

doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0061

Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, *et al.* The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): Hydrological effect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 513–527. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 513–527.]

新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应

沈永平¹, 苏宏超², 王国亚³, 毛炜峰⁴, 王顺德⁵,
韩萍², 王宁练¹, 李忠勤¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州 730000; 2. 新疆水文水资源局, 新疆乌鲁木齐 830000;
3. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃兰州 730000; 4. 新疆气候中心, 新疆乌鲁木齐 830002;
5. 阿克苏水文水资源勘测局, 新疆阿克苏 843000)

摘要: 新疆是我国冰川、积雪资源最为丰富的地区, 冰川和积雪融水在水资源构成中占有重要的地位, 其对气候变化的响应使得河流水文过程发生明显的变化, 对新疆干旱区的水资源利用和管理产生重大影响. 新疆高山流域产流占地表径流的80%以上, 其中冰川和积雪融水径流在总径流中的比例可达45%以上, 积雪和冰川融水是河流的主要补给来源. 在新疆北部的阿尔泰山和天山北坡河流主要以融雪径流补给为主, 而在天山南坡、昆仑山、喀喇昆仑山和天山北坡的伊犁河流域的河流以冰川融水补给为主; 以融雪径流为主要的河流主汛期在春季到夏初, 而冰川融水补给的河流夏季是主汛期. 随着新疆气候向暖湿转变, 高山流域的水文过程对气候变暖和积雪增加产生明显的响应: 以积雪为主补给的河流, 水文过程对气候变暖的响应表现为最大径流前移, 夏季径流减少明显; 以冰川融水补给的河流, 径流响应表现为6–9月汛期径流量明显增大, 汛期洪水增多, 年流量增加. 由于不同补给类型河流的水文过程发生变化, 其相应下游的水资源供给和洪水安全管理产生了重大影响, 在水资源管理方面需要适应气候变化对水文过程的调整, 减缓气候变化对水资源安全的影响.

关键词: 积雪融水; 冰川融水; 气候变化; 水文过程; 新疆

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

0 引言

冰川和积雪是冰冻圈主要组成部分, 我国冰雪冻土分布广泛, 与社会经济发展有密切的关系^[1]. 冰冻圈由于对气候的高度敏感性和重要的反馈作用, 是影响全球和区域气候变化的重要因子, 也是对全球气候变化最为敏感的一个圈层. 受气候变化和人类活动的影响, 在我国西部地区冰雪变化引起的水文效应、环境效应、资源效应、生态效应、灾害效应和社会效应日趋显著, 对未来生态与环境安全和社会经济等将产生广泛和深刻的影响^[2]. 冰雪变化直接影响到我国西部及其相邻高亚洲地区的冰雪水资源利用、寒区生态环境安全和冰雪灾害发生

的程度与影响范围, 也关系到寒区的工程建设. 随着全球气候变暖, 近年来我国西部高山和高原的冰雪冻土灾害发生的频率也呈显著增加趋势, 影响范围逐渐扩大, 造成的损失也越来越大. 这些灾害正在对西部高山和高原及其相邻影响区的城镇和民族居住地以及重要国防干线的安全运营形成较大威胁, 冰雪变化带来的水资源安全、生态环境安全、自然灾害和工程建设等问题将会日益凸显, 迫切需要建立应对这些问题的策略和对策^[1–2]. 为此, 基于对中国西部冰川积雪变化影响的研究, 以我国西部的新疆地区为例, 对新疆冰川、积雪对气候变化的响应从5个方面进行描述, 包括冰川、积雪对气候变化响应的水文效应、灾害效应、资源效应、生

收稿日期: 2013-03-05; 修订日期: 2013-05-20

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951404; 2010CB951402); 国家自然科学基金项目(41271083; 41201062; 41271035)资助

作者简介: 沈永平(1961–), 男, 陕西西安人, 编审/研究员, 1985年在中国科学院兰州冰川冻土研究所获硕士学位, 现主要从事寒区水文与全球变化研究及科技期刊编辑. E-mail: shenyp@lzb.ac.cn

态效应和社会效应. 本文作为开篇主要从新疆冰雪变化引起的水文效应来展开, 这也是目前新疆气候变化对冰雪影响最为直观和影响最大的一个方面. 其他方面的研究成果总结将在以后陆续发表, 敬请关注.

1 新疆的冰川、积雪分布特征

根据《简明中国冰川目录》^[3], 新疆的冰川分布在阿尔泰山、天山、帕米尔、喀喇昆仑山和昆仑山, 包含在额尔齐斯河、准噶尔内流河、中亚细亚内流河和塔里木内流河等水系中, 共发育有冰川 18 311 条, 面积 24 721.93 km², 冰储量 2 623.4711 km³, 约占中国冰川总储量的 46.9%, 是中国冰川规模最大和冰储量最多的地区(表 1). 冰川在新疆水资源的构成中占有重要地位, 是该区工农业生产赖以发展的重要保证^[4]. 在干旱缺水的西北地区, 冰川水资源就是绿洲生命线, 哪里的山上有冰川, 哪里的山前平原就有绿洲发育^[5].

被天山、帕米尔、喀喇昆仑山和昆仑山环绕的塔里木河源区有三条国际河流, 即阿克苏河、叶尔羌河和喀什噶尔河以向心状地汇入塔里木河, 它们上游发育着数量多和规模大的冰川, 使该区实际利用的冰川水资源总量较中国境内的冰川数量多, 境外的冰川面积(3 461.94 km²)和冰储量(341.9687 km³)分别占塔里木河流域相应冰川总量的 19.5% 和 16.0%(表 2). 其中, 阿克苏河支流库马里克河发源于吉尔吉斯斯坦的中天山和托木尔-汗腾格里峰区, 在上游发育有数量众多和规模巨大的冰川^[6], 其中南伊内里切克冰川长 63.5 km, 面积 567.20 km², 是中低纬度长度超过 50 km 的 8 大冰川之一. 库马里克河境外的冰川条数(1 447 条)、面积(2 248.40 km²)和冰储量(228.4751 km³)分别占该

河相应冰川总量的 92.1%, 70.4% 和 46.0%. 阿克苏河另外一支流托什干河的上游也源于吉尔吉斯斯坦的中天山, 在其上游发育有 288 条冰川, 但冰川规模(258.30 km²)不大^[7]. 喀什噶尔河源于塔吉克斯坦共和国境内的西帕米尔, 其上游发育有 239 条冰川, 面积 345.70 km². 在叶尔羌上游克勒青河的克什米尔巴基斯坦实际控制区也有 142 条冰川, 其面积(609.54 km²)和冰储量(72.3721 km³)均较大.

新疆属干旱半干旱区, 地表水资源匮乏, 但

表 1 新疆冰川资源统计
Table 1 Glaciers resource in Xinjiang

流域名称	冰川条数 /条	冰川面积 /km ²	冰川储量 /km ³
艾丁湖	352	164.04	7.7212
庙尔沟等	94	88.69	4.9118
额尔齐斯河	403	289.29	16.3953
乌伦古河	13	3.91	0.0971
伊犁河	2 373	2 022.66	142.1791
喀拉湖	12	25.5	1.5336
天山北麓东段诸河	298	158.64	7.4598
天山北麓中段诸河	1 997	1 268.49	82.3403
艾比湖水系	1 104	823.06	47.546
和田河	3 555	5 336.98	578.7136
叶尔羌河	2 917	5 315.31	612.1036
喀什噶尔河	1 135	2 422.82	230.6202
阿克苏河	1 005	2 411.56	436.987
渭干河	853	1 783.86	258.2731
开孔河	832	474.98	23.2469
克里雅河诸小河	895	1 357.27	100.6561
车尔臣河诸小河	473	774.87	72.6864
合 计	18 311	24 721.93	2 623.471

表 2 塔里木河流域可利用的冰川数量统计(据刘潮海统计)

Table 2 Statistic of glaciers available in Tarim River basin (According to Prof. Liu Chaohai's data)

河流名称	冰川条数(条)			冰川面积 /km ²			冰储量 /km ³		
	国内	国外	总计	国内	国外	总计	国内	国外	总计
和田河	3 555		3 555	5 336.98		5 336.98	578.7136		578.7136
叶尔羌河	2 917	142	3 059	5 315.31	609.54	5 924.85	612.1036	72.3721	684.4757
喀什噶尔河	1 135	239	1 374	2 422.82	345.70	2 768.52	230.6202	26.6085	257.2287
阿克苏河	1 005	1 735	2 740	2 411.56	2 506.70	4 918.26	436.9870	242.9881	679.9751
渭干河	853		853	1 783.86		1 783.86	258.2731		258.2731
开孔河	832		832	474.98		474.98	23.2469		23.2469
总计	10 297	2 116	12 413	17 745.51	3 461.94	21 207.45	2 139.9444	341.9687	2 481.9131

季节性积雪水资源丰富。新疆隆冬时期积雪覆盖面积可达 $100 \times 10^4 \text{ km}^2$ 左右, 冬季雪贮量在全国是最丰富, 达 $181.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 水当量, 占全国冬季平均积雪贮量 $535.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的 33.9%^[8], 积雪对新疆水资源的重要性不言而喻。积雪作为重要的水文和气候变量, 其时空分布的变化对气候系统也会产生重要影响。新疆三山加两盆地的地貌格局使积雪分布具有鲜明的局地特征, 新疆的积雪分布总体呈自西向东、由北向南减少的特点^[9-10]。冬春季积雪主要分布在天山以北, 厚度一般在 16 cm 以上, 厚度最大的是在阿勒泰、塔城以及博格达峰地区, 可达到 30 cm 以上; 其次, 是天山山区北麓伊犁地区, 积雪深度也达到了 20 cm; 天山以南积雪深度比较浅薄, 大部分都在 10 cm 以下, 但在南疆西部的托什干河流域一带地区, 积雪深度达到了 20 cm 以上^[10-12]。新疆积雪的空间分布在山区和平原极不平衡, 山区集中了积雪的绝大部分, 统计新疆 1960 年代以来的积雪状况表明^[10], 新疆年平均积雪深度为 13.4 cm, 其中, 山区为 17.6 cm, 平原为 11.8 cm。

2 新疆水资源形成机理和气候变化特征

新疆位于欧亚大陆腹地, 在远离海洋和三山夹二盆的综合地理环境影响下, 形成了典型的内陆干旱、半干旱气候特征。河川径流主要来自山区降水和冰雪融水补给, 河川径流变化与气温、降水具有同步性, 河川径流有冰川和永久性积雪融水补给、季节性积雪融水补给、降雨补给、地下水的补给及各种组合的混合补给^[13-16]。中低山区主要为降雨补给, 中山带主要为季节性积雪融水补给, 高山带主要为冰川和永久性积雪融水补给, 不同类型的河流表现为不同的径流特性与洪水特性。新疆山区年降水量为 $2\,062 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总降水的 81.1%, 经过山区调蓄与转化, 产生了 $798.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的水资源, 其余水量以各种蒸散发($1\,263 \times 10^8 \text{ m}^3$)形式返回空中, 这就是山区水资源形成过程^[16]。山区河川径流总量加上平原区地表产水量组成 $879 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的河川径流总量, 流入平原区的河川径流量除流出境外的 $229.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的水量外, 其余水量通过各种形式转化, 最终以各种蒸发形式返回空中。新疆全区有 570 多条河流, 大部分流程短, 水量小。年径流大于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的有 18 条, 占河流总数的 3%, 径流量 $526 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总径流量的 59.8%; 年径流不足 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的有 487 条, 占河流总数的

85%, 水量仅有 $83 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总径流量的 9.4%。从地貌特征和水循环特点, 全疆可分为山区和平原区二大区域, 其中, 山区大约 $70 \times 10^4 \text{ km}^2$, 97.1% 的水资源形成于山区; 平原区面积为 $94 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。由于山区降水量比较稳定^[17-18], 另外山区的冰川积雪对地表水水资源起着调节的作用, 河川径流量年际变化幅度小, 变差系数在 0.1~0.5 之间。径流量的年内分配很不均匀, 主要表现为春旱、夏洪、秋缺、冬枯的特点, 多数河流春季(3—5 月)水量小, 占年水量的 5%~30%; 夏季(6—8 月)占 34%~81%; 秋季(9—11 月)占 7%~24%; 冬季(12—2 月)占 20% 以下。

新疆是一个受气候变化影响比较突出和显著的地区^[19-20], 新疆近 50 a 来的气温呈上升趋势, 平均增长率为 $0.27 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。1987 年以后的平均气温较 1986 年以前有明显升高, 尤其是北疆西部、北部和东疆地区增幅较大, 达 $0.6 \sim 1.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。新疆各季平均气温的变幅以冬季为最大, 夏季最小, 但各季总体上均呈上升趋势。伴随着气温加速上升的同时, 降水量普遍增加, 近 50 a 来新疆年降水量总体呈增加的变化趋势, 全疆年降水量平均增幅 $0.67 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 天山山区增幅最大, 达 $1.0 \sim 2.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。有部分地区呈减少趋势, 主要是阿尔泰山西部、伊犁西部的部分地区。根据对 1961—2007 年新疆气象器测资料分析^[21], 近 47 a 来新疆平均气温呈增高变化, 且增高速率加快; 降水量呈增多趋势, 1980 年代以来增湿较明显; 各区域年平均 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 界线温度积温均呈增加趋势, 其中, 天山山区的增幅最大, 其次为北疆、南疆(表 3); 年平均 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温的年代际变化表现为, 北疆自 1960 年代、天山山区自 1980 年代、南疆自 1970 年代以来呈逐年代增加的趋势(表 4)。1961—2003 年新疆夏季 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 层平均高度总体呈上升趋势, 1990 年代初开始上升明

表 3 新疆不同区域 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温特征

Table 3 Result of $0 \text{ }^\circ\text{C}$ accumulated temperature in three regions of Xinjiang

项目	北疆	天山山区	南疆
年平均 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温 / ($^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)	3 567.1	2 305.7	4 274.1
变率 / ($^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot (10\text{a})^{-1}$)	49.3	53.5	28.2
最大年 / $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温 / ($^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)	4 124.2	2 698.7	4 523.7
	(1997 年)	(1997 年)	(2001 年)
最小年 / $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温 / ($^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)	3 306.4	2 100.0	4 118.0
	(1993 年)	(1993 年)	(1976 年)

表 4 新疆不同区域各阶段 0℃ 积温特

Table 4 Result of 0℃ accumulated temperature in Xinjiang in different decades

区 域	1960 年代	1970 年代	1980 年代	1990 年代	2001—2007 年	1961—2007 年
北疆 / (℃ · d)	3 497.3	3 527.5	3 538.6	3 635.2	3 689.1	3 565.1
天山山区 / (℃ · d)	2 235.6	2 283.0	2 277.7	2 356.6	2 483.5	2 309.9
南疆 / (℃ · d)	4 282.6	4 282.6	4 242.9	4 296.6	4 459.8	4 296.6

显,阿尔泰山西坡、北疆西部、天山北坡、天山南坡 4 个区域明显上升,而昆仑山北坡夏季 0℃ 层略下降。升高幅度从南向北、从西向东增加。

3 新疆冰川、积雪的近期变化特征

根据中国第二次冰川编目的初步结果(刘时银,内部交流),对新疆第一次冰川编目统计的 22 494 条冰川进行遥感监测,从第一冰川编目的冰川面积为 29 485.43 km²,到 2008 年冰川面积减到 25 667.64 km²,减少 3 817.79 km²,总体变化为 12.95%。其中,额尔齐斯河流域从 293.93 km² 减到 188.33 km²,减 105.6 km²,面积总变化-35.9%;伊犁河流域从 2 164.43 km² 减到 1 584.91 km²,减 579.52 km²,面积总变化-26.9%;东亚内陆河流域的新疆其他流域,从 27 027.07 km² 减到 23 894.4 km²,减 3 132.67 km²,面积总变化-11.6%。冰川条数从 22 494 条减少到 22 463 条,仅减少 31 条,其中,在额尔齐斯河流域冰川从 394 条减到 272 条,减 122 条;伊犁河流域从 2 302 条减到 2 093 条,减 209 条,但在属于东亚内陆河流域的新疆其他流域,由于大冰川退缩分解,冰川条数从 19 798 条增加到 20 098 条,增加 300 条。对塔里木河流域的监测表明,冰川在 1970 年到 2008 年期间,冰川总面积从 21 024 km² 减到 19 061 km²,减 1963 km²,减少-9.3%,平均每年减-0.25%;冰川条数 12 105 增加到 12 711,增加 606,增约 5%;冰川单个面积从平均 1.74 km² 减少到 1.5 km²,减少约 40.24 km²。根据李忠勤等^[22]的研究结果,对新疆 1 800 条冰川在 1962—1976 年和 2002—2006 年两期影像对比研究的显示,过去 26~44 a 间,总面积缩小了 11.7%,平均每条冰川缩小 0.243 km²,末端退缩速率 5.8 m · a⁻¹。冰川在不同区域的缩小比率为 8.8%~34.2%,单条冰川的平均缩小量为 0.092~0.415 km²,末端平均后退量为 3.5~10.5 m · a⁻¹。

胡列群等^[23]根据 1960—2011 年的观测资料,对新疆南北疆及天山山区冬春年(10—5 月)的积雪

特征进行了统计结果表明,近 50 a 来南北疆及天山山区的积雪深度均呈小幅增长(天山山区增幅最大),积雪日数呈略微降低趋势,积雪初始、终止日期无明显变化;新疆区域的积雪分布总体呈自西向东、由北向南减少的特点。1960—2009 年间北疆积雪日数整体呈降低态势,尤其是从 1980 年之后降低的趋势比较明显;北疆积雪深度整体呈增加趋势,但变化波动较大;南疆地区的积雪日数整体也呈降低态势,但变化的拐点与北疆相反,即从 1970 年开始降低至 1980 年之后开始增加;南疆积雪深度整体呈增加趋势,尤其是从 1980 年之后,呈稳定增加;天山山区积雪日数整体也呈降低态势,尤其是从 1980 年之后,呈稳定降低的趋势;天山山区积雪深度整体呈增加趋势,但变化波动较大;新疆区域积雪初始、终止日期其变化基本稳定,没有表现出明显的提前或推迟趋势。

4 新疆冰雪流域对气候变化的水文响应

新疆水资源有 80% 以上形成于盆地周围的中高山区,高山地区的冰川和积雪融水是河流的主要补给源^[5]。随着全球变化引起的高山寒区升温 and 降水变化在此反映敏感,已经显示出自 20 世纪 80 年代中期以来的异常变化。最近的研究报告已指出,在山地流域,较高的气温会使雨/雪比率增大,加速春季融雪的速率^[24],导致更快、更早和更大的春季径流,气候变化引起高山寒区各种介质中的水循环变化加快^[24-25]。源于新疆高山的河流均有冰雪融水补给,山区的冰川融水与每年出流的积雪融水和降雨径流,成为山前平原经济发展带的主要水资源。随着全球升温和气候变化,位于亚欧内陆腹地的高山冰雪流域水文循环变化对此反映敏感^[25-38],涉及这些气候变化的主要问题是高山冰川积雪融水对长期水资源的可持续利用的意义。

自 20 世纪 80 年代末以来,受气候变化的影响,全疆大多数河流径流量均有不同程度的增加,以季节积雪和雨水补给为主的径流量增加在冬、春、秋季;以高山冰雪融水和雨水补给为主的河流

四季都有增加^[19]。气候变暖导致径流的年内分配更加不均匀,春旱夏洪的危害更加凸现,水资源的供需矛盾和洪水威胁加重^[15]。为检验新疆不同冰雪流域水文过程对气候变化的响应,选择新疆不同类型冰川、积雪覆盖流域水文站水文资料,结合气象资料,研究冰雪河流对气候变化响应的水文过程,为未来水资源管理和利用提供支持。

4.1 阿尔泰山南坡克兰河流域

克兰河发源于西风带水汽影响的新疆阿尔泰山南坡,源头与蒙古国交界,河流全长 265 km,由北向南穿过阿勒泰市区,经奇奇苏湖流入额尔齐斯河,属额尔齐斯河的支流。克兰河地表径流以季节性积雪融水补给为主,夏季降水补给为辅,冬季主要靠地下水补给,属于融雪水和雨水混合补给型河流,在分类上属于阿尔泰型河流^[14]。由于该区冬季严寒漫长,所以冬季降水(11—3月)以季节积雪形式存在流域内,进入春季以后,主要在5—6月融水进入河槽,使该地区的河流具有明显的春汛特点。阿尔泰山区秋季降水量大于春季的降水量,而径流却是春季大于秋季,这与天山、祁连山北坡河流径流秋季大于春季,春旱缺水形成鲜明的对照,这是克兰河径流的一个显著特点^[39]。

本区从每年10月开始的积雪和冰冻,冬季基本上不产流,但冬季却是降水量增加的明显时段,这样为第二年春季融雪径流形成的积累了大量物资基础^[39]。克兰河主要由融雪径流补给,积雪融水可达年径流量的45%。年最大月径流一般出现在6月,融雪季节的4—6月径流量占年径流的65%。流域从1960年代开始升温明显^[29],年平均气温从50年代的1.4℃上升到90年代的5.2℃;冬季升温最大,尤其是在2月达 $1.51\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$,各月平均达 $0.80\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。年降水量呈增加趋势,降水增加主要是在冬季和开春;而5—7月及9—10月降水呈下降趋势,最大的减少在5—7月,达 $8\sim 10\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。随着气候变暖,河流水文过程发生了很大的变化,主要表现在最大月径流由6月提前到5月,最大月径流量也增加约15%,4—6月的融雪季节径流量也由占年流量的60%增加到近70%。从图1可以看出^[29],克兰河最大径流月多年平均是6月,最大流量月在1990年代之前是6月最大,5月次之,但从20世纪90年代开始,5月径流量成为最大月,其年内径流过程发生了前移,年内的径流上升阶段变得较陡,而径流下降阶段比较平缓。从气温变化看,5月份升温达 $0.081\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$,

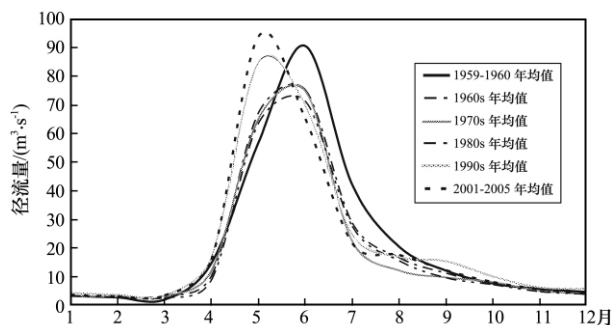


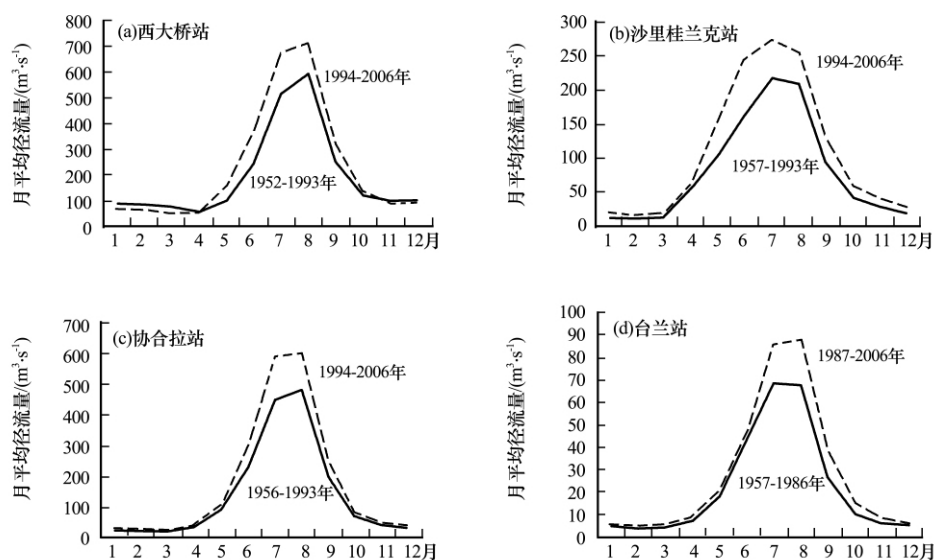
图1 克兰河阿勒泰水文站 1959—2005 年年代际年内径流过程变化^[29]

Fig. 1 Decade average monthly streamflow changes at Altay Hydrological Station of Kelan River basin in 1959—2005^[29]

这就使得5月的融雪径流加大,成为最大径流月,年内水文过程的最大值从6月提前到5月。所以,气温的不断升高导致以积雪融水为主的克兰河最大径流月出现提前,这是积雪流域水文过程对气候变化的明显响应。在长期变化趋势上,本区气温上升主要在冬季,降水也在冬季增加明显,而夏季降水有下降趋势;水文过程主要表现在5月径流表现为增加趋势,而6月径流为下降趋势,形成夏季径流减少而春季径流增加的年内径流分配状况^[29]。

4.2 天山南坡阿克苏河流域

阿克苏河是塔里木河最大的一条源流,阿克苏河对塔里木河干流水量的补给量占73.2%,在塔里木河的形成、发展和演化中发挥着主要作用^[40]。阿克苏河是天山南坡径流量最大的河流,流域面积 $5.14\times 10^4\text{ km}^2$ 。昆马力克河和托什干河是阿克苏河两大主要支流,是阿克苏河的主要水源^[41]。阿克苏河从两支流汇合口至入塔里木河处的肖夹克,长132 km,山区是阿克苏河的产流区,平原绿洲为农业灌溉及生态耗用水区。台兰河是在阿克苏河流域中游汇入的一条支流。阿克苏河流域共计有冰川2740条,冰川面积4918.26 km²,冰体积679.9751 km³^[36]。昆马力克河与台兰河都是以冰川融水补给为主的河流^[30,33],多年平均年径流量分别为 $46.04\times 10^8\text{ m}^3$ 和 $7.35\times 10^8\text{ m}^3$,冰川融水分别占到其总径流的52.4%和69.7%。托什干河是以雨雪混合补给为主的河流,年径流量为 $25.76\times 10^8\text{ m}^3$,雨雪水约占其总径流的45.1%。昆马力克河流域的冰川覆盖面积较大^[27],比托什干河大2212.39 km²,夏季强烈消融时,冰川融水所占的比例与流域冰川覆盖面积的大小密切相关。

图2 阿克苏河流域主要水系 1957—2006 年径流年内变化^[28]Fig. 2 The monthly runoff of the main water system changes from 1957—2006 in Aksu River basin^[28]

阿克苏河流域在 1956—2006 年近 50 a 来年径流量变化十分显著^[28], 年径流量在 1993 年之前呈波浪式下降趋势, 1993 年之后则表现为较快的上升趋势, 1994—2006 年径流量发生了增多的跃变. 阿克苏河 1994—2006 年年平均径流量比 1952—1993 年增加 19.94%, 昆马力克河增加 23.87%, 托什干河增加 33.91%. 托什干河径流增加幅度最大, 说明以雨雪混合补给为主的河流, 径流增加更为显著. 台兰河径流在 1986 年之前呈快速下降趋势, 而 1986 年之后则为快速的上升趋势, 1987—2006 年的年平均径流量比 1957—1986 年增加 24.31%, 径流变化转折点较其他河流提前了 7 a, 原因可能是台兰河流域冰川融水所占比例最大, 达到 69.7%, 因而对气候变化的响应更加敏感.

近 10 多年来, 阿克苏河流域主要水系 5—9 月的径流量增加显著(图 2). 以冰川融水补给为主的昆马力克河与台兰河径流年内变化虽然转折的时间点不同, 但趋势相似, 径流增加主要都在汛期的 7、8 月, 昆马力克河协合拉站 1994—2006 年 7、8 月平均径流分别比 1956—1993 年增加了约 30% 和 24%, 而台兰河台兰站 1987—2006 年 7、8 月平均径流分别比 1956—1986 年增加了约 25% 和 29%; 非汛期的 1—4 月和 11—12 月径流年内变化微弱. 其原因是 7、8 月为冰川的主要消融期, 而冰川融水是昆马力克河与台兰河径流的主要补给, 分别占到 52.4% 和 69.7%, 气温升高使冰川融水径流增加显著. 托什干河沙里桂兰克站 1994—2006 年 5—9 月

平均径流比 1957—1993 年分别增加了约 49%、48%、26%、21% 和 38%, 5、6 月平均径流增加幅度最大. 阿克苏河西大桥站径流是由昆马力克河与托什干河径流合成, 其径流年内变化形态体现了两条河流的径流变化特征, 表现为 5、6 月和 9 月径流增加显著, 1994—2006 年 5、6 月和 9 月平均径流分别比 1952—1993 年增加了约 57%、50%、26%; 7、8 月平均径流分别增加了约 30% 和 20%, 变化特征类似于昆马力克河. 由此可见, 阿克苏河 5、6 月径流增加幅度最大, 原因可能气温升高导致降水和积雪融水增加, 汛期径流有提前增大的趋势. 由以上分析可知, 阿克苏河流域西大桥站、协合拉站以及台兰站径流增加的主要月份都在 6—8 月份, 而以雨雪水补给为主的托什干河沙里桂兰克站径流从 4 月开始就明显增加, 尤以 5—7 月增加显著.

4.3 天山北坡奎屯河流域

奎屯河流域源于依连哈比尔尕山北坡, 出山后汇集四棵树河和古尔图河, 向北流入艾比湖, 地势南高北低, 整个流域面积约 4 000 km², 干流全长 220 km^[14]. 奎屯河流域自东向西依次为奎屯河、四棵树河、古尔图河, 均发源于天山中段北坡, 多年平均径流量之和达 12.67×10^8 m³. 主流奎屯河在将军庙水文站以上集水面积 1 945 km², 根据中国冰川目录统计^[41], 1964 年奎屯河共有各类冰川 309 条, 冰川面积 201.12 km², 约占集水面积的 10.3%, 冰储量 10.969 km³. 根据 2004 年卫星影像解译数据^[42], 奎屯河源冰川面积在 1964—2004

年减退了 15.37%, 并有 11 条冰川消失, 河源冰川面积已减缩为 170.21 km², 损失面积达 30.91 km², 末端退缩 3.5 m · a⁻¹. 奎屯河与天山北坡多数河流类似, 具有月际分布极不均匀、季节变化明显的特点^[14]. 由于降水和冰雪融水集中在汛期, 所以, 6—9 月径流量占到全年径流量的 75.1%. 其中, 以主汛期 7、8 月径流量为最大, 占年径流量的 49.2%。

根据奎屯河将军庙水文站自 1963 年后近 47 a 径流量序列分析^[31], 近 47 a 径流量以 $0.18 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的速率增加, 特别是 1992—2009 年, 径流量增加速率达到 $0.68 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$. 根据月径流年代际的变化^[31](图 3), 在 20 世纪 60 年代和 70 年代为平水年, 随后各年代的月平均流量都有增加, 在秋、冬季枯水期因河道水量较少, 尽管有所增加, 但起伏不大, 而在汛期反映最为明显. 年代际变化与 21 世纪初前 6 a 平均值相比, 除

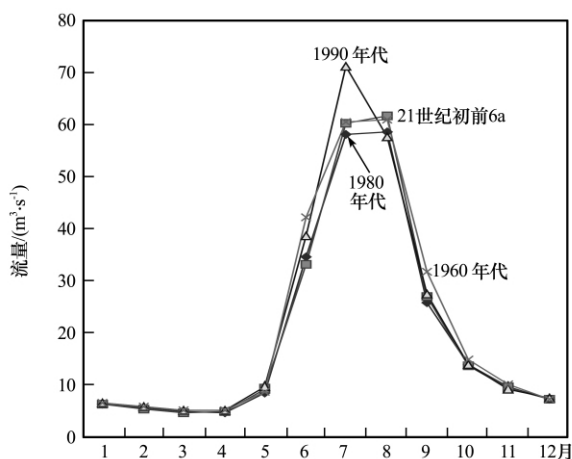


图 3 奎屯河各年代际月平均流量变化^[31]

Fig. 3 Decade average monthly streamflow changes at Jiangjunmiao Station of Kuytun River basin^[31]

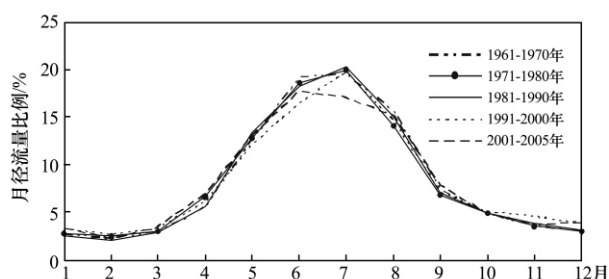


图 4 喀什河托海水文站 1955—2005 年代际径流年内变化过程^[32]

Fig. 4 Decade average monthly streamflow change at Huohai Station of Hashi River basin in 1955—2005^[32]

90 年代 7 月平均流量增加 18%、8 月减少 5% 左右外, 基本上呈逐年增长; 6 月和 9 月份也呈现有相似现象, 特别是 6 月份可代表高山地区的融雪径流情况, 80 年代与 60 年代相近, 并略偏低; 21 世纪初的前 6 a 平均流量要比 90 年代高出 10%, 呈逐年增加. 同时, 受到山区夏季降水增加明显的影响, 仅 90 年代月平均流量最大月出现在 7 月, 8 月水量减少; 其余年代均出现在 8 月, 并与 7 月份相差不大.

由于气候变暖, 奎屯河出山口将军庙水文站 1959—2009 年径流量的总体以 $0.266 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 速率增加, 而 1992—2006 年河川径流增加速率达到 $2.168 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 约为 1960—2006 年间增速的 4 倍^[31]. 据乌苏气象站和将军庙水文站观测到的降水记录, 从 2003 年降水就出现明显减少, 年降水量减少 15%~35%; 而升温趋势明显, 1992—2006 年间增温速率达到 $0.75^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 约为 1960—2006 年期间的两倍^[31]. 若以同期的气温和降水比较, 将军庙站的径流量增加, 应归因于气温升高引起冰川融水增加所致. 选用气候统计模型公式来估算奎屯河年冰川融水量^[31], 求得奎屯河源 2004 年的冰川总融水量为 $1.86 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占河流径流量的 29.4%, 比杨针娘^[5] 1980 年计算的冰川融水量占 23.7% 数据增加了 5.7%. 根据王林^[43] 研究, 奎屯河流域 1964—2004 年冰川面积减退了 15.37%, 近似估算其冰川储量在过去 40 a 间缩减了 21.5%, 冰川储量融化掉 $22.63 \times 10^8 \text{ m}^3$. 除当年在冰川上的降水外, 折合平均每年增加消耗老冰的融水量 $0.566 \times 10^8 \text{ m}^3$, 相当于多年平均补充融水出流要消耗冰川积累约 30% 之多, 这种高亚洲冰川近期减退对河流水资源的影响是不能忽视的^[37], 而且也引起河源冰川径流增加有 5% 以上.

4.4 天山西部喀什河流域

喀什河发源于天山西部依连哈比尔尕山, 为伊犁河支流. 喀什河流域总面积 9 541 km², 河长 316.5 km, 流域海拔在 800~4 600 m 之间, 地势东高西低, 南北两侧被依连哈比尔尕山、阿吾拉勒山所包围, 形成向西敞开的狭长形盆地, 致使西来水汽可长驱直入, 在山地受阻产生较多降水, 在高山区发育现代冰川^[5,14]. 据《中国冰川目录》^[3], 喀什河流域冰川面积 421.6 km², 冰川覆盖率为 4.42%, 冰川融水补给量为 $5.52 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占河川径流量的 13.9%^[5]. 喀什河乌拉斯台水文站以上冰川面积

407.7 km², 冰川融水补给量为 5.34×10^8 m³, 占总补给量的 16.8%, 地下水补给量占 28.1%, 雨水及季节性积雪融水补给占 55.1%^[14].

喀什河径流既有来自高山的冰川融水补给, 又有降节融雪与降水补给, 加之流域冲积层深厚, 植被覆盖度大, 对径流亦有一定的调节作用^[32]. 所以, 喀什河径流年内分配较为均匀, 年际变化相对平缓. 从喀什河径流补给主要补给源是冰川及积雪融水, 因此, 径流年内分配过程主要受气温影响, 夏季气温高, 积雪和冰川融水大量补给河流, 加之夏季降雨径流的汇入, 故夏季水量较大, 占年水量的 50.71%; 冬季气温低, 降水以固态形式存于流域中, 河川径流主要来自地下水, 冬季水量仅占年水量 6.37%; 春季水量所占比重仅次于夏季, 占年水量的 21.93%, 秋季占年水量 16.26%. 喀什河春汛一般始于 4 月初, 此后随着气温的持续升高, 积雪消融, 河道流量开始持续上涨, 直至 6 月开始冰川融水, 即夏汛开始. 喀什河的春汛、夏汛形成了年径流过程的双峰形式, 加之春汛、夏汛相连, 构成连续涨水期. 因此, 汛期长达 4 个月以上, 出现在 5—8 月, 占年水量 66%, 最大水月多出现在 7 月, 占年水量的 19.79%. 从(图 4)^[32]可见, 11、12、1—4 月水量略有增加趋势, 6、7 月有微弱减少趋势, 其他各月无明显趋势变化, 径流年内变化过程趋于均匀. 其原因是由于春季提前造成, 该河春

汛一般始于 4 月初, 但从 20 世纪 80 年代末期开始, 春汛大多集中出现于 3 月下旬, 从而造成春季水量增多; 二是由于持续升温天气, 使冰川消融期增长, 径流过程坦化, 造成冬季水量增多. 1955—2005 年喀什河年径流总体呈微弱增加趋势, 其中冷季径流有明显增加趋势, 而暖季径流量呈微弱减少趋势.

4.5 天山东部哈密地区河流

哈密地区位于新疆东部极端干旱区, 天山呈东西向横恒于哈密境内, 天山是本地区的水源地和“水塔”, 高山区降水量可达 500~600 mm^[44], 并在天山南北坡发育现代冰川, 区域冰川 179 条^[45], 冰川面积 155.83 km², 冰储量约 8 km³, 为哈密地区主要的调节水源. 据最新统计^[46], 哈密地区地表水资源总量 10.3×10^8 m³, 可利用水资源量 6.4×10^8 m³. 哈密地区长年淌水河流共 76 条, 其中 20 条河流受到冰川融水的补给影响, 冰川平均年融水量达 1.72×10^8 m³. 根据本区 50 多年来的水文气象观测记录^[35], 自 1957 年以来年均温度总体上升, 而且自 1986 年以后升温更加明显. 位于山区的巴里坤站气温一直呈递增趋势, 升温达 $0.07 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$, 最近 10 a 均值比最早 10 a 均值平均升高 2.6 $^\circ\text{C}$. 冬季各站平均气温都呈上升趋势, 升温速率达到 $0.05 \sim 0.06 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$. 连续的高温使地区范围内有冰川消融水补给河流后期径流量大增^[35], 其中第

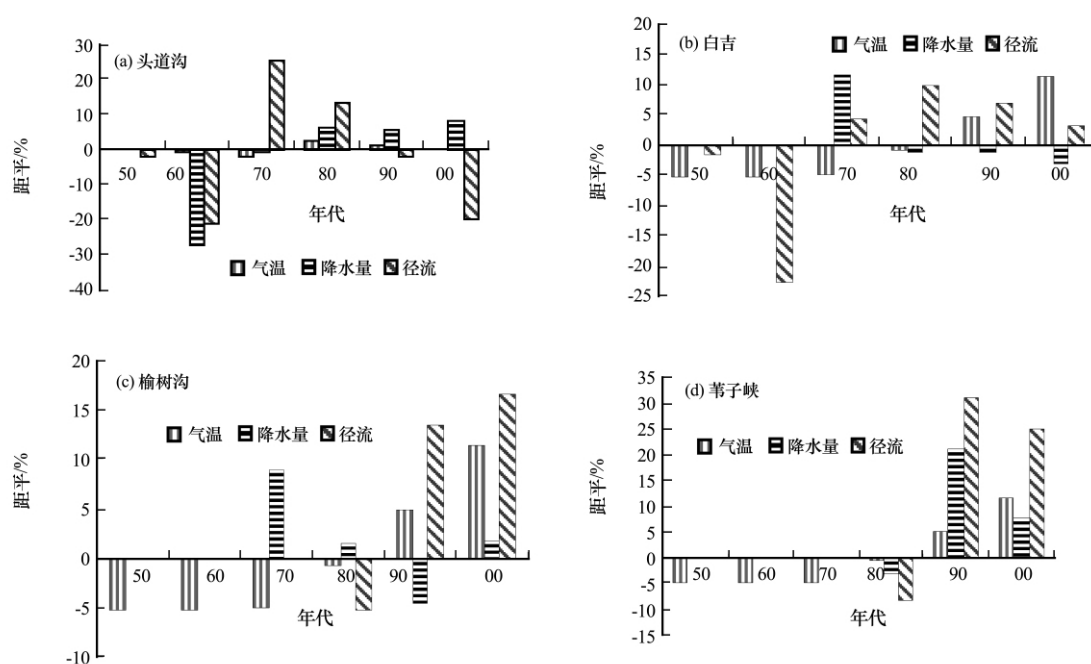


图 5 哈密四站年均流量变化及其趋势^[35]

Fig. 5 Variations of annual runoff and their tendency for four hydrological stations of Hami region^[35]

子峡站 1998—2001 年均值比建站至 1997 年均值多 53.3%, 比建站至 2007 年均值多 37.9%, 比最近 10 a 均值多 14.8%。

哈密地区的河流大体上分两大类^[35], 一类是有冰川融水补给的河流, 虽然数量不多, 但径流量占全地区 79.4%; 另一类是没有冰川融水补给的河流, 这类河流年径流量普遍少于 $1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$, 但数量较多, 涉及面广。无冰川融水补给的河流总体上水量受降水、气温影响明显, 洪枯水量悬殊。最近几十年, 地区内各地降水量呈递增趋势, 但近期河流年径流出现减少趋势, 特别是春季(图 5 a)。主要原因是中高山区气温的全面升高, 导致各流域中、高山区的前期积雪尚未到正常消融期就提前缓慢融化。这些积雪消融水大多就地下渗成为土壤水, 而到气温适宜的春天, 这部分原会补给河流的水量已消失, 终使这些河流春季水量的日趋减少, 原来这部分河流春季 3—5 月经流量约占年径流量的 60% 左右。有冰川融水补给的河流, 年径流量总体呈增加趋势。白吉站流域高山区有冰川面积 13.36 km^2 , 榆树沟站控制流域有冰川面积 22.85 km^2 , 苇子峡站流域有冰川面积 35.63 km^2 (图 5 b, c, d)。在 20 世纪 90 年代, 各河的年径流量增加较多, 尤以伊吾河流域苇子峡站变化最为明显, 20 世纪 90 年代后比前期均值增长 35.7%, 最近 10 a 平均流量比最早 10 a 平均流量多 41.4%, 这意味着每年比最早 10 a 的平均流量增加 $2\,430 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水量; 增长最小的故乡河白吉站为 11.5%。增长幅度与流域冰川面积成正比, 冰川面积越大, 水量增加越多。

总体来讲, 随着区域气候的变暖, 各类河流径流过程发生着较大变化^[35]: 无冰川消融水补给的河流出现洪、枯水量悬殊, 近期年径流出现减少趋势; 有冰川消融水补给河流的年径流量变化明显, 其中河源冰川不多、个体面积较小的河流年径流量在 2000 年前增加, 近年有减缓趋势; 而河源冰川较多、个体面积较大的河流这种增多趋势仍在继续。

5 不同冰雪径流河流对气候变化的响应及其分类

5.1 冰川、积雪径流对气候变化的响应机理

冰川是固体水资源, 它的消融和积累对河川径流具有天然调节作用, 是我国西部尤其是干旱区主要河流的重要补给来源^[46]。在我国西部山区, 不同的流域冰川覆盖率不同, 不同的冰川面积对山区径

流贡献也不同^[5](表 5)。我国冰川融水径流水资源的空间分布很不均匀, 而且与冰川面积的分布不一致。内流区冰川面积占我国冰川总面积的 60%, 但冰川融水径流仅占其总量的 41.5%, 而冰川面积占 40% 的外流区的冰川融水径流却占 48.5%。但冰川融水径流对河流补给比率则相反, 即内陆干旱少雨的大陆型冰川区的冰川融水补给比率大, 而降水丰沛的海洋型冰川区则相对较小。根据叶柏生等^[47-48]研究, 随着冰川覆盖率的增加, 径流年内变化迅速减小, 很快趋于平稳。从定量的角度看, 当流域冰川覆盖率超过 5% 时, 冰川对河流的年内调节作用效果明显; 当冰川覆盖率超过 10% 时, 河流径流基本趋于稳定。

表 5 新疆冰川融水径流及其对河流的补给
(据文献[5]修改)

Table 5 Glacial meltwater in river basin of Xinjiang
(According to Ref. [5] modification)

内陆河水系	冰川面积 / km^2	出山河川 径流量 / 10^8 m^3	冰川融水 径流量 / 10^8 m^3	冰川融水 补给比重 / %
准噶尔盆地	2254.1	125	16.89	13.5
新疆伊犁河	2022.66	193	26.41	13.7
吐哈盆地	252.73	16.7	1.9	11.4
塔里木盆地	19888.81	347	133.42	38.5
额尔齐斯河	289.29	100	3.62	3.6
总计	24707.59	781.7	182.24	23.3

对新疆不同流域冰川融水对河流贡献和流域冰川覆盖率进行统计可以看出(图 6), 融水贡献比例和冰川覆盖率呈非线性关系, 在覆盖率较小的情况下, 冰川融水的作用更加明显, 但当冰川达到 10% 左右以后, 冰川贡献大于 25%, 这时的冰川贡献呈缓慢增加, 但冰川融水的调节已经很明显。这和叶柏生等^[47-48]的研究结果相似。一般来说, 冰川融水在干旱区的表现更加明显, 由于山外降水很少, 几乎不产流, 所以冰川融水在这些河流中的比例更加明显, 但一般占 10%~14% 左右, 所以其对河流的调控作用不明显。大冰川和覆盖度大的流域, 冰川融水对河流补给在 25% 以上, 已经对河流径流起到调控和稳定作用。

另外, 冰川具有多年调节河川径流量的作用^[5]。冰川融水径流对河川径流的调节作用在于在干旱少雨的年份, 冰川融水可以弥补因降水减少而造成的河流水量不足。当连续出现低温多雨天气

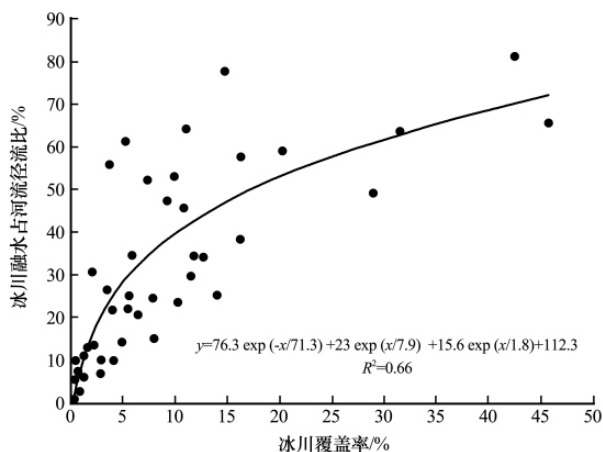


图6 新疆流域冰川覆盖度与冰川融水对河流径流贡献的关系

Fig. 6 Relationship of glacier coverage and glacier meltwater contribution to river runoff in Xinjiang region

时,冰川融水量减少,冰川上的积雪补给冰川形成冰川冰保存起来,河流水量减少.因此,冰川融水补给量较大的河流受旱涝威胁相对要小,对我国西部干旱地区农业稳定和持续发展起着重要作用.就冰川融水对河流的补给比重而言,我国西部省区冰川融水径流对河流的贡献以新疆为最大,其补给比重占25.4%^[5].不同类型的河流,冰川融水的调节作用不同.干旱年份,降水量不同程度地比正常年偏少,冰雪融水类河流的径流量普遍比正常年偏大;雨水-冰雪融水类河流的径流量接近正常年或略偏少;雨水类与雪融水类河流的径流量比正常年偏少较多.湿润年份则相反,冰雪融水类河流的径流量偏少;雨水-冰雪融水类河流略高于正常年;而雨水类与雪融水类河流的径流量则偏大.冰川融水径流水资源丰富的地区,冰川融水对河流的补给比重不一定大,在干旱区雨水对河流的补给作用较弱所致,所以冰川融水比例较大.冰雪资源对地表水资源的调节,不仅表现在这种“高山固体水库”对河川径流的年调节作用,而且还体现在对河川径流年内分配的影响.冰川径流的年内变化与冰川消融期的长短和冰川类型有关.由于冰川融水径流的季节变化非常明显,所以径流的年内分配极不均匀,其融水径流高度集中于6—8月.

积雪在全球水循环中也起着重要作用,全球淡水年补给量大约5%来自降雪,亚洲、欧洲、北美洲的大江大河,包括我国的长江、黄河,春季补给主要来自融雪径流.因此,雪冰覆盖的大河源头地

区积雪水资源对气候变暖的响应对全球环境和径流能产生举足轻重的影响,尤其是中亚和北美西部干旱半干旱区用水高度依赖山区冬季积雪^[1].中国西北干旱区冬季积雪贮量相当于该区年径流总量的38.2%,春季融雪在我国东北、新疆、西藏等地区形成春汛及时地满足了春灌的迫切需要,为农业发展提供了得天独厚的水资源条件^[8].

最近的研究报告已指出^[25],气候变化会使高纬度地区和融雪补给的流域可能产生的强降水天数和洪水频率增加.在山地流域,较高的气温会使雨/雪比率增大,加速春季融雪的速率^[49-50],缩短降雪季节的时间,导致更快,更早和更大的春季径流,气候变化引起高山寒区各种介质中的水循环变化^[24].气候变暖下,积雪流域季节水文过程变迁(移动)的机理如图7.

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.但随着时间的演替,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.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^[51-53].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^[54].现在气温正值大幅度升温的初期,融水量以增加为主^[46].

5.2 不同雪冰径流对气候变暖响应分类

以融雪径流为主的额尔齐斯河支流克兰河,气温上升使得最大径流月由6月提前至5月,春季径流增加,而夏季径流减少,尤其是在7—8月的径流减少^[29].对于融雪和冰川融水混合补给的河流,由于河流的汛期是在夏季,春季农业缺水严重,随着气温的上升,增加的河流径流依然是集中在夏季,使得洪水压力和风险增大^[28].但在积雪比例较大的一些流域,而冰川融水比例相对小的流域,如库车河,开都河及托什干河上游等,也在春季增加径流,可以缓解春季需水,减轻春旱压力.但这类河流在秋季的径流也有一定增加,总体增加的径流缓

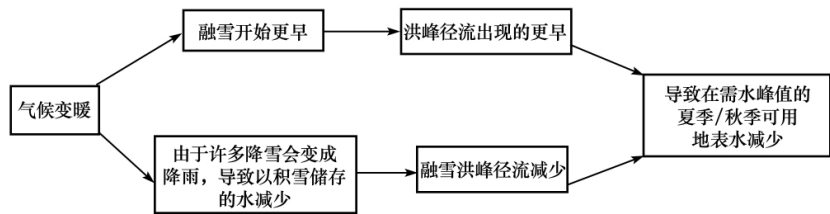


图 7 积雪流域季节水文过程变迁(移动)机理

Fig. 7 Mechanism of hydrological processes change (movement) with climate warming in snow cover basin

表 6 不同雪冰比例河流对气候变暖响应分类

Table 6 Classification of rivers with different snow cover and glaciers coverage response to climate warming

河流类型	冰雪融水特征	典型代表性河流	对气候变化的响应特征
I 型	积雪融水为主的, 几乎可以不考虑冰川融水	阿尔泰山克兰河, 塔城等河流	对升温的响应表现为融雪提前, 由 6 月提前到 5 月, 春季径流增加, 夏季径流减少明显
II 型	以积雪融水为主, 冰川融水比例在 5%—15%	以渭干河库车河为代表, 乌鲁木齐河等天山北坡的河流也属此类	最大径流月在夏季. 月, 一般在 7—8 月; 但随着气温上升, 依然是夏季月径流最大, 但最大月前移到 6 月
III 型	积雪和冰川融水所占比例接近, 冰川融水比例在 25%(15%—35%)左右	黑孜, 开都河, 奎屯河, 卡拉苏等	最大径流月保持在 7 月, 对气候变暖的响应只是汛期径流增大, 其他时段变化不大
IV 型	以冰川消融为主, 积雪融水比例明显下降	阿克苏河和台兰河及木扎尔特河属于此类	对气候变暖的响应是汛期增大, 但又分为春季-夏季增加型和夏季-秋季增加型

解了需水压力, 平衡了年内的水资源分配. 对于主要以冰川融水为主的河流, 增加的径流在夏季和秋季, 加大了汛期的洪水风险. 新疆气候 1986/1987 年度发生转型^[19-20], 气候变暖和变湿明显, 尤其是冬季增温最为明显, 使得年汛期的最大流量和冬季的最小径流量在大部分雪冰河流呈现明显增加趋势; 以积雪为主的流域, 春季融雪径流最大, 并且最大洪峰出现的时间提前, 其他冰川的融水河流是在夏季洪水最大, 由于冬季流量的增加, 许多河流出现冬季凌汛, 冬季发生洪水. 根据以上研究, 我们依据不同雪冰径流所占总径流量的比例, 将新疆河流对气候变暖响应进行分类如表 6.

6 结论

新疆是我国冰川、积雪资源最为丰富的地区, 冰川和积雪融水在水资源构成中占有重要的地位, 其对气候变化的响应使得河流水文过程发生明显的变化, 对新疆干旱区的水资源利用和管理产生重大影响. 新疆高山流域产流占地表径流的 80% 以上, 其中冰川和积雪融水径流在总径流中的比例可达 45% 以上, 积雪和冰川融水是河流的主要补给来源. 在新疆北部的阿尔泰山和天山北坡河流主要以融雪径流补给为主, 而在天山南坡、昆仑山、喀喇昆仑山和天山北坡的伊犁河流域的河流以冰川融水

补给为主; 以融雪径流为主要的河流主汛期在春季到夏初, 而冰川融水补给的河流夏季是主汛期. 随着新疆气候向暖湿转变, 高山流域的水文过程对气候变暖和积雪增加产生明显的响应: 积雪为主补给的河流, 水文过程对气候变暖的响应表现为最大径流前移, 夏季径流减少明显; 以冰川融水补给的河流, 径流响应表现为 6—9 月汛期径流量明显增大, 汛期洪水增多, 年流量增加. 由于不同补给类型河流的水文过程发生变化, 其相应对下游的水资源供给和洪水安全管理产生了重大影响, 在水资源管理方面需要适应气候变化对水文过程的调整, 减缓气候变化对水资源安全的影响.

参考文献 (References)

[1] Ding Yongjian, Qin Dahe. Cryosphere change and global warming: impact and challenges in China[J]. China Basic Science, 2009(3): 4—10. [丁永建, 秦大河. 冰冻圈变化与全球变暖: 我国面临的影响与挑战[J]. 中国基础科学, 2009(3): 4—10.]

[2] Yao Tandong, Qin Dahe, Shen Yongping, et al. Cryospheric change and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 35(3). [姚檀栋, 秦大河, 沈永平等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响[J]. 自然杂志, 2013, 35(3): doi: 10. 3969/j. issn. 0253—9608. 2013. 03. 000.]

- [3] Shi Yafeng. Concise Chinese Glacier Inventory[M]. Shanghai: Shanghai Scientific Popularization Press, 2005: 17—188 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005: 17—188.
- [4] Kang Ersi, Yang Zhenniang, Lai Zuming, *et al.* Runoff of snow and ice meltwater and mountainous rivers [M]// Glaciers and their Environments in China—the Present, Past and Future. Beijing: Science Press, 2000. 190—233. [康尔泗, 杨针娘, 赖祖铭, 等. 冰雪融水径流和山区河流[M]//中国冰川与环境. 北京: 科学出版社, 2000. 190—233.]
- [5] Yang Zhenniang. Glacier Water Resources in China[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991: 81—150. [杨针娘. 中国冰川水资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 81—150.]
- [6] Liu Chaohai, Xie Zichu, Durgerov M B, *et al.* Glaciations in Tianshan [M]. Beijing: Science Press, 1998: 18—44. [刘潮海, 谢自楚, 久尔盖诺夫 M B. 天山冰川作用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 18—44.]
- [7] Shen Yongping, Wang Guoya, Ding Yongjian, *et al.* Changes in glacier mass balance in watershed of Sary Jaz-Kumarik Rivers of Tianshan Mountains in 1957—2006 and their impact on water resources and trend to end of the 21th century[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(5): 792—800. [沈永平, 王国亚, 丁永建, 等. 1957—2006 年天山萨雷扎兹-库玛拉克河流域冰川物质平衡变化及其对河流水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(5): 792—800.]
- [8] Li Peiji. Preliminary assessment of seasonal snow resources in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1988, **43**(2): 108—119. [李培基. 中国季节积雪资源初步评价[J]. 地理学报, 1988, **43**(2): 108—119.]
- [9] Li Peiji. Response of snow covers to climate warming in Xinjiang[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, **59**(4): 491—497. [李培基. 新疆积雪对气候变暖的响应[J]. 气象学报, 2001, **59**(4): 491—497.]
- [10] Cui Caixia, Yang Qing, Wang Shengli. Comparison analysis of the long term variations of snow cover between mountain and plain areas in Xinjiang region from 1960 to 2003[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(4): 486—490. [崔彩霞, 杨青, 王胜利. 1960—2003 年新疆山区与平原积雪长期变化的对比分析[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(4): 486—490.]
- [11] Yang Qing, Cui Caixia, Sun Churong, *et al.* Snow cover variation during 1959—2003 in Tianshan Mountains, China[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, **3**(2): 80—84. [杨青, 崔彩霞, 孙除荣. 1959—2003 年中国天山积雪的变化[J]. 气候变化研究进展, 2007, **3**(2): 80—84.]
- [12] Mu Zhenxia, Jiang Huifang, Liu Feng. Spatial and temporal variations of snow cover area and NDVI in the west of Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(5): 875—882. [穆振侠, 姜卉芳, 刘丰. 2001—2008 年天山西部山区积雪覆盖及 NDVI 的时空变化特性[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(5): 875—882.]
- [13] Yang Zhenniang, Liu Xinren, Zeng Zhuqun, *et al.* Cold Regions Hydrology of China [M]. Beijing: Science Press, 2000: 54—87. [杨针娘, 刘新仁, 曾柱群, 等. 中国寒区水文[M]. 北京: 科学出版社. 2000: 54—87.]
- [14] Zhou Yuchao. River Hydrology and Water Resources in Xinjiang [M]. Ürümqi: Xinjiang Science, Technology and Public Health Press, 1999: 1—445. [周聿超. 新疆河流水文水资源[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1999: 1—445.]
- [15] Deng Mingjiang. Water Resources and Sustainable Utilization in Xinjiang Uyghur Autonomous Region [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2005. [邓铭江. 新疆水资源及可持续利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.]
- [16] Deng Minjiang. Research and thinking on water resources in Xinjiang[J]. Quaternary Sciences, 2010, **30**(1): 107—114. [邓铭江. 新疆水资源问题研究与思考[J]. 第四纪研究, 2010, **30**(1): 107—114.]
- [17] Su Hongchao, Shen Yongping, Han Ping, *et al.* Precipitation and its impact on water resources and ecological environment in Xinjiang Region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, **29**(3): 343—350. [苏宏超, 沈永平, 韩萍, 等. 新疆降水特征及其对水资源和生态环境的影响[J]. 冰川冻土, 2007, **29**(3): 343—350.]
- [18] Wu Yongping, Wang Chenghai, Shen Yongping. Spatiotemporal evolution of precipitation over Tarim River Basin during 1960—2009: characteristics and reasons[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(06): 1268—1273. [吴永萍, 王澄海, 沈永平. 1960—2009 年塔里木河流域降水时空演化特征及原因分析[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(06): 1268—1273.]
- [19] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, *et al.* An assessment of the issues of climatic shift from warm-dry to warm-wet in Northwest China [M]. Beijing: Meteorology Press, 2003: 1—200. [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 1—200.]
- [20] 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, 胡汝骥. 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.]
- [21] Xinjiang Meteorological Bureau. Assessment Report on Regional Climate Change in Xinjiang[R]. Ürümqi: Xinjiang Meteorological Bureau, 2012. [新疆气象局. 新疆区域气候变化评估报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆气象局, 2012.]
- [22] Li Zhongqin, Li Kaiming, Wang Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, North Western China[J]. Quaternary Sciences, 2010, **30**(1): 96—106. [李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究[J]. 第四纪研究, 2010, **30**(1): 96—106.]
- [23] Hu Liequn, Li Shuai, Liang Fengchao. Comparison analysis of the variations of snow cover in Xinjiang region during recent 50

- years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35** (4): in press. [胡列群, 李帅, 梁凤超. 新疆区域近 50 年积雪变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2013, **35**(4): 出版中.]
- [24] Solomon S, Qin DH, Manning M, *et al.* *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. IPCC WG1 AR4 Report* [M]. Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press, 2007:747—845.
- [25] Bates B C, Kundzewicz Z W, Wu S, *et al.* *Climate Change and Water, IPCC Technical Paper VI* [M]. Geneva: IPCC Secretariat, 2008:1—210.
- [26] Kang Ersi, Cheng Guodong, Lan Yongchao, *et al.* A model for simulating the response of runoff from the mountainous watershed of inland river basins in the arid area of northwest China to climatic changes[J]. *Sci. China Ser D*, **29**(Suppl. 2): 49—54. [康尔泗, 程国栋, 蓝永超, 等. 西北干旱区内陆河流域出山径流变化趋势对气候变化响应模型[J]. *中国科学(D 辑)*, 1999, **29**(S2): 49—54.]
- [27] Gao Qianzhao, Wang Run, Ernst Giese. Impact of climate change on surface runoff of Tarim River originating from the south slopes of the Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30** (1): 1—11. [高前兆, 王润, Ernst Giese. 气候变化对塔里木河来自天山的地表径流影响[J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(1):1—11.]
- [28] Wang Guoya, Shen Yongping, Su Hongchao, *et al.* Runoff changes in Aksu River Basin during 1956—2006 and their impacts on water availability for Tarim River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(4):562—568. [王国亚, 沈永平, 苏宏超, 等. 1956—2006 年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响[J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(4): 562—568.]
- [29] Shen Yongping, Wang Guoya, Su Hongchao, *et al.* Hydrological processes responding to climate warming in the upper reaches of Kelan River basin with snow-dominated of the Altay Mountains region, Xinjiang, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29** (6): 845—854. [沈永平, 王国亚, 苏宏超, 等. 新疆阿尔泰山区克兰河上游水文过程对气候变暖的响应[J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(6):845—854.]
- [30] Shen Yongping, Liu Shiyin, Ding Yongjian, *et al.* Glacier mass balance change in Tailanhe river watersheds on the south slope of the Tianshan Mountains and its impact on water resources[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25** (2):124—128. [沈永平, 刘时银, 丁永建, 等. 天山南坡台兰河流域冰川物质平衡变化与其对径流的影响[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(2):124—128.]
- [31] Ayinuer • Ziyabeike, Gao Jing. Impacts of climate change on the surface runoff in Kuytun River on the north slope of Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(6): 1186—1193. [阿依努尔 • 孜牙别克, 高婧. 气候变化对天山北坡奎屯河高山区地表径流的影响[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(6): 1186—1193.]
- [32] Wang Jiaoyan. Impacts of climate change on runoff process of Khash River in the Western Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33** (5): 1153—1160. [王姣妍. 气候变化对天山西部喀什河径流变化过程的影响分析[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(5): 1153—1160.]
- [33] Shen Yongping, Wang Guoya, Ding Yongjian, *et al.* Changes in Merzbacher Lake of Inylchek Glacier and glacial flash floods in Aksu River basin, Tianshan during the period of 1903—2009[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(6): 993—997. [沈永平, 王国亚, 丁永建, 等. 百年来天山阿克苏河流域麦茨巴赫冰湖演化与冰川洪水灾害[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(6):993—997.]
- [34] Tang Shizhen. Changing characteristics of the meltwater runoff in the Sikesu River and their potential influence to the river runoff[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31** (4): 741—747. [汤世珍. 天山四棵树河冰川径流变化特征及其对河流径流的可能影响[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(4): 741—747.]
- [35] Gao Jianfang, Luo Guangxiao. Impact analysis of climate changes on river's runoffs in Hami Region Xinjiang. [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(4):748—758. [高建芳, 骆光晓. 气候变化对新疆哈密地区河川径流的影响分析[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(4):748—758.]
- [36] Jiao Keqin, Ye Baisheng, Han Tianding, *et al.* Response of runoff to climate change in the Glacier No. 1 at the headwater of Ürümqi River, Tianshan Mountains during 1980—2006[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(3): 606—611. [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.]
- [37] Yao Tandong, Liu Shiyin, Pu Jianchen, *et al.* Recent glacial retreat in High-Asia in China and its impact on water resources in Northwest China[J]. *Science in China(Series D)*, 2004, **34** (6): 535—543. [姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源影响[J]. *中国科学(D 辑)*, 2004, **34**(6): 535—543.]
- [38] Gao Xin, Ye Baisheng, Zhang Shiqiang, *et al.* Glacier melt water change and impact on Tarim River during 1961—2000 [J]. *Science in China Series D: Earth Science*, 2010, **53**(6): 880—891. [高鑫, 叶柏生, 张世强, 等. 1961—2006 年塔里木河流域冰川融水变化及其对径流的影响[J]. *中国科学(D)*, 2010, **40**(5):654—665.]
- [39] Harlan Hazaizi. River hydrological features in Altay region, Xinjiang[J]. *Chinese Hydrology*, 2001, **21**(4):53—55. [努尔兰 • 哈再孜. 阿勒泰地区河流水文特征[J]. *水文*, 2001, **21** (4):53—55.]
- [40] Duan Jianjun, Wang Yanguo, Wang Xiaofeng, *et al.* Impact of climate change and human activities on the water resources and ecological environment of Tarim River Basin in 1957—2006[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31** (5): 781—791. [段建军, 王彦国, 王晓风, 等. 1957—2006 年塔里木河流域气候变化和人类活动对水资源和生态环境的影响[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(5): 781—791.]

- [41] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Glacier Inventory of China, Ⅲ: Tianshan Mountains (Interior Drainage Area of Junggar Basin in Northwest) [M]. Beijing: Science Press, 1986: 7—22, 148. [中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录, Ⅲ: 天山山区(西北部准噶尔内流区) [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 7—22, 148.]
- [42] Wang Wenbin. The Observed Facts and Comparison of Tianshan Glacier Change in Different Regions, Xinjiang [D] PhD Thesis, Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2009: 51—64. [王文彬. 新疆天山不同区域冰川变化观测事实与对比 [D], 博士论文, 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2009: 51—64.]
- [43] Wang Lin. Research on Glacial Change Features in Kuytun River in Tianshan in the Recent 40 Years [D]. Master Thesis, Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2010: 24—46. [王林. 天山奎屯河流域近 40 年来冰川特征研究 [D]. 硕士论文, 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2010: 24—46.]
- [44] Li Zhongqin, Wang Feiteng, Zhu Guocai, *et al.* Basic features of the Miaoergou flat-topped glacier in East Tianshan Mountains and its thickness change over the past 24 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, **29** (1), 61—65. [李忠勤, 王飞腾, 朱国才, 等. 天山庙尔沟平顶冰川的基本特征和过去 24 a 间的厚度变化 [J]. 冰川冻土, 2007, **29** (1): 61—65.]
- [45] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Science. Glacier Inventory of China (III) (Tianshan Mountains: Interior Drainage Area of Scattered Flow in East) [M]. Beijing: Science Press, 1986. [中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录 (III 卷) (天山山脉: 东部散流内流区) [M]. 北京: 科学出版社, 1986.]
- [46] Xie Zichu, Wang Xin, Kang Ersi, *et al.* Glacial runoff in China: An evaluation and prediction for the future 50 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, **28** (4): 457—466. [谢自楚, 王欣, 康尔泗, 等. 中国冰川径流的评估及其未来 50 a 变化趋势预测 [J]. 冰川冻土, 2006, **28** (4): 457—466.]
- [47] Ye Baisheng, Han Tianding, Ding Yongjian. Some changing characteristics of glacier streamflow in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, **21** (1): 54—58. [叶柏生, 韩添丁, 丁永建. 西北地区冰川径流变化的某些特征. 冰川冻土, 1999, **21** (1): 54—58.]
- [48] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Jiao Kebin, *et al.* The response of river discharge to climate warming in cold region over China [J]. Quaternary Sciences, 2012, **32** (1), 103—110. [叶柏生, 丁永建, 焦克勤, 等. 我国寒区径流对气候变暖的响应 [J]. 第四纪研究, 2012, **32** (1): 103—110.]
- [49] Wang Jian, Shen Yongping, Lu Anxin, *et al.* Impact of climate change on snowmelt runoff in the mountainous regions of Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23** (1): 28—33. [王建, 沈永平, 鲁安新, 等. 气候变化对中国西北地区山区融雪径流的影响 [J]. 冰川冻土, 2001, **23** (1): 28—33.]
- [50] Wang Guoya, Mao Weiyi, He Bin, *et al.* Changes in Snow Covers during 1961—2011 and Its Effects on Frozen Ground in Altay Region, Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34** (6): 1293—1300. [王国亚, 毛炜峰, 贺斌, 等. 新疆阿勒泰地区积雪变化特征及其对冻土的影响 [J]. 冰川冻土, 2012, **34** (6): 1293—1300.]
- [51] Ye Baisheng, Chen Kegong, Shi Yafeng. A model simulating the processes in responses of glacier and runoff to climate change [J]. Chinese Geographic Sciences, 1997, **7** (3): 243—250. [叶柏生, 陈克恭, 施雅风. 冰川及其径流对气候变化响应过程的模拟模型—以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例 [J]. 地理科学, 1997, **17** (1): 32—40.]
- [52] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Liu Fengjing, *et al.* Responses of various-sized alpine glaciers and runoff to climate change [J]. Journal of Glaciology, 2003, **49**: 1—7.
- [53] Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, *et al.* Response of glacier melting to climatic change—Take Ürümqi Glacier No. 1 as an example [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, **29** (3): 333—343. [李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应—以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例 [J]. 冰川冻土, 2007, **29** (3): 333—343.]
- [54] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Liu Fengjing, *et al.* Advancement of cold-region hydrology studies over last the two decades in China—In memorial of outstanding cold-region hydrologist, Dr. Ye Baisheng, for his scientific achievements and innovative contributions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34** (5): 1009—1012. [丁永建, 刘时银, 刘凤景, 等. 中国寒区水文学研究的新阶段——记我国杰出寒区水文学家叶柏生研究员的创新与贡献 [J]. 冰川冻土, 2012, **34** (5): 1009—1012.]

The Responses of Glaciers and Snow Cover to Climate Change in Xinjiang (I): Hydrological Effects

SHEN Yong-ping¹, SU Hong-chao², WANG Guo-ya³, MAO Wei-yi⁴,
WANG Shun-de⁵, HAN Ping², WANG Ning-lian¹, LI Zhong-qin¹

(1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China*; 2. *Xinjiang Hydrology and Water Resources Bureau, Ürümqi Xinjiang 830000, China*;

3. *Geologic Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China*;

4. *Xinjiang Climate Center, Ürümqi Xinjiang 830002, China*; 5. *Aksu Hydrology and Water Resources Reconnaissance Bureau, Aksu Xinjiang 830000, China*)

Abstract: Xinjiang is the largest area of glaciers and snow cover resources in China. Glaciers and snow melt water plays an important role in water resources. The hydrological processes of the rivers have been changed by the responses of glaciers and snow cover to climate change during last 50 years. The runoff of mountain areas occupies over 80% of the total surface runoff, and the proportion of glaciers and snow melt water is up to 45% or more. The rivers in the Altai Mountains in the northern of Xinjiang and in the north slope of the Tianshan Mountains were mainly dominated by snowmelt runoff. The rivers are located in the southern slope of Tianshan, Kunlun Mountains, Karakorum Mountains and the Ili River Basin was supplied mainly by glaciers melt water. The flood season of the river supplied by snowmelt is in the spring to early summer, and which of the supplied by glacial melt water is in summer. With the

transform of the climate changes to warm and humid in Xinjiang, the hydrological processes of alpine basin had presented some significant responses to the climate warming and the snow cover increased; the maximum runoff month advanced in the rivers supplied by snow cover, and the runoff decreased obviously in summer; the runoff in June to September increased significantly in the river supplied by glacier melt, and the runoff in flood season increased, and the annual runoff increased. The changes of the hydrological process in different types of river have had a significant impact on water supply and flood safety management in the lower reaches of rivers. So it is necessary to adjust the strategies of the water resources management in order to adapt the effects of climate change on hydrological processes, and mitigate the effects of climate change on water safety.

Keywords: snow meltwater; glacial meltwater; climate change; hydrological processes; Xinjiang