

文章编号: 1008 - 2786 - (2017)6 - 769 - 09

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000277

近 55 a 托木尔峰国家级自然保护区 气候及径流变化特征

满苏尔·沙比提, 张雪琪, 马国飞

(新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘 要: 本文运用多种方法对托木尔峰自然保护区 1961—2015 年气温、降水、径流变化及其影响因子进行分析, 旨在为当地水资源合理利用提供理论支撑。结果显示: 55 a 来气温升高 1.5 °C, 其中保护区北坡中山带上升最高为 1.7 °C; 春夏秋冬分别升高了 1.2 °C、1.1 °C、1.7 °C 和 1.9 °C, 秋冬季对增温的贡献率较大; 在春季南坡高山带增温最高为 1.4 °C、夏秋季北坡中山带增温最高为 1.8 °C 和 2.3 °C、冬季南坡低山带增温最高为 2.8 °C; 降水年增率 1.27 mm, 其中南坡中山带年增率最大为 2.38 mm; 四季年增率分别为春季 0.15 mm、夏季 0.55 mm、秋季 0.41 mm、冬季 0.13 mm, 夏秋季对增湿贡献率较大; 春季南坡高山带年增率最大为 0.32 mm、夏秋季南坡中山带年增率最大为 1.03 mm 和 0.77 mm、冬季北坡中山带年增率最大为 0.22 mm; 库玛拉克河径流量年增率为 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$, 台兰河径流量年增率为 $0.01 \times 10^8 \text{ m}^3$, 保护区气温和降水的变化是造成径流变化的主要因素, 尤其是春季降水和夏季气温的影响最为显著。

关键词: 气候变化; 径流变化; 影响因子; 托木尔峰自然保护区

中图分类号: P339; P467

文献标志码: A

全球气候变化是当今国际社会的热点话题。干旱半干旱区是近 100 a 来全球增温最显著的区域, 尤其在北半球中纬度, 冬季升温幅度达 1.7 °C, 约为全球陆地增温水平的 2 倍^[1,2]。近 50 a 气候资料显示, 我国西北干旱区气温以 0.34 °C/10 a 的速度上升, 变暖程度高于全国平均水平^[2]。近 50 a 来, 中国年降水量整体上趋于减少, 但 80 年代末西北干旱区气候明显的表现出由暖干向暖湿转型, 体现在地表径流持续增加, 湖泊水位上升、面积扩大^[1,3]。

托木尔峰位于科克莎尔山与子午岭相汇的山结处, 海拔 7435.3 m, 为天山最高峰。托木尔峰区山峰高耸, 平均海拔约 6000 m 左右, 其中 6000 m 以上的高峰有 15 座, 6800 m 以上的高峰有 5 座, 海拔 4000 m 以上的山地约占 60%, 高耸的山峰为冰川发育提供了有利条件。据《天山托木尔峰地区的冰川与气象》专著, 该区有各类冰川 509 条(境内), 冰川

面积达 2746.3 km², 是天山山脉最大的冰川作用中心, 也是超大型冰川的集中分布区。面积超过 300 km² 的冰川有 3 条, 冰川总储水量约 $4959.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均每年山区产生的 56% 径流量来自冰川融水^[4]。研究区是新疆重要的水资源补给区, 是“天然水塔”, 其气候及径流变化, 直接影响全疆的水资源和生态安全^[5-7]。近年来谢昌卫等^[8] (2005), 通过对托木尔峰南麓径流变化的气候因素分析指出, 气温对径流量变化的影响明显大于降水对径流的影响; 王建等^[9] (2006), 分析近 40 a 来托木尔峰南部地区气候及水文环境变化特征指出, 托木尔峰南部地区 1987 年以来气候呈现由暖干向暖湿转变的趋势; 谢昌卫等^[10] (2005), 分析托木尔峰南麓河流径流量变化特征及其对北极涛动事件的响应指出, 强事件年, 径流量增加, 反之则减少。以往的研究都以托木尔峰南坡中低山带作为研究对象, 并未对整个

收稿日期(Received date): 2016 - 06 - 07; 改回日期(Accepted date): 2017 - 07 - 07

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41461107) [National Natural Science Foundation of China(41461107)]

作者简介(Biography): 满苏尔·沙比提(1963 -), 男, 新疆阿克苏人, 教授, 主要研究方向: 干旱区环境演变与灾害防控研究 [Mansur Sabit (1963 -), male, Akesu Xinjiang, professor, specialized in environmental change and disaster prevention and control in arid area] E-mail: mansursa@163.com

保护区,尤其是保护区北坡和南坡高山带进行气候变化特征对比分析。笔者选择保护区周围的4个气象站和2个水文站1961—2015年的逐月气温、降水和径流数据,通过线性趋势法、Mann-Kendall 突变检验法、重标极差分析法(R/S)分析托木尔峰自然保护区1961—2015年气温、降水和径流的趋势变化和突变特征,以期为区域经济结构调整和水资源合理开发利用提供参考依据。

1 研究区概况

托木尔峰自然保护区位于南天山的托木尔峰山汇处。西与吉尔吉斯斯坦,南与温宿以北的低山山麓地带,北与昭苏盆地的特克斯河,东与木扎尔特河

毗连。地理坐标为东经 79° 50' ~ 80° 54', 北纬 41° 40' ~ 42° 04', 总面积 $34.36 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。托木尔峰自然保护区是我国海拔最高的自然保护区之一,现代冰川发育,北坡属于伊犁河流域,主要河流有卡因特木扎尔特河和北木扎尔特河。南坡属于塔里木河流域,主要河流自西向东依次为库玛拉克河、阿特依纳克河、台兰河、喀拉玉尔滚河和南木扎尔特河,其中库玛拉克河与台兰河的径流量较多。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源与处理

由于托木尔峰自然保护区内没有长期固定的地面气象站,而且地形地貌比较复杂,海拔高差较大。

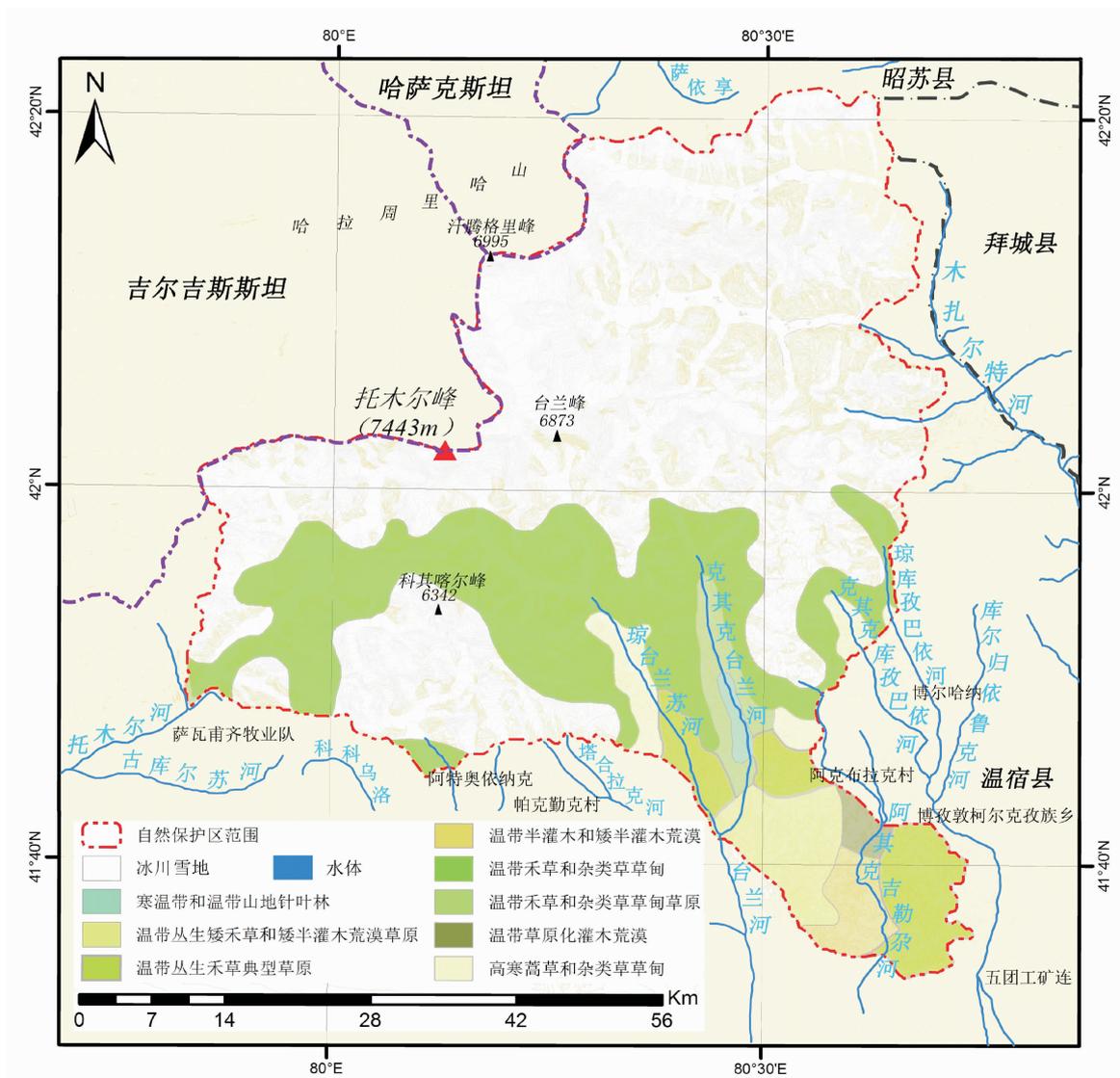


图1 保护区示意图

Fig. 1 Sketch map of the nature reserve

因此,本研究分别选用靠近保护区北坡的昭苏气象站(1851 m)代表保护区北坡中山带;选用保护区南坡西部的吐尔尕特气象站(3504.4 m)代表保护区南坡高山带;选用保护区西南坡的阿合奇气象站(1984.9 m)代表保护区南坡中山带;选用靠近保护区东南坡的拜城气象站(1229.2 m)代表保护区南坡低山带,对各气象站1961—2015年的气温和降水实测资料进行统计分析,以反映托木尔峰自然保护区的气候变化特征。选用保护区西南坡的库玛拉克河协和拉水文站及保护区南坡台兰河台兰水文站的实测径流量,分析保护区的径流量变化特征;本文选取的水文站均为河流山区出山口控制站,河川径流变化除受气候变化的影响外,受人类活动的直接干扰较小。

2.2 研究方法

运用线性回归和趋势分析方法分析气候与径流变化特征。采用 Mann-Kendall 突变方法检测气候与径流发生变化的突变年^[11-12]。运用 R/S 分析法判断气温、降水和径流未来变化趋势,采用多元回归方法分析气温、降水、径流之间的线性关系。R/S 分析法是一种非线性科学预测方法,通过该方法计算得到的 Hurst 指数 H 的取值范围为 $[0, 1]$,当 $H = 0.5$,标志着时间序列是随机的,即过去趋势不影响未来;当 $H > 0.5$,表示未来趋势与过去保持一致, H 越接近 1,持续性越强;反之亦然^[13]。

3 结果与分析

3.1 气温变化趋势及突变检测

3.1.1 气温变化特征

随着全球气候变暖趋势的增强^[14],托木尔峰自然保护区气温的升高也是不争的事实。保护区1961—2015年平均气温 $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,升高率 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年均最高气温 $4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2013),年均最低气温 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1974)(图2)。

春季平均气温 $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,增长率为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;夏季平均气温 $15.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;秋季平均气温 $4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;冬季平均气温 $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在四季中,秋冬季对保护区增温的贡献率较大,春夏季贡献率较小。

托木尔峰自然保护区由于海拔和地形地貌因素的影响,各垂直带气温变化幅度不尽相同。保护区

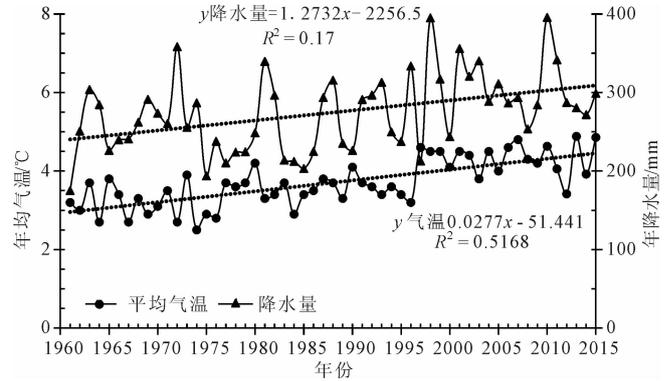


图2 保护区年均气温和年降水量的年际变化趋势

Fig.2 Changing trend of annual mean temperature and precipitation in the reserve

北坡中山带平均气温 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,20世纪60~80年代以负距平为主,其余年代以正距平为主。春季平均气温 $4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;夏季平均气温 $14.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$;秋季平均气温 $4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;冬季平均气温为 $-9.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表1)。

保护区南坡高山带55 a 平均气温 $-3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,波动较大。春季平均气温 $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;夏季平均气温为 $6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;秋季平均气温为 $-2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$;冬季平均气温 $-13.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表1)。

保护区南坡中山带55 a 平均气温 $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,变暖趋势较弱。春季平均气温 $8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;夏季平均气温 $18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$;秋季平均气温 $7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$;冬季平均气温 $-7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表1)。

保护区南坡低山带55 a 平均气温 $8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。春季平均气温 $11.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;夏季平均气温 $21.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$;秋季平均气温 $8.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$;冬季平均气温 $-9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率 $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,55 a 约上升 $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表1)。

3.1.2 气温的突变检验

由气温的突变检测图 3 可知,保护区北坡中山带,南坡高山带、中山带和低山带 UF、UB 曲线分别交于 1997、1993、1997 和 1996 年,并且随后顺序统计值 UF 曲线远远超过信度线,这表明保护区各垂直带的气温变化趋势存在明显的状态改变,突变前后平均气温分别升高了 1.1、0.8、1.0、0.9 °C。R/S 分析结果表明,保护区北坡中山带,南坡高山带、中山带和低山带气温的 Hurst 指数分别为 0.27、0.30、0.30 和 0.31,均低于 0.5。参照冯新灵等^[15]对 Hurst 指数的分级标准,可以发现,4 个区域的 Hurst

指数均达到 -3 级,具有较强的反持续性。即保护区各垂直带的气温在未来一段时间可能与过去状态不一致,呈现下降趋势。

3.2 降水变化趋势及突变检测

3.2.1 降水变化特征

托木尔峰自然保护区近 55 a 年均降水量 274.7 mm,年增率 1.27 mm。20 世纪 60 年代初至 80 年代降水量偏少,低于 55 a 平均值;90 年代中期波动在 250 mm 附近,低于平均值;90 年代后期至 2010 年急剧增长,年均降水量 300 mm 以上,之后呈下降趋势;20 世纪 60~80 年代以负距平为主,其余年代以

表 1 保护区各垂直带年均气温、年降水量、四季平均气温和四季降水量的年际线性变化率

Tab. 1 Linear-changing rate of the seasonal and annual mean temperature and the annual and seasonal precipitation in each altitudinal belt of the reserve

所在位置	年值		春季		夏季		秋季		冬季	
	气温 /(°C/10 a)	降水 /(mm/a)								
北坡中山带	0.32 * *	0.27	0.25 *	0.03	0.34 * *	-0.03	0.42 * *	0.08	0.25	0.22 *
南坡高山带	0.28 * *	1.32 * *	0.25 * *	0.32	0.21 * *	0.56	0.35 * *	0.35	0.31 * *	0.10 *
南坡中山带	0.26 * *	2.38 * *	0.20 *	0.28	0.16 * *	1.03 *	0.29 * *	0.77 * *	0.36 * *	0.12
南坡低山带	0.25 * *	1.12 * *	0.20 * *	-0.03	0.11 *	0.64 * *	0.17 * *	0.43 *	0.52 *	0.08

注: * 通过 95% 置信度检验, ** 通过 99% 置信度检验

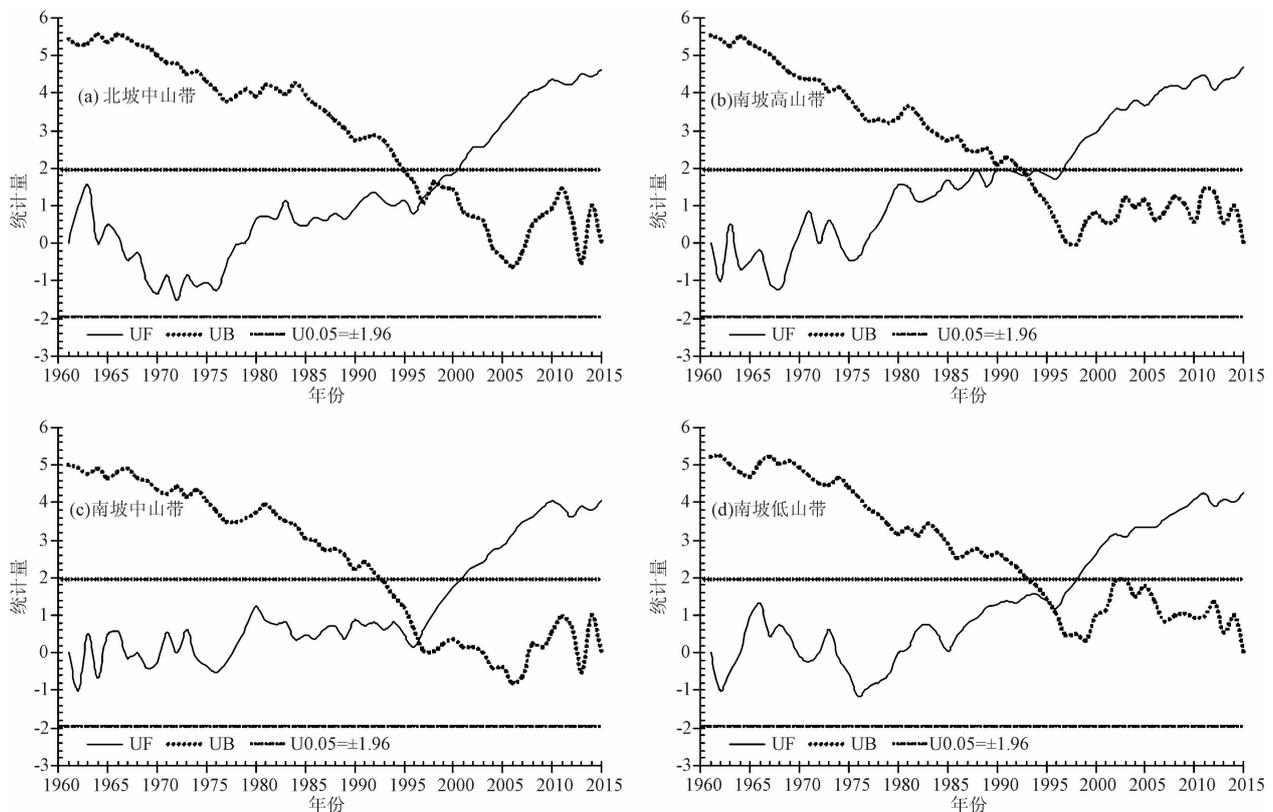


图 3 保护区各垂直带年均气温的变化突变

Fig. 3 Abrupt alteration of annual mean temperature in each altitudinal belt of the reserve

正距平为主,最大降水量 395.7 mm(2010),最小降水量 175.1 mm(1961)(图 2)。春季平均降水量 74.7 mm,年增率 0.15 mm;夏季平均降水量 135.5 mm,年增率 0.55 mm;秋季平均降水量 51.1 mm,年增率 0.41 mm;冬季平均降水量 12.9 mm,年增率 0.13 mm。

托木尔峰自然保护区由于海拔和坡向坡度的影响,各垂直带降水变化幅度不尽相同^[16]。保护区北坡中山带 55 a 平均降水量 504.9 mm,年增率 0.27 mm,20 世纪 60 年代至 70 年代初略有增长,年均降水量 523 mm 左右,高于平均值;70 年代中后期至 1997 年有所下降,年均降水量 471 mm 左右,低于平均值;1998 年至今,年均降水量浮动在 535 mm 左右,高于平均值。春季平均降水量 143.9 mm,年增率 0.03 mm;夏季平均降水量 247.5 mm,年增率 -0.03 mm;秋季平均降水量 92.2 mm,年增率 0.08 mm;冬季平均降水量 21.9 mm,年增率 0.22 mm(表 1)。

保护区南坡高山带 55 a 平均降水量 251.2 mm,年增率 1.32 mm,20 世纪 60 年代初至 70 年代初期略有增长,70 年代中期至 90 年代初期有所降低,之后迅速增长,波动性较大,20 世纪 70~80 年代以负距平为主,其余年代以正距平为主。春季平均降水量 73.6 mm,年增率 0.32 mm;夏季平均降水

量 121.6 mm,年增率 0.56 mm;秋季平均降水量 45.0 mm,年增率 0.35 mm;冬季平均降水量 11.2 mm,年增率 0.10 mm(表 1)。

保护区南坡中山带 55 a 平均降水量 223.3 mm,年增率 2.38 mm,1961-1987 年大多数低于平均值,之后在波动中有所增长,20 世纪 60~80 年代以负距平为主,其余年代以正距平为主。春季平均降水量 55.6 mm,年增率 0.28 mm;夏季平均降水量 116.2 mm,年增率 1.03 mm;秋季平均降水量 40.6 mm,年增率 0.77 mm;冬季平均降水量 8.3 mm,年增率 0.12 mm(表 1)。

保护区南坡低山带 55 a 平均降水量 119.3 mm,年增率 1.12 mm,20 世纪 60 年代初至 80 年代中期在低水平波动,年均降水量低于多年平均值,之后在波动中缓慢增长,高于平均值。春季平均降水量 25.8 mm,年增率 -0.03 mm;夏季平均降水量 56.8 mm,年增率 0.64 mm;秋季平均降水量 26.7 mm,年增率 0.43 mm;冬季平均降水量 10.1 mm,年增率 0.08 mm(表 1)。

3.2.2 降水的突变检验

由托木尔峰自然保护区降水时间序列的突变检测图 4 可见,北坡中山带在 1966 年发生了由减小向增加的转变,且 1972—1973 年增加趋势通过 95%

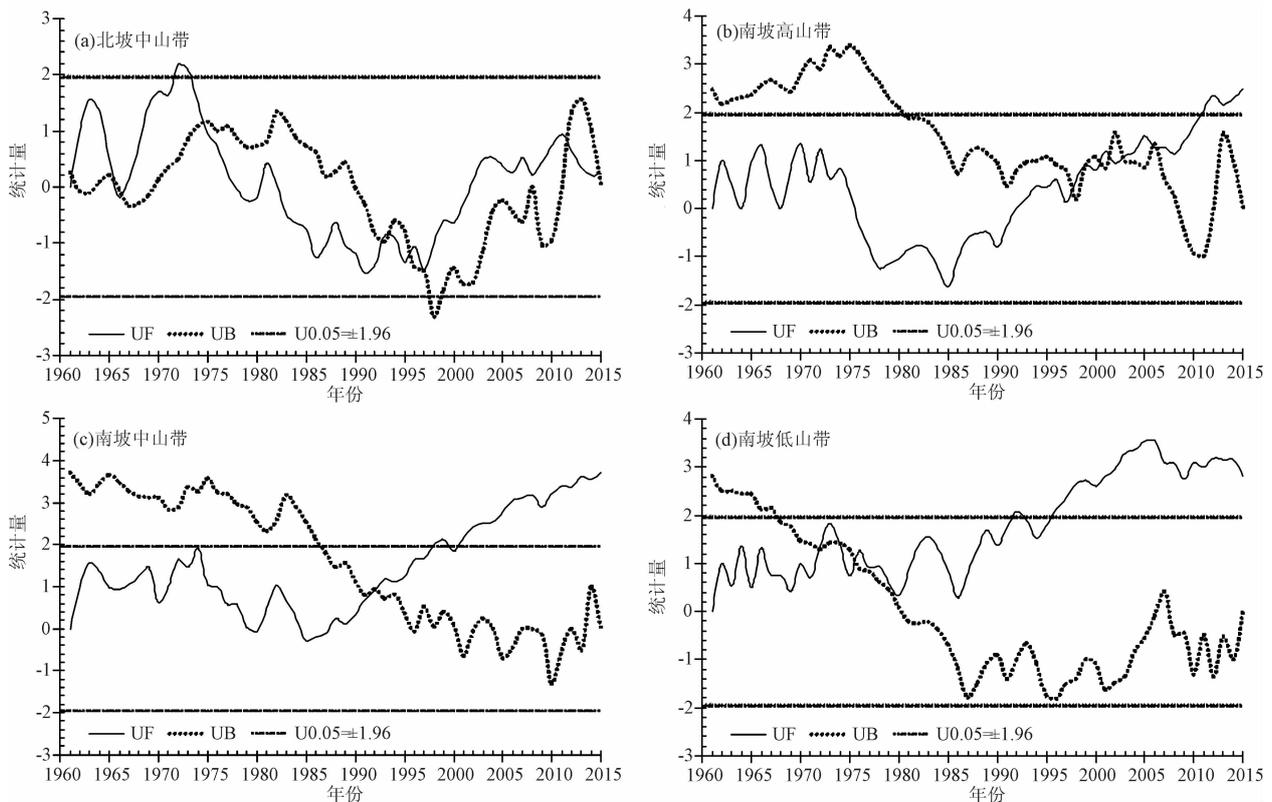


图 4 保护区各垂直带年降水量的变化突变

Fig. 4 Abrupt alteration of annual mean precipitation in each altitudinal belt of the reserve

置信度检验;1996 发生了由减小向增加的转变,但增加趋势不明显。南坡高山带、中山带、低山带分别在 1998、1992、1976 年发生了由减小向增加的突变,突变前后降水量分别增加了 40.3、76.9、35.3 mm。这表明保护区除了北坡中山带突变不明显外,其余各垂直带降水变化存在明显的突变。通过 R/S 分析可知,保护区北坡中山带,南坡高山带、中山带和低山带降水的 Hurst 指数分别为 0.25、0.29、0.24 和 0.36,其中北坡中山带和南坡中山带等级为 -4 级,具有强反持续性;南坡高山带、低山带等级为 -3 级,具有较强反持续性。这说明南、北坡中山带的降水在未来一段时间极有可能呈现减小趋势,且减小的可能性大于南坡高、低山带。

3.3 径流变化趋势及突变检测

3.3.1 径流年际变化特征

由库玛拉克河 1961—2015 年径流量序列分析得知,55 a 年均径流量 $49.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1961、1978、1980—1981、1984、1994—1995、1997—2004、2007—2013、2015 年份径流量为偏丰,其余年份为偏枯。20 世纪 60 年代初至 80 年代末径流量的年际变化幅度不大,其中 80 年代的变化幅度最小,除 1961、1978、1980、1981 和 1984 年份径流量高于距平值外,其余年份均低于距平值。从 90 年代起径流量迅速增长,浮动在 $54.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,高于平均值,年均径流量趋势线的倾向系数为 0.15,径流量呈上升趋势(图 5)。

由台兰河 1961—2015 年径流量序列分析得知,55 a 年均径流量为 $7.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,最大年径流量 $9.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1991),最小年径流量 $5.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1972),极差 $4.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。20 世纪 60 年代初至 80 年代中期径流量的年际变化幅度较小,除 1961 和

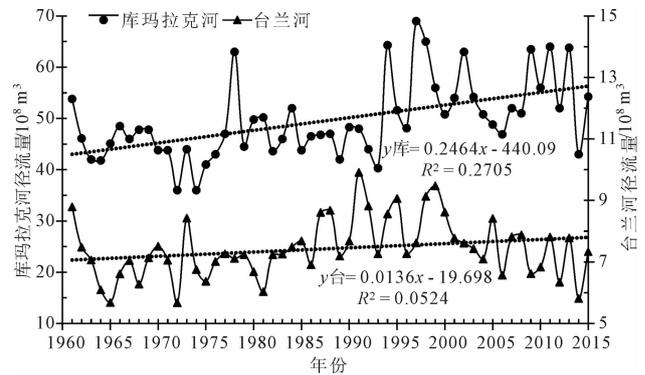


图 5 库玛拉克河与台兰河年径流量变化趋势

Fig. 5 Changing trend of runoff in the Kumalake River and the Tailan River

1973 年份高于距平值外,其余年份均低于距平值。从 80 年代中期至 90 年代末径流量迅速增长,除 1986、1989、1993 和 1996 年份低于距平值外,其余年份均高于距平值,90 年代年均径流量达 $8.6 \times 10^8 \text{ m}^3$;从 21 世纪初起径流量略有减小,接近距平值,年均径流量趋势线的倾向系数为 -0.06(图 5)。

3.3.2 径流的突变检测

由保护区径流突变检测图 6 可见,库玛拉克河径流突变年份为 1993 年,与保护区南坡高山带气温突变时间一致,但径流突变年份与保护区南坡高山带、中山带和低山带降水突变时间存在较大的差异,说明库玛拉克河以高山冰雪融水补给为主,径流量与高山带气温的升高有密切联系,高山带气温的升高导致冰雪融化,径流量增加。台兰河径流突变年份为 1981 年,与保护区南坡低山带降水突变时间基本一致,但是超前于南坡中低山带气温的突变时间,说明台兰河径流以中低山降水和冰雪融水混合补给为主,与降水之间的关系比气温更为密切。库玛拉克河径流的 Hurst 指数为 0.33,等级为 -3 级,具有

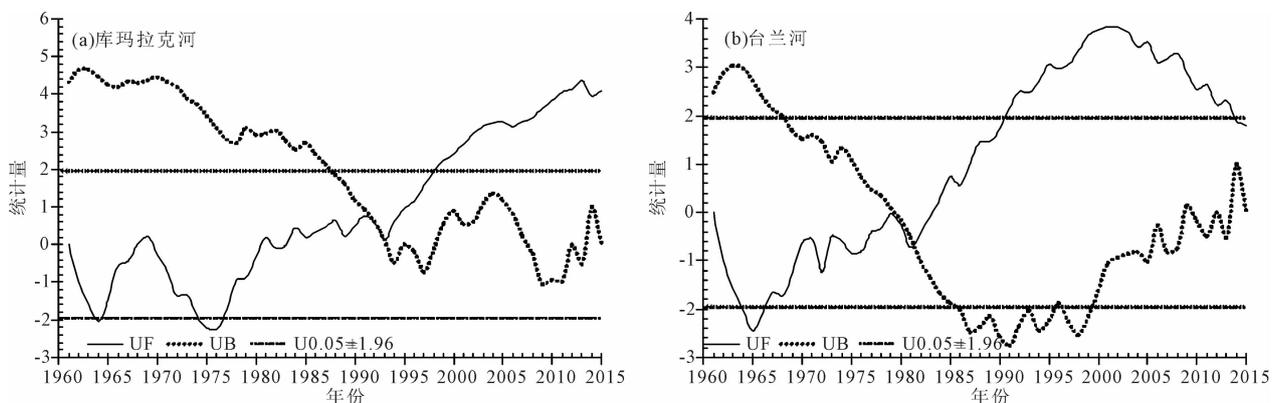


图 6 库玛拉克河与台兰河年径流量的突变

Fig. 6 Abrupt alteration of annual runoff in Kumalake River and Tailan River

较强反持续性;台兰河径流的 Hurst 指数为 0.39,属于 -2 级,表现为较弱的反持续性。这表明在未来一段时间内库玛拉克河与台兰河径流量可能呈现减小的趋势,但是反持续性不明显。

3.3.3 气候变化对径流的影响

托木尔峰自然保护区海拔高,现代冰川发育,冰川面积占保护区总面积的 52%,冰雪融水是库玛拉克河与台兰河径流的主要补给来源。保护区径流量的大小不仅受降水量影响,更多的受气温的影响。通过气温升高加速冰川等“固体水库”的消融,进而增大径流量。降水则直接影响径流量的增减。为定量研究径流量与气温、降水之间的关系,选取保护区南坡高山带、中山带、低山带春季、夏季、秋季气温和降水作为自变量,以保护区南坡的库玛拉克河与台兰河径流量作为因变量进行多元回归分析,所得回归方程如表 2 所示。由表 2 可见,库玛拉克河径流量与气温、降水之间存在极显著相关,置信度均超过 99%,气温的回归系数远大于降水,其中夏季气温回归系数最大,为 8.82,说明气温越高,冰雪融水越多,对径流量的贡献越大。构建的台兰河径流回归方程的拟合性不如库玛拉克河,说明台兰河径流量对气温、降水的响应不如库玛拉克河敏感。其中春季降水和夏季气温的回归系数最大,分别为 0.01、0.51,说明春季降水和夏季气温对台兰河径流量的影响较大。从以上分析可知,气温、降水对径流量的影响权重不同,径流对气温的敏感度优于降水,径流量的增加与气温升高之间的关系更为密切,但是两条河流的径流量均主要受到春季降水量和夏季气温的影响。气温的持续升高导致源流山区冰雪消融加剧,增加河流来水量。但是,随着气温的持续升高,河流上游山区冰雪消融加剧,这在未来冰雪出现融水高峰后可能会导致径流量的减小,因此,如何实现水资源的可持续利用是今后研究的重点。

4 讨论与结论

4.1 讨论

气候变化的成因是目前气候研究的热点问题,大气中温室气体含量的急剧上升,厄尔尼诺和拉尼娜现象的不规则出现和大气环流都会影响气候的变化^[1,15]。近 55 a 来托木尔峰自然保护区呈变暖增湿趋势,其中气温升高了 1.5 °C,变暖主要在秋冬两季;降水年增率为 1.27 mm,增湿主要集中在夏秋两季。这主要是因为北大西洋的亚速尔高压和冰岛低压增强,使得欧亚大陆北部上空产生显著的西风急流,造成保护区气温偏高,降水偏多^[16-17]。20 世纪 60 年代初至 80 年代保护区气温偏低,为 3.3 °C,这主要由 1980 年前后全球气候变冷所致^[2];90 年代至 2015 年气温偏高为 4.1 °C,这主要由北大西洋大气环流结构在 1971—1986 年发生调整,由 1987 年开始稳定在一个新的水平上所致^[2]。运用 R/S 分析法判断气温、降水和未来变化趋势时,发现 Hurst 指数均 < 0.5,表现为不同强度的负持续性,说明未来一段时间气温、降水和径流可能表现出减小的趋势。这符合施雅风等^[1]提出在西北气候向暖湿转型中仍存在年代际的干湿波动这一结论。

保护区的径流受气温和降水变化的双重影响。气温通过对冰川的生消作用来影响径流量,降水则直接对冰川和径流量进行补充。库玛拉克河、台兰河径流分别在 1993、1981 年发生了由减小向增加的突变,这主要是因为保护区自 90 年代起气温突增,并且本区河流多以冰雪融水和降水混合补给为主,对气温变化极其敏感。构建的库玛拉克河径流与气温、降水之间的回归方程(置信度超过 99%)说明气温越高,冰雪融水越多,对径流的贡献越大。但是随着气温的持续升高,山区冰雪消融加剧,这在未来冰

表 2 两河径流量与春夏秋冬平均气温和降水量之间的线性关系

Tab. 2 Linear relationships between the runoff and the mean temperature and precipitation

河流	春季	夏季	秋季
库玛拉克河	$R = 4.014T + 0.096P + 21.396$ $\alpha = 0.003$	$R = 8.818T - 0.090P - 94.893$ $\alpha = 0.000$	$R = 3.568T + 0.067P + 32.468$ $\alpha = 0.007$
台兰河	$R = -0.006T + 0.009P + 6.997$ $\alpha = 0.414$	$R = 0.506T + 0.004P - 0.739$ $\alpha = 0.067$	$R = 0.354T + 0.001P - 6.007$ $\alpha = 0.139$

注:R - 径流量;T - 气温;P - 降水; α - 模型显著性水平。

雪出现融水高峰后,终会因冰雪面积的缩小致使径流减少。因此,未来如何实现水资源的可持续利用将成为今后的研究重点。

4.2 结论

(1)托木尔峰自然保护区气温序列呈显著的上升趋势,55 a 约升高 1.5 °C,其中保护区北坡中山带约升高 1.7 °C,南坡高山带约升高 1.5 °C,南坡中山带约升高 1.4 °C,南坡低山带约升高 1.4 °C,北坡中山带对保护区增温的贡献率较大,南坡中低山带贡献率较小。保护区降水量年增率 1.27 mm,其中,北坡中山带年增率 0.27 mm,南坡高山带年增率 1.32 mm,南坡中山带年增率 2.38 mm,南坡低山带年增率 1.12 mm,南坡中山带对保护区增湿的贡献率较大,北坡中山带的贡献率较小。

(2)保护区气温和降水的季节变化明显,55 a 春季气温约升高 1.2 °C,夏季约升高 1.1 °C,秋季约升高 1.7 °C,冬季约升高 1.9 °C。春季南坡高山带、夏秋季北坡中山带、冬季南坡低山带对保护区增温的贡献率较大。55 a 来春季降水的年增率 0.15 mm,夏季降水的年增率 0.55 mm,秋季降水的年增率 0.41 mm,冬季降水的年增率 0.13 mm。春季南坡高山带、夏秋季南坡中山带、冬季北坡中山带对增湿的贡献率较大。

(3)保护区的气温、降水和径流具有明显的突变年份。保护区北坡中山带,南坡高山带、中山带和低山带气温的突变年份分别为 1997、1993、1997 和 1996 年。降水的突变年份分别为 1996、1998、1992 和 1976 年。库玛拉克河径流的突变年份为 1993 年,台兰河径流的突变年份为 1981 年。库玛拉克河径流的突变年份与保护区南坡高山带气温的突变时间一致,台兰河径流的突变年份与保护区南坡低山带降水的突变时间较接近。

(4)库玛拉克河径流量的年增率 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$,台兰河径流量的年增率 $0.01 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。回归方程显示,两条河流的径流量主要受春季降水和夏季气温的影响。

参考文献 (References)

- [1] 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 [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]
- [2] 孟秀敬,张士锋,张永勇. 河西走廊 57 年来气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(11):1482-1492 [MENG Xiujing, ZHANG Shifeng, ZHANG Yongyong. The temporal and spatial change of temperature and precipitation in Hexi corridor in recent 57 years [J]. Acta Geographica Sinica,2012,67(11):1482-1492]
- [3] 秦甲,丁永建,叶柏生,等. 中国西北山地景观要素对河川径流的影响作用分析[J]. 冰川冻土,2011,33(2):397-404 [QIN Jia, DING Yongjian, YE Baisheng, et al. Regulating effect of mountain landscapes on river runoff in northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2011,33(2):397-404]
- [4] 谢昌卫,丁永建,刘时银,等. 托木尔峰南坡冰川水文特征及其对径流的影响分析[J]. 干旱区地理,2004,27(4):570-575 [XIE Changwei, DING Yongjian, LIU Shiyin, et al. Analysis on the glacial hydrological features of the glaciers on the south slope of Mt. Tomur and the effects on runoff [J]. Arid Land Geography,2004,27(4):570-575]
- [5] 刘浦江. 新疆托木尔峰国家级自然保护区资源保护与开发利用现状和对策[J]. 中南林业调查规划,2014,33(1):40-42 [LIU Pujiang. Present situation and counter measures of protection and exploitation of resources in Xinjiang Tomur peak nature reserve [J]. Central South Forest Inventory and Planning,2014,33(1):40-42]
- [6] 赵军,黄永生,师银芳,等. 2000—2012 年祁连山中段雪线与气候变化关系[J]. 山地学报,2015,33(6):683-689 [ZHAO Jun, HUANG Yongsheng, SHI Yinfang, et al. Relationship between snow line change and climate change in the middle of Qilian mountains during 2000-2012 [J]. Mountain Research,2015,33(6):683-689]
- [7] 满苏尔·沙比提,娜斯曼·那斯尔丁,艾萨迪拉·玉苏甫. 天山托木尔峰国家级自然保护区生态系统服务价值评估[J]. 山地学报,2016,34(5):599-605 [MANSUR Sabit, NASIMA Nasirdin, ASADDULLA Yusup. Evaluation on ecosystem service value of Tianshan Tomur national nature Reserve [J]. Mountain Research,2016,34(5):599-605]
- [8] 谢昌卫,丁永建,刘时银,等. 托木尔峰南麓径流变化的气候因素分析[J]. 冰川冻土,2005,27(2):269-275 [XIE Changwei, DING Yongjian, LIU Shiyin, et al. Runoff change on the south slopes of Mount Tomur and its response to climatic variation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2005,27(2):269-275]
- [9] 王建,丁永建,刘时银,等. 近 40 年来托木尔峰南部地区气候及水文环境变化特征[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(2):118-123 [WANG Jian, DING Yongjian, LIU Shiyin, et al. Characteristics of climatic and hydrological variation in southern Tomur, Tianshan, Xinjiang during the past 40 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2006,20(2):118-123]
- [10] 谢昌卫,丁永建,刘时银,等. 托木尔峰南麓河流径流量变化特征及其对北极涛动(AO)事件的响应[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(6):83-88 [XIE Changwei, DING Yongjian, LIU Shiyin, et al. Characteristics of runoff of rivers at the south slope of Mt. Tomur and its response to Arctic Oscillation(AO) [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2005,19(6):83-88]

- [11] George E P Box. Time Series Analysis Forecasting and Control (Third Edition)[M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc, 1994
- [12] Kendall MG. Rank Correlation Measures[M]. London: Charles Griffin, 1975
- [13] 燕爱玲, 黄强, 刘招, 等. R/S 法的径流时序复杂特性研究[J]. 应用科学学报, 2007, **25**(2): 214 - 217 [YAN Ailing, HUANG Qiang, LIU Zhao, et al. Complicated property of runoff time series studied with R S method [J]. Journal of Applied Sciences, 2007, **25**(2): 214 - 217]
- [14] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 过去 30 年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响[J]. 地理研究, 2016, **35**(1): 49 - 57 [YIN Yunhe, WU Shaohong, ZHAO Dongsheng, et al. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the source region of the yellow river from 1981 to 2010 [J]. Geographical Research, 2016, **35**(1): 49 - 57]
- [15] 冯新灵, 冯自立, 罗隆诚, 等. 青藏高原冷暖气候变化趋势的 R/S 分析及 Hurst 指数试验研究[J]. 干旱区地理, 2008, **31**(2): 175 - 181 [FENG Xinling, FENG Zili, LUO Longcheng, et al. Fractal analysis of climate change and Hurst index experiment in Tibetan plateau in future [J]. Arid Land Geography, 2008, **31**(2): 175 - 181]
- [16] 慈晖, 张强, 张江辉, 等. 1961—2010 年新疆极端降水过程时空特征[J]. 地理研究, 2014, **33**(10): 1881 - 1891 [CI Hui, ZHANG Qiang, ZHANG Jianghui, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events within Xinjiang during 1961 - 2010 [J]. Geographical Research, 2014, **33**(10): 1881 - 1891]
- [17] 龚道溢, 王绍武. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响[J]. 地理学报, 2003, **58**(4): 559 - 568 [GONG Daoyi, WANG Shaowu. Influence of Arctic Oscillation on winter climate over China [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, **58**(4): 559 - 568]

Climatic and Runoff Characteristics of Tomur National Nature Reserve for Recent 55 Years

MANSUR Sabit, ZHANG Xueqi, MA Guofei

(School of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: In this paper, temperature, precipitation, runoff and its influencing factors collected in Tomur Nature Reserve from 1961 to 2015 were analyzed by various methods to provide theoretical foundation for rational utilization of local water resources. Results showed that the air temperature increased by 1.5 °C on average in 55 years, where the highest in the middle zone of north slope of the reserve increased by 1.7 °C, with a increment of 1.2 °C, 1.1 °C, 1.7 °C and 1.9 °C in spring, summer, autumn and winter, respectively, suggesting both autumn and winter played a more active role in warming than other seasons. In spring, the maximum temperature rise in the alpine zone of the southern slope of the reserve was 1.4 °C. In summer or autumn, in the middle zone of the northern slope there occurred temperature growth with a maximum value of 1.8 °C or 2.3 °C, respectively, and the highest temperature increase in the lower zone of the southern slope was 2.8 °C in winter. The increase rate of annual precipitation was 1.27 mm, with the maximum value of 2.38 mm/a observed in the middle zone of the southern slope. Separately, the annual increase rates amounted to 0.15 mm in spring, 0.55 mm in summer, 0.41 mm in autumn and 0.13 mm in winter, suggesting summer and autumn more responsible for humidity. In spring, the maximum annual increase rate of precipitation in the alpine zone of the southern slope was 0.32 mm. In summer and autumn, the maximum annual increase rate in the middle zone of the southern slope was 1.03 mm and 0.77 mm, respectively. In winter, the annual increase rate in the middle zone of the northern slope was 0.22 mm. The annual increase rate of runoff in the Tailan River is $0.01 \times 10^8 \text{ m}^3$ and in Kumalake River $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$. The changes of temperature and precipitation in the reserve were the main factors resulting in runoff change. Especially the effect of spring precipitation and summer air temperature was the most significant.

Key words: climate change; runoff change; impact factor; Tomur Nature Reserve