

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0094

王强, 夏军, 余敦先, 等. 时变增益模型在辽宁干旱半干旱流域的适用性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 35-41.
WANG Q, XIA J, SHE D X, et al. The applicability research of TVGM model in arid and semiarid watersheds of Liaoning Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 35-41. (in Chinese)

时变增益模型在辽宁干旱半干旱流域的适用性研究

王强¹, 夏军^{1,2}, 余敦先¹, 王福东³, 孙玉华³

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 辽宁省水文局, 沈阳 110003)

摘要: 自然流域属于典型复杂开放的系统, 水文要素的时空变化具有高度非线性的特点, 干旱半干旱流域尤其显著。因此, 针对干旱半干旱流域降雨径流非线性问题, 运用水文非线性时变增益模型(TVGM)、GR4J模型、总径流线性响应模型及线性扰动模型对辽宁省干旱半干旱流域日径流过程进行模拟分析, 从2个精度衡量指标对4个模型的应用效果进行较为深入的对比分析, 探究这4个模型在干旱半干旱流域降雨径流模拟中的适用性。结果表明: 在辽宁省干旱半干旱流域的水文模拟中, TVGM模型适用性最好、GR4J模型次之, 两种线性模型适用性较差。TVGM模型引入时变增益因子, 综合考虑了土壤湿度、降雨强度等产流的关键要素, 其模拟和验证效果都比较理想, 体现了该模型的特色和应用价值。

关键词: 时变增益模型; GR4J模型; 总径流线性响应模型; 线性扰动模型; 降雨径流模拟

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0035-07

The applicability research of TVGM model in arid and semiarid watersheds of Liaoning Province

WANG Qiang¹, XIA Jun^{1,2}, SHE Dunxian¹, WANG Fudong³, SUN Yuhua³

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. Hydrological Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

Abstract: Natural watershed is a typical complex open system, and the temporal spatial variation of hydrological elements is highly nonlinear especially in arid and semiarid watersheds. Therefore, focusing on the nonlinear relationship between rainfall and runoff in arid and semiarid watersheds, this paper applied the Time Variant Gain Model (TVGM), GR4J, Total Linear Response Model (TLR), and Linear Perturbation Model (LPM) to simulate the daily streamflow in Liaoning Province, China. We compared the application effects of the four models in terms of two accuracy measures to investigate the applicability of these four models in the simulation of rainfall and runoff in arid and semiarid watersheds. The results showed that the TVGM model was the best choice, followed by the GR4J model, whereas the two linear models performed poorly in the hydrological simulation of arid and semiarid watersheds in Liaoning Province. The TVGM model introduced the time variant gain factor and considered the key factors (e.g., watershed wetness and rainfall intensity) of runoff generation. It presented much more satisfying results than the other models during the calibration and validation periods. This is the characteristic and application value of TVGM model.

Key words: TVGM model; GR4J model; TLR model; LPM model; rainfall runoff simulation

收稿日期: 2017-10-30 修回日期: 2018-01-10 网络出版时间: 2018-06-22
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180620.1805.002.html>
基金项目: 国家自然科学基金(41571028)

Fund: National Natural Science Foundation of China (41571028)

作者简介: 王强(1990), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: qwang0718@whu.edu.cn

通讯作者: 夏军(1954), 男, 湖北孝感人, 中国科学院院士, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

径流过程是降雨通过流域调节,在时间和空间进行重新分配,即径流过程是流域对降雨的水文响应^[1]。由于受到降水时空模式及下垫面因素的影响,降雨径流关系呈现高度非线性。降雨径流转化过程中的非线性关系研究是水文学研究中最重要理论问题之一,也一直是国内外水文科学研究的热点问题和前沿课题^[2-6]。

水文模型是对自然界中复杂水循环过程的近似描述,是水文科学研究的一种手段和方法,也是对水循环规律研究和认识的必然结果^[7]。针对水文模型,国内外自 20 世纪 50 年代以来先后开展了一系列工作,大量的水文模型相继被提出,如 Stanford 模型、水箱(Tank)模型、PDM 模型、GR 系列模型、新安江模型、TOPMODEL 模型、MIKE 模型、SWAT 模型、VIC 模型等。根据模型对降雨径流物理过程的描述方式,可将水文模型分为系统模型、概念性模型和物理机制模型;根据模型对变量空间变化的描述程度,可将水文模型分为集总式模型和分布式模型。目前,分布式水文模型对物理机制描述完备,但其所需要数据资料较复杂,计算较为繁琐,且参数较多,异参同效明显,模型不确定性较大;系统模型及集总水文模型具有结构简单、对基础资料要求较低的特点,且从应用效果而言,系统模型及集总水文模型模拟精度不低于分布式水文模型。因此,从实际业务需求出发,迫切需要一种既能反映降雨径流非线性机理同时对资料适应性较强的水文模型。

在众多的水文模型中,我国学者夏军于 1989 年提出一种结构较为简单的水文非线性时变增益模型(TVGM)^[8-11]。该模型充分考虑产流过程中流域土壤湿度(土壤含水量)不同引起的产流量变化^[11-13],既可以表达为产流时变非线性的概念性参数模型,又可以表达为产汇流为整体的 Volterra 系统非线性响应模型。初步应用表明,季风气候影响下的半湿润半干旱地区和中小流域,TVGM 模型实际应用效果较好^[13-16]。

TVGM 参数少,在模型原理及结构方面具有一定特色,但目前该模型在国内干旱半干旱区域应用相对较少。因此,本文以辽宁省西部干旱半干旱区域流域为研究对象,在日尺度下对 TVGM 模型、GR4J 模型、总径流线性响应模型及线性扰动模型进行降雨径流模拟,通过对比,探究 TVGM 模型在干旱半干旱流域的适用性。

1 研究方法

1.1 时变增益模型(Time Variant Gain Model, TVGM)

以 Volterra 泛函级数为依据的水文非线性模

型,其参数辨识随展开阶数增大而更加困难,对实际应用造成巨大难题。基于此,我国学者夏军于 1989-1995 年期间在爱尔兰国立大学(UCG)参加国际河川径流预报研讨班时提出了水文非线性系统的时变增益模型(Time Variant Gain Model, 简记为 TVGM)^[9],模型结构如图 1 所示。非线性时变增益模型(TVGM)通过考虑土壤湿度(API),引入时变增益的概念,使用简单的产、汇流方程构建模型,避免了 Volterra 泛函级数辨识困难问题,从而使得较为复杂的基于 Volterra 泛函级数的水文非线性系统能够以一种较为简单的概念性模型进行表达。从理论上可以证明,TVGM 与具有普适性关系的 Volterra 非线性系统同构,而水文线性系统是该模型中的一个特例^[1]。

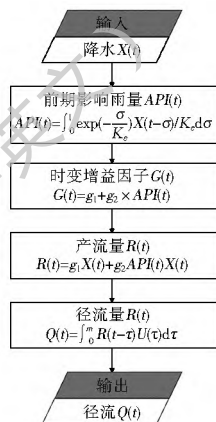


图 1 时变增益模型结构示意图

Fig. 1 The structure of TVGM model

TVGM 模型将降雨-径流之间的转化过程分为产流和汇流两个模块。在产流模块中,净雨量 R 表达为毛雨量 X 和系统增益因子 G 之积。

$$R(t) = G(t) X(t) \quad (1)$$

显然,从水文科学角度出发,系统增益因子 $G(t)$ 的概念应为流域的产流系数($0 \leq G(t) \leq 1.0$)。夏军通过全球 60 多个不同气候、下垫面条件流域水文长序列资料分析,发现降雨径流的增益因子并非常数,而是与土壤湿度有关系,为时变增益因子^[1]。

在流域汇流模块中,采用了简单的响应函数模型,即

$$Y(t) = \int_0^t U(\tau) R(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

式中: $U(\tau)$ 是系统的响应函数。

通过引入时变增益的概念,基于 Volterra 非线性泛函的复杂水文非线性系统识别过程能够用一种简单的水文系统概念性模型(TVGM)等价表达,二者在机理上相互关联。进一步的研究表明,TVGM 模型易于扩展到非线性季节扰动的水文系

统,且易于开展实时校正作业。

1.2 GR4J 模型(modé le du Gé nie Rural á 4 paramé tres Journalier, GR4J)

GR4J 是 Perrin^[17] 在 GR3J 模型基础上提出的一个具有 4 个参数的概念性降雨径流模型。该模型是 GR 系列模型中的日模型,经过了一系列学者的研究和推广,目前已经在包含干旱区在内的 400 多个区域接受了检验,广泛应用于国内外多个流域的水资源管理、洪水预报、枯水预报等方面^[17,20]。GR4J 模型分为产流和汇流两个模块,每个模块均有一个水箱进行产汇流计算,其基本结构如图 2 所示。产流阶段,GR4J 模型通过引入产流水箱方式将产流量与流域土壤湿度相关联;汇流阶段,GR4J 模型采用时段单位线进行汇流演算,汇流阶段将总产流量按照比例分为两部分,采用两条单位线进行汇流演算。

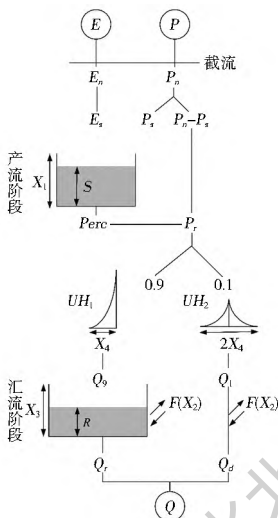


图 2 GR4J 模型结构示意图
Fig. 2 The structure of GR4J model

GR4J 模型主要有 4 个参数,分别是 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ,通过大量流域多年实例资料验证,GR4J 模型参数 80% 置信区间见表 1。

表 1 GR4J 模型参数意义及参数范围

Tab.1 The description and range for parameters of GR4J model

参数	含义	中值	范围区间(80% 置信区间)
X_1 /mm	产流水箱库容	350	[100, 1200]
X_2 /mm	地下水交换系数	0	[- 5, 3]
X_3 /mm	汇流水库库容	90	[20, 300]
X_4 /d	单位线汇流时间	1.7	[1.1, 2.9]

1.3 总径流线性响应模型(Total Linear Response Model, TLR)

总径流线性响应模型^[21,23]是由爱尔兰的 Nash 等人提出,该模型假定流域是一个线性、时不变、集

总的确定性水文系统,其降雨径流转化关系可以用一个线性卷积方程来进行描述:

$$y(t) = \int_0^t h(\tau)x(t-\tau)d\tau \quad (3)$$

式中: $x(t)$ 为流域面平均降雨量(输入); $y(t)$ 为流域出口断面的总径流量(输出); $h(\tau)$ 为系统作用函数或系统的响应函数。

总径流线性响应模型原理简单,思路清晰,易于计算,已广泛应用于生产实际,模型基本表达形式如下所示:

$$y(k) = G \sum_{i=1}^m u(i)X(k-i+1) + e(k) \quad (4)$$

式中: G 为增益因子(常数); $u(i)$ 为标准化的脉冲响应函数; $y(k)$ 为第 k 时刻的出流量; $X(k)$ 为第 k 时刻的流域平均降雨量; $e(k)$ 为误差,模型参数可根据历史资料采用最小二乘法估算。

1.4 线性扰动模型 (Linear Perturbation Model, LPM)

总径流线性响应模型模拟出的季节均值有均化的倾向,因此纳希等在 1983 年研制了线性扰动模型^[22,24,26],该模型假定扰动变量 $[X'(k), y'(k)]$ 之间存在线性关系,从而建立像总径流线性响应模型类似的线性扰动模型。

$$y'(k) = \sum_{j=1}^m H(j)X'(k-j+1) + e(k) \quad (5)$$

式中: $H(j)$ 为线性扰动系统响应函数; $e(k)$ 为误差; $y'(k)$ 和 $X'(k)$ 为输出和输入的扰动项,即输出(径流)和输入(降雨)对其季节均值的偏差。

2 研究区域与资料

2.1 研究区域

辽宁省西部属于干旱半干旱区域,其产流机制具有特殊性,在垂向上同时存在蓄满和超渗两种机制。为了对比不同水文模型在描述这种混合产流机制的适用性,同时避免流域空间尺度所带来的影响,本文选择辽宁省西部两个面积差异较大的流域进行研究,所选流域分别为东白城子流域和叶柏寿流域。其中,东白城子流域集水面积 2 070 km²,流域多年平均降雨量为 483.30 mm,多年平均蒸发量约为 1 746 mm。受东南亚季风影响,降雨时空分布不均,汛期 6 月-9 月占全年的 78.70%。东白城子流域内共有 10 个配套雨量站。流域地理及站点分布见图 3。叶柏寿流域集水面积 192 km²,属大陆性气候,干旱少雨,多年平均降水量 487 mm,且多集中在夏季,6 月-8 月降水占全年降水总量的 70% 以上。流域多年水面蒸发量为 1 938 mm,蒸发量远远

大于降雨量, 干旱指数达到 3.0 左右, 为辽宁省最干旱地区。叶柏寿流域内共有 5 个配套雨量站, 流域地理及站点分布见图 4。



图 3 东白城子流域雨量站分布

Fig. 3 The distribution of rainfall stations in the Dongbaichengzi catchment

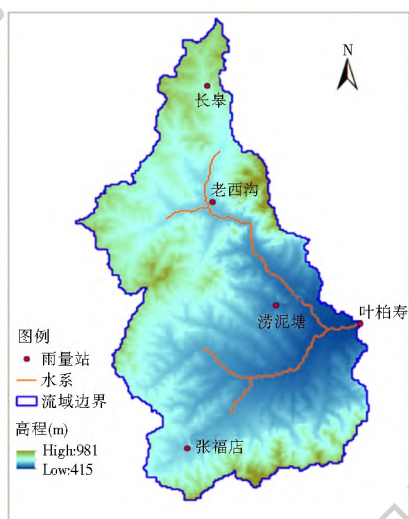


图 4 叶柏寿流域雨量站分布

Fig. 4 The distribution of rainfall stations in the Yebaishou catchment

2.2 研究资料

TVGM 模型、TLR 模型及 LPM 模型需要降雨和径流数据, 其中流域逐日面平均降雨量根据流域内雨量站观测资料采用泰森多边形法获得, 日径流数据是流域控制点的观测资料。GR4J 模型还需要流域潜在蒸散发数据。通过中国气象科学数据共享服务平台 (<http://data.cma.cn>) 获取流域附近气象站点常规气象资料(包括气温、风速、相对湿度、日照时数等), 采用 Penman-Monteth 公式计算各站点潜在蒸散发量^[27], 进而采用 IDW (inverse distance weighting) 进行空间插值, 获取研究区的流域逐日潜在蒸散发能力, 作为 GR4J 模型的输入。将资料序列分为两部分, 一部分用于率定期模型, 称为率定期; 一部分用于验证模型, 称验证期, 详情见表 2。

表 2 流域水文资料情况

Tab. 2 The hydrological data of the catchments

控制站	集水面积 / km ²	资料总长度 / a	率定期长度 / a	验证期长度 / a
东白城子	2 070	15(1966- 1980)	10(1966- 1975)	5(1976- 1980)
叶柏寿	192	10(1981- 1990)	7(1981- 1987)	3(1988- 1990)

3 结果分析与讨论

针对所选择辽宁省西部两个干旱半干旱流域的日径流模拟, 本文采用 TVGM、GR4J、TLR 和 LPM 模型进行模拟, 如表 2 所示划分模型率定期和验证期, 针对 TVGM 和 GR4J 模型采用 SCE-UA 算法^[28]自动优选参数, 针对 TLR 和 LPM 模型采用最小二乘法对系统增益及响应函数进行估算。为了比较四个模型在同一个流域水文模拟的表现, 本研究选取两种评价指标 Nash-Sutcliffe 效率系数 (NSE)、 R^2 确定性系数作为评估模型性能的评价指标。Nash-Sutcliffe 效率系数是一个正态统计方程, 它反映了观测值和对应模拟值之间的拟合程度, NSE 可利用下式计算:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_{obs} - Q_{sim})_i^2}{\sum_i (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})_i^2} \quad (6)$$

式中: Q_{sim} 和 Q_{obs} 表示径流模拟值和观测值; $\overline{Q_{obs}}$ 为径流平均观测值。

NSE 的变化范围为 $-\infty \sim 1$, 当 NSE 计算结果为 1 时, 可认为观测值与模拟值完全吻合; 当其值在 0.5~1 之间时, 模拟的结果可接受; 当 NSE 小于 0 时, 认为模型模拟结果较差。

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})_i (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})_i]^2}{\sum_i (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})_i^2 \sum_i (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})_i^2} \quad (7)$$

式中: Q_{obs} 与 Q_{sim} 与上式含义相同。当 R^2 值越接近 1, 表示实测和模拟值的相关程度越高。

表 3 列出了 TVGM、GR4J、TLR 和 LPM 四个模型在率定期和验证期的模拟精度评估, 图 5 给出了四个模型的径流模拟结果, 由于篇幅所限仅给出两个流域一年验证期的径流模拟过程。

从表 3 中可以得出, 在同一个流域, 综合考虑效率系数 NSE 和确定性系数 R^2 , 4 个模型模拟精度差异较大。对于东白城子流域, 在率定期, TLR 模型的 NSE 和 R^2 分别为 0.53 和 0.54, LPM 模型的表现与 TLR 模型相一致, GR4J 模型的 NSE 和 R^2 分别为 0.68 和 0.71, 而 TVGM 模型的 NSE 和 R^2 均为 0.85。虽然四种模型 NSE 效率系数均在 0.5 以上, 但相较 TVGM 模型和 GR4J 模型, 两种线性

模型(TLR 及 LPM)的 NSE 和 R^2 明显偏低,在模型验证期获得相似的结论,在率定期和验证期 TVGM 模型模拟结果略优于 GR4J 模型。对于叶柏寿流域,率定期 TVGM 模型的 NSE 和 R^2 均为 0.65,GR4J 模型的 NSE 和 R^2 均为 0.63,二者模拟结果较为相近,均有较好的表现,两种线性模型的 NSE 和 R^2 均小于 0.5,模拟效果较差;而在验证期 TVGM 模型模拟效果明显优于 GR4J 模型及两种线性模型。在东白城子流域率定期、验证期和叶柏寿流域的验证期,TVGM 模型模拟结果的 NSE 和 R^2 均达到 0.85 以上,显著优于其他三种模型,说明 TVGM 模型能够较好反映干旱半干旱流域降雨径流过程的非线性特征。

表 3 TVGM、GR4J、TLR 和 LPM 模型率定期和验证期结果

Tab. 3 The simulation results in calibration and validation periods of TVGM, GR4J, TLR, and LPM models

研究流域	模型	率定期		验证期	
		NSE	R^2	NSE	R^2
东白城子	TVGM	0.85	0.85	0.87	0.87
	GR4J	0.68	0.71	0.71	0.71
	TLR	0.53	0.54	0.36	0.44
	LPM	0.53	0.55	0.36	0.41
叶柏寿	TVGM	0.65	0.65	0.86	0.86
	GR4J	0.63	0.63	0.06	0.34
	TLR	0.46	0.47	-0.15	0.31
	LPM	0.47	0.48	-0.06	0.31

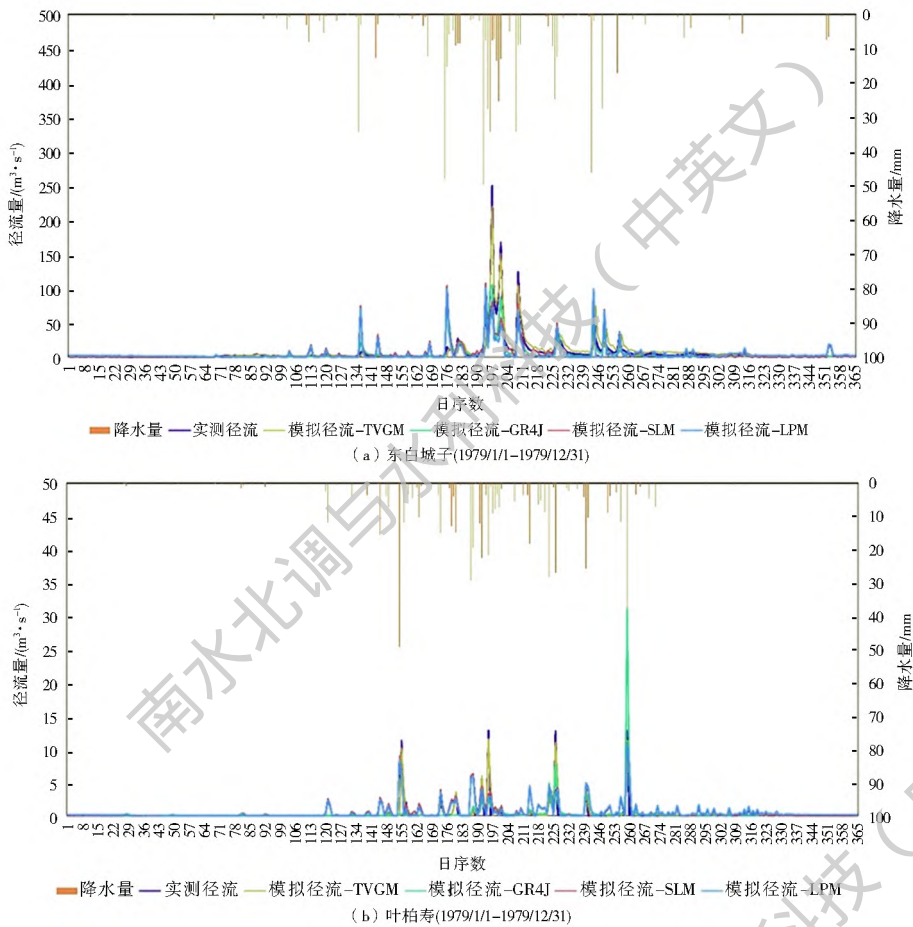


图 5 模型径流模拟结果

Fig. 5 The simulated runoff results in (a) Dongbaichengzi (1979/ 1/1- 1979/ 12/ 31) and (b) Yebashou (1990/ 1/ 1- 1990/ 12/ 31) by 4 models

图 5 分别给出了东白城子流域验证期 1979 年、叶柏寿流域验证期 1990 年的日径流模拟结果。通过四种模型模拟径流过程与实测径流过程对比,可以看出如下结果。

- (1) 总体而言,四种模型模拟值与实测值相比,都略偏低,但基本都能反映径流的实际变化趋势。
- (2) 两种线性模型在枯水期径流偏高、洪水期径流偏低,均化现象明显。分析其原因是线性模型

采用定常增益因子,只能表征流域多年平均状况,而东白城子、叶柏寿流域属于典型干旱半干旱区域,其降雨径流呈现陡涨陡落,非线性特点显著,因此线性模型在该区域应用效果较差。

- (3) TVGM 模型、GR4J 模型模拟径流过程与实测径流过程较为一致,径流模拟结果基本满足精度要求,洪峰及过程模拟较两种线性模型更好,其中 TVGM 模型模拟过程在洪峰量级和出现时间更接

近实测值。

综合表3和图5可以看出,TVGM模型和GR4J模型在精度评定和径流过程两方面均两种线性模型有明显提升。分析其原因,辽宁省西部干旱半干旱地区的降雨径流呈现垂向蓄满-超渗的复杂产流机制特点,产流量的多寡一方面与前期流域平均湿度有关,另一方面与降雨强度密切相关。两种线性模型(TLR和LPM)由于采用定常增益因子,其产流量的大小仅取决于降雨量,而未考虑流域前期湿度的影响,因而造成径流模拟均化严重,难以应用于干旱半干旱流域。相比之下,TVGM模型与GR4J模型在两个研究流域率定期取得相似的结果且TVGM模拟结果略优于GR4J模型,而在验证期TVGM模型显著优于GR4J模型。对比TVGM模型和GR4J模型,二者均具有结构简单、参数少、参数易于寻优、应用广泛的特点,其中TVGM模型从降雨径流非线性关系出发,综合考虑降雨强度、土壤湿度对产流的贡献,而GR4J模型将产汇流过程概化为产汇流两个水箱进行模拟。

通过这两个研究流域的相互对比可以发现,同一模型在东白城子流域的应用效果均优于叶柏寿流域。根据相关研究表明,中小流域水文非线性显著,且随着面积减小,其非线性程度加剧^[29-31]。因此,相较东白城子流域,叶柏寿流域面积更小,其降雨径流非线性特征更加显著,因而假定流域降雨径流关系为线性的TLR和LPM模型在叶柏寿流域的模拟效果明显劣于其在东白城子流域的应用。GR4J模型虽然在东白城子流域模拟效果较为理想,但其在叶柏寿流域验证期NSE与 R^2 分别为0.06和0.34,表明GR4J模型模拟精度不稳定,虽然存在较大潜力,但仍需要更多的干旱半干旱流域验证其适用性。TVGM模型是针对流域降雨径流非线性特征而提出的模型,因此针对降雨径流非线性更为显著的叶柏寿流域,TVGM模型能够更好的把握降雨强度和土壤湿度等影响产流的关键因素,模拟效果较其他模型更好。

4 结论

本文收集整理了辽宁省西部干旱半干旱流域日降雨径流资料,分别采用TVGM模型、GR4J模型和两种线性系统模型(TLR和LPM)对日径流过程进行模拟,结果表明:两种线性系统模型基于线性水文系统假定,采用定常系统增益因子,难以表达干旱半干旱流域复杂降雨径流非线性关系;GR4J模型有4个可以自动优选的参数,结构简单、方便实用,

在干旱半干旱流域应用效果较线性模型具有一定优势,但模拟精度不稳定,需要更多的干旱半干旱流域验证其适用性;TVGM模型从水文系统理论出发,综合考虑土壤湿度、降雨强度等影响产流的关键要素。在辽宁省西部干旱半干旱流域的水文模拟中,TVGM模型的模拟和验证效果都比较理想,说明用时变增益模型进行干旱半干旱流域日径流模拟的适用性,也说明了模型的特色和应用价值。

总体而言,TVGM模型具有结构简单、参数少、易于寻优的特点,避免了模型参数的“异参同效”现象,能够在一定程度上解决干旱半干旱流域水文非线性问题,具有良好的推广前景。笔者建议将该模型在我国其他干旱半干旱流域进行适用性评价,广泛开展应用研究,积累应用案例和经验,不断完善我国流域水文预报和模拟的技术方法。

参考文献(References):

- [1] 夏军. 水文非线性系统理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. (XIA J. Hydrological nonlinear system theory and method[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (in Chinese))
- [2] KASHANI M H, GHORBANI M A, DINPASHOH Y, et al. Comparison of volterra model and artificial neural networks for rainfall runoff simulation[J]. Natural Resources Research, 2014, 23(3): 34F-354. DOI: 10.1007/s11053-014-9235-y.
- [3] NAYAK P C, VENKATESH B, KRISHNA B, et al. Rainfall runoff modeling using conceptual, data driven, and wavelet based computing approach[J]. Journal of Hydrology, 2013, 493(13): 57-67. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.04.016.
- [4] VINAGRE M, BLANCO C, AMARANTE MESQUITA A. A nonlinear rainfall runoff model with a sigmoid gain factor to simulate flow frequency distribution curves for Amazon catchments[J]. Journal of Hydrology & Hydromechanics, 2011, 59(3): 145-156. DOI: 10.2478/v10098-011-0012-x.
- [5] BLANCO C J C, SANTOS S S M, QUINTAS M C. Contribution to hydrological modelling of small Amazonian catchments: application of rainfall runoff models to simulate flow duration curves[J]. Hydrological Sciences Journal/ journal Des Sciences Hydrologiques, 2013, 58(7): 1423-1433. DOI: 10.1080/02626667.2013.830727.
- [6] 刘玮丹. 基于ANN和TOPMODEL的新型降雨-径流模型构建研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013. (LIU W D. Study on structuring ANN and TOPMODEL-based new rainfall runoff model[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [7] 徐宗学. 水文模型: 回顾与展望[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 278-289. (XU Z X. Hydrological models: past, present and future[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2010, 46(3): 278-289. (in Chinese))
- [8] XIA Jun. A system approach to real-time hydrologic forecast in watersheds[J]. Water International, 2002, 27(1): 87-97. DOI: 10.1080/02508060208686981.

- [9] XIA J. Real-time rainfall runoff forecasting by time variant gain Models and updating approaches[R]. Ireland: UCG, 1995.
- [10] XIA Jun. Identification of a constrained nonlinear hydrological system described by Volterra functional series[J]. Water Resources Research, 1991, 27(9): 2415-2420. DOI: 10. 1029/91WR01364.
- [11] XIA J, O'CONNOR K M, KACHROO R K, et al. A nonlinear perturbation model considering catchment wetness and its application in river flow forecasting[J]. Journal of Hydrology, 1997, 200(1-4): 164-178. DOI: 10. 1016/S0022-1694(97)00013-9.
- [12] 王纲胜, 夏军, 朱一中, 等. 基于非线性系统理论的分布式水文模型[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 521-525. (WANG G S, XIA J, ZHU Y Z, et al. Distributed hydrological modeling based on nonlinear system approach[J]. Advance in Water Science, 2004, 15(4): 521-525. (in Chinese) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2004. 04. 022.
- [13] 宋星原. 时变增益水文模型的改进及实时预报应用研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002(2): 1-4. (SONG X Y. Research on real-time rainfall runoff forecasting by improved time variant gain model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002(2): 1-4. (in Chinese))
- [14] 王纲胜, 夏军. 含季节信息的时变增益水文系统模型[J]. 科技进步与对策, 2000, 17(12): 185-187. (WANG G S, XIA J. The time variant gain model with seasonal information[J]. Science & Technology Progress and Police, 2000, 17(12): 185-187. (in Chinese))
- [15] 宋星原, 邵东国, 夏军. 洋河流域非线性产汇流实时预报模型研究[J]. 水电能源科学, 2003, 21(3): 1-3. (SONG X Y, SHAO D G, XIA J. Research on real-time flood forecast model of nonlinear runoff and concentration for Yanghe basin[J]. Water Resources and Power, 2003, 21(3): 1-3. (in Chinese))
- [16] 万蕙, 夏军, 张利平, 等. 淮河流域水文非线性多水源时变增益模型研究与应用[J]. 水文, 2015(3): 14-19. (WAN H, XIA J, ZHANG L P, et al. Multisource time variant gain model and its application in Huaihe river basin[J]. Journal of China Hydrology, 2015(3): 14-19. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2015. 03. 003.
- [17] PERRIN C, MICHEL C, ANDRÉ ASSIAN V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1-4): 275-289. DOI: 10. 1016/S0022-1694(3)00225-7.
- [18] EDIJATNO, NILO DE OLIVEIRA NASCIMENTO, XIAOLIU YANG, et al. GR3J: a daily watershed model with three free parameters[J]. Hydrological Sciences Journal, 1999, 44(2): 263-277. DOI: 10. 1080/02626669909492221.
- [19] 邓鹏鑫, 王银堂, 胡庆芳, 等. GR4J 模型在赣江流域日径流模拟中的应用[J]. 水文, 2014, 34(2): 60-65. (DENG P X, WANG Y T, HU Q F, et al. Application of GR4J in daily runoff simulation for Ganjiang river basin[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(2): 60-65. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2014. 02. 012.
- [20] 邓鹏鑫, 胡庆芳, 王银堂, 等. GR 模型与新安江模型及两参数月水量平衡模型在赣江流域的降雨径流模拟比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 382-387. (DENG P X, HU Q F, WANG Y T, et al. Comparison of GR model, Xin'anjiang model, and WBM-DP model in rainfall runoff simulation in Ganjiang river basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(5): 382-387. (in Chinese) DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2014. 05. 002.
- [21] LIANG GENG-CHEN, J E NASH. Linear models for river flow routing on large catchments[J]. Journal of Hydrology, 1988, 103(1): 157-188. DOI: 10. 1016/0022-1694(88)90012-1.
- [22] 文康, 梁庚辰. 总径流线性响应模型与线性扰动模型[J]. 水利学报, 1986(6): 3-12. (WEN K, LIANG G C. The total linear response model (TLR) and the linear perturbation model (LPM)[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986(6): 3-12. (in Chinese))
- [23] 蔡素芳, 梅亚东, 陈洋波. 新安江模型与总径流线性响应模型的应用对比研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(9): 79-81. (CAI S F, MEI Y D, CHEN Y B. A comparative study of the application of Xin'anjiang model and total linear response model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(9): 79-81. (in Chinese))
- [24] J E NASH, B I BARS. A Hybrid Model for Flow Forecasting on Large Catchments[J]. Journal of Hydrology, 1983, 65(1): 125-137. DOI: 10. 1016/0022-1694(83)90213-5.
- [25] 梁庚辰, J E Nash. 大流域汇流演算的线性扰动模型[J]. 水力发电学报, 1991(2): 14-28. (LIANG G C, J E Nash. Linear perturbation model for river flow routing on large catchments[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1991(2): 14-28. (in Chinese))
- [26] SINGH V P, HYDROLOGIC SYSTEMS V I. Rainfall runoff modeling[M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1988.
- [27] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. Angstrom 公式参数对 ET₀ 的影响及 FAO 建议值适用性评价[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 644-652. (HU Q F, YANG D W, WANG Y T, et al. Effects of Angstrom coefficients on ET₀ estimation and the applicability of FAO recommended coefficient values in China[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(5): 644-652. (in Chinese) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2010. 05. 001.
- [28] DUAN Q, SOROOSHIAN S, GUPTA V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models[J]. Journal of Hydrology, 2015, 158(3-4): 265-284. DOI: 10. 1016/0022-1694(94)90057-4.
- [29] 夏军. 水文尺度问题[J]. 水利学报, 1993(5): 32-37. (XIA J. Scale Problems in hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993(5): 32-37. (in Chinese))
- [30] 刘丽芳, 刘昌明, 王中根, 等. 流域面积和降水量对中小流域水文效果影响分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2): 157-163. (LIU L F, LIU C M, WANG Z G, et al. Impacts of catchment area and rainfall on hydrological simulation in middle or small catchments[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49(2): 157-163. (in Chinese))
- [31] 芮孝芳. 水文学前沿科学问题之我见[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 95-102. (RUI X F. Discussion of some frontier problems in hydrology[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 95-102. (in Chinese) DOI: 10. 3880/j. issn. 10067647. 2015. 05. 013.