

中国北方夏半年干旱的时空变化

刘莉红¹, 翟盘茂², 郑祖光¹, 刘晓玲¹

(1. 中国气象局培训中心, 北京 100081; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要: 利用1951-2008年中国北方348个站的夏半年逐日降水资料, 首先把整个北方分几个区分别建立夏半年最长连续无降水日数时间序列; 然后采用经验模态分解(EMD)方法求出该序列的本征模态函数(IMF), 分析各序列的不同时间尺度的变化, 又用小波变换等方法分析各序列的转折点。结果表明, 北方4个区(东北、华北、西北东部和西北西部)夏半年最长连续无降水日数的变化主要是由前2个较高频的本征模态函数分量构成, 它们的方差贡献占总方差的80%左右, 说明3~4年、7年左右尺度的振荡对整个序列的变化起主要作用。较低频的分量则反映10~15年以上的年代际变化。近58年来, 东北、华北、西北东部的最长连续无降水日数都呈增加趋势, 北方大部分地区干旱化加剧; 而西北西部则呈减少趋势, 干旱趋于缓解。近十几年来较明显的变化是东北趋于变干, 西北东部趋于变湿。各区最长连续无降水日数显著增加的年份, 东北、华北在1992年前后, 西北主要在1960年前后, 相应地, 这些地区发生明显的干旱情景。分析所用的时间-空间尺度不同, 所得到的结果可能有所不同。

关 键 词: 夏半年; 最长连续无降水日数; 经验模态分解; 时空变化; 中国北方

1 引言

在全球变暖的背景下, 各种灾害性天气气候事件频繁发生, 中国北方干旱灾害时有发生, 而且干旱化有加剧的趋势, 越来越受到学术界的关注^[1-6]。马柱国等^[3]指出近50年来东北和华北的降水量减少, 呈变干趋势; 西北大部的降水量增加, 呈现湿化趋势; 只有新疆北部虽然降水量增加, 却呈现变干趋势。又指出近10年来东北和华北地区极端干旱频率显著增加; 而西北地区极端干旱频率出现下降趋势。王绍武等^[7]、施雅风等^[8]的研究表明西北地区有变湿的趋势。龚道溢等^[9]、王志伟等^[11]指出中国北方大部分地区干旱趋于严重, 连年的干旱是沙漠化加剧的重要原因。翟盘茂等^[10]的研究表明, 近半个世纪来, 东北、华北、西北的东部干旱增强, 而西北西部减弱。

气象干旱的含义是: 一个地区在长期无降水或降水异常偏少的气候背景下, 由于降水与蒸散收支不平衡造成的水分异常短缺的现象^[4]。以往研究气象干旱的问题多采用降水量和温度来构造干旱指数^[1-2]。马柱国等^[3]把湿润度和干燥度指数用于全球或区域尺度的地表湿润状况的分析, 揭示了一些有

意义的事实。Bhalme等^[11]在评估印度夏季季风期的水分条件时提出的干旱面积指数, 能够反映区域水分状况。Palmer^[12]利用水平衡原理导出的干旱指数, 具有较明确的物理意义。张强等^[4]提出一种综合性的气象干旱指数, 即CI指数。总之, 干旱气候的形成是降水偏少和长时间无降水的结果。即使降水量较多, 但如果过于集中, 而无降水日数增加, 同样会导致干旱。因此, 连续无降水日数(dry spell)可以用作表征干旱的指标之一^[13]。另一方面, 中国北方降水主要在夏半年, 而夏半年是农作物的生长季, 生长季内的连续无降水日数的变化情况, 对于农作物的生长非常重要。

从上述看出, 针对北方干旱问题的研究工作, 不同作者从不同的角度, 用不同的方法和指标, 所得出的结论大都认为近十几年来整个北方有变干的趋势, 然而对北方不同地区的干湿变化的分析结果有所不同, 因此有必要继续进行分区研究。还可看出, 对干旱指数序列用某个时间尺度(如几年或十几年或几十年)加以平均得到一个较平滑的新序列进行分析的工作较多, 而对序列内在的多时间尺度变化的构成及其对整个序列变化的贡献的分析工作较少。

收稿日期: 2011-03; 修订日期: 2011-06.

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106018); 中国气象局兰州干旱气象研究所干旱基金项目(IAM200908)。

作者简介: 刘莉红(1970-), 女, 汉族, 黑龙江省伊春市人, 教授, 硕士, 主要从事气候变化研究。E-mail: liulh@cma.gov.cn

针对上述情况,本文从夏半年最长连续无降水日数的角度研究干旱问题,把它作为表征干旱的一种指标,探讨北方不同地区多年干湿演变的特征。主要问题是:①北方不同地区夏半年最长连续无降水日数的多年变化,是由哪些时间尺度的振荡变化构成的;其中,哪些尺度的振荡对整个气候变化起主要作用,长期演变的趋势如何;②在连续无降水日数的多年变化过程中,有哪些显著增加的转折年份,它们与干旱有何联系。针对这两个问题,本文首先按北方不同地区分别建立近 58 年夏半年最长连续无降水日数的时间序列(Series of the longest number of consecutive dry days in warm half year, SD)。然后采用近几年迅速发展起来的经验模态分解(EMD, Empirical Mode Decomposition)方法,求出原序列的本征模态函数(IMF, Intrinsic Mode Functions)分量,据此分析原序列的不同时间尺度的振荡模态结构;并且采用小波分析等方法寻找序列的转折点,讨论最长连续无降水日数的显著增加与干旱的联系。这项工作对于深入了解北方干旱气候的时空变化以及其趋势,合理利用水资源安排农业生产,有一定的参考价值。

2 资料和方法

2.1 资料

本文选取 32°N 以北(其中西北西部选取 36°N 以北)作为整个北方地区^[3,14]。所用资料是中国气象局提供的北方台站的日降水资料,按照夏半年缺测数不超过 20 天和资料连续长度在 40 年以上这两个条件,筛选出符合条件的北方 348 个站点(图 1)。根

据这 348 个站(1951-2008 年)的夏半年(4-9 月)逐日降水量资料,首先定义无降水日为 24 小时内降水量观测记录小于 0.1 mm,其次定义最长连续无降水日数为每个夏半年中无降水日数连续出现最长的天数,建立各站的夏半年最长连续无降水日数的时间序列(SD)。

参照文献[1]、[3]和[14],进一步划分出东北(A)、华北(B)、西北东部(C)和西北西部(D)4 个区,分别建立各区的日数序列 SDA、SDB、SDC 和 SDD。序列的长度都是 $N = 58$ 。

在夏半年最长连续无降水日数的计算和分析方面,分别对 4 个区的日数序列(SDA、SDB、SDC 和 SDD)进行分析。其方法是^[1]:先将所选北方地区做格点分区,格距为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$,然后在各个区分别统计各格点中的站点数,根据各站点在格点中所占的权重,确定每个格点中夏半年最长连续无降水日数,进而通过计算各区的日数平均值确定出各区的最长连续无降水日数。

2.2 方法

本文主要采用 Huang 等于 1998 年提出的经验模态分解(EMD)方法^[15],从夏半年最长连续无降水日数序列中,逐级分离出本征模态函数(IMF)分量,通过分析这些分量揭示序列内在的多尺度振荡变化。分离的办法是采用筛选过程。把序列中的极大值和极小值分别用(3 次)样条函数曲线联结起来,分别构成上、下两条包络线,它们的均值线为 m_1 。由原序列 $X(t)$ 与 m_1 之差得到 h_1 。经过 k 次筛选,使得 h_1 的全部极大值都为正,极小值都为负,并且局部峰和谷的波形关于横轴(零均值线)是基本对称的。这样得到了第一个本征模态函数 IMF1:

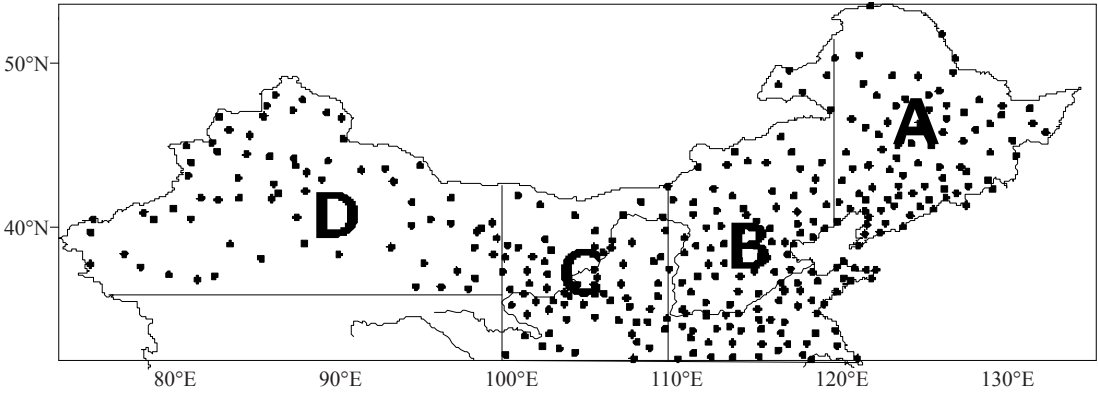


图 1 北方地区站点分布及分区情况

Fig.1 Distribution of the stations and 4 sub-regions in northern China

$$IMF1 = C_1(t) = h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) \quad (1)$$

C_1 是原序列中时间尺度最短即最高频的分量(振荡模态)。然后把 C_1 从原序列中分离出来,得到剩余序列 r_1 。再对 r_1 重复上述过程,得到第二个 IMF 分量 C_2 。如此进行下去,原序列就可用逐级分离出的 IMF 分量表示成:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r_n(t) \quad (2)$$

式中: r_n 是最后的“剩余”,即趋势项,表示整个序列的总趋势。

停止筛选过程的判据是与每次筛选前后的序列之差有关的量 SD :

$$SD = \sum_{i=0}^T \left[\frac{|h_{j(k-1)}(t) - h_{jk}(t)|^2}{h_{j(k-1)}^2(t)} \right] j=1, \dots, n; k=1, 2, \dots \quad (3)$$

当 SD 达到某个阈值时,停止筛选。在本文中,经过试验取 SD 的阈值为 $0.2 \sim 0.3$ 。

式(2)表明,原序列 $X(t)$ 是有限的 n 个 IMF 分量 ($C_i, i=1, \dots, n$) 以及 1 个趋势项 r_n 之和。这种分解实际上是完备的。每一个分量表征原序列内在的一种时间尺度的振荡,它的非平稳性减弱了,因此, EMD 方法适合于分析非平稳序列中的振荡模态^[15-18]。对于较高频的 IMF 分量的周期性,都进行了显著性检验。

本文还采用小波变换和 Mann-Kendall (M-K) 方法^[19-23],分析最长连续无降水日数序列变化趋势的转折。在小波分析中,母小波用 Maxihat 小波和 Haar 小波,放大因子都取 $a=2^j, j=0, 1, \dots$,表示不同的时间尺度。求出不同尺度下转折点后,都进行了 t 显著性检验。

小波变换可以揭示原序列的突变点位置,显现出复杂序列中不易被观察到的急剧变化的局部特征,即突变现象。其基本原理如下:

若记 $\psi(t)$ 为基本小波,则按如下方式生成小波函数族 $\{\psi_{a,b}\}$

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), b \in R, a \in R - \{0\} \quad (4)$$

式中: a 是放大因子或称尺度参数,它决定了小波函数的波形(宽度、峰度等),因为 a 出现在式(4)的分母上,故 a 的定义域应在实数域 R 内去掉零点及其邻域的值,表示为 $a \in R - \{0\}$; b 是平移因子,它决定了小波函数所处的位置; $\psi_{a,b}(t)$ 具有平移和放大的特点。一个信号或函数 f 的连续小波变换

$W_f(a,b)$ 定义为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

对于年平均温度这样的离散有限序列(长度 N),则有:

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{C_b}} |a|^{-\frac{1}{2}} \sum_{n=1}^N f(n) \cdot \bar{\psi}\left(\frac{n-b}{a}\right) \quad (6)$$

式中: $C_b = 2\pi \sum_{\omega} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|}$, $b=1, 2, \dots, n$; ($\hat{\psi}(\omega)$, ω

为频率)是 $\psi(t)$ 的 Fourier 变换。

基本小波有不同型式,相应的变换结果也不相同。本文分别采用 Mexihat 小波函数和 haar 小波函数做基本小波。Mexihat 小波函数表达式为:

$$\psi(t) = (1-t^2) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2}, -\infty < t < \infty \quad (7)$$

它是由高斯函数的二阶导数得来的。用 Mexihat 小波函数得到的变换曲线图上,原函数 $f(t)$ 的上升突变点对应 W_f 由下而上的穿零点(穿过横轴);下降突变点则对应由上而下的穿零点。

haar 小波函数的表达式为:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t < 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

它是样条函数的简化形式。用 haar 小波函数得到的变换曲线图上,原函数 $f(t)$ 的上升突变点对应 W_f 的峰点;下降突变点则对应谷点。

M-K 方法和统计 t 检验方法在文献[24]已有详细的叙述。M-K 方法是一种非参数统计检验方法,可用于检测序列的变化趋势和突变区域,是一种常用的突变检测方法。 t -检验方法是一种均值统计检验方法,这种统计检验的基本思想是针对要检验的问题,提出统计假设,按照给定的显著性水平对接受还是拒绝假设做出推断。分析某一气候变量序列的变化是否显著,需要进行统计检验。

3 中国北方夏半年最长连续无降水日数的变化

3.1 夏半年最长连续无降水日数的统计特征

表 1 给出了中国北方 4 区 1951-2008 年近 58 年来夏半年最长连续无降水日数的统计特征。从表 1 可以看出:就最长连续无降水日数的平均状况、最

大值和最小值来讲,4个区从东向西都是增加的,其中东北、华北的最大值出现在20世纪90年代后,而西北东部、西北西部分别出现在60年代和50年代;4个区的最小值出现在50年代和60年代,其中华北和西北东部出现的年份相近。

3.2 夏半年最长连续无降水日数的多时间尺度变化

为了更清楚地表现各区夏半年最长连续无降水日数序列的数值变化,首先把各区的日数序列转化为日数距平序列,分别记为SDAA(A区,东北)、SDAB(B区,华北)、SDAC(C区,西北东部)、SDAD(D区,西北西部)。然后对这4个距平序列分别用EMD方法求出其IMF分量和趋势项。用谱分析寻找IMF分量的周期,并且作周期的显著性检验(图2)。

图2的a、b、c和d分别绘出4个区日数距平序列及其主要的IMF分量和趋势项。其中a1、b1、c1和d1分别是4个区的原距平序列,其上标有转折点。从图2可以看出,距平序列大小涨落很不规则。把它分解成IMF分量后,各分量呈现出围绕零均值线的、局部极大值和极小值基本对称的振荡型式,它们的均值(一阶矩)都为零,不随时间变化,因而是平稳的;振幅(二阶矩)波形比原序列规整、简单,非平稳性减弱了。从高频到低频振荡的尺度逐渐增大,而且在同一时间段内分量之间没有相同的频率变化。

考察各分量对于原序列的相对重要性时,一是根据各分量振幅变化的量级(图2)的纵坐标数值);二是参照谐波分析,用方差贡献表现各分量对原序列的重要性。表2绘出4个区各IMF分量的方差贡献。

分析图2及表2表明,4个区的第1个IMF分量(C_1)的方差贡献约为48%~58%,即占总方差的50%左右,因而是最重要的振荡模态,反映了3~4年的振荡。其次是 C_2 (7年左右振荡),约

表1 北方4个区夏半年最长连续无降水日数的58年统计特征
Tab.1 Statistics of the number of days of the longest consecutive dry period in the warm half year in northern China and its 4 sub-regions during 1951–2008

最长连续无降水日数统计特征	东北(A区)	华北(B区)	西北东部(C区)	西北西部(D区)
平均值/天	14.45	17.04	18.82	32.46
最大值/天	20.08(2003)	22.93(1997)	30.79(1962)	47.57(1951), 44.5(1962)
最小值/天	10.91(1959)	12.63(1963)	12.61(1964)	25.54(1958)
线性趋势/(天/10a)	0.3	0.4	0.4	-1.1

注:括号内为出现年份,其中西北西部大部分站的观测记录是从1955年开始,只有11个站的观测记录始于1951年,可能对统计结果有一定的影响。所以表中列出了该区的最大值排名第二的年份。

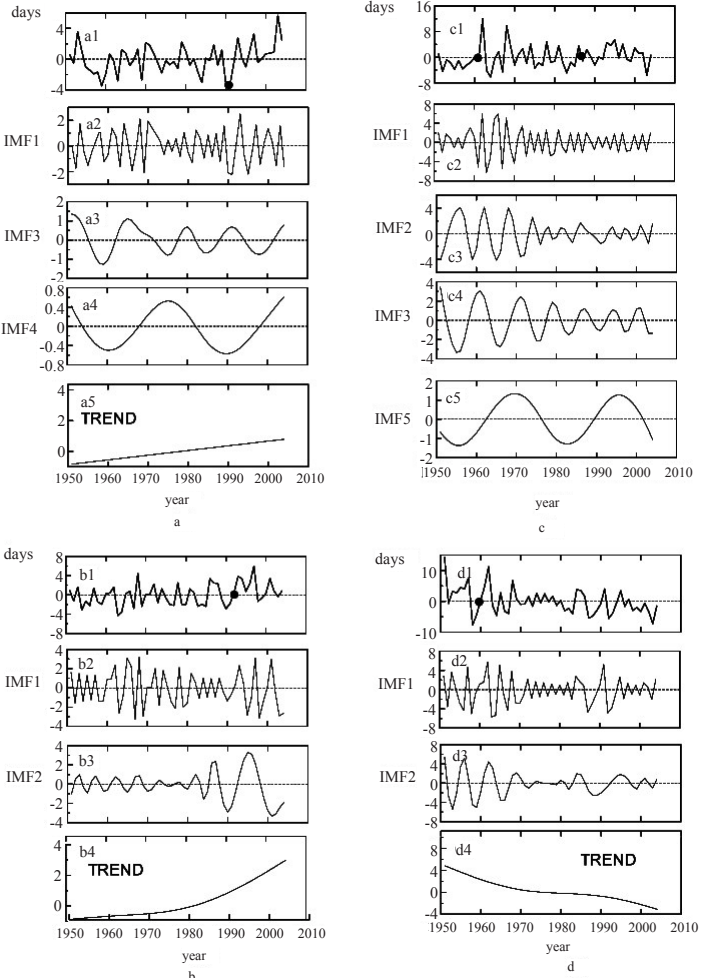


图2 4个区夏半年最长连续无降水日数距平序列以及主要的IMF分量
Fig.2 Anomaly series of the number of days of the longest consecutive dry periods in the warm half year in 4 sub-regions, and the statistical intrinsic mode functions components and trend term

说明:(a)东北区;(b)华北区;(c)西北东部;(d)西北西部。曲线a1、b1、c1、d1分别是各区的距平序列:SDAA(a1)、SDAB(b1)、SDAC(c1)、SDAD(d1)。其上的“·”为序列变化趋势的显著转折点。横坐标为年份。纵坐标是日数距平值和IMF分量的数值变化范围,单位都是天。

占25%~36%; C_3 也较重要。前2个IMF分量($C_1 + C_2$)约占70%~80%,前3个分量占90%,它们对原距平序列的变化起主要的作用。

各区也有一些各自的特点:

表2 北方四区各IMF分量对原序列的方差贡献
Tab.2 Variance contribution to the original series of the IMF components in northern China and its 4 sub-regions

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
东北区	0.514	0.253	0.138	0.043	0.052	—
华北区	0.520	0.337	0.107	0.036	—	—
西北东部	0.482	0.264	0.169	0.028	0.056	0.001
西北西部	0.580	0.361	0.022	0.036	—	—

(1) 东北区SDAA

东北区SDAA(图2a)的IMF分量有5个。从最高频分量IMF1看出,从1998-2008年经历了三增两减,近2年趋于减少。值得注意的是较低频变化,从IMF3看出,1998年以后,日数在增加;从IMF4看出,从1990年以后,日数也在增加。这表明,年际和年代际以及总趋势(图2(a5))变化都是日数增加,东北区有变干的趋势,这一点与原序列(图2(a1))近几年的日数显著增加是一致的。

(2) 华北区SDAB

华北区SDAB(图2b)的IMF分量有4个。从图2(b3)知,IMF2在20世纪80年代之前振幅较小,之后振幅变化加剧,对SDAB序列的影响也增大,大约呈8~10年的周期性振荡。从图2(b2)知,1990年以来经历了四增四降。近十几年来,前2个分量的变化有相互抵消的情形,近2年日数增加。从总趋势(图2(b4))看,80年代以来日数明显增加,说明华北区也有变干的趋势。

(3) 西北东部区SDAC

西北东部区SDAC(图2c)的IMF分量有6个。经显著性检验,前3个IMF分量都呈周期性振荡。而且近40年来它们的振幅趋于减小,亦即日数变化趋于减小。从图2c看出,IMF2和IMF3这2个8~10年的振荡模态,58年来振幅变小,对原序列的贡献也减小。IMF5为两峰两谷型的较有规则的低频振荡,两个峰值在分别在1970年和1995年,在1955-1970年和1983-1994年这两个时间段内,最长连续无降水日数明显增加。值得注意的是,近几年来,IMF分量表现出日数增加,而且序列SDAC的总趋势仍然是略有增加(TREND图略),说明该区气候有变干趋势。

(4) 西北西部区SDAD

西北西部区SDAD(图2d)的IMF分量有4个,从表2的第4行知,前2个分量就占总方差90%以上,它们决定原序列的变化。它们的周期性都不明显,而且近10年来日数变幅都很小。低频变化不

明显。从58年总趋势(图2(d4))看,日数呈减少,说明西北西部有变湿趋势。

3.3 夏半年最长连续无降水日数距平序列的显著转折分析

基于夏半年最长连续无降水日数显著增多对干旱的发生有重要作用的观点,以下着重分析各区日数距平序列中显著增多(曲线上升)的年份,即序列变化趋势的显著转折点(简称转折点),相应的Mexihat小波变换结果对应着局部由负到正穿过零点,Haar小波变换则对应着局部极大值点。

采用Mexihat小波变换、Haar小波变换和M-K方法,综合分析4个区的序列SDAA、SDAB、SDAC和SDAD的变化趋势的显著转折年份,见图2的a1、b1、c1和d1曲线上的标记“·”。分析表明:

(1) 小波变换显示的转折点的数目,随着放大因子a的增大而减少。从较小的时间尺度上看,转折点很多,但通过t检验的点很少;从大的时间尺度上看,真正有转折意义的年份很少,但大多数是显著的。

(2) 不同放大因子a下,连续无降水日数显著增大并通过t检验的较稳定的转折点是(见2的“·”点):东北序列(SDAA)在1992年;华北序列(SDAB)在1992年前后,1960年前后也有日数增加,但不显著;西北东部序列(SDAC)分别在1960年和1986年前后;西北西部序列(SDAD)在1960年前后。

3.4 夏半年最长连续无降水日数的变化趋势

(1) 总趋势

58年来各区夏半年最长连续无降水日数变化的整体趋势,见表1的线性趋势栏以及图2的趋势项(Trend)。从表1可以看出,东北、华北和西北东部的连续无降水日数都是增加的,分别为每10年增加0.3天、0.4天和0.4天,而西北西部减少较明显(-1.1天/10a)。

(2) 总趋势和低频变化趋势的综合分析

从58年来总的变化看,东北、华北和西北东部,最长连续无降水日数是增加的,说明这些地区有变干或干旱半干旱有加强的趋势,而西北西部日数减少,有变湿或干旱有所缓和。从最近10年左右的

4 结论与讨论

4.1 结论

本文建立了58年来中国北方不同地区夏半年

最长连续无降水日数的时间序列,使用经验模态分解(EMD)、小波分析和其它方法进行分析,得到以下主要结论:

(1) 各区夏半年最长连续无降水日数变化主要是由 IMF1 和 IMF2 这 2 个较高频本征模态函数分量构成,这说明,3~4 年和 7 年左右的振荡变化对整个序列的变化起主要作用。

(2) 58 年来,北方大部地区(东北、华北和西北东部)的夏半年最长连续无降水日数增加,呈现变干的趋势,干旱化趋于加剧,而西北西部的日数趋于减少,有变湿的趋势。最近十几年来,比较明显的是东北变干,西北东部变湿,其他两区变化不明显。这些结果和前面“引言”中与已有的研究结果相近,但也有不同之处。

(3) 4 个区夏半年最长连续无降水日数显著增加(变化趋势明显转折)的年份是:东北区和华北区在 1992 年;西北东部在 1960 和 1986 年前后;西北西部在 1960 年前后显著增加,这些显著增加的年份与当地的干旱发生有密切的联系。

4.2 讨论

(1) 文中明确揭示出夏季最长连续无雨日数显著增多的一个转折点,北方的东半部在 1992 年,西半部在 1960 年。如果与干旱联系起来看,1960 年前后连续无降水日数的显著增多,是那三年连旱的严重自然灾害的成因之一。1992 年也是东北到华北广大地区的干旱年。正因为连续的无降水会导致干旱的发生,所以,分析最长连续无降水日数的变化特征是有意义的。

但是用最长连续无降水日数衡量干旱,它只能在一定程度上反映气象干旱。虽然气象干旱是其他如农业干旱、水文干旱、社会经济干旱的根本原因,但较之于后面这些干旱类型,气象干旱^[25-26]的实用性不强。它只反映水量的供应一方面,不反映水量的需求。干旱本质上是水量“供需”不平衡造成的。因此,要进一步把它转化为实用的干旱指数,有待继续研究。

(2) 文中分析结果说明,讨论干旱问题离不开空间和时间的尺度。在空间尺度上,中国北方整体趋于干旱,但干湿变化的地理分布和程度不尽相同,大部分地区趋于变干,但局部地区(如西北西部)变湿。文中按地理位置把北方大致分为 4 个区,也可以按某个干旱指标的等值线分布进行分区,结果可能有所不同,将另文讨论。在时间尺度上,58 年

尺度的总趋势与十几年和几年的变化可能一致(如东北区),也可能不同。西北东部总趋势变干,但近十几年来干湿相间、变幅不大。因此,分析所用的时空尺度不同,得出的结论可能不同。EMD 方法的优点是它能够清晰地表现出不同时间尺度的变化及其对原序列的贡献大小。这对于气候分析和预测具有重要意义。

参考文献

- [1] 王志伟, 翟盘茂. 中国北方近 50 年干旱变化特征. 地理学报, 2003, 58(增刊): 61-68.
- [2] Zou X K, Zhai P M, Zhang Q. Variations in droughts over China: 1951-2003. Geophysical Research Letter, 2005, 32: L04707, doi: 10.1029/2004GL021853.
- [3] 马柱国, 华丽娟, 任小波. 中国近代北方极端干湿事件的演变规律. 地理学报, 2003, 58(增刊): 69-74.
- [4] 张强, 邹旭恺, 肖风劲, 等. GB/T20481-2006, 气象干旱等级. 中华人民共和国国家标准. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [5] 姚玉璧, 董安祥, 王毅荣, 等. 基于帕默尔干旱指数的中国春季区域干旱特征比较研究. 干旱区地理, 2007, 30(1): 22-29.
- [6] 王兴梅, 张勃, 张凯, 等. 石羊河流域极端干旱事件的时空变化特征. 地理科学进展, 2011, 30(3): 299-305.
- [7] 王绍武, 龚道溢, 翟盘茂. 西部地区的气候变化//秦大河. 中国西部地区的环境演变. 北京: 科学出版社, 2002: 31-80.
- [8] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
- [9] 龚道溢, 韩晖. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析. 地理学报, 2004, 59(2): 230-238.
- [10] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951-2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16-18.
- [11] Bhalme H N, Mooley D A. Large-Scale drought/floods and Monsoon circulation. Monthly Weather Review, 1980, 108: 1197-1211.
- [12] Palmer W C. Meteorological Drought. Weather Bureau Res. Paper 45. U.S. Department of Commerce: Washington, DC, 1965: 58.
- [13] Frich P, Alexander L N, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Climate Research, 2002, 19(3): 193-212.
- [14] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. 地理学报, 2003, 58(增刊): 1-10.

- [15] Huang N E, Zheng S, Steven R L, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1998, 454: 903-995.
- [16] 郑祖光, 刘莉红. 经验模态分析与小波分析及其应用. 北京: 气象出版社, 2010.
- [17] He J X, Yu Z H, Yang X Q, et al. Temporal characteristics of Pacific Decadal Oscillation (PDO) and ENSO and their relationship analyzed with method of empirical mode decomposition (EMD). *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 19(1): 83-92.
- [18] 杜建丽, 林振山, 张真真, 等. 中国GDP增量与能源消费增量关系的多尺度分析. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 119-124.
- [19] 韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化. *大气科学*, 2003, 27(2): 157-170.
- [20] 刘太中, 刘式达, 郑祖光, 等. 气候突变的子波分析. *地球物理学报*, 1995, 38(2): 158-162.
- [21] 徐长发, 李国宽. 实用小波方法. 2版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004: 107-119.
- [22] 刘莉红, 郑祖光. 近百余年我国气温变化的突变点分析. *南京气象学院学报*, 2003, 26(3): 378-383.
- [23] 刘莉红, 郑祖光. 我国1月和7月气温变化的分析. *热带气象学报*, 2004, 20(2): 151-160.
- [24] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007: 23-66.
- [25] 何斌, 武建军, 吕爱锋. 农业干旱风险研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(5): 557-564.
- [26] 袁文平, 周广胜. 旱指标的理论分析与研究展望. *地球科学进展*, 2004, 19(6): 982-991.

Temporal and Spatial Variations of the Drought in the Warm Half Year over Northern China

LIU Lihong¹, ZHAI Panmao², ZHENG Zhuguang¹, LIU Xiaoling¹

(1. China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Daily precipitation data from 348 stations in northern China are selected to construct the time series of the periods of the longest consecutive dry days in the warm half year (April-September) that is divided into four sub-regions. The empirical mode decomposition (EMD) method is used to obtain intrinsic mode functions (IMFs) by which variations are analyzed at various time scales. Based on wavelet analysis and other methods, sudden jump points are found. Results show that the variation of the longest consecutive dry period is mainly composed of two higher frequency intrinsic mode functions, and their contribution ratio is 80% to the total variance. This shows that 3-4 year and 7-8 year oscillations play important roles. Lower frequency components reflect the inter-annual variation of about 10 years. There is an increasing trend of the longest consecutive dry period in the warm half year in northeast China, north China, and eastern part of northwest China, and the droughts in most of northern China are increasing, but decreasing in the western part of northwest China. For the last 10 years, it get drier in northeast China, while it gets wetter in the eastern part of northwest China. The significant increase of the longest consecutive dry periods observed in north China in 1992 and in northwest China in 1960 was associated with the droughts. The results obtained may be different from each other owing to the differences in temporal and spatial scales.

Key words: warm half year; the longest consecutive dry period; empirical mode decomposition; temporal and spatial variations; northern China

本文引用格式:

刘莉红, 翟盘茂, 郑祖光, 等. 中国北方夏半年干旱的时空变化. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1380-1386.