

近57年江苏沿海降水量演变特征分析

张宇, 钟平安, 万新宇, 曹明霖, 马彪

(河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 基于江苏沿海1957年—2013年逐月降水量序列资料, 采用Mann-Kendall法、滑动t检验、Morlet小波法分析了江苏沿海代表时段降水量变化趋势、突变点和周期特征。结果表明, 近57年江苏沿海年、汛期、枯季降水量均呈不显著减少趋势, 区域上则呈现北部减少、南部增加趋势; 年、汛期、枯季降水量均未发生显著突变; 各代表时段降水量变化具有13年左右的主周期, 区域上震荡周期一致性较好; 未来几年, 年、汛期、枯季降水将有所增加。

关键词: 降水量; 演变特征; 江苏沿海; Mann-Kendall检验; 滑动t检验; Morlet小波

中图分类号: TV125 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0198-04

Evolution characteristics of precipitation along the coastal area of Jiangsu Province in recent 57 years

ZHANG Yu, ZHONG Ping-an, WAN Xin-yu, CAO Ming-lin, MA Biao

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Study of the evolution rule of precipitation along the coastal area of Jiangsu Province is of great significance for the development and construction of its coastal area as well as the allocation and management of water resources. Based on the monthly precipitation data (1957-2013) along the coastal area of Jiangsu Province, the variation trend, mutation points, and periodicity of precipitation in the representative periods were analyzed using the Mann-Kendall test, sliding t test, and Morlet wavelet analysis method. The results showed that the annual precipitation and precipitation in the flood and dry seasons decrease significantly in recent 57 years; precipitation decreases in the north while increases in the south; precipitation has no abrupt change in the representative periods; precipitation variation has a primary periodicity of 13 years, and the regional variation periodicity is consistent; and precipitation in the representative periods will increase in the future.

Key words: precipitation; evolution characteristics; coastal area of Jiangsu Province; Mann-Kendall test; sliding t test; Morlet wavelet analysis

降水量演变特征研究对于水资源配置和社会可持续发展具有重要意义。很多学者采用不同方法对我国各大流域、主要地区的降水量演变特征进行了多角度研究, 取得了诸多研究成果。王兆礼等^[1]利用GIS空间化技术分析了珠江流域降水量演变特征。杨明明等^[2]研究了淮河流域主汛期降水。曾小凡等^[3]对长江流域8个敏感区域年降水量演变规律进行了研究。李想等^[4]分析了松花江流域和辽河流域降水演变规律。张皓和冯立平^[5]则通过分析华北地区降水资料, 研究其时空变化特征。姚慧明等^[6]更是诊断了全中国降水量演变趋势, 提出近期降水量新事实。

目前研究水文序列趋势分析常用的方法^[7]有: 线性倾向估计、滑动平均、二次平滑、三次样条函数及Mann-Kendall法等。常见的突变检验方法有低通滤波法、滑动t检验法、

Cramer法、Yamamoto法、Mann-Kendall法, 不同的方法检验结果略有差异, 其中Mann-Kendall法既可以用于趋势检验又可以用于突变检验^[8-10], 因为其检测能力强, 在各种研究领域广泛应用。而对于水文时间序列的周期分析的好坏将直接影响到未来水文特征的预测精度, 常用的方法有最大熵谱分析、逐步回归周期分析、小波分析等。小波分析法具有良好的局部化性质、时频多分辨功能^[11], 小波分析的关键在于绘制小波变换系数图和小波方差图, 通过这两种图形的变化识别多时间尺度特征^[12]。

江苏沿海地区^[13]包括连云港、盐城、南通三个地级市及其所辖17个县(市), 拥有丰富的土地、岸线、海洋资源, 是长江三角洲的重要组成部分, 也是我国实行“沿海开发”战略的主战场。本文以江苏沿海1957年—2013年逐月降水量资料

收稿日期: 2014-08-20 修回日期: 2015-02-05 网络出版时间: 2014-03-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150319.0938.013.html>

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题(2012BAB03B03); 国家自然科学基金项目(51179044)

作者简介: 张宇(1990), 男, 江苏南通人, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: zhangyu74@163.com

通讯作者: 钟平安(1962), 男, 安徽无为, 教授, 博士, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: pazhong@hhu.edu.cn

为基础,采用 Mann-Kendall 法、滑动 t 检验、Morlet 小波分析法对江苏沿海降水量演变特征进行研究,为江苏沿海水利规划、水资源配置和管理提供决策依据。

1 研究资料与方法

1.1 研究资料

江苏沿海地区总面积 3.25 万 km^2 , 区域地理坐标为东经 $119^{\circ}21' - 121^{\circ}55'$, 北纬 $31^{\circ}33' - 35^{\circ}07'$, 东西窄、南北长, 沿海岸线呈带状分布, 地处北亚热带暖温带过渡地段。区内降水充沛, 年内分配不均。本文选取空间分布均匀的赣榆站、射阳站、东台站、南通站、吕泗站 1957 年-2013 年逐月降水量资料, 采用算术平均法计算了研究区逐月降水量。研究区位置及所选气象站分布见图 1。

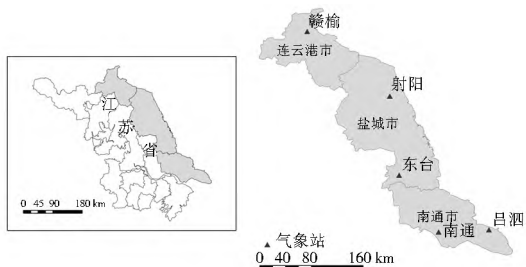


图 1 江苏沿海位置及所选气象站分布

Fig. 1 Location of coastal area in Jiangsu Province and distribution of selected meteorological stations

1.2 研究方法

1.2.1 Mann-Kendall 检验

应用 Mann-Kendall 方法(下文简称 M-K 法)检验时间序列的变化趋势时,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:

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

若 $Z < 0$, 则认为有下降趋势; 若 $Z > 0$, 则认为有上升趋势。在显著性水平 α 下, 若 $|Z| \geq Z_{\alpha/2}$ 认为上升或下降趋势显著; 若 $|Z| < Z_{\alpha/2}$ 则认为趋势性不显著。

应用 M-K 法用于检验序列突变时, 需要构造一个序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \quad (4)$$

式中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i < x_j \end{cases} \quad (1 \leq j \leq i) \quad (5)$$

在时间序列随机独立的假定下, 序列 s_k 的均值和方差可由式(6)、式(7)计算如下:

$$E(s_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (6)$$

$$\text{Var}(s_k) = \frac{1}{72}k(k-1)(2k+5) \quad (7)$$

构造统计量 UF_k :

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

将时间序列按降序排列, 采用式(8)计算得到 UF_k , 再按下式计算 UB_k :

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n+1-k' \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

在同一坐标内绘制 UF_k 和 UB_k 曲线, 若两曲线有交点, 且交点位于给定显著性水平临界值内, 则该交点即为突变点。

1.2.2 滑动 t 检验

对于样本量为 n 的时间序列 x , 设置某一时刻为基准点, 基准点将时间序列 x 分为前后两段子序列 x_1 和 x_2 , 样本个数分别为 n_1 和 n_2 , 平均值为 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 , 方差为 s_1^2 和 s_2^2 。构造统计量^[14]:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (10)$$

其中

$$s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (11)$$

式(10)服从自由度为 $v = n_1 + n_2 - 2$ 的 t 分布。

1.2.3 Morlet 小波分析

将离散的时间序列^[15]表示成 $f(k\Delta t) \in L^2(\mathbb{R})$, 给出基小波函数 $\psi(t)$, 则序列的小波变换系数为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \overline{\psi\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right)} \quad (12)$$

将关于尺度因子 a 的小波变换系数的平方对时间因子 b 积分, 可求得小波方差:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (13)$$

绘制小波方差图, 峰值对应的时间尺度即为周期。

2 江苏沿海降水量演变特征分析

2.1 降水量变化趋势

江苏沿海 1957 年-2013 年平均年降水量为 1 022.7 mm, 汛期(5 月-9 月)、枯季(10 月至次年 4 月)分别为 709.5 mm、313.2 mm, 占全年的 69%、31%。图 2 是江苏沿海的年、汛期、枯季降水量过程线, 3 个时段降水量年际变化较大, 波动明显。历年最大年降水量为 1 485.2 mm(1991 年), 最小年降水量为 529.6 mm(1978 年), 极值比为 2.8; 汛期、枯季极值比分别为 3.2、2.7。

选择年、汛期、枯季 3 个时段, 采用 M-K 法检验降水量序列变化趋势, 结果见表 1。

线性回归分析表明(图 2), 江苏沿海 3 个代表时段降水量均呈不显著的减少趋势, 其中年降水量以 6.2 mm/(10a) 的速度减少, 汛期降水量以 4.9 mm/(10a) 的速度减少, 而枯季降水量以 1.3 mm/(10a) 的速度减少, 反映了江苏沿海降水量变化趋势存在时段性差异。

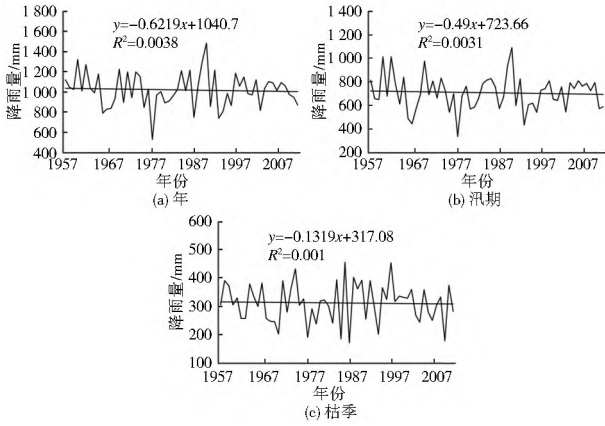


图 2 江苏沿海地区代表时段降水量过程线

Fig. 2 Precipitation in the representative periods from 1957 to 2013 in the coastal area of Jiangsu Province

表 1 江苏沿海地区代表时段降水量趋势分析结果

Tab. 1 Trend of precipitation in the representative periods from 1957 to 2013 in the coastal area of Jiangsu Province

代表时段	统计量 Z	趋势性	显著性
年	-0.5163	减少	不显著
汛期	-0.2134	减少	不显著
枯季	-0.3098	减少	不显著

为了分析降水量变化趋势的区域性差异,选择 5 个气象站代表时段的降水量序列,利用公式(2)计算出各自对应的统计量 Z 值(表 2)。

表 2 江苏沿海地区不同气象站代表时段年降水量 M-K 统计量 Z 值

Tab. 2 M-K statistic Z values of the selected meteorological stations in the representative periods from 1957 to 2013 in the coastal area of Jiangsu Province

站点名称	年	汛期	枯季
赣榆	-0.2822	-0.0069	-1.0119
射阳	-1.1152	-1.1909	-0.6815
东台	-1.0257	-0.7916	-0.6677
南通	0.8329	1.1358	0.3924
吕泗	0.1033	0.1859	0.4956

由表 2 可知,江苏沿海北部的赣榆、射阳、东台站在 3 个代表时段降水量均呈减少趋势,而南部的南通、吕泗站均有增加的趋势。显著性水平 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.10$ 对应的临界值分别为 1.96 和 1.64,5 站各时段的发展趋势均未通过 $\alpha=0.05$ 或 $\alpha=0.10$ 的显著性水平检验,说明变化趋势并不显著。

2.2 降水量突变特征

对江苏沿海年、汛期、枯季降水量序列分别进行 M-K 检验(图 3)和滑动 t 检验(图 4)。3 个代表时段具有相似的特征,M-K 检验时 UF_k 、 UB_k 曲线在序列起初 2~3 年均有点,但考虑到统计方法对样本数量的要求,序列起初的交点不确定性太大,不纳入可靠的突变点,序列中后期虽然存在交点,但是 UF_k 曲线并没有大幅波动,整体没有显著的变化趋势,因此,认为 3 个代表时段均未发生突变。滑动 t 检验($n_1=n_2=10$)的结果与 M-K 法吻合,各代表时段 t 统计量均未通过显著性水平检验。因此可以确定江苏沿海 1957 年-

2013 年代表时段降水量未发生显著突变。

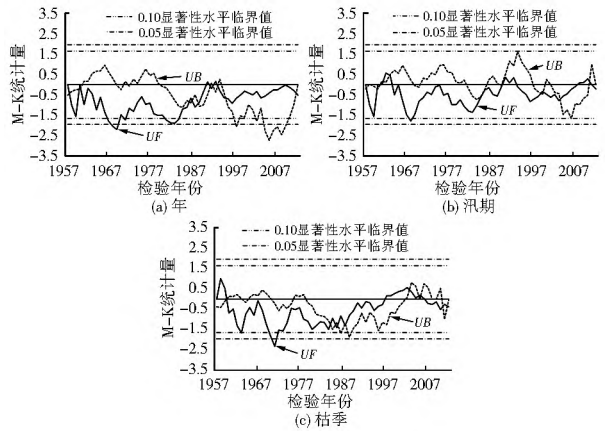


图 3 江苏沿海地区代表时段降水量 M-K 统计量曲线

Fig. 3 M-K statistic values of precipitation in the representative periods from 1957 to 2013 in the coastal area of Jiangsu Province

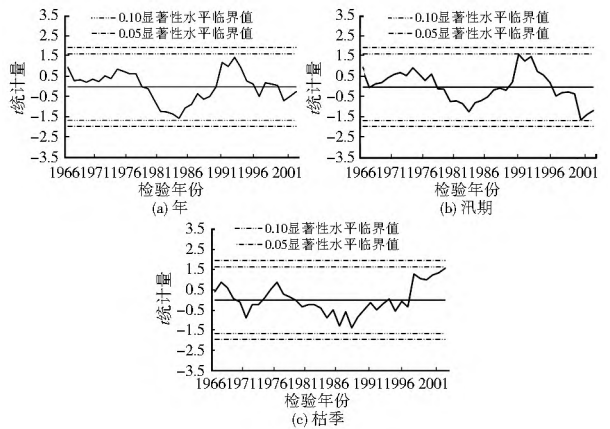


图 4 江苏沿海地区代表时段降水量 t 统计量曲线

Fig. 4 t statistic values of precipitation in the representative periods from 1957 to 2013 in the coastal area of Jiangsu Province

2.3 降水量周期性特征

采用 Morlet 小波分析江苏沿海代表时段降水量序列,得到小波变换系数等值线(图 5)。由图 5(a)可见,在 10~16 a 尺度上,年降水量变化表现为偏枯期和偏丰期交替出现,是影响未来江苏沿海年降水量的主要时间尺度,现在(2014 年)江苏沿海正处于年降水量偏枯期的末尾,未来将进入一个新的偏丰期,年降水量将有所增加。在准 8 a、准 4 a 尺度上,表现为嵌套在大尺度下的结构。对小波变换系数的平方进行积分,可得到小波方差(图 6),通过峰值对应的时间尺度可知,江苏沿海年降水量在 13 a、8 a、4 a 有 3 个显著振荡周期,其中 13 年处信号震荡最强(图 6(a))。汛期、枯季降水量的周期变化与年降水量变化相似(图 5(b)、图 5(c)),汛期变化周期由强到弱依次为 12 a、8 a、4 a(图 6(b)),而枯季变化周期为 13 年、3 年(图 6(c))。

对江苏沿海 5 站代表时段降水量震荡周期进行统计,表 3 是周期特征值汇总,结果表明各站周期与江苏沿海整体一致性较好。各站年降水量、汛期降水量、枯季降水量第一主周期均为 13 a 左右,只有赣榆站与其他站不同,年、汛期 8 a 时间尺度的信号强于 13 a 尺度信号。

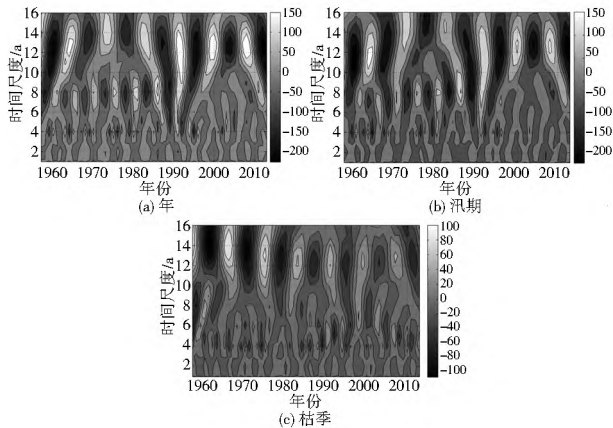


图5 江苏沿海地区代表时段年降水量小波变换系数等值线
Fig. 5 Contours of precipitation wavelet transform coefficient in the representative periods from 1957 to 2013 in the coastal area of Jiangsu Province

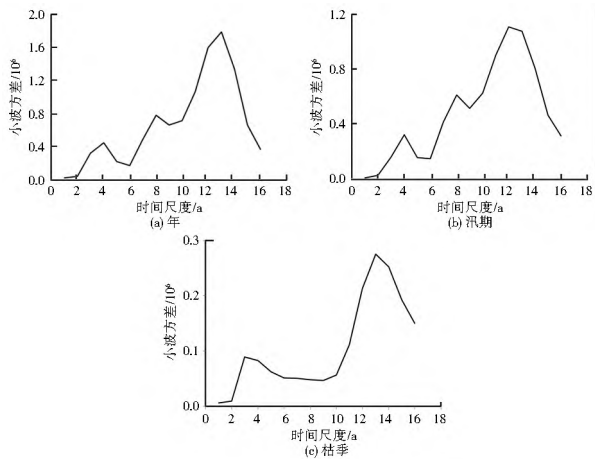


图6 江苏沿海地区代表时段年降水量小波方差

Fig. 6 Wavelet variance of precipitation in the representative periods from 1957 to 2013 in the coastal area of Jiangsu Province

表3 江苏沿海及沿海不同气象站代表时段降水量周期特征值
Tab. 3 Precipitation periodicity values in the representative periods from 1957 to 2013 in the coastal area of Jiangsu Province

时段	名称	江苏沿海	赣榆	射阳	东台	南通	吕泗
年	第1主周期	13	8	13	13	13	12
	第2主周期	8	13	9	8	3	8
	第3主周期	4	4	5	4		3
汛期	第1主周期	13	8	13	13	12	12
	第2主周期	8	13	4	8	3	8
	第3主周期	4	4		4		3
枯季	第1主周期	13	14	14	13	13	13
	第2主周期	3	4	4	4	3	6
	第3主周期						3

3 结论

(1) 近57年江苏沿海地区的年、汛期、枯季降水量年际变化较大,极值比分别为2.8、3.2、2.7,呈不显著的减少趋势;区域上呈现北部地区降水量减少、南部地增加的趋势,但均不显著,同时汛期、枯季降水量变化不显著,对未来江苏沿

海防汛抗旱工作影响不大。

(2) 近57年江苏沿海地区的年、汛期、枯季降水量未发生显著突变。

(3) 江苏沿海地区年降水量震荡周期由强到弱依次为13 a、8 a、4 a,汛期为12 a、8 a、4 a,而枯季周期为13 a、3 a。在降水量呈不显著减少的背景下,未来几年江苏沿海将进入一个新的降水偏丰期,降水量将有所增加。

参考文献(References):

[1] 王兆礼,陈晓宏,张灵,等.近40年来珠江流域降水量的时空演变特征[J].水文,2006(6):71-75. (WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong, ZHANG Ling. Spatiotemporal change characteristics of mean precipitation in the Pearl River Basin during 1961-2000[J]. Journal of China Hydrology, 2006(6): 71-75. (in Chinese))

[2] 杨明明,钟平安,魏蓬.淮河流域主汛期降水演变规律研究[J].水电能源科学,2012(7):37-40. (YANG Mingming, ZHONG Ping'an, WEI Peng. Study on precipitation evolution rule of Huaihe River Basin in main flood period[J]. Water Resources and Power, 2012(7): 37-40. (in Chinese))

[3] 曾小凡,翟建青,姜彤,等.长江流域年降水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(6):727-732. (ZENG Xiaofan, ZHAI Jianqing, JIANG Tong, et al. Spatial characteristics and evolutionary trends of annual precipitation in the Yangtze River basin[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008(6): 727-732. (in Chinese))

[4] 李想,李维京,赵振国.我国松花江流域和辽河流域降水的长期变化规律和未来趋势分析[J].应用气象学报,2005(5):593-599. (LIXiang, LI Weijing, ZHAO Zhen guo. Trend of precipitation in the valleys of Songhuajiang and Liaohe Rivers[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005(5): 593-599. (in Chinese))

[5] 张皓,冯利平.近50年华北地区降水量时空变化特征研究[J].自然资源学报,2010(2):270-279. (ZHANG Hao, FENG Liping. Characteristics of spatiotemporal variation of precipitation in North China in recent 50 years[J]. Journal of Natural Resources, 2010(2): 270-279. (in Chinese))

[6] 姚惠明,吴永祥,关铁生.中国降水演变趋势诊断及新事实[J].水科学进展,2013(1):1-10. (YAO Huiming, WU Yongxiang, GUAN Tiesheng. Diagnose of precipitation evolution trend in China and new facts[J]. Advances in Water Science, 2013(1): 1-10. (in Chinese))

[7] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:43-45. (WEI Fengying. Statistics, Diagnosis and Prediction Technology for Modern Climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 43-45. (in Chinese))

[8] 余予,孟晓艳,张欣.1980-2011年北京城区能见度变化趋势及突变分析[J].环境科学研究,2013(2):129-136. (YU Yu, MENG Xiaoyan, ZHANG Xin. Trends and Abrupton Analysis on the Visibility in the Urban Area of Beijing City during 1980-2011[J]. Research of Environmental Sciences, 2013(2): 129-136. (in Chinese))

(下转第205页)

- 202-209. (SUN Cheng-fu, ZHANG Ya-hong, CHEN Jiarr hong, et al. Improved differential evolution based on Gaussian disturbance and immune search strategy[J]. Journal of Nanjing University: Nat Sci Ed: 2013, 49(2): 202-209. (in Chinese))
- [4] Kaelo P, Ali M M. A numerical study of some modified differential evolution algorithms[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(3): 1176-1184.
- [5] Liu Junhong, Lampinen J. A Fuzzy Adaptive Differential Evolution Algorithm[J]. Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 2005, 9(6): 48-462.
- [6] Ter Braak C J F, Vrugt J A. Differential Evolution Markov Chain with snooker updater and fewer chains[J]. Statistics and Computing. 2008, 18(4): 435-446.
- [7] Vrugt J A, C J F ter Braak, C G H Diks, et al. Accelerating Markov chain Monte Carlo simulation by differential evolution with self adaptive randomized subspace sampling[J]. Int. J. Nonlinear Sci. Numer. Simul. .
- [8] 曹飞凤. 基于MCMC方法的概念性流域水文模型参数优选及不确定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. (CAO Feifeng. Study on parameter optimization and uncertainty analysis for conceptual hydrological model based on MCMC method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese))
- [9] Vrugt J A, C J F ter Braak, H V Gupta, et al. Equifinality of formal(DREAM) and informal(GLUE) Bayesian approaches in hydrologic modeling[J]. Stochastic Environ. Res. Risk Assess. , 2008.
- [10] Evans J P, Jakeman A J. Development of a simple, Catchment scale, rainfall-evapotranspiration-runoff model[J]. Environmental Modelling & Software. 1998, 13: 385-393.
- [11] Wagener T, Lees M J. Rainfall Runoff Modelling Toolbox user manual[J]. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, UK. 2001.
- [12] Gelman A, Rubin D B. Inference from iterative simulation using multiple sequences[J]. Statistic Science, 1992(7): 457-472.
- [13] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow and forecasting through conceptual models 1: A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970(10): 282-290.

(上接第201页)

- [9] 张峰, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 珠江上游流域枯水期降水演变特征分析[J]. 水电能源科学, 2012(2): 9-12. (ZHANG Feng, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Analysis of Precipitation Variation of Low Water Season in Upstream of Pearl River Basin[J]. Water Resources and Power, 2012(2): 9-12. (in Chinese))
- [10] 李志, 刘文兆, 郑粉莉. 1965年至2005年泾河流域极端降水事件的变化趋势分析[J]. 资源科学, 2010(8): 1527-1532. (LI Zhi, LIU Wenzhao, ZHENG Fenli. Analyzing Variation Trends in Extreme Precipitation Events in the Jing River Watershed during 1965-2005[J]. Resources Science, 2010(8): 1527-1532. (in Chinese))
- [11] 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): 23-27. (QIU Haijun, CAO Mingming, ZENG Bin. Wavelet Analysis on the Temporal Series of Precipitation in Xi'an[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011(32): 23-27. (in Chinese))
- [12] 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(6): 1001-1011. (LI Miao, XIA Jun, CHEN Sheming, et al. Journal of Natural Resources, 2011(6): 1001-1011. (in Chinese))
- [13] 杨树滩, 张文新, 贾锁宝. 略论江苏沿海地区水资源配置[J]. 江苏水利, 2011(5): 8-11. (YANG Shutan, ZHANG Weixin, JIA Suobao. Study on Jiangsu Coastal Water Resources Allocation[J]. Jiangsu Water Resource, 2011(5): 8-11 (in Chinese))
- [14] 郭彦, 侯素珍, 林秀芝. 近51年西柳沟流域水沙变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014(10): 176-183. (GUO Yan, HOU Suzhen, LIN Xiuzhi. Variation Characteristics of Runoff and Sediment in Xiliugou River basin for Recent 51 Years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014(10): 176-183. (in Chinese))
- [15] 余世鹏, 杨劲松, 王相平, 等. 滨海滩涂地区降水变化的多尺度周期特征分析与趋势预测[J]. 中国农业气象, 2013(4): 377-383. (YU Shipeng, YANG Jingsong, WANG Xiangping, et al. Multiscale Periodic Analysis and Trend Prediction for Precipitation Dynamics in Coastal Tidal Flat Region[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013(4): 377-383. (in Chinese))