

黄河上游地区径流量的转折性变化及其成因

马有绚¹ 张调风² 温婷婷¹ 马占良¹ 来晓玲¹ 段丽君¹

(1 青海省气候中心, 西宁 810001; 2 兰州资源环境职业技术大学/黄河流域生态环境产教融合研究院/甘肃省气候资源利用与防灾减灾重点实验室, 兰州 730021)

摘要: 利用1961—2021年唐乃亥水文站61年的径流量资料和流域气温、降水量、蒸发量等气象观测资料以及高原季风、西风环流等气候指数, 分析黄河上游径流量的基本特征, 揭示影响径流量变化的气候成因。研究表明: 1991年前后, 黄河上游径流量出现由降到升的突变, 自2001年以来显著增长; 径流量具有8a的显著性变化周期, 气候暖湿化是引起1991年以来黄河上游地区径流量显著增大的主要原因, 大气环流及其影响的转变, 是黄河上游地区造成径流量发生变化的重要原因, 1991年以来在干燥的西风环流减弱和暖湿的高原季风增强的共同作用下, 黄河上游地区径流量增加。

关键词: 径流量, 气候变化, 大气环流, 黄河上游

The Transitional Change of Runoff in the Upper Reaches of Yellow River and Its Causal Analysis

Ma Youxuan¹, Zhang Tiaofeng², Wen Tingting¹, Ma Zhanliang¹, Lai Xiaoling¹, Duan Lijun¹

(1 Qinghai Climate Centre, Xining 810001; 2 Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech University/Yellow River Basin Ecotope Integration of Industry and Education Research Institute/Key Laboratory of Climate Resources Utilization and Disaster Prevention and Mitigation of Gansu Province, Lanzhou 730021)

Abstract: Using runoff data of Tangnaihai hydrometric station, meteorological observational data including temperature, precipitation and evaporation and climate indexes such as plateau monsoon and westerly circulation from 1961 to 2021, the characteristics of runoff in the upper reaches of the Yellow River were analyzed to uncover the climatic causes that affect the runoff change. The results show that the runoff in the upper reaches of the Yellow river had a sudden change from descending to rising around 1991, and it has increased significantly since 2001. The runoff has a significant change period of 8 years. Climate warming and wetting is the main reason of the abrupt runoff increase and the transformation of atmospheric circulation and its influence is an important reason for the significant increase of runoff in the upper reaches of the Yellow River. Runoff has increased in the upper reaches of the Yellow River since 1991 under the joint action of the weakening of dry westerly circulation and the enhancement of warm and humid plateau monsoon.

Keywords: runoff, climate change, atmospheric circulation, upper reaches of the Yellow River

0 引言

黄河发源于青藏高原, 上游流域面积广大, 地貌复杂, 气候差异甚大。黄河上游径流来源主要有三个方面: 一是天然降水; 二是冰雪消融; 三是地下水补给^[1]。流量的丰枯变化不仅影响黄河上游的生态环境, 还直接影响中下游水资源量的变化^[2-3]。通过气候因子对河川径流量进行合理预测可以帮助实现对水资源的统筹规划和集约利用, 具有十分重要的现实意义^[4]。

众多研究一致认为, 20世纪西北地区气候总体呈暖干化趋势^[5-7], 但丁永建等^[8]、施雅风等^[9]曾提出, 西北地区气候可能正在发生从暖干向暖湿转型, 而且转型已经开始。近期一些研究^[10-11]也证明了西北地区气候暖湿化的事实, 表明在百年尺度上, 西北地区经历了20世纪40年代和60年代至今的两个增暖期, 且当前的暖期更强; 21世纪开始西北地区西部与东部同时进入增湿期。

气候变化是黄河上游径流减少的主要驱动力^[12-13]。蓝永超等^[14-15]指出, 在全球变暖的气候背景下, 随着气温升高, 蒸发和下渗增加使地表径流有所减少。李林等^[16]研究表明, 降水量的减少, 特别是夏季降水量的减少直接导致了黄河上游流量的减少。上述研究使人们了解到黄河上游地区流量的变化特征及其减少的成因。但以往的研究往往侧重于整体的统计分析, 对

投稿日期: 2022年5月13日; 修回日期: 2023年5月5日
第一作者: 马有绚(1990—), Email: 870168267@qq.com
通信作者: 张调风(1985—), Email: ztf_qhzx@163.com
资助信息: 青海省防灾减灾重点实验室开放基金项目(QFZ-2021-Z14); 青海省气象局重点项目(QXZD2022-07); 中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-143)

其径流量的转折特征及其成因分析相对较少。本文对黄河上游地区的唐乃亥径流演变新特征进行研究,并分析影响其转折的气候和大气环流成因,以期为黄河上游地区水资源评估提供背景数据,为相关决策提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

气象站点资料采用1961—2021年黄河上游地区泽库、河南、兴海、同德、玛沁、达日、甘德、玛多和久治9个气象台站月平均气温、降水量、平均相对湿度、平均风速和蒸发量数据,代表研究区域的气候要素(图1)。由于全省大部分台站在1969年前后更换了风速测量仪器,所以1961—1969年风速不予分析,仅分析1970—2021年数据。黄河上游地区流量采用青海省境内黄河上游唐乃亥水文站观测资料,时间为1961—2021年。高原季风指数采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的风场资料计算得到,资料水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。亚洲纬向环流指数和西藏高原指数等采用国家气候中心气候系统监测指数集(<http://10.1.64.154/portal/web-home.index/>)。



图1 研究区及气象站点分布

Fig. 1 Distribution of the study area and meteorological stations

1.2 研究方法

利用上述9个气象台站气象资料序列的空间算数平均值代表黄河上游地区(唐乃亥水文站上游)气候状态,蒸发量通过高桥浩一郎公式来计算^[13]。采用线性趋势法、相关分析、波谱分析^[17]、Mann-Kendall法(M-K法)进行统计分析。

高原季风指数 I_{PM} 采用公式(1)计算,即为600 hPa (27.5° — 32.5° N, 80.0° — 100.0° E)范围内的平均西风量距平 ΔU_1 与(33.0° — 37.5° N, 80.0° —

100.0° E)范围内的平均东风量距平 ΔU_2 之差^[18-19]。

$$I_{PM} = \Delta U_1 - \Delta U_2, \quad (1)$$

纬向环流指数又称西风指数,是反映平均地转风中西风分量的一个指标,可以定量表述纬向环流的强弱,是所取范围各格点上地转西风分量的平均值。通常在500 hPa等压面上计算西风指数 I_z ,而中国经常使用亚洲地区的西风指数,其范围是 45° — 65° N、 60° — 150° E^[20]。

M-K突变检验是在M-K趋势检验的基础上建立的一种确定时间序列突变的方法。该方法根据构造的秩序列样本计算统计量 U_f 和 U_b ,根据 U_f 和 U_b 曲线在置信范围内的交点,确定时间序列的突变点^[21]。

2 结果与分析

2.1 黄河上游地区气候变化特征

气温作为热量指标对流量的主要影响表现在以下几个方面:一是影响冰川和积雪的消融;二是影响流域总蒸散量;三是改变流域高山区降水形态;四是改变流域下垫面与近地面层空气之间的温差,从而形成流域小气候^[3]。近61年来,黄河上游地区年平均气温总体呈波动上升趋势,其气候倾向率为 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (图2a),明显高于同期全球及全国的增温平均值。黄河上游地区年平均气温在1997年以来有加快的趋势,20世纪60年代平均气温为 -0.68°C ,90年代达到为 -0.31°C ,2000年后平均气温为 0.76°C ,2010年以来气温升高尤为突出,平均气温达 0.96°C ,比20世纪90年代增加了 1.27°C 。

黄河上游地区近61年年均降水量呈明显的增加趋势(图2b),气候倾向率为 $12.4\text{ mm}/10\text{a}$ ($P < 0.01$)。其变化趋势具有明显的年际和年代际振荡,从降水的年代际变化来看,20世纪60年代初至70年代中期为降水相对减少时段,70年代中期至80年代末进入多雨期,90年代后又经过一个低值阶段,21世纪以来又呈明显增多的趋势。

由高桥浩一郎公式计算得出的1961—2021年黄河上游地区蒸发量年际变化曲线(图2c)可以看出,近61年来,黄河上游地区年蒸发量呈显著增大趋势,其气候倾向率为 $8.0\text{ mm}/10\text{a}$ ($P < 0.001$),这与黄河上游地区气温的显著升高有密不可分的关系。

从1961—2021年黄河上游地区年平均相对湿度变化曲线(图2d)可以看出,近61年来,黄河上游地区年平均相对湿度呈波动减小趋势,其气候倾向率为 $-0.3\%/10\text{a}$ ($P < 0.1$)。从1970—2021年黄河上游地区年平均风速变化曲线(图2e)可以看出,近50年来,黄河上游地区年平均风速呈显著减小趋势,其气候倾

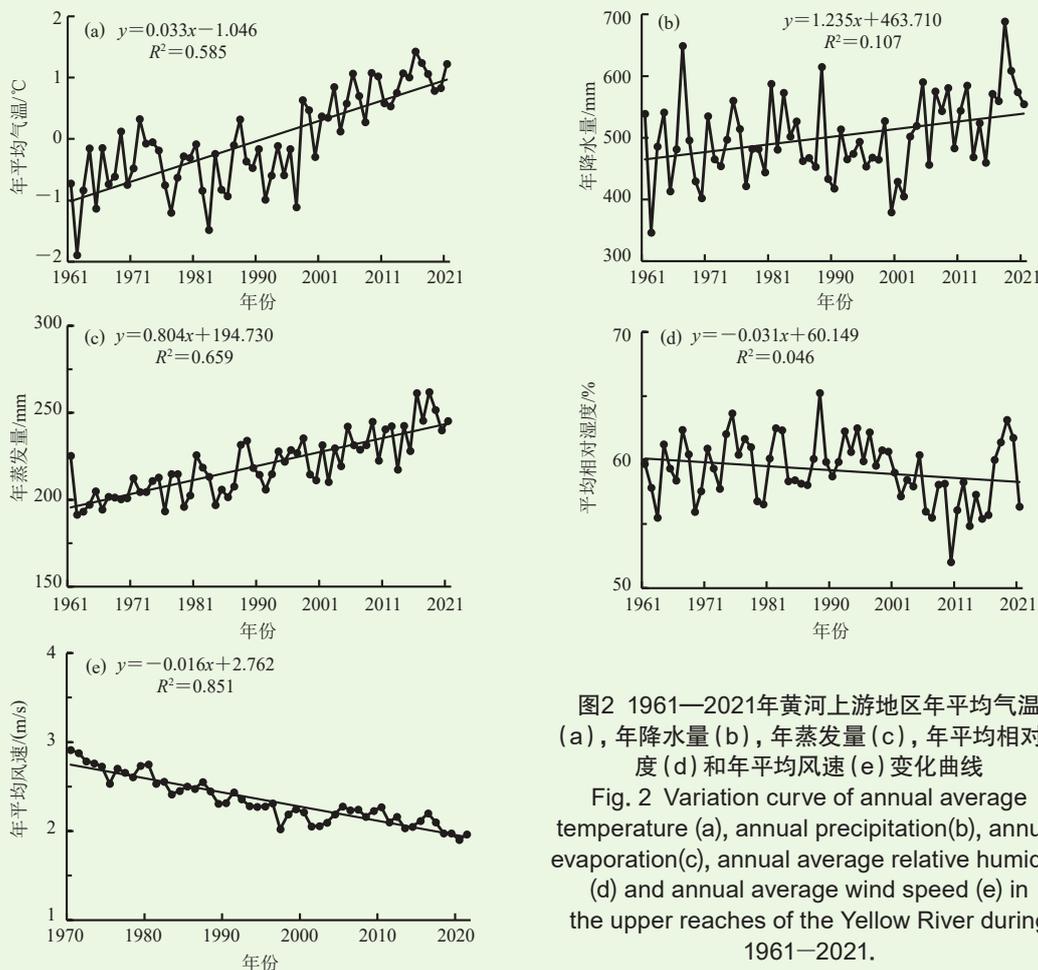


图2 1961—2021年黄河上游地区年平均气温(a), 年降水量(b), 年蒸发量(c), 年平均相对湿度(d) 和年平均风速(e) 变化曲线
Fig. 2 Variation curve of annual average temperature (a), annual precipitation(b), annual evaporation(c), annual average relative humidity (d) and annual average wind speed (e) in the upper reaches of the Yellow River during 1961—2021.

向率为 $-0.16 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10\text{a})$ ($P < 0.001$)。

2.2 黄河上游地区径流量变化特征

由1961—2021年黄河上游径流量变化曲线来看(图3a), 近61年来黄河上游径流量总体呈波动下降趋势, 气候倾向率为 $-7.6 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10\text{a})$ 。自1991年开始, 黄河上游径流量波动上升, 2020年径流量达 $982.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 远远超过多年平均值($653.3 \text{ m}^3/\text{s}$), 达到了20世纪80年代初的水平。M-K法突变检验分析(图3b)表明, 在1991年前后径流量出现了突变, 即呈现增加的态势, 2000年以后增加显著。突变转折以前, 黄河上游地区径流量以 $25.9 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10\text{a})$ 的速率减少, 而转折后以 $122.9 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot 10\text{a})$ 的速率迅速增加($P < 0.01$)。

波谱分析(图3c)表明, 黄河上游径流量具有8 a和38 a的显著性变化周期, 而从各显著性周期的小波系数变化趋势来看(图3d), 进入21世纪以来, 8 a的短周期在00年代不太明显, 但在10年代逐渐变得显著, 而38 a的长周期显得日趋突出。这表明近21年来黄河上游流量的持续上升态势已打破了以往以持续下

降为主、8 a小幅回升为辅的短周期变化规律, 呈现出较强劲的、较长周期的持续上升趋势。这一变化对于改善黄河上游地区生态、水文和气候环境具有积极的影响。

2.3 影响黄河上游地区径流量变化的气候成因

2.3.1 气候趋于暖湿

在全球变暖的背景下, 青藏高原呈现出气候暖湿化的趋势^[22]。由图2给出的黄河上游地区平均气温、年降水量变化来看, 黄河上游地区气候变化同样出现变暖、变湿特征, 尤其在1991年以后, 暖湿特征更加显著。

大气降水、地表蒸发和气温是影响流量的主要因子^[23]。表1中给出了黄河上游地区年平均径流量与年平均气温、年降水量、年平均相对湿度、年平均风速的相关系数。可以看到, 平均气温与径流量总体上呈负相关关系, 黄河上游地区径流量转折前, 平均气温与径流量的负相关关系更加明显, 表明气温升高加大流域蒸发量, 导致径流补给减少, 且该补给减少大于冰雪融水的补给; 转折后平均气温与径流量呈正相关

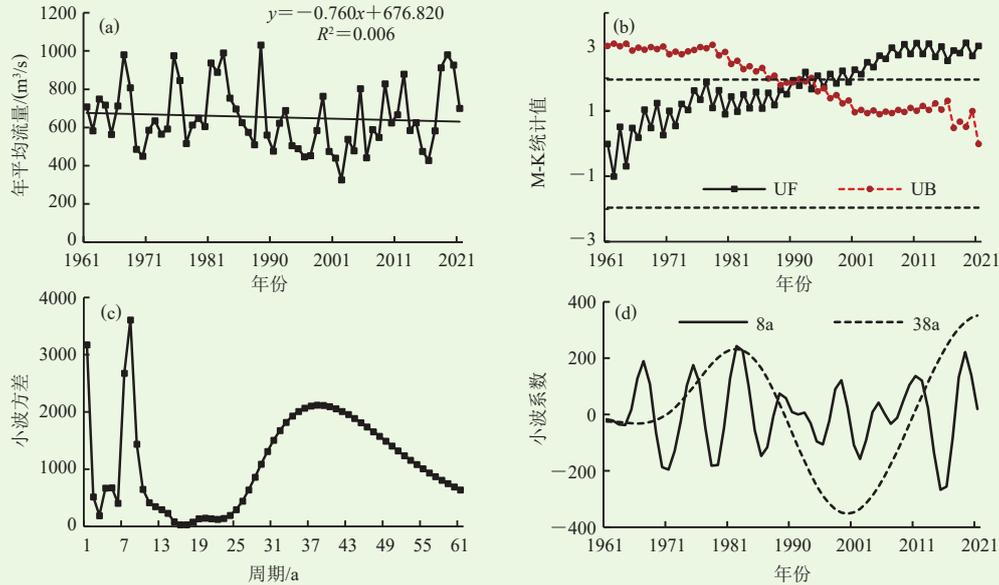


图3 1961—2021年黄河上游径流量年际变化(a), M-K突变检验(b), 小波方差(c)以及小波系数(d)变化曲线
Fig. 3 Annual variation (a), M-K mutation test (b), wavelet variance diagram (c) and wavelet coefficient curve (d) of runoff in the upper reaches of the Yellow River during 1961—2021.

关系($P < 0.1$), 说明气温升高致使冰雪融水增加, 对流量补给大于流域蒸发量增加导致的减少作用。

表1 不同时段唐乃亥站径流量与研究区同期各气候要素的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between runoff at Tangnaihai Station during different time periods and the climatic factors of the same period in the study area

	年平均气温	年降水量	年平均相对湿度	年平均风速
1961—2021年	-0.074	0.711***	0.464***	-0.008
1961—1990年(转折前)	-0.115	0.819***	0.598***	-0.485*
1991—2021年(转折后)	0.294	0.760***	0.302	-0.308

注: *表示 $P < 0.05$; ***表示 $P < 0.001$

近61年, 年降水量与径流量呈显著的正相关关系, 黄河上游地区径流量转折前和转折后, 其相关系数均 > 0.7 ($P < 0.001$), 表明降水对于径流量具有决定性的影响, 它是流量演变的主要驱动因子^[24]。年平均相对湿度与径流量呈显著的正相关关系, 但这种正相关关系在黄河上游地区径流量发生突变转折后明显减弱。年平均风速总体上与径流量相关并不明显, 但是在黄河上游地区径流量发生突变转折之前存在相对明显的负相关关系, 这种关系在转折后明显减弱。年蒸发量与径流量并无明显的相关关系, 表明其对黄河上游地区径流量的增长并未起到明显的作用, 这与刘彩虹等^[3]李林等^[19]研究结论一致。

2.3.2 大气环流特征

上述分析表明, 气候变化是影响黄河上游地区径流量变化的主要影响因子, 而大气环流异常是造

成气候异常的直接原因。为分析黄河上游地区径流量与大气环流变化的联系, 将1961—2021年径流量与同期500 hPa环流场做相关分析(图4a), 发现中高纬度($15^{\circ} - 70^{\circ}N$), 从欧洲至东亚上空自北向南呈现“正—负”的相关区域, 中国大部为显著的负相关区($P < 0.05$), 异常中心位于巴尔喀什湖以南至新疆地区, 巴尔喀什湖至贝加尔湖以北的地区为正相关区域, 说明巴尔喀什湖至新疆附近低槽偏强、中国大部为负高度距平控制时, 容易造成青海大部降水偏多, 从而导致黄河上游地区径流量增加。反之, 则情况相反。

大气环流对黄河上游地区径流量的影响在其突变转折前后具有较大的差异(图4b和4c)。1961—1990年(转折前), 在欧亚地区影响黄河上游径流量变化的区域主要位于贝加尔湖和青藏高原及新疆上空, 当高原高度场偏低并且贝加尔湖高压偏强时, 欧亚地区总体形成“西低东高”配置, 利于降水偏多, 进而导致黄河上游地区径流量增加; 1991—2021年(转折后), 影响黄河上游地区径流量增加的主要关键区与转折前发生了明显的变化, 巴尔喀什湖至贝加尔湖以北地区的正相关区明显增强、范围增大, 青藏高原及新疆附近的负相关性减弱、范围明显减缩, 而低纬度地区的正相关性增强。表明转折前后, 大气环流对黄河上游地区径流量的影响机制发生了明显的变化。

2.3.3 高原夏季风增强

高原夏季风是由地形阶梯造成对流层中层大气的

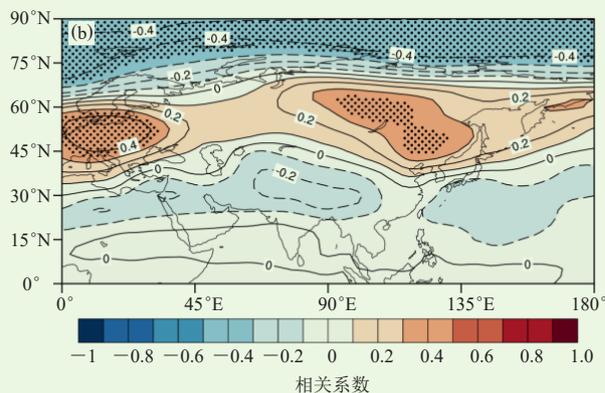
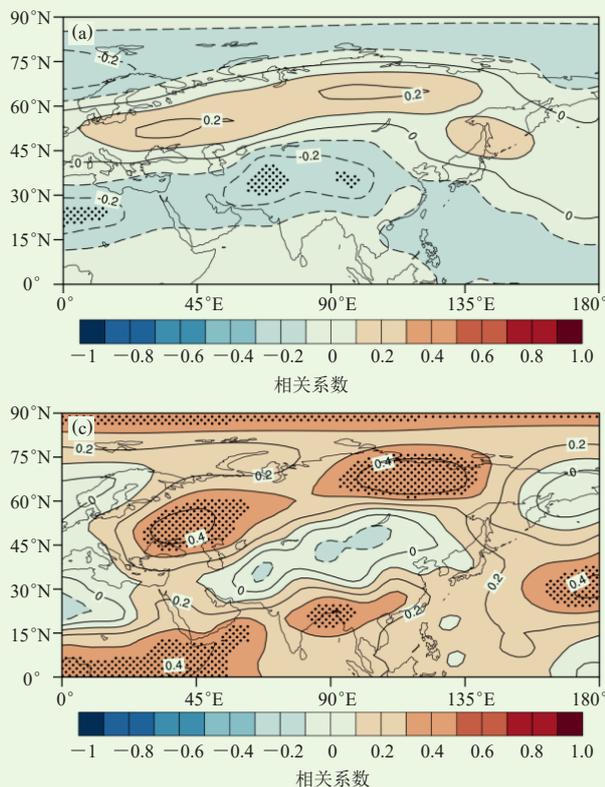


图4 不同时段黄河上游径流量与500 hPa高度场相关系数
(打点区域表示通过0.05显著性水平检验)
(a) 1961—2021年; (b) 1961—1990年; (c) 1991—2021年
Fig. 4 Correlation coefficient between runoff and 500 hPa height field in the upper reaches of the Yellow River (The dotted areas are the places that pass the significance test of 0.05.)
(a) During 1961—2021; (b) During 1961—1990; (c) During 1991—2021

温度差异引起的,对高原地区气候的影响不容忽视。研究区位于青藏高原东北部地区,其流域水文、气候环境的演变,不可避免地要受到高原季风的影响^[19]。夏季600 hPa上高原主体受强大低压系统控制,近地层风场呈气旋式旋转,大致以32.5°N为界,其南侧为偏西风,北侧为偏东风。从风场角度计算 I_{PM} ,差值越大,说明高原夏季近地面切变线南北纬风向差越大,气旋性旋转越强,高原夏季风越强;反之,则越弱。

1961—2021年 I_{PM} 如图5(a)所示,1961年以来高原夏季风总体呈减弱趋势,其气候倾向率为 $0.34 \text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ ($P < 0.01$),特别是1980年之前,减弱趋势明显。M-K法突变检验(图5b)表明,高原夏季风在1987年之前呈减弱趋势,之后逐渐增强。2013年前后出现由弱到强的突变,增强趋势更加显著。图5c和5d分别为黄河上游地区径流量突变转折前后高原夏季风指数变化曲线,可以看到,转折前高原夏季风总体呈显著的减弱趋势($P < 0.01$),其气候倾向率为 $-1.35 \text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$;而转折后高原夏季风呈现明显增强的趋势($P < 0.01$),气候倾向率为 $0.44 \text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$ 。李林等^[19]研究表明,强劲的高原夏季风可以将孟加拉湾乃至印度洋的暖湿气流源源不断地输送到青海地区,使其区域气候呈现出暖湿化趋势,继而利于黄河上游地区径流量的增加。

2.3.4 西风环流减弱

李万莉等^[25]研究表明,我国西北地区的水汽输送主要集中在夏季,西风气流是西北地区水汽输送的主要载体。高原夏季风对区域西风带活动具有显著的影响,近数十年来两者总体变化趋势相反,前者增强后者减弱^[26]。处于西风带和高原季风交汇区域的青海地区,西风环流强弱变化及其与高原季风此消彼长的相互作用对流域气候、水文环境的影响不容忽视^[20]。本文采用亚洲纬向环流指数(I_z)来表征西风指数。1961年以来, I_z 呈略微增长趋势,并在1991年左右出现突变,虽然突变在显著线之外,但与黄河上游径流量突变年份一致。转折前 I_z 呈增长趋势,其气候倾向率为 $0.25 \text{ hPa}/10\text{a}$,其对黄河上游地区径流量的影响并不明显,二者相关系数仅为 -0.085 ;而转折后 I_z 呈现减弱趋势,气候倾向率为 $-0.16 \text{ hPa}/10\text{a}$,与黄河上游地区径流量相关系数达 -0.306 ($P < 0.1$),表明干燥的西风环流减弱对黄河上游地区径流量增多具有一定的作用(图6)。

3 结论与讨论

1) 1961—2021年黄河上游地区气温呈波动上升态势,2000以来增温更加显著;年降水量呈明显增加趋势($P < 0.01$),并且具有明显的年际和年代际振荡;年蒸发量呈显著增大趋势($P < 0.001$),这与黄河上游地区气温的显著升高有密不可分的关系;相对湿度呈

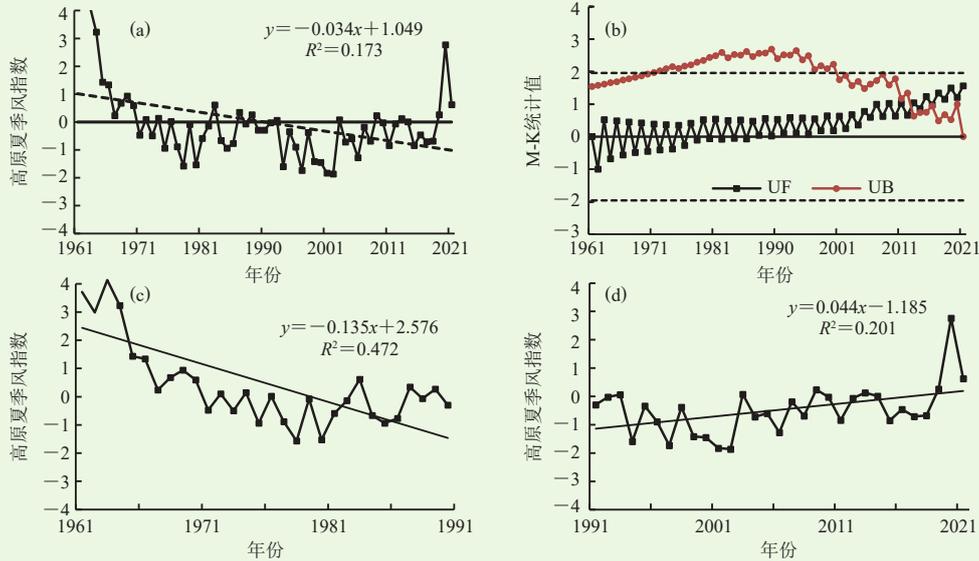


图5 1961—2021年高原夏季风指数变化 (a), M-K突变检验 (b), 及黄河上游地区径流量突变转折前 (c) 和转折后 (d) 高原夏季风指数变化曲线

Fig. 5 Anomaly variation of plateau summer monsoon index (IPM) (a), M-K mutation test (b) and the variation of IPM before (c) and after (d) the mutation of runoff in the upper reaches of the Yellow River during 1961—2021

波动减小趋势; 平均风速呈显著减小趋势 ($P < 0.001$)。

2) 1961—2021年黄河上游径流量总体呈波动下降趋势, 其变化在1991年前后出现了突变, 2000年以后呈显著增加趋势。黄河上游径流量具有8 a和38 a的显著性变化周期, 近21年来黄河上游流量的持续上升态势已打破了以往以持续下降为主、8 a小幅回升为辅的短周期变化规律, 呈现出较强劲的、较长周期持续上升趋势。

3) 黄河上游地区径流量变化对年平均气温、降水量、相对湿度及平均风速的变化响应敏感, 其中降水对径流量具有决定性的影响。气温对径流量的影响在径流量转折前后具有较大差异, 转折前气温升高加大流域蒸发量, 导致流量补给的减少要大于升温带来的冰雪融水的增加; 而转折后气温升高致使冰雪融水的补给增加大于加大流域蒸发量导致流量补给的减少量。

4) 大气环流及其影响的转变是黄河上游地区造成径流量发生变化的重要原因, 1991年以来在干燥的西风环流减弱和暖湿的高原季风增强的共同作用下, 黄河上游地区降水量增多导致径流量增加。

众所周知, 西北地区气候同时受东亚夏季风和西风环流的影响, 它们为西北地区提供了基本的水汽来源, 而高原季风作为亚洲季风系统的子系统, 位于高原上空, 直接影响黄河上游地区。关于当前黄河上游地区径流量发生变化的原因, 需同时关注西风环流和东亚夏季风环流的动向。西风环流、东亚夏季风特

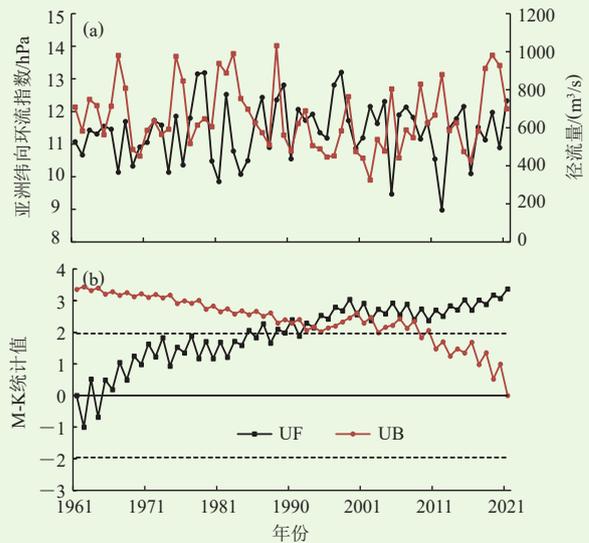


图6 1961—2021年亚洲纬向环流指数与黄河上游地区径流量变化曲线 (a), 亚洲纬向环流指数M-K突变检验 (b)
Fig. 6 Variation of Asian zonal circulation index (I_z) and runoff in the upper reaches of the Yellow River (a); M-K mutation test of Asian zonal circulation index (b) during 1961—2021

别是高原季风之间的相互作用, 及其对黄河上游及周边地区气候变化特别是降水量增加的影响机理是十分复杂的。本研究仅从统计的角度对其变化趋势和影响进行分析, 并没有深入分析黄河上游地区径流量与它们之间的定量关系, 后续将应用数值模式进行模拟研究。此外, 还需从植被覆盖、冻土退化等气候环境因

(下转113页)

充足,组织学员对预先设定问题进行讨论交流;总结评价部分以教学目的为出发点,梳理总结预报理论依据、天气发生机理、关键预报指标、预报疑难点及凝练课题方向等,分析评价学员对教学内容的理解和掌握程度。

3 结论与讨论

1) 高原灾害性天气预报技术培训案例库是高原天气预报技术培训课程体系的重要组成部分,与平原地区相比,高原地区天气预报技术培训案例在选取和培训目标设计上,要体现高原天气特色,要符合高原预报员能力提升需求。

2) 高原灾害性天气预报技术培训案例建设结合实际,准确定位培训案例目标,以强化复杂下垫面条件下,预报员对天气预报理论知识理解应用、天气发生发展机理分析、各类气象数据资料释用、预报思路建立为培训目的,可分为以下三类:基于基本知识理解和多源资料应用技术的培训案例、基于天气机理分析和预报思路建设的培训案例、基于预报方法创新研究能力的培训案例,以满足高原预报员不同成长阶段能力提升培训需求。

3) 高原灾害性天气预报技术培训案例建设内容主

要包括案例课程教学计划编制、案例文本资料撰写、数据资料收集处理、讨论问题设计和教学课件开发(PPT)。其中教学课件是案例教学实施的主体,教师通过教学课件控制教学过程及教学流程。教学课件一般应包括教师讲授部分、学员实践部分、讨论交流部分和总结评价部分。

深入阅读

- 慕凤丽, 2015. 案例教学在中国: 机遇与挑战. 北京: 北京大学出版社.
- 林存华, 2021. 干部教育培训运用案例教学需要处理好的几个关系. 党政论坛, (1): 58-61.
- 杨萍, 王志强, 李焕连, 2020. 基于诺尔斯成人学习理论的干部培训案例教学探析. 中国成人教育, (2): 80-83.
- 袁晴雪, 王腾蛟, 2015. 青年教师在预报员培训教学工作中的经验与思考. 继续教育, (4): 28-29.
- 何海鹰, 2012. 参与式培训在干部培训中的运用及效果分析——以气象部门县级气象局长培训为例. 继续教育, 26(12): 26-28.
- 李春景, 2015. 案例教学分层次目标浅议——以气象领导干部培训案例教学为例. 继续教育, 29(10): 48-49.
- 王腾蛟, 孙俊, 冉津江, 2021. 高原山地强对流天气培训个例库建设及应用研究. 教育教学论坛, (15): 26-29.
- 王腾蛟, 张新华, 2020. 西南低涡可视化教学平台设计与开发. 科技与创新, (24): 146-148.

(作者单位: 刘青春、罗昌娟, 青海省气象干部培训学院; 邹立尧, 中国气象局气象干部培训学院; 栾姝琦, 海北州气象局)

(上接92页)

素的角度分析对黄河上游地区径流量的影响机理。

参考文献

- [1] 李栋梁, 张佳丽, 全建瑞, 等. 黄河上游径流量演变特征及成因研究. 水科学进展, 1998, 9(1): 23-29.
- [2] 时兴合, 秦宁生, 汪青春, 等. 黄河上游径流量的变化及其预测模型研究. 青海科技, 2007, (5): 14-19.
- [3] 刘彩虹, 杨延华, 王振宇. 黄河上游夏季流量对气候变化的响应及未来趋势预估. 地理科学进展, 2012, 31(7): 846-852.
- [4] 冯禹昊, 朱江玲. 基于Morlet小波的辽河径流量变化及其成因分析. 水土保持研究, 2019, 26(2): 208-215.
- [5] 王绍武, 董光荣. 中国西部环境演变评估(第1卷)中国西部环境特征及其演变. 北京: 科学出版社, 2002.
- [6] 翟盘茂, 任福民, 张强. 中国降水极值变化趋势检测. 气象学报, 1999, 57(2): 81-89.
- [7] 谢金南, 周嘉陵. 西北地区中、东部降水趋势的初步研究. 高原气象, 2001, 20(4): 362-367.
- [8] 丁永建, 叶佰生, 刘时银. 祁连山中部地区40 a来气候变化及其对径流的影响. 冰川冻土, 2000, 22(3): 193-199.
- [9] 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. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
- [10] 张强, 朱飘, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征. 科学通报, 2021, 66(C2): 3757-3771.
- [11] 马鹏里, 杨金虎, 卢国阳, 等. 西北地区东部气候的转折性变化. 高原气象, 2020, 39(4): 840-850.
- [12] Huang Q, Zhao X H. Factors affecting runoff change in the upper reaches of the Yellow River. Progress in Natural Science, 2004, 14(9): 811-816.
- [13] 刘彩虹, 朱西德, 白彦芳. 近50年来黄河源区流量对气候变化的响应及其未来变化趋势预测. 资源科学, 2011, 33(7): 1236-1241.
- [14] 蓝永超, 林舒, 李州英, 等. 近50 a来黄河上游水循环要素变化分析. 中国沙漠, 2006, 26(5): 849-854.
- [15] 蓝永超, 文军, 赵国辉, 等. 黄河河源区径流对气候变化的敏感性分析. 冰川冻土, 2010, 32(1): 175-182.
- [16] 李林, 汪青春, 张国胜, 等. 黄河上游气候变化对地表水的影响. 地理学报, 2004, 59(5): 716-722.
- [17] 李春晖, 郑小康, 杨志峰, 等. 黄河天然径流量变化趋势及其影响分析. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(1): 80-85.
- [18] 袁云, 李栋梁, 安迪. 青海湖水位变化对青藏高原气候变化的响应. 高原气象, 2012, 31(1): 57-64.
- [19] 李林, 申红艳, 刘彩虹, 等. 青海湖水位波动对气候暖湿化情景的响应及其机理研究. 气候变化研究进展, 2020, 16(5): 600-608.
- [20] 董祝雷, 白美兰, 衣娜娜. 内蒙古夏季降水与亚洲纬向环流的联系. 干旱气象, 2018, 36(2): 256-262.
- [21] 白君瑞, 徐宗学, 班春广, 等. 基于Z指数的雅鲁藏布江流域径流丰枯变化及其特征分析. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(6): 715-723.
- [22] 李林, 陈晓光, 王振宇, 等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究. 气候变化研究进展, 2010, 6(3): 181-186.
- [23] 孙卫国. 气候资源学. 北京: 气象出版社, 2008.
- [24] 孙卫国, 程炳岩, 李荣. 黄河源区径流量的季节变化及其与区域气候的小波相关. 中国沙漠, 2010, 30(3): 712-721.
- [25] 李万莉, 王可丽, 傅慎明, 等. 区域西风指数对西北地区水汽输送及收支的指示性. 冰川冻土, 2008, 30(1): 28-34.
- [26] 田俊, 马振峰, 范广洲. 高原季风对500 hPa中纬度西风带活动的影响. 成都信息工程学院学报, 2010, 25(1): 61-68.