

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0120

ZHANG Wei, ZHAO He. Analysis on the shape of glacial valley and its influencing factors in the middle and west section of Tanggula Mountain [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(4):1337-1346. [张威, 赵贺. 唐古拉山中西段冰川槽谷形态及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2022, 44(4):1337-1346.]

唐古拉山中西段冰川槽谷形态及其影响因素分析

张威, 赵贺

(辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘要: 冰川槽谷作为典型的冰川侵蚀地貌, 研究其形态特征和影响因素有助于更全面地认识冰川发育模式和侵蚀特征。本文以唐古拉山中西段为研究区, 运用V指数模型和地理探测器模型, 分析探讨了区内冰川槽谷形态发育特征, 并对其影响因素进行了研究。结果表明: 冰川槽谷横剖面的V指数与幂函数 b 值在槽谷对称的情况下可以相互替代, 且典型冰川槽谷横剖面的V指数介于0.20~0.43之间。研究区保存着“箱形”形态的冰川槽谷, 其V指数具有接近于1的特征。区内冰川槽谷横剖面V指数<0.20的占比19%, V指数介于0.20~0.43之间的占比48%, V指数>0.43的占比33%, 表明研究区内呈典型“U”形的槽谷数量最多。此外, 北坡主要发育典型“U”形的冰川槽谷, 占比高达60%, 而南坡各种形态的槽谷数量相当。研究区内山谷冰川发育区、过渡区槽谷呈典型“U”形的占比最多, 而冰帽发育区槽谷近似“箱形”的占比最多。应用地理探测器对影响冰川槽谷形态特征的因素进行评价, 最主要的影响因素有冰川作用区面积因素和冰川作用正差因素, 其次是岩性因素, 再次是坡度和地形起伏度因素, 最后是冰川性质和槽谷朝向因素。冰川作用区面积因素和坡度因素的交互作用对冰川槽谷形态特征的影响最为显著。

关键词: 唐古拉山中西段; 冰川槽谷; V指数; 横剖面形态; 影响因素

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)04-1337-10

0 引言

冰川槽谷是冰川侵蚀作用下形成的一种典型地貌。研究冰川槽谷横剖面的形态特征有助于区分不同谷地的成因以及分析冰川的侵蚀过程和侵蚀能力^[1-5]。近几十年来, 针对青藏高原及其周边山地冰川槽谷横剖面形态的研究已取得了阶段性进展, 并且相关研究已进入量化阶段^[5-10]。崔之久^[11]在研究青藏高原主要山地冰川侵蚀地貌特征时指出, 仅有唐古拉山和祁连山的冰川槽谷横剖面属于宽浅型(槽谷的深宽比超过1:6)。李吉均^[12]在研究横断山脉冰川侵蚀地貌时, 指出此山地共保存4种槽谷剖面形态, 分别是普通“U”形、深窄“U”形、悬链“U”形和“箱形”, 并将前3种剖面形态用函数形式进行了表达。后续学者^[5,8,13]应用幂函数模型

($y=ax^b$)^[14]分别对天山、白马雪山和螺髻山等地的部分冰川槽谷形态进行了详细的分析。近期, Zimmer等^[15]在研究美国内华达山脉第四纪冰川侵蚀地貌特征时, 提出了量化表达冰川作用谷地形态的V指数模型, 并证明此方法在描述冰川作用谷地形态时较幂函数法、二次多项式法准确率更稳定、适用的槽谷形态更多。此前, 笔者已将此方法应用于他念他翁山脉的冰川槽谷横剖面形态特征分析, 取得了较好的结果^[16]。

冰川侵蚀作用谷地具有多种形态特征, 除了最常见的冰川作用谷地为“U”形谷地外, 还发育箱型、倒梯形等谷地形态, 在以往的研究中, 研究者大多集中于对偏“U”形谷地形态特征进行定性定量分析, 而对其他形态的谷地形态特征的量化研究很少; 同时针对唐古拉山宽浅型槽谷的具体表现也

收稿日期: 2022-06-25; 修订日期: 2022-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071013)资助

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

通信作者: 赵贺, 博士研究生, 主要从事冰川与环境演变研究. E-mail: 1053478527@qq.com

可以进一步深化。因此,运用最新的V指数模型,对于冰川槽谷形态进行定量分析,并探讨其影响因素仍需进一步深入。目前,探讨影响冰川槽谷剖面形态特征的主要因素时,大多采用较为传统的皮尔逊相关性分析法等^[16-18]。这些方法的解释能力有限,且仅能分析各个因素的单独作用,而忽略了这些因素之间的相互作用。地理探测器可以用来探测地理属性的空间差异性,并揭示其背后的驱动因素^[19],它的优点是:(1)探测数据类型可以是定性的,也可以是定量的;(2)可以探测两因素交互作用于因变量。此方法在多方面地理研究中都已有较好的应用^[20-21]。

作为青藏高原中部重要的冰川发育区,唐古拉山是研究冰川槽谷形态特征的理想山地。另外,由于区域内地形、冰川发育及岩性等特征分异显著,加之地理位置的特殊性,使得本研究区冰川槽谷横剖面特征存在一定的空间异质性。基于上述研究背景,本文选取唐古拉山中西段形态典型的冰川槽谷作为研究对象,基于V指数模型和地理探测器方法,分析研究区冰川槽谷的形态特征,以及影响冰川槽谷发育的主控因素。分析结果有助于了解大陆性冰川的发育特点、侵蚀程度以及宽浅型槽谷的具体特征。

1 研究区概况

唐古拉山脉位于青海省和西藏自治区的边界,本区新生代发育受控于印度-欧亚板块的大型逆冲推覆构造带,走向与山脉延伸方向一致,呈北西西向展布^[22],整个山脉的地势特点是由西向东逐渐降低^[23],海拔由6 621 m过渡到4 000 m以上(图1)。唐古拉山还是印度夏季风北上的第二道屏障,也是我国海洋性冰川向大陆性冰川过渡的重要地带^[23]。唐古拉山中西段(31°91′~33°40′N,90°83′~93°43′E)地势平缓,少数山头海拔达6 100 m以上,现代冰川发育面积可达678 km²^[23]。根据冰川发育类型可将本研究区分为东部(A区)、中部(B区)和西部(C区)(图1)^[23-24]。其中,东部是山谷冰川发育区;中部是山谷冰川向冰帽冰川过渡区,此区的冰川发育兼备了冰帽冰川和山谷冰川的特点;西部是冰帽冰川发育区。槽谷主要由冰帽冰川和山谷冰川侵蚀形成,其中一些主谷的两侧发育冰川悬谷,形成了大小各异的复合型山谷冰川。冰川性质包括极大陆性冰川和亚大陆性冰川^[25]。本区共发生六次冰川作用,包括倒数第二次冰期、末次冰期早冰阶、中冰阶、晚冰阶以及全新世的新冰期和小冰期^[26]。研究区属于典型的季风山地气候,主要受太平洋东南季风和印度洋西南季风的影响,年降水量约为400 mm^[26]。

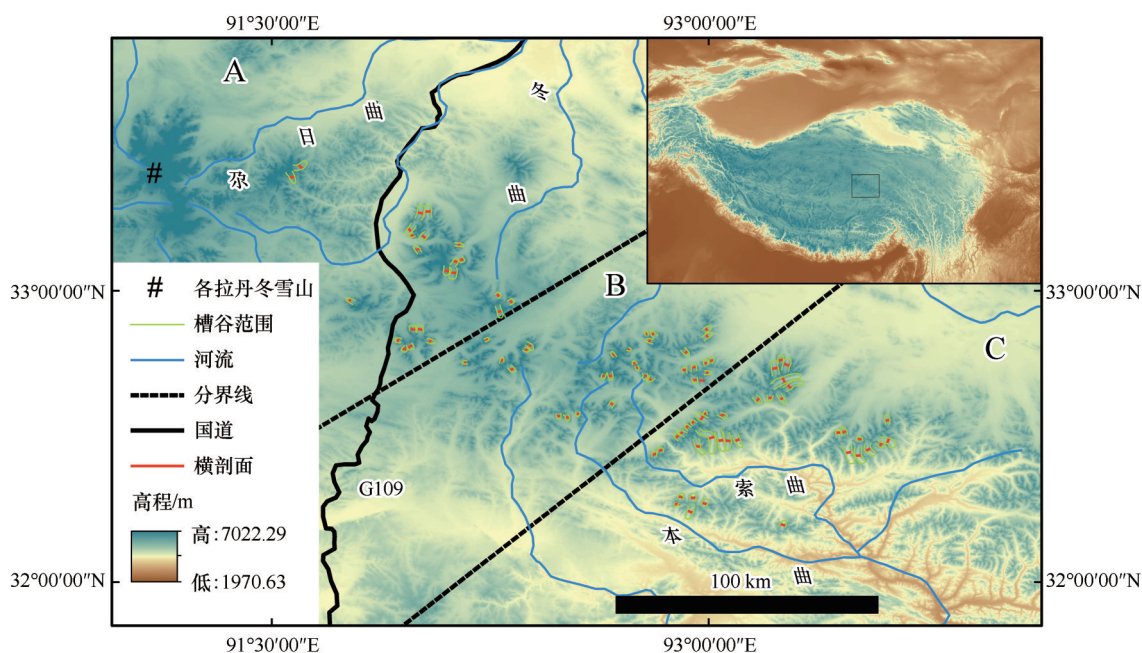


图1 唐古拉山中西段研究区范围与创建的冰川槽谷横剖面示例图(A:冰帽作用区; B:冰帽冰川至山谷冰川过渡作用区;C:山谷冰川作用区)

Fig. 1 Example map of study area extent and created glacial valley cross section in the middle and west Tanggula Mountain (A: ice cap action area; B: ice cap glacier to valley glacier transition action area; C: valley glacier action area)

区内出露石炭纪、二叠纪、侏罗纪、古近纪和新近纪地层,岩石类型主要为花岗岩、碳酸盐岩、砾岩、页岩、泥岩等^[27]。

2 材料与方法

2.1 数据来源与提取

以 ArcGIS10.6 作为技术平台,用于生成河网、提取谷地横截面、获取谷底高程数据集,在工作空间中使用 WGS-84 坐标系处理数据。本文使用的 GDEM V2 30 m 分辨率的数字高程数据可以从地理空间数据云网站(<https://www.gscloud.cn/>)下载。根据现场实际考察和前人的研究成果并结合谷歌地图,选取研究区受后续河流影响较小、谷地填充物较少且发育典型的冰川槽谷 91 条。由于末次冰期以来的冰川槽谷形态特征清晰,受后期其他营力影响较小,故本文以末次冰期以来的冰川作用末端作为边界。部分槽谷的末端可以通过具有年代学的冰川遗迹确定;另一些槽谷可以首先根据 CF 法和 TSAM 法重建末次冰期冰川物质平衡线高度,然后再应用 THAR 法即可确定槽谷的末端。首先根据冰川地貌基本特征确定每条冰川槽谷的大致范围,然后基于每条槽谷内的 DEM 生成河网矢量数据集,为了准确地提取流域水系,在谷歌地图上对

水系进行了反复对照,最终选择 1 000 为阈值。之后使用 ArcMap 中的 ET Geowizards 站线工具,即可自动生成指定宽度且垂直于河网的横剖面线。本文选择的宽度是 2 km,因为这个宽度可以最大程度地覆盖研究区内所有山谷类型。考虑到研究区冰川作用谷地特征的空间异质性,每条槽谷生成一条位于槽谷中间位置的剖面线(图 1)。最后基于 DEM 数据提取每条横截面上的高程数据,然后将数据导入 MATLAB 脚本中计算 V 指数。其中,脚本运行前要求输入的指定高度根据每条谷地实际谷肩距谷底的高程设定。本文的谷肩位置通过谷歌地图判读结合野外考察获取。

2.2 V 指数模型

山区河流和冰川侵蚀机制的差异会造成两者谷地横剖面形态的不同,通常河谷呈“V”形,而冰川谷呈“U”形。该模型据此研究了谷底上方特定冰川作用深度的谷面面积(A_x)与具有相同深度和宽度的理想“V”形截面面积(A_v)间的关系。V 指数(V)计算公式为:

$$V = (A_x/A_v) - 1 \quad (1)$$

V 指数描述谷地形态与“V”形谷的偏差程度,理想的“V”形谷的 V 指数为 0,“U”形谷的 V 指数 > 0;而凸谷的 V 指数 < 0(图 2)。

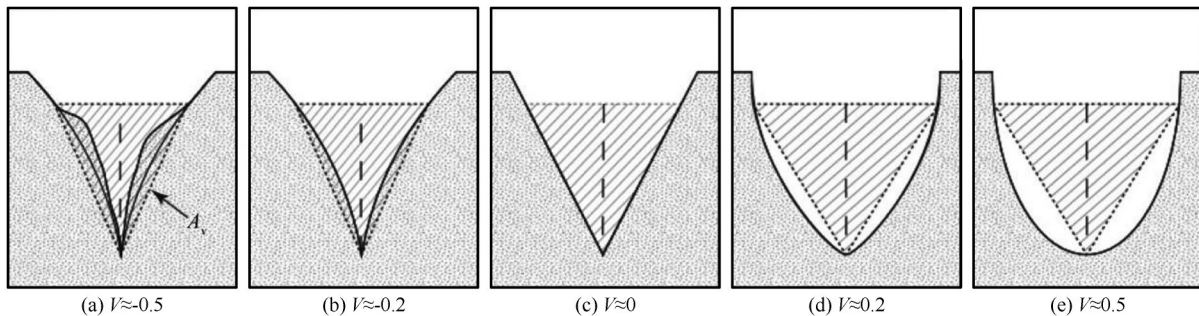


图 2 V 指数和相应的谷形的对应关系

Fig. 2 Correspondence between V and corresponding valley shape

2.3 V 指数与 b 值之间的关系

假设冰川槽谷某一侧横剖面的形态为半“U”形,根据幂函数模型^[14]和 V 指数模型的计算公式,这个半“U”形的 V 指数可以表示为:

$$V = \frac{xy - \int_0^x ax^b dx}{\frac{xy}{2}} - 1 \quad (2)$$

进而得到 V 指数与 b 值的关系式:

$$V = 1 - \frac{2}{b+1} \quad (3)$$

如果槽谷剖面的两侧是对称的,那么这个完整槽谷横剖面的 V 指数与幂函数 b 值之间的关系就可用公式(3)表示,且两者呈正相关关系。另外,典型的冰川槽谷横剖面 b 值主要集中在 1.5~2.5^[6-7,28-29],那么对应的典型冰川槽谷横剖面 V 指数应介于 0.20~0.43。即 V 指数小于 0.20 的槽谷呈现由“V”形谷向典型“U”形谷过渡的形态,侵蚀程度小;介于 0.20~0.43 之间属于具有典型“U”形形态的冰川槽谷;而大于 0.43 的槽谷较典型“U”形谷形态更复

杂。在实地考察中发现V指数大于0.43的槽谷一般谷底宽阔,谷壁与谷底有夹角,有些甚至接近90°,且谷壁弧度不明显,总体呈现出“倒梯形”或近似“箱形”的形态。虽然部分槽谷形态存在不完全对称的情况,但一般相差不大,所以在实际计算中即可用上述关系将V指数与槽谷剖面特征进行对应。

2.4 地理探测器

分异探测:当某个影响因素对某一地理特征影响较大时,那么这个因素X和地理特征Y的空间分布应该呈现出相似性,具体结果q通过GeoDetector软件可以获取^[19]。此模型的表达式是:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

式中:L是X和Y的分层,也就是分类或分区; N_i 和 N 分别为层h和全区的单元数; σ_i^2 和 σ^2 分别是X、Y的方差。q的取值范围为[0,1],q值越大表示影响因素X对地理属性Y的解释力越强。极端情况下,q值为1表明因子X完全控制了Y的空间分布,q值为0则表明因子X与Y没有任何关系。

交互探测:用于识别各个影响因素 X_s 间的交互作用,即评估在因素 X_1 和 X_2 的共同作用下对地理特征Y的解释能力是增大或减小,或这些因素对Y的影响是相互独立的。具体方法是先分别计算 X_1 和 X_2 因素对Y的q值: $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$,其次计算两个因素交互下的q值: $q(X_1 \cap X_2)$,最后把 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较。交互探测关系包含以下几种:(1)当存在关系 $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$ 时表示非线性增强;(2)当存在关系 $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$ 时表示相互独立;(3)当存在关系 $q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$ 时表示双因子增强;(4)当存在关系 $\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$ 时表示单因子非线性减弱;(5)当存在关系 $q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$ 时表示非线性减弱。

2.5 冰川槽谷形态空间分异的影响因素

根据冰川的发育和运动特征,影响冰川槽谷形态特征的因素主要有地形因素、冰川动力因素、冰川性质因素、岩性因素和构造因素^[4]。其中,地形因素主要是指坡度、地形起伏度和槽谷朝向;冰川动力因素是指冰川作用区面积和冰川作用正差。具体而言,坡度是指选取的每个横剖面位置处的坡度值;地形起伏度是指选取横剖面位置以上山地的最高点海拔高度与最低点海拔高度的差值;本文的槽

谷朝向是指每条槽谷选取的中间位置横剖面的方向,采用0°及360°为正北方向, $-22.5^\circ < \beta \leq 22.5^\circ$ 用N表示,为北向; $22.5^\circ < \beta \leq 67.5^\circ$ 用NE表示,为东北向;以此类推顺时针依次用E、SE、S、SW、W、NW表示其他槽谷朝向。研究区槽谷朝向以南、北方向为主,东、西方向最少(图3)。由于冰川槽谷的相关ELA数据获取较易,且计算更便捷,所以冰川作用区面积可由冰川物质平衡线(ELA)以上的冰川发育面积(积累区面积)替代^[17],其中,末次冰期平衡线高度通过CF法和TSAM法重建,均值约为5200m,与前人的研究结果相似^[23];冰川作用正差是指山地最大海拔高度与ELA海拔高度之差^[17]。如图4所示,研究区内冰川性质分界线以西是极大陆型冰川,以东是亚大陆型冰川^[25]。区域内选取的槽谷剖面覆盖的岩性主要包括七大类(图4)。而构造特征无法转换成数据,所以本文未利用地理探测器探测此因素,仅用文字讨论。

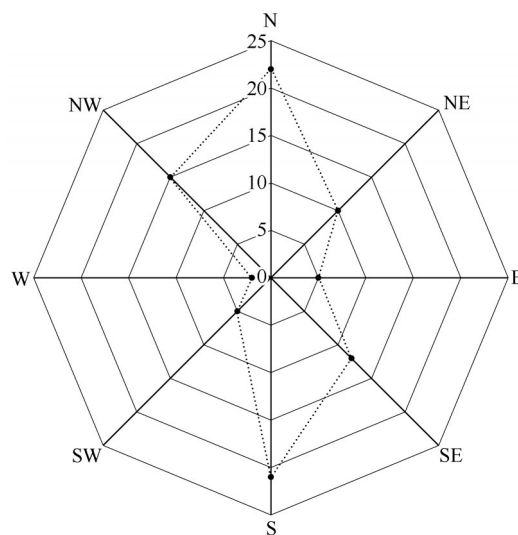


图3 冰川槽谷朝向玫瑰图

Fig. 3 Glacial valley heading rose map

3 结果分析

3.1 冰川槽谷横剖面形态分布规律

研究区冰川槽谷长2.5~12.5 km,平均宽度1.8 km,深100~200 m,海拔介于5690~4710 m。计算结果表明,研究区冰川槽谷横剖面V指数的最小值为0.04,最大值为0.95,均值为0.42。各谷地剖面的V指数数值都>0,其中,V指数<0.20的有17条,占19%;V指数介于0.20~0.43之间的有44条,占48%;V指数>0.43的有30条,占33%(图5)。

分别统计北坡和南坡的冰川槽谷剖面V指数

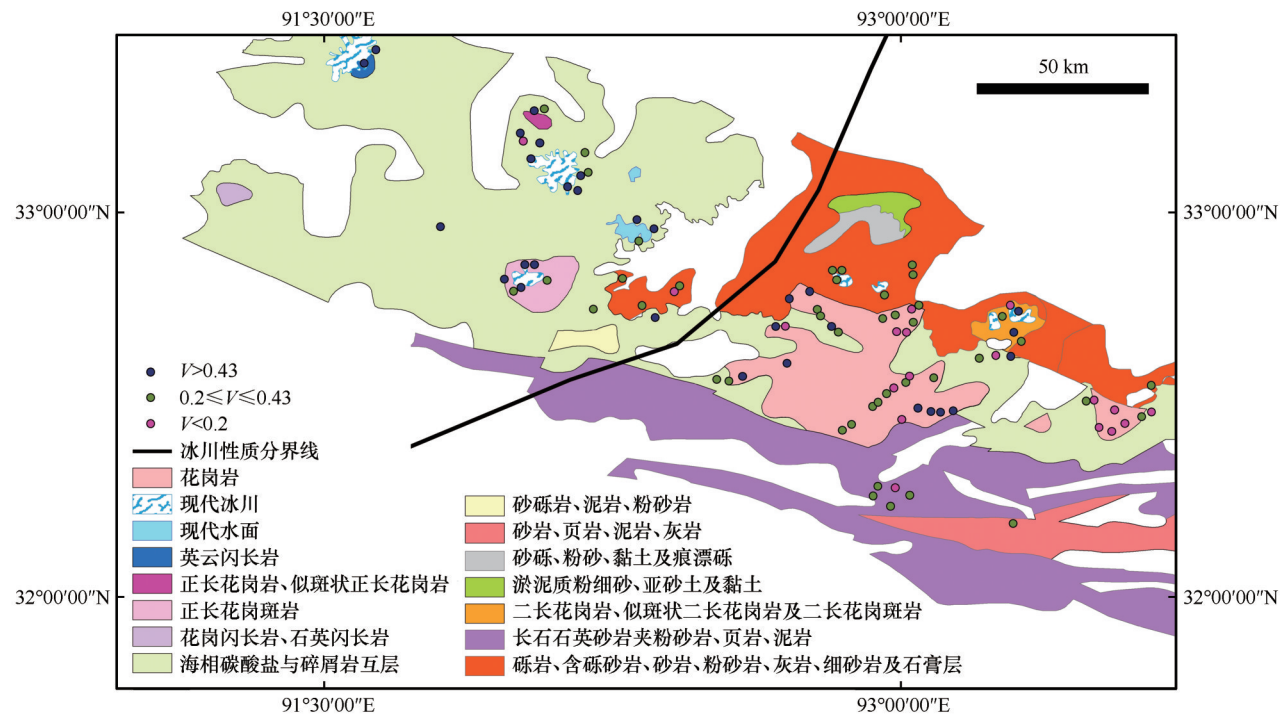


图4 唐古拉山中西部V指数与岩性分布图^[27]

Fig. 4 V and lithological distribution map in the middle and west of Tanggula Mountain^[27]

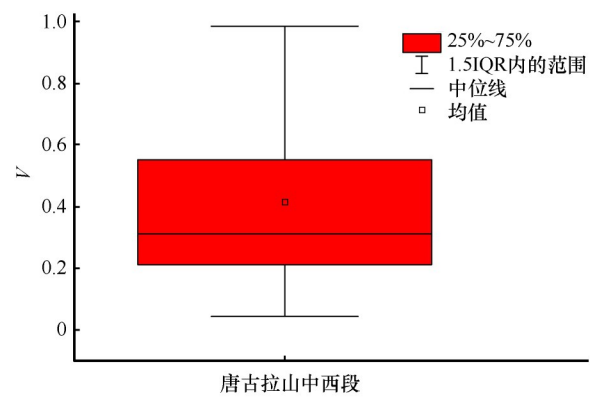


图5 唐古拉山中西段V指数箱型图

Fig. 5 V box diagram of the middle and west section of Tanggula Mountain

以分析其发育特征的差异,选取的冰川槽谷位于北坡的有52条,位于南坡的有39条。比较每条冰川槽谷V指数发现,无论北坡还是南坡槽谷发育特征差异都较大,北坡冰川槽谷V指数<0.20的有6条,占12%;V指数介于0.20~0.43之间的有31条,占60%;V指数>0.43的有15条,占28%。南坡冰川槽谷V指数<0.20的有11条,约占29%;V指数介于0.20~0.43之间的有13条,占33%;V指数>0.43的有15条,占38%(图4、图6)。由此可见,北坡的槽谷主要呈现出典型的“U”形形态,其次是近似“箱形”的形态,少部分呈现由“V”形向典型“U”形过渡

的形态;而南坡的槽谷三种形态发育数量相差不大。其中,北坡发育的冰川槽谷V指数最小值为0.10,最大值为0.95,均值为0.42;南坡发育的冰川槽谷V指数最小值为0.04,最大值为0.95,均值为0.47。

选取的槽谷中位于东部、中部和西部的数量分别为37条、31条和23条。东部冰川槽谷V指数<0.20的有10条,占27%;V指数介于0.20~0.43之间的有20条,占54%;V指数>0.43的有7条,占19%。中部冰川槽谷V指数<0.20的有5条,占16%;V指数介于0.20~0.43之间的有19条,占61%;V指数>0.43的有7条,占23%。西部冰川槽谷V指数<0.20的有2条,占9%;V指数介于0.20~0.43之间的有5条,占21%;V指数>0.43的有16条,占70%(图4、图6)。其中,东部冰川槽谷的V指数最小值为0.04,最大值为0.95,均值为0.36;中部的冰川槽谷V指数最小值为0.04,最大值为0.95,均值为0.40;西部的冰川槽谷V指数最小值为0.04,最大值为0.95,均值为0.64。上述结果表明,冰帽冰川发育区的槽谷V指数均值在三个区域中最大,且槽谷以趋近“箱形”形态为主,侵蚀程度较强;而山谷冰川作用区和过渡区的槽谷V指数均值相似,且槽谷形态都以典型“U”形为主,侵蚀程度较弱。呈现上述现象的原因可能与地形因素、冰川动

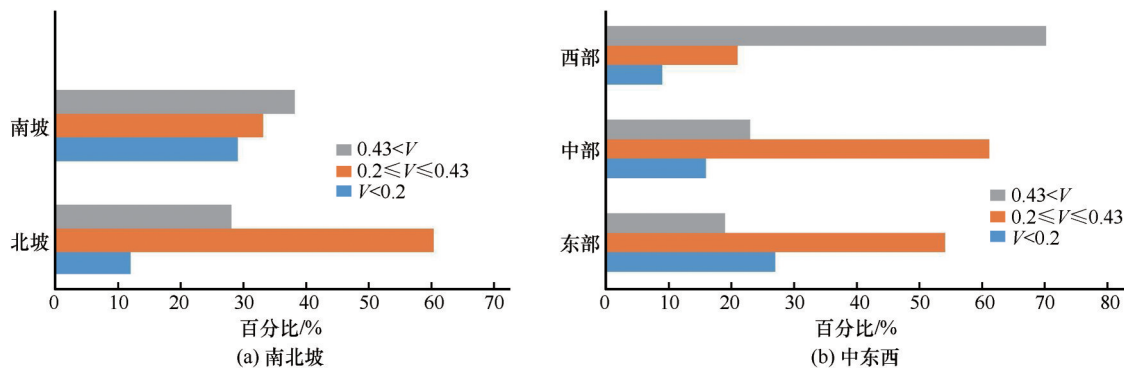


图6 南北坡V指数分布特征(a)和东、中、西三部V指数分布特征(b)

Fig. 6 V distribution characteristics of north-south slope (a) and V distribution characteristics of east, middle and west slope (b)

力因素密切相关。具体而言,西部夷平面广布,冰帽冰川发育,在这种地形影响下冰川物质平衡线的少量下降也会造成冰川的强烈扩张。因此,此区冰川规模较大,冰川动力较强,冰川侵蚀能力更强,槽谷形态更接近于“箱形”。而东部和中部地形切割程度较西部强,所以此区冰川的扩张不如西部强烈,冰川侵蚀能力也不如西部,槽谷形态更接近于典型“U”形。除此之外,箱形槽谷的形成可能也与冰前地形的非“V”形形态有关。

3.2 槽谷横剖面形态的影响因素分析

地理探测器可以分析各因素的空间分异程度。由表1可知,各个因素在不同程度上解释了槽谷形态的空间差异。地理探测器q值显示的各因素与槽

谷形态间的相关性程度如下:冰川作用区面积(0.3695)>冰川作用正差(0.2143)>岩性(0.1816)>坡度(0.1784)>地形起伏度(0.1221)>冰川性质(0.0973)>槽谷朝向(0.0680)。因此,上述定量的因素中冰川作用区面积和冰川作用正差因素是本研究区冰川槽谷形态空间分异最主要的控制因素,其次是岩性因素,再次是坡度和地形起伏度因素,最后是冰川性质和槽谷朝向因素。另外,q值对应的p值代表了每个因子的显著性。一般而言,如果p值越小,说明因素X对因变量Y的影响越显著。但有些数据总体差异较小(如坡度和地形起伏度),分区后平均值差异不大也会造成p值较大的情况。

表1 地理探测器各因素探测结果

因素	坡度 X_1	地形起伏度 X_2	槽谷朝向 X_3	冰川作用区面积 X_4	冰川作用正差 X_5	冰川性质 X_6	岩性 X_7
q 值	0.1784	0.1221	0.0680	0.3695	0.2143	0.0973	0.1816
p 值	0.7280	0.4547	0.6453	0.0030	0.1239	0.0164	0.0827

冰川作用区面积和冰川作用正差因素是本研究区冰川槽谷形态空间分异最主要的控制因素,具体而言:研究区内冰川作用面积越大、冰川动力越强时,槽谷的形态越接近典型“U”形或“箱形”。而岩性因素也是研究区内槽谷形态变化不可忽视的因素,具体表现在:区内的岩石类型中,花岗岩与闪长岩的硬度最强,其次是碳酸盐岩,再次是砾岩、砂岩和页岩,而泥岩等最弱。从代表区内冰川槽谷剖面形态的V指数结果来看,冰川槽谷在不同岩性处的形态表现基本符合上述侵蚀规律。针对地形因素(包括坡度和地形起伏度因素)对区内冰川槽谷形态的影响可以解释为:因本文选取地形数据是指每条槽谷中的地形,也就是槽谷沿程的坡度和地形

起伏度,此时的地形会通过影响基底剪切应力从而改变冰底滑动速率的方式改变冰川槽谷形态^[30-31]。一般来说,极大陆型冰川的侵蚀能力比亚大陆型冰川弱^[25],但研究区内槽谷V指数普遍较大的冰帽冰川发育区(A区)属于极大陆型冰川,而槽谷V指数普遍较小的山谷冰川发育区(C区)属于亚大陆型冰川,这与侵蚀规律不符,所以冰川性质不是槽谷形态的主控因素。此外,槽谷朝向也不是本研究区槽谷形态的主控因素,因为槽谷总共有八个朝向,每个朝向的V指数均值不存在规律,且每个朝向均保存了多种形态的谷地。构造活动主要通过降低冰川物质平衡线、改变山地坡度、影响地热通量等方面影响冰川槽谷剖面变化^[15,32]。青藏高原虽

然处于不断的隆升过程^[33],但整体性的抬升并不会造成小范围研究区的冰川发育差异。并且根据前人的调查结果,唐古拉山脉整体处于同一个地层分区中,受大断裂的影响较小^[34],山脉内断层也较少,所以构造因素在本研究区冰川槽谷形态特征方面的影响可以忽略不计。综上所述,影响本研究区冰川槽谷形态差异最主要的因素是冰川作用区面积和冰川作用正差因素,其次是岩性因素,再次是坡度和地形起伏度因素;而冰川性质因素、槽谷朝向因素和构造因素对本研究区槽谷形态的影响可以忽略不计。

实际上,冰川槽谷形态特征往往是由多个因素共同作用的结果,所以为了进一步确定不同因素的组合作用对槽谷形态的解释力是加强还是削弱,需要进行交互探测。基于表 1~2 中 q 值结果,冰川作用区面积与冰川作用正差、冰川作用区面积与冰川性质、冰川作用区面积与岩性、冰川作用正差与冰川性质、冰川作用正差与岩性、冰川性质与岩性的因素组合关系都属于双因子增强,而其他两两因素

的组合交互作用都大于其叠加作用,属于非线性增强关系。另外,根据探测结果,冰川作用区面积因素和坡度因素的交互作用对冰川槽谷形态特征的影响最大。这两因素可以通过既增大冰川规模又增强冰川基底滑动速率的方式使得冰川槽谷形态更趋近于典型“U”形或“箱形”。

目前,已经对青藏高原部分山地的冰川槽谷形态特征及其影响因素做出了详细的研究^[16-18]。这些槽谷发育的冰川性质包括海洋性冰川、亚大陆性冰川和极大陆性冰川。结合本文研究结果来看,无论哪种冰川性质的槽谷形态都可能受到坡度因素和地形起伏度的影响。而从纬向分布的角度,这些槽谷分布在青藏高原的中高纬和中低纬度。其中,分布于中低纬度的槽谷形态主要受冰川规模的影响,而冰川规模的增大通常通过冰川作用区面积和冰川作用正差等因素的改变而实现,这与本文得到的冰川作用区面积和冰川作用正差因素是影响唐古拉山中西段冰川槽谷形态变化的主要因素结论相符。

表 2 地理探测器的交互探测
Table 2 Interactive detection of geographic detectors

	坡度 X_1	地形起伏度 X_2	槽谷朝向 X_3	冰川作用区面积 X_4	冰川作用正差 X_5	冰川性质 X_6	岩性 X_7
坡度 X_1	0.1784						
地形起伏度 X_2	0.4437	0.1221					
槽谷朝向 X_3	0.7016	0.4438	0.0680				
冰川作用区面积 X_4	0.8097	0.7862	0.6765	0.3695			
冰川作用正差 X_5	0.6539	0.6625	0.4545	0.5313	0.2143		
冰川性质 X_6	0.3107	0.2756	0.2477	0.3970	0.2230	0.0973	
岩性 X_7	0.5720	0.5488	0.3824	0.5160	0.3063	0.2314	0.1816

4 对比分析

本文 V 指数与 Zimmer 在内华达山脉的研究^[15]和笔者在他念他翁山的研究^[16]有较大的差异。内华达山脉存在 V 指数 >0.43 的槽谷但最大值是 0.67,他念他翁山也存在 V 指数 >0.43 的槽谷但最大值是 0.53,而本文首次计算得到有 V 指数结果接近于 1。那么 V 指数近似于 1 时代表了怎样的冰川槽谷形态呢?首先,根据上述讨论可知 V 指数 >0.43 的槽谷一般呈现出“倒梯形”或“箱形”形态。其次,基于 V 指数模型的计算原理[式(1)],当计算得到 V 指数结果接近于 1 时,面积(A_v)的大小应为面积(A_r)大小的近 2 倍,所以此时的冰川槽谷剖面形态接近于矩形或者说“箱形”。李吉均^[12]在研究

横断山脉范围内的贡嘎山和稻城冰帽冰川侵蚀地貌时也指出,这两个山地保存着“箱形”形态的冰川槽谷,这与本文得到的结果相符。而唐古拉山保存的大多数“宽浅型”槽谷可能就是“箱形”形态。从 V 指数的结果来看,箱形槽谷相对于冰前河流“V”形谷偏差程度较大,可能代表了侵蚀程度较强。另一方面箱形槽谷的形成可能也与冰前地形的非“V”形态密切相关。另外,根据“箱形”槽谷的形态特征和模型计算原理, V 指数模型可以更好地识别“箱形”槽谷。因为幂函数、二次多项式等模型在计算时的假设前提就是槽谷横剖面要呈抛物线或“U”形形态,而 V 指数模型只需输入相应的数据直接计算,不用考虑此假设前提。

5 结论

(1)冰川槽谷横剖面的V指数与幂函数 b 值之间可以相互替代,且典型冰川槽谷横剖面的V指数介于0.20~0.43之间。

(2)唐古拉山中西段保存着“箱形”形态的冰川槽谷,“箱形”形态的槽谷可以通过V指数(>0.43)进行识别和定量描述。

(3)根据V指数计算结果,本研究区选取的冰川槽谷呈典型“U”形的数量最多,其次是近似于“箱形”的,最少的是由“V”形向典型“U”形过渡的槽谷。北坡的槽谷形态主要呈现典型“U”形,其次是近似“箱形”的形态,少部分呈现由“V”形向典型“U”形过渡的形态;而南坡的槽谷三种形态发育的数量基本相同。冰帽冰川发育区的槽谷以近似“箱形”为主;而山谷冰川作用区和过渡区的槽谷都以典型“U”形为主。

(4)冰川作用区面积和冰川作用正差因素是造成冰川槽谷形态差异的主要原因,而从交互关系来看冰川作用区面积因素与坡度因素的交互作用对冰川槽谷形态特征的影响最大。其他各个因素(地形因素、冰川动力因素、冰川性质因素、岩性因素和构造因素)对唐古拉山中西段冰川槽谷形态的空间分异有着不同程度的影响。

参考文献(References):

- [1] Li Jijun, Zhou Shangzhe, Pan Baotian. The problems of Quaternary glaciation in the eastern part of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 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.]
- [2] Cui Zhijiu, Chen Yixin, Zhang Wei, et al. Research history, glacial chronology and origins of quaternary glaciations in China [J]. *Quaternary Sciences*, 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.]
- [3] Sernai 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.
- [4] Yao Pan, Wang Jie. A review of the quantified analysis methods of glacial trough and its influential 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.]
- [5] Zhang Wei, Bi Weili, Li Yonghua, et al. Analysis of the geomorphology features of the glacial trough valleys and the influence factors in the Baimaxue Shan, northwest of Yunnan Province [J]. *Quaternary Sciences*, 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.]
- [6] Li Yingkui, Liu Gengnian, Cui Zhijiu. The morphological character and paleo climate indication of the cross section of glacial valleys [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 1999, 7(2): 163-170. [李英奎, 刘耕年, 崔之久. 冰川槽谷横剖面形态特征的古环境标志再探讨[J]. 应用基础与工程科学学报, 1999, 7(2): 163-170.]
- [7] Li Yingkui, Liu Gengnian. The cross-section variation of glacial valley and its reflection to the glaciation [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(2): 235-242. [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): 235-242.]
- [8] 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.]
- [9] Li Yingkui, Liu Gengnian, Cui Zhijiu. Longitudinal variations in cross-section morphology along a glacial valley: a case-study from the Tien Shan, China [J]. *Journal of Glaciology*, 2001, 47(157): 243-250.
- [10] Li Yingkui, Liu Gengnian, Cui Zhijiu. Glacial valley cross-profile morphology, Tian Shan Mountains, China [J]. *Geomorphology*, 2001, 38(1/2): 153-166.
- [11] Cui Zhijiu. Essential features of the development of clacialand-forms on Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1980, 35(2): 137-148. [崔之久. 青藏高原(及其邻近山地)冰川侵蚀地貌发育的基本特征与影响因素[J]. 地理学报, 1980, 35(2): 137-148.]
- [12] *Glaciers in the Hengduan Mountains* [M]. Beijing: Science Press, 1996. [中国科学院青藏高原综合科学考察队编. 横断山冰川[M]. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [13] Zhang Wei, He Daiwen, Liu Libo, et al. Evolution of glacial trough and influence factors of the Qingshui Valley in Luoji Mountain, Sichuan Province [J]. *Progress in Geography*, 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.]
- [14] Svensson H. Is the cross-section of a glacial valley a parabola? [J]. *Journal of Glaciology*, 1959, 3(25): 362-363.
- [15] Zimmer P D, Gabet E J. Assessing glacial modification of bed-rock valleys using a novel approach [J]. *Geomorphology*, 2018, 318: 336-347.
- [16] 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.]
- [17] Yao Pan. Spatial variations of glacial erosion and its influential factors in the Qilian Mountain [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.]
- [18] Yao Pan, Wang Jie, Harbor J M, et al. The relative efficiency and influence of glacial and fluvial erosion on Tibetan Plateau landscapes [J]. *Geomorphology*, 2020, 352: 106988.
- [19] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and perspective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.]
- [20] Zhang Jinxi, Gong Jie, Liu Dongqing. Dynamics and driving factors of landscape fragmentation based on geo detector in the

- Bailongjiang watershed of Gansu Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(8): 1370-1378. [张金茜, 巩杰, 柳冬青. 地理探测器方法下甘肃白龙江流域景观破碎化与驱动因子分析[J]. *地理科学*, 2018, 38(8): 1370-1378.]
- [21] Li Linfeng, Li Kaiming. Study on the relationship between glacier change and topographic factors in the Shiyang River Basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1026-1035. [李林凤, 李开明. 石羊河流域冰川变化与地形因子的关系探究[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(5): 1026-1035.]
- [22] Li Yalin, Wang Chengshan, Yi Haisheng, et al. Cenozoic thrust system and uplifting of the Tanggula mountain, northern Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(8): 1118-1130, 1234. [李亚林, 王成善, 伊海生, 等. 西藏北部新生代大型逆冲推覆构造与唐古拉山的隆起[J]. *地质学报*, 2006, 80(8): 1118-1130, 1234.]
- [23] Li Jijun. *Tibet Glacier* [M]. Beijing: Science Press, 1986. [李吉均. *西藏冰川* [M]. 北京: 科学出版社, 1986.]
- [24] Jiao Keqin, Shen Yongping. The quaternary glaciations and glacier properties in the Tanggula range [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(1): 34-42. [焦克勤, 沈永平. 唐古拉山地区第四纪冰川作用与冰川特征[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(1): 34-42.]
- [25] Shi Yafeng. *Glaciers and their environments in China: the present, past and future* [M]. Beijing: Science Press, 2000. [施雅风. *中国冰川与环境: 现在、过去和未来* [M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [26] Wang Jie, Zhou Shangzhe, Tang Shulin, et al. The sequence of quaternary glaciations around the tanggula pass [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(1): 149-155. [王杰, 周尚哲, 唐述林, 等. 唐古拉山垭口地区的第四纪冰川测年新研究[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(1): 149-155.]
- [27] Chinese Academy of Geological Sciences. *Geological Atlas of China* [M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2002. [中国地质科学院. *中国地质图集* [M]. 北京: 地质出版社, 2002.]
- [28] Liu Gengnian. Research on glacial erosional landforms: Case study of luojishan Mt. western Sichuan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1989, 11(3): 249-259, 287. [刘耕年. 川西螺髻山冰川侵蚀地貌研究[J]. *冰川冻土*, 1989, 11(3): 249-259, 287.]
- [29] Kassab C, Harbor J. Alternative coordinate systems for analyzing cross-section shapes of glaciated valleys: a case study from the Dalijia Mountains, China [J]. *Physical Geography*, 2013, 34(2): 108-123.
- [30] Raymond C F. Flow in a transverse section of athabasca glacier, Alberta, Canada [J]. *Journal of Glaciology*, 1971, 10(58): 55-84.
- [31] Raymond C F. How do glaciers surge? A review [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(B9): 9121-9134.
- [32] Lai Jingtao, Anders A M. Tectonic controls on rates and spatial patterns of glacial erosion through geothermal heat flux [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 543: 116348.
- [33] Li Jijun, Zhou Shangzhe, Zhao Zhijun, et al. Discussion on the main curtain of Tibetan Movement [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2015, 45(10): 1597-1608. [李吉均, 周尚哲, 赵志军, 等. 论青藏运动主幕[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(10): 1597-1608.]
- [34] Li Shanglin, Ma Boyong, Qiao Gengbiao, et al. Stratigraphic division and fault characteristics of the Suoxian-Tanggulashan area in northern Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(Suppl 1): 40-41. [李尚林, 马伯永, 乔耿彪, 等. 西藏北部索县至唐古拉山一带的地层分区及分区断裂特征[J]. *地质学报*, 2013, 87(增刊1): 40-41.]

Analysis on the shape of glacial valley and its influencing factors in the middle and west section of Tanggula Mountain

ZHANG Wei, ZHAO He

(College of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116021, Liaoning, China)

Abstract: Glacial valley is a typical landform formed by glacial erosion. Studying the morphological characteristics of the cross-section of the glacier valley is helpful to distinguish the causes of different valleys and analyze the erosion process and erosion capacity of the glacier. Glacial erosion valley has many morphological characteristics. In addition to the most common glacial valley being U-shaped valley, box shaped and inverted trapezoidal valley forms are also developed. In the previous studies, researchers mostly focused on qualitative and quantitative analysis of the morphological characteristics of the partial U-shaped valley, while few quantitative studies on the morphological characteristics of other forms of valley; At the same time, the specific performance of the wide and shallow valley of Tanggula Mountain can be further deepened. When Zimmer studied the Quaternary glacial erosion geomorphologic features of the Sierra Nevada in the United States, he proposed a V-index (V) model to quantitatively express the glacial valley morphology, which proved that this method has higher accuracy than the power function method and the quadratic polynomial method in describing the glacial valley morphology. Geographic detectors can be used to detect the spatial differences of geographic attributes and reveal the driving factors behind them. Its advantages are: (1) the types of detection data can be qualitative or quantitative

tive; (2) The interaction of two factors on the dependent variable can be detected. This method has been well applied in many geographical studies. As an important glacier development area in the central part of the Qinghai Tibet Plateau, Tanggula Mountain is an ideal mountain for studying the morphological characteristics of glacier valleys. In addition, due to the significant differences in the terrain, glacier development and lithology in the region, and the particularity of the geographical location, the cross-sectional characteristics of the glacier valley in the study area have certain spatial heterogeneity. Based on the above research background, this paper selects the typical glacier valley in the middle and west section of Tanggula Mountain as the research object, and analyzes the morphological characteristics of the glacier valley in the research area and the main control factors affecting the development of the glacier valley based on the V model and the geographical detector method. The analysis results are helpful to understand the development characteristics and erosion degree of continental glaciers and the specific characteristics of wide shallow valley. The results show that: (1) the V and the power function b value of the cross section of the glacier valley can be replaced each other, and the V of the cross section of the typical glacier valley is between 0.20 and 0.43. (2) There are “box shaped” glacial valleys in the study area, whose V is close to 1. (3) 19% of the cross-section V of the glacier valley in the study area is less than 0.20; The proportion of V between 0.20 and 0.43 is 48%; The proportion of $V > 0.43$ is 33%, indicating that the number of typical U-shaped valleys in the study area is the largest. In addition, the north slope mainly develops typical glacial valleys, accounting for 60%, while the south slope has the same number of valleys in various forms. (4) In the study area, the typical U-shaped valleys in the valley glacier development area and the transition area account for the most, while the “box shaped” valleys in the ice cap development area account for the most. (5) Geographical detectors are used to evaluate the factors that affect the morphological characteristics of glacial valleys. The most important factors are the area of glaciation area and the positive difference of glaciation, the second is the lithologic factor, the third is the slope and topographic relief, and the last is the glacial nature and the direction of the valley. The interaction of the area factor and the slope factor in the glaciation zone has the most significant effect on the morphological characteristics of the glacier valley.

Key words: the middle and west section of Tanggula Mountain; glacier valley; V -index; cross section morphology; influence factor

(责任编辑: 王杰)