

哈尔滨站径流、输沙的多时间尺度特征

穆兴民^{1,2}, 宋小燕^{2,3}, 高鹏^{1,2}, 王飞^{1,2}, 王双银¹

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院、水利部 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 水沙多时间尺度变化的复杂结构分析可为短期及中长期水沙预测提供科学依据。选用松花江哈尔滨控制站 1955—2005 年年均面降雨量、年均径流和输沙量数据, 采用小波多尺度分析方法, 分析哈尔滨站主要水文要素的周期及其多时间尺度变化特征。结果表明: 哈尔滨站降雨、径流和输沙量序列主周期基本一致且均存在多时间尺度特征。三要素的第一主周期为 24.0~26.0 a, 第二主周期为 17.0~18.0 a, 第三主周期为 6.0~7.0 a。在 7 a 时间尺度上, 20 世纪 50—60 年代, 降雨、径流和输沙量序列的曲线变化基本同步。20 世纪 70 年代, 由于大规模人口迁入以及为解决粮食问题的水土资源开发导致了三条曲线发生紊乱, 20 世纪 80 年代后黑土地综合治理措施的实施使得三条曲线重新趋于一致。在 17 a 和 26 a 时间尺度上, 受引水工程、兴建水库等人类活动的影响, 三条曲线间的变化出现不同步现象。水沙丰枯变化及奇异点判断与时间尺度有密切关系, 离开时间尺度的变化趋势是毫无意义的。

关键词: 降雨; 径流; 输沙; 小波分析; 多时间尺度; 哈尔滨

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2011)01-0135-10

在时间序列研究中, 时域和频域是常用的两种基本形式。其中, 时域分析具有时间定位能力, 但无法得到关于时间序列变化的更多信息, 频域分析(如 Fourier 变换)虽具有准确的频率定位功能, 但仅适合平稳时间序列分析。然而, 地学中许多现象(如河川径流、地震波、暴雨、洪水等)随时间的变化往往受到多种因素的综合影响, 大多属于非平稳序列, 它们不但具有趋势性、周期性等特征, 还存在随机性、突变性以及多时间尺度结构, 具有多层次演变规律。对于这类非平稳时间序列的研究, 通常需要某一频段对应的的时间信息, 或某一时段的频域信息, 显然, 时域分析和频域分析对此均无能为力^[1-2]。20 世纪 80 年代初, 由 Morlet 提出的一种具有时频多分辨功能的小波分析, 为更好地研究时间序列问题提供了可能, 它能清晰地揭示出隐藏在时间序列中的多种变化周期, 充分反映系统在不同时间尺度中的变化趋势, 并能对系统未来发展趋势进行定性估计^[3-4]。

对东北地区气候要素的时间变化已有较多研究: 姜晓艳等在分析中国东北地区哈尔滨、长春、沈阳和大连近百年来年平均气温和百年降水变化特征的基础上, 采用小波分析的方法研究了两者多时间尺度的复杂结构^[5-6]; 孙力等使用小波分析等方法对东北地区近 90 a 来夏季降水的空间异常特征及时间变化规律进行了诊断研究^[7]; 杨素英等对近 50 a 来东北地区夏季气温异常的空间变化特征进行了研究^[8]。近年来东北地区河流水沙问题已引起人们的关注。宋小燕等对哈尔滨站近百年来径流变化趋势进行了分析^[9]; 徐东霞等根据嫩江、石

收稿日期: 2009-12-02; 修订日期: 2010-08-16。

基金项目: 国家“973”项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”(2007CB401203)。

第一作者简介: 穆兴民(1961-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为水土保持、生态水文。E-mail: xmmu@ms.iswc.

灰窑、同盟、江桥、大赉水文站 1956—2006 年 51 a 的径流资料,采用 Morlet 小波对嫩江流域径流序列进行了多时间尺度研究^[10];李林育等根据松花江流域主要水文站实测输沙量资料对 51 a 来流域输沙量变化与人类活动关系进行了分析^[11]。穆兴民等在对历史资料甄别与整理的基础上,分析近代以来东北三省区人口、土地利用变化及其与水土流失关系的演变^[12]。东北地区由于受到自然因素和不合理的人类活动影响,水沙过程、特性已发生了巨大变化,以上的研究工作虽然从不同角度得到了很多有意义的结论,但关于东北地区降雨、径流和输沙的水沙变化特性缺乏耦合关系分析。因此,采用 Morlet 小波变换分析方法,对哈尔滨站水沙多时间尺度的复杂结构进行分析,对了解我国东北地区水沙多时间尺度的复杂结构变化规律具有重要意义,为短期及中长期水沙预测提供科学依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

松花江流域位于 41°42′~51°38′N 和 119°52′~132°31′E 之间,流域面积 55.68 × 10⁴ km²。松花江有南北两源,南源第二松花江发源于吉林省长白山天池,北源嫩江发源于大兴安岭伊勒呼里山中段南侧,两源于三岔河附近汇合向东而流始称松花江。流域位于中国东北地区的北半部,地处东亚季风的北部边缘,由季风强弱的年际变化所造成的各年气候状况有很大差别^[13]。冬季寒冷漫长,夏季炎热多雨,春季干燥多风,秋季很短,年内温差较大,多年平均气温在 5~3℃ 之间,多年平均年降水量一般在 500 mm 左右。流域位于世界著名三大黑土带之一的东北黑土带,是我国重要的工业和商品粮基地,每年生产约 350 × 10⁸ kg 的商品粮,而且它还是我国甜菜、亚麻、向日葵等经济作物的主产区和畜牧业基地。然而,黑土带母质层是粘重的黄土,易产生地表径流和滑坡,长期的人类开发活动造成了该区生态环境的恶化。

哈尔滨水文站位于松花江干流的中游,是第二松花江和嫩江汇合后的主要控制站,1898 年该站为水位站,1953 年扩建为水文站,控制流域面积 389 769 km²,占流域面积的 70%。哈尔滨站畅流期径流占全年的 86% 左右,汛期占 31% 左右。哈尔滨的洪水组成概况:嫩江占 59%,第二松花江占 30%,拉林河占 10%。该站自建站以来,为哈尔滨市的防汛抗旱,给排水、工程设计等部门提供了各种宝贵的数据。

1.2 数据来源及处理

本文选用中国气象科学数据共享服务网下载的资料质量好、系列完整、面上分布均匀的哈尔滨、长春、齐齐哈尔、扎兰屯、嫩江、克山、前郭尔罗斯和安达 8 个气象站的 1955—2005 年降雨资料(表 1),根据泰森多边形法计算出哈尔滨站控制区域的面平均降雨量^[14],使用面平均降雨量来进行降雨量的分析;选用哈尔滨站 1955—2005 年的实测日流量资料,将流量换算为径流量进行分析,同时选用哈尔滨站 1955—2005 年的实测输沙量资料,对年输沙量进行分析。

为消除水文序列中季节变化等的干扰,需要将原数据作标准化处理,以更好地表现其波动性及其周期性质,即:

$$R_i^* = \frac{R_i - \bar{R}}{\sigma_i} \quad (1)$$

式中: R_i^* 为第 i 年水文序列标准化数据; R_i 为实测第 i 年水文序列的年均值; \bar{R} 、 σ_i 为水文序列的均值和方差^[15]。

表 1 松花江部分气象站地理位置

Table 1 The location of weather stations in Songhua River

站名	所属河流	经度(E)	纬度(N)	海拔/m	泰森多边形中所占比例/%
哈尔滨	松花江干流	126°46'	45°45'	142.3	6.0
长春	第二松花江	125°13'	43°54'	236.8	20.0
齐齐哈尔	嫩江	123°55'	47°23'	145.9	15.2
扎兰屯	嫩江	122°41'	48°01'	315.6	17.4
嫩江	嫩江	125°14'	49°10'	242.2	18.2
克山	嫩江	125°53'	48°03'	234.6	6.8
前郭尔罗斯	第二松花江	124°52'	45°05'	135.9	10.6
安达	松花江干流	125°19'	46°23'	149.3	6.0

1.3 分析方法

水沙演变过程中包含连续的多时间尺度变化特征,在运用小波分析理论分析水沙周期变化,选择合适的基小波函数是前提。本文之所以选用 Morlet 连续复小波变换分析哈尔滨站水沙时间序列的多时间尺度特征,是因为 Morlet 连续复小波变换能同时给出时间序列变化的位相和振幅两方面的信息,而实小波变换只能给出时间序列变化的振幅和正负;并且复小波函数的实部和虚部位相差为 $\pi/2$,能够消除用实小波变换系数作为判据而产生的虚假振荡,使分析结果更为准确^[16]。

1.3.1 小波函数

小波分析的基本思想是用一簇小波函数系来表示或逼近某一信号或函数。因此,小波函数是小波分析的关键,它是指具有震荡性、能够迅速衰减到零的一类函数,即小波函数 $\psi(t) \in L^2(R)$ 且满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2)$$

式中, $\psi(t)$ 为基小波函数,它可通过尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一簇函数系:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \text{其中, } a, b \in R, a \neq 0 \quad (3)$$

式中, $\psi_{a,b}(t)$ 为子小波; a 为尺度因子,反映小波的周期长度; b 为平移因子,反映时间上的平移。

1.3.2 小波变换

若 $\psi_{a,b}(t)$ 是由式(3)给出的子小波,对于给定的能量有限信号 $f(t) \in L^2(R)$,其连续小波变换(简称为 CWT)为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

式中: $W_f(a,b)$ 为小波变换系数; $f(t)$ 为一个信号或平方可积函数; a 为伸缩尺度; b 为平移参数; $\bar{\psi}\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 为 $\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 的复共轭函数。

地学中观测到的时间序列数据大多是离散的,设函数 $f(k\Delta t)$, ($k=1,2,\dots,N$; Δt 为取样间隔),则式(4)的离散小波变换形式为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (5)$$

由式(4)或(5)可知小波分析的基本原理,即通过增加或减小伸缩尺度 a 来得到信号的低频或高频信息,然后分析信号的概貌或细节,实现对信号不同时间尺度和空间局部特征的分析。

1.3.3 小波方差

将小波系数的平方值在 b 域上积分,就可得到小波方差,即

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (6)$$

小波方差随尺度 a 的变化过程,称为小波方差图。由式(6)可知,它能反映信号波动的能量随尺度 a 的分布。因此,小波方差图用来确定信号中不同种尺度扰动的相对强度和存在的主要时间尺度,即主周期。

2 结果与分析

2.1 降雨、径流和输沙量变化周期

为能较清楚地说明小波系数实部等值线图在哈尔滨站水沙多时间尺度分析中的作用,利用 Suffer 进一步处理和修饰,得到图 1 所示的小波系数实部等值线图,图中的等值曲线为小波系数实部值。当小波系数实部值为正时,代表水沙的偏多期(实线);为负时,表示水沙偏少期(虚线)。由图 1 可以清楚地看到哈尔滨站降雨、径流和输沙序列演化过程中存在多时间尺度特征。经小波变换后,图 1 中的三幅图其实线和虚线在不同尺度上的交替格局十分雷同,且径流和输沙序列在周期性振荡的强弱和位相变化上更为相似,其中 3~8 a、12~18 a 和 20~32 a 的时间尺度上表现十分明显,正负位相交替出现。

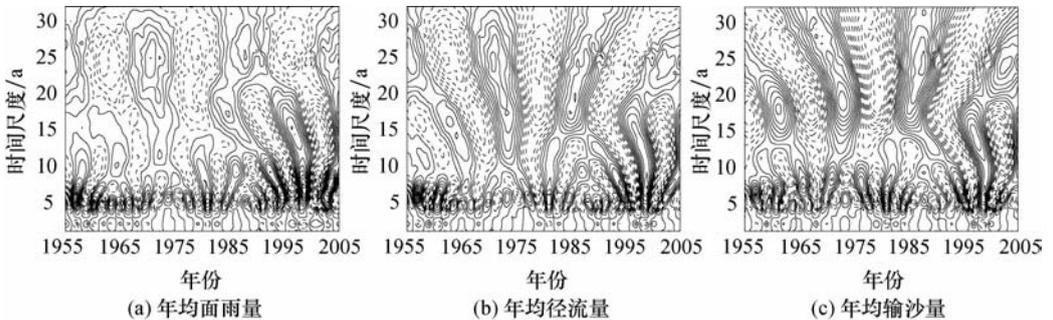


图 1 哈尔滨站降雨、径流和输沙量序列的小波变换系数对比

Fig. 1 Wavelet coefficient of precipitation, runoff and sediment discharge in Harbin

降雨、径流、输沙量序列 Morlet 小波变换模方的时频变化如图 2 所示,可以看出降雨、径流、输沙量的不同时段各时间尺度的强弱分布。其中,降雨、径流、输沙 3~8 a 和 20~32 a 的时间尺度周期震荡均十分明显,周期变化在整个分析时段表现得非常稳定,具有全域性;12~18 a 的时间尺度径流和输沙强弱分布很相似,周期震荡具有全局性,但降雨序列的强弱分布差异较大,在 20 世纪 80 年代以后表现才较为稳定。

为确切判断各水文要素序列的周期显著性随尺度的变化特征,采用式(6)计算小波方差并绘制方差曲线(图 3)。方差曲线每一峰值表示在对应尺度下存在较为显著的周期,最高峰值对应的尺度即为该序列的最显著周期。从图 3 可以看出,哈尔滨站降雨、径流和输沙

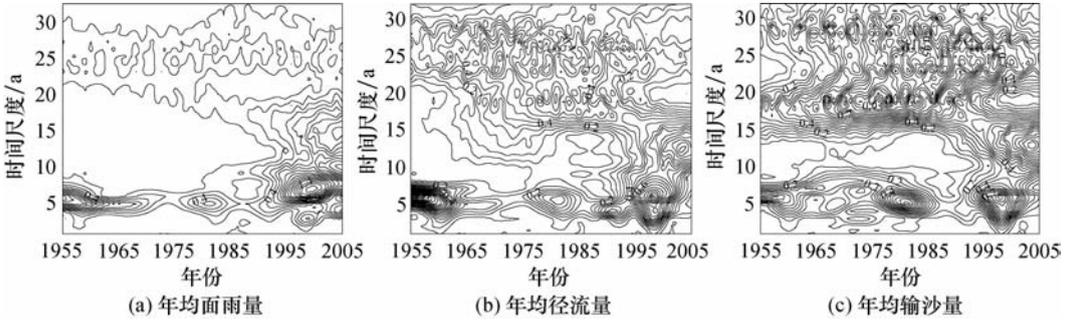


图2 哈尔滨站降雨、径流和输沙量的小波变换模方的时频分布

Fig. 2 Wavelet coefficient modular square of precipitation, runoff and sediment discharge in Harbin

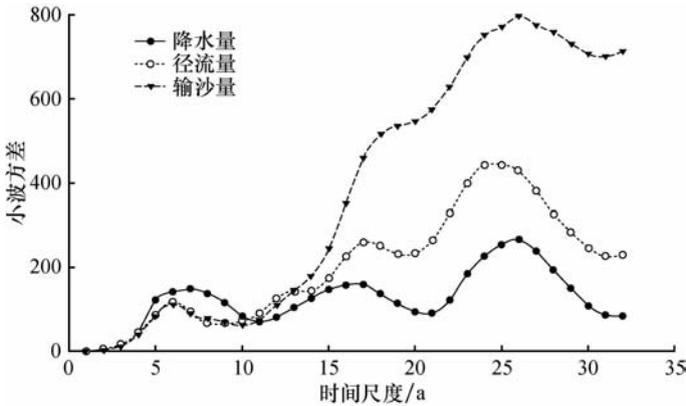


图3 哈尔滨站降雨、径流和输沙量的小波方差

Fig. 3 Wavelet coefficient variance of precipitation, runoff and sediment discharge in Harbin

3 个序列的小波方差曲线存在 3 个较为明显的峰值,且出现峰值所对应的的时间尺度十分相近,这表明降雨和径流、输沙序列的主周期基本一致。但三者存在差异:降雨和输沙序列的第一主周期均为 26.0 a,而径流序列的主周期为 24.0 a;降雨径流序列的第二主周期为 17.0 a,输沙的第二主周期则出现在 18.0 a 左右;第三主周期降雨出现在 7.0 a 时间尺度上,径流输沙则出现在 6.0 a 尺度上。

2.2 降雨、径流、输沙的多时间尺度特征

2.2.1 降雨、径流、输沙序列的多时间尺度特征

小波变换实部随历时的变化过程(图 4)反映了系统在该尺度下的小波系数实部变化特征。其中,正的 $W_j(a,b)$ 实部值对应于水沙偏多期,负的 $W_j(a,b)$ 实部值对应于偏少期, $W_j(a,b)$ 实部值为 0 对应着水沙变化的突变点。从图 4 中可以分析出:在不同的时间尺度下,哈尔滨站水沙存在周期及丰枯变化特征。

在 7 a 时间尺度上,哈尔滨站水沙平均变化周期在 4.5 a 左右,大约经历了 22 个丰—枯转换期。20 世纪 50—60 年代,降雨、径流、输沙 3 个水文要素序列的曲线变化基本同步,70 年代这一时间段内降雨、径流、输沙曲线位相变化发生紊乱,80 年代后重新趋于一致。另外,3 条曲线从 70 年代到 90 年代中期振幅较其前后时间段明显减小。由于振幅大小与

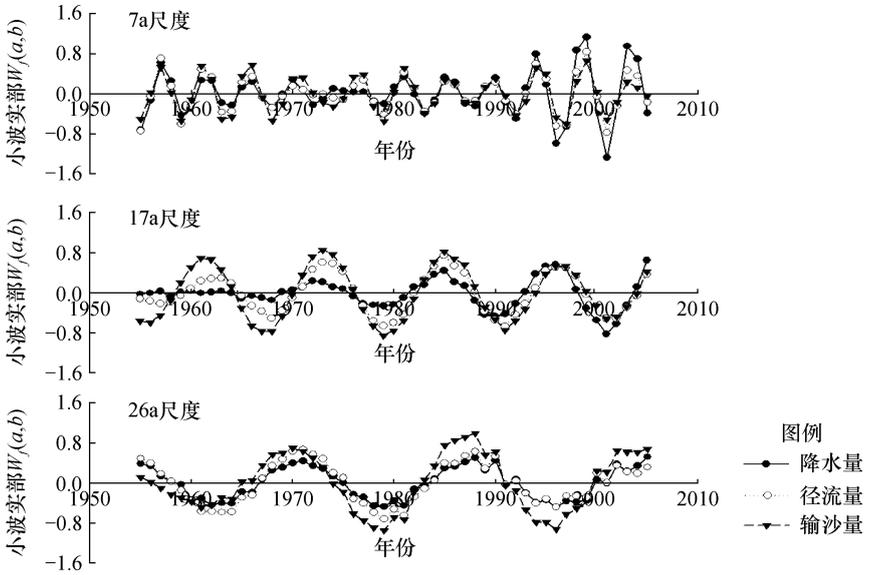


图4 哈尔滨站降雨、径流和输沙量在不同时间尺度下的小波变换系数实部变化曲线

Fig. 4 Wavelet coefficient curves of precipitation, runoff and sediment discharge at different scales in Harbin

水文序列量值变化程度有关,因此,哈尔滨站在这一时间段内3个水文要素的量值均趋于均匀化。20世纪50—60年代,哈尔滨站降水较为丰富,小尺度上,径流和输沙曲线基本同步。70年代期间,大规模人口迁入,以及为解决粮食生产问题的不合理开发导致3条曲线发生紊乱。期间发生的典型事件有:1967年组建了生产建设兵团,将当时国营农场、劳改农场统统划归生产建设兵团,进行了大面积的开荒。1974年以后主要是进行集体开荒,国家将人民公社集体开荒纳入计划,给予一定的资金补助,加快了土地开发进度^[17]。3条曲线在80年代后之所以能重新趋于一致是因为1978年党的十一届三中全会以后,东北地区进行了土地综合开发,山水田林路综合治理,同时国家启动了“三北”防护林体系建设工程。尤其是1985年以后,因三江平原以往的过度开发所带来的生态环境和物种保护等方面的问题,逐渐引起人们的关注,重点研究了三江平原开发保护的问题^[18]。90年代以后3条曲线振幅均增大,说明哈尔滨站90年代以后降雨、径流、输沙量增大。这个时期的水沙变化主要是因为降雨量大幅度增加,一般降雨量越大,流域产流与输沙也越多,但其中较为异常的是输沙量变化,它在降雨和径流量较70年代有大幅增加的情况下,仍保持与70年代输沙量相当的水平,甚至进入21世纪以后的输沙量更表现为明显的减少趋势。这主要是因为这个时期东北地区的政策导向由原先的以开发为主变化为治理与开发相结合,更加注重土地的合理利用与保护。1994年,黑龙江省最大的一块湿地三江平原成立了“三江自然保护区”。1998年松嫩流域发生了特大洪水,对国家和人民的生命和财产造成了巨大的损失,使国家更加重视东北黑土区的合理开发和环境保护问题。1999年,国家决定“北大荒”全面停止开荒,实行退耕还“荒”(还林、还草、还湿地),黑土区大面积大规模的开垦宣告结束。2000年,国家实施天然林保护工程,进行松嫩平原农田保护体系和三江平原农业生产基地保护体系建设。2003年正式启动了东北黑土区水土流失综合治理试点工程^[19],这些综合措施的实施使得输沙量明显减少。从曲线的波动趋势看,2006和2008年左右为丰枯突变点,即在2009—2010年左右这个时间段哈尔滨站的降雨、径流、输沙将处于偏少状态。

在 17 a 时间尺度上,哈尔滨站水沙变化平均变化周期为 12.0 a 左右,大约经历了 9 个周期的丰枯变化。20 世纪 50—60 年代,先后建成了“八一运河”、“北引”、“中引”和“南引”等较大的引水工程,这些水利工程的修建减少了哈尔滨站径流量^[19],使得径流序列位相变化滞后于降雨和输沙序列的变化。在 70—90 年代期间,仅松花江的一条支流嫩江就建成了大型水库 5 座:诺敏河支流的太平湖水库、音河支流上游的音河水库、洮儿河支流上的察尔森水库、月亮泡水库,洮儿河干流上的向海水库^[20]。这些水库先后投入使用,起到对水沙重新分配的作用,使得 70 年代以后的径流和输沙量序列曲线位相变化普遍滞后于降雨量序列的变化。从这种趋势可以预估,2010 和 2016 年左右将为丰枯突变点,2010—2016 年左右各水文要素处于偏少状态。

在 26 a 时间尺度上,哈尔滨站水沙的平均变化周期为 16.5 a 左右,大约经历了 6 个周期的丰枯变化。降雨径流在 1955—1958 年、1967—1975 年、1984—1991 年和 2000—2005 年各时段为正位相,表明这几个时段内处于偏丰状态,1959—1966 年、1976—1983 年和 1992—1999 年降雨径流位相为负,表明处于偏少状态。输沙量 1955—1956 年、1965—1974 年、1983—1991 年和 2000—2005 年各时段内处于偏丰状态,1957—1964 年、1975—1982 年和 1992—1999 年位相为负,表明处于偏少状态。降雨与径流量序列的曲线变化在整个研究时段内变化基本同步,输沙量序列变化在 20 世纪 80 年代中期之前一直提前于降雨、径流量序列的变化,80 年代中期之后 3 条曲线变化趋于一致。从这种趋势可以预估,2016 年左右将为丰枯突变点,2008—2016 年各水文要素量处于偏少状态。

哈尔滨站降雨、径流、输沙量主要以 7.0 a、17.0 a 和 26.0 a 左右的周期为主,这 3 个周期的波动,共同决定着哈尔滨站 3 个水文要素在整个时间域内变化的特性。同时,通过小波分析,可以利用大尺度未来趋势诊断结果对小尺度的更远未来进行诊断^[21],从而为系统中、长期预测提供背景分析依据。

2.2.2 降雨、径流、输沙序列的奇异点判断

根据小波方差检验的结果(图 4),列出了曲线与横轴相交处即奇异点所在位置(表 2)。由表 2 得出:在 7.0 a 时间尺度上,除 20 世纪 70 年代外,降雨、径流、输沙的奇异点位置在研究时间序列上基本相同,其中径流、输沙的奇异点更有极其相似的同步变化特征。在

表 2 不同时间尺度下降雨、径流和输沙量序列的突变点

Table 2 The singular points of precipitation, runoff and sediment discharge at different scales in Harbin

尺度/a	7	17	26
降雨量	1956、1958、1960、1962、1964、1967、1969、1971、1973、1975、1977、1980、1982、1984、1986、1988、1991、1993、1995、1997、2000、2002、2004 年	1957、1959、1961、1964、1969、1975、1981、1987、1993、1998、2004 年	1958、1966、1975、1983、1991、1999 年
径流量	1956、1958、1960、1962、1964、1967、1969、1972、1976、1978、1980、1982、1984、1986、1988、1991、1993、1995、1997、2000、2002、2004 年	1960、1964、1970、1976、1982、1988、1994、1999、2004 年	1958、1966、1975、1983、1991、1999 年
输沙量	1956、1958、1960、1962、1964、1967、1969、1972、1975、1978、1980、1982、1984、1986、1988、1991、1993、1995、1997、2000、2002、2004 年	1958、1964、1970、1976、1982、1988、1994、1999、2004 年	1956、1964、1974、1982、1991、1999 年

17.0 a 时间尺度上,径流、输沙序列的奇异点变化除第一个奇异点外,其他奇异点位置均相同,且两要素奇异点变化均滞后于降雨的奇异点变化。在 26.0 a 时间尺度上,降雨、径流序列的奇异点变化完全相同,并在 20 世纪 90 年代之前,一直滞后于输沙序列的奇异点变化。随着时间尺度的增大,小时间尺度上的一些奇异点逐渐退化为平常点,相反,随着时间尺度的降低,除原有的奇异点外,还不断增加奇异点,大时间尺度上的一些平常态,在低层次看来则是突变态。因此,奇异点判断与时间尺度有密切关系。

3 小结

(1) 哈尔滨站降雨、径流和输沙序列演化过程中存在周期变化特征。3~8 a 和 20~32 a 的时间尺度周期震荡均十分明显,具有全域性;12~18 a 的时间尺度径流和输沙强弱分布很相似,周期震荡具有全局性,而降雨只在 20 世纪 80 年代以后表现才较为稳定。哈尔滨站降雨、径流和输沙 3 个序列的小波方差曲线存在 3 个较为明显的峰值,且出现峰值所对应的时间尺度十分相近,表明降雨和径流、输沙序列的主周期基本一致。降雨、径流、输沙序列的第一主周期为 24.0~26.0 a,第二主周期为 17.0~18.0 a,第三主周期为 6.0~7.0 a。

(2) 哈尔滨站降雨、径流和输沙序列演化过程中存在多时间尺度变化特征。在 7 a 时间尺度上,20 世纪 50—60 年代,降雨、径流和输沙量 3 个水文要素序列的曲线变化基本同步,70 年代,3 条曲线位相变化发生紊乱,80 年代后重新趋于一致,90 年代,输沙量在降雨和径流量大幅增加的情况下保持与 70 年代相当的水平,甚至进入 21 世纪以后更有明显的减少趋势。在 17 a 时间尺度上,20 世纪 50—60 年代,径流量序列位相变化滞后于降雨和输沙量的变化;70 年代以后,径流和输沙量序列曲线位相变化普遍滞后于降雨量序列的位相变化。在 26 a 时间尺度上,降雨与径流量序列的曲线变化在整个研究时间段内变化基本同步,输沙量序列变化在 20 世纪 80 年代中期之前一直提前于降雨、径流量序列的变化,80 年代中期之后 3 条曲线变化趋于一致。降雨、径流、输沙序列的位相变化与开垦北大荒、引水工程、兴建水库以及黑土地水土流失综合治理等人类活动有密切联系。随着时间尺度的增大,小事件尺度上的一些奇异点逐渐退化为平常点,相反,随着时间尺度的降低,除原有的奇异点外,还不断增加奇异点。因此,水沙丰枯变化及奇异点判断与时间尺度有密切关系,离开时间尺度的变化趋势是毫无意义的。

参考文献 (References):

- [1] 王文圣,丁晶,向红莲. 水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2002, 34(6): 14-17. [WANG Wen-sheng, DING Jing, XIANG Hong-lian. Multiple time scales analysis of hydrological time series with wavelet transform. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2002, 34(6): 14-17.]
- [2] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. [PENG Yu-hua. *Wavelet Transform and Engineering Application*. Beijing: Science Press, 2002.]
- [3] Morlet J, Arens G, Fourgeau E, et al. Wave propagation and sampling theory and complex waves [J]. *Geophysics*, 1982, 47(2): 222-236.
- [4] 王文圣,丁晶,李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. [WANG Wen-sheng, DING Jing, LI Yue-qing. *Hydrology Wavelet Analysis*. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.]
- [5] 姜晓艳,刘书华,马明敏,等. 中国东北地区近百年来气温序列的小波分析[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 122-125. [JIANG Xiao-yan, LIU Shu-hua, MA Ming-min, et al. Wavelet analysis of the temperature time series in North-east China during the last 100 years. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(2): 122-125.]

- [6] 姜晓艳, 刘书华, 马明敏, 等. 东北地区近百年来降水时间序列变化规律的小波分析[J]. 地理研究, 2009, 28(2): 354-362. [JIANG Xiao-yan, LIU Shu-hua, MA Ming-min, *et al.* Wavelet analysis of the precipitation time series in Northeast China during the last 100 years. *Geographical Research*, 2009, 28(2): 354-362.]
- [7] 孙力, 安刚, 丁立, 等. 中国东北地区夏季降水异常的气候分析[J]. 气象学报, 2000, 58(1): 70-82. [SUN Li, AN Gang, DING Li, *et al.* Climatic analysis of summer precipitation features and anomaly in Northeast of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(1): 70-82.]
- [8] 杨素英, 王谦谦. 近50a 东北地区的夏季气温异常的时空变化特征[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(5): 653-660. [YANG Su-ying, WANG Qian-qian. Spatial/temporal variations of summer temperature in Northeast China in recent 50 years. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2003, 26(5): 653-660.]
- [9] 宋小燕, 穆兴民, 高鹏, 等. 松花江哈尔滨站近百年来径流变化趋势分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1803-1809. [SONG Xiao-yan, MU Xing-min, GAO Peng, *et al.* Trends and changes of stream flow variation from 1900-2005 at the Harbin of Songhua River. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10): 1803-1809.]
- [10] 徐东霞, 章光新, 冯夏清. 嫩江流域径流量多时间尺度特征分析[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1592-1598. [XU Dong-xia, ZHANG Guang-xin, FENG Xia-qing. Discussion on multiple time scales of runoff variation in the Nenjiang River Basin. *Resources Science*, 2009, 31(9): 1592-1598.]
- [11] 李林育, 焦菊英, 李锐, 等. 松花江流域河流泥沙对人类活动的相应特征[J]. 泥沙研究, 2009, 6(2): 62-70. [LI Lin-yu, JIAO Ju-ying, LI Rui, *et al.* Response characteristics of sediment to human activities in the Songhua River basin. *Journal of Sediment Research*, 2009, 6(2): 62-70.]
- [12] 穆兴民, 高鹏, 王双银, 等. 东北三省区人类活动与水土流失关系演进[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 37-42. [MU Xing-min, GAO Peng, WANG Shuang-yin, *et al.* Evolution of the relationship between soil and water loss and human activities in modern times in Northeast China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(5): 37-42.]
- [13] 孙永罡, 白人海. 松花江、嫩江流域主要气象灾害研究[M]. 北京: 气象出版社, 2005. [SUN Yong-gang, BAI Ren-hai. Main Meteorological Disaster Research of Songhua and Nen River. Beijing: Meteorological Press, 2005.]
- [14] 汪丽娜, 张晓萍, 穆兴民, 等. 陕北黄土陵区面平均雨量推算方法[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 15-19. [WANG Li-na, ZHANG Xiao-ping, MU Xing-min, *et al.* Calculation method of mean rainfall amount of river basin in the hilly-gully region of Loess Plateau of northern Shaanxi Province. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(2): 15-19.]
- [15] 于浩, 张晓萍, 李锐. 延河流域径流和输沙周期变化特征的小波分析[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(4): 18-22. [YU Hao, ZHANG Xiao-ping, LI Rui. Periodic variation of the stream flow and sediment transport in Yanhe River using wavelet analysis test. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(4): 18-22.]
- [16] 邓自旺, 林振山, 周晓兰. 西安市近50年来气候变化多时间尺度分析[J]. 高原气象, 1997, 16(1): 81-93. [DENG Zi-wang, LIN Zhen-shan, ZHOU Xiao-lan. Multiple time scales analysis of Xi'an climate change for the last 50 years. *Plateau Meteorology*, 1997, 16(1): 81-93.]
- [17] 中国自然资源丛书编撰委员会. 中国自然资源丛书: 黑龙江卷[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. [China Natural Resources Series Compilation Committee. China Natural Resources Series: Heilongjiang Volume. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.]
- [18] 中国湿地资源开发与环境保护研究课题组. 三江平原开发历史回顾[J]. 国土与自然资源研究, 1998(1): 15-19. [China Resources Development and Environmental Protection Wetlands Research Group. Sanjiang plain development historical review. *Territory & Natural Resources Study*, 1998(1): 15-19.]
- [19] 鄂竞平. 加强领导明确重点全力搞好东北黑土区水土流失综合治理试点[J]. 中国水土保持, 2003(11): 1-3. [E Jing-ping. Strengthen leadership, focus on specification and integrated control of soil erosion in black soil in Northeast Pilot. *Soil and Water Conservation in China*, 2003(11): 1-3.]
- [20] 徐东霞, 章光新, 尹雄锐. 近50年嫩江流域径流变化及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 416-421. [XU Dong-xia, ZHANG Guang-xin, YIN Xiong-rui. Runoff variation and its impacting factor in Nenjiang River during 1956-2006. *Advances in Water Science*, 2009, 20(3): 416-421.]
- [21] 林振山, 邓自旺. 子波气候诊断技术的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1999. [LIN Zhen-shan, DENG Zi-wang. Wavelet Climate Diagnostic Research. Beijing: Meteorological Press, 1999.]

The Multi-time Scale Features of Runoff and Sediment Discharge in Harbin

MU Xing-min^{1,2}, SONG Xiao-yan^{2,3}, GAO Peng^{1,2}, WANG Fei^{1,2}, WANG Shuang-yin²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Multi-time scales analysis may provide a scientific basis for short-term and long-term projections of runoff and sediment discharge. The multi-time scale features of precipitation, runoff and sediment discharge were studied using wavelet analysis test in Songhuajiang River. The data of areal average precipitation, runoff and sediment discharge from 1955 to 2005 were employed for Harbin Hydrological Gauging Station. The results showed that precipitation, runoff and sediment discharge had significant approximate periodicity and multi-time scale features. Their first main periods were 24.0 – 26.0 years, the second main periods were 17.0 – 18.0 years, and the third periods were 6.0 – 7.0 years. At the 7 years scale, changes of precipitation, runoff and sediment discharge had the synchronization from the 1950s to the 1960s; in the 1970s, due to massive population movement, as well as the irrational development of water and land resources, a three-curve disorder was resulted; after the 1980s, the implementation of comprehensive measures made three curves re-converge. At 17 and 26 years scales, because of water diversion project, the construction of reservoirs and other human activities, there is not always synchronization between the three curves. Wet and dry years and singular points were closely related to the time scale, so the trend divorced from time scales is meaningless.

Key words: areal average precipitation; runoff; sediment discharge; wavelet transform; multi-time scale; Harbin