

# 艾比湖流域气候变化及对地表水资源的影响

许兴斌<sup>1,2</sup>, 王勇辉<sup>1,2</sup>, 姚俊强<sup>3</sup>

(1. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 3. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

**摘 要:** 利用艾比湖流域逐月气温、降水数据, 结合流域地表径流和艾比湖湖泊面积数据, 分析了 1961—2010 年流域气候要素变化趋势和突变特征, 探讨了气候变化对流域地表水资源的影响。结果表明: (1) 近 50 a 来艾比湖流域气温、降水均呈波动上升趋势, 气候由暖干型向暖湿型转变。冬季升温对流域气温增幅贡献率大, 气温在 1995 年发生突变。冬季降水量增幅明显, 夏季只有温泉站点降水量增幅显著, 降水量在 1984 年发生突变; (2) 流域年均气温与径流量呈正相关, 年降水量与径流量的变化呈显著同步性; (3) 流域年平均气温与艾比湖面积大小关系复杂; 年平均降水量与湖泊面积的变化趋势趋于同步, 1996—1999 年这种同步性更明显; (4) 气候变化直接影响冰川伸缩与雪线升降, 冰川数量和规模均逐渐减小, 用水矛盾日益尖锐, 影响绿洲社会经济发展。

**关键词:** 艾比湖流域; 气候变化; 突变; 水资源

中图分类号: P467; P332.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)03-0121-06

## Impact of the Climate Change of Ebinur Lake Basin on Surface Water Resources

XU Xingbin<sup>1,2</sup>, WANG Yonghui<sup>1,2</sup>, YAO Junqiang<sup>3</sup>

(1. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China;

2. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

3. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** Using data of monthly temperature, precipitation of Ebinur Lake Basin, and combining its overland runoff and lake area, we analyzed the variation trend and mutation characteristics of climate elements in Ebinur Lake basin from 1961 to 2010 and discussed the impact of the climate change on surface water resources. The results indicated that: (1) the temperature and precipitation in Ebinur Lake Basin both reflected a fluctuating upward trend in recent 50 years, with the climate changing from a warm-dry to warm-wet type, temperature rise in winter contributed to the temperature rise of Ebinur Lake Basin, the temperature mutated in 1995, precipitation showed remarkable increase in winter, this increase is only notable in hot spring in summer, precipitation mutated in 1984; (2) annual mean temperature was positively correlated with runoff volume in Ebinur Lake Basin, variation of annual mean precipitation was remarkably synchronized with that of runoff volume; (3) it was complex between the higher annual mean temperature and area of Ebinur Lake Basin. The trends of the precipitation show good agreement with the lake area, especially the 1996—1999; (4) climate change directly impacted the glacier scale and snow line height. The gradual decline of glacier scale and deficiency of water resources will affect the development of oasis social economy.

**Keywords:** Ebinur Lake Basin; climate change; mutate; water resource

近几十年来的气候变化已经给我国乃至全球的自然生态环境和社会经济环境带来了深刻的影响, 气候变化及影响备受关注<sup>[1]</sup>。气候变化必然引起水分循环的变化, 引起水资源在时空上的重新分布和总量的改变, 进而影响到流域生态环境与社会经济的发展<sup>[2]</sup>。受全球变暖的影响, 中国西北地区的气候在

20 世纪 80 年代中后期发生由暖干向暖湿的转型<sup>[3]</sup>, 引起了区域水资源的变化, 极端气象水文事件频发, 导致了诸多生态环境问题。随着气候系统的进一步变化, 干旱地区的地表径流、湖泊、冰川等地表水资源对区域气候变化的响应日益成为研究的热点<sup>[4-8]</sup>。

艾比湖流域地处天山北坡、丝绸之路经济带上,

是中国向西开放的桥头堡,同时,由于深居内陆,受海洋暖湿气流的影响小,生态环境脆弱,盐尘暴频发,使得该流域成为气候变化敏感区域,是影响整个新疆北部乃至内陆生态系统的重要因素之一,在生态环境保护中具有重大的作用。关于艾比湖流域气候、水文的研究较多。杨青等<sup>[9]</sup>对艾比湖流域气候变化趋势分析发现,流域气候发生了气温升高、降水增多的明显变化,但分布不均。胡江玲等<sup>[10]</sup>运用趋势系数、距平百分率、小波分析等方法分析了艾比湖流域的降水变化。董煜等<sup>[11]</sup>对艾比湖流域水文特征进行了分析,以期来反映径流对降水变化的反应。吴佩钦等<sup>[12]</sup>通过充分评估艾比湖流域人类活动对湖泊面积变化的影响,建立湖泊降水补给、入湖河流的有效补给、湖泊蒸发、库容之间的线性关系,预测未来湖泊面积变化趋势。

以上研究多集中在独立气候要素分析研究及水资源水量(面积)变化趋势等方面,探讨分析气候变化与地表水资源之间关系的研究较少。鉴于此,本文选取该流域代表性气象站点 1961—2010 年的月均气温和降水资料,结合流域地表径流和艾比湖湖泊面积数据,从该区域 50 年间气候要素季节变化的角度出发,通过线性趋势、Mann-kendall 非参数检验等方法,揭示该流域的气候要素变化趋势和突变特征,探讨气候变化对流域地表水资源的影响。本研究对流域水资源合理开发利用、区域社会经济发展、生态环境平衡及生态系统恢复与重建等提供一定的理论依据,对制定流域水资源最严格管理和应对气候变化策略具有重要意义。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

艾比湖流域位于亚欧大陆腹地、古尔班通古特沙漠西缘,地理位置为  $44^{\circ}44'—45^{\circ}09'N$ ,  $52^{\circ}35'—53^{\circ}11'E$ ,总面积为  $50\,621\text{ km}^2$ 。流域内地形复杂,山地、平原、洼地等均有分布。该流域地势西高东低,流域中心为低洼区和集水区,艾比湖位于流域的中偏北部,是干旱地区完全封闭性尾间湖泊的典型代表。流域有博尔塔拉河、精河和奎屯河,当前能够补给艾比湖的水系为博尔塔拉河和精河,其余河区由于当地不合理的开发利用以及流量相对较小而无法补给。

受纬度位置、海陆位置和地形的影响,艾比湖流域降水稀少,气温日较差和年较差大。流域多年平均气温  $7.2^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为  $166\text{ mm}$ 。6—10 月降水量占到全年降水量的  $50\%\sim 75\%$ ,流域降水的区域差异明显且季节分配不均匀。艾比湖及其流域在维持新疆北部生态系统平衡方面具有极其重要的作用,在气候变化和人类活动的共同作用和影响下,艾比湖流

域地表水资源产生了巨大的变化,生态环境进一步恶化,用水矛盾日益尖锐,影响了该流域生态环境与当地社会经济的发展。

### 1.2 数据来源与方法

艾比湖流域地域面积广阔,气象站点分布有限且不均匀,数据起止时间不一致,为了保证监测数据的完整性和有效性,本文采用流域内有代表性的博乐、温泉、精河、乌苏、阿拉山口 5 个代表性气象站点 1961—2010 年逐月气温和降水量数据,1950—2009 年艾比湖湖泊面积变化数据<sup>[11,13-14]</sup>,气温与降水数据来源于新疆气象局气象信息中心,艾比湖的入湖径流量数据是按照补给艾比湖的精河和博河的年径流量加权平均所得,时间序列为 1961—2008 年。本文季节划分按照气象划分:春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月—次年 2 月)。

利用线性趋势、Mann-kendall 非参数趋势检验和突变检验方法,揭示该流域的气候要素变化趋势和突变特征,探讨气候变化对流域地表水资源的影响。Mann-kendall 非参数趋势检验和突变检验的具体方法见文献<sup>[14—15]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 气候变化趋势特征及突变分析

2.1.1 气候变化趋势特征 1961—2010 年,艾比湖流域气温整体呈波动上升的趋势,各气象站点气温振幅呈一致性变化(图 1)。流域 50 a 来气温呈波动上升趋势,年平均气温增幅为  $0.36^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,各站点均通过了 0.05 置信水平显著性检验(表 1)。就区域而言,博乐四季的气温变化趋势均通过 0.05 的显著性水平检验,增温幅度明显高于其他站点;近 50 a 来流域年均气温上升了  $1.2^{\circ}\text{C}$ ,博乐增温幅度最大,为  $1.5^{\circ}\text{C}$ ;温泉增温幅度最小,为  $0.6^{\circ}\text{C}$ 。季节变化而言,博乐和乌苏增温最大,分别为  $0.44, 0.36^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,温泉增温幅度最小,为  $0.20^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。流域内春、夏季气温变化幅度较小,只有博乐通过了 0.05 显著性水平检验。秋、冬季变化幅度明显,所有站点冬季气温均通过 0.05 显著性水平检验,可以看出,冬季气温升高幅度最明显,对流域增温幅度贡献率最大。

艾比湖流域 1961—2010 年降水量变化幅度较小,变化趋势较缓(图 2)。温泉、乌苏、阿拉山口的年降水量增幅明显,通过了 0.05 的显著性水平检验;其他站点降水量无明显变化(表 1)。季节变化而言,所有站点冬季、温泉夏季年降水量增幅明显,其余季节年降水量均无明显变化。温泉年降水量增幅最大,为  $20.46\text{ mm}/10\text{ a}$ ,阿拉山口年降水量增幅最小,为

4.01 mm/10 a。2001—2010 年与 1961—1970 年相比,年降水量增幅最大的是温泉,增幅为 66.52 mm;增幅最小的是精河,增幅为 27.5 mm。

表 1 艾比湖流域各站平均气温、降水量的变化特征						
要素	季节	博乐	温泉	精河	乌苏	阿拉山口
气温/ (℃/10 a)	春季	0.39*	0.02	0.29	0.35	0.13
	夏季	0.31*	0.09	0.27*	0.16	0.16
	秋季	0.48*	0.26	0.34*	0.40*	0.32
	冬季	0.60*	0.69*	0.49*	0.55*	0.60*
	年平均	0.44*	0.20*	0.34*	0.36*	0.31*
降水量/ (mm/10 a)	春季	2.16	2.81	0.68	5.62	0.65
	夏季	3.26	10.87*	1.44	1.13	1.02
	秋季	2.20	3.54	2.35	4.06	1.68
	冬季	3.75*	3.34*	2.27*	4.02*	2.65
	年平均	11.55	20.46*	6.66	14.84*	4.01*

注: \* 代表通过置信水平  $\alpha=0.05$  的置信度检验。

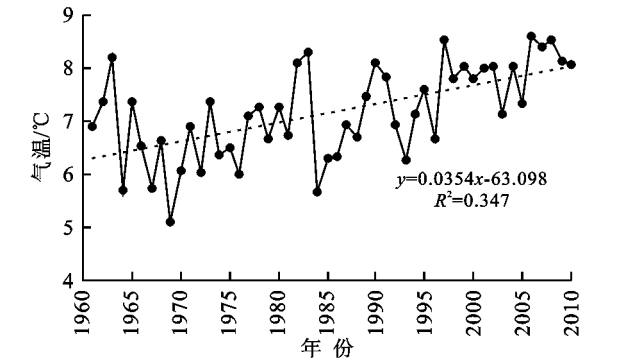


图 1 艾比湖流域 1960—2010 年平均气温变化趋势

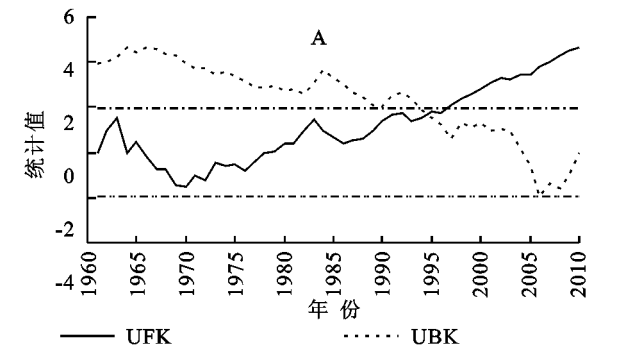


图 3 艾比湖流域 1960—2010 年年平均气温、年降水量突变曲线

2.2 气候变化对地表径流的影响

水资源变化与气候条件紧密相连,气候变化对地表径流产生直接影响<sup>[16]</sup>。大气降水是水循环的重要环节之一,是干旱区地表径流的主要来源,直接影响流域径流量的大小。

艾比湖流域年径流量最大值为 6.27 亿 m<sup>3</sup>(1999 年),最小值为 4.03 亿 m<sup>3</sup>(1967 年),极值比为 1.56,径流总量年际变化不大,但径流量在 1961—1969 年、1981—1998 年变化较强烈,尤其在 1967 年、1992 年径流量显著减少,1981 年、1999 年明显偏多。

2.1.2 气候突变分析 利用 Mann-Kendall 检验方法对艾比湖流域气温、降水变化趋势进行突变检验,结果显示:流域年平均气温和降水量的正序列曲线均超过了 0.05 置信水平线,突变特征明显。

艾比湖流域年平均气温在 1995 年发生了突变,1995 年之后气温增幅明显(图 3A)。1961—2010 年艾比湖流域年平均气温为 7.2℃,2008 年年平均温度最高(8.5℃),1969 年年平均气温最低(5.1℃),相差 3.4℃。

利用 Mann-Kendall 非参数检验方法,年降水量在 1984 年发生突变,通过 0.05 显著性水平检验,1984 年之后降水量增幅十分明显(图 3B)。以上分析表明,艾比湖流域年降水量与年均气温均呈现波动上升的趋势,Mann-Kendal 检验发现分别在 1984 年、1995 年发现突变,表明艾比湖流域气候由“暖干型”向“暖湿型”转变,突变时间与西北干旱区基本一致<sup>[3]</sup>。

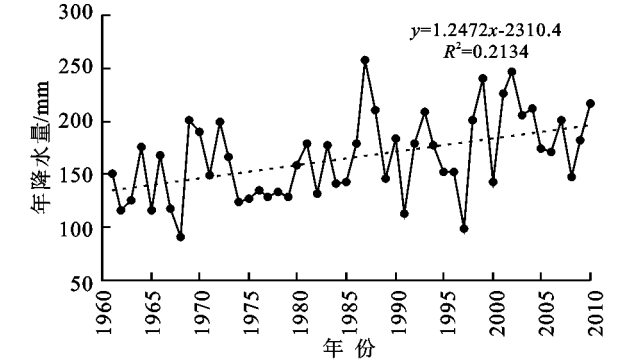


图 2 艾比湖流域 1961—2010 年年降水量变化趋势

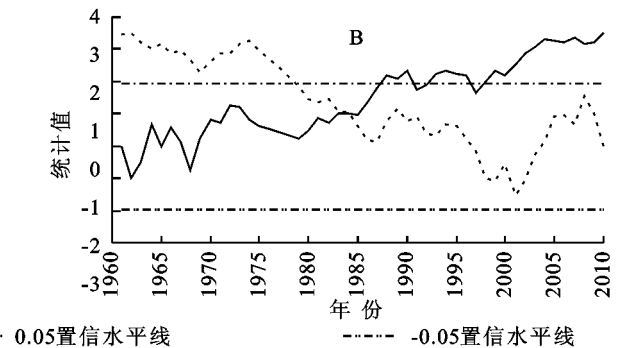


图 3 艾比湖流域 1960—2010 年年平均气温、年降水量突变曲线

从图 4 可以看出,气温与降水与径流量之间呈正相关,相关系数分别为 0.637 6、0.437 1,流域年平均气温呈波动上升趋势,径流量也随着气温的变化而不断发生改变,主要表现为:流域径流量受年均气温变化的影响,径流量随着气温的上升而增加,随着气温的下降而减小。艾比湖流域地表径流的补给方式主要是山区降水和季节性冰雪融水,由于流域内存在较多冰川,流域年平均气温上升,导致冰川消融量增加,径流补给量增大。流域年径流量的变化趋势与年降水量的变化趋势一致,且呈正相关。

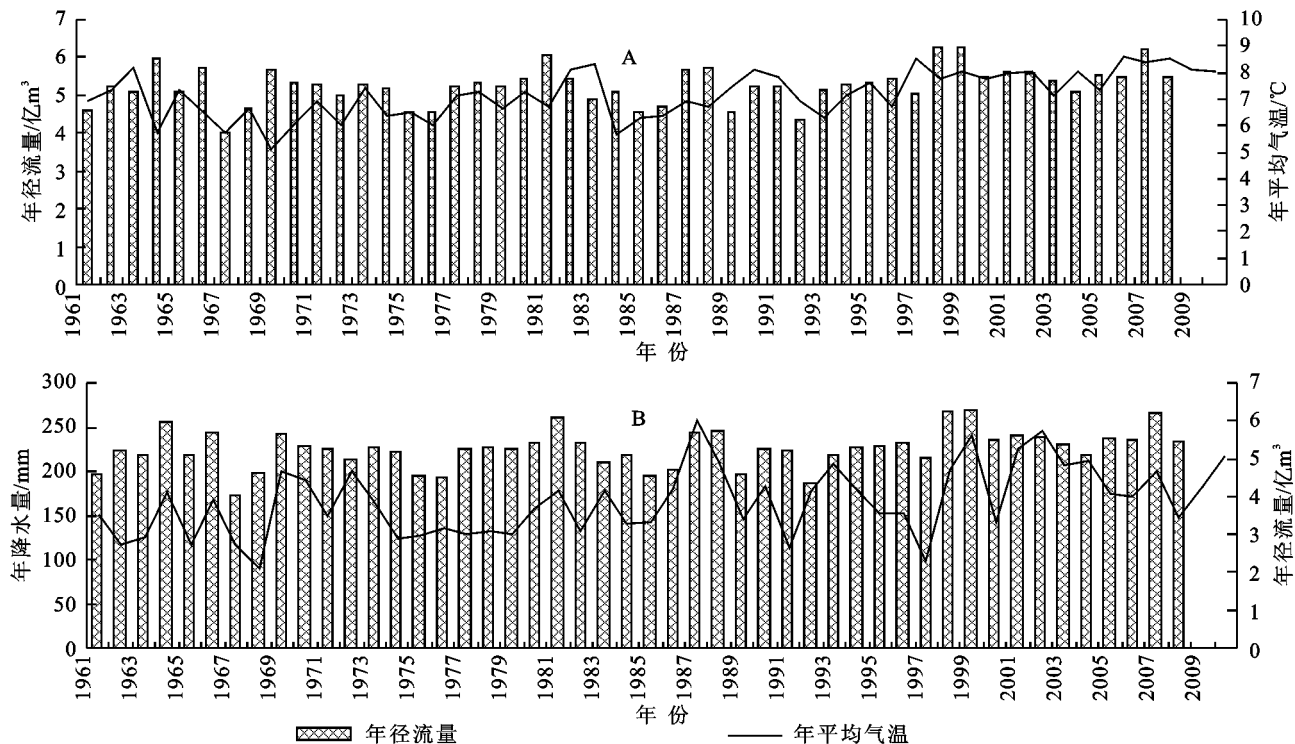


图 4 艾比湖流域 1961—2010 年径流量与年平均气温、年降水量的关系

### 2.3 气候变化和人类活动对艾比湖湖泊面积的影响

气候变化直接或间接影响着湖泊水量的收入和支出,是湖泊变迁的重要驱动因素<sup>[17]</sup>。内陆湖尤其是尾间湖泊,处于一个相对独立的内陆水分循环系统中,受气候波动和人类活动的共同作用<sup>[18]</sup>。艾比湖位于流域中北部,是干旱地区完全封闭性尾间湖泊的典型代表,由于深居内陆及完全的封闭性,流域气候波动对湖泊面积收缩与扩张产生较大影响。

由图 5 可以看出:1970—1984 年、2004—2009 年,随着年平均气温波动上升,艾比湖湖泊面积逐年下降,从 2004 年的 872 km<sup>2</sup> 降低至 2009 年的 515 km<sup>2</sup>,气温与湖泊面积呈负相关。年平均气温升高时,湖泊面积减小,说明在此时间段里,年平均气温变化对湖泊面积影响较大;1995—1998 年,随着年平均气温升高,湖泊面积随之增大,气温与湖泊面积呈正相关,年平均气温对湖泊面积有一定影响。

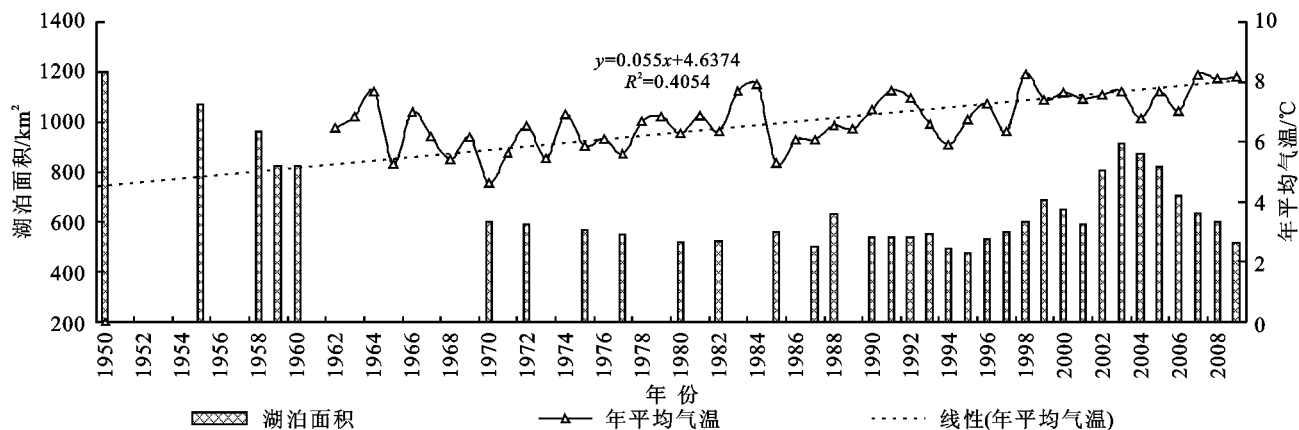


图 5 艾比湖流域 1950—2008 年平均湖泊面积与年平均气温的关系

由图 6 可知,流域年平均降水量对湖泊面积的影响较大。由于 1950—1955 年、1960—1970 年湖泊面积数据缺失,故无法找出这段时间湖泊面积与降水之间的关系。但从整体上来看,流域年平均降水量与湖泊面积的变化趋势趋于同步。1996—1999 年,同步性更明显。

仅从降雨、气温变化与湖面积的动态看,由于湖面积变化与降雨量变化同步性更强,故湖面积的降雨影响高于气温。但不可否认,水资源的人为干预是影响湖面面积变化最重要的因素。这从近 60 a 来艾比湖湖泊面积的发展变化所经历的以下几个阶段可以说明:

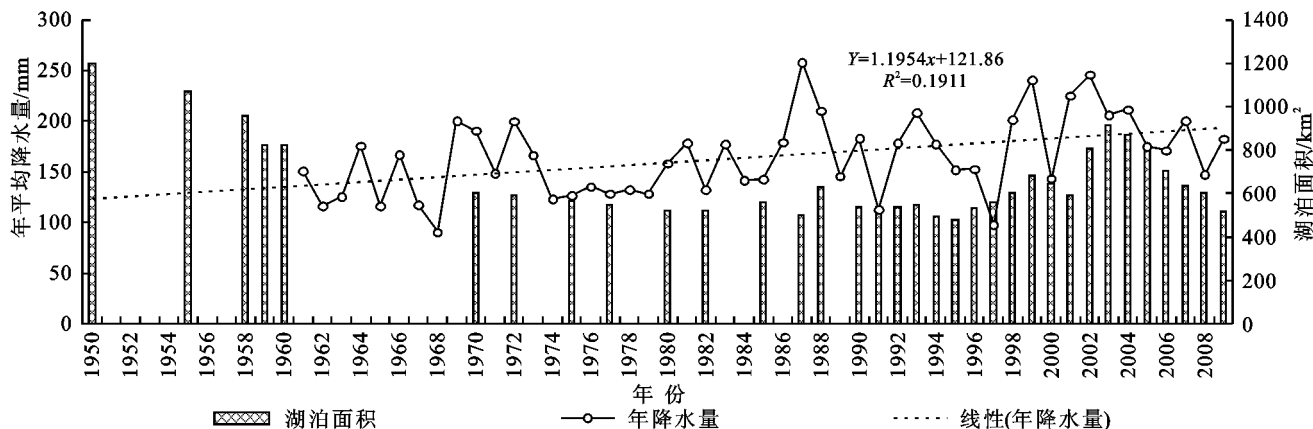


图6 艾比湖流域1950—2008年平均湖泊面积与年平均降水量的关系

(1) 1950—1970年,快速收缩阶段。这一阶段湖泊面积的变化主要是自然和人类作用两大因素共同主导的。变暖变干的气候条件下,随着流域人口增加、土地开垦,流域用水量加大,对湖泊周边生态环境破坏日益严重,湖泊面积萎缩。艾比湖流域入湖水量剧减,注入艾比湖的水量减少70%以上。1950年艾比湖流域的人口总数仅为6.78万人,之后人口增长速度快;湖泊面积由1950年的1200 km<sup>2</sup>萎缩到1970年的520 km<sup>2</sup>;耕地面积急剧增加,从1950年33.9万hm<sup>2</sup>迅速至1970年的233.7万hm<sup>2</sup>,农业耗水量也相应的从1.12亿m<sup>3</sup>增至7.71亿m<sup>3</sup>[19]。

(2) 1970—1995年,波动萎缩阶段。这一阶段人口增速及土地开垦量增加趋于平缓,1981—1990年人口增长减缓,年均增长率降至1.38%,博尔塔拉河、精河流量平稳,注入艾比湖的水量趋于稳定。

(3) 1995—2004年,波动扩张阶段。这一阶段由于受到气候由“暖干”向“暖湿”的转变,年降水量逐年增加。同时,博州近年来每年节水2000多万m<sup>3</sup>,竭尽全力保证每年6亿m<sup>3</sup>入湖补给水量,导致湖泊注水量增加,湖泊面积增大。

(4) 2004—2009年,收缩阶段。2002年以后气温升高,年降水量在2004年以后明显减少,是湖面萎缩的气候原因。同时,随着社会经济的发展,水资源短缺日益凸显,对当地社会经济的发展形成了严峻挑战。截止到2009年,艾比湖湖泊面积萎缩至515 km<sup>2</sup>。2009年与1950年相比,湖泊面积萎缩了57%。2005年后,通过艾比湖流域生态整治工程,建立艾比湖湿地国家级自然保护区,生态环境好转,湖泊面积维持在500 km<sup>2</sup>以上。

## 2.4 气候变化对流域冰川的影响

冰川是气候的产物,对气候反应敏感,它的存在与变化不仅对气候变化具有明显的反馈、调节和指示

作用,而且对生态环境、水资源变化等具有重要影响[13]。在气候变暖的大背景下,冰川等自然系统受到气候变化的影响越来越大,作为气候变化的重要指示剂,受到诸多关注[20]。艾比湖流域河流的调节主要靠冰雪融水和降水。流域主要河流都有冰川分布,当前能够补给艾比湖的河流主要有博尔塔拉河与精河。根据兰州冰川冻土研究所统计结果,博尔塔拉河流域有167条冰川,面积为110.28 km<sup>2</sup>,储存量为54.51亿m<sup>3</sup>,年均融水量为1.05亿m<sup>3</sup>,占径流量的21.4%;精河流域有129条冰川,面积为96.20 km<sup>2</sup>,储存量为54.60亿m<sup>3</sup>,年均融水量为0.96亿m<sup>3</sup>,占径流量的20.6%[21]。对奎屯河流域的哈希勒根51号冰川1964—2001年冰舌末端变化量及运动特征的观测与分析发现,35 a间该冰川末端退缩了49 m,平均1.4 m/a,基本处于稳定状态,但在1999—2000年,冰舌末端平均退缩4.83 m/a,2000—2001年平均退缩量为5.2 m/a,说明冰川消融在增速。冰舌末端伸缩变化与1999—2001年流域年均气温上升、年均降水量下降的趋势相吻合[13]。可见,气候因子的变化是影响冰川进退的主要因素,而气温和降水与冰川进退直接相关,冰川消融随着流域气候变暖趋势增强而逐渐加剧。

## 3 结论

(1) 流域近50 a来气温呈波动上升趋势,年平均气温增幅为0.36℃/10 a。M-K突变检验结果表明气温在1995年发生突变;冬季气温升高幅度最明显,对流域增温幅度贡献率最大。流域年降水量变化幅度较小,变化趋势较缓,温泉、乌苏和阿拉山口的年降水量增幅明显,并在1984年发生突变,所有站点冬季、温泉夏季年降水量增幅明显;表明流域气候由暖干型向暖湿型转变,且趋势加强。

(2) 对比分析主要气候因子气温与降水对径流的影响,气温、降水与径流量之间均呈正相关,相关系数分别为 0.637 6,0.437 1,气温、降水量与径流的关系密切。

(3) 艾比湖湖泊面积变化是气候背景和人为因素共同作用的结果。近 50 a 来,艾比湖湖泊面积变化呈“收缩—扩张—收缩”3 个阶段:1950—1995 年为湖泊收缩阶段,以 1970 年为界,前期快速收缩,后期波动收缩;1995—2004 年为波动扩张阶段;2004—2009 年呈收缩状态。在湖泊收缩阶段的 1970—1984 年、2004—2009 年,年平均气温与湖泊面积呈负相关,对湖泊面积的影响较大;在扩张阶段的前期(1995—1998 年),年平均气温与湖泊面积呈正相关,后期由于气候变化很小,二者关系不大,故流域年平均气温与湖泊面积关系复杂。流域年平均降水量与湖泊面积的变化趋势趋于同步,相关度高,1996—1999 年,同步性更明显。

(4) 气候变暖的背景下,气温升高导致流域冰川面积收缩,雪线升高,冰川数量和规模都在逐渐减小。

#### 参考文献:

- [1] 任国玉,徐铭志,初子莹,等.近 54 a 中国地面气温变化[J].气候与环境研究,2005,10(4):717-727.
- [2] 郭鹏程,包安明,陈曦,等.1960—2006 年艾比湖流域冷暖季气候状况分析[J].自然资源学报,2012,27(1):132-142.
- [3] 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,2003,23(2):152-164.
- [4] 陈亚宁,徐长春,杨余辉,等.新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J].地理学报,2009,64(11):1331-1341.
- [5] 徐阳,谭东成,胡彩虹,等.径流对区域气候变化的响应研究[J].气象与环境科学,2008,31(4):32-35.
- [6] 毛炜峰,樊静,沈永平,等.近 50 a 来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响应[J].

冰川冻土,2012,34(5):1037-1046.

- [7] 翟禄新.近 50 a 来中国西北气候变化及其水文响应分析[D].兰州:兰州大学,2008.
- [8] 李佳,杨太保,何毅,等.1990—2011 年天山东部冰川退缩对气候的响应[J].水土保持研究,2014,11(3):212-216.
- [9] 杨青,何清,李红军,等.艾比湖流域沙尘气候变化趋势及其突变研究[J].中国沙漠,2003,23(5):503-508.
- [10] 胡江玲,武胜利,金海龙,等.艾比湖流域近 48 a 来降水变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(9):94-99.
- [11] 董煜,海米提·依米提.艾比湖流域径流水文特征及其对降水变化响应:以博尔塔拉河为例[J].水土保持研究,2014,21(2):94-99.
- [12] 吴佩钦.近 20 a 来艾比湖逐月水量变化分析及未来变化趋势预测[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2005.
- [13] 井哲帆,叶柏生,焦克勤,等.天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川表面运动特征分析[J].冰川冻土,2002,24(5):563-566.
- [14] 张富翔,丁生祥,金元锋,等.近 47 a 同德地区气候突变特征分析[J].安徽农业科学,2008,36(20):8719-8722.
- [15] 尹云鹤,吴绍洪,陈刚.1961—2006 年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J].自然资源学报,2009,24(12):2147-2157.
- [16] 邵爱军,左丽琼,吴烨,等.河北省近 50 a 气候变化对水资源的影响[J].中国农村水利水电,2008(2):51-55.
- [17] 朱立平,谢曼平,吴艳红.西藏纳木错 1971—2004 年湖泊面积变化及其原因的定量分析[J].科学通报,2010,55(18):1789-1798.
- [18] 白洁,陈曦,李均力,等.1975—2007 年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析[J].湖泊科学,2011,23(1):80-88.
- [19] 贾春光,王晓峰,杨龙,等.艾比湖水位变化对湖区生态效益影响的初探[J].新疆师范大学学报:自然科学版,2005,24(3):141-144.
- [20] 吕卉,杨太保,田洪阵,等.北阿尔泰山近 30 a 冰川变化研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(10):69-76.
- [21] 李艳红,楚新正,金海龙,等.新疆艾比湖流域水文特征分析[J].水文,2006,26(5):68-71.