

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.04.004

汉江流域实际蒸散发的时空演变规律及成因分析

朱非林^{1,2}, 王卫光^{1,2}, 孙一萌², 郑强^{1,3}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 根据汉江流域14个气象站点1961—2011年的逐日气象资料, 分别利用参数率定后的AA模型和GG模型计算汉江流域的实际蒸散发。在此基础上, 采用Mann-Kendall检验法、Sen's坡度检测法和Pettitt突变检测法对过去51 a汉江流域实际蒸散发的时空演变规律及主要气象因子的变化趋势进行分析, 并探讨实际蒸散发变化的成因。结果表明, 参数率定后的AA模型和GG模型对汉江流域实际蒸散发的模拟结果基本一致; 汉江流域1961—2011年平均实际蒸散发总体上呈现自东南向西北逐次减少的空间分布特征; 整个流域的多年平均实际蒸散发呈现显著下降趋势, 并于1979年发生显著性突变; 显著下降的风速和日照时数是导致汉江流域年实际蒸散发显著下降的主要原因。

关键词: 实际蒸散发; 蒸散发时空演变规律; Mann-Kendall检验; Sen's坡度检测法; Pettitt突变检测法; 汉江流域

中图分类号: P339 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2013)04-0300-07

Spatial and temporal variations of actual evapotranspiration and their causes in Hanjiang River Basin

ZHU Feilin^{1,2}, WANG Weiguang^{1,2}, SUN Yimeng², ZHENG Qiang^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on daily meteorological data from 14 stations in the Hanjiang River Basin from 1961 to 2011, the AA model and the GG model with calibrated parameters were used to calculate the actual evapotranspiration in the Hanjiang River Basin. On this basis, the Mann-Kendall statistical test, Sen's slope test, and Pettitt test were selected to detect the spatial and temporal variations of actual evapotranspiration and the trend of major meteorological factors over the last 51 years, and the causes of these variations were also explored. The results show that the actual evapotranspiration calculated by the AA model and the GG model with calibrated parameters was basically the same. The annual average actual evapotranspiration showed a decreasing trend from the southeast to the northwest in the Hanjiang River Basin from 1961 to 2011. In addition, the annual average actual evapotranspiration presented a significant downward trend from 1961 to 2011, with a significant mutation occurring in 1979. A significant decrease of wind speed and sunshine duration was largely responsible for the significant decrease of actual evapotranspiration in the Hanjiang River Basin.

Key words: actual evapotranspiration; spatial and temporal variations of evapotranspiration; Mann-Kendall test; Sen's slope test method; Pettitt sudden change test method; Hanjiang River Basin

收稿日期: 2013-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(51009046); 国家“十二五”科技支撑计划(2013BAC10B01)

作者简介: 朱非林(1992—), 男, 江苏如东人, 本科生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zhufeilin163@163.com

蒸散发在地球大气系统的能量收支和水平衡变化中扮演着关键角色。作为能量平衡和水量平衡唯一的共同项,蒸散发是衡量水文循环和气候变化的重要指标。因此,确定蒸散发的长期变化趋势已成为研究区域尺度气候变化的水文响应所关注的焦点^[1-2]。表述蒸散发的变量主要包括水面蒸发、参考蒸散发和实际蒸散发。水面蒸发是指从蒸发皿观察到的蒸发量,参考蒸散发表征充分供水下垫面条件下假想作物蒸散到空气中的水量,而实际蒸散发则是直接参与水文循环的变量。

近几年来,关于中国各大流域参考蒸散发和水面蒸发时空变化规律的研究已经得到了广泛开展。蔡辉艺等^[3]结合敏感系数法,利用 26 个气象站点的资料分析了淮河流域 1960—2008 年参考蒸散发的时空变化趋势;Wang 等^[4]分析了海河流域 1957—2008 年参考蒸散发的变化规律及其影响因素;刘宏伟等^[5]基于 Penman-Monteith 公式,评价了 Hargreaves 方法在太湖流域对参考蒸散发的模拟精度;Xu 等^[6]对长江流域 1960—2000 年蒸发皿蒸发和参考蒸散发的时空变化特征进行研究,发现显著下降的太阳辐射和风速是造成长江流域参考蒸散发呈显著下降趋势的主要原因;雷慧闽等^[7]采用生态水文模型分析了黄河下游大型引黄灌区 1984—2006 年蒸散发的变化规律;杜军等^[8]分析了藏北高原蒸发皿蒸发的变化特征,研究表明日照时数和平均气温日较差的显著减小和相对湿度的明显增加造成了蒸发皿蒸发呈现显著的减少趋势。

事实上,相对于参考蒸散发和水面蒸发而言,实际蒸散发是水平衡过程中的直接参与变量,因而更加受到关注。但由于受到气候条件和地表状况等众多因素的共同作用,实际蒸散发被认为是水文循环中最为复杂的环节,很难直接测出,因此通常由间接估算的方法得到。传统的实际蒸散发估算方法(比如:波温比和涡度相关法、SPAC 水分传输综合模拟法、定量遥感估算法等)由于所需的资料难以获取和估算精度有限等,在实际应用中受到了较大限制。Bouchet^[9]于 1963 年提出了蒸散发互补相关原理,为实际蒸散发的估算开辟了一条新途径。基于互补相关原理的概念,3 种实际蒸散发计算模型(AA 模型、GG 模型、CRAE 模型)被相继提出。这 3 种模型仅需要常规的气象数据,因此近年来被许多学者用于估算实际蒸散发^[10-11]。然而,互补相关原理的成立需要一定的假设条件,加上蒸散发的各种影响因子随气候条件的不同会发生改变,因此 3 种模型的估算能力和适用性在不同的气候类型区存在较大差别。Xu 等^[12]和刘绍民等^[13]的研究均表明,基于 3 种模型原始参数的模拟效果较差,往往需要通过参数率定来提高估算精度,并且各模型的最优参数值在不同的气候类型区不一致。Gao 等^[14]利用参数率定后的 AA 模型和 GG 模型估算了海河流域的实际蒸散发,并基于 Thornthwaite 水量平衡法的计算结果对 2 种模型进行评价,发现 AA 模型在海河流域的估算效果相对更优。此外,刘波等^[15]和刘健等^[16]分别采用 AA 模型和 GG 模型估算长江流域和鄱阳湖流域的实际蒸散发,均取得了较好的模拟效果。

汉江是长江流域最长的支流,沿江分布有较大规模的工农业,同时也是我国重要的农业产区和商品粮基地。然而,汉江干流历史上洪水灾害严重,是容易发生洪涝灾害的地区之一。研究汉江流域实际蒸散发的时空演变规律有助于进一步理解气候变化对水量平衡的影响,为流域的水资源配置和开发利用提供理论依据。目前,关于汉江流域实际蒸散发方面的深入研究还未见报道。基于此,笔者分别利用参数率定后的 AA 模型和 GG 模型,根据汉江流域内 14 个气象站点 1961—2011 年的逐日气象资料进行实际蒸散发的模拟,基于水量平衡法的计算结果优选出 GG 模型,分析了过去 51a 间实际蒸散发的时空演变规律和主要气象因子的变化趋势,并探讨实际蒸散发演变的成因。

1 研究区域和资料

汉江流域发源于陕西省汉中市蟠冢山,沿途流经鄂、陕、豫、川、渝、甘 6 省市,位于东经 106°12′~114°14′、北纬 30°08′~34°11′,干流全长 1577 km,流域面积 15.9 万 km²。汉江流域属于亚热带季风区,气候比较温和,年平均气温在 15~17℃ 之间,水量较充沛。

研究资料包括向家坪水文站的径流量资料和汉江流域内 14 个气象站点的逐日常规气象资料。水文资料摘自《中华人民共和国水文年鉴》,时间序列为 1961 年 1 月至 1986 年 12 月;气象资料由中国气象局气象信息中心气象资料室提供,时间序列为 1961 年 1 月至

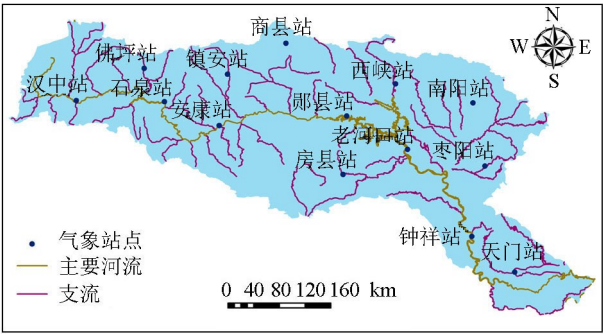


图 1 汉江流域及气象站点分布示意图
Fig. 1 Sketch map of location of Hanjiang River Basin and distribution of meteorological stations

2011 年 12 月。资料包括日降水量、日最高气温、日最低气温、日平均气温、气压、相对湿度、日照时数。

2 研究方法

2.1 实际蒸散发模型

2.1.1 AA 模型

Brutsaert 等^[17] 根据 Bouchet^[9] 的互补相关原理,提出了 AA 模型。AA 模型中的参考蒸散发 E_p 与湿润环境蒸散发 E_w 分别利用 Penman 公式和 Priestly-Taylor 公式计算。实际蒸散发 E_a 的计算公式为

$$E_a = 2\alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - M) - \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - M) + \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} e_a \right]$$
 (1)

式中: α ——经验系数,其推荐取值为 1.26; Δ ——饱和水汽压曲线斜率, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$; γ ——干湿表常数, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$; R_n ——地表净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; M ——土壤热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; e_a ——空气干燥力, mm/d 。

2.1.2 GG 模型

Granger 等^[18] 引进相对蒸散发的概念,利用道尔顿蒸散定律推导出实际蒸散发和参考蒸散发的定量互补关系:

$$E_a = \frac{\Delta G}{\Delta G + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma G}{\Delta G + \gamma} e_a$$
 (2)

式中 G 为相对蒸散发参数, $G = E_a/E_p$ 。

定义相对干燥力 $D = E_a/(E_a + R_n)$, G 与 D 之间存在以下关系:

$$G = \frac{1}{a + b \exp(4.902D)} + 0.006D$$
 (3)

式中 a 和 b 为经验系数,推荐取值分别为 0.793 和 0.20。

2.2 Mann-Kendall 检验和 Sen's 坡度检测法

Mann-Kendall 检验^[19-20] 和 Sen's 坡度检测法^[21] 是基于秩和变化斜率的检验方法,其优点在于不需要预先假定样本的分布,不受异常值的干扰,能很好地处理非正态分布的数据。因此,这 2 种方法被广泛地用于水文、气象数据序列的变化趋势研究^[22-23]。同时, Mann-Kendall 检验也是世界气象组织积极推荐的非参数检验方法。

2.3 Pettitt 突变检测法

Pettitt 于 1979 年提出的 Pettitt 突变检测法^[24] 是一种非参数检验方法,其物理意义清晰,可以明确突变时间,已经被广泛地应用于水文、气象序列的突变研究^[25]。该检验选用 Mann-Whitney 的统计函数 $U_{i,T}$, 认为样本 $x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_T$ 独立同分布 (T 为样本容量), 对于连续序列, $U_{i,T}$ 和 $V_{i,T}$ 的计算公式为

$$U_{i,T} = U_{i-1,T} + V_{i,T} \quad V_{i,T} = \sum_{j=1}^T \text{sgn}(x_i - x_j)$$
 (4)

最显著的突变点为 $K_T = \max |U_{i,T}|$, 突变点显著水平 p 的计算公式为

$$p = 1 - \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right)$$
 (5)

3 结果和讨论

3.1 模型参数率定和实际蒸散发模拟

为了得到 AA 模型和 GG 模型在汉江流域的最优参数值,选取汉江流域的子流域——洵河流域(面积为 6448 km^2) 作为参数率定区域。

由洵河流域内气象站点 1961—1986 年的降雨量资料和向家坪水文站的同期径流量资料求得多年平均降雨量 $P_0 = 820.4 \text{ mm}$, 多年平均径流深 $R_0 = 312 \text{ mm}$, 运用多年水量平衡方程 $E_0 = P_0 - R_0$ 得到洵河流域多年平均实际蒸散发 $E_0 = 508.4 \text{ mm}$ 。采用模型的原始参数值进行计算, AA 模型和 GG 模型求得的 E_0 分别为 860.5 mm 和 597.3 mm , 所得结果与多年水量平衡方程的计算结果均存在一定误差,但 GG 模型的误差明显比 AA 模型小。因此,本文通过对 2 种模型参数的不断调整,使模型估算出的 E_0 与水量平衡法计算结果的

闭合差尽可能小,最终将 AA 模型的参数 α 调整为 0.965,将 GG 模型的参数 a 和 b 分别调整为 1.30 和 0.21。利用参数率定后的 AA 模型和 GG 模型对洵河流域模拟的 E_0 分别为 514.2 mm 和 509.2 mm,与水量平衡方程计算结果的相对误差仅为 1.14% 和 0.16%,两者的估算精度都有大幅度提高,并且表现出较好的适用性,但相对而言 GG 模型的模拟效果更优。

从洵河流域实际蒸散发的年内分布和年际变化(图 2)看,参数率定后 AA 模型和 GG 模型的模拟结果表现出高度的一致性,各月份的实际蒸散发最大仅相差 1.9 mm,年实际蒸散发的变化趋势基本一致。该结果进一步验证了利用参数率定后的两种模型对汉江流域实际蒸散发进行模拟的可靠性。

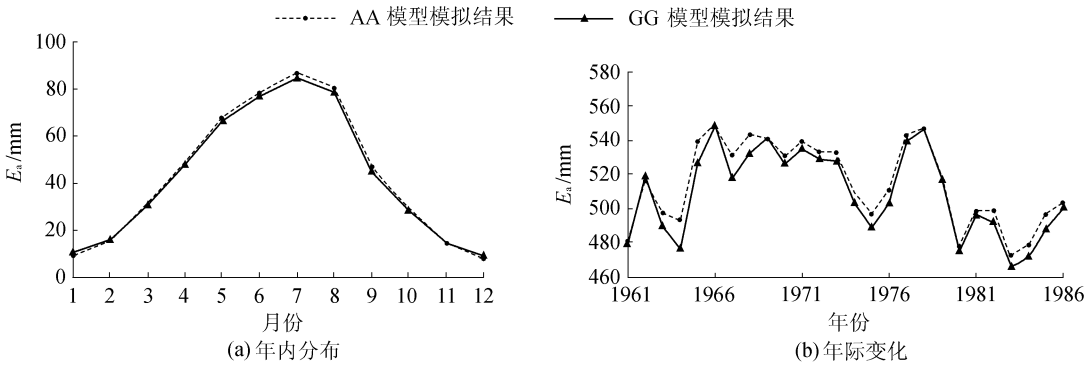


图 2 参数率定后 AA 模型和 GG 模型计算出的洵河流域实际蒸散发的年内分布和年际变化对比

Fig. 2 Comparison of monthly and annual average actual evapotranspiration calculated by AA model and GG model using calibrated parameter values for Xunhe River Basin

根据汉江流域 14 个站点 1961—2011 年的逐日实测气象资料,分别利用参数率定后的 AA 模型和 GG 模型对整个汉江流域的实际蒸散发进行模拟。从年际变化(图 3)看,AA 模型和 GG 模型估算出的年实际蒸散发的变化趋势基本一致,各年份的实际蒸散发也大致相等。为了便于研究,本文根据 GG 模型的计算结果对汉江流域过去 51 a 的实际蒸散发时空演变规律进行分析。

3.2 汉江流域实际蒸散发的空间变化特征

本文利用反距离权重插值法分析汉江流域 1961—2011 年平均实际蒸散发的空间分布特征(图 4)。从总体上看,汉江流域多年平均实际蒸散发呈现从东南向西北逐渐减少的趋势,其中位于汉江下游的钟祥站和天门站的多年平均实际蒸散发在 14 个气象站点中较大,分别为 607.9 mm 和 607.5 mm;汉江上游各气象站点的多年平均实际蒸散发相对较小,最小值出现在佛坪站,其多年平均实际蒸散发为 484.5 mm。

分别利用 Mann-Kendall 检验和 Sen's 坡度检测法对汉江流域 14 个气象站点 1961—2011 年的逐年实际蒸散发进行趋势分析,图 5 给出了 Mann-Kendall 检验的统计量 Z 值和 Sen's 坡度值的空间分布。在过去的 51 a 间,除镇安气象站的年实际蒸散发呈显著上升趋势(置信度超过 95%)外,其余 13 个站点均呈现下降趋势,其中 8 个站点的下降趋势较显著(置信度超过 95%),主要分布在流域东部。Sen's 坡度检测法的结果表明:流域东部的 Sen's 坡度值较小,坡度范围集中在 $-1.0 \sim -1.5 \text{ mm/a}$;流域中部的 Sen's 坡度值相对

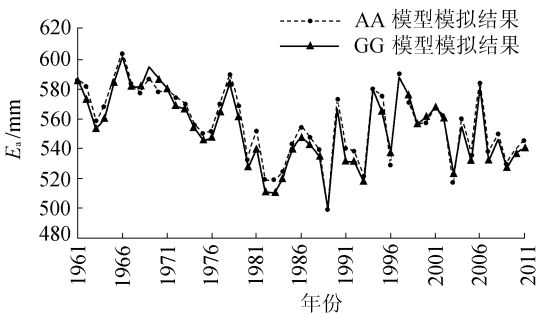


图 3 参数率定后 AA 模型和 GG 模型计算出的汉江流域实际蒸散发的年际变化对比

Fig. 3 Comparison of annual average actual evapotranspiration calculated by AA model and GG model using calibrated parameter values for Hanjiang River Basin

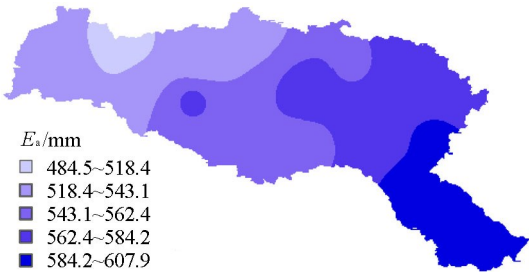


图 4 汉江流域多年平均实际蒸散发的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual average actual evapotranspiration over Hanjiang River Basin

较大,局部地区甚至出现了正的上升趋势,其中镇安站的坡度值为 0.812 mm/a,是所有站点中唯一出现正 Sen's 坡度值的站点,这与 Mann-Kendall 检验的结果一致。

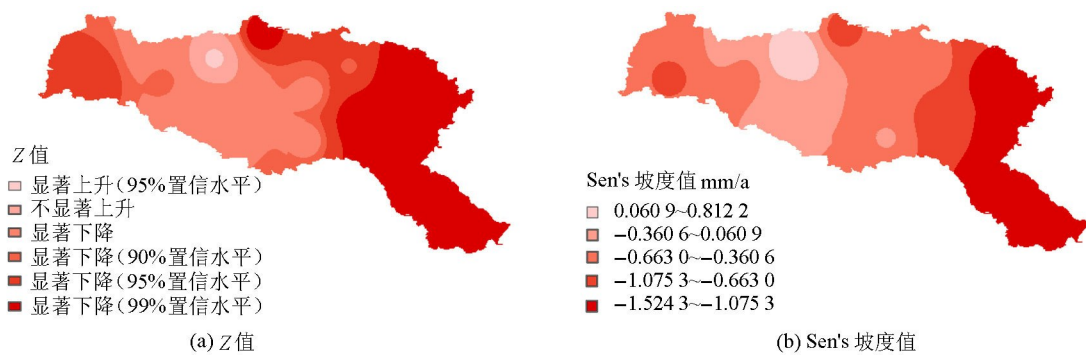


图5 Z值和Sen's坡度值的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of Z values and Sen's slope values

3.3 汉江流域实际蒸散发的时间变化特征

分别采用简单线性回归模型和二元回归模型得出汉江流域实际蒸散发的回归曲线(图6)。总体上看,过去51a间汉江流域的实际蒸散发呈较明显的下降趋势,下降斜率为-0.6714 mm/a。二元回归曲线显示汉江流域实际蒸散发的年际变化可大致分为2个阶段:1961—1991年下降趋势较显著,曲线斜率较小;1991年之后下降幅度明显减小,2001—2011年间呈现微弱的上升趋势。

为了进一步分析汉江流域实际蒸散发的年际变化规律(包括趋势、坡度和突变),分别采用 Mann-Kendall 检验法、Sen's 坡度检测法和 Pettitt 突变检测法对该流域1961—2011年的实际蒸散发序列进行检测,结果表明,过去51a汉江流域年实际蒸散发呈现显著的下降趋势(置信度为99%),其 Sen's 坡度值为-0.6913 mm/a,与一元线性回归曲线的斜率(-0.6714 mm/a)基本一致。图7(a)显示年实际蒸散发在1979年发生显著突变, P 值为 3.44×10^{-4} (远小于99%置信度的阈值0.01), K_t 值为424。图7(b)表明突变前后的 E_a 均值由575.5 mm降至547.3 mm,降幅达5%。

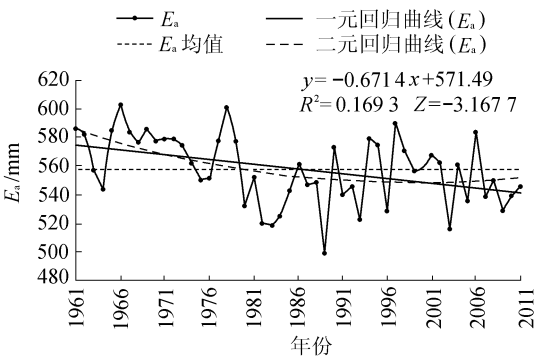


图6 汉江流域1961—2011年实际蒸散发的年际变化

Fig. 6 Annual variation of actual evapotranspiration over Hanjiang River Basin from 1961 to 2011

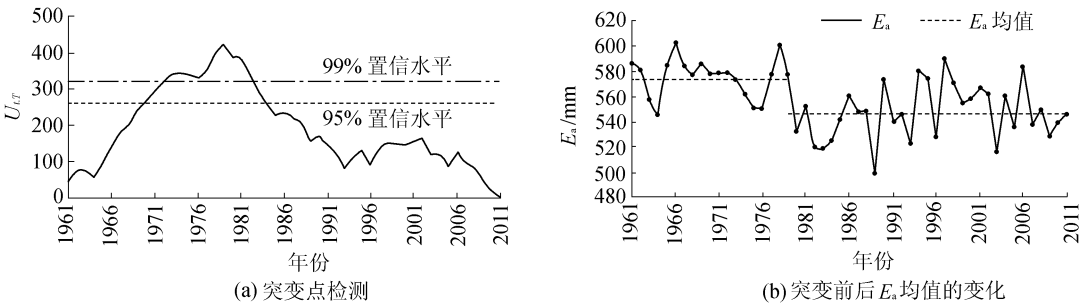


图7 汉江流域1961—2011年实际蒸散发的Pettitt检测结果

Fig. 7 Results of Pettitt test of actual evapotranspiration over Hanjiang River Basin from 1961 to 2011

从汉江流域的逐站点 Pettitt 检测结果(图8)看,流域内所有14个站点的年实际蒸散发均呈显著突变趋势(置信度为95%),其中有8个站点的突变达到了99%置信度,主要分布在流域的东南部和西北部地区。此外,共有11个站点的突变年份为1979年,占总数的78.6%。

3.4 实际蒸散发变化的成因分析

受供水条件和能量因素共同作用,流域实际蒸散发的机理一般比较复杂,由于土壤含水量资料往往难以

搜集,因此以降水量代替^[26]。研究表明,气象因子变化是造成湿润地区实际蒸散发时空波动的主要原因^[27]。基于此,为了探讨汉江流域 1961—2011 年实际蒸散发时空演变的成因,笔者分别采用 Mann-Kendall 检验法、Sen's 坡度检测法和 Pettitt 突变检测法对风速、气温、日照时数、气压、相对湿度、降水量这 6 个气象因子进行检测。研究表明:(a)过去 51 a 间汉江流域的年平均风速、年平均日照时数和年平均气压均呈现显著的下降趋势(置信度为 99%),并且分别于 1981 年、1979 年和 1993 年发生显著突变(置信度为 99%);(b)在全球气候变暖的背景下,汉江流域的年平均气温也显著升高(置信度为 99%),其 Sen's 坡度值为 0.016℃/a,在 1993 年发生显著突变(置信度为 99%);(c)年平均相对湿度和年降水量分别呈微弱的上升趋势和微弱的下降趋势,两者未表现出显著的突变特征。

风速、气温、日照时数和降水量对实际蒸散发均产生正作用,而相对湿度和气压对实际蒸散发则产生负作用^[24]。但是过去 51 a 间气温的显著上升和气压的显著下降并没有导致汉江流域实际蒸散发上升,究其原因,主要是风速和日照时数显著下降对实际蒸散发的减弱作用补偿了气温和气压引起的实际蒸散发增量,从而造成实际蒸散发呈显著的下降趋势。各气象因子的 Pettitt 突变检测结果也表明风速和日照时数的突变年份(1981 年、1979 年)与实际蒸散发的突变年份(1979 年)几乎一致,两者的显著下降是导致汉江流域 1961—2011 年实际蒸散发显著下降的主要原因。

4 结 语

对汉江流域 1961—2011 年实际蒸散发的时空演变规律和主要气象因子的变化趋势进行分析,并探讨了实际蒸散发变化的成因,得到以下主要结论:

- a. 参数率定后的 AA 模型和 GG 模型均表现出较好的适用性,两种模型对整个汉江流域实际蒸散发的模拟结果基本一致。相对而言,GG 模型的模拟效果更优。
- b. 汉江流域 1961—2011 年平均实际蒸散发总体上呈现自东南向西北逐次减少的空间分布特征;除镇安站的年实际蒸散发呈显著上升趋势外,其余站点均呈下降趋势,其中 8 个站点的下降趋势较显著,主要分布在流域东部。
- c. 汉江流域 1961—2011 年平均实际蒸散发呈现显著的下降趋势,其 Sen's 坡度值为-0.6913 mm/a,并于 1979 年发生显著突变,突变前后的均值由 575.5 mm 降至 547.3 mm,降幅达 5%。
- d. 过去的 51 a 间,风速和日照时数显著下降对实际蒸散发的减弱作用补偿了气温和气压引起的实际蒸散发的增量,是导致汉江流域年实际蒸散发显著下降的主要原因。

参考文献:

[1] WANG Weiguang, PENG Shizhang, YANG Tao, et al. Spatial and temporal characteristics of reference evapotranspiration trends in the Haihe River Basin, China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 16: 239-252.

[2] JHAJHARIA D, DINPASHOH Y, KAHYA E, et al. Trends in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India[J]. Hydrol Processes, 2012, 26: 421-435.

[3] 蔡辉艺, 余钟波, 杨传国, 等. 淮河流域参考蒸散发量变化分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2012, 40(1): 76-82. (CAI Huiyi, YU Zhongbo, YANG Chuanguo, et al. Analysis of variation of reference evapotranspiration in Huaihe Basin[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(1): 76-82. (in Chinese))

[4] WANG Weiguang, SHAO Quanxi, PENG Shizhang, et al. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River Basin during 1957—2008 and their spatial and seasonal differences[J]. Water Resource Research, 2012, 48: 1-27.

[5] 刘宏伟, 余钟波. 用 Hargreaves 法与 Penman-Monteith 法计算 ET_0 : 以太湖流域的应用为例[J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 6-8. (LIU Hongwei, YU Zhongbo. Application of Hargreaves and Penman-Monteith Equation to estimating ET_0 : a case study in Taihu Basin[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 6-8. (in Chinese))

[6] XU C Y, GONG L, JIANG T, et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan

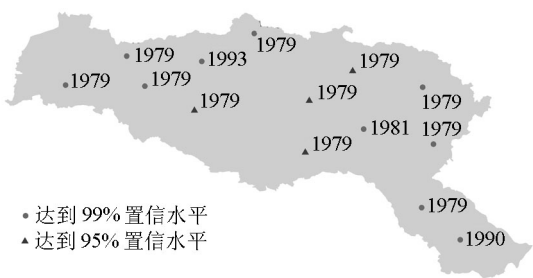


图 8 各气象站点实际蒸散发的突变年份
Fig. 8 Years of mutation of actual evapotranspiration at 14 meteorological stations

- evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327: 81-93.
- [7] 雷慧闽, 蔡建峰, 杨大文, 等. 黄河下游大型引黄灌区蒸散发长期变化特性[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(1): 13-17. (LEI Huimin, CAI Jianfeng, YANG Dawen, et al. Long-term variability of evapotranspiration in a large irrigated area in lower reach of Yellow River[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(1): 13-17. (in Chinese))
- [8] 杜军, 边多, 鲍建华, 等. 藏北高原蒸发皿蒸发量及其影响因素的变化特征[J]. *水科学进展*, 2008, 19(6): 786-791. (DU Jun, BIAN Duo, BAO Jianhua, et al. Changes of pan evaporations and its impact factors over northern Tibet in 1971-2006[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 786-791. (in Chinese))
- [9] BOUCHET R J. Evapotranspiration reele et potentielle, signification climatique[J]. *General Assembly Berkeley, Int Ass Sci Hydrol*, 1963, 62: 134-142.
- [10] 赵玲玲, 陈喜, 夏军, 等. 气候变化下乌江流域蒸散发互补关系变化及成因辨识[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(6): 629-634. (ZHAO Lingling, CHEN Xi, XIA Jun, et al. Variation of complementary relationship of evapotranspiration with climate changes and its cause analysis in Wujiang Basin[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2011, 39(6): 629-634. (in Chinese))
- [11] 王艳君, 姜彤, 刘波. 长江流域实际蒸散发量的变化趋势[J]. *地理学报*, 2010, 65(9): 1079-1088. (WANG Yanjun, JIANG Tong, LIU Bo. Trends of estimated and simulated actual evapotranspiration in the Yangtze River Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1079-1088. (in Chinese))
- [12] XU C Y, SINGH V P. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 308: 105-121.
- [13] 刘绍民, 孙睿, 孙中平, 等. 基于互补相关原理的区域蒸散发量估算模型比较[J]. *地理学报*, 2004, 59(3): 331-340. (LIU Shaomin, SUN Rui, SUN Zhongping, et al. Comparison of different complementary relationship models for regional evapotranspiration estimation[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 331-340. (in Chinese))
- [14] GAO Ge, XU Chongyu, CHEN Deliang. Spatial and temporal characteristics of actual evapotranspiration over Haihe River Basin in China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 26(5): 655-669.
- [15] 刘波, 翟建青, 高超, 等. 基于实测资料对日蒸散发估算模型的比较[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(9): 974-980. (LIU Bo, ZHAI Jianqing, GAO Chao, et al. A comparison of daily actual evapotranspiration evaluation models based on field observational data[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(9): 974-980. (in Chinese))
- [16] 刘健, 张奇, 许崇育, 等. 近50年鄱阳湖流域实际蒸散发量的变化及影响因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(2): 139-145. (LIU Jian, ZHANG Qi, XU Chongyu, et al. Change of actual evapotranspiration of Poyang Lake watershed and associated influencing factors in the past 50 years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(2): 139-145. (in Chinese))
- [17] BRUTSAERT W, STRICKER H. An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration[J]. *Water Resource Research*, 1979, 15(2): 443-450.
- [18] GRANGER R J, GRAY D M. Evaporation from natural nonsaturated surfaces[J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 111: 9-19.
- [19] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Journal of the Econometric Society*, 1945, 133(3): 245-259.
- [20] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Griffin Press, 1970.
- [21] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63: 1379-1389.
- [22] 杨肖丽, 任立良, 江善虎, 等. 西辽河源头流域径流变化趋势及影响因素分析[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(1): 37-41. (YANG Xiaoli, REN Liliang, JIANG Shanhu, et al. Analysis of trend and influencing factors of runoff variation in headwater basin of West Liaohe River[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, 40(1): 37-41. (in Chinese))
- [23] 陆志华, 夏自强, 于岚岚, 等. 近51年松花江流域气温时空变化特征[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(6): 629-635. (LU Zhihua, XIA Ziqiang, YU Lanlan, et al. Characteristics of spatio-temporal variation of temperature in Songhua River Basin from 1960 to 2010[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, 40(6): 629-635. (in Chinese))
- [24] PETTITT A N. A non-parametric approach to the change point problem[J]. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
- [25] ZHANG Shurong, LU X X. Hydrological responses to precipitation variation and diverse human activities in a mountainous tributary of the lower Xijiang, China[J]. *Catena*, 2009, 77(2): 130-142.
- [26] GAO Ge, CHEN Deliang, XU Chongyu, et al. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960-2002[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D11): 1-8.
- [27] COHEN S, STANHILL G. Evaporative climate changes at Bet-Dagan, Israel, 1964-1998[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 83-91.