

Comparison of Simulation Methods for Annual Streamflow*

Shuai Li, Lihua Xiong

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: lishuai@whu.edu.cn

Received: Feb. 1st, 2013; revised: Feb. 19th, 2013; accepted: Mar. 8th, 2013

Copyright © 2013 Shuai Li, Lihua Xiong. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Based on the structure of two-parameter monthly water balance (TPMWB) model, two annual streamflow simulation methods, which were called as TPMWB-1 and TPMWB-2 respectively, were designed in this paper. For the TPMWB-1, observed monthly precipitation and potential evapotranspiration were taken as the inputs, monthly runoff was firstly simulated by using the TPMWB model, and the annual streamflow was subsequently calculated by the sum of the corresponding simulated monthly runoff. For the TPMWB-2, observed annual precipitation and potential evapotranspiration were taken as the inputs, and annual streamflow was then directly simulated. To provide a comparison with the simulation results of these two methods, the multiple linear regression (MLR) method was also used to estimate the annual streamflow. Finally, 52 sub-catchments in Dongjiang, Ganjiang and Hanjiang River Basins were chosen for comparison analysis of the runoff simulation results of 3 methods. The results show that all methods obtain good simulation results. From the successful application of TPMWB-2 methods it is concluded that the structure of TPMWB model is suitable and recommended to directly simulate the annual runoff in more humid and semi-humid regions.

Keywords: Annual Streamflow Simulation; Two-Parameter Monthly Water Balance Model; Multiple Linear Regression Method

年径流模拟方法比较研究*

李 帅, 熊立华

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: lishuai@whu.edu.cn

收稿日期: 2013年2月1日; 修回日期: 2013年2月19日; 录用日期: 2013年3月8日

摘 要: 基于两参数月水量平衡(TPMWB)模型的基本结构框架, 本文设计了两种年径流模拟方法(TPMWB-1 和 TPMWB-2)。TPMWB-1 方法以实测月降水量和蒸发量作为输入, 通过 TPMWB 模型首先得到模拟月径流量, 然后逐月累加得到模拟年径流量; 而 TPMWB-2 方法以实测年降水量和蒸发量作为 TPMWB 模型输入, 直接得到模拟年径流量。作为比较, 多元线性回归(MLR)方法也被用于年径流模拟。在东江、赣江和汉江流域的 52 个子流域上对 3 种方法进行了年径流模拟。研究发现, 3 种方法均取得了令人满意的模拟效果。TPMWB-2 方法在年径流模拟中的成功应用表明, TPMWB 模型结构也适合直接用于年时间尺度的径流模拟, 可在更多湿润或半湿润地区年径流模拟中推广应用。

关键词: 年径流模拟; 两参数月水量平衡模型; 多元线性回归方法

*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: 李帅(1987-), 男, 湖北汉川人, 博士研究生, 主要从事水文模型方面的研究。

1. 引言

河川年径流量是水资源中长期规划及管理的关键指标, 因此, 准确地模拟年径流量对区域水资源的宏观管理、合理开发及有效利用, 更好地制定区域社会经济发展规划具有十分重要的指导意义。目前, 年径流模拟方法主要有数理统计方法和数学物理模型方法两大类^[1]。随着数值计算技术的发展, 水文模拟同其它学科交叉产生的一些新方法也越来越多的被应用到年径流估计实践当中。例如, 人工神经网络方法^[2]、灰色系统方法^[3]、投影寻踪方法^[4]及均生函数方法^[5]等。然而, 随着模拟方法的深入发展和广泛应用, 研究者逐渐意识到绝大多数新方法虽然计算量非常大, 但是得到的模拟结果并不一定比传统经典方法得到的结果优良, 而且缺乏明确的物理意义。

近年来, 为了满足水资源管理者在流域中长期水文模拟、水资源供需分析以及气候变化对大尺度区域水资源影响评估等方面的不同需要, 将已开发且较成熟的水文模型拓展应用到不同时间尺度的径流模拟中已成为水资源规划及管理过程中一个较为普遍的做法, 并在不少流域上得到了较好的验证^[6,7]。受此启发, 本文对熊立华等^[8,9]提出的两参数月水量平衡模型进行改进, 将模型从月时间尺度拓展到年时间尺度上。同时也采用多元线性回归方法对年径流进行估计。通过比较三种年径流估计方法在中国南方近 50 个流域上的应用效果, 以期为后来年径流模拟方法的改进提供一定参考。

2. 年径流模拟方法介绍

较长时间尺度(如月、年或多年)的水文过程往往已经概化掉存在于较短时间尺度的一些随机不确定因素, 因此, 长时间段的径流模拟一般要求水文模型在确保模拟精度的前提下, 具有结构简约、参数较少的特点。作为“九五”科技攻关重中之重项目“气候变化或异常对水文水资源影响评估系统”的重要研究成果, 两参数月水量平衡模型^[8,9](简称为 TPMWB 模型)就具有这样的特点。TPMWB 模型结构简单, 物理意义明确, 成功地应用于中国南方 70 个流域上, 获得了满意的效果。李帅等^[10]将 TPMWB 模型与其它 7 种月水量平衡模型从模型结构和径流模拟效果两方面进行比较分析, 进一步证实了 TPMWB 模型的上述

优点。

借鉴 TPMWB 模型在月径流模拟中的成功经验, 本文尝试将其应用于年径流模拟中。针对时间尺度的转换问题, 本文基于 TPMWB 模型得到两种年径流模拟方法, 分别记为 TPMWB-1 和 TPMWB-2 方法。1) TPMWB-1 方法: 以实测月降水量和蒸发量作为输入, 通过 TPMWB 模型首先得到模拟月径流量, 然后逐月累加得到模拟年径流量; 2) TPMWB-2 方法: 以实测年降水量和蒸发量作为 TPMWB 模型输入, 直接得到模拟年径流量。为了更加直观地体现两种方法的结构特征, 图 1 和图 2 分别给出了两种方法的设计思路。由于两种方法的设计思路不同, 所采用的状态变量因此并不完全一致, 两种方法中的变量符号及物理解释如表 1 所示。

与此同时, 为了与 TPMWB-1 和 TPMWB-2 方法的年径流模拟效果进行对比分析, 本文选取年降水量和年蒸发能力作为年径流量的主要影响变量, 采用多元线性回归方法(简称为 MLR 方法)^[11]对年径流量进行拟合。为了系统比较 3 种年径流估计方法的异同, 将三种方法的计算公式汇总于表 2。

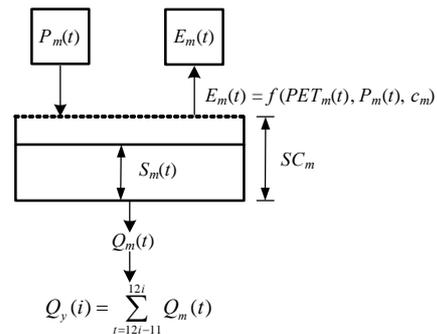


Figure 1. Design idea for the TPMWB-1 method
图 1. TPMWB-1 方法设计思路

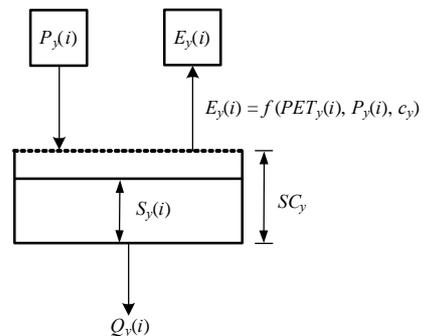


Figure 2. Design idea for the TPMWB-2 method
图 2. TPMWB-2 方法设计思路

Table 1. Variable symbols with physical explanations in 3 annual streamflow simulation methods
表 1. 变量符号及物理解释

符号	物理意义	备注
i	时间尺度/年	3种方法均采用
t	时间尺度/月	TPMWB-1方法采用
$P_m(t)$	月降水量/mm	TPMWB-1方法采用
$PET_m(t)$	月蒸发能力/mm	用月蒸发器(皿)观测值代替(TPMWB-1方法采用)
$E_m(t)$	月实际蒸发量/mm	TPMWB-1方法采用
$S_m(t-1)$	第 t 月初的流域土壤总含水量/mm	TPMWB-1方法采用
$S_m(t)$	第 t 月末的流域土壤总含水量/mm	TPMWB-1方法采用
$Q_m(t)$	月径流量/ m^3	TPMWB-1方法采用
$P_y(i)$	年降水量/mm	TPMWB-2 和 MLR 方法采用
$PET_y(i)$	年蒸发能力/mm	由逐月蒸发器(皿)观测值累加得到(TPMWB-2 和 MLR 方法采用)
$E_y(i)$	年实际蒸发量/mm	TPMWB-2方法采用
$S_y(i-1)$	第 i 年初的流域土壤总含水量/mm	TPMWB-2方法采用
$S_y(i)$	第 i 年末的流域土壤总含水量/mm	TPMWB-2方法采用
$Q_y(i)$	年径流量/ m^3	3种方法均采用

Table 2. Formulas of 3 annual streamflow simulation methods
表 2. 三种年径流估计方法公式汇总

方法	数学表达式	参数说明
TPMWB-1	$Q_y(i) = \sum_{t=12i-11}^{12i} Q_m(t)$ $Q_m(t) = (S_m(t-1) + P_m(t) - E_m(t)) \times \tanh\left(\frac{S_m(t-1) + P_m(t) - E_m(t)}{SC_m}\right)$ $E_m(t) = c_m \times PET_m(t) \times \tanh(P_m(t)/PET_m(t))$	c_m 为月蒸散发折算系数; SC_m 为流域月最大蓄水能力/mm
TPMWB-2	$Q_y(i) = (S_y(i-1) + P_y(i) - E_y(i)) \times \tanh\left(\frac{S_y(i-1) + P_y(i)}{SC_y}\right)$ $E_y(i) = c_y \times PET_y(i) \times \tanh(P_y(i)/PET_y(i))$	c_y 为年蒸散发折算系数; SC_y 为流域年最大蓄水能力/mm
MLR	$Q_y(i) = \beta_0 + \beta_1 P_y(i) + \beta_2 PET_y(i)$	β_0 、 β_1 和 β_2 为多元线性回归方程的偏回归系数

3. 年径流模拟比较

3.1. 目标函数和优化算法

为保证 3 种方法模拟结果的有效性和无偏性, 本文选用 Nash 效率系数 NSE 和模拟总量相对误差 RE 为目标函数进行参数率定, 两者的计算公式为:

$$NSE = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (1)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \quad (2)$$

式中, $Q_{obs,i}$ 为第 i 年的实测年径流量, $Q_{sim,i}$ 为第 i 年的模拟年径流量, n 为样本年数, $\overline{Q_{obs}}$ 为实测年径流量的平均值, 即 $\overline{Q_{obs}} = \sum_{i=1}^n Q_{obs,i} / n$ 。

显然, NSE 越接近于 1.0, 效率越高, 说明模拟效果越好; RE 越接近 0, 说明拟合的总精度越高。

事实上, 提高模型效率系数 NSE 和减少多年平均相对误差 RE 这两个目标是完全一致的^[9]。

由于微粒群算法(PSO)算法简单, 容易实现, 一般能够很快达到全局最优^[12]。因此, 本文采用 PSO 算法对 TPMWB-1 和 TPMWB-2 方法进行参数率定。

3.2. 资料

东江是珠江水系三大流域之一, 河口以上流域集水面积 34,144 km²。东江流域属亚热带季风气候, 年均降水量在 1500~2400 mm 之间, 流域内各地区的降水量随季节变化较大, 汛期 4~9 月降水量约占全年的 80%。赣江是长江鄱阳湖水系最大的一条河流, 流域集水面积 80,948 km², 地处东南季风区, 气候温和, 降水丰沛, 年平均降水量 1400~1800 mm, 季节分配不均匀, 4~6 月的降水量占年雨量的 50%, 洪水多发生在 5~6 月, 7~8 月受台风影响, 也可能出现较大洪水。汉江是长江的第一大支流, 流域集水面积 159,000 km², 地处副热带季风区, 流域气候温和湿润, 是南北气候分界的过渡地带。汉江流域多年平均降水量 897 mm, 季节分配不均匀, 5~10 月份的降水量占年雨量的 80%, 洪水多发生在 7~10 月份, 暴雨强度大, 历时短。

本文以珠江的东江流域, 长江的赣江和汉江流域作为研究对象, 从东江选用 8 个子流域、赣江选用 21 个子流域以及汉江选用 23 个子流域共计 52 个子流域来检验上述 3 种年径流估计方法的模拟效果。由于 52 个子流域资料系列长度普遍偏短, 平均资料年限小于 24 年, 最长资料年限不超过 35 年, 最短资料年限仅

为 8 年, 为了保证模拟结果的稳定性, 本文不设定检验期, 所有资料均用来率定 3 种方法中的参数。文中实测径流系列进行必要的还原, 月蒸发能力由当月蒸发器(皿)观测值代替, 年蒸发能力由逐月蒸发器(皿)观测值累加得到。

3.3. 结果分析与讨论

将 TPMWB-1、TPMWB-2 和 MLR 方法分别应用于东江、赣江和汉江流域的 52 个子流域, 图 3 描绘了 3 种年径流估计方法应用于各子流域后的效率系数 NSE 大于等于给定 NSE 的流域比例。从图中可以看出, 3 种方法的模拟效果均较好, 52 个子流域的平均 NSE 都在 80% 以上, 且所有子流域的 NSE 均超过了 50%。其中, TPMWB-1 方法的模拟效果最好, 平均 NSE 达到 88.58%, 且所有子流域的 NSE 都在 68% 以上。MLR 方法表现次之, 平均 NSE 达到 86.17%。TPMWB-2 方法表现最差, 但平均 NSE 也在 83% 以上。

尽管效率系数 NSE 在本文中作为判断 3 种方法模拟好坏的主要指标, 但多年平均径流的相对误差 RE 同样控制在相对合理的范围内。图 4 给出了 TPMWB-1、TPMWB-2 和 MLR 方法分别应用于各子流域后的相对误差 RE 大于等于给定 RE 的流域比例。从图中可以看出, MLR 方法的年径流拟合总精度最高, 在所选的 52 个子流域中, 所有子流域的 RE 均控制在 $\pm 0.5\%$ 的范围之内。TPMWB-1 和 TPMWB-2 方法的年径流拟合总精度相近, 其中, 近 80% 子流域的 RE 落在 $\pm 1\%$ 之间, 近 90% 子流域的 RE 落在 $\pm 2\%$ 之间, 所有子流域的 RE 均落在 $\pm 5\%$ 之间。

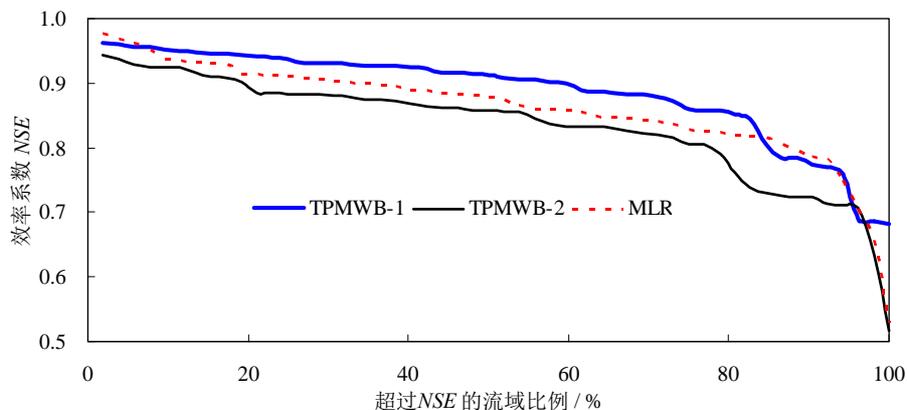


Figure 3. Percentage of catchments with NSE value calculated from 52 sub-catchments using 3 annual streamflow estimation methods greater than or equal to a given NSE value

图 3. 三种年径流估计方法应用于各子流域后的效率系数 NSE 大于等于给定 NSE 的流域比例

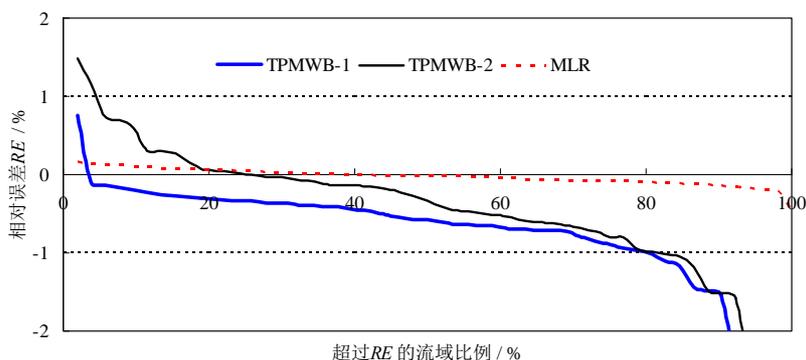


Figure 4. Percentage of catchments with RE value calculated from 52 sub-catchments using 3 annual streamflow estimation methods greater than or equal to a given RE value

图4. 三种年径流估计方法应用于各子流域后的效率系数 RE 大于等于给定 RE 的流域比例

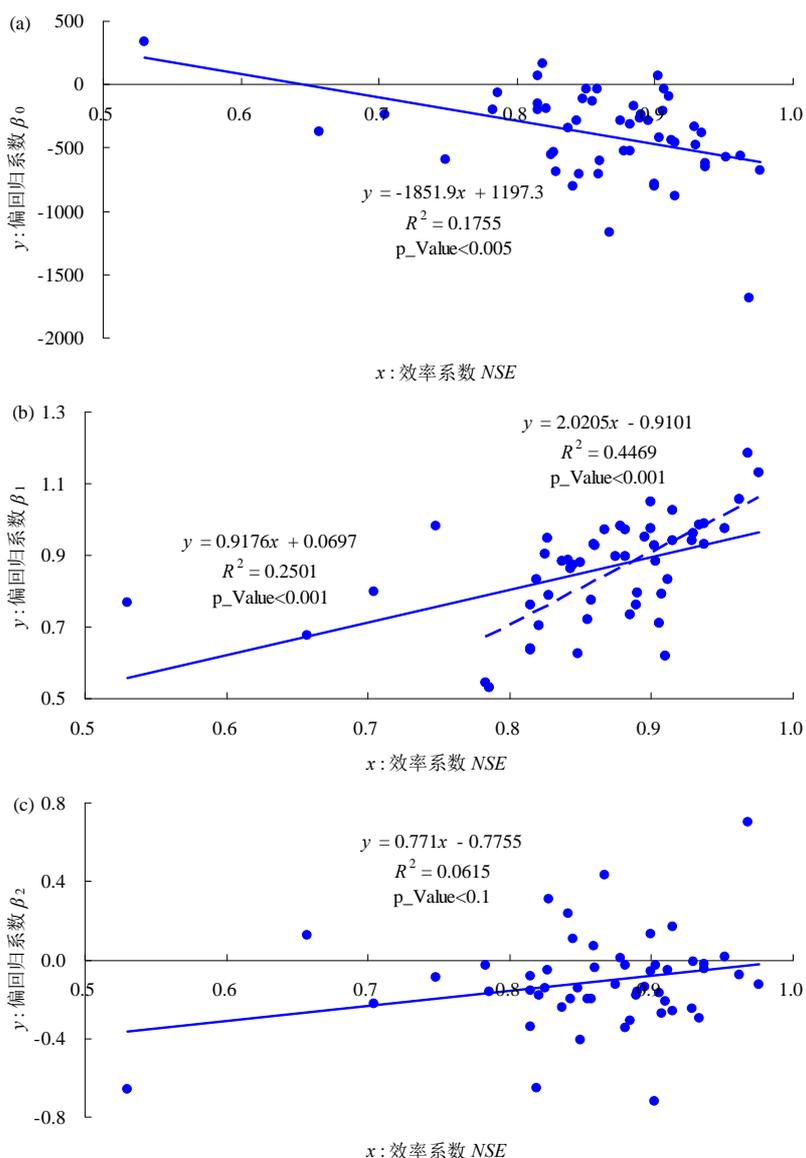


Figure 5. Correlation between the partial regression coefficients (a) β_0 , (b) β_1 , and (c) β_2 in multiple linear regression (MLR) method and nash-sutcliffe efficiency NSE for annual streamflow simulation

图5. MLR 方法中偏回归系数(a) β_0 , (b) β_1 及(c) β_2 与年径流模拟效率系数 NSE 的相关关系

从上述结果分析中可以发现, 对于本文提出的两种年径流估计方法(TPMWB-1 和 TPMWB-2), TPMWB-1 方法与 TPMWB 模型结构相同, TPMWB-2 方法与 TPMWB 模型结构稍有差异, 但 TPMWB-1 和 TPMWB-2 方法均获得令人满意的模拟效果, 这表明, TPMWB 模型结构同样给年径流量的有效估计提供了一个合理的假定, 那就是, 年径流量也可以被认为是年土壤含水量的双曲正切函数。

基于数学物理模型的 TPMWB-1 和 TPMWB-2 方法在年径流模拟中表现优良, 基于数理统计原理的 MLR 方法同样获得了令人满意的效果。在 MLR 方法中, 年降水量 $P_y(i)$ 和年蒸发能力 $PET_y(i)$ 作为年径流量 $Q_y(i)$ 的两个主要影响变量, 从物理机制上讲, $P_y(i)$ 越多, $Q_y(i)$ 越大, $Q_y(i)$ 与 $P_y(i)$ 之间理应呈正相关关系, 即偏回归系数 $\beta_1 > 0$; 而 $PET_y(i)$ 越强, $Q_y(i)$ 越小, $Q_y(i)$ 与 $PET_y(i)$ 之间理应呈负相关关系, 即偏回归系数 $\beta_2 < 0$ 。为了进一步探讨 MLR 方法中参数估计值在研究区域的统计规律, 图 5 给出了

MLR 方法中偏回归系数 β_0, β_1 及 β_2 分别与年径流模拟效率系数 NSE 的散点图。从图中可以看出, 在三个参数中, β_1 与 NSE 的关系最为密切, 存在显著的正线性相关关系, 而且当剔除少数模拟效果相对较差的点 ($NSE < 0.75$) 时, 确定性系数 R^2 存在明显的提升 ($R^2 = 0.25 \rightarrow 0.45$, 如图 5(b)所示); β_0 与 NSE 的相关关系次之, 且绝大多数 β_0 的估计值小于 0; 相关性最差的为 β_2 。从图 5(c)中可以发现, β_2 的估计值有正有负, 这与基于物理机制的预判存在一定的出入, 这表明, 尽管 MLR 方法得到的模拟结果并不比基于数学物理模型方法得到的结果差, 但其片面追求模拟结果数学意义上的最优, 致使参数估计值缺乏必要的物理解释。

最后, 为了具体比较基于数学物理模型(TPMWB-1)和基于数理统计原理(MLR)的年径流估计方法的模拟效果, 图 6 绘出了东江顺天流域模拟和实测年径流过程。从图中可以看出, TPMWB-1 和 MLR 方法的模拟精度均较高。

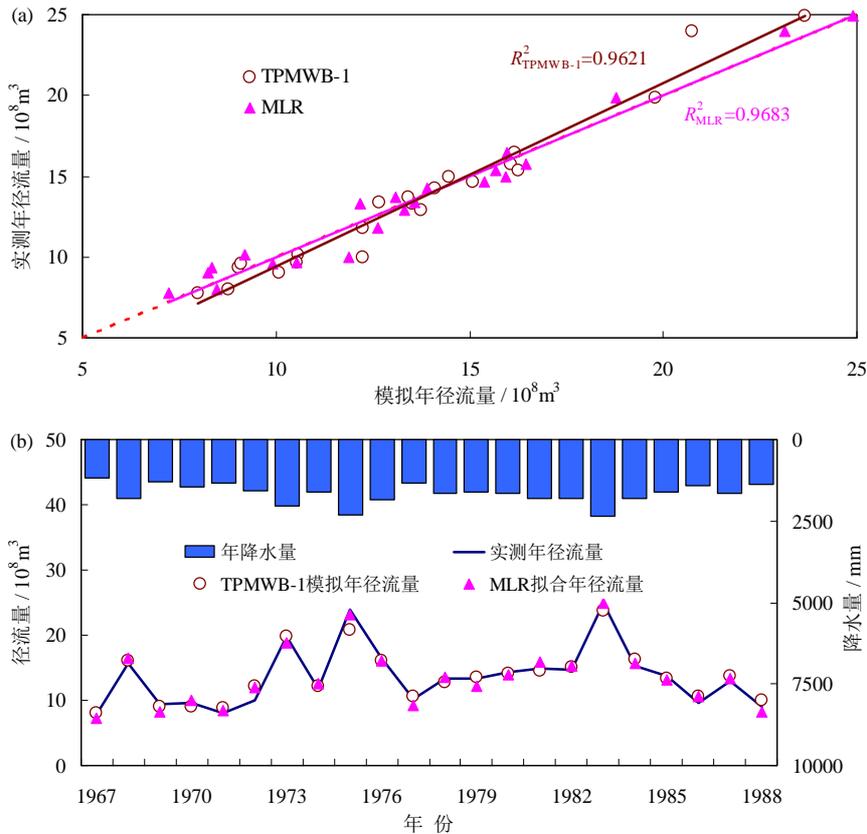


Figure 6. Scatter diagram of observed and simulated annual streamflow at Shuntian catchment in Dongjiang Basin (a) and the graph of observed and simulated annual streamflow for the same catchment (b)
图 6. 东江顺天流域实测和模拟年径流散点图(a)和年径流过程(b)

4. 结语

流域年径流量是水资源评价与合理配置利用的重要依据, 因此, 开展年径流模拟方法的比较研究对于准确掌握区域水资源现状, 实现区域经济可持续发展具有十分重要的现实意义。在两参数月水量平衡(TPMWB)模型的基本结构框架下, 本文设计了两种年径流估计方法(TPMWB-1 和 TPMWB-2), 同时引入多元线性回归(MLR)方法对年径流量进行拟合并与 TPMWB-1 和 TPMWB-2 方法的模拟结果进行对比分析。在东江、赣江和汉江流域的 52 个子流域上对 3 种年径流估计方法进行了应用效果检验。结果发现, 3 种方法均获得了令人满意的模拟效果。TPMWB-1 和 TPMWB-2 方法在年径流估计中的成功经验表明, TPMWB 模型的结构同样适合于年时间尺度的径流模拟, 可在更多湿润或半湿润地区的年径流模拟中推广应用。

参考文献 (References)

- [1] 乔西现, 蒋晓辉, 黄强, 等. 年径流预测的遗传模拟退火门限自回归模型[J]. 应用科学学报, 2006, 24(4): 424-428.
QIAO Xixian, JIANG Xiaohui, HUANG Qiang, et al. Annual runoff prediction based on GA and simulated annealing. *Journal of Applied Sciences*, 2006, 24(4): 424-428. (in Chinese)
- [2] 冯平, 丁志宏, 韩瑞光, 等. 基于 EMD 的降雨径流神经网络预测模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(1): 152-158.
FENG Ping, DING Zhihong, HAN Ruiguang, et al. Precipitation-runoff forecasting ANN model based on EMD. *System Engineering-Theory & Practice*, 2009, 29(1): 152-158. (in Chinese)
- [3] 李力, 沈冰, 李荣峰, 等. 水电站入库径流量的灰色自记忆预测方法研究[J]. 应用科学学报, 2007, 25(2): 198-201.
LI Li, SHEN Bing, LI Rongfeng, et al. Gray self-memory of inflow to hydropower station reservoir. *Journal of Applied Sciences*, 2007, 25(2): 198-201. (in Chinese)
- [4] 乔云峰, 夏军, 王晓红, 等. 投影寻踪法在径流还原计算中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 6-10.
QIAO Yunfeng, XIA Jun, WANG Xiaohong, et al. Estimation of restoration of annual runoff series by using projection pursuit method. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2007, 26(1): 6-10. (in Chinese)
- [5] 刘洪兰, 张俊国, 董安祥, 等. 张掖市水资源利用现状及未来趋势预测[J]. 干旱区研究, 2008, 25(1): 35-40.
LIU Honglan, ZHANG Junguo, DONG Anxiang, et al. Analysis on the actuality of water resources utilization and its future prediction in Zhangye City, Gansu Province. *Arid Zone Research*, 2008, 25(1): 35-40. (in Chinese)
- [6] 夏军, 叶爱中, 乔云峰, 等. 黄河无定河流域分布式时变增益水文模型的应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, 15(4): 457-465.
XIA Jun, YE Aizhong, QIAO Yunfeng, et al. An applied research on distributed time-variant gain hydrological model in Wuding River of Yellow River. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2007, 15(4): 457-465. (in Chinese)
- [7] ZHANG, L., POTTER, N., HICKEL, K., et al. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework-model development and testing. *Journal of Hydrology*, 2008, 360(1-4): 117-131.
- [8] XIONG, L. H., GUO, S. L. A two-parameter monthly water balance model and its application. *Journal of Hydrology*, 1999, 216(1): 111-123.
- [9] 熊立华, 郭生练, 付小平, 等. 两参数月水量平衡模型的研制及其应用[J]. 水科学进展, 1996, 7(增刊): 80-86.
XIONG Lihua, GUO Shenglian, FU Xiaoping, et al. Two-parameter monthly water balance model and its application. *Advances in Water Science*, 1996, 7(Suppl.): 80-86. (in Chinese)
- [10] 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, WAN Min. Comparison of monthly water balance models. *Journal of China Hydrology*, 2011, 31(5): 35-41. (in Chinese)
- [11] MYERS, R. H. *Classical and modern regression with applications* (2nd edition). Duxbury Press, California, 1990.
- [12] 谢晓锋, 张文俊, 杨之廉. 微粒群算法综述[J]. 控制与决策, 2003, 18(2): 129-134.
XIE Xiaofeng, ZHANG Wenjun and YANG Zhilian. Overview of particle swarm optimization. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 129-134. (in Chinese)