

文章编号:1000 - 0240(2000)02 - 0171 - 07

冰川槽谷横剖面形态特征探析^{*}

李 英 奎, 刘 耕 年

(北京大学城市与环境学系, 北京 100871)

摘要:基于对天山中、西部冰川槽谷的量算,并对比国内外不同区域的研究成果,利用冰川槽谷横剖面的幂函数模型探讨了冰川槽谷的横剖面形态特征.研究表明,本区槽谷的 b - FR 关系并不完全符合 Hirano 和 Aniya 提出的山地冰川模式,而是有自身的形态特征.但槽谷剖面形态参数 A 、 b 之间具有明显的线性关系,并具有很强的普遍性,可以作为冰川槽谷横剖面形态的判别标准.

关键词:冰川槽谷;幂函数模型; b - FR 关系;山地冰川模式

中图分类号:P931.4 **文献标识码:**A

1 引言

自从 Svensson^[1]使用方程 $y = ax^b$ 定量描述冰川槽谷横剖面的形态特征以来,这一模型已得到了广泛应用^[2~5],大大促进了冰川槽谷剖面形态的定量研究. Graf^[2]通过冰川槽谷横剖面与河道断面水力几何形态关系(hydraulic geometry)的类比,对这一模型进行了合理解释. Hirano 和 Aniya^[6~8]根据极值原理,认为经过长期的作用过程,冰川槽谷横剖面将发育成为最有效进行冰川侵蚀的悬链线形态(catenary pattern),而悬链线形态可以很好地拟合为幂函数形式($y = ax^b$),从而给出了冰川槽谷横剖面幂函数模型的理论解释.

但是,幂函数模型在描述槽谷剖面形态时仍不完备.首先,该模型没有对冰川槽谷的深度和宽度进行限定,这使具有相同函数的槽谷剖面由于宽度和深度的不同而表现为不同的形态^[2].针对这一缺陷, Graf^[2]提出使用槽谷宽深比($FR = D/Wt$)作为对这一模型的补充.其次,最初的研究认为冰川槽谷剖面近似符合抛物线形态(b 接近于 2),这也是其常被称为抛物线模型的原因,但随着研究的不断深入,越来越多的数据表

明 b 值具有较大的变化范围^[2~5,9,10]. 这使冰川槽谷的剖面形态,由于参数 a 、 b 和 FR 的不同组合可以表现为不同形态,增加了冰川槽谷形态的不确定性.冰川槽谷剖面形态是否具有任意的参数组合?若是,冰川槽谷与其它谷地的区别何在?若不是,冰川槽谷又应该具有怎样的参数特征?这些都成为冰川槽谷剖面形态研究中亟待解决的问题.

本文通过对天山中、西部地区冰川槽谷剖面的量计,研究槽谷横剖面各参数之间的关系,探讨冰川槽谷横剖面的形态特征.

2 研究区域简介

本文研究区域以天山乌鲁木齐河源区的冰川槽谷为重点,同时还对天格尔峰南侧以及天山西部奥尔特塔乌尊区的一些冰川槽谷进行了量计(图 1).天山乌鲁木齐河源区为典型双层槽谷,上下槽谷分别形成于高望峰和下、上望峰冰期^[11].上槽谷受到后期切割作用的严重破坏,分布不连续.下槽谷保存完好,形态典型,连续分布,便于对其形态的系统研究.因此,本文量计的槽谷剖面以下冰川槽谷为主.

* 收稿日期:1999 - 12 - 29;修订日期:2000 - 03 - 17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(49671075)

作者简介:李英奎(1970~),男,河北卢龙人,北京大学城市与环境学系博士生,现从事地貌学、自然灾害与 GIS 等研究. E-mail: yingkui@263.net

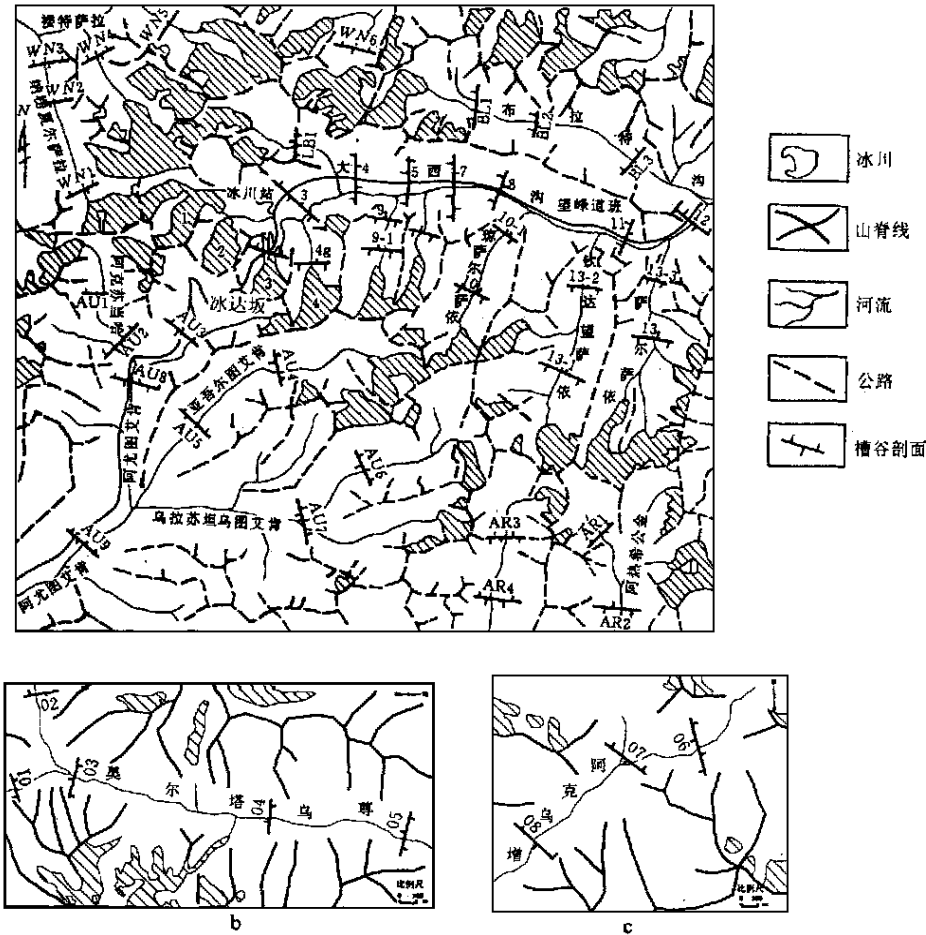


图 1 天山地区统计槽谷剖面分布及编号
a. 冰达坂区; b 与 c. 奥尔特塔乌尊区

Fig. 1 Distribution and code of cross sections of glacial valleys, Tianshan Mountains

3 研究方法 with 数据处理

冰川槽谷横剖面形态的分析采用最小二乘法，对 $y = ax^b$ 两边取对数，得：

$$\ln y = \ln a + b \ln x \tag{1}$$

令 $Y = \ln y, A = \ln a, X = \ln x$ ，上式变为 $Y = A + bX$ 的线性形式，由最小二乘法得：

$$A = \frac{\sum X \sum XY - \sum Y \sum X^2}{(\sum X)^2 - n \sum X^2}$$

$$b = \frac{\sum X \sum Y - n \sum XY}{(\sum X)^2 - n \sum X^2} \tag{2}$$

相关系数为：

$$R = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \tag{3}$$

由于冰川槽谷的形态经常受到后期侵蚀或堆积作用的改造，因此在冰川槽谷剖面量测过程中，需要进行适当修正，本文采用如下处理方式：1) 如果谷底受到后期河流作用的侵蚀，则谷底高度采用趋势推测值；2) 如果谷内存在较大的后期堆积，则适当去掉一些相应数据点。

利用这一方法，本文对天山乌鲁木齐河源及其附近地区的 43 个冰川槽谷剖面，以及天山西部奥尔特塔乌尊区的 8 个冰川槽谷剖面进行了量测和分析，数据列于表 1。

表 1 天山地区冰川槽谷剖面形态统计数据

Table 1 Statistic values about cross sections of glacial valleys, Tianshan Mountains

编号	坡向	<i>b</i>	- <i>A</i>	<i>FR</i>	编号	坡向	<i>b</i>	- <i>A</i>	<i>FR</i>	编号	坡向	<i>b</i>	- <i>A</i>	<i>FR</i>
O1	阴坡	2.997	13.15	0.224	AR1	阴坡	2.261	8.308	0.252	9	阴坡	3.238	13.34	0.254
	阳坡	2.246	7.883			阳坡	1.546	3.896			阳坡	2.010	6.754	
O2	阴坡	1.818	5.773	0.195	AR2	阴坡	1.684	5.284	0.173	9-1	阴坡	2.177	7.610	0.23
	阳坡	2.570	10.82			阳坡	1.389	3.903			阳坡	2.049	6.914	
O3	阴坡	2.777	11.48	0.194	AR3	阴坡	1.467	4.039	0.211	a	阴坡	2.096	6.614	0.285
	阳坡	2.912	13.00			阳坡	1.674	4.717			阳坡	2.416	8.854	
O4	阴坡	2.441	9.943	0.227	AR4	阴坡	1.809	5.980	0.16	10-1	阴坡	2.047	6.162	0.312
	阳坡	1.755	4.559			阳坡	2.679	12.01			阳坡	1.688	4.262	
O5	阴坡	2.930	11.65	0.251	WN1	阴坡	1.808	5.760	0.231	10	阴坡	2.086	7.159	0.258
	阳坡	2.784	11.35			阳坡	1.875	5.863			阳坡	2.209	8.170	
O6	阴坡	1.433	3.243	0.251	WN2	阴坡	1.532	4.261	0.202	13	阴坡	1.555	3.941	0.22
	阳坡	1.073	1.569			阳坡	1.420	3.414			阳坡	1.614	4.954	
O7	阴坡	1.908	6.489	0.235	WN3	阴坡	1.291	2.305	0.288	13-1	阴坡	2.903	12.39	0.216
	阳坡	2.111	7.925			阳坡	1.307	2.394			阳坡	2.290	8.877	
O8	阴坡	2.953	13.08	0.282	WN4	阴坡	1.443	3.512	0.229	13-2	阴坡	1.485	3.592	0.286
	阳坡	1.652	4.270			阳坡	1.236	2.311			阳坡	1.514	3.300	
AU1	阴坡	2.524	10.62	0.164	WN5	阴坡	1.586	4.710	0.213	13-3	阴坡	1.795	4.820	0.303
	阳坡	1.906	6.839			阳坡	1.533	3.920			阳坡	2.146	7.005	
AU2	阴坡	4.336	23.97	0.151	WN6	阴坡	1.788	5.526	0.222	12	阴坡	1.810	5.025	0.275
	阳坡	2.115	7.597			阳坡	1.686	5.317			阳坡	2.252	7.872	
AU3	阴坡	1.903	6.413	0.192	BL1	阴坡	1.064	1.244	0.192	11	阴坡	1.469	2.808	0.313
	阳坡	1.815	6.482			阳坡	2.267	9.279			阳坡	1.642	4.371	
AU4	阴坡	2.317	9.399	0.172	BL2	阴坡	1.385	3.115	0.266	8	阴坡	2.247	8.239	0.22
	阳坡	2.968	13.34			阳坡	1.255	1.931			阳坡	1.843	6.271	
AU5	阴坡	1.867	6.380	0.176	BL3	阴坡	1.912	5.311	0.306	7	阴坡	1.564	4.246	0.262
	阳坡	1.897	7.062			阳坡	1.899	5.435			阳坡	2.084	6.860	
AU6	阴坡	2.023	7.629	0.186	1fg	阳坡	1.512	3.458		5	阴坡	2.620	10.28	0.189
	阳坡	1.714	5.559			阴坡	1.689	4.339			阳坡	2.099	7.814	
AU7	阴坡	1.796	6.836	0.164	1dl	阴坡	1.446	2.852		4	阴坡	1.640	4.070	0.15
	阳坡	2.577	11.73			阳坡	1.390	3.038			阳坡	1.062	2.418	
AU8	阴坡	3.487	17.33	0.154	3g	阴坡	1.903	5.724	0.276	LB1	阴坡	2.442	9.062	0.255
	阳坡	1.432	4.066			阳坡	1.549	4.195			阳坡	2.229	8.391	
AU9	阴坡	2.012	8.421	0.129	4g	阴坡	1.703	4.932	0.245	2	阴坡	1.732	5.226	0.142
	阳坡	1.703	5.965			阳坡	2.329	8.672			阳坡	2.336	10.87	

4 *b* - *FR* 关系

Hirano 和 Aniya^[6~8]研究了参数 *b* 与 *FR* 的关系,并据此探讨了冰川槽谷的发育特征,将其归纳为两种模式,一种称为山地冰川模式(Rocky Mountain model),*FR* 随 *b* 的增大而增大,冰川槽谷的发育以下蚀(overdeepening)作用为主;另一种称为大陆冰川模式(Patagonia - Antarctica model),*FR* 随 *b* 的增大而减小.冰川槽谷的发育以侧蚀(widening)作用为主.但槽谷剖面的这一形态特征和发育模式曾受到 Habor^[12]的质疑,同时 *b* - *FR* 关系也有待于不同区域大量数据的验证.

图 2 为天山地区冰川槽谷剖面的 *b* - *FR* 关系

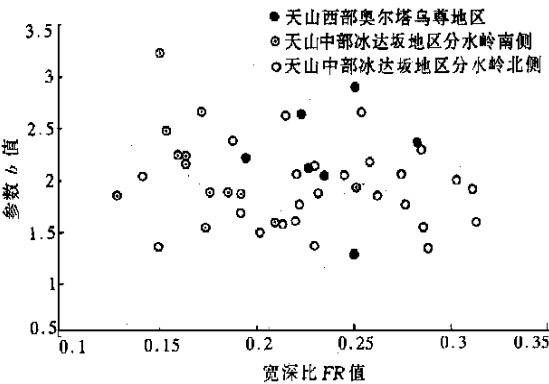


图 2 天山地区槽谷形态的 *b* - *FR* 关系

Fig. 2 The *b* - *FR* diagram of glacial valley cross section, Tianshan Mountains

图.可以看出,本区冰川槽谷剖面的 $b - FR$ 关系无论整体还是不同区域都具有分布分散,总体呈负相关关系的特征.没有表现出 Hirano 和 Aniya 的 FR 随 b 增大而增大的山地冰川模式,反而与其所归纳的大陆冰川模式较为符合.这说明 $b - FR$ 关系的山地冰川模式并不具有普遍性,不能完全适合所有山地冰川地区,同时也说明天山地区冰川侧蚀作用更加强烈,而对应的下蚀作用相对较弱.这可能与冰川性质(本区冰川不是 Rocky Mountains 的海洋性冰川)、规模、作用时间和过程有关,同时也受基岩岩性的影响.

5 剖面参数 $A - b$ 关系

5.1 参数 $A - b$ 关系

冰川槽谷是冰川长期作用地表的结果,冰川规模和侵蚀能力决定了槽谷的形态,冰川规模越大、侵蚀能力越强,冰川槽谷越宽、越深,谷壁越陡.根据冰川槽谷的幂函数模型,冰川槽谷的横剖面形态特征取决于参数 a 、 b 的大小.一般认为, b 反映槽谷剖面的谷壁陡度, b 值越大,谷壁越陡; a 表示槽谷剖面谷底的宽阔程度, a 值越大,谷底越窄.

目前,对槽谷剖面参数 a 、 b 之间关系的研究较少,只是 Graf^[2]得出随着槽谷级别(类似于 Horton 的水系分级)的增加 a 、 b 值增大的趋势.但是由于数据较少,并不具备普遍意义.

由于 a 一般远小于 1,本文采用它的对数值 A 进行分析. A 是一个负值,其绝对值反映槽谷谷底的宽阔程度, $-A$ 值越大, a 值越小.谷底越宽阔.资料表明, $-A$ 和 b 具有明显的相关关系, $-A$ 随着 b 值的增大而增大(图 3).回归方程为:

$$-A = 6.411 b - 5.886 5 \tag{4}$$

相关系数 $R^2 = 0.969 2$,为显著相关,这说明冰川槽谷横剖面参数 A 和 b 值是相互制约、相互确定的.由于统计数据样本包括了国内外空间上不同区域的不同山岳冰川类型,同时统计数据来自国内外不同的学者,排除了个人因素.因此,上述冰川槽谷剖面参数 $A - b$ 的线性关系具有一定的普遍性,可以作为冰川槽谷剖面形态的判别标准.

5.2 讨论

Graf^[2]曾利用冰川槽谷与河道系统的类比,根据河道断面水力几何形态关系导出冰川槽谷剖面形态的幂函数模型.如果这种对比合理的话,通过进一步的分析,也可以推导出冰川槽谷剖面参数 $A - b$ 的线性关系.

设 W 为河宽; Q 为流量; h 为水深,则根据断面水力几何形态关系,有如下方程^[13]:

$$W = \alpha_1 Q^{\beta_1} \quad h = \alpha_2 Q^{\beta_2} \tag{5}$$

式中: α_1, α_2 , 为拟合系数; β_1, β_2 为拟合指数,经

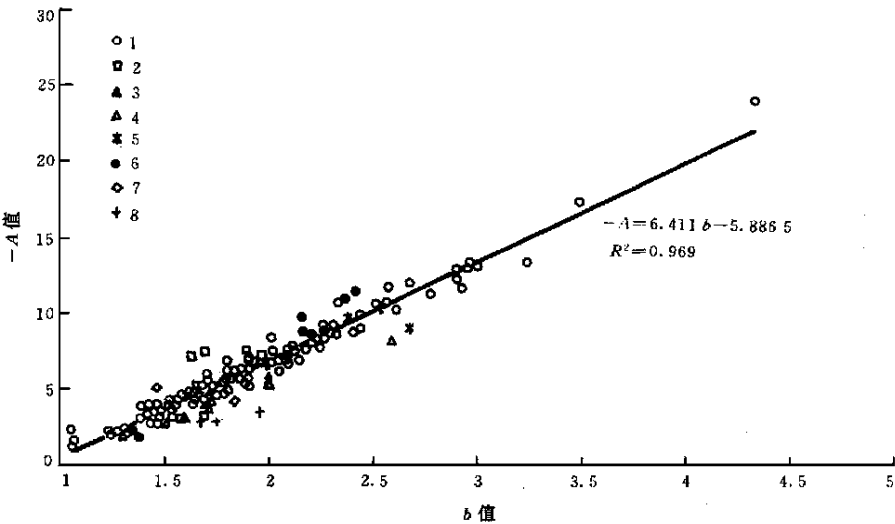


图 3 冰川槽谷剖面形态 $A - b$ 关系

1. 天山中西部(笔者); 2. 天山乌鲁木齐河源区(据文献〔4〕); 3. 西藏枪勇冰川谷(据文献〔4〕); 4. 四川螺髻山(据文献〔5〕); 5. 据文献〔10〕; 6. 据文献〔9〕; 7. 据文献〔2〕; 8. 据文献〔3〕

Fig. 3 The $A - b$ diagram of glacial valley cross-section

过变换可得:

$$h = \left[\frac{\alpha_2}{\alpha_1^{\frac{\beta_2}{\beta_1}}} \right] W^{\left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)} \quad (6)$$

假设谷地对称,设 x 为谷地一侧水平距离,则 $W = 2x$,代入上式,得:

$$h = \alpha_2 \left[\frac{2}{\alpha_1} \right]^{\left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)} x^{\left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)} \quad (7)$$

本式表明谷地剖面符合幂函数模型 ($y = ax^b$),其中 a 、 b 参数分别为:

$$a = \alpha_2 \left[\frac{2}{\alpha_1} \right]^{\left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)} \quad (8)$$

$$b = \frac{\beta_2}{\beta_1} \quad (9)$$

对 a 的表达式两边取对数,并代入 b 的表达式,可得:

$$A = \ln a = \ln \alpha_2 + b \ln \left(\frac{2}{\alpha_1} \right) \quad (10)$$

本式表明 A 、 b 之间具有线性关系.本文参考长江中下游断面河相关系的研究^[14],利用上述公式,计算其断面的形态参数,并对比天山中西部冰川槽谷剖面形态特征(图4),可以看出与冰川槽谷横剖面形态类似,不同河道断面的 A - b 也具有明显的线性关系.但是冰川槽谷剖面与河道断面的

A - b 特征又存在明显不同:

(1)河道断面 A 、 b 值的变化范围明显大于冰川槽谷剖面,冰川槽谷剖面 b 值主要集中于 1.5 ~ 2.5 之间,其剖面形态的变化较小.河道断面 b 值变化范围很大,从小于 1 到数百,说明河道断面的形态变化大.

(2)两者 A - b 关系也明显不同,从拟合直线上来看,两者斜率的差别不大,主要差别表现在截距上,河道断面的拟合直线可以近似看作冰川槽谷剖面拟合直线向上平移的结果.说明同样 b 值的条件下,河道断面 A 值大于冰川槽谷剖面,相应 a 值小于冰川槽谷剖面,断面形态上表现为河道断面相对于冰川槽谷剖面,谷底更加宽阔,这与平原河道的特征相一致.

应当指出,由于没有相关山区河谷断面的数据,本文尚无法说明冰川槽谷剖面与山区河谷断面形态参数的具体区别,但有理由相信其间也必存在较为明显的区分,这有待更进一步的研究.

6 结论

本文通过天山中西部地区冰川槽谷形态特征的分析,认为天山地区冰川槽谷的横剖面形态并不符合 Hirano 和 Aniya b - FR 关系的山地冰川模式,这说明 b - FR 关系并不能反映所有山地冰川槽谷的横剖面形态,而是有海洋性与大陆性冰川之别.同时,研究表明槽谷幂函数模型的参数 A 、 b 之间具有明显的线性关系,它能够反映冰川槽谷剖面形态

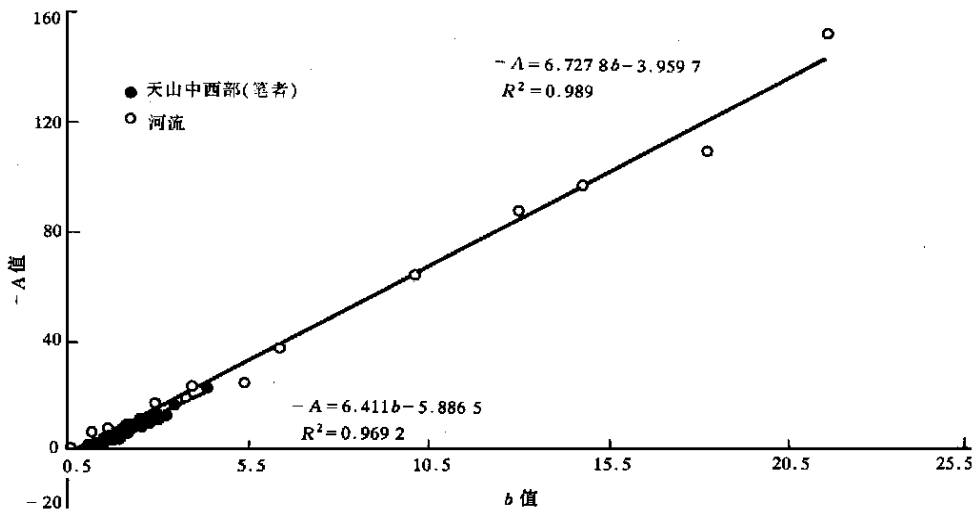


图4 冰川槽谷剖面与河流断面形态 A - b 关系图

Fig. 4 The A - b diagram of glacial valley and river cross-section

的共同本质,具有一定的普遍性,可以作为确定冰川槽谷形态的指标。

本文还讨论了冰川槽谷剖面与河谷断面的联系,探讨了两者之间的区别,这将有助于不同成因谷地的区分。

致谢:论文写作和野外工作期间得到北京大学城市与环境学系崔之久教授、新疆大学地理系熊黑钢教授的指导和中国科学院天山冰川观测试验站的支持,在此表示衷心感谢。

参考文献(References):

- [1] Svensson H. Is the cross - section of a glacial valley a parabola [J]. *Journal of Glaciology*, 1959, 3:362 ~ 363.
- [2] Graf W L. The geomorphology of the glacial valley cross - section [J]. *Arctic and Alpine Research*, 1970, 2:303 ~ 312.
- [3] Doornkamp J C, King C A M. Numerical Analysis in Geomorphology [M]. Arnold, London: 1971. 276 ~ 285.
- [4] Jiao Keqin. Cross - section of glacial valley at the head of Urumqi River, Tianshan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3(suppl.): 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 Shichuan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 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): 253 ~ 255.]
- [6] Hirano M, Aniya M. A rational explanation of cross - profile morphology for glacial valleys and of glacial valley development [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, 13: 707 ~ 716.
- [7] Hirano M, Aniya M. A rational explanation of cross - profile morphology for glacial valleys and of glacial valley development: A further note [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1989, 14: 173 ~ 174.
- [8] Hirano M, Aniya M. A reply to "A discussion of Hirano and Anyia's (1988, 1989) explanation of glacial - valley cross profile development" by Jonathan M. Harbor [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1990, 15: 379 ~ 381.
- [9] James L A. Polynomial power functions for glacial valley cross - section morphology [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 413 ~ 432.
- [10] Wheeler D A. Using parabolas to describe the cross - sections of glaciated valleys [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1984, 9: 391 ~ 394.
- [11] Cui Zhijiu. Glacial erosion landforms and development of trough at the head of Urumqi River, Tian Shan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3(suppl.): 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.]
- [12] Harbor J M. A discussion of Hirano and Anyia's (1988, 1989) explanation of glacial - valley cross profile Development [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1990, 15: 369 ~ 377.
- [13] Qian Ning, Zhang Ren, Zhou Zhide. Fluvial channel evolution [M]. Beijing: Science Press, 1987 (In Chinese). [钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [14] Institute of Geography, CAS, Institute of Changjiang hydrological and hydroelectric Sciences Planning and Design, Institute of Changjiang Fairway Bureau, et al. River features and evolution in the middle and lower reacher of the Yangtze River [M]. Beijing: Science Press, 1985. 99 ~ 101 (In Chinese). [中国科学院地理研究所, 长江水利水电科学研究院, 长江航道局规划设计研究所. 长江中下游河道特性及其演变[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 99 ~ 101.]

Discussion on the Cross Section Features of Glacial Valley

L I Ying - kui, L I U Geng - nian

(Department of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing, 100871, China)

Abstract: The large variation of b value in the power model ($y = ax^b$) used widely in the analysis of the cross section features of glacial valley causes some uncertainty in determining its morphology. The relationships among the morphologic parameters (a , b , and FR (form ratio defined by Graf (1970) as the width of the glacial valley at the trim - line divided by the valley depth below the trim - line)) become the key issues to the morphology research of the glacial valley. Based on the investigation

and observation of glacial valleys in the middle and western Tianshan Mountains and other related researches both in China and in other countries, the relationships among a , b , and FR of the glacial valley cross section are presented and discussed in this paper.

The first purpose is to verify the relationship between b and FR ($b - FR$ diagram). Hirano and Aniya (1988) classified it into the Rocky Mountain model and the Patagonia - Antarctica model. The Rocky Mountain

model, in which b increases with increasing FR , is available for alpine glacial valleys and depicts an overdeepening development of the glacial valley. The Patagonia - Antarctica model is available for glacial valleys formed by continental ice mass with larger b associated with smaller FR and reflects a widening process of the glacial valley. However, the $b - FR$ diagram in Tianshan Mountains does not coincide with the Rocky Mountain model. b is dispersive and have a trend of decrease with increasing FR , showing that the widening is larger than the overdeepening in these areas. This indicates that Hirano and Aniya's Rocky Mountain model can not be applied to all alpine glacial areas and can not be used as a criterion to describe the glacial valley geomorphology.

Secondly, the relationship between A ($A = \ln a$) and b is studied. Statistics show that the $A - b$ diagram has a closed linear relationship ($A = 6.411b - 5.8865$) and can fit in with all results up to now both in China and in other countries. This relationship can determine the U - shaped glacial valley morphology essentially and can be used as a criterion to describe the glacial valley ge-

omorphology. In order to provide a rational explanation of it, this linear relationship is analogized with the fluvial hydraulic geometry relations just like Graf did in 1970 and compared the $A - b$ diagram of glacial valleys in the Tianshan Mountains with the fluvial channel cross sections in the middle and lower reaches of the Yangtze River. It is shown that the power model and the $A - b$ linear relationship of glacial valley cross sections can be derived from the hydraulic geometry relations, and the $A - b$ diagram of the fluvial channel cross sections in the middle and lower reaches of the Yangtze River also shows a trend similar to the glacial valleys. However, there is evident distinction between the cross sections of glacial valleys and river channels. The variation of b in the river channel cross section is larger than that of the glacial valley. At the same time, the bottom width of a river channel cross section represented by A is wider than that of a glacial valley evidently. These characteristics can be helpful to differentiate valleys formed by different processes and useful to the research of the alpine glacier dynamics.

Key words: glacial valley; power model; $b - FR$ diagram; Rocky Mountain model