

1960–2009年新疆渭干河流域蒸发皿蒸发量变化特征

卢磊^{1,2}, 乔木¹, 周生斌¹, 唐金³, 闫俊杰^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 新疆农业大学, 乌鲁木齐 830052)

摘 要:根据新疆气象局地面观测资料,整理出渭干河流域1960–2009年蒸发皿蒸发量资料,运用线性趋势估计、距平与累积距平、滑动t检验、小波分析、灰色预测等方法,对蒸发皿蒸发量的变化趋势、周期特征、突变特征及未来趋势进行了分析。结果表明:①50年来,渭干河流域蒸发皿蒸发量有升有降,总体上呈波动式减少的趋势,其变化倾向率为-19.72 mm/10a,通过了0.05的显著性检验。累积距平曲线的变化趋势显示,年蒸发皿蒸发量以1987年和2004年为转折点,前期偏多,中期偏少,后期偏多。②年蒸发皿蒸发量在1987年发生了由多到少的突变,在2004年发生了由少到多的突变,突变类型比较复杂,是均值突变和转折突变两种突变类型的组合。③蒸发皿蒸发量在50a的时间序列中存在8a、17a和20a的周期。在8a的时间尺度上,年蒸发皿蒸发量序列经历了7个偏多期和6个偏少期;在17a的时间尺度上,经历了2个偏多期和2个偏少期;在20a的时间尺度上,经历了1个偏少期和2个偏多期。④利用建立的灰色预测GM(1,1)模型对渭干河流域蒸发皿蒸发量进行了预测,发现模型的可靠性高,预测结果准确,年蒸发皿蒸发量在未来3年将出现增加的趋势。

关 键 词:蒸发皿蒸发量;变化趋势;小波分析;灰色预测;渭干河流域

20世纪末以来,全球性气候变化引起社会的广泛关注,国内外许多学者利用多种方法从不同的时空尺度对气候要素的变化趋势及影响因素做了大量的相关研究^[1–6]。蒸发既是地表热量平衡的组成部分,又是水量平衡的组成部分,是水循环中最直接接受土地利用和气候变化影响的一项。反过来,蒸发又可减小辐射向感热的转化,增加空气湿度,提高最低气温及降低最高气温,起到调节气候的作用。全球性陆面蒸发对大气环流和降水均有重要影响,因此,进行蒸发皿蒸发量变化的研究,对深入了解气候变化规律及探讨气候变化的原因具有十分重要的意义。由于实际蒸发的测定非常困难,而蒸发皿观测资料累积序列长、可比性好,长期以来,一直是水资源评价、水文研究、水利工程设计和气候区划的重要参考指标^[7]。近年来,蒸发皿蒸发量的变化趋势在水文循环过程对气候变化响应研究中的指示意义已为广大水文学家认知,并成为当今水文科学领域的热点问题^[8]。因此,很多学者开展了这方面的研究。王建勋等^[9]利用1961–2000年阿

拉尔市气象局逐日蒸发皿蒸发量资料,揭示了该区域蒸发量年内、季节和年际变化特征及其趋势;杜军等^[10]采用气候倾向率方法,对西藏雅鲁藏布江中游1981–2005年14个气象站年、季小型蒸发皿蒸发量及其影响气候因子的变化趋势进行了分析;李景玉等^[11]分析了青藏高原西藏地区蒸发皿蒸发量时间与空间分布格局及变化趋势;曾燕等^[12]发现中国蒸发皿蒸发量呈明显减少趋势,并认为日照百分率减少造成的太阳总辐射减少是其减少的主要原因。胡汝骥认为与全球和全国气候变化趋势一致,新疆气候存在着变暖增湿的趋势,随着气候的暖湿化过程,新疆各地区蒸发力也随之发生变化^[13]。新疆渭干河流域是干旱区的典型缩影,因此从流域的尺度上进行蒸发量变化的研究,对深入了解流域气候变化规律及探讨气候变化的原因具有十分重要的意义。

本文利用渭干河流域4个气象站(库车、沙雅、新和、拜城)1960–2009年的逐年蒸发皿蒸发量资料,在运用线性趋势估计、距平与累积距平、滑动t

收稿日期:2010-10; 修订日期:2011-01.

基金项目:新疆维吾尔自治区“十一五”重大专项(200733144-1)。

作者简介:卢磊(1984-),男,硕士研究生,研究方向为环境遥感与恢复生态。E-mail: lulei2010@126.com

通讯作者:乔木,男,研究员,主要从事环境遥感和干旱区生态恢复研究。

检验、小波分析等方法,对渭干河流域蒸发皿蒸发量的变化趋势、周期特征、突变特征进行分析的基础上,利用以往资料建立灰色预测模型,对未来几年的蒸发皿蒸发量进行了预测,以期为渭干河流域气候变化、农作物灌溉制度的制定及水文循环研究提供参考和依据。

1 研究区概况

渭干河流域位于新疆天山山脉与塔里木盆地之间,介于东经 $80^{\circ}37' \sim 83^{\circ}59' E$,北纬 $41^{\circ}06' \sim 42^{\circ}40' N$ 。渭干河是塔里木盆地北部水量较大的河流之一,其主流木扎提河由西端进入拜城盆地,汇集了卡普斯浪河、台勒维丘克河、喀拉苏河和克孜勒河形成渭干河流域,干流河长452 km,全流域面积 $6.79 \times 10^4 \text{ km}^2$,其行政地域包含拜城、新和、库车和沙雅4个县。该流域为典型的大陆性气候,光热资源丰富,降水稀少,蒸发强烈,气温差异显著。整个流域地形复杂多样,北部为天山山脉,是渭干河流域重要的水源地与涵养林区;中部是以秋里塔格山为主的低山和残丘;渭干河出山口后呈辐射状分布,在南部形成扇形的冲积平原。由于地形复杂,该流域在水土资源组合良好的区域形成两类人工绿洲,即位于拜城县境内的山间盆地绿洲和位于新和、库车与沙雅县境内的三角洲绿洲^[14]。

2 资料和方法

2.1 研究资料及统计分析方法

研究资料来源于新疆气象局关于渭干河流域4个气象站点(库车、沙雅、新和、拜城)的气象观测数据,考虑到资料的完整性和可比性,本文选取1960-2009年的蒸发皿蒸发量来分析其变化。对资料的统计分析采用的方法主要为:①用线性倾向估计法分析蒸发皿蒸发量的变化趋势,线性方程的斜率 b 小于0,则为下降趋势,斜率 b 大于0,则为上升趋势, $b \times 10$ 为其变化倾向率。以距平曲线的波动来反映蒸发皿蒸发量的变化幅度,累积距平曲线的上升段和下降段反映了要素随时间变化的增加和降低。②用滑动 t 检验来确定蒸发皿蒸发量序列的突变年份, t 值超过显著水平线的年份即为突变年份。③用小波分析法^[15]来识别蒸发皿蒸发量序列

的周期性变化,小波方差出现极值的时间尺度即为序列的周期尺度。

2.2 GM(1,1)模型的建立及诊断

利用1960-2009年的蒸发皿蒸发量资料,建立灰色预测GM(1,1)模型,对研究区蒸发皿蒸发量的变化进行预测。设原始时间数据序列为:

$$X^{(0)} = [X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)], \text{对原序列做一}$$

次累加处理,生成一组新的序列:

$$X^{(1)} = [X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)] \quad (1)$$

$$\text{其中: } X^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i) \quad (2)$$

其相应的GM(1,1)模型的微分方程为:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u \quad (3)$$

设 $b = (a, u)^T$,按最小二乘法得到:

$$b = (B^T B)^{-1} B^T Y_1 \quad (4)$$

其中:

$$B^T = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X^{(0)}(1) + X^{(0)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(X^{(0)}(2) + X^{(0)}(3)) & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(X^{(0)}(n-1) + X^{(0)}(n)) & 1 \end{bmatrix}, \quad Y_1 = \begin{bmatrix} X^{(0)}(2) \\ X^{(0)}(3) \\ \dots \\ X^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

得到微分方程的解为:

$$X^{(1)}(t+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (6)$$

$$\text{还原得: } X^{(0)}(t+1) = X^{(1)}(t+1) - X^{(1)}(t) \quad (7)$$

为分析模型的可靠性,必须对模型进行诊断,目前较为通用的诊断方法是对模型进行后验差检验,即先计算观察数据离差 S_1 及残差的离差 S_2 :

$$S_1^2 = \sum (X^{(0)}(t) - \bar{X}^{(0)}(t))^2, \quad S_2^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} (q^{(0)}(t) - \bar{q}^{(0)}(t))^2 \quad (8)$$

再计算后验比 c 和 p : $c = \frac{S_1}{S_2}$,

$$P = \{q^{(0)}(t) - \bar{q}^{(0)} < 0.6745S_1\} \quad (9)$$

3 结果分析

3.1 蒸发皿蒸发量的趋势分析

为了检测流域内不同站点间观测数据的变化趋势是否完全一致,表1给出了流域内4个站点的

相关程度。从表1可以看出在 $\alpha=0.01$ 水平下,流域内各站点观测数据相关性显著,且均呈现正相关。因此流域内不同站点间的观测数据的变化趋势是一致的。

由图1蒸发皿蒸发量的变化曲线可知,渭干河流域蒸发皿蒸发量有升有降,呈波动式变化趋势。年最大蒸发皿蒸发量为2518.77 mm,出现在1961年,年最少蒸发皿蒸发量为1628.38 mm,出现在1992年。利用趋势计算方法得出50a来渭干河流域年蒸发皿蒸发量的线性变化趋势系数,由表1所示的方程可知,年蒸发皿蒸发量以19.72 mm/10a的趋势在减少(相关系数为-0.38,通过了0.05的显著性检验),减少趋势较显著。

从不同的时间段来看(表2),1960-1987年间,年蒸发皿蒸发量有显著的下降趋势,其蒸发皿蒸发量的倾向率为-35.63 mm/10a,变化趋势明显;1987-2004年间,蒸发皿蒸发量上升趋势显著,通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,且上升幅度比较大,其变化倾向率为176.95 mm/10a;2005-2009年,蒸发皿蒸发量下降趋势非常显著,年蒸发皿蒸发量以44.82 mm/a的趋势在减少(相关系数为0.77,通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验)。

累积距平曲线可以反映气候要素的长期变化趋势。历年蒸发皿蒸发量累积距平曲线的变化显示(图2),渭干河流域50a蒸发量的基本特征是,前期年蒸发皿蒸发量偏多,中期年蒸发皿蒸发量偏少,后期蒸发皿蒸发量又转为偏多,1987年和2004年为变化的转折点。1987年以前,年蒸发皿蒸发量处于较高水平,持续时间较长,变化幅度较小,正距平年为20年,占到前期年数的近71.43%;其中,

1961年的距平值为526.19,为50年以来的最高值。1987年蒸发皿蒸发量只有1898.05 mm,其距平值为-94.52;1987年以后,年蒸发皿蒸发量不断下降,基本上全为负距平年。2004年以后,年蒸发皿蒸发量不断增加,但其变化仍然可以分为两个阶段:2004-2006年间,年蒸发皿蒸发量距平线变化剧烈,持续上升,而2006年以后,距平值持续下降,但距平值依然较高。

3.2 蒸发皿蒸发量的突变分析

气候突变是普遍存在于气候变化中的一个重要现象,是指气候要素从一种分布状态转到另一种分布状态突然而持久的变动^[16]。由前面的分析可知,50a来渭干河流域蒸发皿蒸发量的变化大致可以分为3个阶段。这种变化趋势是否导致了蒸发皿蒸发量的突变,这种突变是否达到了突变的显著水平,需要做进一步的分析。检验突变的方法有很

表1 各站点间蒸发皿蒸发量的相关性检验
Tab.1 The correlation tests of pan evaporation at various sites

相关系数	库车	新和	沙雅	拜城
库车	1			
新和	0.79**	1		
沙雅	0.64**	0.81**	1	
拜城	0.84**	0.80**	0.69**	1

**表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著水平

表2 蒸发皿蒸发量的变化特征
Tab.2 The regression equations of annual pan evaporation in Weigan River Basin

年代	均值	方程	相关系数
1960-2009	1992.57	$y = -1.9724x + 5906.7$	0.38
1960-1987	2047.67	$y = -3.5628x + 9078.9$	0.42
1988-2004	1827.40	$y = 17.695x - 33491$	0.83**
2005-2009	2245.59	$y = -44.815x + 92189$	0.77**

、**分别表示通过 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 的显著水平

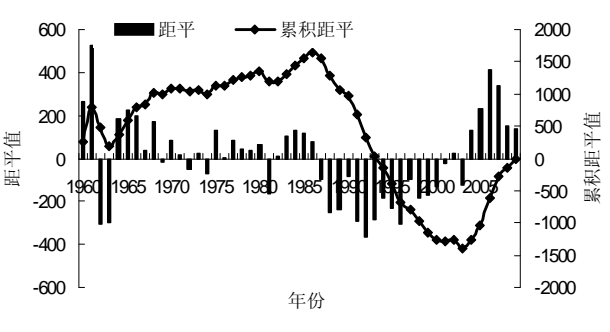
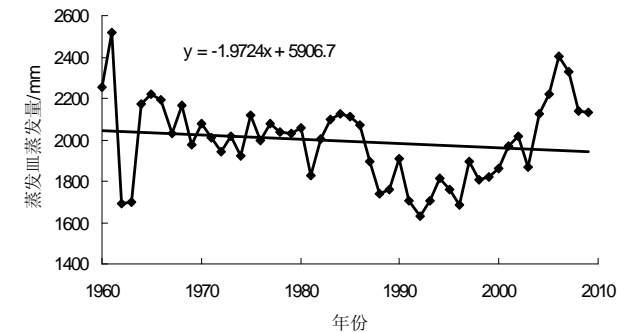


图1 1960-2009年渭干河流域蒸发皿蒸发量的变化趋势
Fig.1 Trend of pan evaporation change in Weigan River Basin

图2 渭干河流域蒸发皿蒸发量的距平、累积距平变化趋势
Fig.2 Trend of annual and accumulative annual pan evaporation anomalies in Weigan River Basin

多种,主要为线性趋势法、Cramer法、Mann-Kendall法、滑动 t 检验等。其中,滑动 t 检验法能够简单直观的确定趋势的突变点及显著性。因此,本文运用滑动 t 检验法对渭干河流域蒸发皿蒸发量进行突变和显著性检验。

图3给出了滑动 t 检验法的检验结果,由曲线的变化趋势来看,渭干河流域年蒸发皿蒸发量有减少的趋势,滑动 t 检验的 T 值在整个时间序列上经历了“负-正-负-正-负-正-负”的转变。其中, T 值分别在1987年和2004年取得最大值和最小值,且 T 值均超过了显著水平线,达到了突变的水平,说明渭干河流域蒸发皿蒸发量在1987年发生了由多到少的突变,在2004年发生了由少到多的突变。滑动 t 检验得出的突变年份与累积距平线得到的变化年份一致,表明研究区内年蒸发皿蒸发量的变化趋势确实存在1987年和2004的突变年份。

渭干河流域蒸发皿蒸发量序列在1987和2004年发生了突变,这种突变属于哪种类型的突变,是简单的均值突变、跷跷板突变、转折突变,还是这几种突变的组合,还需要对突变类型进行检验。为弄清蒸发皿蒸发量突变的类型,以1987年和2004年为分界点对年蒸发皿蒸发量进行了阶段趋势检验。表3给出了渭干河流域不同阶段蒸发皿蒸发量的变化趋势。在3个时间段内,均值最大的为1987-2003年,最小的为2004-2009年。各组数据均值 t 检验的结果表明,在3个突变年份中,均值差异都达到了 $\alpha=0.05$ 的显著水平。

总的看来,50年间渭干河流域蒸发皿蒸发量总体呈下降的趋势,下降中又包含着一定的起伏。在发生突变的3个时间段内,均值都发生了显著的变化,并在1987和2004年的突变年份中发生了转折突变,蒸发皿蒸发量呈现上升-下降-上升趋势。因此,渭干河流域蒸发皿蒸发量年序列在50a间发生的两次突变并不是简单的均值突变或转折突变,而是这两种突变的组合。

3.3 蒸发皿蒸发量的周期分析

年蒸发皿蒸发量的变化与气温有关,而气温变化遵循一定的周期性规律^[17-20],从而使得年蒸发皿蒸发量的变化也表现为一定

的周期性。小波分析具有多分辨率分析的特点,可以得到每一时刻在各周期中所处的位置,能够更好地分析序列随时间的变化情况,借助小波变换的时频局部化优势可以准确地找到时间序列的大小时间尺度(周期)和突变点所在的位置,从而为气候系统分析、预测提供重要依据^[21]。

渭干河流域50a来蒸发皿蒸发量变化的小波分析表明,年蒸发皿蒸发量的变化是由不同长度周期震荡的叠加而形成的,其变化趋势中存在较长周期,长周期中包含短周期。

图4中,小波方差在17a和20a尺度上存在极值,由于数据序列较短,无法准确预测更长时间尺

表3 蒸发皿蒸发量年序列的分段及均值检验
Tab.3 Partitions and test results of annual pan evaporation time series

均值检验	1960-1986年	1987-2003年	2004-2009年
1960-1986年	1		
1987-2003年	239.21*	1	
2004-2009年	-172.39*	-411.60*	1

*表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著水平。

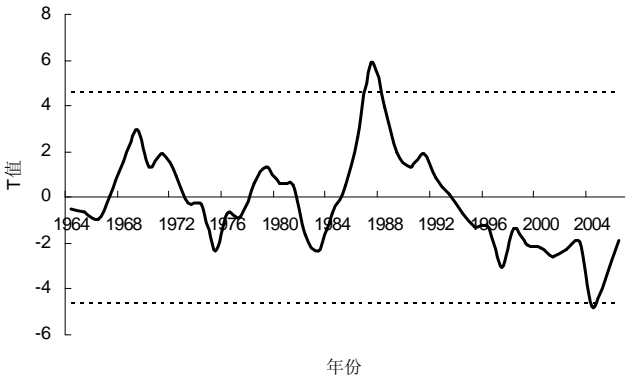


图3 渭干河流域年蒸发皿蒸发量的突变特征

Fig.3 Abrupt change test of annual pan evaporation in Weigan River Basin

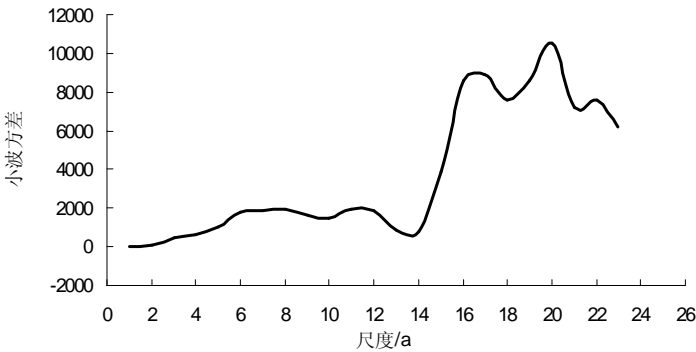


图4 渭干河流域蒸发皿蒸发量的小波方差图

Fig.4 Wavelet variances of pan evaporation in Weigan River Basin

度周期,最终确定渭干河流域在 50a 的时间尺度上存在约准 17a 和 20a 的年代际周期,而从 20 世纪 60 年代到 21 世纪初存在 8a 的短周期。

图 4 中,年蒸发皿蒸发量小波系数等值线在 17a 和 20a 左右的时间尺度附近分布比较密集,存在明显的小波系数高低值中心震荡。其中,8a 的周期分布并不稳定,在 20 世纪 60 年代和 21 世纪初比较显著;而 17a 的周期在整个时间序列上都比较显著。在 10a 以下的时间尺度上,蒸发皿蒸发量的波动比较大,经历了 6 个偏少期和 7 个偏多期;在 10-20 年的时间尺度上,年蒸发皿蒸发量经历了“偏少-偏多-偏少-偏多”的交替变化,每一时期持续的时间大都在 10a 左右;在 20a 以上时间尺度上,蒸发皿蒸发量发生由多到少再到多的转变。

由以上分析可知,渭干河流域蒸发皿蒸发量变化的主要周期为 8a、17a 和 20a,图 5 给出了渭干河流域蒸发皿蒸发量主周期小波系数曲线变化图。从图中可以看出,在 8a 的时间尺度上,1960-1970 年和 1985-2009 年间,曲线的波动比较明显,年日数序列经历了 7 个蒸发皿蒸发量的偏多期和 6 个偏少期。在 17a 的时间尺度上,年蒸发皿蒸发量序列经历了 1965-1975、1989-2000 年 2 个偏少期和 1960-1964、1976-1988、2001-2009 年 3 个偏多期,发生变化的年份是 1964、1981 和 1999 年。在 20a 的时间尺度上,年蒸发皿蒸发量序列经历 1960-1980、2001-2009 年 2 个偏多期和 1981-2000 年 1 个偏少期,发生变化的年份为 1981 和 2001 年。

综合图 5 和图 6,可以看出,渭干河流域蒸发皿蒸发量序列在 17 年和 20 年的时间尺度上,小波系数等值线或小波系数曲线都没有闭合,且都处于高值区,蒸发皿蒸发量正处于局部的偏多期。由此可以推断,渭干河流域未来几年蒸发皿蒸发量的偏多期仍将持续下去。蒸发量的增加将会使区域水循环速度的加快,并由此对渭干河流域水汽循环造成的影响奠定良好的基础;但同时由于渭干河流域封闭的地形,蒸

发量的增加势必加重区内土壤盐渍化程度,对农业产生一定的影响。

3.4 蒸发皿蒸发量的灰色预测

3.4.1 构建 GM(1,1)模型

以 2004-2009 年蒸发皿蒸发量的历史数据为样本,建立渭干河流域蒸发皿蒸发量的 GM(1,1)模型:

$$X^{(0)} = [2125.7, 2223.5, 2404.35, 2331.3, 2140.4, 2130.4]$$
$$X^{(1)} = [2125.7, 4349.2, 6751.55, 9082.85,$$

表 4 灰色模型预测蒸发皿蒸发量结果
Tab.4 Predicted amount of pan evaporation
from grey dynamic model

X(t)	观察值	拟合值	误差	相对误差/%
X(2)	2223.5	2260.42	-36.92	-1.6606
X(3)	2402.35	2434.35	-32.00	-1.3322
X(4)	2331.3	2291.08	40.22	1.7253
X(5)	2140.4	2111.79	28.61	1.3369
X(6)	2130.4	2169.04	-38.64	-1.8138

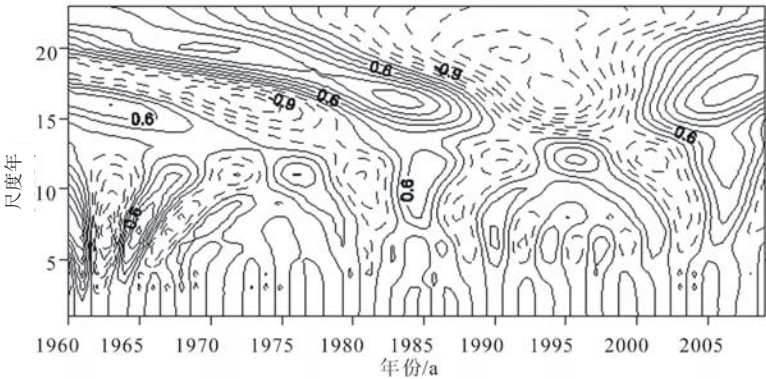


图 5 1960-2009 年渭干河流域年蒸发皿蒸发量的小波系数等值线
Fig.5 Wavelet coefficients of pan evaporation in Weigan River Basin during 1960-2009

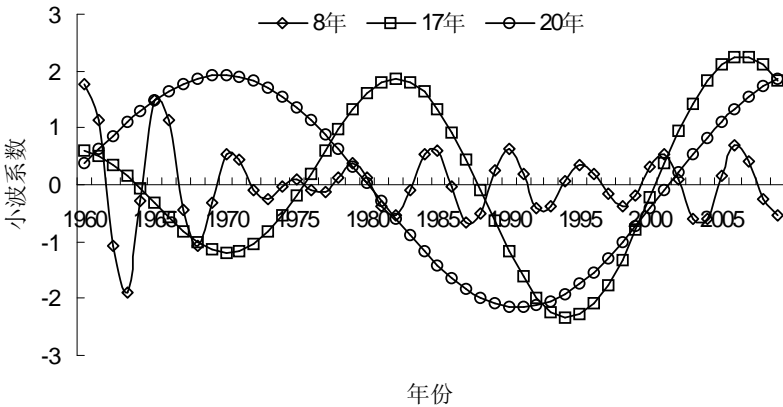


图 6 渭干河流域年蒸发皿蒸发量的主周期小波系数曲线
Fig.6 Wavelet coefficients lines at principal period scales of annual pan evaporation in Weigan River Basin

11223.25, 13353.65]

由式(4)解得: $a = -0.264$, $u = 10.165$

则预测模型为:
$$X^{(0)}(t+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-at} + \frac{u}{a}$$
$$= 122.138e^{0.264t} - 38.483$$

令 $t=1, 2, \dots, 5$, 解得年蒸发皿蒸发量的模型值, 再由(7)式还原得出模型的预测值(表4)。

表4中列出了渭干河流域蒸发皿蒸发量的实际值、模型预测值、误差及相对误差。从表中可以看出, 模型拟合值和实际观测值之间比较接近, 其误差和相对误差的绝对值全部分布在 $28.61 \sim 40.22$ 和 $1.3322\% \sim 1.8138\%$ 之间, 说明模型的拟合效果较好, 模型复合预测要求。

3.4.2 蒸发皿蒸发量的诊断及预报

虽然模型预测的结果与实际结果之间的拟合效果较好, 但其可靠性仍不能确定, 因此必须对模型的可靠性做进一步的诊断。根据式(8)和式(9)对模型的可靠性进行诊断。结果表明, 利用2004-2009年蒸发皿蒸发量构建的模型的后验差比值为 $c=0.3244 < 0.35$, 小误差概率 $p=1.0 > 0.95$, 达到了显著性水平, 其可靠性比较高, 可以用来进行年蒸发皿蒸发量的预测。利用建立的模型和公式(7), 可以得到未来3年的蒸发皿蒸发量为:

当 $t=6$, $X^{(0)}(7) = 2882.01$, 即2010年的年蒸发皿蒸发量为 2239.54 mm 。

当 $t=7$, $X^{(0)}(8) = 2923.60$, 即2011年的年蒸发皿蒸发量为 2269.60 mm 。

当 $t=8$, $X^{(0)}(9) = 2970.86$, 即2012年的年蒸发皿蒸发量为 2317.86 mm 。

4 结论

本文首先利用线性趋势估计、距平与累积距平、滑动 t 检验、小波分析等方法, 对渭干河流域蒸发皿蒸发量的趋势变化、周期、突变特征进行了分析, 然后利用灰色预测模型对未来几年的蒸发皿蒸发量进行了分析, 得出以下结论:

(1) 1960-2009年间, 渭干河流域蒸发皿蒸发量呈减少的趋势, 其变化倾向率为 $19.72\text{mm}/10\text{a}$ 。历年蒸发皿蒸发量累积距平曲线的变化显示, 前期年蒸发皿蒸发量偏多, 中期年蒸发皿蒸发量偏少, 后期年蒸发皿蒸发量偏多, 变化的转折点在1987年和2005年。

(2) 运用滑动 t 检验法对渭干河流域50a来的年蒸发皿蒸发量进行突变分析, 发现年蒸发皿蒸发量在1987年发生了由多到少的突变, 在2004年发生了由少到多的突变。均值检验和趋势检验的结果表明, 1987年和2004年的突变类型并不是简单的均值突变或转折突变, 而是这两种突变的组合。

(3) 蒸发皿蒸发量变化的小波分析表明, 渭干河流域年蒸发皿蒸发量在50a的时间序列中存在8a的年际和17a、20a的年代际周期, 在8a的时间尺度上, 年日数序列经历了7个偏多期和6个偏少期; 在17a的时间尺度上, 经历了2个偏多期和2个偏少期; 在20a的时间尺度上, 经历了2个偏多期和1个偏少期。

(4) 利用2004-2009年蒸发皿蒸发量的资料, 建立了灰色GM(1, 1)模型, 并对渭干河流域未来几年的蒸发皿蒸发量进行了预测。建立模型的诊断结果表明, 模型的可靠性高, 预测结果能够反映实际状况, 其相对误差的绝对值在 $1.3322\% \sim 1.8138\%$ 之间, 其后验差比值和小误差概率值均达到最高精度。模型对渭干河流域蒸发皿蒸发量的预测结果表明, 未来3年蒸发皿蒸发量将出现增加的趋势。

参考文献

- [1] 何云玲, 张一平, 杨小波. 中国内陆热带地区近40年气候变化特征. 地理科学, 2007, 27(4): 499-505.
- [2] 李红军, 江志红, 魏文寿. 近40年来塔里木河流域旱涝的气候变化. 地理科学, 2007, 27(6): 801-807.
- [3] Rodefick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. International Journal of Climatology, 2004, 24(9): 1077-1090.
- [4] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s. International Journal of Climatology, 2005, 25(3): 2031-2039.
- [5] 刘玲, 高素华, 王兰宁. 三江源地区气候突变及未来演变趋势分析. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 53-59.
- [6] 王菱, 甄霖, 刘雪林, 等. 蒙古高原中部气候变化及影响因素比较研究. 地理研究, 2008, 27(1): 171-180.
- [7] 庄晓翠, 张林梅, 李海花. 新疆阿勒泰地区20cm蒸发皿蒸发量的变化特征. 中国农业气象, 2010, 31(1): 53-58.
- [8] 刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 近50年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因. 地理学报, 2009, 64(3): 259-269.
- [9] 王建勋, 胡云喜, 朱建雯. 1961-2000年新疆阿拉尔垦区蒸发量的变化特征. 气象与环境学报, 2008, 24(5): 29-31.
- [10] 杜军, 胡军, 刘依兰, 等. 近25年雅鲁藏布江中游蒸发

- 皿蒸发量及其影响因素的变化. 自然资源学报, 2008, 23(1): 120-126.
- [11] 李景玉, 张志果, 徐宗学, 等. 影响西藏地区蒸发皿蒸发量的主要气象因素分析. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4(4): 20-29.
- [12] 曾燕, 邱新法, 刘吕明, 等. 1960-2000年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征. 水科学进展, 2007, 18(3): 311-318.
- [13] 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等. 近50a新疆气候变化对环境影响评估. 干旱区地理, 2001, 24(2): 97-103.
- [14] 张新焕, 杨德刚, 刘云同. 基于能值的绿洲种植业系统可持续性及其敏感性评价: 以新疆渭干河流域为例. 生态学报, 2009, 29(11): 6008-6016.
- [15] 刘晓梅, 闵锦忠, 刘天龙. 新疆叶尔羌河流域温度与降水序列的小波分析. 中国沙漠, 2009, 29(3): 565-569.
- [16] 张家宝, 史玉光. 新疆气候变化短期气候预测研究. 北京: 气象出版社, 2002: 1-266.
- [17] 邱新法, 刘吕明, 曾燕. 黄河流域近40年蒸发皿蒸发量的气候变化特征. 自然资源学报, 2003, 18(4): 437-442.
- [18] 郭军, 任国玉. 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析. 水科学进展, 2005, 16(5): 666-672.
- [19] 王海军, 张勃, 赵传燕, 等. 中国北方近57年气温时空变化特征. 地理科学进展, 2009, 28(4): 643-650.
- [20] 胡利平, 姚延锋, 裴古娥, 等. 天水地区近50年气温、降水变化特征. 地理科学进展, 2009, 28(4): 651-656.
- [21] 林纾, 陆登荣, 王毅荣, 等. 1960年代以来西北地区暴雨气候变化特征. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 16-21.

Characteristics of Pan Evaporation Changes During 1960–2009 in Weigan River Basin, Xinjiang

LU Lei^{1,2}, QIAO Mu¹, ZHOU Shengbin¹, TANG Jin³, YAN Junjie^{1,2}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Based on the ground observations by the Xinjiang Bureau of Meteorology, the trend, periods and abrupt change of pan evaporation were analyzed in Weigan River Basin with methods of linear analysis, annual anomalies, abrupt t test, wavelet analysis and grey forecasting. The results indicated that as a whole, the annual pan evaporation trend was decreasing in the Weigan River Basin during the given 50 years. The average change was -19.72 mm/10a, which passed the significance test at 0.05 level. The results also showed the annual pan evaporation changes during 1987-2004, which had a high period before 1987, a low period 1987-2003 and a high period after 2004. The annual pan evaporation had presented abrupt changes during 1987-2004. The change type was complex, which included mean value changes and transition changes. There were obvious periods of 8, 17 and 20 years for the annual pan evaporation series during the given 50 years in the Weigan River Basin. At the scale of 8 years, there were 7 high value periods and 6 low value periods. At the scale of 17 years, there were 2 high value periods and 2 low value periods. At the scale of 20 years, there were 2 high value periods and 1 low value periods. The predicted amount of pan evaporation from the established grey dynamic model indicates that the dependability of the established grey dynamic model is very high and the predicted result has nicety. The annual pan evaporation will be increasing in the next three years.

Key word: pan evaporation; change trend; wavelet analysis; grey forecasting; Weigan River Basin

本文引用格式:

卢磊, 乔木, 周生斌, 等. 1960-2009年新疆渭干河流域蒸发皿蒸发量变化特征. 地理科学进展, 2011, 30(3): 306-312.