

气候变化对中亚天山山区水资源影响研究

陈亚宁, 李 稚, 方功焕, 邓海军

(中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 本文结合资料分析和文献阅读, 对全球气候变化背景下的中亚天山山区水文、水资源变化进行了讨论分析。在全球升温滞缓背景下, 中亚天山山区在过去的10余年, 气温却一直处于高位态波动状态; 气候变暖及持续高位态波动加剧了山区冰川和积雪等固态水体的消融, 导致山区降雪率降低, 天山山区降雪率从1960-1998年的11%~24%降低到2000年以来的9%~21%, 有97.52%的冰川表现为退缩状态, 水储量呈明显减少趋势, 减小幅度约为-3.72 mm/a; 气候变暖直接影响区域水循环和水系统的稳定性, 引起径流补给方式和水资源数量的改变, 加大了水资源时空分布的不确定性。天山山区在短时期内因冰雪融水增多, 会出现径流量增加现象。但在未来气候持续变暖、降水条件维持不变的条件下, 河川径流量将会出现减少趋势。

关键词: 气候变化; 冰川积雪; 降雪率; 水文水资源; 中亚天山

DOI: 10.11821/dlxb201701002

1 引言

山区作为一个独特的地理单元, 是干旱、半干旱区大多数河流的发源地, 尤其在干旱区, 几乎所有的河流发源于山区^[1]。山区降水相对丰富, 以冰川、积雪、冻土等形式储水于山上, 为世界上约20%的人类的生存提供淡水资源^[1-2]。全球变暖加速了水循环, 加剧了极端气候水文事件, 降低了水资源有效性, 加大了水系统的脆弱性^[3-4], 尤其干旱区以冰川、积雪融水和降水混合型补给为主的河流, 对气候变化响应敏感, 气温和降水的变化使得河流水文过程变得更为复杂^[2]。

天山被誉为“中亚水塔”, 横亘于欧亚大陆腹地, 长约2500 km, 南北宽平均250~350 km, 由一系列高大山地、山间盆地和谷地组成, 是世界上距离海洋最远的山系, 也是世界上现代冰川最发育的山系之一^[5] (图1)。山区丰富的冰川、积雪作为中亚干旱区水资源的重要组成部分, 对气候变化非常敏感。气候变暖引起的山区冰川/积雪变化直接影响河川径流过程与水资源量的改变。中亚干旱区主要河流均发源于山区, 水资源的形成、补给、转化等方面的特点鲜明, 在世界干旱区都具有很强的代表性^[2, 6]。

研究结果显示, 自1998年开始, 全球出现升温滞缓现象 (Global Warming Hiatus)^[7-8]。在当今CO₂浓度不断增加的情况下, 为什么会出现增温滞缓? 其原因和机制尚无定论。然而, 值得关注的是, 在全球增温滞缓背景下, 中亚天山山区的气温却在1998年之后的15年间一直处于高位震荡状态, 而同时降水呈微弱增加趋势^[9]。在这种气候变化背景

收稿日期: 2016-08-24; 修订日期: 2016-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41630859, 41471030) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41630859, No.41471030]

作者简介: 陈亚宁(1958-), 男, 研究员, 中国地理学会会员(S110004398M), 主要从事干旱区水资源与地表过程研究。

E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

下, 中亚天山山区的降水形式、降水总量、雨雪比以及冰川、积雪等又都发生了怎样变化? 水文过程与水资源又如何响应? 这些问题尚不得而知。

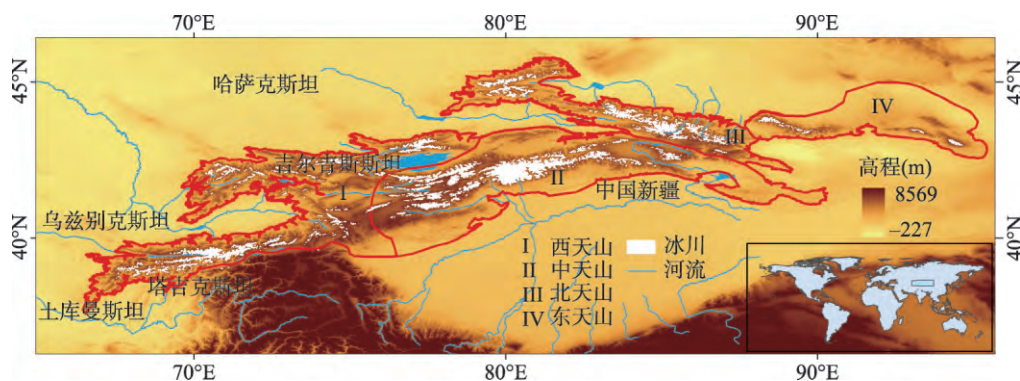


图1 中亚天山地理位置图

Fig. 1 Location of the study area (the Tianshan Mountains in Central Asia)

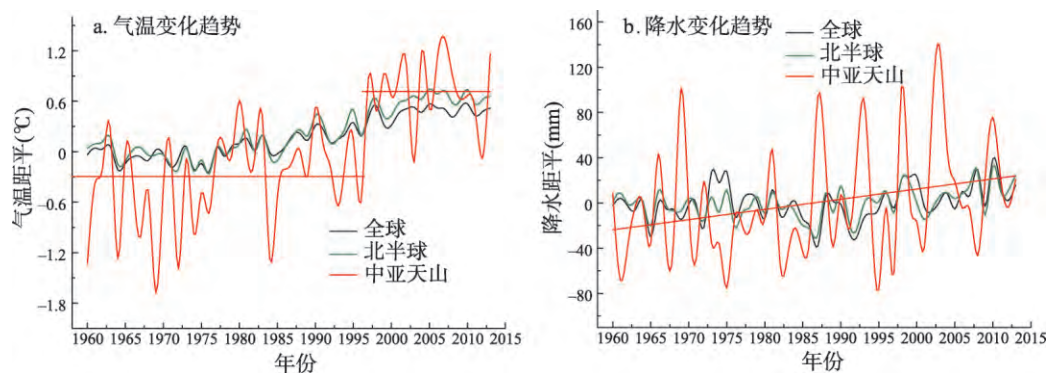
天山山脉连接着中国新疆以及中亚的哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦和乌兹别克斯坦等国家。由于多国多民族的政治复杂性与自然地理单元的完整性叠加在一起, 分散的政治主体割裂了天山科学研究的完整性, 导致天山区域性研究成果的局限性。气候变化引起的天山山区水循环和水系统的改变, 可能引起水资源数量变化, 加剧水文波动和水资源的不确定性, 从而导致中亚地区间、国家间的水事争端和绿洲经济与荒漠生态两大系统的水资源供需矛盾加剧, 影响中亚区域国家之间关系以及丝绸之路经济带建设。为此, 深入研究气候变化对天山山区的水资源影响, 准确掌握水资源的数量及变化, 不仅对科学管理水资源、服务于国家丝绸之路经济带建设具有重要意义, 同时为中国在中亚地区国际河流水资源谈判中争取主动权提供重要的科技支撑。

2 气候变化对水资源的影响

在过去的半个多世纪, 全球增温速率为 $0.175\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}^{[10]}$, 而中亚地区升温达 $0.36\sim 0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}^{[11]}$, 明显高于全球或北半球同期平均增温速率。利用CRUTS 3.23数据分析了中亚天山的气候变化, 发现中天山、东天山一带温度升高最为显著, 升温速率最高可达 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}^{[12]}$ 。详尽分析中亚天山的温度变化还发现, 年平均气温在1998年出现了“突变型”升高(图2), 统计气温突变升高以来的约15年间(1998-2013年), 气温较其之前的30年升高了约 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并且自1998年以来一直处于高位震荡^[9]。而这期间, 中亚天山山区的降水量变化比较平稳, 略有增加, 增加速率为 $8.4\text{ mm}/10\text{a}$, 略高于全球和北半球平均水平。其中, 西天山和北天山的部分地区增加明显, 增率达 $8.5\sim 12.3\text{ mm}/10\text{a}$; 中天山和东天山降水呈微弱增加趋势, 增加速率仅为 $6.1\sim 7.0\text{ mm}/10\text{a}$ 。在全球变暖, 尤其当前气温持续高位震荡影响下, 势必导致降水的时空分布和降水形式改变, 加快以冰川、积雪为主体的“固体水库”的消融和萎缩, 改变水资源构成和径流组分, 对天山山区的水资源系统产生重要的影响。

2.1 气候变暖导致山区降雪率变化

山区径流的形成不仅受气温和降水影响, 还与山区降水形式和降雪率变化有着密切联系。在气候变暖背景下, 降水形式、季节分配、冰川积雪时空分布等也随之会发生变化, 并影响山区水循环过程, 如河流补给类型、径流季节分配、径流量等^[2]。



数据来源: CRUTS V. 3.23

图2 1960-2014年间全球、北半球和中亚干旱区气温和降水变化趋势

Fig. 2 Trends of temperature and precipitation of the world, Northern Hemisphere, and Central Asia during 1960-2014

2.1.1 降雪率降低 在气候变暖和气温持续高位态波动状态下,山区降水的时空分布、海拔变化及雨雪比等都会发生相应变化,出现降雪初日推迟、终日提前、降雪(日数、量)减少、降雨增多的现象^[2]。气温升高导致山区不仅仅是降水量的变化,同时可能会对降水形式(如雨雪比)产生影响,从而改变山区的产汇流过程。本文结合中国气象局(data.cma.cn/)和全球历史气候网(Global Historical Climatology Network, GHCND)(ncdc.noaa.gov/ghcnm/)的气象站点实测数据,对天山山区4个不同区域过去50年的降雪率变化进行了分析,研究结果显示,天山山区气温急剧升高,降水也呈增加趋势,降雪率却呈现总体降低趋势,天山山区的降雪率从1960-1998年的11%~24%降低到2000年以来的9%~21%。这与Guo等^[13]对中国境内天山的研究结果是一致的。其中,在天山山区1500~2500 m的中海拔地区降雪率减少最为显著,而在>3500 m的高海拔地区变化幅度不甚明显。在昆仑山、瑞士阿尔卑斯山及美国大陆等地区,也发现了降雪日数相对于降雨日数的降低和降雪率降低等现象^[14-16]。如美国大陆,降雪率总体呈降低趋势,特别是在日均温为-5℃左右、增温幅度在0~3℃的地带,降雪率的降低不仅受到太平洋年代际涛动的影响,而且受到气候长期变暖的影响^[14]。值得一提的是,在全球变暖背景下,虽然降雪率有降低趋势,但是极端降雪量却没有相同的变化趋势。例如在北美洲气温0℃以下、海拔<1000 m的区域,虽然平均降雪量减少了65%,但极端日降雪量增加了8%^[17]。

2.1.2 降雪率变化的影响 降雪率变化不仅影响冰川物质的积累、消融过程,而且显著影响径流过程和水资源变化。降水形式的改变会影响水文过程,但如何影响径流量变化尚不确定^[18]。有研究者通过Budyko水热平衡假设分析了降水形式变化对径流量的影响,指出山区径流的形成和多寡不仅受气温和降水影响,还与山区降水形式和降雪率变化有直接关系^[19]。山区降雪率大与径流水平高有密切的联系,降雪率下降,可能导致河川径流量减少。然而,在山区降水量不变甚至有所增加的情势下,降雪率变化是如何影响水资源、抑制径流过程,其机理尚不明确^[19]。在融雪径流补给为主的地区,降雪向降雨的转变会显著影响流域水文过程,导致径流季节分配变化,径流峰值向春季移动,而不再集中于需水量最高的夏秋季节^[2]。在有些地区,降雪率降低还可能引起夏季的水资源短缺或洪水灾害^[20]。这对预估未来不同情景下的水资源变化趋势至关重要。

2.2 气候变暖加速山区冰川积雪消融

冰川、积雪作为“固态水库”储水于山区,是山区水资源的重要组成部分,气候变暖及持续高位震荡加快了天山山区的冰川退缩,加剧了山区冰川、积雪和冻土等固态水

体的消融, 加快了“中亚水塔”的萎缩^[1, 5, 21]。

2.2.1 冰川退缩严重 中亚天山山区共有冰川 10778 条, 总面积约为 13566.6 km² (glims.org/RGI/index.html)。在 1961-2012 年间, 约有 97.52% 的冰川表现为退缩状态, 有 2.14% 的冰川呈增加趋势, 0.34% 的冰川没有明显变化^[21]。本文对天山山区不同区域两个阶段 20 世纪 60 年代-2000 年、2000-2012 年的典型冰川变化情况进行了分析, 结果显示, 在 20 世纪 60 年代-2000 年期间, 西天山的冰川递减速率最大, 达 -20%; 其次是中天山, 递减速率为 -15%; 北天山和天山东部的博格达山区的冰川递减速率分别为 -13%、-3.1%。而在 2000 年以来, 西天山和中天山冰川的递减速率明显减缓, 分别为 -8.1%、-10.1%; 而北天山和天山东部的博格达山区冰川的递减速率增大, 分别达到 -13.8%、-7.45%。总体表现为天山西部地区(西天山、中天山西部及北天山西部)近 10 年来的冰川退缩速率要明显低于前一阶段, 而天山东部(中天山东部、北天山东部及博格达山)冰川退缩速率要明显快于前一阶段。

对不同海拔高度的冰川变化分析对比显示, 几乎所有海拔范围内的冰川面积都呈减少的趋势, 只是分布在低海拔区域冰川较高海拔区域的冰川退缩更为明显。如在北天山的 Karatal 河流域, 1989-2012 年冰川的平均最低海拔分布高度上升了 47 m, 从 3288 m 上升到 3335 m^[22]。分布在海拔 3600 m 以下高度的冰川退缩速率约为 -27%, 而分布在海拔 3600 m 以上冰川的退缩速率约为 -16%。比较 1989 年、2001 年及 2012 年 3 个时段的冰川变化显示, 在过去的 20 余年间, 该流域的冰川由 1989 年的 243 条减少到 2012 年的 214 条, 冰川面积也由 142.8 km² 减少到 109.3 km², 减少了 23.45% (表 1)。

表 1 中亚天山 Karatal River 流域冰川变化^[22]

Tab. 1 Changes of glaciers in the Karatal River Basin of Tianshan Mountians

分区	冰川面积(km ²)/数目(条)				面积变化(%) / 年平均变化率(%)		
	1956 年	1989 年	2001 年	2012 年	1956-1989 年	1989-2012 年	1956-2012 年
Terisakkan	14.1/36	8.4/21	6.5/21	5.1/17	-40/-1.22	-39/-1.68	-63/-1.13
Koksu	108.6/167	75.3/149	64.1/140	56.1/135	-31/-0.93	-26/-1.11	-48/-0.86
Shyzyhn	8.7/19	4.9/11	4.2/10	3.8/10	-44/-1.32	-22/-1.32	-56/-1.0
Kora	49.3/66	50.8/62	45.6/55	42.7/52	-22/-0.68	-21/-0.91	-39/-0.69
Total	198.9/285	142.8/243	122.2/226	109.3/214	-28/-0.86	-23/-1.02	-45/-0.81
Glaciers <0.1 in 1956	3.6/73	2.36/77	0.76/39	0.59/34	-34/-1.0	-75/-3.2	-83/-1.5

2.2.2 积雪面积减少 山区积雪的变化对于干旱区水资源情势有着直接影响。根据 MODIS 积雪数据, 分析了 2002-2013 年 10 余年间中亚天山的最大积雪面积与最小积雪面积的变化。结果显示, 2002-2013 年间天山山区的积雪面积总体呈减少趋势。其中, 中天山的积雪面积减少最为明显, 最大积雪面积和最小积雪面积减少值分别为 -672 km²/a、-60 km²/a, 西天山的积雪面积有所增加, 最大积雪面积和最小积雪面积增加值分别为 2.3 km²/a、16 km²/a。进一步比较不同区域的最大/最小积雪覆盖面积与研究区面积之比(最大/最小积雪覆盖率)显示, 中天山和东天山的最大积雪覆盖率的年递减率较大, 分别为 -0.32%、-0.28%, 而西天山的最大/最小积雪覆盖面积略呈增加趋势, 近 12 年分别增加了 0.01%、1.02% (表 2)。

2.2.3 水储量减少 气候变暖及持续高位震荡加速了天山山区的冰川退缩, 加剧了山区冰川积雪等固态水体的消融^[23-24], 导致山区水储量减少。本文利用 GRACE 重力卫星的时变重力位资料, 对天山山区 2003-2014 年的陆地水储量变化做了计算, 得出天山山区的陆地水储量呈明显减少趋势, 减小幅度约为 -3.72 mm/a (图 3)。同时详尽分析还发现, 不

表 2 2002-2013 年中亚天山山区积雪变化^①

Tab. 2 Snow cover changes of the Tianshan Mountains in Central Asia during 2002-2013

	最大积雪 ^②			最小积雪 ^③		
	覆盖率(%)	面积变化(km ² /a)	变化率(%/a)	覆盖率(%)	面积变化(km ² /a)	变化率(%/a)
西天山	87	2.3	0.001	1.4	16	0.085
中天山	79	-672	-0.32	4.7	-60	-0.029
北天山	90	-78	-0.28	0.51	-20	0.02
东天山	54	-240	-0.09	2.1	17.6	0.08

注：① 表中数据基于 MODIS 积雪遥感数据 MOD10A1 解析获得；② 最大积雪覆盖率是指各区域的最大积雪覆盖面积与该区域面积之比；③ 最小积雪覆盖率是指各区域的最小积雪覆盖面积与该区域面积之比。

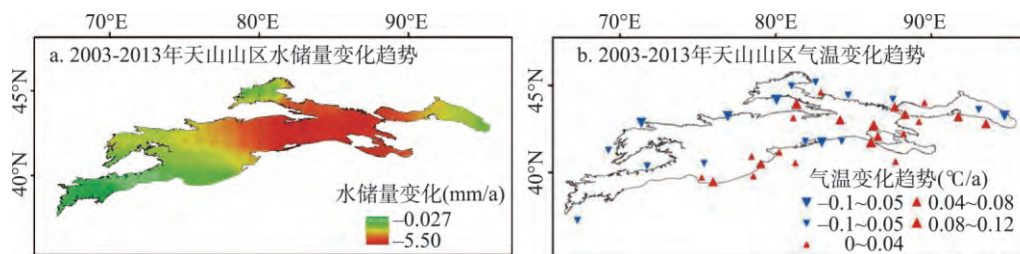


图 3 2003-2013 年中亚天山水储量变化分析

Fig. 3 Terrestrial water storage variation and temperature trend in the Tianshan Mountains during 2003-2013

同地区的水储量变化不尽一致。由图 3a 可见，天山山区水储量减少最为强烈的区域主要分布在中天山一带，达 -5.5 mm/a ，而西天山一带水储量减少幅度较小，约为 -0.12 mm/a 。天山山区的冰川积雪退缩及水储量减少与气候因子变化有着密切的关系。由图 3b 可见，中天山一带在 2003-2014 年间升温速率达到 $0.4\sim 0.8^\circ\text{C}/10\text{a}$ ，而西天山的温度升高不甚明显，个别地区甚至出现下降趋势；从降水变化分析，在 2003-2014 年，天山山区的降水量变化非常平稳，略有降低，降低速率为 -0.7 mm/a ，因此，温度的快速升高加速了冰川积雪消融，是导致天山山区水储量减少的重要因素。

2.3 气候变暖加大了水资源时空分布的不确定性

2.3.1 干旱区水循环各环节受陆表格局和气候变化影响显著 伴随着气温升高和高位震荡，水循环要素发生了改变，山区的降水、冰川、积雪等因气候变化而对河流水文过程的影响也变得更为复杂，水资源系统更为脆弱。中国境内天山过去 50 年气候变化对水文过程包括径流、潜在蒸散发、冰川积雪影响的研究结果显示，气候变暖引起的冰川、积雪变化的区域差异性和对气候变化响应的复杂性加大了应用水文模型开展融冰、融雪径流研究的不确定性^[5, 25]。

2.3.2 气候变暖加大了以冰川融水补给为主的河川径流量 由冰雪融水补给为主的河流，其水文过程受冰川积雪融水变化影响显著^[2]。由于气温持续的高位态波动引起冰川和积雪退缩，固态水资源转化为液态水资源，中亚以冰川融水补给为主的河流普遍呈现出径流量增加趋势，而且冰川比例越高，径流量增加水平越大^[26-28]。如发源于中天山的阿克苏河，其两大支流—库玛拉克河和托什干河（冰川面积比例分别为 16.2%、4.2%）的径流量，在 1998 年之后相比之前分别增加了 26.2% 和 14.9%，其中分别有 35%~48% 和 9%~24% 的径流量增加来自冰川融水^[29]；在 Karatal 河流域，冰川面积比例在 5% 以上的子流域的径流普遍呈上升趋势，而冰川面积在 2% 以下的子流域，径流增加不显著甚至呈现减

少趋势^[27];位于天山西部的伊塞克湖流域,几乎所有小河流的径流量都呈增加趋势,增加幅度在3.2%~36%之间^[30]。但是,对于天山东段的一些流域,由于冰川面积较小,冰川水资源补给量较低,径流量增加不明显,甚至出现了减少趋势,部分地区已经出现冰川消融拐点。如发源于东天山的哈密头道沟和二道沟流域,冰川面积比例不足1%,径流量在1998年后分别减少了12.5%和增加6.6%,这也证明了冰川比例越高,径流量增加水平越大。同样的规律在阿尔卑斯山也存在,如冰川覆盖度在10%以上的流域,径流量存在增加趋势,而冰川覆盖度在10%以下的流域,径流量呈明显减少趋势^[31]。

2.3.3 气候变暖改变了径流的年内分配规律 气候变化不仅引起径流补给方式和水资源数量的改变,而且改变了径流年内分配规律。由于气候变暖,天山山区冰川积雪融水补给河流的最大径流出现时间已经出现了季节性变化,表现为冰川和积雪消融期提前、径流峰值提前等一系列水文响应^[19]。以积雪融水为主要补给源的河流,水文过程对气候变暖的响应表现为最大径流峰值前移,夏季径流减少明显;以冰川融水补给为主的河流,一般表现为6-9月汛期径流量明显增大,汛期洪水增多,年径流量增加^[32]。例如,位于西天山锡尔河的支流Naryn河,由于冬季气温上升和日最高气温高于融化基温的天数增加,流域内冰川由20世纪90年代末的1019 km²退缩到2000年代中期的926 km²,冬季和早春的径流明显增加^[33];对于以冰川融水补给为主的库玛拉克河,在1998年以后冬季、春季和夏季的径流增加量分别为13%、15%和15%,而以融雪径流补给为主的托什干河流域,3个季节的径流增加分别为65%、56%和11%,也证明了以融冰水和以融雪水补给为主的河流对气候变暖响应的差异性。同样,在世界其他山区流域也发现了由于气候变暖导致的由冰川/积雪融水补给河流的水文过程的改变。如美国山区典型流域,融雪日期提前使得径流峰值提前,积雪减少明显削弱了洪峰流量^[34];在兴都库什—喜马拉雅山脉由于气候变暖导致的冰川积雪融水径流提前约30天,冰雪融水径流在过去30年增加了33%~38%^[35]。

2.3.4 气候变暖改变了水资源构成 天山山区的水资源主要由高山冰川积雪融水、中山森林带降水以及低山带基岩裂隙水构成,产汇流机制复杂,在世界干旱区都具有很强的代表性。长期以来,天山山区的水资源依靠自然界独特的水循环过程维持着相对脆弱的平衡关系。气候变暖及高位持续波动,不仅对河流上源冰川积雪储量造成影响,同时导致水资源补给和径流组分发生变化,这对变化环境下的水资源未来趋势预估带来了新的挑战。

基于分布式VIC模型,对气候变化影响下的阿克苏河两大支流径流组分的未来变化进行了分析,结果显示,冰川融水、积雪融水和降雨分别占库玛拉克河和托什干河径流补给量的43.8%、27.7%、28.5%和23.0%、26.1%、50.9%^[36]。再如,发源于东天山的乌鲁木齐河,在1950-2009年间径流量增加了10%^[28],其中1994年以后69.7%的径流增加是由于冰川融水导致的,冰川融水所占比例从62.8%增加到72.1%^[37-38];位于天山西段的伊犁河流域,其主要支流特克斯河的冰川退缩尤为突出,引起了河流的补给类型的改变,降雨径流所占比例减少,自20世纪70年代以来,特克斯河流域冰川退缩了22%,降雨径流由1966-1975年的9.8%减少到2000-2008年的7.8%^[39]。

2.3.5 气候变化加剧了水文波动性 气候变暖影响区域水循环和水系统的稳定性,加剧了河流水文波动和水资源不确定性。天山山区的河川径流对冰川、积雪的依赖性较强,随着冰川退缩、冰川调节功能的下降以及因降水异常等极端气候水文事件的影响而变率增大^[2],河流水文过程将会变得更为复杂,极端气候水文事件的频度和强度增大。如中国西北干旱区的极端水文事件的发生频率由20世纪80年代以前的40次/10a,增加到20世纪

80年代后期以来的78次/10a^[40]；中国最大的内陆河—塔里木河，2009年和2010年上游的来水量分别为 $14.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $72 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，是塔里木河流域有水文记录以来径流量最少和最多年份，二者比值相差5倍多。研究结果显示，随着气候变暖，冰川面积比例降低，径流的变异系数（径流不稳定性）呈幂函数形式增长^[26]。预估到2070-2099年，塔里木河流域的冰川将退缩32%~90%，导致径流量减少，水资源危机加重，不确定性将进一步加剧^[30]。

3 结语

自1998年以来全球出现了升温滞缓现象，中亚地区与全球气候变化大趋势一致，但是，值得一提的是，1998年以来这一地区的气温却一直处于高位态波动状态，较其之前的30年平均温度升高了1.0℃。中亚天山深居欧亚大陆腹地，是世界上距海洋最远的山系，在过去的15年，气温为何会出现高位态波动，值得特别关注。因为在中亚干旱区，气温升高及持续高位态波动导致降雪率降低，加速天山山区冰川积雪融化，加快了以冰川、积雪为主体的“固体水库”的消融和萎缩，加重了中亚干旱区水资源危机，对中亚地区的发展和丝绸之路经济带建设产生重要影响。

全球变暖加速了山区冰川积雪消融，加大了冰川积雪融水量，天山山区在近期或一定时段内会因为冰雪融水增多，径流量增加现象。但是，就长远来看，由于冰川萎缩，冰川储量减少，在未来气候持续变暖、降水条件维持不变的条件下，河川径流量总体上会出现减少趋势，尤其是夏季径流量。届时，中亚干旱区生产与生态用水的矛盾会进一步加剧。

全球变暖导致降水的时空分布、降水形式发生变化，加大了水文波动性，改变了水资源构成和径流组分，给变化环境下的水资源未来趋势预估带来了新的挑战。为此，需要进一步加强山区水资源储量变化趋势、速率及影响机制研究，加强山区径流组分变化及其对气候变化响应的研究，为准确掌握水资源数量变化、科学管理水资源提供科学基础，服务于国家一带一路建设。

参考文献(References)

- [1] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian Water Towers. *Science*, 2010, 328: 1382-1385.
- [2] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 2005, 438: 303-309.
- [3] IPCC. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013.
- [4] Douville H, Chauvin F, Planton S, et al. Sensitivity of the hydrological cycle in increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. *Climate Dynamics*, 2002, 20: 45-68.
- [5] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2012, 2(10): 725-731.
- [6] Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295-1304. [陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展, *地理学报*, 2014, 69(9): 1295-1304.]
- [7] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 2013, 501: 403-407.
- [8] Easterling D R, Wehner M F. Is the climate warming or cooling? *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(8): 108706.
- [9] Li Z, Chen Y, Li W, et al. Potential impacts of climate change on vegetation dynamics in Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(24): 12345-12356.

- [10] Harris I, Jones P, Osborn T, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations: The CRU TS3. 10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 2014, 34: 623-642.
- [11] Hu Z, Zhang C, Hu Q, et al. Temperature changes in Central Asia from 1979 to 2011 based on multiple datasets. *Journal of Climate*, 2014, 27: 1143-1167.
- [12] Jones P D, Lister D H, Osborn T J, et al. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2012, 117: D05127.
- [13] Guo L, Li L. Variation of the proportion of precipitation occurring as snow in the Tianshan Mountains, China. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(7): 1379-1393.
- [14] Knowles N, Dettinger M D, Cayan D R. Trends in snowfall versus rainfall in the western United States. *Journal of Climate*, 2006, 19: 4545-4559.
- [15] Feng S, Hu Q. Changes in winter snowfall/precipitation ratio in the contiguous United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D15).
- [16] Serquet G, Marty C, Dulex J P, et al. Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland. *Geophysical research letters*, 2011, 38(7): 128-136.
- [17] O'Gorman P A. Contrasting responses of mean and extreme snowfall to climate change. *Nature*, 2014, 512(7515): 416-418.
- [18] Regonda S K, Rajagopalan B, Clark M. Seasonal cycle shifts in hydroclimatology over the western United States. *Journal of Climate*, 2005, 18(2): 372-384.
- [19] Berghuijs W R, Woods R A, Hrachowitz M, et al. A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow. *Nature Climate Change*, 2014, 4: 583-586.
- [20] Bocchiola D. Long term (1921-2011) hydrological regime of Alpine catchments in northern Italy. *Advances in Water Resources*, 2014, 70: 51-64.
- [21] Farinotti D, Longuevergne L, Moholdt G, et al. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. *Nature Geosci*, 2015, 8(9): 716-722.
- [22] Kaldybayev A, Chen Y, Issanova G, et al. Runoff response to the glacier shrinkage in the Karatal River Basin, Kazakhstan. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9: 1-8.
- [23] Li B, Zhu A, Zhang Y, et al. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(178): 425-432.
- [24] Wang P Y, Li Z Q, Li H L, et al. Glacier No. 4 of Sigong River over Mt. Bogda of eastern Tianshan, Central Asia: thinning and retreat during the period 1962-2009. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66: 265-273.
- [25] Chen Y N. *Water Resources Research in Northwest China*. New York: Springer, 2014. doi: 10.1007/978-94-017-8017-9. pp.440.
- [26] Zhang Y, Luo Y, Sun L, et al. Using glacier area ratio to quantify effects of melt water on runoff. *Journal of Hydrology*, 2016, 538: 269-277.
- [27] Kaldybayev A, Chen Y, Issanova G, et al. Runoff response to the glacier shrinkage in the Karatal river basin, Kazakhstan. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9: 1-8.
- [28] Kong Y, Pang Z. Evaluating the sensitivity of glacier rivers to climate change based on hydrograph separation of discharge. *Journal of Hydrology*, 2012, 434: 121-129.
- [29] Duethmann D, Bolch T, Farinotti D, et al. Attribution of streamflow trends in snow and glacier melt-dominated catchments of the Tarim River, Central Asia. *Water Resources Research*, 2015, 51: 4727-4750.
- [30] Dikich A, Hagg W. ABHANDLUNGEN-Climate driven changes of glacier runoff in the Issyk-Kul Basin, Kyrgyzstan, *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 2003, 39: 75-86. (in Russian)
- [31] Birsan M V, Molnar P, Burlando P, et al. Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 2005, 314: 312-329.
- [32] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): Hydrological effect. *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. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 513-527.]
- [33] Kriegel D, Mayer C, Hagg W, et al. Changes in glacierisation, climate and runoff in the second half of the 20th century in the Naryn basin, Central Asia. *Global Planet Change*, 2013, 110: 51-61.
- [34] Campbell J L, Driscoll C T, Pourmokhtarian A. Streamflow responses to past and projected future changes in climate at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, United States. *Water Resources Research*, 2011, 47(2): W02514.

- [35] Singh P, Bengtsson L. Impact of warmer climate on melt and evaporation for the rainfed, snowfed and glacierfed basins in the Himalayan region. *Journal of Hydrology*, 2005, 300(1-4): 140-154.
- [36] Zhao Q D, Zhang S Q, Ding Y J, et al. Modeling hydrologic response to climate change and shrinking glaciers in the highly glacierized Kunma Like River Catchment, Central Tian Shan. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16: 2383-2402.
- [37] Sun M, Li Z, Yao X, et al. Rapid shrinkage and hydrological response of a typical continental glacier in the arid region of northwest China: Taking Urumqi Glacier No. 1 as an example. *Ecohydrology*, 2013, 6: 909-916.
- [38] Sun M, Li Z, Yao X, et al. Modeling the hydrological response to climate change in a glacierized high mountain region, northwest China. *Journal of Glaciology*, 2015, 61: 127-136.
- [39] Xu B, Lu Z, Liu S, et al. Glacier changes and their impacts on the discharge in the past half-century in Tekes watershed, Central Asia. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2015, 89: 96-103.
- [40] Wang H, Chen Y, Li W. Characteristics in streamflow and extremes in the Tarim River, China: Trends, distribution and climate linkage. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(5): 761-776.

Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia

CHEN Yaning, LI Zhi, FANG Gonghuan, DENG Haijun

(State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography,
CAS, Urumqi 830011, China)

Abstract: Changes in hydrological processes and water resources under climate change in the Tianshan Mountains of Central Asia have been investigated based on data analysis and paper review. Under the context of global warming hiatus, temperature of the Tianshan Mountains in Central Asia has been in a state of high variability, which has accelerated the melting of glacier and snow. Warming has resulted in a series of changes in water resources. Snowfall fraction decreased from 11%-24% in 1960-1998 to 9%-21% in 2000-2014, 97.25% of the glaciers retreated in the last 50 years; and water storage decreased at a rate of -3.72 mm/a during 2003-2014. Warming has led to changes in mountainous hydrological processes and water resources. The runoff in the Tianshan Mountains has increased due to the accelerated glacier/snow melt, however, the runoff will decrease in the long term under continuous warming and current precipitation conditions.

Keywords: climate change; glacier and snow; snowfall fraction; water resources; Tianshan Mountains, Central Asia