

三江平原近 60 年降水量时空变异特征分析^{*}

邢贞相¹ 闫丹丹¹ 刘美鑫¹ 付强^{1,2} 李映辉¹

(1. 东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 采用趋势分析法、Mann-Kendall 突变分析法、小波分析法和时态 GIS 对三江平原 1952—2012 年间的 61 a 降水量的时空变异特征进行分析。结果表明: 时间上, 5 个主要行政区的降水量序列在时间整体上变化趋势不明显, 而在时间序列内部存在不同突变趋势, 存在以 28、22、15、6 a 4 个时段为主周期的波动状态; 整个三江平原降水量序列在时间整体上变化趋势也不明显, 但在时间序列内部表现出突变趋势, 即 1955 年开始呈下降趋势, 至 1979 年开始呈上升趋势, 到 1997 年又呈下降趋势, 存在与各行政分区主周期相同的波动状态。空间上, 三江平原降水量空间分布变化趋势表现出明显的差异性, 即 1952—1954 年从北到南呈现中间多两端少的变化趋势, 而 1955—1978 年从北到南呈现两端多中间少的变化趋势, 1979—2012 年也呈现北多南少、东多西少的变化趋势。5 个主要行政区及三江平原 1952—1954 年和 1997—2012 年两个时段内的多年平均降水量均少于 1955—1996 年间的多年平均降水量。

关键词: 三江平原 降水量时空变异 趋势分析法 Mann-Kendall 突变分析法 小波分析 时态 GIS

中图分类号: P338 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0337-08

Spatiotemporal Variability Analysis of Annual Precipitation in Sanjiang Plain in Recent Sixty Years

Xing Zhenxiang¹ Yan Dandan¹ Liu Meixin¹ Fu Qiang^{1,2} Li Yinghui¹

(1. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. The Key Laboratory of High Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: Trends analysis method, wavelet analysis, Mann-Kendall abrupt change test and temporal GIS were used to analyze the spatial distribution characteristics and temporal trends of precipitation based on the annual precipitation observed data from 1952 to 2012 in Sanjiang Plain. The analysis results showed that there was no obvious change trend during the whole time span with several internal variation trends for annual precipitation in five administrative areas, which meant that it existed four main periods of 28, 22, 15 and 6 years for annual precipitation series. For the whole series of precipitation in the Sanjiang Plain, there were no obvious change trends with the following internal variation trends, that was, there was a downward trend from 1955 to 1979, after then an upward trend until 1997, and then there was a downward trend in the remained annual precipitation series. There was an obvious spacial variation for precipitation. It showed that the precipitation in the middle of Sanjiang Plain was more than that in the two sides where from the north to the south during 1952 to 1954, while there was less precipitation in the middle than that in both sides where from the north to the south during 1955 to 1978, and then there was a trend of more precipitation in the north and east, and less precipitation in the south

收稿日期: 2015-01-16 修回日期: 2015-04-06

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51109036、51179032)、黑龙江省自然科学基金资助项目(E2015024)、水利部公益性行业科研专项资助项目(201301096)、黑龙江省级领军人才梯队后备带头人资助项目(500001)、黑龙江省博士后科研启动资金资助项目(LBH-Q12147)、东北农业大学 SIPT 计划大学生创新训练资助项目和东北农业大学研究生创新资助项目(yjsex14071、yjsex14070)

作者简介: 邢贞相, 副教授, 博士, 主要从事水资源分析与评价研究, E-mail: xingzhenxiang01@163.com

通讯作者: 付强, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源分析与评价研究, E-mail: fuqiangneau@sina.cn

and west in Sanjiang Plain during 1979 to 2012. In addition, for both the whole Sanjiang Plain and each administrative area, the annual average precipitation amounts during 1952—1954 and 1997—2012 were more than that during 1955—1996.

Key words: Sanjiang Plain Spatiotemporal variation of annual precipitation Trends analysis method Mann – Kendall abrupt change test Wavelet analysis Temporal GIS

引言

三江平原面积辽阔,资源丰富,发展潜力很大。建国以来,农业开发取得了很大成绩,耕地面积已由 1949 年的 78.6 万 hm^2 扩大到目前的 366.77 万 hm^2 ,成为国家重要的商品粮基地,对保障我国粮食安全做出了巨大贡献。近年来,三江平原由于盲目扩大水田面积,加之农民节水意识淡薄,使得三江平原地下水位普遍下降,进而诱发了一系列水资源短缺问题。对于三江平原水资源随机特征和空间分布的研究,已取得了一些研究成果。付强等^[1]运用非平稳时序模型对三江平原井灌水稻区地下水动态变化进行了分析;栾兆擎等^[2]利用三江平原地区范围内的 18 个气象站点及外围 6 个站点的长期观测资料运用趋势系数、气候倾向率等方法分析了三江平原的气温及降水时空变化规律;苏安玉等^[3]借助 GIS 的数据管理和空间分析能力,建立了地下水空间数据库,同时结合动态平衡法,实现地下水含水层的三维可视化,在地理信息系统 ArcGIS 平台,采用 Spatial Analyst 分析模块中的 Kriging 插值方法,实现对三江平原地下水资源空间分布以及地下水水位动态变化的模拟和对地下水补给量的评价;刘东等^[4]以 853 农场为例,采用小波消噪对实测年降水资料进行消噪、差分和标准化处理,建立了年降水量小波随机耦合预测模型,揭示了区域年降水量的时间变化规律;刘贵花等^[5]通过非参数检验法 (Mann – Kendall) 分析了三江平原挠力河流域 19 个气象站点近 50 年 (1956—2004 年) 降水序列的变化趋势,

并利用 Surfer 作出流域降水量及倾斜度 β 等值线图,研究了该流域降水的时空分布特征;田苗等^[6]利用江苏省 1998 年 1 月—2014 年 3 月的 TRMM 3B43 月降水资料,采用尺度为 12 的标准化降水指数 (SPI12),分析了江苏省旱涝时空特征变化规律。以上研究成果主要针对 10 年前的气象资料,单一的从时间上或空间上分析了三江平原水资源的变化特征,而水资源的变异特征在时间上和空间上是密切相关的^[7-9],因此,有必要从时间和空间角度同步分析水资源的变异特征。本文利用更新后降水资料从时空两个角度同步分析三江平原的降水变异特征,对掌握该地区的气候变化背景、充分利用自然降水资源,保障三江平原农业生产与社会经济健康发展等具有重要意义。

1 研究区概况

三江平原位于小兴安岭以东,乌苏里江以西,北至黑龙江干流,南至兴凯湖,地理坐标为东经 $129^{\circ}30' \sim 135^{\circ}05'$ 、北纬 $43^{\circ}50' \sim 48^{\circ}40'$ 。总面积 10.89 万 km^2 ,占黑龙江省总面积的 24%,是我国重要的粮食储备基地和商品粮生产基地。行政区包括哈尔滨市的依兰县,鹤岗市及其所属的绥滨、萝北县,佳木斯市及其所属的桦川、桦南、汤原、富锦、同江、抚远县,双鸭山市及其所属的集贤、友谊、宝清、饶河县,鸡西市及其所属的鸡东、虎林、密山县,七台河市及其所属的勃利县,牡丹江市的穆棱市,共 23 个市县,如图 1 所示。

以行政区划 (佳木斯、鸡西、七台河、鹤岗和双

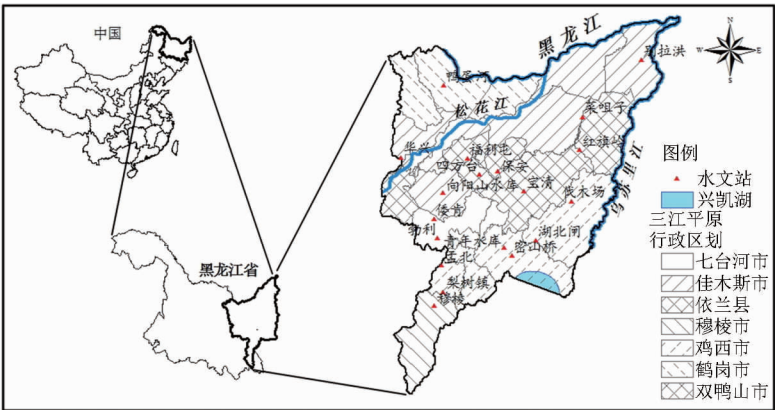


图 1 三江平原区域概况图
Fig.1 Geographic location of Sanjiang Plain

鸭山市)作为研究单元,进行三江平原降水量时空变异特征分析。

2 数据与方法

2.1 基本气象数据

降水量数据摘自黑龙江省水利年鉴 19 个水文站(图 1)的气象观测资料,鉴于 1952—2012 年间的逐月降水资料相对完整,因此选取该时段内的降水观测数据作为本次研究的基础资料,通过整编得到各站年降水总量。通过泰森多边形法求得佳木斯、鸡西、七台河、鹤岗和双鸭山市 5 个行政区的年降水量,再利用各行政区面积加权平均法求得整个三江平原的年降水量。

2.2 降水量时间序列分析

从趋势性、突变性和周期性 3 方面分别对降水量进行时间序列分析。其中,趋势性分析采用趋势分析法,突变性分析选用世界气象组织(WMO)推荐的 Mann-Kendall(M-K)突变分析法^[10-14],周期性分析采用 Morlet 小波分析法^[15-20]。

2.2.1 趋势分析法

用 x_i 表示样本量为 n 的某气候变量,用 t_i 表示 x_i 所对应的时间,建立 x_i 与 t_i 的一元线性回归方程

$$x_i = a + bi \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{1}$$

式中 a ——回归常数 b ——回归系数
 a 和 b 均用最小二乘法对其进行估计。

对观测数据及其相应的时间 t_i ,回归系数 b 和常数 a 的最小二乘估计分别为

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2}$$
$$a = \bar{x} - b \bar{t} \tag{2}$$

其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ $\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$

对于线性回归的计算结果,主要分析回归系数 b 的正负表示气候变量的趋势倾向,即 $b > 0$ 时 x 随时间的增加呈上升趋势, $b < 0$ 时 x 随时间的增加呈下降趋势。 b 值的大小反映了上升或下降的速率,即表示上升或下降倾向的程度。

2.2.2 突变分析法

设时间序列为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 构造秩序列 r_i, r_i 表示当 $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$ 时的样本累积数。定义

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 1, 2, \cdots, n)$$
$$r_i = \begin{cases} 1 & (x_i > x_j > 0, j = 1, 2, \cdots, n) \\ 0 & (0 < x_i \leq x_j, j = 1, 2, \cdots, n) \end{cases} \tag{3}$$

s_k 均值 $E(s_k)$ 以及方差 $\text{Var}(s_k)$ 定义为

$$E(s_k) = \frac{n(n-1)}{4}$$
$$\text{Var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \tag{4}$$

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量

$$U_{F_k} = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \cdots, n) \tag{5}$$

其中 $U_{F_1} = 0$ 。 U_{F_k} 为标准正态分布, k 给定一显著水平 α ,查正态分布表得到临界值 U_α ,当 $|U_{F_k}| > U_\alpha$,表明序列存在一个明显的趋势变化, U_{F_k} 在图中表示为 U_F 。把此方法引用到反序列中,重复上述计算过程,并将计算值乘以 -1 ,得到 U_{B_k} , U_{B_k} 在图中表示为 U_B ,令 $U_{B_1} = 0$ 。

通过分析统计序列 U_{F_k} 和 U_{B_k} 可进一步分析序列 x 的趋势变化,而且可以明确突变的时间,指出突变的区域。若 $U_{F_k} > 0$,则表明序列呈上升趋势; $U_{F_k} < 0$ 则表明呈下降趋势;当它们超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著。如果 U_F 和 U_B 这 2 条曲线出现交点,且交点在临界直线之间,那么交点对应的时刻就是突变开始的时刻。

2.2.3 小波分析法

小波分析是将一簇频率不同的振荡函数作为窗口函数 $\varphi(t)$ 对信号 $f(t)$ 进行扫描和平移。时间序列 $f(k\Delta t)$ ($k = 1, 2, \cdots, N$; Δt 为取样的时间间隔)的小波变换

$$W_f(c, d) = |c| \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \varphi\left(\frac{k\Delta t - d}{c}\right) \tag{6}$$

式中 c ——尺度因子 d ——平移因子
 $W_f(c, d)$ ——小波系数

基本小波函数有墨西哥帽小波(Mexican hat)、Morlet 小波和 Wave 小波等。本文采用 Morlet 小波,小波系数为

$$W_f(c, d) = |c|^{-1/2} \sum_{k=1}^N f(k) e^{idt} e^{-t^2/2} \tag{7}$$

它是由一个周期函数经过 Gaussian 函数平滑而得到的,所以它的伸缩尺度 a 与 Fourier 分析中周期 T 的关系为

$$T = \frac{4\pi c}{e + \sqrt{2 + e^2}}$$

因此取 $e = 6.2$ 时,周期 T 可以近似地用 c 来代替。

将时间域上关于 c 的所有小波变换系数的平方进行积分即为小波方差

$$\text{Var}(c) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(c, d)|^2 dd \tag{8}$$

式中 $\text{Var}(c)$ ——小波方差

小波方差反映了波动的能量随尺度 c 的分布,可以用来确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度,对应峰值处的尺度称为该序列的主要时间尺度即主要周期。

2.3 降水量空间序列分析

采用时态 GIS^[21-22] 对降水量进行空间序列分析。时空 GIS 是一种采集、存储、管理、分析与显示地理实体信息随时间变化 (或时空信息) 的计算机系统 (简称 TGIS)。它不仅包含传统地理信息系统空间的特性,而且涵盖时间的特性;它既可以反映事物和现象的存在状态,又可以表达其发展变化过程及规律。

3 结果与分析

3.1 降水量序列变化的时间分析

3.1.1 趋势性分析

年际变化上 (图 2), 近 60 年来三江平原 5 个主要行政区佳木斯、鸡西、七台河市年降水量均呈下降趋势, 年际倾向率分别为 $-0.928\ 1$ 、 $-1.120\ 1$ 、 $-1.383\ 4\ \text{mm/a}$; 鹤岗、双鸭山市年降水量均呈微弱上升趋势, 年际倾向率分别为 $0.316\ 2$ 、 $0.146\ 1\ \text{mm/a}$ 。

而整个三江平原年总降水量呈微弱下降趋势, 年际倾向率为 $-0.558\ 3\ \text{mm/a}$ 。为消除周期变化, 对数据进行 5 年滑动平均处理, 结果表明近 60 年来降水量并没有明显的上升或下降趋势, 而是呈波动状态。

3.1.2 突变性分析

水文时间序列的突变点往往包含丰富的突变信息, 它反映了引起突变的气候原因、人类活动的影响等, 但趋势性分析只能发现时间序列的整个变化趋势, 无法具体反映序列内部的变化特征, 因此采用 M-K 方法深入分析降水量时间序列内部的突变特征, M-K 突变检验分析结果如图 3 (图中所示虚线表示 $\alpha=95\%$ 的显著性水平的临界值) 所示。根据图 3 分析可知:

佳木斯市 U_F 和 U_B 曲线有 1983 年和 1993 年 2 个交点, 即在 1983 年和 1993 年发生突变, 表现为佳木斯市年降水量 1983 年后呈明显上升的趋势, 但在 1993 年后呈明显下降的趋势。

鸡西市 U_F 和 U_B 曲线存在 2 个交点, 分别为 1974 年和 1994 年, 且两交点均在临界线之间, 则交点所对应的时间便是鸡西市年降水量突变开始的时间。由 U_F 曲线得出, 鸡西市年降水量从 1974 年和

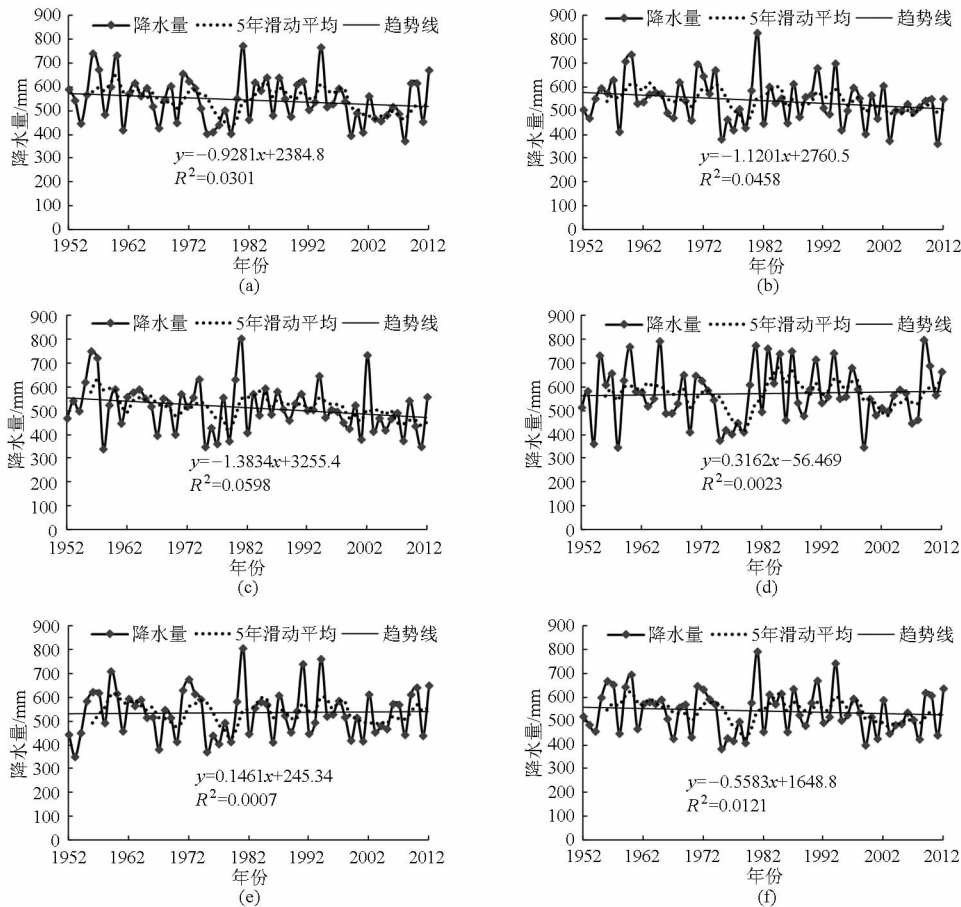


图 2 年降水量总体变化特征

Fig.2 Global variation characteristics of annual precipitation in Sanjiang Plain

(a) 佳木斯市 (b) 鸡西市 (c) 七台河市 (d) 鹤岗市 (e) 双鸭山市 (f) 三江平原

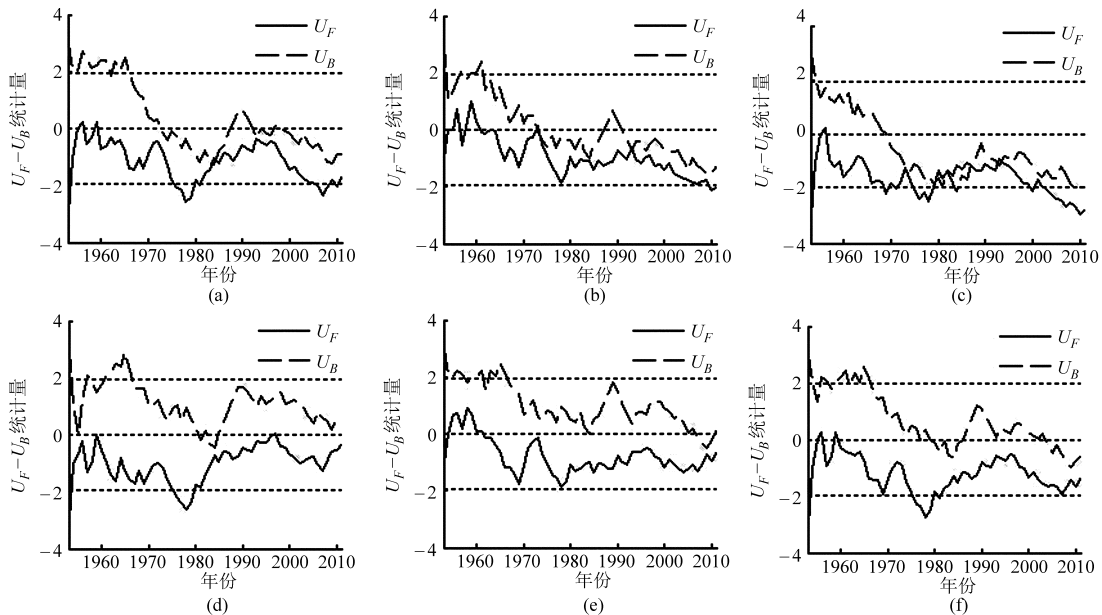


图 3 年降水量 M - K 突变分析

Fig. 3 M - K mutation analysis on annual precipitation
(a) 佳木斯市 (b) 鸡西市 (c) 七台河市 (d) 鹤岗市 (e) 双鸭山市 (f) 三江平原

1994 年开始均有明显下降的趋势。

七台河市年降水量变化趋势非常明显,其 $U_F - U_B$ 曲线在 1972 年、1979 年、1988 年和 1993 年均有点。其中,七台河市年降水量 1972 年、1988 年和 1993 年发生突变后,呈下降的趋势,而 1979 年表现为上升的趋势。

鹤岗市 U_F 和 U_B 曲线无交点,即没有突变点。而由 U_F 曲线可知,鹤岗市年降水量变化趋势分 3 个阶段:① 1961—1979 年出现明显的下降趋势。② 1979—1997 年存在明显的上升趋势。③ 从 1997 年开始又出现下降的趋势。

双鸭山市 U_F 和 U_B 曲线没有交点,但 U_F 曲线变化趋势明显,表现为 1959 年出现最大值后, U_F 曲线出现持续的下降趋势,但在 1972 年出现上升的趋势,之后呈下降趋势。

三江平原年总降水量 $U_F - U_B$ 曲线没有交点。但由 U_F 曲线可知,1955 年年降水量存在下降的趋势,并且从 60 年代初到 70 年代末下降趋势显著,而从 1979 年开始呈现上升的趋势,直到 1997 年又呈现下降的趋势。

3.1.3 周期性分析

运用小波分析对 1952—2012 年三江平原年降水量数据进行分析,得到小波变换系数实部时频分布图,如图 4 所示。从图 4 可以看出,近 60 年来三江平原 5 个主要行政区及整个三江平原包含了不同尺度的周期变化。为进一步分析其周期性,图 5 给出了三江平原 5 个主要行政区及三江平原 Morlet 小波方差分布。综合分析图 4 和图 5 可知:28、22、15、

6 a 左右尺度波动较为明显,存在降水量偏多、偏少循环交替变化,在 2010 年后以上 3 种尺度的小波正在形成,小波系数为正,因此预测未来降水量在这 4 种尺度上均呈偏多趋势(表 1)。

表 1 各区域年降水量时间序列主周期变化

Tab.1 Main periods in time series of annual precipitation in each area

区域	第 1 主周期	第 2 主周期	第 3 主周期	第 4 主周期
佳木斯市	28	22	15	6
鸡西市	28	22	15	6
七台河市	22	28	15	6
鹤岗市	22	15	28	6
双鸭山市	28	22	15	6
三江平原	28	22	15	6

文献[23 - 24]曾对三江平原地区集贤县和 853 农场的降水量时间序列进行分析,结果显示三江平原的降水量时间序列也具有 4 个主周期,其各主周期个数及长度与本文分析结果相似,具有较好的一致性。但因其涉及时间序列年限短、研究区域尺度小等导致其分析结果仅有 1980 年一个突变点,且各主周期长度稍短。这表明降水量时间序列变异分析的结果与序列长度和数据的代表性关系较为密切。

3.2 降水量序列变化的空间分析

依据三江平原降水量 M - K 突变分析结果,选取三江平原五个主要行政区 1952—1954 年、1955—1978 年、1979—1996 年和 1997—2012 年多年平均降水量(表 2),运用时态 GIS 获取降水量空间分布特征,如图 6 所示。

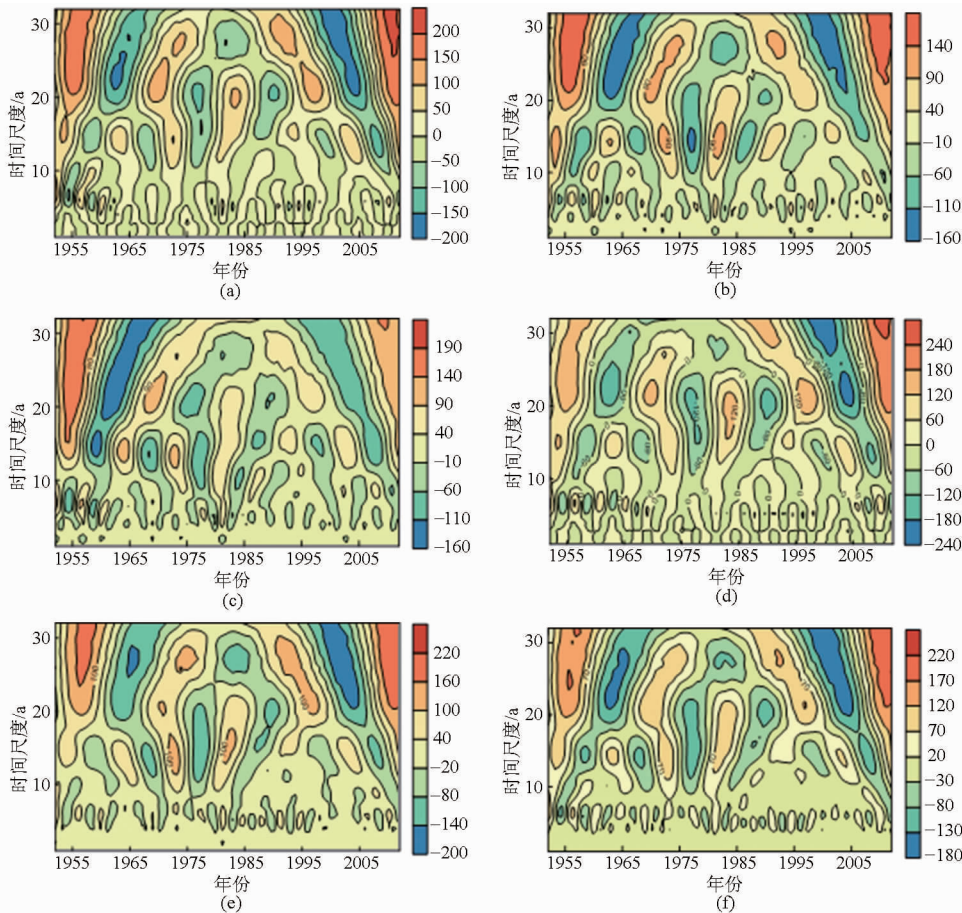


图 4 小波变换系数实部时频分布

Fig. 4 Time-frequency distribution of real parts of wavelet transform coefficient

(a) 佳木斯市 (b) 鸡西市 (c) 七台河市 (d) 鹤岗市 (e) 双鸭山市 (f) 三江平原

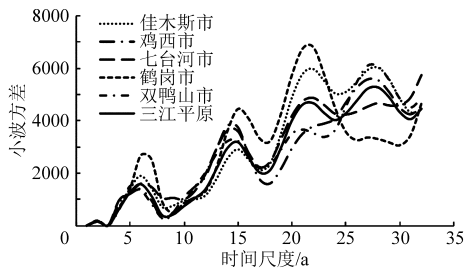


图 5 Morlet 小波方差分布

Fig. 5 Variance distribution of real parts of Morlet wavelet

表 2 各区域多年平均降水量

Tab. 2 Average annual precipitation in each area in Sanjiang Plain				mm
区域	1952—1954 年	1955—1978 年	1979—1996 年	1997—2012 年
佳木斯市	527. 30	552. 75	570. 99	508. 58
鹤岗市	486. 80	558. 38	605. 24	564. 04
双鸭山市	415. 57	540. 67	555. 48	525. 26
鸡西市	508. 77	557. 97	552. 29	507. 16
七台河市	503. 83	527. 11	535. 16	470. 89
三江平原	488. 15	549. 11	565. 37	516. 57

期内,三江平原降水量空间分布变化趋势表现出明显的差异性,其中,1952—1954 年多年平均降水量由于时段较短空间变异不明显。具体表现为 1952—1954 年从北到南呈现中间多两端少的变化趋势,而 1955—1978 年从北到南呈现两端多中间少的变化趋势,1979—1996 年呈现北多南少、东多西少的变化趋势,1997—2012 年亦呈现北多南少、东多西少的变化趋势。从表 2 可以看出,各时间突变节点间的降水量空间变化不尽相同。各行政区及整个三江平原的降水量在前期 3 个突变时段(1952—1954 年、1955—1978 年、1979—1996 年)内呈上升趋势,而在最后一个突变时段(1997—2012 年)内呈下降趋势。究其原因,可能与近年来三江平原水稻种植面积快速增长,地下水位加剧下降、灌溉模式等因素有关,有待于进一步深入研究。

文献[25]对三江平原 1971—2003 年降水的空间序列进行分析,结果表明该区域降水量基本以西北—东南方向左右对称,双鸭山市周围地区降水量比较低,与本文不同时间突变节点间的降水空间分布特征较为一致。

在三江平原相邻有变化趋势时间节点之间的时

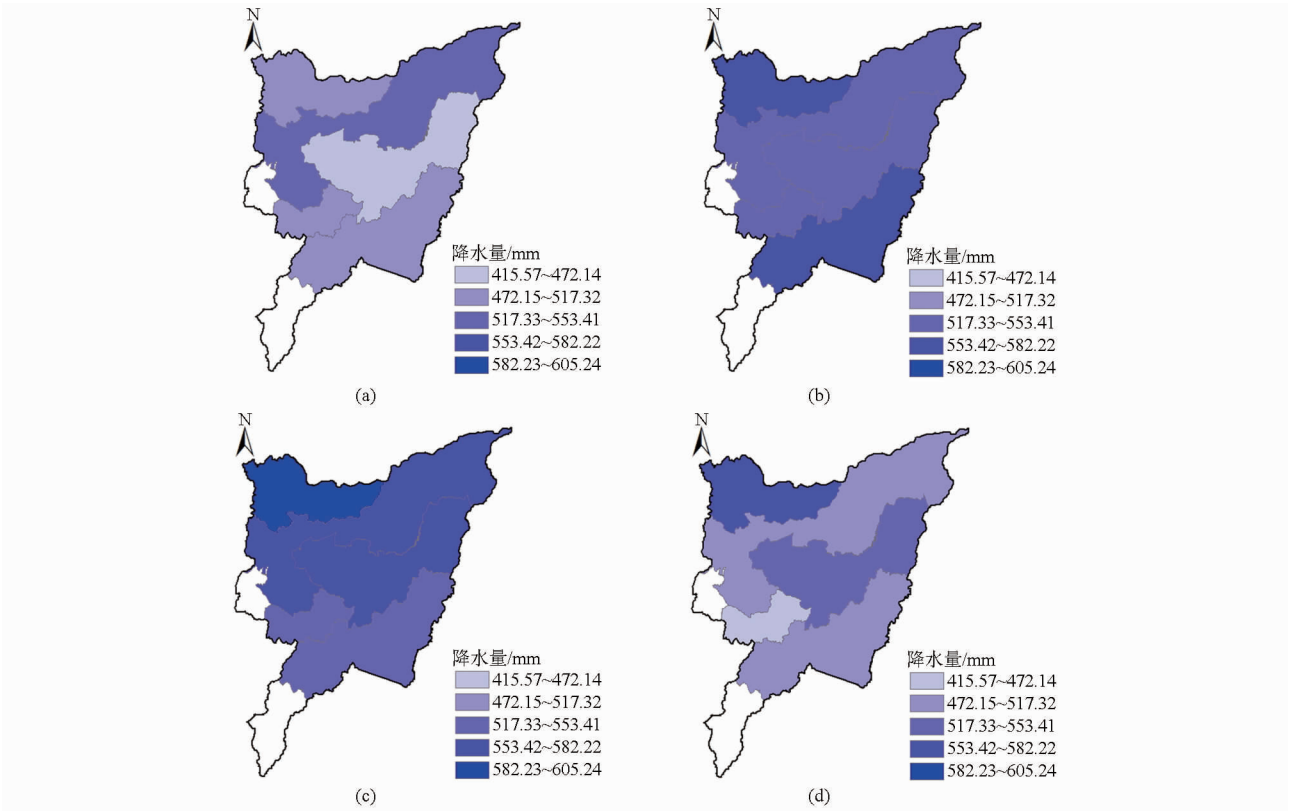


图 6 时段多年平均降水量的空间分析

Fig.6 Spatial analysis of average annual precipitation in different spans
(a) 1952—1954 年 (b) 1955—1978 年 (c) 1979—1996 年 (d) 1997—2012 年

4 结论

(1)年际变化上,近 60 年来三江平原 5 个主要行政区佳木斯、鸡西、七台河市年降水量呈下降趋势;鹤岗、双鸭山市降水量呈微弱上升趋势。整个三江平原年降水量呈微弱下降趋势。为消除周期变化对数据进行 5 年滑动平均处理,结果表明近 60 年来降水量呈波动状态。

(2)时间突变上,5 个主要行政区年降水量突变存在明显的差异性;三江平原年降水量在 1955 年后

存在下降的趋势,并且从 60 年代初到 70 年代末下降趋势显著,但从 1979 年开始呈现上升的趋势,直到 1997 年又呈现下降的趋势。

(3)周期变化上,佳木斯、鸡西、鹤岗、双鸭山市和三江平原存在 28、22、15、6 a 4 个主周期。

(4)空间变化上,三江平原降水量空间分布变化趋势表现出明显的差异性。而 5 个主要行政区及三江平原 1952—1954 年和 1997—2012 年两个时段内的多年平均降水量均少于 1955—1996 年间的多年平均降水量。

参 考 文 献

1 付强, 门宝辉, 王立坤. 非平稳时序模型在三江平原井灌水稻区地下水动态变化中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 1(1): 132 - 138.
Fu Qiang, Men Baohui, Wang Likun. Applying non-stable time series model to forecasting the groundwater dynamic varies in area of well irrigation rice in Sanjiang Plain[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2003, 1(1): 132 - 138. (in Chinese)

2 栾兆擎, 章光新, 邓伟, 等. 三江平原 50 a 来气温及降水变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 39 - 43.
Luan Zhaoqing, Zhang Guangxin, Deng Wei, et al. Study on the changes of air temperature and precipitation in the last 50 years in the Sanjiang Plain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(11): 39 - 43. (in Chinese)

3 苏安玉, 濮励杰, 付强, 等. 基于 Kriging 模型的三江平原地下水资源评价[J]. 经济地理, 2007, 27(6): 1018 - 1020.
Su Anyu, Pu Lijie, Fu Qiang, et al. Evaluation of groundwater resources based on Kriging model in the Sanjiang Plain[J]. Economic Geography, 2007, 27(6): 1018 - 1020. (in Chinese)

4 刘东, 赵清, 付强. 基于小波消噪的三江平原井灌区年降水随机预测模型[J]. 中国农村水利水电, 2010(4): 4 - 7.
Liu Dong, Zhao Qing, Fu Qiang. Stochastic forecasting model of annual precipitation in well irrigation paddy areas in Sanjiang Plain based on wavelet denoising[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(4): 4 - 7. (in Chinese)

5 刘贵花, 栾兆擎, 阎百兴. 三江平原挠力河流域近 50 年降水时空分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(2): 131 - 136.

- Liu Guihua, Luan Zhaoqing, Yan Baixing. Analysis on the spatiotemporal distribution of precipitation in the Naoli River of the Sanjiang Plain during the past 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(2): 131–136. (in Chinese)
- 6 田苗, 李卫国. 基于 TRMM 遥感数据的旱涝时空特征分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 252–257.
Tian Miao, Li Weiguo. Analysis of spatial and temporal characteristics of drought and flood based on TRMM remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 252–257. (in Chinese)
- 7 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 1031–1040.
Wang Ying, Cao Mingkui, Tao bo, et al. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change[J]. Geographical Research, 2006, 25(6): 1031–1040. (in Chinese)
- 8 袁喆, 严登华, 杨志勇, 等. 1961—2010 年中国 400 mm 和 800 mm 等雨量线时空变化[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 494–502.
Yuan Zhe, Yan Denghua, Yang Zhiyong, et al. Research on temporal and spatial change of 400 mm and 800 mm rainfall contours of China in 1961—2000[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 494–502. (in Chinese)
- 9 徐利岗, 周宏飞, 梁川, 等. 中国北方荒漠区降水多时间尺度变异性研究[J]. 水利学报, 2009, 40(8): 1002–1011.
Xu Ligang, Zhou Hongfei, Liang Chuan, et al. Multi-time scale variability of precipitation in the desert region of North China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(8): 1002–1011. (in Chinese)
- 10 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- 11 胡刚, 宋慧. 基于 Mann–Kendall 的济南市气温变化趋势及突变分析[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2012, 26(1): 96–101.
Hu Gang, Song Hui. Analysis of air-temperature variation trend and abrupt change in Jinan based on Mann–Kendall test [J]. Journal of University of Jinan: Science and Technology, 2012, 26(1): 96–101. (in Chinese)
- 12 Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1): 144–150.
- 13 Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13: 245–259.
- 14 Kendall M G. Rank correlation methods[M]. London: Charles Griffin, 1948: 202.
- 15 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.
- 16 桑燕芳, 王栋. 水文序列小波分析中小波函数选择方法[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 295–306.
Sang Yanfang, Wang Dong. Application of reliability analysis to reverse filters design[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(3): 295–306. (in Chinese)
- 17 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2006, 42(4): 503–509.
Shao Xiaomei, Xu Yueqing, Yan Changrong. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(4): 503–509. (in Chinese)
- 18 祝青林, 张留柱, 于贵瑞, 等. 近 30 年黄河流域降水量的时空演变特征[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 477–482.
Zhu Qinglin, Zhang Liuzhu, Yu Guirui, et al. The spatial and temporal variability characteristics of precipitation in the Yellow River basin of recent 30 years[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(4): 477–482. (in Chinese)
- 19 刘勤, 严昌荣, 张燕卿, 等. 近 50 年黄河流域气温和降水量变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 475–480.
Liu Qin, Yan Changrong, Zhang Yanqing, et al. Variation of precipitation and temperature in Yellow River Basin during the last 50 years [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 475–480. (in Chinese)
- 20 李占杰, 鱼京善. 黄河流域降水要素的周期特征分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 401–404.
Li Zhanjie, Yu Jingshan. Analysis on precipitation cycles in the Yellow River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2010, 46(3): 401–404. (in Chinese)
- 21 陈军, 李志林, 蒋捷, 等. 多维动态 GIS 空间数据模型与方法的研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2004, 29(10): 858–862.
Chen Jun, Li Zhilin, Jiang Jie, et al. Dynamic and multi-dimensional spatial data modeling: models and methods[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(10): 858–862. (in Chinese)
- 22 姜晓轶, 周云轩. 从空间到时间—时空数据模型研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(3): 480–485.
Jiang Xiaoyi, Zhou Yunxuan. From space to time: a research on spatio-temporal data model[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(3): 480–485. (in Chinese)
- 23 吴敏, 董云峰, 周子强. 三江平原—集贤县(1959—2007 年)旱涝规律研究[J]. 中国科技纵横, 2012(18): 181.
Wu Min, Dong Yunfeng, Zhou Ziqiang. Study on drought and waterlogging in Jixian County of Sanjiang Plain (1959—2007) [J]. China Science & Technology Panorama Magazine, 2012(18): 181. (in Chinese)
- 24 刘东, 付强. 基于小波变换的三江平原低湿地井灌区年降水序列变化趋势分析[J]. 地理科学, 2008, 28(3): 380–384.
Liu Dong, Fu Qiang. Variation on trend analysis of annual precipitation series based on wavelet transform in well-irrigation area of low-lying wetland in Sanjiang Plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(3): 380–384. (in Chinese)
- 25 李宏伟, 田竹君, 杨伟, 等. 近 50 年三江平原农业气象条件空间特征分析[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(10): 4493–4496.
Li Hongwei, Tian Zhujun, Yang Wei, et al. Analysis of spatial distribution of agricultural meteorological conditions in the Sanjiang Plain during nearly 50 years[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(10): 4493–4496. (in Chinese)