

鄱阳湖流域过去 1000 a 径流模拟以及对气候变化响应研究*

张小琳^{1,2,3}, 李云良^{1,2}, 于 革¹, 张 奇^{1,2**}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为研究过去千年尺度径流变化及其对气候变化的响应, 以长江中游鄱阳湖流域为研究区, 运用气候模式 CCSM4 和 ECHAM5 模拟过去 1000 a 气候数据, 空间降尺度后驱动水文模型模拟了鄱阳湖流域过去近千年流域径流序列. 利用快速傅里叶变换、小波分析等手段, 分析流域极端径流变化特征、周期和该流域旱涝事件发生频率. 结果表明: 2 种气候模式均能反映出中世纪暖期及小冰期阶段的干湿交替变化, 且小冰期内中干旱状态维持时间较长; 径流的丰枯变化与降水量变化具有较好的对应关系. CCSM4 和 ECHAM5 模式下发生旱涝灾害与极大极小降水事件发生频率基本相同, 径流丰枯变化与降水变化周期相近, 均具有 30 a 左右的主周期, 10~15、7 a 左右的子周期. 小波系数模平方图中 30 a 左右显著的能量信号揭示了该周期与北太平洋气候的主要环流机制的太平洋年代际振荡周期相近, 因此, 大气环流涛动是造成气候-水文变化的主要原因. 研究结果拓展了基于近代 60 a 观测记录的流域水文变化的认识, 探讨了千年时间长度下流域干湿变化特征和水文对气候响应的动力机制, 有助于全面系统认识长江中游在全球气候暖化背景下旱涝极端水文事件的发生机制与变化规律.

关键词: 千年尺度; 径流变化; 干湿特征; 水文周期; 鄱阳湖流域; 气候变化

Runoff simulation and response to climate changes for Poyang Basin during the past 1000 years

ZHANG Xiaolin^{1,2,3}, LI Yunliang^{1,2}, YU Ge¹ & ZHANG Qi^{1,2**}

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: We took Poyang Basin as a study area to explore runoff variances during the past 1000 years and the response to climate changes. First, we generated meteorological data for the past 1000 years using climate models CCSM4 and ECHAM5. Then the hydrological model of Poyang Basin was driven using the downscaled meteorological data to produce runoff series. We analysed the characteristics of extreme dry and wet events, the periodic change and the frequency of droughts and floods with fast Fourier transformation and wavelet analysis. It is concluded that both climate models are capable to reflect climate changes during Middle Warm Period and Little Ice Age, indicating a longer dry period in Little Ice Age. There is a good relationship between simulated runoff and precipitation, showing that the drought and flood events have a similar frequency with the minimum and maximum values in precipitation. Also, they have the similar primary period of about 30 years and sub-cycle of around 10 to 15 years and 7 years. The significant signal of 30 years in wavelet power spectrum contours illustrates that such period is consistent with Pacific Decadal Oscillation, which is the main circulation mechanism of the North Pacific climate. Hence, atmospheric circulation oscillation may be the main reason causing meteorological and hydrological changes. This paper extends the current studies on hydrological variances based on data records for the recent 60 years, to a time scale of thousand years. Under the background of global warming, this study helps

* 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB956103)和江西省重大生态安全问题监控协同创新中心项目(JXS-EW-00)联合资助. 2015-07-07 收稿; 2015-10-28 收修修改稿. 张小琳(1993~), 女, 硕士研究生; E-mail: zxlsherrytc@163.com.

** 通信作者; E-mail: qzhang@niglas.ac.cn.

better understand the mechanism and change patterns of drought and flood events in the middle reaches of Yangtze River.
Keywords: Thousand-year scale; runoff variance; floods and droughts; hydrologic circle; Poyang Basin; climate change

长期以来,受观测资料时间序列限制,水文领域研究常常局限于近 50~100 a 间,难以获得百年以上的水文记录和周期认识. 而近年来,全球气候变化问题引起全世界的关注,应运而生的气候模式为探究长时间水文特征变化提供了便利. 气候模式模拟得到的长期气象数据驱动水文模型得到流域水文过程是研究水文变化特征的重要手段. 本文利用气候模式 CCSM4 和 ECHAM5 重建鄱阳湖流域长时间气象、水文序列,突破了水文序列和周期分析受资料限制的瓶颈.

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告(AR5)^[1]采用国际耦合模式比较计划(CMIP5)组织的全球 20 多所研究机构参与气候模拟与预估实验,对过去全球气候变化进行阐述,认为在东亚地区 850—1050 年期间气候偏暖,随后 1350—1880 年期间气候变冷,紧接着就是受人类影响 20 世纪近代温暖期^[2]. 这 3 个气候阶段的气温变化剧烈,局部地区干湿变化明显,被称为中世纪温暖期(Medieval Warm Period, MWP)、小冰期(Little Ice Age, LIA)和近代暖期. LIA 阶段作为近代 21 世纪暖期的前期背景,其干湿变化引起了学者的关注. 早在 20 多年前,徐馨等^[3]对我国东部小冰期气候特征与环境变迁进行研究,发现我国东部地区干湿冷暖变化明显,冷期偏干、暖期偏湿,但其他配置情况同时也有出现. 直到最近杨勋林等^[4]高精度石笋记录研究发现,三峡库区小冰期气候特征中存在明显的年代尺度干湿波动.

鄱阳湖(28°24'~29°46'N, 115°49'~116°46'E)作为我国最大的淡水湖,位于长江中游,流域面积 16.22×10⁴ km²,由赣江、信江、抚河、修水、饶河 5 大主要水系构成,通过湖口与长江保持水力联系(图 1). 湖泊面积在丰、枯季变化剧烈,枯水期湖泊面积仅不足 1000 km²,而丰水季最大可达 4000 km²^[5]. 自 1990s 以来,鄱阳湖流域旱涝极端事件频发,引起了国内学者的关注. 据统计数据显示,鄱阳湖流域旱涝灾害在 1990s 频发,

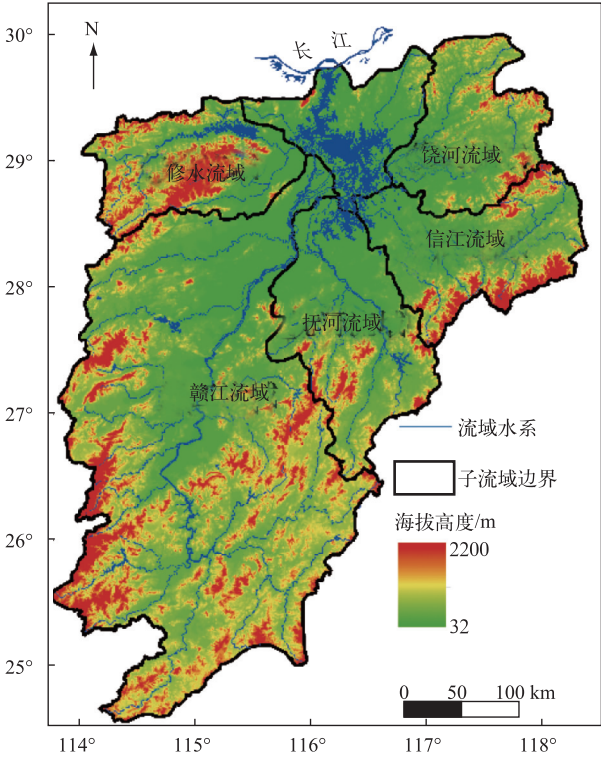


图 1 鄱阳湖流域及其水系

Fig.1 Poyang Basin and river networks

1996、1998 和 1999 年发生了过去 50 a 间最为严重的洪水灾害^[6],而 1992—1993、1996—1997 年则经历了严重的干旱事件. 进入 21 世纪后,在全球气候异常的背景下,2003、2006 和 2007 年鄱阳湖干旱情况愈甚. 目前针对鄱阳湖流域径流变化的研究着眼于以下几个方面:一是气候影响导致流域蒸发量变大^[7],从而径流量变少,流域发生干旱;二是鄱阳湖与长江之间水力联系的变化,长江与鄱阳湖之间此消彼长的相互作用影响了鄱阳湖水量变化^[8];三是三峡水利枢纽的蓄水减小中下游干流秋季流量,增强对鄱阳湖的排空作用,使鄱阳湖出现秋季异常低枯水位^[9]. 上述研究受观测资料限制均着眼于近 50 a 内,难以认识鄱阳湖流域更长时间尺度上的历史旱涝灾害发生规律.

针对水文长期变化,闵骞^[10]利用地方志等史料确定鄱阳湖流域近 600 a 无实测资料时期的洪水年份,从统计角度分析洪水变化特征. 然而,这些分析还难以从动力机制上揭示水文响应气候变化的行为和特征. 本文利用气候模式,结合鄱阳湖流域水文模型,重建鄱阳湖流域过去 1000 a 气象、水文序列,能够更直观、准确地认识千年尺度下流域干湿变化与旱涝水文事件的发生概率. 本文的研究有助于弥补以往研究中利用史料记载或山体沉积物^[11-12]资料对鄱阳湖流域近千年水文环境变化进行定性研究的不足. 对鄱阳湖流域过去 1000 a 气象水文数据进行重建,分析水文响应气候变化的行为和特征及干湿变化,对认识鄱阳湖流域近代极端水文事件发生频次与强度提供参照条件,也在全球气候变化的水文效应研究中提供长江中游大湖流域的研究案例.

1 研究方法

1.1 气候模式

气候模式通常指全球大气环流模式(GCM),基于地球系统中动力、物理、化学和生物过程建立的数学方程组来确定地球各部分圈层的性状,由此构成地球系统的数学物理模型. 采用气候模式模拟的气候系统变化以及变化的响应时间过程和空间特征,是在季节到年代际尺度上的气候变化研究的重要途径. 气候模式从简单的能量平衡方程到复杂的地球系统模式,目前发展的地球系统模式(ESMs),耦合大气、海洋、陆地、海冰,部分模型进一步耦合气溶胶、碳循环、动态植被和大气化学过程^[13]. 其中大气海洋环流模式(AOGCMs)耦合了气候系统中大气、海洋、陆地、冰雪四个部分的动力变化^[1]. 针对历史时期气候变化,CMIP5-PMIP 计划开展了对过去 1000 a 的气候模拟研究计划. 20 多家气候模型组织采用共同的太阳辐射、火山灰指标、温室气体(如 CO₂、CH₄等)等指标作为气候场驱动,通过气候模式的动量、热量、水量等物理模式计算得到近地面温度、高层大气场、大气环流特征等结果^[14]. 本文采用美国通用气候系统模式 CCSM4 和德国的 ECHAM5 模式进行气候模拟^[15],数据来自于 IPCC-GCM 模式中心发布的 42 个模式的实验数据,该数据中心提供相关数据的下载(<http://www.ipcc-data.org/>).

本文采用的 CCSM4 和 ECHAM5 模式模拟作为水文模拟驱动,主要考虑到其对东亚气候特征具有较高的模拟能力^[16]. 美国国家大气研究中心开发的 CCSM4 气候模式^[17],在国内应用得到了较好的评估,近年来田芝平等^[18-19]验证 CCSM4 模式能较好地模拟东亚和我国的气候特征,适合用于长时间积分的气候模拟研究. 同时,由德国马普气象研究所提供的 ECHAM5 模式,在前代 ECHAM4 基础上优化了大气、海洋、陆地、冰雪 4 个部分的动力变化耦合功能,具有较好的模拟能力^[20]. 近年来,布和朝鲁等^[21]将 ECHAM4/OPYC3 模式对东亚季风年循环进行模拟,并对其未来变化进行预测,翟建青等^[22]则利用 ECHAM5 模式对 2050 年前中国旱涝格局进行预估. 这些研究均表明这两种模式对我国的区域气候系统有较好的模拟能力.

由于迄今为止大部分的海气耦合气候模式(AOGCM)的空间分辨率还较低,很难对区域尺度的气候变化情景做合理的预测,降尺度法已广泛用于弥补 AOGCM 在这方面的不足. 其中统计降尺度法,是由大尺度气候信息获取小尺度气候信息的有力工具. 首先是确立大尺度气候要素(预报因子)和局地气候要素之间(被预报量)的经验关系,然后将这种经验关系应用于全球模式或区域模式的输出,获得任一地点的相应信息^[23]. 本文针对 CCSM4 和 ECHAM5 全球气候模型在 IPCC-CMIP5 框架下的模拟,从中提取出鄱阳湖流域的相关结果. 采用统计降尺度模拟法获得鄱阳湖流域过去 1000 a 逐月温度和降水序列,于革等^[24]采用鄱阳湖历史文献和考古调查的史料对这些气候模拟结果予以验证,表明 GCMs 模拟的降水变化可以接受. 其中的现代气候数据,根据鄱阳湖国家二级气象站 1951—2000 年 17 个站点的逐月温度和降水数据及气象站位

置获得.

1.2 水文模式

分布式水文模型 WATLAC 是模拟湖泊集水域地表、地下水流的数学模型,弥补了大多数水文模型对地下径流的粗略概括,并较好地模拟湖泊与湖泊流域内陆地河流之间的水力联系^[25]. 该模型受降水和蒸发驱动分为地表径流和地下径流两个模拟过程,主要考虑了林冠截留、流域蒸散发、土壤蓄水、坡面径流、地下水补给和径流以及河道径流等流域主要水文过程^[26]. 地表径流部分采用空间离散栅格进行模拟,每一栅格区域内水文地质参数均认为不同并结合遥感解译的方式输入数据. 地下径流部分基于饱和土壤和非饱和土壤不同的土壤特性将两者分开考虑,采用有限差分分离散饱和和含水层、解析方程模拟非饱和土壤层^[27]. 更详细的模型具体计算方法参考文献[26].

利用 WATLAC 模型对鄱阳湖流域的研究论证已在国内外获得认可,如刘健等^[27]利用 1960—1989 年间外洲站和峡江站的实测资料对模型进行验证,在率定期 2 个水文站年径流相对误差均不足 8%,在校核期均小于 2%,证实该模型模拟赣江流域水文过程与真实水文过程吻合度较高;Ye^[28]等结合 ECHAM5 模式利用 WATLAC 模型对未来气候背景下鄱阳湖径流进行预估,与 6 个水文站实测资料相比, Nash 系数均在 0.64~0.86 之间,确定性系数均在 0.70~0.87 之间,表明模型模拟值与实测值之间存在较好的拟合关系;Li 等^[29]将 WATLAC 流域模型与湖泊水动力模型耦合对鄱阳湖及其流域系统进行整体化模拟,对于流域径流量、湖水位和出湖流量资料,率定期 Nash 系数分别为 0.71~0.84、0.88~0.98 和 0.80;校验期 Nash 系数均在 0.62~0.97 之间变化,模拟结果与实测数据有较高的拟合度;针对不同降水数据对流域径流模拟精度的影响, Li 等^[30]分别用热带测雨任务卫星 (TRMM) 解译的降水量与地面站点雨量站实测数据驱动 WATLAC 模型,对鄱阳湖流域径流进行模拟,评估了不同来源降水数据对模拟结果的影响.

上述研究表明,分布式水文模型 WATLAC 在鄱阳湖流域上成功地开展了应用研究. 故本文采用该模型重建鄱阳湖流域近 1000 a 来的径流序列.

1.3 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 法是一种非参数统计检验方法,现已在水文、气象、环境等各个领域得到广泛应用^[31-32]. 该方法不需要样本遵循一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用于类型变量和顺序变量,计算简洁^[33]. 主要计算变量的顺序列和逆序列,以及顺逆序列的交叉点,用以明确变量的突变时间以及突变区域^[33].

1.4 快速傅里叶变换

水文过程随时间产生变化,故水文时间序列(径流、洪水等)基本上是非平稳时变的,通常认为该序列包括周期项、趋势项和随机项,序列看作这 3 种不同频率成分的线性叠加,故频域特征亦随时间变化^[34]. 频谱分析可以从含有噪声干扰的长时间域中描绘出代表能量强弱的频域. 为了探索近千年来鄱阳旱涝事件发生的频率,采用快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT)^[35]对 CCSM4 和 ECHAM5 模型各自降水量及径流深数据进行处理,检验其中的频率信号.

1.5 小波分析法

小波分析法自 Foufoula^[36]引入水文领域后,一直在探求水文序列变化特性和水文序列模拟预报方面得以广泛应用^[37-39]. 水文时间序列存在多时间尺度的特点,小波分析能同时从时域和频域揭示时间序列的局部特性,分解出水文序列中不同频率的组成部分^[40],揭示水文序列的周期性、趋势性等特征. 通过选择合理的基本小波函数 $\varphi(t)$ 进行连续小波变换 (Wavelet Transform, WT):

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中, $W_f(a, b)$ 为小波系数, a 表示尺度因子,一定意义上反映事件的发生频率; b 表示时间因子,反映序列在时间上的平移. 小波分析法具体计算步骤因篇幅限制本文不做介绍,请参考文献[36].

本文中采用 Morlet 复小波作为基小波对 CCSM4 和 ECHAM5 模式产生的降水量和径流深数据进行小波分析. 所得小波系数模的大小表示不同时间尺度信号的强弱,反映了序列在该时间尺度上的震荡强弱,模平方分布图更能够揭示具有嵌套关系的径流丰枯变化. 小波分析法基于快速傅里叶变换进行延伸,在定位事件发生频率的基础上,进一步体现其在时域上的变化强弱,分析整个序列的周期以及难以发现的阶段性周

期变化. 故本文利用小波分析法进一步分析鄱阳湖流域近千年旱涝灾害在不同时间尺度下的发生强弱,揭示其发生周期.

2 结果

2.1 鄱阳湖流域年平均气温变化特征

为了检验过去千年气候变化基本的阶段特征,对 GCM 模拟经降尺度处理后获得的鄱阳湖流域年平均气温进行 M-K 检验,该地区 1400—1960 年气温处于下降趋势,1450—1940 年显著下降;1070—1400 年气温处于上升趋势,1100—1280 年显著上升;在 1310 年附近温度发生显著突变,上升趋势减缓(图 2). 故在下文中划分 1400 年作为中世纪暖期到小冰期的变化点,以便进行计算和讨论.

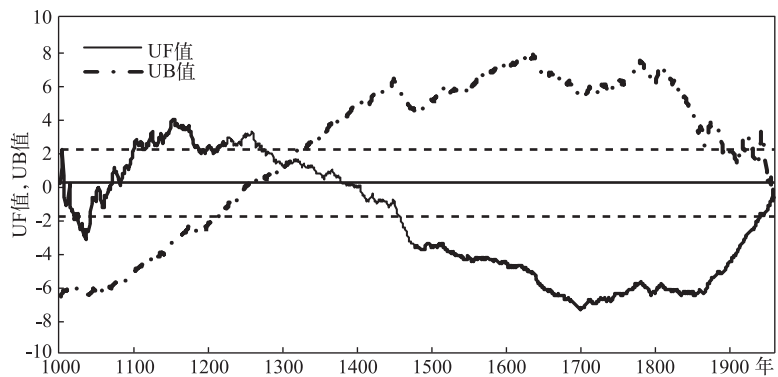


图 2 鄱阳湖流域年平均气温 M-K 趋势及突变检验结果(上、下虚线分别表示±95%置信曲线)

Fig.2 The result of M-K trend and mutation test in Poyang Basin
(The two dash line represent ±95% confidence curve separately)

2.2 降水-径流序列变化特征

经过采用 1、5、10、20、30 a 等不同时间尺度的平均后,获得过去千年降水径流系列基本认识,本文聚焦在年际~年代际变化特征的分析. CCSM4 和 ECHAM5 模式下鄱阳湖流域近千年降水-径流深 10 a 和 30 a 平均距平散点图显示,流量与气候呈现较好的响应关系(图 3). CCSM4 模式中,降水与径流深呈显著正相关并通过 t 检验($R=0.84, P<0.01$),ECHAM5 模式中两者亦然($R=0.97, P<0.01$).

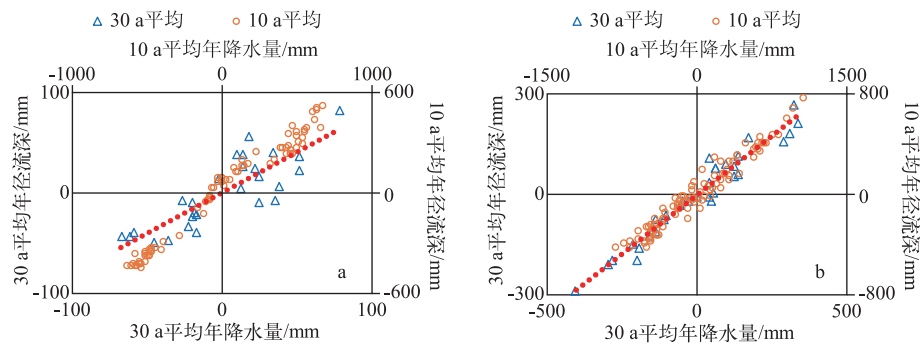


图 3 CCSM4(a)和 ECHAM5(b)气候模式下鄱阳湖流域降水与径流深 10 a 和 30 a 平均距平散点图

Fig.3 Scatter diagram of average anomaly on 10-year and 30-year scale of precipitation and runoff depth under climate model CCSM4(a) and ECHAM5(b) in Poyang Basin

CCSM4 模式径流序列含 1041—1850 年,共 810 a. ECHAM5 模式径流序列含 1000—1959 年,共 960 a. 2

种模式对 MWP 和 LIA 两个时期的干湿变化模拟情况略有不同(图 4). CCSM4 模式在 MWP 时期,径流量在均值附近波动变化,干湿交替出现. 降水量在 47% 的年份中处于干旱条件,径流量在 42% 的年份中处于偏干旱状态,分布较均匀. LIA 期间,干湿变化剧烈,容易引起极端旱涝事件,降水量和径流量分别在 56% 和 44% 的年份中处于偏干旱状态,均与偏湿润状态间隔出现,干湿变化明显. 总体来说,在 CCSM4 模式中,干湿变化相伴出现,且降水量变化与径流量变化较为一致. ECHAM5 模式则显示在 MWP 时期,降水量在 58% 的年份中偏少,径流量在 52% 的年份中处于偏干旱状态,在 1030—1070、1120—1160 年期间持续时间较长. 在 LIA 阶段,降水量和径流量则分别在 61% 和 57% 的年份中处于偏少状态,在 1450—1500、1650—1680、1900—1950 年间持续时间较长. 在此模式中,能看到较明显的长时间干湿状态的维持.

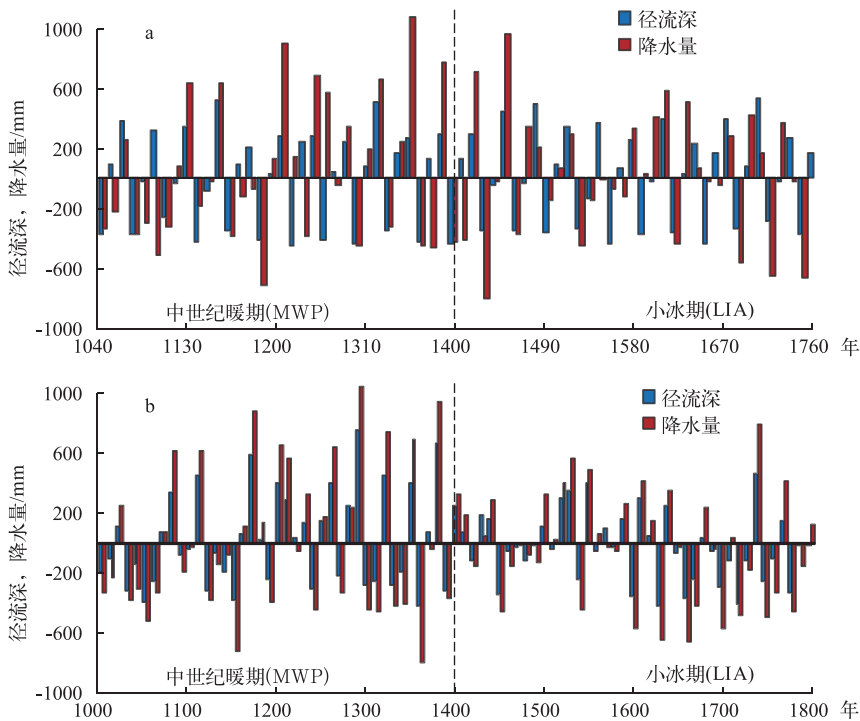


图 4 CCSM4(a) 和 ECHAM5(b) 气候模式下鄱阳湖流域 10 a 平均降水-径流距平序列变化特征及相互关系

Fig.4 Variances of anomaly of precipitation and runoff on 10-year time scale under climate model CCSM4(a) and ECHAM5(b) in Poyang Basin

2.3 降水-径流干湿周期变化

CCSM4 和 ECHAM5 模式降水-径流深序列周期变化见图 5. 快速傅里叶变换结果很容易识别出时间序列各种尺度的强弱变化,2 种模式均有几处峰值(图 5a,b),说明在该频率(可转换为周期)下震荡最强. 同时降水径流深序列在峰值处对应的频率也有较高的吻合度,说明降水-径流深在时间尺度上有相同的震荡周期. CCSM4 模式中超过置信曲线的频率有 0.033(30 a)、0.101(10 a)和 0.133(7 a),ECHAM5 模式中超过置信曲线的频率有 0.034(29 a)、0.066(15 a)和 0.133(7 a). 2 种模式下降水-径流序列重现期相对一致,说明径流过程与降水过程同步变化. 考虑到周期的统计意义,仅列出前 3 大周期.

小波变换模平方时频分布图所表现出的周期分布与 FFT 基本相似,但前者进一步提供了频率分布在时间序列上的变化特征. CCSM4 模式中无论降水量还是径流深均在 20~40 a 时间尺度之间能量最强,其能量中心基本在 30 a 左右(图 5c,d). ECHAM5 模式在 20~80 a 时间尺度间均有置信区域,但具有连续性变化的能量中心基本维持在 30 a 左右(图 5e,f). 两种模式下降水-径流序列两者的模平方时频分布基本相似,进一步说明流量过程虽受卡因素影响,但在时间上主要随着降水过程变化. 综上两种模式的分析结果,反映在

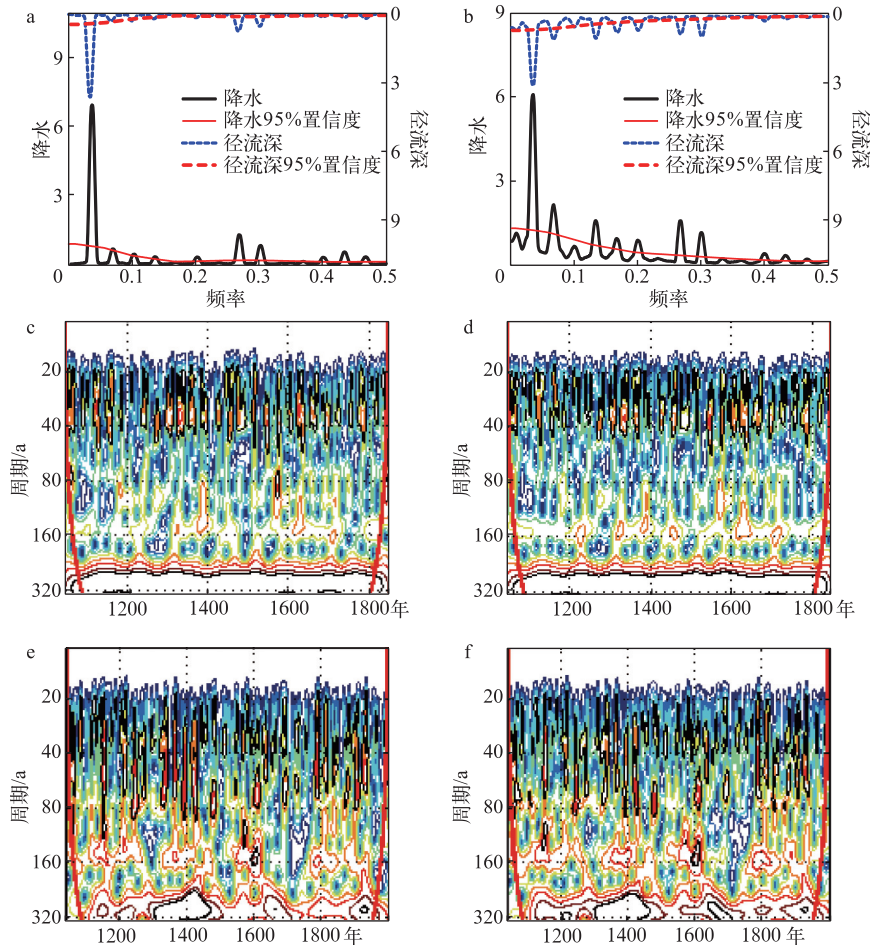


图 5 CCSM4(a)和 ECHAM5(b)模下降水-径流深序列快速傅里叶变换功率谱(黑色实线和黑色虚线分别表示降水和径流深的功率变化,红色实线和红色虚线分别表示降水和径流深 95%置信度下的统计值);CCSM4 模式径流深(c)和降水(d)序列小波变换模平方时频分布, ECHAM5 模式径流深(e)和降水(f)序列小波变换模平方时频分布(黑色实线代表通过 95%置信检验的时频部分,红色实线表示影响锥,影响锥外部分不具可置信度)

Fig.5 Fast Fourier transform spectral power spectrum of precipitation and runoff depth of CCSM4 model(a) and ECHAM5 model(b) (The black solid line and dash line indicates spectral power of precipitation and runoff depth, respectively; The red ones stand for their own 95% confidence line); Wavelet power spectrum contours of runoff depth and precipitation for CCSM4 model(c and d) and for ECHAM5 model(e and f) (It was plotted by time series against periods, in which the 95% confidence contour was in black part and the black arc full line meant cone of influence; Any part below the red line is not reliable)

近千年鄱阳湖流域降水-径流过程变化均以 30 a 周期为主.

3 讨论

全球气候变化的驱动因素受不同时间和空间尺度的影响. 从千年-万年以上时间尺度来看,地球轨道参数是气候变化的主要影响因子;在百年-千年尺度上则主要受太阳活动强度变化的影响;在年际及年际变化上,气候系统的内部振荡和海陆气相互作用充当着相当重要的角色^[41]. 从过去千年以来,在工业革命之

前,地球气候变化主要受自然因子的驱动;而在工业化革命之后,人类活动的影响逐渐增加(IPCC, 2013). 比如,三峡大坝的水量调度影响了长江与鄱阳湖之间的相互作用^[8],加剧了湖泊旱季的干旱程度. 然而,由于水文站限于 50、60 a 资料,难以论证鄱阳湖径流变化显示的 25~30 a 的主周期观点^[42]. 此外,有限的资料仅能够认识到降水^[43]、蒸发^[7]条件对径流变化在 50~100 a 内的影响,也难以全面认识径流过程响应长期气候变化的动力机制.

地球上水文现象与太阳辐射的驱动^[44]密不可分,水文变化受到太阳辐射强度变化的影响. 太阳活动中最基本的太阳黑子,发生周期约为 11 a,太阳黑子的活动导致地球磁场的紊乱,地转偏向力等受其影响,进而导致大气环流的改变,相应地对陆地上水文状况造成影响. 有学者已验证太阳黑子与流域降水之间的关系^[45]. 鄱阳湖流域位于长江中游,受季风气候控制,极易受到气候系统的内部振荡和海陆气相互作用. 厄尔尼诺是一种周期为 7 a 的太平洋反自然现象,与全球气候变化密切相关,易造成极端天气的产生,此现象在一定程度上造就了鄱阳湖流域降水—径流序列有 7 a 的子周期.

除了 7、11 a 周期外,气候系统的内部振荡和海陆气相互作用充当着相当重要的角色,影响到气候水文变化的年际—年代际变化尺度上. 在近千年的大气涛动中, PDO (Pacific Decadal oscillation Index, 太平洋年代际振荡) 具有显著的 27.4 a 的周期^[46],如 PDO 强时,东亚以及长江中下游的降水呈现偏高状态^[47]. 本文分析的 30 a 周期反映出径流响应降水的周期变化,揭示了与北太平洋气候的主要环流机制的周期相近,因此大气涛动是造成气候异常的直接原因.

湖泊沉积伴随着重要的环境变化,沉积孢粉证据具有重要的植被、气候信息,能够反演过去植被气候变迁^[48],湖泊沉积与流域气象、水文关系的响应在于革^[48]、刘恩峰等^[49]的研究中均有论述. 本文将鄱阳湖沉积孢粉证据与模拟得到的小冰期流量序列互相对比,间接反映出湖泊变化发展的阶段性,佐证重建鄱阳湖流域古径流数据的可靠性. 流量为两种模型模拟流量的平均值,含 1401—1850 年共 450 a 的径流资料,古地质数据为同期沉积孢粉证据^[50]. 本文模拟的径流量相对于平均值经历了偏多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多 7 个阶段的变化,在 1401—1450、1513—1586、1738—1758、1832—1847 年期间径流量较均值偏高,在 1451—1512、1587—1737、1759—1836 年期间则偏低(图 6). 沉积孢粉指标则指示在小冰期植物量相对于平均值经历了偏多—偏少—偏多—偏少—偏多两个旋回的变化过程,在 1414—1442、1572—1624、1685—1850 年期间孢粉指标较平均值偏高,在 1443—1571、1625—1684 年期间则偏低,说明整个小冰期内鄱阳湖流域生态系统在外界干扰下发生了多次震荡变化,与径流阶段性变化过程基本类似. 由于孢粉种类、粒度大小的不同,受水体携带能力限制,孢粉和水文过程在时间序列上并不保持完全同步相关^[48],本文中约有 44% 的年份保持相同的变化. 高流量年对应高降水年,降水冲刷流域内植被使得植物孢粉到达地面,在达到孢粉量阈值前,降水越高意味着冲击力越大,进而越多的孢粉接触地面. 随后经过一系列流域河网调控进入湖体进行沉积.

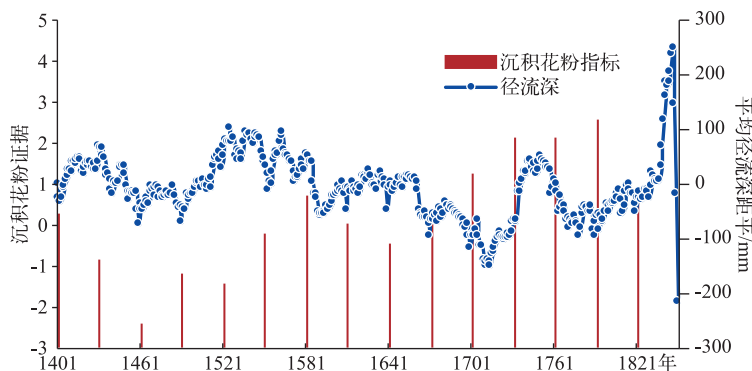


图 6 小冰期沉积孢粉证据与逐年平均径流深两轴线柱图(沉积孢粉指标为 30 a 平均距平)

Fig.6 Double axis plotting and histogram for pollen index and annual average runoff depth
(The pollen index was the departures calculated at 30-year scale during Little Ice Age)

4 结语

本文模拟了鄱阳湖流域过去 1000 a 来流域径流序列,从千年尺度认识该流域水文响应气候变化的行为和特征及其动力机制。现代鄱阳湖的极端水文现象主要受控于大气降水和地表汇流,而历史时期的回归期分析可对预测未来极端气候水文提供可靠的科学依据。鄱阳湖流域过去 1000 a 来径流周期主要为 30 a,有 10~15、7 a 的次周期,与现代鄱阳湖流域径流研究相似,但从长时间尺度上进一步验证了太阳活动和大气活动对该流域水文过程的影响。

1) 鄱阳湖流域降尺度下两种气候模式 (CCSM4 和 ECHAM5) 驱动的千年降水径流变化总体趋势一致,反映出辐射变化下大气环流的基本特征,导致流域降水的基本格局。两个模式驱动下的流域径流变化略有不同, ECHAM5 模式中有较长时间的偏干年份出现,而 CCSM4 模式干湿年份交替出现。两种模型在小冰期期间的偏干年份均多于中世纪暖期。

2) 利用快速傅里叶变化对 CCSM4 和 ECHAM5 模式下的径流序列进行分析,其径流序列分别展示出了主周期 30 a 和 29 a 的峰值, 10~15 a 次周期和 7 a 左右第 3 周期。分析主周期与大气涛动太平洋年代际振荡有关,次周期与太阳活动有关,第 3 周期与辐射和大气共同作用下的厄尔尼诺有关。大气涛动的变化反映一个地区气候变化的宏观特征。在年代际及年际变化上,气候系统的内部振荡和海陆气相互作用充当着相当重要的角色。小波分析结果显示, CCSM4 模式在 20~40 a 和 ECHAM5 模式在 20~80 a 均有较强显著的信号,但能量峰值约在 30 a 左右,与快速傅里叶变换结论相近。同一模式下,降水径流序列模平方分布图中能量分布相似,说明两者在千年尺度上有一致的震荡变化强弱。该现象揭示了千年大气涛动变化,有助于认识自然气候变率下的区域气候变化的特征和规律。

3) 模拟结果能够与地质记录相互对比、验证。鄱阳湖近千年沉积孢粉记录揭示了该流域植物量经历偏多-偏少-偏多-偏少-偏多两个旋回的变化,与径流序列干湿变化相对应,佐证了该流域径流序列数据的可信度。

5 参考文献

- [1] IPCC, fifth Assessment Report-Climate change 2013: The Physical Science Basis (AR5). <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- [2] Cook ER, Krusic PJ, Anchukaitis KJ *et al.* Tree-ring reconstructed summer temperature anomalies for temperate East Asia since 800 C.E.. *Climate Dynamics*, 2012, **41**(11/12): 2957-2972. DOI 10.1007/s00382-012-1611-x.
- [3] Xu Xin, Geng Lihua. The climatic features and environmental changes of Little Ice Age in Eastern China. *Geology of Guizhou*, 1990, **7**(1): 35-45 (in Chinese with English abstract). [徐馨, 耿丽华. 中国东部小冰期气候特征与环境变迁. 贵州地理, 1990, **7**(1): 35-45.]
- [4] Yang Xunlin, Chen Fahu, Yuan Daoxian *et al.* Climate change during Little Ice Age with high-resolution stalagmite record in the Three-Gorges Reservoir area. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, **33**(5): 629-634 (in Chinese with English abstract). [杨勋林, 陈发虎, 袁道先等. 高分辨率石笋记录的三峡库区小冰期气候变化. 地理科学, 2013, **33**(5): 629-634.]
- [5] Ye Xuchun, Zhang Qi, Liu Jian *et al.* Natural runoff change characteristics and flood/drought disasters in Poyang Lake catchment basin. *Journal of Natural Disasters*, 2012, **21**(1): 140-147 (in Chinese with English abstract). [叶许春, 张奇, 刘健等. 鄱阳湖流域天然径流变化特征与水旱灾害. 自然灾害学报, 2012, **21**(1): 140-147.]
- [6] Min Qian. Analysis on the flood characters in 1990s, Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2002, **14**(4): 323-330 (in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2002.0405. [闵茜. 20 世纪 90 年代鄱阳湖洪水特征分析. 湖泊科学, 2002, **14**(4): 323-330.]
- [7] Liu Jian, Zhang Qi, Xu Chongyu *et al.* Change of actual evapotranspiration of Poyang Lake watershed and associated influence factors in the past 50 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **19**(2): 139-145 (in Chinese with English abstract). [刘健, 张奇, 许崇育等. 近 50 年鄱阳湖流域实际蒸发量的变化及影响因素. 长江流域资源环境, 2011, **19**(2): 139-145.]
- [8] Guo Hua, Hu Qi, Zhang Qi. Changes in hydrological interactions of the Yangtze River and the Poyang Lake in China dur-

- ing 1957–2008. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(5): 609-618 (in Chinese with English abstract). [郭华, Hu Qi, 张奇. 近 50 年来长江与鄱阳湖水文相互作用的变化. 地理学报, 2011, **66**(5): 609-618.]
- [9] Zhang Q, Ye XC, Werner AD *et al.* An investigation of enhanced recessions in Poyang Lake comparison of Yangtze River and local catchment impacts. *Journal of Hydrology*, 2014, **517**: 425-434. DOI 10.1016/J.jhydrol.2014.05.051.
- [10] Min Qian, Wang Zepei. On the regularity of flood occurrences in Poyang Lake in the past 600 years. *J Lake Sci*, 1994, **6**(4): 375-383 (in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/1994.0411. [闵騫, 汪泽培. 鄱阳湖近 600 年洪水规律分析. 湖泊科学, 1994, **6**(4): 375-383.]
- [11] Jia Yufang. Research on sand hills and their environmental significance in Lake Poyang region since last glacial period [Dissertation]. Jinan: Shandong Normal University, 2012 (in Chinese with English abstract). [贾玉芳. 末次冰期以来鄱阳湖沙山沉积及其环境意义研究[学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2012.]
- [12] Yu Lingling. Climate change in the sand mountain section of Poyang Lake during the Little Ice Age and its regional socio-economic response [Dissertation]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2011 (in Chinese with English abstract). 于玲玲. 鄱阳湖沙山记录的小冰期气候变化及其区域社会经济响应[学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2011.
- [13] Qin Dahe, Thomas Stocker, 259 Authors and TSU (Bern & Beijing). Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2014, **10**(1): 1-6 (in Chinese with English abstract). DOI 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.001. [秦大河, Thomas Stocker, 259 名作者和 TSU. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化进展, 2014, **10**(1): 1-6.]
- [14] Liu Ke. Comparison and analysis for the result of multi-model ensembles of GCM and result of RCM in China [Dissertation]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2011 (in Chinese with English abstract). [刘珂. 中国区域气候的 GCM 与 RCM 模拟结果的对比分析[学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2011.]
- [15] IPCC Data Distribution Center. AR4 GCM data (Data provided by the Met.Office Hadley Centre). <http://www.ipcc-data.org>, 2006.
- [16] Yu G, Harrison SP. An evaluation of the simulated water balance of Eurasia and northern Africa at 6000 yr B.P. using lake status data. *Climate Dynamics*, 1996, **12**: 723-735. DOI 10.1007/s003820050139.
- [17] Blackmon M, Boville B, Bryan F *et al.* The community system model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, **82**(11): 2357-2376.
- [18] Tian Zhiping, Jiang Dabang, Zhang Ran *et al.* Long-term climate simulation of CCSM4.0 and evaluation of its performance over East Asia and China. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2012, **36**(3): 619-632 (in Chinese with English abstract). DOI 10.3878/j.issn.1006.9895.2011.11092. [田芝平, 姜大膀, 张冉等. CCSM 4.0 的长期积分试验及其对东亚和中国气候模拟的评估. 大气科学, 2012, **36**(3): 619-632.]
- [19] Tian Zhiping, Jiang Dabang. Evaluation of the performance of low-to high-resolution CCSM4 over East Asia and China. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2013, **37**(1): 171-186 (in Chinese with English abstract). DOI 10.3878/j.issn.1006.9895.2012.12050. [田芝平, 姜大膀. 不同分辨率 CCSM4 对东亚和中国气候模拟能力分析. 大气科学, 2013, **37**(1): 171-186.]
- [20] Yu G, Shen H, Liu J. Impacts of climate change on historical locust outbreaks in China. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2009, **114**(D18). DOI 10.1029/2009JD011833.
- [21] Bueh Cholaw, Lin Yonghui. A simulation of the annual cycle and future change of the East Asia Monsoon with the ECHAM4/OPYC3 CGCM model. *Climatic and Environmental Research*, 2003, **8**(4): 402-416 (in Chinese with English abstract). [布和朝鲁, 林永辉. ECHAM4/OPYC3 海气耦合模式对东亚季风年循环及其未来变化的模拟. 气候与环境研究, 2003, **8**(4): 402-416.]
- [22] Zhai Jianqing, Zeng Xiaofan, Su Buda *et al.* Patterns of dryness/wetness in China before 2050 projected by the ECHAM5 model. *Advances in Climate Change Research*, 2009, **5**(4): 220-225 (in Chinese with English abstract). [翟建青, 曾小凡, 苏布达等. 基于 ECHAM5 模式预估 2050 年前中国旱涝格局趋势. 气候变化研究进展, 2009, **5**(4): 220-225.]
- [23] Fan Lijun, Fu Congbin, Chen Deliang. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques. *Advances in Earth Science*, 2005, **20**(3): 320-329 (in Chinese with English abstract). [范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展. 地球科学进展, 2005, **20**(3): 320-329.]
- [24] Yu Ge, Liao Mengna, Li Yongfei. Responses of lake ecosystem to the climate changes of the past 1000 years—Case study of dynamic simulations for ecosystem changes of Poyang Lake. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(6): 1148-1159 (in Chinese

- with English abstract). DOI 10.3969/j.issn.1001-7410.2013.06.11. [于革, 廖梦娜, 李永飞. 湖泊生态系统对过去 1000 年气候变化的响应研究——以鄱阳湖生态系统动力学模拟为例. 第四纪研究, 2013, **33**(6): 1148-1159.]
- [25] Zhang Qi. Coupled simulation of surface and subsurface runoffs for lake catchment. *Progress in Geography*, 2007, **26**(5): 1-10(in Chinese with English abstract). [张奇. 湖泊集水域地表—地下径流联合模拟. 地理科学进展, 2007, **26**(5): 1-10.]
- [26] Zhang Q, Werner AD. Integrated surface-subsurface modeling of Fuxianhu Lake catchment, southwest China. *Water Resource Manage*, 2009, **23**: 2189-2204. DOI 10.1007/s11269-008-9377-y.
- [27] Liu Jian, Zhang Qi. Verification of a new distributed hydrologic model in Ganjiang River catchment, Poyang Lake watershed. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(1): 19-26(in Chinese with English abstract). [刘健, 张奇. 一个新的分布式水文模型在鄱阳湖赣江流域的验证. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(1): 19-26.]
- [28] Ye XC, Zhang Q, Bai L *et al.* A modeling study of catchment discharge to Poyang Lake under future climate in China. *Quaternary International*, 2011, **244**: 221-229. DOI 10.1016/j.quaint.2010.07.004.
- [29] Li YL, Zhang Q, Yao J *et al.* Hydrodynamic and hydrological modeling of the Poyang Lake catchment system in China. *Journal of Hrdologic Engineering*, 2014, **19**: 607-616. DOI 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000835.
- [30] Li XH, Zhang Q, Xu CY. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang Lake basin. *Journal of Hydrology*, 2012, **418-419**: 28-38. DOI 10.1016/j.jhydrol.2012.01.013.
- [31] Chen Wenhai, Liu Yanxiang, Ma Zhuguo. The seasonal characteristics of climatic change trend in China from 1951 to 1997. *Plateau Meteorology*, 2002, **21**(3): 251-257(in Chinese with English abstract). [陈文海, 柳艳香, 马柱国. 中国 1951—1997 年气候变化趋势的季节特征. 高原气象, 2002, **21**(3): 251-257.]
- [32] Xu Zongxue, Li Zhanling, Shi Xiaokun. Long-term trends of major climatic variables and runoff in the Shiyang River basin. *Resources Science*, 2007, **29**(5): 121-128(in Chinese with English abstract). [徐宗学, 李占玲, 史晓崑. 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析. 资源科学, 2007, **29**(5): 121-128.]
- [33] Wei Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology (Second Edition). Beijing: Meteorology Press, 2008: 69(in Chinese). [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术: 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2008: 69.]
- [34] Sang Yanfang, Wang Zhonggen, Liu Changming. Applications of wavelet analysis to hydrology: status and prospects. *Progress in Geography*, 2013, **32**(9): 1413-1422(in Chinese with English abstract). [桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望. 地理科学进展, 2013, **32**(9): 1413-1422.]
- [35] Li Gengyin, Chen Zhiye, Ning Yu. Two modified algorithm for fast Fourier transform. *Automation of Electric Power System*, 1997, **21**(12): 37-40(in Chinese with English abstract). [李庚银, 陈志业, 宁宇. 快速傅里叶变换的两种改进算法. 电力系统自动化, 1997, **21**(12): 37-40.]
- [36] Foufoula-Georgiou E, Kumar P. Wavelets in geophysics. San Diego, CA: Academic Press, 1994.
- [37] Nourani V, Komasi M, Mano A. A multivariate ANN-Wavelet approach for rainfall-runoff modeling. *Water Resources Management*, 2009, **23**(4): 2877-2894. DOI 10.1007/s11269-009-9414-5.
- [38] Liu Xiaotong, Cai Yunlong. Research of runoff's feature and impact factors in multiple dimensions based on wavelet analysis: A case study on Tongtian River. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, **50**(3): 549-556(in Chinese with English abstract). DOI 10.13209/j0479-8023.2014.056. [刘笑彤, 蔡云龙. 基于小波分析的径流特性和影响因素多尺度分析——以通天河为例. 北京大学学报: 自然科学版, 2014, **50**(3): 549-556.]
- [39] Liu Xinyou, Huang Ying, Yuan Shutang. Wavelet analysis of precipitation characteristics in Songhuaba water source area of Kunming. *Journal of China Hydrology*, 2013, **33**(2): 59-63(in Chinese with English abstract). [刘新有, 黄英, 袁树堂. 昆明松华坝水源地降水特征及小波分析. 水文, 2013, **33**(2): 59-63.]
- [40] Wang Wensheng. Hydrology wavelet analysis. Beijing: Chemical Industry Press, 2005(in Chinese). [王文圣. 水文小波分析. 北京: 化学工业出版社, 2005.]
- [41] Zhang Qiang, Han Yongxiang, Song Lianchun. The summarize of development of global climate change and its effect factors. *Advances in Earth Science*, 2005, **20**(9): 990-998(in Chinese with English abstract). [张强, 韩永翔, 宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述. 地球科学进展, 2005, **20**(9): 990-998.]
- [42] Liu Jian, Zhang Qi, Xu Chongyu *et al.* Characteristics of runoff variation of Poyang Lake Watershed in the past 50 years. *Tropical Geography*, 2009, **29**(3): 213-224(in Chinese with English abstract). [刘健, 张奇, 许崇育等. 近 50 年鄱阳

- 湖流域径流变化特征研究. 热带地理, 2009, **29**(3): 213-224.]
- [43] Ye Xuchun, Zhang Qi, Liu Jian *et al.* Impacts of climate change and human activities on runoff of Lake Poyang catchment. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(5): 835-842(in Chinese with English abstract). [叶许春, 张奇, 刘健等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域天然径流的影响. 冰川冻土, 2009, **31**(5): 835-842.]
- [44] Rui Xiaofang. Principle of hydrology. Beijing: China Water Resources and Hydropower Publishing House, 2004: 10(in Chinese). [芮孝芳. 水文学原理. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 10.]
- [45] Li Chunhui, Yang Zhifeng. Relationship between solar activities and precipitation in the Yellow River basin. *Meteorological Monthly*, 2005, **31**(11): 42-44(in Chinese with English abstract). [李春晖, 杨志峰. 太阳活动与黄河流域降水关系分析. 气象, 2005, **31**(11): 42-44.]
- [46] Mantua NJ, Hare SR. The pacific decadal oscillation. *Journal of Oceanography*, 2002, **58**: 35-44. DOI 10.1023/A: 1015820616384.
- [47] Huang JB, Wang SW, Gong DY *et al.* Atmospheric oscillations over the last millennium. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(22): 2469-2472. DOI 10.1007/s11434-010-3210-8.
- [48] Yu Ge. High-resolution records of lacustrine sedimentology and palynology responding to changes in climate and hydrology. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, **29**(1): 118-124(in Chinese with English abstract). DOI 10.14027/j.cnki.cjxb.2011.01.008. [于革. 高分辨湖泊沉积和孢粉记录对气候、水文变化的响应. 沉积学报, 2011, **29**(1): 118-124.]
- [49] Liu Enfeng, Yang Xiangdong, Shen Ji *et al.* Sedimentary flux of Lake Taibai, Hubei Province anf correlations with precipitation and human antivities in its catchment during the last century. *J Lake Sci*, 2007, **19**(4): 407-412(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2002.0405. [刘恩峰, 羊向东, 沈吉等. 近百年来湖北太白山湖沉积通量变化与流域降水量和人类活动的关系. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 407-412.]
- [50] Zhu Haihong, Zhang Ben eds. Poyang Lake — the development of wetland hydrological and biological remediation deposition. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1997: 349(in Chinese). [朱海虹, 张本. 鄱阳湖——水文生物沉积湿地开发整治. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997: 349.]