



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.004

吴凯, 王晓琳, 王高旭, 等. 1961年-2014年西辽河流域降水时空变异性诊断[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 22-28. U Kai, WANG Xiaolin, WANG Gaoxu, et al. Spatial-temporal variation of precipitation in West Liao River Basin during 1961-2014[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 22-28. (in Chinese)

1961年-2014年西辽河流域降水时空变异性诊断

吴凯¹, 王晓琳², 王高旭¹, 吴永祥¹

1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;

2. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 对西辽河流域1961年-2014年降水量年值建立了由基于过程线、滑动平均、Hurst指数的初步诊断, 基于相关系数、Mann-Kendall检验、滑动 T 检验、小波分析的详细诊断两部分组成的变异诊断系统。并聚焦近10年(2005年-2014年)年降水量时空分布, 其年均降水与多年(1961年-2014年)、1961年-1970年、1971年-1980年、1981年-1990年和1991年-2000年五组平均年降水空间分布比较, 对采用ArcGIS的Kriging插值后的差值时空分布进行了详细阐述。结果表明: 年降水量序列呈轻微下降的整体态势, 未来具有增加的可能性; 6 a、18 a或30 a为其主周期, 1998年是年降水量的突变年。空间分布上, 年降水量变异程度大致呈现自流域西南、东部向北部增大的趋势。近10年属于少雨年份。在空间分布上整体少于上述五组降水数据。

关键词: 降水; 西辽河流域; 时空变异; 趋势分析; 突变检验; 小波分析

中图分类号: TV211.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)02-0022-07

Spatial-temporal variation of precipitation in West Liao River Basin during 1961-2014

WU Kai¹, WANG Xiaolin², WANG Gaoxu¹, WU Yongxiang¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the annual precipitation in West Liao River Basin from 1961 to 2014, we established a variation diagnosis system that integrated preliminary diagnosis, which was based on hydrograph, moving average, and Hurst index, with detailed diagnosis, which was based on correlation coefficient, Mann-Kendall mutation test, moving T test, and wavelet analysis. We also focused on the spatial-temporal distribution of the annual precipitation in the recent ten years (2005-2014), and compared the annual mean precipitation in this period with the annual mean precipitation during the five periods of 1961-2014, 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990, and 1991-2000. Using the Kriging method, we described the spatial-temporal variation of the precipitation in the recent ten years on ArcGIS Platform. The results showed that the annual precipitation during 1961-2014 was slightly decreasing, but with a potential to increase in the future. Its primary periods were 6, 18 or 30 a. The year of 1998 witnessed an abrupt change in the annual precipitation. Regarding spatial distribution, the variation degree of annual precipitation generally expanded from the southwest and east of the basin to the north. The recent ten years were dry years. The precipitation in this period was generally less than that in the above mentioned five periods.

Key words: precipitation; West Liao River Basin; spatial-temporal variation; trend analysis; abrupt change test; wavelet analysis

收稿日期: 2016-06-08 修回日期: 2016-07-19 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金(51479222; 51109138); 水利部公益性行业科研专项经费(201301002; 201501041)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51479222; 51109138); The Ministry of Water Resources Public Welfare Industry Research Special Funds(201301002; 201501041)

作者简介: 吴凯(1991-), 男, 河南驻马店人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: kwu@nhri.cn

通讯作者: 王高旭(1979-), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源、水利信息化方面研究。E-mail: gxwang@nhri.cn

大气降水是决定水资源量时空分布最重要的因素,是陆地水循环中的最活跃的因素,是生态系统的形成、演化过程关键环节。我国用水矛盾突出^[1,2],而在区域水循环、水资源的研究中,降水的时空变异研究是一项基础而又重要的研究工作,国内外已有相当数量和深度研究^[3,7]。但先前针对西辽河整个流域的降水的时空变异相关研究较少,且多数研究利用的观测资料基于的气象台站数量稀少,精确度受限,对该区域降水的时空变异的诊断细部分析表达不够^[8,11],同时对影响近年来社会经济发展程度最大的近 10 年降水情况则未给予特别关注。本文采用基于国家气象信息中心基础资料专项最新整编的中国地面 2 472 台站降水资料得到的高密度气象站网的降水长序列观测分析资料,详细计算和探讨区域降水时空变异。

1 研究区域

选取西辽河流域为研究区域,边界采用水资源分区的西辽河区。西辽河流域是辽河流域上中游,流域地势上自蒙古高原过渡到辽河平原,地势西高东低。其中流域绝大部分区域属于行政区中的内蒙古自治区的赤峰市和通辽市,极小部分属河北、辽宁和吉林三省(图 1),面积约为 13.5 万 km²。主要属于我国草原沙地农牧生态区,是典型的生态敏感区和脆弱区,流域生态环境曾因为自然或人类活动因素变异发生剧变^[12,14]。在气候上属于暖温带半湿润向中温带半干旱气候的过渡带,大部分处于干旱、半干旱气候区。年均气温 5.0℃~6.5℃,年均降雨量 350~500 mm。流域降水地带差异性显著,总体上表现为自西南向东北逐渐增加。季风控制的 7、8 两月降水占年降水的近 60%。地区降水受地形影响显著,山区高于平原。

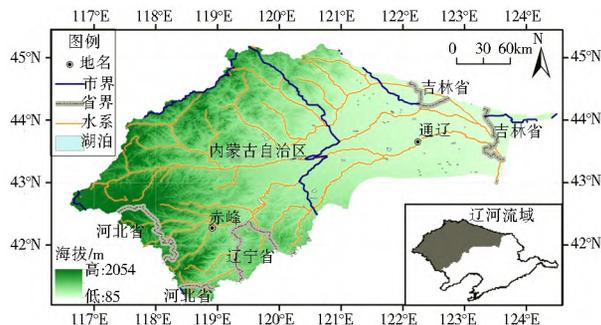


图 1 研究区地理位置
Fig. 1 Location of the study area

2 数据来源及计算方法

2.1 数据来源

本文计算数据采用中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 的“中国地面降水月值 0.5°×0.5°格点数据集(V2.0)”。该数据集的数据来源于国家气象信息中心基础资料专项收集、整理的 1961 年至最新的全国国家级台站(基本、基准和一般站)的降水月值资料,同时结合 GTOPO30 数据和 DEM 得到的数据。数据集质量状况良好,数据完整,采用其中的 1961 年 1 月至 2014 年 12 月共 648 个月数据文件。

降水变异系数(C_v)是指分析时段降水量的序列标准差与其均值的比值,表示降水时间尺度上的波动性强弱。降水的区域分布图是基于计算后的格点数据在 ArcGIS 软件平台上采用适合于本区域的克里金插值法^[15,16]进行绘制的。

2.2 计算方法

月/年降水量是指相应时段(月/年)降水的累积深度,单位均取 mm。降水变异系数(C_v)是指分析时段降水量的序列标准差与其均值的比值,表示降水时间尺度上的波动性强弱。降水的区域分布图是基于计算后的格点数据在 ArcGIS 软件平台上采用适合于本区域的克里金插值法^[15,16]进行绘制的。

对西辽河流域年降水量建立变异诊断系统^[17]:首先利用过程线、累积距平、五年滑动平均和 Hurst 指数进行初步诊断分析确认是否存在确定性成分。目估原始序列的过程线,初步判断其趋势性;五年滑动平均则使波动影响大大削弱,新序列的趋势性更加容易目估得到。接着采用包括相关系数、Mann-Kendall 检验、滑动 T 检验和小波分析四种方法对趋势性、跳跃性和周期性特征进行详细诊断;根据以上计算进行综合分析,阐述降水的分析诊断结论(图 2)。

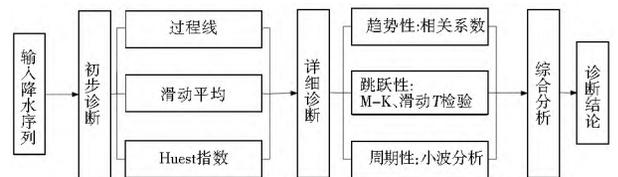


图 2 降水变异诊断系统

Fig. 2 Diagnosis system for precipitation variations

2.2.1 初步诊断方法

(1) 滑动平均。

对于指定的序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 计算几个前期值和后期值的均数得到新的序列 y_i , 对新序列作出过程线并进行观察。数学表达式为

$$y_i = \frac{1}{2k+1} \sum_{l=i-k}^{i+k} x_{i+l} \quad (1)$$

(2) Hurst 系数。

采用 R/S (重标极差分析)检验法计算水文序列的 Hurst 系数。即对于某时间序列,计算出差分序列,该差分序列代表了该时间序列的增长率或者衰减率的;然后计算出对应于不同时滞的极差(R)和标准离差(R/S)。如果极差与标准离差的比值随时滞而呈幂律分布的趋势,则幂指数即为 Hurst 系数。具体为;考虑一个时间序列增量 $|X_{(T)}|$, 这里

$X_{(t)} = B(t) - B(t-1)$, $B(t)$ 为时刻 t 的观测值 ($t = 1, 2, \dots$)。对于任意正整数 τ 定义均指序列:

$$\{X_{\tau}\} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} X(t), \tau = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

用 $\zeta(t)$ 表示累积离差

$$\zeta(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (X(u) - X_{\tau}), 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

极差 R 定义为

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} \zeta(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} \zeta(t, \tau), \tau = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

标准差 S 定义为

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (X(t) - X_{\tau})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

考虑比值 $R(\tau)/S(\tau) = R/S$, 对于给定的序列, 任何长度 τ 的 R/S 均可计算。

$$R/S = (c\tau)^H \quad (6)$$

对上式取对数可得

$$\ln[R(\tau)/S(\tau)] = H(\ln c + \ln \tau) \quad (7)$$

式中: H 称为 Hurst 指数。对于差分序列 $x_t = \Delta y_t = y_t - y_{t-1}$, 其一阶自相关系数可以表作 $C = 2^{2H-1} - 1$ 。

2.2.2 详细诊断方法

(1) 相关系数—线性回归。

采用一元线性回归拟合, 利用斜率 b 分析序列的趋势性。

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i t_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \quad (8)$$

式中: x_i 为降水序列; t_i 为时间; n 为序列的长度。

(2) 滑动 T 检验。

$F_1(x)$ 和 $F_2(x)$ 为滑动点 τ 前后两序列的总体分布函数, 从总体 $F_1(x)$ 和 $F_2(x)$ 中分别抽取容量为 n_1 和 n_2 的两个样本, 要求检验原假设 $F_1(x) = F_2(x)$ 。定义统计量为

$$T = \frac{\overline{x_1 x_2}}{S_w \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)^{1/2}} \quad (9)$$

式中

$$\overline{x_1} = \frac{1}{n_1} \sum_{t=1}^{n_1} x_t, \quad \overline{x_2} = \frac{1}{n_2} \sum_{t=n_1+1}^{n_1+n_2} x_t \quad (10)$$

$$S_w^2 = \frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (11)$$

$$S_1^2 = \frac{1}{n_1-1} \sum_{t=1}^{n_1} (x_t - \overline{x_1})^2$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n_2-1} \sum_{t=n_1+1}^{n_1+n_2} (x_t - \overline{x_1})^2 \quad (12)$$

T 服从 $t(n_1 + n_2 - 2)$ 分布, 选择显著性水平 α 查 t 分布表得到临界值 $t_{\alpha/2}$, 当 $|T| > t_{\alpha/2}$ 时, 拒绝原假设, 说明其存在显著性差异, 当 $|T| < t_{\alpha/2}$ 时, 则接受原假设。滑动 T 检验法是利用传统的 T 检验法对序列逐点进行检验, 对于满足 $|T| > t_{\alpha/2}$ 所有可能的点 τ 使 T 统计量达到极大值的那一点作为所求的最可能变异点 τ_0 。

(3) Mann-Kendall 检验法。

Mann-Kendall 检验是联合国粮食及农业组织 (FAO) 推荐的序列分析的非参数检验方法。该检验对样本分布不作要求, 对少数异常值的抗干扰性好, 适合非正态分布的时间序列, 对于降水序列具有较好的适用性^[18]。

定义统计变量为

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{Var(s_k)}} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中, $s_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^n a_{ij}, k = 2, 3, \dots, n; a_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases}$
 $1, 2, \dots, i; E(s_k) = \frac{k(k+1)}{4}, Var(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$ 。

将时间序列 x 按降序排列, 再按上式计算, 同时使

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k' = n+1-k \end{cases}, k = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

基于 UF_k 和 UB_k 的统计, 得到 x 的趋势性, 并最终得到突变时间。

(4) 小波分析。

基于小波变换出的低频系数, 分析其变化过程得到不同尺度下的趋势变化, 从而可以进行多尺度分辨^[19-20]。

小波函数 $\Psi(t)$ 定义为

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (15)$$

对 $\Psi(t)$ 进行伸缩、平移, 形成一簇子小波:

$$\Psi_{ab}(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), b \in R, a \in R, a \neq 0 \quad (16)$$

式中: a 为尺度因子或频率因子; b 为时间因子, 反映在时间上的平移。这里小波函数采用 Morlet 小波:

$$\Psi(t) = e^{ia} e^{-t^2/2} \quad (17)$$

式中: c 为常数; i 表示虚数。伸缩尺度 a 与周期 T 关系如下所示

$$T = \left[\frac{4\pi}{c + \sqrt{2 + c^2}} \right] \times a \quad (18)$$

若是式 (17) 的子小波, 则序列 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换:

$$W_f = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (19)$$

式中: $\overline{\Psi}(t)$ 为 $\Psi(t)$ 的复共轭函数; $W_f(a, b)$ 称为小波变化系数。若分析序列为离散形式, 如 $f(k\Delta t)$ ($k=1, 2, \dots; \Delta t$ 为取样时间间隔), 则表达式:

$$W_f = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \overline{\Psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (20)$$

3 年降水的时间变异诊断

3.1 初步诊断

利用西辽河流域 1961 年- 2014 年共 54 年的年降水量数据做出过程线(图 3), 西辽河流域年降水量在 271.9~557.5 mm 之间, 年均降水量为 400 mm, 变异系数 CV 为 0.16。1998 年降水量出现序列的最大值为 558 mm, 2009 年降水量则出现序列的最小值为 272 mm, 最大值与最小值相差约一倍, 流域降水年际变化较大。目估整个过程线, 1999 年- 2011 年降水出现了明显的凹陷区。

利用式(1)绘出五年滑动平均线(图 3), 通过观察发现其波动性明显。具体来说, 五年滑动平均线在 1979 年- 1998 年对应位置出现一个谷峰; 对应于 1999 年- 2010 年的五年滑动平均线, 总体呈下降趋势, 且这一段的值处于整个序列的低谷区; 2010 年- 2014 年才有所抬升。

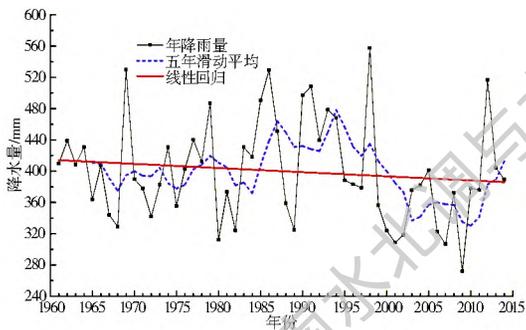


图 3 西辽河流域 1961 年- 2014 年年降水量变化

Fig. 3 Annual precipitation variations in West Liao River Basin during 1961- 2014

利用式(2)~ (7)计算, 1961 年- 2014 年共 54 年的年降水量 Hurst 指数 $H = 0.3513 < 0.5$, 表明降水序列的变化率具有长程记忆, 差分序列的一阶自相关系数 $C = -0.1863 < 0$, C 的意义是事物随时间的变化率- 增长率或者衰减率。 H 和 C 计算结果表明时间序列变化前后负相关, 即过去降水量的整体减少趋势与未来的变化趋势相反, 即未来年降水量可能将会增加。

对 54 年数据进行分组, 对 1961 年- 1978 年、1979 年- 1996 年和 1997 年- 2014 年三组、每组 18 个年降水量做出四分位数图(图 4)进行基本统计量观察。第三组数据教前两组各分位值均比前两组

小, 与五年滑动平均线及过程线分析结论相符。其中 1961 年- 1978 年此分组(第一组)的年降水量均值与多年平均年降水量相近; 1979 年- 1996 年此分组(第二组)的年降水量均值则多于多年平均年降水量; 1997 年- 2014 年此分组(第三组)的平均年降水量则少于多年平均降水量。表明近 20 年来, 降水量偏少。其中第三组出现一个离群值, 发生在 1998 年, 年降水量为 557.5 mm。

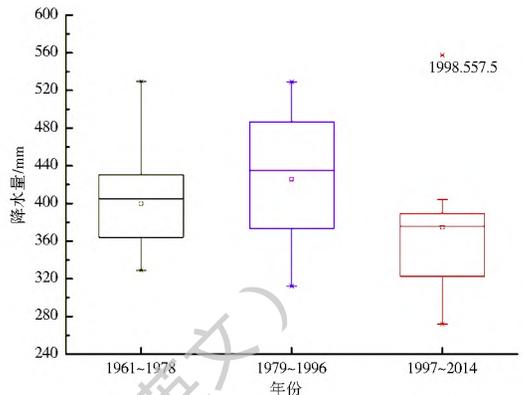


图 4 年降水序列的分组统计(1/4、2/4、3/4)

Fig. 4. Box chart of annual precipitation series

3.2 详细诊断

(1) 趋势分析。

54 年来降水量总体呈下降趋势, 由式(8)计算线性回归斜率为-0.53(图 3), 即平均每 10 年年降水量减少 5.3 mm, 减少趋势不明显。线性拟合的方程 $F = 0.865$, 未通过显著性检验(置信度为 $\alpha = 0.05, F_{\alpha} = 3.84$)。

(2) 突变分析。

对 1961 年- 2014 年西辽河流域降水量进行 M-K 检验, 其中检验曲线的步长取为 6。显著性水平 α 取为 0.05, 对应的临界值曲线 $U_{0.005} = \pm 1.96$ 。由式(13)和(14)计算根据交叉点得出 1975、1998 年可能是突变年。为进一步对突变年进行筛选分析, 基于滑动 T 检验法作进一步分析。对滑动 T 检验的步长同样取为 6, 显著性水平 α 取为 0.05, 由式(9)~ (12)计算突变年则为 1998 年, 结合两个突变检验方法的结果, 认为 1998 年极有可能是突变年。为进一步核实, 分别计算可能突变年前后的年降水序列的均值, 并进行对比分析。1961 年- 1998 年和 1999 年- 2014 年年平均降水量为 557.5 mm 和 516.7 mm, 两者相差近 40 mm, 差别较大。综合以上分析, 可以得到 1998 年是突变年。

(3) 周期分析。

由式(15)~ (20)计算表明, 在不同的时间尺度上信号强弱具有不同分布的特征, 信号强弱表征降

水的波动性的强弱,也即与多年降水的差值。由图 5 可以得到,28~32 a、15~20 a、5~7 a 的时间尺度自增强逐渐变相对较弱,相对应的振荡中心分别为 1967 和 2007 年、1991 年、1972 和 1985 年。由以上分析可知,西辽河流域年降水量在整个时间尺度内 28~32 a、15~20 a 和 5~7 a 三个时间尺度波动变化影响。可以认为其主周期为 6 a、18 a 或 30 a。未来几年处于周期性的雨量增长,因此未来雨量会增长,与 R/S 分析方法得到的结论一致。

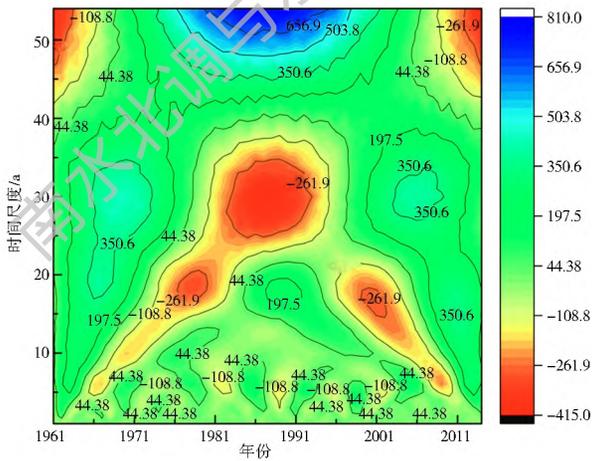


图 5 Morlet 小波变换系数实部时频分布
Fig. 5 Contours of real part time frequency distribution of Morlet wavelet transform coefficient

4 年降水的空间变异诊断

根据多年平均降水量等值线图分析发现在西辽

河流域中部即西辽河干流降水量在 360 mm 以下,其他区域年降水量则在 360 mm 以上,大致处于 360~500 mm 之间,流域南部、东部、北部边缘区域出现了 400 mm 以上降水量。植被覆盖影响到流域降水量的分布状况。1961 年-2014 年西辽河流域年降水量变异系数在 0.166~0.256 之间,平均值为 0.208。根据西辽河流域变异系数等值线图可以得出:变化程度较大的区域集中在流域北部,乌力吉木仁河区域,大致呈现自流域西南、东部向该区域递增的趋势,其中西辽河流域西南部和东部变异系数最小,约为 0.18。该区域大部分同时也是年均降水量偏少区域。

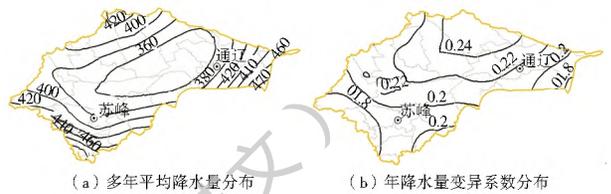


图 6 西辽河流域降水空间分布(1961 年-2014 年)

Fig. 6 Spatial distribution of annual mean precipitation(1961-2014)

为进一步分析近 10 年(2005 年-2014 年,下同)降水量空间变异情况,对近 10 年与多年(1961 年-2014 年)、1961 年-1970 年、1971 年-1980 年、1981 年-1990 年和 1991 年-2000 年五组平均降水量求差,并叠加县级行政区划得出的区域降水量变异图组(图 7),差值变化特征见表 1。

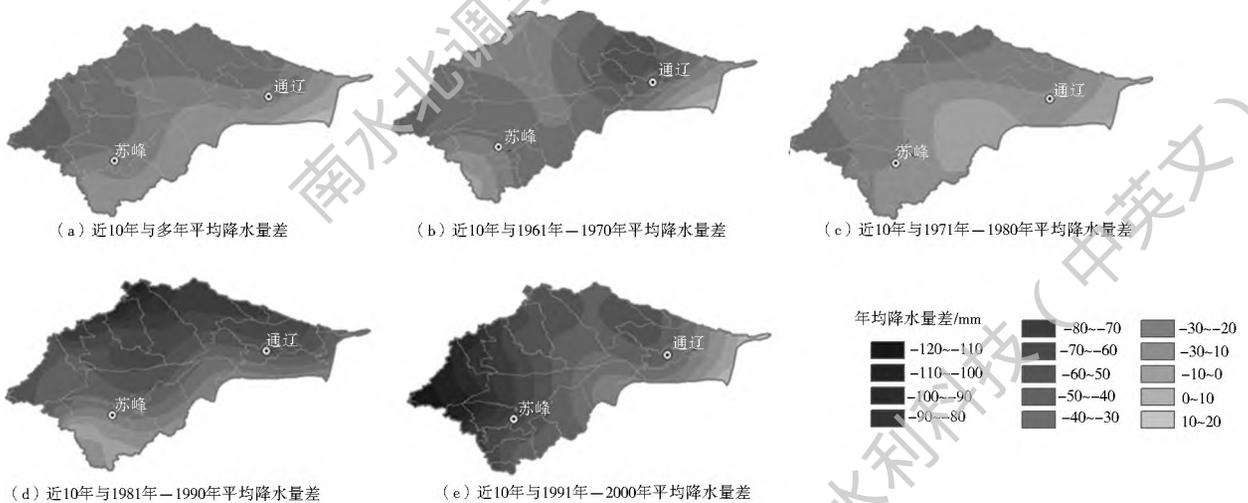


图 7 近 10 年年均降水量与分组年均降水量差值分布图

Fig. 7 Difference in mean annual precipitation between recent 10 years and the five periods

与五组年均降水数据(多年(1961 年-2014)、1961 年-1970、1971 年-1980、1981 年-1990 和 1991 年-2000 年平均降水量)差值分布图显示,除 1971 年-1980 年外,近 10 年来降水较其他三组数据均减少,极少区域出现正值,符合上文中对 3 组降

水量分为统计量的分布特征(图 3)。

图 7 可以反映出降水量的空间变化也具有波动性的特征。此外减少的水量沿着时间的序列逐步增大,且差值的极值大小随时间变大,表明 1961 年以来降水的空间和时间分布随时间变化其变异程度越来

越大。整体上东部变化程度较西部小,南部变化程度较北部小,与变异系数 C_v 的空间分布特征(图6)基本吻合。流域北部变异程度最大。整体上东部变化程度较西部小,南部变化程度较北部小的特征。

表1 差值变化特征

Tab. 1 Characteristics of spatial distribution of the differential values

比较对象	多年平均	1961年-1970年	1971年-1980年	1981年-1990年	1991年-2000年
正值区域	东部极小部分	东部极小部分、西南极小部分	东部极小部分、教来河中下游	西南部小部分(老哈河上游)	东部小部分
负值变化趋势	自东南向西北差值绝对值逐渐增大	西南向东北差值绝对值整体呈逐渐增大	自东南向西北差值绝对值逐渐增大	自东南向西北差值绝对值逐渐增大	自东向西差值绝对值逐渐增大

5 结论

通过诊断系统得到:1961年-2014年年降水量存在明显的年代尺度波动,54年年降水量呈微弱减少趋势,而未来的变化趋势则可能相反。其整体变化趋势符合全球气候变化的大背景^[21-22],同时具有明显的周期性和跳跃性。基于 ArcGIS 的克里金插值空间变异性发现近10年空间上降水量大幅减少,地带性分布明显。针对水文要素的变异规律研究,应结合线性趋势、非线性趋势、跳跃性和周期性等多种角度采用多种方法进行分析,对不同方法下得到的结果进行比较分析,进而得到综合性结论。

参考文献(References):

[1] 中国水利规划设计总院. 全国水资源综合规划水资源调查评价[R]. 北京:中国水利规划设计总院, 2004. (Institute of China Water Resources Planning, Investigation and evaluation of water resources for national integrated planning of water resources [R]. Beijing: Institute of China Water Resources Planning, 2004. (in Chinese))

[2] 贾绍凤, 张杰. 变革中的中国水资源管理[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(10): 102-106. (JIA Shaofeng, ZHANG Jie. Institutional reform of water resources management in China [J]. China Population Resources and Environment, 2011, 21(10): 102-106. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2011.10.016.

[3] Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34: L01704. DOI: 10.1029/2006GL028129, 2007

[4] Tao S Y. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]// Monsoon Meteorology. 1987: 60-92

[5] 刘丹丹, 吴现兵, 程伍群, 等. 白洋淀流域降水特性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 113-117. (LIU Dan dan, WU Xian bing, CHENG Wu qun, et al. Analysis of characteristics of precipitation in Baiyangdian basin [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 113-117. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2014.05.026.

[6] 赵路伟, 徐刚. 河南省1961年-2014年气温和降水量的时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 17-23, 54. (ZHAO Lu Wei, XU Gang. Temporal spatial variation characteristics of temperature and precipitation in Henan Province from 1961 to 2014 [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 17-23, 54. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.03.004.

[7] 张宇, 钟平安, 万新宇, 等. 近57年江苏沿海降水量演变特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015(2): 198-201. (ZHANG Yu, ZHONG Ping an, WAN Xin yu, et al. Evolution characteristics of precipitation along the coastal area of Jiangsu Province in recent 57 years [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(2): 198-201. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.02.002.

[8] 徐凯. 西辽河流域水循环规律及平原区生态稳定性研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013. (XU Kai. Study on Water Cycle Regulation in West Liao River Basin and Ecosystem Stability of West Liao River Plain [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013. (in Chinese))

[9] 王耕, 吴伟. 基于GIS的西辽河流域生态安全空间分异特征[J]. 环境科学, 2005, 26(5): 28-33. (WANG Geng, WU Wei. Assessment on ecological security spatial differences of west areas of Liaohe River Based on GIS [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2005, 26(5): 28-33. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.0250-3301.2005.05.006.

[10] 郝璐, 王静爱. 基于SWAT-WEAP联合模型的西辽河支流水资源脆弱性研究[J]. 自然资源学报, 2012, 27(3): 468-479. (HAO Lu, WANG Jing ai. Evaluate to water resources vulnerability using SWAT-WEAP model in tributary of Xiliaohe River [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(3): 468-479. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2012.03.013

[11] 方秀琴, 任立良, 李琼芳. 老哈河流域水文要素变化研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 620-624. (FANG Xiu qin, REN Li liang, LI Qiong fang. Variations of hydrological elements in Laohahe River Basin [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(6): 620-624. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.002.

[12] 钱正英, 沈国航, 石玉林. 东北地区有关水土资源配置、生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究(综合卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (QIAN Zheng ying, SHEN Guo fang, SHI Yu lin. Strategy studies of water and land resource

- allocation, ecosystem and environmental reservation, and sustainable development in northeast China (Synthesis volume) [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [13] 陈军, 周丽, 于孟文. 内蒙古西辽河平原地质环境问题及地下水资源合理开发利用研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 123-125. (CHEN Jun, ZHOU Li, YU Mengwen. Geological environmental problems and suggestion of scientific exploitation and utilization of groundwater resource in the west of Liaohe plain inner Mongolia [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(3): 123-125. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-3665.2008.03.029.
- [14] 王西琴, 李力. 西辽河断流问题及解决对策[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(6): 79-83. (WANG Xi qin, LI Li. The Drying up of the Western Liaohe River and the Countermeasures to the Problem [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(6): 79-83. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-7578.2007.06.015.
- [15] 何, 傅德平, 赵志敏, 等. 基于 GIS 的新疆降水空间插值方法分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6): 35-37. (HE Yan, FU De ping, ZHAO Zhi min, et al. Analysis of spatial interpolation methods to precipitation based on GIS in Xinjiang [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(6): 35-37. (in Chinese))
- [16] 周锁铨, 薛根元, 周丽峰, 等. 基于 GIS 降水空间分析的逐步插值方法[J]. 气象学报, 2006, 64(1): 100-111. (ZHOU Suo quan, XUE Gen yuan, ZHOU Li feng, et al. The stepwise interpolation approach of precipitation for spatial analysis based on GIS [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64(1): 100-111. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0577-6619.2006.01.010.
- [17] 许斌. 变化环境下区域水资源变异与评价方法不确定性[D]. 武汉: 武汉大学, 2013. (XU Bin. Alteration and assessment with uncertainty study of regional surface water resources in the changing environment [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (in Chinese))
- [18] 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. (WEI Feng ying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999. (in Chinese))
- [19] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J]. 地理科学进展, 2013, 32(9): 1413-1422. (SANG Yan fang, WANG Zhong gen, LIU Chang ming. Applications of wavelet analysis to hydrology: Status and prospects [J]. Progress in Geography, 2013, 32(9): 1413-1422. (in Chinese)) DOI: 10.11820/dlkxjz.2013.09.011.
- [20] 李淼, 夏军, 陈社明, 等. 北京地区近 300 年降水变化的小波分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 1001-1011. (LI Miao, XIA Jun, CHEN She ming, et al. Wavelet analysis on annual precipitation around 300 years in Beijing Area [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(6): 1001-1011. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2011.06.011
- [21] 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 Ming kui, TAO Bo, et al. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change. Geographical Research, 2006, 25(6): 1031-1040. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2006.06.010.
- [22] 任国玉, 战云健, 任王玉, 等. 中国大陆降水时空变异规律——N. 气候学特征[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 299-310. (REN Guo yu, ZHAN Yun jian, REN Yu yu, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: N. Climatology [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 299-310. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.03.001.

(上接第 21 页)

- [28] 杨光, 高俊. 云南省干旱特点和抗旱工作探讨[J]. 人民珠江, 2012, 33(4): 73-75. (YANG Guang, GAO Jun. Study on drought characteristics and drought resistance in Yunnan Province [J]. Pearl River, 2012, 33(4): 73-75. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2012.04.024.
- [29] 茆诗松, 程依明, 濮晓龙. 概率论与数理统计教程(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 423-434. (MAO Shi song, CHENG Yi ming, PU Xiao long. Probability and mathematical statistics (2nd edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 423-434. (in Chinese))