

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0101

YAO Junqiang, CHEN Jing, Dilinuer Tuoliwubieke, et al. Trend of climate and hydrology change in Xinjiang and its problems thinking[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5):1498-1511. [姚俊强, 陈静, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 新疆气候水文变化趋势及面临问题思考[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5):1498-1511.]

新疆气候水文变化趋势及面临问题思考

姚俊强¹, 陈静¹, 迪丽努尔·托列吾别克¹, 韩雪云², 毛炜峰¹

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆乌鲁木齐 830002; 2. 新疆维吾尔自治区气候中心, 新疆乌鲁木齐 830002)

摘要: 新疆是亚洲中部干旱区的重要组成部分, 对全球变化响应异常敏感, 水资源问题突出, 研究变暖背景下新疆的气候水文变化及面临的问题, 对应对和适应未来气候变化及水资源安全具有重要意义。基于最新的气候水文观测资料和相关成果, 研究了新疆水文气候要素变化趋势与演变特征, 探讨了目前面临的主要问题及对策建议。结果表明: 1961—2018年新疆升温幅度高于全球平均水平, 冬季升温贡献最大; 降水量和降水日数均明显增加, 夏季降水增加最显著; 21世纪以来气温和降水均在高位波动, 但增加幅度减缓, 气候有从暖湿化向暖干化转折的迹象, 干旱化趋势加剧。21世纪以来, 极端最高气温、极端最低气温和高温日数显著增加, 高温初日提前, 高温终日推迟, 极端降水事件、暴雨雪强度和频次明显增加。受气候变化和人类活动共同影响, 塔里木河流域源流区径流量明显增加, 干流径流量微弱减少; 博斯腾湖水位阶段性变化明显, 2013年以来逐渐扩张; 艾比湖总体萎缩, 而山区湖泊赛里木湖面积稳定扩张。新疆气候水文变化面临主要问题包括: 对新疆气候变化趋势和物理过程认识不明、水文气象灾害风险加剧难以把控、气候变化影响不确定性加剧, 水安全问题迫在眉睫。建议趋利避害, 抓住气候机遇, 加快生态环境建设; 开展气候水文综合科学考察, 加强机理研究, 构建综合观测协同网络, 提高水文气象灾害风险调控能力; 将有效应对、有序适应气候变化提升到战略的高度, 为建设美丽新疆和高质量发展服务。

关键词: 新疆; 气候变化; 径流; 湖泊; 水资源; 对策建议

中图分类号: P468 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)05-1498-14

0 引言

新疆地处欧亚大陆腹地, 中国西北干旱区西部, 是亚洲中部干旱区的重要组成部分。受“三山夹两盆”地形格局, 形成独具特色的山区-绿洲-荒漠三大生态系统, 气候复杂, 水循环过程独特, 生态环境脆弱, 对气候变化极其敏感, 是全球变化研究的关键区, 在全球干旱区具有独特的代表性^[1]。

21世纪初, 施雅风院士提出了西北干旱区主要是新疆地区气候“暖湿化”转型, 即随着温度上升, 新疆气候水文要素发生明显改变, 出现降水量、径流量和冰川消融量持续增加, 湖泊水位显著上升等明显信号, 同时预估认为气候暖湿转型可能是世纪性的^[2-3]。围绕气候“暖湿化”转型, 学者们从转型

事实、可能影响和机理机制等角度进行了高热度的研究, 对“暖湿化”问题有了较为系统的认识^[4-12]。进入21世纪以来, 新疆气候发生明显变化, 表现为气温出现跃变式升高且维持高温波动, 降水量增加幅度较21世纪以前有所减缓, 干湿气候随着发生改变^[13-17]。在此背景下, 新疆的降水量、极端气候事件会发生怎样的变化? 河流径流、湖泊水文、冰川等水文过程与水资源又如何变化?

可以肯定的是, 新疆气候的明显改变势必会对区域极端事件、水文过程和水资源产生重要影响, 进而影响到新疆的水资源安全和社会经济可持续发展。为此, 本研究基于最新的气候水文观测资料和相关成果, 研究新疆水文气候要素变化趋势与演

收稿日期: 2020-03-05; 修订日期: 2020-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1903113; 42171038); 中国气象局气候变化专项(CCSF202028)资助

作者简介: 姚俊强, 副研究员, 主要从事干旱区气候变化与水循环研究. E-mail: yaojq1987@126.com.

变特征，探讨目前面临的主要问题，并尝试提出对策建议。研究成果对新疆水资源科学管理、应对和适应未来气候变化带来的影响具有科学意义。

1 数据说明

1.1 气象数据

新疆区域现有长期气象观测台站 105 个，考虑到各台站起始时间不一以及个别台站迁站等情况，经对比选取了 89 个台站完整的逐日平均气温、最高/最低气温、降水量数据序列，时间跨度为 1961 年 1 月至 2018 年 12 月。数据由新疆气象信息中心提供，按气象业务标准经过了严格的质量控制。四季划分按照春季为 3—5 月，夏季为 6—8 月，秋季为 9—11 月，冬季为当年 12 月至次年 2 月的标准。根据气候区划的指标以及地理特征，将新疆分为新疆北部、天山山区和新疆南部三个气候区(图 1)。

标准化降水蒸散指数(SPEI)是常用的表征区域干湿变化的指数之一，该指数综合考虑了降水和蒸发作用，而且具有多时间尺度和对气温变化敏感等优点，在变暖背景下干湿分析中具有明显的优势^[13,16]。极端最高气温是指日最高气温大于第 10 百分位值的气温；极端降水事件是指日降水量大于第 5 百分位值的降水量。根据新疆地方降水量业务标准，在新疆区域内，暴雨指一昼夜 24 小时内降雨量超过 24 mm 或 12 小时降雨量超过 20 mm；而暴雪指一昼夜 24 小时内降雪量超过 12 mm 或 12 小时降雪量超过 10 mm。年暴雪日数是指前一年 7 月至当年 6 月之间的年暴雪日数。

1.2 径流量数据

新疆河流众多，选取塔里木河流域和艾比湖流域作为新疆南部和北部代表性流域进行研究。塔

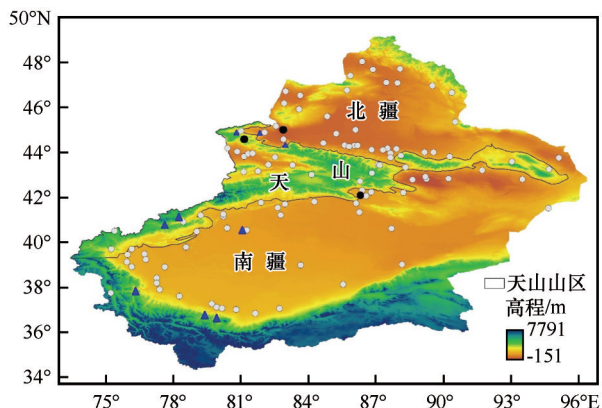


图 1 新疆区域位置及气象水文站点分布图(白色圆点为气象站，蓝色三角形为代表性水文站，黑色圆点为典型湖泊位置；黑色实线为三个气候区的边界)

Fig. 1 Map showing the location and distribution of meteorological and hydrological stations in Xinjiang (the white dot is the weather station, the blue triangle is the representative hydrological station and the black dot is the typical lake location; the solid black line is the boundary of the three climatic zones)

里木河流域位于新疆南部塔里木盆地，流域总面积约 $102 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是中国最大的内陆河流域。历史上曾有九大水系汇入塔里木河，目前仅有阿克苏河、叶尔羌河与和田河常年有地表水汇入塔里木河干流^[18]。如表 1 所示，选取塔里木河流域“三源一干”上的 6 个水文站 1961—2017 年径流量数据，其中阿克苏河为库玛拉克河协合拉水文站和托什干河沙里桂兰克站监测径流之和，和田河为喀拉喀什河乌鲁瓦提站和玉龙喀什河同古孜洛克站水文监测径流之和，叶尔羌河为卡群站监测数据，塔里木河干流采用阿拉尔水文监测站数据。选取艾比湖流域精河的精河水文站、博尔塔拉河上游温泉水文站和出山口的博乐站 1961—2017 年径流量数据。

表 1 新疆代表性流域及水文站点信息

Table 1 Information of representative basins and hydrological stations in Xinjiang

流域名称	河流名称	水文站	经度/E	纬度/N	平均径流量/($\times 10^8 \text{ m}^3$)
塔里木河流域	阿克苏河	协合拉	79. 61°	41. 57°	49. 0
		沙里桂兰克	78. 54°	40. 94°	28. 3
	和田河	乌鲁瓦提	79. 44°	36. 83°	22. 3
		同古孜洛克	79. 92°	36. 81°	23. 1
	叶尔羌河	卡群	76. 87°	37. 98°	67. 6
	塔河干流	阿拉尔	81. 30°	40. 54°	45. 9
艾比湖流域	精河	精河	82. 92°	44. 37°	4. 7
	博尔塔拉河	温泉	81. 03°	44. 98°	3. 1
		博乐	82. 05°	44. 87°	5. 0

1.3 湖泊变化数据

选取博斯腾湖、艾比湖和赛里木湖为代表性湖泊,其中博斯腾湖水位数据来自塔里木河管理局,时间尺度为1961—2019年。基于Landsat TM/ETM和环境减灾卫星遥感监测的新疆主要湖泊夏季水域面积变化数据来自新疆气候中心《2018年新疆气候变化监测公报》^[19],时间尺度为1999—2018年。

2 结果与分析

2.1 新疆气候变化特征

2.1.1 气温变化趋势

1961—2018年新疆年平均气温呈显著上升趋势,升温速率为 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.01$),高于

1951—2018年中国的升温速率 $[0.24\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$,《中国气候变化蓝皮书(2019)》][图2(a)]。1997年以后出现了明显增暖,1997—2018年气温比1961—1996年偏高了 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,是有观测记录以来最暖的19年。

从年代际变化来看,20世纪60年代至80年代初期变化趋势不明显;1987—1997年气温急剧增加,升温速率高达 $0.79\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.01$);1997年以来气温增加趋势停滞,升温速率仅为 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P>0.05$),但依然在高位震荡。冬季平均气温上升趋势最明显 $[0.40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, $P<0.01$],对全年升温速率贡献最大;春、秋季次之 $[0.30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, $P<0.01$],夏季升温速率最低 $[0.22\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, $P<0.01$]。

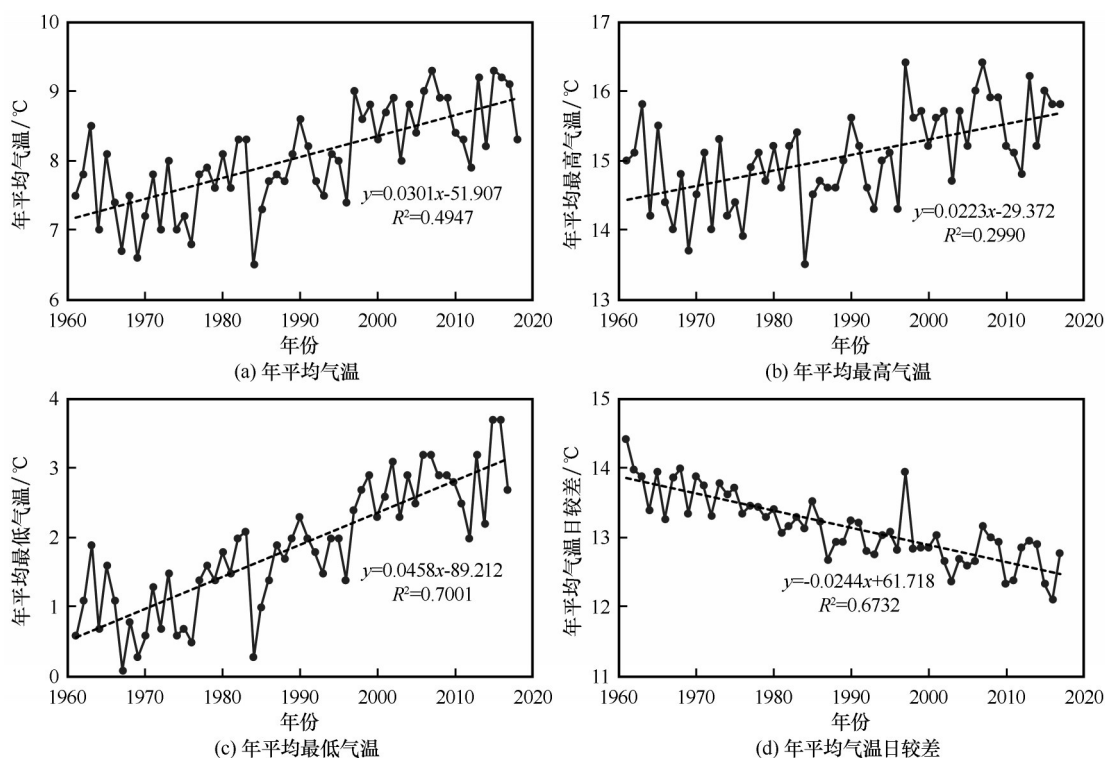


图2 1961—2018年新疆区域气温变化趋势

Fig. 2 Annual variations of mean air temperature (a), mean maximum air temperature (b), mean minimum air temperature (c) and mean daily temperature range (d)

升温趋势有明显区域差异,新疆北部升温速率最大 $[0.35\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, $P<0.01$],其次是天山山区 $[0.30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, $P<0.01$],新疆南部升温速率 $[0.26\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, $P<0.01$]最小(表2)。1961—2018年新疆有97%的站点有升温趋势,仅在南部的库车和阿克陶温度降低。

1961—2018年新疆年平均最高气温和最低气

温均有上升趋势,升温速率分别为 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.01$)和 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.01$),最低温度升温速率是最高温度升温速率的2倍[图2(b)、2(c)]。新疆南部最高气温增加最快,而北部最低温度升温最明显(表2)。季节上,春季最高气温升温速率最大 $[0.27\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, $P<0.01$],夏季最小 $[0.16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, $P<0.01$];而冬季最低气温升温速率最大

表2 1961—2018年新疆及各区域年和季节气温变化趋势

Table 2 Temperature variation trends (mean, maximum and minimum) in Xinjiang and its three sub-regions, annual and seasonal, 1961 – 2018

	季节	新疆	新疆北部	天山山区	新疆南部
平均气温/ $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$	全年	0.30*	0.35*	0.30*	0.26*
	春季	0.30*	0.34*	0.27*	0.27*
	夏季	0.22*	0.25	0.29*	0.16
	秋季	0.32*	0.39*	0.25	0.25
	冬季	0.40*	0.47*	0.32*	0.36*
最高气温/ $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$	全年	0.21*	0.22*	0.22*	0.21*
	春季	0.27*	0.37*	0.25	0.27*
	夏季	0.16	0.09	0.1	0.13
	秋季	0.36*	0.34*	0.30*	0.36*
	冬季	0.24	0.2	0.17	0.36*
最低气温/ $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$	全年	0.44*	0.51*	0.44*	0.38*
	春季	0.45*	0.53*	0.43*	0.38*
	夏季	0.40*	0.55*	0.53*	0.41*
	秋季	0.50*	0.56*	0.50*	0.44*
	冬季	0.52*	0.75*	0.54*	0.52*

注：*表示通过了95%的显著性检验。

$[0.52^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}, P<0.01]$ ，夏季最小 $[0.40^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}, P<0.01]$ (表2)。新疆最低气温升温趋势远远高于最高气温，导致年平均气温日较差呈明显的减小趋势，减小速率为 $0.24^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$

[图2(d)]。

2.1.2 降水量变化趋势

1961—2018年新疆年降水量呈增加趋势，增加速率为 $10\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}(P<0.05)$ [图3(a)]。1986年以前波动变化，1987年以后明显增加，比之前增加了35.3 mm，但年际变化幅度明显增加。区域分布来看，天山山区增湿速率最大 $[16\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}, P<0.05]$ ，新疆北部次之 $[12.3\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}, P<0.05]$ ，新疆南部最小 $[5.5\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}, P<0.05]$ (表3)。

1961—2018年新疆四季降水量均呈增加趋势。其中，夏季降水量增加趋势最明显 $[3.9\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}, P<0.05]$ ，春、秋季次之 $[2.1\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $2.0\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}, P<0.05]$ ，冬季最小 $[1.9\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}, P<0.05]$ 。区域来看，北疆冬季增加速率最大 $[3.4\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ ，春季最小 $[2.4\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ ；天山山区夏季增加速率最大 $[7.1\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ ，冬季最小 $[2.1\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ ；南疆夏季增加速率最大 $[3.2\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ ，冬季最小 $[0.4\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ (表3)。夏季，天山降水量增多速率最大；冬季，北疆增加速率最大。通过显著性检验的站点来看，新疆75%的站点降水量有显著增加趋势，其中冬季有97%的站点降水量显著增加，夏秋季分别有37%和33%的站点降水量显著增加，春季仅有7.4%的站点降水量显著增加。

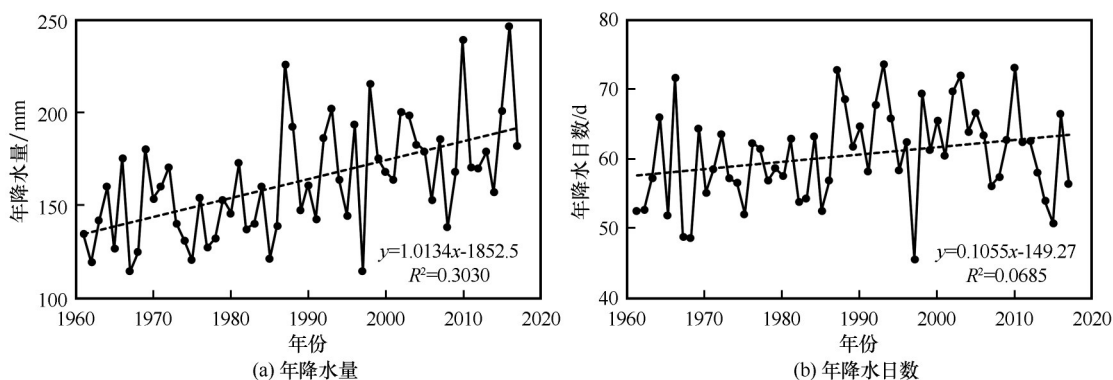


图3 1961—2018年新疆区域年降水量(a)和年降水日数(b)变化趋势

Fig. 3 Annual variations of precipitation (a) and precipitation days (b) in Xinjiang from 1961 to 2018

1961—2018年新疆年日降水量 $\geq 0.1\text{mm}$ 降水日数呈增加趋势，增加速率为 $0.96\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}(P>0.05)$ [图3(b)]。天山降水日数增加速率最大 $[1.1\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ ，新疆南部最小 $[0.5\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ ，增加趋势均不显著。新疆仅有29%的站点的降水日数呈显著增多趋势，主要分布在新疆西北部、天

山北坡和塔里木盆地南缘。

2.1.3 干湿气候变化

1961—2018年新疆干湿气候有下降趋势，12个月时间尺度SPEI指数所反映的变化趋势为 $-0.0135\cdot\text{a}^{-1}(P<0.05)$ ，并有明显的年代际特征。1997年之后发生明显的突变，从1961—1996年的

表3 1961—2018年新疆及各区域年和季节降水量变化趋势[单位: mm·(10a)⁻¹]

Table 3 Variation trends of annual and seasonal precipitation in Xinjiang and its three sub-regions, from 1961 to 2018 [unit: mm·(10a)⁻¹]

季节	新疆	新疆北部	天山山区	新疆南部
全年	10.0 *	12.3 *	16.0 *	5.5 *
春季	2.1 *	2.4	4.5 *	0.8
夏季	3.9 *	3.4 *	7.1 *	3.2 *
秋季	2.0 *	2.9 *	2.3 *	1.0
冬季	1.9 *	3.4 *	2.1 *	0.4

注: 带*表示通过了95%的显著性检验。

相对湿润期(变化趋势为0.0269·a⁻¹)转折为1997—2018年的干旱期(变化趋势为-0.0199·a⁻¹)(图4)。

约70%以上的站点有干旱化趋势,主要在新疆南部、东部和天山山区,而在新疆西北部、塔里木盆地西南部和帕米尔高原增湿特征明显。因此,1997年以来新疆气候有逐渐从暖湿转向暖干的迹象。

1961—2018年新疆平均逐年干旱月(SPEI≤-1)有明显的增加趋[0.5 mon·(10a)⁻¹, P<0.01]。1997年以前干旱月份每年不超过2个月,之后逐渐增加;21世纪以来,年均干旱月份数大于4个月。1997—2018年干旱频率增加明显,且干旱强度越大,频率增加越明显,极端干旱频率从1961—1996年的0.6次·a⁻¹增加到1997—2018年的2.65次·a⁻¹。此外,1961—1996年期间以区域性干旱为主,而1997—2018年站次比明显上升,新疆干旱发生范围在1997年以后明显扩大。

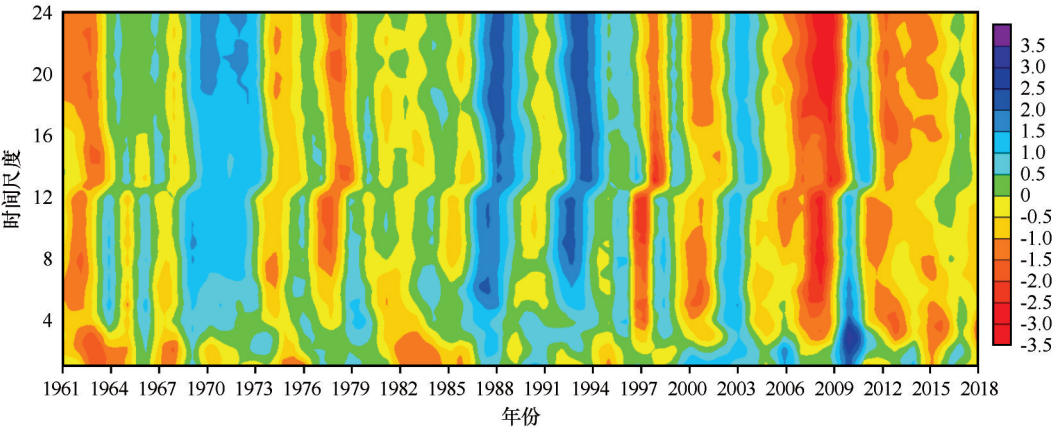


图4 1961—2018年新疆不同时间尺度(1~24个月)SPEI指数的变化特征

Fig. 4 Annual variation of SPEI index on different time scales (1~24 months) in Xinjiang from 1961 to 2018

2.1.4 极端气候变化

在变暖背景下,新疆极端天气气候事件频率和强度逐渐增大。1961—2018年极端最高气温呈上升趋势,升温速率为0.13℃·(10a)⁻¹(P<0.05),其中76%的站点极端最高气温增加明显,主要分布在新疆南部和东部。≥35℃高温日数明显增加,高温初日在提前,终日在延迟(图5)。随着气候变暖,极端高温发生的频次和强度增加,21世纪以来极端高温增加趋势更加显著。极端最低气温上升明显,升温速率为0.67℃·(10a)⁻¹(P<0.01),远远高于极端最高气温的升温速率,其中20世纪80年代以来更加明显,21世纪后波动大(图5)。区域来看,新疆北部升温速率最大[0.84℃·(10a)⁻¹, P<0.01],其次是天山山区[0.61℃·(10a)⁻¹, P<0.01]和新疆南部[0.54℃·(10a)⁻¹, P<0.01]。≤-30℃低温日数有显著减小趋势[-0.41℃·(10a)⁻¹, P<0.01],21

世纪以来变化不明显。

1961—2018年新疆极端降水事件和平均日最大降水量呈明显增加趋势,增加速率为0.9 d·(10a)⁻¹和0.86 mm·(10a)⁻¹(P<0.05)(图6)。日最大降水量变化趋势有明显的空间差异,其中新疆北部增速最大,天山次之,新疆南部增速较小,全区有26%的站点增加显著。最长连续降水日数增加趋势不显著[0.06 d·(10a)⁻¹, P>0.05],区域差异与日最大降水量一致;而最长连续无降水日数明显减少[0.97 d·(10a)⁻¹, P<0.05],区域差异与日最大降水量相反。年暴雨量和暴雨日数均呈明显增加趋势,增加速率分别为1.82 mm·(10a)⁻¹和0.05 d·(10a)⁻¹(P<0.01),其中天山山区增速最大,新疆北部次之,新疆南部增速较小;而年暴雨量和暴雪日数也有明显增加趋势,增加速率分别为0.47 mm·(10a)⁻¹和0.03 d·(10a)⁻¹(P<0.01),

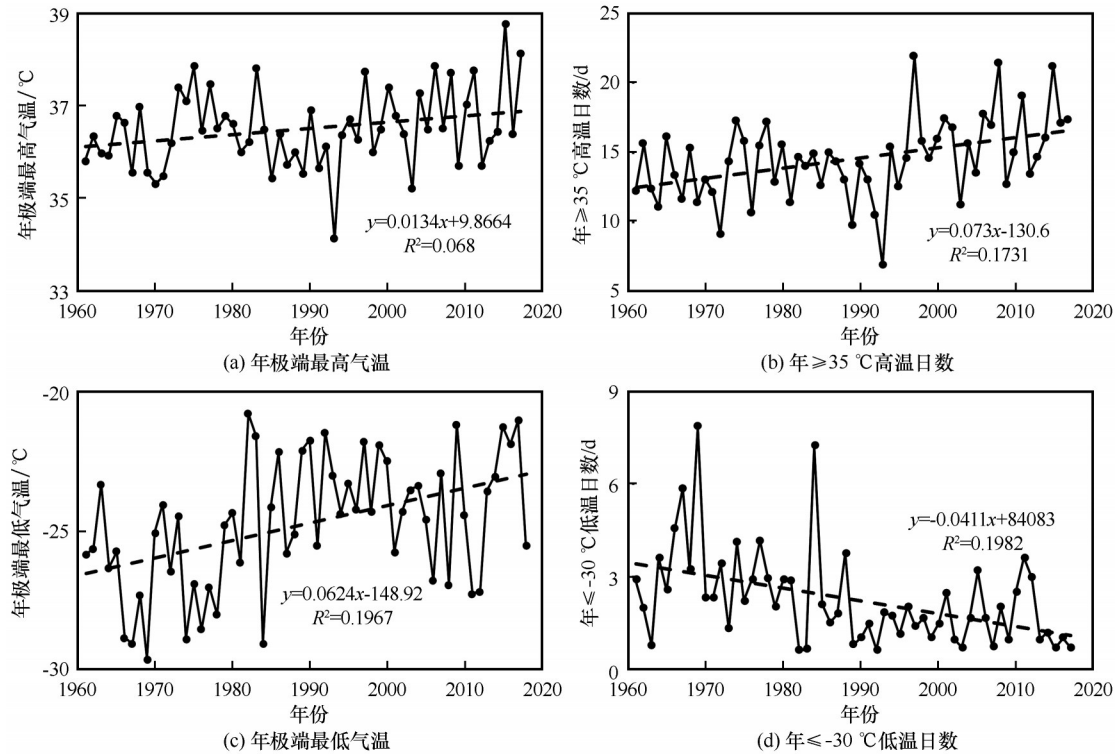


图5 1961—2018年新疆区域极端气温变化趋势

Fig. 5 Annual variations of extreme temperature in Xinjiang from 1961 to 2018: annual extreme maximum temperature (a); number of $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ high temperature days (b); annual extreme minimum temperature (c); number of $\leq -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ low temperature days (d)

其中新疆北部增速最大,天山山区次之,新疆南部增速较小。

2.2 新疆代表性流域径流量变化趋势

2.2.1 河川径流量

(1)塔里木河流域

1961—2017年塔里木河流域的“三源流”径流量均呈增加趋势,其中阿克苏河径流量显著增加,增加趋势为 $2.36 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.01$);叶尔羌河径流量有不显著的增加趋势 [$2.31 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$, $P > 0.05$];和田河径流量微弱增加,趋势为 $1.40 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$,但未通过显著性检验 ($P > 0.05$)。塔里木河干流径流量有微弱的减少态势,变化趋势为 $-0.33 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$,未通过显著性检验 ($P > 0.05$) (图7)。

阿克苏河径流量有明显的年代际阶段性变化特征。20世纪60年代至70年代末有增加趋势 [$5.28 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$, $P < 0.05$],之后明显减少,80年代变化较小,90年代至21世纪初急剧增 [$16.02 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$, $P < 0.05$],但21世纪以来急剧显著减少 [$-23.81 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$, $P < 0.01$],最近几年径流量有明显回升。同时,21世纪以来径流量年际波动大。和田河径流量在70年代末至90

年代初有减少趋势 [$-9.56 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$, $P < 0.05$],而90年代中期至今有明显增加趋势 [$6.68 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$, $P < 0.05$]。叶尔羌河和塔里木河干流径流量以年际波动为主,且年际变率较大,无较明显阶段性特征,其中21世纪以来干流径流量年际变率明显增大。

(2)艾比湖流域

1961—2017年艾比湖流域径流量变化差异较大,博尔塔拉河流域博乐站径流量呈现显著的上升趋势 [$0.18 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$, $P < 0.05$],上游的温泉站径流量以年际波动变化为主 [$0.03 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$, $P > 0.05$],无明显的阶段性变化特征;而精河流域径流量变化有微弱的上升趋势 [$0.02 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$, $P > 0.05$]。20世纪60年代至80年代中后期,精河流域径流量有增加趋势,70年代中期至80年代中期增加趋势显著;90年代初明显下降,90年代有增加趋势;21世纪以来有明显下降趋势,2013年达到有记录以来最低值,2016年出现了径流量次高值 [$5.87 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot (10\text{a})^{-1}$]。20世纪70年代之前博尔塔拉河流域博乐站有明显的减少趋势,之后呈波动变化,90年代中后期急剧增加,至2002年达到有记录以来的最高值 ($7.82 \times 10^8 \text{ m}^3$),2002

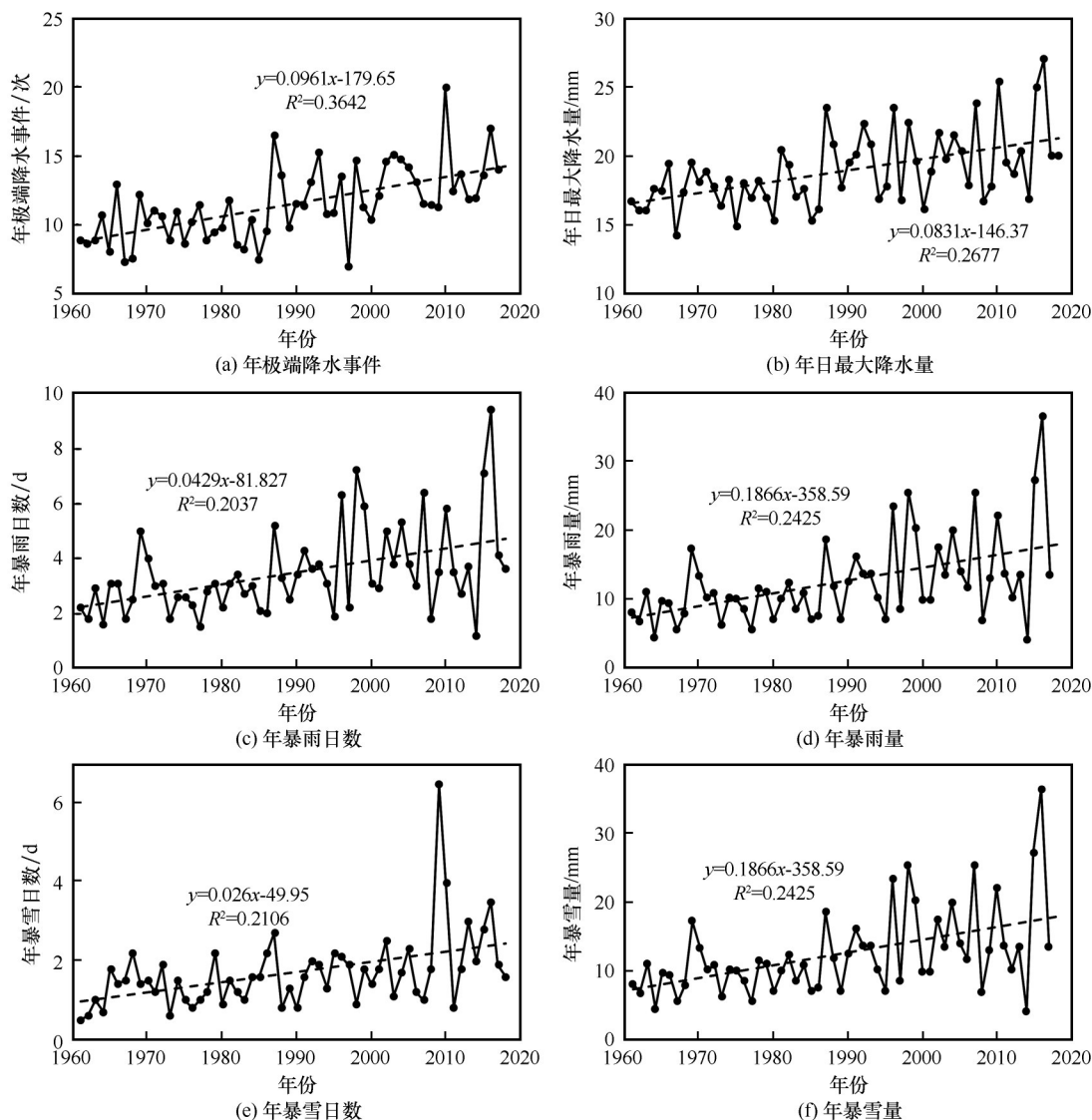


图6 1961—2018年新疆区域极端降水变化趋势

Fig. 6 Annual variations of extreme precipitation in Xinjiang from 1961 to 2018: annual extreme precipitation event (a); annual maximum 1-day precipitation (b); number of heavy rainfall days (c); annual heavy rainfall (d); number of heavy snow days (e); annual heavy snow (f)

年后径流逐渐减少, 同时也在2016年出现了径流量次高值($6.98 \times 10^8 \text{ m}^3$)(图8)。

(3) 径流量对气候变化的响应

塔里木河流域径流量对气候变化的响应研究发现, 阿克苏河径流量的年代际变化与区域气候增暖增湿的变化特征高度一致, 突变均发生在20世纪90年代, 如径流量在1993年发生突变, 气温和降水量的突变分别发生在1997年和1986年, 气候影响径流变化具有滞后性。阿克苏河径流量受到了区域气温和降水的双重影响, 90年代以来区域降水量显著增加, 同时升温引起冰雪消融, 冰雪融水和降水量补给的增多使得径流量急剧增加。叶尔

羌河径流量也在1993年发生突变, 气温在1996年发生突变, 而降水无突变特征; 相关分析表明径流量与气温显著相关, 而与降水相关不显著, 说明叶尔羌河径流量对气温变化更敏感。和田河也有类似的关系, 径流量与气温的相关性系数最好, 且具有一定的滞后性。塔里木河源流冰雪融水补给径流量比例较高, 阿克苏河流域达到59.3%, 叶尔羌河和和田河也分别达到了54.0%和59.5%^[18]。冰川融水径流补给比重大的河流, 其径流变化对气温的响应更加强烈^[12]。在冰川强烈消融的流域, 径流已出现减少趋势, 如阿克苏河流域冰川面积减少了29.7%^[10], 冰川处于强烈消融和退缩状态, 使得21

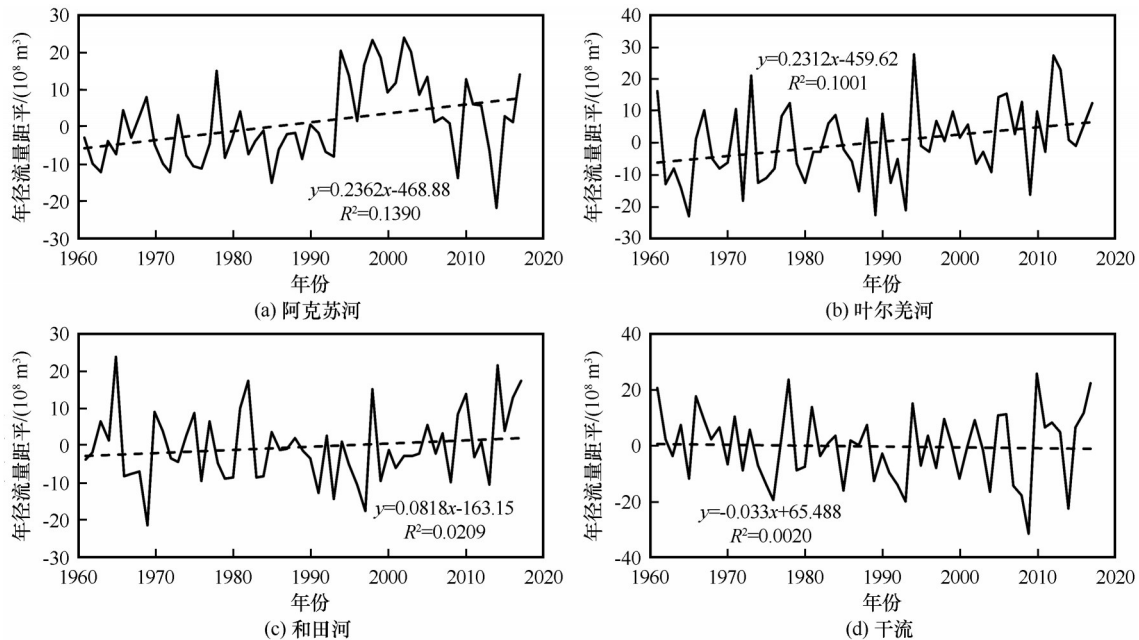


图7 塔里木河流域“三源一干”径流量距平变化

Fig. 7 Annual variations of runoff anomaly of the Aksu River (a), the Yarkant River (b), Hotan River (c) and Tarim trunk stream (d)

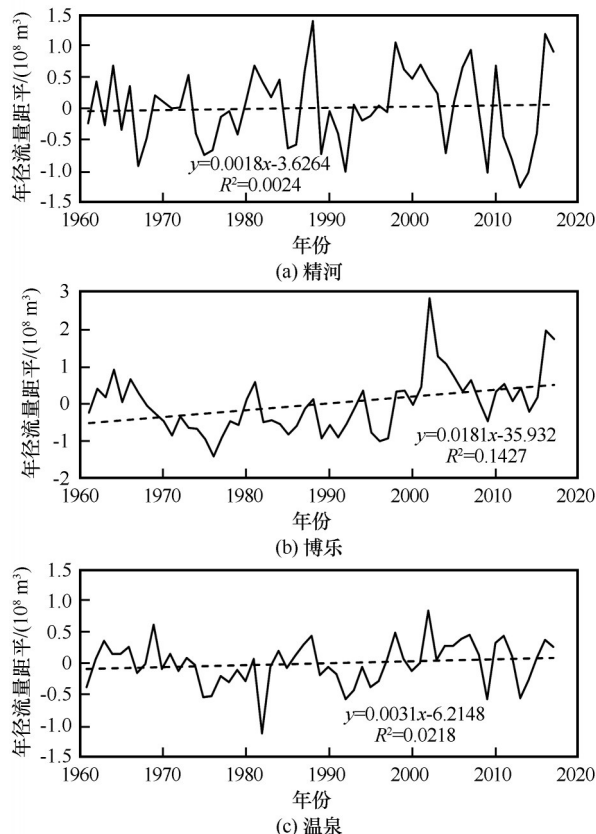


图8 艾比湖流域主要水文测站径流量距平变化

Fig. 8 Annual variations of runoff anomaly of the three main hydrological stations in Ebinur Lake Basin: Jinghe (a), Bole (b) and Wenquan (c)

世纪以来流域径流显著减少。气温升高会加速冰川积雪的融化,进而增加径流量。但随着升温持

续,冰雪水资源量减少,冰川融水量锐减,径流因降水异常的影响而变率增大,21世纪以来年际变率明显增大证实了这点。因此,通过调节冰雪融水补给,气温主导年代际阶段性径流变化,而降水变化则影响径流的年际波动变率。

相关分析表明艾比湖流域径流量与区域气温显著相关,与降水量的年际变化也有显著同步性。受区域变暖变湿的影响,1981—2005年精河流域径流量比之前增加了3.24%;受降水量增加的影响,2016年径流量急剧增加。而受增暖增湿的影响,博乐站径流量保持持续增加趋势。此外,受温泉盆地地下水资源调节作用的影响,温泉和博乐站径流量相对稳定,径流异常主要受降水异常的影响。

2.2.2 新疆典型湖泊变化

湖泊是干旱区水资源循环的重要环节和贮存库,干旱区湖泊变化是气候变化对区域水资源影响的综合体现。新疆是一个多湖泊的地区,面积大于 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的湖泊有197个,面积超过 100 km^2 的有9个,面积大于 10 km^2 的湖泊有30个,湖泊总面积 $12\,414 \text{ km}^2$,占全国湖泊面积的13.2%,次于西藏、青海、江苏,居全国第4位^[20]。选取博斯腾湖、艾比湖和赛里木湖为代表性湖泊,分析新疆湖泊的变化特征。

(1) 博斯腾湖

博斯腾湖是我国内陆最大的淡水湖泊,位于天山南麓的博湖县境内封闭的山间盆地,80%以上的

水来自开都河,出流汇入孔雀河。随着水资源过度开发利用,博斯腾湖生态环境问题凸显,严重影响着博斯腾湖生态系统和生态安全^[21]。

1961—2018年博斯腾湖水位呈下降趋势,趋势率为 $-0.024\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。1987年和2013年湖泊水位最低,为1 045.0 m;2002年水位最高,为1 049.39 m。博斯腾湖水位阶段性变化明显,其中1961—1987年湖泊水位有下降趋势,然后经历了1988—2002年的急剧增加和2003—2012年的持续下降,水位变化率分别为 $-0.083\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $0.263\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $-0.309\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。2013年以来的增加态势,2017年开始明显回升,其中2018年达到了1 047.5 m,2019年已经达到了1 048.2 m(图9)。

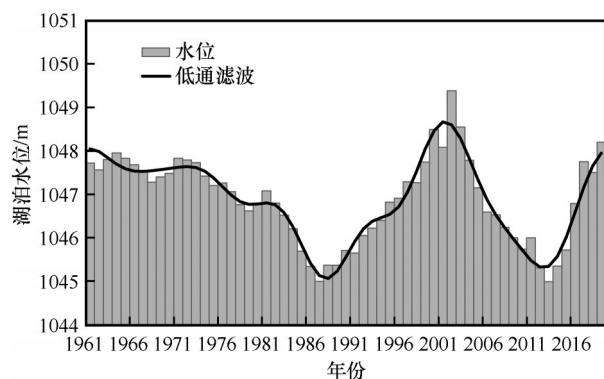


图9 1961—2019年博斯腾湖湖泊水位变化

Fig. 9 Annual variation of water level in Bosten Lake, 1961—2019

博斯腾湖水面面积经历了类似的变化^[22]。ETM和环境减灾卫星遥感监测发现,1999—2018年夏季博斯腾湖面积变化整体呈减少趋势,2018年湖泊面积为1 042 km²,其中1999—2002年湖泊面积明显扩张,2002—2012年水域面积逐渐萎缩,2013年之后显著扩张[图10(a)]。Landsat卫星也显示1988—2002年期间湖泊逐年扩张,而在2003—2014年期间急剧萎缩;MODIS数据也显示出了2003—2014年湖泊的萎缩^[23]。

1961—2018年博斯腾湖流域气候有明显变化,1987年开始气候明显变暖变湿,引起博斯腾湖水位明显上升;但1997年之后气温急剧上升,而降水量的增加趋势减弱,区域干旱加剧,导致21世纪以来湖泊水位的明显下降;2013年之后降水量增加,尤其是2016年降水量达到最大值,引起湖泊水位明显回升。因此,气候变化,尤其是降水量的变化是引起湖泊水位变化的主要原因之一,但还受冰川补

给变化、生态输水工程、农业灌溉用水等其他因素的影响^[23]。

(2) 艾比湖——干旱区尾间湖

艾比湖位于准噶尔盆地西南部,是干旱区典型的尾间型湖泊。20世纪50年代艾比湖湖面面积为1 200 km²左右,至1998年萎缩至519.26 km²^[24]。ETM和环境减灾卫星遥感监测发现,1999—2018年夏季湖泊面积经历了两个变化阶段,其中1999—2003年湖泊逐渐扩张,从519.26 km²扩张到2003年的972.39 km²;然后急剧萎缩,2013年湖泊面积达到最小,仅为429.63 km²,比2003年萎缩了55.4%。2013年之后逐渐扩张,至2018年湖泊面积达到748.68 km²[图10(b)]。空间上,艾比湖西北部萎缩明显,水域向东南部缩减,从而对生态环境造成影响。随着艾比湖面积的逐渐干缩,裸露的湖底已成为风沙-盐尘暴的发源地,严重威胁我国北方生态安全^[24]。

(3) 赛里木湖——高山湖泊

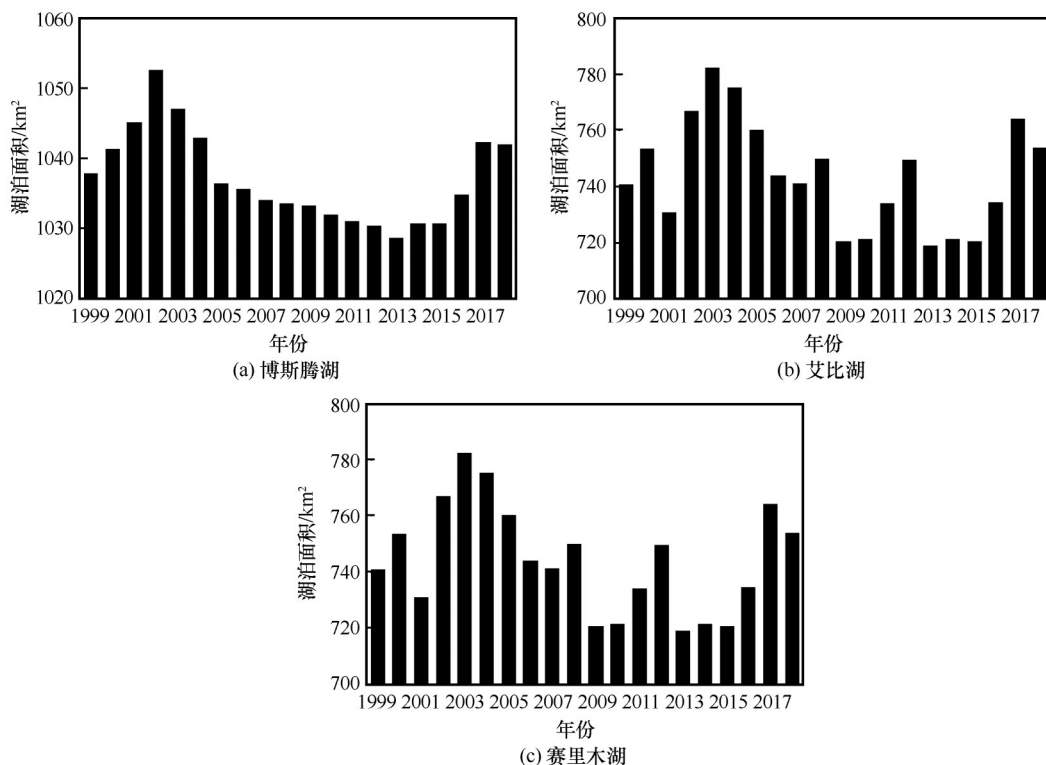
赛里木湖位于天山西段,封闭的高山盆地水系,是极具代表性的高山湖泊。1999—2018年赛里木湖夏季湖面面积变化稳定,有微弱的扩张趋势。其中2016年湖泊面积最大,2018年减小到462.9 km²,湖泊扩张区域主要分布在地势低且平坦的草原地带[图10(c)]。受气候暖湿化影响,冰雪消融增多,入湖径流量和湖面降水量明显增加,湖面稳定扩张。

2.3 新疆气候水文变化面临的问题及思考

2.3.1 新疆气候水文变化面临的问题

(1) 新疆气候“暖湿化”的科学认识和物理过程不明确

21世纪初,施雅风院士提出了西北干旱区气候“暖湿化”转型的信号,其中干旱区西部,尤其是新疆更加明显^[2-3]。20世纪80年代中后期以来新疆气温和降水量均突变型增加,表现为“暖湿化”特征;但1997年之后,尤其是21世纪以来,新疆气候发生明显变化,表现为气温出现跃变式升高且维持高温波动,降水量增加趋势减缓,且降水量年际变化明显增大,极端降水事件频次和强度明显增加,对新疆气候变化产生重要影响。SPEI干旱指数显示,新疆气候有从1961—1996年的“暖湿化”转折到1997—2018年的“暖干化”的迹象,1997年以来发生“湿干转折”信号,干旱化趋势凸显。约70%以上的站点有干旱化趋势,干旱频率、干旱发生月份和

图 10 遥感监测的新疆典型湖泊面积变化^[19]Fig. 10 Variations of lake area of the three typical lakes: Bosten Lake (a), Ebinur Lake (b) and Selimu Lake (c) in Xinjiang, monitored by remote sensing^[19]

干旱范围等均有明显增加。

目前,对新疆气候变化趋势,尤其是“暖湿化”趋势的认识不清,物理过程不明。在全球变暖和人类活动加剧的背景下,新疆气候还处在不断调整和转型过程中,气候变化趋势和特征多样并存,区域差异明显。从气温和降水量的角度,新疆气候至今依然维持着“暖湿化”特征;但从干湿变化角度,变暖引起蒸发需求旺盛,降水的增加量不足以抵消蒸发增加的需求量,区域陆面趋于干旱并反馈至大气,出现干旱化趋势。针对“暖湿化”的成因,大多学者认为是在高中低纬环流系统配合影响下,来自高纬、热带印度洋、阿拉伯海和局地的水汽输送增强所致^[6-9],但物理过程依然不清晰。21 世纪以来的干旱化的形成原因更加复杂,现有研究表明北大西洋多年代际振荡(AMO)和 ENSO 与新疆干旱化有密切关系^[15],物理过程和机理也不清楚。同时,人为增暖加剧、土地利用/土地覆盖变化、城市群快速扩张等人类活动都将对干旱化产生重要影响。

(2) 极端天气气候事件频发重发,水文气象灾害风险加剧

新疆极端气温、极端降水和干旱等事件发生频

率增加,强度加大,21 世纪以来尤其明显。极端暴雨雪对总降水量的贡献增加,短时强降水的频次和强度增加,中小雨频次和贡献减小,使得降水气候的极端化更加严重。例如,2018 年 7 月 31 日哈密突发短时特大暴雨,14 小时降水量达到 115.5 mm,超过当地历史最大年降雨量 52.4 mm,山洪、水库、铁路、公路、房屋损失严重,死亡 20 多人。同时,降水更加集中,且加剧了干旱事件的频次和强度,使得洪旱灾害并发并增。随着气候变暖加快,高温初日提前,高温终日推迟,干旱和高温天气同时出现的频次增加,干旱和高温协同发展产生连锁效应,将会对农业、森林、基础设施和人类健康带来严重威胁。此外,气温升高和极端降雨增多,使得冰雪融水径流增大,冰湖更易溃决,冰川跃动时有发生。在气候变化和极端事件影响下,水文气象灾害风险加剧。

新疆的气象水文灾害主要有暴雨山洪、高温、干旱、冰湖溃决、冰崩、暴雪雪崩、冰川跃动以及泥石流、滑坡等。受气候变化影响,气象水文灾害的致灾因子、触发条件,以及灾害形成发育的过程和机理认识不足,对灾害孕育和演化过程的物理描述和机理认识不明,尚不能进行有效的灾害预测和

风险防控。在极端天气气候事件频发重发背景下,水文气象灾害风险难以把控。

(3)气候变化影响不确定性加剧,水安全问题迫在眉睫

受“三山夹两盆”格局影响,新疆气候和水循环过程独特,水资源特色鲜明。在变暖背景下,极端气候水文事件频发重发,加大了水循环系统脆弱性,进而加剧了水资源的不确定性。气候变化在加剧径流年际丰枯变化的同时,也改变了径流的稳定性,表现为冰雪消融期提前、汛期径流量增加等现象。新疆径流对冰川的依赖性强,其中天山北坡、南坡和昆仑山北部的冰川融水分别占河流径流总量的31.8%、33.7%和56.3%^[18]。随着气温升高,尤其是山区气温异常升高,冰川面积小、海拔较低的流域,冰川退缩和积雪消融加剧,打破冰冻圈物质平衡,冰川消融出现变化拐点,造成固体水资源和冰川融水补给量锐减,对河流的调节功能下降,地表径流的稳定性降低,受极端降水的影响而变率增大^[25-26]。未来20~30年新疆冰川仍将强烈消融,冰雪融水急剧减少;未来50年新疆天山约有80%以上的小冰川消失;在RCP4.5情景下,乌鲁木齐河源1号冰川径流2050年之后快速下降,至2090年冰川消融殆尽^[27]。

水资源问题是制约新疆高质量、可持续发展的最主要问题之一。气候变暖引起新疆水文气象要素,尤其是水分循环结构发生明显改变。在极端气候频发重发的背景下,水循环系统不稳定性加剧,给新疆水资源安全带来了严峻的挑战,水安全问题迫在眉睫。

2.3.2 对策及建议

针对新疆气候水文变化趋势和存在的问题,需要科学应对机遇与挑战。应抓住气候机遇,趋利避害,未雨绸缪,提出如下建议。

(1)开展新疆气候水文综合科学考察,建立水文气象综合观测协同网络和共享机制,提高水文气象灾害风险防控和防灾减灾能力

新疆受特殊地理、气候条件的限制,气象水文监测站点不足,尤其在4 000 m以上的山区和沙漠腹地,都是监测的空白区。建议结合第三次新疆综合科学考察,全面布局气候水文灾害综合科学考察,尤其对西天山、阿尔泰山、帕米尔高原和罗布泊等关键区域进行重点布局,获取第一手气象灾害数据。因此,需要加强(极端)气候水文变化及灾害

机理等基础科学问题研究,建立水文气象综合观测协同网络和共享机制。提高基础设施建设防灾抗灾标准,大力提升应对极端气候水文事件和水资源风险的能力,提高水文气象灾害风险防控和防灾减灾能力。

(2)抓住气候机遇,加快生态环境建设,优化调整产业结构,为建设美丽新疆和高质量发展服务

新疆天山山区、帕米尔高原、阿勒泰等地区降水量持续增加,应抓住气候机遇,加快山区生态环境建设,加大山区和荒漠区生态保护力度,充分利用不同气候立体景观格局,构建冰雪、山地、绿洲和荒漠区地带性生态景观格局,形成水文气候与生态环境良性耦合的自然生态系统;根据区域水文气候变化趋势,研判未来水文气候形势,协调城乡发展,主动调整工农业产业布局,优化农业产业结构,加快布局生态产业;抓住气候资源机遇,优先发展生态旅游和冰雪旅游业,打造一批绿色旅游品牌;抓住光热等资源优势,优化布局清洁能源发展基地,为自治区高质量发展服务,推动区域绿色发展,建设美丽新疆。

(3)将有效应对和有序适应气候变化提升到战略的高度

气候变化是新疆水资源安全和生态安全的关键驱动因子。新疆水资源安全很大程度上取决于山区降水和冰雪融水,气候变化显著影响水资源分布格局,加剧供需水矛盾;山地、绿洲和荒漠生态系统稳定性也受气候变化的直接影响。近年来,自治区政府在生态保护和环境治理方面投入了大量的人财物力,但山地和荒漠自然生态依然在退化,水资源问题依然严峻,其原因是未能足够重视和合理利用气候变化带来的红利。因此,在“丝绸之路经济带”核心区建设的国家战略中,建议把有效应对和有序适应气候变化提升到自治区发展战略的高度,在水资源管理和生态治理规划中充分考虑气候变化的因素,有效应对气候变化对新疆水资源和生态保护带来的不利影响,有序适应气候系统中不可避免的变化,贯彻“环保优先、生态立区”理念,保障新疆长治久安和高质量发展。

3 结论

基于1961—2018年新疆逐日气象观测资料、1961—2017年新疆代表性流域径流资料和Landsat TM/ETM 和环境减灾卫星遥感监测的1999—2018

年典型湖泊夏季湖泊面积资料, 结合最新的相关研究成果, 研究了新疆水文气候要素变化趋势与演变特征, 探讨了目前面临的主要问题及对策建议。结果表明:

(1) 1961—2018 年新疆升温速率为 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P<0.01$), 升温幅度高于全国平均水平, 冬季升温贡献最大; 最低温度升温速率是最高温度升温速率的 2 倍; 降水量和降水日数均明显增加, 夏季降水增加最显著; 1997 年以后出现了明显增暖, 21 世纪以来气温和降水均在高位波动, 但增加幅度减缓, 气候有从暖湿化向暖干化转折的迹象, 干旱化趋势加剧。

(2) 1961—2018 年极端最高气温、极端最低气温和高温日数显著增加, 高温初日提前, 高温终日推迟; 极端降水事件、暴雨雪强度和频次明显增加; 21 世纪以来, 极端事件的强度和频次增加更加显著。

(3) 受气候变化和人类活动共同影响, 新疆地表水资源发生明显改变。塔里木河流域源流区径流量明显增加, 干流径流量微弱减少; 博斯腾湖水位阶段性变化明显, 2013 年以来逐渐扩张; 艾比湖总体萎缩, 而山区湖泊赛里木湖面积稳定扩张。

(4) 新疆气候变化经历了“暖湿化”的过程, 目前研究对变化趋势和物理过程认识还不清楚, 对水文气象灾害风险加剧难以把控, 水安全问题迫在眉睫。针对以上问题, 建议趋利避害, 抓住气候机遇, 加快生态环境建设; 开展综合科学考察, 构建综合观测协同网络, 提高水文气象灾害风险调控能力; 将有效应对、有序适应气候变化提升到战略的高度, 为建设美丽新疆和高质量发展服务。

参考文献(References):

- [1] Chen Y, Li W, Deng H, et al. Changes in Central Asia's water tower: past, present and future [J]. *Scientific Reports*, 2017, 6(1): 35458.
- [2] 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.]
- [3] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152-164. [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, 2003(2): 152-164.]
- [4] Yang Lianmei, Guang Xuefeng, Zhang Yingxin. Study on atmospheric circulation characteristics of precipitation anomalies in arid region of Central Asia [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(2): 249-259. [杨莲梅, 关学锋, 张迎新. 亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 249-259.]
- [5] Dai Xingang, Li Weijing, Ma Zhuguo. The characteristics of variation of Xinjiang water vapor sources in recent years [J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(12): 1651-1656. [戴新刚, 李维京, 马柱国. 近十几年新疆水汽源地变化特征[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(12): 1651-1656.]
- [6] Zhao Bingke, Cai Chengxia, Yang Lianmei, et al. Atmospheric circulation anomalies during wetting summer over Xinjiang region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(3): 434-442. [赵兵科, 蔡承侠, 杨莲梅, 王慧. 新疆夏季变湿的大气环流异常特征[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(3): 434-442.]
- [7] Yang Lianmei, Zhang Qingyong. Circulation characteristics of interannual and interdecadal anomalies of summer rainfall in north Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(2): 412-419. [杨莲梅, 张庆云. 新疆北部汛期降水年际和年代际异常的环流特征[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 412-419.]
- [8] Zhao Y, Zhang H. Impacts of SST Warming in tropical Indian Ocean on CMIP5 model-projected summer rainfall changes over Central Asia [J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(9/10): 3223-3238.
- [9] Chen Huopo, Sun Jianqi, Fan Ke. Possible mechanism for the interdecadal change of Xinjiang summer precipitation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(6): 1844-1851. [陈活泼, 孙建奇, 范可. 新疆夏季降水年代际转型的归因分析[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(6): 1844-1851.]
- [10] Deng Haijun, Chen Yaning. The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions: a case study in Tianshan Mountains of Central Asia [J]. *Aata Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1309-1323. [邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1309-1323.]
- [11] 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 [J]. *Aata 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[J]. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295-1304.]
- [12] Chen Zhongsheng. Quantitative identification of river runoff change and its attribution in the arid region of Northwest China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016. [陈忠升. 中国西北干旱区河川径流变化及归因定量辨识[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.]
- [13] Yao J Q, Zhao Y, Chen Y, et al. Multi-scale assessments of droughts: a case study in Xinjiang, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 444-452.
- [14] Yao J Y, Yong Z, Yu X J. Spatial-temporal variation and impacts of drought in Xinjiang (Northwest China) during 1961—2015 [J]. *PeerJ*, 2018, 6: e4926.
- [15] Yao J Q, Tuoliewubieke D, Chen J, et al. Identification of drought events and correlations with large-scale ocean-atmospheric patterns of variability: a case study in Xinjiang, China [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(2): 94.
- [16] Yao Junqiang, Mao Weiyi, Hu Wenfeng, et al. A dataset of drought indices based on the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) over Xinjiang, China (1961—2015)

- [J/OL]. China Scientific Data, 2019, 4(3). (2019-07-10). DOI: 10.11922/csdata.2018.0048.zh. [姚俊强, 毛炜峰, 胡文峰, 等. 1961–2015年新疆区域SPEI干旱指数数据集[J/OL]. 中国科学数据, 2019, 4(3). (2019-07-10). DOI: 10.11922/csdata.2018.0048.zh.]
- [17] Hu Wenfeng, Chen Lingling, Yao Junqiang. Evolution characteristic of drought patterns at multiple timescales in Xinjiang for last 55 year[J]. Pearl River, 2019, 40(11): 1-9. [胡文峰, 陈玲玲, 姚俊强, 等. 近55年来新疆多时间尺度干旱格局演变特征[J]. 人民珠江, 2019, 40(11): 1-9.]
- [18] Chen Yaning. Water resources research in the arid region of Northwest China [M]. Beijing: Science Press, 2014. [陈亚宁. 西北干旱区水资源研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [19] Xinjiang Climate Center. Xinjiang climate change monitoring communique: 2018[M]. 2019. [新疆维吾尔自治区气候中心. 2018年新疆气候变化监测公报[M]. 2019.]
- [20] Wang Shijiang. Rivers and lakes in Xinjiang, China[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010. [王世江. 中国新疆河湖全书[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.]
- [21] Chen Yaning. Study on sustainable use of water resources in Bosten Lake Basin[M]. Beijing: Science Press, 2014. [陈亚宁. 博斯腾湖流域水资源可持续利用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [22] Yao J Q, Chen Y N, Zhao Y, et al. Hydroclimatic changes of Lake Bosten in Northwest China during the last decades [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 9118.
- [23] Sun Aiming, Feng Zhingkui, Ge Xiaoqing, et al. Bosten Lake surface area changes analysis using long temporal Landsat image series[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(8): 1122-1132. [孙爱民, 冯钟葵, 葛小青, 等. 利用长时间序列Landsat分析博斯腾湖面积变化[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(8): 1122-1132.]
- [24] Zhang Fei, Wang Juan, Taxifolati Teyibei, et al., The spatial and temporal dynamic changes and driving forces in the surface area of Ebinur Lake from 1998-2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2848-2859. [张飞, 王娟, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 1998–2013年新疆艾比湖湖面时空动态变化及其驱动机制[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2848-2859.]
- [25] Ding Yongjian, Zhao Qiudong, Wu Jinkui, et al. The future changes of Chinese cryospheric hydrology and their impacts on water security in arid areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 23-32. [丁永建, 赵求东, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文未来变化及其对干旱区水安全的影响[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 23-32.]
- [26] Wang Kang, Zhang Tingjun, Mu Cuicui, et al. From the Third Pole to the Arctic: changes and impacts of the climate and cryosphere[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 104-123. [王康, 张廷军, 牟翠翠, 等. 从第三极到北极: 气候与冰冻圈变化及其影响[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 104-123.]
- [27] Li Zhongqin. Material balance and dynamic process simulation of mountain glaciers[M]. Beijing: Science Press, 2014. [李忠勤. 山地冰川物质平衡和动力过程模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]

Trend of climate and hydrology change in Xinjiang and its problems thinking

YAO Junqiang¹, CHEN Jing¹, Dilinuer Tuoliwubieke¹, HAN Xueyun², MAO Weiyi¹

(1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;

2. Xinjiang Climate Center, Urumqi 830002, China)

Abstract: Xinjiang is an important part of the arid Central Asia, which responds sensitively to the global climate change and has the water resources problem severely. Studying the impact of climate change on water resources in Xinjiang has a significant effect on the adaptability of future climate change and water resource security. Based on the latest climate-hydrological observations and research results, this paper analyzes the characteristics of hydrological and climate change and the impacts of climate change on water resources, and discusses the main problems and countermeasures. Results indicate that: (1) Temperature in Xinjiang had a significant increasing trend during 1961—2018, and the increase rate of temperature was higher than the global average and the winter change could be the most important factor for the rise in annual air temperature. Precipitation and number of precipitation days had increased obviously, especially in summer. However, both temperature and precipitation had fluctuated with high level frequency, and the sharp increasing trend had retarded since the 21st century. The climate experienced a transformation from warm-wet to warm-dry, with a intensifying drought. (2) The number of extreme maximum temperature, extreme minimum temperature and high temperature days had increased significantly since the beginning of 21st century. The first day of high temperature was brought ahead, the last day of high temperature was postponed, and the intensity and frequency of extreme precipitation events and rainstorm snow had increased significantly. (3) Under the influence of climate change and human activities, the runoff in sources of the Tarim River basin had increased obviously. The water of the Bosten Lake had expanded since 2013. The Ebinur Lake had shrunk and the Sayram Lake had been expanded steadily. The glaciers had been generally retreated with great regional differences, specially in the Tianshan and Altai Mountains. (4) There are main problems of climate and hydrological changes in Xinjiang, such as unclear understanding of climate change trends and physical processes, difficult to handle the increased risk of hydro-meteorological disasters, the uncertainty in the impact of climate change, especially, the water security. (5) It is suggested to seek the advantages and avoid the disadvantages, to seize the climate opportunity and to speed up the construction of ecological environment. Seizing the climate opportunity, let us to carry out comprehensive investigations on climate and hydrology system, to strengthen mechanisms research, to build a coordinated comprehensive observations network and to improve the ability to control the risks of hydro-meteorological disasters. It is necessary to take effective and orderly adaptation to climate change to a strategic level to serve the building of a beautiful Xinjiang and high-quality development.

Key words: Xinjiang; climate change; runoff; lake; water resources; countermeasures and suggestions

(责任编辑: 陈仁升; 编辑: 周成林)