沂河径流非线性变化特征对气候变化的响应

李宝富[1]，熊黑钢[2]，廉丽姝[1]，孙小银[1]，周长春[1]
(1.曲阜师范大学 地理与旅游学院，山东 日照 276826；2.北京联合大学 应用文理学院，北京 100083)

摘　要：[目的] 研究沂河水文和气候因子在不同时间尺度上的非线性变化特征，为进一步了解径流对气候变化的复杂响应过程提供理论依据。[方法] 采用集合经验模态分解(EEMD)、Mann-Kendall 检验、相关分析和线性回归等分析方法。[结果] 1951—2013 年沂河径流呈显著下降态势($p<0.01$)，下降速率为3.33 $\times10^8$ m^3/10 a，但在 1976 年前后径流则呈相反变化趋势。同时，径流可分解为 4 个经验模态分量(IMF)，其中在年际尺度上(周期为 3 和 6 a)的变化对径流总体变化的贡献率较大，为 58%，其次是在数年代际(周期为 31 a)尺度上的变化，贡献率为 11%，而在年代际(周期为 13 a)尺度上的变化对径流总体变化的贡献较小，仅为 6%。故径流变化的非线性变化趋势对径流变化的贡献率为 25%。[结论] 气候因子在不同时间尺度上对径流的作用方式和影响机理具有明显差异，其中在年代际和数年代际尺度上气候因素与径流关系更为密切。

关键词：径流；非线性变化；不同时间尺度；气候变化
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2016)04-0169-06　　**中图分类号**：P467，P339

文献参数：李宝富，熊黑钢，廉丽姝，等.沂河径流非线性变化特征对气候变化的响应[J].水土保持通报，2016，36(4)：169-174. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.031

Nonlinear Variation of Runoff and Its Response to Climate Change in Yihe River

LI Baofu[1], XIONG Heigang[2], LIAN Lishu[1], SUN Xiaoyin[1], ZHOU Changchun[1]
(1. *College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao, Shandong* 276826, *China*;
2. *College of Applied Arts and Science of Beijing Union University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: [Objective] Studying the nonlinear variations of runoff in Yihe River and the climate factors in different time scales, which was expected to provide theoretical basis for analizing the impact of climate change on runoff. [Methods] The methods of ensemble empirical mode decomposition(EEMD), Mann-Kendall test, Pearson correlation analysis and Linear regression were adopted. [Results] The runoff appeared a significant linear downward trend($p<0.01$) during 1951—2013, with a rate of 3.33$\times10^8$ m^3/10 a butan aberrant trend existed around 1976. Meanwhile, runoff was decomposed into four IMFs. The contribution of variance of inter-annual scale(quasi-3 and quasi-6-year) to the overall one was the largest, reaching 58%. The contributions of inter-decadal scale(quasi-13-year) and multi-decadal scale(quasi-31-year) were 11% and 6%, respectively. Subsequently, the contribution of nonlinear variation to the overall runoff was 25%. [Conclusion] The effects of climate factors(PDO, ENSO, temperature and precipitation) in different time-scales on runoff and its mechanism were proved different. The climate factors in inter-decadal scale and multi-decadal scale are more closely related to runoff change.

Keywords: **runoff**; **nonlinear variation**; **different scales**; **climate change**

中国是一个严重缺水的国家，人均淡水资源仅为世界平均水平的 1/4，在世界上名列 110 位，是全球人均水资源最贫乏的国家之一[1]。而山东省作为经济强省，人均水资源量却不到全国平均水平的1/6[2]。水资源短缺已成为山东省社会经济可持续发展的“瓶颈”和关键制约因素。因此，本研究以淮河流域的重要支流、鲁南地区的主要水源地之一、临沂地区的母亲河——沂河为例，开展径流演化过程及其影响因素研究，这不仅有助于提高对水资源变化机理的认识，而且可为水资源极度匮乏地区制定科学的水资源管理策略提供科学依据。

目前，气候变化对水循环与水资源影响的研究是

收稿日期：2015-10-10　　**修回日期**：2015-11-08
资助项目：山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目“定量辨识气候变化与人类活动对沂河地表水资源的影响”(BS2014HZ022)；国家自然科学基金项目(41471389)；山东省自然科学基金项目(ZR2015DL001)
第一作者：李宝富(1983—)，男(汉族)，山东省临沂市人，博士，副教授，主要从事气候变化与水文水资源研究。E-mail：lenny006@163.com。

国际上普遍关注的全球性问题，也是中国可持续发展的重大战略问题[3-4]。气候变化已使得全球水循环过程发生改变。已有研究[5]表明，在过去30 a多，全球气候变化已使得我国北方地区旱情加重，水生态环境恶化，严重阻碍了社会经济的发展；而且未来气候变化对我国“南涝北旱”的格局和未来水资源分布的影响将很有可能进一步加剧。此外，气候变化加剧了水资源变化的不确定性[6]。例如，近年来，沂沭泗河地区的暴雨日出现频率逐渐增加[7]，必然导致河流水文过程发生相应改变，从而引起水资源总量与季节分配发生变化。因此，诸多学者[8-12]开展了有关河流水文过程的线性变化及其对气候变化的响应研究，并取得了一些成果。然而，水文系统作为一个复杂的非线性系统，水文过程的非线性变化及其与气候因子的内在联系尚需进一步探索[13-14]。因此，本文着重探析沂河径流在年际、年代际和数年代际尺度上的非线性变化特征，并解析其与流域气候要素（气温和降水）及对我国北方气候有着重要影响的大气环流〔厄尔尼诺—南方涛动（NESO）和太平洋十年涛动（PDO）〕在不同时间尺度上的响应关系。ENSO（El Nino-Southern Oscillation）是发生在东南太平洋与印度洋及印尼地区之间的反相气压振动，它可以反映全球尺度的气候波动[15]，并通过影响东亚季风环流和太平洋副热带高压，对我国不同区域的气候产生不同程度和方式的影响[16]。PDO（Pacific Decadal Oscillation）是美国海洋学家斯蒂文于1996年发现的“拉马德雷”现象，它作为一种高空气压流，分别以“暖位相”和“冷位相”两种形式交替在太平洋上空出现，每种现象持续20～30 a，并对我国乃至全球气候产生重要影响。虽然水文过程的非线性变化引起了学者的关注，但由于方法所限，对水文系统的非线性过程的解读尚处于起步阶段。近年来，Wu和Huang[17]提出的一种噪声辅助数据分析方法——集合经验模态分解（EEMD）法，是克服研究系统的非线性和非平稳性的有效手段[18-19]。该方法与其他分解方法（如小波分析）不同，它不受傅立叶分析的限制，是一种自适应的分解过程，可在很大程度上去除持久稳固信号（模态函数，IMF）的噪声，已在电学、光学、图像处理、气候等领域得到应用[19-20]，而在水文系统的应用有待加强。因此，本文运用EEMD方法解读沂河水文和气候因子在不同时间尺度上的非线性变化特征，从而揭示径流对气候变化的复杂响应过程。

1 研究区概况

沂河是淮河流域沂沭泗水系中较大河流，北接海河平原，南邻黄淮平原，为临沂地区的母亲河。沂河源出山东省沂源县，经沂水、沂南、临沂、蒙阴、平邑、郯城等县、市，至江苏省邳县吴楼村入新沂河，抵燕尾港入黄海，全长约500 km，流域面积1.70×10^4 km^2。沂河流域山丘区约占70%，平原区约占30%。该流域属暖温带半湿润季风大陆性气候，受大陆气团和海洋性气团交替影响，具有四季分明、夏季炎热、冬季寒冷等特征。流域多年平均降水量约为815 mm，降水在年内分布极不均匀，集中于夏秋季节。

2 数据和方法

1951—2013年，沂河径流数据来自临沂水文站。采用沂河流域及其附近的沂源、兖州、莒县和徐州气象站的平均气候状况代表流域气温和降水在1951—2013年的变化特征。1951—2013年，太平洋10 a涛动（PDO）数据来自http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest；厄尔尼诺—南方涛动（ENSO）数据源自http://icoads.noaa.gov/。

采用线性回归、Mann-Kendall趋势和突变检验法，分析沂河径流在不同时间尺度上的线性变化趋势及突变时间。运用集合经验模态分解（EEMD）方法解析径流和气候因子在不同年际、年代际和数年代际等时间尺度上的非线性变化特征。采用Person相关分析法探讨不同时间尺度上的沂河径流的非线性变化过程与流域气温、降水、PDO和ENSO的相关关系。

3 结果与分析

3.1 径流突变

Mann-Kendall突变分析表明，1951—2013年沂河地表径流在1966年发生显著突变（$p<0.01$）。因此，将1966—2013年径流序列数据再次进行突变分析，结果发现径流在1970年又发生显著突变（$p<0.05$）。然后分析1970—2013年径流突变状况。依次类推，结果显示沂河径流分别在1976和1999年发生显著性突变（$p<0.05$）。考虑到某些突变点前后时间序列较短，因此本文重点分析径流在1951—2013年，1951—1975年和1976—2013年3个时间尺度上的线性趋势变化特征。

3.2 线性变化

1951—2013年沂河地表年平均径流量为2.15×10^9 m^3。其中，径流量最大值出现在1963年，高达6.21×10^9 m^3，最小值出现在1989年，仅为1.45×10^8 m^3。从线性变化来看，近63 a径流呈显著减少趋势（$p<0.01$），变化速率为-3.33×10^8 m^3/10 a（图1）。虽然径流在1951—2013年尺度上表现出显著下降态势，但在其它时间尺度上则表现出不同的变化趋势。其中，在1951—1975年，径流虽也呈减少趋势，

但并不显著,减少速率为-6.98×10^8 m^3/10 a。而在1976—2013年,径流则表现出显著增加趋势($p<0.05$),线性变化速率为3.95×10^8 m^3/10 a。因此,基于水文演化过程的复杂性,还必须从不同时间尺度揭示其非线性变化特征。

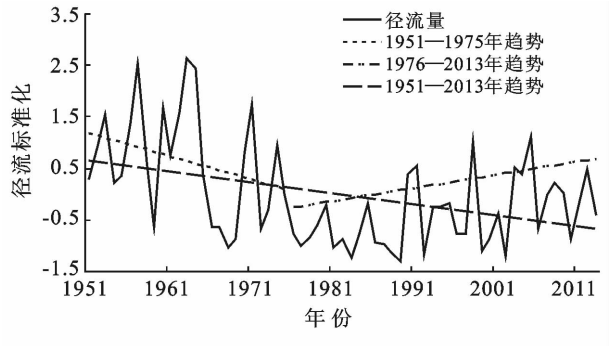


图 1　沂河 3 个不同时期的地表径流变化

3.3　非线性变化

EEMD 分析结果表明,1951—2013 年沂河地表径流可分解为 4 个固有模态函数分量(IMF1—4)和 1 个趋势项(图 2)。每个 IMF 分量可反映径流在不同时间尺度上的固有波动频率特征,趋势项则显示了径流在近 63 a 的非线性变化趋势。对每个分量的显著性检验,则表明了各分量具有的物理意义的大小。其中,IMF4 分量的显著性较高,达到了 95%的水平,说明该分量的物理意义较大,其次是 IMF1 和 IMF2,均达到了 90%的显著性水平,而 IMF3 的显著性较低,说明径流在该时间尺度下波动频率的物理意义相对较弱。

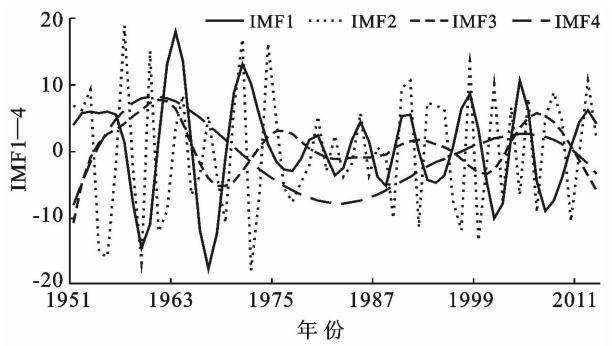


图 2　基于 EEMD 分解的沂河径流固有模态函数分量(IMF1—4)及趋势

各径流分量不仅展示了外部驱动力下水文系统的周期性变化,也反映了水文过程在不同时间尺度上的非线性变化特征。1951—2013 年,径流变化在年际尺度上具有 3 a(IMF1)和 6 a(IMF2)的准周期(图 2),在年代际尺度上具有 13 a(IMF3)的变化周期,而在数年代际尺度上的变化周期为 31 a(IMF4)。从各分量对径流变化的方差贡献率来看,IMF1 分量的贡献率最大,为 36%;其次是 IMF2 和 IMF4,贡献率分别为 22%和 11%;而 IMF3 的贡献率最小,仅为 6%,这与径流在相应时间尺度波动频率的物理意义较弱相符。因此,可得出径流的非线性变化趋势对其总体变化的贡献率为 25%,显示水文系统的自然波动对径流变化具有明显的影响。同时表明,年际尺度径流变化对径流总体变化的影响较大,贡献率高达 58%。

从不同时间尺度径流非线性变化特征来看,IMF1 和 IMF2 分量在 1970s 中期至 1980s 的波动幅度明显低于其他时段,尤其是 1970s 中期以前径流变化幅度较大(图 2)。这一方面与区域气候波动状况有关;另一方面与流域人类活动干扰强度联系紧密,沂河流域大中型水库修建时间大多集中在 20 世纪 60—70 年代,此时期内人类调蓄水量较大,水库在拦蓄地表径流、削减洪峰和改变径流的时空分布等方面从一定程度上影响了径流量的波动。而在 1970s 中期至 1980s,流域土地利用变化及水利设施建设等人类活动影响程度相对较弱。1980s 以后,由于区域气候变化对全球气候变暖的响应显著,区域气候极端事件频发,而且随着人口和社会经济的快速发展,人类干扰活动对流域水文过程影响程度逐渐增强。因此,从图 2 中还可以看出,径流 IMF1 和 IMF2 分量在 1980 s 以后的振幅开始逐渐增大。另外,在年代际尺度上(IMF3),径流波动幅度表现出与年际变化相似的特征,可见年代际变化与年际变化的关系密切。但在数年代际尺度上(IMF4),则表现出不同的特征,径流变化的幅度和不稳定性在近 63 a 来在呈减小态势,这说明人类活动或自然因素在长时间尺度上对水文过程的影响程度略有降低。同时表明,气候自然波动和人类干扰活动对水文过程的年际变化影响程度相对较大。

3.4　径流对气候变化的响应关系

为了揭示气候因素对沂河地表径流的影响,本文首先分析沂河流域平均气温和降水变化与径流的对应关系。然后,着重解析对我国东部季风区气候影响较大的厄尔尼诺—南方涛动(NESO)和太平洋 10 a 涛动(PDO)两种大气环流与径流的联系。本文同时运用 EEMD 方法将各气候因素进行分解,以便从年际、年代际和数年代际尺度上探讨不同气候因素与径流的变化关系。

1951—2013 年研究区径流与流域降水量联系紧密,两者呈极显著正相关性($p<0.01$),相关关系为 0.79(图 3)。从各分量来看,年际尺度的 IMF1 和 IMF2 的径流与降水的关系有所降低,相关系数分别为 0.61 和 0.54,但也达到了 $p<0.01$ 的显著性水平。而在年代际(IMF3)和数年代际(IMF4)尺度上,

径流与降水的关系变得更为密切，相关性分别高达0.88和0.98，两者变化的同步性十分明显。这说明降水在年代际以上尺度上对径流的影响程度明显大于年际尺度。

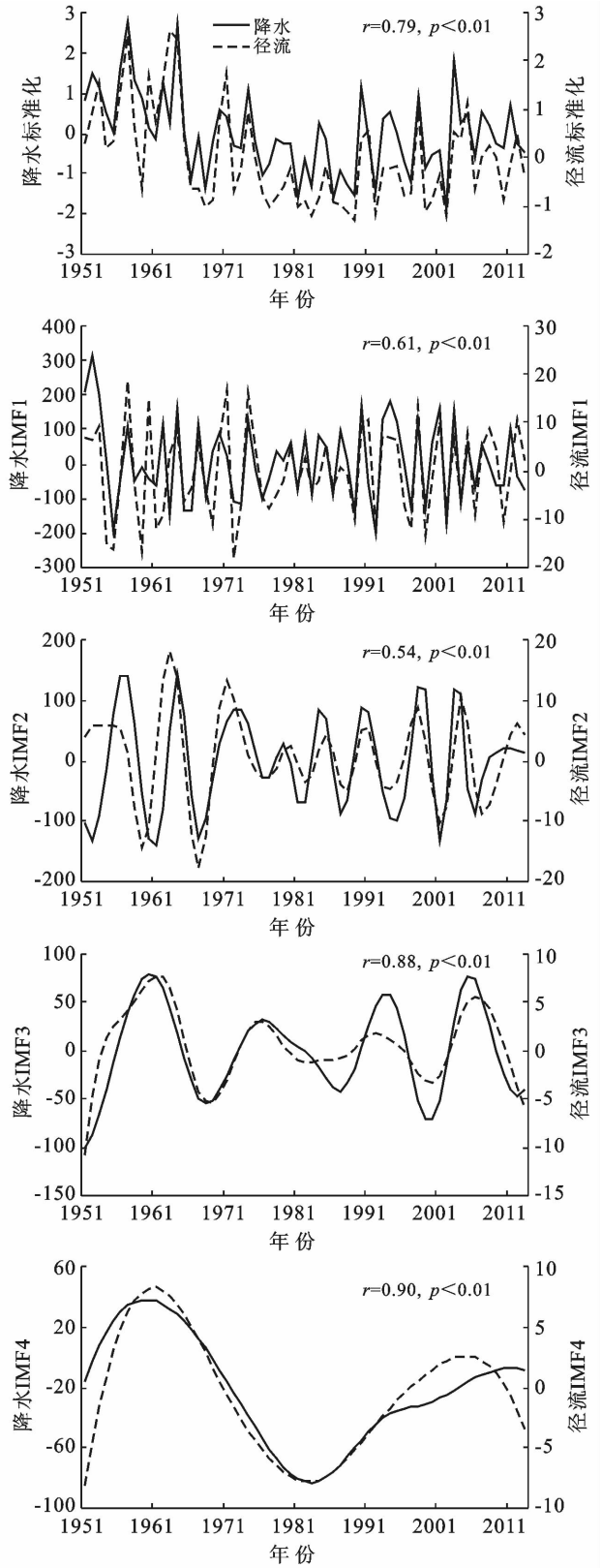


图3 沂河1951—2013年径流与降水在不同时间尺度上的波动状况

1951—2013年沂河流域平均气温与径流相关性系数仅为−0.29，虽然达到了$p<0.05$的显著性水平，但其相关性明显低于降水与径流的关系(图4)。从不同时间尺度的分量来看，IMF1分量的气温与径流的相关性较差，相关系数仅为−0.17，两者在IMF2分量的相关性有所增加，系数为−0.37($p<0.05$)；而在年代际及以上尺度上，两者的相关性由负相关转为显著正相关，尤其是IMF4分量的两者相关系数(0.63)明显高于其它分量。这一方面说明随着时间尺度的增大，气温对径流的影响程度发生明显变化，同时表明，在年际和年代际尺度上，气温对径流的影响机理具有显著差异。这是因为在时间较短的年际尺度上，气温主要通过蒸发等因素来间接影响径流量的变化，对于以降水补给来源为主的流域，气温对径流的影响程度小于降水，而且温度升高，引起蒸发增大，故气温往往与径流呈负相关。但在时间较长的年代际或数年代际尺度上，气温变化往往会对气候系统产生深远影响，从而影响降水量的时间分配和空间布局，进而引起流域径流量变化。

在年尺度上，近63 a来沂河径流与ENSO呈显著负相关关系($r=-0.27$，$p<0.05$)。这在于ENSO偏强年，我国北方降水普遍偏少[21]。但从不同分量来看，ENSO与径流的关系更为复杂。其中，在IMF1和IMF3尺度上，两者的相关关系不具有显著性，但在IMF2尺度上两者呈显著正相关性($r=0.34$，$p<0.05$)，而在IMF4尺度上却呈显著负相关关系($r=-0.45$，$p<0.01$)。这反映出不同时间尺度上ENSO对径流的影响程度与作用机理迥异。

1951—2013年研究区径流与PDO呈显著负相关性($r=-0.39$，$p<0.05$)。同时，从各分量来看，在不同时间尺度上PDO与径流的关系不一(图5)。其中，在年际尺度上的IMF1和IMF2分量两者关系并不显著，而在年代际尺度上的IMF3分量两者具有显著正相关性($r=0.36$，$p<0.05$)，但数年代际尺度上的IMF4分量两者却呈显著负相关关系($r=-0.78$，$p<0.01$)。这也反映出时间尺度越大，PDO与径流的关系越紧密。值得注意的是，虽然IMF2分量在1951—2013年的径流和PDO相关性较差，相关系数仅为−0.08；但在1951—1974年两者呈极显著负相关性，相关系数高达−0.58($p<0.01$)，同时在1975—2013年两者的关系转为显著正相关性($r=0.33$，$p<0.05$)。另外，IMF3分量也表现出类似的现象。其中，在1951—1970年两者具有极显著正相关性，之后也转为负相关关系。从图5也可以看出，径流和PDO的关系在1970s前后有了明显的转换。

这说明即使在同一时间尺度上,不同时间段内 PDO 对径流的影响也是有明显差异的,也体现了大气环流对径流影响的复杂性和不确定性。

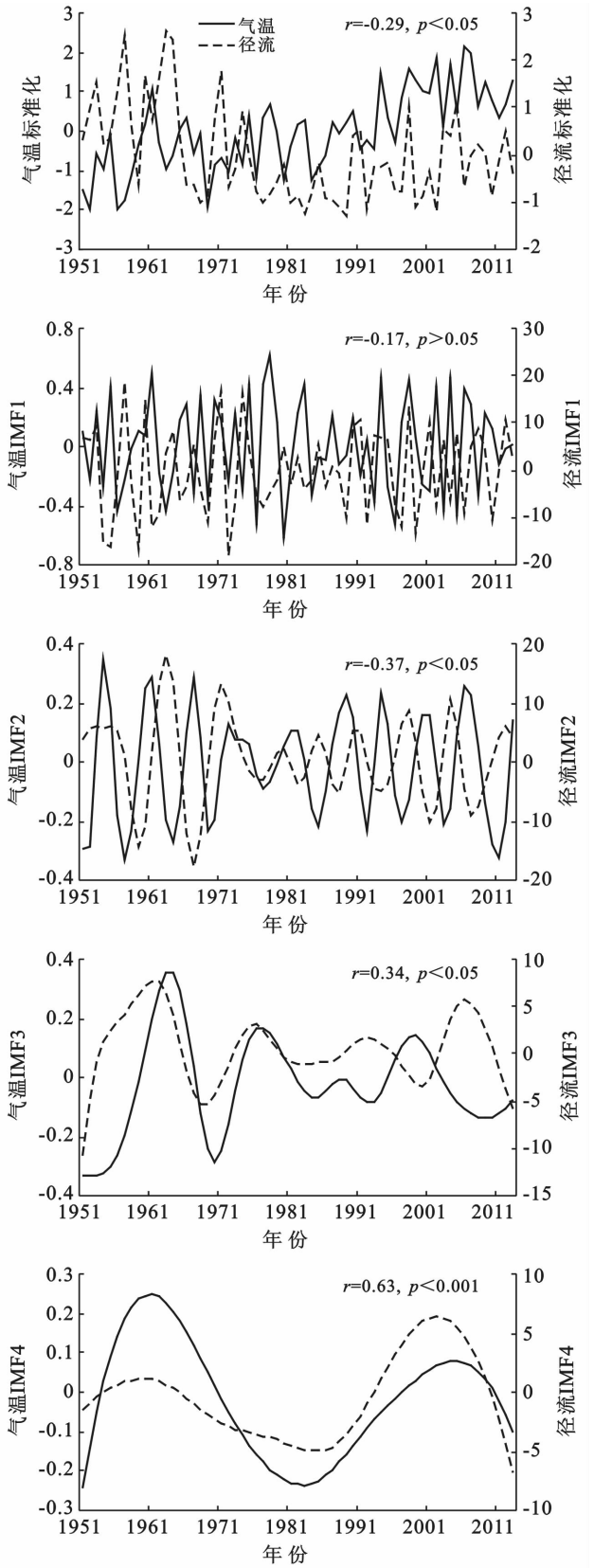


图 4　沂河 1951－2013 年径流与气温在不同时间尺度上的变化

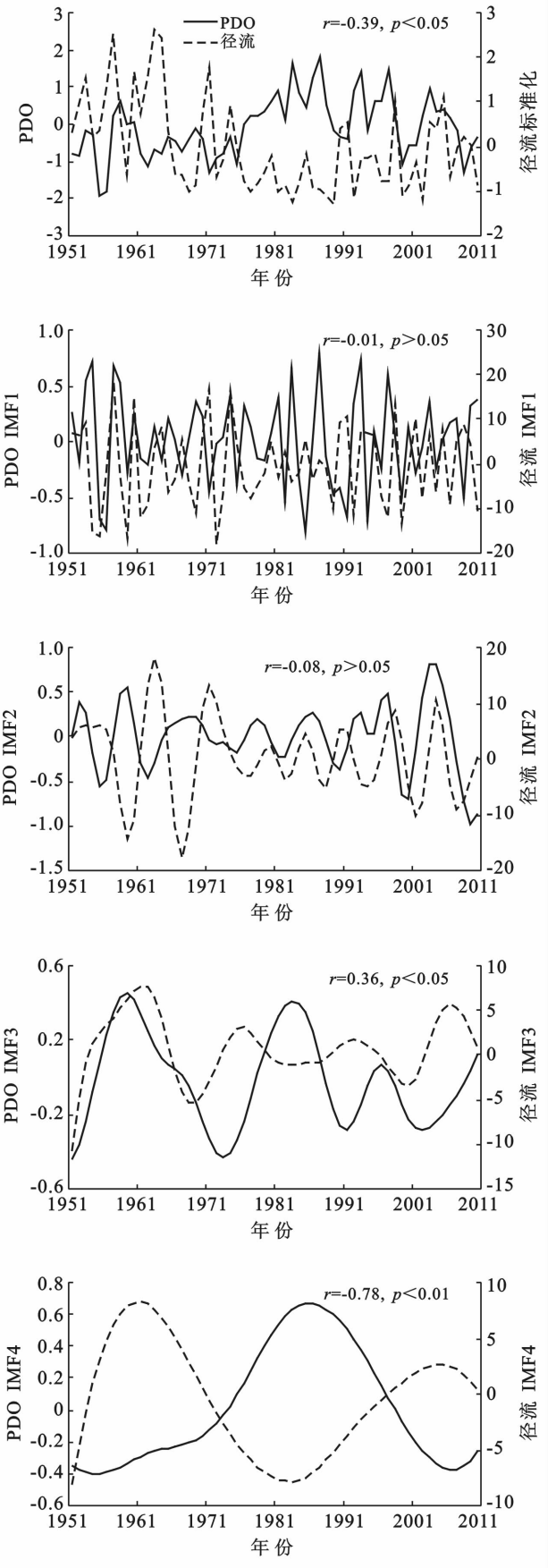


图 5　沂河 1951－2013 年径流与 PDO 在不同时间尺度上的变化

4 讨论与结论

4.1 讨 论

本研究基于EEMD,Mann-Kendall趋势和突变检验及线性回归等方法对沂河径流在不同时间尺度上的线性和非线性变化特征进行深入分析,并探讨了径流对气温、降水、ENSO和PDO变化的响应关系,基于研究结论可得到以下启示与思考。

(1) 运用同一方法,对不同时间尺度的径流变化进行突变检验结果并不一致。这说明在进行突变点分析时,要结合研究对象的实际情况,确定相对有实际意义的突变时间,这将有利于对科学问题的分析与解释。同时,不同时间尺度的径流线性变化趋势结果差异明显,反映了径流变化具有一定的复杂性和不稳定性,需要结合其非线性变化特征,深入剖析径流变化规律。而且通过对径流非线性变化特征进行分析,有助于提高对不同时间尺度上水文系统变化规律的认识。

(2) 通过分析气温、降水与径流的关系,可以看出气温对径流的影响机理相对复杂,不仅要考虑气温变化对蒸散发的直接影响,更要探讨温度变化对气候系统的长期影响。因此,该方面的研究有待加强,这将有利于我们全面揭示气候系统对水文系统的影响机理,有助于提升对水文系统变化的预估水平,从而提高水资源系统应对气候变化的能力。

(3) 基于径流对ENSO和PDO变化的响应分析,可以看出大气环流对径流的影响具有复杂性和不稳定性,尤其在不同时期、不同时间尺度上,大气环流对径流的影响可能存在作用方式与强度的转变,但其机理尚不明确。因此,在利用水文模型等方法对水文过程进行模拟、预测时,必须考虑到大气环流对水文系统影响机理的动态变化过程。换言之,要加强水系统对区域气候变化或大气环流的动态响应研究,这也是我们未来工作的重点。

4.2 结 论

(1) 不同时间尺度的沂河径流突变检验结果不尽相同。其中在1976年前后,径流发生的突变更为明显。

(2) 沂河径流在不同时间尺度上的线性变化特征具有明显差异。其中径流在1951—2013年尺度上呈显著下降态势($p<0.01$),下降速率为3.33×10^8 $m^3/10$ a;在1951—1975年,径流呈减少但不显著变化趋势;而在1976—2013年,径流则表现出显著增加趋势($p<0.05$),变化速率为3.95×10^8 $m^3/10$ a。

(3) 从非线性变化特征来看,沂河径流在年际尺度的变化对径流总体变化的贡献率较大,为58%,并具有3和6 a非线性变化周期;在年代际尺度上径流变化周期为13 a,对径流变化的贡献率较小,仅为6%;而在数年代际尺度上径流变化周期为31 a,对径流总体变化贡献率为11%。因此,径流变化的非线性变化趋势对径流变化的贡献率为25%。

(4) 在年际、年代际和数年代际尺度上,降水量与径流均呈显著正相关关系($p<0.01$),但在年代际和数年代际尺度上两者的关系更为密切。在不同时间尺度上,气温对径流的影响程度与机理具有明显差异,主要表现在气温与径流在年际尺度上呈负相关关系,而在年代际及以上尺度上则呈显著正相关性($p<0.05$)。

(5) 不同时间尺度上大气环流对径流的影响具有复杂性和不稳定性。其中,ENSO与径流的关系随着时间的变化而不断发生正、负相关性的转变。同时,PDO与径流的关系也表现出类似的现象,而且即使在同一时间尺度上,不同时期内两者的关系也会发生显著正、负相关性的转换。

[参 考 文 献]

[1] 王在柱,李鹏,郭玲玲.浅析我国水资源利用现状及农业节水灌溉对策[J].内蒙古科技与经济,2013,27(4):42-43.

[2] 李瑜,庄会波,宋秀英,等.山东水资源与环境社会经济协调发展综合评价[J].水文,2003,23(2):37-41.

[3] 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.

[4] 叶许春,刘健,李相虎,等.气候和人类活动对赣江径流变化的作用分析[J].河海大学学报:自然科学版,2013,41(3):196-203.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 叶金印,黄勇,张春莉,等.近50年淮河流域汛期降水日数和强度的分布与变化特征[J].湖泊科学,2013,25((4):583-592.

[8] 薛丽芳,谭海樵.沂河流域水文特征变化及其驱动因素[J].地理科学进展,2011,30(11):1354-1360.

[9] 史红玲,胡春宏,王延贵,等.淮河流域水沙变化趋势及其成因分析[J].水利学报,2012,43(5):571-579.

[10] 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.

[11] 姚梦婷,高超,陆苗,等.1959—2008年淮河流域极端径流的强度和频率特征[J].地理研究,2014,34(8):1535-1546.

(下转第181页)

[13] Kpomblekou K A, Tabatabai M A. Effect of low-molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailabilty of phosphorus in phosphate rocks added to soils [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003,100(2/3):275-284.

[14] 黄丽,刘畅,胡红青.不同 pH 下有机酸对针铁矿和膨润土吸附 Cd^{2+},Pb^{2+} 的影响[J].土壤学报,2007,44(4):643-649.

[15] 吉芳英,王图锦,胡学斌,等.三峡库区消落区水体—沉积物重金属迁移转化特征[J].环境科学,2009,30(12):3481-3487.

[16] 李宛泽,谢文明,江涛,等.3 种低相对分子质量有机酸对土壤中 DDT 的解吸[J].北华大学学报:自然科学版,2009,10(6):551-553.

[17] 李平,王兴祥.几种低分子量有机酸淋溶对土壤 pH 和交换性铝的影响[J].土壤,2005,37(6):669-673.

[18] 胡刚,王里奥,袁辉,等.三峡库区消落带下部区域土壤氮磷释放规律模拟试验研究[J].长江流域资源与环境,2008,17(5):780-784.

[19] 王业春,雷波,杨三明,等.三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价[J].环境科学,2012,33(2):612-617.

[20] 张信宝.关于三峡水库消落带地貌变化之思考[J].水土保持通报,2009,29(3):1-4.

[21] 张彦春,王孟钧,戴若林.三峡库区水环境安全分析与战略对策[J].长江流域资源与环境,2007,16(6):801-804.

[22] 杨茜,蒋珍茂,石艳,等.低分子量有机酸对三峡库区消落带典型土壤磷素淋溶迁移的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):126-131.

[23] 唐海燕,魏世强.低分子量有机酸对淹水土壤磷释放动力学的影响[J].西南农业大学学报:自然科学版,2005,27(4):439-443.

[24] 陆文龙,王敬国,曹一平,等.低分子量有机酸对土壤磷释放动力学的影响[J].土壤学报,1998,35(4):493-499.

[25] 蒋智,况明生.重庆地区近 57 a 降雨量变化特征及其影响分析[J].亚热带水土保持,2009,21(2):9-13.

[26] 胡红青,廖丽霞,王兴林.低分子量有机酸对红壤无极态磷转化及酸度的影响[J].应用生态学报,2002,13(7):867-870.

[27] 金相灿.沉积物污染化学[M].北京:中国环境科学出版社,1992:314-323.

[28] 付春平,钟成华,邓春光.水溶液电导率与三峡库区底泥氮磷释放关系研究[J].重庆建筑大学学报,2006,28(4):76-78.

(上接第 174 页)

[12] 杨默远,桑燕芳,王中根,等.潮河流域降水—径流关系变化及驱动因子识别[J].地理研究,2014,33(9):1658-1667.

[13] Xu Jianhua, Chen Yaning, 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] Xu Jianhua, Chen Yaning, Li Weihong, et al. The nonlinear hydro-climatic process in the Yarkand River, Northwestern China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013,27(2):389-399.

[15] 李芬,张建新,郝智文,等.山西降水与 ENSO 的相关性研究[J].地理学报,2015,70(3):420-430.

[16] 陈烈庭,吴仁广.太平洋各区海温异常对中国东部夏季雨带类型的共同影响[J].大气科学,1998,22(5):718-726.

[17] Wu Zhaohua, Huang Norden E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2011,1(1):1-41.

[18] Huang N E, Wu Zhaohua. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies[J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2): 2008.

[19] 王文,任冉,李耀辉.基于 EEMD 的黄河中上游夏季降水预报方法的研究[J].气象科学,2014,34(3):261-266.

[20] Bai Ling, Xu Jianhua, Chen Zhongsheng, 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, 2014, 35(11):3229-3237.

[21] Wang Shanshan, Huang Jianping, He Yongli, et al. Combined effects of the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation on global land dry-wet changes[J]. Scientific Reports, 2014,4:6651.