

基于地理信息系统的太阳直接辐射与冰川物质平衡的关系^①

丁永建¹ 李新¹ 程国栋¹ Martin Hoelzle² Wilfried Haeberli²

(1 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 兰州, 730000; 2 瑞士理工学院水力、水文和冰川实验室)

摘 要 基于冰川微地形对冰川物质平衡重要影响的认识, 在考虑朝向、坡度、地形遮蔽等因素的条件下, 以地理信息系统为手段, 对乌鲁木齐河源 1 号冰川冰面太阳可能直接辐射进行了理论计算. 在此基础上, 建立了计算冰面任意一点物质平衡的 $B = f(T, R)$ (气温-辐射) 模型. 比较了该模型与 $B = f(T)$ (气温) 模型、 $B = f(P, T)$ (降水-气温) 模型及 $B = f(Q)$ (能量平衡) 模型之间的优缺点, 表明该模型具有物理意义明确、计算精度较高、参数易于获得等优点, 从而为计算冰川物质平衡提供了新的途径.

关键词 地理信息系统 太阳可能直接辐射 冰面点物质平衡

中图法分类号 P343.7

第一作者简介 丁永建, 男, 39 岁, 研究员, 1982 年毕业于河北地质学院水工系. 主要从事冰川与寒区环境研究.

1 引言

冰雪表面热量交换与冰川物质平衡密切相关. 我国西部山地大多数冰川消融的主要来源是太阳辐射, 根据在不同冰川上、不同年份短期观测的数据估算 (白重瑗, 1988), 其供热比率占总收入热量的 60.5% ~ 92.1%. 而对于干冷气候区的冰川来说, 太阳辐射在总收入热量中的贡献可达到 90.0% ~ 93.0% (白重瑗, 1989). 在收入的热量中, 80% 以上消耗于冰雪消融, 可见太阳辐射是研究物质平衡最重要的热量指标. 因此, 利用能量平衡是研究物质平衡的重要途径之一 (Oerlemans, 1993). 然而, 由于辐射观测上的限制, 尤其是在冰面上布设适量的辐射观测网点以达到通过辐射精确计算冰川消融的目的就更加困难. 这是从冰面热量平衡的角度来看辐射与冰川物质平衡的联系. 另一方面, 在具有冰川物质平衡实测资料的冰川上, 如何建立物质平衡与热量指标之间的关系, 以便通过这种关系来推测无资料地区冰川物质平衡状况, 亦是目前条件下估算物质平衡所关注的课题. 基于物质平衡与气

候要素之间的密切关系, 通常多考虑影响冰川物质平衡的重要气候参数——气温和降水, 建立相关关系, 即所谓的 $P-T$ 模式. 为了摆脱降水变率大和随高度变化稳定性差的影响, 更简捷而有效的办法就是直接用物质平衡和气温之间的关系来估算物质平衡 (Kotlyakov *et al.*, 1982; 丁永建等, 1991). 这些方法的优缺点显而易见. 本文以乌鲁木齐河源 1 号冰川 (以下简称 1 号冰川) 为研究对象, 基于地理信息系统 (Geographic information system, 简称 GIS), 考虑冰面坡度、坡向、地形遮蔽等微地形因素对太阳辐射的影响, 通过对冰面可能直接辐射的计算, 试图建立物质平衡与理论辐射和气温的关系, 从而获得估算多年平均物质平衡的方法.

2 资料分析计算及处理

2.1 冰川物质平衡

根据 1 号冰川 1982/1983 年度以来冰面物质平衡观测网点资料统计, 东、西支冰川各有 36 个花杆观测点. 剔除若干倒伏、观测数据缺失较多的测点, 最后共确定西支冰川 8 排 31 个点、东支冰

^① 本文于 1997-11-6 收到/属中国科学院“中国冰冻圈动态及变化研究”特别支持项目和国家人事部留学回国工作择优基金资助项目.

表 1 1 号冰川平均观测点上 (1982~ 1996 年) 的物质平衡 (B_j)、气温 (T_s) (5~ 9 月) 及地理位置

Table 1 The locations of the mean measured points in the Glacier No. 1, together with their specific mass balance (B_j) and air temperature (T_s) (May~ September)

测点	B_j /mm	经度/ $^{\circ}$	纬度/ $^{\circ}$	海拔/m	T_s / $^{\circ}\text{C}$	测点	B_j /mm	经度/ $^{\circ}$	纬度/ $^{\circ}$	海拔/m	T_s / $^{\circ}\text{C}$
A	- 2 806	86. 81361	34. 11666	3 832. 6	0. 3	A'	- 2 353	86. 81750	34. 11500	3 768. 4	0. 7
B	- 2 144	86. 81222	34. 11778	3 869. 8	0. 0	B'	- 1 611	86. 81583	34. 11556	3 800. 1	0. 5
C	- 1 537	86. 81139	34. 11806	3 889. 1	- 0. 1	C'+	- 1 196	86. 81472	34. 11639	3 810. 7	0. 4
D	- 1 127	86. 80861	34. 11833	3 962. 4	- 0. 6	C'	- 1 161	86. 81389	34. 11472	3 843. 7	0. 2
E	- 736	86. 80694	34. 11806	3 995. 5	- 0. 8	D'	- 670	86. 81139	34. 11306	3 898. 6	- 0. 2
F	- 322	86. 80500	34. 11694	4 030. 1	- 1. 1	E'	- 265	86. 80889	34. 11000	3 933. 7	- 0. 4
G	- 232	86. 80278	34. 11667	4 063. 6	- 1. 3	F'	- 117	86. 80778	34. 10833	3 968. 9	- 0. 7
H	- 159	86. 80111	34. 11667	4 077. 4	- 1. 4	G'	- 191	86. 80694	34. 10639	4 006. 2	- 0. 9
						H'	18	86. 80556	34. 10417	4 055. 7	- 1. 3

川9排35个点为在统计年限内有效观测点. 对这些测点上的物质平衡值在垂直冰川流线方向属同一排的进行算术平均, 其位置亦由各点地理位置坐标的平均值确定. 由此共获得西支8个平均测点, 东支9个平均测点. 各平均观测点上物质平衡值(B_j)及相应位置如表1所示. 这里强调并给出了测点空间位置是为了便于利用GIS计算各测点太阳辐射.

2.2 冰面各观测点消融季节的平均气温

消融季节(5~9月)的气温对冰川消融起着控制作用. 各平均测点上消融季平均气温由小渠子气象站、大西沟气象站和1号冰川水文站1982年以来观测资料确定(表2). 可以看出, 3站之间在消融季有着稳定的气温梯度. 根据气温梯度推算的各测点消融季平均气温如表1所示.

表 2 各站 5~ 9 月平均气温及各站间气温梯度

Table 2 Mean air temperature of various stations, together with their temperature gradient (May~ September)

站 名	气温/ $^{\circ}\text{C}$	海拔/m	海拔间隔	气温梯度/ $^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$
小渠子	11. 7	2 160	小渠子~ 大西沟	0. 68
大西沟	2. 3	3 539	大西沟~ 水文站	0. 68
1 号冰川	1. 2	3 700	小渠子~ 水文站	0. 68
平 均				0. 68

2.3 冰面各测点最大可能直接辐射的计算

晴天地表接受到的太阳辐射能量为:

$$I_p = \int_r^s I_0 \cos(n, s) dt \tag{1}$$

式中: I_p 为地面可能接受到的太阳辐射 (Potential direct solar radiation); I_0 为太阳入射辐射 (The incoming radiation from the sun); n 为与地面状况有关的矢量; s 为与太阳有关的矢量; t_r 、 t_s 分别为日出和日落时间.

傅抱璞 (1983) 对上述各参数的计算进行过开创性的工作. 但限于当时的条件, 对某些算法无法求解, 只能借助于图解法, 且对于数据量较大时难于实现. 最近李新^①在此基础上就利用地理信息系统(GIS)计算各参数进行了有益的改进和尝试. 本文太阳理论辐射是根据 Funk *et al.* (1992) 模型计算的, 有兴趣者可参阅有关文献, 在此不作详细介绍. 需要指出的是, 山区太阳辐射的空间分布计算必须依赖于GIS, 这不仅是因为模型所需的地形

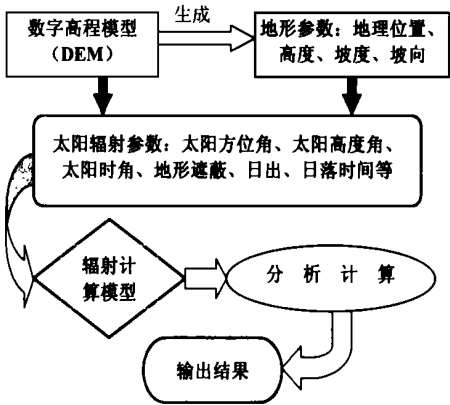


图 1 基于 GIS 的辐射计算示意图
Fig. 1 Scheme of computing potential direct solar radiation based on GIS

①李新, 1998. 冰冻圈信息系统及其应用研究. 博士论文.
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

参数, 如海拔、坡向、坡度等须借助于数字高程模型 (DEM) 生成, 而且太阳辐射方程中的各项参数, 如太阳入射角、日出和日落时间等也需要利用数字高程模型计算. I_p 的计算过程如图 1 所示. 计算的冰面各平均测点消融季 (6~ 10 月) 平均可能直接太阳辐射列于表 3.

表 3 基于 GIS 计算的冰面消融季平均直接辐射

Table 3 The computed potential direct solar radiation in the ablation period (June~ October)

测点	平均直接辐射 / ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	测点	平均直接辐射 / ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
A	26.450	A'	27.175
B	27.850	B'	26.825
C	27.725	C'	25.925
D	26.625	C'+	26.200
E	26.525	D'	25.675
F	26.025	E'	24.450
G	25.600	F'	25.000
H	25.275	G'	24.350
		H'	24.350

3 物质平衡与直接辐射和气温之间的关系

图 2 为基于 GIS 计算的 1 号冰川冰面可能直接太阳辐射和气温与物质平衡的关系. 为了对比, 还给出了另一类型冰川——瑞士格列斯 (Gries) 冰川物质平衡与可能直接太阳辐射和气温的相互关系.

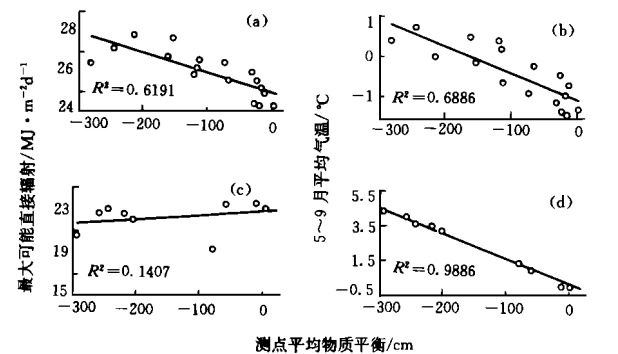


图 2 可能直接太阳辐射和气温与物质平衡的关系
a、b. 中国乌鲁木齐河源 1 号冰川;
c、d. 瑞士阿尔卑斯山格列斯 (Gries) 冰川
Fig. 2 The relationship between potential direct radiation and air temperature and mass balance

在过去的研究中, 一般均有这样的体会, 即认为 1 号冰川物质平衡与气温之间难于建立起很好的

相关关系. 这一方面是与地形因素的影响有关, 另一方面由于乌鲁木齐河源地处干燥内陆地区, 云雾对太阳直接辐射的影响要比海洋性气候区内小得多, 太阳直接辐射对冰川消融影响较大. 但从另一个角度来看, 乌鲁木齐河源区降水又集中在辐射强烈的夏季, 反过来又削弱了直接辐射对冰面消融的作用. 这样综合作用的结果是导致了冰川物质平衡既受太阳直接辐射制约, 又与热量平衡的其它组份相关. 基于这样的基本思路, 可把影响冰川物质平衡的热量平衡要素分解为两个主要分量: 一是太阳辐射, 可用可能直接太阳辐射来反映; 另一个是综合热量指标, 可用气温来表示. 在图 2 中我们已看到, 1 号冰川物质平衡确实与可能直接辐射 (图 2a) 和气温 (图 2b) 均存在着一定联系, 尽管两者的相关程度均可通过显著性检验, 但其相关系数均未达到令人满意的结果.

从图 2c、d 中我们亦看到阿尔卑斯山地冰川与 1 号冰川的结果有着较大的差别. 格列斯冰川物质平衡与理论计算的太阳直接辐射几乎没有直接的联系, 而与气温却显示出十分密切的关系. 这种差异反映了气候差别对冰川物质平衡的影响. 阿尔卑斯山地处欧洲大陆南部, 不仅具有地中海气候的特征, 而且还受大西洋季风的影响, 年降水较为丰富且分布较均匀. 尤其是阿尔卑斯山区, 年降水量十分丰富. 格列斯冰川区 (平均海拔 2 820 m) 平均年降水量为 1 960~ 2 000 mm, 而在可拉瑞登 (Clariden) 冰川区海拔 2 710 m 处测量到的 5~ 9 月降水量可达 610 mm 以上 (Aellen, 1994). 由于四季降水丰富, 云雾天气较多, 必然削弱太阳直接辐射对冰川的直接影响. 这是阿尔卑斯山区太阳直接辐射与物质平衡关系不明显的主要原因之一.

由此可见, 在受大陆性气候影响的地区和与受海洋性气候影响的地区, 热量组份对冰川物质平衡的贡献是有较大差别的. 在大陆性气候区内, 仅用气温作为估算冰川物质平衡的热量指标误差较大. 通过太阳直接辐射的理论计算, 可为估算平均物质平衡提供可靠的热量指标. 为了提高估算冰川物质平衡的精度, 建立了 1 号冰川冰面点物质平衡 (b_j) 与太阳直接辐射和气温之间的关系:

$$b_j = 844 - 71.3T_{5\sim 9} - 37.3R_d \quad (2)$$

式中: R_d 为基于 GIS 计算的冰面任意点太阳可能直接辐射; $T_{5\sim 9}$ 为根据气温梯度 ($0.68\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) 推算的冰面 5~ 9 月平均气温. 上式复相关系数

可达 0.9121 ($R^2 = 0.832$), 在 0.01 水平上回归效果显著. 图 3 为 1 号冰川实测与计算的冰面点物质平衡之间的比较. 可以看出利用上式计算的物质平衡结果还是令人满意的. 通过上述途径建立的冰川物质平衡的方程尽管仍然是经验性的, 但其出发点是热量平衡为基础, 而且模型中各参数有其明确的物理意义.

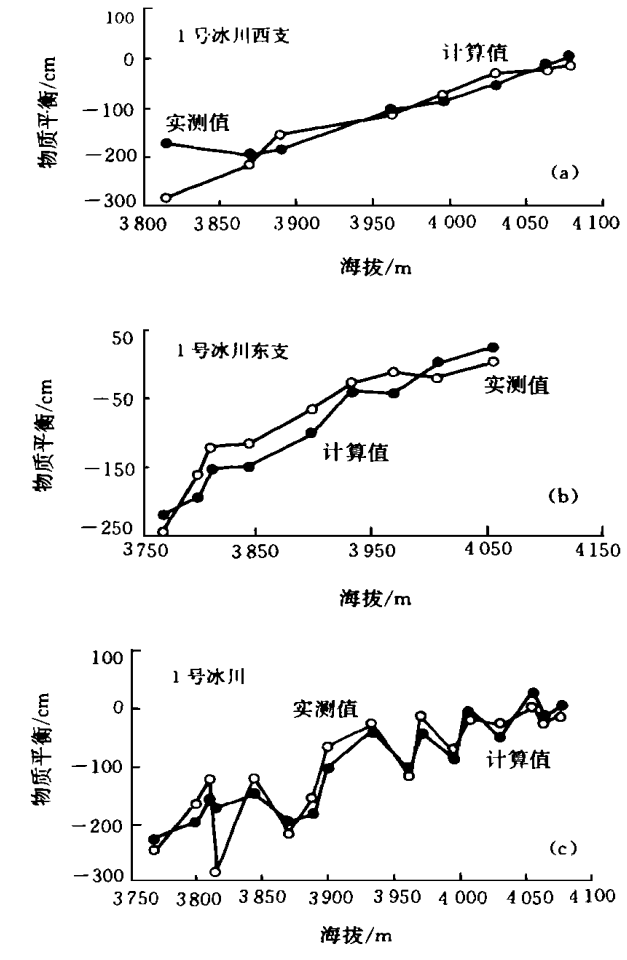


图 3 乌鲁木齐河流域 1 号冰川点物质平衡
实测值与计算值之比较

Fig. 3 Comparison between measured and calculated mass balances
for the Glacier No. 1 in the source of the Urumqi River

4 分析与讨论

目前估算冰川物质平衡的方法归纳起来有以下几种: 1) 利用夏季气温与冰川消融之间的关系估算, 可简单的表示为 $A = f(T)$, 著名的 Krenke 公式就属此类. 这种方法较简单、易操作, 但精度较差. 2) 建立物质平衡与降水和气温的关系进行估算, 即所谓的 $P-T$ 模式, 可表示为 $B = f(P, T)$. 该方法的基础是考虑了物质平衡的两大基本

要素——积累和消融, 具有明确的物理概念, 也提高了对物质平衡的估算精度. Llibouty (1974) 对此有过较系统的研究. 但该方法适用性较差, 只能在降水和气温同时观测的地区应用, 而大多数冰川区很难获得这样的观测资料, 尤其是降水资料. 3) 用度日因子法估算, 可表示为 $A = f(\sum T)$. 该方法是通过正积温与冰川消融相关联, 但要估计物质平衡还需要推算冰面降水量. 4) 能量平衡法估算, 可表示为 $B = f(Q)$. 这种方法概念清晰, 物理意义明确, 但所需参数较多, 且难以获得. 若要获得一条冰川较精确的能量平衡参数, 需要在冰面布设适量的能量平衡观测点, 在目前条件下这几乎是很难做到的. Oerlemans (1993) 利用能量平衡模型曾对全球冰川物质平衡进行过研究, 但该模型很难应用于某一地区或某一条冰川上.

从上面的讨论我们看到, 各种方法各有利弊. 鉴于此, 本研究以热量平衡原理为基础, 基于冰面消融的主要能量来自于太阳辐射这一基本事实 (白重瑗, 1989), 认为太阳直接辐射在太阳总辐射中占据主导地位, 因而到达地面的可能太阳直接辐射与冰川消融应具有密切关系. 如果这样的认识是正确的话, 研究结果应该具有一定的物理意义和可信度. 从实际结果来看, 尽管最后给出的模型仍然是统计结果, 但它既摆脱了 $B = f(P, T)$ 模式中降水难于推算的困扰, 又解决了 $A = f(T)$ 模式中精度不高的问题, 而且考虑了能量平衡参数, 从而提高了估算物质平衡的精度, 使得计算物质平衡具有较明确的物理意义, 且便于在不同冰川上应用. 这里我们姑且称这种模式为混合模式, 用 $B = f(T, R)$ 表示. 图 4 给出了用 $B = f(T, R)$ 模型和用 $B = f(T)$ 模型对 1 号冰川冰面各点物质平衡计算和实测值的比较, 可以看出, $B = f(T, R)$ 模型显示出较好的结果. 混合模式的最大优点在于利用它可以推算冰面任意一点物质平衡.

但是, 本研究只能用于估算冰川平均物质平衡, 不能给出物质平衡变化的时间系列. 此外, 由于地面大气层能量交换对地表能量分布起着重要作用, 在计算太阳辐射时只考虑了地理位置、海拔和微地形等因素的影响, 未能考虑大气层内能量的交换. 事实上, 由于大气层内能量交换的复杂性, 目前条件下也无法达到这一目的. 今后研究可考虑几种不同大气条件对太阳直接辐射影响, 从而使计算的直接太阳辐射更接近于实际.

另外, 本研究在推算冰面气温时没有考虑冰面

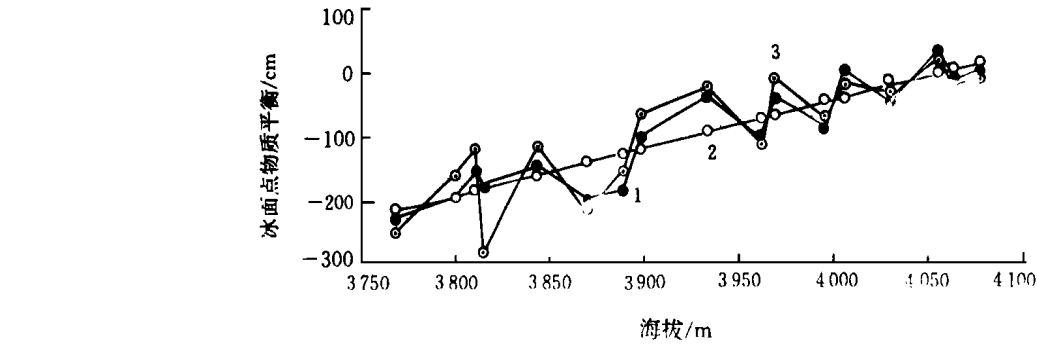


图 4 不同模型计算的冰川点物质平衡与实测值之比较
1. $b = f(T, R)$; 2. $b = f(T)$; 3. 实测值
Fig. 4 Comparison between measured and calculated mass balances from two different models

冷效应 (cooling effect). 主要原因是冰面冷效应的研究还很不成熟, 目前只是在个别冰川上获得几个平均值, 冰面不同位置这种冷效应是否相同, 其沿冰川是否变化等均不清楚. 若使用平均值, 在推求冰面气温时只是在各点增加了某一增量, 对最后统计结果并无实际影响. 所以本研究没有考虑冰面冷效应.

5 结论

本项研究以地理信息系统为手段, 通过对乌鲁木齐河源 1 号冰川冰面太阳可能直接辐射的计算, 建立了冰面点物质平衡与可能直接辐射和气温的关系, 从而提高了估算物质平衡的可靠程度, 它不仅为计算冰川物质平衡提供了新的途径, 而且在研究山区冻土分布、寒区水文等方面均具有很大潜力. 然而, 本项研究中对太阳直接辐射的计算尚需不断完善, 以期获得更好的结果.

致谢: 白重瑗先生对本文提出十分有益的修改

意见, 特致谢忱.

参 考 文 献

丁永建, 谢自楚, 1991. 一种冰川物质平衡的简单表述方法. 冰川冻土, **13** (3): 213~ 218
白重瑗, 1988. 中国冰川的辐射和热量平衡. 中国冰川概论. 北京: 科学出版社, 50~ 51
白重瑗, 1989. 冰川与气候关系的研究. 冰川冻土, **11** (4): 287~ 296
傅抱璞, 1983. 山地气候. 北京: 科学出版社, 1~ 87
Aellen M, 1994. Die Gletscher Der Schweizer Alpen. Jahrbuch Der Gletscherkommission der SANW, 111 und 112, 99~ 113
Funk, M M Hoelzle, 1992. A model of potential direct solar radiation for investigating occurrences of mountain permafrost. Permafrost and Periglacial Processes, vol. 3: 139~ 142
Kotlyakov V M, Krenke A N, 1982. Investigation of the hydrological condition of alpine regions by glaciological method. IAHS, No. 138: 31~ 41
Lliboutry, L. 1974. Multivariate statistical analysis of glacier annual balances. Journal of Glaciology, **13** (69): 371~ 392
Oerlemans, 1993. A model for the surface balance of ice masses, Part I: Alpine glaciers. Zetschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band 27/28, 63~ 83

Potential Direct Solar Radiation Based on GIS and Glacier Mass Balance

DING Yong- Jian¹ LI Xin¹ CHENG Guo- Dong¹ Hoelzle MARTIN² Wilfried HEABERLI²

(1 Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, Lanzhou 730000; 2 Laboratory of Hydraulics,

Hydrology and Glaciology, CH - 8092 Zurich, Switzerland)

Abstract Based on geographic information system (GIS), the potential direct solar radiation in the ice surface of the Glacier No. 1 in the source of the Urumqi River has been computed in consideration of the orientation and slope of the glacier, elevation and topographic shadow. At first, a point specific mass balance is averaged from the row that is perpendicular to main flow line of the glacier. The geographical coordinates at the averaged points are determined by averaged coordinate. Total seventeen points have been got. Then, summer air temperature (May- September) (T_s) at every point is calculated by a gradient of $0.6^\circ\text{C}/100\text{m}$. Finally, the potential direct solar radi-

ation at every point is computed. According to the computing results, a model of specific mass balance, $B = f(T, R)$ (air temperature- radiation) model, has been set up. Using the model, mass balance in any point of the ice surface can be computed. Physic significance and limitation of the model is discussed in detail. In comparing with other models, such as $B = f(T)$, $B = f(P, T)$ (precipitation- air temperature) and $B = f(Q)$ (energy balance), the $B = f(T, R)$ model shows higher accuracy and its parameters are easy to be got. The model provides a new method for estimating glacier mass balance.

Key words geographical information system, potential direct solar radiation, glacier mass balance