

柏玲, 陈忠升, 王充, 等. 西北干旱区阿克苏河径流对气候波动的多尺度响应[J]. 地理科学, 2017, 37(5): 799-806. [Bai Ling, Chen Zhongsheng, Wang Chong et al. Multi-scale Response of Runoff to Climate Change in the Aksu River Basin in Arid Area of the Northwestern China. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(5): 799-806.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.05.018

西北干旱区阿克苏河径流对气候波动的多尺度响应

柏玲¹, 陈忠升^{2,3}, 王充⁴, 徐建华⁴

(1. 南昌大学经济管理学院, 江西 南昌 330031; 2. 西华师范大学国土资源学院, 四川 南充 637002;
3. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;
4. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要: 基于阿克苏河流域 1960~2010 年的气象、水文观测数据, 利用集合经验模态分解(EEMD)方法, 对研究期内阿克苏河径流时间序列进行多尺度的分析, 并探讨其不同时间尺度上的振荡模态结构特征及其对气候因子的多尺度响应。结果表明: ① 近 50 年来, 阿克苏河年径流整体上呈现出显著的非线性增加趋势, 且其变化在年际尺度上表现出准 3 a 和准 6~7 a 的周期性波动, 在年代际尺度上表现出准 13 a 和准 25 a 的周期性变化; ② 各周期分量的方差贡献率表明, 年际振荡在径流长期变化中占据主导地位, 年代际尺度在径流变化过程中也起着重要作用。重构的径流年际变化能够较为详细地描述原始径流序列在研究时期内的波动趋势, 重构的径流年代际变化则有效揭示了阿克苏河径流在不同年代丰、枯水期交替出现的状态。③ 在年际尺度上径流与气温、降水和潜在蒸发表现为不显著的正相关关系, 而在年代际尺度上, 径流量与气温和降水均表现为显著的正相关关系, 与潜在蒸发表现为显著的负相关关系, 且在年代际尺度上相关性和显著性明显强于年际尺度, 表明年代际尺度更适于评价径流对气候波动的响应。结果表明 EEMD 是一种甄别非线性趋势和尺度循环的有效方法。

关键词: 阿克苏河; 径流距平; 集合经验模态分解; 本征模函数; 多尺度响应

中图分类号: F339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2017)05-0799-08

IPCC 第五次气候变化评估报告指出: 近 130 a (1880~2012 年), 全球地表平均气温约上升了 0.85℃, 全球快速变暖已成既定事实^[1], 且变暖最快的区域为北半球中纬度地区^[2]。全球气候系统变暖将改变大气降水的时空变异特性及全球现有水循环过程, 引起水资源在时空方面的重新分配, 进而影响生态环境和社会经济的发展^[1]。中国西北干旱区地处中纬度地带的欧亚大陆腹地, 属典型的温带大陆性干旱气候, 是对全球气候变化响应最敏感的区域之一^[3], 从 20 世纪 80 年代后期开始, 该区的气候发生了明显的转变, 即由“暖干”转向“暖湿”^[4]。位于西北干旱区的塔里木河是中国最大的内陆河, 其径流主要来源于山区的冰川积雪融水和降雨, 其中冰川融水约占其总径流的 47.9%, 因而气温和降水变化都对其地表径流具有

重要影响^[5]。在汇入塔里木河干流的三源流中, 阿克苏河是唯一常年向塔里木河干流输水的源流, 补给的水量占源流总补给量的 73%, 是塔里木河补给水量最多的源流, 该河径流的变化对塔里木河干流起着至关重要的作用^[6]。因此, 在全球变暖大背景下, 研究阿克苏河流域的径流变化特征及其对气候变化的响应, 对合理配置塔里木河流域水资源, 促进流域经济和生态保护可持续协调发展, 极具现实意义。

气候-水文变化研究的关键问题之一就是趋势的检测, 这对正确估计全球大尺度或区域气候-水文变化趋势以及辨识其主要原因都具有重要的意义^[7-9]。目前, 大多研究者仍采用线性回归、Mann-Kendall 趋势检验、滑动平均或多项式、经验函数和样条函数拟合、自然正交函数(EOF)和小波

收稿日期: 2016-07-25; **修订日期:** 2016-10-24

基金项目: 荒漠与绿洲生态国家重点实验室自主项目(Y371163)资助。[Foundation: State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences (Y371163).]

作者简介: 柏玲(1987-), 女, 河南新蔡人, 讲师, 主要从事环境变化与区域可持续发展研究。E-mail: bling1987yy@163.com

通讯作者: 陈忠升, 副研究员。E-mail: chenzhs@ms.xjbu.ac.cn

函数等方法拟合水文-气候变化趋势^[10-13]。然而,已有研究表明,气候-水文系统是复杂非线性系统,用来表征气候-水文变化的因子如径流、气温和降水等的长期变化不仅是一个非线性非平稳的复杂变化过程,同时还往往伴有多尺度或准周期性的振荡^[13,14]。鉴于之前所采用的方法存在一定局限性,如何有效揭示径流变化过程的基本形态至今仍是一个亟待解决的问题。

随着信号检测技术的快速发展,Wu等^[15]提出了一种新的噪声辅助数据分析方法——集合经验模态分解(EEMD),此方法适合于对非平稳、非线性信号的检测,是对经验模态分解(EMD)^[16]的一种改进,有效解决了EMD的“模态混合”问题,可将一个非线性非平稳信号中不同尺度的振荡和趋势逐级分解开来,即按照从高频到低频的顺序形成一系列具有不同特征尺度的数据序列,即本征模函数(IMF)分量。近几年,作为目前提取信号变化趋势的最新方法之一的EEMD也开始被逐步应用到气候-水文变化的相关研究领域,并取得了一些有益的进展^[17-19]。然而,迄今为止,还鲜有文献从不同的时间尺度来探究干旱区内陆河年径流的非线性过程,尤其是典型流域气候-水文序列的年际和年代际变化特征以及总体变化趋势并未得到很好地认识。本文借助EEMD方法,利用阿克苏河流域1960~2010年气象水文观测数据,对研究期内径流时间序列进行多尺度的分析,并探讨其不同时间尺度上的振荡模态结构特征及其对气候因子的多尺度响应。

1 研究区概况

阿克苏河位于塔里木盆地的北缘,发源于天

山中段西部南麓地区,流域总面积约为 $5.0 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中国外面积为 $1.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,国内面积约为 $3.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[20],大致介于 $40^\circ 17' \text{ N} \sim 42^\circ 27' \text{ N}$ 和 $75^\circ 35' \text{ E} \sim 80^\circ 59' \text{ E}$ 之间(图1)。流域地势西北高、东南低,受地形影响,山地垂直地貌分带明显。由于该流域深居欧亚大陆腹地,远离海洋,属于温带大陆性干旱气候,总体特点是干旱少雨,蒸发量大,日照时间长,光热资源丰富。该流域多年平均气温、年降水量和潜在蒸发量分别为 $9.2 \sim 11.5^\circ \text{ C}$ 、 64 mm 和 1890 mm ^[13]。昆马力克河和托什干河是阿克苏河的两大支流,在喀拉都维汇合成为阿克苏河。由于阿克苏河径流的产流区位于山区,受人类活动影响较少,径流产生主要受山区复杂气候条件如气温、降水和潜在蒸发的影响。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文所采用的阿克苏河1960~2010年径流量为其源流区出山口水文控制站(协和拉苏与沙里桂兰克)的实测数据,由新疆塔里木河流域管理局提供。所用气温和降水数据来自代表性较好、时间序列较为完整的阿克苏河流域3个气象站(阿克苏、阿合奇与柯坪)。气象数据由国家气象中心提供,在发布前已经过时间一致性和极值检验。利用各气象站的气象观测资料,采用联合国粮农组织推荐的Penman-Monteith公式计算出潜在蒸发^[21]。

2.2 研究方法

EEMD方法^[15]是目前提取信号变化趋势的最新方法之一,通过在原数据信号中加入适当大小的白噪音来模拟多次观测的情景,在多次测量停止筛选后,取总体平均值作为EEMD分解的最终

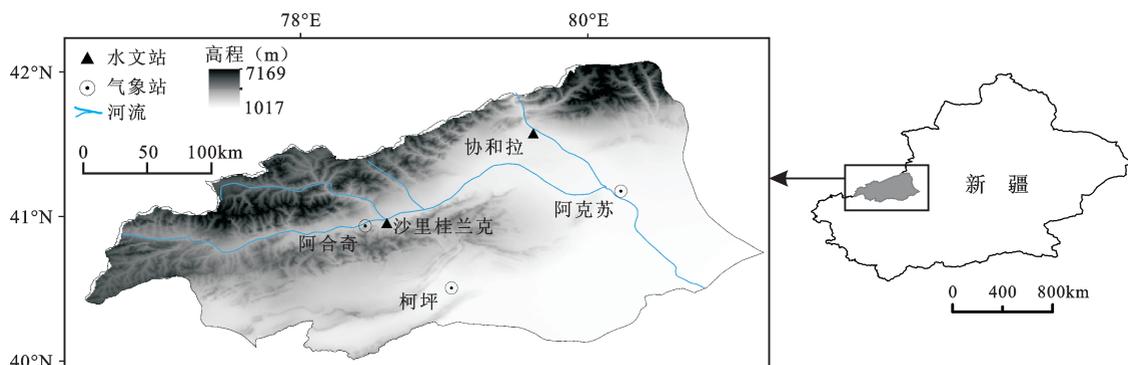


图1 阿克苏河流域位置及气象水文站分布

Fig.1 Location of the Aksu River Basin and the distribution of hydrological and meteorological stations

结果,即:

$$C_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{ij}(t)$$

式中: $C_j(t)$ 为初始信号经过EEMD变换后的第 j 个IMF分量, N 为白噪声增加数, $C_{ij}(t)$ 为第 i 次加入白噪声后分解所得的第 j 个IMF分量。Wu等^[15]指出只要添加噪声是有限的,那么噪声幅值大小对分解结果影响甚微。由此可知,使用EEMD方法不受人为经验干扰,具有较强的自适应性。

EEMD分解的各个IMF分量的信度可通过白噪声的集合扰动来进行检验^[22],详见参考文献[23,24],若分解所得IMF分量的能量相对于周期分布处于95%置信线以上,说明该IMF分量表征的周期性振荡通过了5%的显著性水平显检验,是信号序列变化的主要周期,也称强周期;反之,则说明该IMF分量表示的周期性振荡不甚显著^[18],称为弱周期。

3 径流变化特征分析及其对气候波动的响应

3.1 径流变化的趋势特征

由1960~2010年阿克苏河径流的绝对距平变化过程(图2)可以看出,近50年来,阿克苏河径流量总体上呈现出明显的波动性增加趋势;20世纪90年代中期,径流量出现了由相对偏枯至偏丰的转折,其中在1960~1993年的偏枯期,尽管径流量整体上呈微弱减少态势,但仍经历了一个“增-减-增-减”的周期性波动变化过程,而在1994~2010年期间,阿克苏河径流量总体偏多,处于偏丰期,但各年径流量存在较大差异,径流量偏多年份与偏少年份相差高达 $38.62 \times 10^8 \text{m}^3$,属极端水文事件

高发期。此外,由图2径流的5 a移动平均曲线可以看出,阿克苏河径流的变化趋势并非是线性的,而是呈现出较强的非线性和非平稳的波动性特征。因此,线性分析并不能反映阿克苏河径流的真实变化状况,这就需要借助于处理非平稳、非线性信号的方法来进行进一步揭示阿克苏河径流的复杂性变化过程。

3.2 径流的多尺度变化

利用EEMD方法对阿克苏河1960~2010年径流距平时间序列进行分解,可得到4个IMF分量(C_{1-4})和一个趋势项 R ,结果如图3所示。4个IMF分量依次反映了径流从高频到低频不同时间尺度(准周期)的波动状况,最后得到的 R 表示径流随时间变化的总体趋势。EEMD分解的各个IMF分量都具有独立性和明确的物理意义,不会出现混频现象,它们各自反映了原始信号中固有的不同时间尺度的振荡(即准周期变化),这种振荡强度的非均匀变化反映了水文系统内部动力过程和外部强迫共同作用的非线性关系。为揭示分解得到的各IMF分量所表征的准周期振荡的强弱,采用显著性检验来判断,结果如表1所示。 C_2 和 C_4 未通过10%的显著性水平检验,说明其所对应的周期在径流变化过程表现的较弱。 C_1 和 C_3 分别通过了10%和5%的显著性水平检验,其所包含的具有实际物理意义的信息相对较多,说明其对应的振荡周期为径流时间序列的主要振荡周期。综合图3和表1可知,阿克苏河1960~2010年径流量变化具有相对稳定的准周期性,表现为在年际尺度上,具有准3 a(C_1)和准6~7 a(C_2)的周期变化,在年代际尺度上,具有准13 a(C_3)和准25 a(C_4)的周期变化。

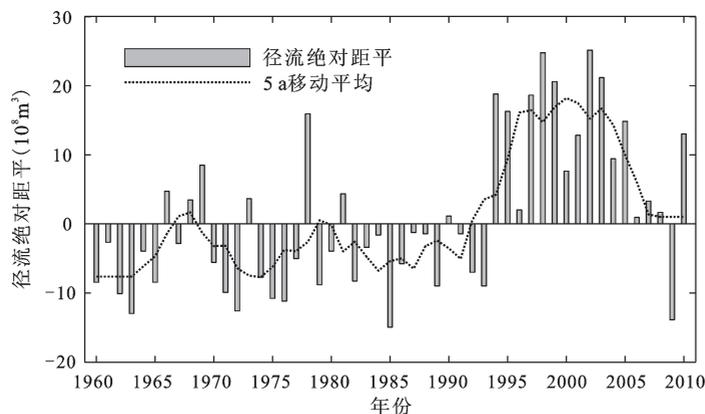


图2 1960~2010年阿克苏河径流绝对距平变化

Fig.2 Change in runoff absolute anomaly of the Aksu River in 1960-2010

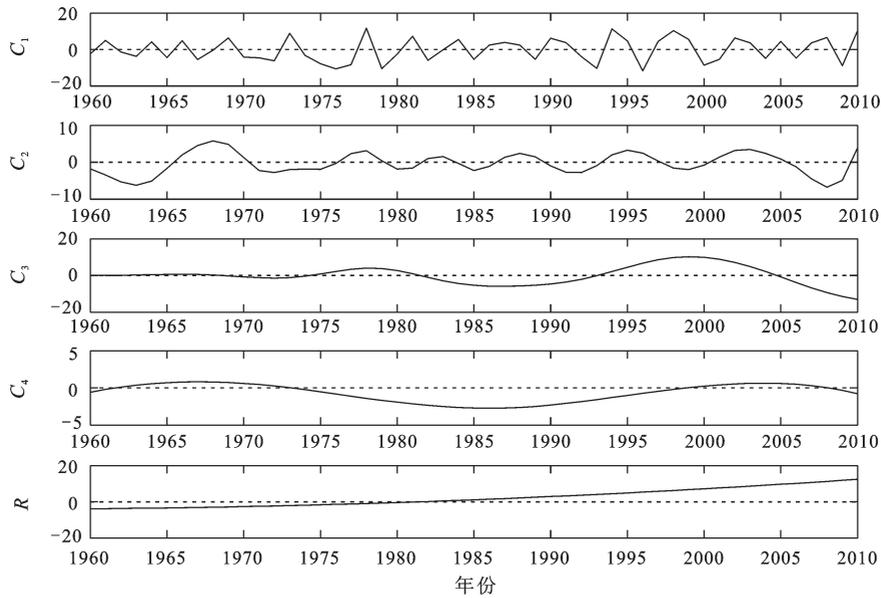


图3 阿克苏河1960~2010年径流距平EEMD分解结果

Fig.3 The results of EEMD decomposition of runoff anomaly for the Aksu River in 1960-2010

尽管EEMD分解的个别IMF分量并未通过显著性检验,但其对原始数据序列波动状况仍有一定的贡献。结合图3和表1可以看出,阿克苏河径流量EEMD分解的分量 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 分别表示的准3 a、6~7 a、准13 a和准25 a的周期性变化,它们的方差贡献率分别为40.90%、8.41%、25.68%和23.60%。具体来看, C_1 分量的振幅呈现出减小-增大-减小的趋势波动特征,且在20世纪70年代和90年代径流的振幅明显高于其它时段; C_2 分量在60年代和70年代径流振幅较大; C_3 分量90年代中期以前的振幅相对较小,之后振幅相对较大; C_4 分量在1962~1973年和1999~2008年2个时段处于偏多状态,其余时期处于偏少状态。对于EEMD趋势项 R ,它的方差贡献率高达23.60%,其波动变化反映出阿克苏河径流量在1960~2010年总体上呈现出近似线性但实为非线性的显著增多趋势。此外,通过表1还可看到径流年际振荡(C_{1-2})对径流总体变化特征的影响程度(49.31%)要明显高于年代际振荡(C_{3-4})的影响程度(27.08%),这一发现对进一步剖析径流变化成因具有重要的指示作用。

年际和年代际变化是气候-水文系统中2个重要的时间尺度,将EEMD对阿克苏河分解结果重构到年际和年代际尺度上,并对比原始径流绝对距平和趋势项序列(图4)。其中年际变化是由代表年际本征模函数 C_1 与 C_2 相加得到,可认为是由

表1 径流距平各分量的周期、显著性水平及其方差贡献率

Table 1 Periods, significant test and the variance contribution rates of Intrinsic Mode Function (IMF) components for runoff anomaly

IMF 分量	C_1	C_2	C_3	C_4	R
周期(a)	3	6~7	13	25	
显著性检验	90%~95%	< 50%	> 95%	< 50%	
贡献率(%)	40.90	8.41	25.68	1.40	23.60

滤掉大尺度振荡而得;年代际变化是由年代际本征模函数 C_3 、 C_4 与趋势项 R (包含超过研究时段更长时间尺度的波动)相加而得。可以看出,重构的年际变化与原始径流距平序列的变化趋势基本是一致的,能较好地描述原始径流距平序列在研究时期内的波动状况,重构的年代际变化在整个研究时段上呈现出增多与减少相间但整体显著递增的变化趋势,可以有效揭示阿克苏河径流在不同年代丰、枯水期交替出现的状态。就阿克苏河而言,径流年际和年代际波动能从不同尺度上反映原始径流序列在研究时期内的波动状况,且年际和年代际变化具有明显的互相调制作用。从方差贡献率来看,阿克苏河年际变化约占49.31%,而年代际变化为50.68%,年代际变化对径流整体变化的贡献略高于年际变化。可见,在对气候水文时间序列进行分析时,绝不能忽视年际和年代际这2个非常重要的时间尺度。

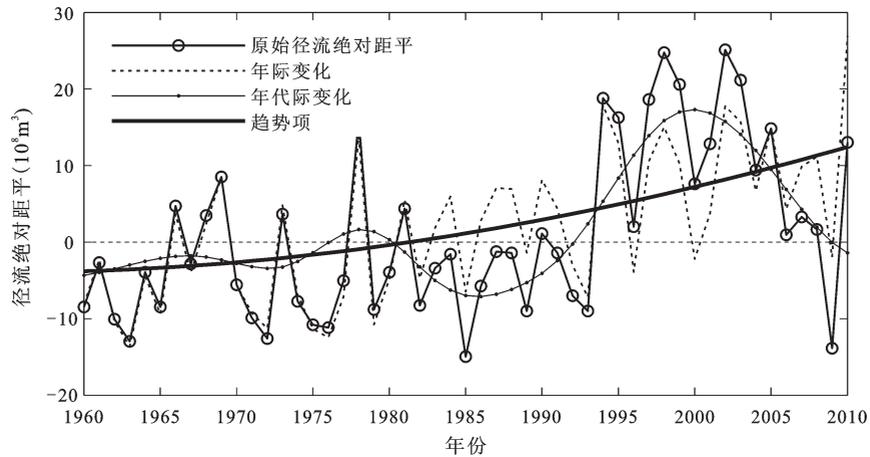


图4 年际和年代际径流变化与原始径流绝对距平对比

Fig.4 Inter-annual and interdecadal variations and comparisons with original runoff absolute anomaly

3.3 径流对气候变化的多尺度响应

在全球气候变暖背景下,阿克苏河流域年径流量变化主要受局部气候因子气温、降水和潜在蒸发的影响^[13,25]。通过对阿克苏河径流量同期的气温进行多尺度分解发现,阿克苏河流域气温整体上呈现上升趋势,且其变化在年际尺度上存在准3 a和准6 a的周期性波动,在年代际尺度上存在准10 a和准22 a的周期性变化。与同期的气温变化过程相比,阿克苏河径流量变化与其表现为相同的年际尺度特征和相似的年代际尺度特征,且在变化趋势上具有一致性。同样,对阿克苏河1960~2010年年降水量进行多尺度分解发现,该流域的降水变化整体上呈增加趋势,且其变化在年际尺度具有准3 a和准6 a的周期,在年代际尺度上具有准10 a和准33 a的周期变化。由此可以看出,阿克苏河流域年降水量的变化与同期的年径流量变化具有相似的年际尺度特征,但在年代际尺度上存在一定的差异。不同于气温和降水,EEMD分解后的潜在蒸发总体表现为下降趋势,其变化在年际尺度上存在准3~4 a和准7 a的周期性波动,在年代际尺度存在准43~44 a的周期性变化。通过对比阿克苏河流域径流与气温、降水和潜在蒸发的趋势项(图5)发现,阿克苏河径流变化与其影响因子潜在蒸发具有相反的变化趋势,与气温和降水在变化趋势上具有一致性,但在变异时间点上(正负距平的转折点)存在差别,结合图4和图5所示,阿克苏河径流在20世纪70年代末80年代初由负相位转向正相位,而气温、降水和潜在蒸发

却在80年代中后期发生了转折,说明阿克苏河径流量变化对区域气候具有一定的响应,但在变异时间点上并不完全同步。

为进一步定量分析径流对气候因子的响应,首先分别重构了年际和年代际气温、降水和潜在蒸发的变化,其中年际气候因子变化是由表征气温、降水和潜在蒸发各自的年际本征模函数 C_1 与 C_2 相加得到,而年代际气候因子变化则由年代际本征模函数 C_3 、 C_4 与趋势项 R 相加而得;其次,为便于比较,采用最大值最小值标准化方法将不同尺度的径流量、气温、降水和潜在蒸发进行标准化,最后采用相关分析来进一步揭示它们的定量关系。通过对阿克苏河径流量与气温、降水和潜在蒸发进行多尺度相关分析(图6),结果发现在年际尺度,尽管径流与气温、降水和潜在蒸发都表现为正相关关系,但这种相关关系并不显著,这可能与气候-水文序列小尺度的振荡(高频)包含了较多的系统外界噪声有关。而在年代际尺度上,径流量与气温和降水都表现为显著的正相关关系,与潜在蒸发表现为显著的负相关关系,且在年代际尺度上相关性明显强于年际尺度,表明年代际尺度更适于评价径流对气候波动的响应。

此外,由图6可以看出,无论是在年际尺度还是年代际尺度上,气温和径流的相关性都要强于降水和潜在蒸发,说明相较于降水和潜在蒸发,气温是影响阿克苏河径流量变化的决定性因素,这与阿克苏河径流以冰川融水补给为主有关^[26],气温的升高可通过影响冰川积雪的消融间接作用于径流。

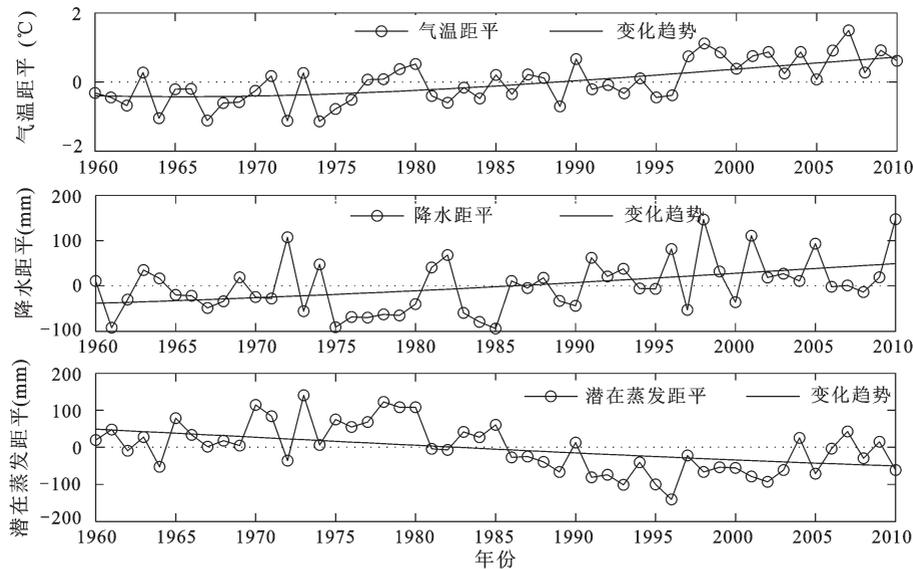


图5 EEMD分解的1960~2010年阿克苏河流域气温、降水和潜在变化趋势

Fig.5 The temperature, precipitation and potential evaporation change tend decomposed by EEMD of the Aksu River Basin in 1960-2010

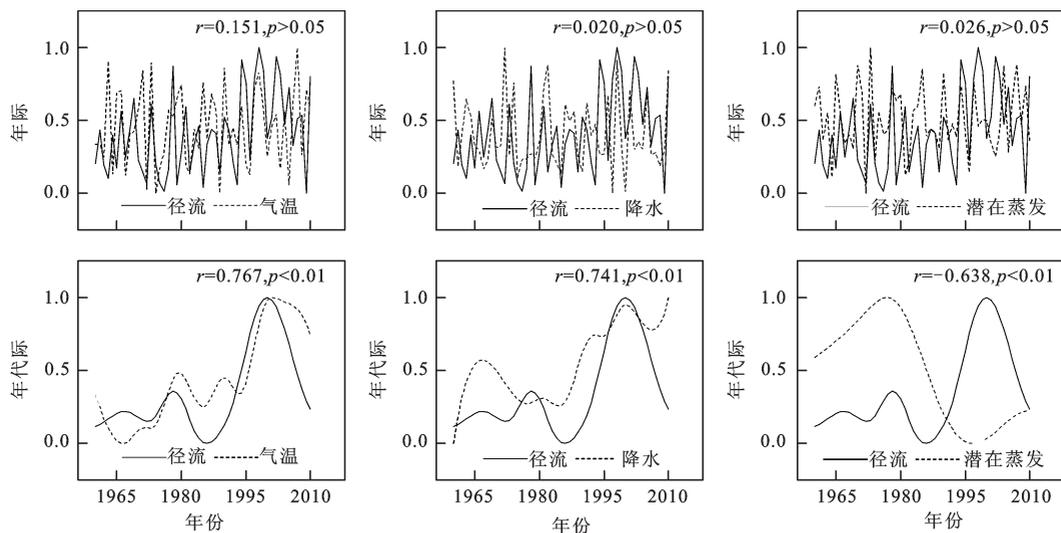


图6 阿克苏河年径流量和气候因子在不同尺度上的相关关系

Fig.6 Correlations between runoff and climate factors for the Aksu River at different time scales

4 结论

阿克苏河径流在年际尺度上主要表现为准3 a和准6~7 a的强周期性振荡,而在年代际尺度上则显示出准13 a和准25 a的弱周期性变化,且径流在整个研究时段内表现出一个近似线性但实为非线性的增多变化过程;重构的径流年际变化较好地刻画了径流原始距平序列在研究时期内的波动细节,而年代际变化则有效地揭示出阿克苏河径流在不同年代丰、枯水期交替出现的状况;此外,还发现径

流年际振荡在径流长期变化中占据主导地位。

阿克苏河径流对同期气温、降水和潜在蒸发在年际和年代际尺度上的响应存在明显差异。具体而言,在年际尺度上,径流与气温、降水和潜在蒸发均表现为不显著的正相关关系,而在年代际尺度上,径流与气温和降水则为显著的正相关关系,与潜在蒸发却呈现出显著的负相关关系,说明阿克苏河径流对气候波动的响应主要表现在年代际尺度上。这一发现,可为西北干旱区内陆河流域后续相关研究工作提供新的思路和手段。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Ji F, Wu Z H, Huang J P et al. Evolution of land surface air temperature trend[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4: 462-466.
- [3] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295-1304. [Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295-1304.]
- [4] Shi Yafeng, Shen Yongping, Kang Ersi et al. Recent and future climate change in northwest China[J]. *Climatic Change*, 2007, 80(3/4): 379-393.
- [5] 王国亚, 沈永平, 苏宏超, 等. 1956-2006年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(4): 562-568. [Wang Guoya, Shen Yongping, Su Hongchao et al. Runoff changes in Aksu River Basin during 1956-2006 and their impacts on water availability for Tarim River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(4): 562-568.]
- [6] Li Hongjun, Jiang Zhihong, Yang Qing. Association of North Atlantic oscillations with Aksu river runoff in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(1): 12-24.
- [7] Sun Xian, Lin Zhenshan, Cheng Xiaoxia et al. Regional features of the temperature trend in China based on Empirical Mode Decomposition. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(2): 166-176.
- [8] Xu Changchun, Chen Yaning, Yang Yuhui et al. Hydrology and water resources variation and its response to regional climate change in Xinjiang. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 599-612.
- [9] 柏玲, 陈忠升, 王祖静, 等. 1980-2013年新疆高空大气温度变化特征[J]. *地理科学*, 2016, 36(3): 458-465. [Bai Ling, Chen Zhongsheng, Wang Zujing et al. Upper-air temperature change of Xinjiang during 1980-2013. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(3): 458-465.]
- [10] 张延伟, 葛全胜, 姜逢清, 等. 北疆地区1961-2010年极端气温事件变化特征[J]. *地理科学*, 2016, 36(2): 296-302. [Zhang Yanwei, Ge Quansheng, Jiang Fengqing et al. Evolution characteristics of the extreme high and low temperature event in North Xinjiang. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(2): 296-302.]
- [11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. *Modern climatic statistical diagnosis and forecasting technology(2nd)*. Beijing: China Meteorological, 2007.]
- [12] 张健, 李同昇, 张俊辉, 等. 1933-2012年无定河径流突变与周期特征诊断[J]. *地理科学*, 2016, 36(3): 475-480. [Zhang Jian, Li Tongsheng, Zhang Junhui et al. The runoff abrupt change and periodic characteristics of the Wudinghe River during 1933-2012. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(3): 475-480.]
- [13] Xu Jianhua, Chen Y, Lu Feng et al. The nonlinear trend of runoff and its response to climate change in the Aksu river, western China[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(5): 687-695.
- [14] 孙鹏, 张强, 白云岗, 等. 塔里木河流域径流量周期特征及其影响因素[J]. *地理科学*, 2013, 33(2): 216-222. [Sun Peng, Zhang Qiang, Bai Yungang et al. Periodic properties of runoff changes of the Tarim River Basin: possible causes and implications. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(2): 216-222.]
- [15] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [16] Huang N E, Shen Z, Long S R et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [17] Wu Zhaohua, Huang N E, Wallace J M et al. On the time-varying trend in global-mean surface temperature[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37(3/4): 759-773.
- [18] 邵骏, 吕孙云, 钱晓燕, 等. 基于总体经验模态分解的水文序列多尺度分析[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2011, 39(11):105-108. [Shao Jun, Lv Sunyun, Qian Xiaoyan et al. Multi-scale analysis of hydrological series using ensemble empirical mode decomposition. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*. 2011, 39(11): 105-108.]
- [19] 刘天虎, 刘天龙. 集合经验模态分解下中国新疆降水变化趋势的区域特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2015, 9(4): 17-24. [Liu Tianhu, Liu Tianlong. Regional features of precipitation variation trends over Xinjiang in China by the ensemble empirical mode decomposition method. *Desert and Oasis Meteorology*, 2015, 9(4): 17-24.]
- [20] 蒋艳, 周成虎, 程维明. 新疆阿克苏河流域年径流时间序列特征分析[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(1): 87-96. [Jiang Yan, Zhou Chenghu, Cheng Weiming. Analysis on the characteristics of runoff time series in Akesu basin. *Progress in Geography*, 2005, 24(1): 87-96.]
- [21] Allen R G, Pereira L S, Raes D et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements[M]. Italy: FAO, 1998 .
- [22] Wu Z H, Huang Ne. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. *Proceedings of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2004, 460(246): 1597-1611.
- [23] 薛春芳, 侯威, 赵俊虎, 等. 集合经验模态分解在区域降水变化多尺度分析及气候变化响应研究中的应用[J]. *物理学报*, 2013, 62(10): 496-503. [Xue Chunfang, Hou Wei, Zhao Junhu et al. The application of ensemble empirical mode decomposition method in multiscale analysis of region precipitation and

- its response to the climate change. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(10): 496-503.]
- [24] 柏玲, 陈忠升, 赵本福. 集合经验模态分解在长江中下游梅雨变化多尺度分析中的应用 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(3):82-88. [Bai Ling, Chen Zhongsheng, Zhao Benfu. Application of ensemble empirical mode decomposition method in multiscale analysis of Meiyu in Middle-Lower Reaches of Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(3):82-88.]
- [25] Li Baofu, Chen Y, Xiong Heigang. Quantitatively evaluating the effects of climate factors on runoff change for Aksu River in northwestern China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 123(1/2): 97-105.
- [26] 杨鹏, 陈亚宁, 李卫红, 等. 2003-2012年新疆塔里木河径流量变化与断流分析[J]. *资源科学*, 2015, 37(3): 485-493. [Yang Peng, Chen Yaning, Li Weihong et al. Analysis of changes in runoff and drying in the Tarim River from 2003 to 2012. *Resources Science*, 2015, 37(3): 485-493.]

Multi-scale Response of Runoff to Climate Change in the Aksu River Basin in Arid Area of the Northwestern China

Bai Ling¹, Chen Zhongsheng^{2,3}, Wang Chong⁴, Xu Jianhua⁴

(1. *School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China*; 2. *School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637002, Sichuan, China*; 3. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China*; 4. *The Key Lab of Geographic Information Science, Chinese Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China*)

Abstract: On the basis of the hydrological and meteorological data in the Aksu River Basin during 1960-2010, the multi-scale characteristics of runoff variability were analyzed using the ensemble empirical mode decomposition method (EEMD), and the aim is to investigate the oscillation mode structure characteristics of runoff change and its response to climate fluctuation at different time scales. Results indicated that in the past 50 years, the overall runoff of Aksu River in northwestern China has exhibited a significant non-linear upward trend, and its changes obviously manifested quasi-3 and quasi-6-7 years at inter-annual scale and showed quasi-13 and quasi-25 years at inter-decadal scale. Variance contribution rates of each component showed that the inter-annual change held a dominant position in the overall runoff change, and the inter-decadal change also played an important role in the overall runoff change for the Aksu River. The reconstructed inter-annual variation could describe the fluctuation state of original runoff during the study period; the reconstructed inter-decadal variability effectively revealed that the runoff for the Aksu River changed over the years, namely the state of abundance and low water period appear alternately. In addition, we found that runoff has a positive correlation to precipitation, temperature and potential evaporation (PET) at the inter-annual scale, but not significant in statistics. The runoff has a significant positive correlation to precipitation and temperature whereas a negative correlation to PET at the inter-decadal scale, furthermore, they are more significant and relevant at inter-decadal scale, indicating that the inter-decadal scale is more suitable for investigating the responses of runoff dynamics to climate fluctuation. Meanwhile, the results also suggested that EEMD is an effective method to distinguish the non-linear trend from multi-scale variability of non-linear and non-stationary signal and can be helpful to deepen the understanding of the multi-scale characteristics for runoff in arid area of the northwestern China.

Key words: the Aksu River; runoff anomaly; ensemble empirical mode decomposition; intrinsic mode function (IMF); multi-scale response