

引用格式: 柏玲, 刘祖涵, 陈忠升, 等. 开都河源流区径流的非线性变化特征及其对气候波动的响应[J]. 资源科学, 2017, 39(8): 1511–1521. [Bai L, Liu Z H, Chen Z S, et al. Runoff nonlinear variation and responses to climate fluctuation in the headwater region of the Kaidu River[J]. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1511–1521.] DOI: 10.18402/resci.2017.08.08

开都河源流区径流的非线性变化特征 及其对气候波动的响应

柏玲¹, 刘祖涵^{2,3}, 陈忠升⁴, 徐建华⁵

(1. 南昌大学经济管理学院, 南昌 330031;

2. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022;

3. 南昌工程学院江西省水信息协同感知与智能处理重点实验室, 南昌 330099;

4. 西华师范大学国土资源学院, 南充 637002; 5. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241)

摘要: 非线性是现代水文学研究的重要前沿问题之一, 对揭示水文系统变化规律及其复杂性具有重要意义。基于开都河源流区气象和水文站 1960–2012 年实测数据, 采用集合经验模态分解方法, 对研究期内开都河年径流时间序列进行多尺度分析, 并探讨其不同时间尺度上的非线性变化特征及其对气候因子的多尺度响应。研究表明: ①近 50 年来, 开都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 2~3a 和准 4~5a 的周期性波动, 在年代际尺度上表现出准 10~11a 和准 26~27a 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; ③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整个研究时段的波动状况, 二者在变化趋势上基本是一致的; 重构的径流年代际变化则有效揭示了开都河径流量在 1995 年出现了由负距平到正距平的转折; ④在重构的年际尺度和年代际尺度上, 降水与径流的相关性都强于气温、潜在蒸发与径流的相关性, 说明降水是影响开都河径流变化的决定性因素; 而在年代际尺度上降水、气温和潜在蒸发的相关性都要明显强于年际尺度, 表明年代际尺度是评价该区径流对气候波动响应过程的较佳尺度。

关键词: 开都河源流区; 径流; 非线性变化; 集合经验模态分解; 气候波动; 多尺度响应

DOI: 10.18402/resci.2017.08.08

1 引言

中国是世界上人均水资源最匮乏的国家之一, 全国水资源量调查报告显示, 中国人均水资源量约为 2200m³, 相当于世界人均水资源量 30% 左右^[1]。而对于占国土面积 1/4 的西北内陆干旱区来说, 人均水资源量尚不到全国平均水平的一半, 水资源短缺已经成为西北干旱区工农业生产、经济发展和生态环境改善的制约因素, 这一问题在新疆表现得尤为突出^[2]。开都河作为新疆天山南坡水量最丰富的

河流之一, 其水量的变化不仅与下游焉耆盆地、博斯腾湖、孔雀河流域的生态环境变化息息相关, 还承担着向塔里木下游紧急生态输水的任务^[3]。可以说, 开都河的水源关系到整个新疆巴音郭楞蒙古自治州生态环境建设、农业灌溉、工业发电、排污和地下水补给^[4], 是极其重要的生态和生命源。

政府间气候变化专门委员会(IPCC)在第五次评估报告中指出, 相对于 1961–1990 年, 1880–2012 年全球地表平均气温约上升了 0.85℃, 全球快速变

收稿日期: 2016–12–20; 修订日期: 2017–03–05

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2016M600515); 江西省水信息协同感知与智能处理重点实验室开放基金项目(2016WICSIP012); 江西省科技厅重点研发计划项目(20161BBF60061)。

作者简介: 柏玲, 女, 河南新蔡人, 博士, 讲师, 主要研究方向为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, E-mail: chenzhs@ms.xjb.ac.cn

暖已是一个不争的事实^[5],且变暖最快的区域为北半球中纬度地区^[6]。气候变暖可加速水分循环,改变水资源的时空分布,加剧极端水文事件的发生,进而影响生态环境和社会经济发展^[5]。已有研究^[7]表明,过去近30年(1980-2010年),全球气候变暖导致中国北方地区旱情加重,南方洪涝灾害增加,水生态环境总体恶化,据推测未来气候变化不仅对中国“南涝北旱”的分布格局影响加剧,还会对水资源配置相关工程产生不利,给社会经济的可持续发展带来严重的影响。此外,气候变化加剧了水资源的不确定性,且在中国西北干旱区表现得尤为明显^[8],如20世纪80年代以来,西北干旱区的极端水文事件在范围和频率上都呈显著增加趋势^[9],而极端水文事件的增加势必又导致水循环过程改变,水文波动性增加,水资源不确定性和脆弱性加大。因此,许多学者采用不同的方法开展了有关西北干旱区内陆河流水文过程的变化趋势及其对气候变化响应的研究^[10-15],目前对西北干旱区径流的变化趋势检测多集中在线性变化趋势上^[10-12],为进一步认识西北干旱区气候-水文的变化趋势提供了一定的借鉴。然而,气候-水文系统作为一个复杂的非线性系统^[13],包括气温、降水和径流在内的众多气候因子的长期变化大都是一个非线性、非平稳的复杂变化过程,并伴有多种尺度或周期性的振荡,因而线性分析方法并未合理而准确地诊断出气候-水文系统的自然变率和阶段性变化的非线性特征。为此,Xu等通过小波分解和重构的方法分析了开都河径流变化的多尺度波动特征,发现开都河径流1957-2008年呈现非线性变化趋势,并且它们的趋势变化具有尺度依赖性^[14],但该研究并未有效分离出径流的尺度循环和趋势特征,这主要是由于小波分解的小波基和分解层数需要人为设定,缺乏自适应性^[16]。截止目前,学术界仍面临着对水文以及气候变化过程基本形态认识的难题。

伴随着近年来信号检测技术的进步,关于信号处理的方法也在不断发展和改进,针对经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的“模态混合”和其他缺乏自适应性的非线性分解方法的不足,Wu等提出了一种新的时间序列信号处理方法,即集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode

Decomposition, EEMD)^[17]。该方法是对EMD^[18]的新发展,不仅有效改进了EMD的“模态混合”问题,还可自适应地将不同的尺度振荡和趋势从一个非线性非平稳信号中逐级分离出来,得到该信号的本征模函数(Intrinsic Mode Function, IMF),也就是形成一系列从高频到低频具有不同特征尺度的数据序列。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,在气温^[19,20]、降水^[21,22]、干旱指数^[23,24]、径流变化^[25]等方面,从多时间尺度(准周期)视角取得了一些有益的认识。然而,目前还鲜有文献从多时间尺度来探究干旱区内陆河年径流的非线性变化过程,在年际(inter-annual)和年代际(inter-decadal)尺度上解析径流对气候要素响应的成果更是少见。因此,本文借助EEMD方法,基于开都河源流区1960-2012年水文和气象实测数据,分析开都河径流的非线性变化特征,探讨径流在不同时间尺度上对气候因子响应程度,进而揭示径流对气候变化的复杂响应过程,期冀能为西北干旱区相关研究提供有益借鉴。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

开都河流域地处新疆巴音郭楞蒙古自治州境内,位于天山南麓焉耆盆地北缘,流域面积约2.2万km²。开都河发源于天山中段,流经天山南坡,最终流入博斯腾湖,是焉耆境内的主要河流。开都河源流区是指大山水文站以上的区域(图1),介于82°58'E-86°55'E和41°30'N-43°21'N之间,集水面积约为18 827km²。由于居住在开都河源流区的人口规模比较小,该区域受到人类活动的影响较小,主要受气候变化的影响^[26]。该流域山区多年降水量约为332mm,且主要集中在6-8月份,蒸发皿蒸发量大于1100mm,多年平均气温只有-4.6℃,极端最低温达-48.1℃,冰雪覆盖的时间一般从当年的11月份持续到第二年的3月份,持续天数多达139.3d,最大平均雪深达12cm^[14]。

2.2 数据来源

(1)1960-2012年开都河径流量数据来自其源流区出山水文站点一大山口的观测数据,由新疆塔里木河流域管理局提供。

2017年8月

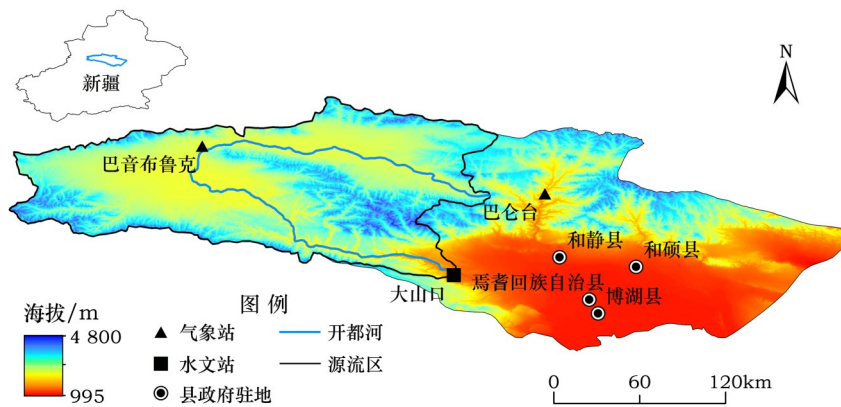


图1 开都河流域位置及气象和水文站点分布

Figure 1 Location of the Kaidu River Basin and the distribution of meteorological stations and hydrological stations

(2) 1960-2012年开都河源流区巴音布鲁克和巴仑台2个气象站的降水、气温数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。此外,1960-2012年潜在蒸发数据是根据巴音布鲁克和巴仑台气象站的气象观测资料,采用联合国粮农组织推荐的Penman-Monteith公式计算所得^[27]。

2.3 研究方法

EEMD方法是当前提取信号变化趋势的最新方法之一,该方法模拟多次观测值时是通过在原数据信号中加入适当大小的白噪音来进行的,在多次测量停止筛选后取总体平均值,能够很好地对非线性、非平稳信号的复杂变化进行诊断^[17]。其核心在于其引入了白噪声扰动并进行集合平均,最终分解不仅保留了原信号的信息,还克服了EMD方法存在模态混叠问题,从而使得最终分解的每个IMF分量具有明确的物理意义和独立性^[21]。EEMD分解的主要步骤有:

(1) 在原始信号序列 $x(t)$ 中加上第 i 次给定振幅的白噪声序列 $n_i(t)$:

$$x_i(t) = x(t) + n_i(t) \quad (1)$$

(2) 对信号 $x_i(t)$ 进行 EMD 分解,得到一系列表示不同特征尺度的 IMF 分量;

(3) 重复前两步操作过程,每次加入相同振幅的新生白噪声序列,共重复 N 次;

(4) 对 N 次分解得到所有 IMF 分量后求集合平均,结果可以表示为:

$$C_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{ij}(t) \quad (2)$$

式中 $C_j(t)$ 为原始信号经过 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 等指出一般而言噪声幅值大小对分解结果影响甚微,只要在 EEMD 分解过程中添加噪声是有限的^[17]。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和分解便利性。

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,详见相关参考文献^[21,25],如果分解所得的某个 IMF 能量相对于周期分布处于 95% 置信线以上,则说明该 IMF 分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^[25],称为弱周期。

3 结果与分析

3.1 径流的趋势变化特征

图2显示,1960-2012年开都河径流距平总体呈显著增加趋势,线性增加速率为1.73亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ 。总体来看,开都河径流量在1995年出现了由负距平到正距平的转折,在1995以前径流量相对偏少,开都河整体偏枯,1996-2012年则相对偏多,开都河整体偏丰,这与Chen等^[28]利用Mann-Kendall突变检验对开都河源流区径流变化检测所得结果是一致的。分时段来看,20世纪60年代至70年代初,径流呈波动上升趋势,但变化幅度不大;1971-1986年期间,开都河径流呈减少趋势;径流量在该时期相对偏

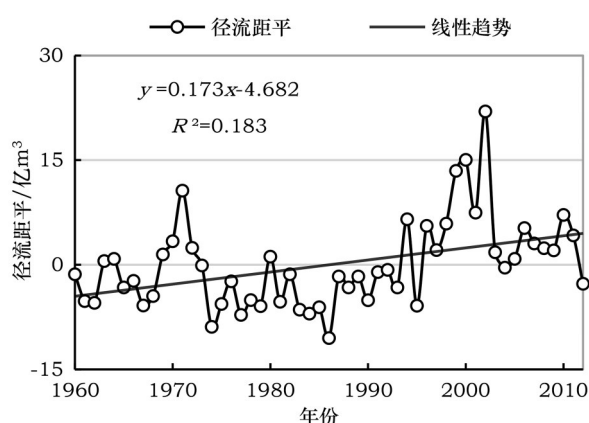


图2 1960–2012年开都河径流距平变化

Figure 2 Runoff anomaly change of Kaidu River from 1960 to 2012

少,处于枯水期;1986-2002年期间,径流量呈明显增加趋势,进入明显的丰水期,且在2002年径流量达到极大值。2002-2012年期间,尽管径流变化呈微弱的下降趋势,但与20世纪90年代中期以前相比,开都河仍处于偏丰期。显然,径流变化表现出非线性的波动上升趋势,并非是线性和平稳的变化,因而采用线性拟合的方法并不能有效揭示径流的阶段性变化特征。

3.2 径流的多尺度变化特征

EEMD是目前适用于非线性、非平稳序列信号分析的一种新方法,能够很好地提取趋势和周期信息^[22]。因此,基于开都河1960-2012年径流距平数据,采用EEMD方法进行分解后得到4个IMF分量和1个趋势分量(图3)。*IMF1-IMF4*分量依次反映了原始径流距平序列由高频到低频的振荡变化,对应于不同时间尺度(准周期)的波动特征,最后得到的剩余趋势项(*RES*)则表示径流在整个研究期内随时间变化的总体演变趋势。为进一步判断EEMD的分解效果,本文借助广泛应用于气候变化检测的小波变换对开都河径流距平进行多尺度分解,发现选择不同的小波基和分解层数,分解结果会表现出巨大的差异(图略),说明小波变换不具有自适应性。与小波变换相比,EEMD方法具有较强的灵活性和自适应性,分解过程也较小波变换简便,各分量能清晰地刻画信号在不同时间尺度上的变化特征。

一般情况下,EEMD分解的各个IMF分量都具有明确的物理意义和独立性,不会出现混频现象,

它们分别反映了原始径流序列中内在的不同时间尺度(周期性)的振荡变化。而衡量这种不同特征尺度所表征的周期性振荡强弱,可采用显著性检验来判断,结果如表1所示,*IMF1*所表征的准2~3a周期未通过5%的显著性水平检验,即径流具有不明显的准2~3a周期性振荡。而*IMF2*、*IMF3*和*IMF4*所表征的准周期振荡通过了5%的显著性水平检验,说明径流具有显著的准4~5a、准10~11a和准

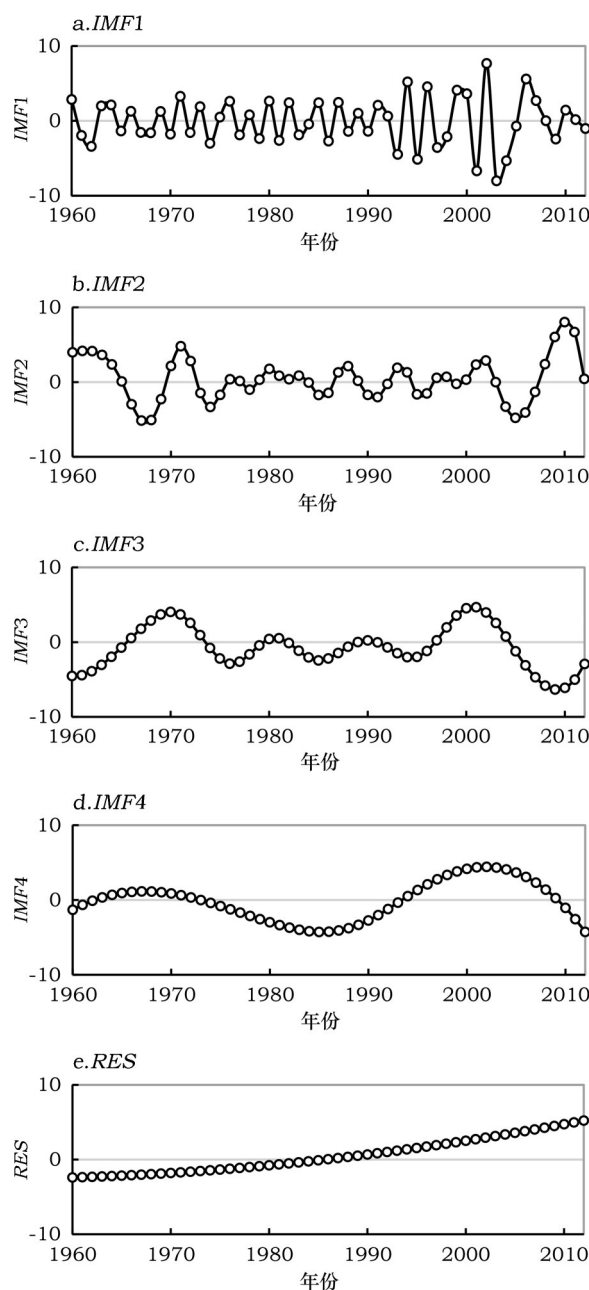


图3 1960–2012年开都河径流距平各IMF分量及趋势项

Figure 3 The IMF and trend components of runoff anomaly for Kaidu River from 1960 to 2012

2017年8月

**表1 开都河径流距平各IMF分量的周期、方差贡献率
及其与径流距平序列的相关性**

Table 1 Periods and variance contribution rates of IMF components
and their correlations with the runoff anomaly series for Kaidu River

	周期 /a	显著性检验 /%	方差贡献率 /%	与径流距平的 相关系数
IMF1	2.65	80~90	25.96	0.49**
IMF2	4.82	> 95	21.26	0.32**
IMF3	10.60	> 95	20.71	0.37**
IMF4	26.58	> 95	18.31	0.63**
RES			13.76	0.46**

注:**、*分别表示在0.01、0.05水平上显著。

26~27a的周期性振荡。综合图3和表1可以看出,开都河径流50多年来变化在年际尺度上(包括小于10a以下的准周期)存在准2~3a、准4~5a的周期振荡,在年代际尺度上(包括大于10a小于100a的准周期)存在准10~11a和准26~27a的周期变化,这些振荡周期不仅包含了气候-水文系统外在强迫的周期变化,同时还包含气候-水文系统的非线性反馈作用。对流层准2a周期性振荡(TBO)是大气环流年际变化的基本特征^[29],本文研究结果表明开都河径流也具有与TBO类似的振荡周期;径流4~5a周期性振荡与厄尔尼诺现象(ENSO)和北大西洋涛动(NAO)相应;径流准10~11a周期与Qian等^[30]研究得出的千年全球平均气温变化周期一致,是自然界外强迫作用的结果,与太阳活动密切相关,如准11a的太阳黑子活动周期;径流准26~27a周期与太平洋年代际震荡(PDO)20~30a冷暖相位交替的准周期^[31]相对应。近期,孙鹏等^[32]对塔里木河流域径流量周期特征进行分析发现,塔河流域年径流量存在2~6a左右的显著周期变化,与开都河径流年际尺度上的准周期变化具有一致性,研究结果在一定程度上佐证了本文结论的合理性,说明径流作为气候系统的重要组成部分,其振荡周期与自然外强迫和气候系统内部变化(自然变率)密切相关。

方差贡献率可用来表示各尺度振荡频率和振幅对原始数据总体特征影响程度,如表1给出了径流距平各分量的周期、方差贡献率以及与原始径流距平相关性。各分量方差贡献率显示,年际振荡在径流长期变化中占主导,而结合径流各分量与原始径流距平的相关关系,可以发现年代际变化和趋势

项与原始径流距平也具有显著的正相关关系,这说明年代际变化和长期趋势信息同样不可忽略。综合图3和表1还可看出,IMF1表征的准2~3a周期性振荡的方差贡献率最大,约为25.96%,该周期尺度的振荡属于高频振荡,在1990s和2000s的振幅相较于其它时期明显偏高;IMF2表示的是准4~5a周期振荡,它对径流距平总体方差贡献率也较大,为21.26%,这个周期性振荡主要是在1960s后期和2000年之后表现的比较明显;IMF3代表的准10~11a的周期性振荡方差贡献率也较大,为20.71%,其周期性振荡在整个研究时期均有表现,并且在1960s中期至1970s初期和1990s后期和2000s初期振荡最为明显;IMF4表示的是径流准26~27a的周期变化,其方差贡献率为18.31%,在此时间尺度上,开都河径流量在1963-1974年和1994-2009年为偏多状态;趋势项分量的方差贡献率为13.76%,由趋势项变化可以看出开都河径流量在1960-2012年期间总体上表现出近似线性的显著增加趋势,然而,实际上是非线性的显著增加趋势。

年际和年代际变化是气候系统中两个重要的时间尺度^[33],也是目前气候相关研究的热点问题。然而,如何从原始气候信号中有效分离出年际和年代际分量的方法还不成熟。同时,径流作为气候系统的重要组成部分,但少有研究关注西北干旱区径流的年际和年代际变化以及径流在不同时间尺度上对气候因子的响应特征。为深入探讨径流年际、年代际振荡的变化特征以及不同尺度在径流整体变化中的作用,根据EEMD分解的结果分别对径流的年际、年代际变化进行了重构,如图4a所示。其中年际变化是由代表年际本征模函数IMF1和IMF2相加得到,可认为是由滤掉大尺度振荡而得;年代际变化是由年代际本征模函数IMF3和IMF4与趋势项RES(包含超过研究时段更长时间尺度的波动)相加而得。

对比重构的年际变化与原始径流距平序列的趋势变化可以看出,二者基本是一致的,说明重构的年际变化能较好地描述原始径流距平序列在研究时期的波动变化状况,这也在一定程度上揭示了年际振荡在开都河径流量近50多年来变化过程中占据主导地位。重构的年代际变化在整个研究时

段总体上呈显著增加的趋势变化,具体来说表现出增多与减少相间的交替变化过程。径流年代际变化揭示的是径流50多年来的长期复杂变化过程,从本质上来说它是将大尺度振荡叠加到一个50年来整体上升的径流序列变化趋势中得到的。重构的径流年代际变化有效揭示了开都河径流量在1995年出现了由负距平到正距平的转折,这与Chen等^[28]和Li等^[34]利用Mann-Kendall方法检测得到的西北干旱区内陆河近50年径流变化整体发生转折的时间点具有一致性,是对区域气候于20世纪80年代中后期由“暖干”转向“暖湿”的滞后响应。

为验证EEMD重构的径流年际和年代际变化的合理性,本文也采用了常用的9年滑动平均法对径流时间序列进行了年际和年代际分离。首先,对径流距平的时间序列作9年滑动平均所得结果为其年代际变化;然后,径流年际变化再由径流距平的原始时间序列减去9年滑动平均值获得(图4b)。通过对比两种方法分离出来的年际和年代际变化结果可以发现,两种方法分离的年际和年代际变化趋势基本一致(图4),但利用9年滑动平均法所得的年代际径流变化序列两端缺少平滑值,大多使用序列的平均值来填补,这样就很难反映出序列两端的真实变化趋势。此外,9年滑动平均法也不能有效去除较强的年内信号,使得其分离的年际和年代际变化相较于EEMD重构结果,不具备明确的物理意义。就开都河而言,重构的径流年际和年代际变化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,开都河年际变化

约占47.22%,而年代际变化为52.78%,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两个非常重要的时间尺度。

3.3 径流变化对气候波动的响应

在全球气候变化背景下,开都河年径流量变化主要受局部气候因子降水、气温和潜在蒸发的影响^[13, 14, 28, 34, 35]。通过对与开都河径流量同期的降水、气温和潜在蒸发进行EEMD分解发现,降水和气温整体上表现为上升型的趋势类型,且其变化在年际尺度上存在准2~3a和准5~7a的周期性波动,在年代际尺度上存在准10~11a和准26~28a的周期性变化。由此可以看出,开都河径流与降水、气温和潜在蒸发在年际尺度上具有相似的周期性变化(2~3a和5~7a),在年代际尺度上也有相似的周期性变化(准10~11a和26~28a),表明开都河径流与气温和降水在年际和年代际自然变异尺度上均具有内在关联性。而开都河径流补给既有高山冰川、永久性积雪,又有中低山季节性积雪融水和夏季降水补给^[28],因而受气温和降水共同影响,这也是径流与降水和气温具有相似周期的重要原因。

不同于气温和降水的是,EEMD分解后的潜在蒸发总体表现为下降趋势。通过对比开都河源流区气温、降水和潜在蒸发趋势项(图5)发现,开都河径流变化与潜在蒸发具有相反的变化趋势,而与气温和降水在变化趋势上具有一致性。同时,在变异时间点上(正负距平的转折点)也存在差别,结合图3和图5可以发现,开都河源流区降水、气温和潜在蒸发趋势项转折时间分别发生1987年、1993年和

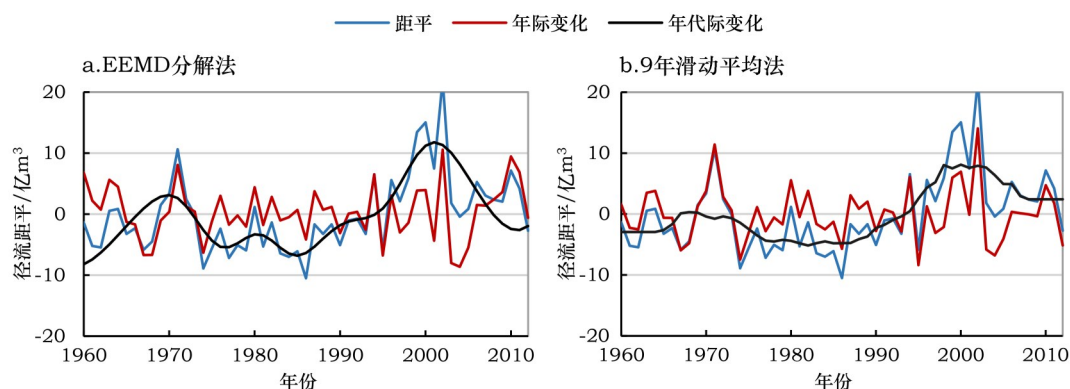


图4 基于EEMD分解法和9年滑动平均法重构的开都河径流年际与年代际变化

Figure 4 The inter-annual and inter-decadal variations of runoff in Kaidu River based on EEMD composition and 9-year moving-average method

2017年8月

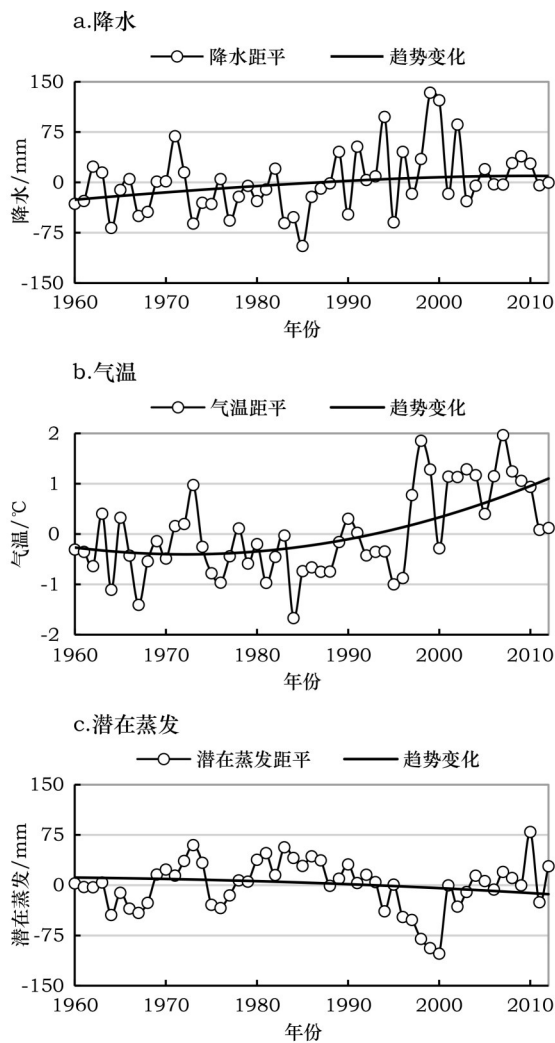


图5 基于EEMD分解的开都河降水、气温和潜在蒸发趋势变化与原始距平对比

Figure 5 Change trends of the precipitation, temperature and potential evaporation in Kaidu River based on EEMD composition and their comparison with the original departure

1993年,而径流趋势项却在1986年出现了由负距平到正距平的转折,说明开都河径流量趋势转折变化对区域降水的响应更为一致,与气温和潜在蒸发虽具有相似周期,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,分别重构了降水、气温和潜在蒸发的年际和年代际变化,其中气候因子的年际变化由表征各自年际尺度上的准周期分量进行加总,即 $IMF1$ 加上 $IMF2$ 表示年际变化,而气候因子的年代际变化则由表征其年代际尺度上的准周期分量和趋势项进行加总,即

$IMF3$ 、 $IMF4$ 与趋势项 RES 相加得到。通过对开都河径流量与气温、降水和潜在蒸发进行多尺度相关分析(表2),发现在年际尺度,径流与降水表现为显著的正相关关系,而与气温和潜在蒸发的相关性并未通过5%的显著性水平检验;而在年代际尺度上,径流与降水和气温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,表明年代际尺度是评价该区径流对气候波动响应过程的较佳尺度。此外,径流与降水在年际和年代际尺度上均表现为显著的正相关,从侧面反映出降水是影响开都河源流区径流变化的最主要的气候因子,这与Chen等^[28]和赵直等^[12]的研究结果是一致的。

降水、气温和潜在蒸发对径流的影响程度有异,这与径流组份密切相关^[36]。开都河发源于天山山区,径流的补给主要来自山区的冰川积雪融水和降雨(表3),因而降水和气温作为表征气候变化的两个基本因子都对出山口径流具有显著的影响。显然,降水可以直接以雨水和降雪的形式补给径流,而气温则是通过2个重要途径间接影响径流,一是影响冰川积雪的消融,二是影响流域总蒸散量。已有研究表明^[37],在全球变暖背景下,近50多年西北干旱区融雪期天数平均增加了24.5d,在其他条件不变的情况下,融雪期天数每增加1%可诱发年径流量增多4.69%,这一现象在开都河源流区同样存在,气温升高导致融雪期增长,冰雪融水增加,进而引起非汛期流量增多,尤其秋季表现出显著的增多趋势^[12]。此外,径流量、降水量和蒸发量三者之间存在此消彼长的关系,即在降水量一定的情况下,蒸发

表2 1960–2012年开都河年径流量和气候因子的相关系数

Table 2 Correlations between runoff and climate factors in Kaidu River from 1960 to 2012			
时间尺度	径流 vs. 降水	径流 vs. 气温	径流 vs. 潜在蒸发
年际尺度	0.651**	0.056	-0.173
年代际尺度	0.872**	0.695**	-0.672**

注:**表示在0.01水平上显著。

表3 开都河径流组成

Table 3 The component of runoff for Kaidu River (%)			
径流组成	冰川融水	雨雪混合	地下水
开都河	14.1	45.3	40.6

注:径流组成来源于文献[36]。

量的减小会降低地表水资源的消耗,从而引起径流增加^[36]。因此,可以说降水、气温和潜在蒸发都在一定程度上影响了开都河源流区的径流变化,但由于该区域径流各组份所占比例不同,尤其是径流以雨雪混合补给为主,故各气候因子对径流的影响程度也存在一定差异,降水明显要高于气温和潜在蒸发的影响,这与陈亚宁等^[35]的研究结果一致。

与前人研究结果^[12,35]相比,本文着重探讨了气候因子和径流的非线性、多尺度变化特征及不同时间尺度上径流对气候因子的响应过程,从复杂性角度初步解读了开都河源流区水文-气候系统的内在作用机理,这更有助于加深对该区域径流变化及其驱动机制的认识。此外,也有研究^[28,35]表明,开都河源流区径流变化还受到大气环流和地形等因素的影响,本文在此不做赘述。

4 结论

采用EEMD方法,通过对1960-2012年开都河径流时间序列进行多尺度分析及其对气候变化的多尺度响应的探讨,获得以下结论:

(1)开都河年径流在1960-2012年整体上呈现一个近似线性,但实际上为显著的非线性增加趋势,且其变化在年际尺度上表现出准2~3a的弱周期和准4~5a的强周期性振荡,在年代际尺度上表现出准10~11a和准26~27a的强准周期性变化,各周期分量的方差贡献率显示,年际振荡在径流长期变化中占据主导地位,说明径流年际自然变率对径流总体演变特征的影响程度要高于年代际自然变率的影响。

(2)重构的径流年际变化过程与其原始径流距平序列的变化过程基本一致,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,并有效揭示了开都河径流量在1995年出现由负距平到正距平的转折,说明年代际变化主导了径流的总体变化趋势,也暗示年际和年代际变化具有明显的互相调制作用。

(3)开都河径流量与同期降水、气温和潜在蒸发具有相似的准周期变化,然而不同的是,与降水和气温在变化趋势上具有较强的一致性,但与同期潜在蒸发变化趋势具有相反性。此外,可以发现,

不管是在年际尺度上还是年代际尺度上,降水与径流的相关性都要强于气温、潜在蒸发与径流的相关性,说明降水是影响开都河径流变化的决定性因素;而在年代际尺度上降水、气温和潜在蒸发的相关性都要明显强于年际尺度,表明年代际尺度是评价该区径流对气候波动响应过程的较佳尺度。

EEMD是一种甄别非线性趋势和尺度循环的有效方法,一方面,将EEMD应用于气候-水文时间序列研究,不仅能够提取可靠真实的气候-水文时间序列变化的固有时间尺度(准周期变化),便于寻找真正的趋势变化,有助于加深人们对于干旱区内陆河径流的多尺度变化特征的认识。另一方面,年际和年代际是非常重要的两个时间尺度,随着全球气候变暖,关于某一气候因子如气温和降水的年际和年代研究是目前气候研究的重点问题。然而,径流作为气候系统的重要组成部分,其年际和年代变化的研究相对较少,尤其是在产流比较特殊的西北干旱区(水资源主要来源于山区的冰雪融水和降雨),针对气候变化对径流在年际和年代际尺度上影响却往往未加区分,因此本文应用EEMD方法有效分离出年际和年代际变化,探讨了径流对气候要素在年际和年代际尺度上的响应并发现年代际尺度更适于评价径流对气候波动的响应,这为以后相关研究也提供了一种新的思路。

参考文献(References):

- [1] 张利平,夏军,胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120. [Zhang L P, Xia J, Hu Z F. Situation and problem analysis of water resource security in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(2): 116-120.]
- [2] 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. [Chen Y N, Yang Q, Luo Y, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of Northwest China[J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35(1): 1-9.]
- [3] 尚明,李兰海,姚亚楠,等. 天山南坡开都河流域洪水影响要素分析研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 85-91. [Shang M, Li L H, Yao Y N, et al. Analysis of factors affecting peak flow of the Kaidu River on the southern slope of the Tianshan Mountains[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(9): 85-91.]

2017年8月

- [4] 张一驰,李宝林,程维明,等.开都河流域径流对气候变化的响应研究[J].资源科学,2004,26(6):69-76. [Zhang Y C, Li B L, Cheng W M, et al. Hydrological response of runoff to climate variation in Kaidu Catchment[J]. *Resources Science*, 2004, 26(6):69-76.]
- [5] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [6] Ji F, Wu Z, Huang J, et al. Evolution of land surface air temperature trend[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6):462-466.
- [7] 夏军,刘春蓁,任国玉.气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J].地球科学进展,2011,26(1):1-12. [Xia J, Liu C Z, Ren G Y. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(1):1-12.]
- [8] 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 Y N, Li Z, Fan Y T, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of North-west China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9):1295-1304.]
- [9] 陈亚宁.气候变化对西北干旱区水循环影响机理与水资源安全研究[J].中国基础科学,2015,(2):15-21. [Chen Y N. Impacts of climate change on the water cycle mechanism and water resources security in the arid region of Northwest China [J]. *China Basic Science*, 2015, (2):15-21.]
- [10] 高前兆,王润, Giese E. 气候变化对塔里木河来自天山的地表径流影响[J].冰川冻土,2008,30(1):1-11. [Gao Q Z, Wang R, Giese E. Impact of climate change on surface runoff of Tarim River originating from the south slopes of the Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(1):1-11.]
- [11] 陈亚宁,徐长春,杨余辉,等.新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J].地理学报,2009,64(11):1331-1341. [Chen Y N, Xu C C, Yang Y H, et al. Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11):1331-1341.]
- [12] 赵直,徐哈.新疆开都河流域近50a径流量年际年内变化及其对气候变化的响应分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(10):151-156. [Zhao Z, Xu H. The response of runoff variance in the Kaidu River Basin to the climate changes[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(10):151-156.]
- [13] Xu J H, Li W H, Ji M H, et al. A comprehensive approach to characterization of the nonlinearity of runoff in the headwaters of the Tarim River, western China[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(2):136-146.
- [14] Xu J H, Chen Y N, Li W H, et al. Combining BPANN and wavelet analysis to simulate hydro-climatic processes- a case study of the Kaidu River, Northwest China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7(2):227-237.
- [15] 赵直,徐哈.极点对称模态分解下中国新疆温度变化趋势的区域特征[J].地理研究,2014,33(12):2358-2366. [Zhao Z, Xu H. The research of temperature variation trends over Xinjiang in China by extreme-point symmetric mode decomposition method [J]. *Geographical Research*, 2014, 33(12):2358-2366.]
- [16] Bai L, Xu J, Chen Z S, et al. The regional features of temperature variation trends over Xinjiang in China by the ensemble empirical mode decomposition method[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(11):3229-3237.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Wu Z H, 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.
- [20] 王兵,李晓东.基于EEMD分解的欧洲温度序列的多尺度分析[J].北京大学学报:自然科学版,2011,47(4):627-635. [Wang B, Li X D. Multi-scale fluctuation of European temperature revealed by EEMD analysis[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(4):627-635.]
- [21] 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):10923-1:109203-8. [Xue C F, Hou W, Zhao J H, et al. The application of ensemble empirical mode decomposition method in multiscale analysis of region precipitation and its response to the climate change[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(10):10923-1:109203-8.]
- [22] 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 T H, Liu T L. Regional features of precipitation variation trends over Xinjiang in China by the ensemble empirical mode decomposition method[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2015, 9(4):17-24.]
- [23] Kuo C C, Gan T Y, Chan S. Regional intensity-duration frequency curves derived from ensemble empirical mode decomposition and scaling property[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18(1):66-74.
- [24] Qian C, Zhou T J. Multidecadal variability of North China aridity and its relationship to PDO during 1900-2010[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(3):1210-1222.
- [25] 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 J, Lv S Y, Qian X Y, *et al.* Multi-scale analysis of hydrological series using ensemble empirical mode decomposition[J]. *J Huazhong Univ. Sci. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2011, 39(11): 105-108.]
- [26] Chen Z S, Chen Y N, Li B F. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff for Kaidu River Basin in arid region of northwest China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, 111(3-4): 537-545.
- [27] Allen R G, Pereira L S, Raes D, *et al.* Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements[R]. Rome: FAO, 1998.
- [28] Chen Z S, Chen Y N. Effects of climate fluctuations on runoff in the headwater region of the Kaidu River in northwestern China [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2014, 8(2): 309-318.
- [29] 姚俊强, 刘志辉, 杨青, 等. 近130年来中亚干旱区典型流域气温变化及其影响因子[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 291-302. [Yao J Q, Liu Z H, Yang Q, *et al.* Temperature variability and its possible causes in the typical basins of the arid Central Asia in recent 130 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 291-302.]
- [30] Qian W H, Lu B. Periodic oscillations in millennial global-mean temperature and their causes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(35): 4052-4057.
- [31] Chen Z S, Chen Y N, Bai L F, *et al.* Multiscale evolution of surface air temperature in the arid region of Northwest China and its linkages to ocean oscillations[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 128(3-4): 945-958.
- [32] 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 P, Zhang Q, Bai Y G, *et al.* Periodic properties of runoff changes of the Tarim River Basin: possible causes and implications[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(2): 216-222.]
- [33] 宋巧云, 魏凤英. 年代际气候变化研究进展[J]. 气象科技, 2006, 34(1): 1-6. [Song Q Y, Wei F Y. Progress in interdecadal climate variation[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(1): 1-6.]
- [34] Li B F, Chen Y N, Xiong H G. 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.
- [35] 陈亚宁, 徐长春, 郝兴明, 等. 新疆塔里木河流域近50a气候变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 921-929. [Chen Y N, Xu C C, Hao X M, *et al.* Fifty-year climate change and its effect on annual runoff in the Tarim River Basin, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 921-929.]
- [36] 陈亚宁. 新疆塔里木河流域生态水文问题研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010. [Chen Y N. Eco-hydrology Research in the Tarim River Basin of Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 2010.]
- [37] 李宝富, 陈亚宁, 陈忠升, 等. 西北干旱区山区融雪期气候变化对径流量的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1461-1470. [Li B F, Chen Y N, Chen Z S, *et al.* The effect of climate change during snowmelt period on stream flow in the mountainous areas of Northwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1461-1470.]

Runoff nonlinear variation and responses to climate fluctuation in the headwater region of the Kaidu River

BAI Ling¹, LIU Zuhan^{2,3}, CHEN Zhongsheng⁴, XU Jianhua⁵

(1. School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

3. Jiangxi Province Key Laboratory of Water Information Cooperative Sensing and Intelligent Processing,
Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;

4. School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637002, China;

5. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Nonlinearity is one of important frontier issues in the field of modern hydrology. It is of great significance to discover the variation and the complexity of the hydrological system. On the basis of hydrological and meteorological data in the headwater region of the Kaidu River from 1960 to 2012, multi-scale characteristics of runoff variability were analyzed using the ensemble empirical mode decomposition method to investigate nonlinear change characteristics of runoff at different time scales and multi-scale responses to climate fluctuation. We found that in the past 50 years, the overall runoff of Kaidu River in Xinjiang has exhibited a significant non-linear increasing trend, and changes have manifested at quasi-2~3 and quasi-4~5 year inter-annual scales and showed quasi-10~11 and quasi-26~27 year inter-decadal scales. Variance contribution rates of each periodic component showed that inter-annual change held a dominant position in the long-term change of runoff, and inter-decadal change also played an important role in the overall runoff change for Kaidu River. Reconstructed inter-annual variation describes the fluctuation state of original runoff during the study period, that is to say the trends of both are basically the same. The reconstructed inter-decadal variability shows that the runoff of Kaidu River underwent a significant transition in 1995 from low to high, namely the state of runoff anomaly shifting from a negative phase to a positive abundance water period. In addition, we found that the correlation between runoff and precipitation is more relevant and significant at both the inter-annual and inter-decadal scales compared to the correlation between runoff and temperature and potential evaporation, indicating that precipitation is the decisive factor for changes in runoff. Corrections between runoff and precipitation, temperature and potential evaporation are more significant and relevant at the inter-decadal scale than inter-annual scale, suggesting that the inter-decadal scale is more suitable for investigating responses of runoff dynamics to climate fluctuation.

Key words: the headwater region of the Kaidu River; runoff; nonlinear variation; ensemble empirical mode decomposition; climate fluctuation; multi-scale responses