

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0049

王亚慧,黄鹏年,李致家,等.不同蒸发数据在降雨径流模拟中的适用性[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):48-56. WANG Y H, HUANG P N, LI Z J, et al. Study on applicability of different evaporation data in rainfall runoff simulation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 48-56. (in Chinese)

# 不同蒸发数据在降雨径流模拟中的适用性

王亚慧<sup>1</sup>, 黄鹏年<sup>2</sup>, 李致家<sup>1</sup>, 邱桢毅<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 南京信息工程大学 水文与水资源工程学院, 南京 210044)

**摘要:**为了探究不同质量和精度蒸发数据对降雨径流模拟的影响,选取 E601 蒸发皿蒸发数据、离散化的 Thornthwaite 经验公式计算的潜在蒸散发和将固定值作为蒸发数据 3 种来源的蒸发资料作为输入,利用新安江模型分别对屯河流域 1981—2004 年的径流过程进行模拟,对比分析了 3 种数据对径流模拟结果的影响,结合年内各季节误差规律,分析了不同季节对蒸发数据精度的敏感程度。结果表明,蒸发皿蒸发、公式计算蒸散发和固定值的模拟结果确定性系数均值分别达到 0.90、0.89 和 0.86,公式计算蒸散发值适用性较好;在季节尺度上,季节内蒸发存在趋势性变化的春季和秋季对不同来源的蒸发数据更加敏感,对流域潜在蒸散发的精度要求更高;通过优化冬季蒸发的固定值模拟结果显示,使用固定数值代替流域蒸发能力的方案在夏季和冬季适用性较好,其中冬季蒸发固定为 1 mm 时在降雨径流模拟中可以取得较好的模拟效果。

**关键词:**降雨径流模拟; Thornthwaite 经验公式; 蒸发数据; 新安江模型

中图分类号: P334.92 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## Study on applicability of different evaporation data in rainfall runoff simulation

WANG Yahui<sup>1</sup>, HUANG Pengnian<sup>2</sup>, LI Zhijia<sup>1</sup>, QIU Zhenyi<sup>1</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Hydrology and Water Resources Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of different evaporation data on the accuracy and quality of rainfall runoff simulations, pan evaporation, potential evapotranspiration estimated by discretized Thornthwaite empirical formula and the fixed value as evaporation data were selected as inputs to simulate the runoff process using Xin'anjiang model from 1981 to 2004 in the Tunxi watershed. The effect of three kinds of data on runoff simulation results were compared and analyzed. Furthermore, the sensitivity of different seasons on the accuracy of evaporation data was analyzed based on the error regularity of each season in a year. The results showed that the average deterministic coefficient of pan evaporation, and evapotranspiration estimated by formula and fixed values were 0.90, 0.89 and 0.86, respectively, while the applicability of evapotranspiration estimated by formula was better. On the seasonal scale, spring and autumn seasonal changes were more sensitive to seasonal evaporation data and required higher accuracy of potential evapotranspiration in the basin. By optimizing the simulation results using fixed value of evaporation in winter showed that the scheme of fixed value had good applicability in summer and winter instead of the evaporation capacity of the basin. The evaporation in winter was fixed to 1mm showed good simulation results.

收稿日期: 2019-04-01 修回日期: 2019-09-06 网络出版时间: 2019-09-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190911.1442.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402705); 国家自然科学基金项目(51679061; 41130639); 江苏省高校自然科学研究面上项目(17KJB170015)

作者简介: 王亚慧(1995—), 女, 河南杞县人, 主要从事水文物理规律模拟与预报方面研究。E-mail: WangYH0213@163.com

通信作者: 李致家(1962—), 男, 山西运城人, 教授, 博士, 主要从事水文物理规律模拟与预报方面研究。E-mail: zjli@hhu.edu.cn

**Key words:** rainfall runoff simulation; Thornthwaite empirical formula; evaporation data; Xin'anjiang model

流域蒸散发在流域水量平衡中起着重要的作用<sup>[1]</sup>。在降雨径流模拟中,流域蒸散发量计算是产流计算的重要内容。蒸散发直接作用于流域土壤含水量的变化,其决定了无雨期土壤含水量的消耗量,也影响降雨期的产流量,蒸散发资料的输入将直接影响模型产流计算成果,特别对于长时期的产流量计算,蒸发时常是决定性因素<sup>[2]</sup>。但由于全国范围内的蒸发站密度较低,直接获取径流模拟所需的流域蒸发数据较难,尤其对于中小流域。对此,国内外以 Penman-Monteith(PM)公式计算结果为标准<sup>[3]</sup>,对基于不同气象因素的蒸发估算方法进行了较多对比研究<sup>[4-7]</sup>。为了探究不同蒸发估算方法在降雨径流模拟中的适用性,Oudin 等<sup>[8]</sup>通过不同潜在蒸散发计算模型的对比,发现基于温度和辐射的蒸散发计算方法在日径流模拟中得到的模拟效果与基于 Penman 公式的蒸散发计算公式的模拟精度相当,但由于 Penman 公式输入资料较为复杂反而不太适用于降雨径流模型;赵玲玲等<sup>[9]</sup>基于水文循环对蒸散发估算方法进行了回顾和综述。也有学者尝试用不同时间尺度的蒸发数据进行降雨径流模拟计算,薛联青等<sup>[10]</sup>通过分布式模型 CREST 验证了全球月平均蒸发数据在径流模拟中能够得到较好的模拟结果;李相虎等<sup>[11]</sup>通过月蒸散发时间尺度转换模型得到日蒸散发量序列,不仅反映了日蒸发量的时间变异特征,也很好地满足了流域日降雨径流模拟中对蒸发数据的需求。然而,目前针对不同来源的蒸发数据在降雨径流模拟中的适用性对比研究较少,并且无论是蒸发估算方法的比较还是蒸发数据在降雨径流模拟中的应用,研究大多在年尺度上进行分析,蒸发数据在不同季节是否具有同等效果的适用性,不同季节是否对蒸发数据具有相同的精度要求尚有疑问。从季节尺度探究不同来源蒸发数据对降雨径流模拟的影响,对在降雨径流模拟中选择合适精度的蒸发数据,提高模型的可行性和普适性有重要意义。

因此,本文采用以温度为基础的 Thornthwaite 经验公式作为流域潜在蒸散发计算模型的代表参与流域径流模拟,一方面该方法计算精度得到较多认可<sup>[12-14]</sup>;另一方面是该方法仅需气温资料,容易获得具有较高完整度的输入数据,具有较好的实用性<sup>[15-16]</sup>。分别与固定值和蒸发皿蒸发值 3 种不同质量和精度的蒸发数据对屯溪流域日径流过程进行模

拟,探究不同质量和精度的蒸发数据在降雨径流模拟中的适用性,分析降雨径流模拟中各季节对蒸发数据的敏感程度及精度要求,提高降雨径流模拟在不同区域条件下的灵活性和简便性。

## 1 研究区概况

屯溪流域位于安徽省皖南山区,属于亚热带季风气候,年平均温度为 17 ℃。冬季盛行西北风,天气晴冷干燥;夏季多东南风,气温高,光照强,空气湿润;春、秋两季气旋活动频繁,冷暖变化大。屯溪流域面积为 2 670 km<sup>2</sup>,流域内地势西高东低,相对高差较大。该流域雨量充沛,年平均降雨量为 1 600 mm,降雨在年内、年际分配极不均匀:4—6 月多雨,降雨量占全年降雨量的 50%,易发生洪涝灾害;7—9 月降雨量仅占 20%,旱灾频繁。河川径流年内、年际变化较大。流域内植被良好,土壤类型主要为黏壤土。

## 2 研究方法和数据

### 2.1 新安江模型

三水源新安江模型<sup>[17]</sup>是由河海大学水文系水文预报教研室赵人俊教授带领的研究组研制,之后借鉴山坡水文学概念和国内外产汇流理论的研究成果,逐步完善的一个降雨径流模型。新安江模型是一个分散参数的概念性模型,其根据流域下垫面的水文、地理情况将其流域分为若干单元(或子流域),在每个单元流域分别进行三层蒸散发计算、产流计算、分水源计算和汇流计算,之后将每个单元流域的流量过程演算到流域出口,叠加起来即得整个流域的径流过程。目前该模型在我国径流模拟及预报中得到了广泛的应用<sup>[18-20]</sup>。

### 2.2 Thornthwaite 经验公式及改进

#### 2.2.1 Thornthwaite 经验公式

Thornthwaite 经验公式<sup>[21-22]</sup>最初基于美国中东部地区的试验数据而提出的,并且假设干湿空气没有平流,且潜热与显热之比为常数。它是依据月平均气温和最大可能日照时数建立联系的一个计算潜在蒸散发( $ET_0$ )的经验公式,将  $ET_0$  看作为温度的幂函数,计算的是月平均潜在蒸散发量。

$$ET_{0mi} = 16 \left( \frac{N_i}{12} \right) \left( \frac{n_i}{30} \right) \left( \frac{10T_{mi}}{b} \right)^c \quad (1)$$

$$b = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_{m_i}}{5} \right)^{1.514} \quad (2)$$

$$c = 0.49239 + 1792 \times 10^{-5} b - 771 \times 10^{-7} b^2 + 675 \times 10^{-9} b^{-3} \quad (3)$$

式中:  $ET_{0m_i}$  为月平均潜在蒸散发量, mm/月;  $N_i$  为每日最大可能日照时数的平均值(由纬度计算);  $n_i$  为第  $i$  个月的天数;  $T_{m_i}$  为第  $i$  个月的月平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2.2 Thornthwaite 公式离散化

参考 TOPKAPI 模型<sup>[23]</sup>中计算参比潜在蒸散发的经验公式, 该公式在结构上类似辐射方法, 将气温看作是辐射的一个指标(见式(4))。该公式在温度上属于线性关系, 允许在时间尺度上增加时间步长进行离散化处理, 并且考虑农作物的影响增加作物因子(见式(5))。

$$ET_{0m_i} = \beta N_i W_u T_{m_i} \quad (4)$$

$$ET_0(i, \Delta t) = Kc(\beta N_i W_u T_{\Delta t}) \frac{\Delta t}{30 \times 24 \times 3600} \quad (5)$$

式中:  $ET_{0m_i}$ 、 $N_i$ 、 $T_{m_i}$  同上;  $\beta$  为回归系数;  $W_u$  为权重因子;  $ET_0(i, \Delta t)$  为第  $i$  月一个特定时间步长的参比蒸散发量;  $\Delta t$  为时段(s);  $Kc$  为作物因子;  $T_{\Delta t}$  为在  $\Delta t$  时间内平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ 。

将式(4)代入式(5)结果如下, 式(6)中  $ET_{0m_i}$  由 Thornthwaite 公式代入即为该公式的离散化。

$$ET_0(i, \Delta t) = Kc \left( ET_{0m_i} \frac{T_{\Delta t}}{T_{m_i}} \right) \frac{\Delta t}{30 \times 24 \times 3600} \quad (6)$$

### 2.3 数据来源

蒸发皿蒸发和流域潜在蒸散发都反映气象因素对蒸发的影响, 但流域潜在蒸散发受土体的影响, 且与周围环境的热交换条件与水面蒸发不同, 因此需将蒸发皿蒸发换算成流域潜在蒸散发。

蒸发皿蒸发值选取屯溪水文站 E601 蒸发皿观测的日蒸发资料, 与流域潜在蒸散发的关系可以表达为

$$E_p = kE_0 \quad (7)$$

式中:  $E_p$  为流域潜在蒸散发(mm);  $k$  为流域蒸散发折算系数;  $E_0$  为水面蒸发(mm)。

改进的 Thornthwaite 经验公式选取屯溪气象站的地面气温资料计算得到流域潜在蒸散发。

固定值由蒸发皿蒸发多年日平均值得到, 其换算为流域潜在蒸散发公式为

$$E_p = k \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n E_0 / N_n \quad (8)$$

式中:  $E_p$ 、 $k$ 、 $E_0$  同上;  $N$  为蒸发皿蒸发数据的年数;  $n$  为第  $i$  年的天数;  $N_n$  为  $N$  年的总天数。

流域蒸散发折算系数和作物因子通过水量平衡

校核得到见表 1。

表 1 蒸发模块主要参数

Tab. 1 Main parameters of evaporation module		
参数名称	流域蒸散发折算系数	作物因子
参数值	1.1	0.77

其中, 蒸散发折算系数  $k$  包括  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  三方面的内容:  $k_1$  为蒸发皿系数, 该值夏季约为 0.7, 冬季约为 1;  $k_2$  为陆面蒸发能力与水面蒸发之比, 其值在夏季约为 1.3~1.5, 冬季约为 1;  $k_3$  是蒸发测站对全流域的代表性问题<sup>[17]</sup>。屯溪流域为湿润流域且植被良好, 夏季植被区温度较水面温度低, 地气温差大, 植被蒸腾作用强烈, 实际蒸散发大于水面蒸发, 其蒸散发折算系数  $k$  大于 1<sup>[24]</sup>; 冬季蒸散发折算系数约为 1, 因此该流域蒸散发折算系数可达到 1.0 以上<sup>[25]</sup>。

而流域实际蒸散发机理复杂, 受到气象要素、土壤、植被和土壤可供水量的影响<sup>[26]</sup>。一般情况下, 流域蒸发量主要取决于土壤蒸发量, 土壤蒸发量主要受到气象因素和土壤含水率的影响<sup>[24]</sup>, 文中通过新安江模型中三层蒸散发模式计算得到实际蒸散发。

### 2.4 数据分析

改进的 Thornthwaite 经验公式需要时间步长内的平均气温, 即屯溪气象站的日均气温。该数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)中国地面气候资料日值数据集, 日平均气温为 4 次(02:00、08:00、14:00、20:00)定时观测值的平均值, 且整理发现屯溪气象站 1981—2004 年日均气温数据缺失率为 0%, 具有较好的完整度。由于屯溪流域冬季温度存在低于  $0^{\circ}\text{C}$  的情况, 因此对冬季潜在蒸散发值直接赋值为 1 mm。蒸发皿蒸发通过水文年鉴获取, 将蒸发皿蒸发值多年日平均值计算得到固定值为 2.1 mm/d。3 种蒸发数据的过程线见图 1。

从图中可以看到, 计算的蒸散发值和蒸发皿蒸发数据虽然在极值上有较大差异, 但年内周期性变化均比较明显, 都存在冬季到夏季逐渐增大、夏季到冬季逐渐减小的趋势; 而固定值相对于前两种数据存在春季前期偏大后期偏小, 夏季明显偏小, 秋季前期偏小后期偏大, 冬季明显偏大的情况。具体以计算蒸散发值、固定值与蒸发皿蒸发值的确定性系数来表示的 3 种数据的误差关系, 见图 2。计算蒸散发值确定性系数均值为 0.28, 固定值为蒸发皿蒸发的多年日平均值, 因此固定值确定性系数为 -0.03, 约

等于0。其中计算蒸发值和固定值的不确定性系数在1992、1997、1999年有明显的下降,说明这三年计算蒸发值、固定值与蒸发皿蒸发值年内分布差异更为突出。

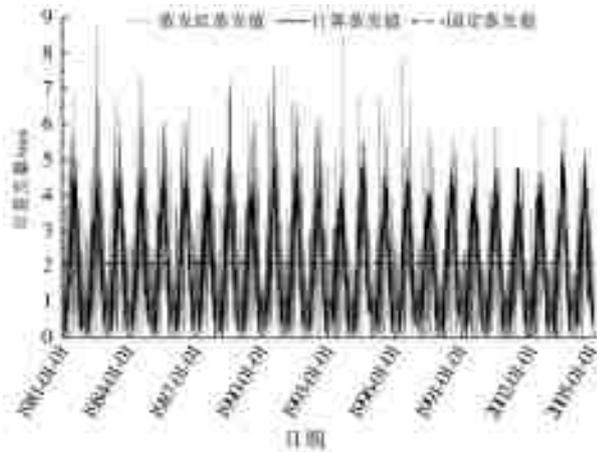


图1 不同蒸发数据源过程线

Fig. 1 Process lines for evaporation data from different sources

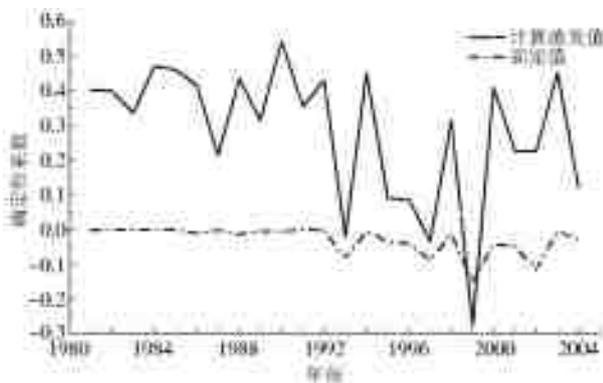


图2 蒸发数据过程线拟合情况

Fig. 2 Process fitting lines for evaporation data

### 3 日径流模拟及结果分析

#### 3.1 模型模拟结果

为了探究蒸发数据的精度对日径流模拟的影响,首先使用蒸发皿蒸发得到的流域潜在蒸散发数据输入新安江模型中对屯河流域1981—2004年日径流资料进行模拟,通过单纯形法和人工调试相结合的方法对产汇流模块参数进行率定。之后使用相同的产汇流参数分别输入固定值得到的流域潜在蒸散发和改进 Thornthwaite 经验公式计算的潜在蒸散发数据(以下简称“计算”)对24年日径流资料进行模拟,新安江模型主要参数调试结果见表2,模拟结果见图3。

从图3中可以看到,蒸发皿蒸发模拟的径流深相对误差分布比较均匀,均值为0.075%;而计算的径流深相对误差均值虽然稍微偏小但分布更加集

表2 新安江模型主要参数赋值  
Tab. 2 Main parameters values of Xin'anjiang model

序号	参数意义	参数	参数值
1	流域蓄水容量分布曲线指数	B	0.3
2	深层散发系数	C	0.1
3	张力水容量/mm	WM	120
4	上层张力水容量/mm	WUM	20
5	下层张力水容量/mm	WLM	60
6	不透水面积比例	IM	0.01
7	自由水容量/mm	SM	38
8	流域自由水容量分布曲线指数	EX	1.5
9	地下水出流系数	KG	0.3
10	壤中流出流系数	KI	0.4
11	河网水流消退系数	CS	0.3
12	地下水消退系数	CG	0.9
13	壤中流消退系数	CI	0.6
14	河道汇流的马斯京干法系数	X	0.2

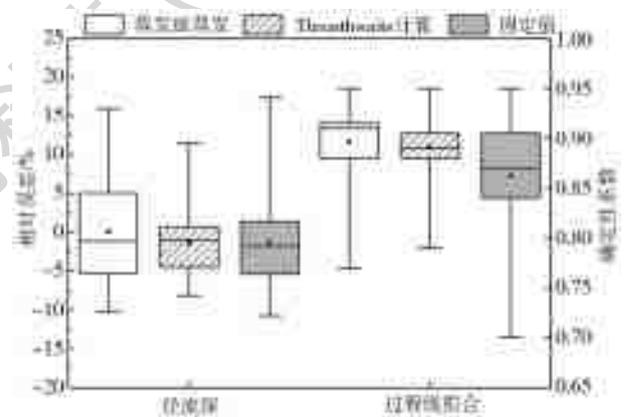


图3 3种蒸发数据驱动的模型模拟结果

Fig. 3 Simulation results driven by three evaporation data models

中,有19年的径流深相对误差分布在±5%之内;固定模拟的相对误差分布虽然相对集中但普遍偏小,也就是说模拟的径流深较实测偏小。3种数据模拟的过程线拟合误差以不确定性系数来表示,蒸发皿蒸发和计算蒸发值模拟的过程线拟合的不确定性系数均分别达到0.90和0.89,但蒸发皿蒸发模拟的不确定性系数离散度更高,计算则相对稳定,说明蒸发皿蒸发数据所模拟的过程线存在几场较好几场较差的情况,如1998年及之前,两者模拟效果基本相同,1998年之后蒸发皿蒸发模拟精度有所下降,2001年甚至达到0.77,计算模拟精度则较蒸发皿蒸发更优,也验证了该公式计算值的适用性和可靠性。此外,固定模拟的过程线拟合偏差较大,不确定性系数均值仅达到0.86,且固定值的模拟结果离散度更高,

特别在年降雨量较小的年份,模拟结果不能达到与蒸发皿蒸发、计算相当的精度。另外,根据图 3 中 1992、1997、1999 年 3 年较为突出的蒸发数据误差关系,发现 1992 年 3 种数据模拟结果存在较大差异,蒸发皿蒸发模拟结果优于计算蒸发,优于固定值模拟结果;而 1999 年 3 种蒸发数据的模拟结果确定性系数均达到 0.95,计算蒸发的径流量模拟结果明显优于其他两者的模拟结果。分析原因为降雨弱化了蒸发数据带来的误差影响,并且年降雨量越大,这种作用越明显。

综合以上,年降雨量越大,蒸发导致的土壤含水量变化对流域产流的影响越小,降雨径流线性关系越凸显,无论是蒸发皿蒸发数据还是固定值模拟结果均较好;反之,降雨量小,土壤含水量作用增加,非线性关系凸显,导致对蒸发数据精度要求提高。针对精度要求,具体将通过典型年进行分析。

### 3.2 3 种蒸发数据对比分析

通过模拟期 3 种蒸发数据模拟的日径流量和实测日径流量绘制线性相关关系见图 4。从图中可以看出,无论是蒸发皿蒸发数据、公式计算的蒸散发值还是固定蒸发数据模拟的流量都与实测流量具有较好的相关性, $R^2$  分别达到 0.91、0.91 和 0.90。结合计算模拟的径流深相对误差和确定性系数,认为计算得到的蒸发数据和蒸发皿蒸发数据对径流模拟的结果基本一致,因此当实测蒸发数据缺失,通过改进的 Thornthwaite 经验公式计算的潜在蒸散发可以在径流模拟中作为蒸发模块的输入,并可以取得很好的模拟结果。

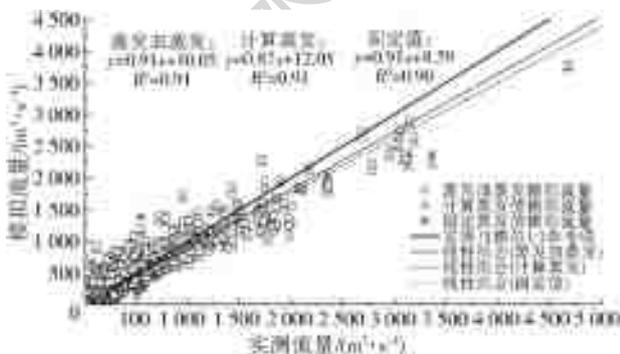


图 4 3 种蒸发数据模拟流量与实测流量相关关系

Fig. 4 Correlation between measured flow and simulated flow of three kinds of evaporation data

对比蒸发皿蒸发、计算值和固定值模拟结果发现,3 种蒸发数据模拟过程线确定性系数均达到 0.9 的年份有 8 a,通过 P-III 型曲线对年降雨量进

行拟合分析其频率分布发现,丰水年( $P < 25\%$ )有 6 a,均在其中。而枯水年则存在固定模拟结果相较蒸发皿蒸发和计算相差较大的情况。分别选取 1995 年为典型丰水年( $P = 25\%$ ),年降雨量 2 166.3 mm;1990 年为典型平水年( $P = 50\%$ ),年降雨量 1 855 mm;1986 年为典型枯水年( $P = 75\%$ ),年降雨量 1 613.1 mm 对年径流模拟进行分析见图 5。

从图 5 中可以看出 3 种数据在汛期对洪水过程线的模拟都得到了很好的结果。固定值模拟结果在 3 个典型年都存在秋季偏大,冬季偏小的情况,春夏季节模拟过程线则与蒸发皿蒸发和计算基本一致,因此,判断固定值模拟结果相较于蒸发皿蒸发和计算的误差主要来源于秋冬季节。而丰水年降雨量较集中,主要发生在春夏季节,秋冬季节的降雨只形成两个较小的洪水过程线,平水年和枯水年降雨量则相对分散,因此在丰水年 3 种数据模拟结果基本一致,而在平水年和枯水年则表现出较大的差别。

## 4 季节分析

针对固定值模拟结果不理想的情况,参考经验公式对秋冬季蒸发进行调整,发现当固定值冬季蒸发改为 1 mm/d(以下简称固定 1 mm),以水量平衡为原则其他季节蒸发值相应增加均为 2.4 mm/d 时,模拟结果有明显提高,径流深相对误差均值为 3.86%,确定性系数均值为 0.89,达到计算模拟结果精度。各季节过程线拟合的确定性系数见图 6,均值见表 3。

从表 3 中可以看出,春夏季节模拟结果普遍较好,而秋冬季节模拟结果较差,具体分析如下。

春季蒸发皿蒸发模拟精度略高于另三种数据,主要原因是前期气温较低,计算蒸发值偏小,随着温度的回升,计算蒸发值才逐渐增大;固定值相较于蒸发皿蒸发则前期偏大后期偏小。但因为前期土壤含水量较小,后期虽然降雨首先补给上层土壤含水量,但蒸发能力相对增大,上层土壤含水量极易变为 0,导致实际蒸发不能按流域蒸发能力进行计算,一定程度上弱化了不同蒸发数据输入的影响。

从图 6(b)中可以看出蒸发皿蒸发和计算值在夏季的模拟结果较好,并且优于固定值。分析原因为夏季降雨更加频繁且降雨量较大,使得土壤含水量容易达到田间持水量,流域蒸发基本按照蒸发能力来计算,固定值得到的流域潜在蒸散发

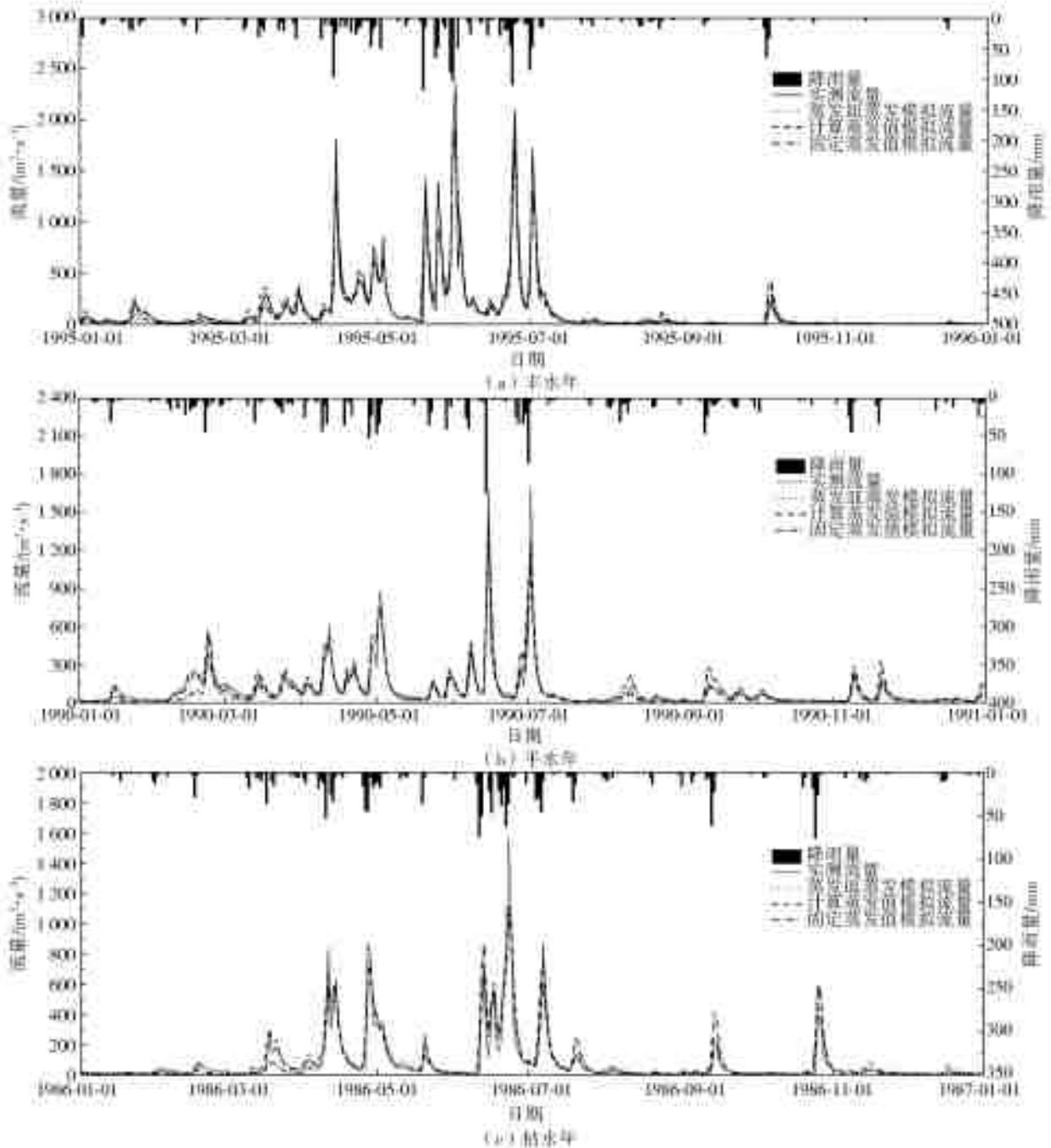


图5 典型年3种蒸发数据进行径流模拟过程线对比

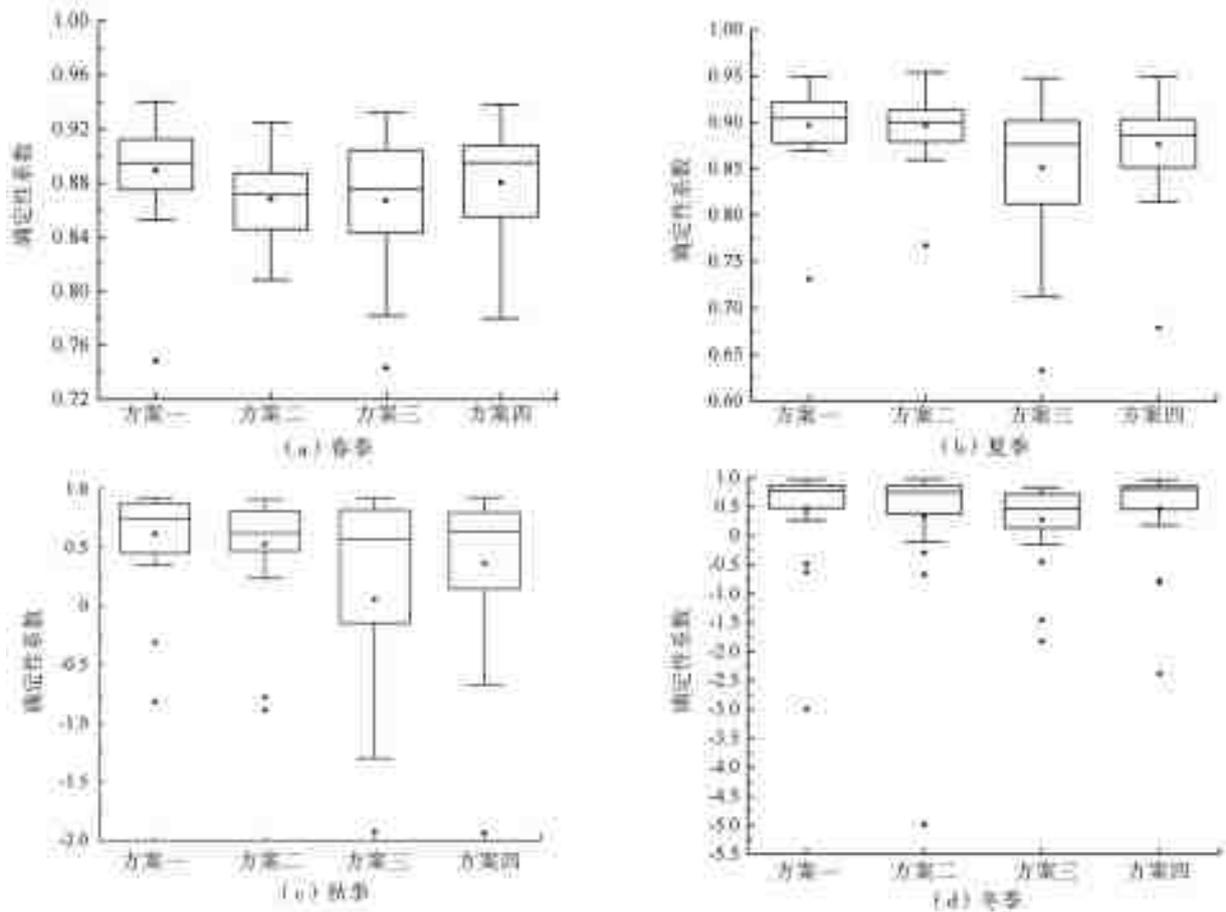
Fig.5 Comparison of runoff simulation process lines with three types of evaporation data

明显偏小,使得降雨补充土壤含水量比例减小,产流增加,进而导致夏季模拟洪量、洪峰较实测偏大;固定1 mm方案中夏季流域潜在蒸散发增大,结果显示模拟精度得到了一定的提高,也验证了上述分析的合理性。

由于夏季雨水丰沛,土壤含水量较大,秋季前期实际蒸发仍然按流域蒸发能力蒸发。随着土壤含水量的减小,流域蒸发能力也在减小,流域实际蒸发也随之不断减小。但由于计算值与温度成正相关关系,计算值在秋季后期下降幅度更大,导致计算值模拟精度达不到蒸发皿蒸发的模拟精度。而固定值在

夏季的蒸发误差通过土壤含水量传递到秋季,也就是固定值所计算的秋季初始土壤含水量偏大,而固定值所得到的流域潜在蒸散发在前期却偏小,使得土壤含水量误差进一步扩大,降雨后产流增大,导致固定值在秋季的模拟结果较差。同时,可以看到固定1 mm的模拟结果虽然有所提高,但与蒸发皿蒸发和计算蒸发的模拟结果相比仍有一定的差距。说明有趋势性变化的蒸发数据在秋季适用性更好。

冬季降雨量较小,相应的土壤偏干,未降雨时蒸发主要消耗下层土壤含水量,降雨后按蒸发能力蒸



注: 方案一为蒸发皿蒸发模拟结果, 方案二为计算蒸发值模拟结果, 方案三为固定值模拟结果, 方案四为固定 1 mm 模拟结果。

图 6 不同蒸发数据各季节模拟过程线确定性系数

Fig. 6 Deterministic coefficient of simulation process line of different evaporation data in different season

表 3 各季节过程线拟合确定性系数均值

Tab. 3 Mean value of the deterministic coefficient of process line fitting in different season

季节	蒸发皿蒸发	计算	固定	固定 1 mm
春	0.89	0.87	0.87	0.88
夏	0.90	0.90	0.85	0.88
秋	0.62	0.53	0.06	0.37
冬	0.47	0.34	0.28	0.47

发。四种数据在冬季的模拟结果均不理想, 但固定 1 mm 模拟精度达到蒸发皿蒸发的模拟精度, 说明将冬季蒸发固定为 1 mm 具有较好的适用性。

四种数据对秋冬季节的模拟精度低于春秋季节, 一方面是因为秋冬季节为非汛期, 降雨量较少, 土壤含水量作用相应增大, 使得降雨径流相关关系减弱, 模拟结果的不确定性增加; 另一方面秋冬季节径流量量级较小, 对误差有放大的影响。

综合以上, 蒸发皿蒸发数据在降雨径流模拟中的模拟效果优于计算蒸发值, 优于固定 1 mm, 优于

固定值。对比蒸发皿蒸发、计算值和固定 1 mm 的模拟结果发现, 计算值和固定 1 mm 在季节内蒸发变化趋势相对稳定的夏季和冬季模拟效果更加接近蒸发皿蒸发模拟结果, 说明相较于夏季和冬季, 季节内蒸发存在趋势性变化的春季和秋季对不同来源的蒸发数据更加敏感; 同时也说明固定 1 mm 在夏季和冬季适用性更好; 冬季蒸发固定为 1 mm 时在降雨径流模拟中可以取得较好的模拟效果。

## 5 结论

蒸发皿蒸发数据在降雨径流模拟中效果最好, 同时改进的 Thornthwaite 经验公式计算的潜在蒸散发数据在降雨径流模拟中也具有较好的适用性。

相较于季节内蒸发变化趋势相对稳定的夏季和冬季, 季节内蒸发存在趋势性变化的春季和秋季对不同来源的蒸发数据更加敏感, 对流域潜在蒸散发的精度要求更高; 而使用固定数值代替流域蒸发能力的方案在夏季和冬季适用性较好, 其中冬季蒸发固定为 1 mm 时在降雨径流模拟中可以取得较好的

模拟效果。

研究为实测资料缺失或者中小流域气象站网密度较大的区域提供了简便且模拟精度较高的数据类型参考,同时对降雨径流模拟中选取何种精度的蒸发数据具有借鉴意义。

#### 参考文献(References):

- [1] RODERICK M L, FARQUHAR G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. *Science*, 2002, 298 (5597): 1410-1411. DOI: 10. 1126/science. 1075390-a.
- [2] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004:104-130. (RUI X F. Theory of hydrology[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2004: 104-130. (in Chinese))
- [3] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[R]. FAO, Rome, 1998, 300; 6541.
- [4] SINGH V P, XU C Y. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation[J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11 (3): 311-323. DOI: 10. 1002/(SICI) 1099-1085 (19970315) 11:3<311::AID-HYP446>3. 0. CO;2-Y.
- [5] 秦年秀,陈喜,薛显武,等. 潜在蒸散发量计算公式在贵州省适用性分析[J]. *水科学进展*, 2010, 21(3): 357-363. (QIN N X, CHEN X, XUE X W, et al. An applicability study of potential evapotranspiration models in Guizhou Province [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(3): 357-363. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2010. 03. 008.
- [6] 邹磊,夏军,马细霞,等. 潜在蒸散发量估算方法在河南省的适用性分析[J]. *水文*, 2014, 34(3): 17-23. (ZOU L, XIA J, MA X X, et al. Applicability of potential evapotranspiration methods in Henan Province [J]. *Journal of China Hydrology*, 2014, 34(3): 17-23. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2014. 03. 004.
- [7] 赵娜,王治国,张复明,等. 海河流域潜在蒸散发估算方法及其时空变化特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(6): 11-16. (ZHAO N, WANG Z G, ZHANG F M, et al. Model evaluation and spatial-temporal variations of potential evapotranspiration in Haihe Catchment. *South-to-North Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(6): 11-16. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 06. 002.
- [8] OUDIN L, HERVIEU F, MICHEL C, et al. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2-Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 303 (1): 290-306. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2004. 08. 026.
- [9] 赵玲玲,夏军,许崇育,等. 水文循环模拟中蒸散发估算方法综述[J]. *地理学报*, 2013, 68(1): 127-136. (ZHAO L L, XIA J, XU C Y, et al. A review of evapotranspiration estimation methods in hydrological models [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68 (1): 127-136. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0375-5444. 2013. 01. 014.
- [10] 薛联青,范正行,郝振纯,等. 全球月平均蒸发数据在流域径流模拟中的适用性[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(6): 602-606. (XUE L Q, FAN Z X, HAO Z C, et al. Analysis of applicability of global average monthly evaporation data to runoff simulation [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2011, 39(6): 602-606. (in Chinese)) DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2011. 06. 002.
- [11] 李相虎,任立良,张奇,等. 蒸散发时间尺度转换在日降雨径流过程模拟中的应用[J]. *湖泊科学*, 2010, 22 (5): 749-756. (LI X H, REN L L, ZHANG Q, et al. Application of evapotranspiration temporal scale transformation method in daily rainfall-runoff simulation [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(5): 749-756. (in Chinese)) DOI: 10. 18307/2010. 0518.
- [12] XU C Y, SINGH V P. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15 (2): 339-349. DOI: 10. 1002/hyp. 119.
- [13] PEREIRA R A, ANGELO P D C. An analysis of the criticism of Thornthwaite's equation for estimating potential evapotranspiration [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1989, 46 (1): 149-157. DOI: 10. 1016/0168-1923(89)90118-4.
- [14] 张晓琳,熊立华,林琳,等. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用[J]. *干旱区地理*, 2012, 35 (2): 229-237. (ZHANG X L, XIONG L H, LIN L, et al. Application of five potential evapotranspiration equations in Hanjiang basin [J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35 (2): 229-237. (in Chinese)) DOI: 10. 13826/j. cnki. cn65-1103/x. 2012. 02. 006.
- [15] 高彦春,于静洁,刘昌明. 气候变化对华北地区水资源供需影响的模拟预测[J]. *地理科学进展*, 2002, 21 (6): 616-624. (GAO Y C, YU J J, LIU C M. A simulated prediction of impacts of climate change on water supply and demand in the North-China-Region [J].

- Progress in Geography, 2002, 21(6): 616-624. (in Chinese) DOI: 10. 11820/dlkxjz. 2002. 06. 012.
- [16] 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(1): 105-121. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2004. 10. 024.
- [17] 赵人俊. 流域水文模拟-新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利水电出版社, 1984. (ZHAO R J. Watershed hydrological simulation-Xin'anjiang model and Northern Shaanxi model[M]. Beijing: Water conservancy and hydropower press, 1984. (in Chinese))
- [18] 李致家, 姚玉梅, 戴健男, 等. 利用水文模型研究下垫面变化对洪水的影响[J]. 水力发电学报, 2012, 34(3): 17-19. (LI Z J, YAO Y M, DAI J N, et al. Study on impact of basin cushion changes on river floods by hydrological modeling [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 34(3): 17-19. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2012. 07. 005.
- [19] 高红艳, 唐英敏. 基于栅格新安江模型的淮河上游土壤侵蚀预测[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 73-77. (GAO H Y, TANG Y M. Prediction of the soil-erosion in the upper stream of the Huaihe River based on the grid Xin'anjiang model[J]. South-to-North Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 73-77. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 03. 013.
- [20] 刘欣蔚, 王浩, 雷晓辉, 等. 粒子群算法参数设置对新安江模型模拟结果的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 69-74, 208. (LIU X W, WANG H, LEI X H, et al. Influence of parameter settings in PSO Algorithm on simulation results of Xin'anjiang model [J]. South-to-North Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 69-74, 208. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 20180011.
- [21] LIETH H. Evapotranspiration and primary productivity: C. W. Thornthwaite memorial model[J]. Pub in Climatology, 1972, 25: 37-46. DOI: 10. 1007/978-3-642-30235-0\_5.
- [22] PEREIRA A R, PRUITT W O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration[J]. Agricultural Water Management, 2004, 66(3): 251-257. DOI: 10. 1016/j. agwat. 2003. 11. 003.
- [23] MAZZETTI C. TOPKAPI 模型与应用指南[M]. 南京: 河海大学出版社, 2014. (MAZZETTI C. TOPKAPI model and application guide[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2014. (in Chinese))
- [24] 陈哈. 区域蒸散发的实测及模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017. (CHEN H. The measurement and simulation of regional evapotranspiration [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [25] 叶金印, 吴勇拓, 李致家, 等. 湿润地区中小河流山洪预报方法研究与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012(6): 615-621. (YE J Y, WU Y T, LI Z J, et al. Forecasting methods for flash floods in medium and small rivers in humid regions and their applications[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences) 2012(6): 615-621. (in Chinese)) DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2012. 06. 004.
- [26] GAO G, CHEN D L, XU C Y, et al. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960-2002[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: 1-8. DOI: 10. 1029/2006JD008010.