

Impact of Potential Evapotranspiration on Runoff Simulation in Hanjiang Basin*

Lihua Xiong, Xiaolin Zhang, Lin Lin, Shuai Li

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: 698zhangxiaolin@163.com

Received: Mar. 16th, 2012; revised: Mar. 28th, 2012; accepted: Apr. 11th, 2012

Abstract: The FAO-56 Penman-Monteith equation (PM) and four other temperature-based equations, i.e. Hargreaves (Har), Blaney-Criddle (B-C), Thornthwaite (Tho) and Hamon (Ham), were used to estimate the monthly potential evapotranspiration at 41 sub catchments in Hanjiang basin. The monthly runoff of each catchment was then simulated using the two-parameter monthly water balance model based on the estimated potential evapotranspiration data. The parameter calibration method was chosen to be SCE-UA algorithm. A comparison among the simulation results using five different monthly potential evapotranspiration equations showed that: 1) The average model efficiency of two-parameter monthly water balance model over 41 sub catchments is more than 80% for each different monthly potential evapotranspiration equation; 2) The simulation result is best when using the Ham equation, with the model efficiency at each of 41 catchment larger than 70%, while the results of the PM, Har, and B-C equations are relatively poor, and the Tho method is the worst.

Keywords: Potential Evapotranspiration; Monthly Water Balance Model; Runoff Simulation; Hanjiang Basin

潜在蒸散发公式对汉江流域径流模拟结果的影响*

熊立华, 张晓琳, 林琳, 李帅

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: 698zhangxiaolin@163.com

收稿日期: 2012年3月16日; 修回日期: 2012年3月28日; 录用日期: 2012年4月11日

摘要:采用FAO-56 Penman-Monteith (PM)、Hargreaves (Har)、Blaney-Criddle (B-C)、Thornthwaite (Tho) 和 Hamon (Ham)等5种潜在蒸散发公式计算汉江41个子流域的月潜在蒸散发量, 将其作为蒸发输入数据代入两参数月水量平衡模型中模拟各子流域的月径流过程。模型参数的率定选用SCE-UA算法。径流模拟结果显示: 1) 对于每一个潜在蒸散发计算公式, 两参数月水量平衡模型在41个子流域上的效率系数的平均值均达到80%以上; 2) 使用Ham方法模拟精度最优, 每个子流域的效率系数均达到70%以上, PM法、Har和B-C法略差, Tho方法模拟精度最差。

关键词: 潜在蒸散发; 月水量平衡模型; 径流模拟; 汉江流域

1. 引言

全球变暖是各国政府和科学界共同关心的重大

*基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51190094)和国家自然科学基金面上项目(51079098)资助。

作者简介: 熊立华(1972-), 男, 武汉大学教授, 博导, 主要从事水文水资源研究。

问题, 气候变暖能够加速区域水文循环, 使得不同地区的水资源供需矛盾更加尖锐, 因此水资源是受气候变化影响最直接、最重要的领域。利用流域水文模型耦合区域气候模式是评价气候变化对水资源影响的基本途径, 为满足生态学研究、干旱分析、气候变化

和人类活动影响评价等不同目的, 水文工作者根据不同流域的水文气候特点, 相继提出或改进了结构及计算时段各异的水量平衡模型用于流域水资源和气候研究。

最早的水量平衡模型可以追溯到 1940 年代, Thornthwaite 和 Mather 提出的水量平衡模型在径流模拟方面非常有效^[1]。随后水文学家们发展了很多其他的水量平衡模型: 例如 Palmer 的双土壤层模型^[2], Thomas 提出的四参数 abcd 水量平衡模型^[3], 郭生练等提出的五参数月水量平衡模型^[4], 以及熊立华和郭生练提出的两参数月水量平衡模型^[5]等, 均取得了良好的模拟效果。近几十年来, 研究者先后对其中的一些水量平衡模型做了比较分析, 获得了相当丰富的经验^[6-8], 李帅等人比较了 8 种水量平衡模型在中国湿润地区的模拟效果, 结果显示其中 6 种水量平衡模型的模拟效果良好^[9]。本文选用熊立华和郭生练提出的两参数月水量平衡模型模拟汉江流域的月径流过程, 比较 5 种不同潜在蒸散发计算公式对汉江 41 个子流域月径流模拟的影响。

2. 5 种潜在蒸散发计算公式

常用的估算潜在蒸散发量的方法有很多种, 如水汽输送法、热量平衡法、彭曼法和经验公式法等^[10]。近些年, 国内外开展了大量的对比研究^[10,11], 结果表明不同潜在蒸散发公式在不同地区的适用性存在差异。张晓琳等曾采用 PM 公式以及以温度为为基础的 B-C、Har、Tho 和 Ham 公式 5 种计算方法分析汉江流域的潜在蒸散发量^[12]。本文在此基础上, 将潜在蒸散发计算结果应用于两参数月水量平衡模型中, 模拟

汉江 41 个子流域的月径流过程。

PM 公式属于综合法, 是目前公认的应用最普遍、精度最高的公式之一^[13], 缺点是需要详细的气象资料; 其他 4 种潜在蒸散发公式均属于温度法, 对资料的要求低, 应用灵活方便, 在世界各地都得到广泛的推广和应用^[14,15]。5 种潜在蒸散发公式的具体计算表达式见表 1, 公式中各参数具体含义及取值可参照文献^[16-18]。

3. 两参数月水量平衡模型及参数率定

3.1. 两参数月水量平衡模型

两参数月水量平衡模型由熊立华和郭生练提出, 概念明确, 模拟精度高, 在东江、赣江和汉江 70 个子流域上取得了很好的应用效果^[5]。该模型以水量平衡为理论基础, 将各个水文过程或变量之间的关系概化成经验函数或表达式来模拟流域水文过程, 相对于日尺度模型来说, 概化了存在于较短时间尺度上的一些随机不确定因素, 因此模型结构简单, 参数少, 便于广泛推广。

两参数模型主要输入数据为月降水量和月蒸发量, 输出数据为实际蒸散发, 径流深等。本文降雨量采用各子流域控制面积内降雨观测值的算术平均值, 径流资料采用各子流域控制站的实测值。已有的研究成果一般利用蒸发皿蒸发计算实际蒸散发, 而潜在蒸散发同蒸发皿蒸发一样, 都是计算实际蒸散发的参数^[19], 因此本文采用 5 种复杂程度各异的潜在蒸散发计算公式计算汉江 41 个子流域月潜在蒸散发量, 将其作为蒸发输入数据代入两参数月水量平衡模型中, 计算

Table 1. Potential evapotranspiration equations
表 1. 潜在蒸散发计算公式表

名称	潜在蒸散发量 ET_0 计算公式	经验系数 k
PM	$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$	
Har	$ET_0 = kR_n T D^{1/2} (T_a + 17.8)$	0.0023
B-C	$ET_0 = kp(0.46T_a + 8.13)$	0.85
Ham	$ET_0 = k \times N \times Pt \quad Pt = 216.7 \times \frac{0.6108 \times e^{\left(\frac{17.27 - T_a}{T_a + 273.3}\right)}}{T_a + 273.3}$	0.84
Tho	$ET_0 = k(10T/I)^a \times uN/360 \quad a = 0.016 \times I + 0.5$ $I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad i_j = 0.09 \times T_j^{1.5}$	16

实际蒸散发并对汉江 41 个子流域进行月径流模拟。

实际月蒸发量 E 的计算公式可以写成:

$$E(t) = c \times ET_0(t) \times \tanh(P(t)/ET_0(t)) \quad (1)$$

$E(t)$ 为第 t 个月的实际蒸发量, 本文的 $ET_0(t)$ 为第 t 个月潜在蒸散发量, $P(t)$ 为第 t 个月观测的降水量, c 为模型的第一个参数, 通过率定得到。

月径流量的计算公式为:

$$Q(t) = S(t-1) \times \tanh[S(t-1)/SC] \quad (2)$$

SC 为流域平均蓄水容量, 是模型的第二个参数, $S(t)$ 为第 t 个月土壤层净含水量, 可由以下公式推算:

$$S(t) = S(t-1) + P(t) - E(t) - Q(t) \quad (3)$$

当 $S(t) > 0$ 时, $Q(t)$ 才用(2)式计算, 当 $S(t) < 0$ 时, $Q(t)$ 取 0, 表明土壤里没有任何净含水量, 不产生径流。

3.2. 参数率定

由于两参数月水量平衡模型概化成两个参数, 所以参数 c 和 SC 必然与流域气候条件和下垫面的特征有关^[20], 参数的优选十分必要, 在一定程度上决定了模型的拟合精度。本文为保证模拟结果的有效性和无偏性, 选择 Nash 效率系数 R^2 、模拟径流和实测径流的多年平均相对误差 RE 作为目标函数来衡量模型的模拟精度。

1) R^2 , 模型效率系数, Nash 与 Sutcliffe 在 1970 年提出^[21], 计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4)$$

这里的 $Q_{obs,i}$, \bar{Q}_{obs} , $Q_{sim,i}$ 分别指实测月径流深, 实测月径流深的平均值, 模拟的月径流深。

2) RE , 模拟径流深和实测径流深的多年平均相对误差:

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \quad (5)$$

模型效率主要取决于 R^2 值, R^2 越接近于 1, 表

明模型效率越高, 同时 RE 越接近于 0, 说明模拟效果越好。在率定过程中, 一般很难使两者同时达到最优, 需要综合考虑实际需要, 率定出满足要求的参数。

参数的自动率定包含两个步骤: 第一步, 根据目标函数 RE 初步确定 c 和 SC ; 第二步, c 值固定为第一步的率定结果, 根据目标函数 R^2 二次率定参数 SC 。自动率定模型参数模块用 C++ 编程, 参数率定采用 SCE-UA 算法, SCE-UA 算法是一种全局优化算法, 能够有效快速的搜索到水文模型参数的全局最优解^[22,23], 是目前水文模型参数优选中最有效的方法。

4. 流域简介

汉江是长江中下游最大的支流, 发源于秦岭南麓, 干流经陕西、湖北两省, 于武汉市汇入长江, 全长 1570 余 km。流域集水面积 15.9 万 km², 地势西北高, 东南低。

汉江流域位于我国南北地理和气候分区的交界区域, 属亚热带季风区, 四季温暖, 干湿分明, 流域多年平均气温 14℃, 年平均相对湿度 74%, 年平均蒸发量 848 mm, 年平均降水量 928 mm, 水量丰沛, 但年内分配不均, 年际变化较大, 洪水多发生在 7~10 月, 暴雨强度大, 历时短, 在未来气候变化的情势下, 水文对其的响应将直接影响到生态环境及其产业结构。本文选择汉江流域的 41 个子流域作为研究对象, 比较 5 种不同潜在蒸散发计算公式情形下两参数月水量平衡模型径流模拟的精度。41 个子流域基本信息见表 2。

5. 应用与结论

将 5 种潜在蒸散发公式的计算结果分别代入两参数月水量平衡模型中, 对汉江流域 41 个子流域逐一进行计算, 得到最终的月径流模拟结果。

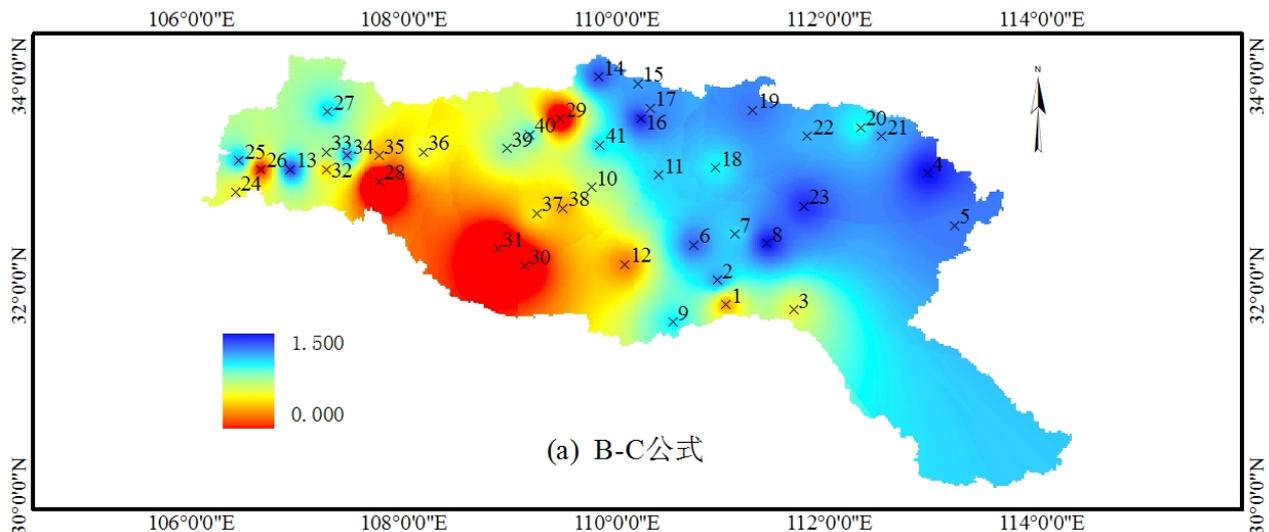
5.1. 参数率定结果分析

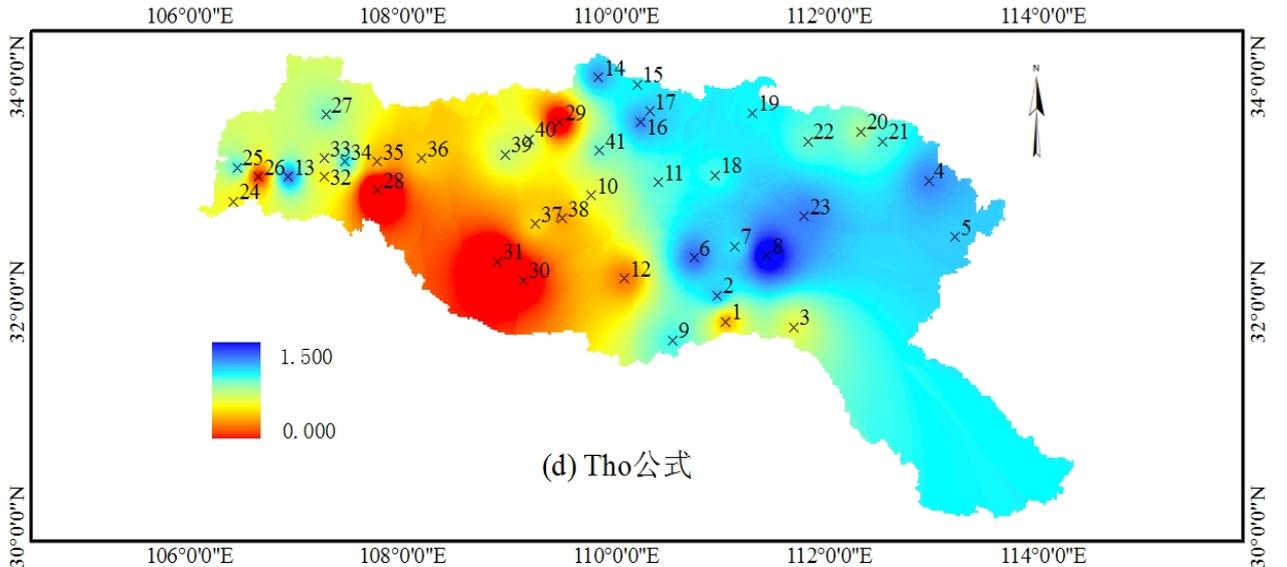
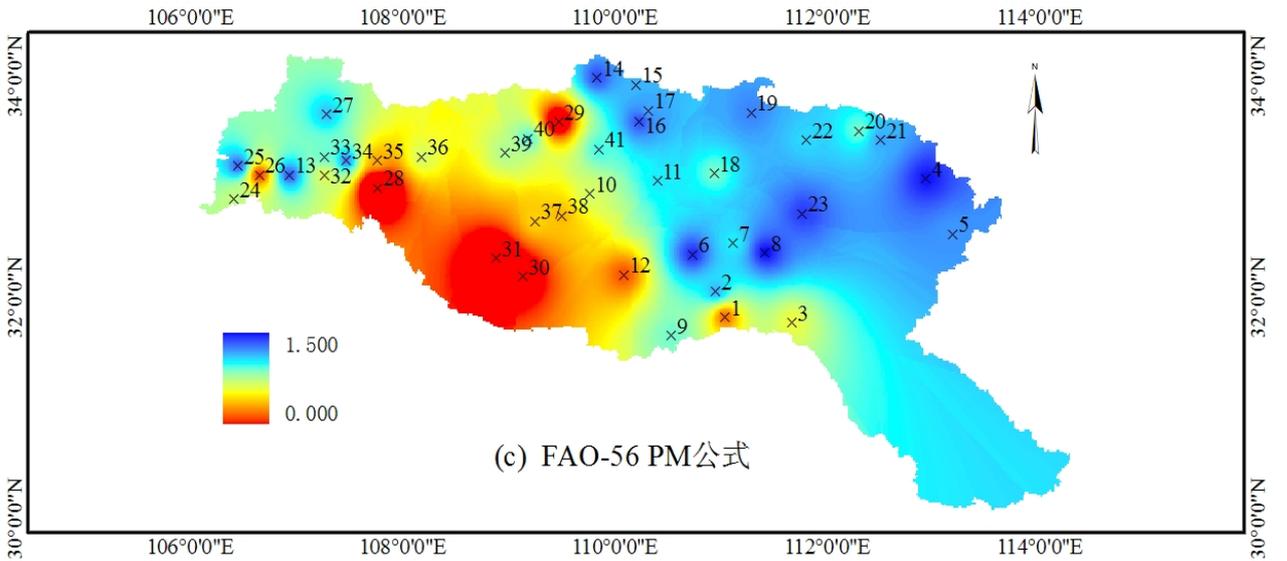
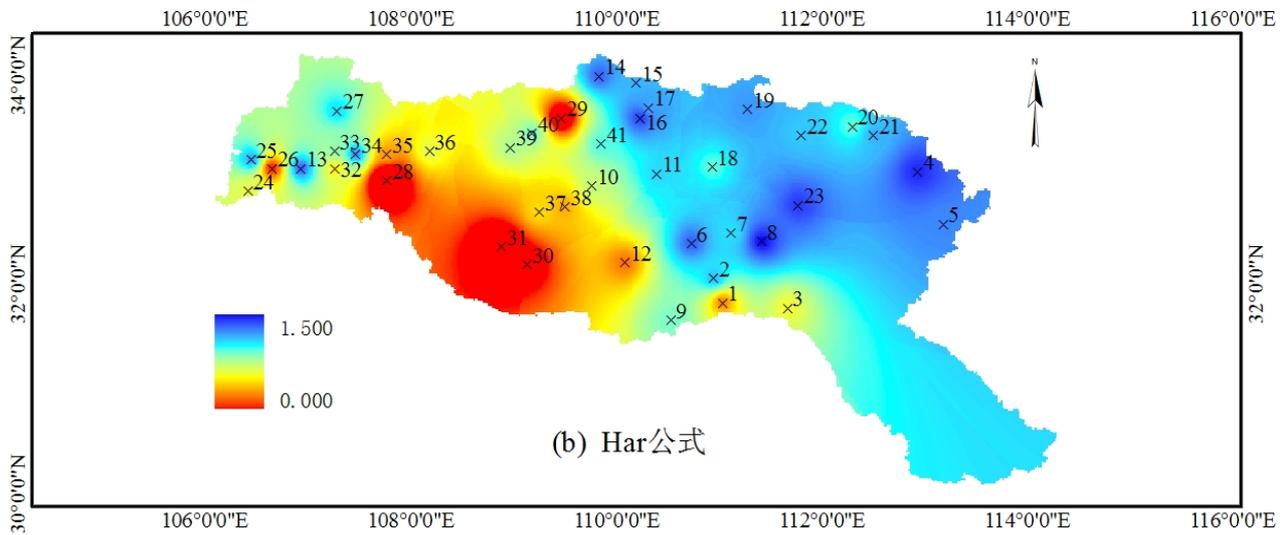
图 1 和图 2 分别为参数 c 和 SC 的空间分布图。从图中可以看出: 模型参数具有一定的地区分布规律, 反映了不同地区自然地理条件与降水径流之间的关系。

参数 c 介于 0.30~1.25 之间, 是潜在蒸散发与实际蒸散发之间的转化系数, 反应了不同流域不同潜在蒸散发公式计算结果与该流域实际蒸散发之间的关系。

Table 2. Forty one sub-catchments in Hanjiang Basin
表 2. 汉江流域 41 个子流域

序号	流域名称	面积(km ²)	年份	Nc (月)	Nv (月)	序号	流域名称	面积(km ²)	年份	Nc (月)	Nv (月)
1	台口	2073	1965~1989	240	60	22	后会儿	816	1958~1989	312	72
2	青峰	2082	1963~1989	264	60	23	半店	425	1955~1989	324	96
3	挽鱼沟	560	1965~1989	240	60	24	铁锁关	433	1966~1989	216	72
4	社旗	1044	1966~1989	240	48	25	茶店子	1683	1967~1989	192	84
5	平氏	748	1960~1989	324	36	26	元墩	449	1973~1989	168	36
6	解家河	425	1979~1987	84	24	27	江口	2501	1972~1989	180	36
7	草店	683	1960~1987	240	36	28	西乡	1224	1975~1989	144	36
8	花园	2601	1964~1987	192	96	29	大竹河	2651	1968~1989	192	72
9	白岩	690	1965~1989	228	72	30	红椿	933	1980~1989	96	24
10	蜀河	581	1969~1989	192	60	31	六口	1749	1981~1989	84	24
11	贾家坊	1281	1960~1989	288	72	32	南沙河	243	1967~1989	204	72
12	新洲	4660	1964~1989	240	72	33	升仙村	2143	1961~1989	264	84
13	孤山	322	1974~1989	108	84	34	长滩	237	1971~1989	168	60
14	麻街	326	1974~1989	168	24	35	西水街	911	1961~1989	288	60
15	板桥	493	1975~1989	144	36	36	两河口	2816	1967~1989	204	72
16	竹林关	951	1972~1989	132	84	37	县河口	772	1966~1989	228	60
17	武关	724	1959~1989	312	60	38	桂花园	1275	1964~1989	240	72
18	江湾	781	1959~1989	288	84	39	柴坪	2364	1969~1989	180	72
19	米坪	1404	1967~1989	216	60	40	青泥湾	1377	1965~1989	240	60
20	白土岗	1134	1963~1989	240	84	41	南宽坪	3936	1965~1989	240	60
21	口子河	421	1963~1989	264	60						





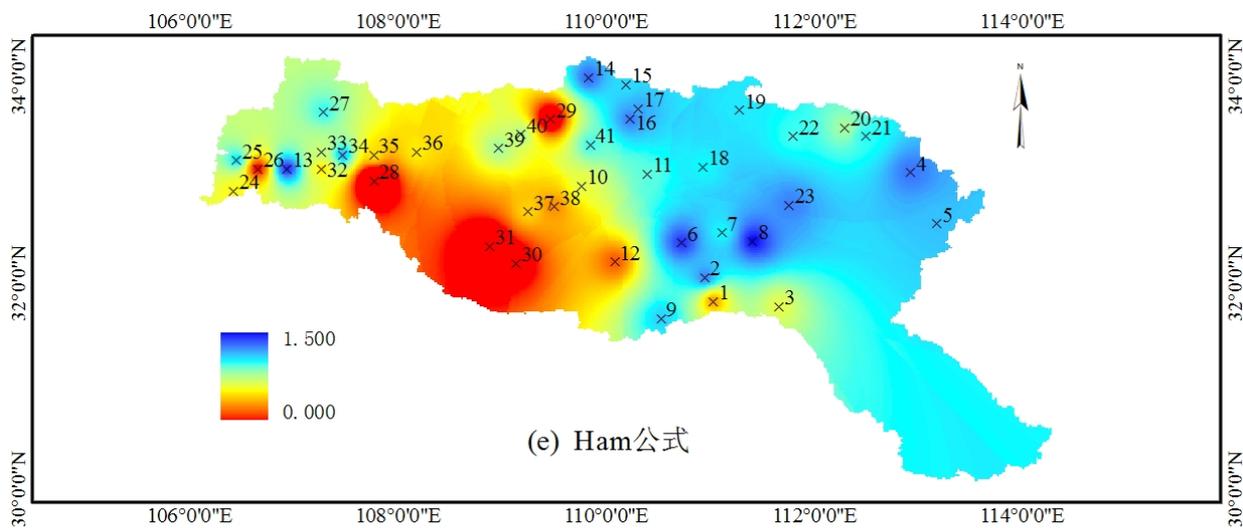
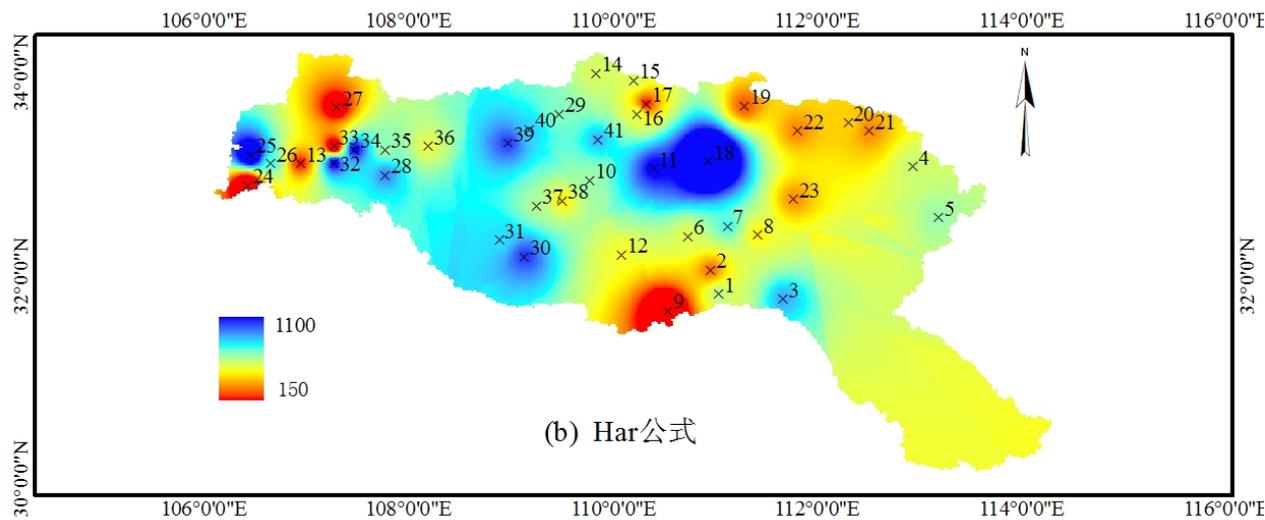
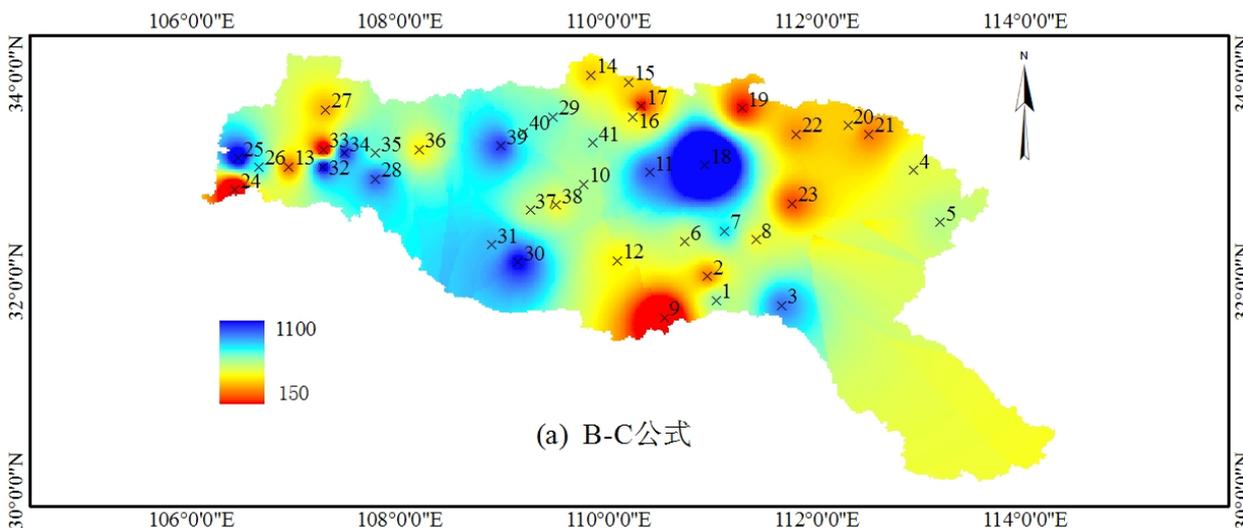


Figure 1. The spatial distribution of c using five potential evapotranspiration equations
图 1. 五种潜在蒸散发计算方法下参数 c 空间分布



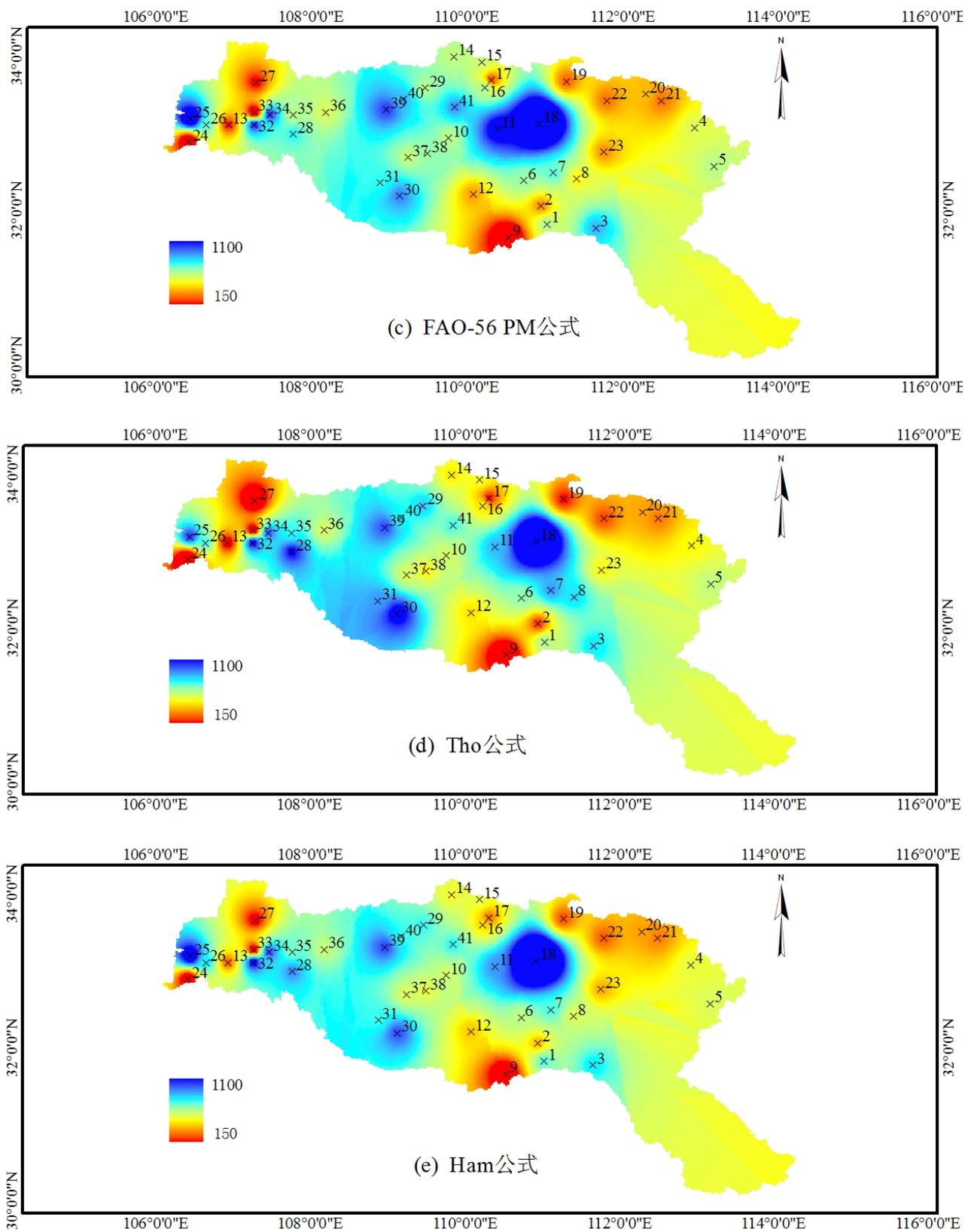


Figure 2. The spatial distribution of SC using five potential evapotranspiration equations
图 2. 五种潜在蒸散发计算方法下参数 SC 空间分布图

汉江上游参数 c 取值较小, 中游取值最大, 下游取值居中。参数 SC 介于 150 mm~1100 mm 之间, 表示流域最大蓄水能力, 反映了不同地区自然地理条件与流域土壤含水量之间的关系。整体上看, 使用 Tho 计算公式时, 流域平均蓄水容量 SC 最小; 使用 PM 计算公式, 流域平均蓄水容量 SC 最大。空间分布上, 流域上游土壤含水量较大, 江湾流域达到最大值, 约 1000 mm; 中下游土壤含水量较低。整体分布西北高东南低, 但是也有部分小流域出现了特殊情况, 例如上游的铁锁关、元墩、升仙村、江口附近, 流域土壤含水量略低; 下游的挽鱼沟土壤含水量略高。

5.2. 径流模拟精度比较

图 3 描绘了使用 5 种潜在蒸散发计算公式时, 率定期模型效率系数大于某一个给定 R^2 取值的流域的个数占有子流域数目的比例, 图 4 为模型相对误差大于某一个给定 RE 取值的流域的个数占有子流域数目的比例。从图中可以看出, 对每一个潜在蒸散发计算公式, 两参数月水量平衡模型总体上都达到了较

好的模拟效果。无论是检验期还是率定期, 对每一个潜在蒸散发计算公式, 41 个子流域的 R^2 的平均值都在 80% 以上, RE 绝对值的平均值均小于 2%。

使用 Ham 公式计算潜在蒸散发时, 每一个子流域率定期和检验期的 Nash 效率系数 R^2 都达到 70% 以上。而且 41 个流域率定期和检验期的 R^2 组成的数据序列, 方差较小, 说明使用 Ham 法时, 41 个子流域的月径流模拟精度 R^2 波动性小, 均处于较高的模拟水平。Ham 法在率定期和检验期平均 RE 均为最小, 但是 RE 序列的方差较大, 仅次于 Tho 法, 说明 Ham 法用于不同子流域时, RE 波动性较大。

PM 法在率定期和检验期平均 R^2 为 84.46% 和 84.33%, 但是六口流域和县河口流域检验期 R^2 小于 70%, 模拟精度略差。Har 方法在率定期和检验期平均 R^2 为 84.38% 和 84.18%, 平均模拟精度较优, 但在六口流域和县河口流域检验期 R^2 小于 70%, 模拟精度略差。B-C 法在率定期和检验期平均 R^2 为 83.46% 和 83.82%, 但是除去同样模拟效果较差的六口和县河口流域外, 竹林关流域率定期模拟效果也未能达到 70%。

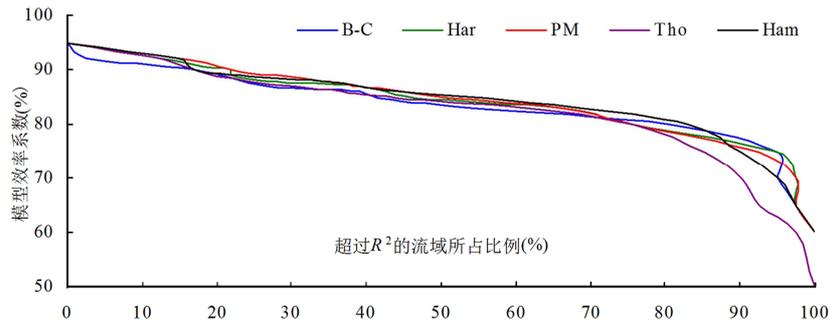


Figure 3. Percentage of catchments with the model efficiency greater or equal to the given R^2 value for five potential evapotranspiration equations in calibration period

图 3. 五种潜在蒸散发公式下率定期模型效率系数大于等于给定 R^2 的流域比例

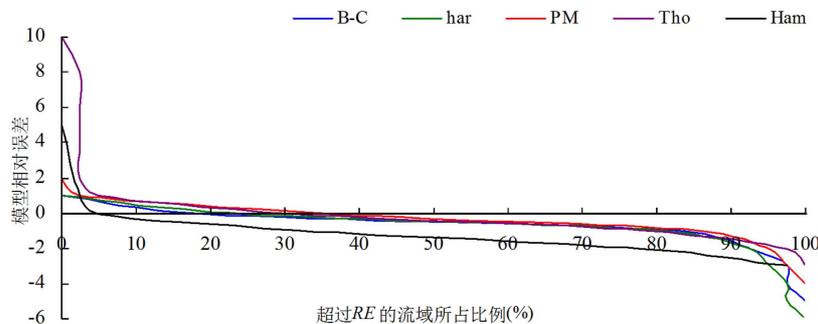


Figure 4. Percentage of catchments with the volumetric relative error greater or equal to the given RE for five potential evapotranspiration equations in calibration period

图 4. 五种潜在蒸散发下率定期流域相对误差大于等于给定 RE 的流域比例

Tho 法相对于其它 4 种方法是模拟效果最差的, 率定期和检验期平均 R^2 最低, 同时率定期有 3 个流域模拟效果小于 70%, 竹林关流域率定期 R^2 仅 50.44%, 检验期有 5 个流域模拟效果小于 70%。 R^2 和 RE 序列方差也是最大的, 说明模拟精度的波动性也最大。可见使用不同潜在蒸散发计算公式, 流域径流模拟结果之间略有差距。

以模拟效果较好的 Ham 公式为例, 图 5 和图 6 分别描绘了铁锁关流域和两河口流域分别在率定期、检验期的模拟径流和实测径流过程, 从曲线图可以看到, 径流模拟效果良好。

5.3. 实际蒸散发和流域蓄水过程分析

对于径流模拟精度的评定除考虑模型效率系数和相对误差外, 还需考虑模拟的实际蒸散发过程和流域蓄水过程是否合理。图 7 和图 8 给出了不同潜在蒸散发公式下, 铁锁关流域在率定期(1972~1976 年)以及两河口流域在检验期各自的实际蒸散发量和流域土壤含水量的变化过程曲线。从图中可以看出: 流域

实际蒸散发拟合程度较高, 实际蒸散发年内变化剧烈, 雨季蒸发量大, 旱季蒸发较小; 而使用潜在蒸散发公式时, 流域土壤含水量略有差别, 但变化趋势相似, 土壤含水量从雨季开始, 逐渐增至最大值, 从旱季开始又逐渐降至最小。两者的变化规律符合一般性规律, 变化过程合理。

6. 总结与展望

本文采用 5 种不同的潜在蒸散发公式计算流域的月潜在蒸散发量, 将其带入两参数月水量平衡模型, 计算实际蒸散发, 同时利用 SCE-UA 算法自动率定模型参数, 较好的实现了汉江流域 41 个子流域月径流过程模拟。

结果表明: 利用 Ham 方法计算潜在蒸散发时, 所有子流域的 Nash 效率系数 R^2 在率定期和检验期都达到 70% 以上, 显示出较高的模拟精度, 平均偏差也是 5 种不同的潜在蒸散发估计公式中最小的。利用其它 4 种公式计算潜在蒸散发时, 个别流域出现了模拟精度略差的情况, R^2 小于 70%。其中, 使用 Tho 公式模拟

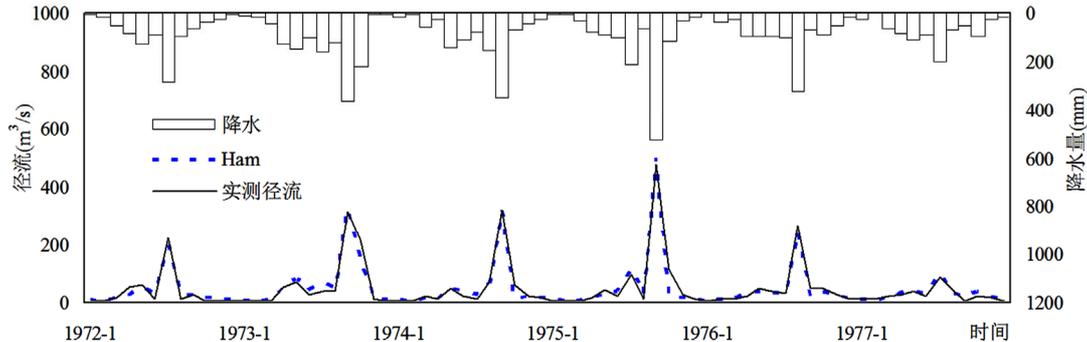


Figure 5. The process of actual and simulated runoff at the Tiesuoguan catchment in calibration period
图 5. 铁锁关流域率定期实际径流与模拟径流过程

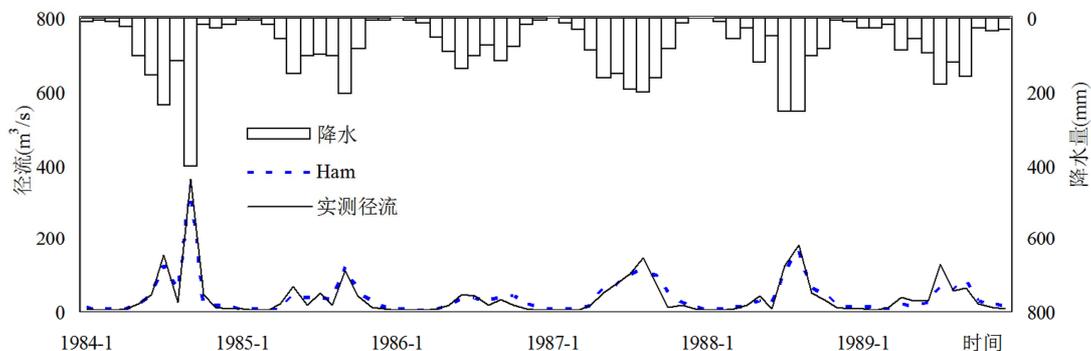


Figure 6. The process of actual and simulated runoff at the Lianghekou catchment in verification period
图 6. 两河口流域检验期实际径流与模拟径流过程

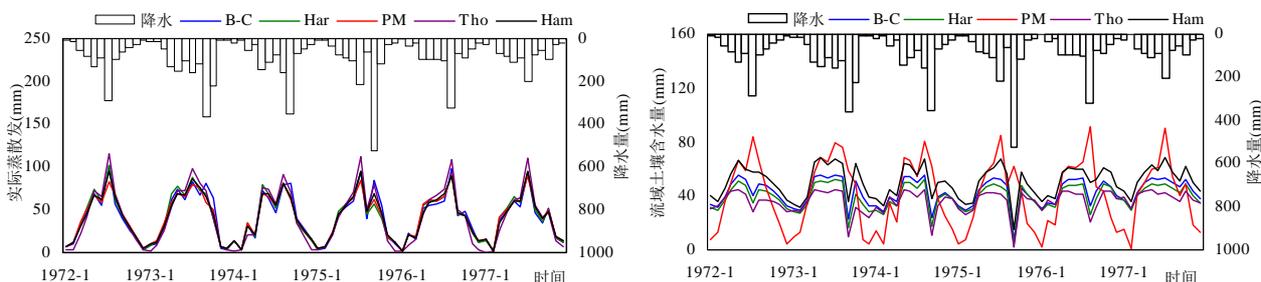


Figure 7. The process of actual evapotranspiration and soil water content at the Tiesuoguan catchment for five potential evapotranspiration equations in calibration period

图 7. 5 种不同潜在蒸散发公式下铁锁关流域率定期实际蒸散发以及流域土壤含水量变化过程

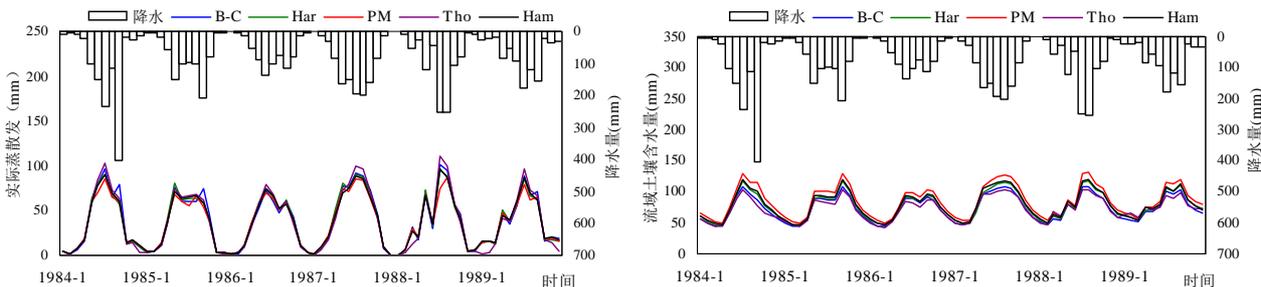


Figure 8. The process of actual evapotranspiration and soil water content at the Lianghekou catchment for five potential evapotranspiration equations in verification period

图 8. 5 种不同潜在蒸散发公式下两河口流域检验期实际蒸散发以及流域土壤含水量变化过程

精度最差。尽管使用不同的潜在蒸散发公式, 模拟精度略有差距, 但总体而言, 两参数模型都成功的模拟了汉江 41 个子流域的月径流过程, 对实际蒸散发和流域蓄水过程的模拟也比较合理。因此, 在汉江流域可以利用潜在蒸散发公式估计实际蒸散发并进行月径流模拟, 其结果精度可靠, 能够为流域供水、水资源合理配置提供依据, 对于该流域的中长期水文预报, 也具有一定的参考价值。

参考文献 (References)

- [1] THORNTHWAITE, C. W., MATHER, J. R. The water balance. Publications in Climatology. Lab. Drexel Institute of Technology, 1955, 8(1): 1-104.
- [2] PALMER, W. C. Meteorologic drought. US Weather Bureau Research Paper, 1965.
- [3] THOMAS, H. A. Improved methods for national water assessment, report, contract WR15249270. Washington DC: US Water Resources Council, 1981.
- [4] GUO, S. Impact of climate change on hydrological balance and water resources systems in the Dongjiang Basin, China. Modeling and Management of Sustainable Basin-Scale Water Resources, July 1995 LAHS Publ.No.231, 1995.
- [5] XIONG, L., GUO, S. A two-parameter monthly water balance model and its application. Journal of Hydrology, 1999, 216(1): 111-123.
- [6] ALLEY, W. M. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models. Water Resources Research, 1984, 20(8): 1137-1149.
- [7] VANDEWIELE, G. L., WIN, N. L. Monthly water balance models for 55 basins in 10 countries. Hydrological Sciences Journal, 1998, 43(5): 687-699.
- [8] XU, C. Y., SINGH, V. P. A review on monthly water balance models for water resources investigations. Water Resources Management, 1998, 12(1): 31-50.
- [9] 李帅, 熊立华, 万民. 月水量平衡模型比较研究[J]. 水文, 2011, 31(5): 35-41.
LI Shuai, XIONG Lihua and WAN Min. Comparison of monthly water balance models. Journal of China Hydrology, 2011, 31(5): 35-41. (in Chinese)
- [10] 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. Journal of Hydrology, 2005, 308(1-4): 105-121.
- [11] 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 Nianxiu, CHEN Xi, XUE Xianwu, et al. An applicability study of potential evapotranspiration models in Guizhou Province. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 357-363. (in Chinese)
- [12] 张晓琳, 熊立华, 林琳, 等. 五种潜在蒸散发方法在汉江流域的应用[J]. 干旱区地理, 2012, 35(2): 229-237.
ZHANG Xiaolin, XIONG Lihua, LIN Lin, et al. The application of five potential evapotranspiration equations in Hanjiang Basin. Arid Land Geography, 2012, 35(2): 229-237. (in Chinese)
- [13] ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, Rome, 1998: 1-300.
- [14] 刘晓英, 李玉中, 王庆锁. 几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 12-18.
LIU Xiaoying, LI Yuzhong and WANG Qingsuo. Evaluation on several temperature-based methods for estimating reference crop evapotranspiration. Transaction of CSAE, 2006, 22(6): 12-18. (in Chinese)

- [15] 王声峰, 段爱旺, 张展羽. 半干旱地区不同水文年 Hargreaves 和 P-M 公式的对比分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 29-33. WANG Shengfeng, DUAN Aiwang and ZHANG Zhanyu. Comparison and analysis of Hargreaves equation and Penman-Mon-teith equation during the different hydrological years in the semi-arid region. Transaction of CSAE, 2008, 24(7): 29-33. (in Chinese)
- [16] XU, C. Y., SINGH, V. P. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. Hydrological Processes, 2001, 15(2): 305-319.
- [17] PAPADOPOULOU, E., VARANOU, E., BALTAS, E., et al. Estimating potential evapotranspiration and its spatial distribution in Greece using empirical methods. 8th International Conference on Environmental Science and Technology, Lemnos Island, 8-10 September 2003: 650-658.
- [18] 唐丽霞, 张志强, 王新杰, 等. 晋西黄土高原丘陵沟壑区清水河流域径流对土地利用和气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2010, 34(7): 800-810. TANG Lixia, ZHANG Zhiqiang, WANG Xinjie, et al. Stream-flow response to climate and land use changes in Qingshui River watershed in the loess hilly-gully region of Western Shanxi Province, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(7): 800-810. (in Chinese)
- [19] 彭世彰, 徐俊增. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(6): 5-9. PENG Shizhang, XU Junzeng. Comparison of reference crop evapotranspiration computing methods. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(6): 5-9. (in Chinese)
- [20] 黄锡荃, 李惠明, 金伯欣. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992. HUANG Xiquan, LI Huiming and JIN Boxin. Hydrology. Beijing: China Education Press, 1992. (in Chinese)
- [21] NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [22] DUAN, Q. Y., GUPTA, V. K. and SOROOSHIAN, S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. Journal of Optimization Theory and Application, 1993, 76(3): 501-521.
- [23] SOROOSHIAN, S., DUAN, Q. Y. and GUPTA, V. K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. Journal of Hydrology, 1994, 158(3-4): 265-284.