

王霞雨, 贾文豪, 王森, 等. 基于创新趋势分析方法的珠江流域降水径流变化趋势研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(4): 52-69. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.005

WANG Xiayu, JIA Wenhao, WANG Sen, et al. Research on the variation trends of precipitation and runoff in the Pearl River Basin based on innovative trend analysis method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(4): 52-69. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.005

基于创新趋势分析方法的珠江流域 降水径流变化趋势研究

王霞雨^{1,2}, 贾文豪^{3,4}, 王森^{3,4}, 冯仲恺^{1,2,5}, 秦友伟^{1,2},
张康^{4,5}, 刘夏⁴, 李家誉⁴

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 3. 水利部珠江河口治理与保护重点实验室, 广东广州 510611; 4. 水利部珠江水利委员会珠江水利科学研究所, 广东广州 510611; 5. 水利部粤港澳大湾区水安全保障重点实验室, 广东广州 510611)

摘要:【目的】降水和径流是水文循环的关键要素, 研究降水、径流趋势变化, 特别是进一步挖掘降水与径流间关系的改变, 对理解气候变化、水资源管理和生态保护具有重要意义。【方法】基于1956—2019年长系列降水与径流资料, 采用创新趋势分析方法对珠江流域不同时空尺度的降水、径流以及径流系数的变化趋势进行分析。【结果】结果表明: (1) 珠江流域年降水量整体呈下降趋势, 低值类的变化呈现超过5%的下降趋势, 说明珠江流域干旱发生的可能性增加, 年径流量的变化趋势同降水一致; 从不同子流域来看, 西江、东江呈显著下降趋势, 而北江则呈上升趋势。(2) 从不同季节来看, 珠江流域春、秋季降水呈显著下降趋势, 而夏、冬季降水呈上升趋势, 春季高值类及秋季所有类型降水呈现超过5%的下降趋势, 夏季高值类及冬季低中值类降水呈现超过5%的上升趋势; 春、秋、冬三季年径流量变化趋势同降水一致, 而夏季则相反。(3) 径流系数呈显著下降趋势, 高值类下降最为明显, 经初步分析径流系数的降低与流域蒸散发增加、植被覆盖率变化以及水工程调蓄有关。(4) 创新趋势分析法和传统 Mann-Kendall 方法在趋势类型上的一致率为70%, 显著性的一致率为22%。【结论】珠江流域降水、径流以及径流系数时空变化特征: 从时间上看, 珠江流域年降水量和年径流量整体呈下降趋势, 径流系数显著下降; 从空间上看, 西江、东江降水径流呈显著下降趋势, 而北江则呈上升趋势; 创新趋势分析法相较于 Mann-Kendall 法在趋势显著性检验方面差异明显。

关键词: 创新趋势分析; 气候变化; 降水径流; 径流系数; 时空变化特征; 珠江流域

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.005

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV212.3; P467

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)04-0052-18



新
语
清
澜
科
研
与作者互动

收稿日期: 2023-12-07; 修回日期: 2024-03-19; 录用日期: 2024-04-09; 网络出版日期: 2024-06-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001000); 国家自然科学基金项目(52379009); 水灾害防御全国重点实验室自主研究项目(5240152E2); 广东省水利科技创新项目(2023-01); 水利部重大科技项目(SKS-2022005)

作者简介: 王霞雨(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xiayu_wang@qq.com

通信作者: 贾文豪(1994—), 男, 工程师, 博士, 主要从事气候变化与水文学及水资源研究。E-mail: wh_prwri@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Research on the variation trends of precipitation and runoff in the Pearl River**Basin based on innovative trend analysis method**

WANG Xiayu^{1,2}, JIA Wenhao^{3,4}, WANG Sen^{3,4}, FENG Zhongkai^{1,2,5}, QIN Youwei^{1,2},
ZHANG Kang^{4,5}, LIU Xia⁴, LI Jiayu⁴

(1. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 3. Key Laboratory of the Pearl River Estuary Regulation and Protection of Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, Guangdong, China; 4. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, Guangdong, China; 5. Key Laboratory of Water Security Guarantee in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] Precipitation and runoff are the key elements of the hydrological cycle. Studying the trend variations of precipitation and runoff, especially further exploring changes in their relationship, is of great significance for understanding climate change, water resources management, and ecological protection. [Methods] Based on a long series of precipitation and runoff data from 1956 to 2019, the innovative trend analysis method was used to analyze the variation trends of precipitation, runoff, and runoff coefficient at different spatiotemporal scales in the Pearl River Basin. [Results] The result showed that: (1) the overall annual precipitation in the Pearl River Basin showed a downward trend, with changes in low-value categories declining by more than 5%, indicating an increased likelihood of drought in the Pearl River Basin, and the change trend of annual runoff was consistent with that of precipitation. Across different sub-basins, the West River and East River showed significant downward trends, while the North River showed an upward trend. (2) From a seasonal perspective, spring and autumn precipitation in the Pearl River Basin showed a significant downward trend, while summer and winter precipitation showed an upward trend. The spring high precipitation values and all types of autumn precipitation showed a downward trend of more than 5%, and the summer high precipitation values and winter low-to-median precipitation showed an upward trend of more than 5%. The variation trends of annual runoff in spring, autumn, and winter were consistent with precipitation, but were opposite in summer. (3) The runoff coefficient showed a significant downward trend, especially in high values. Preliminary analysis suggested that the decrease in runoff coefficient was related to the increase of evapotranspiration, changes in vegetation coverage, and the regulation and storage of water engineering. (4) The consistency rate between the innovative trend analysis method and the traditional Mann-Kendall method was 70% for trend type and 22% for significance. [Conclusion] Spatiotemporal variation characteristics of precipitation, runoff, and runoff coefficient in the Pearl River Basin: From a temporal perspective, the annual precipitation and runoff in the Pearl River Basin show an overall declining trend, with a significant decrease in the runoff coefficient. From a spatial perspective, the precipitation and runoff in the West River and East River exhibit a noticeable downward trend, while the North River shows an upward trend. The innovative trend analysis method, compared to the Mann-Kendall method, demonstrates significant differences in trend significance testing.

Keywords: innovative trend analysis; climate change; precipitation and runoff; runoff coefficient; spatiotemporal variation characteristics; Pearl River Basin

0 引言

气候变化背景下,全球尺度水资源的时空分布、水文循环发生显著变化^[1],而降水和径流是表征这一变化的关键要素^[2],前者通常被用于评估区域气候的变化情况,后者常用于评估气候变化对水资源的影响。受地理位置、地形地貌、自然气候等因素的综合影响,不同量级降水事件在时空分布上存在明显差异,使得径流总量、强度等特征季节性、区域性差异显著,导致水旱灾害多发频发,威胁流域水工程建设运行、生态安全、经济安全和粮食安全。趋势分析是检验气候与水资源量平均状态是否发生变动的重要手段,通过对降水径流变化趋势的分析,可以全面掌握

降水格局,明晰流域径流演变特征,从而指导防汛抗旱工作,因此受到学者的广泛关注^[3-4]。气候变化与人类活动综合影响下,流域产汇流机制发生显著改变,降水径流关系随之发生变化。径流系数是表征降水径流关系的重要指标,其变化趋势能够反映出气候变化、水利设施建设、下垫面变化等方面的影响,对变化环境下适应性策略的构建具有较强参考价值。

国内外学者在对水文气象要素分析中发展了多种趋势分析方法^[5],其中常用方法包括 Mann-Kendall (M-K)、Spearman's Rho 和 Sen's slope 法等^[6],但已有研究表明,M-K 检验和 Spearman's Rho 检验结果会受到数据系列长度以及系列自相关性的影

响^[7-8], 甚至可能导致方法失效。SEN^[8]提出了创新趋势分析方法(innovative trend analysis, ITA), 该方法最显著的特点是不包含任何假设, 数据长度不受限制、不需要服从正态分布和不受序列间存在相关性的影响^[9], 其有效性通过了蒙特卡洛模拟验证。此外, 该方法还可以进一步挖掘数据序列中不同类别(低值类、中值类与高值类)变化趋势的差异^[10], 已被广泛应用于世界各地不同地区的降水^[11-13]、径流^[14]、蒸发量^[15]、气温^[16]等水文气象要素系列的趋势分析, 说明其在水文气象领域具有合理性及有效性。此外, 其他学者^[17-22]也对 ITA 方法进行了进一步研究, 可以证明其不同地区和不同数据集上的适用性和准确性, 进一步支持了该方法的可行性, 但尚未见应用于珠江流域的有关研究。

已有研究中, 针对珠江流域降水趋势分析方面, 唐亦汉等^[23]研究发现 1959—2012 年珠江流域西部年降雨有减少趋势, 流域大部分的降雨日数则有增加趋势; 苏恒等^[24]基于西江流域 1970—2017 年降水量数据, 认为降水量呈不显著的减少趋势, 春、秋降水量呈减少趋势, 夏、冬呈增加趋势; 王斌等^[25]的结果表明东江流域 1959—2018 年降水呈现出缓慢减少趋势, 春、秋两季在缓慢减少, 夏、冬两季则在缓慢增加; TIAN 等^[26]研究表明 1956—2013 年珠江流域降水呈不显著下降趋势, DENG 等^[27]发现珠江流域大部分地区年降水量和季节降水量均略有减少。在径流方面, 陈立华等^[28]对梧州站 1950—2015 年径流进行趋势分析, 结果表明西江径流显著减少, 且具有较强的持续性; 李继清等^[29]基于西江流域干支流 7 个控制性水文站近 60 a 的日径流资料, 发现西江流域年均以及夏、秋季径流呈下降趋势, 春、冬季径流整体呈上升趋势; YANG 等^[30]和 BAI 等^[31]均发现珠江流域径流呈减少趋势。

以上研究为认识珠江流域的水资源分布规律及变化趋势提供了有力支撑, 但从方法来看, 多采用传统 Mann-Kendall 趋势检验、线性趋势法、Sen's slope 法。在气候变化影响不断加剧的背景下, 珠江流域的降水与径流变化可能难以满足时间序列服从正态分布等假设, 同时, 缺少不同趋势分析方法的对比研究; 从研究尺度来看, 已有研究中多针对珠江流域各子流域如西江、北江、东江分别开展趋势分析, 缺少从全流域不同空间尺度的趋势分析; 从研究对象来看, 目前研究多聚焦于降水或径流, 缺少两者之间相关关系的深入探讨, 如开展径流系数的变化趋势分析; 从研究深度来看, 目前多针对系列整体的趋势进行分析,

缺少对不同类别降水径流, 如低值类、中值类与高值类的趋势分析。

因此, 本文综合采用创新趋势分析法和 Mann-Kendall 检验法对珠江流域 1956—2019 年降水、径流进行趋势分析, 得到珠江流域不同量级降水径流在年季尺度上的时空演变特征, 并利用径流系数剖析降水径流关系的变化趋势, 以期挖掘珠江流域降水径流的演变规律及变化机理, 进而为流域水资源管理、气候变化适应战略提供借鉴与参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

珠江流域(102°14'E—115°53'E, 21°31'N—26°49'N)位于我国西南边境和东南沿海地区, 由西江、北江、东江及珠江三角洲组成, 横跨广东、广西、云南、湖南、贵州、江西 6 个省(自治区)及香港和澳门特别行政区以及越南东北部^[32]。珠江全长 2 214 km, 流域面积 4.53×10⁵ km²。西江、北江在广东省佛山市三水区思贤滘连通后汇入珠江三角洲, 东江在广东省东莞市石龙镇汇入珠江三角洲, 经八大口门注入南海, 构成独特的“三江汇集, 八口分流”的水系特征。受东南季风和西南季风影响, 具有典型的亚热带气候特征, 水文气象要素呈现明显的季节性, 汛期降水量约占全年降水量的 70% 以上, 容易遭受洪涝灾害; 枯水期的“早上加咸”严重威胁粤港澳大湾区的供水安全^[33]。流域内多为丘陵和高原地区, 占整个流域面积 95%, 地西北高东南低, 西北地区为云贵高原, 海拔在 1 000~2 000 m, 东南地区为平原地带, 水系河流交错。珠江流域地理位置和流域概况如图 1 所示。

1.2 数据资料

本文所采用的气象数据资料为珠江流域 62 个气象站点 1956—2019 年的逐日降水及逐日气温, 来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>), 站点位置分布如图 1 所示, 子流域的降水量通过泰森多边形法^[34]计算并转换为月尺度降水; 春季定义为 3—5 月, 夏季为 6—8 月, 秋季为 9—11 月, 冬季为 12 月—次年 2 月^[10]。所采用的径流数据为西江、北江、东江流域的控制性水文站, 即梧州站、石角站、博罗站 1956—2019 年逐月流量资料, 数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》和水利部珠江水利委员会。由于珠江流域没有控制性水文站, 具有独特的“三江汇集, 八口分流”的水系特征, 为了保持降水径流的统一, 在计算时将 3 个控制性水文站流



图1 珠江流域概况

Fig. 1 Overview of the Pearl River Basin

量之和作为珠江流域径流。所采用的月尺度归一化植被指数(*NDVI*)数据资料来源于国家科技资源共享服务平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>), 空间分辨率为 5 km。为便于进行分析以及解决数据缺失的问题, 使用自然邻点插值法将 *NDVI* 数据重采样至 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间分辨率。

2 研究方法

本文主要采用创新趋势分析方法(*innovative trend analysis, ITA*)进行趋势分析, 首先将时间序列从中点分成前后两段等长的子序列(第一子序列及第二子序列), 对各子序列分别按升序排序, 两子序列同一顺序的值一一对应。然后以第一子序列的值为横坐标, 第二子序列的值为纵坐标, 绘制在笛卡尔坐标系中(见图2), 形成的散点若均位于 $y=x$ (斜 45°) 线, 表明无明显变化趋势; 若位于 $y=x$ (斜 45°) 线以上, 则呈上升趋势; 反之, 则为下降趋势^[8]。此外, *ITA* 方法可根据数据点的位置(数据大小)划分低、中、高三类, 本文基于百分位数将不同量级的降水径流划分为低值类($<25\%$)、中值类($25\% \sim 75\%$)和高值类($>75\%$)三类^[14]。

SEN^[9]还进一步提出了 *ITA* 法的统计量计算及其显著性检验方法。其中, *ITA* 方法统计量 *S* 计算公式为

$$S = \frac{2(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)}{n} \quad (1)$$

式中, \bar{y}_1 和 \bar{y}_2 分别为两子序列的均值; *n* 为数据系列的数目。

S 服从均值为零, 标准差为 σ_s 的正态分布, 如果 $S > 0$, 则说系列呈上升趋势; $S < 0$, 则表示呈下降趋势。

如果数据系列的统计量 *S* 在置信区间(*confidence limits, CL*)之外(即 $|S| \geq |CL|$), 则说明具有显著的变化趋势。统计量 *S* 显著性的置信区间计算公式如下

$$CL_{(1-\alpha)} = \pm s_{cri} \times \sigma_s \quad (2)$$

式中, α 为显著性水平; s_{cri} 为标准正态分布对应于 α 的置信区间($\alpha = 5\%$ 时 s_{cri} 值为 1.96)。

σ_s 的定义如下

$$\sigma_s = \frac{2\sqrt{2}}{n\sqrt{n}} \sigma \sqrt{1 - \rho_{y_1 y_2}} \quad (3)$$

式中, σ 为数据系列的标准差; $\rho_{y_1 y_2}$ 为相关系数。

$\rho_{y_1 y_2}$ 计算公式为

$$\rho_{y_1 y_2} = \frac{E(\bar{y}_1 \bar{y}_2) - E(\bar{y}_1)E(\bar{y}_2)}{\sigma_{\bar{y}_1} \sigma_{\bar{y}_2}} \quad (4)$$

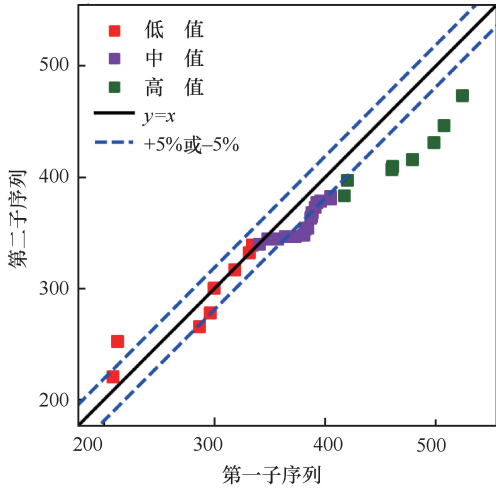


图2 创新趋势分析(ITA)方法示意

Fig. 2 Schematic diagram of the innovative trends analysis (ITA) method

3 结果与分析

3.1 珠江流域不同时空尺度降水趋势分析

ITA法检验年季尺度下降水径流的变化趋势如表1所列,当 $|S| \geq |CL|$ 时则说明具有显著的变化趋势。年降水序列ITA检验结果如图3所示。ITA计算结果显示珠江流域年降水整体呈现不显著下降趋势,从不同类别来看,低值类的变化相对最为明显,呈现超过5%下降趋势,说明珠江流域干旱发生的可能性增加,灌溉、供水等方面可能受到影响,出现水资源短缺现象,而中值类和高值类降水则呈现出上升趋势,因此可以看出低值类降水对整个流域年降水变化的影响较大。从子流域尺度来看,西江、东江呈现显著下降趋势,北江呈显著上升趋势;其中,从不同类别来

看,西江高值类降水呈现上升趋势,中值类和低值类降水呈现下降趋势;北江低值类降水大部分呈现5%的下降趋势,干旱的可能性同样增加;东江流域大部分点都位于 $y=x$ 线以下,三类降水都呈现下降趋势。

季节尺度下采用ITA分析降水所得的结果如图4—图7所示。ITA结果显示,珠江流域春季降水呈现显著下降趋势,其中高值类降水下降趋势明显。各子流域降水也呈现下降趋势,其中西江流域中值类和高值类降水、东江流域低值类和高值类降水呈现超过-5%的下降趋势,北江降水序列大多数点集中在下三角区域-5%线左右,降水整体呈现出明显的下降趋势。

夏季降水序列的趋势变化结果如图5所示,珠江流域夏季降水呈现显著上升趋势,各子流域变化趋势同珠江流域相一致。从不同类别来看,珠江流域高值类降水呈现超过5%的上升趋势,西江流域中值类降水和高值类降水呈现5%左右的增长趋势,而低值类降水呈现出非单调趋势,北江流域整体呈现出明显的上升趋势,上升幅度略高于西江流域。东江流域低值类降水序列在 $y=x$ 线下呈现下降趋势,中值类和高值类降水呈现非单调趋势。夏季高值类降水的增加会导致极端降水的可能性增加,导致滑坡、泥石流等洪涝灾害的防御难度加大以及土壤侵蚀、水土流失加剧。

珠江流域秋季降水[见图6(a)]整体呈现显著下降趋势,各子流域变化趋势同珠江流域一致。珠江流域、西江流域所有类型降水、北江流域低值类降水和中值类、东江流域中值类和高值类呈现出超过5%的下降趋势,除北江流域外下降趋势都随着降水的增加经历了减弱—增强—减弱的变化阶段。北江流域强降水则非单调趋势。东江流域低于200mm的低值类降水落在 $y=x$ 线的上三角区域,呈现出增长趋势。秋季降水的下降趋势,会导致水库等工程的蓄水压力增加。

冬季珠江流域降水呈现上升趋势,其中北江流域

表1 年季尺度下降水径流ITA法统计量结果

Table 1 Statistical results of ITA method for annual and seasonal precipitation and runoff

要素	流域	年		春		夏		秋		冬	
		S	CL	S	CL	S	CL	S	CL	S	CL
降水	珠江	-0.12	0.33	-0.61**	0.13	0.89**	0.22	-0.82**	0.11	0.07	0.26
	西江	-0.79**	0.20	-0.66**	0.09	0.64**	0.15	-0.76**	0.14	-0.01	0.31
	北江	1.01**	0.61	-0.65**	0.22	1.44**	0.21	-0.56**	0.14	0.71**	0.28
	东江	-1.06**	0.68	-1.09**	0.34	0.72**	0.44	-1.18**	0.20	-0.72**	0.44
径流	珠江	-3.97**	3.59	-5.41**	2.56	-6.73	8.37	-26.29**	3.91	16.34**	1.04
	梧州	-3.24**	2.23	-1.93	2.25	-6.38**	5.24	-23.23**	4.48	12.43**	0.81
	石角	0.33	0.94	-3.48**	1.21	3.28**	1.19	-0.64	0.72	2.15**	0.43
	博罗	-1.06**	0.32	-0.01	0.70	-3.64**	0.70	-2.42**	0.41	1.77**	0.20

注:**表示通过了95%置信度的显著性检验。

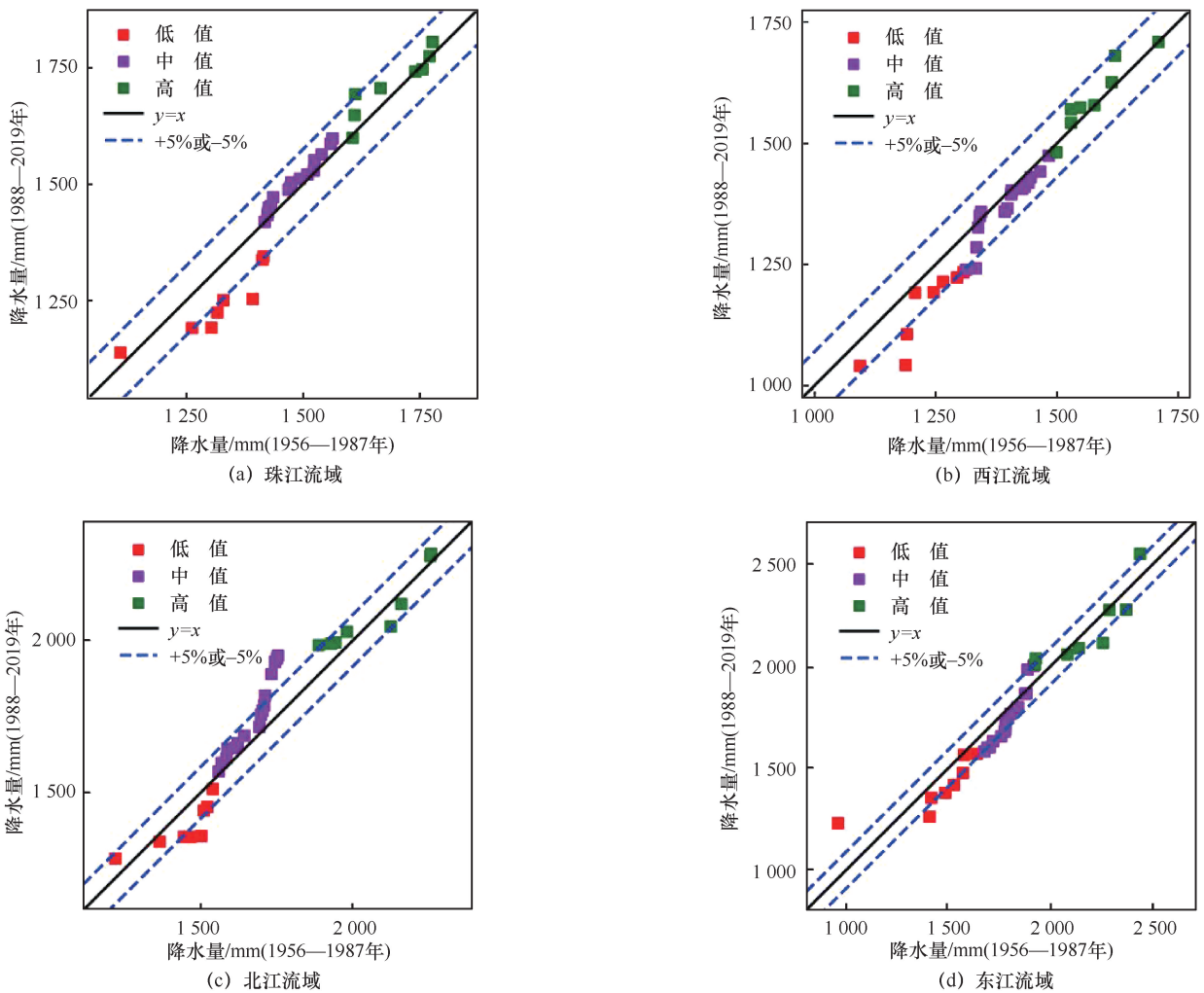
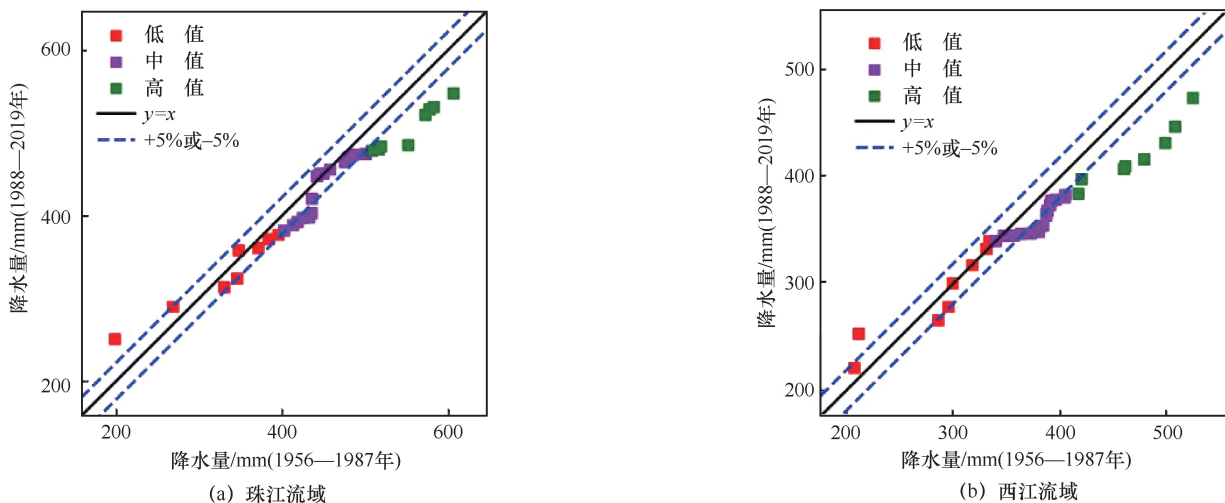
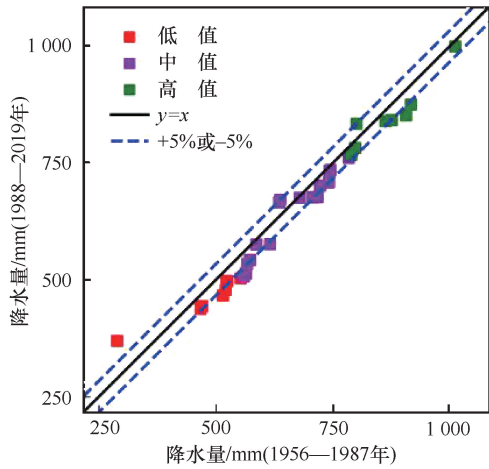


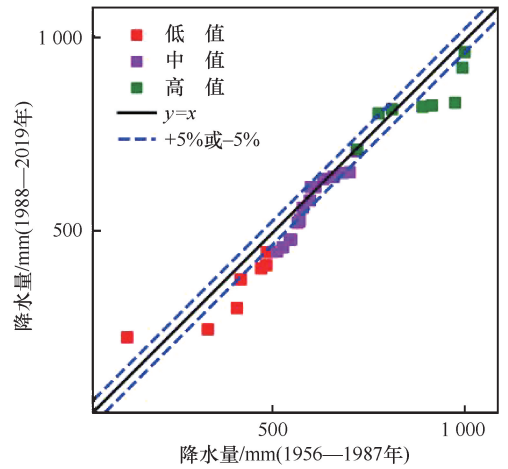
图3 年降水序列 ITA 检验结果

Fig. 3 ITA test results for the annual precipitation sequence





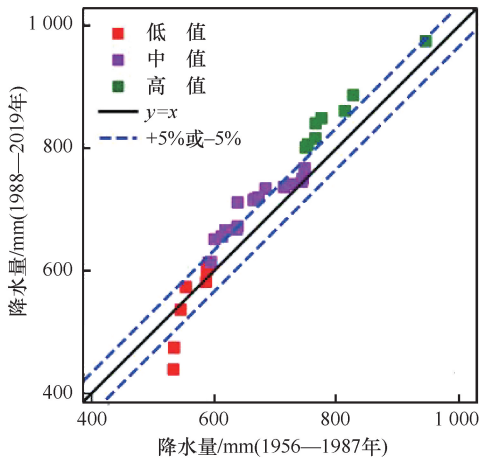
(c) 北江流域



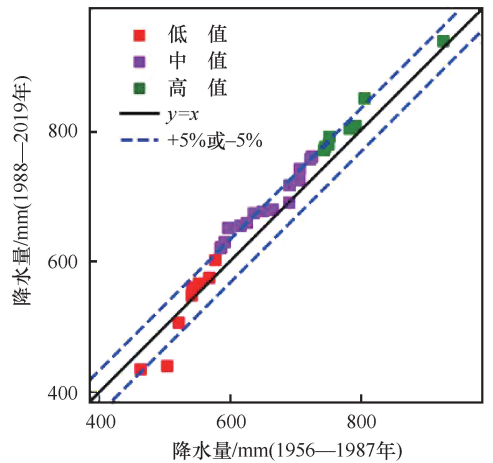
(d) 东江流域

图4 春季降水序列 ITA 检验结果

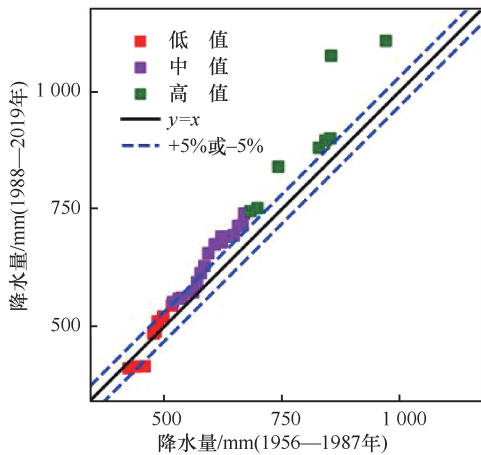
Fig. 4 ITA test results for the spring precipitation sequence



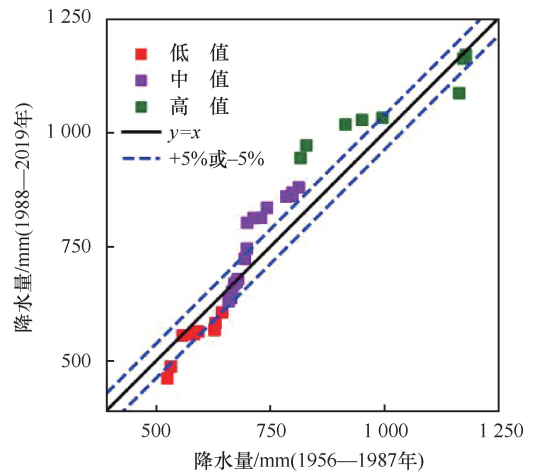
(a) 珠江流域



(b) 西江流域



(c) 北江流域



(d) 东江流域

图5 夏季降水序列 ITA 检验结果

Fig. 5 ITA test results for the summer precipitation sequence

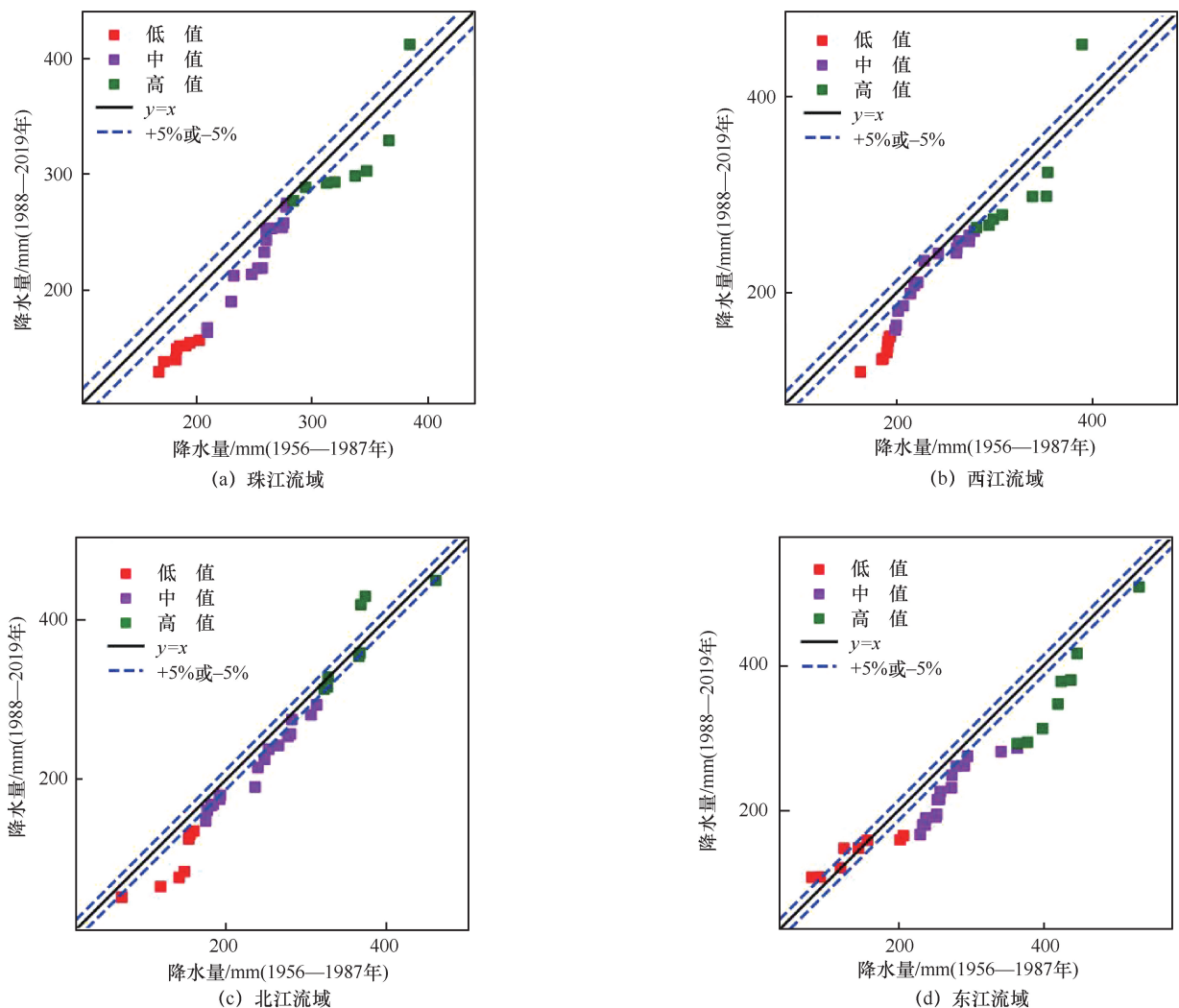
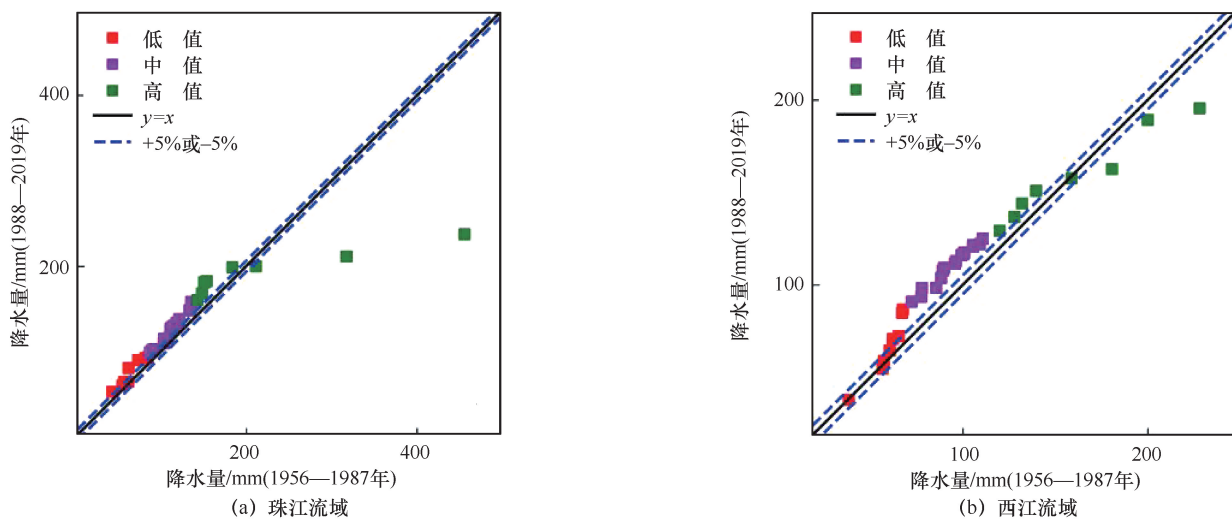


图6 秋季降水序列 ITA 检验结果

Fig. 6 ITA test results for the autumn precipitation sequence



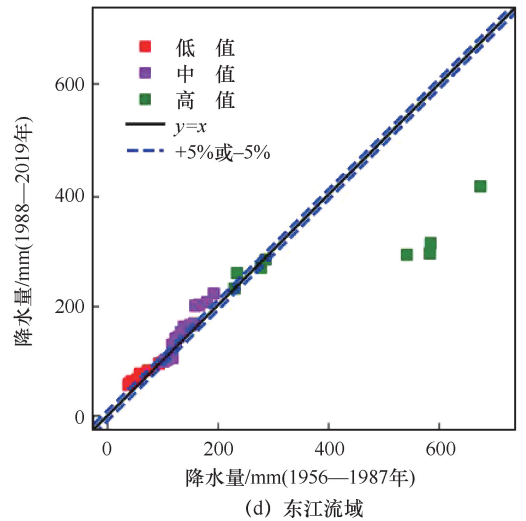
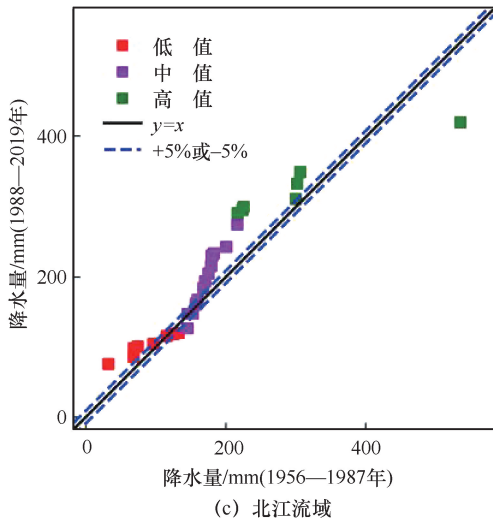


图7 冬季降水序列 ITA 检验结果

Fig. 7 ITA test results for the winter precipitation sequence

呈现上升趋势, 西江、东江流域呈现下降趋势。珠江流域、西江流域和东江流域低中值类、北江流域中高值类呈现超过 5% 明显的上升趋势。西江流域高值类、北江流域低值类降水趋势不单调。东江流域高值类 1956—1987 年超过 300 mm 的降水呈现远超 5% 明显的下降趋势。低值类降水增加表明西江、东江流域冬季不易发生干旱。

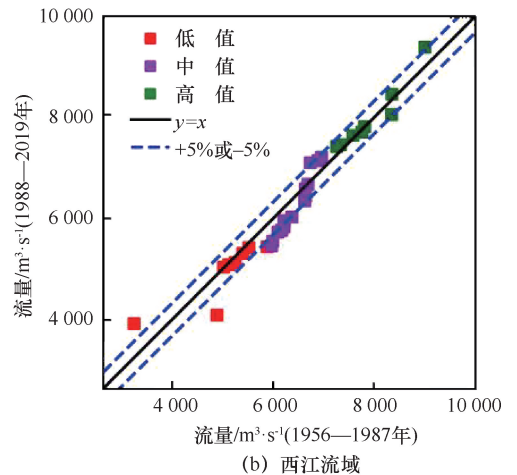
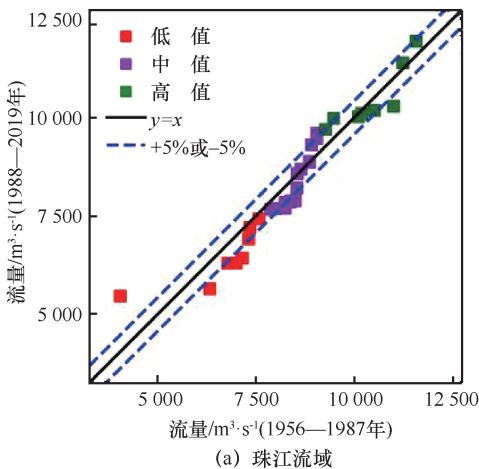
3.2 珠江流域不同时空尺度径流趋势分析

年流量序列的趋势变化结果如图 8 所示。珠江流域年流量呈现显著下降趋势, 从不同类别来看, 低值类流量呈现下降趋势, 中值、高值类流量呈现非单调趋势。从子流域来看, 西江梧州站与东江博罗站呈现显著下降趋势, 其中西江流量的减少与中值类的降低有关, 特别是 6 000~7 000 m³/s 的流量下降程度约 5%, 而东江流量的减少主要与低值类的下降有关, 东江流域发生水文干旱的可能性增加, 水资源量的减少使得水库等调蓄工程的压力增加, 并进一步加剧供

需矛盾。北江石角站虽整体变化趋势不显著, 然而其中值类则呈上升趋势。

季节尺度下采用 ITA 分析径流所得的结果如图 9—图 12 所示。从季节尺度上来看, 整个珠江流域春季流量呈现下降趋势, 各子流域变化趋势同珠江流域相一致。ITA 结果表明, 不同流域的不同径流类别变化趋势也有所差别。珠江流域流量大部分位于 $y=x$ 线和 -5% 线中间, 变化趋势不明显。在春季高值类流量序列中, 梧州站和石角站都有明显的超过 5% 上升趋势, 中值类流量都呈现出非单调趋势。而对于低值类流量, 梧州站呈现出不明显的增长趋势, 而石角站和博罗站的变化幅度则相反, 呈现出下降趋势。

夏季珠江流域流量呈现下降趋势, 梧州站和博罗站变化趋势同珠江流域一致, 石角站流量呈现上升趋势。梧州站和石角站高值类流量呈现出超过 5% 的增长趋势, 会导致出现极端水文事件的可能性增加, 可



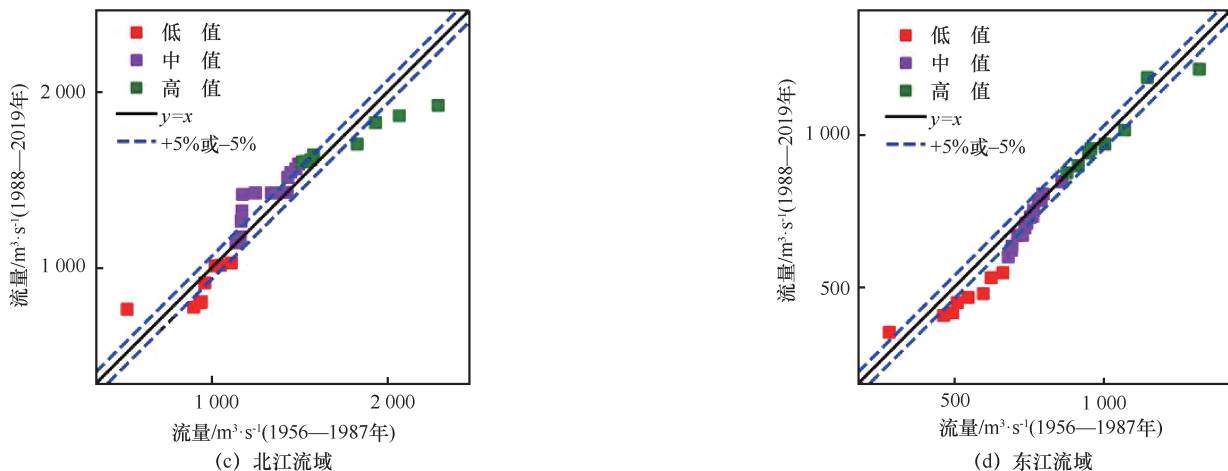


图 8 年径流序列 ITA 检验结果

Fig. 8 ITA test results for the annual runoff sequence

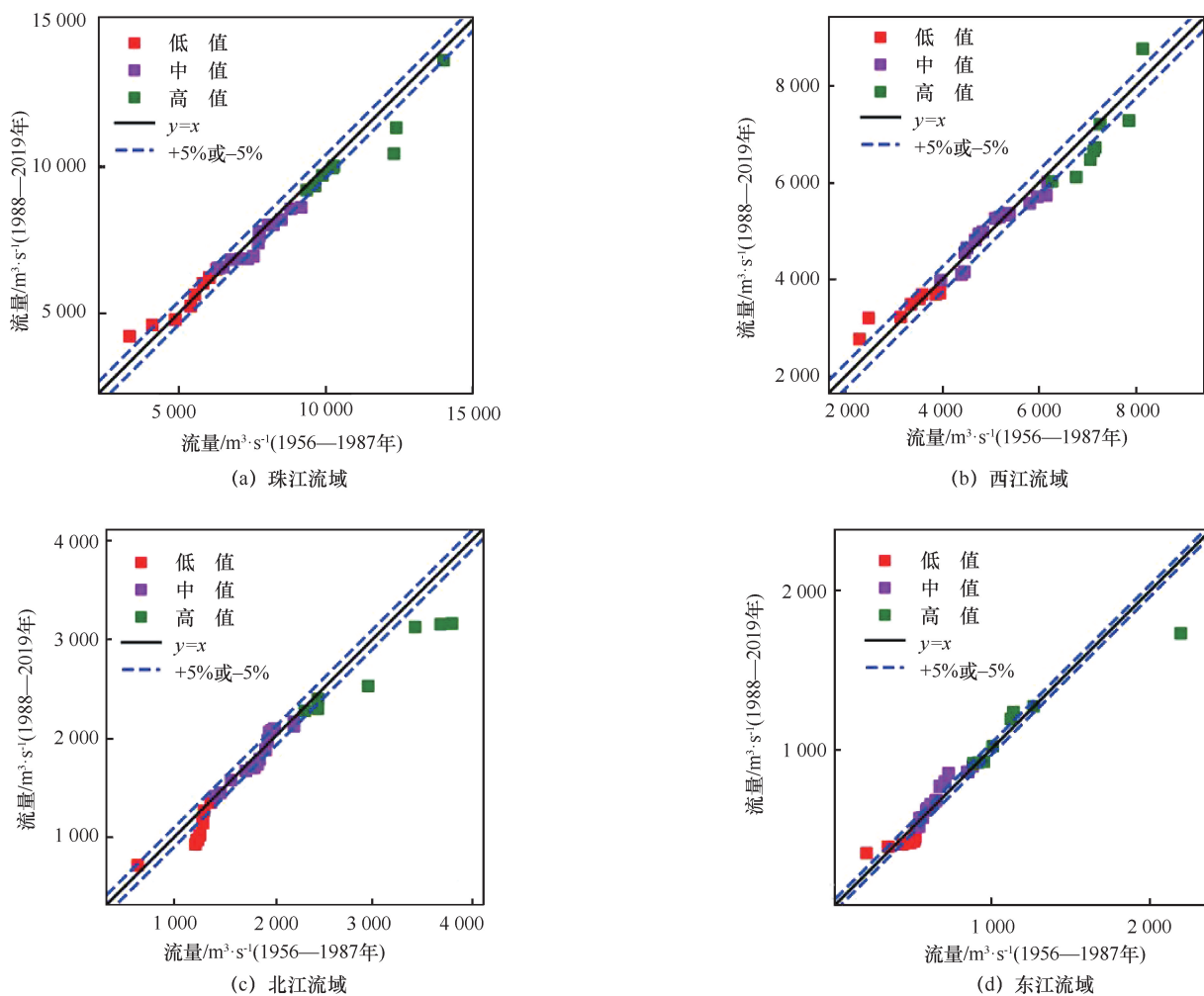


图 9 春季径流序列 ITA 检验结果

Fig. 9 ITA test results for the spring runoff sequence

能加剧洪水对生态系统造成严重破坏, 而中值类流量则是呈现相反的变化趋势; 梧州站低值类流量呈现出非单调趋势, 而石角站流量几乎全部落在 $y=x$ 线上,

没有趋势变化; 博罗站的夏季流量减少趋势随着流量强度增加而逐渐减弱, 低值类和中值类流量呈现超过 5% 的下降趋势, 而强流量则呈现出上升趋势。

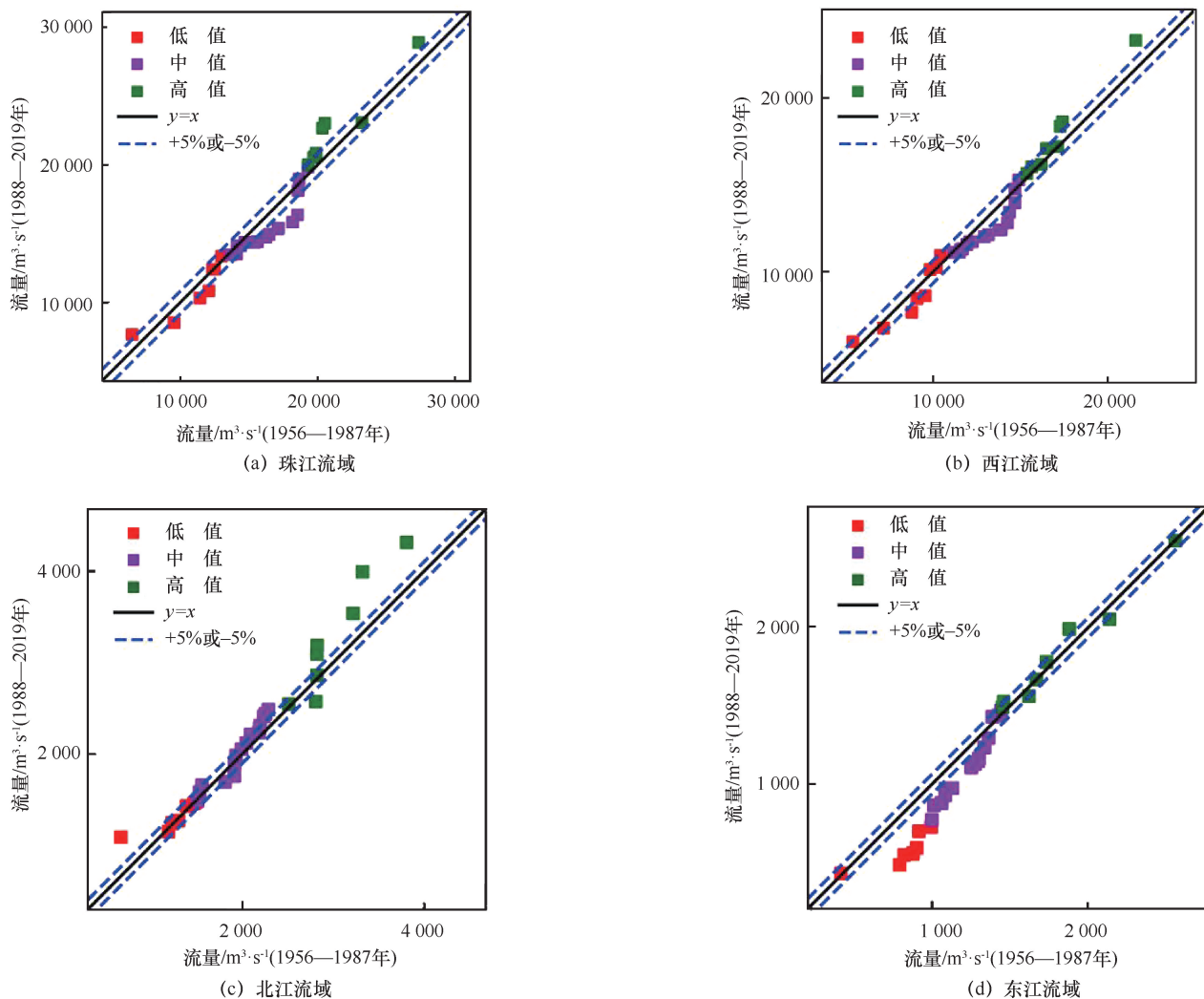
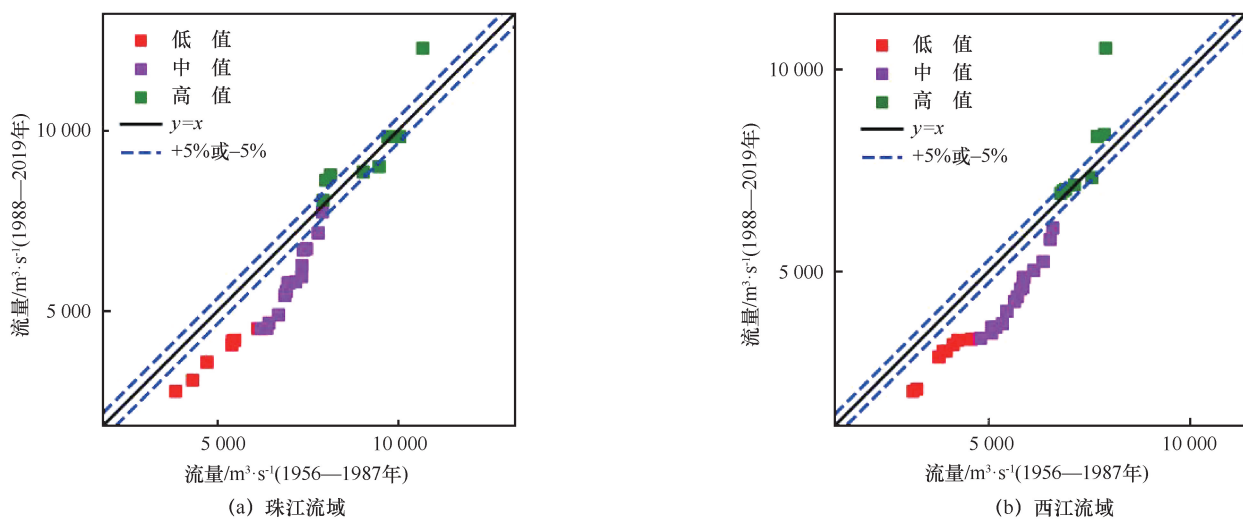
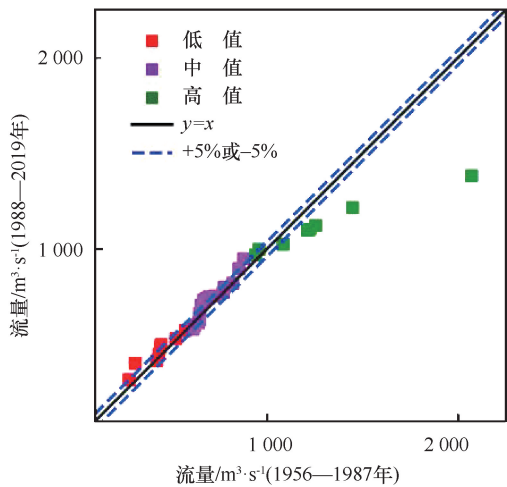


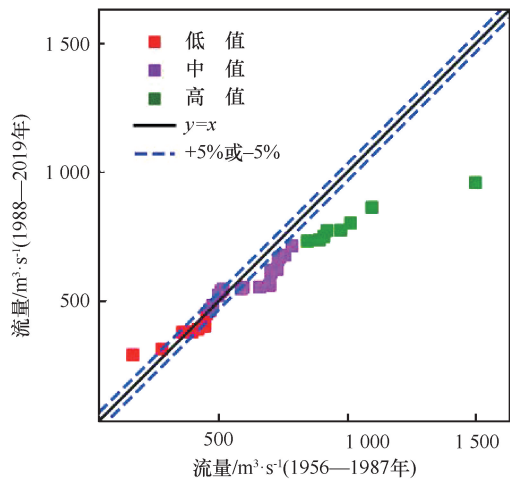
图 10 夏季径流序列 ITA 检验结果

Fig. 10 ITA test results for the summer runoff sequence





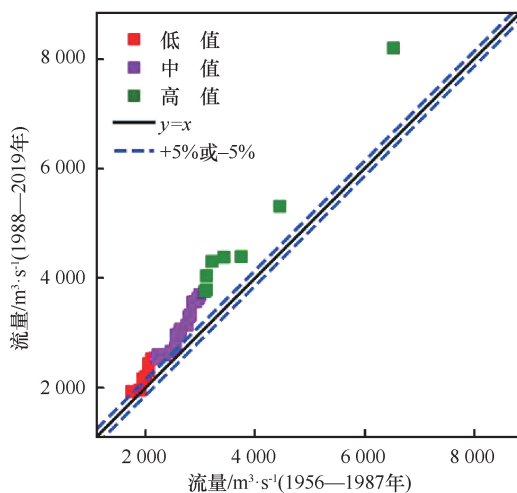
(c) 北江流域



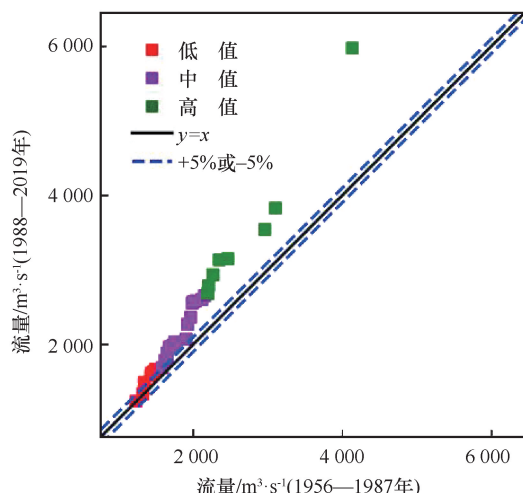
(d) 东江流域

图 11 秋季径流序列 ITA 检验结果

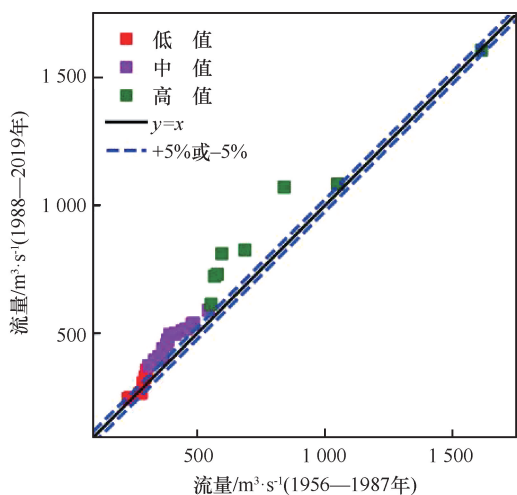
Fig. 11 ITA test results for the autumn runoff sequence



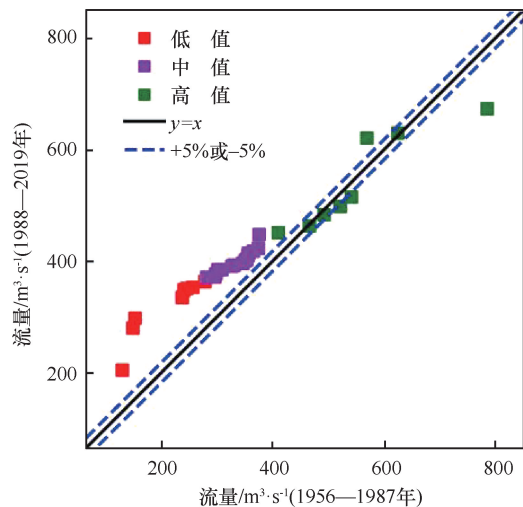
(a) 珠江流域



(b) 西江流域



(c) 北江流域



(d) 东江流域

图 12 冬季径流序列 ITA 检验结果

Fig. 12 ITA test results for the winter runoff sequence

在秋季平均流量的变化上可以明显观察到, 整个珠江流域呈现下降趋势, 各子流域变化趋势同珠江流域相一致。珠江流域和梧州站低值类、中值类呈现出超过 5% 的下降趋势, 并且随着流量强度增加而逐渐减弱, 而博罗站则是中值类和高值类流量呈现出超过 5% 的下降趋势, 且随着流量强度增加而逐渐增加; 石角站中值类呈现出非单调趋势, 高值类流量呈现出超过 5% 的下降趋势。珠江流域和梧州站中值流量序列意味着水资源供应稳定性下降。

对于冬季流量序列的趋势变化, 整个珠江流域呈现显著上升趋势, 各子流域变化趋势同珠江流域一致。其中珠江流域、梧州站和石角站三类流量序列的变化趋势非常相似, 大多数点落在 $y=x$ 线以上, 都呈现出超过 5% 的增长趋势, 并且随着流量强度增加而逐渐增强。而博罗站的变化幅度则是刚好相反, 增长趋势随着流量强度增加而逐渐减弱, 但是其高值类流量则是非单调趋势。

3.3 珠江流域降水-径流关系变化分析

已有研究中多将降水和径流进行分开研究^[35-36], 然而, 降水与径流在天然状态下具有紧密的联系, 且受到下垫面变化、水库工程调蓄等综合影响, 流域水循环过程发生了变化。径流系数是同期降水转变为径流的比例, 能够综合反映气候变化和人类活动对产汇流过程的影响^[37]。因此, 进一步分析径流系数的变化趋势, 计算结果如表 2 所列、图 13 所示。珠江流域年径流系数 ITA 检验结果呈显著下降趋势, 各子流域径流系数也呈下降趋势, 即同等降水条件下的径流减少。在西江流域, 低值类径流系数略有上升, 而中值类、高值类径流系数则是呈现出下降趋势。北江流域介于 0.45~0.50 的径流系数无明显趋势, 大于 0.57 的径流系数下降约 5%。在东江流域, 几乎所有点均低于 1:1 线, 表明所有径流系数类别均有相似的下降趋势, 其中低值类径流系数呈现超过 5% 的下降趋势, 中值类和高值类则不明显。

此外, 不同子流域径流系数变化区间并不一致, 其中, 西江流域介于 0.35~0.50, 北江流域介于 0.45~0.60, 东江流域介于 0.3~0.4。这表明不同流

域在相同的降水下, 北江流域产流最多, 而东江流域产流最少。

珠江流域夏季降水增多, 而径流却减少, 经初步分析可能与气温升高导致流域蒸散发增加有关, 通过对 62 个气象站点的气温趋势分析结果表明, 珠江流域气温显著上升(见表 3), 且低温的增速 ($0.02\text{ }^{\circ}\text{C/a}$) 约为高温增速的 2 倍。此外, 珠江流域的土地利用已经发生显著变化, 基于 1983—2018 年的归一化植被指数 (*NDVI*) 数据采用 M-K 法分析的结果表明(见图 14), 除珠江三角洲外, 珠江流域的 *NDVI* 均呈显著上升, *NDVI* 能有效反映植被的生长情况、植被密度和覆盖度等重要信息, 该指标数值越高表明植被生长状况越好。*NDVI* 呈显著上升趋势表明植被覆盖率增加, 参考已有研究指出植被覆盖率增加会导致地表径流减少^[38-39], 因此珠江流域径流的减少可能与植被覆盖率增加有关。另外, 水利工程的兴建改变了流域的产汇流过程。2001 年龙滩(库容 188.1 亿 m^3)、百色(库容 56.6 亿 m^3) 两座控制性水库开工建设, 显著改变了天然的降水径流关系。

4 结果讨论

4.1 Mann-Kendall 与 ITA 法不同结果对比分析

Mann-Kendall 法检验年季尺度下降水径流的变化趋势如表 4 所列, M-K 计算结果中, 只有冬季珠江径流、梧州站和博罗站径流在 95% 置信水平下呈现出上升趋势, 其余指标均呈现不显著的变化趋势。

Mann-Kendall 法、ITA 法两种方法得到的对比结果如图 15 所示, 图中 1 代表都为上升趋势, 0.5 代表 M-K 上升 ITA 下降, -1 和 -0.5 则相反; * 表示两者显著性一致。两种方法具体的检验结果如表 1 和表 4 所列。最终统计得到两种方法在趋势类型上的一致率为 70% (40 个检验结果中存在 28 个同为增加或减少趋势), 其中春季两者差别较大仅为 25%, 夏、秋、冬季为 87.5%; 而显著性的一致率只有 22% (28 个同为增加或减少趋势的结果中存在 6 个显著性一致), 其中冬季最高为 57.1%。同时 ITA 法在检测

表 2 年径流系数 ITA 法统计量结果

Table 2 Statistical results of ITA method for annual runoff coefficient

因素	珠江	西江	北江	东江
S	$-1.75 \times 10^{-4}^{**}$	-1.80×10^{-5}	-9.40×10^{-5}	$-3.09 \times 10^{-4}^{**}$
CL	1.74×10^{-4}	1.43×10^{-4}	1.65×10^{-4}	8.79×10^{-5}

注: **表示通过了 95% 置信度的显著性检验。

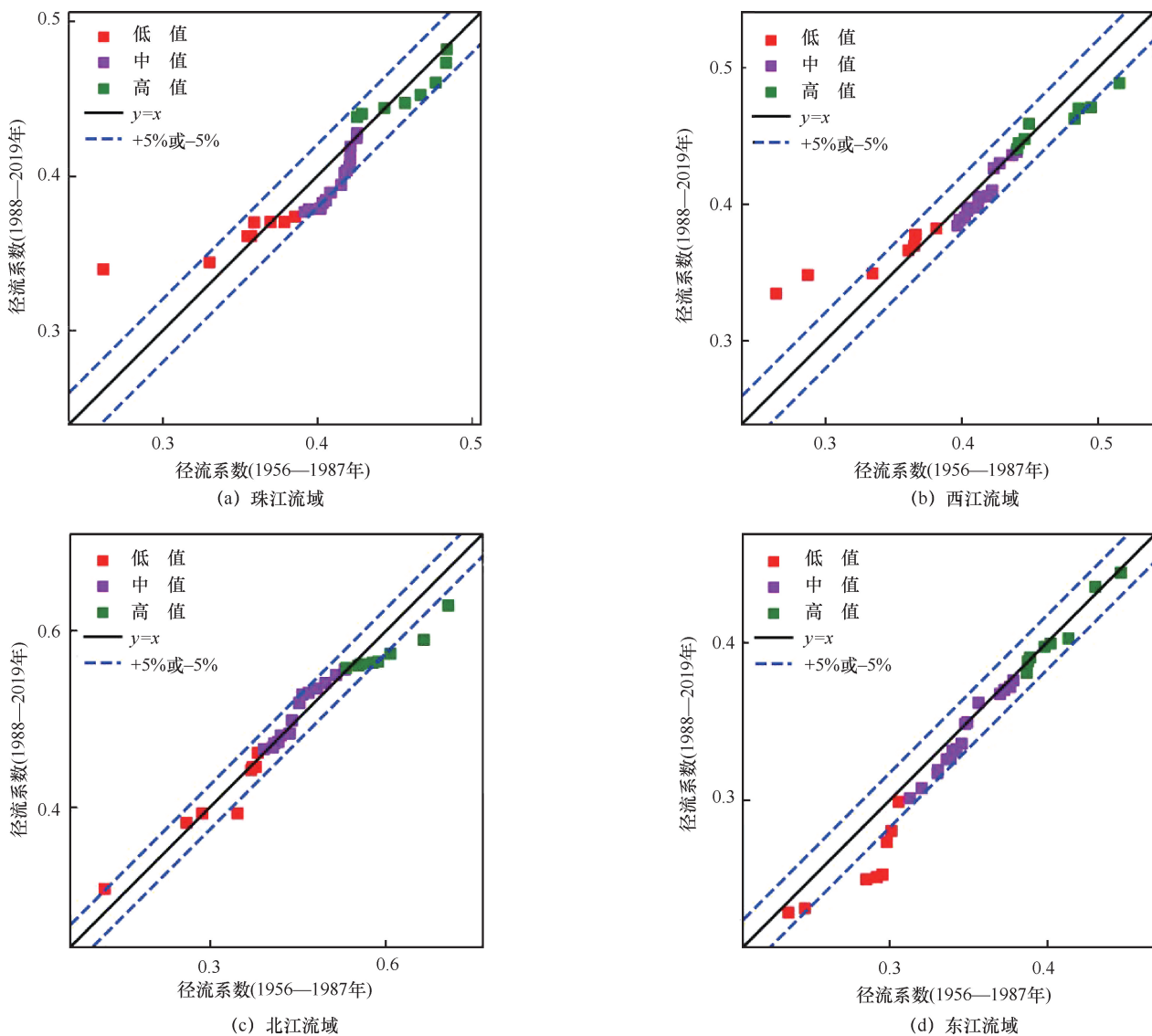


图 13 年径流系数 ITA 检验结果

Fig. 13 ITA test results for annual runoff coefficient

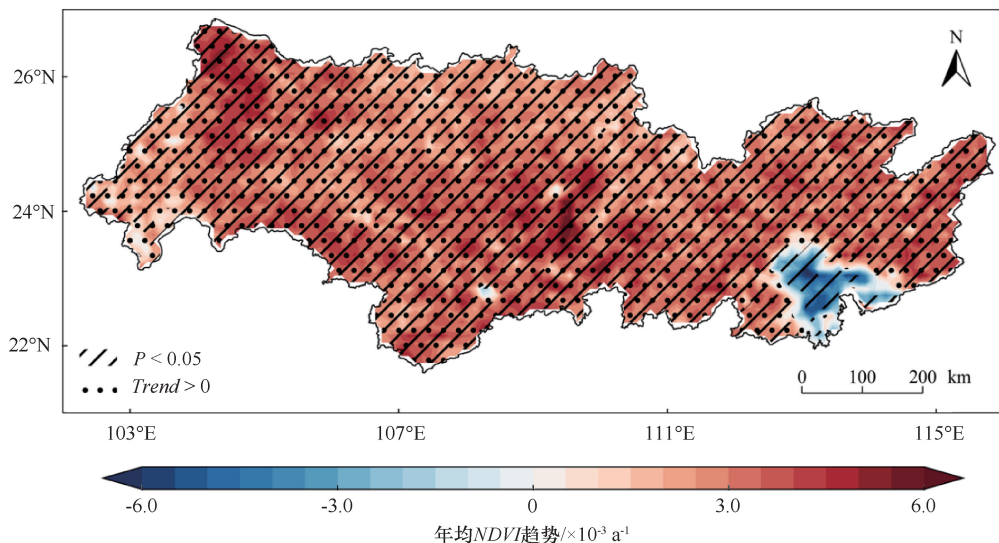


图 14 1983—2018 年归一化植被指数 (NDVI) M-K 检验结果

Fig. 14 Mann-Kendall test results for normalized difference vegetation index (NDVI) from 1983 to 2018

表3 气温 Mann-Kendall 法和 ITA 法统计量结果

Table 3 Statistical results of Mann-Kendall method and ITA method for temperature

气象要素	Z	S
高温	2.914 **	0.011 **
低温	6.425 **	0.020 **

注: Z 为 Mann-Kendall 趋势检验统计量; S 为 ITA 统计量; **表示通过了 95% 置信度的显著性检验。

表4 年季尺度下降水径流 Mann-Kendall 法统计量结果

Table 4 Statistical results of Mann-Kendall method for annual and seasonal precipitation and runoff

要素	流域	Z				
		年	春	夏	秋	冬
降水	珠江	0.87	-0.16	0.72	-0.54	0.53
	西江	0.20	-1.11	0.49	-0.40	1.21
	北江	0.92	0.01	0.89	-0.34	0.72
	东江	-0.34	0.01	0.48	-1.29	-0.11
径流	珠江	-0.04	0.69	-0.91	-0.90	3.42 **
	梧州	0.01	0.99	-1.16	-1.00	3.27 **
	石角	0.48	0.16	-0.02	0.55	1.26
	博罗	-0.32	0.63	-1.08	-0.67	3.78 **

降水径流的趋势时, 相较于 M-K 法检测出来的时间序列显著性的比例更高[M-K 法为 7.5% (3/40), ITA 法为 82.5% (33/40)], 这与已有研究^[40-42]相同。吴国栋^[43]试验了 1000 组数据分别进行 ITA 检测和 M-K 检测, 最终统计得到两种方法在趋势类型上的一致率为 84.3%, 显著性一致率为 25.9%, 与本文得到的结果相类似。综合两种方法来看, 可以发现在趋势显著性检验方面 ITA 与 M-K 的结论差异明显, 但 ITA 方法的核心优势在于能够在识别系列整体趋势的同时, 发现不同类别系列的趋势, 这是 M-K 方法难以

实现的, 其次, ITA 识别的灵敏度相对来说更强, 可以检测一些时间序列数据中无法被 M-K 检验发现的潜在趋势, 这是由于 ITA 法不需要假设时间序列数据服从某种分布, 而是通过判断子序列数据中均值的变化确定是否存在上升或下降趋势, 可以更灵敏地捕捉到时间序列数据中的微小变化。

4.2 ITA 法的局限性及研究展望

本文的研究结果在降水变化趋势上与苏恒等^[24]和王斌等^[25]的结论基本一致, 在西江流域季节尺度径流趋势上与李继清等^[29]的研究略有差异, 这可能与数据时间尺度、处理方式及采用的方法不同有关。所采用的 ITA 法可以根据图像直观地展现出珠江流域不同类别的降水径流变化趋势, 同时也可定量计算出客观的显著性结果。但是当散点位于 $y=x$ 直线附近时, 难以判断其趋势类型, 需要借助计算结果加以分析。本文仅从降雨、径流数据系列本身进行了趋势分析, 尚需结合水文模型等工具对变化趋势演变的内在机理进行深入研究, 此外, 为全面分析流域特征, 在分析的特征指标中也可以补充降水集中度、洪水特征指标和极端气象水文事件的演变规律。

5 结论

本研究应用 ITA 法和 Mann-Kendall 检验分析了 1956—2019 年珠江流域不同时空尺度条件下不同类别降水与径流变化趋势, 并进一步分析了径流系数的变化, 其结果表明如下几点。

(1) 珠江流域年降水量整体呈下降趋势, 年径流量的变化趋势同降水一致; 从不同子流域来看, 西

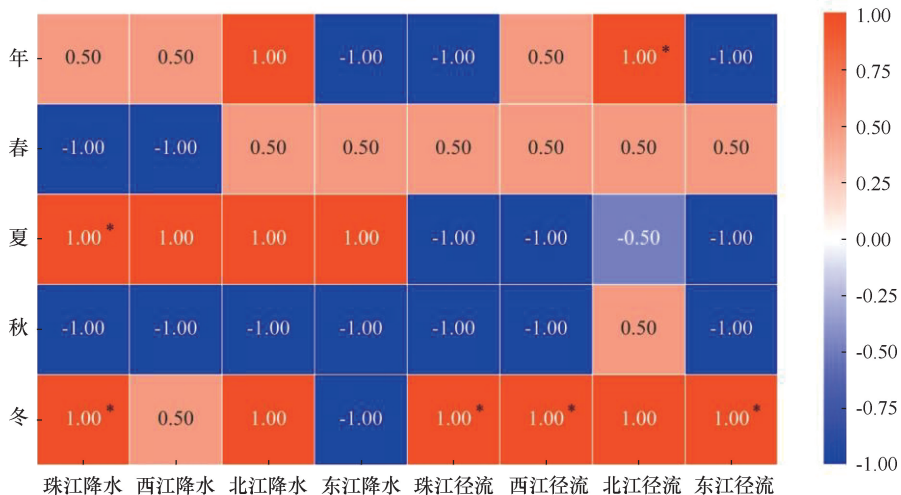


图 15 Mann-Kendall 和 ITA 法降水径流趋势检验结果对比

Fig. 15 Comparison of Mann-Kendall and ITA methods for precipitation and runoff trend test

江、东江呈显著下降趋势, 而北江则呈上升趋势。

(2)从不同季节来看, 珠江流域春、秋季降水呈显著下降趋势, 而夏、冬季降水呈上升趋势, 春季高值类及秋季所有类型降水呈现超过 5% 下降趋势, 夏季高值类及冬季低中值类降水呈现超过 5% 上升趋势; 春、秋、冬三季年径流量变化趋势同降水一致, 而夏季则相反。

(3)不同强度的降水与径流变化趋势并不统一。珠江流域年降水量的下降主要由低值类超过 5% 下降趋势引起, 说明珠江流域干旱发生的可能性增加。春季和秋季高值类降水的下降说明流域在春季与秋季遭受洪水的可能性有所降低; 珠江流域年径流量的下降与秋季低中值类径流下降有关, 会导致水库等工程的蓄水压力增加。

(4)珠江流域径流系数呈显著下降趋势, 高值类的下降最为明显, 经初步分析, 可能与流域气温升高、下垫面的变化以及水工程调蓄能力的增加有关。

(5)通过对比 ITA 与 M-K 两种方法, 发现两者在趋势类型上的一致率为 70%, 而在趋势显著性检验方面 ITA 法相较于 M-K 法检测出来的时间序列显著性的比例更高, 并且 ITA 能够在识别系列整体趋势的同时发现不同类别系列的趋势。

参考文献 (References):

- [1] YANG D, YANG Y, XIA J. Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review [J]. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(2): 115-122.
- [2] 任建成, 谷山青, 冯存峨, 等. 气候变化背景下山东省气温与降水时空变化特征分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(5): 27-37.
- REN Jiancheng, GU Shanqing, FENG Cune, et al. Analysis of the temporal and spatial variation characteristics of temperature and precipitation in Shandong Province under the background of climate change[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(5): 27-37.
- [3] SEN Z. Extreme value innovative trend analysis methodology [J]. *International Journal of Global Warming*, 2022, 28(3): 297-310.
- [4] 冯胜航, 王党伟, 秦蕾蕾, 等. 金沙江流域径流变化特征及成因[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(2): 248-257.
- FENG S H, WANG D W, QIN L L, et al. The characteristic and cause of runoff variation in Jinsha River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(2): 248-257.
- [5] ALMAZROUI M, ŞEN Z. Trend analyses methodologies in hydro-meteorological records [J]. *Earth Systems and Environment*, 2020,

4: 713-738.

- [6] KORUK A E, KANKAL M, YILDIZ M B, et al. Trend analysis of precipitation using innovative approaches in northwestern Turkey [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2023, 131: 103416.
- [7] WANG F, SHAO W, YU H, et al. Re-evaluation of the power of the mann-kendall test for detecting monotonic trends in hydrometeorological time series [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 14.
- [8] SEN Z. Innovative trend analysis methodology [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(9): 1042-1046.
- [9] SEN Z. Innovative trend significance test and applications [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 127(3-4): 939-947.
- [10] 张印, 王汉岗, 余敦先, 等. 基于创新趋势分析方法的黄河年季降水变化特征研究[J]. *中国农村水利水电*, 2023(3): 30-38.
- ZHANG Yin, WANG Hangang, SHE Dunxian, et al. Characteristics of annual and seasonal precipitation change in the Yellow River Basin based on the innovative trend analysis method [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(3): 30-38.
- [11] BUYUKYILDIZ M. Evaluation of annual total precipitation in the transboundary Euphrates-Tigris River Basin of Turkiye using innovative graphical and statistical trend approaches [J]. *Applied Water Science*, 2023, 13(2): 38.
- [12] WANG Y F, XU Y P, TABARI H, et al. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall in the Yangtze River Delta, eastern China [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 231: 104673.
- [13] SHAHFAHAD, TALUKDAR S, ISLAM A M T, et al. Application of advanced trend analysis techniques with clustering approach for analysing rainfall trend and identification of homogenous rainfall regions in Delhi metropolitan city [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(49): 106898-106916.
- [14] WU H, QIAN H. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(5): 2582-2592.
- [15] KISI O. An innovative method for trend analysis of monthly pan evaporations [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 1123-1129.
- [16] DANANDEH M A, HRNJICA B, BONACCIO O, et al. Innovative and successive average trend analysis of temperature and precipitation in Osijek, Croatia [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 145(3-4): 875-890.
- [17] AHMED N, LU H, BOOIJ M J, et al. Innovative polygon trend analysis of monthly precipitation (1952—2015) in the Hindukush-Karakoram-Himalaya river basins of Pakistan [J]. *International Journal of Climatology*, 2022, 42(16): 9967-9993.
- [18] AKCAY F, BINGOLBALI B, AKPINAR A, et al. Trend detection by innovative polygon trend analysis for winds and waves [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 930911.

- [19] AKCAY F, SAN M, NACAR S, et al. Annual Trends of Precipitation and Temperature in the Northwestern Part of Turkey Using Innovative Approaches: A Holistic and Partial Study [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2023, 180(8): 3131-3156.
- [20] GUMUS V, SIMSEK O, AVSAROGLU Y. Evaluation of long-term monthly mean streamflow trend in the Mediterranean basins using different methods [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2023, 151(3-4): 1369-1382.
- [21] WU S, ZHAO W, YAO J, et al. Precipitation variations in the Tai Lake Basin from 1971 to 2018 based on innovative trend analysis [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 139: 108868.
- [22] ZHOU Z, WANG L, LIN A, et al. Innovative trend analysis of solar radiation in China during 1962—2015 [J]. *Renewable Energy*, 2018, 119: 675-689.
- [23] 唐亦汉, 陈晓宏. 近 50 年珠江流域降雨多尺度时空变化特征及其影响[J]. *地理科学*, 2015, 35(4): 476-482.
TANG Yihan, CHEN Xiaohong. Multi-scale spatio-temporal characteristics and influence of precipitation variation in Zhujiang River Basin during the last 50 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(4): 476-482.
- [24] 苏恒, 徐宗学, 李鹏, 等. 1970—2017 年西江流域降水特性分析[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(6): 51-61.
SU Heng, XU Zongxue, LI Peng, et al. Characteristics of precipitation in Xijiang River basin from 1970 to 2017[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(6): 51-61.
- [25] 王斌, 马志鹏, 刘晋, 等. 东江流域降水时空变化及其与 ENSO 事件的响应关系[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(1): 6-9.
WANG Bin, MA Zhipeng, LIU Jin, et al. Study on spatio-temporal characteristics of precipitation and response relationship of ENSO events in Dongjiang River Basin [J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(1): 6-9.
- [26] TIAN Q, YANG S. Regional climatic response to global warming: Trends in temperature and precipitation in the Yellow, Yangtze and Pearl River basins since the 1950s [J]. *Quaternary International*, 2017, 440: 1-11.
- [27] DENG S, CHEN T, YANG N, et al. Spatial and temporal distribution of rainfall and drought characteristics across the Pearl River basin [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 619: 28-41.
- [28] 陈立华, 刘为福, 冷刚, 等. 西江干流径流年际及年内变化趋势分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(4): 74-81.
CHEN Lihua, LIU Weifu, LENG Gang, et al. Study on interannual and annual variation characteristics of runoff in the main stream of Xijiang River[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(4): 74-81.
- [29] 李继清, 张鹏, 赵莹玉, 等. 变化环境下近 60 年西江流域径流时空演变特征[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(3): 1033-1048.
- LI Jiqing, ZHANG Peng, ZHAO Yingyu, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of runoff in the Xijiang River Basin in recent 60 years under the changing environment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 1033-1048.
- [30] YANG L, ZHAO G, TIAN P, et al. Runoff changes in the major river basins of China and their responses to potential driving forces [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127536.
- [31] BAI X, ZHAO W. Impacts of climate change and anthropogenic stressors on runoff variations in major river basins in China since 1950 [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 898: 165349.
- [32] 吴志勇, 白博宇, 何海, 等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(1): 1-9.
WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2023, 51(1): 1-9.
- [33] 陈文龙, 马志鹏, 袁菲, 等. 粤港澳大湾区水安全协同调控理论框架研究[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 22-31.
CHEN Wenlong, MA Zhipeng, YUAN Fei. Theoretical framework of water security collaborative regulation and control in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 22-31.
- [34] CHEN Q H, CHEN H, WANG J X, et al. Impacts of climate change and land-use change on hydrological extremes in the Jinsha River Basin [J]. *Water*, 2019, 11(7): 1398.
- [35] 马俊秀, 曾建军. 石羊河流域不同时间尺度水沙变化研究[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(10): 106-116.
MA Junxiu, ZENG Jianjun. Study on variation of water and sediment at different time scales in Shiyang River Basin [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(10): 106-116.
- [36] 贾昊, 穆兴民, 赵广举, 等. 不同频率黄河上中游径流量变化特征及其趋势预测[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 60-64.
JIA Hao, MU Xingmin, ZHAO Guangju, et al. Variation characteristics and trend prediction of runoff in the upper and middle Yellow River with different frequencies [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 60-64.
- [37] 吕乐婷, 彭秋志, 廖剑宇, 等. 近 50 年东江流域降雨径流变化趋势研究[J]. *资源科学*, 2013, 35(3): 514-520.
LYU Leting, PENG Qiuzhi, LIAO Jianyu, et al. Fluctuation and trends in precipitation and runoff in the Dongjiang River Basin over 50 years [J]. *Resources Science*, 2013, 35(3): 514-520.
- [38] 张建云, 张成凤, 鲍振鑫, 等. 黄淮海流域植被覆盖变化对径流的影响[J]. *水科学进展*, 2021, 32(6): 813-823.
ZHANG JianYun, ZHANG Chengfeng, BAO Zhenxin, et al. Analysis of the effects of vegetation changes on runoff in the Huang-Huai-Hai River basin under global change [J]. *Advances in Water*

Science, 2021, 32(6): 813-823.

- [39] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960—2010年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 605-613.

ZHANG Shulei, YANG Dawen, YANG Hanbo, et al. Analysis of the dominant causes for runoff reduction in five major basins over China during 1960—2010[J]. Advances In Water Science, 2015, 26(5): 605-613.

- [40] 张逸飞, 曾建军. 疏勒河流域气候变化的时空分布特征分析[J]. 水利发展研究, 2024, 24(10): 126-136.

ZHANG Yifei, ZENG Jianjun. Temporal and spatial distribution of climate change in Shule River Basin [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(10): 126-136.

- [41] ACAR E, KANKAL M, AKCAY F, et al. Innovative polygon trend

analyses with star graph for rainfall and temperature data in agricultural regions of Turkey [J]. Environmental Earth Sciences, 2022, 81(23): 530.

- [42] BESH K Z, DEMISSIE T A, FEYESSA F F. Comparative analysis of long-term precipitation trends and its implication in the Modjo catchment, central Ethiopia [J]. Journal of Water and Climate Change, 2022, 13(11): 3883-3905.

- [43] 吴国栋. 水文气象要素的非参数趋势分析和预测研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.

WU Guodong. Nonparametric Trend Analysis and Prediction of Hydro-Meteorological Elements [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.

(责任编辑 王璐)