

# 江河源区达日县近 50 年气候变化的多尺度分析

陈克龙<sup>1,2</sup>, 李双成<sup>2</sup>, 周巧富<sup>2</sup>, 肖景义<sup>1</sup>

(1 青海师范大学生命与地理科学学院, 西宁 810008; 2 北京大学环境学院, 北京 100871)

**摘要:** 利用墨西哥帽小波对达日县 1956~2004 年共 588 个月的气温和降水数据进行多尺度分析, 揭示了达日县气候变化多时间尺度的复杂结构, 分析了不同时间尺度下降水和气温序列的变化周期和突变点, 并确定了各序列中存在的主周期。结果表明: 达日县气温和降水的变化趋势与青藏高原以及江河源区气候总体变化基本一致, 局部存在较明显的滞后反应, 小尺度的变化嵌套在较大尺度的复杂背景之中, 不同时间尺度下突变的年份有所差异, 小波分析在揭示气候变化的多尺度构型和主周期方面具有明显的优势。

**关键词:** 气候变化; 尺度效应; 小波分析; 青海省达日县

文章编号: 1000-0585(2007)03-0526-08

## 1 前言

20 世纪 80 年代提出的地球系统的新思想, 开创了人们从地球的整体性和动态变化性来认识地球系统的新视角<sup>[1]</sup>, 其中气候变化成为研究全球各圈层变化的主要焦点之一<sup>[2]</sup>。气候变化已经不再仅仅是一个单一学科问题, 而逐渐成为地理学、气象学、农学、生态学等诸多学科共同研究的重大议题, 至今在研究内容、研究方法及技术手段等方面取得很多进展<sup>[3]</sup>。气候变化的研究尺度亦发生明显变化: 时间尺度从地质尺度、历史尺度到年际尺度和年以下尺度; 空间尺度从全球尺度、区域尺度到某一景观尺度和地方尺度。随着研究工作的不断深入, 尺度效应和尺度转换问题也越来越显示出其重要性<sup>[4]</sup>。

江河源区位于青藏高原的腹地, 是世界上江河、冰川、雪山最集中的地区, 是长江、黄河和澜沧江的发源地, 是我国最重要、影响范围最大的生态功能区, 素有“中华水塔”之称。近几十年来高原气候呈现出气温升高、降水减少和蒸发量增大的暖干化趋势, 导致源区湖泊萎缩、河流干涸、湿地减小、冰川后退、草场退化、水土流失等生态环境问题<sup>[5]</sup>。虽然青藏高原气候变化的研究目前已在多种时间尺度上取得了丰硕成果<sup>[6~13]</sup>, 但因为青藏高原地势复杂, 所有的地面气候观测站均有一定的地方区域性限制, 高原气候变化的总体特征并不能完全揭示江河源区特定区域的气候变化趋势, 因此江河源区及区域内部气候变化的多尺度研究, 对江河源区的生态建设和保护有极其重要的现实意义和应用价值。

## 2 研究区域特征

达日县地处江河源区, 位于青海果洛藏族自治州南部, 青藏高原的东南部(图 1)。地理位置  $32^{\circ}42' \sim 34^{\circ}15'20''$  N,  $98^{\circ}15'29'' \sim 100^{\circ}32'41''$  E, 面积  $16160\text{km}^2$ , 平均海拔

收稿日期: 2006-12-15; 修订日期: 2007-03-20

基金项目: 973 项目—青藏高原环境变化及其对全球变化的响应与适应对策(2005CB422000)资助。

作者简介: 陈克龙(1965-), 男, 安徽巢湖人, 副教授。主要从事生物地理与可持续发展研究。

3967.5m, 地势西高东低, 山脉连绵, 沟谷交错, 天然草原辽阔, 区内巴颜喀拉山从西北向东南延伸形成了长江、黄河两大水系。气候属高寒半湿润、半干旱大陆性气候, 1 月平均气温 $-12.6^{\circ}\text{C}$ , 7 月平均气温 $9.2^{\circ}\text{C}$ , 年平均气温 $-0.9^{\circ}\text{C}$ , 平均年降水量 544.6mm, 全年降水多集中于 6~9 月, 除冷暖两季外, 没有明显的四季之分, 生长季仅 130~170 天左右, 无绝对无霜期; 植被类型简单, 主要有以小嵩草 (*Kobresia pygmaea*)、矮嵩草 (*K. humilis*) 为优势种的高寒草甸, 藏嵩草 (*Kobresia tibetica*)、黑褐苔草 (*Carex moorcroftii*) 为主的高寒沼泽草甸以及金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 等为主的高寒灌丛。

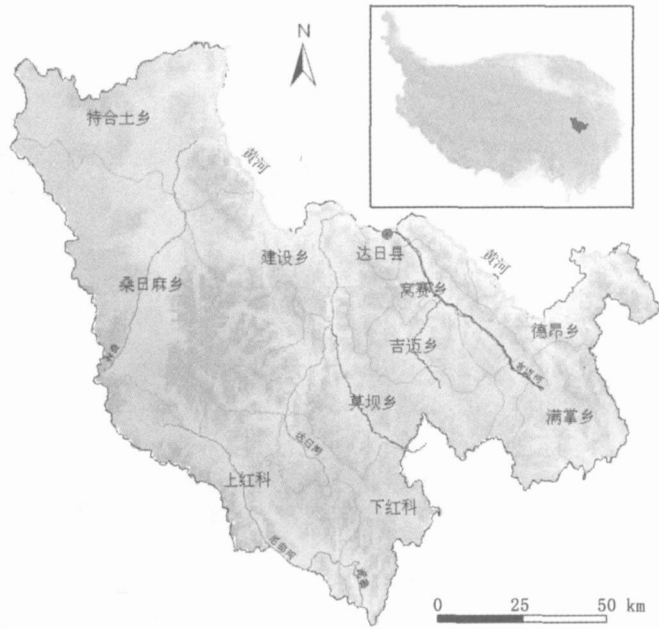


图 1 达日县地理位置  
Fig 1 Location of the study area

3 数据与方法

3.1 气象数据处理

本文选用青海达日县气象站 1956 年 1 月~2004 年 12 月气温和降水数据, 数据来自青海省气象局气候资料中心, 其中气温数据 588 个(12 月 $\times$ 49 年), 降水数据 588 个(12 月 $\times$ 49 年), 数据总样本数 1176 个。为消除月份变化的影响, 首先分别对降水及气温序列进行距平(图 2a, 图 2b); 对于降水变化序列, 自 1985 年以来波动幅度明显变小, 且正距平峰值出现频率也在变小, 说明较之 1985 年以前, 该地区的降雨量呈现减少的趋势, 且大降雨量的出现次数也偏少; 对于气温序列来说, 没有以年值为单位的那种明显上升趋势, 但 1998 年以来, 正距平明显多于负距平, 说明过去 6 年温度明显升高。

3.2 小波分析方法原理

小波分析(Wavelet Analysis)是由 Y. Meyer, S. Mallat 与 I. Daubechies 等科学家提出并迅速发展起来的一种新的数学方法, 通常是指由 Hilbert 空间中的满足某种特性的一系列向量组成的集合, 是在傅立叶(Fourier)变换的基础上引入了窗口函数, 小波变换基于平移和伸缩的不变性, 允许把一个时间序列分解为时间和频率的贡献, 其优势在于它能进行多分辨率分析, 并在时域和频域都有良好的局部化的性质, 从而解决了傅立叶变化不能解决的许多问题, 被称为“数学显微镜”。小波分析目前在揭示多尺度特征方面具有明显优势, 并被广泛应用到多个领域, 例如海滩剖面的多尺度变化研究<sup>[14]</sup>、不同尺度下的物质孔隙度特征<sup>[15]</sup>。同时, 在诊断气候变化的内在层次结构<sup>[16]</sup>、分辨时间序列不同尺度上的演变特征方面非常有效<sup>[17~19]</sup>。小波分析原理主要包括小波变化的形式、母小波的选择以及小波方差分析, 本文通过编写数据处理及运算程序, 在 Matlab(MathWorks Inc. 1984~

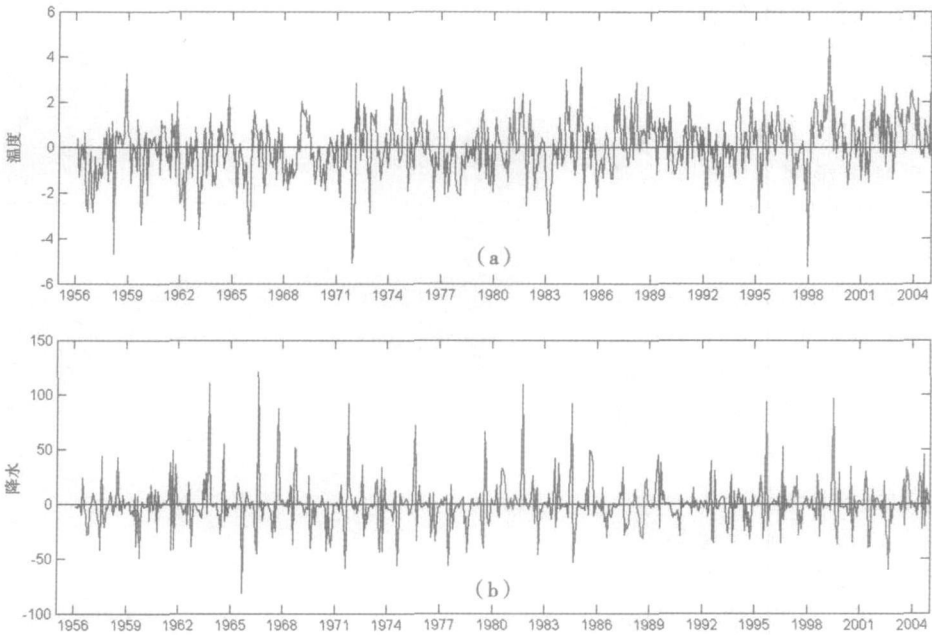


图 2 青海省达日县 1956~ 2004 年逐月气温 (a) 和降水 (b) 序列数据距平图

Fig 2 Series of monthly temperature anomalies (a) and precipitation anomalies (b) during 1956~ 2004 in Dari County, Qinghai Province

2006) 中运行。

首先是小波形式的变换过程:

设  $\varphi(t)$  为一平方可积函数, 即  $\varphi(t) \in L^2(R)$ , 若其傅立叶变换  $\Phi(\omega)$  满足容许条件公式,

$$C_\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Phi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty$$

则  $\varphi(t)$  称为一个基本小波或小波母函数, 然后将小波函数  $\varphi(t)$  进行伸缩和平移, 得到连续小波  $\varphi_{a,\tau}(t)$ :  $\varphi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$ ,  $a, \tau \in R$ ,  $a > 0$

对于任意函数  $f(t) \in L^2(R)$  的连续小波变换可得到小波系数  $W_f(a, \tau)$ :

$$W_f(a, \tau) = \langle f(t), \varphi_{a,\tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (a \text{ 为尺度因子, } \tau \text{ 为平移因子})$$

最终经过基本小波与待分析函数作内积之后, 可分解得到不同尺度下的小波系数, 这一系列过程就是小波变换过程。

其次是根据研究内容和目标的差异, 选择不同类型的母小波。目前在实践和理论中被验证的有效小波母函数有 Haar 小波、Mexh 小波、Morlet 小波、Meyer 小波等二十余种小波函数。墨西哥帽(Mexican Hat)小波是高斯概率密度函数的二阶导数, 因形似墨西哥草帽而得名。墨西哥帽小波在揭示数据资料的奇异性(突变点)方面表现出良好的性能, 它没有尺度函数, 小波在时频上同时具有良好的局部性, 对于信号局部特性的检测作用较大。本文选用 Mexh 小波作为分析函数, 其时域关系表示为:  $\varphi(t) = (1 - t^2) e^{-t^2/2}$

小波方差分析是小波分析的重要内容, 其计算式为:  $w_p(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |w_f(a, b)|^2 db$

将时间域上的关于  $a$  的所有小波系数的平方积分称为小波方差, 引入小波方差是为了估测格局和过程的尺度参数 (D. B Percival, 2000)。因此在一定尺度下, 小波方差表示时间序列中该尺度周期波动的强弱 (能量大小), 小波方差图能反映时间序列中所包含的各种尺度 (周期) 的波动及其强弱 (能量大小) 随尺度变化的特性, 通过方差图可非常方便的寻求 (查找) 一个时间序列中起主要作用的尺度 (周期)。

3.3 运算步骤

(1) 对原始气温和降水序列数据进行距平处理, 以去除年周期的趋势影响。(2) 选择适当的基本小波类型和变换类型 (连续或离散)。本文选用 Mexican Hat 为基本小波, 进行连续小波变换。(3) 提取不同尺度的小波系数并作图。以时间序列 (年) 为横轴, 实际尺度 (以月为单位) 为纵轴, 作小波系数分布图。(4) 利用小波变换分别计算不同尺度下气温和降水的小波方差。

4 结果分析

利用小波分析分别将达日县近 50 年来降水和气温的一维信号在时间和频率方向上展开, 分别对其时频结构进行更细致的剖析, 能够提取更多尺度有价值的信息。分析过程中, 小波系数图的高值中心和低值中心所处的位置对应着气温和降水序列的突变点。

4.1 逐月气温序列的小波分析

图版 4 图 3 是达日县 1956~ 2004 年逐月气温距平 Mex h 小波变换的小波系数图, 纵坐标表示实际尺度 (以月为单位), 横坐标表示相对时间 (以 1956 年为起始年份)。图的上半部分为低频, 对应较长尺度周期的振动; 下半部分为高频, 对应较短尺度周期的振动。

在图 3 上部, 年代际尺度 (10a 以上尺度) 有 1 个最明显的高值中心在 21 世纪初期 (2000~ 2004 年), 有 2 个次高值中心在 20 世纪 70 年代中期 (1975~ 1976 年) 和 80 年代后期 (1988 年), 有 2 个明显的低值中心在 20 世纪 80 年代初 (1980~ 1983 年) 和 90 年代初 (1992~ 1995 年)。表现出 20 世纪 70 年代前气温相对较低, 波动变化不明显; 70 年代后出现高、低、高、低、高的波动变化, 最后一个高值中心最明显, 且目前尚未形成闭合。

在图 3 的下部, 年际尺度 (10a 以下尺度) 上振荡复杂多变, 但 3a 尺度和 6a 尺度表现较为明显。3a 尺度上有 6 个高值中心 (1959、1965、1969、1982、1999 和 2004 年, 其中 1999 年高温中心最为显著) 7 个低值中心 (1956~ 1957、1962~ 1963、1977~ 1978、1983、1986、1998 和 2001 年, 其中 1983 和 1998 年最为显著); 6a 尺度上有 4 个高值中心 (1961、1975、1989 和 2004 年) 3 个低值中心 (1956~ 1957、1977~ 1978 以及 1993 年)。

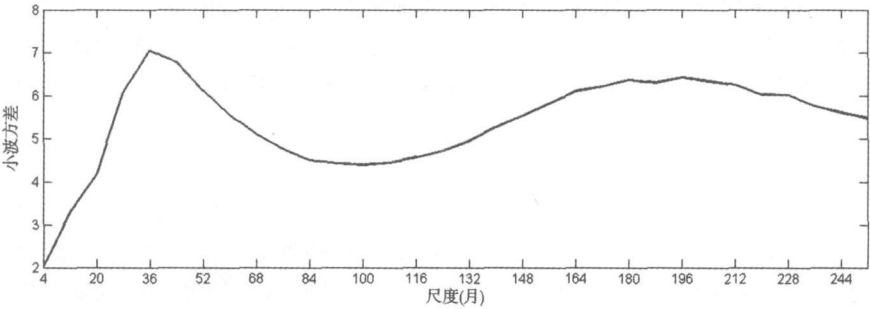


图 4 青海省达日县 1956~ 2004 年逐月温度距平序列小波方差图

ig 4 Wavelet variances pattern of monthly temperature anomalies during 1956~ 2004 in Dari County

为了揭示气温变化的主周期, 本研究进行了小波方差分析。图 4 是达日县 1956~2004 年气温距平系列小波方差图, 纵坐标表示小波方差 (Wavelet variance), 横坐标表示时间尺度 (Scale)。从图上可以更清楚地看出达日气温序列的优势尺度表现得较为简单, 3a (36 个月) 的优势尺度最明显, 在 15~18a 也存在一个不太显著的次优势尺度域。说明达日县气温序列主要存在以 3a 为主的短周期和以准 16a 为主的次长周期。

#### 4.2 逐月降水序列的小波分析

图版 4 图 5 是达日县 1956~2004 年逐月降水距平  $M_{exh}$  小波变换的小波系数图, 纵坐标表示小波尺度, 横坐标表示相对时间 (以 1956 年为起始年份)。图的上半部分为低频, 对应较长尺度周期的振动; 下半部分为高频, 对应较短尺度周期的振动。

在图 5 的上部, 年代际尺度 (10a 以上尺度) 上有 1 个明显的高值中心在 20 世纪 80 年代初期 (1981~1983 年), 有 1 个次高值中心在 20 世纪 60 年代中期 (1965~1968 年), 有 1 个亚次高中心在 20 世纪 90 年代中期; 有 1 个明显的低值中心在 20 世纪 70 年代中期 (1971~1976 年)。从 1956 年至今出现了数次干湿交替变化, 其中 20 世纪 80 年代前波动变化较明显, 发生了 2 次大的干湿变化; 20 世纪 80 年代后降水相对较少, 波动变化不太明显。

在图 5 的下部, 年际尺度 (10a 以下尺度) 上振荡复杂多变, 但 3a 尺度和 6a 尺度表现较为明显。3a 尺度上有 2 个高值中心 (1963~1964 和 1989 年) 和 2 个低值中心 (1970~1971 和 2003 年); 6a 尺度上有 1 个高值中心 (1982~1983 年) 和 2 个低值中心 (1970~1971 和 1978~1979 年)。

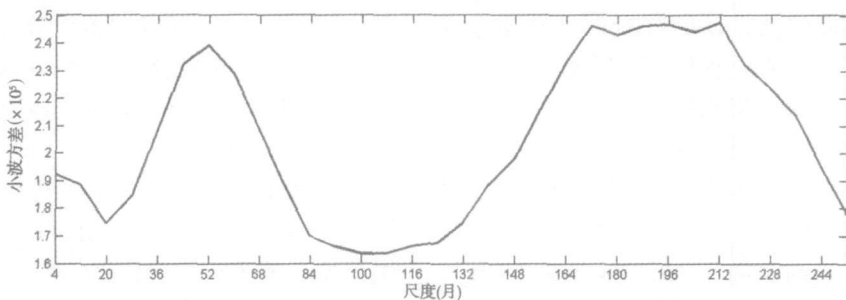


图 6 青海省达日县 1956~2004 年逐月降水距平序列小波方差图

Fig 6 Wavelet variances pattern of monthly precipitation anomalies during 1956~2004 in Dari County

为了揭示降水变化的主周期, 本研究进行了小波方差分析。图 6 是达日县 1956~2004 年降水距平系列小波方差图, 纵坐标表示小波方差, 横坐标表示时间尺度。从图上可以更清楚的看出降水序列的优势尺度域表现为两个, 一个是在 3~5a, 以 4a 左右为中心; 另一个优势尺度域为 14~18a, 以 16a 为中心。在尺度为 4 和 16 的时候出现了两个很明显的峰值, 说明这一降水序列存在明显的以 4a 为主的短周期和以 16a 为主的长周期。

## 5 讨论与结论

(1) 达日县 1956~2004 年的气候变化充分体现了多尺度变化的特征: 逐月气温序列存在一个 3a 为主的短周期和以 16a 为主的长周期, 从冷暖交替的情况看, 最后一个暖周期尚未闭合, 可以判断出近几年内仍处在暖期, 气温将会继续偏高; 逐月降水序列也存在一个 4a 为主的短周期和 16a 为主的长周期, 从干湿交替的情况可以判断当前降水仍然偏低, 但有一个湿润期正在放大, 未来几年将有可能出现新的变化。

(2) 达日县近 50 年的年代际气候变化中: 有三次明显的气温升高期 (20 世纪 70 年代中期、80 年代后期及 21 世纪初期), 其中 21 世纪初气温升高最为显著; 有二次明显的降水增加时期 (20 世纪 60 年代中期和 80 年代前期), 其中 80 年代前期降水增加最为显著。这与李潮流、杨建平、李林等学者所研究的结果基本相似<sup>[20~22]</sup>, 表明达日县气温和降水的年代际变化趋势与青藏高原以及江河源区气候总体变化基本一致, 但局部也存在较明显的滞后反应<sup>[23~25]</sup>。

(3) 达日县气候变化在不同尺度上具有不同突变点, 随着尺度的不同突变位置会发生偏移, 小尺度的变化嵌套在较大尺度的复杂背景之中。达日县 50 年的气候变化中, 气温和降水在年际尺度上结构复杂、波动明显, 虽然 3a 尺度和 6a 尺度都具有明显的高频振荡, 但其突变的年份存在很大的差异。

(4) 小波分析素有“数学显微镜”之称, 能在不同时间尺度上分析过去气候的变化周期及冷暖、干湿交替情况, 并可通过小波系数图来预测近期内的气候变化趋势, 小波分析在揭示气候变化的多尺度构型和主周期方面具有明显的优势。然而由于发展时间较短, 还存在一定的局限性, 目前它只能反映气候的冷暖、干湿变化状况, 而不能定量指出其变化的程度。未来小波分析的广泛应用, 还将有待于其母函数的拓展和提高。

## 参考文献:

- [1] 张强, 韩永翔, 宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述. 地球科学进展, 2005, 20(9): 990~998
- [2] 张兰生, 方修琦, 任国玉. 全球变化. 北京: 高等教育出版社, 2001. 1~341.
- [3] 林海. 中国全球变化研究的回顾与展望. 地学前缘, 2002, 9(1): 19~25.
- [4] 李双成, 蔡运龙. 地理尺度转换若干问题的初步探讨. 地理研究, 2005, 24(1): 11~18.
- [5] 《三江源自然保护区生态环境》编辑委员会. 三江源自然保护区生态环境. 西宁: 青海人民出版社, 2002. 1~240.
- [6] 汤懋苍, 程国栋, 林振耀. 青藏高原近代气候变化及对环境的影响. 广州: 广州科技出版社, 1998. 121~139.
- [7] 冯松, 汤懋仓, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. 科学通报, 1998, 43(6): 633~636.
- [8] 叶笃正, 高由禧, 等. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979. 1~278.
- [9] 徐影, 丁一汇, 李栋梁. 青藏地区未来百年气候变化. 高原气象, 2003, 22(5): 451~457.
- [10] 林振耀, 赵断寒. 青藏高原气温降水变化的空间特征. 中国科学(D 辑), 1996, 26(4): 354~358.
- [11] 冯松, 姚檀栋, 江源. 青藏高原近 600 年的温度变化. 高原气象, 2001, 20(1): 105~108.
- [12] 马晓波, 李栋梁. 青藏高原近代气温变化趋势及突变的分析. 高原气象, 2003, 22(5): 507~512.
- [13] 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.
- [14] Ying Li a, Murray Lark, Dominic Reeve. Multi-scale variability of beach profiles at Duck: A wavelet analysis. Coastal Engineering, 2005, 52(12): 1133~1153.
- [15] Frantziskonis G. Wavelet-based analysis of multiscale phenomena: Application to material porosity and identification of dominant scales. Probabilistic Engineering Mechanics, 2002, 17(4): 349~357.
- [16] Andreo B, Jiménez P, Durán J J, et al. Climatic and hydrological variations during the last 117~166 years in the south of the Iberian Peninsula, from spectral and correlation analyses and continuous wavelet analyses. Journal of Hydrology, 2006, 324(1~4): 24~39.
- [17] 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. 中国科学(D 辑), 2004, 34(12): 1176~1183.
- [18] 路云阁, 李双成, 蔡运龙. 近 40 年气候变化及其空间分异的多尺度研究——以内蒙古自治区为例. 地理科学, 2004, 24(4): 432~438.
- [19] 张军涛, 李哲, 郑度. 温度与降水变化的小波分析及其环境效应解释——以东北农牧交错区为例. 地理研究, 2002, 21(1): 55~60.

- [20] 李潮流, 康世昌. 青藏高原不同时段气候变化的研究综述. 地理学报, 2006, 61(3): 327~ 335.
- [21] 李林, 李凤霞, 郭安红, 朱西德. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究. 自然资源学报, 2006, 21(1): 79~ 85.
- [22] 杨建平, 丁永建, 沈永平, 等. 近 40a 来江河源区生态环境变化的气候特征分析. 冰川冻土, 2004, 26(1): 7~ 16.
- [23] 王根绪, 李琪, 程国栋, 等. 40a 来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应. 冰川冻土, 2001, 23(1): 346~ 351.
- [24] 李林, 朱西德, 汪青春, 等. 三江源地区气候变化及其对生态环境的影响. 气象, 2004, 30(8): 18~ 21.
- [25] 徐宗学, 和宛琳. 近 40 年黄河源区气候要素分布特征及变化趋势分析. 高原气象, 2006, 25(5): 906~ 913.

## Multi-scale study on climate change for recent 50 years in Dari County in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers

CHEN Ke-long<sup>1,2</sup>, LI Shuang-cheng<sup>2</sup>, ZHOU Qiao-fu<sup>2</sup>, XIAO Jing-yi<sup>1</sup>

(1. Department of Geography and Resource Environment, Qinghai Normal University, Xining 810008, China;

2 College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Wavelet analysis, known as “Mathematical Microscope”, has become a new mathematical approach in recent 20 years, being applied widely in many fields. Especially, with the significant advantage of characteristic of variable scale, it is suitable and effective enough to demonstrate the multi-scale traits of climate change, such as temporal series of temperature and precipitation. Accordingly, in this paper, Mexican Hat Wavelet is used to analyze the multi-scale characteristics of the climate change in Dari County, based on the temperature and precipitation of instrument data for 588 months during 1956~ 2004. Consequently, the periods and turning points of temperature and precipitation series in different time-scale are revealed, and the primary periods determined are 3 years or 4 years in a small scale and 16 years in a large scale. Meanwhile, the wavelet coefficients patterns exhibit a probable increasing trend in temperature and humidity in the following years. In the past 50 years, the temperature climbed to peak values for 3 times with the maximum at the beginning of the 21st century, and the precipitation is 2 times with the maximum in the early years of the 1980s. In general, the tendency of temperature and precipitation in Dari County is approximately consistent with that on the Tibetan Plateau and the source regions of the Yangtze and Yellow rivers except for some local lags in several periods. Changes in underdecadal scales are nested into complicated background in larger scales. The turning points varied along with the time-scale. According to the above analysis, we can conclude that there is a significant advantage of wavelet analysis in revealing the multi-scale characteristics, the primary period, and forecasting the trend of climate change in the following years.

**Key words:** climate change; scale effect; wavelet analysis; Dari County in Qinghai Province

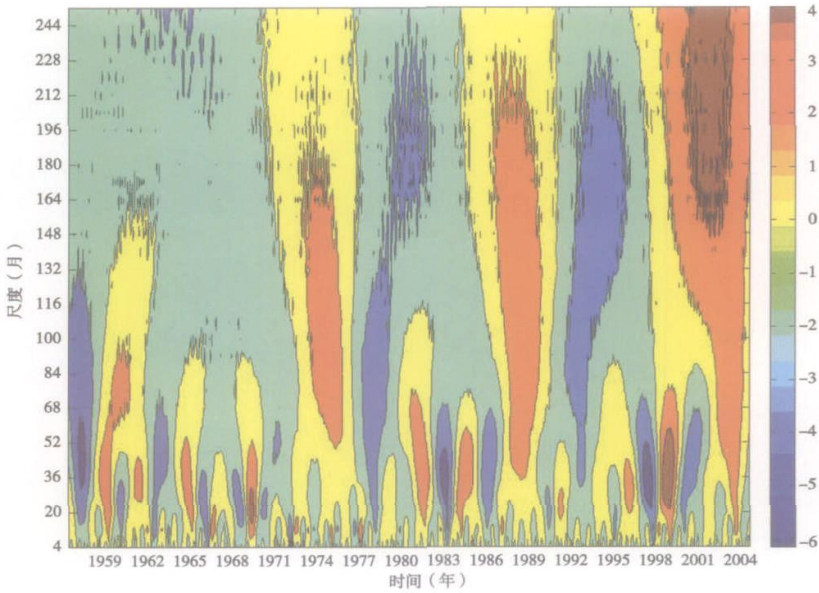


图 3 青海省达日县 1956~2004 年逐月温度距平序列小波系数图

Fig.3 Wavelet coefficients pattern of monthly temperature anomalies during 1956~2004 in Dari County, Qinghai Province

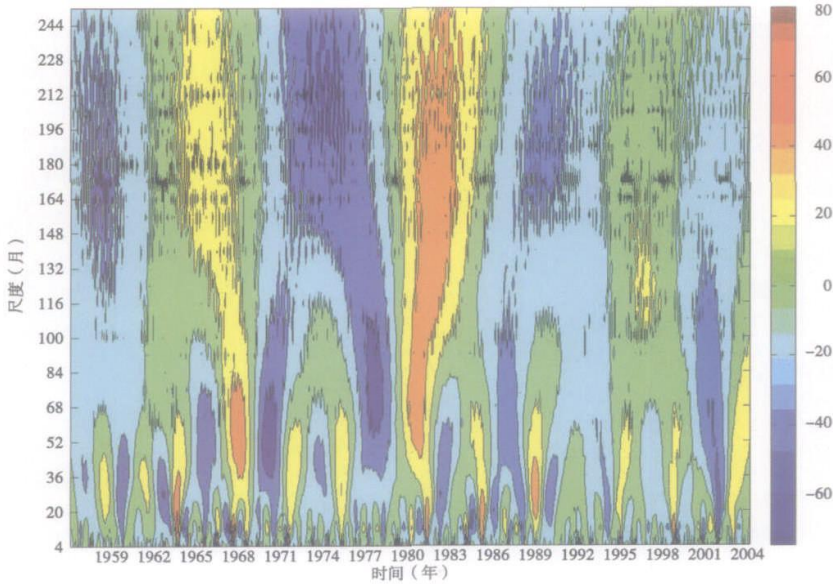


图 5 青海省达日县 1956~2004 年逐月降水距平序列小波系数图

Fig.5 Wavelet coefficients pattern of monthly precipitation anomalies during 1956~2004 in Dari County, Qinghai Province