

颜明,李夫星,贺莉,等.夏季风等环流因子对黄河中游径流量周期变化的影响[J].地理科学,2016,36(6):917-925.[Yan Ming, Li Fuxing, He Li et al. Effects of Summer Monsoon and Other Atmospheric Circulation Factors on Periodicities of Runoff in the Middle Huanghe River During 1919-2010. Scientia Geographica Sinica, 2016,36(6):917-925.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.06.015

夏季风等环流因子对黄河中游 径流量周期变化的影响

颜明¹,李夫星^{1,2},贺莉¹,吕美朝¹,陈东¹

(1.中国科学院地理与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:基于黄河中游4个水文站1919~2010年还原的天然径流量、1873~2011年的夏季风强度指数、北大西洋涛动指数(NAO)和西太平洋副高指数等资料,利用Morlet小波方法分析了黄河中游河口镇-龙门区间(简称河龙区间),龙门-三门峡区间(简称龙三区间)和三门峡-花园口区间(简称三花区间)径流量的周期变化,并探索了夏季风、中纬度西风与西太平洋副高等环流因子对黄河中游3个区间径流量周期性变化的影响。研究发现,黄河中游3个区间径流量的变化对夏季风、中纬度西风和西太平洋副高存在差异性响应,季风对于黄河中游的径流量不仅在时间上具有趋势性的影响,更为重要的是存在周期性的控制作用,在80 a长周期上对于整个黄河中游都有控制作用,但影响黄河中游降水-径流过程的不仅仅是夏季风,相关统计结果表明还受到西风带和西太平洋副高周期的影响。3个区间都存在一个中等尺度(25 a)的周期,这个周期在夏季风上没有得到体现,河龙区间和龙三区间的25 a周期是受西风带影响所致,而三花区间的中尺度25 a周期是西太平洋副高指数的强度和西界的作用所致。

关键词:小波分析;径流量;夏季风;西太平洋副高;黄河中游

中图分类号:TV121

文献标识码:A

文章编号:1000-0690(2016)06-0917-09

目前,全球气候变化及其影响是水文水资源及气候领域的研究热点,已经成为国际上普遍关心的问题,全球气候变化对水循环及水文过程变化的影响在许多地方都有明显的反映,这也是中国可持续发展面临的重大战略问题^[1-5]。干旱向湿润转变的过渡区的水资源变化及成因分析更是当前亟需解决的问题,也是水文科学研究的前沿课题^[6-9]。在气候变化和人类活动的双重影响下,黄河中游径流量出现了明显减少^[10],黄河中游径流量的减少一方面是人类活动的影响,农作物灌溉和城市工业及生活用水主要是从河道中引水^[11-13],随着人口的增加和工农业的发展,引水量呈现出明显的增加趋势,再有就是水土保持工作的开展,植被的增加和淤地坝的建设都扩大了拦蓄的水量,更多的通过蒸发蒸腾作用进入大气中,减少了河川汇聚的水量^[14,15]。另一方面,气候的变化也是导

致黄河中游水量减少的一个重要原因^[16],这个区域恰好位于季风气候区的西部边缘带上,季风的波动与本区的气候尤其是降水间存在必然的联系,间接导致径流量的变化,近半个世纪,季风呈现出明显减弱的趋势^[17,18],这导致从太平洋输送进入陆地的水汽明显减少,从而通过降水转化成的径流减少^[6]。在水资源严重不足的情况下,我们需要分析这种减少趋势是否在整个黄河中游都有反映,以及这种趋势在何时将发生变化。

黄河中游为干旱向湿润转变的过渡区,位于地貌二级阶梯的前沿,是夏季风和西风带共同的边缘带,这里的气候表现为大陆性季风气候。同时,黄河中游也处于西风带控制范围内,西风带所输送的水汽对于本区的降水-径流过程也有一定影响。根据观测,过去70 a,中国东部季风区的降雨量和地表水资源量都呈现出不同程度的减少趋

收稿日期:2015-06-24;**修订日期:**2015-11-23

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB428404)和国家自然科学基金项目(41271306,41371037)资助。[Foundation: The 973 Program of China(2010CB428404) and National Nature Science Foundation of China(41271306,41371037).]

作者简介:颜明(1977-),男,四川内江人,助理研究员,主要从事河流地貌与环境研究。E-mail: yanming@igsnr.ac.cn

通讯作者:陈东,研究员。E-mail: dchen@igsnr.ac.cn

势。由于受不同环流因子的影响,西部地区的降雨和水资源又表现出增加的趋势,在全球显著变暖和水循环加快的背景下,中国西北部部分地区出现了明显地从暖干向暖湿趋势的转变,这表明全球变暖后有利于西北部地区的南风增强,促进水汽向北输送,这一过程是全球显著变暖驱动水循环过程加快的结果^[19]。同时,前人研究表明,夏季风和中纬度西风都存在明显的周期变化^[17,20],这种周期转换对黄河中游径流量的影响方面的研究还不够。另外,西太平洋副高也是一个不容忽视的因素,其与夏季风配合共同影响太平洋向中国陆地水汽输送^[17,21],它的周期性变化也必然对黄河中游径流量产生影响。因此,研究夏季风等多个大气环流因子对于黄河中游径流周期变化的影响,不仅在未来水资源的合理调配上具有现实意义,同时有助于深化不同环流因子对季风-西风带过渡区水资源丰枯变化的诱发机制的理解,有助于推动水循环及水资源科学的发展。

本研究基于黄河中游4个主要水文站的长时间序列的径流量资料、夏季风强度指数(I_{SM})、西太平洋副高指数和北大西洋涛动指数等,在前人关于气候变化与黄河中游水资源之间的趋势性分析的基础之上,利用能够在不同时间尺度上分辨自然要素周期性的小波方法,构建出径流量与相关环流因子在不同时间尺度上的分布,梳理它们的周期特性,着重阐述黄河中游径流量随时间变化

的周期性以及它们与夏季风等环流因子间的关系,在不同的时间尺度上寻找径流量与不同环流因子间在周期性上的关系,从而确定不同环流因子对黄河中游不同区间径流量周期的影响。

1 研究区概况

黄河中游指黄河河口镇至花园口区间,位于 $32^{\circ}\text{N} \sim 42^{\circ}\text{N}$ 和 $104^{\circ}\text{E} \sim 113^{\circ}\text{E}$ 之间,干流长1234.6 km,集水面积约 $36.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。根据地理位置、气候特点及水文测站控制情况,可将黄河中游划分为3个区域:河口镇至龙门区间(河龙区间)、龙门至三门峡区间(龙三区间)、三门峡至花园口区间(三花区间)。黄河中游为干旱向湿润转变的过渡区,该区域年降水量约为520 mm,降水以夏季的集中性暴雨为主,产流快,径流的产生对气候的响应敏感。东部与南部被厚层的黄土所覆盖,植被条件也较好,以山区为主,东部为太行山,南部为秦岭山脉。中部是汾河盆地和渭河盆地(汾渭盆地),汾河盆地的西侧是吕梁山,再向西为丘陵沟壑区与沙黄土覆盖区,部分区域为毛乌素沙地和库布齐沙漠覆盖,表层有明显的沙层覆盖,下部为古黄土。可见,东部和南部的山地是一个明显的地貌界限,同时,由于山地高度影响,也会影响到气流的传输,东部季风输送的气团遇到山体后爬升形成降雨,从西边过来的中纬度西风输送的水汽在遇到吕梁山和秦岭也会促使降水的形成。

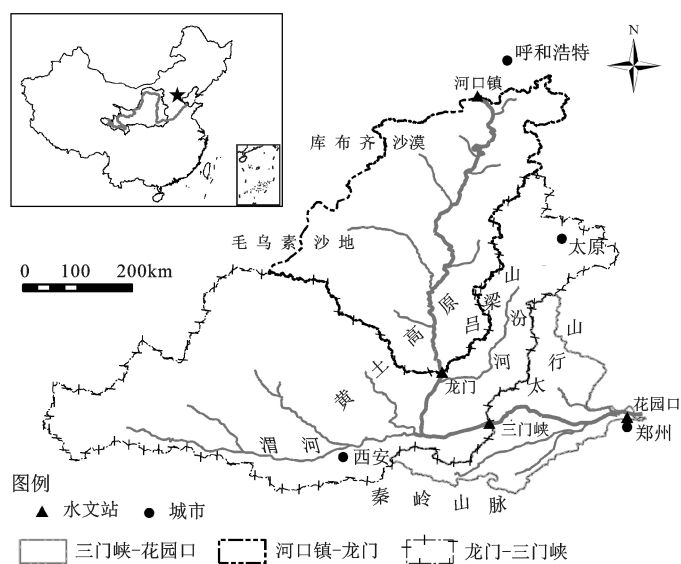


图1 黄河中游径流区间的空间分布

Fig.1 Distribution of runoff regions in the middle Huanghe River

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

黄河中游干流上的4个水文站将黄河中游分为3个次一级的区间,每个区间的径流量可以利用下游水文站的径流量减去相邻上游水文站的径流量所余水量。由于水文站的径流量为实测径流量,随着人类活动影响的增强,实测径流量偏离天然径流量越来越大,为排除气候的影响,需获得天然径流量,将人类从河流中引出的水量进行还原,也就是用每个区间计算出的实测的区间径流量加上被人类引出的水量。计算公式如下:

$$Q_{wn} = Q_{wm} + Q_{w,div} = Q_{wm,i+1} - Q_{wm,i} + Q_{w,div} \quad (1)$$

式中 Q_{wn} 为某一区间的天然径流量, Q_{wm} 是区间的实测径流量, $Q_{w,div}$ 是净引出水, $Q_{wm,i}$ 是某一水文站的实测径流量, $Q_{wm,i+1}$ 是相邻上游水文站径流量。获得了黄河水利委员会通过还原计算出的河龙区间、龙三区间和三花区间1919~2010年的天然径流量序列值,相比测量时间开始于20世纪50年代的降雨量序列值的时间长度多30余年,更加适合周期性分析。

为定量估计东亚夏季风的强度,不同的研究者从降雨、气压对比和风场等几个方面出发,提出了不同的夏季风强度指标^[22-27]。其中,郭其蕴^[23]的指标从季风的形成机制出发,考虑了海陆气压的差异,根据海陆气压的对比建立夏季风强度指标,根据7月海陆热力的差异计算了1873~1980年夏季风7月强度指数,之后又将该时间序列的夏季风强度指数延伸到了2000年,计算的月份改为6~8月,孙颖等^[18]在该基础之上将该序列延长至2011年,因此,将采用上述的1873~2011年共计139年的 I_{SM} 来做周期性分析。

黄河中游的降雨产流的水汽来源还可能受到西太平洋副高和西风带的影响,穆巧珍等^[19]建立了西太平洋副高指数强度、北界和西界等序列值,这里引用了其中的强度和西界序列值,时间段为1919~1999年。西风带有2条主要的路线,一是沿着青藏高原北部从西向东输送水汽,二是从阿勒泰山向东输送水汽,由于北大西洋涛动(NAO)是反映中纬西风强弱的一个主要参数,因此本文采用NAO指数,所取时间段为1950~2011年,北大西洋涛动指数越大,西风带向东输送水汽越多,反之则越少^[26]。

2.2 研究方法

小波分析是一种能够将信号通过二维扩展,在时频两域表现局部特征的数学方法,是一种窗口大小固定不变,但其形状可以改变的时频局部化分析方法。可以看到每一时刻在各周期中所处的位置,能够更好地分析序列随时间的变化情况。近年来被广泛应用于气候、水文的多尺度分析研究中,目前广泛使用的小波函数有Haar、Mexicanhat、Morlet、Meyer、Daubechies等。研究的序列是一个随时间变化的径流过程,波峰和波谷分别对应径流的丰、枯变化,因此选用与其形态相近的Morlet小波,它是一种复数小波^[29,30]。研究表明,与实型小波相比,复数小波能更真实地反映时间序列各尺度大小及其在时域中的分布,Morlet小波定义为:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (2)$$

式中 ω_0 是无量纲频率,这里选择128作为小波容许性条件。

为更为准确的定位某一周期的显著性,需要计算小波功率谱,小波功率谱的公式定义为 $|W_n^X(s)|^2$,该功率谱表达了时间序列在给定小波尺度和时间域内的波动量级,能够反映某一周期上的能量值,用来确定其周期显著性。由于采用的Morlet母小波为复值小波,因此 $W_n^X(s)$ 也为复数,其复值部分可以解释为局部相位。将小波功率谱在某一周期上进行时间平均,可以得到小波全谱。

$$W^2(s) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |W_n(s)|^2 \quad (3)$$

小波全谱能够表达时间序列真实功率谱的无偏、一致估计。通过小波全谱图中可以清晰的辨别时间系列的周期波动特征及其强度。

3 黄河中游径流量的变化

3.1 径流量的年际变化特征与趋势

黄河中游4个主要水文站控制的区间年径流量,仅河龙区间表现出了下降趋势,而龙三和三花2个区间的径流量则无明显的趋势性变化(图2)。河龙区间径流量在20世纪60年代末之前都处于较高的水平,之后有显著的减少,前期均值为 $75.09 \times 10^8 \text{ m}^3$,后期仅为 $44.51 \times 10^8 \text{ m}^3$,这一时间节点与东亚夏季风70年代开始的持续减弱相对应,这也是导致黄河流域中下游水资源在上世纪后期不断减少的主因;龙三区间的径流量随时间的变化

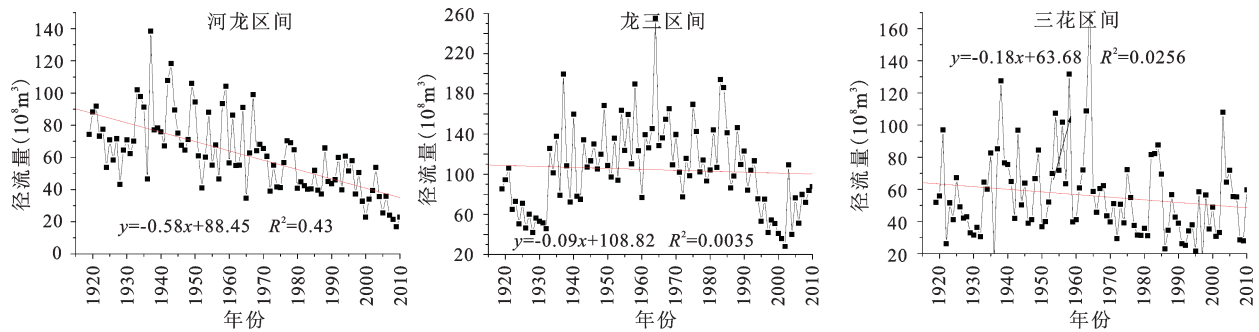


图2 1919~2010年不同区间径流量随时间的变化

Fig.2 Variations of runoff in different regions during 1919-2010

可以划分为3个时期,1932年以前及1994年以后2个较少的时期和中间径流量较高时期;三花区间径流量的变化更为复杂,阶段性变化也更多。三花区间径流量的多年平均值为 $56.03 \times 10^8 \text{ m}^3$,最大值是1964年的 $177.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,最小值是1936年的 $14.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,变差极大,年际变化明显。从近百年的径流量时间序列来看,龙三区间和三花区间的径流量并未出现明显的趋势性变化,具有较为明显的上下波动。

3.2 径流量的周期变化特性

1919~2010年3个区间径流量的周期具有比较高的相似性,尤其是中长时间尺度的周期的一致性较好,都具有明显的80 a周期,在25 a左右也具有相似的周期,在更小时间尺度上的周期存在差异。

图3b、图3c和图3d分别是河龙区间、龙三区间和三花区间的径流量小波功率谱。可以发现,3个区间的径流量变化都存在一个明显的80 a的主周期,贯穿了整个研究期。龙三区间和三花区间还存在一个25 a周期的能量峰值,这个周期贯穿了整个研究期,河龙区间也存在一个25 a的周期,但能量值比较微弱,说明这个周期并不明显。在更短时间的周期上,3个区间具有明显差异,河龙区间在20世纪60年代末以前存在2~8 a的周期波动,之后短的周期波动很少出现。龙三区间大部分时间内存在2~8 a的周期波动,20世纪50~90年代还存在13 a的周期波动,而三花区间短周期的波动更为明显,分布时间也更为宽广,周期以2~8 a为主,20世纪60年代以后还存在14 a左右的周期,总体上与龙三区间的周期特征相似。

3.3 径流量周期变化的影响因素

夏季风的强弱变化是决定中国中东部南北降

雨多寡的关键性因素^[31,32]。1873~2011年,夏季风强度指数在时间上的变化可以划分为4个时期:1873~1885年之间的高值期,1886~1898年的低值期,1899~1965年的高值期及之后的低值期(图3)。20世纪60年代前后的季风变化比较明显,70年代以后季风明显减弱。从整体来看,前期随时间变化不存在明显的趋势,只是在70年代后出现突变,存在明显的减弱,这可能也是导致中国中东部水资源减少的主因^[33]。从全局小波波谱中可以看出,在置信范围内具有2个明显的功率峰值,分别位于40 a和80 a,这与郭其蕴提出的东亚夏季风40 a和80 a的周期性变化吻合^[28],中国东部降水的周期性变化对这2个周期具有明显的响应^[29,30]。夏季风的80 a周期变化与黄河中游3个区间径流量的80 a周期完全一致,说明季风对黄河中游径流量的80 a周期具有主导性,除此之外,夏季风在1960~1970年还有一个能量不太显著的8~10 a的周期变化。夏季风的周期性变化对于中国中东部降雨具有重要意义,夏季风强时,不仅输送更多的水汽,其向内陆深入也更多,覆盖更为广阔的区域,因此在80 a长周期上,夏季风能够覆盖整个研究区,使得黄河中游3个区间的径流量都表现出相应的80 a周期。季风减弱后,从东部输送的水汽减少,覆盖的范围也大大缩小,导致黄河中游河龙区间的径流量明显减少,但其它区间的径流量并没有出现趋势性转变,说明黄河中游径流量的周期性变化可能不仅仅受到夏季风的影响,还有其它因素作用于研究区的径流量的周期性变化。

影响中国降雨-径流的不仅有夏季风,西太平洋副高的强度和界限的变化是导致夏季风向北输送水汽的重要因素,它与季风配合共同影响中国

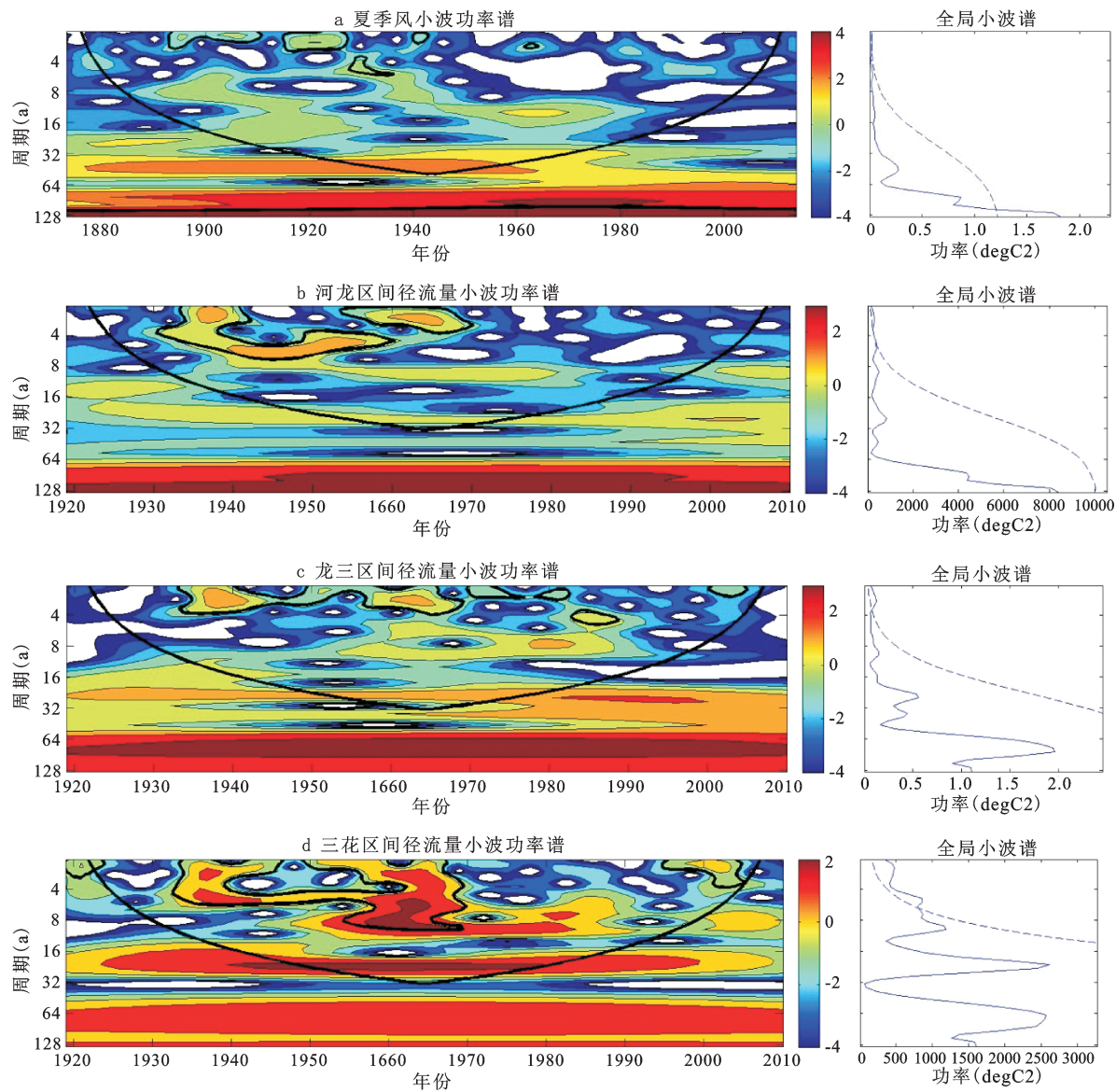


图3 夏季风和黄河中游3个区间径流量的小波功率谱

Fig.3 Wavelet power spectrum of summer monsoon and runoff of three regions in the middle Huanghe River

尤其是北方的降雨,当西太副高强度越强、西界越偏西,其能促进更多的水汽进入中国北方,反之,能到达北方的水汽会减少。西太副高的强度和西界都具有一个较强的26~27 a的周期变化,与三花区间的径流量中尺度周期接近。另外,多元回归分析的结果也显示三花区间的径流量与西太副高强度、西界都有比较好的相关性,显著性 p 值都小于0.05(表1)。回归分布如图4,径流量的点阵都分布在西太副高和强度拟合出的趋势面附近,说明它们与径流量的变化具有较好的相关。

从研究区的水汽路径来看,这里还存在一个重要的水汽来源,中纬度西风沿着青藏高原北部

表1 黄河中游三花区间径流量与西太副高强度、西界的回归分析				
Table 1 Regression analysis between runoff, intensity and west boundary of WPSH in Longsan region of the middle Huanghe River				
	回归系数	标准差	t 检验值	显著性 p 值
西太副高强度	-0.022	0.010	-2.202	0.031
西太副高西界	-0.026	0.010	-2.469	0.016

也将部分水汽输送到黄河中游,尤其是季风减弱时,西风带在阻塞高压减弱的情况下会得到增强,输送的水汽也会明显增加。因此,当季风减弱后,位于山地西侧的黄河中游河龙区间和龙三区间会

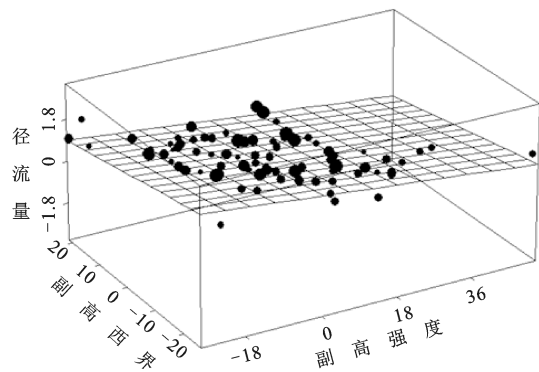


图4 龙三区间径流量与西太平洋副高强度和西界的二元回归散点分布

Fig.4 Binary regression distribution of runoff with intensity of WPSH and west boundary of WPSH in Longsan Region

接受更多的西风带水汽,西风带的周期变化将对这两个区间的径流量产生影响,但在主河道的西侧河龙区间的高程是西高东低,很难形成降雨,在穿过黄河主河道后,遇到的山体由于高度不够,拦截水汽能力有限,因此,河龙区间虽然在25 a左右存在一个周期,但不够显著。河龙区间的东侧和南侧都是高大的山体,能有效的拦截西风带气流,形成降雨,促进径流的增加。通过回归分析可以发现,北大西洋涛动与黄河中游河龙区间和龙三区间的径流量之间具有比较好的相关性, t 检验的 p 值都低于0.05,而与三花区间的关系不太明显,显著性检验的 p 值大于0.05(表2)。

表2 黄河中游3个区间径流量与NAO的回归分析
Table 2 The results of regression analysis between NAO and runoff in the middle Huanghe River

	回归系数	标准差	t 检验值	显著性 p 值
河龙区间	-0.065	0.0244	-2.660	0.010
龙三区间	-0.083	0.030	-2.801	0.007
三花区间	-0.100	0.053	-1.886	0.063

从更小的2~14 a周期来看,河龙区间只在20世纪60年代以前有2~8 a的周期震荡,之后不存在这些小的周期,这与夏季风在小尺度的周期特性是对应的,夏季风同样表现为以60年代为分界点,前期存在小的周期波动,而后期多表现出趋势性的减弱。相比河龙区间,龙三和三花区间在小的周期上有更多的表现,但同样具有以60年代为界限的特征,前期小的周期更明显,后期2个区间只有14 a左右的周期。说明在80 a周期里,季风的小

的波动对整个研究区的径流量也有周期影响。而季风减弱后,西风带存在的13 a周期影响着成雨条件较好的龙三区间的径流量的周期变化。

3.4 径流量与影响因素间的多元回归分析

黄河中游径流量的变化受到多个环流因子的影响,在不同尺度上的周期变化对不同影响因素存在响应,为更为全面的反应不同区间的径流量对不同影响要素的响应差异,我们将3个区间的径流量与夏季风、中纬度西风 and 西太平洋副高强度及西界作了多元回归分析(表3)。可以看出,相较于北大西洋涛动和西太平洋副高,夏季风对河龙区间径流量变化的影响更显著,龙三区间受北大西洋涛动指数的影响更显著,而三花区间更多的受到西太平洋副高强度和西界的影响,与其它因素间的相关性不明显。可以看出,黄河中游不同区间的径流量变化是受到不同因素影响的,不同因素的周期性变化使得不同区间径流量产生相应的周期变化。夏季风起着主导作用,在夏季风减弱后,北大西洋涛动和西太副高的影响才能得到更多体现。

表3 黄河中游不同区间径流量与影响因素间的多元回归分析

Table 3 The results of regression analysis between runoff of three regions and influence factors in middle Huanghe River

区间	影响因素	回归系数	标准差	t 值	p
河龙区间	夏季风	0.39	0.15	2.52	0.014
	西太副高强度	-0.02	0.05	-0.33	0.755
	西太副高西界	-0.04	0.05	-0.90	0.372
	北大西洋涛动	-0.04	0.03	-1.38	0.171
龙三区间	夏季风	-0.27	0.19	-1.42	0.159
	西太副高强度	-0.02	0.06	-0.34	0.734
	西太副高西界	0.03	0.06	0.52	0.604
	北大西洋涛动	-0.10	0.03	-3.11	0.003
三花区间	夏季风	-0.11	0.33	-0.33	0.740
	西太副高强度	-0.28	0.11	-2.53	0.014
	西太副高西界	-0.30	0.11	-2.81	0.006
	北大西洋涛动	-0.10	0.06	-1.80	0.076

4 结论与讨论

4.1 结论

1)黄河中游3个区间的径流量都存在明显的周期变化,都具有比较相似的80 a和25 a左右两个周期变化规律,且分布在研究期内的大部分时间

段上;低于25 a时间尺度上,3个区间径流量的周期变化具有差异,有2~8 a和13 a的周期。

2) 夏季风的80 a长周期变化是致使黄河中游3个区间的径流量具有80 a多寡周期转变的主要成因。

3) 西太平洋副高和中纬度西风的25 a左右周期变化分别使得三花区间和龙三区间的径流量出现相应的周期转变。

4) 在夏季风强盛时期,黄河中游的径流量更容易表现出2~8 a的小周期波动,夏季风减弱后,中纬度西风和西太平洋副高的次一级的13 a周期分别在龙三区间和三花区间的径流量周期变化上表现出来。

4.2 讨论

黄河中游干流3个区间径流量的周期性具有比较高的相似性,尤其是中长期周期变化上,通过回归分析发现这些周期的成因是不同的。夏季风、中纬度西风和西太平洋副高是影响研究区内径流量周期波动的3个主要环流因子,总体来看,夏季风对3个区间径流量的周期变化起着主导作用,虽然黄河中游处于季风区的边缘,但夏季风仍是本区水汽输送的主要来源,因此,研究区内3个区间的径流量都具有80 a的周期。中纬度西风输送的水汽是本区降水-径流形成的又一来源,这个环流因子的25 a左右的周期强弱变化使黄河中游龙三区间的径流也表现出相应的周期变化,虽然河龙区间的25 a周期并不明显,但这也从侧面反映中纬度西风对于河龙区间和龙三区间的降水-径流过程是有一定贡献的。西太平洋副高的强度和西界在25 a左右的周期变化使得三花区间的径流量在研究期内也表现出了相应的周期变化。在更小的时间尺度上具有更复杂的依存关系,夏季风活跃时,3个区间径流量都存在2~8 a的小周期,自20世纪60年代开始季风减弱后,2~8 a的周期性变化也随之减弱。20世纪后期,龙三区间和三花区间还具有一个13 a左右的隐含周期,分别受西风带和西太平洋副高的影响形成。虽然黄河中游的季风气候特征明显,季风是影响本区径流量变化的主导因素,但绝不是唯一的影响因素,由于黄河中游的位置靠近西部,在地势上又在二级台阶的前沿,西太平洋副高和西风带对黄河中游的径流量变化也具有不可忽视的作用,中纬度西风是另一个重要水汽来源,而西太平洋副高与夏季风

共同作用使得黄河中游的径流量表现出不同尺度的周期变化。从径流量的总量来看,黄河中游的径流量主要还是受到夏季风强弱变化控制,也就是说,夏季风的减弱是黄河水资源不断减少的主因,中纬度西风和西太平洋副高的影响只是起到了一定的缓解作用,黄河中下游水资源供给的不足还有待强夏季风周期的回归才能得到有效遏制,根据周期性预计,这个时刻或许会出现在2040年前后。

随着全球气候变化研究的深入,进一步挖掘多环流因子对径流量的影响机制将推进水文水资源与气候过程研究工作的开展,也必将促进水资源科学和气候学的发展。

参考文献(References):

- [1] 夏军, 雒新萍, 曹建廷, 等. 气候变化对中国东部季风区水资源脆弱性的影响评价[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(1): 8-14. [Xia Jun, Luo Xinping, Cao Jianting et al. Impact and assessment of climate change on the water resources vulnerability in the eastern China monsoon region. *Advances in Climate Change Research*, 2015, 11(1): 8-14.]
- [2] 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 Jun, Liu Chunzhen, Ren Guoyu. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(1): 1-12.]
- [3] Burn B H. Hydrologic effects of climatic change in west-central Canada. *J Hydro*, 1994, 160: 53-70.
- [4] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006: 1-116. [Wang Guoqing. Impacts of climate change on hydrology and water resources in the middle reaches of the Yellow River Basin. Nanjing: Hohai University, 2006: 1-116.]
- [5] 李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学, 2013, 33(4): 457-464. [Li Fengping, Zhang Guangxin, Dong Liqin. Studies for Impact of Climate Change on Hydrology and Water Resources. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(4): 457-464.]
- [6] Jiongxin Xu. Temporal variation in summer monsoon intensity since 873 and its influence on runoff in the drainage area between Hekouzhen and Longmen, Yellow River basin, China[J]. *Climatic Change*. 2012, 11(2): 283-296.
- [7] Wilby R, Greenfield B, Glenn C. A coupled synoptic-hydrological model for climate change impact assessment[J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 153(1-4): 265-290.
- [8] Viney N R, Sivapalan M. The hydrological response of catchments to simulated changes in climate[J]. *Ecological Modelling*, 1996, 86(2-3): 189-193.
- [9] Sefton C E M, Boorman D B. A regional investigation of cli-

- mate change impacts on UK streamflows[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 195(1-4): 26-44.
- [10] 李二辉, 穆兴民, 赵广举. 1919-2010年黄河上中游区径流量变化分析[J]. *地理科学*, 2014, 25(2): 155-163. [Li Erhui, Mu Xingmin, Zhao Guangju. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow river from 1919-2010. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 155-163.]
- [11] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H, Zhang X W. Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach[J]. *Water Resources Management*, 2002, 16: 239-261.
- [12] 王随继, 李玲, 颜明. 气候和人类活动对黄河中游区产流量变化的贡献率[J]. *地理研究*, 2013, 32(3): 395-402. [Wang Suiji, Li Ling, Yang Ming. The contributions of climate change and human activities to the runoff yield changes in the middle Yellow River Basin. *Geographical research*, 2013, 32(3): 395-402.]
- [13] 张淑兰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 泾河流域近50年来的径流时空变化与驱动力分析[J]. *地理科学*, 2011, 31(6): 721-726. [Zhang Shulan, Wang Yanhui, Yu Pengtao et al. Spatio-temporal variance of annual runoff in Jinghe River Basin of northwest China in past 50 years and its main causes. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(6): 721-726.]
- [14] 赵建民, 陈彩虹, 李靖. 水土保持对黄河流域水资源承载力的影响[J]. *水利学报*, 2010, 41(9): 1079-1086. [Zhao Jianmin, Chen Caihong, Li Jing. Impacts of soil and water conservation on water resources carrying capacity in Yellow River basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(9): 1079-1086.]
- [15] 常丹东, 刁鸣军, 王礼先. 黄河流域水土保持定额减水研究[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 57-64. [Chang Dandong, Diao Mingjun, Wang Lixian. Water reduction norm of soil and water conservation in Yellow River basin. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 57-64.]
- [16] Zhifeng Yang and Qiang Liu. Response of stream flow to climate changes in the Yellow River Basin, China [J]. *J. Hydrometeorol*, 2011, 12: 1113-1126.
- [17] 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 1873~2000年东亚夏季风变化的研究[J]. *大气科学*, 2004, 28(2): 206-216. [Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei et al. Studies on the variations of East-Asian summer monsoon during AD 1873~2000. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(2): 206-216.]
- [18] 孙颖, 丁一汇. 未来百年东亚夏季降水和季风预测的研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2009, 39(11): 1487-1504. [Sun Yin, Ding Yihui. A projection of future changes in summer precipitation and monsoon in East Asia. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 39(11): 1487-1504.]
- [19] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152-164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest china. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152-164.]
- [20] 田俊, 马振峰, 范广洲. 高原季风对500hPa中纬度西风带活动的影响[J]. *成都信息工程学院学报*, 2010, 25(1): 61-68. [Tian Jun, Ma Zhenfeng, Fan Guangzhou. The relationships between Plateau monsoon and 500hPa westerly activities in Mid-latitude. *Journal of Cheng Du University of information Technology*, 2010, 25(1): 61-68.]
- [21] 穆巧珍, 王绍武, 朱锦红, 等. 近百年夏季西太平洋副热带高压的变化[J]. *大气科学*, 2001, 25(6): 788-797. [Mu Qiaozhen, Wang Shaowu, Zhu Jinhong et al. variations of western pacific subtropical high in summer during last hundred years. *Chinese journal of atmospheric sciences*, 2001, 25(6): 788-797.]
- [22] 安芷生, 刘晓. 东亚季风气候的历史与变率[J]. *科学通报*, 2000, 45(3): 238-249. [An Zhisheng, Liu Xiao. The history and variations of east Asian monsoon climate. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(3): 238-249.]
- [23] 郭其蕴. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析[J]. *地理学报*, 1983, 38(3): 207-217. [Guo Qiyun. The summer monsoon intensity index in east Asian and its variation. *Acta Geophica Sinica*, 1983, 38(3): 207-217.]
- [24] 施能. 近40年东亚冬季风强度的多时间尺度变化特征及其与气候的关系[J]. *应用气象学报*, 1996, 7(2): 175-182. [Shi Neng. Features of the east Asian winter monsoon intensity on multiple time scale in recent 40 years and their relation to climate. *Quarterly journal of applied meteorology*, 1996, 7(2): 175-182.]
- [25] 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 近40年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常[J]. *大气科学*, 1996, 20(5): 575-583. [Shi Neng, Zhu Qiangen, Wu Bingui. the east Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather climate anomaly in china for 40 years. *scientia atmospheric sinica*, 1996, 20(5): 575-583.]
- [26] Tao S Y, Chen L X. The east Asian summer monsoon proceedings of international conference on monsoon in the far east [A]. Tokyo, 1985, Nov. 5-8, 1-11.
- [27] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems [J]. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 1992, 118: 877-926.
- [28] 龚道溢, 周天军, 王绍武. 北大西洋涛动变率研究进展[J]. *地理科学进展*, 2001, 16(3): 413-420. [Gong Daoyi, Zhou Tianjun, Wang Shaowu. Advance in the studies on north atlantic oscillation (nao). *Advance in earth sciences*, 2001, 16(3): 413-420.]
- [29] Morlet J. Wave propagation and sampling theory and complex wave. *Geophysics*, 1982, 47(2): 222-236.
- [30] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998. 79(1): 61-78.
- [31] 赵振国, 朱艳峰, 柳艳香, 等. 1880-2006年中国夏季雨带类型的年代际变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4: 95-100. [Zhao Zhenguo, Zhu Yanfeng, Liu Yanxiang et al. Decadal Variation of Summer Rain-Pattern in China During 1880-2006. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4: 95-100.]

- [32] 陈红, 薛峰. 东亚夏季风和中国东部夏季降水年代际变化的模拟[J]. 大气科学, 2013, 37(5): 1143-1153. [Chen Hong, Xue Feng. Numerical simulation of the decadal variations in the East Asian summer monsoon and summer rainfall in eastern China. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(5): 1143-1153.]
- [33] 夏军, 苏人琼, 何希吾, 等. 中国水资源问题与对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2008, 23(2): 116-120. [Xia Jun, Su Renqiong, He Xiwu et al. Water resources problems in China and their countermeasures & suggestions. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2008, 23(2): 116-120.]

Effects of Summer Monsoon and Other Atmospheric Circulation Factors on Periodicities of Runoff in the Middle Huanghe River During 1919-2010

Yan Ming¹, Li Fuxing^{1,2}, He Li¹, Lyu Meichao¹, Chen Dong¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Morlet wavelet method was adopted to analyze the periodicities of runoff in three regions (Hekouzheng-Longmen, Longmen-Sanmenxia and Sanmenxia-Huayuankou), and to explore its effects on summer monsoon, Westerlies and West Pacific Subtropical High (WPSH) on the changes of runoff. Data collected are cumulative natural runoff of four hydrology stations in the middle Huanghe River, annual summer monsoon index, North Atlantic Oscillation, and strength and west boundary of WPSH. Analysis results indicate that the weaken of summer monsoon intensity leads to decreasing trend of runoff in Hekouzheng-Longmen. More importantly, summer monsoon has periodic change, and it's the mainly reason to periodic vibrations of runoff. Besides, runoff indicate a 80 year period, and it is coincident with 80 year period of summer monsoon. The periodicities of runoff are influenced by both summer monsoon and westerly and WPSH. Additionally, runoffs in all these three regions have a medium scale periodicity with 25 year cycle, except the summer monsoon. The 25 year periodicity of runoff in Hekouzheng-Longmen region and Longmen-Sanmenxia region is caused by Westerlies, while the periodicity of runoff in Sanmenxia-Huayuankou region is caused by the intensity and west boundary of the WPSH. The study has theoretical and practical significance for the prediction of water resources in the Huanghe River Basin in the future.

Key words: wavelet analysis; runoff; summer monsoon; West Pacific Subtropical High; the middle Huanghe River