

赵晓恩,李璐,张合理,等.哈萨克斯坦北部伊希姆河径流对气候变化和人类活动的响应[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(5):102-109.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.05.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



哈萨克斯坦北部伊希姆河径流对气候变化和人类活动的响应

赵晓恩¹,李璐^{2*},张合理^{1,3},陈峰^{1,3},Zulfiyor Bakhtiyorov^{1,4}

(1.云南大学国际河流与生态安全研究院,云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室,云南 昆明 650500;

2.新疆气象台,新疆 乌鲁木齐 830002;3.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,中国气象局树木年轮理化

研究重点开放实验室,新疆树木年轮生态实验室,新疆 乌鲁木齐 830002;4.塔吉克斯坦共和国

科学院胡占德科学中心,胡占德 735712,塔吉克斯坦)

摘要:基于1933—2016年哈萨克斯坦北部伊希姆河彼得罗巴甫洛斯克水文站流量观测数据以及流域内格点气象数据,利用线性趋势法、Mann-Kendall检验、相关普查法和累积量斜率变化率比较法等方法,探讨了气候变化背景下伊希姆河流量变化及其主要驱动因子。结果显示:(1)伊希姆河流域近84年气温和降水呈上升趋势,且在20世纪70年代后增加趋势更加明显。(2)伊希姆河流量年内分布不均,年际流量变化总体呈下降趋势,但趋势不明显。(3)伊希姆河流量受流域内降水和气温共同影响,其中降水与流量相关性最大,且降水的变化对流量补给具有滞后性,6—9月气温对同时期流量影响较大。(4) T_1 时段(1969—1996年)和 T_2 时段(1997—2016年)与 T 时段(1933—1968年)相比,气候变化对流量减少的贡献率分别为16.09%和44.83%,而人类活动对流量减少的贡献率为83.91%和55.17%。流域内水资源的开发及利用、人口数量和土地利用方式的变化等人类活动因素在很大程度上影响了伊希姆河流量。

关键词:哈萨克斯坦北部;伊希姆河;气候变化;径流变化;人类活动

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2022)05-0102-08

水资源是人类赖以生存和发展的基础,气候变化在不同程度上影响着水循环^[1]。自1850年以来,全球地表平均气温上升幅度超1℃^[2]。在全球变暖背景下,冰川消融加速、洪涝和干旱等极端气候事件频发,对中亚地区生态系统和社会经济产生的影响尤为突出^[3]。中亚地处亚洲内陆干旱半干旱区,区域水

资源供需不平衡,空间分布不均,发源于山地的河川径流是重要水源之一。随着社会经济快速发展,该地区水资源承载力面临巨大的压力,严重制约着区域可持续性发展^[4-5]。此外,中亚地区是我国开展丝绸之路经济带建设的重要合作区域,水资源安全是建设经济带过程中高度关注的问题。

近年来,基于器测气象水文数据,相关学者对于中亚地区河流流量时空变化及其气候驱动因子进行了大量的研究^[6-8]。近80年以来,额尔齐斯河年均流量呈下降趋势,但趋势不显著^[6];1881年以来,锡尔河流域年均降水量与年均温呈波动式上升,流量受气温和降水共同影响,呈上升趋势^[7];自1970年以来,乌拉尔河受气候变化和人类活动影响显著^[8]。目前,伊希姆河源区的水文研究大多集中于水资源保

收稿日期:2021-12-14;修回日期:2022-04-15

基金项目:新疆联合基金(U1803341);国家重点研发(2018YFA0606401-03);新疆维吾尔自治区自然科学基金(2021D01B118);中国沙漠气象科学研究基金(Sq2019002)

作者简介:赵晓恩(1997—),男,硕士研究生,现从事树木年轮气候学与水文水资源研究。E-mail:waterzhao@yeah.net

通信作者:李璐(1989—),女(蒙古族),工程师,现从事气候变化与水文水资源研究。E-mail:lilu20210510@163.com

护^[5,9]、生态水文^[10]等方面,而在全球气候变化背景下,利用水文资料分析流域水文变化极少,尤其缺乏气候变化和人类活动对径流变化贡献率定量分析方面的研究。

以伊希姆河自 1933 年以来月均流量观测数据和流域内平均气温与降水量数据为基础,采用线性趋势法、Mann-Kendall 突变检验法和累积量斜率变化率比较法,研究流域内气温、降水量和流量变化特征。定量分析气候因子和人类活动对径流变化的贡献率,探讨伊希姆河流量变化的气候驱动因子。以期为丝绸之路经济带沿线水资源合理规划提供科学依据,为更好地促进中哈两国跨境水资源与工农业合作发展提供科学参考。

1 资料与研究方法

1.1 研究区概况

伊希姆河全长 2 450 km,流域面积约为 $14.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,发源于哈萨克斯坦北部尼亚兹山,流经哈萨克斯坦和俄罗斯,河道自东向西流经哈萨克斯坦首都努尔苏丹,在杰儿札温斯克北上,经彼得罗巴甫洛斯克出至俄罗斯境内,流经伊希姆平原,在乌斯季伊希姆注入额尔齐斯河。河流主要补给来源为降水和积雪融水^[11-12]。流域内水资源量占哈萨克斯坦水资源总量的 1.86%,供应着 230 多万人(600 多个村庄和 8 个城市)的用水需求,自然和人为因素使其水资源利用复杂化^[13]。

研究区地处哈萨克丘陵及其北部,乌拉尔山脉东部,地势南高北低,地理位置为 $50^\circ \sim 58^\circ \text{N}$, $64^\circ \sim 76^\circ \text{E}$ (图 1)。流域北部、中部海拔在 $2 \sim 200 \text{ m}$,南部海拔在 $200 \sim 903 \text{ m}$,属于典型的温带大陆性气候,多年平均气温为 1.89°C ,多年平均降水量为 350.44 mm 。流域内夏季降水多,易发生洪水灾害,冬春季节寒

冷,降水多以积雪的形式存储^[14-15]。

1.2 资料

1933—2016 年伊希姆河器测月平均流量资料来源于哈萨克斯坦境内彼得罗巴甫洛斯克水文站(54.87°N , 69.14°E)。流量观测期间,水文站位置未发生改变。上游有谢尔盖耶夫斯基大型水库(1969 年投入使用),出库流量最高达 $693 \text{ m}^3/\text{min}$ 。由于伊希姆河流域内气象站较少,观测数据缺失较多,可利用率较低。为此本文所用气象数据为英国东英吉利大学气候研究中心(CRU)提供的 1933—2016 年 CRU-TS 4.03 气象格点数据集,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,选取范围为 $50^\circ \sim 58^\circ \text{N}$, $64^\circ \sim 76^\circ \text{E}$,要素为月均气温、月降水量和月均潜在蒸发量(Potential Evapotranspiration, *PET*)。相关学者^[10,16]已经利用 CRU 格点数据对中亚不同区域的降水、气温、蒸发等气象要素进行相关研究,结果表明中亚地区 CRU 格点数据揭示气候要素变化特征具有较高的可靠性和适用性。

1.3 研究方法

本文采用线性趋势法^[17]和不均匀系数法分析气候水文要素演变趋势及特征。使用 Mann-Kendall 突变检验法^[18-19]和滑动 *T* 检验法^[20]探究气候水文要素的突变现象;使用相关普查法^[21-22]分析年内气候水文要素之间关系和气候变化对径流的影响;利用滑动相关分析方法^[23]探讨在年际尺度上气候因子如何影响流量变化,选取时间窗口为 21 a,滑动步长为 1。

气候变化和人类活动对径流变化的贡献率定量分析是采用王随继等^[24]2012 年提出的累积量斜率变化率比较法实现的。假设流量—时间曲线的斜率在某一年的发生了改变,则改变前后分为两个时期,即 S_{Rb} 和 S_{Ra} ;假设降水量—时间曲线的斜率在某一年的发生了改变,则改变前后分为两个时期,即 S_{Pb} 和 S_{Pa} ,累积流量斜率变化率 $R_{\text{SR}}(\%)$ 为:

$$R_{\text{SR}} = \frac{100 \times (S_{\text{Ra}} - S_{\text{Rb}})}{S_{\text{Rb}}} = 100 \times \left(\frac{S_{\text{Ra}}}{S_{\text{Rb}}} - 1 \right). \quad (1)$$

累积降水量斜率变化率 $R_{\text{SP}}(\%)$ 为:

$$R_{\text{SP}} = \frac{100 \times (S_{\text{Pa}} - S_{\text{Pb}})}{S_{\text{Pb}}} = 100 \times \left(\frac{S_{\text{Pa}}}{S_{\text{Pb}}} - 1 \right). \quad (2)$$

式中, R_{SR} (R_{SP})为正(负)时,代表斜率增大(减小)。

降水量对径流变化的贡献率 $C_{\text{P}}(\%)$ 为:

$$C_{\text{P}} = 100 \times \left(\frac{R_{\text{SP}}}{R_{\text{SR}}} \right) = 100 \times \frac{\left(\frac{S_{\text{Pa}}}{S_{\text{Pb}}} - 1 \right)}{\left(\frac{S_{\text{Ra}}}{S_{\text{Rb}}} - 1 \right)}. \quad (3)$$

同理,可以求出流域内气温或蒸发量对径流变

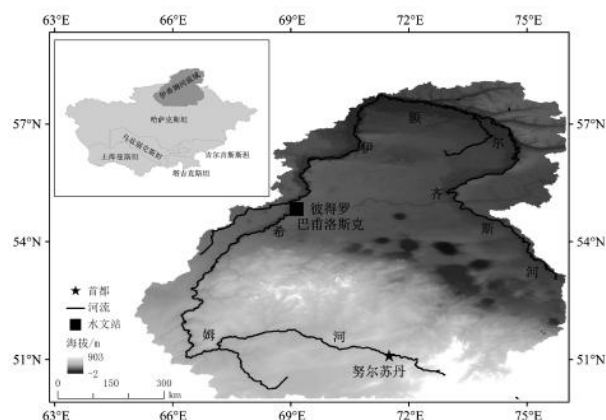


图 1 哈萨克斯坦伊希姆河流域示意图

化的贡献率,即 $C_T(\%)$ 和 $C_{ET}(\%)$ 。气温是通过蒸发来影响径流变化,可以用 C_{ET} 代表 C_T ,则人类活动对径流变化的贡献率 $C_H(\%)$ 为:

$$C_H = 100 - C_P - C_{ET} \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 气候变化特征

伊希姆河流域 1933—2016 年平均气温在 $-0.48 \sim 3.97^\circ\text{C}$, 7 月月平均气温为 19.88°C , 1 月月平均气温为 -17.28°C (图 2a)。自 1933 年以来,伊希姆河流域气温总体上呈显著上升趋势,其线性趋势为 $0.30^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($P < 0.01$, 图 3a)。年际平均气温波动较大,20 世纪 30—50 年代平均气温较其他年代低,距平值为 -0.77°C ; 20 世纪 80—90 年代平均气温达时段最高值,距平值为 0.42°C 。从 Mann-Kendall 突变检验 (图 3b) 分析得出,自 1962 年起,伊希姆河流域年均温序列呈上升趋势,年平均气温在 1980 年发生突变,整体升温趋势呈现从低上升到高上升的变化。

伊希姆河流域 1933—2016 年平均降水量为 350.44 mm , 最大年降水量出现在 2013 年 (443.93 mm); 最小年降水量出现在 1950 年 (253.28 mm)。年内降水量分布不均,主要集中在夏

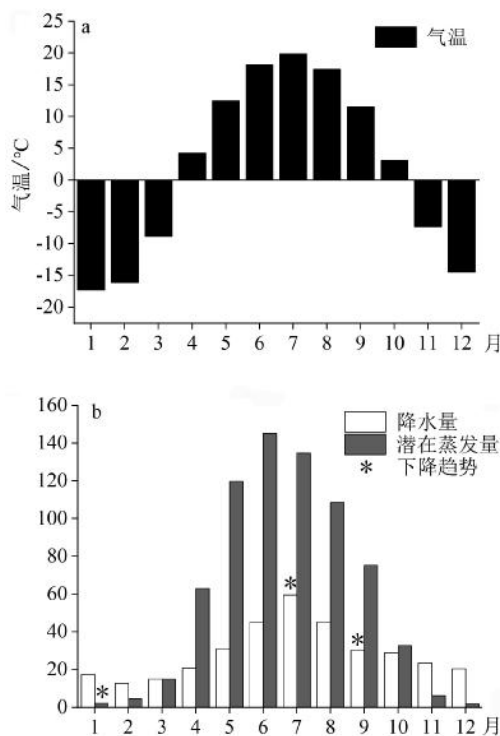


图 2 1933—2016 年伊希姆河流域月平均气温(a)和月平均降水量(b,单位:mm)

季,占全年降水量的 42.82% (图 2b)。从年降水量变化 (图 3c) 可知,1933—2016 年流域降水量总体呈上升趋势,线性趋势为 $4.70\text{ mm}/10\text{a}$ ($P < 0.05$)。年际降水量波动较大,其中,20 世纪 50 年代为最低阶段,21 世纪初达到峰值。1953 年以来伊希姆河流域年降水量呈上升趋势 (图 3d),1969 年以后呈显著增加趋势 ($P < 0.05$),1963 年年降水量发生了突变。

伊希姆河流域 1933—2016 年年平均潜在蒸发量为 708.91 mm 。夏季年均潜在蒸发量为 388.49 mm , 冬季年均潜在蒸发量仅为 8.41 mm 。其中,1 月潜在蒸发量自 1933 年呈下降趋势,其他月份保持上升趋势。潜在蒸发量与年均气温在年内变化上保持同步增长趋势,两序列间年际相关性达 0.60 (1933—2016 年, $P < 0.01$)。器测时期内,流域潜在蒸发量总体呈上升趋势,线性趋势为 $7.5\text{ mm}/10\text{a}$ ($P < 0.01$, 图 3e)。伊希姆河流域年均潜在蒸发量自 1953 年以来呈增加趋势,在 1973、1993 年发生突变 (图 3f)。

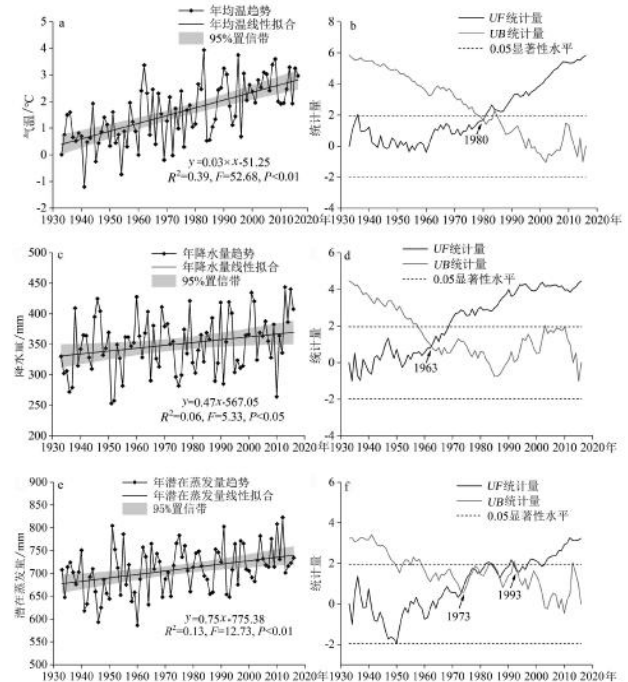


图 3 1933—2016 年伊希姆河流域年平均气温、年降水量和年潜在蒸发量变化及

Mann-Kendall 突变检验

(a 为年均气温, b 为气温突变检验, c 为平均降水量, d 为降水量突变检验, e 为年潜在蒸发量, f 为潜在蒸发量突变检验)

2.2 流量变化特征

2.2.1 流量年内变化

伊希姆河流量年内分配不均, 各个年代的年内流量呈现“单峰型”特征。年内 4 月流量开始增加, 到

5月流量达峰值。流量主要集中在4—6月,占全年流量的85.46%;年内其他月份处于平水期,占全年流量的14.54%。这可能是由于河流主要补给类型为冰雪融水,初春时节,气温回升,上游冰雪融化;夏季,降水量增多,两者共同影响河流的补给。此外,水库建成后的调节作用使得伊希姆河在平水期保持稳定的流量变化,未出现断流现象。通过计算不均匀系数,发现20世纪40—60年代值最大,分别为1.98、1.74和1.66,相对于其他年代各月间流量波动大。

2.2.2 流量年际变化

伊希姆河年际流量变化大,多年平均流量为 $54.91 \text{ m}^3/\text{s}$ 。年均流量总体呈下降趋势(图4a),线性趋势为 $-0.50 (\text{m}^3/\text{s})/10 \text{ a}$,未能通过显著性检验。流量总体上波动趋势明显,20世纪40—50年代流量上升趋势显著($P<0.05$),1948年达到最高值,为 $227.42 \text{ m}^3/\text{s}$ ($P<0.05$);20世纪60—80年代流量为最低阶段,原因可能是受到上游水库和气候变化影响。利用Mann-Kendall突变检验方法(图4b)分析UF和UB的交点位置,采用滑动T检验法,选取时间窗口为5、10和15 a(滑动步长为1),确定了伊希姆河年均流量分别在1969、1997年前后发生了突变。

3 讨论

3.1 气候变化对径流的影响

流域内气候的变化会直接或间接影响河流流量的大小^[25]。将上年7月—当年12月降水量和气温数据对伊希姆河年均流量进行相关普查分析(图5a)。结果表明,年径流量与流域内上年7月—当年5月降水量相关性最大,相关系数为0.51($P<0.01$);年径流量与流域当年4—8月气温相关性最大,相关系数为 -0.22 ($P<0.05$)。伊希姆河流量主要集中在春季和夏季,占全年流量的85.46%,流域内冬季、春季和夏季降水量占全年降水量的76.42%。结合伊希姆河流量年内分配特征分析,年均流量与上年7月—当年5

月降水量呈显著正相关性($P<0.01$),可能是因为流域内降水量在直接或间接转化为流量过程中具有明显滞后性。上年7月—当年5月降水量对当年流量一直有积极的影响,冬季降水主要以冰雪等固体形式存在,春季气温回暖时开始融化,伴随着降水量的增多,通过地表径流和地下径流补给伊希姆河。4—8月气温与年均流量相关性最大,该时期流域内气温开始升高并达到峰值,春夏高温导致了流域内蒸散能力的提高。尽管春季气温的升高导致积雪融水进入河流补给,但在这一过程中并不能完全弥补由蒸散带来的水分损耗。因此,4—8月气温会对伊希姆河产生负面影响,导致流量减少。值得注意的是,1月气温与年均流量呈显著正相关($P<0.01$),可能是因为1月气温的升高增加了积雪融化量,而1月又为全年最低蒸发量时期,所以二者保持呈正相关且同步增加趋势。Deng等^[26]研究表明,近年来中亚夏季降水有所增加,冬季气温升高对流域内河流流量影响不容小觑。

采用年际滑动相关分析法进一步分析可知(图5b),年降水量对年均流量变化具有促进作用,整个时期呈现波动式正相关趋势。年均气温可能受到由全球变暖造成的驱动水循环加快影响,1981年后,与年均流量保持同步上升趋势。如果未来全球变暖趋势未停滞,气温很可能在伊希姆河流量变化上占据主导地位。龙爱华等^[27]同样认为中亚干旱半干旱气候区变化态势,由“暖干”向“暖湿”的趋势发展,该地区气温上升幅度要明显高于全球平均水平。同时,中亚地区气温和降水对水循环过程有叠加作用。近年来,虽然降水趋势不断的上升,但对水循环过程的影响在逐步缩小^[23,28]。因此,研究中亚地区水文循环对气候变化的响应具有重要意义。

3.2 人类活动对径流变化的影响

气候变化和人类活动是影响径流量大小的两大主要因子^[29-30]。气候变化主要包括降水量和气温变

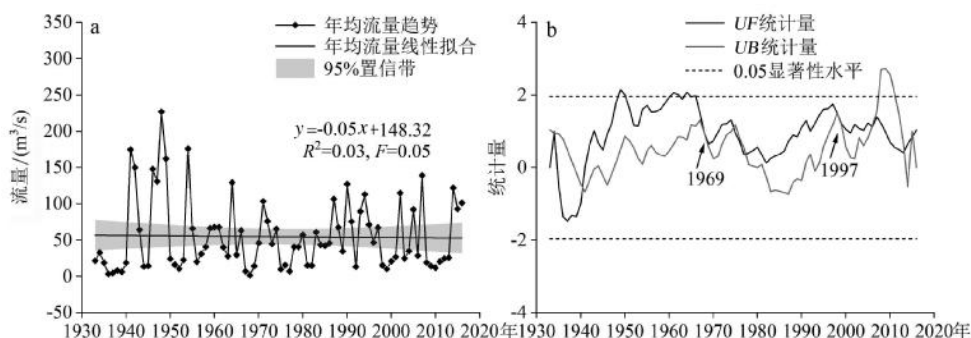


图4 1933—2016年伊希姆河年内分配、年际流量变化(a)及Mann-Kendall突变检验(b)

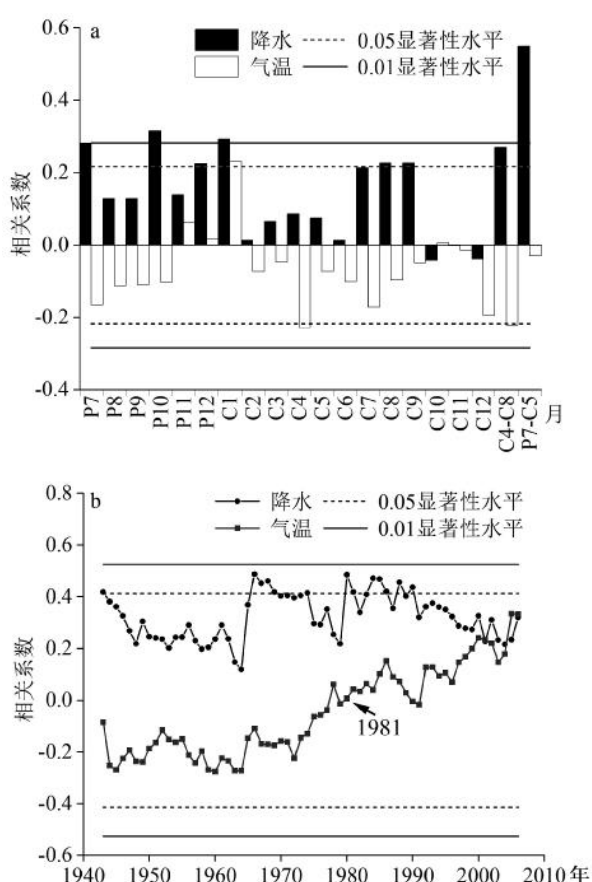


图5 伊希姆河年平均流量与气候因素相关系数
(a)和滑动相关分析(b)

化,人类活动因素包括人为改变下垫面、流域环境和水资源的开发及利用等^[31-32]。研究区位于哈萨克斯坦境内,由于其特殊的历史、战争、社会制度和经济原因,自1933年以来,受人为活动影响强烈,伊希姆河累积年平均流量不同时期拟合度也有所不同。因此,将伊希姆河累积年平均流量与Mann-Kendall突变检验结合,划分为1933—1968年(T 时段)、1969—1996年(T_1 时段)和1997—2016年(T_2 时段)3个阶段,并对累积年平均流量、累积年降水量和累积年蒸发量进行分析(图6)。

人口数量的增加是流域内河流流量变化的重要原因之一^[33]。20世纪30年代前苏联开展了“消灭富农运动”,驱逐26.6万人到哈萨克斯坦北部地区长期定居,从事农业劳动或手工行业^[31]。第二次世界大战期间(1939—1945年),哈萨克斯坦地区作为大后方基地接纳疏散人口达150万之多^[34-36]。自1960年开始,境内人口开始进入稳步发展时期,截至2016年,人口数量翻了一番,达到了1700万^[37]。人口数量的增多带来城市化进程的加快,人为改变下垫面条件,导致地下水汇集减少,地表径流也相应减少。

另外,人口数量的增加导致了区域用水紧张,水资源量减少,生活用水大幅提高,1989年伊希姆河流域用水结构中家庭用水只占15%,而到2016年底,这个比率上升到了59%^[5]。自1933年以来,伊希姆河流量的减少与地区人口数量的增加密切相关。

人口数量的增加带来土地利用类型的改变,在恶劣和干旱的地方种植农业作物,使得国内农业用地极速增加。由于特殊的干旱半干旱气候,大量的农业用水会显著减少地表径流量。经历了“垦荒运动”(1954—1960年)后,哈萨克斯坦总计开荒 $2.30 \times 10^7 \text{ hm}^2$,建立了573个国营农场,总播种面积达 $2.55 \times 10^7 \text{ hm}^2$,成为了一个大粮仓^[36]。截至1989年底,伊希姆河流域农业用水占用水结构比为61%。其中,灌溉水占农业用水的54%^[5]。农业用水的增加与伊希姆河84年以来呈减少趋势密切相关。

从前苏联第二个五年计划(1933—1937年)开始,哈萨克斯坦主要精力放在了大型水利设施建设方面,依托这些大型水利工程修建新的灌溉系统^[36,38]。截至1958年,哈萨克斯坦灌溉面积达到 $1.45 \times 10^7 \text{ hm}^2$,牧场面积为 $8.10 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。在第八个五年计划(1966—1970年)和第九个五年计划(1971—1975年),哈萨克斯坦水利建设总投资比第六个五年计划(1956—1960年)和第七个五年计划(1961—1965年)增加了6倍,建造了大量的灌溉工程系统,包括水渠、水坝、堤坝等水利基础设施^[36,38]。1966—1976年又修建了 $5.17 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 的灌溉系统,对 $3.78 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 灌溉地进行了灌溉系统改造^[38]。其中,上游地区谢尔盖耶夫斯基水库的投入使用(1969年)导致伊希姆河下游年均流量大幅减少,从年平均 $58.75 \text{ m}^3/\text{s}$ (1933—1968年)减少到年平均 $51.81 \text{ m}^3/\text{s}$ (1969—2016年),两者相差 $6.94 \text{ m}^3/\text{s}$;水库建成前最大月流量为 $2080 \text{ m}^3/\text{s}$,而水库建成后则为 $1048 \text{ m}^3/\text{s}$,它显著地调节了洪峰值的大小。因此,1969,伊希姆河流量发生突变很可能是因为上游水库的作用。

结合气候因子分析, T 时段、 T_1 时段和 T_2 时段累积流量斜率趋势逐时段呈下降趋势,而累积降水量斜率和累积蒸发量斜率趋势呈上升趋势(表1)。 T 时段受人类活动因素影响较小,加之年降水量在1963年发生突变呈上升趋势,流量显示出大幅波动变化且距平值为最高(图6d)。 T_1 时段由于上游水库的调节、土地利用类型的改变、农业人口和农业用水的增加等人类活动因素,流域用水量急剧增加。1980年年均气温发生突变,使得流域内蒸散能力

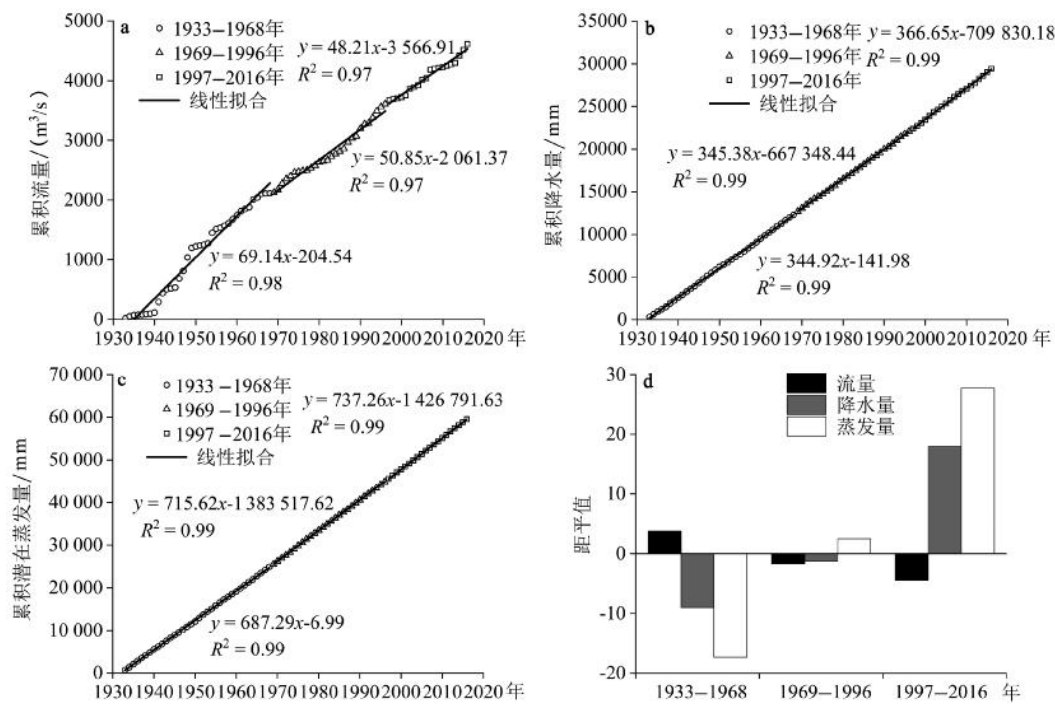


图6 伊希姆河累积流量(a)、降水量(b)和潜在蒸发量(c)年变化与距平值分析(d)

表1 伊希姆河累积流量、累积降水量和累积蒸发量斜率及其变化率

时段	累积流量 斜率/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)/a)	T_1 、 T_2 与 T 时段比较		累积降水 斜率/ (mm/a)	T_1 、 T_2 与 T 时段比较		累积蒸发 斜率/ (mm/a)	T_1 、 T_2 与 T 时段比较	
		变化量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对变化率/ %		变化量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对变化率/ %		变化量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对变化率/ %
T (1933—1968年)	69.14	—	—	344.92	—	—	687.29	—	—
T_1 (1969—1996年)	50.85	-18.29	-26.45	345.38	0.46	0.13	715.62	28.33	4.12
T_2 (1997—2016年)	48.21	-20.93	-30.27	366.65	21.73	6.30	737.26	49.97	7.27

增强,地下水和降水补给无法弥补这一缺口,流量呈下降趋势。 T_2 时段为受人类活动和气候变化影响强烈时期,地表水资源的使用增加及非生产性损失加剧和气候变化共同影响了伊希姆河流量的减少。根据以上分析和累积量斜率变化率比较法得出, T_1 时段和 T_2 时段与 T 时段相比,气候变化对流量减少的贡献率分别为16.09%和44.83%,而人类活动对流量减少的贡献率为83.91%和55.17%。

4 结论

通过分析伊希姆河流量的特征以及流域气候因素,研究了流域水文过程对气候变化和人类活动响应,主要结论如下:

(1)近84年以来,伊希姆河流域气温总体呈上升趋势,1962年以后增温趋势明显。降水量也呈增加趋势,尤其在20世纪70年代以后,由于全球气候变暖,驱动水循环的过程加快,导致降水量的增加尤为明显。

(2)伊希姆河地处中亚干旱半干旱气候区,河流流量年内分配不均匀。流域内降水量在冬春季节以冰雪固态的形式存在,随着温度的升高而融化,4—6月月均流量占全年流量的85.46%。流量年际变化总体呈下降趋势,但趋势不显著。

(3)伊希姆河流量受流域内气候因子和人类活动的共同影响。降水对流量的贡献最大,且相关性最大。气温与当年4—8月径流量相关性最大,而降水的变化对径流补给具有滞后性。利用累积量斜率变化率比较法计算出 T_1 时段和 T_2 时段与 T 时段相比,气候变化对流量减少的贡献率分别为16.09%和44.83%,而人类活动对流量减少的贡献率为83.91%和55.17%。流域内下垫面基础、生态环境的改变和水资源的开发及利用等人类活动在很大程度上影响了伊希姆河流量。

参考文献:

[1] 王胜,许红梅,刘绿柳,等.全球增温1.5℃和2.0℃对淮河中上游径流影响预估[J].自然资源学报,2018,33(11):

- 1966–1978.
- [2] IPCC: Climate change 2021: the physical science basis[C] // Contribution of Working Group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021.
- [3] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1–9.
- [4] NAZIM N. The ways to improve drinking water quality from the intake of the Ishim river [D]. Kazakhstan, Vytautas Magnus University, 2018.
- [5] AKIYANOVA F Z, FROLOVA N L, AVEZOVZ A A, et al. Water resources and system of the River Yesil (ISHIM) under conditions of active anthropogenous transformation and climate change[J]. EurAsian Journal of BioSciences, 2019, 13: 1275–1289.
- [6] HUANG F, XIA Z Q, LI F, et al. Hydrological changes of the Irtysh River and the possible causes [J]. Water Resource Manage, 2012, 26: 3195–3208.
- [7] YAO J Q, CHEN Y N. Trend analysis of temperature and precipitation in the Syr Darya Basin in Central Asia[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 120: 521 – 531.
- [8] LAGUTOV V. The Ural River Basin: Hydrology, Characteristics and Water Use [M]. Netherlands: Springer Science+Business Media, 2008: 129–161.
- [9] SALIKOVA N S, RODRIGO-Ilarri J, ALIMOVA K K, et al. Analysis of the water quality of the Ishim River within the Akmola Region (Kazakhstan) using hydrochemical indicators[J]. Water, 2021, 13(9): 1243.
- [10] OSPANOVA M S, MACKLIN M G, WILLEM H J. Analysis of main periods of catastrophic floods in the Yesil river basin [J]. Journal of Geography and Environmental Management, 2019, 52(1): 58–66.
- [11] KRAVTSOV Y V. Rise of ground water in the Ishim Steppe[J]. Contemporary Problems of Ecology, 2009, 2(6): 655–659.
- [12] VESHKURTSEVA T M. Transformation of the water regime of the Tobol and Ishim rivers under anthropogenic influence [J]. Bulletin of Tyumen state University. Ecology and nature managemen, 2010, 7: 130–137.
- [13] ONGDAS N, AKIYANOVA F, KARAKULOV Y, et al. Application of HEC –RAS (2D) for flood hazard maps generation for Yesil (Ishim) river in Kazakhstan [J]. Water, 2020, 12(10): 2672.
- [14] HARRIS I, OSBORN T J, JONES P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high –resolution gridded multivariate climate dataset[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 693–712.
- [15] 迪丽努尔·托列吾别克, 李栋梁. 近 115 a 中亚干湿气候变化研究[J]. 干旱气象, 2018, 36(2): 185–195.
- [16] 黄秋霞, 赵勇, 何清. 基于 CRU 资料的中亚地区气候特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 396–403.
- [17] 陈峰, 袁玉江, 喻树龙. 闽中北柳杉树轮指示的气候信号与季风区不同地域干湿变化关系[J]. 山地学报, 2015, 33(6): 690–695.
- [18] 于延胜, 陈兴伟. 基于 Mann–Kendall 法的水文序列趋势成分比重研究 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1585–1591.
- [19] 张东艳, 吴运卿, 李妮. 基于 Mann–Kendall 检验的尼洋河流域水文变量演变趋势分析[J]. 中国农村水利水电, 2017, (12): 86–89.
- [20] 裴宏伟, 杨佳, 张红娟, 等. 变化环境下清水河流域径流演变特征及驱动力 [J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(2): 1–13.
- [21] 刘笑彤, 蔡运龙. 基于小波分析的径流特性和影响因素多尺度分析—以通天河为例[J]. 北京大学学报, 2014, 50(3): 549–556.
- [22] 白岗岗, 侯精明, 史玉品, 等. 基于支持向量机的葫芦河流域径流变化的多因素贡献率分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 112–117.
- [23] 赵琳林, 孙美平, 孙皓. 天山北坡奎屯河流域径流模拟及对气候变化的敏感性分析 [J]. 山地学报, 2018, 36(5): 722–730.
- [24] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 388–397.
- [25] 杨胜天, 于心怡, 丁建丽, 等. 中亚地区水问题研究综述[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 79–93.
- [26] DENG H J, CHEN Y N, WANG H J, et al. Climate change with elevation and its potential impact on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia [J]. Global and Planetary Change, 2015, 135: 28–37.
- [27] 龙爱华, 邓铭江, 谢蕾, 等. 气候变化下新疆及咸海流域河川径流演变及适应性对策分析 [J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 377–387.
- [28] 热依莎·吉力力. 气候变化和人类活动对中亚阿姆河径流的影响研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2019.
- [29] 吴立钰, 张璇, 李冲, 等. 气候变化和人类活动对伊逊河流域径流变化的影响 [J]. 自然资源学报, 2020, 35(7): 1744–1756.
- [30] 冷曼曼, 张志强, 于洋, 等. 昕水河流域径流变化及其对气候和人类活动的响应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 113–119+128.
- [31] 尚华明, 范煜婷, 张瑞波, 等. 帕米尔高原东部径流量变化及其对气候变化的响应 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(3): 352–360.

- [32] 张永香,巢清尘,黄磊.全球气候治理对中国中长期发展的影响分析及未来建议[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(1):1-6.
- [33] HU Y, DUAN W, CHEN Y, et al. An integrated assessment of runoff dynamics in the Amu Darya River Basin: Confronting climate change and multiple human activities, 1960–2017[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126905.
- [34] 刘成.20世纪30至60年代苏联中亚地区人口迁移研究[D].兰州:西北师范大学,2020.
- [35] 丁笃本.中亚通史(现代卷)[M].北京:人民出版社,2010.
- [36] 张保国.苏联对中亚及哈萨克斯坦的开发[M].乌鲁木齐:人民出版社,1989.
- [37] 苏联科学院.世界通史(第12卷)[M].北京:东方出版社,1987.
- [38] YU L, DENG M J, LI X Q, et al. Analysis of water resources development in Kazakhstan [C]. International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resource Management, Lanzhou, 2012: 1–6.

Response of the Ishim River Streamflow in Northern Kazakhstan to Climate Change and Human Activities

ZHAO Xiao'en¹, LI Lu², ZHANG Heli^{1,3}, CHEN Feng^{1,3}, ZULFIYOR Bakhtiyorov^{1,4}

(1. Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-Security, Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650504, China;

2. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China;

3. Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration / Xinjiang Laboratory of Tree-ring Ecology, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;

4. Khujand Science Center, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Khujand 735712, Tajikistan)

Abstract Based on the streamflow observation data of the Petropavlovsk hydrological station of the Ishim River in northern Kazakhstan from 1933 to 2016 and meteorological data of the grid points in the basin, the streamflow variation of the Ishim River and its main driving factors in the context of climate change were explored by using the linear trend method, Mann-Kendall test, correlation census method and cumulative slope rate of change comparison method. The results show that: (1) Temperature and precipitation in the Ishim River basin have been increasing in the last 84 years, and the increasing trend is more obvious after the 1970s. (2) The streamflow of the Ishim River is unevenly distributed within the year, and the interannual streamflow variation generally shows a decreasing trend, but the trend is not apparent. (3) The streamflow of Ishim River is influenced by precipitation and temperature in the basin, among which precipitation has the strongest correlation with streamflow, and the change of precipitation has a lag on streamflow recharge. The temperature in June–September has a more significant influence on streamflow in the same period. (4) The contribution of climate change to the decrease of streamflow are 16.09% and 44.83% in the T_1 period (1969–1996) and the T_2 period (1997–2016) compared with the T period (1933–1968), while the contribution of human activities to the decrease of streamflow are 83.91% and 55.17%, respectively. Anthropogenic factors such as development and utilization of water resources in the basin, variations in population size and land use patterns largely influence the streamflow of the Ishim River.

Key words northern Kazakhstan; Ishim River; climate change; streamflow; human activity