

# 近 50 年来新疆天山南北坡 典型流域冰川与冰川水资源的变化<sup>\*</sup>

蓝永超<sup>1</sup>, 沈永平<sup>1</sup>, 吴素芬<sup>2</sup>, 钟英君<sup>3</sup>, 文 军<sup>1</sup>, 马晓波<sup>1</sup>, 胡泽勇<sup>1</sup>

(1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 2 新疆水文水资源局, 乌鲁木齐 830000

3 新疆水利水电学校, 乌鲁木齐 830000)

**提 要:**冰川是大自然修筑的“固体水库”, 在水资源的构成中占有重要地位。新疆地处内陆干旱区, 是我国现代冰川面积分布最广的地区之一。冰川和冰川融水为新疆灌溉农业发展提供了可靠的水资源保障。本文根据中国冰川编目及近年来其它冰川研究成果和监测资料, 对 1960 年以来新疆, 主要是天山山区的冰川与冰川径流的变化进行了分析。分析表明, 受全球气候变暖的影响, 上世纪 60 年代以来至本世纪初, 天山冰川的变化整体上以退缩为主, 1963 - 2000 年冰川面积平均减少 12.5%。但受地理位置和地势条件的影响, 不同流域的冰川变化存在着较大的区域性差异。随着冰川的强烈退缩和冰川融水的增加, 使得近十余年来新疆天山地区大部分冰川补给河流径流量呈增加的趋势。

**关键词:**全球变暖; 冰川; 冰川融水

**中图分类号:** P343.6

**文献标识码:** A

冰川是冰冻圈重要组成部分, 是自然界中最宝贵的淡水资源。地球上陆地面积的十分之一被冰覆盖, 五分之四的淡水储存在冰川上。尽管冰川储量的 96% 位于南极大陆和格陵兰岛, 但是其它地区的冰川由于临近人类居住区而更有利用的现实意义, 特别是亚洲中部干旱区, 历史悠久的灌溉农业一直依赖高山冰雪融水。冰川融水是发源高山的诸多河流的重要补给来源, 随着上世纪 80 年代全球变暖加剧, 有关冰川供给水源的能力以及与冰川有关的灾害和气候变异方面的信息显得越来越重要<sup>[1, 2]</sup>。因此, 获得冰川变化的准确信息, 研究气候变暖对冰川水资源的变化, 对于干旱区水资源的可持续开发和利用及生态环境的改善与促进经济发展都具有重要意义。

## 1 研究区域自然概况

本文的主要研究区域为新疆天山山区, 天山山脉横亘于新疆中部, 北部为阿尔泰山, 南部为昆仑山 - 阿尔金山。三大山系之间为准噶尔盆地和塔里木盆地, 构成“三山两盆”的地貌基本轮廓<sup>[3]</sup>。三大山脉山势巍峨、山体宽广, 山脊至盆地边缘的平原高差悬殊, 北部阿尔泰山相差 2000 ~ 3000m 甚至更多, 南部昆仑山相差 5000 ~ 6000m 及以上, 中部的天山山脉界于其间。高大的山脉为拦截深入内陆的空中水汽创造了有利的条件, 拦截和抬升作用使山区形成远大于平原的降水量, 宽广的山区汇集了大量的降水形成众多的河流。并且, 随着海拔的升高, 气温降低, 蒸发减少, 特别是 3500 ~ 5000m 以上的高山地区, 常年气温处于 0 以下, 为永久冻土带, 降雪得以长期积聚, 形成永久积雪和冰川。西藏和新疆是我国冰川面积最大的地区, 新疆境内冰川 26358km<sup>2</sup>, 主要集中在天山、喀喇昆仑山和昆仑山一带。其中, 天山山区冰川面积和冰川储量分别为 9195.6km<sup>2</sup> 和 10106.7km<sup>3</sup>, 约占新疆冰川面积的 34.88%, 约占我国冰川面积的 15.

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2006 - 9 - 27。

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3 - SW - 229) 与中国气象局沙漠气象基金项目 (sqj2005002) 资助。

作者简介: 蓝永超 (1957 - ), 男 (汉族), 四川资阳人, 研究员, 主要从事全球变化、水文水资源与河川径流变化方面的研究工作。

E - mail: lyc@ns.lzb.ac.cn

68%<sup>[4]</sup>。

2 新疆冰川资源及其分布状况

表 1 新疆境内各山系冰川数量及冰川融水量<sup>[4]</sup>

Tab 1 The melt runoff from glaciers in the mountain system in the Xinjiang

| 山区     | 分区        | 流域                 | 冰川                 | 冰川          | 河流                                | 冰川                                | 冰川融水     | 冰川融水                   | 冰川                                |           |
|--------|-----------|--------------------|--------------------|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|------------------------|-----------------------------------|-----------|
|        |           | 面积                 | 面积                 | 覆盖度         | 径流量                               | 融水量                               | 补给比重     | 模数                     | 储量                                |           |
|        |           | (km <sup>2</sup> ) | (km <sup>2</sup> ) | (%)         | (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | (%)      | (l/s km <sup>2</sup> ) | (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) |           |
| 北疆     | 阿尔泰山      | (含木斯岛岭北坡)          | 52730              | 290. 51     | 0. 55                             | 106. 84                           | 3. 643   | 3. 41                  | 95                                | 164. 22   |
|        | 天山        | 西北准噶尔内流区           | 30440              | 2091. 55    | 6. 87                             | 55. 69                            | 115. 111 | 27. 13                 | 55                                | 1298. 86  |
|        |           | 伊犁河流域区             | 47926              | 2022. 66    | 4. 22                             | 156. 27                           | 26. 41   | 16. 90                 | 99                                | 1421. 79  |
| 南疆     | 东部散 小计    |                    |                    | 411. 37     |                                   | 34. 43                            | 4. 134   | 12. 01                 | 75                                | 200. 93   |
|        | 流内 其 天山北坡 |                    |                    | 158. 64     |                                   | 19. 45                            | 1. 53    | 7. 86                  | 73                                |           |
|        | 流区 中 天山南坡 |                    |                    | 252. 73     |                                   | 14. 98                            | 2. 60    | 17. 38                 | 78                                |           |
|        | 西南塔里木内流区  |                    | 82423              | 4670. 01    | 5. 7                              | 154. 09                           | 50. 52   | 32. 80                 | 82                                | 7185. 07  |
|        |           |                    |                    | (6930. 87)  |                                   |                                   | (74. 43) | (48. 30)               | (81)                              |           |
|        | 帕米尔山区     |                    |                    | 2892. 87    |                                   | 55. 19                            | 16. 31   | 29. 55                 | 43                                | 2487. 30  |
|        | 喀喇昆仑山     |                    |                    | 12784. 42   |                                   | 163. 79                           | 75. 84   | 46. 3                  | 45                                | 14365. 32 |
|        | 昆仑山北坡     |                    |                    | (13383. 97) |                                   |                                   | (80. 71) | (49. 3)                | (46)                              |           |
|        | 羌塘高原      |                    | 57878              | 1194. 88    | 2. 06                             | 16. 15                            | 6. 535   | 40. 5                  | 41                                | 1194. 51  |
|        | 新疆总计      |                    | 710000             | 26357. 7    | 3. 7                              | 742. 45                           | 198. 5   | 26. 7                  | 57                                | 28318. 0  |
|        |           |                    | (29228. 1)         |             |                                   | (227. 3)                          | (30. 6)  | (59)                   |                                   |           |
| 天山合计   |           | 271000             | 9195. 6            | 3. 4        | 400. 48                           | 96. 18                            | 24. 0    |                        |                                   | 10106. 7  |
|        |           |                    | (11456. 5)         |             |                                   | (120. 09)                         | (30. 0)  |                        |                                   |           |
| 天山北坡小计 |           | 117000             | 4272. 85           | 3. 7        | 231. 41                           | 43. 05                            | 18. 6    |                        |                                   | 2795. 2   |
| 天山南坡小计 |           | 154000             | 4922. 74           | 3. 2        | 169. 07                           | 53. 124                           | 31. 4    |                        |                                   | 7311. 1   |
|        |           |                    | (7183. 6)          |             |                                   | (77. 03)                          | (45. 6)  |                        |                                   |           |
| 北疆合计   |           | 202000             | 4563. 36           | 2. 3        | 338. 25                           | 46. 69                            | 13. 8    |                        |                                   | 2959. 42  |
| 南疆合计   |           | 508000             | 21794. 3           | 4. 3        | 404. 2                            | 151. 81                           | 37. 6    |                        |                                   | 25358. 23 |
|        |           |                    | (26446. 7)         |             |                                   | (180. 59)                         | (44. 6)  |                        |                                   |           |

注：1. 括弧中的数字包括流域国外部分的面积、托什干河流域上游国外部分冰川面积缺,估计不大,尚未统计在内；2. 表中流域面积指山区流域面积,河流径流量指有冰川的河流的径流量。

由表 1 可见,新疆境内的昆仑山、喀喇昆仑山冰川面积最大,冰川储量也最大;其次是天山山区;再其次是帕米尔山区;阿尔泰山区冰川面积最小。天山南坡的冰川面积 (包括昆马力克河上游境外的冰川)和冰川储量分布比北坡大 68%和多 1. 62 倍。新疆的冰川主要分布于天山中部、帕米尔山区、喀喇昆仑山区和昆仑山区,它们在环绕塔里木盆地的山脊线上约呈 C 字形分布。天山的托木尔峰地区,喀喇昆仑山的乔戈里峰地区和昆仑山的慕士塔戈峰地区是新疆的三大冰川作用中心。天山的托木尔峰冰川区,年降水量在 900mm 以上,在我国境内发育的冰川面积为 2808. 99km<sup>2</sup>,约占境内天山冰川总面积的 30. 5%,是天山最大的冰川作用中心。在乔戈里峰地区发育的冰川面积为 4650km<sup>2</sup>,占我国境内喀喇昆仑山冰川总面积的 95%,是世界上最大的山岳冰川作用中心。昆仑山区约有 70%的冰川集中分布在其西部的喀拉喀什河上游和克里雅河上游之间。玉龙喀什河源头的慕士峰发育冰川 4199. 42km<sup>2</sup>,是昆仑山最大的冰川作用中心<sup>[4-7]</sup>。

3 天山山区冰川面积的变化

3.1 乌鲁木齐河源一号冰川变化

冰川观测包括一号冰川物质平衡、冰川表面运动速度、冰川末端变化和冰川面积变化等。始于 1959 年,1967—1979 年因文革而中止,1980 年起恢复观测至今。冰川末端变化通过对冰舌末端距冰川外基准点距离的测量获取。冰川面积的计算主要依照航片与地面摄影照片资料。1993 年,一号冰川分离为两条独立的冰川,对其末端及面积变化的观测也分开进行。一号冰川自 60 年代有观测记录以来一直处于退缩状态 (表 2),东西支冰舌自 1993 年完全分离,成为两支独立的冰川,期间共退缩 139. 72m,平均每年退缩 4. 5m。1993 年至 2001 年东支年退缩量为 3. 7m;西支为 5. 7m。东支末端年退缩量较小,而且变化不大

原因可能是由于冰舌表碛覆盖所致。西支 1999—2001年达到创纪录高值 (6 92m、6 95m)明显是高温的反应<sup>[8]</sup>。

表 2 天山乌鲁木齐河源一号冰川冰舌末端变化

Tab 2 The changes of the ice tongue of No. 1 glacier in the riverhead region of Urumqi River in the Tianshan Mountain

| 时间            |  | 后退长度 (m) | 时间            |  | 后退长度 (m)    |
|---------------|--|----------|---------------|--|-------------|
|               |  |          |               |  | 东支 西支       |
| 1962.9~1973.8 |  | -65.6    |               |  |             |
| 1973.8~1980.8 |  | -22.99   | 1993.9~1994.8 |  | -4.85 -6.75 |
| 1980.8~1981.8 |  | -4.83    | 1994.8~1995.8 |  | -3.95 -6.17 |
| 1981.8~1982.8 |  | -2.06    | 1995.8~1996.8 |  | -3.40 -4.60 |
| 1982.8~1986.8 |  | -14.3    | 1996.8~1997.8 |  | -3.65 -4.80 |
| 1986.8~1987.8 |  | -3.68    | 1997.8~1998.8 |  | -3.47 -4.47 |
| 1987.8~1988.8 |  | -3.80    | 1998.8~1999.8 |  | -3.41 -4.85 |
| 1988.8~1989.8 |  | -5.10    | 1999.8~2000.8 |  | -3.40 -6.92 |
| 1989.8~1990.8 |  | -3.57    | 2000.8~2001.8 |  | -3.10 -6.95 |
| 1990.8~1991.8 |  | -6.51    |               |  |             |
| 1991.8~1992.8 |  | -3.44    |               |  |             |
| 1992.8~1993.8 |  | -3.84    |               |  |             |

表 3 天山乌鲁木齐河源一号冰川面积变化

Tab 3 The changes of the ice area of No. 1 glacier in the riverhead region of Urumqi River in the Tianshan Mountain

| 时间      | 面积 (km²)                     |
|---------|------------------------------|
| 1962.8  | 1.950                        |
| 1964.10 | 1.941                        |
| 1986.8  | 1.840                        |
| 1992.8  | 1.833                        |
| 1994.8  | 1.742 (其中,西支 1.115;东支 0.627) |
| 2000.8  | 1.733 (其中,西支 1.111;东支 0.622) |

一号冰川 (位于天山北麓东端乌鲁木齐河源头)的面积亦呈加速减小趋势 (表 3)。其中 1962 - 1992 年这 30年间冰川面积减少 0.12km<sup>2</sup>,与 1992 - 2001年这 9年间减少的 (0.10km<sup>2</sup>)几乎相同。冰川面积减少除了气候原因以外与东西支冰川分离之后末端有效消融面积增大可能也有关系。

3.2 乌鲁木齐河流域

乌鲁木齐河全流域冰川变化是通过两次航空摄影测量成图对比方法获取的,这两次航空摄影分别于 1964和 1992年进行的。因此,利用这两次摄影成图可量算出 1964 - 1992年间的 28年中流域各条冰川长度、面积和冰储量变化的完整资料<sup>[8,9]</sup>。

乌鲁木齐河流域冰川长度、面积和冰储量在 1964 - 1992年间的 28年中均处于减小状态,包括乌 - 1号冰川在内的全流域 155条冰川平均末端退缩了 97.6m,冰川总面积减小量为 6.64km<sup>2</sup>;冰川面积缩小量占整个流域 1962年时冰川面积的 13.8%。而在有冰川储量量算结果的 124条冰川中,冰厚度平均减薄 5.8m,对应的冰川储量减小量达 2.7 ×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,减少的冰储量占 1964年相应冰储量的 15.8%。

3.3 艾比湖水系—四棵树河流域

据刘潮海等<sup>[10]</sup>的研究,位于北天山西段的四棵树河,源于天山的博罗克努山北坡。该流域发育有冰川 364条,面积 336.25km<sup>2</sup>。选择其中的冬都郭勒、哈夏廷郭勒、东都郭勒和西白提四条山地冰川流域的 30条冰川,利用航空像片对比成图方法,获得了这些冰川 1962 - 1990年的变化资料 (表 4)。

在统计的 30条冰川中,1条冰川 (5Y472G8)向前推进了 35m,年平均仅 1.2m。这种状态不是区域气候变化所引起,可能与地形条件影响的积累量重新分配有关。另外,还有 3条冰川 (5Y742C24、5Y742F51和 5Y742F52)处于稳定状态,其余冰川均在后退,面积缩小和冰储量减少,冰面高程下降。

表 4 天山四棵树河流域 1962 - 1990年间冰川变化<sup>[10]</sup>

Tab 4 The change of glacier in the Four - trees River Basin in the Tianshan Mountain during the 1962 and 1990

| 流域名称  | 冰川  | 冰川末端变化 |        |      | 冰川面积变化                |         |                    |      |
|-------|-----|--------|--------|------|-----------------------|---------|--------------------|------|
|       | 数量  | 变化量    | 年平均率   | 变率   | 面积 (km <sup>2</sup> ) |         | 变化量                | 变化率  |
|       | (条) | (m)    | ( m/a) | (%)  | 1962                  | 1990    | (km <sup>2</sup> ) | (%)  |
| 冬都郭勒  | 6   | - 170  | - 6. 1 | 4. 8 | 13. 504               | 13. 076 | - 0. 428           | 3. 2 |
| 哈夏廷郭勒 | 10  | - 131  | - 4. 7 | 5. 7 | 39. 988               | 38. 198 | - 0. 790           | 2. 1 |
| 东都郭勒  | 11  | - 153  | - 5. 4 | 5. 0 | 27. 705               | 26. 698 | - 1. 007           | 3. 6 |
| 西白提   | 3   | - 131  | - 4. 7 | 4. 1 | 22. 018               | 21. 566 | - 0. 452           | 2. 1 |
| 总 计   | 30  | - 140  | - 5. 0 | 4. 9 | 102. 215              | 99. 538 | - 2. 677           | 2. 6 |

3.4 伊犁河—喀什河流域

喀什河是伊犁河最北一支流,源于博罗克努山南坡,与前述的四棵树河相对应。该流域发育有冰川 551条,面积 421.60 km<sup>2</sup>。选择喀什河的阿勒沙郎、吐鲁更恰干、阿尔桑萨依、特洼萨依和孟克德萨依五条山地冰川流域的若干代表性冰川,用航片对比成图法,获得了这些冰川 1962 - 1990年间的变化资料。喀

什河测量的 64 条冰川,全部后退,面积缩小和冰储量减少,冰川平均后退 149 m,变化率为 7.0%,面积缩小了 4 809 km<sup>2</sup>,约为 1962 年冰川面积的 3.5%<sup>[11,12]</sup>。

### 3.5 阿克苏河—台兰河流域

台兰河流域位于天山最高峰托木尔峰(海拔 7435.3 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为 1324 km<sup>2</sup>,流域最高点为托木尔峰,最低点为台兰水文站(海拔 1550 m)。台兰河流域共发育现代冰川 115 条,冰川总面积 431 km<sup>2</sup>,冰川储量 73 132 km<sup>3</sup>,平均冰川雪线海拔 4290 m。流域内长度超过 10 km 的冰川有 4 条,总面积达 307.7 km<sup>2</sup>,占流域冰川总面积的 71.2%。西台兰冰川源于天山最高峰“托木尔峰”(海拔 7435.3 m),面积 108.15 km<sup>2</sup>,长 22.8 km,是一条树枝状山谷冰川,冰川下部被厚层表碛所覆盖。1942 年前,东、西台兰冰川相连,1978 年再次测量时发现,西台兰冰川已与东台兰冰川脱离。70 年代中期,中国科学院登山科考队利用卫星照片实地判读方法,测得 1942 - 1976 年西台兰冰川后退 600 m,1997 年再次对该冰川的冰舌部分进行摄影测量,发现该冰川仍处在较强烈的后退之中,面积仍在缩小<sup>[13-15]</sup>。

### 3.6 天山开都河流域

通过 GIS 集成长时间序列多源遥感数据,采用冰川末端变化和面积变化相结合的监测方法,获得了比较准确的近 40 年天山冰川的动态变化信息<sup>[16]</sup>。从 1963 - 1977 年,研究区八条冰川中的四条前进,两条后退,冰川以前进为主;从 1977 - 1986 年,八条中的四条冰川后退,其他四条保持稳定,冰川以后退为主,但后退的冰川主要是那些在 1963 - 1977 年间前进的冰川;从 1986 - 2000 年,八条冰川中的七条后退,只有一条保持稳定,这一时期冰川后退速度很快并具有普遍性,冰川后退速度达 10 - 15 m/a。在过去的 40 年中,冰川面积由 1963 年的 5479.0 hm<sup>2</sup> 减少到 2000 年的 4795.4 hm<sup>2</sup>,达 12.5%,且主要发生在近 15 年,冰川加速融化与上世纪 80 年代开始的全球变暖具有很强的一致性。

从目前中国其他地区利用遥感技术监测的冰川结果来看,上世纪 60 年代到上世纪末冰川变化都以退缩为主,但区域差异较大。从天山的情况来看,陈建明等<sup>[17]</sup>研究认为乌鲁木齐河流域 1964 - 1993 冰川面积减少了 13.8%,刘时银等<sup>[18]</sup>认为从 1962 - 1990 天山西部四棵树河和喀什河冰川面积退缩了 2.6% ~ 3.5%,李忠勤等<sup>[8]</sup>根据实测数据研究认为 1962 - 2000 乌鲁木齐河 1 号冰川面积减少了 11.0%。

分析表明<sup>[18,19]</sup>,1963 - 2000 年天山山区冰川面积平均减少 12.5%,这个数字略高于乌鲁木齐河 1 号冰川。这可能是由于乌鲁木齐河 1 号冰川面积变化只考虑一条山谷冰川,而这里考虑的是新疆所有的冰川。由于新疆地区冰川类型较多,其中面积较小的雪原和小冰川更容易萎缩,而乌鲁木齐河 1 号冰川是一个规模较大相对比较稳定的山谷冰川,因此,从统计数字上研究区冰川退缩的幅度略大于乌鲁木齐 1 号冰川是可以理解的,如果考虑整个流域的实际情况,冰川退缩的速度应该和乌鲁木齐河流域相当。

## 4 冰川消融及冰川径流

由于 20 世纪的冰川退缩,特别是 20 世纪 80 年代以来的冰川退缩,我国冰川上储存的固体水资源已全面亏损。以最近的一些研究表明<sup>[20]</sup>,20 世纪下半叶以来,由于冰川退缩造成冰川水资源的净损失量估计最大可达 5869.24 亿 m<sup>3</sup>。这正好相当于 10 条黄河的水量。这个亏损数对于干旱的西北地区是一个重要的信号。这一信号有它的短期意义,也有它的长期意义;有它的正面意义,也有它的负面影响。其短期意义是由于冰川的强烈退缩和冰川储存水资源的短期内大量释放,使得西北地区大部分冰川补给河流在近期和不远的将来,径流量仍然增加。但其长远意义确是严重的。随着冰川的不断退缩和冰川储存水资源的长期缺损,最终会出现一个冰川径流量由现在的逐渐增加达到顶峰后转入逐渐减少的临界点,此后冰川径流的减少会逐渐加剧,直到冰川完全消失,冰川融水径流完全消失。现在就准确判断这一临界点何时出现,还为时过早,因为研究基础还比较薄弱。同时已有的发现也确实说明,冰川的退缩强度在不同的地区有很大差异。冰川与冰川融水对于新疆的水资源具有举足轻重的作用。以塔里木盆地为例,大部分河流的冰川融水补给的比例在 30% ~ 80%<sup>[7]</sup>。随着全球平均气温的上升,新疆的冰川正处于消融和萎缩之中,大部分冰川物质平衡为负<sup>[14]</sup>。

### 4.1 冰川融水径流的变化状况

根据理论分析和乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡及平衡线高度对气候变化的敏感性分析的监测结果表明<sup>[21,22]</sup>,冰川物资平衡和零平衡线的波动主要取决于温度变化,与降水关系并不太大。所以,在气候

变暖的情况下,新疆的冰川将持续消融。另外,根据英国气候研究所气候预测中心发布的 HadCM2对 21 世纪全球气温的模拟数值并结合我国冰川分布区<sup>[23]</sup>的实际情况,预计亚大陆型冰川区到 2030 年将升温 0.9 ,到 2070 年将升温 2.0 ,到 2100 年将升温 3.0<sup>[24]</sup>。根据小冰期盛时以来升温与冰川面积减少的经验关系,推测到 2030 年冰川体积或面积将减少 15%,到 2070 年将减少 32%,到 2100 年将减少 48%。其中不确定性可能界于 30% ~ 67%之间,即冰川面积减少 1800 ~ 4000km<sup>2</sup>,相当于冰储量减少 1690 ~ 3760km<sup>3</sup>,它将对西部干旱地区的水资源和水循环产生重大影响<sup>[24]</sup>。新疆“三山夹两盆”的特定地形地貌条件和干旱气候背景形成了该区域特殊的水循环模式,其盆地内的水循环过程可概括为冰川(固态水)-地表水地下水(液态水)-大气水(气态水)之间的循环平衡。在新疆内部水循环模式中,一个极为重要的变化就是大量冰川的加速消融,它是导致近十余年来新疆部分河流、湖泊、地下水增加的一个关键因素。

4.2 天山山区代表性河流冰川融水径流变化

对新疆河流径流量近几十年变化的分析表明<sup>[25,26]</sup>,新疆径流增加较明显的河流主要集中在天山地区,尤其是天山南坡。天山南坡冰川储量(7311.1 ×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>)约为北坡冰川储量(2795.2 ×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>)的 2.6 倍,冰川融水占河流径流的补给比重(31.4%)也大于北坡(18.1%)。在这些河流中尤以雨雪混合补给型的小河流增幅最为明显。与之相比,在北昆仑山地区,冰川消融不是很明显,所以河流径流量变化不大。由于缺乏山区气象观测资料,冰川消融对径流增加的具体贡献还难以予以准确的评价。但观测事实说明,冰川消融是近十余年的新疆部分河流径流增加的重要原因之一。

4.2.1 天山乌鲁木齐河源一号冰川融水径流变化

冰川融水径流量(冰川区径流扣除裸露山坡径流)变化是冰川对气候变化响应的重要综合性指标。杨针娘<sup>[27]</sup>利用水量平衡法推算出一号冰川 1958 - 1987 年融水径流量。推算中使用的冰川区年降水量为大西沟气象站物质平衡年(头一年 9 月到第二年 8 月)降水量,并对其进行了 25%的上浮修正。冰川区径流量使用一号冰川水文站实测资料,其中 1966 - 1979 年为推算资料。冰川面积使用的是 1962 年 8 月测定的 1.95km<sup>2</sup>。将上述推算从 1987 年延长到 2001 年。为使推算结果具有一致性,使用了相同的资料来源和处理方法。其中冰川面积选取 1986 - 2000 年的平均值 1.79km<sup>2</sup>。占控制流域面积 3.34km<sup>2</sup>的 53.6%。

表 5 列出了两次推算的(1958 - 2001 年)乌鲁木齐河源 1 号冰川融水径流量深。乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡观测表明,1959 - 1985 年平均物质平衡值为 - 94.5mm/a,而 1986 - 2000 年增至 - 358.4mm/a,即较前段增大了 2.8 倍<sup>[8]</sup>。相应的冰川融水径流也有大幅度增加,按杨针娘<sup>[27]</sup>计算资料,1958 - 1985 年乌鲁木齐河源 1 号冰川平均融水径流深为 508.4mm/a,而 1986 - 2001 年则为 936.6mm/a,较前期增加 84.2%。由此可见,20 世纪 80 年代以来的快速升温,促使冰川融水径流量迅速增大(图 1 和图 2)。

表 5 乌鲁木齐河一号冰川融水径流深变化<sup>[8]</sup>

Tab 5 The changes of the depth of melting runoff from glacier in the riverhead region of Urumqi River in the Tianshan Mountain

| 冰川融水        |      | 冰川融水        |      | 冰川融水        |        | 冰川融水        |        |
|-------------|------|-------------|------|-------------|--------|-------------|--------|
| 年 代         | 径流深  | 年 代         | 径流深  | 年 代         | 径流深    | 年 代         | 径流深    |
|             | (mm) |             | (mm) |             | (mm)   |             | (mm)   |
| 1958 - 1959 | 323  | 1969 - 1970 | 492  | 1980 - 1981 | 676    | 1991 - 1992 | 400.4  |
| 1959 - 1960 | 316  | 1970 - 1971 | 327  | 1981 - 1982 | 424    | 1992 - 1993 | 1009.2 |
| 1960 - 1961 | 576  | 1971 - 1972 | 224  | 1982 - 1983 | 427    | 1993 - 1994 | 1103.8 |
| 1961 - 1962 | 849  | 1972 - 1973 | 751  | 1983 - 1984 | 394    | 1994 - 1995 | 843.4  |
| 1962 - 1963 | 711  | 1973 - 1974 | 877  | 1984 - 1985 | 921    | 1995 - 1996 | 629.7  |
| 1963 - 1964 | 522  | 1974 - 1975 | 440  | 1985 - 1986 | 1480   | 1996 - 1997 | 1364.7 |
| 1964 - 1965 | 468  | 1975 - 1976 | 122  | 1986 - 1987 | 446    | 1997 - 1998 | 1405.8 |
| 1965 - 1966 | 599  | 1976 - 1977 | 858  | 1987 - 1988 | 1048.3 | 1998 - 1999 | 1300.0 |
| 1966 - 1967 | 294  | 1977 - 1978 | 583  | 1988 - 1989 | 632.6  | 1999 - 2000 | 835.8  |
| 1967 - 1968 | 384  | 1978 - 1979 | 435  | 1989 - 1990 | 446.5  | 2000 - 2001 | 1236.6 |
| 1968 - 1969 | 317  | 1979 - 1980 | 417  | 1990 - 1991 | 803.0  |             |        |

4.2.2 塔里木河流域冰川融水径流变化

塔里木盆地内陆流域总面积 10748.10km<sup>2</sup>,冰川融水年径流量达 150 ×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,约占流域年地表总径流量的 40%,是本区最为重要的水资源<sup>[4,13]</sup>。近 40 年来本区冰川物质平衡主要呈负平衡状态:帕米尔和喀喇昆仑山的冰川流域年物质平衡约为 - 150mm,天山南坡流域在 - 300mm,昆仑山流域冰川基本稳定。

1982/1983年度是天山冰川物质平衡发展的一个突变点,其后冰川消融加剧,前后均值相差 - 250mm,冰川融水和洪水峰值都呈明显增加的趋势<sup>[13]</sup>。

以发源于天山最高峰托木尔峰(海拔 7435.3m)南坡的台兰河流域为例,台兰河水文站控制的流域面积为 1324km<sup>2</sup>,流域最高点为托木尔峰,最低点为台兰水文站(海拔 1550m)。台兰河流域共发育现代冰川 115 条,冰川总面积 431km<sup>2</sup>,冰川储量 73.132km<sup>3</sup>,平均冰川雪线海拔 4290m。流域内长度超过 10km 的冰川有 4 条,总面积达 307.7km<sup>2</sup>,占流域冰川总面积的 71.2%,流域最大冰川为琼台兰冰川,长度为 21.4km,冰川面积达 165.4km<sup>2</sup>。流域内冰川末端最低海拔 3080m,最高海拔 5800m,冰川平均面积 3.75km<sup>2</sup>,冰川覆盖度 32.6%。台兰河流域 1957 - 2000 年平均径流量为  $7.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,平均径流深 566mm<sup>[13]</sup>。

敏感性分析表明,年平均气温变化 1℃,冰川物质平衡变化约 300mm,引起的河流径流变化在台兰河可达 10%。在塔里木盆地周围中山带,年降水量与年气温变化呈正相关关系,年均气温变化 1℃将引起年降水量变化 200mm 左右,全球变暖将导致塔里木河流域山地降水增加。塔里木盆地近 40 年气温的变化具有升温的趋势,上升约为 0.3℃,升温主要是在冬、春季节,夏季小有降温,致使流域内冬季蒸发明显增加。冬春升温使得冰川冷储减少,冰温升高,夏季很短的升温都会使冰川大量消融,急剧的升温可能引起冰川洪水的发生,产生严重的灾害。

## 5 冰川水资源对气候变化的响应

随着气温升高,雪线上升,冰川表面消融加剧,融水量增加,与此同时,冰川末端因消融量超过冰川运动来的冰量,而出现后退,在气候大幅度变暖初期,冰川面上增加的消融量远远超过冰川末端后退而减少的消融量,因此,冰川融水量增加,但随着时间演替,冰川变薄后退加速,到达某种程度,即临界年(年代)冰川面积缩减损失的消融量超过气温升高所增加的面上消融量时,冰川融水径流量随着下降,迅速降至升温前的融水径流初始值,最后将因冰川的消亡,而冰川融水径流停止。冰川变化是积累与消融平衡结果,冰川上游降雪积累得到的冰量通过冰川运动输送到消融区以至冰川末端,因此冰川的变薄后退是消融量超过冰川运动来冰量的结果。降水或积累增加,可增强动力作用,而消融增加则可减弱动力作用。

根据 5 条冰川(西台兰冰川、乌鲁木齐河 1 号冰川、老虎沟 12 号冰川、七一冰川、水管河 4 号冰川)物质平衡对气候的响应分析<sup>[28-31]</sup>,当年降水量不变而夏季平均气温升高 1℃,冰川面积可能缩小量达 40%,这缩小的冰川面积储量即用来增加河流径流量。但实际冰川融水量并不与冰川面积成正比,当气温大幅度变暖初期,冰川面上增加的消融量远超过冰川末端后退而减少的消融量。只有当冰川厚度严重变薄,末端迅速后退减少的消融量超过面上增加消融量时,冰川融水径流量将迅速下降。现在气温正值大幅度升温的初期,融水量以增加为主。

以天山乌鲁木齐河一号冰川为例<sup>[8]</sup>,该冰川自小冰期结束以来,一直处于缓慢退缩状态,1962 年实测冰川面积 1.95km<sup>2</sup>,经过 30a 后至 1992 年实测冰川面积减少了 0.12km<sup>2</sup>,此期间冰川末端退缩 140m,平均 4.5m/a。应用数字高程模型(DEM)可视化计算方法计算的 1964 - 1986 年间,一号冰川冰面高度降低了 10.8m,体积减少 2053 万 m<sup>3</sup>,即年平均亏损 93 万 m<sup>3</sup>。据海拔 3650m 处的大西沟气象站资料,20 世纪 80 - 90 年代升温迅速,可能达 1℃左右,1986 - 2001 年均降水量 488mm,较 1958 - 1985 年平均值 426mm 高出 12.7%。一号冰川冰川上应用插花杆测量的物质平衡,1959 - 1985 年间平均为 -94.5mm/a,而 1986 -

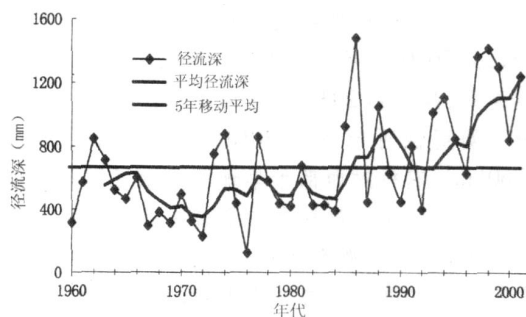


图 1 一号冰川融水径流深变化趋势<sup>[8]</sup>

Fig 1 The change trend of the depth of melting runoff from Na 1 glacier in the riverhead region of Urumqi River in the Tianshan Mountain

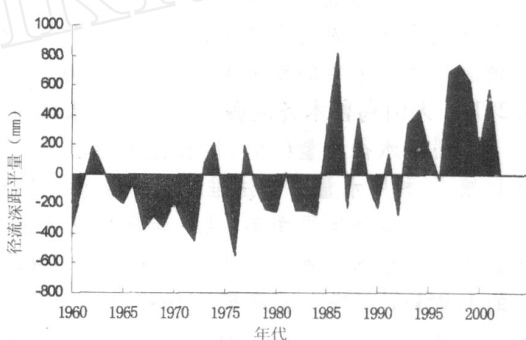


图 2 一号冰川融水径流深距平<sup>[27]</sup>

Fig 2 The change on the departure on depth of melting runoff from Na 1 glacier in the riverhead region of Urumqi River in the Tianshan Mountain

2000 年增至  $-358.4\text{ mm/a}$ , 即较前阶段多了 2.8 倍 (图 3)。相应冰川融水径流深也有大幅度增加, 1958 - 1985 年一号冰川平均融水径流深为  $508.4\text{ mm/a}$ , 而 1985 - 2001 年按同样方法计算为  $936.6\text{ mm/a}$  (图 4)。由此可知, 20 世纪 80 年代以来的快速升温, 促使冰川消融猛烈扩大。

对流域冰川物质平衡变化及其对径流的影响的研究结果表明, 1957 - 2000 年台兰河流域平均冰川物质平衡为  $-287\text{ mm/a}$ , 累计冰川物质平衡水当量为  $-12.6\text{ m}$ ; 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  $-168\text{ mm/a}$ , 1981 - 2000 年下降为平均  $-445\text{ mm/a}$ ; 如果以气候转型的 1986 年为界, 1957 - 1986 年平均台兰河流域冰川积累  $1314\text{ mm/a}$ , 消融量  $1527\text{ mm/a}$ , 冰川物质平衡为  $-213\text{ mm/a}$ , 而 1987 - 2000 年冰川积累为  $1361\text{ mm/a}$ , 消融量  $1808\text{ mm/a}$ , 冰川物质平衡为  $-447\text{ mm/a}$ , 即积累量平均增加  $47\text{ mm/a}$ , 冰川消融增加  $281\text{ mm/a}$ , 冰川物质平衡前后相差  $234\text{ mm/a}$ ; 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 年的平均年径流量为  $7.512\text{ 亿 m}^3$ , 年径流量在 1982 年后急剧增加, 1999 年的径流量比 1981 年增加了  $3.506\text{ 亿 m}^3$ , 即增加了 58%<sup>[14]</sup>。

根据敏感性分析<sup>[21]</sup>, 台兰河流域冰川物质平衡变化  $100\text{ mm}$ , 可引起流域平均径流深变化  $30\text{ mm}$  或径流量变化  $0.23\text{ 亿 m}^3$ 。44a 累计冰川物质平衡  $-12.6\text{ m}$ , 相当于额外补给河流径流量  $54.5\text{ 亿 m}^3$ ; 44a 来由于气温升高引起的冰川净消融  $-287.15\text{ m/a}$ , 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 年台兰河流域冰川消融对河流的额外净补给量占河流总径流量的 13%, 而 1987 - 2000 年冰川消融对河流的额外净补给量占河流总径流量达 23%。根据分析, 气温变化  $1^\circ\text{C}$ , 冰川物质平衡变化约  $300\text{ mm}$ , 河流径流变化在台兰河可达 16%。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, 冰川消融量还是加快, 冰川融水量持续增加。

6 结语

(1) 受全球气候变暖的影响, 上世纪 60 年代以来至本世纪初, 研究区域冰川的变化整体上以退缩为主。但不同年代冰川的进退表现出比较大的差异。一般来说, 从上世纪 60 - 80 年代, 从整体上来看冰川变化幅度较小, 冰川发生剧烈变化的时期主要发生在上世纪末的 15 年。

(2) 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, 随着气温升高, 雪线上升, 冰川表面消融加剧, 冰川融水量持续增加。因此, 气温变化是冰川变化的最直接的因素, 而冰川消融是近十余年的新疆部分河流径流增加的重要原因之一。

(3) 鉴于冰川和冰川水资源对于我国新疆等内陆干旱地区社会经济和生态环境的重要意义, 今后应进一步加强气候变化对冰川变化影响的观测和研究, 以便更好地预测气候持续变暖情景下冰川的变化, 通过对气候变化和冰川变化的研究, 揭示冰川水资源的变化特征与机制。

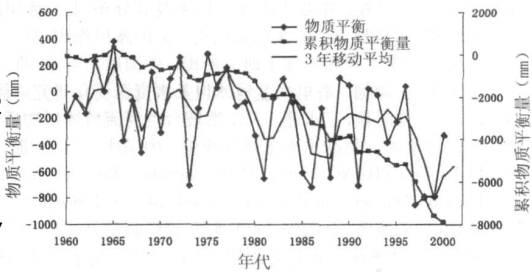


图 3 1959 年以来的冰川物质  
年平衡量及累积物质平衡量<sup>[8]</sup>  
Fig 3 The change of the glacier matter counterbalance  
and cumulating matter counterbalance  
in the riverhead region of Urumqi River in  
the Tianshan Mountainous since 1959

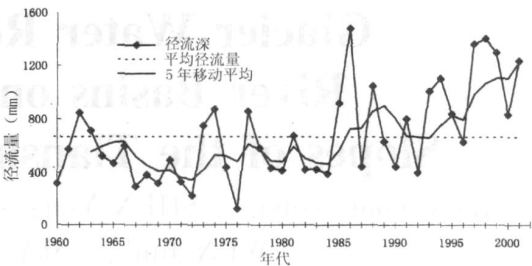


图 4 乌鲁木齐河源一号冰川融水径流变化曲线<sup>[8]</sup>  
Fig 4 The change of melting runoff from  
No. 1 glacier in the riverhead region of  
Urumqi River in the Tianshan Mountain

参考文献

[1] 施雅风. 中国冰川与环境 - 现在、过去和未来 [M]. 北京: 科学出版社, 2000, 9 ~ 224.  
[2] Mennis J L and Fountian A G A spatial- temporal GIS database for monitoring Alpine Glacier change [J]. Photogrametric Engineering & Remote Sensing, 2001, 67 (8): 967 ~ 975.  
[3] 新疆地理学会, 新疆地理手册 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1993, 84 ~ 94.  
[4] 新疆水利厅, 新疆水利学会, 新疆河流水文水资源 [M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1999, 333 ~ 429.  
[5] 袁玉江, 何清, 穆桂金. 天山山区近 40a 夏季降水及与南北疆的比较 [J]. 冰川冻土, 2003, 25 (3): 331 ~ 336.

- [6] 邓铭江,王世江,董新光,等. 新疆水资源及可持续利用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005,150~167.
- [7] 胡汝骥,姜逢清,王亚俊. 新疆冰雪水资源的环境评价[J]. 干旱区研究,2003,20(3):187~188.
- [8] 李忠勤,韩添丁,井哲帆,等. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40a 观测事实[J]. 冰川冻土,2003,25(2):117~123.
- [9] 中国科学院兰州冰川冻土研究所编. 中国冰川目录. 天山山区(东部散流内流区)[C]. 北京:科学出版社,1987.
- [10] 刘朝海,丁良福. 中亚天山冰川资源及其分布[J]. 冰川冻土,1995,17(3):193~202.
- [11] 刘海潮,谢自楚, M Б久尔盖约夫. 天山冰川作用[M]. 北京:科学出版社,1998,18~34.
- [12] 中国科学院兰州冰川冻土研究所编. 中国冰川目录. 天山山区(伊犁河内流区)[C]. 北京:科学出版社,1987.
- [13] 沈永平,王顺德. 塔里木盆地冰川及水资源变化研究进展[J]. 冰川冻土,2002,24(6):819.
- [14] 沈永平,刘时银,丁永建. 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[J]. 冰川冻土,2003,25(2):124~129.
- [15] 中国科学院兰州冰川冻土研究所编. 中国冰川目录. 天山山区(西南部塔里木内流区)[C]. 北京:科学出版社,1987.
- [16] L I Baolin, ZHANG Yichi, ZHOU Chenghu. Remote sensing detection of glacier changes in Tianshan Mountainous for the past 40 years[J]. Journal of Geographical sciences, 2004, 14(3):296~302.
- [17] 陈建明,刘朝海,金明燮. 重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测中的应用[J]. 冰川冻土,1996,18(4):331~336.
- [18] 刘时银. 冰冻圈变化趋势预测. 中国西部环境演变评估第二卷:中国西部环境变化的预测[C]. 北京:科学出版社,2002,166~473.
- [19] L IJ Chaozhai, KANG Ersi, L IJ Shiyin, et al Study on the glacier variation and its runoff responses in the arid region of Northwest China[J]. SCIENCE IN CHINA, 1999, 42(sup):64~72.
- [20] 沈永平,冰川. 北京:科学出版社. 2003,67~83.
- [21] 刘时银,丁永建,王宁练,等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川对气候变化的敏感性研究[J]. 冰川冻土,1998,20(1):9~13.
- [22] 高晓清,汤懋苍,冯松. 冰川变化与气候变化关系的若干探讨[J]. 高原气象,2000,19(1):9~15.
- [23] Loaciga H. A., Valdes J. B., Vogel R., et al. Global warming and the hydrologic cycle[J]. Journal of Hydrology, 1996, 174:83~127.
- [24] 冯思,黄云,许有鹏. 全球变暖对新疆水循环影响分析[J]. 冰川冻土,2006,28(4):500~505.
- [25] 施雅风,刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估[J]. 科学通报,2000,45(4):434~438.
- [26] 张国威,吴素芬,王志杰. 北气候环境转型信号在新疆冰川径流变化中的反映[J]. 冰川冻土,2003,25(2):183~186.
- [27] 杨钟娘. 中国冰川水资源[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1991,81~152.
- [28] 叶佰生,赖祖铭. 未来气候变暖条件下区域冰川的平衡态响应[J]. 科学通报,1992,37(19):1794~1797.
- [29] 叶佰生,施雅风. 天山不同规模山谷冰川及其径流对气候变化的响应过程[A]. 五届全国冰川冻土大会论文集(上)[C]. 兰州:甘肃文化出版社,1996,495~503.
- [30] 叶佰生,赖祖铭. 气候变化对天山伊犁河上游冰川径流的影响[J]. 冰川冻土,1996,18(1):29~36.
- [31] 叶佰生,韩添丁,丁永建. 西北地区冰川径流变化的某些特点[J]. 冰川冻土,1999,21(1):54~58.

# Changes of the Glaciers and the Glacier Water Resources in the Typical River Basins on the North and South Slopes of the Tianshan Mountains since 1960s

LAN Youg - chao<sup>1</sup>, SHEN Yong - ping<sup>1</sup>, WU Su - fen<sup>2</sup>, ZHONG Yin - jun<sup>3</sup>,  
WEN Jun<sup>1</sup>, MA Xiao - bo<sup>2</sup>, Hu Ze - yong<sup>1</sup>

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

2. Xinjiang Bureau of Hydrology and Water Resources, Urumqi 830000;

3. Xinjiang Institute of Water Conservancy, Urumqi 830000 China)

## Abstract

Glacier is a kind of "solid reservoir" build by nature, which occupies an important status in the composing of water resources. Xinjiang Uigur Autonomous Region is located in the inland arid region in the northwestern China, in which there are a large number of mountain glaciers. The glaciers and the melting runoff from the glaciers provide an reliable guarantee of water resources for the irrigated farming in the region. The changes of the glaciers and the melting runoff from the glaciers in Xinjian, especially in the Tianshan Mountain since 1960 were analyzed based on Chinese Glacier Catalogue and some others observation data of glaciers. The results showed The changes of the glaciers in Tianshan Mountain presented basically a cancrizans trend because of the impact of global warming since 1960. The glacier areas reduced averagely for 12% during the period from 1963 to 2000. But there were regional differencies due to the impact of geography position and physiognomy conditions of the different valley catchment areas. The runoff in most rivers which are supplied by melting runoff from glacier in the Tianshan Mountain presented an increasing trend along with the increase of melting runoff from glacier resulting by glacier inintense moving back.

**Key Words:** global warming; glacier; melting runoff from glacier