

文章编号: 1000-0240(2003)02-0124-06

天山南坡台兰河流域冰川物质平衡变化 及其对径流的影响

沈永平¹, 刘时银¹, 丁永建¹, 王顺德²

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 新疆阿克苏 水文水资源勘测局, 新疆 阿克苏 843000)

摘要: 应用控制流域的径流及相关降水资料, 通过模型重建了台兰河流域平均冰川物质平衡序列。结果显示, 1957—2000年流域冰川平均年物质平衡为 -287 mm , 累计冰川物质平衡 -12.6 m ; 44 a 来由于气温升温引起的冰川净消融相当于每年补给河流径流 $1.24 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占河流年径流量的 15%。1982 年以后, 流域冰川物质平衡一直呈负平衡, 1957—1981 年平均物质平衡为 -168 mm a^{-1} , 1982—2000 年平均为 -445 mm a^{-1} 。随着气候由暖干向暖湿转型, 降水量增加, 但冰川对气温的敏感性更大, 冰川消融加快, 冰川融水量持续增加。气温和降水量的变化与北大西洋涛动和北极涛动变化一致, 其突变年份都在 1986—1988 年左右。

关键词: 冰川物质平衡; 气候变化; NAO/AO 指数; 台兰河

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

冰川水资源是我国西部干旱区重要的水资源, 稳定着河流水文的变化, 夏季气温升高引起的冰川融水猛烈增加也是洪水的主要根源。冰川是固体高山水库, 气候的变化对河流水资源的产生和洪水的发生具有重要作用。冰川变化、冰川水资源变化及其冰川洪水研究对塔里木河的治理及供水安全防范是必须的和迫切的。塔里木盆地内陆流域共有现代冰川 14 285 条, 面积 $23\,628.98 \text{ km}^2$, 冰储量 $2\,669.435 \text{ km}^3$, 冰川融水年径流量达 $150 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占流域地表总径流量的 40%, 冰川融水在本区的水资源组成中占据重要的地位^[1]。

1 流域基本概况

台兰河流域位于天山最高峰托木尔峰(海拔 $7\,435.3 \text{ m}$)南坡, 河流最终注入塔里木盆地。以台兰河水文站控制的流域面积 $1\,324 \text{ km}^2$, 流域最高点为托木尔峰, 最低点为台兰水文站(海拔 $1\,550 \text{ m}$)。台兰河流域共发育现代冰川 115 条, 冰川总面积 431 km^2 , 冰川储量 73.132 km^3 , 平均雪线海拔

$4\,290 \text{ m}$ 。流域内长度超过 10 km 的冰川有 4 条, 总面积达 307.7 km^2 , 占流域冰川总面积的 71.2%, 流域内最大冰川为琼台兰冰川, 长度为 21.4 km , 冰川面积达 165.4 km^2 。流域内冰川末端最低海拔 $3\,080 \text{ m}$, 最高海拔 $5\,800 \text{ m}$, 冰川覆盖率 32.6%^[2]。

根据气象观测和 1977—1978 年的科学考察, 本区山区的降水主要来自大西洋和北冰洋的暖湿气流补给, 6~8 月的降水量占全年的 50% 左右, 而 5~9 月占 70% 左右, 因此, 冰川的补给主要发生在暖季^[3]。流域山区的降水量与其北侧天山的昭苏站和天山内部的巴音布鲁克站比较接近, 其月季变化趋势也比较一致^[4]。

近 40 a 来本区气温呈升温的变化趋势, 天山山区平均气温在 4 个 10 a 中升高了 0.6°C 。各季的气温变化也呈现出波动特征, 夏、秋、冬三季均呈明显的上升趋势, 其中秋季上升幅度最大, 为 1.1°C , 冬、夏两季上升幅度同为 0.7°C , 春季变化不大^[1]。秋冬升温使得冰川冷储减少, 冰温升高, 夏

收稿日期: 2002-10-18; 修订日期: 2002-12-16

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(90202013); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-10-06); 国家自然科学基金项目(49871021)资助

作者简介: 沈永平(1961—), 男, 陕西户县人, 副编审, 1985 年在中国科学院兰州冰川冻土研究所获硕士学位, 主要从事全球变化与冰川水资源研究。E-mail: shenyyp@ns.lzb.ac.cn

季很短的升温都会使冰川大量消融。夏季急剧的升温可能引起冰川洪水的发生，产生严重的灾害。

2 冰川物质平衡的计算及其结果

在流域尺度范围内，冰川物质平衡变化具有相似的时空变化特征。在研究中国冰川水文和气候的分布特征时，我们发现在西部的高山、高原地区，流域范围内的降水和径流的分布等值与其所占面积之间都呈负指数关系^[5]。有冰川分布的流域中，冰川覆盖区是流域内降水量、径流量和径流系数分布的最大区域。从统计力学和最大熵原理出发，依据以上的降水和径流分布特征，推导出了一组以水文、气象观测数据计算流域冰川平均物质平衡的公式^[5, 6]。依据这些公式，应用有多年观测的水文站记录的径流和降水资料，就可以恢复流域冰川平均物质平衡各分量的逐年值序列。

在台兰河流域的冰川物质平衡计算中，应用了台兰水文站的径流资料，对于高山冰川区的降水计算(积累量)采用了天山巴音布鲁克站的降水量变化趋势。通过计算获得流域的水文和冰川多年平均特征值(表 1)，并依据降水和径流的年变化，恢复了流域逐年平均冰川物质平衡变化序列(图 1)。

表 1 台兰河流域水文和冰川多年平均特征值
Table 1 Mean annual eigenvalues of hydrological and glaciers in the watershed of Tailanhe River

流域特征值	西天山 台兰河
控制流域水文站	台兰站
流域总面积 F/km^2	1 324
流域冰川总面积 F_g/km^2	431.05
平均径流深 R/mm	566.9
平均降水量 P/mm	683.25
平均径流系数 α	0.8
最小径流深 R_0/mm	10
最小降水量 P_0/mm	150
最小径流系数 α_0	0.35
冰川区径流深 R_g/mm	1 137.1
冰川区降水量 P_g/mm	1 329
比率 K_{GR}	0.35
冰川总积累 C/mm	1 329
冰川总消融 A/mm	1 616
冰川物质平衡水平 mm	1 473
物质平衡 B_H/mm	- 287
冰川融水占径流量比率/%	65.3

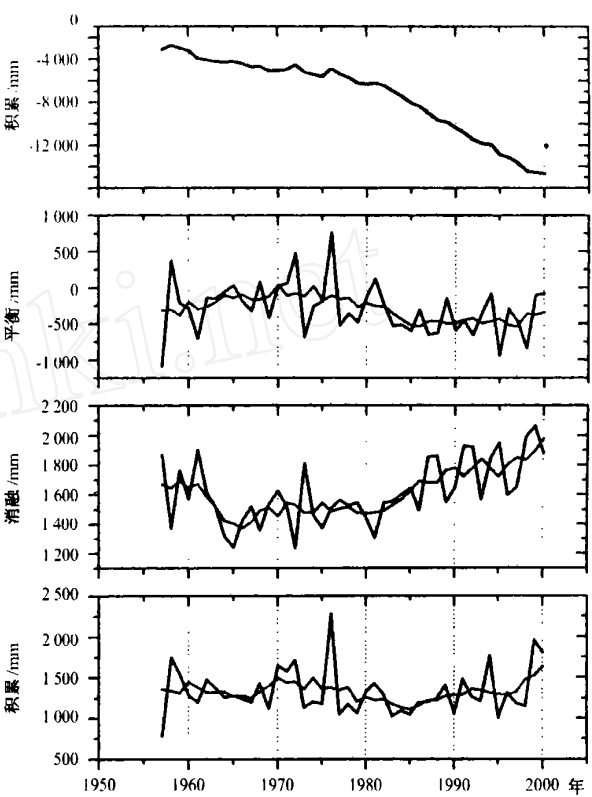


图 1 台兰河流域冰川物质平衡变化

Fig. 1 Glacier mass balance change in the Tailanhe Watershed

以上结果显示，台兰河流域1957—2000年平均冰川年物质平衡为 - 287 mm，44 a 累计冰川物质平衡 - 12.6 m，1982 年以后，流域冰川物质平衡一直呈负平衡。1957—1981 年平均物质平衡为 - 168 mm，1982—2000 年平均为 - 445 mm。如果以气候转型的 1987 年为界，1957—1986 年流域冰川积累 1 314 mm，消融量 1 527 mm，冰川物质平衡为 - 213 mm，而 1987—2000 年积累 1 361 mm，消融量 1 808 mm，冰川物质平衡为 - 447 mm，前后相比积累量平均年增加 47 mm，消融年平均增加 281 mm，冰川物质平衡相差 234 mm。

对计算的流域平均冰川物质平衡的结果精度，以 1977—1978 年中国科学院天山托木尔峰登上科学考察队的冰川水文观测结果进行验证。据苏珍等^[2]1977/1978 年度的观测计算，1978 年台兰冰川的平均总消融深为 1 361 mm，平均总积累量为 1 200 mm，而我们的计算结果为平均总消融深 1 529 mm，平均总积累量 1 173 mm。对比观测和计算结果，计算的积累量少了 2.3%，观测的总消融深如果考虑 10% 的蒸发消耗^[6]，实际应当为 1 497 mm，则计算的消融量结果偏多 2.1%。以上验证结果精度还是相当高的，计算结果是可信的。

3 冰川融水变化对河流水资源的影响

台兰河流域冰川融水占台兰站控制流量比率达 65.3%，冰川融水的变化对流域的水资源量影响是非常明显的. 台兰河流域 1957—2000 年的年平均径流量为 $7.512 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，径流量在 1982 年后急剧增加，1999 年的径流量比 1981 年增加了 $3.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，即增加了 58 % (图 2). 根据敏感性分析，台兰河流域冰川物质平衡变化 100 mm，可引起流域平均径流深变化 30 mm 或径流量变化 $0.23 \times 10^8 \text{ m}^3$. 44 a 累计冰川物质平衡 - 12.6 m，相当于额外补给河流径流量 $54.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；44 a 来由于气温升高引起的冰川净消融 - 287.15 m a^{-1} ，相当于每年额外补给河流 $1.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占河流年径流量的 15 %. 1957—1986 年平均冰川消融对河流的额外净补给量占河流年径流量的 13 %，而 1987—2000 年达 23 % (表 2). 根据冰川物质平衡的敏感性分析，气温变化 1℃，流域冰川物质平衡变化约 300 mm，年径流变化在台兰河可达 16 %^[1]. 这意味着，随着新疆气候由暖干向暖湿转型，虽然降水量增加，但冰川对气温的敏感性更大^[7]，冰川消融加快，冰川融水量持续增加.

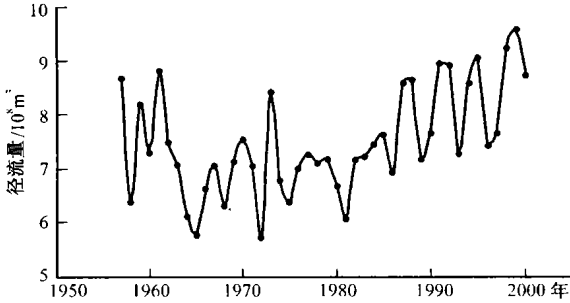


图 2 台兰河台兰站径流量变化
Fig. 2 Streamflow of the Tailanhe River

表 2 台兰河流域径流量对冰川物质平衡变化的响应

Table 2 Response of streamflow to glacier mass balance change in the Tailanhe Watershed

年代	C/ mm	A/ mm	B _n / mm	Q/ 10 ⁸ m ³	Q/ mm
1957—1960	1341.93	1645.18	- 303.25	7.62	575.81
1961—1970	1325.27	1507.06	- 181.79	6.98	527.47
1971—1980	1370.92	1505.85	- 128.33	6.95	524.74
1981—1990	1199.13	1606.62	- 407.49	7.45	562.32
1991—2000	1415.60	1840.16	- 424.56	8.53	644.06
平均	1329.02	1616.17	- 287.15	7.51	566.88

4 冰川物质平衡和径流对气候转型的响应

施雅风等^[8]对西北近年来的降水、径流、洪水、湖泊等变化分析，发现 1987 年以来西北西部和中部地区气候发生了由暖干向暖湿的转型，作为天山西段的台兰河流域也发生了明显的变化. 对台兰河流域计算的 1957—2000 年年平均冰川物质平衡结果进行距平累计 (图 3)，可以发现，1982 年是一个转折年，1957—1981 年累计距平物质平衡量达到 3 000 mm，而 1982—2000 年累计距平物质平衡量呈下降. 但台兰河的累计距平径流量的变化以 1987 年为转折年，1957—1986 年呈下降趋势，1987—2000 年持续上升 (图 4).

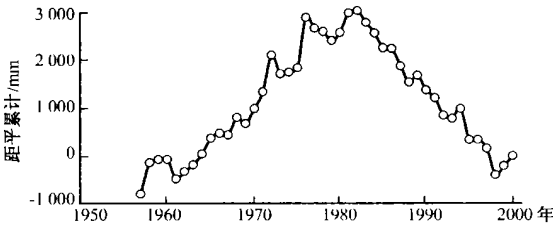


图 3 台兰河流域冰川物质平衡累计距平过程
Fig. 3 Anomalies sum curve of glacier mass balance in the Tailanhe Watershed

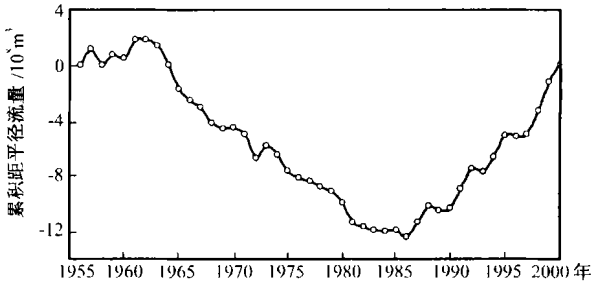


图 4 台兰河流域径流量累计距平过程
Fig. 4 Anomalies sum curve of streamflow in the Tailanhe Watershed

对台兰河流域东西两侧的库车河兰干站、昆马力克的协合拉站及托什干河的沙里桂兰克站的气温和降水变化分析，降水和气温的模比系数距平累计结果表明 (图 5 a, b)，3 站的气温在 1982—1987 年相继发生了明显的转变，其中以兰干站气温 1987 年转型最为显著 (图 5a). 3 站的降水量变化东侧的兰干站在 1987 年发生明显转型，其后西侧在 1989 年前后发生转型变化 (图 5b). 台兰河处于上述 3 站的中间，流域中冰川覆盖度大，冰川融水在流域径流量中占的也非常多，冰川融水对气温的敏感性

高,随着区域气温的明显转变,河流径流量在1987年也发生了转型.冰川物质平衡在1982年发生转型的原因可能是由于冰川处于较高海拔,对气温的反应敏感,所以转型的时间较早.

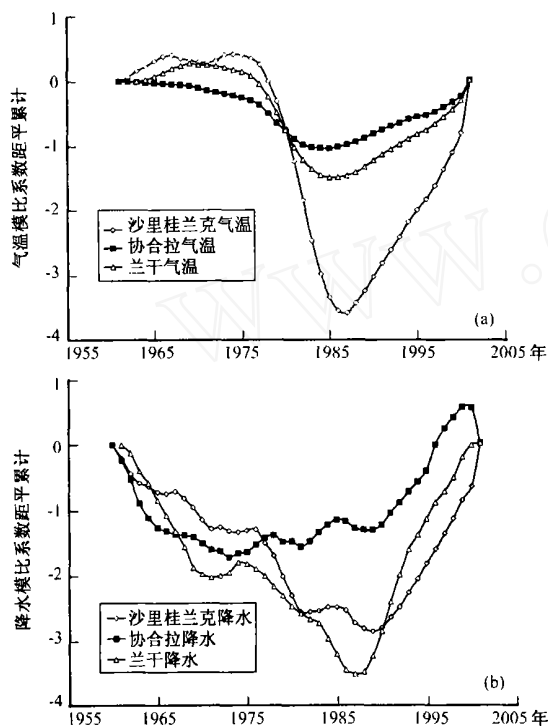


图5 天山南侧3站气温(a)和降水(b)模比系数差积曲线
Fig. 5 Anomalies sum curves of temperature and precipitation on the southern slope of the Tianshan Mountains

由于本区处于西风带的影响和控制下,降水主要来自大西洋和北冰洋的暖湿气流补给^[3],所以作为影响北半球气候变化的重要驱动因子,北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)和北极涛动(Arctic Oscillation, AO)对本区的遥相关联应当给予考虑.北极涛动对北半球气候环境具有广泛的影响,而北大西洋涛动是北极涛动的一个方面或部分.它们的波动可以描述北极地区和中纬度地区气压场的变化,其标准化指数在正位相和负位相来回震荡.人们发现AO与欧亚大陆上的地面气温变化具高度的耦合性^[9, 10],北极涛动的正极性表现为从地面到同温层下部的极地涡流增强,这时北大西洋的暴风雨会把大量的降水带给欧洲北部,而地中海以干旱为主;在负位相,其结果相反.北大西洋涛动波动具有类似的效应,正位相由于北大西洋的亚述尔高压和冰岛低压活动增强,使得欧亚大陆北部上空产生显著西风急流,降水量大于正常水平,北半球的大部分气温也高于正常水平;负位相

时,上述两个气压中心活动减弱,引起欧亚大陆上空的西风气流也减弱,并出现较冷的天气.对1956—2000年的北极涛动和北大西洋涛动指数的距平累计分析(图6a, b),发现1956—1971年是持续负位相期,1972—1986年处于正负波动期,而1987—2000年基本上是持续正位相期,并且强度明显增强.这个结果和西北地区1987年开始气候转型,气温明显升高、降水量增强的结论相一致,说明西北地区气候转型的原因是和北大西洋向东输送的水汽增加、西风气流加强有关.1982年后台兰河流域冰川物质平衡持续负平衡和北极涛动的增强是一致的,1987年开始的西北气候转型是北大西洋大气环流结构在1971—1986年调整后,大气环流结构稳定到一个新水平上的结果.如果没有重大气候影响因素的改变,这一过程将会持续在一个较长时间尺度,其结果将强烈的影响着天山地区的冰川和河流水文变化.

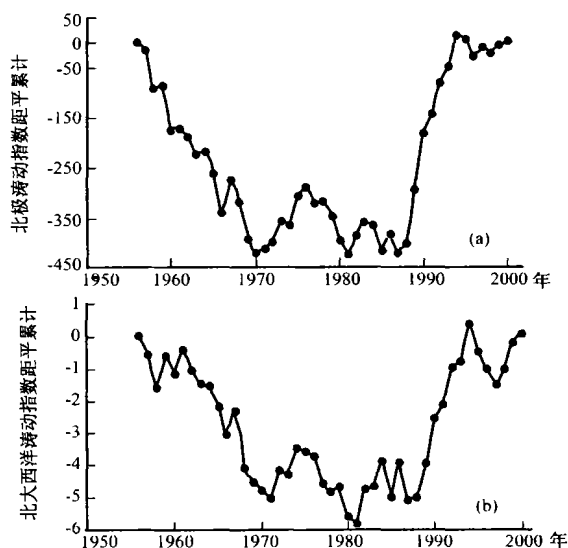


图6 北极涛动(AO)指数(a)和北大西洋涛动(NAO)指数(b)距平累计

Fig. 6 Anomalies sum curves of the AO/NAO indices in 1957—2000

5 结论

恢复重建台兰河流域平均冰川物质平衡各分量的逐年值序列结果显示,1957—2000年冰川年平均物质平衡为 -287 mm ,累计冰川物质平衡 -12.6 m ;台兰河流域冰川融水占台兰站控制流量比率达65.3%,冰川融水的变化对流域的水资源量影响是非常明显的.44 a来由于气温升温引起的冰川净消融相当于每年补给河流 $1.24 \times 10^8\text{ m}^3$,占河

流年径流量的 15 %。1982 年以后, 台兰河流域冰川物质平衡一直呈负平衡, 1957—1981 年平均物质平衡为 $-168 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 1982—2000 年平均为 $-445 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。西北地区气候转型的原因是和北大西洋向东输送的水汽增加, 西风气流加强有关。1982 年以后冰川物质平衡持续负平衡是和北极涛动的增强是一致的, 1987 年开始的西北气候转型是北大西洋大气环流结构在 1971—1986 年调整后, 大气环流结构稳定到一个新的水平上的结果。

参考文献(References):

- [1] Shen Yongping, Wang Shunde. New progress in glacier and water resources changes in Tarim Basin, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 819. [沈永平, 王顺德. 塔里木盆地冰川及水资源变化研究新进展[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 819.]
- [2] Su Zhen, Song Guoping, Wang Lilun, et al. Existing glacier in the Tumuer Region[A]. Glacier and Meteorology in Mt. Tumuer region, Tianshan[C]. 乌鲁木齐: People's Publishing House of Xinjiang, 1985. 32 - 98. [苏珍, 宋国平, 王立伦, 等. 托木尔峰地区的现代冰川[A]. 天山托木尔峰地区的冰川与气象[C]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985. 32 - 98.]
- [3] Kang Ersi, Zhu Shousen, Huang Mingmin. The characteristics of glacier hydrology in the Tumuer region[A]. Glacier and Meteorology in Mt. Tumuer Region, Tianshan[C]. 乌鲁木齐: People's Publishing House of Xinjiang, 1985. 99 - 119. [康尔泗, 朱守森, 黄明敏. 托木尔峰地区的冰川水文特征[A]. 天山托木尔峰地区的冰川与气象[C]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985. 99 - 119.]
- [4] Gao Dengyi, Yan Jiangzheng, Ying Qixiao, et al. Meteorology and climate in the Tumuer region[A]. Glacier and Meteorology in Mt. Tumuer Region, Tianshan[C]. 乌鲁木齐: People's Publishing House of Xinjiang, 1985. 143 - 224. [高登义, 严江征, 应启孝, 等. 托木尔峰地区的现代冰川[A]. 天山托木尔峰地区的冰川与气象[C]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985. 143 - 224.]
- [5] Shen Yongping, Xie Zichu, Ding Liangfu, et al. Estimation of average mass balance for glacier in a watershed and its application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(4): 302 - 307. [沈永平, 谢自楚, 丁良福, 等. 流域冰川平均物质平衡的计算方法及其应用[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 302 - 307.]
- [6] Shen Yongping, Liu Shiyin, Wang Genxu, et al. Fluctuations of glacier mass balance in watersheds of Qilian Mountain and their impact on water resources of Hexi Region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 244 - 250. [沈永平, 刘时银, 王根绪, 等. 祁连山北坡流域冰川物质平衡波动及其对河西水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 244 - 250.]
- [7] Xie Zichu, Su Zhen, Shen Yongping, et al. Mass balance and water exchange of Hailuoguo Glacier in Mount Gongga and their influence on glacial melt runoff[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(1): 7 - 15. [谢自楚, 苏珍, 沈永平, 等. 海螺沟冰川物质平衡、水交换特征及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2001, 23(1): 7 - 15.]
- [8] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm - dry to warm - humid in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219 - 226. [施雅风, 沈永平, 胡汝驥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219 - 226.]
- [9] Thompson D W J, Wallace J M. Structure of the Arctic and Antarctic Oscillations[A]. Proceedings of the 23rd Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop[C]. Florida, USA: NOAA, NWS, Department of Commerce, 1998. 281 - 284.
- [10] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. Geophysical Res. Lett., 1998, 25: 1 297 - 1 300.

Glacier Mass Balance Change in Tailanhe River Watersheds on the South Slope of the Tianshan Mountains and Its Impact on Water Resources

SHEN Yong-ping¹, LIU Shi-yin¹, DING Yong-jian¹, WANG Shun-de²

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. Aksu Hydrology and Water Resource Bureau, Aksu Xinjiang 843000, China)

Abstract: The Tarim Basin is the biggest arid inland basin in China, it is located in Asia European Continent and far away from the sea. Tailanhe Watershed is located on the southern slope of the highest peak, Tumer, 7435.3 m asl, of the Tianshan Mountains, source from the Jong Tailan Glacier, inflow to the Tarim Basin, southern Xinjiang. The area of the watershed controlled by the Tailan Hydrological Station is 1 324 km², the existing glaciers cover 431 km² in area and 32.6 % of the total watershed area. Precipitation increases with altitude, mean annual rainfall is about 683 mm, the maximum rainfall appears on glacial cover area with 1 329 mm depth. Mean annual streamflow of 1957—2000 is $7.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ in the watershed, with 566 mm in average water depth. The climate is controlled by the westerly stream and air mass from Northern Atlantic Ocean and Arctic Ocean pass through centre Asia and Europe, the warm season is the main glacier replenishment period. Major climatic features are a spring - summer precipitation maximum occurring simultaneously with ice and snow melt.

Over the past decades years, the Tianshanin have started melting down with the increase in tem-

perature leading to increasing glacier-fed streamflow. The glacial runoff is 65 % of average annual runoff in the Tailanhe watershed, mean annual glacier mass balance in 1957—2000 is - 287 mm per year and total 44 years ice mass loss 12.6 m in thickness. 1982 is a key year, a dominating weaker positive mass balance character shift to strong negative phase, and mean annual mass balance changed from - 168 mm per year in 1957—1981 to - 445 mm per year in 1982—2000. A sensitivity test shows that 1 annual air temperature change will cause 300mm glacier mass balance fluctuation, and 16 % amplitude of average annual runoff. As global warming, the glacier melts strengthening and meltwater increasing rapidly, more water resources supply to arid Tarim Basin.

In the Xinjiang area, the climate is affected mostly by the westerly current coming from the Atlantic Ocean and the Arctic Ocean. The Northern Atlantic Oscillation and the Arctic Oscillation indices affect the precipitation, temperature and glacier mass balance variations of the Tianshan Mountains. The climate shift in northwest China is linkage to NAO/AO strength change, a reason of the causes.

Key words: glacier mass balance; climate change; NAO/AO indices; Tailanhe River of Xinjiang