

汉江流域日降水多种小波分解与重构及其时空分布

赵登忠^{1,2}, 张万昌²

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093;

2. 中国科学院 大气物理所东亚区域气候—环境重点实验室 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029)

摘要: 将汉江流域 55 个气象站点 1981 年的日降水数据作为随机信号, 借助于小波分析时间变化特征, 利用 Haar 等 7 种小波函数分解日降水信号, 采用 Kriging 空间内插方法把分解得到的小波系数空间离散化, 在每个 100 m × 100 m 栅格上进行小波的重构, 从而实现随机性较高的日降水信息的时空降尺度, 以期得到较为准确的日降水时空数据集。利用该流域另外 45 个气象站点 1981 年的日降水数据进行时空模拟结果的验证。通过平均误差等指标的定量评估, 结果表明, 采用 Haar 小波母函数对日降水信号进行分解与重构能够最准确地表达日降水的时空变化特征, 更能充分表达日降水的高度随机性本质特征。

关键词: 小波分析; Kriging 插值; 日降水; 多种小波分解与重构

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)02-0140-07

中图分类号: P468.0⁺21

Multi-wavelet Decomposition and Reconstruction of Daily Precipitation over the Hanjiang River Basin

ZHAO Deng-zhong^{1,2}, ZHANG Wan-chang^{1,2}

(1. International Institute for Earth System Science (ESSI), Nanjing University,

Nanjing, Jiangsu 210093, China; 2. Regional Climate Environment Research for Temperate

East Asia, Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Daily precipitation of 55 meteorological stations over the Hanjiang River basin was regard as stochastic signal in order to express its change characteristics on temporal scale. At first, daily precipitation signal was decomposed using the Haar wavelet, the Daubechies (db2) wavelet, etc. and the wavelet coefficient from decomposition of daily precipitation was regionalized using the Kriging spatial interpolation algorithm. Then the wavelet coefficient in each 100 m × 100 m grid was reconstructed by the Haar wavelet and six other wavelets to get the spatial and temporal mapping of daily precipitation and test the sensitivity of different wavelet functions to the interpolated results. Meanwhile the daily precipitation amount from other 45 meteorological stations over the Hanjiang River basin was used to validate the interpolated results quantitatively by five indexes: mean error (ME), mean absolute error (MAE), root mean-square error (RMSE), correlation coefficient, and determinacy coefficient. Results show that the Haar wavelet is the best wavelet to decompose and reconstruct daily precipitation and express the temporal-spatial variation of daily precipitation. The wave profile of the Haar wavelet in the time domain resembles the shape of the precipitation impulses in a given time span, which might be the best way to simulate the temporal variation of daily precipitation. So the interpolated results of daily precipitation amount using the Haar wavelet is perfect in the spatial-temporal interpolation model based on wave over the Hanjiang River basin.

Key words: wavelet analysis; Kriging interpolation; daily precipitation; multi-wavelet decomposition and reconstruction

收稿日期: 2007-11-29 修回日期: 2007-01-15

资助项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB400502, 2001CB309404); 中国科学院“百人计划”择优支持项目(8-057493); 中国科学院大气物理所东亚区域气候—环境重点实验室开放基金; 干旱气象科学研究基金项目(IAM200503)

作者简介: 赵登忠(1978—), 男(汉族), 山东省莘县人, 博士研究生, 主要从事遥感信息提取及遥感和陆面数据同化系统的研究。E-mail: njuzhaodz@163.com。

通讯作者: 张万昌(1966—), 男(汉族), 河南省永城县人, 研究员, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感与地理信息系统水文水资源研究。E-mail: zhangwc@tea.ac.cn。

作为流域内部水循环的输入要素,降水的时空分布状况对于分析和理解流域水文生态系统以及土地利用变化等物理机制具有重要的作用。但作为气象驱动数据的重要来源,气象水文站点的数量往往是有限的,而有限的站点在空间上的布局又不尽合理。从有限的气象站及不尽合理的空间布局获取的点观测气象数据难以满足人们对气象要素在空间尺度上时空变异性精确表达的要求。特别是日降水的时空离散化,由于其具有高度随机性的特点,获取流域尺度上能够准确表达日降水的空间分布特征的时空数据集,成为分布式水文模型发展与应用的限制因素。以上客观因素表明需要建立有效的空间和时间插值技术,利用已有站点实测气象数据生成任意空间尺度上气象要素的时空数据集。

1 研究背景

获取准确的气象水文要素的时空分布特征是进行流域水文模拟、生态系统及环境等相关研究的前提,也是众多领域科学家关注的重要课题之一。在目前国内外的相关研究中,应用于这些地理要素较为成熟的空间离散化方法主要有反距离内插法、Kriging内插方法、样条内插方法、多元回归方法、泰森多边形方法等^[1-6]。Ian A. Nalder 等在加拿大北部地区利用所谓的梯度反距离平方法对月平均气温和降水进行空间制图研究,结果表明这种把高程梯度因素加入到反距离内插方法提高了空间内插的精度,但同时也发现同一种较为理想的方法并不一定适合别的地区^[7]。P. Goovaerts 把高程因素引入到3种Kriging内插模型中利用葡萄牙地区的36个气象站点数据进行空间内插研究,取得了良好的效果^[8]。我国众多学者在不同气候类型地区也进行了大量的研究^[9-10]。这些方法主要是把连续分布的某时段地理要素进行空间制图,并没有体现出气象水文变量在时间系列上的变化特征。美国气象学家 Christopher Daly 近几年提出了一种基于地理空间特征和回归统计方法生成气候图的PRISM插值模型^[11-13],主要考虑高程对气象要素的影响,充分把地形因素考虑到空间内插算法中,取得了良好的效果。但这种方法必须要求站点高程和气象变量之间具有一定的相关性,但对于日降水这种随机性强的变量进行离散化的结果并不是很理想^[14]。朱求安等利用泰森多边形方法结合PRISM内插模型对日降水的空间离散化进行尝试,也取得了理想的结果,但其空间制图出现了不同面积的斑块,同时在低矮山区日降水与高程的相关性并不明显,这些因素限制了其应用范围^[15]。因此以上这

些空间离散化方法对于得到流域尺度上的日降水时空数据集是远远不够的。在表征地理要素的时间系列特征方面,主要的方法有马尔可夫链、信号脉冲、GAMM分布等方法^[16],这类模型主要是利用随机统计方法对多年的日降水数据进行统计分析,得到其在时间系列上的变化特征,利用概率论方法判断某一天的干湿状态,然后再模拟湿日的降水量。但这些方法不能表征出日降水的空间分布特征,只能得到某个点上的时间系列变化特点,同时对实测站点数据的要求较为严格,必须具有几十年的日降水数据才能准确地得到其统计特征。以上这些特点大大降低了其实用价值。因此,近年来通过这两类方法的结合来充分表达日降水变量的时空分布特征成为一种发展趋势。主要相关模型有MTB(The Modified Turning Bands)、Kyriakidis的模型、RPPM(the Rectangular Pulses Point Process Models)等^[17-20],两者的结合主要是首先利用有效的空间内插方法把时间系列模型的相关参数空间离散化,然后利用时间系列插值模型在每个栅格上计算日降水的模拟值,从而得到整个流域的日降水时空数据集,但大部分方法是基于随机统计方法,需要长时间序列的日降水数据进行模型相关参数的获取,限制了其应用推广。

小波分析作为一种自适应的时域和频域同时局部化的分析方法,它可以把复杂的时间序列分解为若干个不同频带的细节信号序列和背景信号序列,具有对信号局部特征进行放大,研究信号细微特征的特点。基于小波分析工具的以上优点,目前它在气象与水文科学领域已经得到了较为广泛的应用,主要用于分析降水、气温、径流量等要素的时序变化特征^[21-22],但并没有考虑这些要素在空间上的变化情况。因此赵登忠等将日降水时间系列看作一种随机信号,由于小波系数能够体现降水信号在时间局域上的频谱,即信号局部的按频率分解时各频段信号的大小,因此利用Haar小波函数在时间尺度上把每个站点的日降水系列进行分解,利用Kriging空间内插方法把小波系数空间离散化,然后在每个栅格上进行日降水信号的重构,从而实现日降水信号的时空离散化,得到了较为理想的流域尺度日降水时空数据集。但是,该方法只利用了Haar一种小波函数对日降水信号进行了分解与重构,未能考虑不同小波基函数对于表达日降水信号时间序列变化特征的有效性。因此本文拟通过选择不同的实小波函数对汉江流域日降水信号进行分解与重构,以测试实小波函数对日降水时空插值效果的影响。

2 日降水时空内插模型小波函数

小波函数的定义为:设 (t) 为一平方可积函数,即 $(t) \in L^2(R)$,若其傅立叶变换 (ω) 满足以下容许条件

$$C = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称 (t) 为一个基本小波或者称为小波母函数。如果对小波函数 (t) 进行伸缩与平移,则可得到小波函数族

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

式中: a ——尺度伸缩因子; b ——平移因子。

对于任意函数或信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的小波变换为

$$W_f(a,b) = [f(t), \psi_{a,b}(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3)$$

式中: $W_f(a,b)$ ——小波系数; (a,b) 的意义同上。可见一维小波变换的本质是将一维信号或函数变换到由尺度伸缩因子 a 和平移因子 b 共同决定的二维平面 (a,b) 上,这个平面称为小波平面。

由小波系数 $W_f(a,b)$ 重构函数或信号 $f(t)$ 的小波逆变换定义为

$$f(t) = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_f(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{1}{a^2} da db \quad (4)$$

式中, a 对于某一给定小波为常数,不随尺度伸缩因子和平移因子而变化。

本文使用结构简单且最早出现的 Haar 小波对日降水信号进行分解与重构,以便提取小波系数进行空间离散化。Haar 小波系由数学家 A. Haar 于 1910 年首先提出的,其母函数为

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq t < 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

Daubechies (dbN) 小波是由世界著名的小波分析学者 Inrid Daubechies 构造的小波函数,其中 N 为小波的阶数。本文中为了简化计算, N 取为 2。dbN 不具有对称性,没有明确的表达式,但其转换函数 h 的平方模是很明显的。

令 $P(y) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k^{N-1+k} y^k$,其中 C_k^{N-1+k} 为二项式的系数,则有其平方模为

$$|m_0(\omega)|^2 = \left[\cos^2 \frac{\omega}{2} \right]^N P \left[\sin^2 \frac{\omega}{2} \right] \quad (6)$$

式中: $m_0(\omega) = \sum_{k=0}^{2N-1} h_k e^{-j\omega k}$ 。

dbN 小波在时域上是有支撑的,即它的长度是有限的;其小波函数可以由所谓的“尺度函数”求出来,尺度函数为低通函数,长度有限。

关于本研究使用的其它小波母函数的详细信息可以参考有关文献^[23],在此不一一阐述。

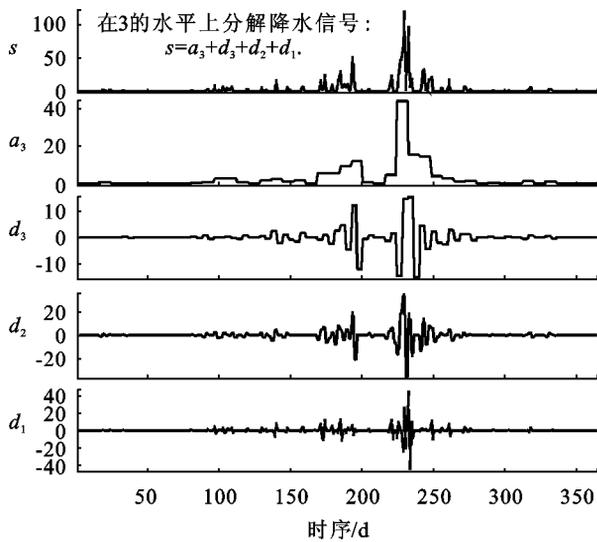
3 研究区及数据介绍

本研究首先在气候温暖湿润的多雨区测试日降水时空内插模型中 7 种小波母函数分解与重构日降水信号对模拟效果的影响评价,因此选择长江支流汉江整个流域作为研究区。汉江位于秦岭和巴山之间,是长江最重要的支流之一,发源于秦岭的南坡。它从源头向西延伸 1 545 km,其流域面积约 1.59×10^4 km²,位于东经 106°12'—114°14' 和北纬 38°08'—34°11' 之间。气候温暖湿润,多雨,年平均气温 15.5℃,年降水在 636.9~1 100 mm 之间,日照时数约 1 770 h,无霜期约 210~270 d,主要的地物类型有落叶林、灌木和旱地。本文所选用的日降水数据为汉江流域 100 个气象站点 1981 年全年的实测资料,利用其中 55 个站点的日降水数据进行时空离散化,并利用 45 个站点的观测数据进行时空插值结果的验证。

4 日降水信号的小波分解

本研究把汉江流域 55 个气象站点的日降水数据利用 Haar 等 7 种小波函数进行分解,以便于表达日降水在时间尺度上的变化特征。由于本研究利用小波分析的目的在于提取降水信号中的主要变化趋势,得到信号的低频分量,滤掉隐藏的随机性信息,并不需要选择过多的信号分解层数从而增加计算量,对最终结果的影响并不是很大,因此日降水信号的小波分解与重构均是在分解层数为 3 的水平上进行的。图 1 为汉江流域靖口关气象站点 1981 年日降水数据经过 Haar 小波分解以后的每个分量示意图。

从分解后的波形可以看出,分解后的低频分量可以描述日降水信号在时间尺度上的变化趋势,而高频分量提取出了日降水的细微变化特征,充分表达了日降水的随机性特点。每种小波对日降水信号分解后的低频信息均表达了降水在一年以内的时间变化,只是每种小波的波形不同而已。分解信号后得到的小波系数体现了信号在时间局域上的频谱,即信号局部的按频率分解时各频段信号的大小,因此本研究使用传统的 Kriging 空间内插方法获取整个流域小波系数的空间分布格局,测试使用不同小波母函数的系数对日降水时空内插结果的影响。



s ——原始日降水信号; a_3 ——信号分解后的低频分量(近似分量);
 d_1, d_2, d_3 ——分别为信号分解后的高频分量(细节分量);

图 1 汉江流域靖口气象站 1981 年日降水数据的小波分解

5 结果与讨论

由于计算量的问题,本研究使用汉江流域 100 个气象站点 1981 年全年的日降水数据进行时空内插研究,其中 55 个站点的日降水数据用于时空离散化计算,45 个站点的观测数据用于时空插值结果的验证。为便于在时间和空间两个尺度上定量地进行内插结果的评估与误差估计,评价基于小波的时空内插模型中不同小波母函数对内插日降水精度的影响。本研究拟采用平均误差 (ME), 平均绝对误差 (MAE), 平均误差平方的平方根 (RMSE) 及确定性系数 (D), 并辅以相关系数 (R) 5 个统计指标作为评估标准。其中确定性系数的表达式为

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (7)$$

式中: P_i ——实测降水值; P ——计算降水值;
 \bar{P} ——实测降水值的均值; n ——时间序列的长度。
平均误差 (ME) 反映总体估计误差的大小, 平均绝对误差 (MAE) 可以表达估计值可能的误差范围, 均方根误差 (RMSE) 可反映估计值的灵敏度和极值效应, 确定性系数直观地体现了实测值与计算值之间的拟合程度, 相关系数则反映了实测值与计算值之间的相关程度。

5.1 时间尺度上的不同小波函数的影响评价

为了在时间尺度上评价基于小波方法日降水时空内插模型不同小波母函数对日降水模拟效果的影

响,对崇家沟气象站 1981 年日降水实测数据通过借助于 bior2.2,coif2,db2,dmey,haar,rbio2.2 和 sym2 共 7 种小波母函数对日降水信号进行分解与重构。统计分析表明,使用 bior2.2,coif2,db2,dmey,haar,rbio2.2,sym2 共 7 种小波母函数进行日降水分解与重构时空内插结果与崇家沟气象站实测数据的相关系数分别为 0.877 3,0.874 1,0.872 5,0.878 1,0.930 9,0.876 1 和 0.875 2,其中利用 Haar 小波函数进行日降水分解与重构的相关系数最高,其它几种小波结果的相关系数非常相近,其变化在 0.1 以内。从日降水观测值与模拟值之间的线性相关曲线的斜率也可以看出,利用 Haar 小波函数进行日降水分解与重构的曲线斜率为 0.9783,最接近于理想状况下的 1,其它小波的曲线斜率均在 0.9 以上。对于两者之间线性相关曲线的截距来说,也是 Haar 小波函数的结果最理想,其截距最接近于 0。

图 2—5 显示了汉江流域用于验证的 45 个气象站点的所有评价指标状况,它们依次为 45 个气象站点基于小波方法时空内插结果与实测日降水数据之间的相关系数,MAE,RSME 以及确定性系数,由于平均误差 (ME) 易受到正负值相互抵消的影响,因此本文没有列出它在每个验证站点的分布情况。

对于相关系数来讲,bior2.2,coif2,db2,dmey,haar,rbio2.2,sym2 各小波母函数模拟与观测日降水量的相关系数平均值分别为 0.796 1,0.799 9,0.790 6,0.797 9,0.852 2,0.798 0,0.798 3,最大值分别为 0.933 1,0.943 4,0.944 0,0.943 5,0.949 8,0.939 6 和 0.944 1,最小值分别为 0.552 5,0.530 8,0.459 4,0.526 1,0.534 6,0.563 6 和 0.544 7。

从相关系数的分布情况来看,Haar 小波函数时空内插结果与实测数据的平均相关系数最高,其它 6 种小波的平均相关系数均在 0.7~0.8 之间,因此 Haar 小波在基于小波日降水时空内插模型中的优势是明显的。从 MAE 和 RSME 两个定量指标的分布可以看出,基于 Haar 小波函数时空内插结果 MAE 和 RSME 在用于验证的 45 个气象站点的分布曲线中大部分是处于其它小波函数相应曲线的下方。

这种现象说明除了个别的气象站点外,在大部分验证气象站点上基于 Haar 小波函数时空内插结果是最理想的。

从图 5 中可以看出,基于 Haar 小波函数日降水时空内插结果与实测数据之间的确定性系数曲线大部分位于其它小波函数相应曲线的上方,这种现象同样也可以说在大部分验证气象站点上基于 Haar 小波函数时空内插结果是最理想的。

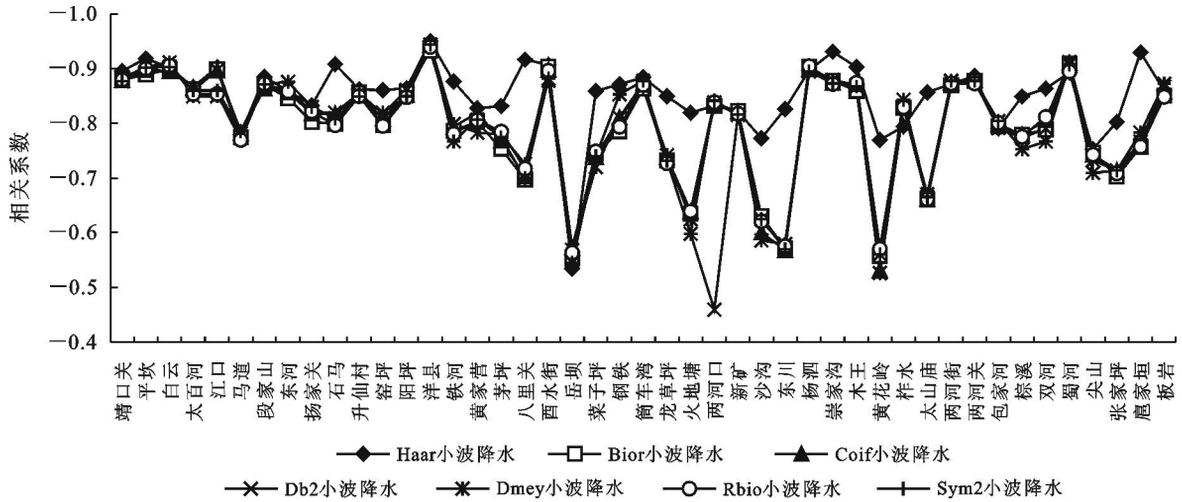


图 2 汉江流域小波分解方法模拟与实测日降水之间的相关系数

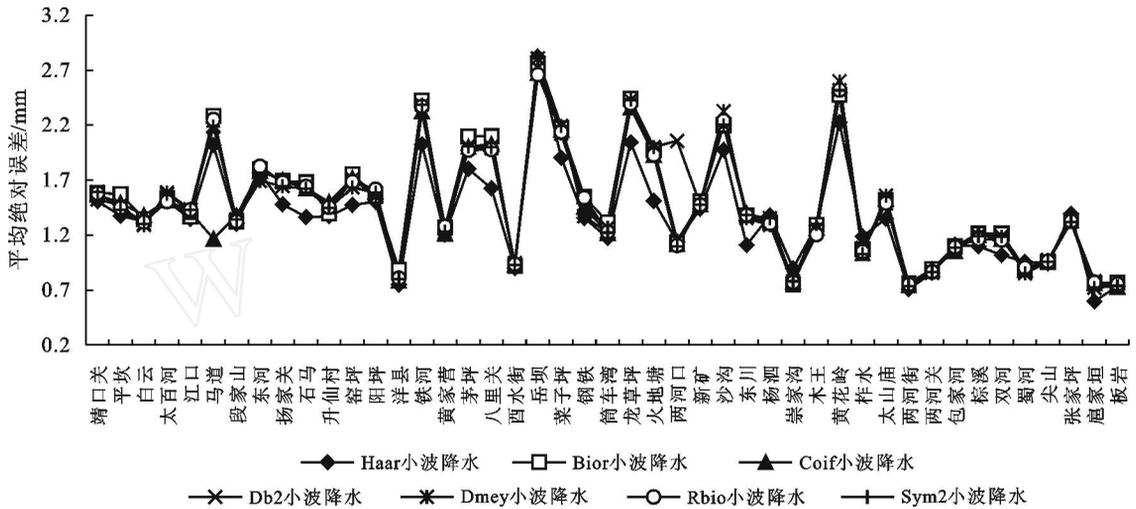


图 3 汉江流域小波分解方法模拟与实测日降水之间的 MAE

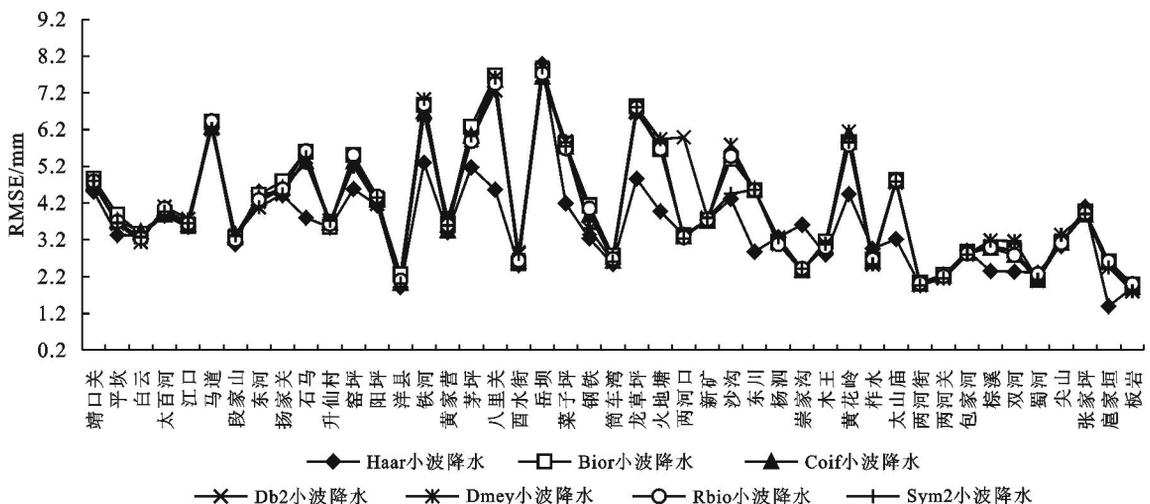


图 4 汉江流域小波分解方法模拟与实测日降水之间的 RMSE

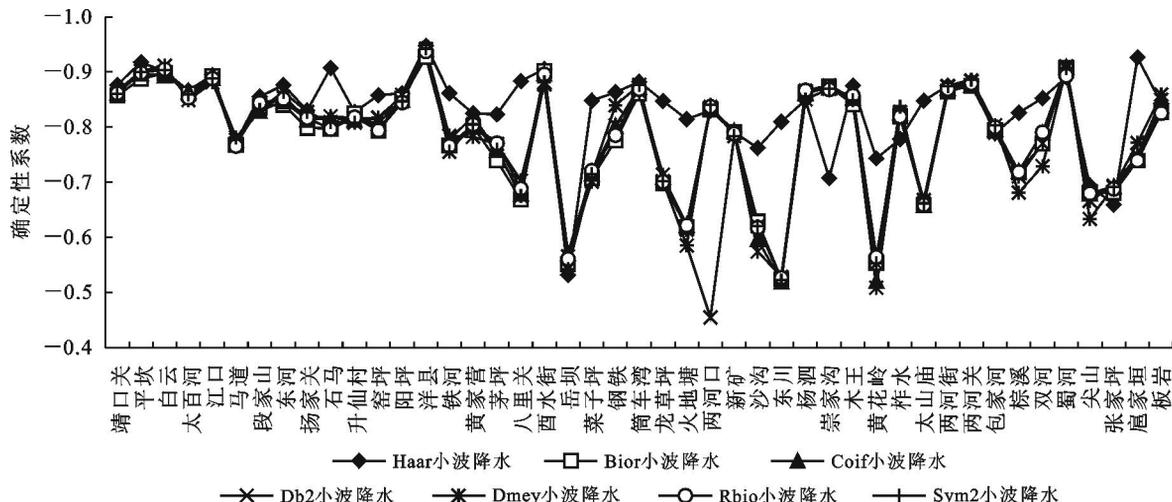


图 5 汉江流域小波分解方法模拟与实测日降水之间的确定性系数

5.2 空间尺度的不同小波函数的影响评价

为了评估基于小波内插时空模型中小波母函数在模拟日降水量过程中的影响,本研究选择 1981 年 3 月 27 日,1981 年 5 月 28 日,1981 年 8 月 23 日,1981 年 12 月 12 日 4 d 分别代表春季、夏、秋、冬四季分析 7 种小波母函数内插结果在空间尺度上的误差分布情况。基于 Haar 小波函数内插结果相对于其它小波函数来讲和实际观测日降水量的峰值比较吻合。根据统计结果表明,1981 年 3 月 27 日 bior2.2,coif2,db2,dmey,haar,rbio2.2,sym2 各小波母函数日降水内插数据与实测数据之间的确定性系数分别为 0.651 0,0.679 9,0.728 8,0.687 4,0.919 8,0.734 3和 0.728 8,其中基于 Haar 小波函数内插结果的确定性系数是高的,其他小波函数内插结果的确定性系数均在 0.6~0.8 之间,也是和日降水曲线之间的吻合程度相一致的。1981 年 5 月 28 日,1981 年 8 月 23 日和 1981 年 12 月 12 日的统计结果同样也表明基于 Haar 小波函数时空内插结果是最理想的。

因此,在基于小波日降水时空内插模型中,使用 Haar 小波母函数对日降水进行分解与重构所得到的时空模拟结果是最理想的。由于日降水的高度随机性,其小波分解后的低频分量也不可避免地仍然存在随机性信息,表现为日降水类似于脉冲信号的特征,具有一定的强度和持久度。因此和脉冲非常相似的 Haar 小波母函数对日降水信号的时间变化特征表达的更加准确,使 Haar 小波母函数对日降水的时空降尺度表达较为理想。这种现象和 MTB 方法中把日降水作为一种脉冲信号处理的方法也是一致的,更能充分表达日降水的高度随机性本质特征。

6 结论

本研究利用基于小波理论的时空内插模型对汉江流域 55 个气象站点 1981 年日降水量进行时空离散化,得到了较为准确的日降水时空数据集,测试了 Haar 等 7 种小波函数在日降水时空内插过程中的敏感性。结果表明,采用 Haar 小波母函数对日降水信号进行分解与重构能够最准确地表达日降水的时空变化特征。这种评价结果和 MTB 方法中把日降水作为一种脉冲信号处理的方法也是一致的,说明这种小波函数更能够充分表达日降水的高度随机性本质特征。但是由于汉江流域属于雨量比较丰富的湿润地区,日降水信号内部随机信息比较丰富,因此其小波分解与重构效果较为理想,可能对随机性更高的干旱地区日降水更为困难,因此未来的研究还需要在干旱区域进行进一步的测试和试验。

[参 考 文 献]

- [1] 赵俊兰. Kriging 法在 GIS 空间数据内插中的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 1998(3): 35—38.
- [2] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 用空间内插法研究黄土丘陵小流域土壤水分时空分布特征[J]. 自然科学进展, 2002, 12(4): 430—433.
- [3] 汪学兵,柳玲,吴中福. 空间内插方法在 GIS 中的应用[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(1): 35—39.
- [4] 封志明,杨艳昭,丁晓强,等. 气象要素空间内插值方法优化[J]. 地理研究, 2004, 23(3): 357—364.
- [5] 冯锦明,赵天保,张英娟. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 261—277.
- [6] 孙强,曾维华,沈珍瑶,等. 基于地统计学方法的泾河流域降水空间变异规律研究[J]. 干旱区资源与环境,

- 2004, 18(5) : 47—51.
- [7] Ian A Nalder, Ross W Wein. Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 92: 211—225.
- [8] Goovaerts P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*[J], 2000, 228: 113—129.
- [9] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国陆地区域气象要素的空间插值[J]. *地理学报*. 2002(57) : 47—56.
- [10] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3) : 260—265.
- [11] Christopher Daly. A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33: 140—158.
- [12] Christopher Daly, Wayne P Gibson, George H. Taylor, et al. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate [J]. *Climate Research*, 2002, 22: 99—113.
- [13] 朱华忠, 罗天祥, Christopher Daly. 中国高分辨率温度和降水模拟数据的验证[J]. *地理研究*, 2003, 22(3) : 349—359.
- [14] 赵登忠, 张万昌, 刘三超. 基于 DEM 的地理要素 PRISM 空间内插研究[J]. *地理科学*, 2004, 24(2) : 205—211.
- [15] 朱求安, 张万昌, 赵登忠. 利用 PRISM 和泰森多边形方法的基于地形要素的日降水量空间插值[J]. *地理科学*, 2005, 25(2) : 233—238.
- [16] Shu Geng, Frits W T. A simple method for generating daily rainfall data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 36: 363—376.
- [17] Dale Mellor. The Modified Turning Bands (MTB) model for space-time rainfall: I. Model definition and properties[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 175: 113—127.
- [18] Kyriakidis P C, Miller N L, Kim J. A spatial time series framework for simulating daily precipitation at regional scales [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 297: 236—255.
- [19] Lelys Guenni, Michael F H. Spatial interpolation of the parameters of a rainfall model from ground-based data [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 212 - 213: 335—347.
- [20] Thornton P E, Running S W, White M A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain [J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 190: 214—251.
- [21] 许月卿, 李双成, 蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究[J]. *中国科学 D 辑地球科学*, 2004, 34(12) : 1176—1183.
- [22] 严华生, 万云霞, 邓自旺, 等. 用正交小波分析近百年来中国降水气候变化[J]. *大气科学*, 2004, 28(1) : 151—157.
- [23] 徐长发, 李国宽. 实用小波方法[M]. 华中科技大学出版社, 2004.

(上接第 84 页)

4 结论

本文利用 1988, 1996 和 2001 年的 3 期 TM 遥感影像数据, 获取了大庆市 13 a 来土地退化数据, 阐述了该区土地退化的时空变化特征, 并分别讨论了自然因素和人类活动对土地退化的驱动力。

(1) 大庆市退化土地面积在持续增加, 速度有加快的趋势, 土地退化数量的区域差异和速度的区域差异十分明显。

(2) 长期以来自然因素是促进土地退化的内部因素, 一些具有标志性的指标如降水量等于 400 mm 对土地退化起到严格的控制作用。

人类活动仍然是近几十年来土地发生退化的最主要的外部动力, 其中农业过度开发、石油开采与加工、人口增长是大庆市土地发生沙化和碱化的主要驱动力, 而且随着石油资源的枯竭, 对土地资源的压力必将越来越大。

[参 考 文 献]

- [1] 程水英, 李团胜. 土地退化的研究进展[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(3) : 38—44.
- [2] 陈建军, 张树文, 陈静, 等. 大庆市土地盐碱化遥感监测与动态分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(4) : 101—107.
- [3] 李宝林, 周成虎. 东北平原西部沙地沙质荒漠化的遥感监测研究[J]. *遥感学报*, 2002, 6(2) : 117—123.
- [4] 李宝林, 周成虎. 东北平原西部沙地的气候变异与土地荒漠化[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(3) : 234—239.
- [5] 臧淑英, 张晶, 于兵. 黑龙江省大庆市景观动态及其生态环境效应研究[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(3) : 321—328.
- [6] 石瑞香, 康慕谊. NECT 上农牧交错区耕地变化及其驱动力分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2000, 36(5) : 700—705.
- [7] 臧淑英, 孙学孟, 韩冬冰. 黑龙江省大庆市土地利用/覆被变化极其驱动力分析[J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(增刊 2) : 63—68.