# 冰川槽谷横剖面形态特征的 古环境标志再探讨

李英奎 刘耕年 崔之久

(北京大学城市与环境学系,北京 100871)

**摘要** 利用抛物线模型通过对天山中部、西部冰川槽谷的量算,并对比国内外不同区域的研究成果,发现槽谷抛物线参数 *A B*之间具有很强的相关性(|*A*| = -5.464+ 6.135° *B*),通过其中的任一参数可以描述冰川槽谷的形态,这些参数反映了冰川的动力状况,对冰川地区古气候和古环境的研究具有重要的意义;同时可利用这些参数描述槽谷的不对称性,槽谷的不对称性成因于槽谷两侧的动力差异,主要的影响因素包括:槽谷坡面朝向、冰川交汇、槽谷弯曲以及地质构造条件等.

关键词 冰川槽谷 抛物线模型 坡面朝向 冰川交汇 槽谷弯曲

冰川槽谷形态的定量分析始于 1959年, Svensson<sup>[1</sup>通过对瑞典北部 Lapporton冰川 谷的测算,提出冰川槽谷的抛物线模型(y= ax<sup>b</sup>),后来, W. L. Graf等进一步验证和发展 了这一模型.我国在这一方面也进行了大量的研究,焦克勤<sup>[2]</sup>分析了天山乌鲁木齐河源区 的冰川槽谷,刘耕年<sup>[3]</sup>对四川螺髻山的冰川槽谷进行了研究.

分析采用最小二乘法,对 y= ax<sup>b</sup> 两边取对数,得:

 $\ln y = \ln a + b \ln x$ 

令 *Y* = ln*y*, *A* = ln*a*, *B* = *b*, *X* = ln*x*, 上式变为 *Y* = *A*+ *BX*的简单形式,由最小二乘法得:

$$A = \frac{\sum X \sum XY - \sum Y \sum X^{2}}{\left[\sum X\right]^{2} - n\sum X^{2}}$$
$$B = \frac{\sum X \sum Y - n\sum XY}{\left[\sum X\right]^{2} - n\sum X^{2}}$$

相关系数为:

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

但是以前的研究基本上是对区域的几条较为典型的槽谷进行分析,缺少对一个区域或几 个区域的详细、大量和系统的研究,本文旨在弥补这一方面的缺陷.另外,冰川槽谷作为寒 冷气候环境的标志解,过去的工作显然留有进一步深入分析的余地.例如:在末次冰期时, 天山地区除公认的气温降低外,降水的分布是怎样的模式.就很值得做进一步的探讨.

本文资料来源于天山乌鲁木齐河源及其附近地区末次冰期冰川槽谷的统计(共 43个 剖面,见图 1),同时还包括天山西部奥尔塔乌尊地区末次冰期的部分槽谷(8个剖面,见 表 1).

不同的学者在进行统计时,统计的标准不同, Svensson Graf以及笔者以 1m为单位进行统计;焦克勤、刘耕年以 100m为单位进行统计.不同的统计标准得出的数据不同,为了便于分析,本文将焦克勤、刘耕年的统计资料转换为以 1m为单位的数据(表 2).



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, Bingbaban, Tianshan M t Table 1 Statistic values about cross sections of glacial valleys, Tiansh

编号	坡向	В	Α	备注	编号	坡向	В	Α	备注	编号	坡向	В	Α	备注
0.1	阴坡	2. 997	- 13. 148		1.51	阴坡	2. 261	- 8. 308	分	0	阴坡	3.238	- 13.336	
01	加 阳坡 2.246	2. 246	- 7.883		AR1	阳坡	1. 546	- 3. 896	7K	9	阳坡	2.010	- 6.754	
02	阴坡	1. 818	- 5. 773	_		阴坡	1. 684	- 5. 284	×۱۰ ا	9-1	阴坡	2.177	- 7.610	
	阳坡	2.570	- 10. 815	大	AR2	阳坡	1. 389	- 3. 903	₩7 —		阳坡	2.049	- 6.914	
03	阴坡	2. 777	- 11. 483	Щ	AR3	阴坡	1. 467	- 4. 039	半]		阴坡	2.096	- 6.614	
	阳坡	2. 912	- 13.002	西		阳坡	1. 674	- 4. 717	侧 A	阳坡	2.416	- 8.854		
04	阴坡	2.441	- 9. 943	部	4.0.4	阴坡	1. 809	- 5. 980	东	10 1	阴坡	2.047	- 6.162	
	阳坡	1. 755	- 4. 559	奥	AK4	阳坡	2. 679	- 12.009	部	10- 1	阳坡	1.688	- 4.262	
05 BE	阴坡	2. 930	- 11. 650	尔	W7 NT 1	阴坡	1. 808	- 5. 760		10	阴坡	2.086	- 7.159	
	阳坡	2.784	- 11. 350	塔	W N 1	阳坡	1. 875	- 5. 863			阳坡	2.209	- 8.170	70 41 54
00	阴坡	1. 433	- 3. 243	乌	WINO	阴坡	1. 532	- 4. 261	冰	水 大 13 反	阴坡	1.555	- 3.941	
<sup>06</sup> 阳坡	阳坡	1. 073	- 1. 569	首	w N2	阳坡	1. 420	- 3. 414	込 坂		阳坡	1.614	- 4.954	
07	阴坡	1. 908	- 6. 489	 IZ	W/ N/ 2	阴坡	1. 291	- 2.305	区	12 1	阴坡	2.903	- 12.388	天
07 ß	阳坡	2. 111	- 7. 925		W N 3	阳坡	1. 307	- 2.394	万水	13- 1	阳坡	2.290	- 8.877	山
00	阴坡	2. 953	- 13.078		W/ N/ A	阴坡	1. 443	- 3. 512	岭	12 2	阴坡	1.485	- 3.592	乌
08	阳坡	1. 652	- 4.270	V	W N 4	阳坡	1. 236	- 2.311	侧	15- 2	阳坡	1.514	- 3.300	〕 鲁木 齐 河 二
A T T 1	阴坡	2. 524	- 10. 617		W/ N/ 5	阴坡	1. 586	- 4.710	西北	13- 3	阴坡	1.795	- 4.820	
AU I	阳坡	1. 906	- 6.839	天	W N J	阳坡	1. 533	- 3. 920	部		阳坡	2.146	- 7.005	
4112	阴坡	4. 336	- 23. 968	山	WN6	阴坡	1. 788	- 5. 526		12	阴坡	1.810	- 5.025	
AU 2	阳坡	2. 115	- 7. 597	冰		阳坡	1. 686	- 5. 317			阳坡	2.252	- 7.872	
1112	阴坡	1.903 - 6.413 达	DI1	阴坡	1. 064	- 1. 244		11 阴	阴坡	1.469	- 2.808	源		
AU 3	阳坡	1.815	- 6. 482		DLI	阳坡	2. 267	- 9. 279	布	11	阳坡	1.642	- 4.371	X
ATT /	, 阴坡	2. 317	- 9. 399	分	→ BL2	阴坡	1. 385	- 3. 115	拉	立 8 寺	阴坡	2.247	- 8.239	
AU 4	阳坡	2, 968	- 13. 338	水		阳坡	1. 255	- 1. 931	特		阳坡	1.843	- 6.271	ł
1115	阴坡	1. 867	- 6.380	岭	BI3	阴坡	1. 912	- 5. 311	沟	7	阴坡	1.564	- 4.246	
AU 3	阳坡	1. 897	- 7.062	南	ЪĽЭ	阳坡	1. 899	- 5. 435			阳坡	2.084	- 6.860	
4116	阴坡	2. 023	- 7. 629	侧 五 16~	1 fa	阴坡	1. 512	- 3. 458	乌	5	阴坡	2.620	- 10.284	
AU 0	阳坡	1. 714	- 5. 559	四	9 <sup>11</sup> 8	阳坡	1. 689	- 4. 339	鲁	阳坡	2.099	- 7.814		
AU7	阴坡	1. 796	- 6.836	こ の	部 阿 1d1 尤	阴坡	1. 446	- 2.852	木	木 1	阴坡	1.640	- 4.070	
AU /	阳坡	2. 577	- 11.727	尤		阳坡	1. 390	- 3. 038	齐	阳坡	1.062	- 2.418		
1118	阴坡	3. 487	- 17. 330	艾	之 之 3g 与	阴坡	1. 903	- 5. 724	। মন	LB1	阴坡	2.442	- 9.062	
AU 8	阳坡	1. 432	- 4.066	肯		阳坡	1. 549	- 4. 195	)円 315		阳坡	2.229	- 8.391	
AU9 阳均 阳均	阴坡	2.012	- 8.421	谷	≌ 4g	阴坡	1. 703	- 4. 932	ぷ	2	阴坡	1.732	- 5.226	
	阳坡	1. 703	- 5. 965			阳坡	2. 329	- 8. 672	X		阳坡	2.336	- 10.865	

## 1 冰川槽谷的形态特征分析

http:/

#### 表 2 一些槽谷剖面形态统计资料换算

Table 2	Some	statistic valu	ies about	cross	sections	of g	lacial	vall	evs
rubic L	come	studistic vare	ios usout	01 000	500 00015	01 D	morui	, and	$\sigma_{j} \sigma_{j}$

地	地上式炉口	+# <b>Ć</b>	原始	数据	换算		
	地点蚁编亏	坂回	b	а	В	Α	留注
	· 注水沟 21540	阴坡	2.000	0. 30	2.000	- 5.809	
	/月小/4 31340	阳坡	2.000	0.40	2.000	- 5.521	
	<b>洼水沟 2600</b>	阴坡	1.503	0.60	1. 503	- 2.827	
Л	肩小角 2000	阳坡	1.734	0.40	1. 734	- 4.296	
西	<b>侧欧沒</b> 打 2750	阴坡	1.737	0.30	1. 737	- 4.598	
h명 一	侧焰冶打 3730	阳坡	1.737	0.30	1. 737	- 4.598	刘耕在[3]
环	<b>侧欧沟</b> 打 2200	阴坡	2.000	0.40	2.000	- 5.521	XJAT +
害		阳坡	1.701	0.40	1. 701	- 4.144	
Щ	日海林 3400	阴坡	2.589	0.35	2. 589	- 8.367	
	口1志1杯 3400	阳坡	2.000	0. 25	2.000	- 5.991	
	日海林 3200	阴坡	1.709	0.50	1. 709	- 3.958	
	口 187年 5200	阳坡	1.306	0.50	1. 306	- 2.102	
	8号冰川谷	阴坡	1.568	0. 5926	1. 568	- 3.139	
天	85M/11	阳坡	1.536	0. 4393	1. 536	- 3.291	
山	0号冰川公	阴坡	1.964	0. 06105	1. 964	- 7.235	
乌	25 M/16	阳坡	1.694	0. 8798	1. 694	- 3.324	
鲁	<b>珀菇尔菇</b> 优	阴坡	1.696	0. 01283	1. 696	- 7.561	
⊔ ★	场附小附批	阳坡	1.632	0. 01284	1. 632	- 7.266	
不文	软状旺菇优	阴坡	1.533	0. 4980	1. 533	- 3.151	
77		阳坡	1.488	0. 4302	1. 488	- 3.091	<b>佳古勒</b> [2]
泂	<u> </u>	阴坡	1.926	0. 07109	1. 926	- 6.908	<b>卅九</b> 到 <sup>11</sup>
源		阳坡	1.655	0. 09258	1. 655	- 5.396	
X	词修注机	阴坡	1.895	0. 02976	1. 895	- 7.636	
	王峄坦加	阳坡	1.417	0. 1865	1. 417	- 3.599	
퓼	检重冰川公	阴坡	1. 595	0. 5953	1. 595	- 3.259	
藏		阳坡	1.509	0. 4196	1. 509	- 3.212	
天 山	台头河	阴坡	1.794	0. 03509	1. 794	- 7.006	
	百二州	阳坡	1.792	0. 04336	1. 792	- 6.785	

 $|A| = -5.464+ 6.135^{\circ} B$ 

相关系数 R= 0.96, F= 1566.256为显著相关,这说明冰川槽谷的 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空间上的不同区域(天山中西部.四川螺髻山.西藏 枪勇冰川谷.瑞典 Lappotron冰川谷和 Beartooth.Mt的冰川谷)的各种山岳冰川类型,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,冰川槽谷的上述关系具有一 定的普遍性,反映了冰川槽谷形态不同于其他谷地形态和简单"U"字形态的谷底宽度与 谷坡陡度相互制约的本质特征,而这种特征正是冰川作用不同于其他营力作用的反映.可 以把 A 或 B 看做冰川作用的指数,同一地区的不同冰川或不同地区的冰川,比较 A 或 B, 其差异反映了冰川规模和冰川作用时间的长短.

由于 A B 值可以相互确定,可以通过其中的任一参数描述槽谷的形态特征,并可进行对比,根据以前统计的习惯,一般采用 B 值描述槽谷的形态. (C1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House, All rights reserved. http://



图 2 槽谷形态 A B 值统计关系图

Fig. 2 The relationship between A and B of glacial valley's cross-section

## 2 不同区域冰川槽谷的形态

No. 2

B值的大小与冰川的侵蚀能力密切相关,不同区域由于冰川的类型和侵蚀能力的不同,冰川槽谷的 B值也不同,表 3列出了不同地区冰川槽谷的 B的平均值.

表 3 不同地区冰川槽谷形态 B的平均值

Table 3 The average B value of glacial valleys cross sections in different areas

地区	B 平均值	数据来源
天山冰达坂区分水岭北侧	1. 943	笔者、焦克勤
天山冰达坂区分水岭南侧	2. 244	笔者
天山西部奥尔塔乌尊区	2. 524	笔者
川西螺髻山	1. 835	刘耕年

可以看出,在天山地区,冰达坂分水岭南侧较北侧 B 值大,冰川槽谷的陡度大,冰川 性质反映较好的水分条件;天山西部奥尔塔乌尊地区 B 值大于中部冰达坂区,说明天山 西部的降水条件还好一些.

天山西部冰川作用大于中部,说明在末次冰期时,天山的水汽仍是由西风带来;南坡 冰川作用大于北坡,则反映西风带向南发生了偏移,也间接证明冰期时欧亚大陆北部高纬 地区存在着强大的冷高压.

与天山地区相比,川西螺髻山的 B值较小,应与其冰川作用时间的相对长短有关.

#### 3 冰川槽谷的不对称性及其影响因素

槽谷是不对称的,这是由于冰川动力状况在槽谷两侧的分异造成的,冰川动力作用强的一侧,侵蚀作用强,形成陡坡;冰川动力作用弱的一侧,形成缓坡.

冰川槽谷两侧的 B 值差异可用来衡量槽谷的不对称性,经过统计分析发现影响冰川 槽谷不对称性的因素主要包括:

(1) 槽谷的坡面朝向

在统计的 51条槽谷剖面中,阴坡 B值大于阳坡 B值的剖面有 29条,约占 57%.说明 槽谷阴坡的陡度一般大于阳坡,这是由于槽谷的阴坡和阳坡侧所受的太阳辐射总量不同, 阳坡侧太阳辐射强,冰川消融强,冰体薄,侵蚀能力弱;阴坡太阳辐射少,冰体厚,侵蚀能力 强,因此,冰川的主流线偏向阴坡侧,形成阴坡侧比阳坡侧更陡的槽谷形态.



图 3 冰川交汇的槽谷侵蚀作用示意图 Fig. 3 Effect of glacial convergence in glacial valleys

(3) 冰川槽谷的弯曲

(2) 冰川的交汇

冰川交汇对槽谷不对称的形成有很 大影响,由于支流冰川的汇入形成冰川相 互顶托 (图 3),冰川的主流线发生偏移,增 大冰川交汇点下游迎支冰川坡的侵蚀,使 该坡侵蚀作用加强,槽谷变陡.这种影响 如果发生在迎支冰川坡为阴坡时,则加大 \*川主流线 了槽谷的不对称性,如果发生在迎支冰川 坡为阳坡时,则减缓槽谷的不对称性,甚 至出现阳坡侧比阴坡侧陡的情况,这种情 况在天山地区普遍存在,在统计的 51条 槽谷剖面的 22条阳坡 *B* 值大于阴坡的槽 谷中,有 14条槽谷位于冰川交汇处.

冰川槽谷的弯曲,也影响槽谷的不对称性,由于冰川运动的惯性使冰川在前进过程中遇到转弯处时,加大对迎冰坡侧的侵蚀,使槽谷的陡度加大(图 4).





Fig. 4 Cornering of glacial valleys and its action to the glacial erosion (C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http:// 另外 ,槽谷的不对称性还受地质构造、岩性等因素的影响

### 4 结论

本文利用冰川槽谷的抛物线模型分析了天山地区及其他一些地区冰川槽谷横剖面的 形态特征,得出了以下结论:

(1) 描述槽谷横剖面谷底宽度与谷壁陡度的参数 A B 之间具有极强的线性相关关系,揭示了冰川槽谷形态不同于其他谷地形态和简单"U"字形态的谷底宽度与谷坡陡度相互制约的本质特征,而这一特征正是冰川作用不同于其他营力作用的反映.同时也证明用其中一个参数描述槽谷形态的科学性.

(2)不同地区槽谷形态的差异反映了冰川作用时期这些地区冰川动力状况的差异,而 这种差异反映了当时的气候、环境特征,可以利用槽谷的剖面形态特征定性和半定量的研 究冰川发育时期的古气候和古环境特征.

(3)槽谷的不对称性成因于槽谷两侧冰川动力状况的差异,主要影响因素为:槽谷坡 面朝向、冰川交汇、槽谷弯曲以及地质构造条件等.

**致谢:**野外工作得到中国科学院天山冰川站的支持,在此表示衷心的感谢.

#### 参考文献

1 Svensson H. Is the cross-section of a Glacial V alley a Parabola. The Journal of Glaciology, 1959, 3(25): 362-363

2 焦克勤.天山乌鲁木齐河源区冰川谷的横剖面.冰川冻土,1981,3(增刊): 92~96

3 刘耕年.川西螺髻山冰川侵蚀地貌研究.冰川冻土,1989,11(3): 253~255

## The Morphological Character and Paleo-climate Indication of the Cross Section of Glacial Valleys

Li Yingkui Liu Gengnian Cui Zhijiu (The Department of Urban and Environment, Peking University, Beijing 100871)

#### Abstract

By measuring 51 glacial valleys in the middle and west of the TianShan Mt. and comparing them with other regions both in China and in other countries, the author considers that the Parabola modal parameters (A and B) of the glacial valley have the closed linear relationship and can be described by the formula |A| = -5.464 + -6.135 B.

It is shown that the morphological character of the glacial valley is different in different regions, causing by the difference of the characters of the glaciers. It can be used as the indication of the paleo-climate.

(C)1994-20 The asymmetrical character of the glacial valley is formed by the dynamic

difference of the glacier on the each side of the valley. The influencing factors include the direction of the valley side, the function of the glacial convergence, the cornering of the valley and other geological factors.

#### Keywords Glacial valley, Parabola modal, Direction of the valley side, Glacial convergence, Cornering of the valley