

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0007

莫崇勋,刘朋,朱新荣,等.近59年广西气象要素时空变化特征分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):46-53,69. MO C X, LIU P, ZHU X R, et al. Spatial and temporal variation characteristics of meteorological factors in Guangxi in recent 59 years [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 46-53, 69. (in Chinese)

近59年广西气象要素时空变化特征分析

莫崇勋^{1,2,3}, 刘朋^{1,2,3}, 朱新荣^{1,2,3}, 阮俞理^{1,2,3}, 杨云川^{1,2,3}, 孙桂凯^{1,2,3}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004; 3. 广西大学 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

摘要:基于广西25个气象台站1958—2016年的气象资料,采用Daniel趋势检验法、Lee-Heghinan变异检验法、Morlet小波分析法、R/S分析法和克里金插值等方法,对广西年日照时数、年平均风速、年降水量、年平均相对湿度和年平均气温的时空变化进行了分析。结果表明:近59年广西年日照时数、年平均风速和年平均相对湿度呈减小趋势,年降水量和年平均气温表现出微弱增加趋势;各气象要素分别在1979、1974、2011、2002和1997年发生变异;各气象要素均表现出多时间尺度耦合的复杂特性,第一主周期分别为22 a、29 a、31 a、26 a和13 a;各气象要素的Hurst指数均大于0.5,说明未来变化趋势将继续与过去变化趋势保持一致;在空间上,广西年日照时数由西北向东南递减,年平均风速、年降水量、年平均相对湿度和年平均气温由北向南递增。

关键词:气象要素;趋势分析;变异分析;周期分析;空间分析;广西

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spatial and temporal variation characteristics of meteorological factors in Guangxi in recent 59 years

MO Chongxun^{1,2,3}, LIU Peng^{1,2,3}, ZHU Xinrong^{1,2,3}, RUAN Yuli^{1,2,3}, YANG Yunchuan^{1,2,3}, SUN Guikai^{1,2,3}

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Based on the meteorological data of 25 meteorological stations in Guangxi from 1958 to 2016, we adopted Daniel trend test method, Lee-Heghinan test, Morlet wavelet analysis, R/S analysis, and Kriging interpolation to analyze the spatial and temporal variations of the sunshine duration, wind speed, precipitation, relative humidity, and temperature data in Guangxi. The results showed that: in the past 59 years, the annual sunshine duration, annual average wind speed, and annual average relative humidity showed a decreasing trend; the annual precipitation and annual average temperature showed a slight rising trend; these factors respectively had abrupt changes in 1979, 1974, 2011, 2002 and 1997; they all showed the complex characteristic of multi-time scale coupling, and their first main periods were 22 a, 29 a, 31 a, 26 a and 13 a, respectively; the Hurst indexes of these meteorological factors were all greater than 0.5, indicating that the future trend will still be consistent with the past trend. In space, the annual sunshine duration in Guangxi declined from the northwest to the southeast, whereas the annual average wind speed, annual precipitation, annual average relative humidity, and annual average temperature showed a rising trend from north to south.

Key words: meteorological factors; trend analysis; mutation analysis; period analysis; spatial analysis; Guangxi

收稿日期:2018-07-23 修回日期:2018-11-14 网络出版时间:2018-12-04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181130.1120.012.html>

基金项目:国家自然科学基金(51569003;51609041);广西自然科学基金(2017GXNSFAA198361)

作者简介:莫崇勋(1974—),男(壮族),广西忻城人,教授,博士生导师,主要从事水文水资源方面研究。E-mail:mcx@mail.gxu.cn

通信作者:刘朋(1991—),男,河南漯河人,主要从事水文变异方面研究。E-mail:liupeng0624@126.com

20 世纪以来,在气候变化和人类活动不断加剧的大背景下,极端事件高频率发生,时刻对全球水文循环过程产生潜移默化的影响^[1-2]。因此,变化环境下水文循环过程以及气象要素变化特征研究成为当今水利学科的研究热点之一,其中全球气候变暖作为环境变化的重要度量,它所带来的水文效应问题倍受各国学者的广泛关注^[3-4]。目前,关于区域气象要素演变规律研究的成果已有很多,如叶瑜等^[5]利用广西 89 个气象台站日照资料,运用 GIS 技术、线性倾向率以及 Mann-Kendall 变异检验方法,对广西近 50 年来日照时数的变异特征及时空变化特征进行分析;孙桂凯等^[6]基于广西 23 个气象站点逐日降水资料,综合运用改进的百分位法和 Morlet 小波分析法,分析了广西 1~5 d 极端连续降水的降水量和降水频次;谢坤坚等^[7]利用广西的日降雨量变化数据对广西降雨侵蚀力时空变化进行分析;孙桂凯等^[8]基于广西 83 个国家级地面气象站逐小时降水观测资料,采用 Mann-Kendall 检验法和 ArcGIS 的空间分析技术研究了广西年降水量及不同历时降水的发生率和贡献率的趋势变化及空间分布规律;叶金印等^[9]采用淮河流域 145 个地面气象站观测资料,分析了近 50 年来淮河流域水文气象要素的时空演变特征;伍红雨等^[10]根据华南地区 111 个气象站点的年日照时数观测资料,基于多种数理统计方法,分析了华南地区年日照时数的时空分布特征和气候变化;周绍毅等^[11]利用广西 71 个气象站近 50 年的逐日气温、降水量和日照时数资料,研究了广西主要农业气候资源在时间和空间上的变化趋势及其差异。通过对相关文献分析发现,目前广西气候变化的相关研究多侧重于某种气候要素的单一研究,很少涉及多种气候要素的综合分析,或者没有在整体上分析区域气候要素的趋势性、变异性、周期性或空间性特征,研究成果存在一定的局限性。鉴于此,本文基于广西 1958—2016 年 25 个气象台站的五种气象要素逐月观测资料,对广西近 59 a 来各气象要素的时空分布特征和变化趋势进行研究,有助于在气候变化的大背景下更好的了解广西气候要素的变化特征,并为有关部门在应对气候变化方面提供一定的理论指导。

1 研究区概况

广西壮族自治区,通称广西,简称“桂”,首府南宁,南临北部湾,是中国唯一沿海的自治区。广西地处中国华南地区,位于东经 $104^{\circ}26'$ ~ $112^{\circ}04'$,北纬 $20^{\circ}54'$ ~ $26^{\circ}24'$,北回归线横贯全区中部,属亚热带季风气候区(见图 1)。广西各地区年降水量均在

1 070 mm 以上,全区年平均气温在 $16.0\sim 23.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,各地年日照时数为 $1\ 213\sim 2\ 135\text{ h}$ 。区内河流随地势从西北流向东南,形成以红水河—西江为主干流的横贯中部以及两侧支流的树枝状水系,全区水力资源丰富,雨水丰沛,干湿分明,气候温暖,热量丰富,季节变化不明显,日照适中,冬短夏长。

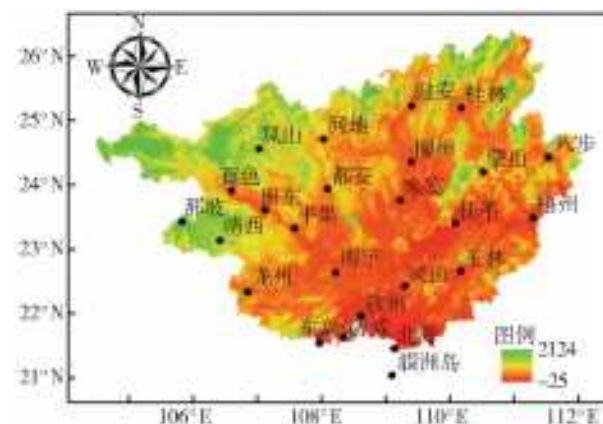


图 1 广西 DEM 及气象监测站点分布
Fig. 1 DEM and the location of meteorological monitoring stations in Guangxi

2 研究方法

基于广西 25 个站点 1958—2016 年的日照、平均风速、降水、平均相对湿度和气温逐月的观测资料,对广西近 59 年来气象要素的年际变化规律进行研究。时间序列资料缺测的部分采取线性插补法和邻近站及历史资料插补法^[12]。文中采用线性趋势法^[13]、滑动平均法^[14]、Mann-Kendall 趋势检验^[15]、Daniel 趋势检验^[16]和游程检验^[17]进行趋势分析;结合 Mann-Kendall 变异检验法、Lee-Heghinan 检验法和滑动 t 检验法、有序聚类检验法、累积距平检验法、滑动游程检验法、滑动 F 检验法和滑动秩和检验法^[18-20]等八种变异检测方法对广西五种气候要素的变异性进行综合检验,使变异点更具说服力;应用 Morlet 小波分析法^[21-22]进行周期分析;基于 R/S 分析法计算 Hurst 指数预测未来变化趋势^[23-25];最后,结合 ArcGIS 的空间插值模块,采用 Kriging 法插值,对本研究区域的气象要素进行空间分析。通过对广西近 59 年来气温、降水和日照等五种气象要素趋势、变异和周期等演变规律的研究,希望能够全面阐述广西气象要素的时空分布规律,为广西有关部门合理利用气候资源和防灾减灾工作提供必要的参考和例证。

3 结果与分析

3.1 广西气象要素趋势分析

文中采用广西 25 个站点 1958—2016 年的日照

时数、平均风速、年降水量、平均相对湿度和气温五个气象要素,综合线性回归分析、滑动平均、Mann-Kendall 趋势检验、Daniel 趋势检验和游程检验进行趋势分析。

气象要素的趋势性检验结果见图 2 和表 1,对于年日照时数,线性回归分析、滑动平均和 Daniel 趋势检验的结果表明,年日照时数总体呈现显著下降趋势,年日照时数线性倾向率为 $-45 \text{ h}/(10 \text{ a})$,通过了 $P < 0.001$ 的显著性检验,减少趋势十分明显,且 Mann-Kendall 趋势检验和游程检验的结果也显示其下降趋势显著,综合这五种方法的检测结果,认为近 59 年广西年日照时数总体呈现显著下降趋势,与周绍毅等人的研究成果基本相同^[11];对于年平均风速,五种方法的检测结果均表明近 59 年来全区年平均风

速呈现显著减小的趋势,年平均风速线性倾向率为 $-0.067 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$,也通过了 $P < 0.001$ 的显著性检验,表现为阶梯式的骤降^[11];对于年降水量,五种检验方法的结果都呈现出并不显著增加趋势,年降水量线性倾向率为 $18.3 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,未通过 $P < 0.001$ 的显著性检验;对于年平均相对湿度,五种检验方法的结果表明近 59 年来全区年平均相对湿度呈现显著减小的趋势,年平均相对湿度线性倾向率为 $-0.42/(10 \text{ a})$,未通过 $P < 0.001$ 的显著性检验;对于年平均气温,综合五种检测方法的结果可知,近 59 年来全区年平均气温呈现显著增加的趋势,这与周绍毅等人的研究是一致的^[11],年日照时数线性倾向率为 $0.14 \text{ }^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$,也通过了 $P < 0.001$ 的显著性检验,但其变化值明显低于全国的平均值($0.22 \text{ }^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$)。

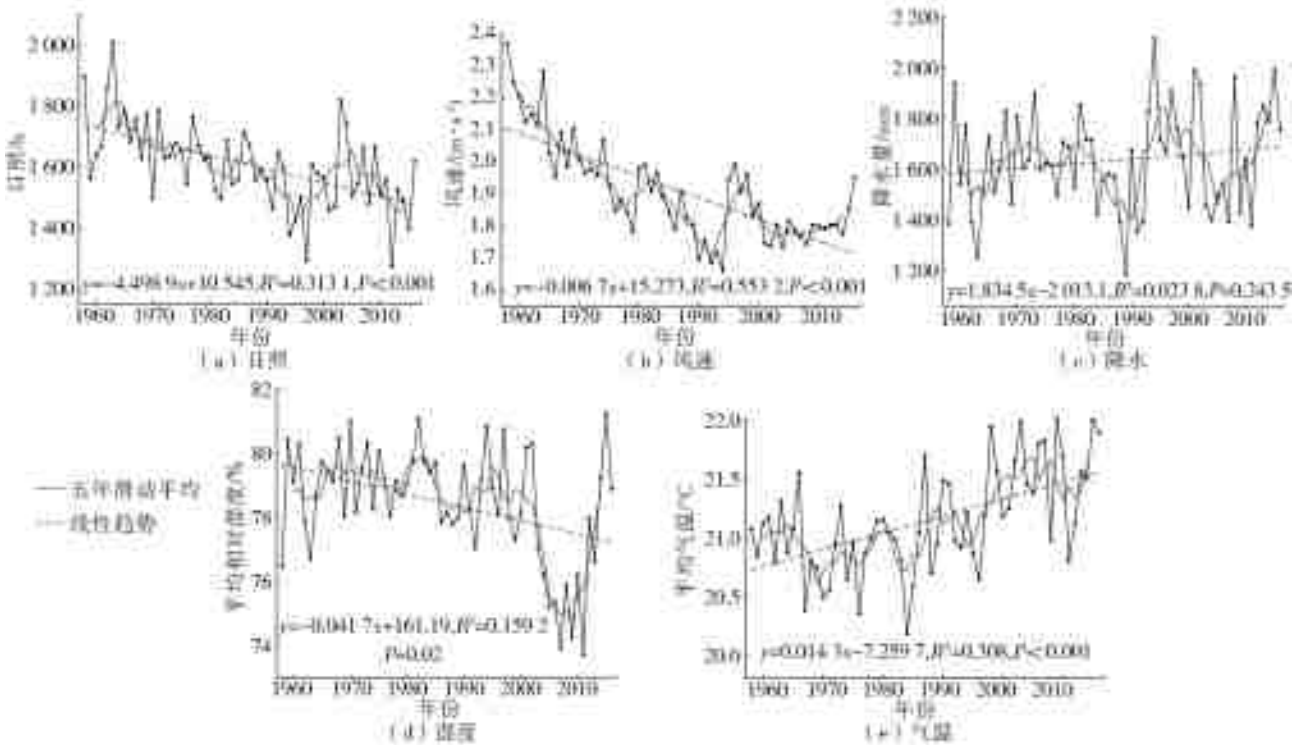


图 2 近 59 年广西各气象要素变化趋势分析

Fig. 2 The variation of meteorological factors in Guangxi in recent 59 years

表 1 近 59 年广西各气象要素趋势分析

Tab. 1 Trends of meteorological factors in Guangxi in recent 59 years

气象要素	线性回归分析		显著性	Mann-Kendall 检验		Daniel 检验		游程检验		趋势分析 综合结果
	<i>b</i>	<i>T</i>		<i>Z_c</i>	显著性	<i>r_s</i>	趋势	<i>U</i>	显著性	
日照	-4.498 9	-5.097 5	显著	-4.420 7	显著	-0.558 5	下降	-1.968 2	显著	显著下降趋势
风速	-0.006 7	-8.400 3	显著	-6.199 4	显著	-0.741 8	下降	-5.103 4	显著	显著下降趋势
降水量	1.834 5	1.178 4	不显著	1.020 2	不显著	0.144 7	上升	-0.654 6	不显著	不显著上升趋势
平均相对湿度	-0.041 7	-3.285 6	显著	-2.903 5	显著	-0.356 1	下降	-2.218 3	显著	显著下降趋势
气温	0.014 3	5.037 4	显著	4.106 8	显著	0.534 1	上升	-2.154 3	显著	显著上升趋势

3.2 广西气象要素变异分析

考虑到单一变异检测方法有其适应区域的局限性,为增强变异点的说服力,本文同时采用 Mann-

Kendall 检验法、Lee-Heghinan 检验法和滑动 *t* 检验法等八种变异检测方法对广西各气象要素的变异性进行综合诊断,将可能变异点中权重最高的年份

确认为最终的变异点。

Mann-Kendall 变异检验结果表明(见图 3),近 59 年来,在全球气候变化和人类活动加剧的大背景下,广西五种气象要素均发生了明显的变异,结合图 3 检验结果可知,年日照时数的 UF 和 UB 曲线在信度线内相交于 1979 年,为进一步保证该变异点的可靠性,同时采用滑动 t 检验和 Lee-Heghinan 检验等七种变异检验方法进行综合诊断,表 2

的变异检验结果显示,年日照时数在 1979 年变异的检验结果所占权重最高,因此可确定年日照时数在 1979 年发生了减少到显著减少的变异;同理可以得出年平均风速、年降水量、年平均相对湿度和年平均气温分别在 1974、2011、2002 和 1997 年发生变异。综上,广西气候要素序列的变异点被多种方法同时检测出,增加了变异点存在的可靠性。

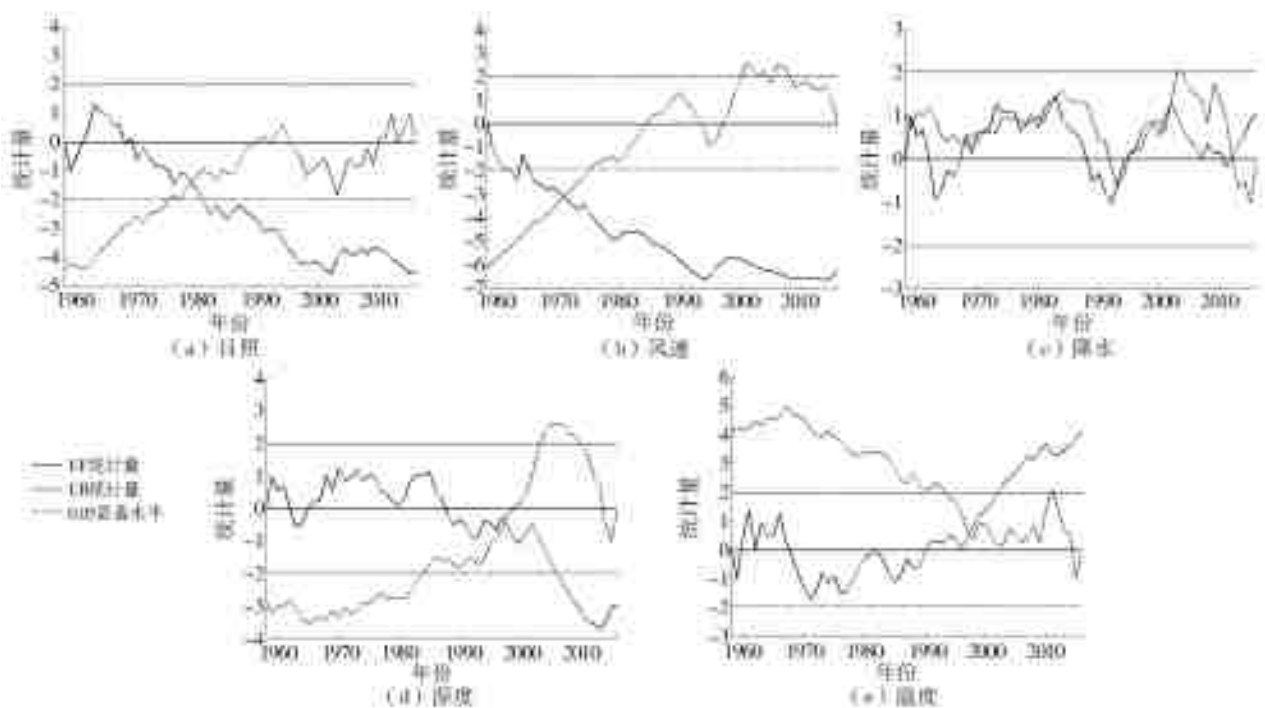


图 3 近 59 年广西各气象要素 M-K 变异检测结果

Fig. 3 M-K mutation detection of meteorological factors in Guangxi in recent 59 years

表 2 近 59 年广西各气象要素变异检验结果

Tab. 2 Mutation test results of meteorological factors in Guangxi in recent 59 years

气象要素	日照	平均风速	降水量	平均相对湿度	平均气温
Mann-Kendall 检验法	1 979	1 971	2 011	1 998	1 997
Lee-Heghinan 检验法	1 979	1 974	2 011	2 002	1 997
滑动 t 检验法	1 979	1 974	1 992	2 002	1 997
有序聚类检验法	1 979	1 974	2 011	2 002	1 997
累积距平检验法	1 981	1 974	1 993	2 002	1 997
滑动游程检验法	1 963	1 964	1 989	2 003	1 996
滑动 F 检验法	1 963	2 002	2 011	2 000	1 962
滑动秩和检验法	1 988	1 988	2 011	2 002	1 987
评分之和	4	4	5	5	5
综合权重	0.500	0.500	0.625	0.625	0.625
综合检验结果	1 979	1 974	2 011	2 002	1 997

3.3 广西气象要素周期分析

为进一步研究广西各气象要素多时间尺度的周期变化特征,文中采用 Morlet 小波分析法计算各气象要素的小波实部图和小波方差图(见图 4),其中,

小波实部图可以读取气象要素在不同时间尺度的变化特征,小波方差图中的极值充分体现气象要素的主周期。图 4 显示,近 59 年来广西各种气象要素在不同时间尺度上的变异点及周期震荡,其中在年日

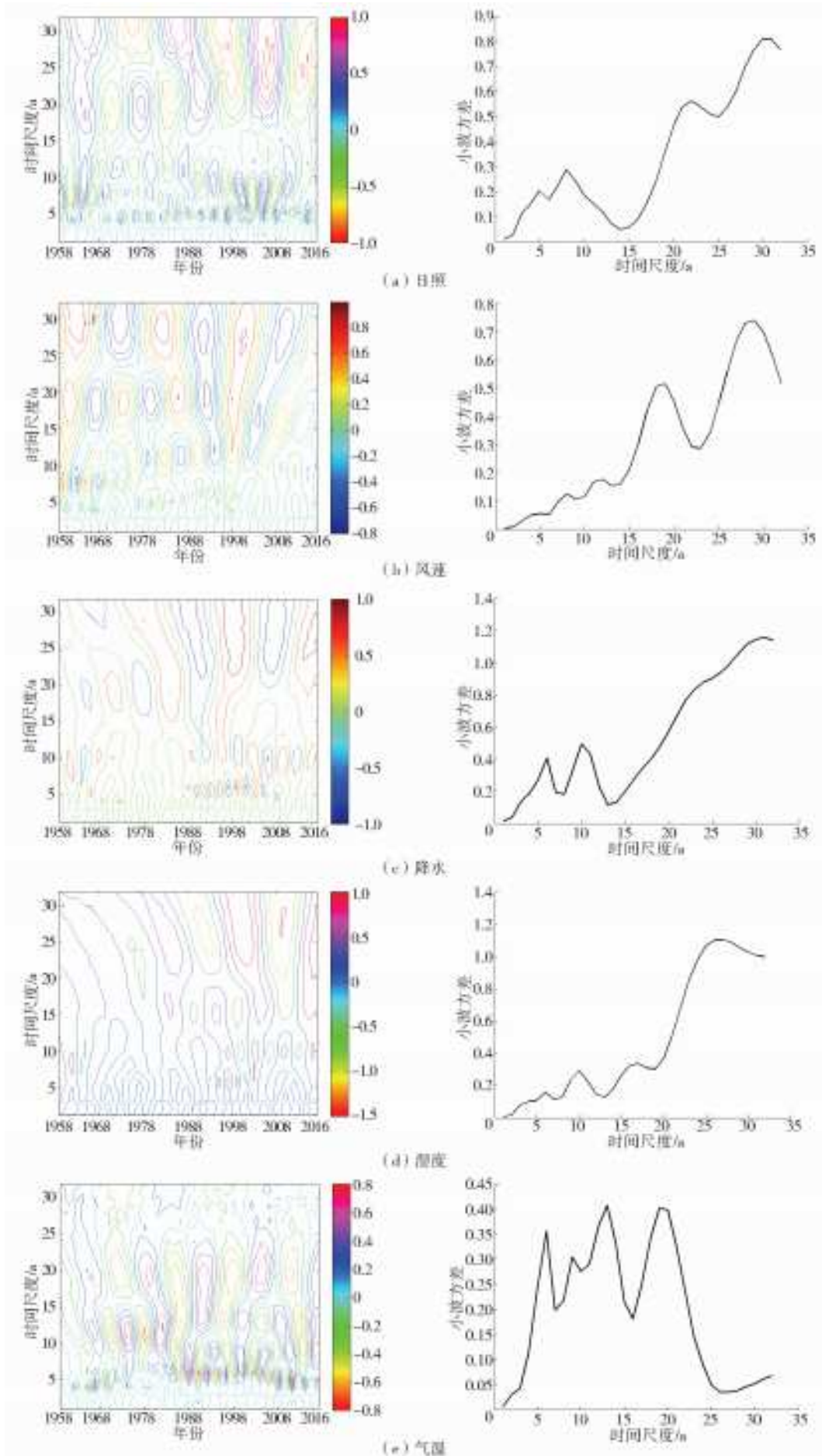


图 4 近 59 年广西各气象要素小波分析结果

Fig. 4 Morlet wavelet analysis of meteorological factors in Guangxi in recent 59 years

照时数的小波实部图中,正值代表日照时数偏大的时期,负值代表日照时数偏小的时期,从图 4 中可以看出,等值线密集期主要集中在 3~6 a、7~9 a、20~23 a 和 27~32 a,且具有全域性,同时结合小波方差图可知,年日照时数对应的小波方差图峰值主要有四个,对应的第一、二、三和四周期分别为 30 a、22 a、8 a 和 5 a;同理可知年平均风速的第一、二、三和四周期分别为 29 a、19 a、12 a 和 8 a;年降水量的第一、二和三周期分别为 31 a、10 a 和 6 a;年平均相对湿度的第一、二、三和四周期分别为 26 a、17 a、10 a 和 6 a;年平均气温的第一、二、三和四周期分别为 13 a、19 a、6 a 和 9 a。

3.4 广西气象要素未来变化趋势

运用 R/S 分析法,计算 Hurst 指数判别未来广

西五种气象要素的变化趋势,同时采用最小二乘法进行线性拟合,所得到的直线斜率即为广西气象要素的 Hurst 指数(见图 5)。结合图 5 的分析结果可知,广西日照、风速、降水、湿度和气温的 Hurst 指数分别为 0.841 3、0.948 3、0.678 6、0.798 6 和 0.884 7,均大于 0.5,这表明广西五种气象要素均存在赫斯特现象,故可预测五种气象要素的时间序列呈显著地正持续性,与 1958—2016 年整体变化趋势保持一致,其中降水和气温在未来将继续保持增加的趋势,日照、风速和湿度将继续保持降低的变化趋势。若全球气候变化依旧保持现在发展趋势或者变化更为激烈^[26],那么,广西气象要素的未来变化趋势将会继续与过去 59 a 保持一致,且短时期内不会发生逆转。

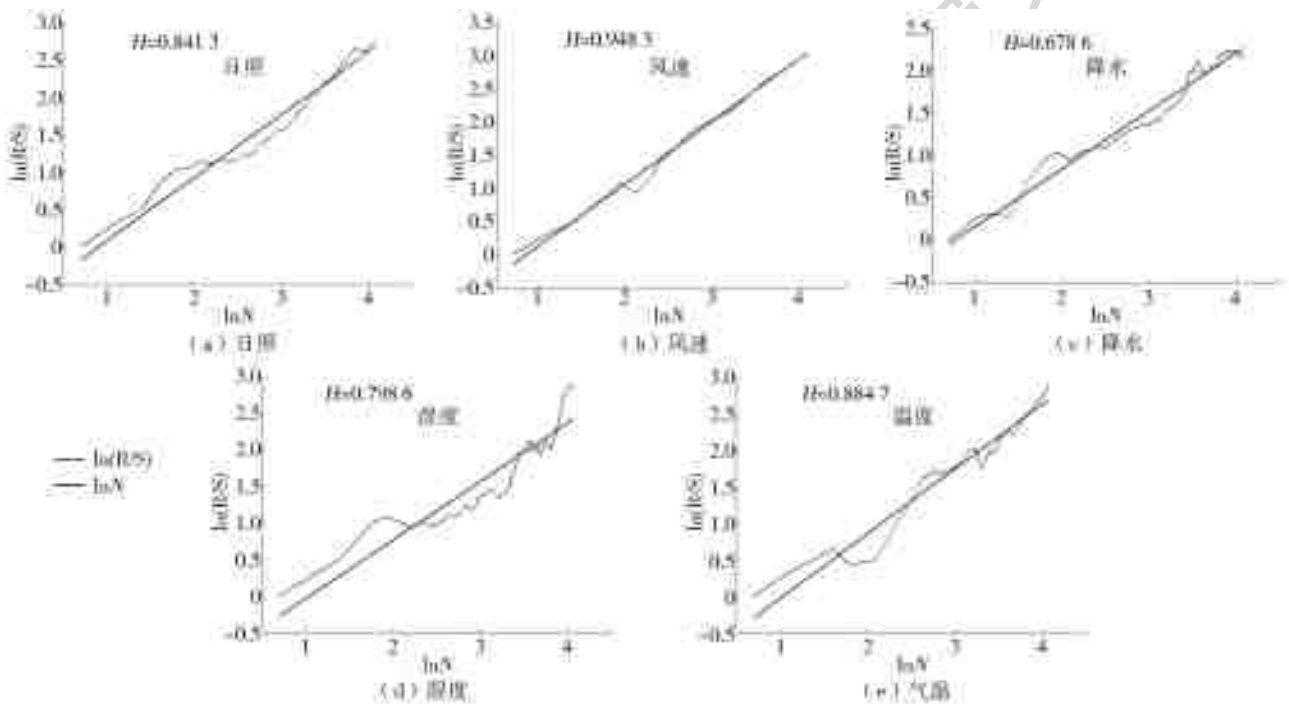


图 5 近 59 年广西各气象要素 R/S 分析结果

Fig. 5 R/S analysis of meteorological factors in Guangxi in recent 59 years

3.5 广西气象要素空间分布

图 6 为广西近 59 年来日照时数、平均风速、年降水量、平均相对湿度和年平均气温的空间分布图。全区年日照时数呈现出由西北向东南递减,日照时数的高值区和低值区差值高达 740 h;广西年平均风速由西向南表现出先增加后减小的规律,由北向南逐渐增大的现象,这主要与广西南部受到海风和海浪的影响有关;年降水量由东北向西南表现出先减小后增加的规律;全区中部内陆地区平均相对湿度明显低于沿海地区,这也与广西沿海的地理位置和所处的亚热带季风区有关,表现出湿热的特性;年平均气温表现出由北向南递增的规律,这也完全符

合地理规律。

4 结论

文中采用多种趋势分析、M-K 变异检测、Morlet 小波分析和 ArcGIS 空间插值等方法,分析了广西 25 个气象站点的日照、风速和降水量等因子的时空演变规律,主要结论如下。

(1)近 59 年广西年日照时数、年平均风速和年平均相对湿度呈现减小趋势,线性倾向率分别为 $-45 \text{ h}/(10\text{a})$ 、 $-0.067 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$ 和 $-0.42/(10\text{a})$;年降水量和年平均气温表现出微弱增加趋势,线性倾向率分别为 $18.3 \text{ mm}/(10\text{a})$ 和 $0.14 \text{ }^\circ\text{C}/(10\text{a})$ 。

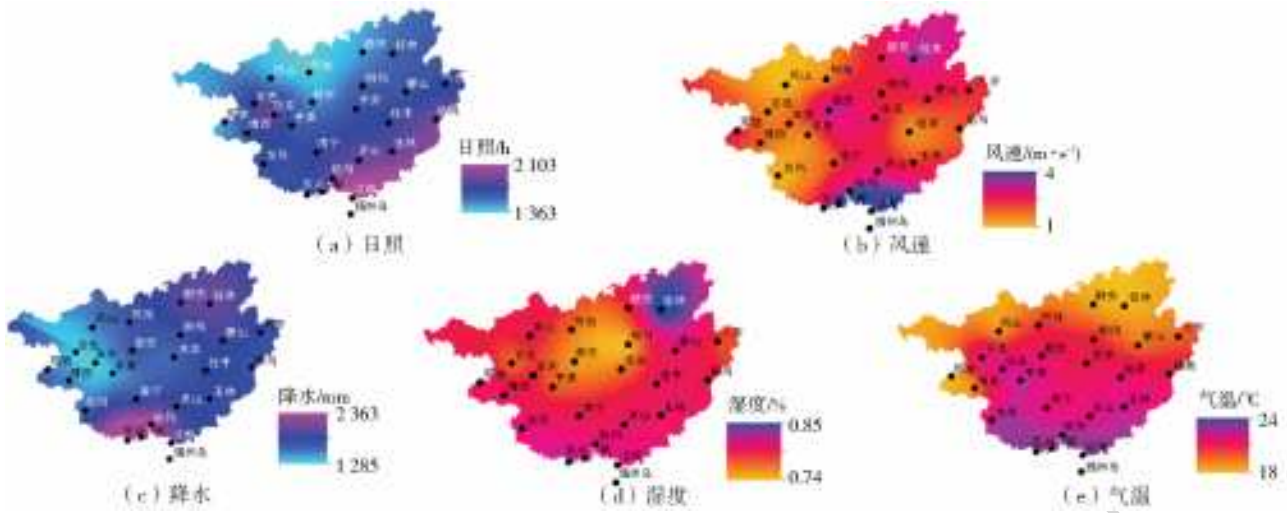


图 6 近 59 年广西气象要素空间分析结果

Fig. 6 Spatial analysis of meteorological factors in Guangxi in recent 59 years

(2) 变异检验结果显示,在全球气候变暖和人类活动加剧的大背景下,全区气象要素发生了明显变异,年日照时数、年平均风速、年降水量、年平均相对湿度和年平均气温分别在 1979、1974、2011、2002 和 1997 年发生变异。

(3) Morlet 小波分析的结果表明,近 59 年来广西各气象要素存在不同时间尺度的变异点及周期震荡,各气象要素的第一主周期分别为 22 a、29 a、31 a、26 a 和 13 a。

(4) R/S 分析结果显示,广西五种气象要素的 Hurst 指数均大于 0.5,这表明气象要素均存在赫斯特现象,故可预测五种气象要素的时间序列呈显著地正持续性,与 1958—2016 年整体变化趋势保持一致。

(5) 在空间上,广西的年日照时数由西北向东南递减;年平均风速由西向东表现出先增加后减小的规律,由北向南逐渐增大的现象;年降水量由东北向西南表现出先减小后增加再增加的规律;年平均相对湿度和年平均气温由北向南呈现递增。

参考文献(References):

- [1] PIAO S, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467 (7311): 43-51. DOI: 10. 1038/nature09364.
- [2] IPCC. Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press, 2007.
- [3] IPCC. Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fifth assess-

ment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press, 2013.

- [4] TAO F, YOKOZAWA M, XU Y, et al. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981-2000[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 138: 82-92. DOI: 10. 1016/j. agrformet. 2006. 03. 014.
- [5] 叶瑜, 苏永秀, 李政, 等. 近 50 年广西日照时数时空变化特征分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29 (14): 196-201. (YE Y, SU Y X, LI Z, et al. The analysis on sunshine duration spatial and temporal variations over Guangxi in recent 50 years [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29 (14): 196-201. (in Chinese)).
- [6] 孙桂凯, 余璇, 高沫, 等. 广西极端连续降水变化趋势及周期性研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36 (2): 6-9. (SUN G K, SHE X, GAO M, et al. Research on variation trend and periodicity of extreme continuous precipitation in Guangxi [J]. Water Research and Power, 2018, 36(2): 6-9. (in Chinese)).
- [7] 谢坤坚, 卢远, 蔡卓杰, 等. 广西降雨侵蚀力时空变化分析[J]. 中国水土保持 SWCC, 2016(12): 50-54. (XIE K J, LU Y, CAI Z J, et al. Temporal and spatial variation analysis of rainfall erosivity in Guangxi [J]. Soil and Water Conservation in China, 2016 (12): 50-54. (in Chinese)) DOI: 10. 14123/j. cnki. swcc. 2016. 0336.
- [8] 孙桂凯, 高沫, 黄亚, 等. 广西近 50 年降水结构时空变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34 (9): 1-4. (SUN G K, GAO M, HUANG Y, et al. Spatial temporal variations of precipitation characteristics in Guangxi over the last 50 years [J]. Water Research and Power, 2016, 34(9): 1-4. (in Chinese)).
- [9] 叶金印, 黄勇, 张春莉, 等. 近 50 年淮河流域气候变化

- 时空特征分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 84-91. (YE J Y, HUANG Y, ZHANG C L, et al. Spatial-temporal variations of climate change of the Huaihe River basin during recent 50 years[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25 (1): 84-91. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2014. 11. 027.
- [10] 伍红雨, 杜尧东, 潘蔚娟. 近 48 年华南日照时数的变化特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2011, 50(6): 120-129. (WU H Y, DU Y D, PAN W J. The change characteristics of sunshine duration during the past 48 years in south China, 2011, 50(6): 120-129. (in Chinese)).
- [11] 周绍毅, 徐圣璇, 黄飞, 等. 广西农业气候资源的长期变化特征[J]. 中国农学通报, 2015, 27(27): 168-173. (ZHOU S Y, XU S X, HUANG F, et al. Secular variation features of agricultural climate resources in Guangxi[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1088-1096. (in Chinese)).
- [12] 闫军辉, 张向敏, 周红升, 等. 1951-2015 年河南省温度变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(7): 102-107. (YAN J H, ZHANG X M, ZHOU H S. Annual temperature variations in Henan during the period of 1951 to 2015[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31 (7): 102-107. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2017. 220.
- [13] 张扬, 白红英, 苏凯, 等. 1960-2013 年秦岭陕西段南北坡极端气温变化空间差异[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1296-1308. (ZHANG Y, BAI H Y, SU K, et al. Spatial variation of extreme temperature change on southern and northern slopes of Shaanxi section in Qinling Mountains during 1960 to 2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73 (7): 1296-1308. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlxb201807009.
- [14] 吴丹瑞, 耿欣欣, 李明. 呼伦湖流域近 55 年气候变化特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 174-178. (WU D R, GENG X X, LI M. Characteristics of climatic changes in Hulun Lake basin in recent 55 years. [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23 (6): 174-178. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2016. 06. 022.
- [15] 王景才, 郭佳香, 徐蛟, 等. 近 55 年淮河中上游流域气象要素多时间尺度演变特征及关联性分析[J]. 地理科学, 2017, 37(4): 611-619. (WANG J C, GUO J X, XU J, et al. Multi-time scales change characteristics and relationship of meteorological variables in the upper and middle regions of the Huaihe River basin in recent 55 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(4): 611-619. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2017. 04. 015.
- [16] 王莉, 胥鹏海, 宋涛, 等. 沔河水水质变化趋势及原因分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(3): 503-506. (WANG L, XU P H, SONG T, et al. Variation tendency of water quality and its causing effect of the Fenghe River[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2011, 41(3): 503-506. (in Chinese)) DOI: 10. 16152/j. cnki. xdxzbz. 2011. 03. 018.
- [17] 王双银, 谢萍萍, 穆兴民, 等. 松花江干流输沙量变化特征分析[J]. 泥沙研究, 2011(4): 67-72. (WANG S Y, XIE P P, MU X M, et al. Analysis of variation of annual sediment loads in Songhua River[J]. Journal of Sediment Research, 2011 (4): 67-72. (in Chinese)) DOI: 10. 16239/j. cnki. 0468-155x. 2011. 04. 006.
- [18] 史红玲, 胡春宏, 王延贵, 等. 淮河流域水沙变化趋势及其成因分析[J]. 水利学报, 2012, 43(5): 571-579. (SHI H L, HU C H, WANG Y G, et al. Variation trend and cause of runoff and sediment load variations in Huaihe River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 (5): 571-579. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2012. 05. 007.
- [19] 何睿, 庞博, 张兰影. 基于水文变异诊断系统的黑河流域上中游径流序列变异[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1937-1942. (HE R, PANG B, ZAHNG L Y. Hydrological alteration diagnosis of runoff series in the upper and middle reaches of Heihe River basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(7): 1937-1942. (in Chinese)) DOI: 10. 13292/j. 1000-4890. 20150612. 012.
- [20] 刘剑宇, 张强, 顾西辉. 水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5477-5485. (LIU J Y, ZHANG Q, GU X H. Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake basin[J]. ACTA ECOLOGICA SINICA, 2015, 35(16): 5477-5485. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201404080664.
- [21] 韩知明, 贾克力, 杨芳, 等. 基于 Morlet 小波的呼伦湖流域降水多时间尺度分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 160-166. (HAN Z M, JIA K L, YANG F, et al. Analysis on multi time scale yearly precipitation of Hulun Lake watershed based on wavelet Morlet analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 160-166. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2018. 01. 026.
- [22] 邢贞相, 闫丹丹, 刘美鑫, 等. 三江平原近 60 年降水量时空变异特征分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 337-343. (XING Z X, YAN D D, LIU M X, et al. Spatio-temporal variability analysis of annual precipitation in Sanjiang plain in recent sixty years[J]. Journal of agricultural machinery, 2015, 46(11): 337-343. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 11. 046.

(下转第 69 页)

- 洪水演进模拟[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 51-57. (WU T J YANG H B, LI Z, et al. Simulation of flood evolution in the Three Gorges reservoir area based on MIKE11[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 51-57. (in Chinese))
- [16] 金玲, 许士国, 于德全. 中小河流洪水风险分析中的洪水演进计算研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(10): 48-51. (JIN L, XU S G, YU D Q. Research on flood evolution calculation in flood risk analysis of medium and small rivers[J]. Hydroelectric Energy Science, 2014, 32(10): 48-51. (in Chinese))
- [17] 初 祁, 彭定志, 徐宗学, 等. 基于 Mike11 和 Mike21 的城市暴雨洪涝灾害风险分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 446-451. (CHU W, PENG D Z, XU Z X, et al. Risk analysis of urban storm and flood disaster based on Mike11 and Mike21 [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2014, 50(5): 446-451. (in Chinese))
- [18] 施 露, 董增川, 付晓花, 等. Mike Flood 在中小河流洪涝风险分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 351-357. (SHI L, DONG Z C, FU Xi H, et al. Application of Mike Flood in risk analysis of floods in medium and small rivers[J]. Journal of Hohai University, 2017, 45(4): 351-357. (in Chinese)) DOI 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2017. 04. 011.
- [19] 叶爱民, 刘曙光, 韩 超, 等. Mike Flood 耦合模型在杭嘉湖流域嘉兴地区洪水风险图编制工作中的应用[J]. 研究探讨, 2016, 26(2): 56-60. (YE A M, LIU S G, HAN C, et al. Application of Mike Flood coupling model in the compilation of flood risk map in Jiaying area of Hangzhou-Jiaying-Huzhou basin [J]. Research, 2016, 26(2): 56-60. (in Chinese)) DOI: 10. 16867/j. cnki. cfdm. 2016. 02. 014.
- [20] 何典灿, 周建中, 江炎生, 等. 基于 MIKE 的杜家台洪道行洪能力研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(9): 52-56. (HE D C, ZHOU J Z, JIANG Y S, et al. Research on flooding capacity of Dujiatai flood road based on MIKE[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(9): 52-56. (in Chinese)) DOI: 10. 11988/ckyyb. 20160514.
- [21] 郭凤清, 屈寒飞, 曾 辉. 基于 Mike21 的滙江蓄滞洪区洪水危险性快速预测[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(3): 144-152. (GUO F Q, QU H F, ZENG H. Rapid prediction of flood risk in the Lujiang River flood detention area based on Mike21[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(3): 144-152. (in Chinese)) DOI: 10. 13577/j. jnd. 2013. 0320.
- [22] 衣秀勇. DHI Mike Flood 洪水模拟技术应用与研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (YI X Y. Application and research of DHI Mike Flood flood simulation technology [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2014. (in Chinese))
- [23] 张念. 桥墩壅水的数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2008. (ZHANG N. Numerical simulation of bridge pier drowning [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese))

.....

(上接第 53 页)

- [23] 曾晟轩, 顾娟, 贺缠生. 西北农牧交错带中部气候变化特征及其持续性[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 356-364. (ZHENG S X, GU J, HE C S. Variability and persistence of climate in the agricultural pastoral transitional zone in the central part of the northwest China[J]. Research of soil and water conservation, 2018, 25(4): 356-364. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2018. 04. 052.
- [24] 王怀清, 殷剑敏, 孔萍, 等. 鄱阳湖流域千年旱涝变化特点及 R/S 分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1215-1220. (WANG H Q, YIN J M, KONG P, et al. Variation of drought and flood over the last millennium in poyang lake basin by R/S analysis[J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2015, 24(7): 1215-1220. (in Chinese)) DOI: 10. 11870/cj-lyzyyhj201507019.
- [25] 邱海军, 曹明明, 胡胜, 等. 近 60a 来中国洪涝灾情变化趋势持续性和周期性研究[J]. 地球与环境, 2014, 42(1): 17-23. (QIU H J, CAO M M, HU S, et al. Susceptibility and periodicity of flood disasters since the 1950s in China[J]. EARTH AND ENVIRONMENT, 2014, 42(1): 17-23. (in Chinese)) DOI: 10. 14050/j. cnki. 1672-9250. 2014. 01. 015.
- [26] INESON S, SCAIFE A A, KNIGHT J R, et al. Solar forcing of winter climate variability in the northern Hemisphere[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(11): 753-757. DOI: 10. 1038/ngeo1282.