

西北干旱区冰川变化及其径流效应研究^{*}

刘潮海 康尔泗 刘时银 陈建明 刘宗香

(中国科学院兰州冰川冻土研究所, 兰州 730000)

摘要 将西北干旱区的冰川作为独立系统, 估算其“小冰期”以来和近数十年的冰川变化量、物质平衡变化值。在此基础上, 模拟保持当前气候状态和气候进一步变化背景下, 冰川径流达到临界状态的时间。

关键词 冰川变化 物质平衡 冰川径流

作为西北干旱区水资源重要组成部分的冰川, 在全球气候变暖背景下如何变化, 对其径流和河流补给作用有什么影响, 冰川水资源量是增多还是减少, 已成为举世关注的重大问题, 因此, 监测冰川变化, 分析其气候响应, 估算和预测冰川径流的变化及其趋势, 具有重要的科学意义和实用价值。

冰川与气候、径流相关模型是在具有长系列观测资料的冰川上建立的^[1], 而把这种模型用于冰川系统(流域、区域)的研究, 标志着冰川学的发展趋势。同时, 冰川径流的估算和预测, 也需要一个系统的冰川长度、面积和物质平衡等要素的状态资料。

本文将西北干旱区作为一冰川系统, 在估算其“小冰期”和近数十年冰川变化量的基础上, 估算冰川径流的状态和可能变化趋势, 为冰川水资源的合理利用提供科学依据。

1 冰川资源及其分布现状

西北干旱区指 35°N 以北, 106°E 以西的广大内陆地区, 从北向南, 依次分布有阿尔泰山、天山、帕米尔、喀喇昆仑、昆仑山和祁连山等(图 1), 它们拦截西风 and 南亚季风带来的水汽, 形成较多的降水和数量众多的冰川, 孕育了相对稳定的河川径流。

西北干旱区计有冰川 22 699 条, 面积 28 330.57 km², 冰储量 2 847.093 3 km³^[2], 分别占全国相应总数的 50.0%, 48.2%和 53.6%。在各大水系中, 塔里木内陆河的冰川数量位居第一(表 1)。西北干旱区年平均冰川融水量达 $202.26 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[3], 约为该区冰储量(以水当量表示)的 0.8%。

西北干旱区冰川分布在新疆、甘肃和青海三省区, 其中新疆维吾尔自治区发育了 18 816 条、面积 25 089.8 km²和冰储量 2 655.8 km³的冰川, 分别占该区相应总数的 82.9%, 88.6%和

1998-06-16 收稿, 1998-10-28 收修改稿

^{*}国家“九五”科技攻关重点(编号: 96-912-01-02)专题及中国科学院重大资助项目(编号: KZ951-B1-212)

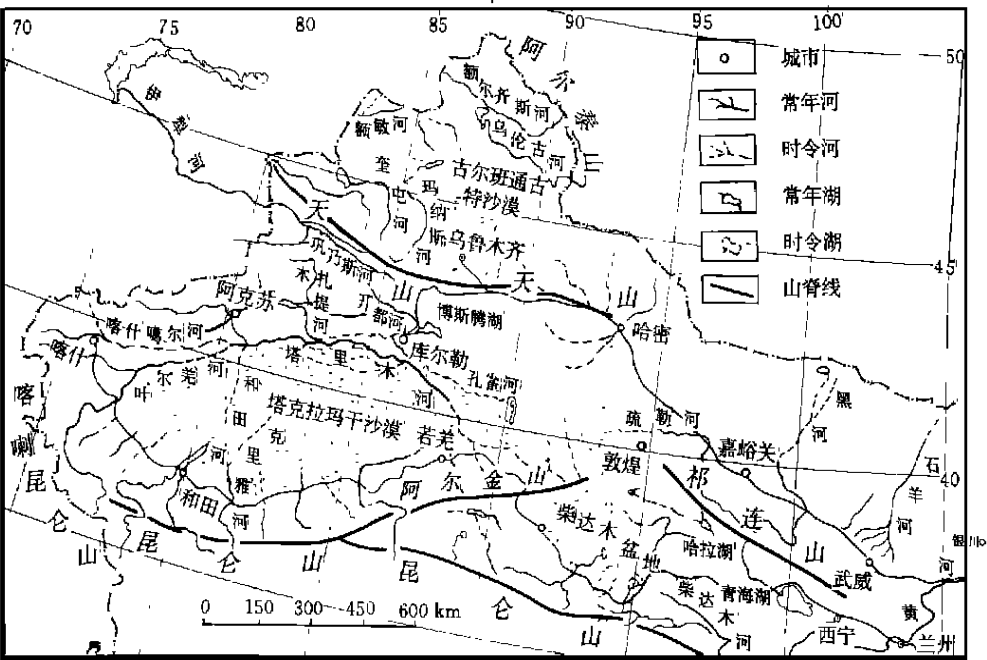


图 1 西北干旱地区山脉水系分布图

93.3%. 青海和甘肃省的冰川数量规模小,但由于地处干旱的河西走廊和柴达木盆地,冰川的水资源意义仍然很大.

表 1 西北干旱区各大水系的冰川数量分布

水 系	冰川条数		冰川面积		冰储量		冰川平均面积	冰川融水量
	条数	%	km ²	%	km ³	%		
额尔齐斯河	403	1.78	289.29	1.02	16.395 3	0.58	0.72	3.62
准噶尔内陆河	3412	15.03	2 254.10	7.96	137.241 9	4.82	0.66	16.89
塔里木内陆河	12 182	53.67	20 271.02	71.55	2 347.316 5	82.45	1.66	136.02
伊犁河	2 373	10.45	2 022.66	7.14	142.179 1	4.99	0.85	26.41
吐鲁番-哈密内陆河	446	1.95	252.73	0.89	12.633 0	0.44	0.57	2.34
河西内陆河	2 194	9.67	1 334.75	4.71	61.549 4	2.16	0.61	9.99
青海内陆河	1 581	6.97	1 865.05	6.58	128.528 0	4.51	1.18	6.31
黄河(大通河)	108	0.48	40.97	0.15	1.250 1	0.05	0.38	0.68
总 计	22 699	100.00	28 330.57	100.00	2 847.093 3	100.00	1.25	202.26

2 “小冰期”百年时间尺度的冰川变化

“小冰期”是指近数世纪地球的一个百年计时间尺度的相对寒冷期. 在此期间, 全球山地冰川均前进, 并在其末端遗留了三道终碛垅, 其表面形态特征、规模、风化程度和植被状况均与更早时期形成的冰碛垅有明显的区别, 因而可以用其遗迹恢复“小冰期”时的冰川规模和重建

当时的环境.

在各山系中选择若干有代表性的冰川流域, 对其“小冰期”时的冰川长度和面积等形态要素进行量算^[4], 按冰川面积等级分别统计其面积(S_L)和变化率($\Delta S/S_L$), 以这些值估算与此相似的山脉或河流“小冰期”最盛时的规模(表 2).

表 2 西北干旱区主要河流域“小冰期”以来的冰川变化

河 流	所在山脉	现代冰川面积	小冰期冰川面积	$S_L - S$	$\frac{\Delta S}{S_L}/\%$
		S/km^2	S_L/km^2	$\Delta S/\text{km}^2$	
石 羊 河	祁连山	64. 82	103. 49	36. 87	37. 4
黑 河	祁连山	420. 55	500. 84	80. 29	16. 0
疏 勒 河	祁连山	849. 38	949. 07	99. 69	10. 5
和 田 河	昆仑山	5 336. 98	5 665. 56	328. 58	5. 8
叶尔羌河	喀喇昆仑山	5 924. 85	6 530. 38	605. 53	9. 3
喀什噶尔河	帕米尔高原	2 247. 28	2 513. 23	265. 95	10. 6
吐鲁番-哈密内陆河	天 山	252. 73	300. 65	47. 92	15. 9
阿克苏河等	天 山	4 670. 40	5 069. 83	399. 43	7. 9
伊 犁 河	天 山	2 022. 66	2 446. 73	424. 07	17. 3
准噶尔内陆河	天 山	2 254. 10	2 585. 38	331. 28	12. 8
额尔齐斯河	阿尔泰山	289. 29	338. 87	49. 58	14. 6
合 计		24 333. 04	27 004. 03	2 670. 99	9. 9

按冰川面积变化率 9.9%估算, 西北干旱区“小冰期”最盛时的冰川面积可达 31 443 km², 较现存的冰川面积增加了 3 112 km². “小冰期”以来, 冰川面积变化率各地区差异很大, 其中较湿润的边缘山地的冰川变化幅度大, 尤以祁连山东段的冷龙岭最大. 随着远离水汽补给源地, 冰川面积变化率减小, 其最小值出现在祁连山西段和西昆仑山. 西北干旱区若干代表性流域的冰川面积变化率与其面积等级的中值均有良好的负指数关系, 表明冰川面积变化率有随冰川面积等级增大而减小的规律. 因此, 按各面积等级的变化率所估算的“小冰期”最盛时的冰川面积比较接近实际, 而一个流域或山区用统一的冰川面积变化率推算其“小冰期”时的总面积, 可能会带来偏大的结果^[9].

3 冰川近期变化

3.1 冰川近期变化事件

西北区直接监测变化的冰川少, 冰川变化的大量资料来源于冰川末端固定标志的重复测量、地面立体摄影测量和航空像片对比成图等间接方法. 本文以祁连山和天山为代表分述如下.

3.1.1 祁连山区 70 年代和 80 年代中期, 对祁连山东、中、西段的代表性冰川进行的各种测量表明, 冰川退缩幅度 80 年代中期较 70 年代中期有所减缓(表 3), 中西段冰川转入前进或达到稳定状态的冰川数量增多, 而祁连山东段的冰川仍处在退缩阶段中, 但其变化幅度有所减缓, 这是 60 年代末以来持续降温和降水量增多在冰川状态上的反映^[9].

表 3 祁连山代表性冰川的近期变化

冰川名称	长度 / km	面积 / km ²	冰川类型	测量时段 / 年	冰川末端变化			冰川面积变化	
					m	m/a	%	km ²	%
水管河 4 号	2.1	1.86	冰斗	1956 ~ 1976	-320.0	-16.0	0.76	-0.265 0	0.71
				1976 ~ 1984	-69.7	-8.7	0.47	-0.014 2	0.10
“七一”冰川	3.8	3.04	冰斗-山谷	1956 ~ 1975	-40.0	-2.1	0.06	-0.024	0.04
				1975 ~ 1984	-10.0	-1.1	0.03	-0.005	0.02
老虎沟 12 号	10.0	21.91	复式山谷	1962 ~ 1976	-71.8	-5.0	0.05		
				1960 ~ 1976				-0.131	0.04
				1976 ~ 1985	-11.7	-1.3	0.013	-0.007	0.003

3.1.2 天山山区 自“小冰期”以来,乌鲁木齐河源 1 号冰川(简称 1 号冰川)退缩速度有逐渐增强的趋势,尤其是 60 年代初到 70 年代初,冰川面积年平均减小 0.007 6 km²,是“小冰期”以来冰川面积缩小最大的时期. 从近数十年冰川实测变化资料序列分析,70 年代初以前,冰川变化的幅度大,年平均后退 6.0 m/a,此后,冰川后退速度有所减缓,90 年代又有增大的趋势.

通过两次航片对比成图方法,获得了乌鲁木齐河 1964 ~ 1992 年冰川变化资料^[7]. 该流域 155 条冰川均后退,面积缩小和冰储量减少. 冰川平均后退 98 m,年均后退 3.5 m,后退率为 12.4%;冰川面积由 1964 年的 48.04 km² 减少到 1992 年的 41.393 km²,缩小率为 13.8%;冰储量减少 2.8×10⁸ m³,减少率为 16.8%. 与此同时,冰面高程下降,其中消融区平均减薄 10.2 m,整个冰川平均下降 5.9 m,平衡线高度平均上升近 30 m.

四棵树河源于北天山西段的博罗克努山北坡,选择其中的 4 条山地冰川流域,利用航空像片对比成图方法,获得了 30 条冰川 1962 ~ 1990 年的冰川变化资料(表 4),其中 1 条冰川前进了 35 m,3 条冰川处于稳定状态,其余冰川均后退、面积缩小和冰储量减少.

在喀什河测量的 64 条冰川均后退、面积缩小. 冰川平均后退 149 m,变化率为 7.0%,冰川面积缩小了 4.809 km²,约为 1962 年冰川面积的 3.5%(表 5).

表 4 四棵树河流域冰川近期变化

编 号	流域名称	条数	冰川末端变化			冰川面积变化		
			变化量 /m	年平均 /m·a ⁻¹	变化率 /%	面积/ km ²		变化量 /km ²
						1962 年	1990 年	
5Y742B	冬都郭勒	3	-170	-6.0	4.8	13.504	13.076	-0.428
5Y742C	哈夏廷郭勒	10	-131	-4.7	5.7	38.988	38.198	-0.790
5Y742F	东都郭勒	11	-153	-5.4	5.0	27.705	26.698	-1.007
5Y742G	西白提	6	-131	-4.7	4.1	22.018	21.566	-0.452
总 计		30	-140	-5.0	4.9	102.215	99.538	-2.677

西台兰冰川源于天山最高峰——托木尔峰,面积 108.15 km²,冰储量 22.23 km³,是一条树枝状山谷冰川. 1942 ~ 1976 年平均后退 17.6 m^[8],1997 年再次进行的地面立体摄影测量发现,该冰川仍处在较强烈的退缩中,年平均后退 17 m,面积缩小 0.374 km².

综上所述,天山山区的冰川,以长度缩短、面积缩小和冰储量减少为其主要趋势. 50 年代末到 70 年代初,后退冰川数量多,退缩幅度大;70 年代初到 80 年代末,冰川退缩速度减缓;进

入 90 年代, 冰川退缩又有加剧之势.

表 5 喀什河流域冰川近期变化

编 号	流域名称	条数	冰川末端变化			冰川面积变化			
			变化量 /m	年平均 /m ° a ⁻¹	变化率 /%	面积/ km ²		变化量 /km ²	变化率 /%
						1962 年	1990 年		
5X043H	阿勒沙郎	12	— 149	— 5. 3	6. 5	27. 430	26. 330	— 1. 100	4. 0
5X043I	吐鲁更恰干	13	— 166	— 6. 1	6. 9	25. 499	24. 442	— 1. 057	4. 1
5X043J	阿尔桑萨依	10	— 150	— 5. 4	6. 0	40. 021	39. 154	— 0. 867	2. 2
5X043K	特洼萨依	17	— 146	— 5. 2	7. 6	36. 024	34. 753	— 1. 271	3. 5
5X043L	孟克德萨依	12	— 130	— 4. 7	7. 0	9. 681	9. 167	— 0. 514	5. 3
平 均		64	— 149	— 5. 3	7. 0	138. 655	133. 846	— 4. 809	3. 5

3.2 西北干旱区冰川近期变化量的估算

从现代冰川发育规模与发育条件的关系上看“小冰期”最盛时两者的关系, 就会得出非常相似的结论. “小冰期”冰川发育的海拔与现代冰川相近, 冰川补给的水汽来源和大气环流形势也与现今冰川区相似, 冰川规模、变化幅度和变化方向的地区差异已经形成. 这样, 相似地区冰川变化量的比值是稳定的. 为此, 在目前冰川普遍退缩的情况下, 可以利用下式估算 60 年代以来的冰川变化.

$$\frac{a_i}{a_b} = \frac{A_i}{A_b}, \tag{1}$$

$$\bar{a} = \frac{1}{S} \sum a_i \circ s_i, \tag{2}$$

式中: a_i 和 a_b 分别为所类比和基准流域的冰川各面积等级的年变化率; A_i 和 A_b 分别为所类比和基准流域“小冰期”以来同一面积等级的冰川面积变化率; S 为所统计的冰川区的冰川总面积; s_i 为各面积等级的冰川面积.

近 35 a 来, 西北干旱区冰川面积约缩小了 1 338 km², 是现代冰川总面积的 4. 9%, 其中最大面积变化率出现在较湿润的西天山和祁连山东段. 随着气候的大陆度增强和远离水汽补给源地, 冰川面积变化率减小, 其最小值出现在祁连山西段和西昆仑山.

4 冰川径流变化及其趋势预测

4.1 模拟原理和方法

在稳定状态下, 即冰川物质平衡为零时的冰川径流量(R_0)是其经流深(r_0)与这种状态下的冰川面积(S_0)的乘积

$$R_0 = r_0 \circ S_0. \tag{3}$$

稳定状态下的冰川径流深等于其总积累或总消融, 近似用多年平均总积累(C)和总消融(A)之和的平均值表示:

$$r_0 = \frac{1}{2} (C + A). \tag{4}$$

当冰川消融因气温升高而增强时, 物质平衡负值增大, 在数量上与此等值的冰川径流深增

量(r_d)也相应增大^[9]. 与此同时,冰川面积也会因物质亏损而缩小(S_d). 这时,冰川径流量(R)应为

$$R = (r_0 + r_d)(S_0 - S_d).$$

(5)

当冰川径流恢复到初始状态时,即 $R=R_0$, 定义为冰川径流的临界状态. 在这种状态下,满足方程(5)所需要的 r_d 和 S_d 的变化量分别为

$$r_d = \frac{r_0 S_d}{S_0 - S_d},$$

(6)

$$S_d = \frac{r_d S_0}{r_0 + r_d}.$$

(7)

气温和降水量的变化通过影响冰川平衡线的位移而使冰川物质平衡发生变化,并导致冰川长度和面积的变化. 这时,就可以利用冰川物质平衡和冰川面积的二维变量估算冰川径流量的变化及其达到临界状态的时间.

4.2 冰川径流变化

在保持现有气候条件下,即 r_d 和冰川面积变化率保持不变时,不同状态和规模的冰川,其径流量达到临界状态的时间相差很大. 在选择 的 5 条冰川中,祁连山西段的老虎沟 12 号冰川,其径流达到临界状态的时间长达 349 a,而位于祁连山东段的水管河 4 号冰川早已达到其径流的临界状态(表 6). 由此比较可以看出,冰川径流达到临界状态的时间随 S_0 的增大而增加,随着 r_0 和 r_d 的增大而缩短. 冰川面积变化率对冰川径流达到临界状态的时间也有重要影响,在边缘较湿润山地,冰川面积变化率大,冰川径流达到临界状态的时间相对较短,而较干旱的内陆山地,冰川径流达到临界状态的时间因冰川面积变化率较小而延长.

西北干旱区的冰川,按其物质平衡水平、物质平衡变化幅度、冰川作用能和冰川面积变化率等活动性指标,分为以下区域:

I 较活动的冰川区. 这个区包括祁连山东段、西天山和阿尔泰等边缘山地,冰川各项活动性指标最高,其平均值列入表 7;

II 较少活动的冰川区. 这个区包括祁连山黑河、东帕米尔的喀什噶尔河、喀喇昆仑山的叶尔羌河、准噶尔和吐鲁番—哈密内陆河等,其活动性各项指标均低于 I 区;

III 最少活动的冰川区. 包括祁连山西段和昆仑山,其特征是物质平衡水平低,物质平衡正、负交替出现,但其绝对值均不大,冰川作用能最低,冰川面积年平均变化率最小.

表 6 代表性冰川径流在保持现有气候状态下的变化

冰川名称	山系	地理位置	r_0 /mm	S_0 /km ²	$R_0 \times 10^8$ / m ³	r_d /mm	S_d /km ²	年平均面积 缩小量 /km ²	达到临界 状态所需 时间/a
西台兰冰川	天山	41°57'N; 80°10'E	1 415	108. 15	1. 530	+262	16. 90	0. 151	112(2 084)
1 号冰川	天山	43°07'N; 86°49'E	638	1. 95	0. 012	+136	0. 343	0. 004	86(2 050)
老虎沟 12 号	祁连山	39°26'N; 96°13'E	641	21. 91	0. 140	−75	2. 90	0. 008 3	349(2 305)
“七一”冰川	祁连山	39°14'N; 99°45'E	577	3. 04	0. 018	−21	0. 115	0. 001 1	105(2 061)
水管河 4 号	祁连山	37°33'N; 101°45'E	1 153	1. 86	0. 021	+88	0. 132	0. 013 6	10(—)

表 7 冰川活动性分区及其径流状态

区号	区 名	冰川面积	物质平 衡水平	冰川作 用 能	60 年代以 来物质平 衡变化	面积年 变 率	起始冰川 径流量	当前冰川 径流量	冰川径流达到临 界状态的时间 / a
		S/km^2	m/m	$E_g/\text{mm}^\circ\text{m}^{-1}$	$b\text{ n/m}$	$\frac{\Delta S}{S}/\%$	R_0 $\times 10^8/\text{m}^3$	$R \times 10^8/\text{m}^3$	
I	较活动的冰川区	7 088.14	1.2	≥ 6.0	-0.20	0.19	85.06	92.63	75(2 035)
II	较少活动的冰川区	11 072.17	0.8	3.5~5.0	-0.15	0.15	88.58	99.66	105(2 065)
III	最少活动的冰川区	10 170.26	0.5	≤ 3.0	± 0.05	0.08	50.85	54.37~ 44.48	113~138 (2 073~2 098)

在保持现有气候条件下，较活动的冰川区，其径流达到临界状态的时间最短，大约出现在下一世纪初，而最少活动的冰川区，则要在下一世纪中后期达到冰川径流的临界状态。

4.3 冰川径流变化的趋势预测

年降水量和夏季平均气温是影响冰川状态和径流变化的主要气候因子，但它们的变化及其幅度又是不确定的。为此，利用 IPCC (1992) 的预测结果，下世纪每 10 a 将平均升高 $0.3\text{ }^\circ\text{C}^{[10]}$ ，到 2030 年和 2050 年，气温将升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1.6\text{ }^\circ\text{C}$ 。夏均温(T_s)的变幅要比年均温(T_a)的变幅小得多^[11]， $T_s=0.4T_a$ ，按此比值将各时段的年均温升高值分别换算为夏均温升高值，分别估算代表性冰川和各活动性冰川区的平衡线、物质平衡和冰川面积等的变化量，并将这些参数作为变量，应用上述模拟方法，估算冰川径流量及其达到临界状态的时间。

所分析的 5 条冰川径流对气温升高响应的的时间尺度是不同的。规模巨大的西台兰冰川径流，大约在下世纪末，即夏均温升高 $1.2\text{ }^\circ\text{C}$ 时达最大值，此后，冰川径流随气温继续升高而逐渐减小，直到下下世纪初才能达到其临界状态。祁连山老虎沟 12 号冰川与西台兰冰川相似，其径流最终达到临界状态的时间最少也需要 100 a 以上，而祁连山东段的水管河 4 号冰川，随着气温升高而迅速衰减，冰川径流量大幅度减少。

西北干旱区各冰川区，冰川径流随气温升高而达到临界状态的时间均缩短。较活动的冰川区，冰川径流可能在下世纪初达到临界状态，但区内不同规模的冰川又差别很大，面积大于 100 km^2 的巨大山谷冰川，可能在下世纪后期才能达到其径流的临界状态。最少活动的冰川区，冰川径流达到临界状态的时间最长，可能出现在下世纪末，区内的巨大山谷冰川可能还要更长。

发育在内陆干旱区的冰川分布海拔高，物质平衡水平低，物质平衡变幅小，冰川末端和面积变化量不大，冰川径流达到临界状态的时间也相对较长。即使较活动的冰川区，与阿尔卑斯山、高加索等海洋性冰川相比，其冰川活动性各项指标均要低得多。因此，西北区的冰川在中国，甚至在世界山地冰川中，均属较稳定的冰川区，冰川变化对其径流的影响程度相对较小。

参 考 文 献

1 康尔泗, Ohmura A. 天山冰川作用流域能量、水量和物质平衡及径流模型. 中国科学, B 辑, 1994 24(9): 983~991

2 杨惠安, 米德生, 康兴成, 等. 西北地区冰川资源的分布及特征. 见: 第五届全国冰川冰土学大会论文集(上). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 175~181

- 3 杨针娘. 中国冰川水资源. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991. 137 ~ 141
- 4 王宗太. 天山中段及祁连山东段小冰期以来的冰川与环境. 地理学报, 1991, 46(2): 160 ~ 168
- 5 张祥松, 王宗太. 西北冰川变化及其趋势. 见: 气候变化对西北华北水资源的影响. 济南: 山东科学技术出版社, 1995. 60 ~ 75
- 6 刘潮海, 宋国平, 金明燮. 祁连山冰川的近期变化及趋势预测. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第 7 号. 北京: 科学出版社, 1992. 1 ~ 9
- 7 刘潮海, 陈建明, 金明燮. 天山乌鲁木齐河流域冰川变化及其气候和径流响应. 见: 第五届全国冰川冻土学大会论文集 (上). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 123 ~ 132
- 8 苏 珍, 张文敬, 丁良福. 冰川发育条件、数量、分布及形态类型. 见: 天山托木尔峰地区的冰川与气象. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985. 42 ~ 56
- 9 Котляков В М и др. Реакция оледенения на предстоящие изменения климата. Изв. АН СССР Сер. Геоф., 1991, 5: 40 ~ 44
- 10 毛文永, 文剑平. 全球环境问题与对策. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. 28 ~ 35
- 11 周尚哲. 冰期夏季降温和年降温关系的初步研究. 冰川冻土, 1988, 10(2): 95 ~ 97