

黄石市降水量年际变化分析及趋势预测

沈国进, 李子慧

湖北省黄石市水文水资源勘测局, 湖北 黄石

收稿日期: 2023年7月17日; 录用日期: 2023年8月14日; 发布日期: 2023年8月31日

摘要

本文对黄石市19站点1956年至2022年67年的年降水资料系列进行分析研究, Mann-Kendall趋势检验和P-III曲线法分析年际未呈现显著性变化, 年降水量均值为1435 mm, 整体随时间呈现小幅度增多。滑动平均值法、K-means聚类法分析黄石市年降水量大约7年为一个变化周期, 而模比系数法分析在历年样本数据周期内更容易发生连续偏枯, 频率为12.1%远高于偏丰频率的3.0%, 旱情发生的频率需要加以重视。R/S分析未来年降水量整体仍为小幅增加, 预测2023年~2025年黄石市降水量多年平均值在1450 mm左右, 多种分析方法的数据与黄石市的水资源调度管理现行政策较为吻合, 未来仍需防汛抗旱并举。

关键词

降水量, 年际变化, Mann-Kendall, K-Means聚类法, 黄石市

Interannual Variation Analysis and Trend Prediction of Precipitation in Huangshi City

Guojin Shen, Zihui Li

Huangshi Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Huangshi Hubei

Received: Jul. 17th, 2023; accepted: Aug. 14th, 2023; published: Aug. 31st, 2023

Abstract

The Mann-Kendall trend test and P-III curve are used to analyze the annual precipitation data series at 19 precipitation stations in Huangshi City from 1956 to 2022 (67 years). The results show that there is no significant change in the interannual variation pattern with an average annual precipitation of 1435 mm. The overall annual precipitation shows a slight increase. Based on the moving average method and the K-means clustering method, the annual precipitation approaches 7 years as a change cycle, while the modulus coefficient method analysis indicates that continuous drought is more likely to occur in the sample data cycle, with

作者简介: 沈国进(1989-), 男, 湖北宜昌人, 工程师, 主要从事水文预报及水情数据分析方面的工作, Email: 121701226@qq.com

文章引用: 沈国进, 李子慧. 黄石市降水量年际变化分析及趋势预测[J]. 水资源研究, 2023, 12(4): 412-419.

DOI: 10.12677/jwrr.2023.124046

a frequency of 12.1% being far higher than the flood frequency of 3.0%, so the frequency of drought needs to be paid attention to. The predicted annual precipitation is 1450 mm from 2023 to 2025 by the R/S analysis method. The data from various analysis methods point out that this is more consistent with the current policy of water resources management, and flood control and drought relief are still needed in the future.

Keywords

Precipitation, Interannual Variation, Mann-Kendall, K-Means Clustering Method, Huangshi City

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

降水是研究气候变化的重要指标之一。随着中国城镇化进程的不断发展,不同区域表现出不同的降水特性,由于降水的丰枯变化直接影响干旱、洪涝等灾害的发生及严重程度,很多学者对不同的城市进行系列的年降水量特征研究[1] [2],均有不同的规律,但是对于黄石市近 70 年降水特性的分析未有表述,也没有从年际角度对降水量进行系统分析。本文利用黄石市 1956 年至 2022 年黄石境内 19 站点 67 年的降水资料,分析黄石市多年的降水量年际变化规律,从而为黄石市的中长期防汛抗旱及水资源管理提供决策支持。

2. 研究数据与方法

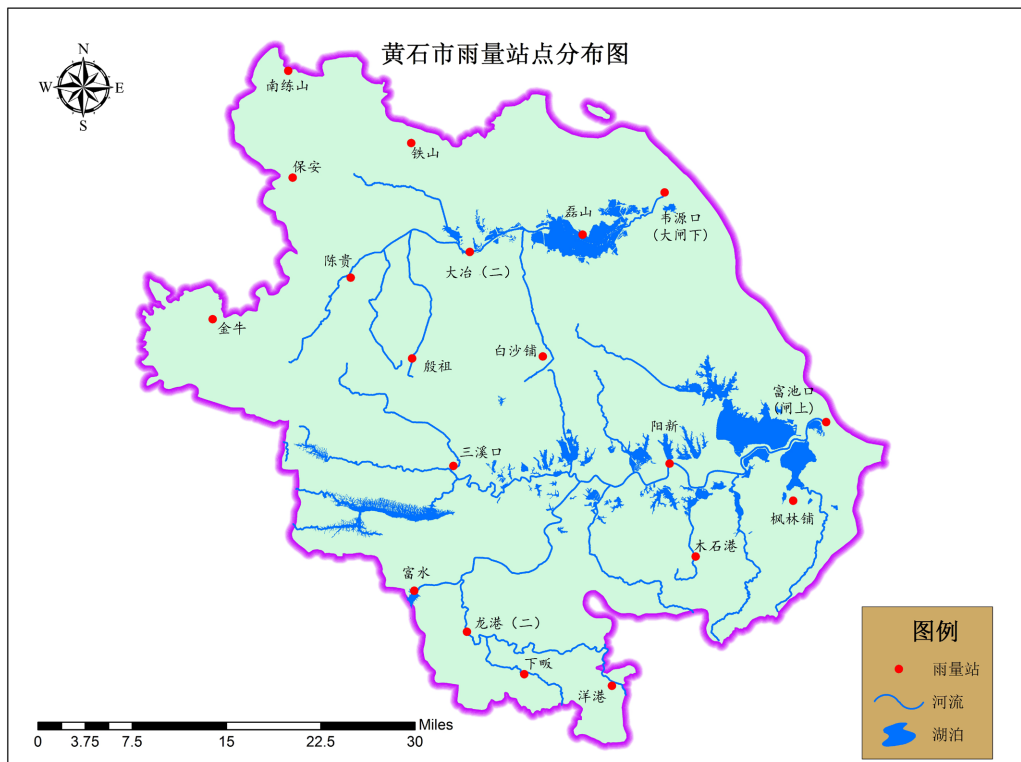


Figure 1. Distribution of precipitation stations in Huangshi City

图 1. 黄石市雨量站点分布图

黄石市历年各月降水量分布图

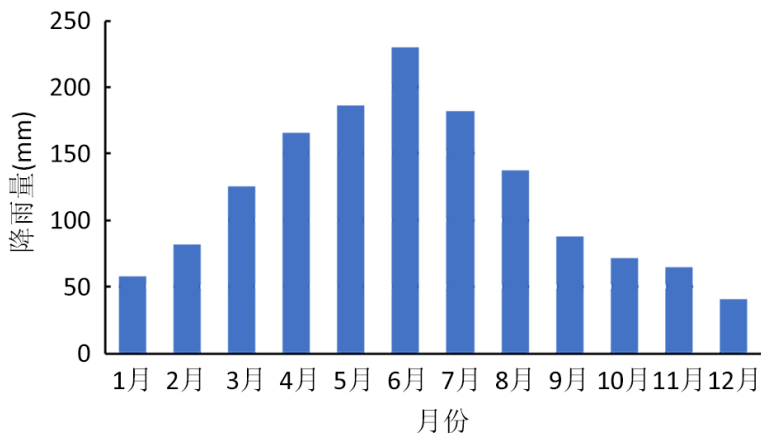


Figure 2. Monthly precipitation distribution of Huangshi City
图 2. 黄石市历年各月降水量分布图

黄石市位于长江中游南岸、湖北省东南部，介于东经 114°31'~115°30'，北纬 29°30'~30°15'之间，国土面积 4583 km²，地形总体趋势西南高东北低，地处中纬度，为典型的亚热带大陆性季风气候。图 1 收集的黄石境内 19 站 1956~2022 年长系列降水资料，所有资料采用实测值或延长至 1956 年，经过三性审查，资料准确可靠，降水站点密度为 241 km²/站，满足雨量站平均 300 km²/站的要求[3]。

67 年的黄石市历年降水量均值为 1435.0 mm，图 2 中 4~9 月降水量占全年的 69.1%，4~7 月降水量占全年的 53.4%，该时间段内主要为清明前后降水、入汛以及梅雨期降水，而黄石历年梅雨期多开始于 6 月下旬，所以 6 月的降水量均值最大，占全年的 16.0%，而梅雨量的多少影响着水利工程的蓄水量，这也是后期抗旱的主要水量。

2.1. Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 检验[4]是一种用于检测时间序列趋势变化的非参数统计方法，它不需要对数据分布做出任何假设，因此适用于各种类型的数据。Mann-Kendall 检验的过程如下：先进行 H₀ 假设(时间序列中不存在显著趋势变化)和 H₁ 假设(时间序列中存在显著趋势变化，包括上升和下降两种单调趋势)。在 H₀ 假设下，定义检验统计变量 S：

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

其中，Sgn 为符号函数：

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

方差计算公式为：

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^m t_k(t_k-1)(2t_k+5)}{18} \tag{3}$$

当 N ≥ 10 时，统计量 S 近似服从标准正态分布，将其通过标准化转化为 Z，使用检验统计量 Z 进行显著性检验，其转化公式如下：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & S > 0 \\ S & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

在给定的置信水平 α ，若 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ ，则 H_0 假设不成立，而 H_1 假设成立，同时根据 Z 正负来判断变化趋势，其中 Z 为正则为增加趋势，负则为减少趋势。

根据 67 年内实测降水量资料，在置信水位 $\alpha = 0.05$ 时，经计算：

$$S = 46, \quad Var(S) = 34146.67, \quad Z = 0.2435, \quad n = 67$$

计算结果 Z 值为 0.2435(略大于 0)，表明黄石市年际降水量接受假设 H_0 ，即认为黄石市 67 年年际降水量未发生显著性变化，但有存在略微增加的趋势。

2.2. P-III 曲线法

对黄石市 67 年的平均降水量进行 P-III 型曲线适线分析，其多年平均降水量为 1435.0 mm， $C_S/C_V = 2$ ，变差系数 $C_V = 0.19$ 。按水资源调查评价标准将河川径流丰、平、枯划分为特丰水年、偏丰水年、平水年、偏枯水年和特枯水年 5 种。

类别：根据经验频率，将年降水量分为：特丰水年 $P < 12.5\%$ ，偏丰水年 $12.5\% < P \leq 37.5\%$ ，平水年 $37.5\% < P \leq 62.5\%$ ，偏枯水年 $62.5\% \leq P < 87.5\%$ ，特枯水年 $P \geq 87.5\%$ 。通过 P-III 型曲线确定各个频率设计值作为划分降水量丰平枯水年标准。表 1 显示，在 67 年资料中，特丰年出现了 10 年、偏丰年出现了 10 年、平水年出现了 23 年、偏枯年出现了 15 年、特枯年出现了 9 年，整体偏枯年份稍多于偏丰年份，丰平枯频率分布较为接近，所以黄石市年际降水量整体分布较为均衡。

Table 1. Precipitation characteristics and water year division in Huangshi City

表 1. 黄石市年降水量特征年划分

特征年划分	特丰水年	偏丰水年	平水年	偏枯水年	特枯水年
值区间(mm)	[1752.5, 2069.2]	[1505.9, 1752.5]	[1333.3, 1505.9]	[1128.8, 1333.3]	[967.1, 1128.8]
发生频次(年)	10	10	23	15	9

2.3. 滑动平均值法

滑动平均值法[5]是连续 n 年的降水量滑动平均值随时间变化的过程线，通过 n 年的降水量平均值与样本(67 年)的均值对比，通过均方根误差(RMSE)来判断黄石市的年降水量周期。考虑通过 2.1 Mann-Kendall 趋势检验未发现样本年际降水量有显著变化，故 Q_i 采用 67 年降水量均值代替， P_i 为滑动样本的年际降水量均值。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n}} \quad (5)$$

采用 2~15 年滑动平均值的方法，表 2 发现在 7 年、10 年和 14 年出现了明显下降趋势，据此判断在 2~15 年的范围内，黄石市年际降水量变化大约 7 年、10 或 14 年为一个周期。

Table 2. Relationship between sliding period and root-mean-square deviation in Huangshi City

表 2. 黄石市滑动周期与均方根误差关系

滑动周期(年)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RMSE	769	331	269	145	133	66.6	71.8	62.2	41.3	61.1	46.5	34	20	33.5

2.4. K-Means 聚类算法

针对样本数据的研究, 采用了 K-Means 聚类算法[6], 在数据集随机取 K 个质心, 然后通过计算各点距质心的距离, 并把离质心近的数据与相应的质心归为一类。通过反复迭代, 直至每个聚类不再变化, 然后对比人为划分的周期(样本数 N 除以 K)的质心的变化与分布, 判断黄石市年际降水量是否存在周期性变化。

通过采用不同的聚类 K 数, 分析每个聚类质心在时间上与人为划分的周期的偏离程度, 表 3 发现, 当聚类 K

Table 3. Relationship between Cluster K and cycle division in Huangshi City

表3. 黄石市聚类 K 与周期划分关系

聚类 K 数	3	4	5	6	7	8	10	11	13	17
周期(年)	22	17	13	11	10	8	7	6	5	4
RMSE	5.02	4.5	4.23	5.44	5.44	4.92	3.73	3.92	3.01	2.37
K 降水均值(mm)	1461	1474	1408	1466	1460	1494	1450	1488	1394	1411
样本均值(mm)	1435	1435	1435	1435	1435	1435	1435	1435	1435	1435
误差(mm)	26	39	-27	31	25	59	15	53	-42	-24

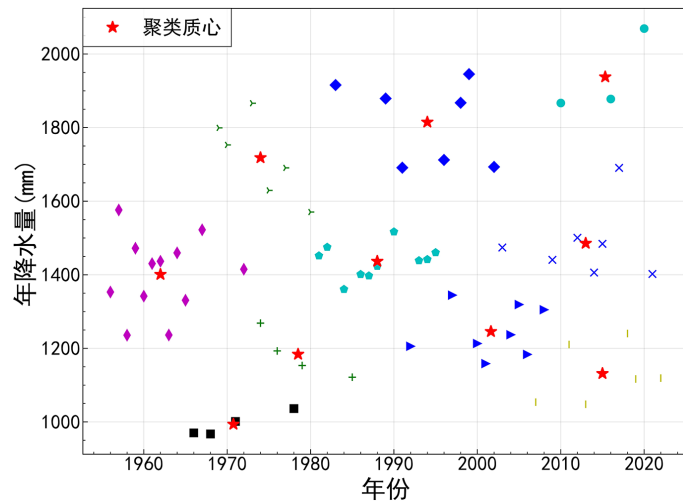


Figure 3. 7-year cycle cluster distribution map of Huangshi City

图3. 黄石市7年周期聚类分布图

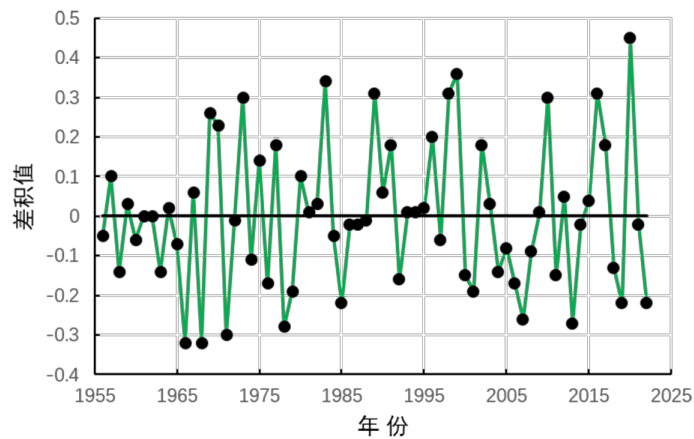


Figure 4. Modulus change of precipitation in Huangshi City

图4. 黄石市年际降水量模比变化曲线

数为 5 和 10 时, RMSE 均出现了较为明显的折点, 对应的周期分别为 13 年循环和 7 年循环, 其中周期 7 年循环的聚类点质心的降水均值更接近样本均值(分布见图 3), 所以 7 年为一个循环周期相对而言整体效果更好。

2.5. 模比系数法

通过曲线斜率的变化更好的反应黄石市 67 年年际降水量变化。当一年或几年的曲线斜率 $K > 0$ 时, 表示该年际平均降水量大于多年平均降水量; 当曲线斜率 $K < 0$ 时, 表示该年际平均降水量小于多年平均降水量; 当曲线斜率 $K = 0$ 时, 表示该年际平均降水量等于多年平均降水量。

Table 4. Proportion of various modulus coefficients in Huangshi City

表4. 黄石市各类模比系数占比情况

模比系数	$K > 0$	$K < 0$	$K = 0$	连续 $K > 0$	连续 $K < 0$	连续偏丰	连续偏枯
样本数	32	34	1	14	16	2	8
占比	47.8%	50.7%	1.5%	21.2%	24.2%	3.0%	12.1%

由图 4 和表 4 可看出, 其模比系数的差积曲线大致为上升段与下降段交替出现, 整体模比系数大于 0 和小于 0 为均匀分布, 同时连续的 $K > 0$ 和 $K < 0$ 约占整体 $K > 0$ 和 $K < 0$ 的一半, 其中连续的 $K > 0$ 占样本数的 21.2%, 占 $K > 0$ 样本数的 45.2%; 连续的 $K < 0$ 占样本数的 24.2%, 占 $K < 0$ 样本数的 48.5%。根据 2.2 P-III 型曲线法进行分割丰平枯水年 5 类, 出现连续偏丰有 2 次(为 1969 年、1970 年、1998 年、1999 年), 占样本数的 3.0%, 出现连续偏枯的有 8 次(为 1965 年、1966 年、1978 年、1979 年、2000 年、2001 年、2004 年、2005 年、2006 年、2007 年、2008 年、2018 年、2019 年), 占样本数的 12.1%, 远超连续偏丰的 3.0%, 为其 4 倍左右, 所以黄石市出现连续偏枯的频率远大于出现连续偏丰的频率, 但是整体分布较为均匀, 未出现显著特征。

2.6. R/S 分析法

R/S 分析[7]法是计算Hurst指数的常用方法之一, 可用于判断时间序列的未来变化趋势。通过给定一个长度为 N 的时间序列, 等分为长度为 n 的 M 个连续不重叠子序列, 长度不足 n 的部分去掉。等分的子序列记为 $X_m \{m=1, 2, \dots, M\}$, 其元素记为 $x\{m, i\}$, $k \in [1, n]$ 。其主要步骤为:

- ① 计算子序列的平均值, 记做 E_m 。
- ② 计算子序列累计离差 $D\{m, k\}$, $k \in [1, n]$:

$$D\{m, k\} = \sum_{i=1}^k [x\{m, i\} - E_m] \tag{6}$$

- ③ 计算极差 R_m 。

$$R_m = \max [D\{m, k\}] - \min [D\{m, k\}] \tag{7}$$

- ④ 计算子序列的标准差 S_m 。

$$S_m = \sqrt{\sum_{i=1}^n [x\{m, i\} - E_m]^2 / n} \tag{8}$$

- ⑤ 计算重标极差, 记做 $\{R/S\}_n$ 。

$$\{R/S\}_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{R_m}{S_m} \tag{9}$$

将 n 不断的增大, 对长度为 N 的时间序列进行分割, 然后重复第(6)至第(9), 直到 $n = N$, 最终得到时间序列的重标极差序列。并绘制散点图, 以 $\ln \{R/S\}$ 为纵坐标, 以 $\ln n$ 为横坐标, 通过线性拟合得到线性回归方程, 方程系数即为Hurst指数 $H(0 \leq H \leq 1)$ 。当 H 趋近于 1 时, 未来变化趋势与过去趋势表现出强持续性, 即连续丰水或

者枯水；当 H 趋近0时，说明未来与现在呈反持续性；当 H 趋近于0.5时，表示未来的趋势与过去无关。

Table 5. R/S method time span and H relationship curve node

表5. R/S法时间跨度与 H 关系曲线节点

时间跨度 n	5	6	7	8	10	15	20	30	40
回归方程 H	0.692	0.669	0.6439	0.6584	0.6503	0.615	0.6004	0.6055	0.5664
R^2	0.9932	0.9935	0.9917	0.9927	0.9929	0.9847	0.9862	0.9872	0.9669

图5中 H 值趋近0.6左右，说明通过R/S分析，黄石市年降水量未来趋势与过去实测系列资料存在弱相关性，且时间跨度越小相关性越好，而表5显示，在 n 为7时出现折点，其Hurst指数为0.6439，说明虽然未来与过去没有显著关系，但是未来年际降水仍呈现略微增加的趋势，7年为一个周期的前四年(包含2019、2020、2021、2022年)平均年降水量为1426.8 mm，而2023至2025年(周期后3年)降水量将略多于均值。

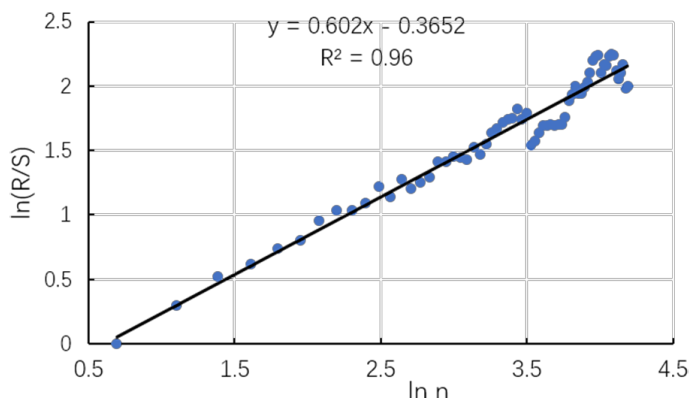


Figure 5. R/S analysis of annual precipitation in Huangshi from 1956 to 2022

图5. 黄石市1956~2022年年降水量R/S分析

3. 结论

1) 根据Mann-Kendall检验对黄石市1956年至2022年共计67年年降水量分析，黄石市年均面降水量总体趋势稳定略增。城镇化建设、气候变化等未产生显著性影响。

2) 通过P-III曲线计算，黄石市67年降水量丰平枯各占1/3左右，总体分布较为均匀；在模比系数法中连续偏枯的频率为12.1%，远高于连续偏丰的频率3.0%，因此在周期内更容易发生连续的枯水年，所以黄石市的水资源管理的指导思路，应长期坚持在辖区内确保防洪安全的同时，充分利用雨洪资源做好抗旱的准备，保证抗旱供水安全。

3) 通过滑动平均值法、K-means、R/S分析等综合结论，黄石市年降水量整体呈现约7年丰平枯循环周期；未来趋势与过去实测系列资料存在一定的相关性，且时间跨度越小相关性越好，据此分析未来3年内(2023至2025年)黄石市降水量多年平均值在1450 mm附近(略多于历年均值1430 mm)。

参考文献

[1] 黄荟羽, 白志娜, 于涵, 等. 1981-2021年辽阳县主要气候变化特征分析[J]. 现代农业科技, 2023(12): 170-174.
HUANG Huiyu, BAI Zhina, YU Han, et al. Analysis of main climate change characteristics in Liaoyang County from 1981 to 2021. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(12): 170-174. (in Chinese)

[2] 毕攀, 史帅帅, 李方红. 山东烟台地区1956-2020年降水量变化特征分析[J]. 河北地质大学学报, 2023, 46(2): 71-77.

- BI Pan, SHI Shuaishuai and LI Fanghong. Analysis of precipitation change characteristics in Yantai area of Shandong Province from 1956 to 2020. *Journal of Hebei GEO University*, 2023, 46(2): 71-77. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国水利部. 水文站网规划技术导则(SL34-2013) [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
Ministry of Water Resources of the People's Republic. Technical guidelines for hydrological station network planning (SL34-2013). Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2013. (in Chinese)
- [4] 史红波. 基于 Mann-Kendall 和小波功率谱的丹东市近 35 年降水量变化特征解析[J]. 水利技术监督, 2023(4): 106-109.
SHI Hongbo. Analysis of precipitation change characteristics of Dandong City in recent 35 years based on Mann Kendall and wavelet power spectrum. *Water Conservancy Technical Supervision*, 2023(4): 106-109. (in Chinese)
- [5] 柏宇轩. K-Means 应用与特征选择[J]. 电子技术与软件工程, 2018(1): 186-187.
BAI Yuxuan. K-means application and feature selection. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2018(1): 186-187. (in Chinese)
- [6] 赵秉霖. 根据降水距平三年和五年滑动平均值的自身演变预测单站未来降水趋势[J]. 吉林气象, 1996(3): 32-33.
ZHAO Binglin. Predicting the future precipitation trend of a single station based on the self-evolution of three and five year moving average precipitation deviations. *Jilin Meteorology*, 1996(3): 32-33. (in Chinese)
- [7] 陈子豪, 李莹莹, 李凯, 等. 基于 M-K、小波和 R/S 方法的黑河上游来水预测[J]. 人民黄河, 2021, 43(12): 29-34.
CHEN Zihao, LI Yingying, LI Kai, et al. Prediction of incoming water from the upper reaches of the Heihe River based on M-K, wavelet, and R/S methods. *People's Yellow River*, 2021, 43(12): 29-34. (in Chinese)