

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2018.0069

张晓松, 曹命凯, 丁艳霞, 等. 南水北调东线典型受水区降雨特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 59-64. ZHANG X S, CAO M K, DING Y X, et al. Rainfall characteristics in typical water receiving area of East Route of South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 59-64. (in Chinese)

南水北调东线典型受水区降雨特征分析

张晓松¹, 曹命凯¹, 艳霞¹, 王少波¹, 张艳¹, 孙敏²

(1. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏扬州 225127; 2. 高邮市水利局, 江苏扬州 225600)

摘要: 根据南水北调东线典型受水区 1951-2012 年降雨资料, 采用滑动平均法、Mann-Kendall 检验法、游程检验法、Spearman 秩次相关检验法及 Morlet 小波变换分析方法, 分析了江苏省沂南水利分区降雨演变趋势和周期变化特征。研究结果表明, 近 62 年来, 该区域降雨量呈不显著减少趋势, 并且呈现 27 a 显著周期变化。研究结果对该地区应对防洪抗旱、农业生产以及南水北调东线可持续调水具有重要的指导意义。

关键词: 南水北调; 沂南地区; 降雨量; Morlet 小波变换; 降雨特征

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0059-06

Rainfall characteristics in typical water receiving area of East Route of South to North Water Diversion Project

ZHANG Xiaosong¹, CAO Mingkai¹, DING Yanxia¹, WANG Shaobo¹, ZHANG Yan¹, SUN Ming²

(1. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources, Co., Ltd., Yangzhou 225127, China;

2. Gaoyou Water Conservancy Bureau, Yangzhou 225600, China)

Abstract: On the basis of the rainfall data from 1951 to 2012, in this paper we analyzed the rainfall evolution trend in a typical water-receiving area of East Route of South to North Water Diversion Project. We adopted four methods including the moving average method, Mann-Kendall test method, Run test method, and Spearman rank test. Meanwhile we used Morlet wavelet transform to analyze the periodic variation characteristics. The results showed that the rainfall in the region showed an insignificant decreasing trend from 1951 to 2012 and had a 27 year variation cycle. The results have important guiding significance for flood control, drought resisting, agricultural production, and sustainable water diversion for the East Route of South to North Water Diversion Project.

Key words: South to North Water Diversion; Yinan area; rainfall; Morlet wavelet transform; rainfall characteristics

南水北调工程是解决我国北方地区水资源短缺, 实现社会经济可持续发展的特大型跨流域调水工程, 分别从长江上、中、下游调水, 经东、中、西三线输送至水资源短缺的黄淮海流域。南水北调东线工程利用江苏省已建的江水北调工程, 逐步扩大调水规模并延长输水线路, 工程从长江下游扬州江都水利枢纽抽引长江水, 利用京杭大运河及与其平行的

河道逐级提水北送至黄淮海平原东部和胶东地区, 其中江苏境内受水区涉及扬州、淮安、盐城、宿迁、连云港和徐州六市, 总面积 3 81 万 km²。

随着全球区域气候的变化, 将导致区域降雨量发生变化, 从而对水资源供给和自然生态系统产生重大影响。因此, 分析研究区域降雨变化的趋势和周期变化规律^[1-4], 对认识区域降雨特征、应对强降

收稿日期: 2017-08-11 修回日期: 2017-12-12 网络出版时间: 2018-01-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180110.0846.002.html>

基金项目: 江苏省水利科技重点项目(2015002)

Fund: Key Project of Water Conservancy Science and Technology in Jiangsu(2015002)

作者简介: 张晓松(1977-), 男, 江苏姜堰人, 高级工程师, 主要从事水利规划设计方面研究。E-mail: 565023887@qq.com

雨等极端气候以及农业生产、防汛抗旱、水资源规划等具有重要意义。南水北调工程实施以来,水文工作者进行了很多有价值的研究,但是有关降雨特征分析的研究仅南水北调中线京石段开展过^[5]。目前研究降雨变化趋势常用的方法有滑动平均法^[6-7]、线性估计、Mann-Kendall 秩次相关检验法^[8-9]等,常用的周期变化研究方法有回归周期分析法、傅立叶分析法^[10]、小波分析法等。本文以南水北调东线江苏境内受水区的沂南水利分区作为研究区域,利用滑动平均法、Mann-Kendall 秩次相关检验法、游程检验法^[11-12]、Spearman 秩次相关检验法^[13-15]四种方法相结合对该地区降雨变化趋势进行分析,并应用 Morlet 小波变换^[11-12]分析降雨的时间及周期变化特征,此研究为南水北调东线江苏境内水量调度运行管理、区域抗旱排涝调度工作的开展以及水资源开发与利用等提供参考。

1 区域概况

江苏省沂南水利分区(简称:沂南地区)是南水北调东线江苏境内水量配置模型的计算单元之一,位于新沂河以南、废黄河以北,东临黄海、西至中运河,涉及四市七县区,包括盐城市的响水县,连云港市的灌南县,淮安市的涟水县、淮阴区,宿迁市的宿豫区、泗阳县、沭阳县,区域总面积 7 477 km²。区域地形总趋势是西高东低,自西南向东北倾斜,东西向平均地面比降约万分之一点三。该区域地处亚热带向暖温带过渡性气候中,又是南北气流过渡地带,有明显的海洋季风特征,全年四季分明,夏季暖热多雨,受台风侵袭频繁,冬季寒

冷干燥,春秋两季昼暖夜寒,冷空气活动频繁,温差变化较大。

2 暴雨类型及特征

区域降雨相对比较集中,多突发性暴雨,最大日降雨量 610.3 mm(陈港站,2000 年 8 月 30 日)。降雨年际变化幅度大,多年平均面雨量为 926.12 mm(1951-2012 年),最大年降雨量为 1 489.69 mm(2003 年),最小年降雨量仅为 572.24 mm(2004 年),多年平均年降雨天数 99.2 d,最多年降雨天数为 131 d(1954 年),最少年降雨天数 63 d(1957 年);降雨年内分配极不均匀,汛期 6 月-9 月降雨量比较集中,约占全年降雨量的 70%,秋末的 10 月至次年的 2 月,降雨量一般只占全年降雨量的 15% 左右。

台风则多发生在 7 月到 9 月,尤其以 8 月最频繁,常因 8~9 级大风大潮伴随着 100 mm 以上降雨同时发生,极易产生突发性的洪、涝、潮等自然灾害。另龙卷风、六级以上的大风、冰雹和 5 月中下旬的干热风,在局部地区也会造成危害^[16-17]。

3 资料选取及分析方法

3.1 资料选取

根据沂南地区雨量站网分布,并综合考虑降雨资料的代表性、可靠性以及完整性,选用区域内的宿迁闸、泗阳闸、淮阴闸等 37 个雨量站点 1951-2012 年逐日降雨数据,利用泰森多边形法^[18]进行面平均雨量计算,以面平均雨量作为区域降雨趋势分析的资料,能更好更全面地分析该地区的降雨变化特征。沂南地区雨量站点分布见图 1。

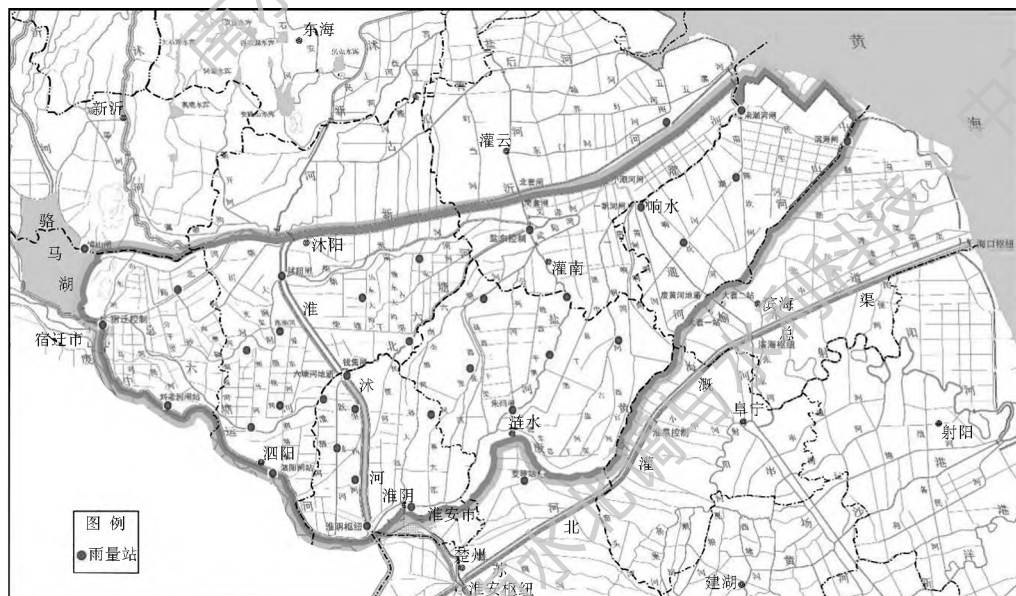


图 1 沂南地区雨量站点分布

Fig. 1 Location of precipitation stations in Yinan Area

3.2 分析方法

本文采用滑动平均法、Mann Kendall 秩次相关检验法、游程检验法、Spearman 秩次相关检验法等 4 种方法来研究分析区域降雨趋势。同时应用 Morlet 小波变换分析该地区降雨的时间及周期变化特征。

(1) 滑动平均法。

在一个系列 $\{x_n\}$ 中, 将连续的 $2n$ 或 $2n+1$ 个数取值取平均, 然后向后逐年滑动求均值直到最后一个数据, 得到的新序列 $\{y_n\}$ 比原序列 $\{x_n\}$ 更光滑, 即滑动平均法。

(2) Mann Kendall 检验法。

应用 Mann Kendall 方法检验降雨时间序列 $\{x_n\}$ 的变化趋势时, 构造统计量 S 如下:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

式中:

$$\text{Sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

统计量 S 服从正态分布, 均值为 0, 方差 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。当 $n > 10$ 时, 将统计量 S 标准化:

$$U = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

若当 $U < 0$, 则认为有下降趋势, 反之呈上升趋势。在显著水平 α 下, 若 $|U| \geq U_{\alpha/2}$, 认为趋势性显著, 反之趋势性不显著^[8-9]。

(3) 游程检验法。

根据已知的降雨时间序列 $\{x_n\}$, 求出相应的距平系列 $\{x'_n\}$, 其中 $x'_i = x_i - \bar{x}$, $\bar{x} = 1/n \sum_{i=1}^n x_i$ 。若将连续的 $x'_i > 0$ 或 $x'_i < 0$ 看作一个游程, 统计序列中出现的游程总数 S , 其中 n_1 为序列中 $x'_i > 0$ 出现的总数, n_2 为序列中 $x'_i < 0$ 出现的总数。实际分析中, 如 n_1 或 n_2 大于 15 时, 构造统计量 U :

$$U = \frac{S - E(S)}{\sqrt{D(S)}} \quad (4)$$

构造统计量 U 近似服从 $N(0, 1)$ 标准正态分布, 式中:

$$E(S) = \frac{2n_1 n_2}{n_1 + n_2} + 1 \quad (5)$$

$$D(S) = \frac{2n_1 n_2 [2n_1 n_2 - (n_1 + n_2)]}{(n_1 + n_2)^2 (n_1 + n_2 - 1)} \quad (6)$$

根据游程检验的 S 分布表, 选取某一显著 α 水平作双边检验。当 $|U| > U_{\alpha/2}$ 时, 拒绝原假设, 序列趋势变化明显, 反之不明显^[11-12]。

(4) Spearman 秩次相关检验法。

Spearman 秩次相关检验主要通过分析降雨序列 $\{x_i\}$ 与其时序 i 的相关性而检验降雨时序是否有趋势性。在运算时, 将降雨序列按从大到小排列, 用其新秩序 R_i 代表, 计算秩次相关系数:

$$r = 1 - 6 \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2 / (n^3 - n) \quad (7)$$

式中: n 为序列长度; $d_i = R_i - i$ 。如果秩次与时序相近, 则较小, 秩次相关系数较大, 趋势性显著。通常采用 t 检验法检验降雨时序的趋势性是否显著, 统计量 T 的计算公式为:

$$T = r \sqrt{(n-4)/(1-r^2)} \quad (8)$$

T 服从自由度为 $n-2$ 的 t 分布, 原假设为序列无趋势, 则根据降雨时序的秩次相关系数计算统计量 T , 然后选择显著水平 α , 在 t 分布表中查出临界值 $t_{\alpha/2}$, 当 $|T| > t_{\alpha/2}$ 时, 则拒绝原假设, 说明序列随时间有相依关系, 从而推断序列趋势明显, 否则, 接受原假设, 趋势不显著^[13-15]。

(5) Morlet 小波变换。

小波分析是一种信号的时间/尺度(频率)分析方法, 具有多分辨率分析的特点, 在时频两域都具有表征信号局部特征的能力, 被广泛应用于水文时间序列的尺度分析、水文预测预报及水文随机模拟。Morlet 小波是一维连续的, 其波形与降雨的波形较为接近。函数表达式为:

$$\Phi(t) = \exp(iw_0 t) \exp(-\frac{t^2}{2}) \quad (9)$$

式中: w_0 为常数, i 为虚数。通过小波变换后, 得到的小波变换图能够反映降雨在不同时间尺度上的周期变化^[19]。小波系数实部为正的用实线表示, 代表降雨偏多; 小波系数实部为负的用虚线表示, 代表降雨偏少。小波方差图反映了能量随时间尺度的分布, 可以用来分析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^[20-22]。为了进一步确定降雨的周期变化, 需通过小波方差检验, 确定显著周期。小波方差的计算公式为:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (10)$$

4 降雨变化特征分析

4.1 降雨变化趋势分析

本文对沂南地区 1951-2012 年面平均雨量采

用 5 年滑动平均法, 直观反映该地区降雨的变化趋势, 同时采用 Mann Kendall 秩次相关检验法、游程检验法、Spearman 秩次相关检验法, 选用置信水平 $\alpha = 0.05$, 通过比较检验统计量与临界值大小来判断降雨变化趋势的显著性。沂南地区年降雨量 5 年滑动平均过程线见图 2, 显著性检验结果见表 1。

图 2 可以直观反映沂南地区年降雨量的变化情况, 降雨呈现增多和减少交替变化, 但总体趋势是减少了, 同时通过 Mann Kendall 检验, $U = -0.996 < 0$, 也定量反映出降雨呈下降趋势。并且从表 1 可以看出, 三种检验一致表明这种下降趋势是显著的。

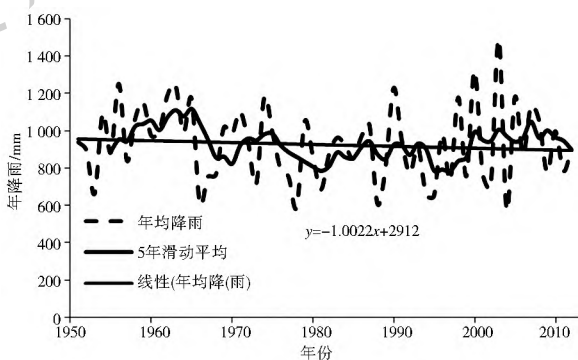


图 2 沂南地区年降雨量 5 年滑动平均过程线
Fig. 2 The 5 year moving average curve of rainfall in Yinan area

表 1 沂南地区年降雨量变化趋势检验

Tab. 1 The change trend test of annual rainfall in Yinan area

方法	检验统计量	显著水平	临界值	结果	趋势性
Mann Kendall 秩次相关检验法	$U = -0.996$	$\alpha = 0.05$	1.96	$ U > U_{\alpha/2}$	显著
游程检验法	$U = 0.39$	$\alpha = 0.05$	1.96	$ U > U_{\alpha/2}$	显著
spearman 秩次相关检验法	$T = 0.942$	$\alpha = 0.05$	2.00	$ T < T_{\alpha/2}$	显著

4.2 降雨周期变化分析

应用 Matlab 的 Morlet 小波分析工具对沂南地区 1951-2012 年降雨资料进行周期特性分析, 得到小波系数实部等值线图和小波方差图, 具体见图 3、图 4。

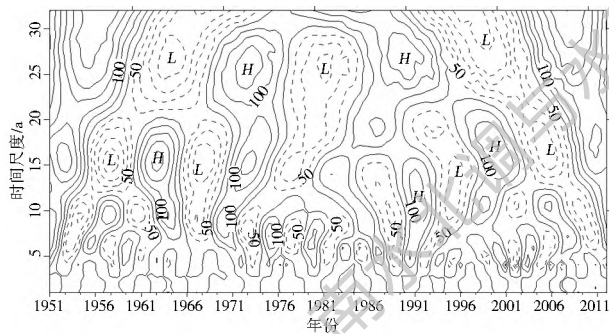


图 3 小波系数实部等值线图

Fig. 3 The isograms of the real part of wavelet coefficient

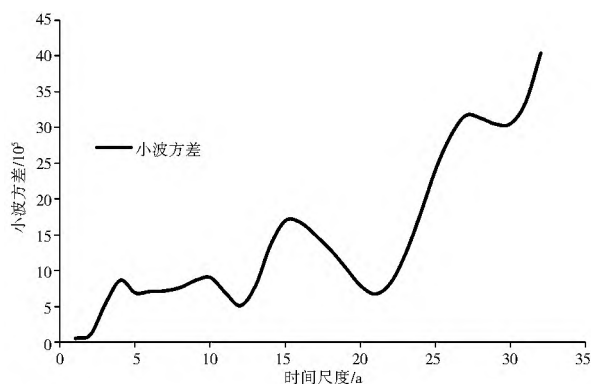


图 4 小波方差图

Fig. 4 The variance of Morlet wavelet coefficient

间尺度的周期变化及其在时间域中的分布, 从而判断在不同时间尺度降雨的未来变化趋势。图 3 中, 实线表示小波系数正值部分, 代表降雨偏多, H 表示正值中心; 虚线表示小波系数负值部分, 代表降雨偏少, L 表示负值中心。从图中可以清楚的看到降雨演变过程中存在多时间尺度特征, 大致为 22~32 a, 12~21 a, 3~11 a 的 3 类尺度的周期变化规律。其中, 22~32 a、12~21 a 两个时间尺度上, 周期变化在整个分析时间中表现的比较稳定, 具有全域性。在 22~32 a 尺度上先增后减, 出现多-少准 3 次震荡; 在 12~21 a 时间尺度上, 出现多-少 6 次震荡。在 3~11 a 时间尺度上 1954-1981 年较为明显, 多-少循环交替。

从图 4 小波方差图可以看出, 不同时间尺度扰动的相对强度不同, 图中存在 4 个较为明显的峰值, 依次 27 a、15 a、10 a、4 a。其中 27 a 对应着最大峰值, 说明 27 a 左右的周期震荡最强, 为沂南地区降雨变化的第一主要周期; 15 a 对应着第二峰值, 为沂南地区降雨变化的第二主要周期; 10 a 对应着第三峰值, 为沂南地区降雨变化的第三主要周期; 4 a 对应着第四峰值, 为沂南地区降雨变化的第四主要周期。以上 4 个周期的波动控制着降雨在整个时间域内的变化特征。

根据小波方差检验结果, 绘制控制区域降雨演变的第一、二周期即 27 a、15 a 特征时间尺度的小波系数图, 见图 5、图 6。从主周期趋势图中可以分析出在不同的时间尺度下, 区域降雨存在的平均周期及多-少变化特征不同。图 5 表明, 在 27 a 时间尺

小波系数实部等值线图能反映降雨系列不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布, 从而判断在不同时间尺度降雨的未来变化趋势。

度上,平均周期为 18 a 左右,大约经历了 3 个多-少转换期。降雨峰值出现在 1955 年、1973 年、1990 年和 2009 年。图 6 表明,在 15 a 时间尺度上,平均周期为 10 a 左右,大约经历了 6 个多-少转换期。降雨峰值出现在 1953 年、1963 年、1973 年、1982 年、1991 年、2000 年、2011 年。

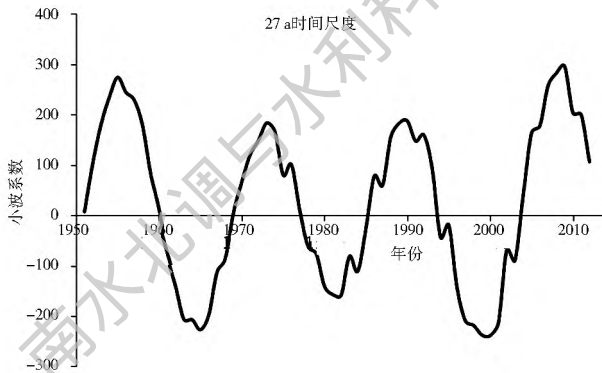


图 5 沂南地区降雨变化的 27 a 特征时间尺度小波实部过程线

Fig. 5 The curve of the real part of wavelet coefficient for rainfall change on 27 a characteristic time scale in Yinan area

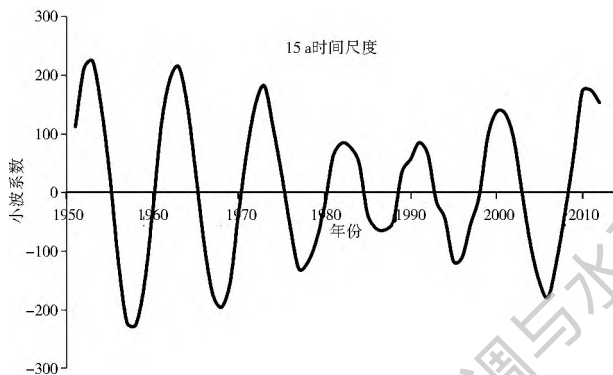


图 6 沂南地区降雨变化的 15 a 特征时间尺度小波实部过程线

Fig. 6 The curve of the real part of wavelet coefficient for rainfall change on 15 a characteristic time scale in Yinan area

5 结论

(1) 在降雨序列具有显著变化趋势时,滑动平均法所得到的曲线能够直观的反映出变化趋势,但是不能表明趋势是否显著。文中采用 3 种检验方法与滑动平均法相结合,既可以直观反映变化趋势,又可以定量分析检验趋势的显著性,同时三种检验方法可以对比参考。最终分析结果一致表明沂南地区 1951-2012 年面平均降雨量呈现增多和减少交替变化,但总体呈递减趋势,并且趋势显著。

(2) 通过 Matlab 的 Morlet 小波分析,沂南地区降雨存在 22~32 a, 12~21 a, 3~11 a 的 3 类尺度的周期变化规律。不同的时间尺度表现出不同的循环交替。小尺度周期震荡剧烈,大尺度周期震荡平稳,规律更明显,全局性更强。

(3) 通过小波方差判断降雨时间序列各种时间尺度扰动的相对强度,沂南地区降雨受 27 a、15 a、10 a、4 a 四个时间尺度的干扰较大,其中 27 a 干扰强度最大,为该序列的主要时间尺度,即主要周期。在 27 a 时间尺度上,该地区降雨的平均周期为 18 a 左右,大约经历了 3 个多-少转换期。

参考文献(References):

- [1] 潘杰. 常州地区 1978 年-2012 年降雨量时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 245-248. (PAN J. Spatial and temporal characteristics of precipitation in Changzhou Area from 1978 to 2012[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 245-248. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nbsdqk.2015.02.012.
- [2] 徐宗学, 张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 27-34. (XU Z X, ZHANG N. Long term trend of precipitation in the Yellow River basin during the past 50 years[J]. Geographical Research, 2006, 25(1): 27-34. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2006.01.004.
- [3] EVANS J P, JAKEMAN A J. Development of a simple, Catchments scale, rainfall evapotranspiration runoff model[J]. Environmental Modelling & Software, 1998, 13: 385-393.
- [4] WAGENER T, LEES M J. Rainfall Runoff Modeling Toolbox user manual[J]. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, U.K. 2001.
- [5] 尹航, 王文君, 吴英杰, 等. 南水北调中线京石段降雨序列特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 113-118. (YIN H, WANG W J, WU Y J, et al. Analysis of rainfall characteristics in Beijing Shijiazhuang section of South to North Water Diversion[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(4): 113-118. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2016.04.21.
- [6] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001(1): 21-23. (PEI Y X, GUO M. The fundamental principle and application of sliding average method[J]. Gun Launch & Control Journal, 2001(1): 21-23. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-6524.2001.01.007.
- [7] 李娟, 张维江, 马铁. 滑动平均-马尔可夫模型在降雨预测中的应用[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 196-198. (LI J, ZHANG W J, MA Y. Application of moving Average Markov Chain in the prediction of precipitation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(6): 196-198. (in Chinese))
- [8] 康淑媛, 张勃, 柳景峰, 等. 基于 Mann-Kendall 法的张掖市降雨量时空分布规律分析[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 501-508. (KANG S Y, ZHANG B, LIU J F, et al. Analysis of the spatio-temporal distribution of precipitation in Zhangye City Using Mann-Kendall method[J]. Resources Science, 2009, 31(3): 501-508. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1007-7588.2009.03.022.
- [9] 郭小芹, 刘明春, 钱莉, 等. 从 Mann-Kendall 特征看石羊河流域降雨量的演变规律[J]. 干旱区地理, 2010, 33(4): 593-599. (GUO X Q, LIU M C, QIAN L, et al. Evolution regularity of

- precipitation in the Shiyang River Basin on Mann Kendall features[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(4): 593-599. (in Chinese) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2010.04.015.
- [10] 肖志国. 几种水文序列周期分析方法的比较研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (XIAO Z G. Comparison of different analysis methods for the periodicity of hydrological time series[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [11] 王文圣, 丁晶, 李耀清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (WANG W S, DING J, LI Y Q. Hydrology wavelet analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [12] 丁晶, 刘权授. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (DING J, LIU Q S. Stochastic hydrology[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese))
- [13] 王国庆, 贾西安, 陈江南, 等. 人类活动对水文序列的显著影响干扰点分析——以黄河中游无定河流域为例[J]. *西北水资源与水工程*, 2001, 12(3): 13-15. (WANG G Q, JIA X A, CHEN J N, et al. Analysis on the transition point of hydrological series impacted by human activities—a case study of Wudinghe basin in the middle reach of the Yellow River[J]. *Northwest Water Resources & Water Engineering*, 2001, 12(3): 13-15. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-643X.2001.03.004.
- [14] 曾小凡, 翟建青, 姜彤, 等. 长江流域年降雨量的空间特征和演变规律分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(6): 727-732. (ZENG X F, ZHAI J Q, JIANG T, et al. Spatial characteristics and evolutionary trends of annual precipitation in the Yangtze River basin[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2008, 36(6): 727-732. (in Chinese) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2008.06.001.
- [15] 杜富慧, 郝振纯, 陈新美, 等. 邯郸地区年降雨量统计特性[J]. *水资源保护*, 2009, 25(6): 16-20. (DU F H, HAO Z C, CHEN X M, et al. Statistical characteristics of annual precipitation in Handan region[J]. *Water Resources Protection*, 2009, 25(6): 16-20. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2009.06.005.
- [16] 徐晨光, 冯新峰, 郑志伟, 等. 江苏省降雨时空分布特征研究[J]. *现代农业科技*, 2014, 20: 236-239. (XU C G, FENG X F, ZHENG Z W, et al. Study on characteristics for spatial and temporal distribution in Jiangsu province[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2014, 20: 236-239. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2014.20.139.
- [17] 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, 13(2): 198-201. (ZHANG Y, ZHONG P A, WAN X Y, 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, 13(2): 198-201. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2015.02.002.
- [18] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (RU X F. Hydrological principles[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2004. (in Chinese))
- [19] 山城菊, 董增川, 付晓花, 等. 近50年来滦河流域径流演变规律研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(4): 5-8. (SHAN C J, DONG Z C, FU X H, et al. Rules of runoff variation in Luanhe river basin in recent 50 years[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(4): 5-8. (in Chinese) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.04005.
- [20] 邱海军, 曹明明, 曾彬. 基于小波分析的西安降水时间序列的变化特征[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(1): 23-27. (QIU H J, CAO M M, ZENG B. Wavelet analysis on the temporal series of precipitation in Xi'an[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(1): 23-27. (in Chinese) DOI: 10.3963/j.issn.1000-6362.2011.01.005.
- [21] 王哲, 只德国, 李涛涛, 等. 海河流域降雨时间序列小波分析[J]. *海河水利*, 2012(3): 30-32. (WANG Z, ZHI D G, LI T T, et al. Wavelet analysis of Haihe river basin rainfall time series[J]. *Haihe Water resources*, 2012(3): 30-32. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2012.03.010.
- [22] 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. (XU Y Q, LI S C, CAI Y L. The research of rainfall variation based on wavelet in Hebei Plain[J]. *Science China Ser. D Earth Sciences*, 2004, 34(12): 1176-1183. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn.1006-9267.2004.12.011.