

基于Budyko假设的岷江流域实际蒸散模拟研究

周君华, 尹铎皓, 范雲鹤, 刘铁刚

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室; 水利水电学院, 成都 610065)

摘要: 基于Budyko假设, 采用傅抱璞模型对1980—2010年岷江流域实际蒸散进行模拟, 将Mann-Kendall检验法、Pettitt突变检测法、反距离权重插值法用于分析实际蒸散的时空变化特征, 以灵敏度及Pearson相关系数为指标分析了岷江流域实际蒸散的主要影响因子。结果表明, 基于Budyko假设的傅抱璞模型对岷江流域实际蒸散的模拟效果较好。岷江流域多年平均实际蒸散在空间上呈自东南向西北逐渐减少的分布特征; 在研究时段内, 流域的多年平均实际蒸散呈显著下降趋势(通过99%置信度检验), 并于1991年发生显著性突变(通过90%置信度检验)。岷江流域实际蒸散的变化是多种因素共同影响的结果, 其中降雨是主要的气候影响因素。

关键词: Budyko假设; 模型; 实际蒸散; 时空趋势; 灵敏度

中国分类号: P339

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.01.019

周君华, 尹铎皓, 范雲鹤, 等. 基于Budyko假设的岷江流域实际蒸散模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(1): 107-112.

0 引言

在流域水文循环过程中, 蒸散是其中重要的一环^[1]。实际蒸散在流域尺度上难以直接测量, 通常使用间接方法估算^[2]。传统方法中常用水量平衡法计算流域实际蒸散, 但结果的准确性受水文资料完整性和模拟时间序列长短等情况的限制。为解决该问题, 前人提出了一系列蒸散理论及模型。在不同的水分供应条件下, 实际蒸散和潜在蒸散存在着正比^[3]或互补^[4]2种关系, 分别对应着“正比假设”和“互补理论”2种蒸散理论。另外, 实际蒸散还受到下垫面特征的影响, 而上述2种理论均未将其纳入到蒸散模型的建立过程中^[5]。为在互补理论及其模型基础上引入下垫面条件, Budyko提出了建立流域水量与能量耦合平衡方程的构想^[6]。在此假设基础上, 各国学者发展出很多衍生公式^[7-9], 分别验证了该假设的合理性。特别是我国学者傅抱璞通过量纲分析和数学推导得出了Budyko假设的解析表达式^[7], 为Budyko假设的应用提供了理论基础。孙福宝等^[10]、韩松俊等^[11]、杨大文等^[12]将Budyko假设应用于我国流域, 证实了该假设的合理性。尹铎皓等^[13]将傅抱璞模型应用在岷江上游流域分析, 模型有较好的适用性。然而, 目前对Budyko假设的普适性研究尚不充分, 一个流域的水热平衡经验关系很难直接应用到其他流域^[10]。岷江流域是长江上游及西南地区的典型流域, 兹基于Budyko假设, 将傅抱璞模型应用于岷江流域, 评价模型在岷江流域的适用性, 分析实际蒸散的时空变化特征和气候影响因子, 为流域水资源的科学管理提供一定参考。

1 研究区概况和基本资料

岷江流域位于102°26'—104°36' E, 28°11'—33°09' N, 流域面积13.6万km²。源于岷山南麓, 由北向南流经汶川县、都江堰市、乐山市, 到宜宾市后注入长江。河源至都江堰为岷江上游, 都江堰至乐山为岷江中游, 乐山至宜宾为岷江下游。研究区属亚热带气候, 年平均气温为11.03℃, 年均降雨量为1 093 mm, 其中5—10

收稿日期: 2015-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301021)

作者简介: 周君华(1996-), 女。主要从事生态水文及农业水利工程研究。E-mail: zhoujunhua_scu@163.com

通信作者: 刘铁刚(1979-), 男。讲师, 主要从事生态水文及农业节水灌溉技术研究。E-mail: liutiegang_scu@163.com

月降雨量约占全年降雨量的80%^[14]。岷江流域是长江支流水量最大的流域,流域内自然资源和水能资源十分丰富。

采用岷江流域内10个气象站(图1)在1980—2010年期间的逐日气象数据,包括降雨量、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、日照时间、10 m处风速和大气压强。年径流采用流域出口处的高场水文站实测数据。

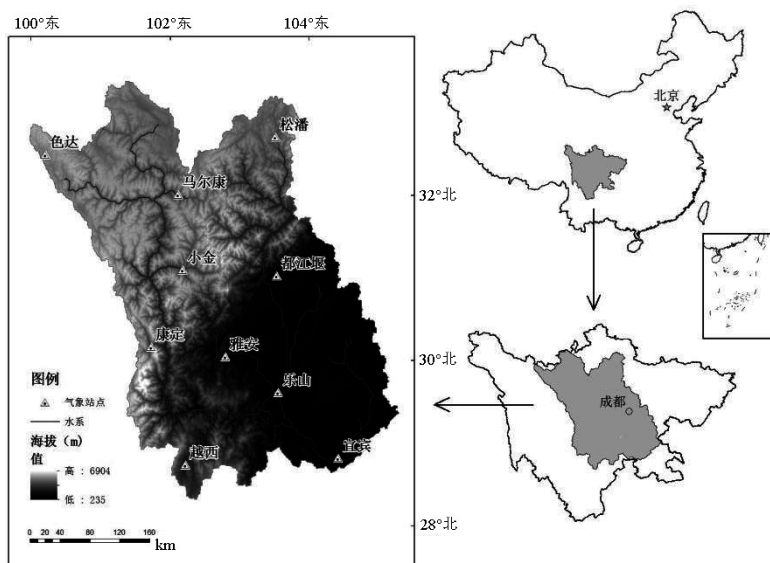


图1 岷江流域位置示意图

2 研究方法

2.1 Budyko假设

流域的实际蒸散在年时间尺度上受潜在蒸散和降雨量等因素控制^[10]。Budyko^[6,15]认为,随着气候的逐渐干燥,流域的实际蒸散和降雨量将逐渐趋近,并由此给出了一个半经验表达式,认为年实际蒸散与年降雨量的比值是年潜在蒸散与年降雨量比值的函数,即:

$$\frac{E}{P} = f\left(\frac{E_0}{P}\right), \quad (1)$$

式中: E 为实际蒸散量(mm); E_0 为潜在蒸散量(mm); P 为降雨量(mm)。

基于Budyko假设,傅抱璞^[7]提出了由量纲分析和微分方程理论推导陆面蒸发计算公式,即:

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P}\right)^\omega\right]^{1/\omega}, \quad (2)$$

式中: ω 为积分常数,取值范围 $(1, \infty)$,可表示下垫面(地形、土壤、植被等)的调蓄作用^[12]。采用基于Budyko假设的傅抱璞模型计算实际蒸散量。其中,潜在蒸散使用世界粮农组织提出的Penman-Monteith公式^[16]计算。

2.2 模型识别与验证

当前,水量平衡法是计算流域实际蒸散较常用的方法,经常使用该方法评价其他模型的模拟精度^[13]。将水量平衡法计算结果用于评价年实际蒸散的模拟精度,水量平衡方程为:

$$P = E + R + \Delta W, \quad (3)$$

式中: E 为流域年实际蒸散(mm); R 为流域出口处测得的年径流量(mm); ΔW 为流域蓄水量的年变化量(mm)。在年平均尺度上的水量平衡计算中,一般可不考虑流域蓄水量的变化^[11]。

采用试错法率定模型参数 ω ,将逐年相对误差(Re)和均方根误差($RMSE$)作为参数精度的检验标准,计

算公式为:

$$Re_i = (E_{sim,i} - E_{obs,i}) / E_{obs,i} , \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{sim,i} - E_{obs,i})^2} , \quad (5)$$

式中: n 为时间序列长度; $E_{sim,i}$ 和 $E_{obs,i}$ 分别为第 i 年模型模拟和水量平衡法计算的年实际蒸散量(mm)。通过调整 ω ,使 Re 和 $RMSE$ 最小。兹将研究时间序列分为2个阶段,用1980—2000年的数据率定模型中的参数,称为识别期;其他有实测径流值的年份(2001—2010年)用来验证模型的精度,称为验证期。

2.3 时空变化趋势分析

将Mann-Kendall非参数检验方法用于岷江流域年实际蒸散长期变化趋势的显著性检验^[17]。检验中,认为时间序列数据 $(x_1, \dots, x_n)$,是 n 个独立同分布的样本;当样本数大于10时,统计量 (Z) 计算式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} , \quad (6)$$

式中: S 为统计变量, $S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$; $\text{Var}(S)$ 为方差, $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。

采用已被广泛应用于水文、气象序列的非参数检验方法:Pettitt突变检测法进行岷江流域年实际蒸散的突变研究^[18]。该检验选用Mann-Whitney的统计函数 $U_{i,T}$,对于样本容量为 T 的连续独立同分布样本 $x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_T$, $U_{i,T}$ 和 $V_{i,T}$ 的计算公式为:

$$U_{i,T} = U_{i-1,T} + V_{i,T} , \quad V_{i,T} = \sum_{j=1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) 。 \quad (7)$$

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:

$$p = 1 - e^{\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2} \right)} 。 \quad (8)$$

采用基于Arcgis平台的反距离权重插值法(IDW)分析岷江流域年实际蒸散的空间分布。该方法基于相近相似原理,以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,距离插值点越近的样本点赋予的权重越大。其计算式为:

$$Z_0 = \left[\sum_{i=1}^s Z_i \frac{1}{d_i^k} \right] / \left[\sum_{i=1}^s \frac{1}{d_i^k} \right] , \quad (9)$$

式中: Z_0 为流域内任一点的实际蒸散量; Z_i 为气象站点 i 的实际蒸散量; d_i 为站点 i 与相近气象站点间的距离; k 为距离的幂(一般取 $k=2$); s 为气象站点的数目。

2.4 实际蒸散影响因素分析

采用灵敏度作为实际蒸散对气候影响因子敏感性的定量标准。针对模型模拟的实际蒸散量,灵敏度是指在某一影响因子发生变化的情况下,模型输出的实际蒸散量结果发生变化的程度^[19]。计算公式为:

$$S_x = \frac{|ET(1.1X_i) - ET(0.9X_i)|}{ET(X)} , \quad (10)$$

式中: S_x 为灵敏度; X_i 为模型中某一参数;灵敏度越大,代表实际蒸散对该气候因子的变化越敏感。

Pearson相关系数法是衡量2个变量间相关关系的一种统计学方法。相关系数的大小由 r 值决定,反映了2个变量的线性相关程度。Pearson相关系数的计算公式为:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} , \quad (11)$$

式中： r 为相关系数。 $0 < r < 1$ 时，表示二变量正相关； $-1 < r < 0$ 时，表示二变量负相关。 $|r|$ 越大，二变量间的相关程度越密切； x_i, y_i 为2个变量的值； $\bar{x}, \bar{y}$ 为2个变量的平均值。为分析气候变量对实际蒸散影响的方向及趋势，兹将 y 取为年实际蒸散量， x 取为实际蒸散量的影响因素。

3 结果与分析

3.1 模型模拟结果

通过试错法对模型参数的不断调整，使得模型计算的实际蒸散量与水量平衡法计算结果的相对误差及均方根误差都尽可能小。由此确定，傅抱璞模型在岷江流域中的参数 ω 为1.53。模拟结果如图2、图3所示。总体来说，参数率定后的傅抱璞模型与水量平衡法计算的多年实际蒸散量变化趋势基本一致，表明模拟精度较高，但模型计算的年实际蒸散量波动幅度相对较小。根据误差统计结果(表1)，在识别期(1980—2000年)用水量平衡法确定的多年平均实际蒸散量为363.8 mm，模型模拟结果的相对误差为1.34%；在验证期(2001—2010年)用水量平衡法确定的多年平均实际蒸散量为373.6 mm，模型模拟结果的相对误差为-2.16%。

表1 年实际蒸散模型模拟结果统计

识别期(1980—2000年)			验证期(2001—2010年)		
Re 变化范围/%	Re 均值/%	$RMSE/mm$	Re 变化范围/%	Re 均值/%	$RMSE/mm$
-13.97~18.43	1.34	24.90	-19.51~24.00	-2.16	24.46

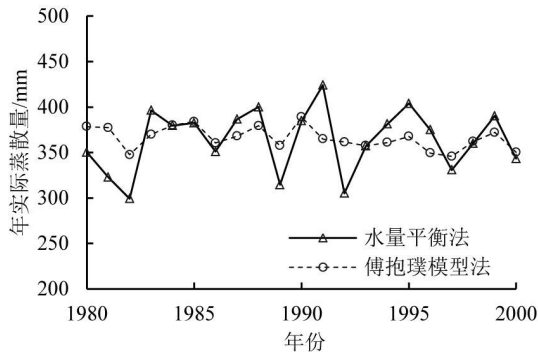


图2 识别期年实际蒸散量模拟结果

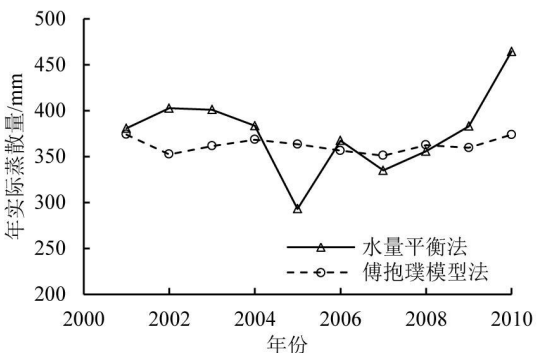


图3 验证期年实际蒸散量模拟结果

3.2 实际蒸散量在时间尺度上的变化特征

图4为傅抱璞模型计算的岷江流域实际蒸散年际变化情况。岷江流域多年平均实际蒸散量为364.8 mm。年实际蒸散量的最大值为389.1 mm，出现于1990年；最小值出现在1997年，为345.8 mm。M-K趋势检验结果显示，岷江流域年实际蒸散以4.4 mm/10a的速度呈现显著下降趋势(通过99%置信度检验)，图5显示，年实际蒸散量在1991年发生显著突变， P 值为0.945(通过90%置信度检验)， K_T 值为122。突变前后的年实际蒸散量平均值由389.1 mm降至364.9 mm，降幅达6%。

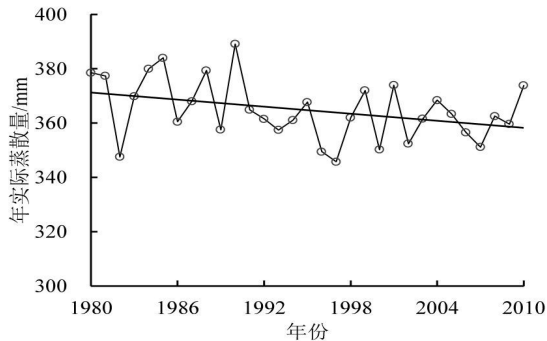


图4 多年实际蒸散量的年际变化

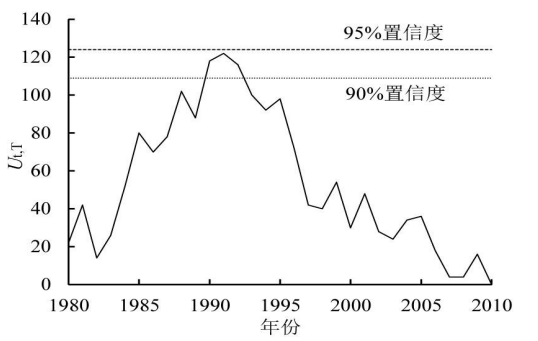


图5 突变点检测

3.3 实际蒸散量在空间尺度上的变化特征

利用反距离权重插值法分析岷江流域1980—2010年平均实际蒸散量的空间分布特征(图6)。总体上，

岷江流域多年平均实际蒸散量呈现从东南向西北逐渐减少的趋势。位于岷江中下游的雅安和越西站的多年平均实际蒸散量在各气象站点中较大,分别为422.3 mm和394.5 mm;岷江上游各气象站点的多年平均实际蒸散量相对较小,最小值出现在色达站,其多年平均实际蒸散量为296.4 mm。在岷江流域中游,雅安、成都、都江堰一带,等值线较为密集,说明该区域实际蒸散量的空间差异较大。

从空间变化趋势(图7)来看,除康定气象站的年实际蒸散发呈显著上升趋势(95%置信度)外,岷江流域绝大部分地区的年实际蒸散均呈现下降趋势,特别是流域东部实际蒸散量呈显著下降趋势(99%置信度)。

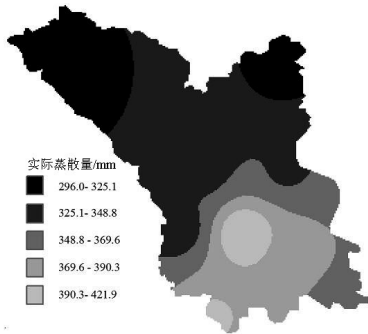


图6 多年平均实际蒸散量的空间分布



图7 实际蒸散变化趋势的空间分布

3.4 实际蒸散量的气候影响因素

影响实际蒸散量的气候因素众多,在基于Budyko假设的模型计算中,影响实际蒸散结果的变量为降雨、风速、平均气温、日照时间和相对湿度。兹采用灵敏度公式,定量化地表示年实际蒸散对上述5个气候因素变化的敏感性,用Pearson相关系数法分析气候变量对实际蒸散影响的方向及趋势,从而确定岷江流域实际蒸散的主要气候影响因子。从表2可以看出,在年尺度上,实际蒸散对降雨最为敏感,灵敏度达到了0.088;其次是相对湿度,对平均气温的敏感程度最小。年尺度上与实际蒸散呈显著正相关的气候因子是降雨和日照时间;呈显著负相关的是相对湿度。造成岷江流域实际蒸散在研究时段内下降的主要原因可视为降雨和日照时间的减少和相对湿度的增加。从Budyko假设角度来看,降雨和相对湿度可以反映流域的水量条件,而日照时间可以在一定程度上反映流域的能量条件。

表2 实际蒸散对气候因子的敏感度

气候因子	风速	平均气温	日照时间	相对湿度	降雨
灵敏度	0.012	0.003	0.036	0.051	0.088
相关系数	0.145	-0.114	0.280	-0.301	0.343
趋势	-0.121	0.036	-0.012	0.106	-2.021

4 结 论

- 1)基于Budyko假设,采用傅抱璞模型模拟了1980—2010年岷江流域的实际蒸散量,通过试错法率定的模型参数 ω 为1.53,模型模拟精度较好。
- 2)岷江流域1980—2010年平均实际蒸散量呈现显著下降趋势(99%置信度),下降速率为4.4 mm/10 a,并于1991年发生显著突变(90%置信度)。
- 3)岷江流域多年平均实际蒸散总体上呈东南向西北逐次减少的空间分布特征;流域绝大部分地区的年实际蒸散均呈下降趋势,特别是流域东部实际蒸散呈显著下降趋势(99%置信度)。
- 4)岷江流域实际蒸散的变化是多种因素共同影响的结果,其中降雨是主要的气候影响因素。

参考文献:

[1] CHAHINE M T. The Hydrological Cycle and Its Influence on Climate[J]. Nature,1992, 359(6 394):373-380.
[2] 冯雪,蔡研聪,关德新,等. 浑太流域实际蒸散的时空变化特征及影响因素[J]. 应用生态学报,2014,25(10): 2 765-2 771.
[3] PENMAN H L. Evaporation: an introductory survey[J]. Netherland Journal Agricultural Science,1956,4(1): 9-29.
[4] BOUCHET R J. Evapotranspiration reelle at potentielle, signification climatique[J]. International Association of Hydrological Sciences Publication, 1963,62:134-142.

- [5] 李修仓. 中国典型流域实际蒸散发的时空变异研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2013.
- [6] BUDYKO M I. Climate and Life[M]. Academic, San Diego, California,1974.
- [7] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学,1981,5(1):23-31.
- [8] CHOUDHURY B J . Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model [J]. Journal of Hydrology,1999,216(1/2):99-110.
- [9] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research,2001,37(3):701-708.
- [10] 孙福宝,杨大文. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究[J]. 水利学报,2007,38(4):409-416.
- [11] 韩松俊,胡和平,田富强. 基于水热耦合平衡的塔里木盆地绿洲的年蒸散发[J]. 清华大学学报(自然科学版),2008,48(12):2 070-2 073.
- [12] YANG D, SUN F, LIU Z, et al. Interpreting the complementary relationship in non-humid environments based on the Budyko and Penman hypotheses[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(18): L18402.
- [13] 尹铎皓,范雲鹤,周君华,刘铁刚. 基于傅抱璞模型的岷江上游流域实际蒸散发研究 [J]. 中国农村水利水电,2016(2):33-36.
- [14] 孟兆鑫,邓玉林,刘武林. 基于 RS 的岷江流域土壤侵蚀变化及其驱动力分析[J]. 地理与地理信息科学,2008,24(4):57-61.
- [15] BUDYKO M I. The Heat Balance of the Earth surface[M]. Washington: United State Department of Commerce, 1958.
- [16] ALLEN R G, PEREIR A L, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation and Drainage Paper 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [17] LI L J, ZHANG L, WANG H, et al. Assessing the impact of climate variability and human activities on stream flow from the Wuding River basin in China[J]. Hydrological processes,2007,21(25): 3 485-3 494.
- [18] PETTITT A N. A non-parametric approach to the change point problem[J]. Applied Statistics,1979,28(2):126-135.
- [19] LI F Q. Estimation of regional evapotranspiration through remote sensing[J]. Journal of Applied Meteorology,1999,38(11):1 644-1 654.

Simulation and Analysis of Actual Evapotranspiration in Minjiang River Basin Based on Budyko Hypothesis

ZHOU Junhua, YIN Duohao, FAN Yunhe, LIU Tiegang

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering,
College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: On the basis of Budyko hypothesis, Fu Baopu model was used to calculate the actual evapotranspiration in Minjiang River Basin during the period of 1980—2010. The Mann-Kendall statistical test, Pettitt test, and IDW interpolation method were selected to detect the spatial and temporal variations of actual evapotranspiration. The results showed that model had an acceptable performance in simulating the actual evapotranspiration (*ET*) in the study area. The annual actual *ET* had a significant decreasing trend at the 99% confidence level, with a decreasing trend from the southeast to the northwest. The sensitivity analysis revealed that the most important climate factor influencing the actual *ET* in Minjiang River Basin was precipitation.

Key words: Budyko hypothesis; model; actual evapotranspiration; temporal and spatial trends; sensitivity

责任编辑:赵宇龙