

黄河源区径流变化特征及影响因素研究

梁鹏飞^{1,3}, 李宗杰², 辛惠娟¹, 李宗省^{1,3}, 段然³, 南富森³, 李玉辰³

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院 甘肃省黄河水环境重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室/甘肃省祁连山生态环境研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要:近年来,黄河源区水资源状况发生了较大变化,为探究黄河源区径流变化特征及影响因素,基于1961–2018年共58 a的径流和气象资料,采用Mann–Kendall检验和小波分析等方法对其进行了分析。结果表明:黄河源区径流量整体上呈现出不显著减少趋势,递减速率为 $-0.63 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,夏、秋季减少幅度大,冬、春季减少幅度较小;1990年前后径流量均呈现不显著增加趋势,且1990年后增加趋势明显加速,后者增幅是前者的3.09倍;1990年后,降水量和气温递增高值区高度重合,且降水量是影响径流量变化的最重要因素。说明暖湿化加速和空间迁移过程导致了黄河源区冰川的加速消融,这也是1990年后径流快速增加的主要原因。

关键词: 径流变化特征; 气温; 降水量; 黄河源区

中图分类号: P333; TV121

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)04-0064-08

Characteristics of runoff changes and influencing factors in the source region of the Yellow River

LIANG Pengfei^{1,3}, LI Zongjie², XIN Huijuan¹, LI Zongxing^{1,3}, DUAN Ran³, NAN Fusen³, LI Yuchen³

(1. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, School of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basins/Gansu Qilian Mountains Ecology Research Center, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In recent years, the water resources conditions in the source area of the Yellow River have changed considerably, based on 58 years of runoff and meteorological data from 1961–2018, Mann–Kendall test and wavelet analysis were used to analyze the characteristics and influencing factors of these runoff changes. The results show that the runoff showed a non-significant decreasing trend as a whole by the rate of $-0.63 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, with a larger decrease in summer and autumn, but a smaller decrease in winter and spring; however, it presented a non-significant increasing trend both before and after 1990, and the increasing trend accelerated significantly after 1990, the latter was 3.09 times of the former. Meanwhile, the increasing high value area of precipitation overlapped with that of temperature after 1990, and precipitation was the most important factor affecting runoff changes. These findings indicate that the accelerated warming and humidification, as well as its spatial migration directly led to the accelerated melting of glaciers, which was also the reason for the rapid increase of runoff after 1990 in the source region of the Yellow River.

Key words: runoff climate change characteristics; temperater; precipitation; source region of the Yellow River

收稿日期:2021-08-31; 修回日期:2022-04-28

基金项目:甘肃省科技计划项目(20JR2RA002); 甘肃省黄河水环境重点实验室开放基金项目(21YRWEG005); 兰州交通大学青年基金项目(2018005); 中国科学院“西部之光”交叉团队项目-重点实验室合作研究专项,第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0405)

作者简介:梁鹏飞(1998–),男,甘肃会宁人,硕士,主要从事寒旱区水文与水资源方面的研究。

通讯作者:李宗杰(1989–),男,甘肃会宁人,博士,讲师,主要从事寒旱区生态水文学研究。

1 研究背景

全球气候变暖毋庸置疑,自20世纪50年代以来,变暖趋势更加显著,引发了许多生态环境问题,气候变化也使得水资源所承载的压力越来越大^[1-3]。由于全球人口快速增长、经济发展和生活水平的提高,人类对水的需求不断增加,水资源压力已成为影响人类社会可持续发展的一个主要威胁。特别是1990年以来,气候发生突变,暖湿化加速^[4-6],更加使得全球极端事件发生次数增多。

径流是水文循环中极其重要的一个环节,是地球陆地表面水体大量存在的一个具体载体。在过去几十年间,全球径流整体上未表现出显著的趋势变化,但明显受到大尺度气候现象的影响^[7]。在径流量显著变化的河流中,有减小趋势的河流在数量上超过了有增大趋势的河流^[8-9]。高寒地区的变暖幅度更加明显,这对寒区径流的水文过程产生了显著影响^[10-12]。然而由于在高寒地区观测和取样的难度较大,缺乏实验数据,使得该区域的研究仍然存在大量空白。黄河源区是我国第二大河黄河的发源地与重要水源区,国内外学者和研究人员已对黄河源区径流变化特征及影响驱动机制做了大量研究。近几十年来,对黄河源区径流量减少趋势已形成了比较统一的认识。商滢等^[13]研究指出黄河源区径流量减少主要是由人类活动导致的。Ji等^[14]通过对黄河源区季节性径流变化的归因进行研究指出,秋季径流主要受气候变化影响,其他季节主要受人类活动影响。Xie等^[15]基于Budyko假设研究指出降水是造成黄河源区径流变化最主要的因素。刘希胜等^[16]采用双累积曲线法研究了黄河源区径流对降水变化的响应,研究指出由于大雨和中雨发生次数的减少导致降水的产流能力出现弱化趋势。吴盼^[17]和王莺等^[18]从冻土退化、土壤侵蚀加剧和植被退化等环境生态问题的角度探讨了其对黄河源区径流变化的影响。综上所述,黄河源区径流量变化的影响机制并没有得出一个统一的结论,在该区域开展不同因素对径流的影响研究对于揭示该区域水文效应的变化机理和应对水资源管理挑战很有必要。

近几十年里,黄河源区也出现了许多生态环境问题^[19]。黄河源区在气候变暖条件下发生了强烈的气候转型^[20],并且该区域径流变化直接与源区气候变化相关^[21],特别是1990年后,降水量和气温普遍呈现增加趋势^[22],使得该区域水文响应过程更加波动频繁,对沿黄生态环境的保护意义重大^[23]。本文利

用黄河源区唐乃亥水文站的径流数据资料分析了该区域径流变化过程,并结合气象资料分析了影响径流变化过程的主要气候因素,以期为综合研究黄河源区水循环、水资源平衡和水资源科学配置提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

黄河源区(95.78°~103.43°E,32.15°~36.24°N)位于青藏高原东北部,平均海拔约在3800m以上,多年平均气温低于0℃,日温差较大,多年平均降水量在380~650mm之间。研究面积约12.2×10⁴km²,区域地形复杂,植被覆盖度高,地势西高东低,河源区分布有多年冻土和季节性冻土^[24]。黄河源区属高原半湿润气候^[25],主要受西风、印度季风和东亚季风的影响^[15]。该区域水文过程受人类活动影响较小,是黄河流域重要的产流区和我国生态屏障区。黄河源区水系及水文、气象站点分布见图1。

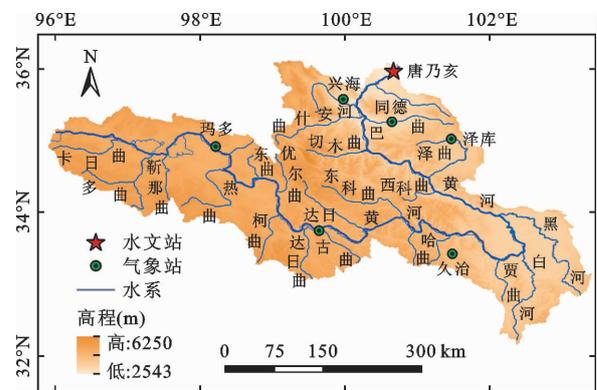


图1 黄河源区水系及水文、气象站点分布

2.2 数据来源

本文使用的径流资料来源于唐乃亥水文站,气象资料来源于玛多、达日等6个气象站(图1),为了使数据年限一致便于分析研究,统一采用1961-2018年共58a的系列数据。本研究所选取的黄河源区气象、水文台站概况见表1。

表1 黄河源区气象、水文台站描述

站名	经度	纬度	海拔/m	资料长度
同德	100°39'	35°16'	3289.4	1961-2018
玛多	98°13'	34°55'	4272.3	1961-2018
达日	99°39'	33°45'	3967.5	1961-2018
久治	101°29'	33°26'	3628.5	1961-2018
泽库	101°28'	35°02'	3662.8	1961-2018
兴海	99°59'	35°35'	3323.2	1961-2018
唐乃亥 (水文)	100°09'	35°30'	2670.1	1961-2018

2.3 研究方法

本文采用了 Mann-Kendall (M-K) 趋势分析法、M-K 突变分析法、距平累积法和小波分析等方法,对黄河源区径流变化特征及影响因素进行了分析。

3 结果与分析

3.1 径流年内变化特征

图2为黄河源区径流、降水年内分配。由图2可知,黄河源区径流量年内分配极不均匀,季节性明显。非汛期径流仅占全年总量的28.57%,汛期径流占到了总量的71.43%,其中7月和9月径流量分别为 $414.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $373.22 \times 10^8 \text{ m}^3$,分别占全年总量的17.3%和15.54%,2月径流量仅 $52.51 \times 10^8 \text{ m}^3$,为全年最小径流量,仅占全年总量的2.19%。

黄河源区径流量年内分配与降水分配具有较好的同步性,这说明径流量的变化过程主要依赖于降水量的变化,也表明降水量是黄河源区径流的主要补给来源。径流年内分布为双峰,分别在7月和9月,这是因为黄河源区降水后并没有全部产流,而是将一部分降水转化为冻土层上水储存了起来,在9月份又释放出来补给径流,形成第二峰。

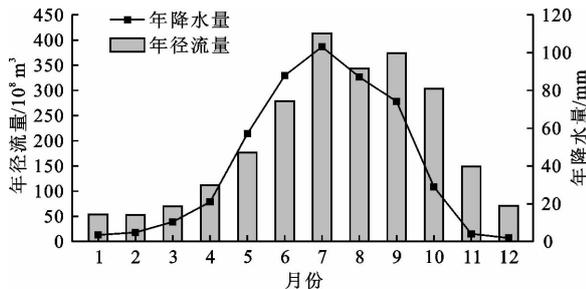


图2 黄河源区径流、降水年内分配

径流的年内季节性变化对水资源的科学配置和高效利用意义重大。图3为1961-2012年黄河源区径流各季节变化特征,分析图3可知,黄河源区四季径流均表现出不同程度的减少趋势,线性变化速率分别为 -0.13×10^8 、 -0.37×10^8 、 -2.17×10^8 、 $-0.24 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,采用M-K趋势检验得到四季径流的统计量分别为-1.1048、-0.8522、-1.6571、-1.0258,未通过显著性检验,减少趋势不显著。但相比较而言,秋季减少幅度最大,说明秋季径流减少对该站的年径流量影响最大。

3.2 径流年际变化特征

3.2.1 径流趋势分析 图4为1961-2018年黄河源区径流量年际、年代际变化及不同时段径流量变化幅度。黄河源区多年平均径流量为 $203.57 \times 10^8 \text{ m}^3$,如

图4(a)所示,年径流量整体呈现出减少趋势,递减速率为 $0.63 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,M-K趋势检验统计量为 $U = -1.72$, $|U| < |U_{\alpha/2}| = 1.96$ (在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下),认为减少趋势不显著。从线性趋势来看,年径流量变化又可以分为两个阶段,1961-1990年呈现增加趋势,递增速率为 $0.58 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,M-K趋势检验统计量为 $U = 0.27$, $|U| < |U_{\alpha/2}| = 1.96$ (在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下),认为增加趋势不显著;1990-2018年也呈现增加趋势,递增速率为 $1.79 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,统计量 $U = 1.34$, $|U| < |U_{\alpha/2}| = 1.96$ (在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下),认为增加趋势也不显著,但相较于1990年之前,其增加趋势明显加速(图4(c)),增幅为1961-1990年径流量增幅的3.09倍。同时,唐乃亥水文站径流量的年代变化过程(图4(b))也证实了这一规律。

3.2.2 径流突变分析 1961-2018年黄河源区径流量突变分析结果见图5。由图5(a)可以看出,1961-2018年径流序列的统计量 UF 与 UB 曲线相交于1987年,并落在0.05显著性水平阈值内,即认为黄河源区径流在1987年可能出现突变,且突变分析通过了显著性水平检验,突变趋势显著。但1987-1990年径流序列的统计量 UF 与 UB 曲线一直存在相交趋势,并且该区域径流在该时段的累积距平曲线(图5(b))也证实了这一现象。因而可认为在1961-2018年期间,黄河源区径流序列在1987-1990年时间段内可能发生了突变。

3.2.3 径流周期分析 图6为黄河源区唐乃亥水文站天然年径流量小波系数实部等值线及不同尺度下小波方差图。分析图6(a)得出,不同时间尺度下黄河源区年径流量存在11、22和35a左右的周期,其中小尺度11a在时间上存在平均3.87a的周期;中尺度22a在时间上存在平均8.29a的周期;大尺度35a在时间上存在平均14.50a的周期。由图6(b)可以看出,第一、第二和第三峰值分别对应35、11和22a,即分别对应径流变化的第一、第二和第三主周期。

3.3 径流变化的影响因素

3.3.1 降水量变化对径流的影响 为了系统阐释黄河源区径流量变化的原因,本文主要选择了黄河源区的玛多、达日等6个国家气象站的气候资料进行分析,图7为1961-2018年黄河源区6个气象站降水量变化特征分析。如图7(a)所示,1961-2018年除久治气象站降水量呈减少趋势外,其余各气象站降水量整体上均呈现不同程度的增加趋势,其中

增幅最为显著的是玛多气象站,增加速率为1.527 mm/a。根据唐乃亥水文站年径流序列年际变化和突变分析结果,猜想1990年后黄河源区暖湿化趋势可能加速,所以将各气象站降水量序列分为1990年前、后两个时间段进行分析,结果如图7(b)所示,1961-1990年间,黄河源区降水量平均增幅为0.956 mm/a,其中达日气象站为减少趋势,递减速率为0.457 mm/a,泽库气象站增加幅度为最大值,增加速率为1.845 mm/a;而1990-2018年间,黄河

源区降水量平均增幅为4.611 mm/a,玛多气象站降水量增加幅度为最小值,递增速率为2.346 mm/a,同德气象站降水量增幅达到最大值,递增速率为7.646 mm/a。相较于前30 a(1961-1990年),整个黄河源区降水量平均增幅加速了4.8倍。

图8显示了黄河源区1990年前、后降水量变化幅度空间分布特征,通过1990年前、后对比发现,黄河源区降水量增多现象有从周边向中心迁移的趋势,并且趋势显著。

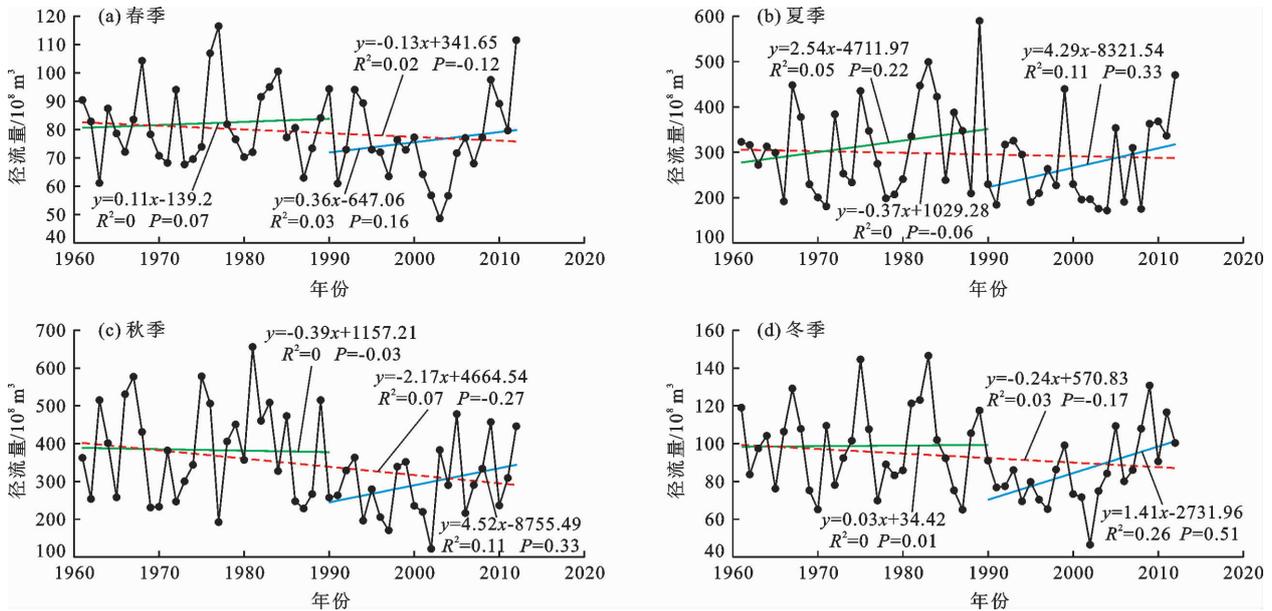


图3 1961-2012年黄河源区径流各季节变化特征

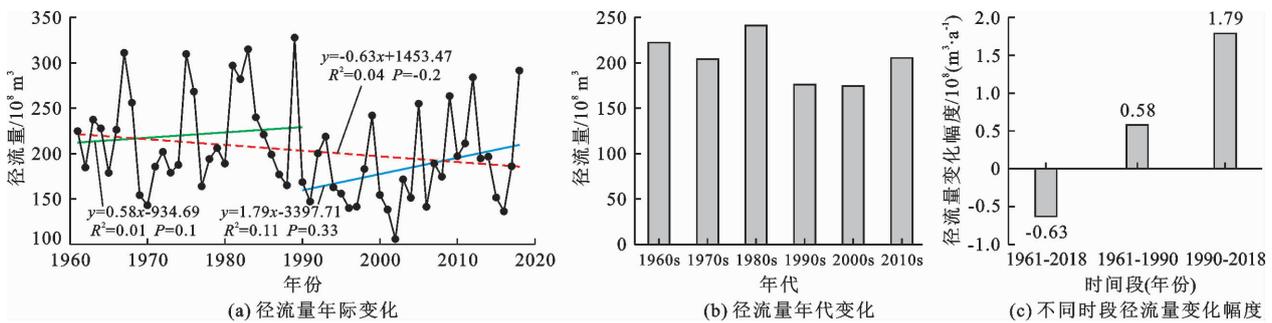


图4 1961-2018年黄河源区径流量年际、年代际变化及不同时段径流量变化幅度

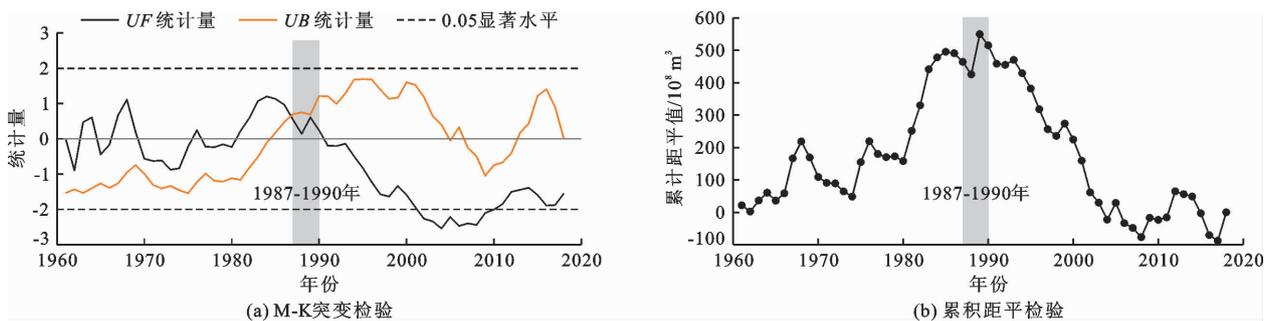


图5 1961-2018年黄河源区径流量突变分析

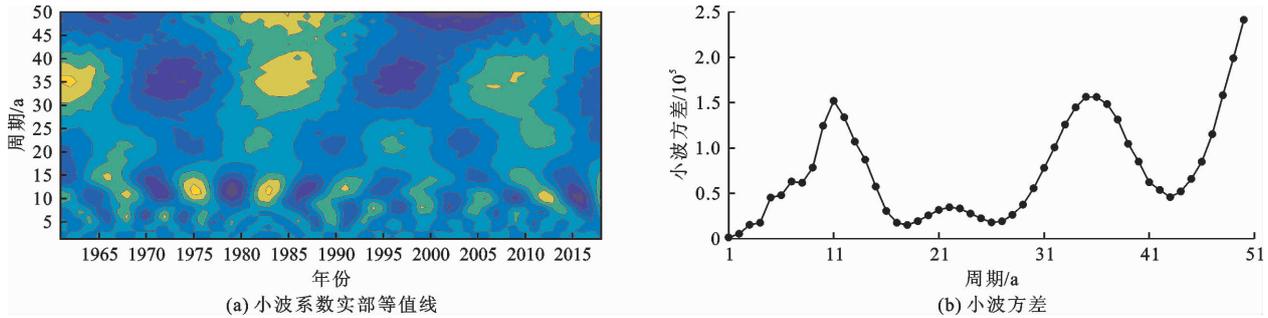


图6 1961 - 2018 年黄河源区天然年径流量周期小波分析

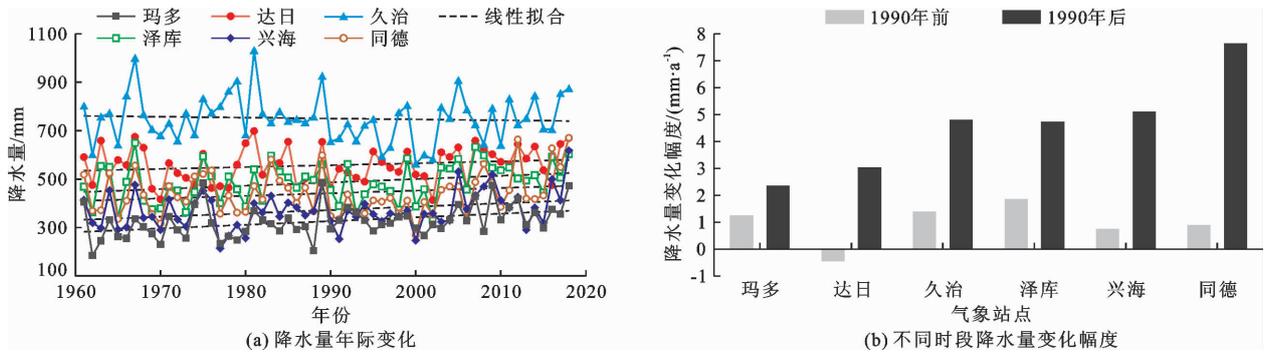


图7 1961 - 2018 年黄河源区 6 个气象站降水量变化特征分析

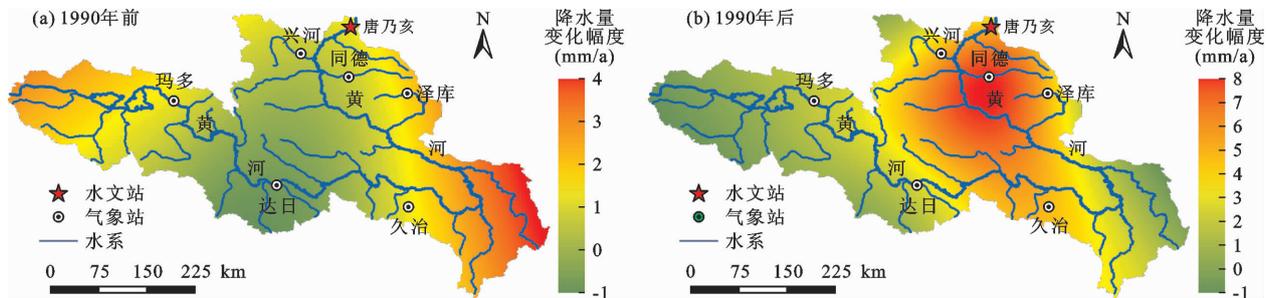


图8 黄河源区 1990 年前、后降水量空间变化

由年尺度 1961 - 2018 年的黄河源区降水量 - 径流量关系(图 9)可以看出,年径流量随着年降水量的增大而增大,呈显著正相关,相关系数为 0.714 ($P < 0.01$)。

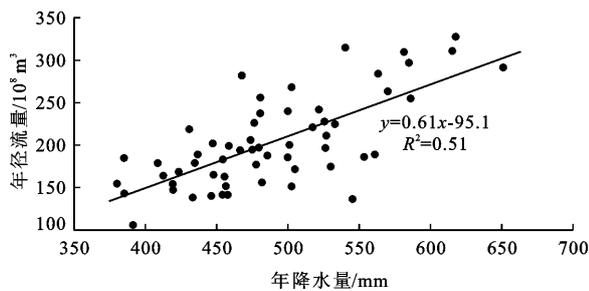


图9 1961 - 2018 年年尺度黄河源区降水量 - 径流量关系

3.3.2 气温变化对径流的影响 图 10 为 1961 - 2018 年黄河源区 6 个气象站气温变化特征分析。如图 10(a)所示,1961 - 2018 年黄河源区气温整体

上呈现不同程度的增加趋势,其中气温增加趋势最为显著的是同德气象站,增加速率为 $0.082\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 。分析 1990 年前、后气温变化特征,结果如图 10(b)所示,1961 - 1990 年间,黄河源区气温增幅平均值为 $0.027\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,玛多气象站气温增幅为最小值,递增速率为 $0.012\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,泽库气象站气温增幅为最大值,递增速率为 $0.040\text{ }^{\circ}\text{C/a}$;而 1990 - 2018 年间,黄河源区气温平均增幅为 $0.072\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,兴海气象站气温增幅为最小值,递增速率为 $0.020\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,同德气象站气温增幅达到最大值,递增速率为 $0.163\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,相较于前 30 a(1961 - 1990 年),研究区气温平均增幅加速了 2.6 倍。

1990 年后,只有兴海气象站气温升高幅度减小,其余站点均表现出升温加速趋势(图 10(b))。这也证实了 1990 年后黄河源区暖湿化趋势加速,解释了唐乃亥水文站年径流序列 1990 年后较前 30 a

(1961 - 1990 年) 径流增加加速的现象。

图 11 显示了黄河源区气温变化幅度空间分布特征,通过 1990 年前、后对比发现,黄河源区气温升高现象有从东南向西北迁移的趋势,并且 1990 年后,降水量和气温递增高值区高度重合。

由于黄河源区分布有冰川和冻土,是径流的主

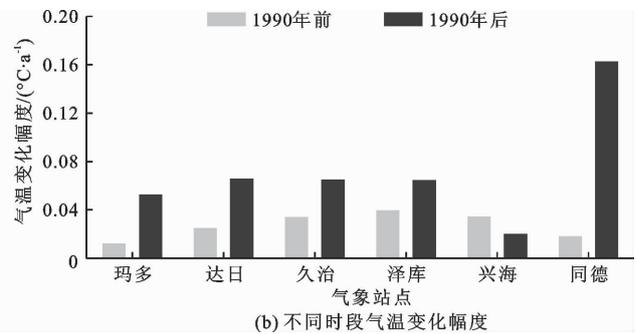
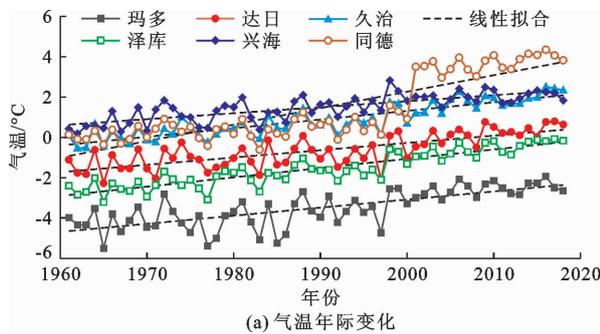


图 10 1961 - 2018 年黄河源区 6 个气象站气温变化特征分析

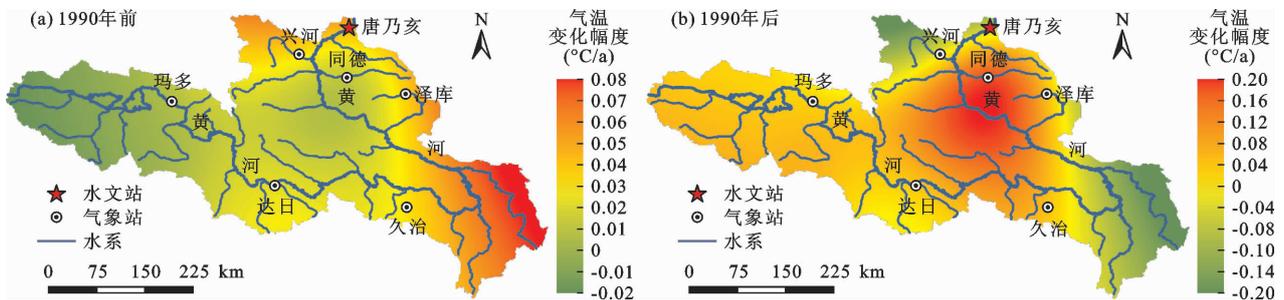


图 11 黄河源区 1990 年前、后气温空间变化

由年尺度 1961 - 2018 年的黄河源区气温 - 径流量关系(图 12)可以看出,年径流量随着气温升高而减少,呈负相关,相关性系数为 -0.192,未通过显著性检验。说明引起黄河源区径流量变化的气候因子中,降水是最重要的因子。

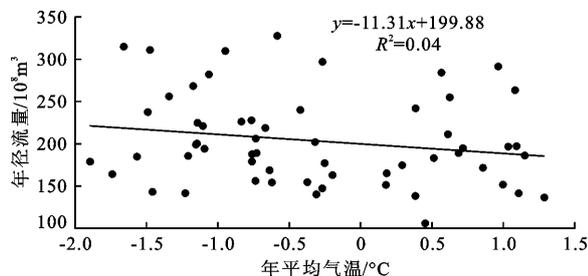


图 12 1961 - 2018 年年尺度黄河源区气温 - 径流量关系

黄河源区不同季节降水量、气温与径流量的相关系数见表 2。由表 2 可见,黄河源区夏、秋季径流量与降水量呈显著正相关,相关系数分别为 0.641 ($P < 0.01$)、0.729 ($P < 0.01$),而径流量与气温相关性不显著;春、冬季径流量与气温呈负相关,且相

要补给区,气温升高现象从东南向西北的迁移过程直接导致了黄河源区冰川和冻土的加速消融,使区域暖湿化趋势加速,这也是 1990 年后黄河源区径流量快速增加的原因。预计这种暖湿化加速及其向黄河源区中心迁移的现象在未来几年将会导致黄河源区径流量持续增大。

关系数绝对值均大于径流量与降水量的相关系数,但均不显著。说明夏、秋季径流量变化很大程度上取决于同时期降水量的变化,春、冬季降水量减少,气温主要通过影响冰雪消融、蒸散发等过程来影响径流过程,所以春、冬季气温变化对径流量变化的影响较大。

表 2 黄河源区不同季节降水量、气温与径流量的相关系数

相关项	春季	夏季	秋季	冬季
降水量 - 径流量	0.172	0.641 **	0.729 **	0.124
气温 - 径流量	-0.224	-0.140	0.011	-0.154

注:“**”表示在置信度 0.01 水平(双侧)上显著相关。

4 讨论

对 1961 - 2018 年黄河源区唐乃亥水文站的径流变化特征分析结果表明其整体呈减小变化趋势,这与已有的研究结果一致^[26-27],且 1990 年径流量发生突变,分析发现 1961 - 1990 年和 1991 - 2018 年两个时间段黄河源区径流量均表现出增加趋势,

这可能是由于20世纪80年代黄河源区径流量的减少导致研究时段内径流量整体呈现出减少趋势。而叶培龙等^[28]的研究指出黄河源区径流量是在20世纪末至21世纪初发生的转折,这与本研究得出转折时间点有偏差,其原因可能是径流资料序列长度不同所导致。径流量年内分配呈“双峰型”,并且秋季径流量减少幅度最大,秋季径流量减少对该水文站年径流量的影响最大,这与伍云华等^[29]的研究结果一致。

已经有不少研究分析^[30-32]表明,西北地区的气候变化呈现出暖湿化趋势,这一结论已逐渐形成共识。黄河源区降水量增多,气温升高,呈现出暖湿化趋势,这与李红梅等^[33]的研究结果一致;刘彩红等^[34]采用Mann-Kendall突变检验法的研究结果显示,2000年以来黄河源区暖湿化趋势加速,这与本文的研究结果有所不同,而本文得到的1990年后暖湿化加速与王莺等^[35]、王楠等^[36]的研究结果一致;黄河源区夏、秋季径流量变化主要受降水量影响,而春、冬季主要受气温影响,这与康颖等^[37]的研究结果基本一致。

本文在径流量变化归因研究中,未对不同土地利用变化、人类活动等其他因素对径流变化的具体影响机制做全面分析,并且气象因素中也仅仅选取了降水和气温两个因子,存在许多不足之处,仍需进一步研究。

5 结 论

基于1961-2018年共58a的径流和气象资料,研究了黄河源区的径流变化特征,探讨了气候因子降水和气温对径流变化过程的影响,主要得到以下结论:

(1)黄河源区径流量年内分配极不均匀,季节性明显。汛期、非汛期径流分别占全年总量的71.43%和28.57%,夏、秋季径流量减少幅度较大,冬、春季径流量减少幅度较小。

(2)黄河源区多年平均径流量整体上呈不显著减少趋势,但以1990年为界,其前后均呈现不显著增加趋势,并且1990年后增加趋势明显加速;1987-1990年为径流量突变时间段,且通过了显著性水平检验,突变趋势显著。

(3)黄河源区年径流变化第一主周期35a在时间上存在平均14.50a的周期;第二主周期11a在时间上存在平均3.87a的周期;第三主周期22a在时间上存在平均8.29a的周期。

(4)降水量增多现象有从黄河源区周边向中心迁移的趋势,并且趋势显著;气温升高现象有从黄河源区东南向西北迁移的趋势,且1990年后,研究区降水量和气温递增高值区高度重合,降水量是影响径流最重要的因素。这种暖湿化加速和空间迁移过程直接导致了黄河源区冰川和冻土的加速消融,这也是1990年后径流量快速增大的主要原因。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] LI Zongxing, FENG Qi, WANG Q J, et al. The influence from the shrinking cryosphere and strengthening evapotranspiration on hydrologic process in a cold basin, Qilian Mountains [J]. Global and Planetary Change, 2016, 144: 119-128.
- [3] KHANNA P, PETROVIC A, RAMDANI A I, et al. Mid-Holocene to present circum-Arabian sea level database: Investigating future coastal ocean inundation risk along the Arabian plate shorelines [J]. Quaternary Science Reviews, 2021, 261: 106959.
- [4] LI Zongxing, LI Zongjie, FENG Qi, et al. Runoff dominated by supra-permafrost water in the source region of the Yangtze River using environmental isotopes [J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: 124506.
- [5] YANG Yuheng, WENG Baisha, YAN Denghua, et al. Partitioning the contributions of cryospheric change to the increase of streamflow on the Nu River [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126330.
- [6] Li Zongxing, YUAN Ruifeng, FENG Qi, et al. Climate background, relative rate, and runoff effect of multiphase water transformation in Qilian Mountains, the third pole region [J]. Science of the Total Environment, 2019, 663: 315-328.
- [7] MUNIER S, PALANISAMY H, MAISONGRANDE P, et al. Global runoff anomalies over 1993-2009 estimated from coupled Land-Ocean-Atmosphere water budgets and its relation with climate variability [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2012, 16(10): 3647-3658.
- [8] ALKAMA R, MARCHAND L, RIBES A, et al. Detection of global runoff changes: Results from observations and CMIP5 experiments [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 10: 2117-2140.
- [9] DAI Aiguo, QIAN Taotao, TRENBERTH K E, et al. Changes in continental freshwater discharge from 1948 to

- 2004[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(10): 2773 - 2792.
- [10] ZHOU Jian, POMEROY J W, ZHANG Wei, et al. Simulating cold regions hydrological processes using a modular model in the west of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 509(4): 13 - 24.
- [11] STOKES C R, SHAHGEDANOVA M, EVANS I S, et al. Accelerated loss of alpine glaciers in the Kodar Mountains, south-eastern Siberia[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 101: 82 - 96.
- [12] ROJELJ J, MEINSHAUSEN M, KNUTTI R. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(4): 248 - 53.
- [13] 商滢,江竹. 黄河源区降水径流变化特征及响应分析[J]. *中国农村水利水电*, 2021(2): 106 - 112.
- [14] JI Guangxing, WU Leying, WANG Liangdong, et al. Attribution analysis of seasonal runoff in the source region of the Yellow River using seasonal Budyko hypothesis [J]. *Land*, 2021, 10(5): 542.
- [15] XIE Jingkai, Xu Yueping, GUO Yuxue, et al. Detecting the dominant contributions of runoff variance across the source region of the Yellow River using a new decomposition framework [J]. *Hydrology Research*, 2021, 52(5): 1015 - 1032.
- [16] 刘希胜,李其江,段水强,等. 黄河源径流演变特征及其对降水的响应[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1721 - 1730.
- [17] 吴盼. 考虑冻土退化的黄河源区径流变化机理研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [18] 王莺,李耀辉,孙旭映. 气候变化对黄河源区生态环境的影响[J]. *草业科学*, 2015, 32(4): 539 - 551.
- [19] 王俊奇,王广军,梁四海,等. 1996 - 2015年黄河源区植被覆盖度提取和时空变化分析[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(2): 662 - 674.
- [20] 白晓兰,魏加华,解宏伟. 三江源区干湿变化特征及其影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 8397 - 8410.
- [21] 孙立群,李铁键,李晴岚,等. 黄河源秋季洪峰对西风指数的响应[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1475 - 1482.
- [22] TONG Laga, XU Xinliang, FU Ying, et al. Wetland changes and their responses to climate change in the “Three - River Headwaters” region of China since the 1990s[J]. *Energies*, 2014, 7(4): 2515 - 2534.
- [23] 杜本峰,穆跃瑄,刘悦雅. 生态健康、健康生态与黄河流域高质量发展[J]. *中州学刊*, 2021, 4(5): 86 - 93.
- [24] 盛乃宁,鞠琴,顿珠加措,等. 黄河源区冻土变化特征及其与温度的关系[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(5): 843 - 852.
- [25] 陈建军,黄莹,赵许宁,等. 黄河源区高寒草地植被覆盖度反演模型精度评价[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(15): 37 - 45.
- [26] YAN Dan, LAI Zhizhu, JI Guangxing. Using Budyko-type equations for separating the impacts of climate and vegetation change on runoff in the source area of the Yellow River[J]. *Water*, 2020, 12(12): 3418.
- [27] 刘晶,吉立,李志威,等. 黄河源唐乃亥水文站水沙序列重建与变化规律研究[J]. *水文*, 2018, 38(5): 34 - 41.
- [28] 叶培龙,张强,王莺,等. 1980 - 2018年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(6): 967 - 979.
- [29] 伍云华,秦宁生,彭晓滨. 近57 a长江黄河源区径流量变化异同特征分析[J]. *高原山地气象研究*, 2021, 41(4): 43 - 47.
- [30] 姚俊强,杨青,陈亚宁,等. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1283 - 1291.
- [31] 李明,孙洪泉,苏志诚. 中国西北气候干湿变化研究进展[J]. *地理研究*, 2021, 40(4): 1180 - 1194.
- [32] 杜懿,王大刚,祝金鑫. 基于CMIP5的中国西北地区暖湿化演变研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(5): 61 - 69 + 77.
- [33] 李红梅,颜亮东,温婷婷,等. 三江源地区气候变化特征及其影响评估[J]. *高原气象*, 2022, 41(2): 306 - 316.
- [34] 刘彩虹,王朋岭,温婷婷,等. 1960 - 2019年黄河源区气候变化时空规律研究[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(2): 293 - 302.
- [35] 王莺,李耀辉,孙旭映. 黄河源区域生态环境演变与对策建议[J]. *干旱气象*, 2013, 31(3): 550 - 557.
- [36] 王楠,李栋梁,张杰. 青藏高原气温变化的研究进展[J]. *干旱气象*, 2010, 28(3): 265 - 269 + 290.
- [37] 康颖,张磊磊,张建云,等. 近50 a来黄河源区降水、气温及径流变化分析[J]. *人民黄河*, 2015, 37(7): 9 - 12.