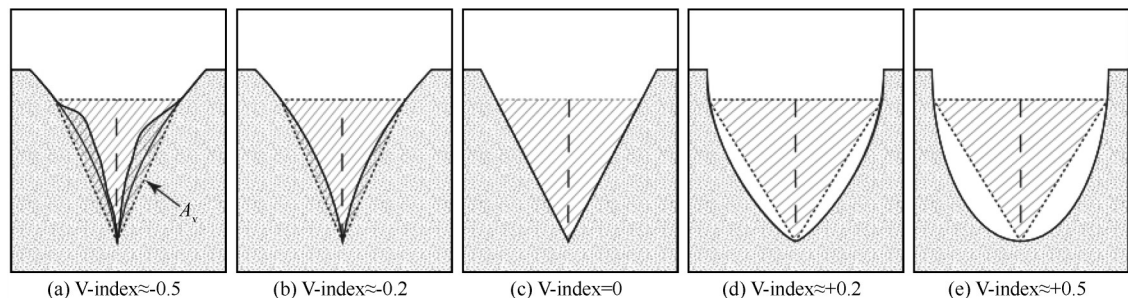


图3 V指数和相应的山谷形式^[22]

Fig. 3 V-index and corresponding valley patterns^[22]

2.2.4 形态比率值(V_r)计算方法

山谷横断面形态的明显差异,可以用谷底宽

度-谷高比描述,即在距山前上游给定距离处,谷底宽度与谷平均高度的比值。计算公式为:

$$V_f = \frac{2V_{fw}}{(E_{ld} - E_{sc}) + (E_{rd} - E_{sc})} \quad (2)$$

式中: V_{fw} 为谷底的宽度; E_{ld} 、 E_{rd} 为左右分水岭高度; E_{sc} 为谷底或河道的高程^[14]。当 V_f 值 < 1.0 时, 构造活动活跃, 河流以下切为主; 当 V_f 值 > 1.0 时, 构造活动稳定, 河流侧向侵蚀。

3 结果

3.1 冰川槽谷横向形态发育特征

研究区内可辨识的冰川槽谷共计 206 条, 长 4.5~26 km, 平均宽度 1.8 km, 深 200~500 m, 海拔高度介于 5 730~3 274 m。为了更易于分析槽谷空间分布差异及满足统计分析对样品的要求, 选取的谷地均 > 5 个横截面, 并计算均值以代表谷地整体的形态特征。计算结果显示, 他念他翁山中段地区所有谷地横截面的 V 指数最小值为 -0.36, 最大值为 0.53, 均值为 0.29。各谷地的 V 指数均值 > 0, 总体上呈“U”形状态。如图 4 所示, 北东向发育的槽谷 V 指数大多在 0.2~0.3 之间, 仅少部分谷地 V 指数在 0~0.2 之间; 西南向发育的槽谷 V 指数多为 0.2~0.3 之间, 支谷 V 指数多为 0~0.1 之间。北东向发育 V 指数大于 0.3 的谷地多于西南向发育 V 指数大于 0.3 的谷地, 表明他念他翁山中段地区北东向发育的冰川槽谷偏“U”形发育居多, 西南向发育的槽谷更偏向于“V”形发育。同时也表现出, 沿研究区主山脊线, 东坡发育的槽谷侵蚀程度强于西坡槽谷的特点。

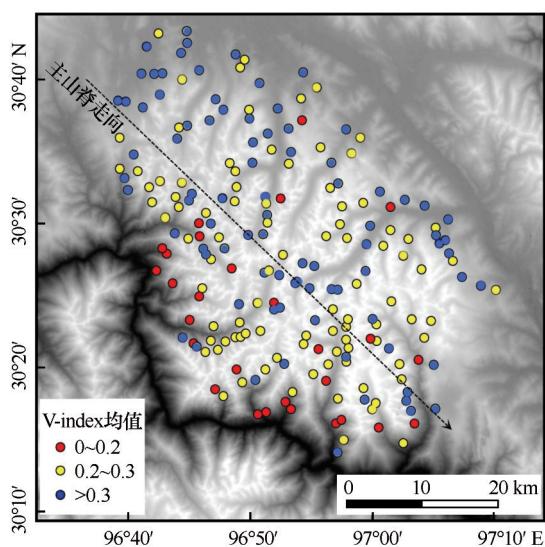


图 4 V 指数均值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of mean value of V-index

3.2 冰川槽谷纵向沿程形态发育特征

整个他念他翁山中段地区主谷、支谷发育范围较大, 分布复杂, 数据量过多。因此, 本文选取了该地区比较典型的 14 条槽谷数据作为代表, 分析冰川侵蚀程度在槽谷纵剖面上的分布规律。这些谷地位置包含各个朝向, 每条谷地所能提取的横截面数量均在 30 个以上, 多数超过 50 个, 且包含典型主、支谷, 能够代表研究区内总体特点(图 1)。14 条冰川槽谷的 V 指数区间分别如下: JZXQ 为 -0.12~0.39; DD 为 -0.02~0.50; QZQ 为 -0.01~0.53; DQQ 为 -0.13~0.54; JQ 为 -0.07~0.46; RXQ 为 -0.27~0.53; MP 为 -0.09~0.51; RAC 为 -0.12~0.49; MH 为 -0.01~0.44; EXXQ 为 -0.14~0.51; YG 为 0.00~0.52; SDQ 为 -0.04~0.50; XY 为 -0.30~0.52; MMNB 为 0.00~0.53。冰川槽谷横剖面纵向沿程的形态特点主要有以下两种表现形式(图 5, 置信区间 90%): (1) V 指数增大, 冰川槽谷横剖面“U”形发育特点逐渐增强, 如 DQQ、RXQ、QZQ、RAC、MH。(2) V 指数减小, 冰川槽谷横剖面“U”形发育特点减弱, 如 JZXQ、XY、DD、JQ、MP、YG、SDQ、MMNB、EXXQ。由于研究区槽谷发育复杂, 支谷众多, 当支谷冰川汇入主谷时, 会使主谷冰量增加, 改变槽谷纵向上的厚度分布。

3.3 冰川槽谷发育模式分析

量化研究冰川槽谷横剖面的形态特征有助于了解冰川的侵蚀程度以及冰川槽谷的演化过程。由于冰川发育的规模有所差异, 会显示出冰川动力条件的差异性, 从而形成山地冰川与大陆冰盖下的两种槽谷发育模式^[29]。除了上述的差异会影响槽谷的形态发育以外, 冰川的性质、基岩的抗侵蚀能力、气候与构造分布特征等均会造成槽谷发育模式的不同, 使得槽谷发育的方式及谷地形态更加复杂多样。姚盼等^[20]总结具有较多数据的山地冰川分析发现, 山地冰川槽谷在发育的过程中存在以下蚀模式为主和以侧蚀模式为主的两种冰川侵蚀模式。

本文通过对研究区 14 条主要槽谷的数据计算, 以形态比率与 V 指数作为参数, 绘制了 V 指数-形态比率图(图 6)。结果显示, 他念他翁山中段地区主要冰川槽谷的 V 指数与形态比率呈负相关关系 ($R^2=0.5481$), 即 V 指数值随着形态比率值的增大而减小, 表明随着冰川侵蚀程度的增加, 槽谷的展宽要强于槽谷的加深, 体现了研究区的冰川侵蚀主要以侧蚀作用为主的特点。

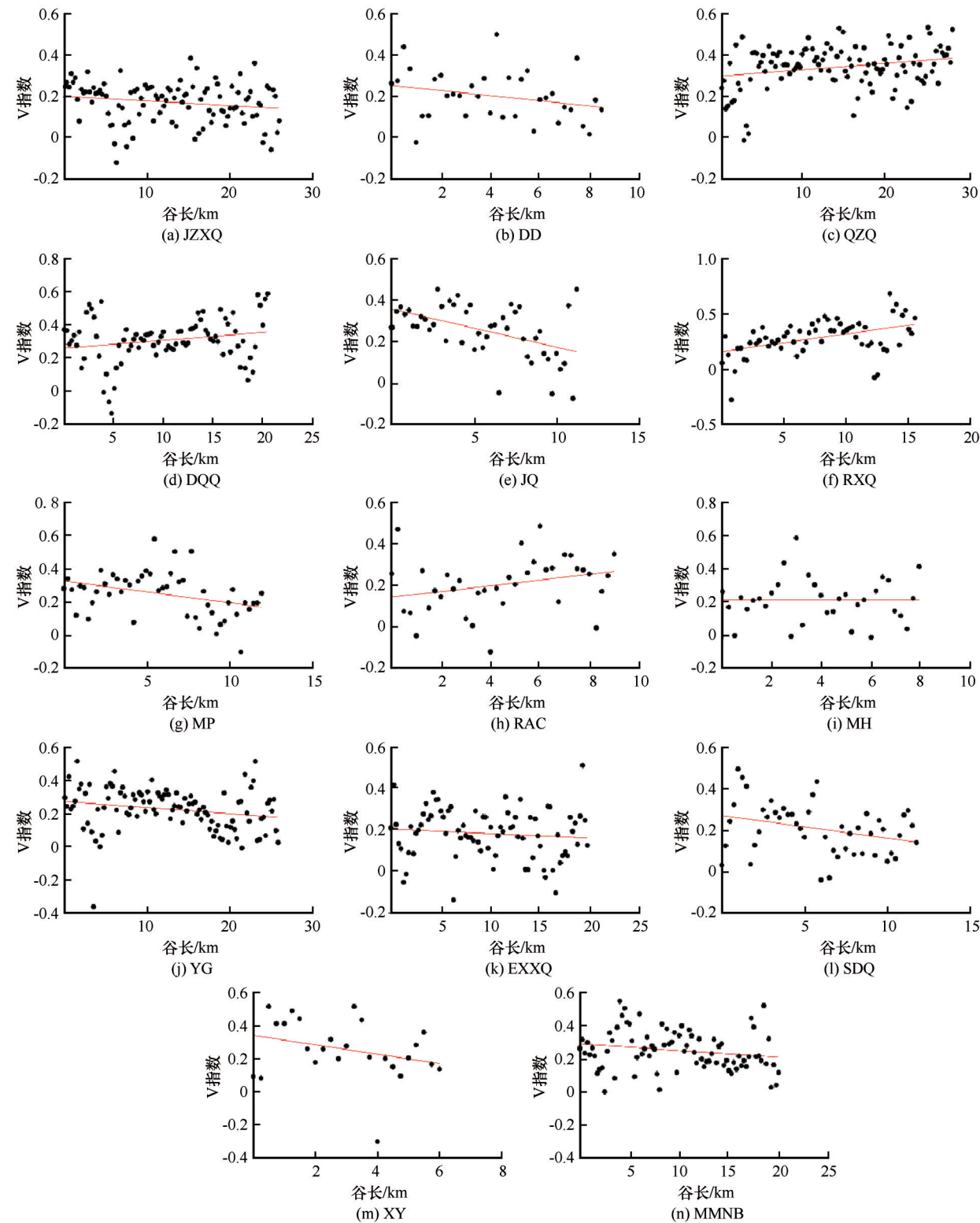
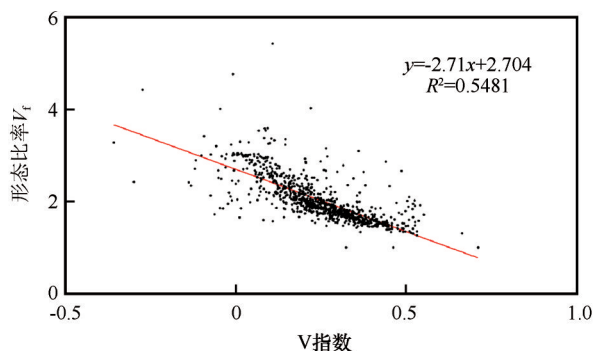


图5 V指数沿程分布趋势图
Fig. 5 V-index distribution along the path

4 影响冰川槽谷形态的因素分析

研究表明,影响冰川槽谷形态的主要因素包括冰川作用时间、基岩的抗侵蚀能力、冰量、冰川性质、构造活动性、地形等因素^[30]。其中,对于冰川作

用时间,选取LGM的作用时段,冰量采用冰川作用区面积和冰川作用正差,构造活动性分析谷地形态比率值,地形因素重点考察平均坡度和平均地形起伏度。

图6 研究区冰川槽谷 V 指数-形态比率 V_i 图Fig. 6 V-index- V_i diagram of glacial trough in the study area

4.1 平均坡度与平均地形起伏度

平均坡度是计算每个山地积累区坡度平均数值,平均地形起伏度是计算每个山地积累区最大与最小高程差的平均数值。冰川在发育之初,由于地形的差异会造成冰川结构和冰川底部滑动速度的不同,从而影响山谷受冰川侵蚀的槽谷形态时空分布^[31]。冰川滑动的侵蚀模型和数值模拟结果表明,冰川槽谷中所受的冰川侵蚀作用与坡度有很好的正相关关系,即坡度越大,冰川侵蚀作用越强^[32-33]。Wang 等^[21]对祁连山冰川槽谷的研究则显示 ELA 以上区域,平均坡度与冰川侵蚀负相关。出现两种不同相关性原因是前者为槽谷坡度,后者为 ELA 以上平均坡度,二者对冰川侵蚀作用的影响机制不同。

研究区谷地的平均坡度与平均地形起伏度的表现形式基本一致(图7)。运用配对 T 检验平均坡

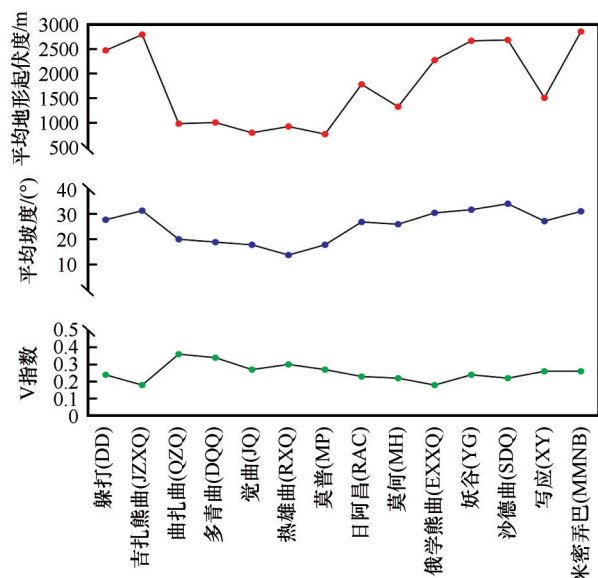


图7 典型谷地 V 指数、平均坡度与平均地形起伏度曲线

Fig. 7 Curves of V-index, average slope and average relief of a typical valley

度、平均地形起伏度与 V 指数呈现较好的负相关性,相关系数分别为 $R^2=0.943$ 和 $R^2=0.836$,反映出谷地的平均坡度或地形起伏度越缓,槽谷所经历的冰川侵蚀作用越强,相反则越弱的特点。这是由于选取谷地的平均坡度,大致代表了冰川积累区的平均坡度,使冰川积累区的冰储量不同,导致整个冰川作用区所受的侵蚀程度存在差异。因此,平均坡度或地形起伏度与侵蚀程度之间具有较好的负相关性,反映的是平均坡度或地形起伏度可以通过控制积累区的冰川规模,进而导致侵蚀程度也发生了改变。当平均坡度或平均地形起伏度相对较小时,该冰川在平均坡度内所积累的谷地形态也会相对宽缓,使冰积累量较高,导致该地区发育冰川的平均规模较大,所以会受较强的冰川侵蚀作用,如热雄曲(平均坡度 13.98, V 指数均值 0.3)、莫普(平均坡度 17.98, V 指数均值 0.27)。

4.2 冰川作用区面积与冰川作用正差

笔者^[25]曾利用 CF 法、THAR 法、AAR 法和 AABR 法重建了研究区 LGM 的冰川物质平衡线(ELA),平均值为 5 183 m,现代 ELA 为 5 385 m。本文选用 LGM 的 ELA 值作为标准进行讨论分析。此外,研究表明,当冰川处于稳定状态时,积累区面积与冰川作用区面积之比可近似为常数^[34]。每个山地冰川积累区的范围,可以根据施雅风等^[35]绘制的 LGM 时 ELA 的等值线图进行提取;即首先在 Arc-Gis 上裁切出各槽谷冰川作用区的大致范围,再提取 ELA 之上的栅格,然后将其转化为矢量并在 Arc-Map 上投影,最后经过几何计算获得相应的积累区面积。冰川作用区面积则可根据积累区面积求得。他念他翁山中段 LGM 冰川积累区面积与冰川作用区面积比值为 0.55^[25]。结果显示,研究区内冰川槽谷 V 指数与冰川作用区面积具有较强的相关性[图 8(a)],整体呈现出显著正相关关系($R^2=0.929$, $P<0.0001$)。冰川作用区面积增大, V 指数表现变大的趋势,冰川槽谷更偏向于“U”形发育,说明研究区内的槽谷形态受古冰川作用区面积影响。

冰川作用正差是每个山地最大高程与冰川 ELA 之差。通过皮尔逊相关系数分析法对研究区冰川作用正差[图 8(b)]与 V 指数进行相关性分析,结果表明:冰川作用正差与 V 指数表现出较弱相关性,相关系数为 $R^2=0.015$, $P=0.68$ (置信区间 95%)。研究区部分谷地的冰川作用正差与 V 指数呈负相关关系,即 V 指数大的谷地冰川作用正差反而较

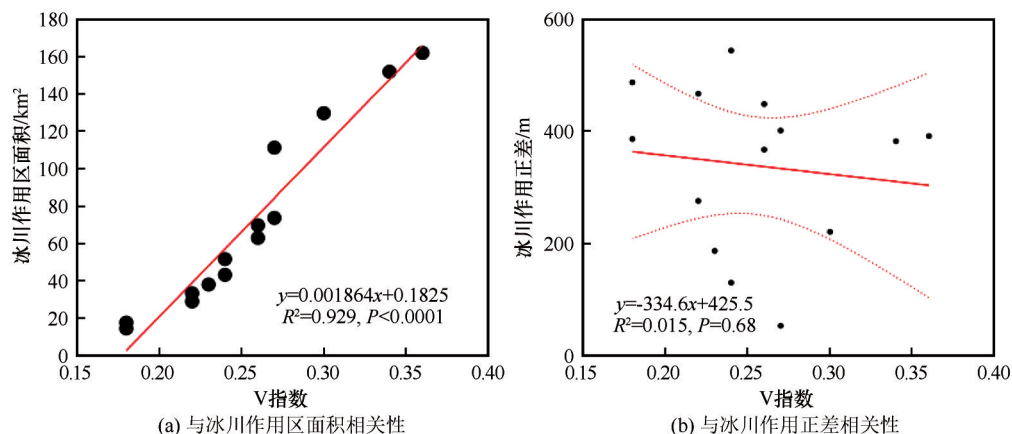


图8 典型谷地V指数与冰川作用区面积、冰川作用正差相关性曲线

Fig. 8 Correlation curve of V-index, area of glaciation area and difference of glaciation in typical valley

小,如JZXQ、QZQ等谷地;而有些谷地的冰川作用正差与V指数呈正相关关系,V指数大的谷地冰川作用正差较大,如EXXQ、YG等谷地。由此可见,冰川作用正差不是影响他念他翁山中段地区冰川槽谷形态发育的主要控制因素。

4.3 冰川性质与基岩岩性

冰川的性质对冰川的发育存在影响。冰川的性质不同,导致了冰川在发育时的冰温度、冰流速与侵蚀能力不同。如果要较好的分析冰川性质对冰川槽谷形态塑造作用的影响,应保证其他影响因素的作用相近。然而,具体到他念他翁山中段地区的每个山谷范围,通常是多个因素综合控制的结果,很难满足上述的要求。研究区内冰川槽谷均为海洋型冰川,冰川性质相同的情况下,冰川槽谷的侵蚀程度却有不同,如QJQ(V指数为0.36)侵蚀程度大于EXXQ(V指数为0.18)。这种差异性则主要来源于区域降水条件、冰川的物理性质、气候条件、冰川规模、岩性等多方面原因所致。而且,前人研究的祁连山地区冰川侵蚀程度也存在较大区别,冰川槽谷形态的分布规律也并未呈现出极大陆型冰川弱于亚大陆型冰川的特点^[20]。上述内容表明,冰川性质对本研究区冰川槽谷形态特征的分布影响比较有限,不是其发育的主要控制因素。

岩性作为地质研究中不可忽视的部分,对于冰川的侵蚀也有重要的影响。而对于岩性的考虑主要从基岩的抗侵蚀能力(rock mass strength, RMS)进行比较分析。基岩的RMS越强,则说明越不容易被侵蚀,所以冰川槽谷的受侵蚀程度也相对较弱,反之则较强。由此推出,火山岩与花岗岩的RMS较强,片岩与板岩偏弱,砂岩更弱,泥岩与黏土的RMS

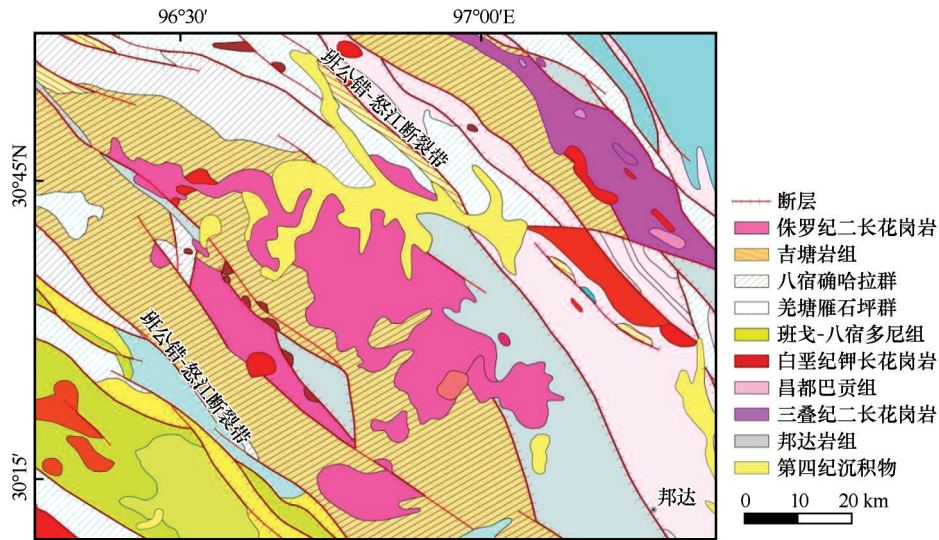
则最弱^[36-37]。他念他翁山中段NE向发育的谷地主要岩性为花岗岩、板岩、片岩、砂岩等;WS向发育的谷地主要岩性为花岗岩、长石砂岩、粉砂岩、超镁铁质岩类等^[38](图9)。NE向发育的槽谷基岩抗侵蚀能力应强于WS向,但NE向谷地冰川侵蚀程度却高于WS向的谷地。而且,DD、JZXQ、QZQ、JQ等谷地的基岩种类相似,基岩的RMS较为接近,但这些槽谷的冰川侵蚀程度也表现出较大差异性。所以,冰川槽谷基岩的岩性对他念他翁山中段地区冰川槽谷侵蚀的形态特征分布影响并不明显,也不是主要控制因素。

4.4 构造活动性

研究表明,形态比率值(V_t)可以在一定程度上反映构造活动性,若 $V_t < 1.0$,反映构造活动活跃,引起主动下切成V形山谷;若 $V_t > 1.0$,反映相对基准面稳定或构造平稳,引起大面积横向侵蚀成“U”形宽谷^[39]。研究区14条典型冰川槽谷的 V_t 值分别为:JZXQ为2.20;DD为2.15;QZQ为1.78;DQQ为1.84;JQ为2.06;RXQ为1.91;MP为1.98;RAC为2.15;MH为2.14;EXXQ为2.20;YG为2.13;SDQ为2.18;XY为2.00;MMNB为2.04。 V_t 总体大于1,均值为2.05,反映区域构造稳定,与其他地质资料反映的构造情况相吻合。所以,构造运动条件也不是影响研究区冰川槽谷形态的主要控制因素。

5 结论

通过数据分析处理软件ArcMap与编程软件MATLAB计算的V指数对他念他翁山中段地区冰川槽谷形态特征定量化分析,结合影响冰川侵蚀强度的各种因素,确定研究区冰川槽谷形态特征及主

图9 他念他翁山中段地区构造及岩性图^[38]Fig. 9 Tectonic and lithology map of the middle section of Tenasserim chain^[38]

控因素,主要结论如下:

(1)他念他翁山中段地区共计发育 206 条冰川槽谷,在海拔高度 5 730~3 274 m 范围内分布。槽谷大多为“U”形或偏“U”形,长 4.5~26 km,平均宽度 1.8 km,深 200~500 m。

(2)在空间横向分布上,研究区的 V 指数值显示出沿主山脊东北坡 V 指数值大于西南坡的特点。V 指数值沿槽谷纵向的变化趋势主要有以下两种表现形式:V 指数增大,冰川槽谷横剖面“U”形发育特点逐渐增强;V 指数减小,冰川槽谷横剖面“U”形发育特点减弱。

(3)研究区槽谷发育模式为展宽强于槽谷的加深,体现了以侧蚀作用为主的特点。研究区冰川槽谷形态特征空间分布的差异性是由于冰川自身特性、冰川作用区地形与基岩岩性等多种因素共同作用的结果。其中,冰川作用区的平均坡度、平均地形起伏度、古冰川作用区面积是造成这种分布差异的主要因素。

谨以此文,纪念李吉均先生!

参考文献(References):

- [1] Cui Zhijiu, Chen Yixin, Zhang Wei, et al. Discussion on the history, characteristics and causes of Quaternary glacial period in China[J]. Quaternary Research, 2011, 31(5): 749-764. [崔之久, 陈艺鑫, 张威, 等. 中国第四纪冰期历史、特征及成因探讨[J]. 第四纪研究, 2011, 31(5): 749-764.]
- [2] Sternai P, Herman F, Valla P G, et al. Spatial and temporal variations of glacial erosion in the Rhône valley (Swiss Alps): Insights from numerical modeling[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2013, 368: 119-131.
- [3] Li Jijun, Zhou Shangzhe, Pan Baotian. Quaternary Glaciers in

Eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Quaternary Research, 1991, 11(3): 193-203. [李吉均, 周尚哲, 潘保田. 青藏高原东部第四纪冰川问题[J]. 第四纪研究, 1991, 11(3): 193-203.]

- [4] Hou Guangliang, Xiao Jingyi, Li Shengmei. Drought vulnerability assessment based on climate change: a case study of eastern Qinghai[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(2): 163-168. [侯光良, 肖景义, 李生梅. 基于气候变化的干旱脆弱性评价——以青海东部为例[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 163-168.]
- [5] McGee W. Glacial canons[J]. Science, 1883, 2: 238.
- [6] Harker A III. Glaciated Valleys in the Cuillins, Skye[J]. Geological Magazine, 1899, 6(5): 196-199.
- [7] Hershey O H. Ancient alpine glaciers of the Sierra Costa Mountains in California[J]. The Journal of Geology, 1900, 8(1): 42-57.
- [8] Hobbs W H. The cycle of glaciation[M]//Climatic Geomorphology. London: Palgrave Macmillan, 1973: 76-90.
- [9] Crosby W O. Certain aspects of glacial erosion[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1928, 39(4): 1171-1181.
- [10] Lewis W V. Valley steps and glacial valley erosion[J]. Transactions and Papers (Institute of British Geographers), 1947, 13: 19-44.
- [11] Davis W M. The mission range, montana[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1916, 2(4): 267-288.
- [12] Svensson H. Is the cross-section of a glacial valley a parabola? [J]. Journal of Glaciology, 1959, 3(25): 362-363.
- [13] Graf W L. The geomorphology of the glacial valley cross section[J]. Arctic and Alpine Research, 1970, 2(4): 303-312.
- [14] Bull W B, McFadden L D. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California[M]//Geomorphology in arid regions. London: Routledge, 1977: 115-138.
- [15] Wheeler D A. Using parabolas to describe the cross-sections of glaciated valleys[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1984, 9(4): 391-394.
- [16] Li Yingkui, Liu Gengnian. Variation of glacier trough and valley cross section and its reflection on glacier dynamics[J]. Journal of Geological Sciences, 2000, 55(2): 235-243. [李英奎, 刘耕年. 冰川槽谷横剖面沿程变化及其对冰川动力的反映

- [J]. 地理学报, 2000, 55(2): 235-243.]
- [17] Li Yingkui, Liu Gengnian, Cui Zhijiu. Glacial valley cross-profile morphology, Tian Shan Mountains, China[J]. *Geomorphology*, 2001, 38(1/2): 153-166.
- [18] Zhang Wei, Bi Weili, Li Yonghua, et al. Morphological characteristics and influencing factors of glacier valley development in Baima Snow Mountain[J]. *Quaternary Research*, 2013, 33(3): 479-489. [张威, 毕伟力, 李永化, 等. 白马雪山冰川槽谷发育的形态特征及其影响因素探讨[J]. 第四纪研究, 2013, 33(3): 479-489.]
- [19] Zhang Wei, He Daiwen, Liu Libo, et al. Evolution of Qingshuigou Glacier Valley in Luoji Mountain, Sichuan Province and its influencing factors[J]. *Advances in Geographical Sciences*, 2014, 33(10): 1397-1404. [张威, 何代文, 刘丽波, 等. 四川螺髻山清水沟冰川槽谷演化及其影响因素[J]. 地理科学进展, 2014, 33(10): 1397-1404.]
- [20] Yao Pan, Wang Jie. A review of the quantified analysis methods of glacial trough and its influencing factors[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 1028-1040. [姚盼, 王杰. 冰川槽谷横剖面量化研究方法及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1028-1040.]
- [21] Wang J, Yao P, Yu B, et al. Controls on spatial variations of glacial erosion in the Qilian Shan, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Geomorphology*, 2018, 318: 128-138.
- [22] Zimmer P D, Gabet E J. Assessing glacial modification of bedrock valleys using a novel approach[J]. *Geomorphology*, 2018, 318: 336-347.
- [23] Chai Le. Glacial geomorphologic process and its response to the Southwest Monsoon in the Taniantaweng Shan during the Quaternary[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2019. [柴乐. 他念他翁山第四纪冰川地貌过程及其对西南季风的响应[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2019.]
- [24] Chen Fuzhong, Liao Guoxing. Basic geological characteristics of Changdu area[J]. *Collected works of geology of Qinghai-Tibet Plateau*(12). Beijing: Geological Publishing House, 1982: 213-228. [陈福忠, 廖国兴. 昌都地区地质基本特征[C]//青藏高原地质文集(12)——“三江”构造地质. 北京: 地质出版社, 1982: 213-228.]
- [25] Qiao Jingru. Quantitative reconstruction of paleoclimate in the middle section of the Taniantaweng Mountains[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2019. [乔静茹. 他念他翁山中段古气候定量重建研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2019.]
- [26] Augustinus P C. Glacial valley cross-profile development: the influence of in situ rock stress and rock mass strength, with examples from the Southern Alps, New Zealand[J]. *Geomorphology*, 1995, 14(2): 87-97.
- [27] Brook M S, Kirkbride M P, Brock B W. Rock strength and development of glacial valley morphology in the Scottish Highlands and northwest Iceland[J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2004, 86(3): 225-234.
- [28] James L A. Polynomial and power functions for glacial valley cross-section morphology[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(5): 413-432.
- [29] Li Yingkui, Liu Gengnian. Discussion on the cross section features of glacial valley[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2): 171-177. [李英奎, 刘耕年. 冰川槽谷横剖面形态特征探析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 171-177.]
- [30] Yao Pan. Spatial variations of glacial erosion and its influential factors in the Qilian Shan[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. [姚盼. 祁连山地区冰川侵蚀程度的空间分布及其影响因素分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.]
- [31] Pedersen V K, Huismans R S, Herman F, et al. Controls of initial topography on temporal and spatial patterns of glacial erosion[J]. *Geomorphology*, 2014, 223: 96-116.
- [32] Harbor J M, Wheeler D A. On the mathematical description of glaciated valley cross sections[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17(5): 477-485.
- [33] Raymond C F. Flow in a transverse section of Athabasca Glacier, Alberta, Canada[J]. *Journal of Glaciology*, 1971, 10(58): 55-84.
- [34] Kern Z, László P. Size specific steady-state accumulation-area ratio: an improvement for equilibrium-line estimation of small palaeoglaciologists[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(19/20): 2781-2787.
- [35] Shi Yafeng, Zhao Jingdong, Wang Jie. New understanding of Quaternary glaciations in China[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2011. [施雅风, 赵井东, 王杰. 中国第四纪冰川新论[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2011.]
- [36] Augustinus P C. Outlet glacier trough size-drainage area relationships, Fiordland, New Zealand[J]. *Geomorphology*, 1992, 4(5): 347-361.
- [37] Brook M S, Tippet J M. The influence of rock mass strength on the form and evolution of deglaciated valley slopes in the English Lake District[J]. *Scottish Journal of Geology*, 2002, 38(1): 15-20.
- [38] Li Yapeng. Study on the glacial period and glacier scale since the Late Pleistocene in the middle section of the Taniantaweng Mountains[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2019. [李亚鹏. 他念他翁山中段晚更新世以来冰期序列与冰川规模研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2019.]
- [39] Silva P G, Goy J L, Zazo C, et al. Fault-generated mountain fronts in southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity[J]. *Geomorphology*, 2003, 50(1/2/3): 203-225.

Morphological characteristics and influencing factors of glacial troughs in the middle section of Tenasserim Mountains based on V-index

GE Runze¹, ZHANG Wei¹, LI Yapeng¹, ZHAO He¹, TANG Qianyu¹, CHAI Le²

(1. College of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116021, Liaoning, China; 2. College of Earth Sciences, East China University of Science and Technology, Nanchang 330127, China)

Abstract: Glacial troughs are one of the most typical glacial landforms distributed in glaciation areas. The study on their morphological characteristics and influencing factors helps to reveal the dynamic process of glacier development. Based on the V-index model and Matlab semi-automatic extraction method, this paper analyzed and discussed the developmental characteristics of glacier trough and valley morphology and the influencing factors of trough and valley morphology differences in the middle section of Tenasserim Mountains. The results show that there are 206 glacial troughs in the study area, most of which are U-shaped or slightly U-shaped, with a length of 4.5~26 km, an average width of 1.8 km, a depth of 200~500 m, and an altitude of 5 730~3 274 m. The transverse distribution of trough valley morphology is as follows: the V-index is more in the range of 0.2~0.3, and the valley with V-index greater than 0.3 developed in the northeast direction is more than that in the southwest direction, indicating that the erosion degree of trough valley in the eastern slope is stronger than that in the western slope. There are two trends of V-index along the longitudinal direction of the glacier trough. With the increase of V-index, the “U” shape of the cross-section of the glacier trough is gradually enhanced. V-index decreases, and the “U” shaped development of glacier trough and valley section weakens. The development of glacial troughs in the study area is dominated by lateral erosion, and the difference in morphology is due to the interaction of many factors, such as the characteristics of the glacier itself, the topography of the glaciation area and the lithology of the bedrock. Among them, the average slope of glaciation area, the average relief of topography and the area of palaeogeoliation area are the main factors causing the difference of distribution.

Key words: Tenasserim Mountains; glacial trough; V-index; morphological characteristics; influence factor

(责任编辑: 赵井东; 编辑: 庞瑜, 周成林)