

# 我国松花江流域和辽河流域降水的长期 变化规律和未来趋势分析\*

李 想<sup>1)</sup> 李维京<sup>2)</sup> 赵振国<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院,北京 100081) <sup>2)</sup>(国家气候中心,北京 100081)

## 摘 要

利用1881~2002年我国东北地区的月、季降水资料,采用历史曲线分析、功率谱分析、小波变换等方法,重点分析了松花江流域和辽河流域降水的长期变化规律。结果表明:松花江流域和辽河流域的降水都存在着明显的年代际变化,松花江流域降水以27~30年周期为主,辽河流域降水周期比松花江流域略长,大概为35~38年左右。根据降水自身演变规律及自回归方法预测的结果,估计未来5~10年,松花江流域仍将处于少雨期,辽河流域少雨期维持时间可能会稍长一些。

关键词:降水 年代际变化 小波分析 均值突变

## 引 言

水资源是生命的源泉,是生态系统不可缺少的要素,同土地、能源等构成人类经济与社会发展的基本条件。随着人口的增长与经济发展,我国对水资源的需求量也不断增加,水资源的危机也成为越来越受关注的资源环境问题之一<sup>[1]</sup>。为了满足可持续发展战略的要求,适应经济社会发展和水资源形势的变化,国家对未来水资源的总量和分布进行了综合规划,本文则重点分析了松花江流域和辽河流域水资源的现状及未来变化趋势。

松花江和辽河同属中国重要江河。松花江是黑龙江最大的支流,全长1900 km,松花江流域面积约55 km<sup>2</sup>,超过珠江流域面积,占东北三省总面积的69.32%,径流总量759亿 m<sup>3</sup>,超过了黄河的径流总量。辽河全长1345 km,发源于七老图山脉的光头山,辽河流域面积约22万 km<sup>2</sup>。松花江流域和辽河流域地处温带、寒温带大陆性季风气候区,冬季寒冷而漫长,夏季炎热多雨,春季干燥多风。多年平均降水量300~950 mm,时空分布不均匀,降水多集中在7~8月份,约占全年降水的50%以上,6~9月汛期降水占全年降水的70%以上,连续多雨和连续少雨的阶段性变化比较明显,降水的年际变化亦较大,最大与最小年降水量之比有的达3倍以上,且有连续年多雨和少雨的交替现象<sup>[2~3]</sup>。自20世纪90年代中后期以来,从降水量上看,松花江流域和辽河流域持续降水量低于多年平均,两个流域均进入一个相对枯水时期,另一方面,随着松花江流域和辽河流域国民经济的发展,各方面对松花江流域和辽河流域水资源的需求大大增加,流域内的人类活动加剧,流

\* 国家自然科学基金项目(40375025)和全国水资源综合规划专题研究“气候变化对中国水资源情势影响的综合分析”共同资助。

2004-09-21 收到,2005-03-09 收到再改稿。

域下垫面自然状态也随之发生变化,导致松花江流域和辽河流域水资源供需矛盾日益突出,给社会主义现代化建设事业和人民的正常生活带来了很大的影响<sup>①②</sup>。与此同时,近百年来,地球气候正经历着以全球变暖为主要特征的显著变化,在这个大背景下,自20世纪90年代以来,松花江流域和辽河流域的年平均气温持续高于多年平均,尤其是冬季温度上升更为显著,在这种气候变暖的条件下,导致水分循环加强和土壤侵蚀加剧,并对区域性降水产生重大影响,使松花江流域和辽河流域的蒸发量增大,这些因素对松花江流域和辽河流域的生态系统和社会经济产生了并将继续产生重大的影响<sup>[4]</sup>,因此干旱缺水自20世纪90年代中后期以来成为松花江流域和辽河流域的主要自然灾害<sup>[5~6]</sup>。

大气降水是陆地水资源的初始来源,而关于东北地区夏季降水的周期变化,孙林海等曾经从旱涝成因和年代际变化等方面作过一些分析<sup>[7]</sup>,但更为全面系统的研究并不多见。本文利用1881~2002年的降水资料,通过功率谱分析、小波变换和历史曲线分析等多种分析方法,分析松花江流域和辽河流域降水的显著周期,重点研究年代际振荡特点,并根据其周期性对松花江流域和辽河流域降水的长期演变规律分析未来10~20年的变化趋势。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本文对松花江流域和辽河流域的降水进行研究所用资料是时间长度不同的两个资料序列。短时间序列的降水资料是由国家气候中心分析整理的1951~2002年我国743站月降水量资料中选出位于松花江流域和辽河流域的107站资料,资料比较详细,站点范围基本上覆盖了松花江流域和辽河流域。长时间序列资料是由赵振国、陈国珍等人整理的1881~2000年我国71站季节降水资料中选出,由于历史原因,该资料站点数目不多,覆盖面不完全,但这种长序列的资料对松花江流域和辽河流域的降水具有较好的代表性,并且120年左右的长时间序列的降水资料,对于研究降水的周期性和阶段性具有非常重要的作用。之后,我们取出长序列中1951~2002年这段时间的资料,与同流域的短时间序列资料进行相关运算,发现松花江流域的相关系数达到0.85,辽河流域的相关系数达到0.91,即两套资料的相关性非常高,说明了长时间序列的资料也能准确地反映出各自流域的降水趋势。图1为辽河流域两时间序列资料累积年降水距平百分率对比示意图,从图中可以看出长短两时间序列的资料所反映的降水趋势基本一致。

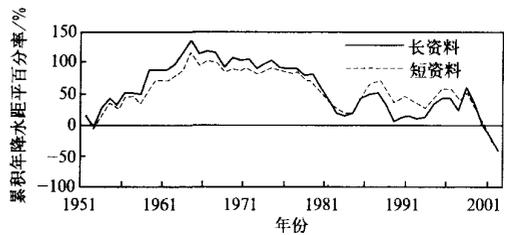


图1 1951~2002年辽河流域长时间序列和短时间序列年降水距平百分率对比

① 赵振国. 东北地区夏季降水的特征及预报. 国家气候中心“技术报告”, No.8816, 1988.

② 张培群, 龚建东, 赵振国. 松花江、嫩江、辽河流域夏季旱涝成因及预测方法研究. 气候变化通讯, 国家气候中心, 2002, (3): 64~72.

由于 1881 ~ 1950 年的长序列资料只有季降水, 所以我们在求取 1881 ~ 2002 年长序列年降水量时, 只能以上一年冬季和当年春、夏、秋季的 4 个季降水量之和来代表当年的年降水, 这样年降水量实际上是上一年 12 月与当年 1 ~ 11 月这 12 个月的降水量之和。这与我们平时所说的年降水量概念有些差异, 特此说明。在获得上述站点资料之后, 我们求出降水的距平百分率、累积距平百分率, 并对资料进行 5 年滑动平均。

## 1.2 研究方法

本文采用功率谱分析方法研究松花江流域和辽河流域降水周期性, 将功率谱估计和标准谱绘成曲线图; 根据绘出的曲线确定多年降水的显著周期, 并对得出的结果进行显著性检验。为了进一步研究降水的阶段性和周期变化规律, 对 1881 ~ 2002 年长时间序列降水资料进行了小波变换分析<sup>[8-10]</sup>。小波变换具有傅氏变换的特征, 是 Fourier 分析方法的突破性进展, 特别是应用到均值突变的检测中, 获得了一系列有意义的结论, 成为气象资料结果分析的一个有力工具。

小波分析是在 Fourier 变换的基础上引入窗口函数, 其变换公式为:

$$W_f(t_0, a) = |a|^{-1/2} \int f(t) g\left(\frac{t-t_0}{a}\right) dt \quad (1)$$

式(1)中,  $t_0$  是平移因子, 表示波动在时间上的平移, 其变化范围是  $0 \sim n$ ;  $a$  称为尺度参数, 反映了小波的周期长度,  $1/a$  相当于频率,  $g(t)$  为母小波函数。

取墨西哥帽状小波作母小波函数, 其表达式为:

$$g(t) = (2/\sqrt{3})\pi^{-1/4}(1-t^2)e^{-t^2/2} \quad (2)$$

取 Morlet 小波作母小波函数, 其表达式为:

$$g(t) = ce^{-t^2/2}\cos(5t) \quad (3)$$

通过小波变换, 可以得到时间系列关于要素(如平均值、频率、振幅)的变化特征。我们应用墨西哥帽状小波分析得到降水量的均值突变年份, 并对突变年份采用  $t$  检验:

$$t = \frac{|a_{ver1} - a_{ver2}|}{\sqrt{(n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2)/(n_1 + n_2 - 2)} \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}} \quad (4)$$

式(4)中,  $a_{ver1}$  是第 1 组样本的平均值,  $a_{ver2}$  是第 2 组样本的平均值,  $n_1$  是第 1 组的样本量,  $n_2$  是第 2 组的样本量,  $s_1^2$  是第 1 组样本的方差,  $s_2^2$  是第 2 组样本的方差。

若  $t > t_\alpha(n_1 + n_2 - 2)$ , 则认为该点是均值突变点; 否则, 该点不是均值突变点。

## 2 年代际振荡

### 2.1 历史曲线和功率谱分析

图 2 为松花江流域和辽河流域年降水距平百分率曲线。从图 2a 和图 2b 中可以看出, 两个流域降水的累积曲线的演变趋势非常接近: 从 20 世纪 50 年代到 60 年代中期, 曲线处于上升阶段, 表明松花江流域和辽河流域处于多雨期; 60 年代后期到 80 年代初期, 曲线呈下降趋势, 表明松花江流域和辽河流域以少雨占优势; 从 80 年代初期到 90 年代中后期, 两曲线的变化趋势有所不同, 松花江流域以上升为主, 表明松花江流域又处于多雨期, 而辽河流域这一时期降水处于波动状态, 表明辽河流域处于多、少雨交替阶段; 从 90

年代后期开始,两条曲线都呈现下降趋势,表明两个流域都进入了少雨期。

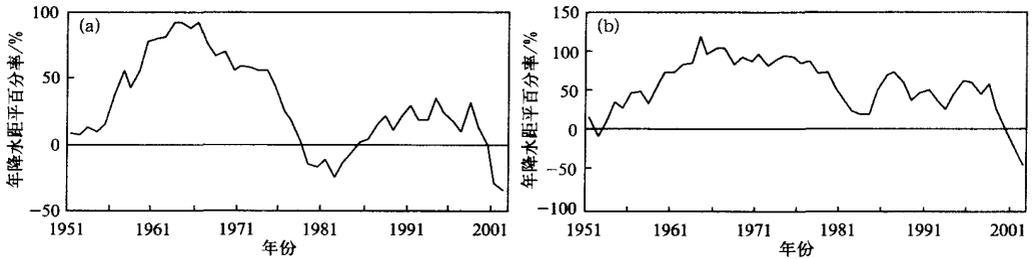


图2 1951~2002年松花江流域(a)辽河流域(b)年降水距平百分率变化曲线

从松花江流域年降水距平百分率功率谱分析结果(图3)可以看出,有3个波动的功率谱值通过了检验,这3个波动对应的周期分别是27年左右,3.5年和4.2年。周期显著性检验的具体做法如下:首先求出落后时间步长为1的自相关系数  $r(1)$ ,利用  $t$  分布检验  $r(1)$  是否显著,确定自相关系数的临界值,经检验  $r(1) = 0.2$ ,故假设总体谱是白色噪音谱,计算功率谱平均谱  $\bar{s} = 0.02439$ ,由于白色噪音谱  $s_0 = 1$ ,故只计算它的95%置信限的上界

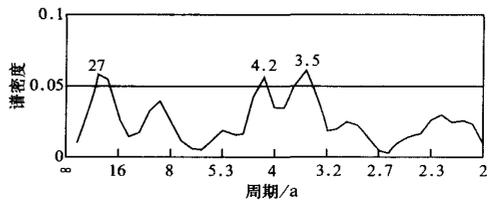


图3 松花江流域1881~2000年年降水量功率谱

$$s_{01}^* = \bar{s} \times \left| \frac{\chi_{0.05}^2}{v} \right|$$

再查置信度为95%,自由度为5.5的  $\chi^2$  分布,得  $\chi_{0.05}^2 = 11.07$ ,代入上式,得  $s_{01}^* = 0.04909$ ,通过比较发现,周期为27年,3.5年和4.2年对应的功率谱值超过了0.04909,为显著周期。即松花江流域的多年降水除了存在周期为3~4年的波动外,还存在着27年左右的长时间的周期振荡。这与图2a松花江流域年降水距平百分率曲线所反映出的年降水量的演变趋势基本吻合。

### 2.2 Morlet小波分析

取 Morlet 小波作为母小波函数,对1881~2000年松花江流域和辽河流域的年降水资料进行了小波功率谱分析,结果见图4。

由松花江流域年降水量小波功率谱分析图(图4a)可以看出,1881~2000年松花江流域年降水量始终存在着1个23~30年左右的周期,这个长周期在20世纪50年代以前以23~25年的周期为主,之后周期长度有增加的趋势,从50年代开始,松花江流域的降水周期演变为27~30年左右,这与前面利用功率谱和历史曲线的分析结果大体相符;另外,松花江流域降水存在着1个3~4年左右的短周期变化;在1881~1905年松花江流域还存在1个8年左右的短周期变化。

由辽河流域年降水量小波功率谱分析图(图4b)可以看出,辽河流域的年降水也以3个不同尺度的周期为主:①2~3年的周期,这个周期的波动的功率谱在20世纪的前10

年和 50 年代以及 90 年代中后期表现出最为显著的极大值区；② 8 ~ 10 年的周期振荡，其波动的功率谱值在 20 年代到 30 年代和 80 年代到现在均表现出极大值区；③ 周期超过 30 年的振荡，尤其是从 20 世纪 20 年代到现在，其波动的功率谱值出现大值中心，其对应的周期为 35 ~ 38 年。

通过分析可以发现，松花江流域和辽河流域的降水的周期大致接近，尤其是 20 世纪 60 年代以来，两个流域年降水 30 年左右的长周期振荡更为显著。

2.3 Mexican hat 小波分析

为了研究松花江流域降水量长期变化的阶段性特征，我们又以墨西哥帽状小波作母小波函数，对 1881 ~ 2000 年松花江流域降水资料进行分析，分析年降水量的阶段性变化特征，图 5 为 1881 ~ 2000 年松花江流域降水的 Mexican hat 小波变换。

在图 5 中， $W_f = 0$  的等值线大致在 1927 年 (47)、1967 年 (87) 和 1980 年 (101) 附近，即 1927, 1967, 1980 年可能是松花江流域年降水量均值的突变年，利用式(4)作  $t$  检验。

在进行检验的过程中，我们选用 95 % 信度标准，结果表明 1927 年没有通过检

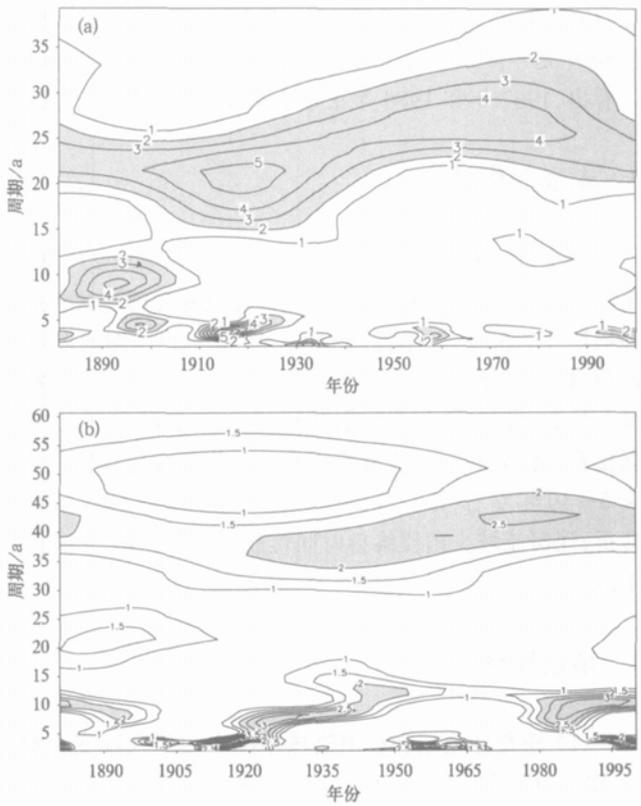


图 4 1881 ~ 2000 年松花江流域(a)和辽河流域(b)年降水量小波分析功率谱图 (阴影部分表示小波分析的功率谱数值  $\geq 2.0 \text{ mm}^2$ )

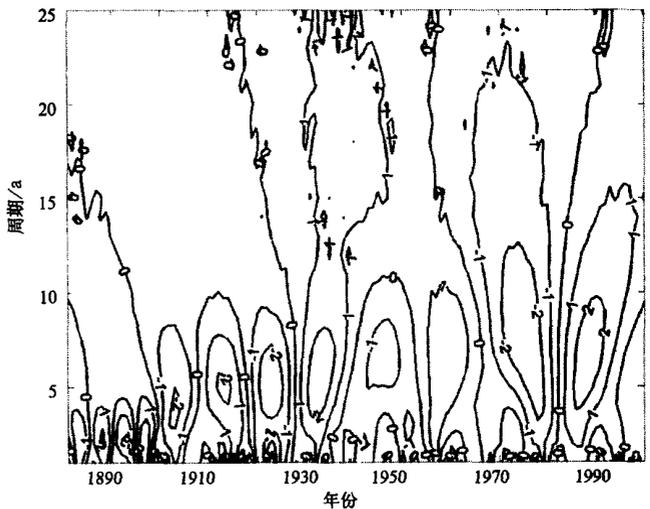


图 5 1881 ~ 2000 年松花江流域降水的 Mexican hat 小波变换

验,1967年和1980年通过检验,即1967年是松花江流域年降水量由多转少的转折年,而1980年是年降水量由少转多的转折年。从松花江流域年降水距平百分率曲线(图2a)可以看出,1967年和1980年正是松花江流域年降水量发生变化的两个转折点。

### 3 未来变化趋势

功率谱分析和小波分析均表明,松花江流域27~30年,辽河流域35~38年的长周期振荡比较显著。近50年来,松花江流域和辽河流域年降水量的历史演变也基本呈现了这种周期性的特点,20世纪50年代到60年代中期的多雨期,60年代后期到80年代初的少雨期以及80年代初到90年代中期的又一多雨期,反映了该地区年降水明显的阶段性特征。从20世纪90年代后期开始,松花江流域和辽河流域又转入了另一个少雨阶段。根据松花江流域和辽河流域年降水的年代际变化规律及未来发展趋势的分析,初步估计未来5~10年左右,松花江流域仍将维持少雨的趋势,可能在2010~2015年期间发生趋势转折;辽河流域少雨段维持时间可能会稍长一些,少雨期之后,将可能逐步转入下一个多雨段。

### 4 结论和讨论

(1) 松花江流域和辽河流域年降水的年代际变化趋势非常显著,两个流域分别存在着27~30年和35~38年的长周期振荡。

(2) 根据多种方法综合分析,未来5~10年左右,松花江流域仍将维持少雨的趋势,可能在2010~2015年期间发生趋势转折;辽河流域少雨段维持时间可能会稍长一些,转折发生的时间可能会晚一些。

降水的年代际振荡并非严格地同期性变化,不同时期的多雨期或少雨期维持的时间长度略有差别,对降水未来发展趋势及转折期在时间上可能会存在误差,使预报有一定的不确定性。另外,年代际变化的机制尚不清楚,需进一步探讨。

### 参考文献

- 1 姜文来. 水资源价值论. 北京: 科学出版社, 1999.
- 2 赵振国. 中国夏季旱涝及环境场. 北京: 气象出版社, 1999.
- 3 周连童, 黄荣辉. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究. 气候与环境研究, 2003, 8(3): 274~290.
- 4 陈峪, 黄朝迎. 气候变化对东北地区作物生产潜力影响的研究. 应用气象学报, 1998, 19(3): 314~320.
- 5 Shukla J, Mintz Y. The influence of land surface evaporation on the earth's climate. *Science*, 1982, 215: 1498~1501.
- 6 Wang Zhiwei, Zhai Panmao. Variation of drought over northern China during 1950-2000. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(4): 480~487.
- 7 孙林海, 赵振国. 中国东北地区夏季雨型划分及其气候特征分析. 国家“九五”重中之重96-908科技项目《我国短期气候预测系统的研究》之六, 短期气候预测系统的总装与业务化试验研究. 北京: 气象出版社, 2004. 26~31.
- 8 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999.

- 9 张存杰,董安祥,白虎志,等. 甘肃省河东地区伏旱的小波分析. 应用气象学报,1998,19(3):291~297.  
10 谢庄,曹鸿兴. 近百余年北京气候变化的小波分析. 气象学报,2000,58(3):362~369.

## LONG TERM VARIATION PATTERN AND FUTURE TREND OF PRECIPITATION IN THE VALLEYS OF SONGHUANJIANG AND LIAOHE RIVERS

Li Xiang<sup>1)</sup> Li Weijing<sup>2)</sup> Zhao Zhenguo<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

<sup>2)</sup> (*National Climate Center, Beijing 100081*)

### Abstract

Study on the precipitation variation features for the valleys of the Songhuajiang and Liaohe rivers is undertaken by means of a trend analysis, power spectral method and wavelet transform in terms of the monthly and seasonal precipitation data from 1881 to 2002. Results indicate that a remarkable interdecadal variation is inherent in the precipitation of the target region, dominated by 27—30 (35—38) year periods for the rainfall in the Songhuajiang (Liaohe) valleys. Based on the evolution of the rainfall itself and auto regression estimation it is inferred that the former (latter) will remain in a drier (a still longer rain deficient) stage in 5—10 years to follow.

**Key words:** Precipitation Interdecadal variation Wavelet analysis Abrupt change in the mean