

## 基于小波变换的三江平原井灌区主汛期降水序列多时间尺度分析\*

刘东<sup>1,2</sup>, 付强<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学 农林经济管理博士后科研流动站, 哈尔滨 150030)

**摘要:**近些年来,由于水田面积迅速增加,导致三江平原井灌水稻区地下水位普遍下降,“吊泵”、局部超采现象时有发生,因此,三江平原的地下水资源平衡急需恢复。为解决上述问题,以 853 农场为例,应用小波理论,对 853 农场实测主汛期降水时间序列的多时间尺度变化特征及突变特征进行分析,并与实测年降水序列变化特征进行了对比分析。结果表明:853 农场主汛期降水序列具有 3 a, 6 a, 29 a 以及 13 a 左右 4 个主周期,同时,主汛期降水序列与年降水序列的主周期具有较好的一致性。该研究结果为 853 农场乃至整个三江平原充分利用天然降水、地下水资源的恢复及可持续利用提供了科学依据。

**关键词:**三江平原; 井灌水稻; 主汛期降水序列; 小波变换; 多时间尺度分析

中图分类号: P426. 614

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)06-0042-04

## Multi-Time Scales Analysis of Main Flood Season Precipitation Series Based on Wavelet Transform in Area of Well-Irrigation in Sanjiang Plain

LIU Dong<sup>1,2</sup>, FU Qiang<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Postdoctoral Scientific Research Mobile Station of Agriculture and Forestry Economic Management, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** The rapid increase of paddy field acreage has led to widely descending of groundwater level in area of well irrigation paddy in Sanjiang Plain in recent years. More and more ‘hanging pump’ and partial overpumping have been occurring in area of well irrigation paddy. Therefore, the groundwater resource balance in Sanjiang Plain need to be recharged urgently. In order to solve above mentioned problems, the authors took Farm 853 as example, analyzed the multi-time scales variation characteristics and jump characteristics of actual observation main flood season precipitation time series in Farm 853 through using the wavelet theory, and the analysis results of main flood season precipitation series were compared with the variation characters of annual precipitation series. The results showed main flood season precipitation series of Farm 853 had four main periods which were 3, 6, 29 and 13 years around, and the main periods of main flood season precipitation series and annual precipitation series had better consistency. The study can provide scientific gist for fully utilizing natural precipitation, groundwater resource recharge and sustainable utilization in Farm 853 so much as the entire Sanjiang Plain.

**Key words:** Sanjiang Plain; well irrigation paddy; main flood season precipitation series; wavelet transform; multi-time scales analysis

三江平原位于黑龙江省东部,是国家重要的商品粮基地。三江平原地势低平,大部分地区土壤质地黏重,排水能力差,很容易形成涝灾而减产<sup>[1-2]</sup>。从 20 世纪 80 年代开始,三江平原开始种植水稻,采用“以稻治涝”的方式改良低湿地,取得了显著的效益。从 1981-2000 年,三江平原水稻种植面积从 7 万 hm<sup>2</sup> 激增到 95.3 万 hm<sup>2</sup> (其中井灌水田占 69%)<sup>[3]</sup>。由于井灌水田面积迅速增加,地下水开采量也迅

速增加,再加上人为浪费严重以及管理不善,使得三江平原地下水位普遍下降,“吊泵”和局部超采现象时有发生。地下水水位下降导致三江平原产生了地下水降落漏斗形成、地面塌陷、水质恶化等一系列水环境问题,因此,应大力加强三江平原地下水补给研究。大气降水是地下水最主要的自然补给来源,但仅靠降水自然补给很难恢复地下水的动态平衡,因此,应大力加强三江平原地下水人工补给研究。而主汛期

\* 收稿日期: 2008-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(No. 30400275)

作者简介: 刘东(1972-),男,黑龙江安达人,博士,副教授,主要从事农业水土资源系统分析与优化利用方面研究。E-mail: liu72dong@126.com

通信作者: 付强(1973-),男,辽宁锦州人,博士,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源系统分析与优化利用方面研究。

降水是三江平原地下水人工补给的重要影响因素,因此,研究三江平原井灌区主汛期降水的多时间尺度变化特征,分析其旱涝变化规律,对于节约地下水资源、地下水资源的恢复以及农业和地下水资源的可持续利用具有重要的意义。

目前,国内外研究降水多时间尺度变化特征的传统方法主要有 Fourier 分析、滤波分析、时间序列分析等,这些方法的研究基础均为单一时间尺度,在时域和频域上不具有局部化性质,对突变点的诊断缺乏数学上的严谨性<sup>[4]</sup>,因此不能全面反映降水的多时间尺度变化特征。而 20 世纪 80 年代初发展起来的小波分析,是泛函分析、Fourier 分析、样条分析、调和分析和数值分析的最完美的结晶,它具有时频多分辨功能和数学意义上的严格突变点分析功能,可以对信号进行多时间尺度细化分析<sup>[4,5]</sup>,因此优于上述传统方法,近些年来广泛应用于气候多时间尺度分析研究中。尝试以 853 农场为例,采用小波分析理论对 853 农场 47 a 主汛期降水时间序列的多时间尺度特征进行诊断分析,揭示 853 农场主汛期降水的周期特征和旱涝变化趋势,为地下水恢复等区域节水农业关键问题研究提供科学依据。

## 1 小波分析基本原理

### 1.1 小波函数

小波函数是指具有震荡特性、能够迅速衰减到零的一类函数,即  $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ 。小波函数有多种,在小波分析中经常采用 Marr 小波、Morlet 小波、Wave 小波等<sup>[6,9]</sup>。本文选用在时域和频域局部性都较好的 Morlet 小波,其函数为

$$\psi(t) = e^{it} e^{-t^2/2} \quad (1)$$

式中:  $c$ ——常数;  $i$ ——表示虚数。

Morlet 小波是由一个周期函数经过 Gaussian 函数平滑而得到的,所以它的尺度因子  $a$  与 Fourier 变换中的周期有一一对应的关系:  $T = [4\pi/(c + \sqrt{2+c^2})] \cdot a_0$ 。当取常数  $c = 6.2$  时,  $t = 1.00057a \approx a$ ,所以 Morlet 小波可以用来进行周期分析。

### 1.2 小波变换

小波变换是小波分析的核心。对于给定满足一定条件的小波函数  $\psi(t)$ , 时间序列  $f(t) \in L^2(R)$  的连续小波变换定义为<sup>[7,9-10]</sup>

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

式中:  $W_f(a, b)$ ——小波变换系数;  $a$ ——尺度因子,反映小波的周期长度;  $b$ ——时间因子,反映时间上的平移。

在实际应用中,水文时间序列大多是离散的。例如  $f(k\Delta t)$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $\Delta t$  为取样时间间隔), 则式(2)的离散形式为<sup>[7-11]</sup>

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{k=1}^n f(k\Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (3)$$

$W_f(a, b)$  能同时反映时域参数  $b$  和频域参数  $a$  的特征,它是时间序列  $f(t)$  或  $f(k\Delta t)$  通过单位脉冲响应的滤波器的输出。当  $a$  较小时,对频域的分辨率较低,而对时域的分辨率较高;当  $a$  较大时,对频域的分辨率较高,而对时域的分辨率较低。因此,小波变换能实现窗口的大小固定、形状可变

的时频局部化。

根据  $W_f(a, b)$  随  $a$  和  $b$  的变化,可以绘出以  $b$  为横坐标,  $a$  为纵坐标的关于  $W_f(a, b)$  的二维等值线图,称为小波变换系数图。通过分析小波变换系数图,可以得到水文时间序列在小波变换域中的小波变化特征,从而揭示出水文时间序列的多时间尺度演变特征和突变特征。

### 1.3 小波方差

将时间域上关于  $a$  的所有小波变换系数的平方进行积分,即为小波方差。对于离散水文时间序列,小波方差可以采用下式计算<sup>[12-13]</sup>。

$$Var(a) = \frac{1}{n} \sum_{b=1}^n |W_f(a, b)|^2 \quad (4)$$

式中:  $n$ ——样本数;  $|W_f(a, b)|^2$ ——小波变换系数模平方。

小波方差随尺度  $a$  变化的过程,称为小波方差图,该图能反映水文时间序列中所包含的各种尺度(即周期)的波动及其强弱(能量大小)随尺度变化的特性,图中各个峰值分别对应着各个显著周期。因此,通过小波方差图可以很方便地确定一个时间序列中存在的主要时间尺度(即主周期)。

## 2 应用实例

853 农场位于黑龙江省三江平原东部,隶属于黑龙江省农垦总局红兴隆分局,土地总面积 1 165.7 km<sup>2</sup>,其中耕地面积 581.35 km<sup>2</sup>。853 农场是一个以种植麦类、豆类、玉米、水稻为主的大型机械化国营农场,从 1991—2000 年,853 农场的水田面积由 0.61 万 hm<sup>2</sup> 激增到 2.67 万 hm<sup>2</sup> (72% 为井灌水稻)。据调查,853 农场从 1991—1998 年 8 a 间,地下水位年平均降幅为 0.3 m/a,多年平均地下水可开采资源量为 0.418 6 亿 m<sup>3</sup>/a,而 2000 年地下水开采量为 0.804 6 亿 m<sup>3</sup>/a,1999—2004 年 6 a 间,地下水位年平均降幅为 0.7 m/a 左右。地下水位的持续下降已经严重破坏了当地地下水资源的供需平衡。为了节约地下水资源,实现地下水资源的可持续利用,本文以 853 农场为例,根据上述小波分析理论,对 853 农场主汛期降水实测序列资料进行多时间尺度分析,以了解其不同时间尺度下的详细结构和变化趋势。

### 2.1 资料来源及处理

从 853 农场气象台收集到该农场 1959—2005 年的主汛期降水资料( $n = 47$ )。为处理方便,将主汛期降水实测序列资料进行距平(中心化)处理,并绘制主汛期降水距平序列变化曲线,见图 1。

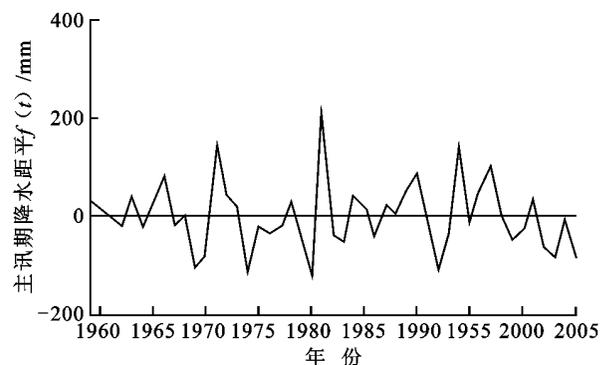


图1 853 农场主汛期 1959—2005 年降水距平变化曲线

### 2.2 主汛期降水距平序列小波变换

按照前述方法,借助于 matlab7.0 编程,计算 853 农场主汛期降水距平序列  $f(k\Delta t)$  ( $k=1, 2, \dots, 47; \Delta t=1$ ) 的小波变换系数  $W_f(a, b)$ 。

由于 Morlet 小波属于复数小波,因此其小波变换系数包括实部和虚部两个部分。由文献[12]、[14]和[15]可知,小波变换的模平方与函数  $f(t)$  在其小波变换域中的能量成正比,就是信号在  $a, b$  时的小波频谱能量,因此小波变换模平方就可以用来表示特征时间尺度信号能量的强弱。而不

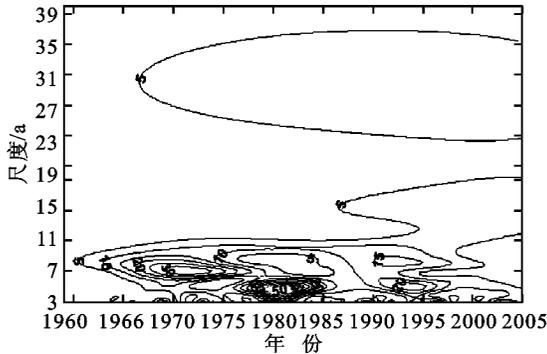


图 2 853 农场主汛期降水距平序列小波变换系数模平方 ( $\times 10^3$ ) 等值线

#### 2.3.1 小波变换系数模平方时频特性分析

由图 2 可以看出不同时间尺度信号能量分布的强弱,其中 1~4 a 时间尺度信号能量变化最强,主要发生在 1977-1986 年,振荡中心在 1981 年;4~7 a 时间尺度信号能量变化也较强,主要发生在 1965-1978 年,振荡中心在 1971 年左右;23~37 a 时间尺度信号主要发生在 1967-2005 年;1~2 a 时间尺度信号主要发生在 1969-1970 年、1971-1975 年、1983-1987 年、1988-1991 年、2002-2005 年;其余时间尺度信号能量变化则较弱。

#### 2.3.2 小波变换系数实部时频特性分析

由图 3 可以看出不同时间尺度的变化、突变点的分布及其位相结构,其中,1~4 a、4~7 a、23~37 a 时间尺度表现最为明显,正负位相交替出现,其中心时间尺度为 3 a、6 a 和 29 a 左右。另外,12~15 a 时间尺度也有表现,其中心时间尺度为 13 a 左右。为了进一步说明 853 农场主汛期降水距平序列旱、涝交替变化的波动特性,在图 3 上固定时间尺度  $a$  值(分别取  $a=3, 6, 13, 29$ ),作平行于  $b$  轴的切割线,在切割线上取点,作小波变换系数  $W_f(a, b)$  的实部(表示为  $R[W_f(a, b)]$ ) 随时移  $b$  变化的过程线,见图 4。

图 4 给出了不同时间尺度小波变换系数实部变化过程,现以 6 a 时间尺度为例分析降水量旱涝变化及正负位相转变点的位置。由图 4 中 6 a 时间尺度小波变换系数实部变化过程,可以看出,1961 年以前、1964-1967 年、1970-1973 年、1976-1978 年、1982-1984 年、1988-1990 年、1994-1997 年、2000-2003 年为正位相,表示降水量偏多;而 1962-1963 年、1968-1969 年、1974-1975 年、1979-1981 年、1985-1987 年、1991-1993 年、1998-1999 年及 2004 年以后为负位相,表示降水量偏少;旱涝突变点在 1961 年、1964 年、1967 年、1970 年、1973 年、1976 年、1979 年、1981 年、1985 年、1987 年、1991 年、1994 年、1997 年、2000 年和 2003 年。

同特征时间尺度信号在不同时间上的分布和位相两方面的信息则可以用小波变换的实部来表示。因此,主汛期降水距平序列小波变换系数  $W_f(a, b)$  的模平方和实部就蕴含着序列随着时间尺度  $a$  (即周期  $T$ ) 和时移  $b$  而变化的特征信息。

### 2.3 主汛期降水距平序列时频分析

按照前述方法绘制 853 农场主汛期降水距平序列小波变换系数  $W_f(a, b)$  的模平方等值线图(见图 2)和实部等值线图(见图 3),在此基础上进行主汛期降水距平序列的时频变化分析。

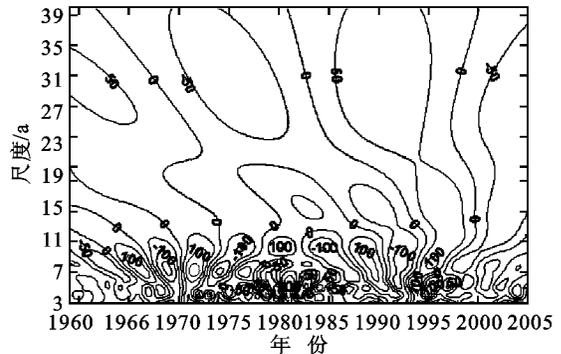


图 3 853 农场主汛期降水距平序列小波变换系数实部时频分布

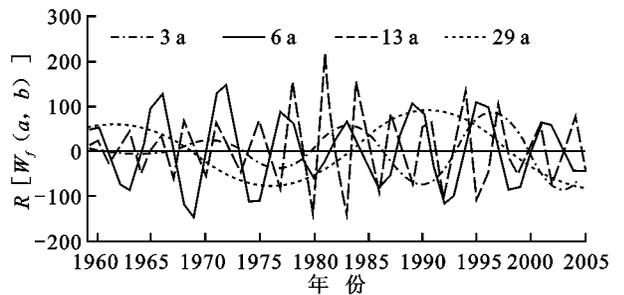


图 4 不同尺度下主汛期降水距平序列 Morlet 小波变换实部变化过程

### 2.4 主汛期降水序列主要周期分析

853 农场主汛期降水序列随时间变化的主周期采用小波方差图来进行分析研究。利用已经求解出来的不同尺度下的小波变换系数,按照前述方法,通过计算机编程,绘制 853 农场主汛期降水距平序列小波方差图,见图 5。从图 5 可以看出,小波方差的主要峰值分别出现在尺度  $a=3, 6, 13, 29$  处,第一峰值为尺度  $a=3$  所对应的小波方差,说明 3 a 左右的周期振荡最强,为第 1 主周期,第 2、第 3、第 4 主周期分别为 6 a、29 a 和 13 a。为了识别上述主周期是否具有统计意义,还需要进行显著性检验。经过计算,853 农场主汛期降水序列的一阶自相关系数  $r(1) = -0.0845 < 0.1$ ,所以采用白噪声谱对小波方差进行检验<sup>[16-17]</sup>,见图 5。由图 5 可以看出,只有 3 a 和 6 a 左右的周期超过了 95% 置信水平,因此,853 农场主汛期降水序列真正的主周期为 3 a 和 6 a 左右。13 a 和 29 a 左右的小波方差虽然也具有一定峰值,但已不明显。

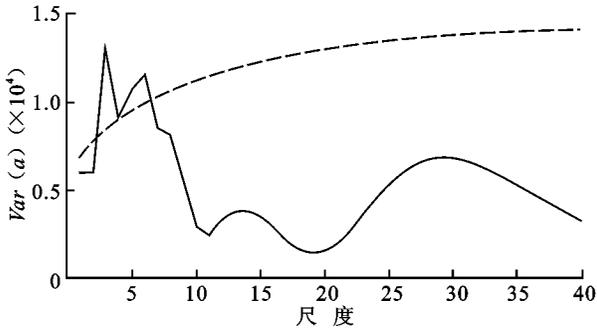
### 2.5 主汛期降水序列变化趋势分析

图 4 已经给出各主周期小波变换系数实部变化过程,通过图 4 即可分析出各主要时间尺度下 853 农场主汛期降水序列的变化趋势。分析较小尺度 3 a 和 6 a 以及较大尺度 13

a 的变化趋势可以看出, 2006 年, 853 农场的主汛期降水量将处于偏少期, 而 2007 年以后将进入降水偏多期; 分析较大尺度 29 a 的变化趋势可以看出, 2006-2012 年, 853 农场的主汛期降水量将处于偏少期, 而 2013 年以后大约 15 a 内, 853 农场的主汛期降水量将处于偏多期。

### 3 讨论

采用同样的方法对 853 农场 1959-2005 年年降水序列



实线为小波方差, 虚线为 95% 置信水平

图 5 853 农场主汛期降水距平序列小波方差

### 4 结论

(1) 小波分析可以展现水文时间序列的精细结构, 为分析水文时间序列的多时间尺度变化特征及突变特征提供了一条新的途径。

(2) 通过小波分析, 识别出 853 农场主汛期降水序列具有 3 a, 6 a, 29 a 以及 13 a 左右 4 个主周期。

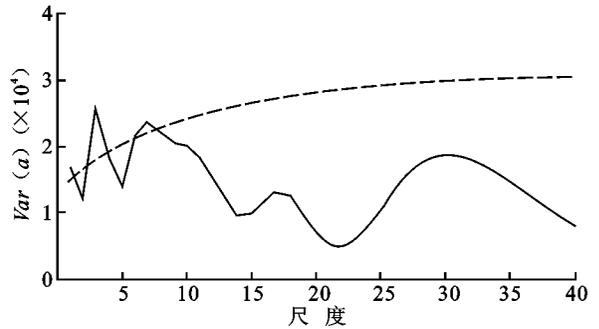
(3) 通过对比分析发现, 853 农场主汛期降水序列与年降水序列具有相似的主周期, 因此, 该地区主汛期降水量的大小对于年降水量的变化有重要影响。

(4) 通过小波分析, 揭示出未来 853 农场主汛期降水的大致变化趋势, 可以充分利用降水偏多期的雨洪资源, 积极开展地下水人工补给, 加快地下水资源的恢复, 从而实现当地地下水资源的可持续利用。

#### 参考文献:

- [1] 张景山, 王秀华. 三江平原地下水开发利用的有效途径[J]. 水利水电科技进展, 1999, 19(5): 66-67.
- [2] 李士峰, 崔广臣, 杨国顺. 三江平原洪涝灾害及治理措施[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(1): 65-67.
- [3] 王韶华, 田园. 三江平原地下水埋深变化及成因的初步分析[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 64-64.
- [4] 陈怀亮, 胡鹏, 张雪芬, 等. 农业气候资源多时间尺度分析: 以郑州市小麦玉米为例[J]. 自然资源学报, 2005, 20(6): 814-821.
- [5] 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.
- [6] 欧素英, 陈子燊. 小波变换在相对海平面变化研究中的应用[J]. 地理科学, 2004, 24(3): 358-364.

的多时间尺度特征进行分析(分析过程略), 并绘制小波方差图, 见图 6。从图 6 可以看出, 853 农场年降水序列小波方差的主要峰值分别出现在尺度  $a=3, 7, 17, 30$  处, 第一峰值为尺度  $a=3$  所对应的小波方差, 说明 3 a 左右的周期振荡最强, 为第一主周期, 第二、第三、第四主周期分别为 7 a, 30 a 和 17 a, 这与上述 853 农场主汛期降水序列周期分析结果 3 a, 6 a, 29 a 以及 13 a 非常接近, 说明 853 农场的主汛期降水控制着全年降水。



实线为小波方差, 虚线为 95% 置信水平

图 6 853 农场年降水距平序列小波方差

- [7] 刘忠阳, 王勇, 丁园圆, 等. 郑州近 54 年降水变化的多时间尺度分析[J]. 气象科技, 2005, 33(suppl.): 123-126.
- [8] Ippolitov I I, Kabanov M V, Loginov S V. Wavelet analysis of hidden periodicities in some indexes of solar activity[J]. Russian Physics Journal, 2002, 45(11): 1086-1092.
- [9] 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: 115-141.
- [10] 吴东杰, 王金生, 滕彦国. 小波分解与变换法预测地下水位动态[J]. 水利学报, 2004(5): 39-45.
- [11] Subasi A, Kiyimik M K, Akin M, et al. Automatic recognition of vigilance state by using a wavelet-based artificial neural network[J]. Neural Comput & Applic, 2005, 14(1): 45-55.
- [12] Mi X C, Ren H B, Ouyang Z S, et al. The use of the Mexican Hat and the Morlet wavelets for detection of ecological patterns[J]. Plant Ecology, 2005, 179(1): 1-19.
- [13] 刘建梅, 王安志, 裴铁璠, 等. 杂谷脑河径流趋势及周期变化特征的小波分析[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(4): 49-55.
- [14] 张少文, 丁晶, 廖杰, 等. 基于小波的黄河上游天然年径流变化特性分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2004, 36(3): 32-37.
- [15] 崔凤林, 谢春来, 付雷, 等. 小波变换时频能量谱技术在地震层序划分中的应用[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(4): 397-399.
- [16] Torrence C, Compo G P. A Practical Guide to Wavelet Analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- [17] 郝立生, 毕宝贵, 姚学祥. 太阳活动变化分析[J]. 空间科学学报, 2007, 27(4): 265-270.