

基于 Morlet 小波的呼伦湖流域降水多时间尺度分析

韩知明, 贾克力, 杨芳, 孙标

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要:利用 Morlet 小波分析方法对呼伦湖流域,海拉尔市、满洲里市、克鲁伦河水文站与乌尔逊河水文站的 1961—2014 年降水序列进行小波特征分析,根据降水序列多时间尺度分析结果,揭示呼伦湖流域多年降水变化特征。结果表明:(1) 研究区年降水量的周期变化特征主要为,海拉尔市年平均降水存在 6 a、11 a 与 27 a 的主周期;满洲里市存在 10 a、16 a 与 27 a 的主周期;克鲁伦河存在 7 a、13 a 与 28 a 的主周期;乌尔逊河存在 5 a、13 a、20 a 与 29 a 的主周期。(2) 通过对各序列枯水期的计算,预测海拉尔市与满洲里市将于 2017 年进入枯水期,克鲁伦河与乌尔逊河将于 2019 年进入枯水期;(3) 预测显示呼伦湖流域在 2018—2026 年,呼伦湖流域降水减少,进入枯水期;在 2027—2035 年,呼伦湖流域的降水量充沛,进入丰水期。

关键词:Morlet 小波; 克鲁伦河; 乌尔逊河; 降水

中图分类号:P467; TV125

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)01-0160-07

Analysis on Multi Time Scale Yearly Precipitation of Hulun Lake Watershed Based on Wavelet Morlet Analysis

HAN Zhiming, JIA Keli, YANG Fang, SUN Biao

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The Morlet wavelet method is used to analyze the precipitation data series from 1961 to 2014 at Hailaer, Manzhouli, Kelulun river gauge stations and Wuerxun River gauge station of Hulun Lake watershed. The characteristics of the annual precipitation variation of Hulun Lake watershed are determined by the multiple time scale analysis of the precipitation time series. (1) The main periodic variations of the annual precipitation of the research basin are as follows. There are 6-year, 11-year and 27-year main variation periods of average annual precipitation in Hailaer city; there are 7-year, 13-year and 28-year main variation periods of average annual precipitation at Kelulun river gauge station, and there are 5-year, 13-year and 29-year main variation periods of average annual precipitation at Wuerxun river gauge station. (2) Based on estimation of the dry periods of each station, it is predicted that Hailaer and Manzhouli will be in the dry periods since 2017, and Kelulun river and Wuerxun river will be in the dry periods since 2019. (3) It is predicted that Hulun Lake will be in the dry period in 2018—2026, and it will be in the wet season in the period from 2027 to 2035.

Keywords: Morlet wavelet theory; Kerulen River; Wuerxun River; precipitation

湿地降水的时空分异是湿地形成、演化和分异的基础^[1]。随着全球气候变暖、经济高速增长及城市化水平提高,区域湿地降水时空分布发生再分配,对湖泊湿地下垫面植被群落类型和分布^[2]、湿地蓄水^[3]及气候调节作用^[4]等产生严重影响。尤其,在我国北方地区,降水趋势变化将改变区域生态系统平衡,影响自然湖泊湿地水环境质量^[5-6]。基于湿地生态保护

及湿地健康监测,有必要对区域湿地降水特征进行时间尺度分析,为研究湿地演化及湿地管理提供重要基础信息。

小波分析是水文时间序列分析中的重要工具之一,主要用于研究水文序列的变化趋势和周期等组成^[7-8]。基于小波理论的多时间尺度分析可将非平稳时间序列分解为较原始序列平稳得多的时间序列,然

收稿日期:2017-02-22

修回日期:2017-03-28

资助项目:国家自然科学基金项目:(51339002,51409288,51509133,51569019,51669022,51269017);内蒙古农业大学优秀青年科学基金(2014XYQ-10);高等学校博士学科点专项科研基金(20131515120005)

第一作者:韩知明(1992—),男,河南省许昌人,硕士研究生,研究方向:水文地球化学。E-mail:m15029258074@163.com

通信作者:贾克力(1958—),男,山西省忻州人,教授,研究方向:环境科学与资源利用。E-mail:kelijia58@126.com

后对分解后的各序列进行分别研究^[9],继而可以清晰地提取出隐藏在水文时间序列中的多种变化周期,充分反映系统在多种不同时间尺度中的变化趋势,并能对水文系统未来发展趋势进行定性化估计。例如,Souza Echer 等^[10]研究了巴西 Pelotas 百年(1894—1995 年)降水量序列变化趋势,同时使用小波变换、交叉谱方法分析了该地年降水量与 ENSO、准两年振荡和太阳黑子数的变化关系。De Jongh 等^[11]应用比利时 Uccle 站点 105 年的降水资料,采用小波分析方法,分别对该地区年、月和季节降水变化进行了研究。Narisma 等^[12]应用小波分析方法分析了全球 20 世纪降水的区域突变。以上研究主要是采用长时间(百年)、单站资料或在较大区域选择有限的站点进行分析,以揭示降水变化规律特征。

目前对呼伦湖流域降水方面的研究相对较少。李翀^[13]等利用水量平衡模型来模拟呼伦湖水面蒸发与水量平衡,王志杰^[14]等对呼伦湖水量的现状及未来气候下可能的存在状态进行了分析,万华伟^[15]等对呼伦湖水面动态变化遥感监测及气候因素驱动进行了分析;然而,以湖泊湿地演化为背景,针对流域降水特征的研究还不完善,因此,本文利用 Morlet 小波理论对呼伦湖流域近 55 a(1961—2014)降水资料进行多时间尺度分析,以揭示呼伦湖流域降水的时空多尺度变化特征,为降水预测和水资源利用提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

呼伦湖流域位于温带半干旱大陆性季风气候区,流域面积约为 33 469 km²。该区域气候主要呈现为春季干旱多风,夏季蒸发强烈降水集中,秋季气温降幅较大,冬季寒冷漫长。流域不同地区年均气温为一 0.5~0.5℃,积雪期为 140 d 左右。全年盛行西北风,年均降雨量为 200~300 mm 左右,湖水封冻时间长达 180 d,冰层厚可达 1 m 以上^[16]。呼伦湖流域位于东北区域,是中国第五大淡水湖,也是东北地区第一大湖,呈西北至东南不规则斜长方形,湖长 93 km,平均宽度为 32 km,最大湖宽 41 km,湖水面积 2 339 km²。呼伦湖水系包括呼伦湖、新开河、克鲁伦河、乌尔逊河、乌兰泡、哈拉哈河等主要湖泊和支流^[17]。流域内主要的雨量站位于坤都冷水文站和阿拉坦额莫勒水文站。

1.2 数据来源

降水数据来源于克鲁伦河阿勒坦额莫勒水文站(1961—2014),乌尔逊河坤都冷水文站(1961—2014),满洲里气象站(1961—2008),海拉尔坝后水文站(1961—2008)。

1.3 研究方法

1.3.1 Morlet 小波 Morlet 小波不但具有非正交性而且还是 Gaussian 调节的指数复值小波,在时间与频率的局部化之间具有较好的平衡,因此本文选取复 Morlet 小波函数作为基函数进行小波变换。

$$\Psi_0(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (1)$$

式中: t 为时间, ω_0 是无量纲频率。

1.3.2 小波变换 对于给定的水文序列和 Morlet 小波,其连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

式中: a 为尺度因子,反映小波的周期长度; b 为时间因子,反映时间上的平移;复共轭复数; $W_f(a, b)$ 称小波变换系数。实际工作中,时间序列常常是离散的,则式(2)的离散形式为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (3)$$

式中: $W_f(a, b)$ 能同时反映时域参数 a 和 b 频域参数, a 的特性是时间序列 $f(t)$ 或 $f(\Delta t)$ 通过单位脉冲响应的滤波器的输出。当 a 较小时,对频域的分辨率低,对时域的分辨率高;当 a 增大时,对频域的分辨率高,对时域的分辨率低。因此,小波变换实现了窗口的大小固定,形状可变的时频局部化。

1.3.3 小波方差 将时间域上的关于 a 的所有小波变换系数的平方进行积分,即为小波方差:

$$\text{var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (4)$$

小波方差 a 随尺度变化过程称为小波方差图,反映了波动的能量随尺度的分布。通过小波方差图,可以确定一个水文序列中存在的主要时间尺度,即主周期。

2 结果与分析

2.1 年降水序列多时间尺度分析

根据呼伦湖流域各地区年降水小波分析结果,除了乌尔逊河,其他三地(海拉尔、满洲里和克鲁伦河)的年降水量主要存在 3 个明显的特征时间尺度,见图 1,海拉尔特征时间尺度分别是 6 a, 11 a 和 27 a,满洲里分别为 10 a, 16 a 和 27 a,克鲁伦河分别出现在 7 a, 13 a 和 28 a,而乌尔逊河存在 4 个明显的特征时间尺度,分别是 5 a, 13 a, 20 a 和 29 a。其中各地能量最强、周期最显著且存在于整个统计时间内的特征时间尺度分别出现在海拉尔 27 a,满洲里 27 a,克鲁伦河 28 a 以及乌尔逊河 29 a。同时,各地普遍从 20 世纪 70 a 左右出现明显的短周期特征,主要在海拉尔 6 a,满洲里 10 a,克鲁伦河 7 a,乌尔逊河 5 a。

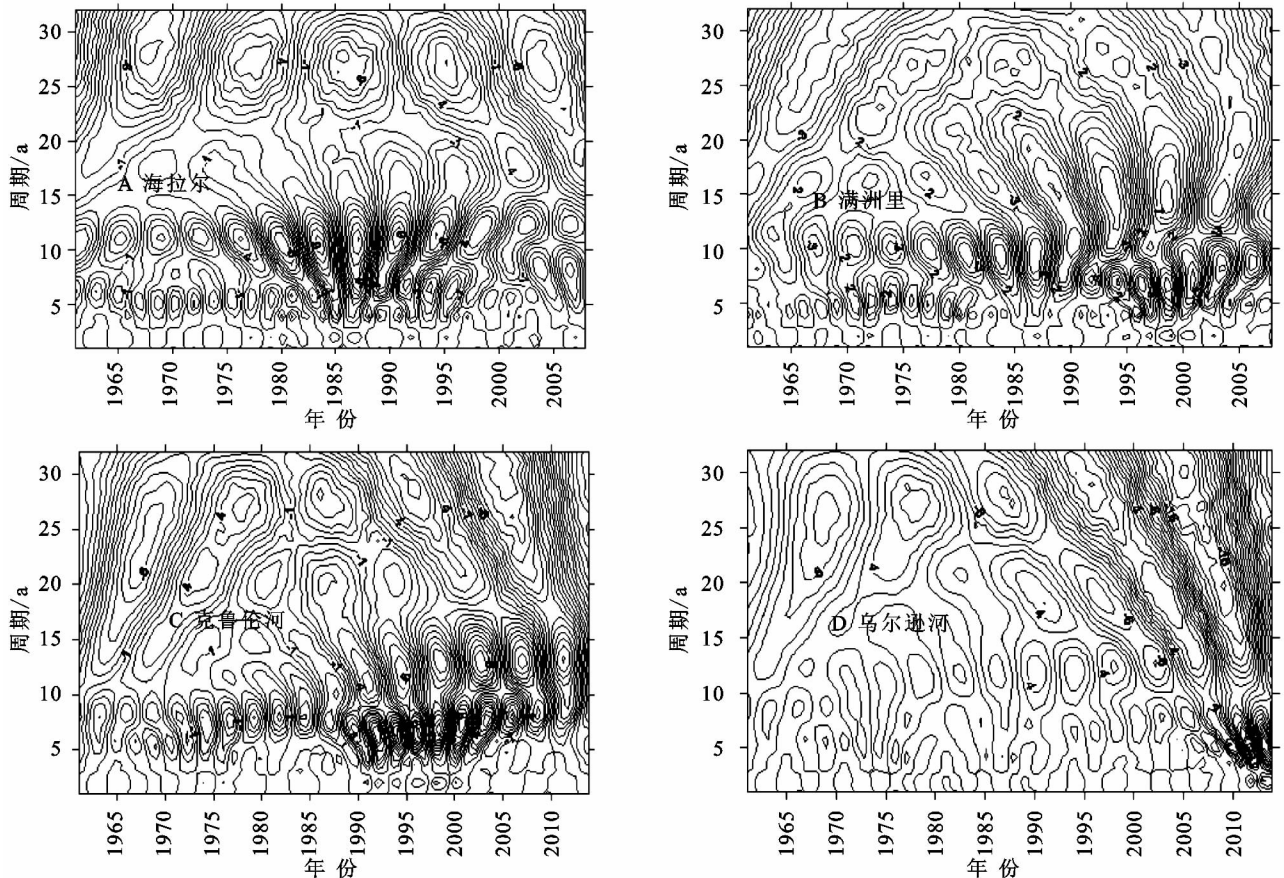


图1 呼伦湖流域各地区年降水小波图

2.2 年降水变化过程分析

小波变换实部变化过程可以表达年际降水量丰枯期和突变点变化情况。图2是呼伦湖流域各地区年降水量距平序列不同尺度小波系数实部变化过程图。由图2A可明显看出海拉尔多年降水过程在6a特征时间尺度上平均变化周期为5a左右,大约经历了12个高低转换期;在11a上,平均周期为10a左右,大约经历了6个高一低转换期;而在27a上,降水量的变化周期为20a左右,大约经历了3个周期的高低变化。满洲里多年降水变化过程(图2B)在10a特征时间尺度上,大约经历了7个高一低转换期;在16a特征时间尺度上,大约经历了4个高一低转换期;而在27a特征时间尺度上,大约经历了2个周期的高低变化。27a左右的周期变化趋势中包含着10a与16a左右的周期变化。

克鲁伦河和乌尔逊河是呼伦湖流域的主要入湖水系,也是额尔古纳河水系的重要组成部分,是研究区重要的水量补给河流。克鲁伦河多年降水变化过程(图2C)在7a特征时间尺度上大约经历了10个高一低转换期;在11a特征时间尺度上,大约经历了5个高一低转换期;而在28a特征时间尺度上大约经历了3个周期的高低变化。在大周期28a的趋势里

包含了2个小周期的变化而且小周期重复出现次数有明显增加趋势,对呼伦湖流域湖泊湿地水量平衡变化趋势有着重要影响。乌尔逊河多年降水变化过程(图2D)在5a特征时间尺度上大约经历了15个高一低转换期,在13a特征时间尺度上大约经历了7个高一低转换期,在20a特征时间尺度上大约经历了3个周期的高低变化,而在29a特征时间尺度上,大约经历了2个周期的高低变化。其中乌尔逊河具有4个特征时间尺度,且在周期的强度与跨度上逐渐增大,平均周期5a,13a和20a的短周期频率有明显的增多趋势。强度最大的29a特征时间尺度也体现出小周期所拥有的变化特征,所以乌尔逊河是影响呼伦湖流域最重要的因素之一,且它的降水量变化在很大程度上关系到呼伦湖未来的发展走向。

2.3 季节性降水变化小波分析

基于呼伦湖流域特殊的地理位置与特殊的气候条件,降水主要集中在夏季与秋季,而克鲁伦河和乌尔逊河贯穿呼伦湖流域,是呼伦贝尔草原的血液,对草原生态起着重要的调节作用,因此对两条河流的降水在季节上做了进一步的研究。为了更合理更鲜明地显示出降水规律统计时间以4—9月的累积降水量为夏季总降水,10月—翌年3月的累积降水量为冬季总降水。

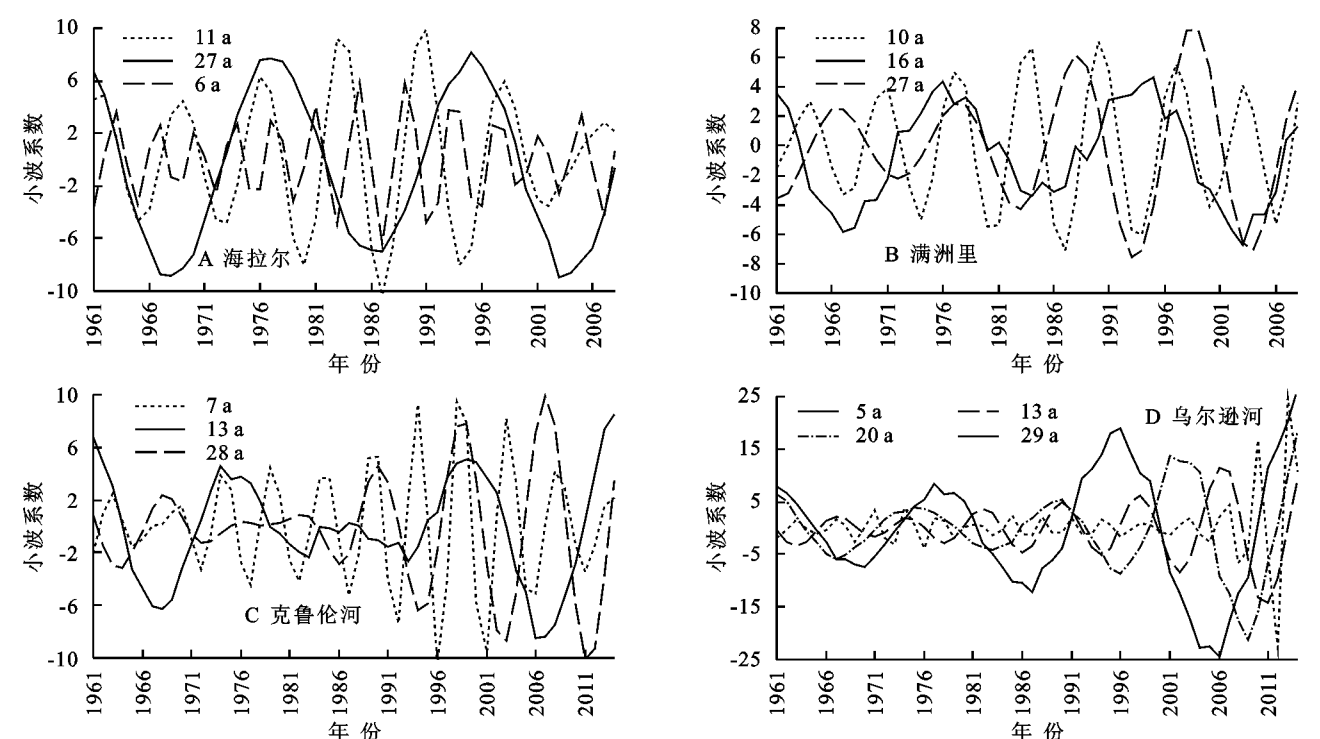


图 2 呼伦湖流域各地区年降水量距平序列不同尺度小波系数实部变化过程

克鲁伦河夏季降水量主要存在 3 个明显的特征时间尺度(图 3),分别是 7 a,13 a 和 28 a,与克鲁伦河年降水量的 3 个特征时间尺度一样,说明夏季降水在全年的降水中占主导。7 a 左右的时间尺度降水周期在 1970—2010 年之间稳定存在,且在 1995—

2005 年这 10 a 间周期强度加大,与克鲁伦河年降水量的变化周期一致。13 a 左右的时间尺度降水周期在 1995 年以后稳定存在,之前表现很弱。28 a 左右的时间尺度的能量最强,周期最显著而且稳定存在 54 a 中。

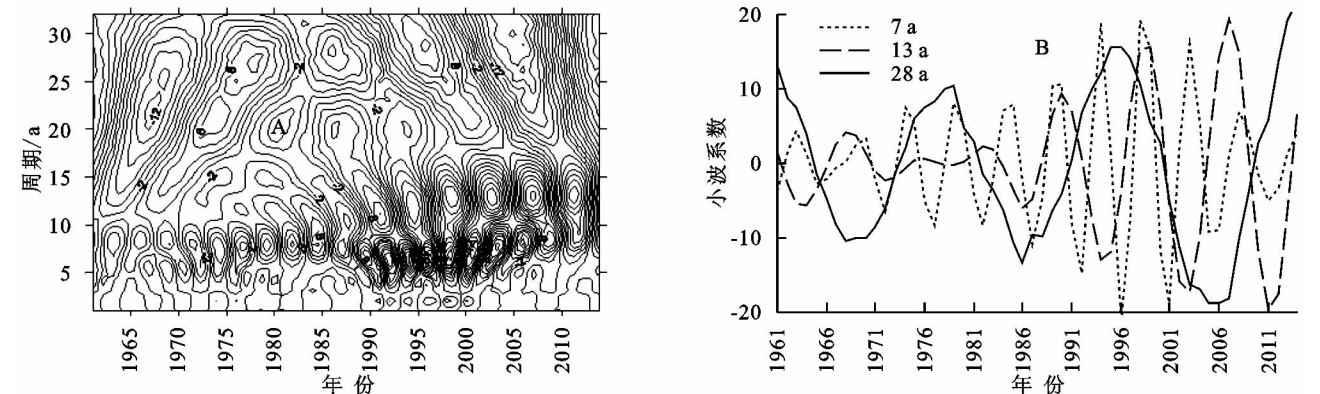


图 3 克鲁伦河夏季降水小波图及其对应的不同尺度小波系数实部变化过程

克鲁伦河冬季降水量主要存在 3 个明显的特征时间尺度(图 4),分别是 5 a,22 a 和 28 a。22 a 左右的时间尺度降水周期最显著且稳定存在 54 a 中。28 a 左右的时间尺度的能量最强,在 1980 年后震荡趋于稳定。与克鲁伦河年降水量与夏季降水量的特征时间尺度 28 a 一致,说明大周期的变化相对比较稳定。5 a 左右的时间尺度降水周期在 1980 年之前与 2000 年以后稳定存在。短周期降水变化幅度增加显著,说明冬季降水强度增加,但频率降低,是冬季极端寒冷天气频发及冬季平均降水过程减少的重要证据。

通过分析可以发现 20 世纪 90 年代初期到 21 世

纪初期小波系数的振幅增强且周期逐渐缩短,夏季降水量明显加大,冬季降水有减小趋势。这与克鲁伦河年降水量的 3 个特征时间尺度上的小波系数实部变化过程一致,进一步的表明了气候变化下,研究区降水更加集中在了夏季(4—9 月),年内降水分配不均问题加剧。

图 5 显示乌尔逊河夏季降水量主要存在 3 个明显的特征时间尺度,分别是 5 a,13 a 和 29 a。5 a 左右的时间尺度降水周期在 1975 年前后 5 a 间稳定存在,2010 年后震荡强烈。13 a 左右的时间尺度降水周期在 20 世纪 80 年代后稳定存在。29 a 左右的时间尺度的能量最强,

且具有全域性。乌尔逊河夏季降水量变化过程在 5 a 上,降水量平均变化周期为 4 a,大约经历了 15 个高一低转换期;在 13 a 上,平均周变化期为 8 a,经历了 6 个高一低转换期;而在 28 a 上,降水量变化周期为 18 a,

大约经历了 2 个周期的高低变化。大周期 28 a 的变化里明显包括着 5 a 与 13 a 两个小周期变化,而且在 2010 年之后降水量开始显著增强,特征尺度变化的周期明显缩短,震荡剧烈。

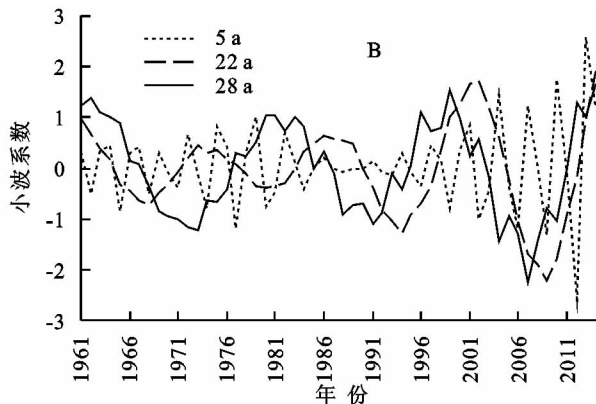
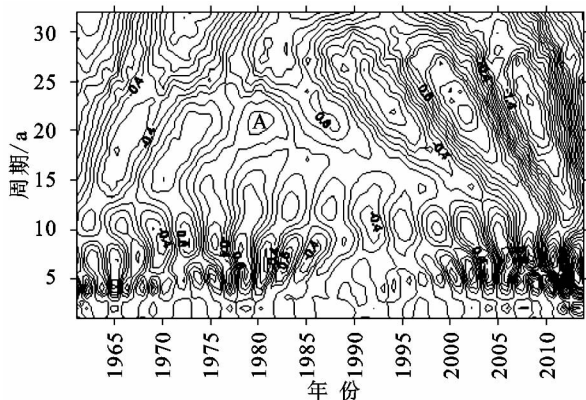


图 4 克鲁伦河冬季降水小波图及其对应的不同尺度小波系数实部变化过程

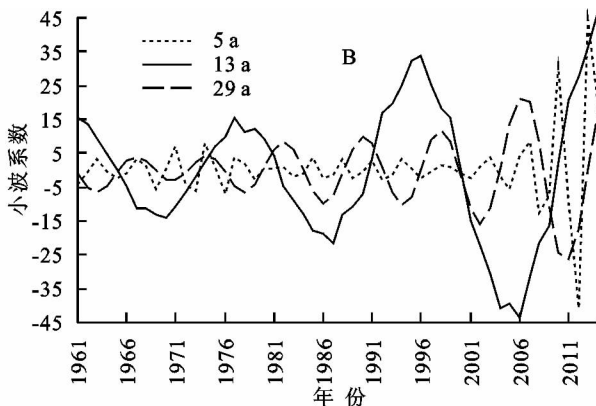
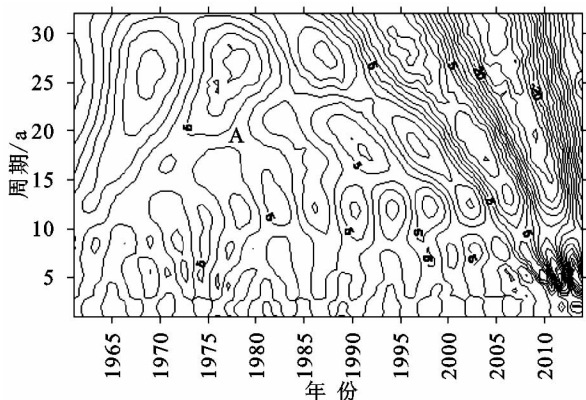


图 5 乌尔逊河夏季降水小波图及其对应的不同尺度小波系数实部变化过程

图 6 显示乌尔逊河冬季降水量主要存在 2 个明显的特征时间尺度,分别是 5 a 和 28 a。5 a 左右的时间尺度降水周期在 20 世纪 90 年代震荡很弱,但之后开始稳定存在。28 a 左右的时间尺度能量最强,在 54 a 中稳定存在,且周期有明显增大的趋势。乌尔逊河冬季降水变化过程在 5 a 特征时间尺度上,平均变化周期为 3 a,大约经历了 16 个高一低转换期;在 28 a 上,降水周期为 19 a,经历了 2 个周期的高低变化。

自 2006 年以后乌尔逊河降水量即使在少雨的冬季也有明显的增多,而且震荡周期强烈频繁,所以映射出夏季降水量也有显著的同样趋势和强度。与乌尔逊河夏季降水量变化过程相比,冬季降水的长周期(28 a)变化一致,短周期进程加快,冬夏季降水量都有增加趋势,但降水频次增加速度显著低于降水幅度变化,是气候变暖条件下,北方降水分配方式改变的重要证据,也是夏季涝灾隐患的先兆。

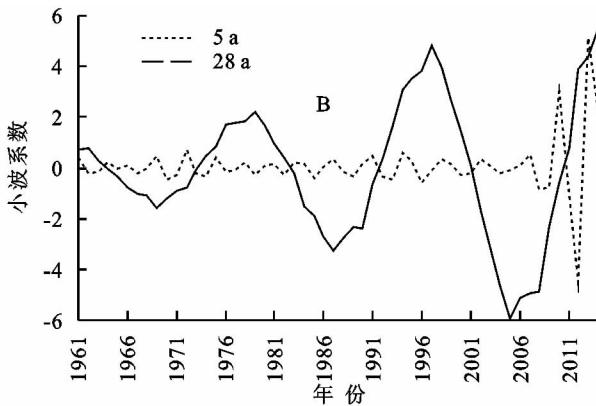
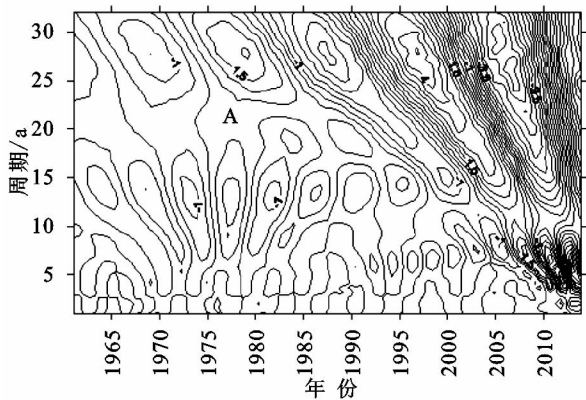


图 6 乌尔逊河冬季降水小波图及其对应的不同尺度小波系数实部变化过程

3 讨论

由本文分析结果得出,海拉尔 6 a 的降水量变化周期基本在 11 a 的降水量变化周期中一致进行,而 6 a 与 11 a 的降水量变化周期基本又在 27 a 的降水量变化周期中同步进行,即大的周期变化趋势中隐含着小周期的变化。这与轩伟^[18]研究额尔古纳河流域近 50 a 水文气象要素变化分析中海拉尔存在 6 a, 12 a, 27 a 的主周期一致。

满洲里市地处呼伦贝尔高原西部边缘地带,毗邻俄罗斯受西伯利亚寒流影响严重,且纬度偏高,远离海洋。海拉尔位于大兴安岭西麓的低山丘陵与呼伦贝尔高原东部边缘的接合地带,因大兴安岭的屏障作用,使湿润的海洋性气候团的影响减弱,大部分时间在西伯利亚高压的控制之下,降水变化相对于满洲里体现出降水量多、分布均匀、变化小等特点。根据赵慧颖等^[19]研究,呼伦湖地区年降水量的变化是自北向南、由西向东、随海拔的升高而增加,三者对年降水量的影响大小依次为经度、海拔高度和纬度等特点得到了充分体现。因此,满洲里的年降水量变化特征时间尺度较大,小尺度的周期变化虽然存在,但不显著且不具有代表性,显示出满洲里降水量分配不均匀。与海拉尔相比,满洲里年降水量变化较大,且降水周期规律没有海拉尔的稳定、明显。

呼伦贝尔草原地区降水主要来源于太平洋夏季风带来的湿润空气,由于地处内陆又受大兴安岭山脉相隔,水汽来源不足,故年降水量较少。多年平均降水量一般为 250~350 mm,降水量自东向西递减到呼伦湖、克鲁伦河一带减至 250 mm 以下^[20]。因此,河流补给是研究区湖泊湿地水量的重要保证。根据黄健^[21]对克鲁伦河与乌尔逊河径流变化的研究,两条河流约在 25 a 左右表现出明显周期性规律。本文所选的四个研究区域的降水量特征时间大尺度都是在 27 a 左右,具体海拉尔与满洲里 27 a 左右、克鲁伦河 28 a 左右、乌尔逊河 29 a 左右,体现了四个研究区所具有的全域性。

54 a 来呼伦湖流域年降水总体有下降趋势。由图 2 可以看出呼伦湖流域各地区在 27~29 a 尺度周期振荡最强最显著,其中,海拉尔在 27 a 尺度上,降水变化的平均周期为 10 a;满洲里在 27 a 尺度上,降水变化的平均周期为 9 a;克鲁伦河在 28 a 尺度上,降水变化的平均周期为 9 a;乌尔逊河在 29 a 尺度上,降水变化的平均周期为 10 a。在 2013 年四个地区正处在降水的丰水期,小波实部变化还有可能继续增大或转而下降,但总体情况还处在丰水期。从图 1 可知 23~30 a 的尺度在 2014 年还没形成闭合,还有

发展的趋势,所以在 2014 年后的一段时间还将处于丰水期,过后 9 a 左右的时间段里将处于枯水期。

呼伦湖主要水源补给河流克鲁伦河与乌尔逊河在季节性降水变化小波分析中可以十分明显的看出研究区降水的季节性变化:夏秋多雨,冬春少雨雪。降水多集中在 6—9 月,占常年的 80% 左右,冬春降雨雪一般在 30~50 mm,约占全年降水量的 20% 左右。其原因是该地区天气系统受蒙古高压、季风环流和地形因素的影响。呼伦湖地区冬季降水量的增加主要集中在 20 世纪 90 年代以来,而春季降水量的增加则进入 21 世纪后更为明显,这正是呼伦湖地区雪灾在 20 世纪 90 年代后期的冬季和 21 世纪初春季多有发生的原因所在^[22]。

伴随气候变化,湖泊湿地的生态环境演变过程发生了变化,降水量、降水日数、日极端降水等的变化趋势^[23-24]是气候变化的重要参数,同时对湖泊湿地生态系统的健康起着非常重要的作用。基于小波分析提供的自适应时域和频域同时局部化的分析方法,研究降水的时间变化周期^[25-27],能自动调节时一频窗,以适应实际分析需要,从而可克服传统的滑动平均、滤波等方法不具有局部化且诊断突变点存在困难的不足,从多年降水变化过程提取反映呼伦湖流域生态环境的变化的有效信息^[28],可为呼伦湖流域生态环境综合治理提供参考依据。

4 结论

(1) 海拉尔的年降水量周期变化明显较其他 3 地稳定,而且周期显著,变化趋势小,但在 20 世纪末开始,周期变化出现显著浮动,而且降水量有所减少,周期有所缩短。

(2) 克鲁伦河的年降水量变化周期显著,而且在大的周期 28 a 左右下包括着 13 a 左右周期变化,在 13 a 周期变化中又包括着 7 a 左右周期变化。说明降水周期有一定的层次性与规律性,而且在 1995—2010 年虽然降水量剧增,但还在小尺度 7 a 左右变化,所以克鲁伦河降水量周期性所受干扰较小,受夏季(4—9 月)降水量的直接影响。

(3) 乌尔逊河的年降水量特征时间尺度较多于其他 3 地,但周期规律并没有其他 3 地明显,且相较于克鲁伦河而言,同样是在降水尺度大周期 28 a 左右下,小周期规律缺少一定的层次性。但同样是受夏季(4—9 月)的降水量的影响,与克鲁伦河一致。在 2008 年以后出现了频繁的高强度降水,这一变化同时出现在了年、夏季和冬季的周期变化中,所以体现出了在年际方面季节的时效性与同步性。

(4) 根据周期的变化趋势可以预测出四个研究区现在正处于丰水期,海拉尔与满洲里将在2017年迎来突变年,由丰水期转为枯水期;克鲁伦河与乌尔逊河将在2019年迎来突变年,由丰水期转为枯水期。利用Morlet小波预测2018—2035年的降水得出:2018—2026年,呼伦湖流域降水量减少,进枯入水期;反之,2027—2035年,呼伦湖流域降水量充沛,进入丰水期。

参考文献:

- [1] 邓伟,胡金明. 湿地水文学研究进展及科学前沿问题[J]. 湿地科学, 2003, 1(1): 12-20.
- [2] Price J S, Waddington J M. Advances in Canadian wetland hydrology and biogeochemistry[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(9): 1579-1589.
- [3] 徐卫红,葛德祥,李娜,等. 1960—2011年洞庭湖流域降水量变化特征[J]. 湿地科学, 2016, 14(1): 108-112.
- [4] Hamlin L, Pietroniro A, Prowse T, et al. Application of indexed snowmelt algorithms in a northern wetland regime[J]. Hydrological Processes, 1998, 12(10/11): 1641-1657.
- [5] 贾文雄,何元庆,李宗省,等. 近50年来河西走廊平原区气候变化的区域特征及突变分析[J]. 地理科学, 2008, 28(4): 525-531.
- [6] 王传辉,周顺武,唐晓萍,等. 近48年青藏高原强降水量的时空分布特征[J]. 地理科学, 2011, 31(4): 470-477.
- [7] Weng H, Lau K M. Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1994, 51(17): 2523-2541.
- [8] Babu GLS, Srivastava A, Sahana V. Analysis of stability of earthen dams in kachchh region, Gujarat, India[J]. Engineering Geology, 2007, 94(3): 123-136.
- [9] Cho S E. Effects of spatial variability of soil properties on slope stability[J]. Engineering Geology, 2007, 92(3): 97-109.
- [10] Souza Echer M P, Echer E, Nordemann D J, et al. Wavelet analysis of a centennial (1895—1994) southern Brazil rainfall series (Pelotas, 31°46' 19"S 52°20' 33"W)[J]. Climatic Change, 2008, 87(3): 489-497.
- [11] De Jongh I L M, Verhoest N E C, De Troch F P. Analysis of a 105-year time series of precipitation observed at Uccle, Belgium[J]. International Journal of Climatology, 2006, 26(14): 2023-2039.
- [12] Narisma G T, Foley J A, Licker R, et al. Abrupt changes in rainfall during the twentieth century[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(6): L06710, doi:10.1029/2006 GL028628.
- [13] 李翀,马巍,叶柏生,等. 呼伦湖水面蒸发及水量平衡估计[J]. 水文, 2006, 26(5): 41-44.
- [14] 王志杰,李畅游,贾克力,等. 呼伦湖生态系统健康状况变化趋势分析[C]. 世界湖泊大会, 2009.
- [15] 万华伟,康峻,高帅,等. 呼伦湖水面动态变化遥感监测及气候因素驱动分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3): 894-898.
- [16] 张娜,乌力吉,刘松涛,等. 呼伦湖地区气候变化特征及其对湖泊面积的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015(7): 192-197.
- [17] Li C, Sun B, Jia K, et al. Multi-band remote sensing based retrieval model and 3D analysis of water depth in Hulun Lake, China[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 771-781.
- [18] 轩玮,李翀,赵慧颖,等. 额尔古纳河流域近50年水文气象要素变化分析[J]. 水文, 2011, 31(5): 80-87.
- [19] 赵慧颖,李成才,赵恒和,等. 呼伦湖湿地气候变化及其对水环境的影响[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5): 795-801.
- [20] 王文华,朱添. 呼伦贝尔草原地区水文特性分析[J]. 东北水利水电, 2011(7): 41-43.
- [21] 黄健. 基于小波理论的呼伦湖流域水文序列随机分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [22] 赵慧颖,乌力吉,郝文俊. 气候变化对呼伦湖湿地及其周边地区生态环境演变的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1064-1071.
- [23] Moberg A, Jones P D. Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in central and western Europe, 1901—99[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(9): 1149-1171.
- [24] Baigorria G A, Jones J W, O'Brien J J. Understanding rainfall spatial variability in southeast USA at different timescales[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(6): 749-760.
- [25] Nolin A W, Hall-McKim E A. Frequency modes of monsoon precipitation in Arizona and New Mexico[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(12): 3774-3781.
- [26] Partal T, Özgür K. Wavelet and neuro-fuzzy conjunction model for precipitation forecasting[J]. Journal of Hydrology, 2007, 342(1/2): 199-212.
- [27] Gan T Y, Gobena A K, Wang Q. Precipitation of southwestern Canada: Wavelet, scaling, multifractal analysis, and teleconnection to climate anomalies[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112, D10110, doi:10.1029/2006 J D007157.
- [28] Bhattacharya G, Jana D, Ojha S, et al. Direct search for minimum reliability index of earth slopes[J]. Computers & Geotechnics, 2003, 30(6): 455-462.