

近52 a天山乌鲁木齐河源1号冰川平衡线高度及其与气候变化关系研究

王卫东¹, 张国飞^{2*}, 李忠勤^{2,3}

(1.甘肃省测绘工程院, 兰州 730000; 2.西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070;
3.中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川站, 兰州 730000)

摘要: 论文以天山乌鲁木齐河源1号冰川1958/1959—2009/2010年平衡线高度观测资料为基础, 研究了平衡线高度及其与气候变化的关系。结果表明, 在研究时段内, 平衡线高度变化分为正常波动、缓慢下降、迅速上升三个阶段, 变化范围介于3 948~4 484 m, 多年平均为4 067 m, 总体呈普遍上升趋势, 总计上升了90 m, 且在2009/2010年超过了冰川的上界, 意味着该年度冰川全部处于消融状态。积累区比率作为平衡线高度变化的一个重要指标, 在这一时期内也呈现明显的下降趋势, 下降了约17%。物质平衡与平衡线高度具有显著的负相关性, 物质平衡减小100 mm, 平衡线高度将上升17 m。冰川处于稳定状态时的平衡线高度, 即零平衡高度 ELA_0 为4 018 m。平衡线高度随纯消融量的增加而升高, 纯消融量增加 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$, 平衡线高度上升14 m。平衡线高度对气候变化的敏感性研究表明, 如果夏季平均气温升高 1°C , 则平衡线高度将上升约82 m, 如果年降水量增加100 mm, 则平衡线高度将下降约41 m, 且夏季气温是影响冰川平衡线高度变化的主导气候因素。

关键词: 平衡线高度; 物质平衡; 气候变化; 1号冰川

中图分类号: P343.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2015)01-0124-09

DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.01.011

冰川是气候变化的指示器, 对气候变化的响应十分敏感^[1-3]。自1986年起, 中国西北部以天山中西部为主的地区气候发生了由暖干向暖湿的转型, 西部冰川强烈退缩, 物质亏损严重, 平衡线高度呈上升趋势^[4-6]。根据大西沟气象站的观测资料, 乌鲁木齐河源区的气温、降水自1980年以来总体呈上升趋势, 1986年至今增加更为显著, 2010年的年平均气温比1986年升高了 2.1°C , 夏季平均气温升高了 1.6°C , 降水量比1986年增多了215 mm。乌鲁木齐河源区的暖湿气候条件使得该地区冰川对气候变化的敏感性更为显著。平衡线高度是冰川积累区与消融区的重要分界线, 它与当地气候条件之间存在着密切关系, 是冰川对气候变化响应的一个重要参数^[7-10]。因此, 平衡线高度研究在冰川与气候关系研究方面具有重要意义。

天山乌鲁木齐河源1号冰川(以下简称1号冰川)自1958年建立定位观测以来, 已

收稿日期: 2012-12-10; 修订日期: 2013-04-10。

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(973项目)(2013CBA01801); 冰冻圈国家重点实验室项目(SKLCSS-ZZ-2012-01-01); 国家自然科学基金(41001040, 41161012)。

第一作者简介: 王卫东(1987-), 女, 甘肃兰州人, 硕士, 主要从事地理信息应用及测绘方面的研究。E-mail: wangweidong_lz@126.com

*通信作者简介: 张国飞(1989-), 男, 甘肃临泽人, 硕士, 主要从事冰川物质平衡方面的研究。E-mail: zhangguofei_lz@126.com

成为国际公认的全球重点监测冰川,是世界冰川监测组织(WGMS)设立的全球重点监测的十条参照冰川之一,也是中亚内陆地区的代表性冰川,具有较强的区域代表性。1997年以来,该冰川的消融极为强烈,物质平衡呈大幅度亏损,平衡线高度显著上升,且在2009/2010年达到历史最高,已超出该冰川的上界,主要是由于夏季气温升高所造成的^[3]。截至2010年,1号冰川已有52 a的平衡线高度观测资料,其余大多数冰川的平衡线高度观测资料序列都相对较短,限制了不同区域冰川平衡线高度变化的对比分析与研究^[11-14]。本文基于1号冰川近52 a的平衡线高度观测资料,研究了该冰川平衡线高度及其与气候变化的关系,旨在为其他冰川平衡线高度的研究提供参考。

1 研究区概况及方法

1.1 研究区概况

1号冰川地理位置43°07'N, 86°49'E,地处亚洲中部(图1),位于天山东段天格尔山Ⅱ峰(海拔4 484 m)北坡,乌鲁木齐河源头,是典型的大陆型双冰斗-山谷冰川。自20世纪80年代中期以来,西北地区气候由暖干向暖湿发生了转型^[6,15],冰川物质负平衡持续增加,冰川面积减少,冰川退缩,冰舌末端位置海拔升高,1993年,该冰川东、西支流最终完全分离,形成两条完全独立的冰川体系,东、西海拔分别为3 743~4 267 m和3 845~4 484 m。据中国冰川编目资料(1962年航片成图资料),该冰川编号为5Y730C0029,面积为1.95 km²,长度为2.2 km。2010年该冰川面积为1.645 km²,长度为2 km,较1962年冰川面积减少了0.305 km²,即减少了15.6%,末端退缩了约200 m^[16-17]。

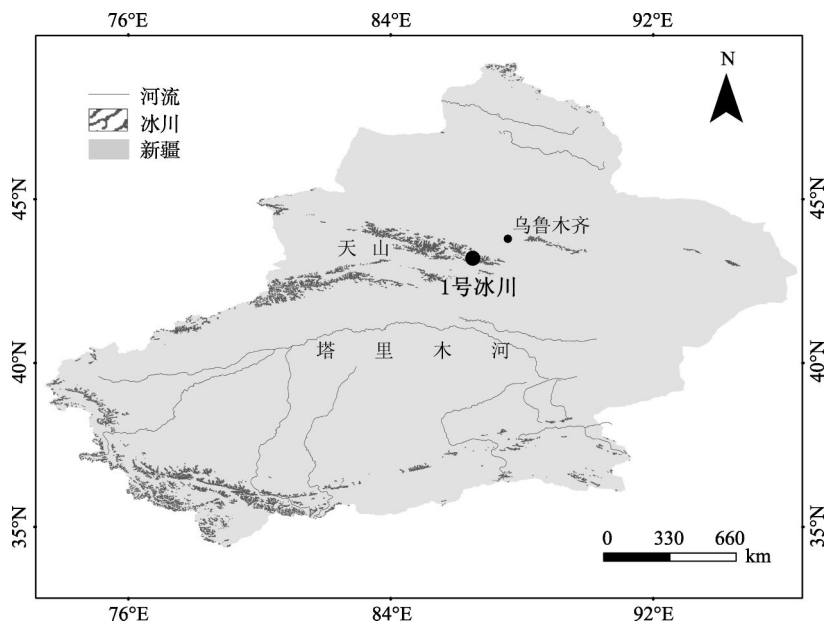


图1 1号冰川地理位置

Fig. 1 Location of Urumqi Glacier No.1

1号冰川是典型的暖季补给型冰川,冰川的积累和消融同时集中于夏季(5—8月),所在地区的气候主要受夏季青藏高原季风影响^[6]。根据大西沟气象站(海拔3 539 m, 43°07' N, 86°50'E,距该冰川水平距离约2 km)1959—2010年的气象观测资料,乌鲁木

齐河源区多年平均气温为 $-5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 负温月长达7~8个月, 最冷月(1月)平均气温为 $-15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最热月(7月)平均气温为 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 平均年降水量为456 mm, 年降水量主要集中于夏季, 且在海拔4 130 m上下形成一个最大降水带(平均年降水量为700 mm), 在该最大降水高度带以下, 年降水量随海拔升高的递增率为 $22\text{ mm}/100\text{ m}$, 非冰川区年平均气温递减率为 $0.68\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 并且夏季气温递减率稍偏大, 而冬季由于逆温层的存在, 气温递减率较小。

1.2 方法与数据

物质平衡观测是冰川研究中最重要的一项观测项目, 1号冰川至今已有52 a的物质平衡资料, 除1966/1967—1978/1979年为插补数据^[5], 该数据已得到冰川学者们的广泛认可且多次引用^[5-6,11,18], 其他年份的物质平衡资料都是实测数据, 物质平衡采用花杆法和雪坑法相结合的方法观测。在消融区, 利用蒸汽钻钻取冰孔布设花杆, 通过测量花杆的高度变化得到消融区的物质平衡变化。在积累区, 通过开挖雪坑, 利用层位法及雪层密度测量得到积累区的物质平衡。以单点物质平衡为基础, 绘制出物质平衡等值线, 利用面积加权法计算出整个冰川的年物质平衡(b_n):

$$b_n = \sum s_i b_i / s \quad (1)$$

其中: s_i 为两相邻等值线间的投影面积; b_i 为 s_i 的平均物质平衡; s 为冰川总面积。

平衡线高度(Equilibrium Line Altitude, ELA)指冰川上年物质积累与年物质损耗相等位置的海拔高度^[1,12]。冰川的平衡线高度在冰川上并不是一条明确的曲线, 其实是一个窄小的带状区域, 不是很容易辨别, 因此, 平衡线高度的确定, 主要是根据冰面花杆所测量的年物质平衡, 绘制出整个冰川的年物质平衡等值线图, 计算出物质平衡为零处的海拔, 即为平衡线高度。通过平衡线高度, 可以计算出积累区比率(积累区面积与冰川面积比值)。研究使用的1号冰川平衡线高度、物质平衡、纯消融量、积累区比率资料来源于中国科学院天山冰川站年报和WGMS冰川物质平衡通报及冰川波动, 气象资料选用大西沟气象站物质平衡年(前一年9月1至翌年8月31日)的夏季平均气温和年降水量观测数据。

2 平衡线高度的变化

2.1 平衡线高度与积累区比率

平衡线高度是冰川积累区与消融区的重要分界线, 它与当地气候条件(气温和降水)之间存在着密切关系。冰川前进、退缩的命运直接由冰川平衡线高度变化决定, 相对于冰川稳定状态而言, 平衡线高度上升, 冰川就会因消融增强而退缩, 平衡线高度下降则冰川就会因积累增多而前进^[12,19]。因此, 平衡线高度是山地冰川变化的良好指标, 是冰川对气候变化响应的一个重要参数。分析可知, 1号冰川在1958/1959—2009/2010年间平衡线高度变化范围介于3 948~4 484 m, 多年平均值为4 067 m。正平衡年与负平衡年之比为16: 36, 正平衡年的平衡线高度变化范围介于3 948~4 066 m, 平均平衡线高度为3 995 m, 负平衡年的平衡线高度变化范围介于3 984~4 484 m, 平均为4 099 m, 较正平衡年的平均平衡线高度高了104 m。

由于平衡线高度的年际波动很大, 难以直接确定其升降趋势, 这可能与平衡线高度附近的形态特征和冰川反射率有关, 为此本文采用平衡线高度的累积距平来分析其变化。图2是1号冰川平衡线高度及其累积距平变化过程。可以看出, 1959—2010年, 1号

冰川平衡线高度变化分三个阶段: ① 1959—1985年, 处于正常的波动范围, 平均平衡线高度为4 051 m; ② 1986—1996年, 呈缓慢的下降趋势, 平均平衡线高度为4 035 m; ③自1997年来, 平衡线高度呈迅速上升趋势, 平均平衡线高度为4 125 m, 直至2009/2010年, 平衡线高度已超过了冰川的上界, 意味着该年度冰川全部处于消融状态。在整个研究时段内, 该冰川平衡线高度总体呈普遍上升趋势, 总计上升了90 m。

冰川积累区比率(AAR)是衡量平衡线高度变化的一个重要指标^[16], AAR能够反映积累区面积在冰川总面积中的比率, 其大小反映冰川补给条件的优劣。统计分析表明, AAR与平衡线高度呈显著的负相关, 相关系数 R 为0.95。平衡线高度随AAR的增大而下降, 随AAR的减小而升高。当AAR等于零时, 整个冰川都会成为消融区, 消融区面积不再增加, 但冰川的负平衡趋势却会不断增强, 平衡线高度上升到一定高度时, 即超出冰川的上界, 冰川本身会阻止其继续上升, 使冰川暂时处于相对的稳定状态^[11]。

基于该冰川的积累区比率资料, 分析了AAR的变化, 在研究时期内, 1号冰川AAR呈明显的下降趋势(图3), 大约下降了17%, AAR变化范围介于0~78%, 平均为46%; 负平衡年份的AAR介于0%~69%, 平均为38%; 正平衡年份的AAR介于45%~78%, 平均为63%。

2.2 平衡线高度与物质平衡

平衡线高度以上, 冰川全年均有物质的净收入, 平衡线高度以下则为净支出。在平衡线高度处, 冰川的年物质平衡为零。平衡线高度变化是冰川物质平衡波动的反映, 物质平衡越小, 表明冰川消融越强烈, 平衡线高度就会上升; 物质平衡越大, 表明冰川积累越多, 则平衡线高度就会下降^[6]。图4是1号冰川1958/1959—2009/2010年平衡线高度和物质平衡的关系。从中可以看出, 2009/2010年该冰川的平衡线高度达到历史最高, 超出了冰川的上界, 冰川全部处于消融状态, 实际观测表明, 该冰川2009/2010年的物质平衡为-1 327 mm(即冰面平均减薄了1.47 m), 是近52 a物质平衡的历史最低值, 说明冰川在该物质平衡年发生了强烈消融。为研究物质平衡(b_n)和平衡线高度间的相互关系, 建立了二者的统计关系:

$$ELA = 4\,018 - 0.17b_n \quad (2)$$

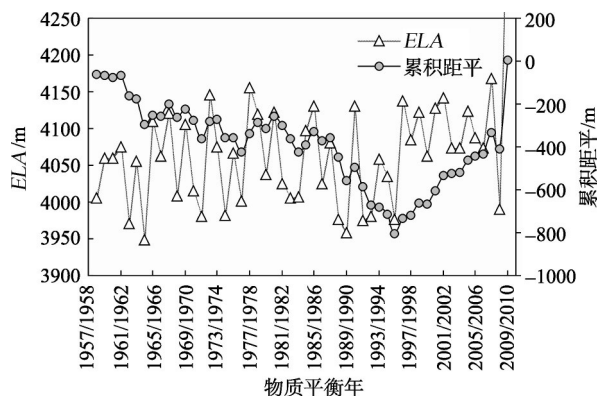


图2 1号冰川平衡线高度及其累积距平变化

Fig. 2 The equilibrium line altitude and its anomaly curve of Urumqi Glacier No.1

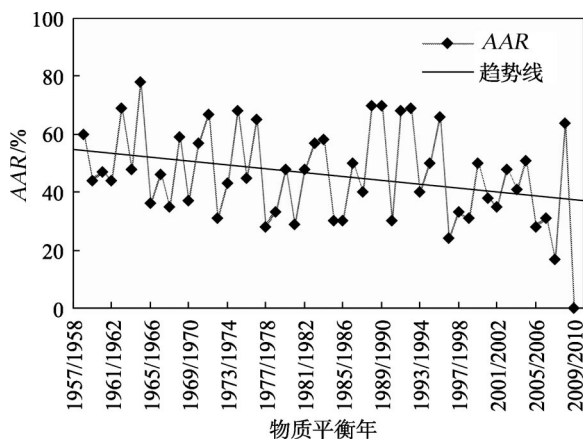
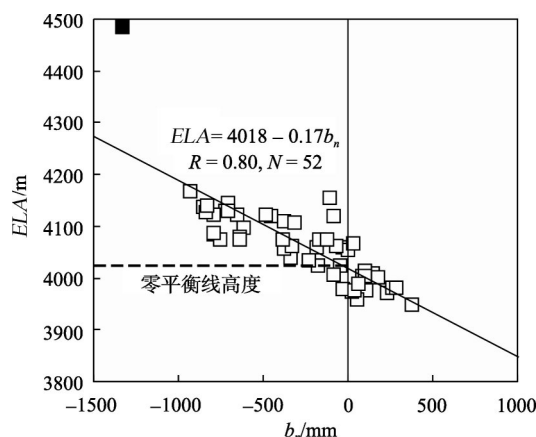


图3 1号冰川积累区比率(AAR)变化

Fig. 3 The accumulation area ratio change of Urumqi Glacier No.1



注：黑色方块代表2009/2010年。

图4 平衡线高度(ELA)与物质平衡(b_n)的关系

Fig. 4 The equilibrium line altitude (ELA) versus mass balance (b_n) of Urumqi Glacier No.1

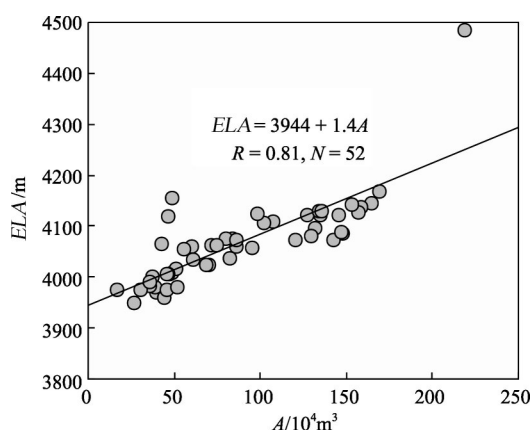


图5 1号冰川平衡线高度(ELA)与纯消融量(A)的关系

Fig. 5 The equilibrium line altitude (ELA) versus net ablation (A) of Urumqi Glacier No.1

候变化的敏感性。图6给出了1号冰川1958/1959—2009/2010年平衡线高度与大西沟气象站夏季平均气温(5—8月)、年降水量的相互关系。以下是获得的平衡线高度(ELA)与夏季平均气温(T_s)、年降水量(P)的统计关系:

$$ELA = 3\,860 + 66.8T_s \quad (R=0.50, N=52) \quad (3)$$

$$ELA = 4\,158 - 0.20P \quad (R=0.18, N=52) \quad (4)$$

结果表明,平衡线高度与夏季平均气温(5—8月)呈显著的正相关,二者相关系数 R 为0.50(显著性水平 $\text{Sig.}=0.00<0.05$),当夏季平均气温升高,平衡线高度将会迅速上升[图6(a)]。这个结果也反映出1958/1959—2009/2010年平衡线高度对夏季平均气温变化的敏感性。除气温外,平衡线高度还受该地区降水量的影响,随着降水量的增多,平衡线高度将会相应下降,呈负相关关系[图6(b)]。

高山地区气温及降水量的年际变化,直接影响着冰川的物质收支状况和平衡线高度

该式相关系数 R 为0.80,统计分析表明,物质平衡与平衡线高度具有显著的负相关性,物质平衡减小100 mm,平衡线高度将上升17 m。由式(2)可知,冰川处于稳定状态时的平衡线高度(整个冰川的年物质平衡为零时的平衡线高度),即零平衡线高度 ELA_0 为4 018 m。

2.3 平衡线高度与纯消融量

1号冰川是夏季补给型冰川,夏季是冰川的强消融期,也是主要的积累期。冰川消融越强烈,平衡线高度上升越明显,冰川积累越多,平衡线也会相应地下降。冰川消融量的变化直接影响平衡线高度的变化^[20-22]。对1号冰川近52 a的平衡线高度与纯消融量进行了相关性分析,结果表明,二者呈显著相关(图5),相关性系数 R 为0.81,表明平衡线高度对纯消融量变化的反映是非常敏感的。图5是平衡线高度与纯消融量的关系,从中可以看出,平衡线高度随纯消融量的增加而升高,随纯消融量的减少而降低。分析表明,纯消融量增加 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$,平衡线高度上升14 m。

3 平衡线高度对气候变化的敏感性

已有研究表明,1号冰川平衡线高度与夏季气温呈正相关,与降水呈负相关^[12,18]。本文利用平衡线高度与夏季气温、年降水之间的统计关系,分析了平衡线高度对气候变化的敏感性。

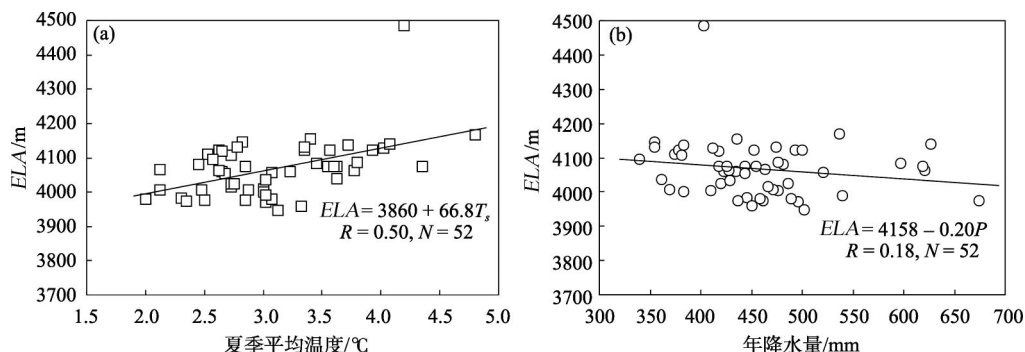


图6 1号冰川平衡线高度与夏季平均气温 (a)、年降水量 (b) 的关系

Fig. 6 The summer temperature (a) and precipitation (b) versus equilibrium line altitude of Urumqi Glacier No.1

的升降。对于冰川区来说, 由于平衡线高度是波动的, 平衡线处的气候状况对气候变化具有更确切的指示意义^[23-25]。为了研究平衡线高度对气候变化的敏感性, 本文利用线性函数, 对气象资料进行标准化处理后, 建立了1号冰川1958/1959—2009/2010年平衡线高度(ELA)与夏季平均气温(T_s)、年降水量(P)之间的统计关系:

$$ELA = 4\,000 + 82T_s - 0.41P \quad (5)$$

该式相关系数 R 为0.625, 显著性水平为0.000, 置信度达到了99.9%。

利用式(5)研究平衡线高度对夏季平均气温、年降水量的敏感性。结果表明, 如果夏季平均气温升高或降低1℃, 则平衡线高度将上升或下降约82 m, 如果年降水量增加或减少100 mm, 则平衡线高度将下降或上升约41 m。相对于夏季气温而言, 平衡线高度对降水量的敏感性比较弱(降水量的增加不是很明显, 近20 a仅增加24 mm)。从平衡线高度对夏季平均气温和年降水量的敏感性程度可知, 夏季平均气温是影响平衡线高度变化的主导气候因素。

近期七一冰川平衡线高度对气候变化的敏感性研究表明^[12], 如果暖季气温(6、7和8月的平均气温)升高或降低1℃, 平衡线高度将上升或下降约172 m; 如果1—3月降水量增加或减少10%, 平衡线高度将下降或上升约62 m。对比可知, 1号冰川平衡线高度对气候变化的敏感程度要小于七一冰川, 造成这种差异的主要原因是二者所处的气候条件不同, 使其具有不同的补给特征, 1号冰川主要受夏季青藏高原季风的影响, 属于夏季补给型冰川, 积累和消融同时集中于夏季, 夏季气温对平衡线高度变化的影响不是很明显, 而七一冰川主要受西风环流的影响, 属于冬季补给型冰川, 冬季积累、夏季消融, 平衡线高度对夏季气温的变化比较敏感。

4 结论

基于1号冰川1958/1959—2009/2010年的平衡线高度观测资料, 研究了冰川的平衡线高度及其与气候变化的关系, 得出以下结论:

(1) 平衡线高度变化分为正常波动、缓慢下降、迅速上升三个阶段, 变化范围介于3 948~4 484 m, 多年平均为4 067 m, 总体呈普遍上升趋势, 总计上升了90 m, 且在2009/2010年超过了冰川的上界, 意味着该年度冰川全部处于消融状态。

(2) 在研究时段内, 积累区比率呈现明显的下降趋势, 下降了约17%, 变化范围介

于0~78%, 平均为46%, 且与平衡线高度呈显著的负相关, 平衡线高度随AAR减小而升高, 随AAR增大而下降。

(3) 物质平衡与平衡线高度具有显著的负相关性, 物质平衡减小100 mm, 平衡线高度将上升17 m, 冰川处于稳定状态时的平衡线高度, 即零平衡高度 ELA_0 为4 018 m。

(4) 平衡线高度随纯消融量的增加而升高, 随纯消融量的减少而降低, 纯消融量增加 $10 \times 10^4 m^3$, 平衡线高度上升14 m。

(5) 平衡线高度对气候变化的敏感性研究表明, 如果夏季平均气温升高1℃, 则平衡线高度将上升约82 m, 如果年降水量增加100 mm, 则平衡线高度将下降约41 m, 且夏季气温是影响平衡线高度变化的主导气候因素。

参考文献(References):

- [1] Benn D I, Lehmkuhl F. Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments [J]. *Quaternary International*, 2000, 65/66: 15-29.
- [2] Ohmura A, Kasser P, Funk M. Climate at the equilibrium line of glaciers [J]. *Journal of Glaciology*, 1992, 38: 397-411.
- [3] LI Zhong-qin, LI Hui-lin, CHEN Ya-ning. Mechanisms and simulation of accelerated shrinkage of continental glaciers: A case study of Urumqi Glacier No. 1 in eastern Tianshan, Central Asia [J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22(4): 423-430.
- [4] PU Jin-chen, YAO Tan-dong, YANG Mei-xue, et al. Rapid decrease of mass balance observed in the Xiao (Lesser) Dongkemadi Glacier in the central Tibetan Plateau [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(16): 2953-2958.
- [5] 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应——以乌鲁木齐河1号冰川为例 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 334-342. [LI Zhong-qin, SHEN Yong-ping, WANG Fei-teng, et al. Response of Glacier melting to climate change—Take Urumqi Glacier No.1 as an example. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 334-342.]
- [6] 张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川1959—2009年物质平衡变化过程及特征研究 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1301-1309. [ZHANG Guo-fei, LI Zhong-qin, WANG Wen-bin, et al. Change processes and characteristics of mass balance of the Urumqi Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains during 1959—2009. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6): 1301-1309.]
- [7] 黄茂桓. 雪线、平衡线 [J]. 冰川冻土, 1992, 14(3): 285-286. [HUANG Mao-huan. The snowline / the equilibrium line. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 14(3): 285-286.]
- [8] 谢自楚, 丁良福, 刘潮海, 等. 冰川零平衡线处的物质平衡及其应用 [J]. 冰川冻土, 1996, 18(1): 1-9. [XIE Zi-chu, DING Liang-fu, LIU Chao-hai, et al. Mass balance at the steady state equilibrium line altitude and its application. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(1): 1-9.]
- [9] 鞠远江, 刘耕年, 魏遐. 山地冰川平衡线高度作为气候变化代用指标的讨论 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(4): 613-616. [JU Yuan-jiang, LIU Geng-nian, WEI Xia. Equilibrium line altitude of Mountain Glacier as a proxy of climate changes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(4): 613-616.]
- [10] 王宁练. 冰川平衡线变化的主导气候因子灰色关联分析 [J]. 冰川冻土, 1995, 17(1): 8-15. [WANG Ning-lian. Grey relational analysis of the leading climatic factor influence the changes of the equilibrium line. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(1): 8-15.]
- [11] 姚檀栋. 冰川物质平衡、零平衡线及气候间的关系——以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例 [J]. 冰川冻土, 1987, 9(4): 289-300. [YAO Tan-dong. The relationship between glacier mass balance equilibrium line and climate. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987, 9(4): 289-300.]
- [12] 王宁练, 贺建桥, 蒲健辰, 等. 近50年来祁连山七一冰川平衡线高度变化研究 [J]. 科学通报, 2010, 55(32): 3017-3115. [WANG Ning-Lian, HE Jian-Qiao, PU Jian-Chen, et al. Variations in equilibrium line altitude of the Qiyi Glacier, Qilian Mountains, over the past 50 years. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 55(32): 3107-3115.]
- [13] 鞠远江, 刘耕年, 张晓咏, 等. 山地冰川物质平衡线与气候 [J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 43-49. [JU Yuan-jiang, LIU Geng-nian, ZHANG Xiao-yong, et al. High Mountain glaciers' ELA_0 and climate. *Progress in Geography*,

- 2004, 23(3): 43-49.]
- [14] 王宁练, 姚檀栋, 田立德, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川的气候敏感性研究 [J]. 干旱区地理, 1998, 21(4): 34-40. [WANG Ning-lian, YAO Tan-dong, TIAN Li-de, *et al.* Climate sensitivity of Glacier No.1 at the source of the Urumqi River in Tianshan Mountains. *Arid Land Geography*, 1998, 21(4): 34-40.]
- [15] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164. [SHI Ya-feng, SHEN Yong-ping, LI Dong-liang, *et al.* Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152-164.]
- [16] 杨惠安, 李忠勤, 叶佰生, 等. 过去44年乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡结果及其过程研究 [J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 76-80. [YANG Hui-an, LI Zhong-qin, YE Bai-sheng, *et al.* Study on mass balance and process of Glacier No.1 at the Urumqi River in the past 44 years. *Arid Land Geography*, 2005, 28(1): 76-80.]
- [17] WGMS. Fluctuations of Glaciers 2005-2010 (Vol. X) [M]. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2012: 336.
- [18] 刘潮海, 谢自楚, 王纯足. 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡过程研究 [J]. 冰川冻土, 1997, 19(1): 17-24. [LIU Chao-hai, XIE Zi-chu, WANG Chun-zu. A research on the mass balance processes of Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19 (1): 17-24.]
- [19] 刘耕年, 陈艺鑫, 张梅, 等. 喜马拉雅山佩枯岗日冰川地貌的年代学、平衡线高度和气候研究 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 959-970. [LIU Geng-nian, CHEN Yi-xin, ZHANG Mei, *et al.* Glacial landform chronology and environment reconstruction of Peiku Gangri, Himalayas. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 959-970.]
- [20] 施雅风, 黄茂桓, 姚檀栋, 等. 中国冰川与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-410. [SHI Ya-feng, HUANG Mao-huan, YAO Tan-dong, *et al.* *Glaciers and Their Environments in China*. Beijing: Science Press, 2000: 1-410.]
- [21] 谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010: 1-490. [LIU Chao-hai, XIE Zi-chu. *Leading Principles of Glaciology*. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2010: 1-490.]
- [22] ZHANG Guo-fei, LI Zhong-qin, WANG Wei-dong, *et al.* Comparative study on observed mass balance between East and West Branch of Urumqi Glacier No. 1, Eastern Tianshan, China [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2013, 5(3): 0316-0323.
- [23] 焦克勤, 叶柏生, 韩添丁, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川径流对气候变化的响应分析 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 606-611. [JIAO Ke-qin, YE Bai-sheng, HAN Tian-ding, *et al.* Response of runoff to climate change in the Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains during 1980-2006. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(3): 606-611.]
- [24] ZHANG Guo-fei, LI Zhong-qin, WANG Wen-bin, *et al.* Rapid decrease of observed mass balance in the Urumqi Glacier No. 1, Tianshan Mountains, central Asia [J]. *Quaternary International*, 2014, 349:135-141.
- [25] 孙美平, 李忠勤, 姚晓军, 等. 1958—2009年乌鲁木齐河源1号冰川融水径流变化及其原因 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(4): 650-660. [SUN Mei-ping, LI Zhong-qin, YAO Xiao-jun, *et al.* Analysis on runoff variation of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River from 1959-2008. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(4): 650-660.]

Study on Equilibrium Line Altitude and Its Relationship with Climate Change of Urumqi Glacier No.1 in Tianshan Mountains in Recent 52 Years

WANG Wei-dong¹, ZHANG Guo-fei², LI Zhong-qin^{2,3}

(1.Gansu Province Engineering Institution of Surveying and Mapping, Lanzhou 730000, China; 2.College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 3.State Key Laboratory of Cryospheric Sciences / Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Urumqi Glacier No.1 is located at the headwaters of the Urumqi River in eastern Tianshan, it is one of the ten reference glaciers around the world in World Glacier Monitoring Service (WGMS). It is considered as a key element of the system because of its special geographical position in arid Central Asia. As a reference glacier in the WGMS glacier monitoring network, it provides the longest glaciological and climatological monitoring record in China. Equilibrium line altitude (ELA) is defined as the altitude where the annual mass balance is zero. Glacier behaviors such as advancing or retreating are controlled by ELA variations, and fluctuations of ELA provide an important indicator of glacier response to climate change. In practice, the ELA is a narrow zonal area, and not very easy to be identified on the glacier surface, therefore, the determination of ELA is mainly done based on the contour map of the annual mass balance of the whole glacier. This paper, based on ELA data of Urumqi Glacier No.1 during 1959–2010, studies the changing process and characteristics of ELA. The results show that ELA experienced three phases during the whole observation period. ELA presented a slow ascending trend in a normal fluctuation range before 1986, with a mean of 4051 m a.s.l; it descended slowly from 1986 to 1996, with a mean of 4035 m, however, it ascended promptly since 1997, with a mean of 4125 m. In 2010, the highest ELA was observed which surpassed the glacier summit, implying that the whole glacier was ablating in this year. During the study period, ELA range was between 3948 m and 4484 m, with a mean of 4067 m, and the general tendency was ascending continually, ascended about 90 m. Accumulation area ratio (AAR) as an important indicators of the ELA change showed obvious decreasing trend, descended by 17%. Analysis shows mass balance and ELA has significant negative correlation. When mass balance decreased by 100 mm, ELA would ascend 17 m and glacier ELA was in a steady state, namely zero ELA (ELA_0) would be 4018 m. As the net ablation increases, ELA shows an ascending trend. Data analysis shows when net ablation increased $10 \times 10^4 \text{ m}^3$, ELA would ascend 14 m. Analytical results of the ELA sensitivity response to climate change suggest that every 1°C summer temperature increase would lead to 82 m ELA ascendance, and ELA would descend 41 m when annual precipitation increased 100 mm. According to the difference of ELA sensitivity in response to summer temperature and precipitation, ELA ascendance was controlled mainly by summer temperature.

Key words: equilibrium line altitude; mass balance; climate change; Urumqi Glacier No.1