文章编号: 0375-5444 (2000) 02-0235-08

冰川槽谷横剖面沿程变化 及其对冰川动力的反映

李英奎. 刘耕年

(北京大学城市与环境学系,北京 100871)

摘要:冰川槽谷梯级宽深比定义为槽谷横剖面上相同等高线间距离与对应深度的比值。它可以 描述槽谷横剖面形态的总体特征,便于不同槽谷横剖面形态的对比。统计分析表明槽谷梯级宽 深比随槽谷深度的变化符合幂函数模型。使用这一模型描述冰川槽谷横剖面的总体形态并据此 探讨冰川槽谷横剖面形态的沿程变化。主要结论如下:简单槽谷从上源到雪线附近,模型参数 显示为槽谷展宽,谷壁变陡,从雪线向下游,槽谷变窄,谷壁变缓;从简单槽谷段向复合槽谷 段,槽谷明显展宽,谷壁变陡,从复合槽谷段向单流槽谷段,槽谷变窄,谷壁变缓。 关键词:简单槽谷;复合槽谷;简单槽谷段;复合槽谷段;单流槽谷段;梯级宽深比 中图分类号: P931.4 文献标识码:A

冰川槽谷横剖面一般呈"U"形,它常是一个地区曾发育过冰川作用的关键指标之一, 对恢复区域古环境具有重要意义。但其它一些成因的谷地也可具有"U"形形态,这是一些 地区是否曾存在冰川作用争论的症结所在¹¹。因此,精确描述槽谷形态并研究其与冰川动力 特征的关系成为判断不同谷地成因的关键所在。

冰川槽谷横剖面形态的沿程变化反映了冰川侵蚀特征的沿程分异,对冰川动力的研究 和区分不同谷地的成因具有重要意义。但过去的研究只局限于少数区域的定性观察和简单 分析^[2]。本文以天山乌鲁木齐河源及其相邻地区的槽谷统计资料为基础,通过槽谷沿程不同 横剖面的形态特征对比,探讨冰川槽谷横剖面形态的沿程变化特征。

1 冰川槽谷的横剖面模型

冰川槽谷横剖面形态的研究目前已进入定量阶段。1959年, H. Sevensson^[3]根据瑞典北部Lapporton冰川谷的测算,认为冰川谷的横剖面符合抛物线形态,可用 $y = ax^b$ 来描述,并认为b接近于 2。一些学者^[4~6]相继采用这一模型对不同地区的冰川槽谷进行了测算,进一步验证了这一模型,同时认为b值并不只局限于 2,而是具有较大的变化范围。b值的大小反映了槽谷的陡度,与冰川的侵蚀能力密切相关^[4,6]。进一步的研究认为冰川槽谷剖面参数a和b之间具有密切的关系,可以相互确定^[6]。

收稿日期:	1999-09-12;	修订日期:	1999-01-18
-------	-------------	-------	------------

- 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49671075) [Foundation Item: National Natural Science Foundation of China, No. 49671075]
- 作者简介: 李英奎 (1970-), 男, 博士生。E-mail: yingkui@ 263. net

但目前的槽谷抛物线模型还不适用于不同槽谷剖面形态的对比研究。首先,这一模型 通过对槽谷两壁分别拟合来描述槽谷两壁的剖面形态,由于很多槽谷具有明显的不对称特 征^[6]且不对称的程度各不相同,因此不能通过槽谷两壁参数的简单平均来描述剖面"U"形 的整体特征,从而很难进行槽谷剖面形态的沿程变化和区域对比研究。其次,在使用这一 模型拟合槽谷形态时,必须首先确定划分槽谷两壁的分界点,由于冰川作用的复杂性以及 后期其他过程的改造,分界点很难确定,这使槽谷横剖面形态参数不可避免地具有误差,给 相关的研究带来困难和不便。为了更好地探讨槽谷剖面的形态对比和沿程变化。本文引入 梯级宽深比的概念来研究槽谷剖面的整体特征。梯级宽深比(f)定义为:

$$f = w / y - y_0$$
 (1-1)

式中 W 为剖面上相同等高线间水平距离, y 为该等高线高程, y₀ 为谷底高程。

当槽谷对称时,由槽谷横剖面的抛物线模型 ($y = ax^b$),梯级宽深比 (f)随槽谷深度 ($d = y - y_0$)的变化符合幂函数形式 ($f = md^n$)。由于槽谷的不对称性,不对称槽谷剖面中 是否也具有这种关系,需要经过实测数据的验证。笔者对天山冰达坂及附近一些地区槽谷 的统计表明:不对称的冰川槽谷中,梯级宽深比 (f)随槽谷深度 (d)的变化同样符合幂 函数形式 ($f = md^n$)。

对 $f = m d^n$ 进行变换, 令 $Y_f = \ln f$, $A_f = \ln m$, $B_f = n$, $X_f = \ln d$, 将其变为 $Y_f = A_f + B_f X_f$



图 1 天山冰达坂地区统计槽谷剖面分布及编号图 Fig. 1 Distribution and code of cross profiles of glacial valleys, Bingdaban, Tianshan M t © 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

9

的线性形式,利用最小二乘法,可得:

$$A_{f} = \frac{X_{f} \quad X_{f}Y_{f} - Y_{f} \quad X_{f}^{2}}{(X_{f})^{2} - n \quad X_{f}^{2}}$$
(1-2)

$$B_{f} = \frac{X_{f} \quad Y_{f} - n \quad X_{f}Y_{f}}{(X_{f})^{2} - n \quad X_{f}^{2}}$$
(1-3)

采用这一模型,本文分析了天山冰达坂区的41个槽谷剖面,同时还对天山西部奥尔塔 乌尊地区末次冰期的部分槽谷的8个剖面进行了统计(图1),资料汇总于表1。

表1 天山地区冰川槽谷剖面形态统计数据

Tab. 1	Statistic	values about	cross	sections of	glacial	valleys,	T ian shan M t
--------	-----------	--------------	-------	-------------	---------	----------	----------------

编号		B_{f}	A_f	R	谷肩/m	备注	编号	B_{f}	A_{f}	R	谷肩/m	备注
01	-	0.627	4.733	0.999	3 100	天山西	WN5	- 0.411	3.730	0.998	3 700	
02	-	0.541	4.437	0.997	3 100	部奥尔	WN6	0.450	3.946	0.996	3 640	
03	-	0.654	5.026	0.999	3 020	塔乌尊	BL1 ·	0.414	3.868	0.987	3 700	布拉
04	-	0.527	4.171	0.999	2 600	部	BL 2	0.266	2.721	0.976	3 500	特沟
05	-	0.672	4.822	0.994	2 480		BL3.	0.486	3.562	0.996	3 100	
06	-	0.454	3.914	0.998	3 300		3g -	0.419	3.585	0.996	3 840	
07	-	0.520	4.360	0.994	3 100		4g -	0.502	4.052	0.998	3 800	
08	-	0.577	4.478	0.997	3 000		9.	0.598	4.444	0.999	3 640	天山乌
AU 1	-	0.553	4.650	0.996	3 800	天山冰	9-1 -	0.533	4.157	0.999	3 700	鲁木齐
AU 2	-	0.701	5.580	0.991	3 760	达坂区	a ·	0.570	4.181	0.995	3 700	河源区
AU 3	-	0.473	4.227	0.995	3 800	分水岭	10-1 ·	0.469	3.502	0.997	3 400	
AU 4	-	0.639	5.075	0.994	3 700	南侧西	10 .	0.543	4.303	0.997	3 720	
AU 5	-	0.475	4.303	0.998	3 600	部阿尤	13 -	0.391	3.620	0.987	3 500	
AU 6	-	0.465	4.220	0.999	3 700	艾肯谷	13-1 -	0.616	4.794	0.998	3 620	
AU 7	-	0.544	4.937	0.991	3 700		13-2	- 0.387	3.241	0.961	3 300	
AU 8	-	0.586	4.971	0.999	3 640		13-3	0.513	3.787	0.999	3 160	
AU 9	-	0.478	4.640	0.998	3 400		12 -	- 0.479	3.720	0.998	2 920	
AR1	-	0.490	3.961	0.994	3 840	分水岭	11 ·	- 0.371	3.078	0.997	3 000	
AR2	-	0.356	3.736	0.984	3 700	南侧东	8 -	- 0.489	4.150	0.998	3 400	
AR3	-	0.373	3.557	0.997	3 800	部	7.	0.442	3.705	0.996	3 420	
AR4	-	0.570	4.752	0.996	3 700		5 -	0.591	4.606	0.992	3 440	
WN1	-	0.458	3.859	0.999	3 800	冰达坂	4 -	0.468	4.434	0.994	3 600	
WN2	-	0.345	3.394	0.982	3 560	区分水	LB1 ·	0.583	4.496	0.999	3 800	
WN3	-	0.264	2.642	0.962	3 500	岭北侧	2 .	0.530	4.788	0.999	3 660	
WN4	-	0.258	2.891	0.992	3 560	西北部						

统计参数 A_f 、 B_f 具有明显的物理意义, B_f 是线性方程 $Y_f = A_f + B_f X_f$ 的斜率, 资料表 明 B_f 为- 1~ 0 之间的负值, 其绝对值的大小反映槽谷的陡度; A_f 为方程的截距, 为正值, 描述槽谷的底部宽阔程度。

利用梯级宽深比及随槽谷深度变化的幂函数模型分析冰川槽谷横剖面的意义在于

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



238

(1) 梯级宽深比 (f) 随槽谷深度变化的幂 函数模型反映了槽谷的整体形态特征,可以不 考虑谷肩位置。同时通过统计分析得到的参数 具有更加稳定、客观、准确、全面的特点。

(2) 通过剖面中梯级宽深比 (f) 随槽谷深 度的变化可以确定谷肩位置,从而比较准确地 确定槽谷的宽深比以及其他形态参数。将不同 高度的 f 值和对应深度 d 值,分别将其对数值 点在坐标纸上 (图 2),可以看出各点基本在一 条直线上,当深度超过谷肩时, f 与 d 的关系将 发生变化,形成直线上的折点,该折点所分开的 两段代表不同作用营力或不同时期作用营力形 成的谷坡,因此,该折点对应的高度为槽谷的谷 肩高度,该点对应的 f 为槽谷的宽深比。

(3) 这一模型不必将槽谷的两壁分开, 避免

了人为确定槽谷两壁分界点可能造成的误差。

(4) 由于这一模型反映了槽谷横剖面的整体形态,因此可通过它进行不同槽谷剖面的 形态特征对比,探讨槽谷剖面形态的沿程变化。

2 冰川槽谷横剖面形态的沿程变化模式

2.1 冰川槽谷的分类与分段

为了更好地研究冰川槽谷形态的沿程变化特征,本文将槽谷的平面形态划分为如下类型: 简单槽谷:一般无大的支谷汇入,表现为无分支的单一槽谷。对于只在源头处存在 一些小支谷的槽谷,也可归为此类。 复合槽谷:槽谷由一些较大的支谷复合而成。一般 来说,复合槽谷的各支冰川谷可认为是简单槽谷的一部分。为研究方便,复合槽谷可进一 步分为三段: 简单槽谷段:槽谷的上源部分,多为分支简单槽谷。 复合槽谷段:各分 支冰川谷交汇的部分。 单流槽谷段:槽谷的下源,冰川汇流后单独前进的槽谷段。 2.2 简单槽谷沿程变化模式及其与冰川动力的关系

对照图 1 和表 1 可以看出,简单槽谷的沿程变化具有如下特征: 谷肩高度从上游向 下游逐渐降低。 A_f、B_f的变化具有明显的规律性。

图 3 给出了一些简单槽谷不同部位槽谷剖面 A_f 、 B_f 的变化图,可以看出: 8 号冰川槽 谷从上游(编号 9—1)到下游(9), $|A_f|$, $|B_f|$ 值呈增大趋势; 琼萨尔萨依和钦达旺萨依 以及分水岭南侧的亚吾尔图肯冰川槽谷,从上游(10, 13—1, AU 4)向下游(10—1, 13— 2, AU 5) $|A_f|$, $|B_f|$ 值逐渐减小。

这种变化是由于冰川动力和侵蚀能力在不同部位的差异造成的。冰川动力状况主要决定于冰量、冰底温度和冰川运动速度。首先,简单槽谷对应的冰川中,冰量在雪线附近最大。雪线以上的区域为积累区,冰川从源头到雪线附近冰量逐渐增大;雪线以下的区域为消融区,在冰川消融区冰川从雪线附近到冰川末端冰量逐渐减少。其次,简单槽谷对应的 ② © 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



冰川中,冰底温度在雪线附近达到最大。据蔡保林等的研究^[7],冰川温度只在表层一定深度 受表面气温的影响,而这一深度以下冰川温度随冰川厚度的增加而增大。张祥松等^[8]对天山 1 号冰川的研究表明,冰川在雪线附近厚度最大,冰体厚度从雪线附近向上下两个方向逐渐 减小。由此可推断冰底温度在雪线附近最高。一般说来,冰川运动速度在雪线附近较大。因 此冰川在雪线附近侵蚀能力最强,往冰川下游减弱。

张振拴^[9]应用不同的方法研究了天山乌鲁木齐河源区不同时期的雪线变化,推算出这 一地区上望峰冰期时的冰川雪线高度为 3 630 ± 40 m,本文讨论的冰川槽谷正是这一冰期 的产物。对于 8 号冰川槽谷,其下游槽谷剖面 (9)对应谷肩高程为 3 640 m,由于位于雪 线附近,形成槽谷剖面 μ_f | β_f |值大于上游剖面 (9—1)的特征。琼萨尔萨依和钦达旺 萨依冰川槽谷,上游剖面 (10, 13—1)对应的谷肩高程 (3 720 m, 3 620 m)比下游剖面 (10—1, 13—2)对应的谷肩高程 (3 400 m, 3 300 m)更接近雪线位置。造成上游槽谷剖 面 μ_f | β_f |值大于下游剖面。分水岭南侧的亚吾尔图肯冰川槽谷也是一样,由于在上望 峰冰期时分水岭南侧较北侧雪线高出 100~150 m ,其上游剖面 (AU 4)对应的谷肩高程 (3 700 m)更接近于雪线位置,因此 μ_f | β_f |值也较下游剖面大。

上述分析可以看出,简单槽谷的 |A_f |、 |B_f |值从上源到雪线附近,逐渐增大;从雪线 向下游逐渐减小。这反映了简单槽谷冰川动力状况的沿程变化特征。 2.3 复合槽谷沿程变化模式及其与冰川动力的关系

复合槽谷冰川的总体特征类似于简单槽谷的冰川,但是在复合槽谷中,存在冰川的汇 流作用。冰川汇流作用对冰川动力状况的影响很大,相对"冲淡"了雪线的作用。冰川汇 流使冰量显著增加并且加大了冰川的厚度,使冰川总体侵蚀能力大大加强。因此在复合槽 谷中,复合槽谷段是冰川侵蚀作用最强烈的地区。

如图 4 所示,复合槽谷从简单槽谷段到复合槽谷段, $|A_f|$, $|B_f|$ 值明显加大,这是由 于冰川汇流作用使冰川侵蚀能力增强所致。在复合槽谷段内部,由于冰川汇流作用和冰川 自身的向下游运动相继出现,使冰川侵蚀能力强弱交替,表现在槽谷形态上, $|A_f|$, $|B_f|$ 值上升与下降交替出现,冰川汇流作用使 $|A_f|$, $|B_f|$ 值增加,而冰川自身的沿程向下游的 运动使 $|A_f|$, $|B_f|$ 值减小。从复合槽谷段到单流槽谷段,类似于简单槽谷,由于雪线以下 冰量减小,流速减慢等原因,槽谷的 $|A_f|$, $|B_f|$ 值逐渐减小。

总之,复合槽谷横剖面形态的沿程变化基本遵循以下模式:从简单槽谷段到复合槽谷

B



^{© 1994-2010} China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

240

-7

段, $|A_f|$, $|B_f|$ 值明显加大; 复合槽谷段到单流槽谷段, $|A_f|$, $|B_f|$ 值逐渐减小。复合槽谷段内部, $|A_f|$, $|B_f|$ 值上升与下降交替出现。这与冰川的动力沿程分异特征相对应。

3 结论

利用冰川槽谷横剖面的形态对比可以比较深入地研究冰川槽谷的沿程变化特征。引入 梯级宽深比(槽谷剖面上相同等高线间距离与对应深度的比值)来描述槽谷剖面的整体形 态。统计分析表明槽谷梯级宽深比随槽谷深度的变化符合幂函数模型,从而通过模型统计 参数A_f、B_f(B_f 是线性统计回归方程的斜率,其绝对值的大小反映槽谷的谷壁陡度, A_f 为 方程的截距,描述槽谷的底部宽阔程度)可以描述槽谷横剖面的整体特征并可用于不同槽 谷横剖面的对比。利用这一模型分析天山中、西部地区冰川槽谷的沿程变化模式,主要结 论如下: (1)简单槽谷从上源到雪线附近 |A_f |、 |B_f |逐渐增大,再向下游, |A_f |、 |B_f |逐 渐减小; (2)复合槽谷从简单槽谷段向复合槽谷段, |A_f |、 |B_f |明显增大,从复合槽谷段 向单流槽谷段, |A_f |、 |B_f |明显减小。冰川槽谷横剖面形态沿程变化的这些特征反映了冰 川动力状况的沿程分异。

论文得到北京大学崔之久教授和新疆大学熊黑钢教授的指导,野外工作得到中国科学院天山冰川站 的大力支持,在此表示衷心感谢。

参考文献 (References)

- [1] Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Li Jijun et al Quaternary glaciation and environment issues in eastern China [M] Beijing: Science Press, 1989 133~265 (In Chinese) [施雅风, 崔之久, 李吉均等中国东部第四纪冰川与环境问题M] 北京:科学出版社, 1989 133~265]
- [2] Cui Zhijiu Glacial erosion landforms and development of trough at the head of Urum qi River, Tian Shan [J] Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3(ad): 1~15 (In Chinese) [崔之久 天山乌鲁木齐河源冰川侵蚀地貌与槽谷演化[J] 冰川冻土, 1981, 3(增刊): 1~15]
- [3] Svensson H. Is the cross-section of a Glacial Valley a Parabola? [J] Journal of Glaciology, 1959, 3(25): 362~363
- [4] Jiao Keqin Cross-section of glacial valley at the head of U rum qi River, Tian Shan[J] Journal of Glaciology and Geocry ology, 1981, 3(ad): 92~96 (In Chinese) [焦克勤 天山乌鲁木齐河源区冰川谷的横剖面[J] 冰川冻土, 1981, 3(增刊): 92~96]
- [5] Liu Gengnian Research on glacial erosional landforms: case study of Luojishan Mt Western Sichuan [J] Journal of Glaciology and Geocry ology, 1989, 11(3): 249~ 259. (In Chinese) [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.]
- [6] LiYingkui, 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 (In Chinese) [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] Cai Baolin, Huang Maohuan, Xie Zichu Research on ice core temperature of Glacier No. 1 in the Urum qi River headwaters [J] Chinese Science Bulletin, 1987, 32 (22): 1732~1733 (In Chinese) [蔡保林, 黄茂桓, 谢自楚 乌鲁木齐河源1号冰川深孔温度的初步研究[J] 科学通报, 1987, 32 (22): 1732~1733]
- [8] Zhang Xiangsong, Zhu Guocai, Qian SongLin et al Radar measuring ice thickness of No. 1 Glacier at the source of U rum qi River, Tianshan [J] Journal of Glaciology and Geocryology, 1985, 7(2): 153~162 (In Chinese) [张祥松, 朱国才, 钱嵩林等, 天山乌鲁木齐河源1号冰川雷达测厚[J] 冰川冻土, 1985, 7(2): 153~162]
- [9] Zhang Zhenshuan Changes of snow line at the head of U rum qi River, T ian Shan[J] Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3 (ad): 106~113 (h Chinese) [张振拴 天山乌鲁木齐河源的雪线变化[J] 冰川冻土, 1981, 3(增刊): 106~113]
 - © 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

The Cross- section Variation of Glacial Valley and Its Reflection to the Glaciation

LIYing-kui, LU Geng-nian

(D epartment of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: A new model based on the gradient wide-depth ratio (GWDR) is posed and the longitudinal variation of glacial valley is presented by using this model on the basis of the investigation and measuring data of the glacial valley cross sections in the middle and west of the T ian Shan M ountains

The GWDR of a glacial valley cross section is defined as the ratio between the distance of the same contour line and its depth in the cross section, and it can describe the integrated characters of a cross section as well as the compared morphological analysis on different cross sections Statistics show that the relationship between the GWDR and its corresponding depth conforms to the power function. Two parameters $(A_f, a measure of$ the breadth of the valley floor, and B_f , a measure of the steepness of the valley sides) are used here to describe this relationship.

According to their planar shapes, glacial valleys are classified as single valleys and multi-valleys, and multi-valleys are subdivided into a sinple valley section, a confluent valley section and a single flow section.

Base on measuring data of 49 cross profiles of glacial valleys in the middle and west of the Tian Shan Mountains, the longitudinal variations of glacial valleys are concluded as follow: (1) In single valleys, two parameters ($|A_f|$ and $|B_f|$) of the GWDR model increase form the head to the snow line, and the valley becomes wider and steeper in two walls On the contrary, they decrease from the snow line to the end of the valley, and the valley becomes narrow er and gentler in two walls (2) In multi-valleys, $|A_f|$ and $|B_f|$ increase form the simple valley section to the confluent valley section, and decrease from the confluent valley section to the single flow section

These characteristics reflect the differences of glaciation along the valley. The glaciation near the snow line is greater than upstream and downstream in the simple valley because the glacier reaches the maximum values in temperature, thickness, and velocity at this location. In multi-valleys, the confluence action becomes the dominant influence factor of the glaciation, so the glaciation in confluence locations is greater than other locations

Key words: Single valley; Multi-valley; Sinple valley section; Confluent valley section; Single flow section; Gradient wide-depth ratio (GWDR)