未来气候变暖条件下区域冰川的平衡态响应
——以伊犁河流域为例

叶佰生　　赖祖铭
（中国科学院兰州冰川冻土研究所，兰州 730000）

关键词　冰川、平衡态、伊犁河

为了寻找区域冰川规模与地形和气候条件的关系，根据已有的研究[1]，选用雪线高度 H_s 代表气候条件对冰川的综合作用，用雪线以上流域面积 F_s 和流域最高高度 H_{max} 代表冰川形成的地形条件．根据冰川的形成条件做如下假设：(1)目前的冰川处于稳定状态；(2)冰川面积 F_g、条数 N_g 取决于 F_s 和 $\Delta H(=H_{max}-H_s)$，即

$$N_g, F_g = f(F_s, \Delta H). \tag{1}$$

根据冰川编目资料按流域将我国天山冰川分成 14 个区，用多元回归分析得出下列关系：

$$F_g = 1.35F_s^{0.82} \cdot \Delta H^{0.55}, \quad (R = 0.97) \tag{2}$$

$$N_g = 1.01F_s^{0.93}/\Delta H^{0.50}. \quad (R = 0.95) \tag{3}$$

这一关系表明：冰川面积和冰川条数均与雪线以上流域面积成正比；F_g 与 ΔH 成正比，而 N_g 则与 ΔH 成反比，即雪线高度及其以上流域面积相同的条件下，流域最高点 H_{max} 越高，流域内冰川面积越大，而条数则减少，也就是有大冰川的流域冰川条数较少，这是符合实际情况的，这一点与原苏联中亚地区的研究结果有差别，其主要原因是他们将 F_s 与 ΔH 的乘积作为一个变量考虑，即

$$N_g, F_g = f(F_s \cdot \Delta H). \tag{4}$$

分析天山各区冰川面积 F_g、条数 N_g 和相应体积 V_g 之间的关系，得出下式：

$$V_g = 0.036F_g^{1.74}/N_g^{0.62}. \quad (R = 0.99) \tag{5}$$

这一关系较好的原因是在冰川编目中，每条冰川的体积本身就是根据其面积估算的．

如果能根据气候条件求得雪线高度，则可依据上式估算出相应气候条件下流域的冰川规模，因此可将(2)、(3)、(5)式用来估算古冰川和未来气候变化条件下的冰川规模．由于这一方法是建立在冰川相对稳定基础上，因而由此估算出的冰川规模亦只是相应气候的平衡态响应．

一、雪线高度对气候变化的响应

冰川上某一高度 H 的物质平衡 $B(H)$ 为

$$B(H) = A_c(H_s) + A_b(H_s) + \int_{H_s}^{H}\left(\frac{dA_c}{dH} + \frac{dA_b}{dH}\right)dH, \tag{6}$$

式中 A_c, A_b——分别为积累量和消融量，其中积累为正，消融为负．

1992-02-09 收稿，1992-06-08 收修改稿

在雪线处，积累量与消融量相等，即

$$B(H_s) = 0, \tag{7}$$

其中，冰川区雪线附近降水基本上是以雪的形式出现，即积累量等于降水量，而消融量与夏季气温有较好的关系。当夏季气温变化 ΔT（升高为正，降低为负），降水增加 α 倍时，H 处的物质平衡为

$$B(H) = (1+\alpha)\cdot A_c(H_s) + A'_b(H_s) + \int_{H_s}^{H}\left(\frac{dA_c}{dH} + \frac{dA_b}{dH}\right)dH, \tag{8}$$

式中 A'_b 为变化后气候条件下 H_s 处的消融量。

在变化后的气候条件下，雪线达到一个新的高度 H'_s，由(8)式得

$$(1+\alpha)\cdot A_c(H_s) + A'_b(H_s) + \int_{H_s}^{H'_s}\left(\frac{dA_c}{dH} + \frac{dA_b}{dH}\right)dH = 0. \tag{9}$$

消融量 A_b 可由霍达科夫公式[2]计算：

$$A_b = (a+T)^b, \tag{10}$$

则

$$\frac{dA_b}{dH} = b(a+T)^{(b-1)}\cdot\frac{dT}{dH}, \tag{11}$$

$$A'_b(H_s) = (a + T(H_s) + \Delta T)^b, \tag{12}$$

其中 T 为夏季多年平均气温(℃)，主要随高度变化。

对于冰川雪线以上区域，积累梯度可近似等于降水梯度 K_p，即

$$\frac{dA_c}{dH} = K_p. \tag{13}$$

求解方程(9)就可得到气温变化 ΔT 降水变化 α 倍时的雪线高 H'_s，依据流域面积高度曲线可由(2)、(3)、(5)式计算出对应气候变化条件下冰川达到稳定时的面积、条数和体积。

二、新疆伊犁河流域冰川规模对气候变化的平衡态响应

伊犁河流域位于天山西部，流域面积(雅马渡以上) $4.9\times10^4\text{km}^2$，主要有哈什河、巩乃斯河、特克斯河及其支流库克苏河，流域内有冰川 2242 条，冰川面积 1967.4km^2，高山冰川作用区降水量达 800—1100mm，是西北地区水量较丰沛地区之一。

根据流域内12个长系列水文气象站资料分析，流域夏季气温梯度 $\frac{dT}{dH}$ 为 $-0.71℃/100\,\text{m}$。降水梯度 K_p 由于受地形影响较大，且本区缺乏高山区资料，无法直接推求。据伊犁河流域下游哈萨克斯坦共和国外伊犁阿拉套和特克斯河上游哈萨克斯坦共和国境内的观测资料，3600 m 以上年降水呈负梯度，其平均值约为 $-34\text{mm}/100\text{m}$[3]。

由大比例尺地形图及冰川编目得到冰川雪线高度及流域地形基本参数(表 1)。

表 1 中需要说明的是：冰川编目中的 H_s 与平衡线高度之间存在着一个附加冰带，这个附加冰带在不同地区，不同冰川其垂直厚度不同。由于缺乏实测资料，又要考虑计算方便，本文用冰川编目中的 H_s 代替平衡线高度，而由此引起的误差实际上是一个系统误差。经计算，这一误差约为 1%，故认为用冰川编目中的 H_s 代替平衡线高度是可以的。

表 2 列出了几种假设的气候情景，即夏季气温变化 0、+1、+2、+3、+4℃ 和降水变化 0、±10%、±20% 情景下伊犁河流域冰川面积、条数和体积的平衡态响应及对应的雪线高度变

表 1　冰川雪线高度及流域地形基本参数

流域		哈什河	巩乃斯沟	库克苏河	特克斯河
H_{max}(m)		4650	4450	5167	5668
H_s(m)		3600	3710	3840	3820
流域面积 (km^2)	$>H_s$	1360	3650	1280	1530
	>4000m	770	220	950	930
	>3000m	2500	720	3020	4250
	>2000m	4990	2250	4440	7770

表 2　各种气候变化情景下伊犁河流域冰川平衡态响应及对应的雪线高度变化

ΔT (℃)	α(%)	条数(%)	面积(%)	体积(%)	雪线(m)
0	20	10.6	18.9	25.4	−103
	10	5.5	9.6	12.8	−53
	0	0.0	0.0	0.0	0
	−10	−6.1	−10.0	−12.9	56
	−20	−12.8	−20.6	−25.8	115
1	20	−8.2	−13.5	−17.4	71
	10	−13.9	−22.3	−28.1	121
	0	−19.6	−31.0	−38.5	173
	−10	−22.5	−36.1	−44.2	228
	−20	−25.5	−41.0	−49.6	286
2	20	−23.2	−37.6	−46.2	248
	10	−25.7	−41.8	−50.7	296
	0	−28.6	−46.0	−55.1	348
	−10	−30.8	−50.0	−59.2	402
	−20	−33.3	−54.1	−63.2	460
3	20	−31.7	−51.7	−61.2	426
	10	−33.8	−55.1	−64.5	475
	0	−36.2	−58.6	−67.8	525
	−10	−38.8	−62.1	−70.9	579
	−20	−42.0	−65.7	−74.0	636
4	20	−40.1	−64.1	−72.9	609
	10	−42.9	−67.0	−75.4	656
	0	−46.2	−70.0	−77.8	706
	−10	−52.3	−72.9	−80.0	759
	−20	−55.0	−75.6	−82.2	815

化.

对上述结果的直接检验较为困难,目前只能根据小冰期冰川作一简单比较,据对天山乌鲁木齐河流域的研究[4],小冰期到现在夏季平均气温升高 0.6℃,年降水减少 12%, 冰川面积、条数分别减少 30.5% 和 11.5%,雪线上升 134m,根据表 2 内插分别为 27、16.2% 和 163m, 两者较为接近.

由表 2 可以看出，冰川体积对气候最为敏感，其次是面积，相对来讲，冰川条数较稳定，这与姚檀栋等的研究结果是一致的[5].

为了更直观地表示气候变化对冰川的影响，图 1 给出了各种气候变化情景下冰川面积的平衡态响应；由此可计算出各种气候条件下(也即不同冰川区)夏季气温升高 1℃ 引起的冰川面积的变化(图 2)，结果表明：降水量大的地区，冰川对气温的变化比较敏感，反之亦然，且降水量的这一影响随基础气温的升高而逐步减小.

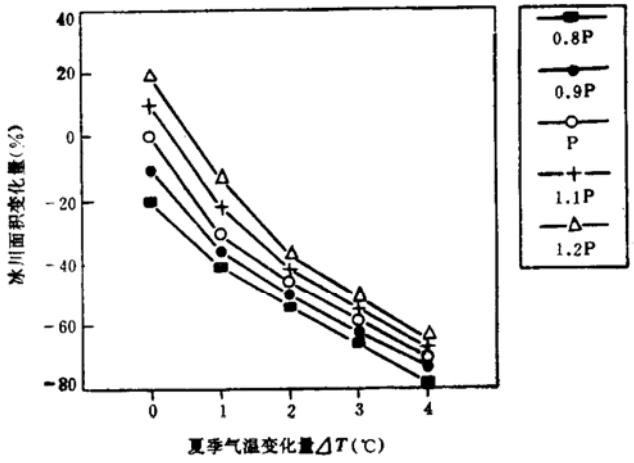


图 1　各种气候变化条件下冰川面积的平衡态响应

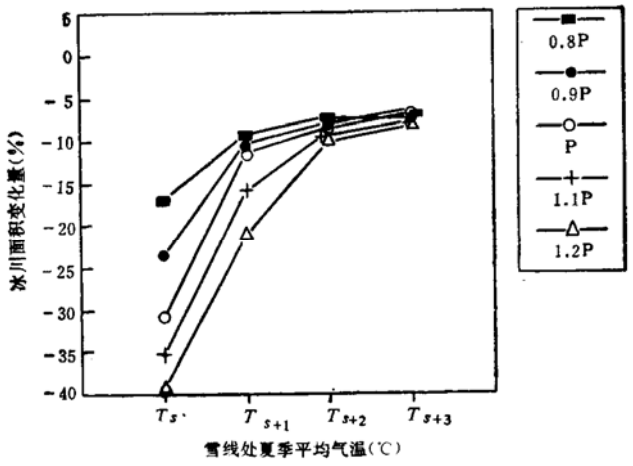


图 2　各种降水条件下夏季气温升高1℃引起的冰川面积变化与雪线处基础气温的关系

参　考　文　献

[1] Глазырин, Г. Е., Соколов, Л. Н., *Материалы Гляциол. Исслед. Хроника, Обсуждения*, М., **26** (1976), 97—101.

[2] Khodakov, V. G., Snow and Ice *Proc. Moscow Symp.*, August 1971. IAHS Publ., **104** (1975), 22—29.

[3] Институт Географии. А Н Казахской ССР, *Ледник Снежный Поклов и Лавины в Горах Казахстана*, Изд. Наука Казахской ССР, Алма-Ата, 1989, 109—125.

[4] 王太宗，地理学报，**46**(1991)，5：160—168.

[5] 姚檀栋、施雅风，中国科学，B 辑，1988，6：657－666.