

从末次冰盛期冰川规模探讨当时的气候环境

——以乌鲁木齐河源区末次冰盛期冰川为例

叶佰生 李世杰 施雅风

(中国科学院兰州冰川冻土研究所, 730000)

摘 要 根据乌鲁木齐河源区末次冰盛期形成的保存完好的古冰川遗迹和现代气候条件下冰川物质平衡与气候的关系, 用冰川动力学方法估算出冰川达到末次冰盛期规模时的气候条件。依据末次冰盛期冰川面积, 结合冰川平衡线高度和冰川体积综合分析, 乌鲁木齐河源区末次冰盛期的夏季气温应比现代低 4.8 左右, 降水约只有现代的 30%。但目前其它古气候方法的研究结果表明, 末次冰盛期的夏季气温比现代低 5.6 左右, 两者相差 0.8, 其原因可能主要是冰川动力学方法未考虑构造抬升对气温的影响, 据此推测, 乌鲁木齐河源区末次冰盛期至今的构造上升量约为 130 m。

关键词 末次冰盛期 冰川 气候

我国西部现代冰川作用区均有保存较完整的末次冰盛期冰川遗迹, 其分布特征和形成年代已进行了一定程度的考察和研究, 并依据雪线高度变化推测了冰期的某些气候特征。但仅依据雪线高度变化用气温梯度方法估算气温变化是不恰当的, 雪线高度变化不仅受气温变化的影响, 而且还受降水量变化的影响, 在我国西部高山区末次冰盛期雪线高度变化还受到构造抬升的影响。另外, 冰川消融与气温之间存在非线性关系, 同样幅度的气候变化对处于不同气候背景条件下的冰川影响是不同的 (Ohmura *et al*, 1992)。Hulton *et al* (1994) 用冰川动力学模型研究南美安第斯山脉末次冰盛期冰川与气候的关系, 取得了较好结果。本文试图结合冰面消融计算和冰川动力学模型, 估算乌鲁木齐河源区末次冰盛期的气候条件。

1 基本理论

山地冰川是一定气候和地形条件共同作用的产物, 气温和降水是影响冰川物质平衡的主要因素。在特定的地形条件下, 某一气候条件, 冰川将对应某一稳定状态, 即稳定

时的冰川面积 S_0 和体积 V_0 可简单表示为气温 T 和降水 P 的函数:

$$S_0 = S(T, P) \quad (1)$$

$$V_0 = (T, P) \quad (2)$$

从理论上讲, 由上述两个方程联立求解可得出冰川达到某一规模的气温和降水量。根据古冰川遗迹能够获得较准确的冰川面积, 并可大约估算冰川体积, 但其准确性较差, 加之对冰川运动规律认识的不足, 式 (2) 给出的解准确性较差。这样, 由式 (1) 仅能求解出冰川达到某一规模时对应降水和气温的各种可能的组合, 如果再依据冰川平衡线高度和冰川体积综合分析, 便可得出相应的气温和降水。

由于假设冰川规模为稳定时的冰川规模, 因而所得出的气温和降水亦是一定时段的平均值。从未次冰盛期冰川终碛垄的存在表明, 当时的冰川处于稳定状态, 因此假设是合理的。

1.1 冰川动力模型

取冰川主流线为 x 轴, 则冰川沿主流线的一维连续性方程为:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = - \frac{\partial Q}{\partial x} + BW \quad (3)$$

式中: t 为时间 S 为垂直于流线方向的冰川横断面面积; Q 为通过冰川横断面的冰通量; B 为单位时间内的物质平衡值; W 为冰川表面宽度。冰通量 Q 可表示为:

$$Q = \bar{U} \cdot S \quad (4)$$

式中: \bar{U} 为冰川横断面平均流速。

根据乌鲁木齐河源 1 号冰川运动机理的研究 (Huang Maohuan, 1992), 1 号冰川运动以冰川冰变形为主, 冰川横断面平均流速可简单表示为 (Hulton *et al*, 1994):

$$\bar{U} = FH \tau_b^2 \quad (5)$$

式中: F 为冰川流动参数与断面平均流速折算系数的一个综合参数; H 为冰川厚度; τ_b 为底部剪切应力, 为:

$$\tau_b = - \rho g H \sin \alpha \quad (6)$$

式中: α 为冰面坡度, 当 α 较小时, $\sin \alpha \approx \alpha = dZ/dx$, 其中: Z 为冰面高程, 可依据冰床高度 Z_0 和冰川厚度计算, 冰床高度 Z_0 取冰川主流线上的冰床高度, 可直接在地形图上判读, 即:

$$Z = Z_0 + H \quad (7)$$

式 (5) 和 (6) 是对无限宽冰川并假设冰体遵循塑性流理论, 因而冰川底部理论上应达到其屈服应力, 一般在 50~150 kPa。对于山谷冰川, 式 (6) 应考虑断面形态的影响 (佩特森, 1987)。流动参数主要与冰温、冰晶大小和取向、杂质含量等因素有关, 由于在试验中测定的 F 值变化很大 (佩特森, 1987), 一般在模型计算中均取一定常数 (Oerlemans, 1988; Hulton *et al*, 1994)。本文将冰川流动参数和断面平均流速折算系数作为

一个综合参数考虑,其值是根据乌鲁木齐河源 1 号冰川模拟计算进行率定的, F 值取 $1.5 \times 10^{-19} \text{N}^{-3} \text{m}^6 \text{月}^{-1}$ 。

1.2 冰川物质平衡

在冰川动力学模型中物质平衡 B 是连接冰川与气候的重要环节,考虑到古气候条件与现代气候条件不同,冰面消融是依据全球范围内的 77 条冰川平衡线高度处夏季平均气温 T_s 与年降水量 P_{ELA} 资料 (Ohmura et al, 1992; 赖祖铭等, 1990) 得出的统计关系计算的,统计结果示于图 1。

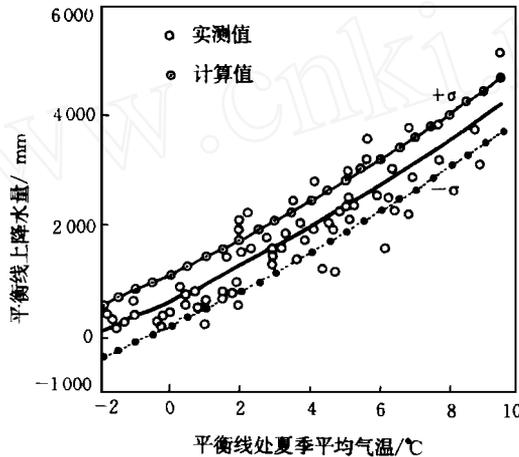


图 1 平衡线处夏季平均气温和年降水量的关系

Fig. 1 Relationship between precipitation and Summer air temperature at the KEA

$$P_{ELA} = 677 + 298T_s + 7.9T_s^2 \quad (8)$$

上式样本数 n 为 77, 相关系数 R 为 0.90, 统计的标准差 σ 为 465。

在平衡线处年消融量可近似等于年降水量,若考虑冰和雪消融的差异性,可将式 (8) 的统计规律应用到冰川的不同断面,根据冰川不同断面处的夏季平均气温和年降雪量计算相应的物质平衡量。即:

$$B = \begin{cases} P_s [677 + 298T_s(Z) + 7.9T_s^2(Z)] & \text{积累区} \\ [677 + 298T_s(Z) + 7.9T_s^2(Z) - P_s]K_i & \text{消融区} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_s 为年降雪量,可依据月平均气温和月降水量估计; $T_s(Z)$ 为不同高度 Z 处的夏季月平均气温; K_i 为冰雪消融比。

式 (8) 的剩余标准差 σ 为 465mm, 此值偏大,其原因在于平衡线高度处夏季气温与年降水量的关系还受太阳辐射的影响 (Ohmura et al, 1992), 因而对不同地区应作适当修正。对某一高度的冰川物质平衡 B 可依据相应高度的夏季气温及对应的降水量由式 (9) 得出, 以此作为冰川动力学模型的输入。

对一维冰川动力模型,无法计算冰川宽度,只能取实际的冰川宽度。对于一般的山

谷冰川,可直接由地形图读取冰川沿主流线的宽度;对于较复杂的复式山谷冰川,采用一种简化方式,依据冰川物质平衡主要随高度变化的特点,将复式冰川概化成一条具有相同面积沿高度分布的冰川,而冰川主流线仍取实际冰川主流线,这一简化在模型计算中对冰川的响应过程可能产生较大的影响,而对冰川平衡态规模的影响不大。由冰川的面积高度分布函数和冰川沿主流线的高度变化可计算出冰川沿主流线的宽度值。由于假设冰川宽度不随时间变化,在冰川变化较小时冰川宽度的变化可能不大,引起的误差较小;而冰川变化幅度太大时,取定宽度可能会引起较大的误差。

在式(3)~(9)中,冰川横断面假设为抛物线型,夏季月平均气温和年降水量作为模型的输入,将式(4)~(7)和(9)代入式(3),用有限差分法求解出冰川厚度和长度,进一步估算出冰川面积和体积。由式(9)结合冰川面积高度分布可得出相应的物质平衡和平衡线高度。

2 末次冰盛期冰川规模

乌鲁木齐河源大西沟,源头海拔4418 m,有现代冰川12条,总面积达8.75 km²,现代雪线高度在海拔4050 m左右。河源区大西沟及西侧支沟末次冰盛期(LGM)(即望峰冰盛期)的堆积及侵蚀地貌普遍保存完好,终碛垄形态明显。据已有的研究,末次冰盛期在18~15 ka BP之间。当时的冰川面积约41.8 km²,冰川末端高度3000 m,由现代冰川面积-平均厚度关系推算,厚度130 m,冰储量约5.436 km³,平衡线的现代海拔为3680~3730 m,秦大河等(1984)估计为3620 m),比现代雪线低约320~370 m,此值未考虑末次冰盛期后的构造抬升影响,显然偏低,但是构造上升量的正确推算是很困难的,不能作为计算中的输入值考虑。

3 模拟结果

本文通过模型计算出各种气候条件下冰川达到的稳定规模(长度、面积和体积)以及相应的物质平衡和平衡线高度,最后根据末次冰盛期冰川面积反算出为维持相应规模冰川所需的各种可能的气温和降水组合条件,在此基础上结合平衡线高度确定出相应的气温和降水。为方便,以下的气温和降水条件均是相对于现代气候条件而言的。

3.1 模型的输入——气温和降水

以表征气候条件的两个主要参量——气温和降水作为模型的输入。气温以大西沟气象站多年平均气温为基准,气温梯度由大西沟气象站和1号冰川下游的1号水文点1985~1993年的月平均气温推算,夏季平均气温梯度在0.65~0.89 /100 m之间,其平均值为0.75 /100 m。据此梯度推算出现代气候条件下的物质平衡沿高度的分布和平衡线高度,将计算的冰川平衡线高度与现代冰川实测平衡线高度相对比,计算值偏高。这表

明式 (8) 应用到具体冰川会有一定误差, 为此, 以现代 1 号冰川实测的平衡线高度为基准, 对式 (8) 作一适当修正, 使计算和实测的平衡线高度相一致。经率定式 (8) 修正为:

$$P_{ELA} = (677 + 298T_s + 7.9T_s^2)/1.15 \quad (10)$$

降水随高度有一定变化, 考虑到过去不同气候条件下降水随高度的变化可能不同, 本文以现代冰川区的平均降水作为模型的输入。降水是以大西沟气象站多年平均降水量为基准, 按杨大庆等 (1988) 的研究进行降水修正和降水梯度推算, 冰川区平均降水约为 650 mm。冰雪消融比 K_i 取 1.56 (王文浚等, 1965)。

3.2 敏感性分析

本模型除估算消融强度的敏感性外, 还估算了另外两个主要参数, 即气温梯度和冰流动参数 F 。下面将分别讨论计算结果对两个参数的敏感性。

(1) 夏季气温梯度

从图 2a 可以看出, 气温梯度的影响随着温度变化幅度的增大而减小。气温变幅在 1 时, 两者引起的气温差值在 0.3 左右, 变幅约在 -5 时, 引起的差值则不到 0.1。因此对末次冰盛期气候条件的估算, 气温梯度选取的大小引起的误差较小, 主要是因为基准气象站恰好处在末次冰盛期冰川的中部。

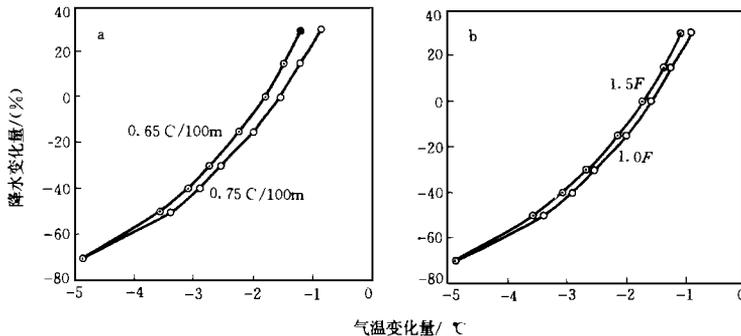


图 2 由末次冰盛期冰川面积估算的当时可能的气候条件 (相对现代气候)

a 不同夏季气温梯度; b 不同 F 值

Fig. 2 Possible climatic conditions inferred from glacierized area in the Last Glacial Maximum

(2) 冰流动参数

冰流动参数 F 是冰川动力学最主要的参数, 它的变化主要取决于冰体温度, 冰温越高, 冰流动性越大, F 值也就越大。本文 F 值的选取是依据乌鲁木齐河源区现代 1 号冰川厚度和面积选取的。图 2b 表明, F 值的大小对气温和降水的估算结果影响较小。原因在于 F 值的大小主要影响冰川对气候变化的响应过程和达到平衡时的冰川体积, 而对平衡时的冰川面积不产生直接影响。这由式 (1) 可以得到很好的解释, 若冰川达到稳定状态, 则式 (1) 变为:

$$\frac{dQ}{dx} = BW \quad (11)$$

两边对 x 积分, 由于冰川达到稳定时顶端和末端冰通量 Q 均为零, 即:

$$\int_0^L BW dx = 0 \quad (12)$$

式 (12) 表明, 稳定时的冰川长度 L (相应面积) 只取决于冰川物质平衡。由图 3 得出, 不同 F 值对达到稳定时的冰川体

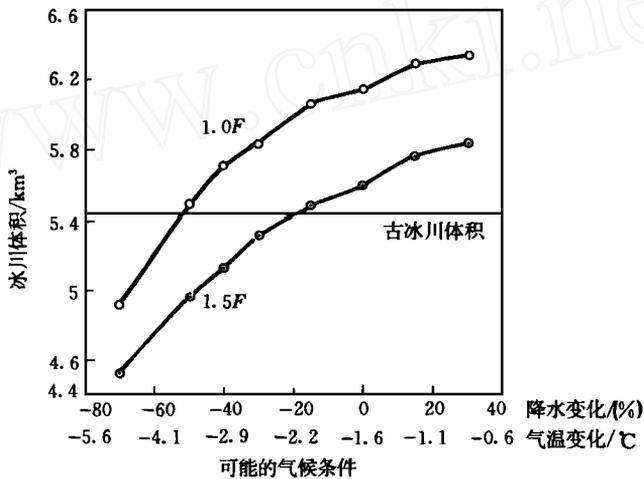


图 3 冰川达到末次冰盛期规模相对应的各种气候条件 (相对现代气候) 下的冰川体积

Fig 3 Glacier volumes under different climatic conditions in the Last Glacial Maximum

积影响较大, 在由冰川面积推算结果的基础上进一步根据冰川体积推算当时的降水和气温, 结果在 $1.0F$ 和 $1.5F$ 条件下, 降水则少于目前的 50% 和 80%, 相应的夏季气温比现在低 3.8 和 2.0 左右。但是, F 值变化规律尚未完全认识清楚, 冰川体积的准确估算也较为困难, 因此用冰川体积反演气候条件可能会有较大的误差, 其结果只供参考。

(3) 冰川平衡线

图 4 表明, 对于不同的降水条件 (相应气温亦不同), 同等面积规模冰川的平衡线高度随降水的增大而升高, 这与冰川积累区和消融区比值 (AAR 值) 随降水增大而减小的规律相一致。根据李世杰估算的末次冰盛期的雪线高度为 $3680 \sim 3730 \text{ m}$, 与图 4 中各种可能气温和降水条件下的冰川平衡线高度相比, 可以粗略推断当时的夏季气温比现今低 4.8 左右, 相应降水约为现代的 30%。另外, 雪线处的冰床高度在 $3400 \sim 3500 \text{ m}$ 之间, 这一结果与由古冰川遗迹确定的冰床高度即 $3400 \sim 3550 \text{ m}$ 基本一致 (秦大河等, 1984)。

在由末次冰盛期冰川面积推算结果 (图 2b) 基础上, 结合冰川平衡线确定末次冰盛期乌鲁木齐河源区的夏季气温比现代低 4.8 左右, 降水只有目前的 30% 左右。

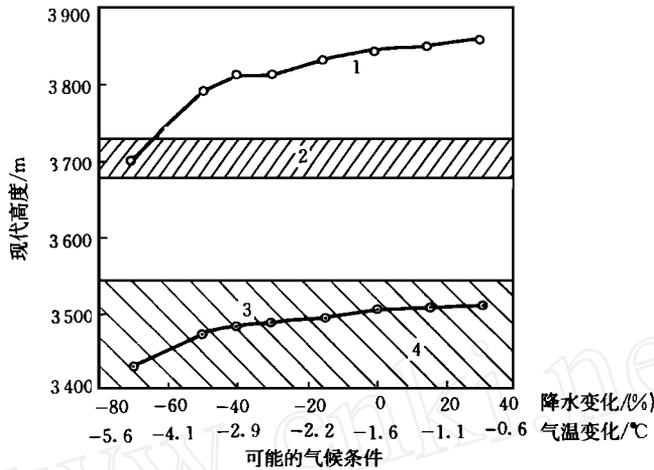


图 4 末次冰盛期冰川的平衡线高度与对应的冰床高度

1 2 由冰川动力方法和古冰川遗迹推算的冰川平衡线;

3 4 由冰川动力方法和古冰川遗迹推算的平衡线处冰床高度

Fig 4 Altitudes of the equilibrium line and relevant ice bed in the Last Glacial Maximum

4 结论与讨论

依据末次冰盛期冰川面积计算结果, 若末次冰盛期夏季气温低于现代气温 1.6 以上, 则当时的降水比现代少; 若低 4 , 则降水不到目前的一半。这一结果与根据昆仑山湖泊变化研究所得结论一致。同时, 结合冰川平衡线高度分析, 当时的夏季气温比现代低 4.8 左右, 降水约为现代的 30%。据乌鲁木齐河源区沉积物中不同粒径石英和长石含量比值确定的末次冰盛期多年冻土下界高度比现代低 900~ 1000 m (赵林等, 1993), 进一步推断当时的年平均气温比现代低 5.4~ 6 , 平均为 5.7 。上述两种方法得到的结果虽有差异, 但却反映出末次冰盛期至今, 夏季升温幅度小于年平均温度这一公认的事实。据此粗略估算, 末次冰盛期夏季气温比年平均气温的升温幅度可能小 0.6~ 1.2 。

上述两种方法推算的末次冰盛期气温值小于其它方法推测的古气温值, 一般认为末次冰盛期年平均气温比现今低 6 左右 (施雅风等, 1990), 据最新的古里雅冰芯 $\delta^{18}O$ 资料分析, 末次冰盛期最冷的 2000 年的年平均气温比目前低 6.2 , 夏季气温与年平均气温的升温幅度差若取 0.6 , 相应的夏季气温比现今低 5.6 左右, 与上述冰川学和冻土学方法推算的结果相比, 气温相差 0.8 。造成这一差别的原因主要可能是上述冰川学方法和冻土学方法推算末次冰盛期气候条件时均未考虑构造抬升对气温降低值的影响。由此可根据气温的这一差值粗略推算构造抬升量。若取气温梯度为 0.6 /m 推算, 则末次冰盛期至今这一地区的构造抬升量约为 130 m, 这一结果与根据乌鲁木齐河河谷下切深度估算的乌鲁木齐河源区末次冰盛期至今的构造抬升量为 120~ 140 m 的结果相一致。

本文冰川物质平衡估算和冰川动力模型的率定均是根据现代冰川资料进行的, 特别是由于运动规律的复杂多变性, 在冰川动力模型中作了一些假设, 将所有这些在现代条

件下得出的结论和假设应用到我们了解极少的地质时期,这本身就是一种探索性的工作,因此文中可能有很多不妥之处,有待进一步探讨。

致谢:中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室计算中心为本文的计算提供了方便,特此致谢。

参 考 文 献

- 王文浚,莫承略等 1965 冰川消融及其对乌鲁木齐河的补给作用 见:天山乌鲁木齐冰川与水文研究 北京:科学出版社, 88~ 97.
- 杨大庆等 1988 天山乌鲁木齐河源降水观测误差分析及修正 冰川冻土, 10 (4): 384~ 399.
- 佩特森著,张祥松等译 1987 冰川物理学 北京:科学出版社
- 赵林,邱国庆,金会军 1993 天山乌鲁木齐河源末次冰期以来气候变化与多年冻土的形成 冰川冻土, 15 (1): 103 ~ 109.
- 施雅风,郑本兴,李世杰 1990 青藏高原的末次冰期与最大冰期 冰川冻土, 12 (1): 1~ 15.
- 秦大河,冯兆东,李吉均 1984 天山乌鲁木齐河源地区主玉木冰期以来冰川变化和发育环境的研究 冰川冻土, 6 (3): 51~ 61.
- 赖祖铭,黄茂桓 1990 中国冰川的数值分类 见:第四届全国冰川冻土学术会议论文选集 北京:科学出版社, 25 ~ 33.
- Huang M aohuan 1992 The movement mechanism s of the U rumqi Glacier No. 1, Tian Shan M ts , China Annals of Glaciology, 16: 39~ 44.
- Hulton N and D Sugder 1994 Glacier modeling and the climate of patagonia during the Last Glacial Maximum. Quaternary Research, 42: 1~ 19.
- Ohmura A and P Kasser 1992 Climate at the equilibrium line of glaciers Journal of Glaciology, 38 (130): 397~ 411.
- Oerlemans J. 1988 Simulation of historic glacier variations with a simple climatic- glacier model Journal of Glaciology, 34 (118): 333~ 341.

Investigation of Climatic Conditions by the Glacier Extension in the Last Glacier Maximum

Ye Baisheng, Li Shijie and Shi Yafeng

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, 730000)

Abstract

This paper presents the estimated climatic scenarios in the Last Glacial Maximum (LGM) using glacier dynamics method, based on glacial vestiges well preserved in the head water of the Urumqi River and the relationship between glacier mass balance and climate in the contemporary climatic scenarios. Based on calculations of glacier areas in the LGM, it is estimated that precipitation in the LGM was less than contemporary one if summer air temperature was 1.6 lower than that at present. If 4 lower, precipitation in the LGM was

less than half of current. By combining of the *ELA* and glacier volume in the LGM, it is determined that summer air temperature in the head water of the Urumqi River in the LGM was 4.8 °C lower than the contemporary temperature and the precipitation in that time approximately accounted for 30% of the contemporary one. However, other paleoclimatic studies demonstrate that the temperature in the LGM was 5.6 °C lower than that at present. The difference, 0.8 °C, is attributed to that ground surface uplift was not figured by the glacier dynamics method. As a result, it is estimated that ground surface uplift reached 130 m since the LGM in the head water of the Urumqi River. It is consistent with the result of 120~140 m obtained from the depth of the valley downcut in the Urumqi River.

Key words: Last Glacial Maximum, glacier, climate

第一作者简介: 叶佰生, 男, 31岁, 副研究员, 1985年毕业于清华大学水利工程系水资源工程专业, 1994年获中国科学院兰州冰川冻土研究所理学博士学位。现从事寒区水文学研究。

评《天山积雪与雪崩》

刘 潮 海

(中国科学院兰州冰川冻土研究所, 730000)

由中国科学院兰州冰川冻土研究所谢自楚研究员和哈萨克斯坦国家科学院地理研究所 . B. 谢维尔斯基院士等主编的《天山积雪与雪崩》一书, 于1996年6月由湖南师范大学出版社正式出版。

该书首次将跨国的天山作为统一的自然地理单元, 应用统一的分析和计算方法, 系统总结了中、哈两国多年来的观测研究成果, 是目前积雪与雪崩研究较为系统, 资料信息量大, 内容丰富, 横跨范围较大的区域性专著。

积雪既是山区宝贵的水资源, 又是在某些地段形成雪崩和风吹雪的物质来源。因此, 观测研究积雪及雪崩的形成、演化和分布规律, 以及定量评估积雪水资源的数量和变化, 对于干旱山区居民的生活用水和该区工农业生产的持续发展具有重要的科学意义和实用价值。

该书把冰川学研究的若干方法应用于山区积雪资源的评估, 提出了导出雪线的概念和估算在此高度上积雪量的新方法, 从而可以把冰川、积雪与气候要素密切相联, 为大范围评估山区冰雪水资源的变化及其气候响应提供了科学依据; 系统论述了坡度、坡向、植被性状对积雪量和稳定积雪日数的影响, 找出了它们之间的定量关系, 是有效解决诸如雪崩评估、径流预报和雪崩工程防治设计等应用问题的必要条件; 还对雪崩状况特征、雪崩危险区的分布规律等作了充分的论述和雪崩参数较精确的计算, 为雪崩防治和其工程设计提供了科学依据。

该书资料丰富而翔实, 计算方法新颖, 图文并茂, 具有理论和应用性强等特点。可供从事地质、地理、水文、气象、冰川、冻土和环境科学的科研、教学工作参考, 也是从事山区经济开发和建设的工程技术人员及各级规划、设计部门不可缺少的参考书。