

The Characteristics of Mountainous Runoff in Shiyang River Basin and Its Spatial Correlation with the Large-Scale Moisture Field

Ying Hou, Fang Zheng*, Yi Shao, Mengjun Zhu

Ningxia (China-Arab) Key Laboratory of Resource Assessment and Environment Regulation in Arid Region, College of Resources and Environment Sciences, Ningxia University, Yinchuan Ningxia
Email: holying@nxu.edu.cn, *zhengf05@163.com

Received: Mar. 31st, 2017; accepted: Apr. 15th, 2017; published: Apr. 18th, 2017

Abstract

In the Shiyang River basin, which is mainly supplied with precipitation, it is important to discuss the large-scale moisture background of surface runoff variation. Based on the runoff, CRU precipitation field (TS 3.24) and SPEI field (CSIC v2.4) on different time scales, the evolution characteristics of mountainous runoff and its spatial correlation with the large-scale moisture field were discussed utilizing Mann-Kendall trend analysis, wavelet analysis and spatial correlation analysis. The results show that in the second half of the 20th century, the mountainous runoff is significantly reduced, in the early 21st century, and show increasing trend at different significant levels. Annual mountainous runoff series contain the severe dry periods (during 1962-1967, 1970-1976 and 1991-2001) and three significant wet periods (1956-1961, 1976-1990 and 2002-2012) for nearly 60 years. The dominant periods of mountainous runoff calculated by wavelet analysis were 2 - 3 years (1960s and early 1970s), the dominant periods of summer and annual mountainous runoff were quasi-4 years (late 1980s and 1990s). The key areas of moisture field influencing spring mountainous runoff variation are in the middle and east of Hexi Corridor; the key areas affecting autumn mountainous runoff variation are the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau and the eastern part of the Hexi Corridor, with the core area at 100°E - 105°E and 33°N - 41°N; the key areas affecting summer and annual mountainous runoff variation are the northeastern part of the East Asian summer monsoon and the northeast-southwest direction of the core area at 100°E - 110°E and 33°N - 42°N.

Keywords

Runoff, Spatial Correlation Analysis, Shiyang River, Moisture Field

石羊河出山径流量演变特征及其大尺度水分背景

侯 迎, 郑 芳*, 邵 议, 朱梦君

作者简介: 侯迎(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要从事气候与水资源、气候与环境演变研究。
*通讯作者。

文章引用: 侯迎, 郑芳, 邵议, 朱梦君. 石羊河出山径流量演变特征及其大尺度水分背景[J]. 水资源研究, 2017, 6(2): 166-175.
<https://doi.org/10.12677/jwrr.2017.62020>

宁夏大学资源环境学院, 宁夏(中阿)资源评价与环境调控重点实验室, 宁夏 银川
Email: holying@nxu.edu.cn, *zhengf05@163.com

收稿日期: 2017年3月31日; 录用日期: 2017年4月15日; 发布日期: 2017年4月18日

摘 要

在以降水补给为主的石羊河流域, 探讨地表径流形成和径流量丰枯变化的大尺度水分背景具有重要意义。基于径流量、CRU降水量(TS3.24)和各时间尺度标准化降水蒸散指数(SPEI, CSIC v2.4)资料, 利用Mann-Kendall趋势分析、小波分析及空间相关分析等方法, 探讨出山径流量的演变特征及其与大尺度水分场的空间关联。结果表明: 在20世纪后半段, 出山径流量显著减少, 在21世纪初, 又呈现不同程度的增加趋势。在1962~1967、1970~1976、1991~2001年以偏枯为主, 1956~1961、1976~1990、2002~2012年以偏丰为主。出山径流量具有显著的2-4a周期(1960s、1970s初), 夏季和年径流量还具有显著的准4a周期(1980s末、1990s)。影响春季径流形成和丰枯变化的水分关键区在河西走廊中东部; 影响秋季径流的关键区域在青藏高原东北缘和河西走廊东部, 核心区位于100°E~105°E, 33°N~41°N; 影响夏季和年径流的关键区域在东亚夏季风北边缘, 核心区位于100°E~110°E, 33°N~42°N, 呈东北-西南走向。

关键词

径流量, 空间相关, 石羊河, 水分场

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

石羊河是甘肃河西走廊内流水系的第三大河。在全球气候变暖的背景下, 该流域以山区大气降水补给为主的水资源系统更为脆弱, 水资源不确定性加大。加之人口压力的增加和不合理的水土资源开发, 导致水资源短缺的矛盾突出, 生态、环境问题日益尖锐。当前流域平均水层深仅 38.7 mm, 人均占有水资源量 706 m³ [1], 年超采地下水 4.5 亿 m³, 水资源开发利用程度高达 164.1% [2]。由此石羊河成为我国用水矛盾最突出、生态环境问题最严重、水资源开发利用程度最高的流域之一, 威胁着当地人民的生存[3]。

目前, 该流域径流变化特征、气候变化及土地利用变化等人类对水资源的影响、径流模拟预测以及水资源优化配置等问题受到学者关注, 郭静等[4]、周俊菊等[5]、张晓伟等[6]、wang 等[7]分析石羊河流域水文演变规律, 李伶俐等[8]采用条件概率分布法和混合分布法计算变化环境下的年径流频率; 王文行等[9]利用遗传算法和自动寻优-人机对话法分析气候变化对径流的影响, 张彧瑞等[10]基于主客观综合赋权分析法计算人类活动和气候变化对水资源影响的贡献率; 周俊菊等[11]通过构建基于气候及土地利用变化的径流过程模拟模型, 郭静等[12]利用 VIC 水文模型和统计降尺度模型, 探讨未来不同气候变化情景下石羊河流域的水文响应; 张刘东等[13]通过不确定性条件下的水资源转化关系理论和模拟优化模型, 孙栋元等[14]通过 MIKE BASIN 模型, 构建流域水资源优化和模拟相关过程模型, 模拟流域径流量、水库和灌区需水量变化特征。

由王文行等[9]分析可知, 影响石羊河径流的主要因素是山区降水。侯迎等[15]基于交叉小波分析表明上游降水量与地表径流在 2~5 a 尺度上(1960s 和 1980~2005 年)正相位关联性强, 且上游降水与地表径流的高凝聚性正相

关更显著,降水对上游径流的形成起主导作用。因此,在以降水补给为主的石羊河流域,探讨地表径流形成和径流量丰枯变化的大尺度水分背景凸显重要意义。空间相关分析方法常用来定量地描述事物在空间上的依赖关系,变量之间是否在空间上相关以及相关程度如何[16]。因此,本文以石羊河流域出山水文站的器测资料为基础,利用趋势分析、小波分析以及空间相关分析等方法,探讨各季节和年出山径流量的演变特征及其与大尺度水分场的空间关联,对于深入认识流域水资源的形成和演变规律,水资源的合理开发利用和生态环境保护具有指导意义。

2. 数据和方法

2.1. 数据

石羊河发源于祁连山脉东段冷龙岭北侧,河长 250 km,主要有古浪河、黄羊河、杂木河、西营河、东大河及西大河等支流。河系以雨水补给为主,兼有冰雪融水成分。选取八条主要支流中径流量较大、观测时间较长、数据较完整的黄羊河、杂木河和西营河,采用水文站点——黄羊河水库(时段:1950~2014 年)、杂木寺(1952~2014 年)及九条岭(1956~2014 年)的逐月径流量(图 1),数据来源于甘肃省水文水资源局。用 CRU 降水量(TS3.24)和标准化降水蒸散指数(SPEI, CSIC v2.4)的距平场作为区域地表径流形成和径流量丰枯变化对应的水分背景。

2.2. 方法

利用 Mann-Kendall 趋势分析(检验值设为 Z)方法[17]分析地表水资源变化趋势。周期分析采用复 Morlet 小波,检验方法为显著性水平为 0.05 的白噪声标准谱的检验[18]。利用空间相关分析探讨石羊河出山径流量与 CRU 降水量和不同时间尺度 SPEI 距平场的空间关联。

3. 结果与分析

3.1. 径流的丰、枯变化

黄羊河多年平均年径流量为 1.35 亿 m^3 ,最大和最小年径流量分别为 2.38 亿 m^3 (2010 年)和 0.68 亿 m^3 (1991 年),变差系数 $C_v = 0.27$;杂木河多年平均年径流量为 2.43 亿 m^3 ,最大和最小年径流量分别为 4.95 亿 m^3 (1958 年)和 1.38 亿 m^3 (1965 年),变差系数 $C_v = 0.25$;西营河多年平均年径流量为 3.19 亿 m^3 ,最大和最小年径流量

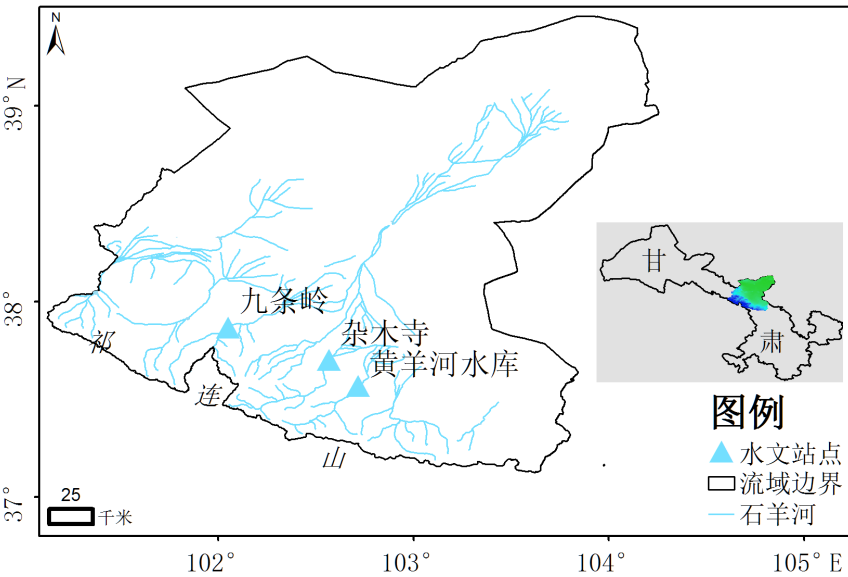


Figure 1. Map of selected hydrological stations in upper Shiyang River
图 1. 石羊河流域及选用的水文站点

分别为 4.43 亿 m^3 (2003 年)和 2.12 亿 m^3 (1991 年), 变差系数 $C_v = 0.18$ 。三条支流的多年平均年径流量从东向西增加, 而其变差系数从东向西减少。黄羊河的多年平均夏季径流量为 0.59 亿 m^3 , 变差系数 $C_v = 0.36$; 杂木河的多年平均夏季径流量为 1.31 亿 m^3 , 变差系数 $C_v = 0.35$; 西营河的多年平均夏季径流量为 1.76 亿 m^3 , 变差系数 $C_v = 0.21$ 。三条支流的多年平均夏季径流量也从东向西增加, 其变差系数也从东向西减少。但夏季径流量的变差系数均高于各年径流量的变差系数, 夏季径流的年际变化更剧烈。

三条支流的径流量虽然极值有些差异, 但峰与峰值、谷与谷值相对应, 其年径流量在公共区间内的平均相关系数为 0.71 ($p < 0.01$, $N = 59$), 夏季径流量的平均相关系数为 0.73 ($p < 0.01$, $N = 59$), 其他季节的径流量也一致变化。三条序列变化趋势具有同步性, 将三条支流的径流量之和作为石羊河出山径流量。

从图 2 的低通滤波曲线可见, 各季节和年总径流量均在 1970s 和 1990s 年代处于枯水期; 春季、夏季和年总径流量在 1980s 处于丰水期, 其他季节位于枯水期; 在 21 世纪初除了夏季径流量, 其他季节和年总径流量均处于丰水期。持续时间较长的丰水期在春季、夏季的 1970s 后期到 1990s 初(持续 14 年)以及秋季、冬季的 21 世纪初期(持续 14 年)。持续时间较长的枯水期在夏季的 1990s 以后(持续 24 年)以及冬季的 20 世纪后半段(持续长达 36 年)。石羊河年出山年径流量大致经历了以下几个丰枯阶段: 1962~1967、1970~1976、1991~2001 年以偏枯为主; 1956~1961、1976~1990、2002~2012 年以偏丰为主(表 1)。

3.2. 趋势分析

表 2 是石羊河出山径流量的趋势检验结果, 结合图 2 可知: 春季、夏季和年径流量呈波动的减少趋势, 秋

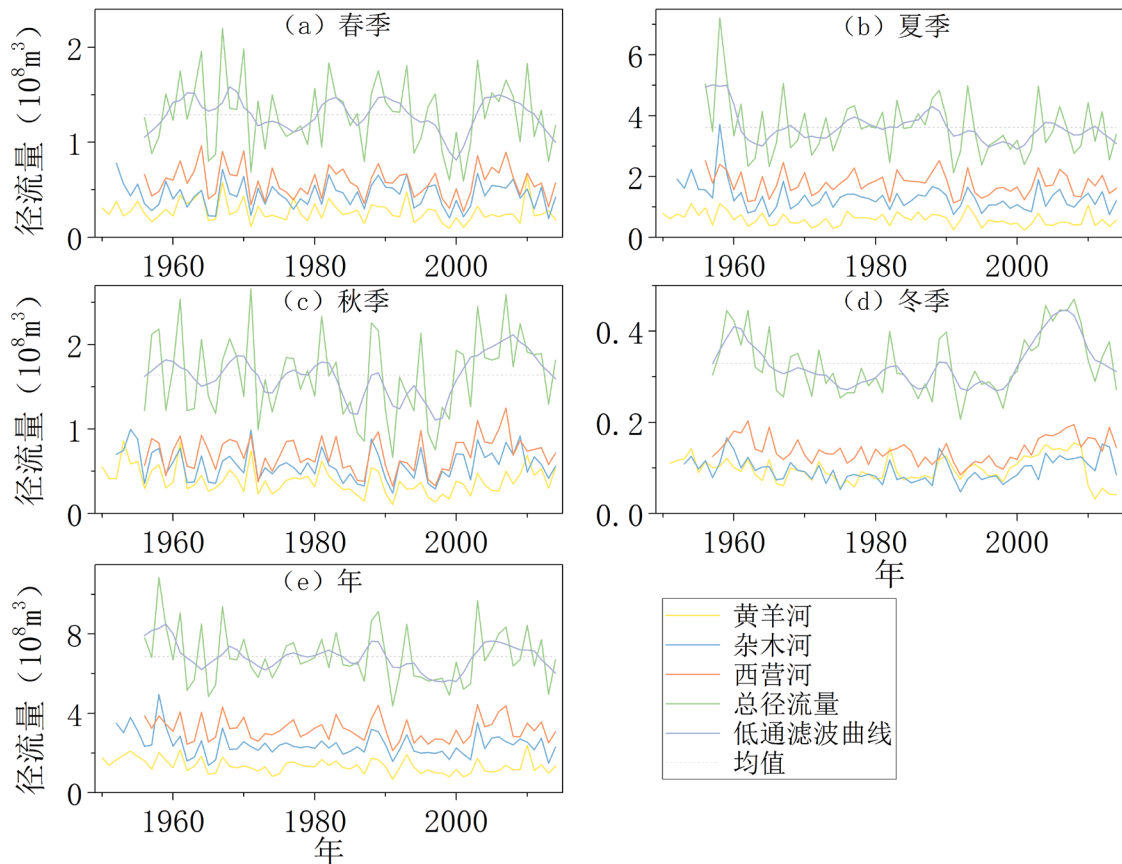


Figure 2. Changing trends of mountainous runoff in the upper Shiyang River

图 2. 石羊河出山径流量变化趋势

Table 1. The statistical characteristics and high and low-flow of mountainous runoff in the upper Shiyang River
表 1. 石羊河出山径流量的统计特征及丰、枯水期

	多年平均径流量(亿 m ³)	最大径流量 (年份, 亿 m ³)	最小径流量 (年份)	Cv	丰水期	枯水期
春季	1.29	2.2(1967)	0.59(2001)	0.28	1959~1971、1980~1994、2003~2011	1971~1980 1994~2003
夏季	3.61	7.22(1958)	2.13(1991)	0.26	1956~1961、1975~1990	1962~1975 1991~2014
秋季	1.64	2.66(1971)	0.67(1991)	0.29	1956~1972、2001~2014	1983~2000
冬季	0.33	0.47(2008)	0.21(1992)	0.20	1956~1965、2001~2012	1966~2000
年	6.87	10.85(1958)	4.37(1991)	0.20	1956~1961、1976~1990、2002~2012	1962~1967 1970~1976 1991~2001

Table 2. Statistical results of Mann-Kendall trend test of mountainous runoff
表 2. 石羊河出山径流量的 Mann-Kendall 趋势检验

流域	整体趋势	下降趋势(时段)	上升趋势(时段)
春季	-0.29	-1.1 (1967~2001)	0.89 (1956~1967) 1.25 (2001~2010)
夏季	-1.1	-1.25 (1956~2001)	0.89 (2001~2010)
秋季	0.5	-1.82 (1956~1997)	1.87(1997~2007)
冬季	0.59	-2.6** (1957~1997)	3.5*** (1997~2008)
年	-1.06	-2.17* (1956~1999)	2.13* (2000~2010)

注: ***: $p < 0.001$; **: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$

季和冬季径流量呈波动的微弱增加趋势, 但整体而言, 各季节和年总径流量呈现出相似的变化趋势。在整个时段(1956~2014 年), 出山径流量可分为三个变化阶段: ①20 世纪后半段, 各季节和年径流量均呈现明显的减少趋势, 其中年总径流量的减少趋势较显著($Z = -2.17, p < 0.05$; 图 2(e)), 冬季径流量的减少趋势最为显著($Z = -2.6, p < 0.01$; 图 2(d))。此外, 春季径流量的减少趋势始于 20 世纪 60 年代中后期(之前呈现微弱的增加趋势; 图 2(a)), 而其他季节和年径流量的减少趋势始于 20 世纪 50 年代中期。②21 世纪初, 各季节和年径流量均呈现不同程度的增加趋势, 其中夏季径流量的增加趋势不明显(图 2(b)), 春季和秋季径流量增加趋势明显但不显著(图 2(a), 图 2(c)), 年径流量在 0.05 显著性水平上显著增加($Z = 2.13$), 而冬季径流量的增加趋势最为显著($Z = 3.5, p < 0.001$)。③2010s, 各季节和年径流量又呈现出明显的减少趋势。

3.3. 丰、枯频率

对于长期的径流变化特征, 历史丰枯频率是一个重要方面。参照文献[19]的方法, 依据模比系数($kp = \text{某一年的径流量} / \text{多年平均径流}$)把年径流量划分为 5 级, 即 $kp \geq 1.2$ 为特丰水年; $1.2 > kp \geq 1.1$ 为偏丰水年; $1.1 > kp \geq 0.9$ 为平水年; $0.9 > kp \geq 0.8$ 为偏枯水年; $kp < 0.8$ 为特枯水年, 确定丰水、平水和枯水年份。如表 3 所示, 春季径流量以平水年和特枯年次数最多, 枯水年份共出现 21 次, 丰水年份共出现 23 次, 总体相差不大。夏季径流量以平水年次数最多, 特枯年和特丰年次数相差不多, 枯水年份(24 次)高于丰水年份(19 次)。秋季径流量以特枯年次数最多, 平水年最少, 但枯水年份(25 次)和丰水年份(26 次)大致相等。冬季径流量平水年份出现频率高于其他特征年份, 特丰年发生的频率高于特枯水, 但枯水年(22 次)高于丰水年(17 次)。年径流量平水年份出现频率远高于其他特征年份, 枯水年(18 次)等于丰水年(18 次)。总体而言, 春、夏和秋季的特枯水年数远高于冬季和年的特枯水年数, 而各季节和年的特丰水年数相差不大, 年平水年数远高于各季节的平水年数(表 3)。

3.4. 周期分析

小波分析的结果显示，春季径流量在 1960s 和 1970s 初具有显著的 2~4a 周期($p < 0.05$)，在 1980s~2000s 也有较高的谱值，但不显著(图 3(a))。夏季径流量在 1960s 和 1970s 初具有显著的准 3a 周期，在 1980s 末和 1990s 具有显著的准 4a 周期($p < 0.05$ ；图 3(b))。秋季和冬季径流量的小波分析结果相似，秋季径流量在 1960s 和 1970s 初具有显著的 2~4a 周期，在 1980s 和 1990s 具有显著的 4~6a 周期($p < 0.05$ ；图 3(c))。年径流量和夏季径流量的小波分析结果相似，在 1960s 具有显著的 2~4a 周期，在 1980s 末和 1990s 具有显著的准 4a 周期($p < 0.05$ ；图 3(d))。各季节和年出山径流量以较短的年际周期为主，2~4a 的周期在湟水河和黑河上下游长期的径流量序列中同样被检测到[20] [21]。2~3a 的周期处于 ENSO 的周期范围内[22]，同时，东亚夏季风北边缘带也存在显著的准 3 年周期[23]，说明石羊河的径流变化与东亚夏季风北边缘带的进退以及 ENSO 变化有关。蓝永超等[24]根据近 50 年气候、水文观测资料研究发现，El Niño 发生年，祁连山区东段气温偏高、降水减少以及径流偏枯。

3.5. 出山径流的大尺度水分背景

石羊河出山径流量与 CRU 降水量场的相关关系通过图 4 的相关场来表现。径流量与降水量的空间相关分析结果与其一阶差分数据的结果相似，且一阶差分数据更能强调径流量与降水量的高频相关性，有利于描述径流形成和径流量丰枯变化对应的逐年水分变化，因此以径流量和降水量的一阶差分数据的分析结果进行阐述。由图 4 可知，春季径流量在祁连山、河西走廊和内蒙古高原有较大范围内的相关显著区($p < 0.05$)，其中相关性最显著的区域位于河西走廊西部(相关系数 $r \geq 0.5$ ；图 4(a))；夏季径流量在黄土高原有相关显著区($p < 0.05$ ；图 4(b))；秋季径流量在西北地区东部、黄土高原西北部、内蒙古高原西部有较大范围内的相关显著区($p < 0.05$)，

Table 3. The frequency of dry and wet years in mountainous runoff

表 3. 石羊河出山径流量的的丰枯频率

	特丰水年数(频率%)	偏丰水年数(频率%)	平水年数(频率%)	偏枯水年数(频率%)	特枯水年数(频率%)
春季	11(18.6)	12(20.3)	15(25.4)	6(10.2)	15(25.4)
夏季	12(20.3)	7(11.9)	16(27.1)	11(18.6)	13(22.0)
秋季	13(22.0)	13(22.0)	8(13.6)	6(10.2)	19(32.2)
冬季	12(20.7)	5(8.6)	19(32.8)	15(25.9)	7(12.1)
年	11(18.6)	7(11.9)	23(39.0)	11(18.6)	7(11.9)

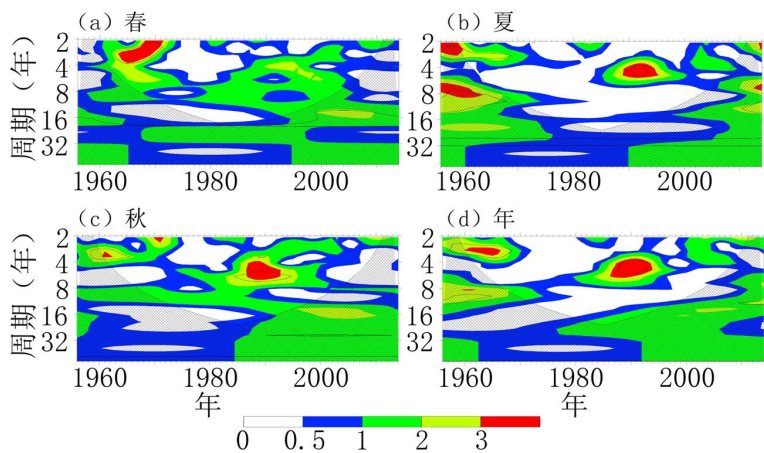


Figure 3. Wavelet analysis of mountainous runoff in the upper Shiyang River
图 3. 石羊河出山径流量的小波分析

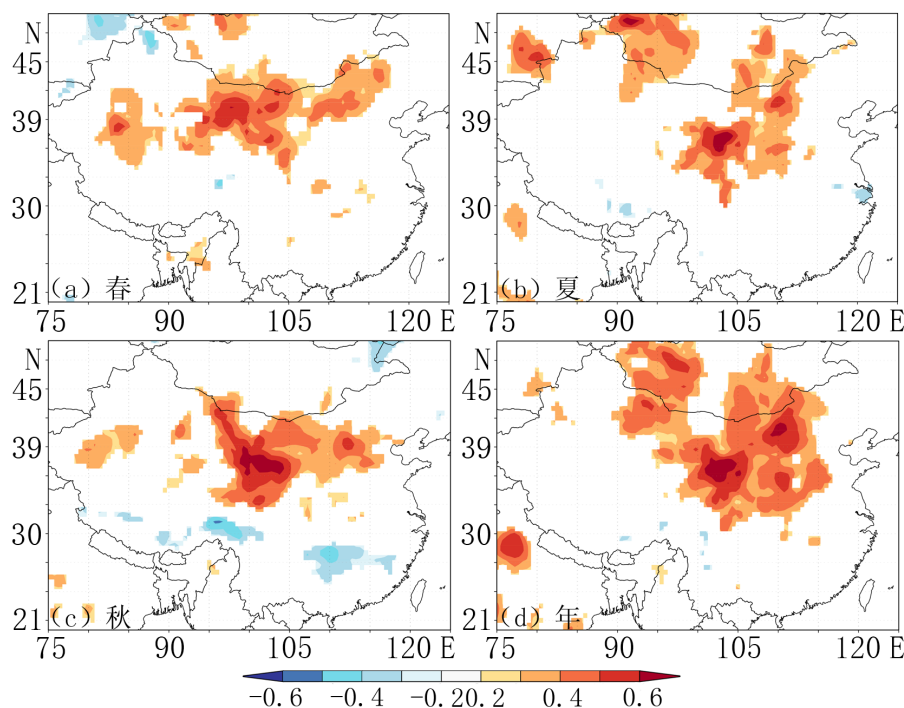


Figure 4. Significant ($p < 0.05$) correlations between mountainous runoff in the upper Shiyang River and CRU precipitation (TS3.24) after the first order difference

图 4. 石羊河出山径流量和 CRU 降水量(TS3.24)一阶差分相关系数的空间分布($p < 0.05$)

其中相关性最显著的区域位于西北地区东部($r \geq 0.6$; 图 4(c)); 冬季径流量与降水量场几乎无显著相关区域(图略); 年径流量在西北地区东部、河西走廊、黄土高原以及内蒙古高原西部有较大范围内的相关显著区($p < 0.05$), 其中相关性最显著的区域也位于西北地区东部($r \geq 0.6$; 图 4(d))。

石羊河出山径流量与 3 个月尺度和 12 个月尺度的 SPEI 距平场(分别以 SPEI3 和 SPEI12 表示)的相关关系通过图 5 的相关场来表现。同上, 也以径流量和 SPEI 的一阶差分数据的分析结果进行阐述。与图 4 相比, 春季径流量与 SPEI3 显著相关的区域明显偏南——在祁连山、河西走廊和黄土高原西部有较大范围的相关显著区($p < 0.05$), 其中相关性最显著的区域位于甘肃一带($r \geq 0.5$; 图 5(a)); 夏季径流量与 SPEI3 显著相关的区域增大的较多, 在黄土高原西北部、内蒙古高原、西北地区东部及蒙古西部有较大范围的相关显著区($p < 0.05$), 其中相关性最显著的区域位于黄土高原西北部($r \geq 0.5$; 图 5(b)); 秋季径流量与 SPEI3 显著相关的区域变化不大, 只是相关性最显著的区域在西北地区东部更聚集和显著($r \geq 0.6$; 图 5(c)); 冬季径流量与 SPEI3 也几乎无显著相关区域(图略); 年径流量与 SPEI12 显著相关的区域明显偏西、偏小, 显著相关的区域集中在西北地区东部、河西走廊以及青藏高原的东北缘。

综上, 影响春季径流形成和丰枯变化的水分关键区域在河西走廊中东部; 影响秋季径流形成和丰枯变化的关键区域在青藏高原的东北缘和河西走廊东部, 核心区在 $100^{\circ}\text{E} \sim 105^{\circ}\text{E}$, $33^{\circ}\text{N} \sim 41^{\circ}\text{N}$; 影响夏季和年径流形成和丰枯变化的关键区域在东亚夏季风北边缘, 核心区在 $100^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$, $33^{\circ}\text{N} \sim 42^{\circ}\text{N}$, 呈东北-西南走向。总之, 东亚夏季风北边缘区[23][25]是石羊河地表水资源形成的水分关键区域。东亚夏季风北边缘带对我国西北地区东部的天气、气候变化和极端灾害性天气气候事件的发生具有重要影响[26]。夏季风越强, 到达区域越北, 持续时间越长, 西北地区东部水分状况越好[25][27], 作为石羊河出山径流量, 特别是夏季和年径流量形成的关键区及核心区, 对石羊河出山径流的形成越有利; 反之径流量会减少。研究表明, 近半个世纪中国半干旱区干旱化加剧, 季风边缘最北位置呈现南退趋势, 且以西北地区东部的趋势最为明显[27]。水分的减少, 导致石羊河出山径流量,

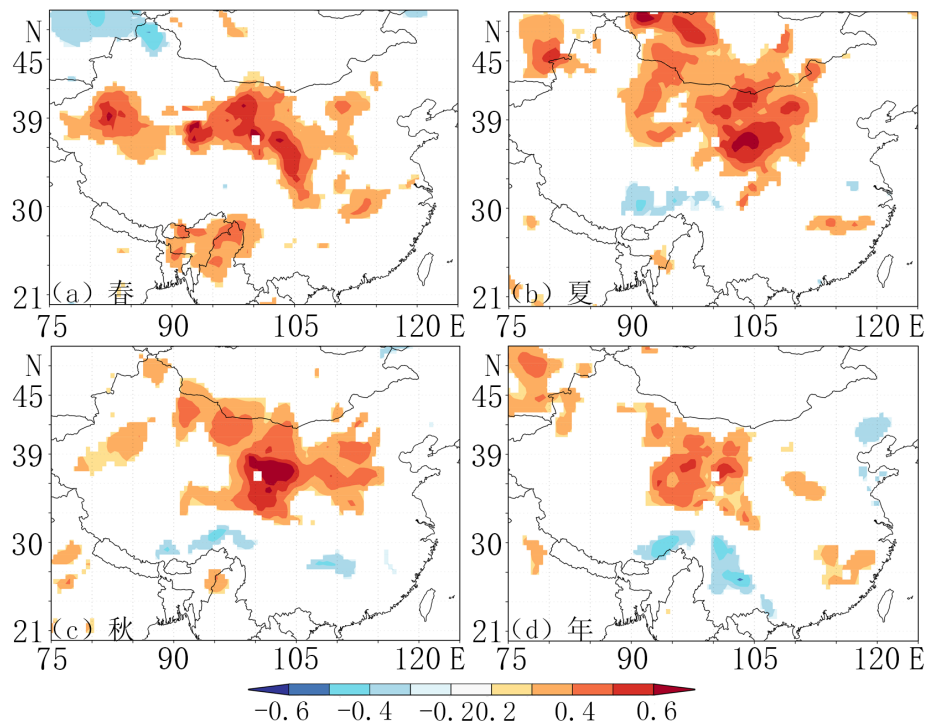


Figure 5. Significant ($p < 0.05$) correlations between mountainous runoff in the upper Shiyang River and SPEI (CSIC v2.4) after the first order difference

图 5. 石羊河出山径流量和 SPEI (CSIC SPEI v2.4) 一阶差分相关系数的空间分布 ($p < 0.05$)

特别是夏季和年径流量呈现明显减弱的趋势。

4. 结论

1) 三条支流的各季节和年总出山径流量呈现相似的变化：在 20 世纪后半段，均呈现减少趋势，其中冬季和年总径流量的显著减少；在 21 世纪初，均呈现不同程度的增加趋势。1962~1967、1970~1976、1991~2001 年以偏枯为主；1956~1961、1976~1990、2002~2012 年以偏丰为主。

2) 春、夏和秋季的特枯水年数远高于冬季和年的特枯水年数，而各季节和年的特丰水年数相差不大。春季、秋季和冬季径流量具有显著的 2~4a 周期(1960s 和 1970s 初)，秋季径流量还具有显著的 4~6a 周期(1980s 和 1990s)。夏季和年总径流量具有显著的 2~4a 周期(1960s 和 1970s 初)和准 4a 周期(1980s 末和 1990s)。

3) 影响春季径流形成和丰枯变化的水分关键区域在河西走廊中东部；影响秋季径流形成和丰枯变化的水分关键区域在青藏高原的东北缘和河西走廊东部，核心区在 $100^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$ ， $33^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$ ；影响夏季和年径流形成和丰枯变化的关键区域在东亚夏季风北边缘，核心区在 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ ， $33^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ ，且呈东北 - 西南走向。东亚夏季风的北边缘区是石羊河地表水资源形成的关键区域。

基金项目

国家自然科学基金项目(51309134)；宁夏大学人才引进科研启动基金(BQD2012011)。

参考文献 (References)

- [1] 康尔泗, 李新, 张济世, 等. 甘肃河西地区内陆河流域荒漠化的水资源问题[J]. 冰川冻土, 2004, 26(6): 657-667.
KANG Ersi, LI Xin, ZHANG Jishi, et al. Water resources relating to desertification in the Hexi area of Gansu province, China. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(6): 657-667. (in Chinese)

- [2] 司书红, 朱高峰, 苏永红. 西北内陆河流域的水循环特征及生态学意义[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(9): 37-44.
SI Shuhong, ZHU Gaofeng and SU Yonghong. The characteristics of water cycle and its ecological functions for inland river basin in northwestern China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(9): 37-44. (in Chinese)
- [3] 李洋. 石羊河流域水循环要素变化特征研究[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
LI Yang. Study on variability of water cycle elements in Shiyang river basin. Yangling: Journal of Northwest A & F University, 2008. (in Chinese)
- [4] 郭静, 粟晓玲. 石羊河流域出山口径流序列的多时间尺度特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 213-220.
GUO Jing and SU Xiaoling. Multiple time scale characteristics of mountainous runoff series in Shiyang river basin. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(6): 213-220. (in Chinese)
- [5] 周俊菊, 师玮, 石培基, 等. 石羊河上游 1956-2009 年出山径流量特征及其对气候变化的响应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 27-34.
ZHOU Junju, SHI Wei, SHI Peiji, et al. Characteristics of mountainous runoff and its responses to climate change in the upper reaches of Shiyang river basin during 1956-2009. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2012, 48(1): 27-34. (in Chinese)
- [6] 张晓伟, 沈冰, 莫淑红, 等. 石羊河流域出山口径流演变特征[J]. 干旱区地理, 2008, 31(6): 836-842.
ZHANG Xiaowei, SHEN Bing, MO Shuhong, et al. Runoff variation characteristics of Shiyang drainage basin. *Arid Land Geography*, 2008, 31(6): 836-842. (in Chinese)
- [7] Wang, H. Q., Zhang, M. S., Zhu, H., et al. Hydro-climatic trends in the last 50 years in the lower reach of the Shiyang river basin, NW China. *Catena*, 2012, 95: 33-41.
- [8] 李伶杰, 宋松柏, 王银堂, 等. 变化环境下石羊河流域年径流频率计算[J]. 水文, 2016, 36(4): 19-25.
LI Lingjie, SONG Songbo, WANG Yintang, et al. Frequency analysis of annual runoff for Shiyanghe River in a changing environment. *Journal of China Hydrology*, 2016, 36(4): 19-25. (in Chinese)
- [9] 王文行, 段争虎, 王建伟. 气候变化对祁连山石羊河出山口径流的影响研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 469-477.
WANG Wenxing, DUAN Zhenghu and WANG Jianwei. Impact of climate change on runoff of Shiyang River in the Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 469-477. (in Chinese)
- [10] 张贱瑞, 马金珠, 齐识. 人类活动和气候变化对石羊河流域水资源的影响——基于主客观综合赋权分析法[J]. 资源科学, 2012, 34(10): 1922-1928.
ZHANG Yurui, MA Jinzhu and QI Shi. Human activities, climate change and water resources in the Shiyang basin. *Resources Science*, 2012, 34(10): 1922-1928. (in Chinese)
- [11] 周俊菊, 雷莉, 石培基, 等. 石羊河流域河川径流对气候与土地利用变化的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3788-3796.
ZHOU Junju, LEI Li, SHI Peiji, et al. Response of runoff to the climate and land use pattern changes in Shiyang river basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3788-3796. (in Chinese)
- [12] 郭静, 王宁, 粟晓玲. 气候变化下石羊河流域上游产流区的径流响应研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(12): 1-8.
GUO Jing, WANG Ning and SU Xiaoling. Response of runoff to climate change in upstream generation area of Shiyang river basin. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(12): 1-8. (in Chinese)
- [13] 张刘东. 石羊河流域灌区水资源管理与决策模型研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2015.
ZHANG Liudong. Water resources management and decision-making model research for irrigation district in Shiyang River basin. Beijing: China Agriculture University, 2015. (in Chinese)
- [14] 孙栋元, 卢书超, 李元红, 等. 基于 MIKE BASIN 的石羊河流域水资源管理模拟模型[J]. 水文, 2015, 35(6): 50-56.
SUN Dongyuan, LU Shuchao, LI Yuanhong, et al. Simulation model of water resources management based on MIKE BASIN for Shiyanghe river basin. *Journal of China Hydrology*, 2015, 35(6): 50-56. (in Chinese)
- [15] 侯迎, 郑芳, 邵议. 基于交叉小波的多尺度气候变化及其对径流的影响[J]. 水资源研究, 2016, 5(6): 564-571.
HOU Ying, ZHENG Fang and SHAO Yi. The multi-timescale climate change and its impact on runoff based on cross-wavelet transformation. *Journal of Water Resources Research*, 2016, 5(6): 564-571. (in Chinese)
- [16] 王劲峰, 廖一兰, 刘鑫. 空间数据分析教程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
WANG Jingfeng, LIAO Yilan and LIU Xin. Course of spatial data analysis. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
WEI Fengying. Modern diagnosis of climate statistics and its prediction. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese)
- [18] Torrence, C., Compo, G. P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 61-78.

- [19] 高学军, 赵昌瑞. 石羊河流域出山径流演变趋势分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2003, 39(4): 273-274.
GAO Xuejun, ZHAO Changrui. Analysis on evolution trend of runoff in Shiyang river basin. Water Resources and Hydro-power Engineering of Gansu, 2003, 39(4): 273-274. (in Chinese)
- [20] 刘普幸, 陈发虎, 靳立亚, 等. 基于胡杨年轮重建黑河下游近 100 年春季径流量[J]. 干旱区地理, 2007, 30(5): 696-700.
LIU Puxing, CHEN Fahu, JIN Liya, et al. About 100-year reconstruction of spring streamflow based on tree rings in the lower reaches of Heihe River. Arid Land Geography, 2007, 30(5): 696-700. (in Chinese)
- [21] 刘禹, 杨银科, 蔡秋芳, 等. 以树木年轮宽度资料重建湟水河过去 248 年来 6-7 月份河流径流量[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(6): 69-73.
LIU Yu, YANG Yinke, CAI Qiufang, et al. June to July runoff reconstruction for Huangshui River from tree ring width of for the last 248 years. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(6): 69-73. (in Chinese)
- [22] Webster, P. J., Torrence, C. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system. Journal of Climate, 1999, 12(8): 2679-2690.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2679:ICITEM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2679:ICITEM>2.0.CO;2)
- [23] 李栋梁, 邵鹏程, 王慧. 1951-2009 年东亚副热带夏季风北边缘位置的地域特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1511-1519.
LI Dongliang, SHAO Pengcheng and WANG Hui. The position variations of the north boundary of East Asian subtropical summer monsoon in 1951-2009. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1511-1519. (in Chinese)
- [24] Lan, Y. C., Lin, S., Hu, X. L., et al. Effect of enso cycle on the temperature, precipitation and runoff in Qilian Mountainous area, northwestern China. Journal of Desert Research, 2009, 29(2): 352-358.
- [25] 汤绪, 孙国武, 钱维宏. 亚洲夏季风北边缘研究[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
TANG Xu, SUN Guowu and Qian Weihong. The study of northern fringe of the East Asian summer monsoon region. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese)
- [26] 李栋梁, 邵鹏程, 王慧, 等. 中国东亚副热带夏季风北边缘带研究进展[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 305-314.
LI Dongliang, SHAO Pengcheng, WANG Hui, et al. Advances in research of the north boundary belt of East Asia subtropical summer monsoon in China. 2013, 32(1): 305-314. (in Chinese)
- [27] 张红丽, 张强. 中国半干旱带干旱变化及其对夏季风进退的响应[C]//第 33 届中国气象学会年会. 2016.
ZHANG Hongli, ZHANG Qiang. Change characteristics of arid and semi-arid region and its response to the advance/retreat of the summer monsoon in China. The thirty-third annual meeting of China Meteorological Society. 2016. (in Chinese)