文章编号: 1672 - 3317 (2022) 12 - 0131 - 08

概念水文模型在漓江流域的适用性研究

阳扬^{1,2},翟禄新^{1,2,3*},贾艳红^{1,2},薛开元^{1,2}

(1.广西师范大学 环境与资源学院, 广西 桂林 541004;

2.珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 广西 桂林 541004;

3.广西漓江流域景观资源保育与可持续利用重点实验室,广西 桂林 541004)

摘 要:【目的】研究不同模型在漓江流域的适用情况。【方法】本文选用 45 个概念性水文模型模拟漓江流域 2008—2016年日径流量,从模型的结构特征、蒸散发以及产汇流计算等方面对模型进行比较分析,以揭示模型在流 域适用性的主要影响因素。【结果】MODHYDROLOG 模型作为漓江流域及相似流域水文模拟的最优选择,GR4J、 IHACRES 和 Hillslope 等模型也作为推荐模型。同时,径流模拟精度低的模型在模拟实际蒸散发和径流成分等方面 存在明显偏差,其中实际蒸散发的模拟不是径流模拟精度的决定性因素,而径流成分的划分则是影响模型适用性的 关键因素。此外,概化处理后的半分布式模型简化了运算过程的同时也会一定程度上影响模拟精度。【结论】 MODHYDROLOG、GR4J、IHACRES 和 Hillslope 等模型作为漓江流域及相似流域水文模拟的推荐模型。 关键词:水文学;模型;适用性;流域 中图分类号:TV11; P343.9 文献标志码:A doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022018 OSID:

阳扬, 翟禄新, 贾艳红, 等. 概念水文模型在漓江流域的适用性研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 131-138. YANG Yang, ZHAI Luxin, JIA Yanhong, et al. Comparison of Conceptual Hydrological Models for Lijiang River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 131-138.

0 引 言

【研究意义】流域水文模型作为一种数学模型, 从定量角度分析流域出口断面流量过程线的形成过 程,是模拟流域水文过程和探究流域水文规律的重要 理论基础^[1-5]。概念性水文模型是以水文现象的物理 概念作为模拟基础,其对产、汇流过程进行了一定程 度的概化,能够科学地表达水文循环机理,仅需较少 的参数即可进行模拟,可在缺少基础地理数据的研究 区应用,降低了开展水文模拟的难度,在实际应用中 较为简单,具有成本低、效率高、可操作性强等特点, 广泛应用于科学研究与生产实践中^[6]。

【研究进展】随着水利资源的开发利用以及防洪 调度的要求不断提高,流域水文模型是河川径流预报 的重要工具。Hengade等^[7]利用 VIC 模型对印度 Ashti 流域进行土地利用和气候变化评估,发现 VIC 模型模 拟流量与实测值具有良好一致性且评估结果满意。 Song 等^[8]将 Tank 模型和 TPHM 模型应用于韩国 41 个流域进行日尺度水文预报,发现 TANK 模型预报精 度还有待提高。王哲等[9]对新安江模型和 TOPMODEL 模型进行洪水预报,认为 TOPMODEL 模型考虑了地形指数的变化,从而对下垫面变化的径 流模拟具有优势,但因流量资料代表性较差,结果表 明新安江模型的径流模拟精度最高。此外,预估未来 气候变化情景下的径流响应规律也是水文模型在水 循环研究的一个重要内容。Yang 等[10]利用 SWAT 模 型模拟评价了未来土地覆被和气候变化下的中国华 北地区流域径流响应。王国庆等[11]利用 RCCC-WBM 模型模拟了黄河流域的未来水资源变化。孟玉靖等[12] 采用 BP 人工神经网络模型预估分析了 3 种 RCP 情景 下的黄河流域径流变化。近年来,国内外在模型的开 发、建立、校正等方面也取得了一些进展。Carenzo 等[13]在阿尔卑斯山区的冰川径流模拟中,利用能量平 衡模型的输出数据校准修正的温度指数模型。张淑敏 [14]针对森林流域的水文特点,结合降雨径流模型理论, 在蓄满产流模型的基础上,考虑森林植被变化因素, 建立反映森林流域特点的降雨径流模型。刘海滢[15]等 对传统降雨入渗产流模型(TGAM)进行修正,引入 膨胀性土壤导水系数和膨胀性土壤饱和含水率,提出 考虑土壤膨胀性影响的降水入渗产流模型(GJGAM)。

【切入点】现有水文模型都有各自的特点和适用 范围,且其校核结果与许多因素有关,如研究流域的 区域特征、模型的结构特性、数据的精确度和时间尺

收稿日期: 2022-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41867028,42061045,41261005) **作者简介:** 阳扬(1997-),女。硕士研究生,主要从事流域水文研究。 E-mail: yangyoungyeah@163.com

通信作者: 濯禄新(1970-), 男。教授, 教师, 博士, 主要从事气候变化的水文响应、流域生态水文过程和水热平衡等方面的研究。 E-mail: zhailuxin6931@163.com

度等,对模型本身结构特点的深入了解是模型研究与应用的基本前提。【拟解决的关键问题】本文选用 45 个典型概念性流域水文模型对漓江流域进行模拟,通 过分析模型的性能特点、蒸散发、产汇流计算方法等 方面,比较模型模拟结果的优劣及地区适用性,为漓 江流域乃至整个南方湿润地区的水文模拟中适宜模 型的筛选与应用提供借鉴。

1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区东北部的漓江流域, 发源于桂林市兴安县西北部的越城岭主峰猫儿山(海 拔2141.5m),自北向南流,属珠江流域西江水系,地 处东经110°07′39"—110°42′57",北纬24°38′10"— 25°53′59″^[16]。漓江干流流经兴安、灵川、桂林、阳朔、 平乐等市县,全长约214 km,面积约为1.23×10⁴ km²^[17], 流域呈南北狭长的树枝状分布(图1)。整体地势为北 高南低,北部为碎屑岩中低山地貌,中南部主要为低 山、丘陵、岩溶地貌,具有典型的喀斯特地貌特征^[18-19]。 研究区属亚热带季风性湿润气候,全年降水丰沛,大 部分地区全年降水量1500~2000 mm。本研究区范围 主要为漓江流域上游的桂林水文站以上流域,集水面 积约为2762 km²,建有青狮潭水库、川江水库、小溶 江水库和斧子口水库等水利工程^[17]。



Fig.1 Scope of Lijiang River Basin

2 流域水文模型简介

45 个模型结构见表 1,模型原理及说明参见文献[20]。

3 数据与方法

3.1 数据收集及参数优选

本文通过桂林水文水资源局收集了漓江流域桂林 水文站 2007—2016 年逐日径流和气象资料序列。模型 均用 Nelder-Mead 算法进行参数优化。Nelder-Mead 算 法是由 Nelder 和 Mead 于 1962 年在 Spendley 等^[21]工 作的基础上设计出新的单纯形搜索方法,该方法为求 解无约束优化问题的局部搜索算法,并无需目标函数 的任何导数信息。对于 *D* 个变量的函数最小化问题, Nelder-Mead 单纯形法使用反射、扩张、收缩和压缩等 操作,通过比较单纯形的 *D*+1 个顶点的目标函数值, 用新的点取代目标函数值最大的顶点,逐步迭代并不 断更新,最终逼近问题的最优解。

表1 模型参数及水库数量

Table 1	Model parameters and number of reservoirs				
模型名称	参数	水库	模型名称	参数	水库
	个数	个数		个数	个数
Collie river basin 1	1	1	GSFB model	8	3
Wetland model	4	1	MOPEX-3	8	5
Collie river basin 2	4	1	SMAR	8	6
Alpine model	4	2	Flex-B	9	3
GR4J	4	2	VIC model	10	3
Penman model	4	3	Flex-I	10	4
United States model	5	2	MOPEX-4	10	5
MOPEX-1	5	4	NAM model	10	6
HYMOD	5	5	SACRAMENTO model	11	5
New Zealand model v1	6	1	Tank model	12	4
Susannah Brook model v1-5	6	2	Xinanjiang model	12	4
Susannah Brook model v2	6	2	FLEX-IS	12	5
Collie river basin 3	6	2	MOPEX-5	12	5
Alpine model v2	6	2	HYCYMODEL	12	6
Thames Catchment Model	6	4	GSM-SOCONT model	12	6
IHACRES	7	1	CLASSIC model	12	8
Hillslope model	7	2	MODHYDROLOG	15	5
TOPMODEL	7	2	HBV-96	15	5
SIMHYD	7	3	Tank Model -SMA	16	5
MOPEX-2	7	5	Midlands Catchment Runoff Model	16	5
Plateau model	8	2	ECHO model	16	6
New Zealand model v2	8	2	LASCAM	24	3
Australia model	8	3			

3.2 模型评价指标

为了定量刻画模型的模拟效果,选取以下2个目标函数作为评价模型在研究区径流模拟效果的衡量指标,分别为反映流量过程拟合程度的克林效率系数(*KGE*)和反映总量精度的标准偏差(*D*_v)^[22-23]:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{Q_s}{Q_s} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2}, \quad (1)$$

$$D_{\rm v} = \left| \frac{Q_0 - Q_{\rm s}}{Q_0} \right| \times 100\%$$
 , (2)

式中: *Q*_s和*Q*₀分别代表第*i*个样本的模拟值和实测值; μ_s、μ_o 分别为模拟值和实测值的平均值; σ_s、σ_o分别 为模拟值和实测值的标准偏差; *r* 为模拟值和实测值 的相关系数。评价因子 *KGE* 数值越接近 1,则径流 的模拟值与实测值的差值越小,模拟效果越好。通常 情况下, *KGE* 评价因子数值都在 0.5 以上的径流模拟 就可表明模型精度较好^[22]。据 Donigian^[23]的标准,认 为*D*_v在观测值的 10%范围内的模拟已经达到了"非常 好"的标准,越接近于 0 则表明模拟效果越好。

4 结果与分析

4.1 模型模拟结果分析

将 45 个水文模型对漓江流域进行逐日径流过程 模拟,选择 2007 年为预热期,2008—2016 年为率定 期。经 Nelder—Mead 算法参数寻优,设置待调参数 上下边界条件,以 KGE 为率定指标。经整理计算, 45 个不同模型的运行结果如表 2 所示,表中所有模 型以 KGE 从大到小排序。

从模型的运行结果可以看出:整体上模拟精度表现良好,41个模型的KGE达到了0.5以上,径流总量标准偏差D,也控制在10%以内,拟合精度较好。其中,最优的4个模型(MODHYDROLOG、IHACRES、GR4J、Hillslope)KGE大于0.78,D,在6%以内,达到了"非常好"的标准;最劣的4个模型(Collie river basin 1、VIC model、TOPMODEL、LASCAM)KGE均小于0.4,D,在20%左右,模拟结果并不理想。图2代表的2008—2016年漓江流域最优4个模型的实测一模拟日径流散点和趋势线。大部分散点都较均匀地分散在1:1线的两侧,表明模拟效果能较好地反映流域的实际径流情况。图3为2008—2016年最劣4个模型的实测一模拟日径流散点和趋势线。散点分布不均,且大部分散点偏离1:1线,与最优4个模型模拟情况差异悬殊。4.2模型优劣影响因素分析

通过对上述最优最劣各 4 个模型对比分析,探 索模型结构特点对漓江流域降水一径流模拟的适用 性。本文将从模型结构、蒸散发、径流成分和漓江 流域自然条件等方面分析模型优劣的影响因素。

4.2.1 模型结构对模拟效果的影响

由于建模人员对模型的水文过程及相关参量表 达式的不同,模型结构之间同样存在差异。从土壤 划分来看,最优的4个模型中除 MODHYDROLOG 详细划分5个水库,其余3个模型均仅含1~2个水 库;最劣的4个模型中,最少为Collie river basin 1 模型的1个水库,最多为含有3个水库的VIC模型。 MODHYDROLOG 模型虽结构较为复杂,但其模拟 结果最优,且将众多水文过程进行显式表达,物理 概念明确,模型整体结构清晰。与之相反的是,Collie river basin 1 模型为传统的水箱模型,仅为单一结构, 由1个水库(土壤含水率)和1个参数(最大土壤 储水量)构成,主要过程为降水量、土壤蒸发量以 及与土壤含水率相关的饱和超渗后形成的地表径流。 该模型过于简单,相关参量的表达式(如产汇流过 程等)未能反映出流域复杂的水文过程和规律,此 外对于植被、地形等的影响也未纳入考虑。因此 Collie river basin 1 模拟效果最差,*KGE*出现负值, 仅为-0.07。而 IHACRES 和 GR4J 等结构简单的模型 能达到较好的模拟效果,两者均将有效降水的快速 和慢速产汇流纳入径流成分之中,模拟结果优秀。 最劣 4 个模型中 VIC 和 LASCAM 模型虽考虑多项 因素,包括可变下渗容量、透水面和不透水面的产 汇流划分等,结构复杂,参数众多,但实际模拟结 果却位于末尾,即模型中水库个数和参数个数并不 是决定模型适用性的关键指标。

表 2 45 个模型模拟效果

Table 2The simulation effect of 45 models

序号	模型名称	KGE	$D_{\rm v}$ /%
1	MODHYDROLOG	0.8	0.19
2	IHACRES	0.79	5.91
3	GR4J	0.79	0.18
4	Hillslope model	0.78	1.36
5	Flex-I	0.78	2.16
6	FLEX-IS	0.78	1.24
7	Midlands Catchment Runoff Model	0.78	0.40
8	Flex-B	0.77	5.60
9	Tank Model -SMA	0.77	4.78
10	Tank model	0.76	4.23
11	HYMOD	0.76	0.72
12	MOPEX-3	0.76	0.44
13	Susannah Brook model v1-5	0.75	0.06
14	Collie river basin 3	0.75	0.07
15	Plateau model	0.75	0.20
16	SMAR	0.75	1.39
17	CLASSIC model	0.75	0.76
18	Collie river basin 2	0.74	0.53
19	United States model	0.74	0.22
20	New Zealand model v2	0.74	9.41
21	SIMHYD	0.74	4.91
22	NAM model	0.74	2.17
23	Penman model	0.73	2.39
24	Australia model	0.73	9.73
25	MOPEX-1	0.73	2.47
26	Thames Catchment Model	0.73	1.56
27	Xin'anjiang model	0.73	2.00
28	MOPEX-2	0.73	2.47
29	MOPEX-4	0.73	2.53
30	SACRAMENTO model	0.73	5.38
31	MOPEX-5	0.73	2.86
32	HYCYMODEL	0.73	0.19
33	Wetland model	0.72	0.70
34	Alpine model	0.72	4.15
35	Alpine model v2	0.72	4.06
36	GSFB model	0.7	16.10
37	ECHO model	0.7	14.91
38	HBV-96	0.65	18.57
39	New Zealand model v1	0.64	6.55
40	Susannah Brook model v2	0.57	7.21
41	GSM-SOCONT model	0.53	37.98
42	LASCAM	0.31	22.34
43	TOPMODEL	0.22	23.25
44	VIC model	0.22	20.62
45	Collie river basin 1	-0.07	19.22

灌溉排水学报 http://www.ggpsxb.com





4.2.2 蒸散发分析

Fig.3

流域蒸散发过程复杂,使用闭合流域多年水量 平衡方程式即可得到物理概念清晰的流域多年平 均蒸散发量^[24]。经计算,漓江流域多年平均蒸散发 量为574.6 mm。模拟结果显示,最优劣8个模型对 流域蒸散发模拟情况差异较大。最优4个模型 MODHYDROLOG、IHACRES、GR4J、Hillslope 计算得到的年均蒸散发总量分别为:711.8、716.9、 242.3 和554.0 mm,Hillslope 模拟蒸散发值与实际 蒸散发总量最为接近,而GR4J模拟值偏低, MODHYDROLOG和IHACRES模拟值偏高。因此, 最优4个模型中仅Hillslope 蒸散发模拟效果理想。 最劣4个模型Collie river basin 1、VIC、TOPMODEL、

实测径流/(mm·d-1)

(c) LASCAM

LASCAM 计算得到的年均蒸散发总量分别为: 777.4、779.0、845.7 和 905.9 mm,模拟值普遍偏高, 模拟结果与实际蒸散发水平差异明显,其中 LASCAM模拟值最高,蒸散发模拟结果均不理想。 这些结果表明,模拟蒸散发与实际蒸散发的接近程 度,一定程度上影响模型对径流的模拟精度,但不 是决定性因素。

实测径流/(mm·d⁻¹) (d) Collie river basin 1

4.2.3 径流成分分析

径流成分是由水源划分决定的。最优的 4 个模型 中 MODHYDROLOG 是三水源,其余 3 个模型均为 二水源。最劣的 4 个模型中 Collie river basin 1、 TOPMODEL、LASCAM 和 VIC 分别为一、二、三、 四水源。为了便于对比,现将各个模型径流成分归为 两类:地表径流(包含地面径流和壤中流)和地下径 流(主要是基流)。最优及最劣的共 8 个模型径流成 分的模拟情况如图 4、图 5 所示。最优 4 个模型 MODHYDROLOG、IHACRES、GR4J、Hillslope 模 拟结果中地下径流所占比例分别为 49%、44%、17% 和 57%,依次对应图 4 (a)、图 4 (b)、图 4 (c)、 图 4 (d)。结果显示,GR4J 地下径流模拟值偏低, 其余 3 个模型地下径流所占比例相差不大。所有的地 表径流均产生于降水较大的时期,随降水量变化,而 地下径流趋势较为稳定,且连续性较好,峰值均出现 在每年的夏季。从整体上看,最优4个模型对径流成 分的模拟所得过程线均较稳定,地表径流和地下径流 与实际的径流成分特点符合,能较好地预报径流过程。 最劣4个模型中TOPMODEL、VIC和LASCAM对 径流成分的模拟并不理想,地下径流所占比例分别为 78%、79%和31%,Collie river basin 1 未划定明确的 地下径流,依次对应图5(a)、图5(b)、图5(c)、 图5(d)。TOPMODEL和VIC模拟地下径流比例较 高,LASCAM偏低。因此,径流成分的划分及处理, 是模型适用于某一流域的关键部分。



Fig.5 Simulation results of runoff components of the worst four models

4.2.4 漓江流域自然条件与模型适用性分析

精度与构建的产、汇流机制密切相关。

流域水文模型是分析流域降雨一径流特性的重 要手段。漓江流域的降雨特性和下垫面因素都会对产、 汇流过程产生影响。漓江流域降雨一径流过程的模拟 从降雨特性来看,漓江流域是典型的季风区雨 源性河流,雨热同期,径流量的变化与降雨时空分 布密切相关。单一的蓄满产流机制并不能满足该流 域的模拟,因而蓄满+超渗的混合产流机制更适用于 该地区。从模拟结果上看,产流机制划分越清晰客 观,模拟效果越好,如 MODHYDROLOG 模型清晰 显式化地划定蓄满和超渗产流机制, IHACRES 和 GR4J 这类模型直接划定快、慢速径流比例,模拟结 果均表现优秀。同样地,漓江流域常年冰雪较少并 不适合考虑融雪作为径流主要来源的冰川模型,如 GSM-SOCONT、HBV-96 等模型适用性不佳。除此 之外,由于受漓江流域气候条件及产流机制的共同 影响,45个模型中大部分模型在枯水期和丰水期存 在一定误差,也是造成模型总体误差的主要原因之 一。就下垫面因素而言,漓江流域植被覆盖度高, 物种繁多,林地占比约70%,因而对降水的截留作 用明显。因此 45 个模型中粗略化处理甚至缺少截留 组分的模型(如 Collie river basin 1 等)存在较大误 差。水文模型要想取得较好的模拟效果,除了精确 的水文与气象资料外,经植被截留后形成的净雨量 作为地表径流的主要来源,对模型产、汇流机制产 生重要影响。

5 讨 论

本研究表明,模型结构复杂性并不能作为模型在 流域适用性的判定标准,如 IHACRES、GR4J 和 Hillslope 等模型虽只构建了单一或 2 个水库,建立含有 少量参数的经验方程即可取得精度高的模拟结果。而 MODHYDROLOG 模型作为45 个模型中拟合效果最优 的模型,其再现了清晰的水文过程,同时显式化的物 理概念表达,对整体模拟流域的水文过程和水通量增 加了透明度。因此,MODHYDROLOG 模型作为漓江 流域及相似流域的水文模型的最优选择,IHACRES、 GR4J和Hillslope 等结构简单精度高的模型也作为推荐 模型。另外,结构过于简单的 Collie river basin 1 模型 模拟效果极差,不适用漓江流域的模拟。VIC、 TOPMODEL 和LASCAM 等半分布式模型,结构复杂, 参数众多,且过多依赖流域地形特征和气候输入,模 拟效果并不理想,因此不推荐应用于漓江流域。

参数数量虽不能直接定义模型的拟合优劣,但可 某种程度上提升模拟水平。如均划分快、慢速径流的 GR4J和IHACRES2个模型中,相较于GR4J模型直接 定义快、慢速径流的比例(1:9),IHACRES针对该 值增加一些必要参数进行率定,最终整体模拟结果稍 高于GR4J,也体现了快、慢速径流划分适用于漓江流 域的水文模拟。同样地,含有24个参数的LASCAM 模型在最劣4个模型中表现最优,一方面与模型本身 对表层和亚层土壤结构划分有关,另一方面较多地与 入渗、蒸散发和产汇流等相关率定参数的增加提升了 模型整体模拟效果。此外,同样考虑地形驱动因素的 TOPMODEL 和 Hillslope 模型,因 Hillslope 关键参数 为主要物理过程的显性感知,所以模拟结果明显高于 TOPMODEL,这与 SAVENIJE 的研究观点一致^[25]。

流域作为一个复合蒸发面,由水面蒸发、土壤蒸 发和植物散发组成^[24]。模型蒸散发计算方法直接影响 蒸散发的模拟效果。最优的4个模型中,Hillslope采 用Hamon方程,一定程度上提升了蒸散发模拟精度, 而 MODHYDROLOG、IHACRES 和 GR4J 模型由于 水库填充比的线性表达等因素产生误差。最劣的4个 模型中 Collie river basin 1、VIC、TOPMODEL 这类 模型均采用潜在蒸散发速率及水库填充比构成的计 算方法,因此虽模拟径流量总体精度并不高,但蒸散 发模拟接近实际水平。而 LASCAM 模型在蒸散发计 算方程中引入水库库值、植被覆盖状态(LAI)以及 植被类型等流域特征参数,模拟结果并不理想,一方 面受制于流域特征参数精度的影响,另一方面可能源 于概化公式与流域的匹配水平不足而产生模拟误差。

从模型的产汇流模块来看,GR4J 模型直接界定 快、慢速径流的比例,因而对地下径流产生模拟偏差, 这也是GR4J 对径流成分模拟不理想的直接原因。另 外,LASCAM 和 VIC 模型将土壤分为多层,整体上 着重对地表径流的计算,净雨量大量损失,最终流向 该水库的流量较小且极不稳定,因而地下径流的计算 难免存在低估的可能。且VIC 模型主要产流方式适合 干旱地区超渗产流的特点,只有第1层土壤直接响应 降雨动态过程并产生地表径流,中间层只有下渗过程, 由此造成更多误差。

参照 Sivapalan M 依据物理精确性和空间分辨率 对模型的分类方式[26],本文选用的45个模型中部分 模型(如 VIC、TOPMODEL等)为建立在亚流域组 合基础上的中等精度分布式模型,亚流域均采取集总 式概念模型。本文结合 Sivapalan 和 Clark 对模型的修 正概化公式,将模型中流域特征相关参数(地形指数、 叶面积指数等)和相关水文过程进行处理,在保留模 型原结构特点的基础上,不受限于流域的地形及植被 数据精度,同时大大简化了运算过程[27-28],但模拟过 程中存在由于概化公式产生模拟偏差的可能。另外, 张如强等[29]认为模型的模拟效果与目标函数的选取 直接相关,目标函数中模拟值与实测值之差采用平方 的形式,这导致洪峰的影响较基流大,即该效率系数 对洪峰过于敏感。因而本文在模拟效果评价上选取的 KGE 目标函数同样存在相同不足,由此带来模型模 拟的效果评价误差。最后, 漓江流域有众多水库, 水 库的调度和人工的影响对漓江流域的径流有一定影 响,模型对径流模拟偏差可能与人类活动导致的下垫

面变化以及水利工程修建有一定的关系,同时模型评价中没有考虑洪峰和枯水的模拟精度,这也是未来工作中有待进一步研究的内容。

6 结 论

 1)就径流模拟能力而言,在45个模型中,KGE 大于 0.5 的有 41 个模型,大部分模型均适用于漓江 流域。其中,MODHYDROLOG、GR4J、IHACRES 和 Hillslope 等模型作为漓江流域及相似流域水文模 拟的推荐模型。

2)从蒸散发计算来看,仅 Hillslope 模型模拟蒸 散发值最为接近实际蒸散发水平。最优4个模型蒸散 发模拟精度高于最劣4个模型,但蒸散发的模拟情况 并不是径流模拟结果的决定性因素。

3) 径流成分的划分及处理是模型适用于某一流域的关键部分。虽径流各自比例相差较大,但径流模拟效果好的模型对径流成分的模拟结果理想,符合实际径流变化特点。径流模拟效果差的模型不适于估算径流成分。

4)模型适用性体现了模型机制与流域特征属性的匹配度,将含有较多流域特征参数的半分布式模型进行概化处理,尽管大大简化了运算过程,但由此也会带来模拟偏差。

参考文献:

[1] 包为民. 水文预报[M]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 139-142.

BAO Weimin. Hydrological forecast[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006: 139-142.

[2] 李致家.水文模型的应用与研究[M].南京:河海大学出版社, 2008: 3-12.

LI Zhijia. Application and research of hydrological modelling[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2008: 3-12.

- [3] 康彦付,李建柱,马秋爽. 紫荆关流域分布式HEC-HMS水文模型构 建及洪水模拟[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4): 108-115. KANG Yanfu, LI Jianzhu, MA Qiushuang. Using HEC-HMS model to simulate flooding in Zijingguan watershed[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(4): 108-115.
- [4] 陈沛源,李金文,俞巧,等. 基于 SWAT 模型的泾河流域地下水分布 特征与水资源评价[J]. 灌溉排水学报,2021,40(12):102-109,126. CHEN Peiyuan, LI Jinwen, YU Qiao, et al. Evaluating groundwater resource and its distribution in jinghe basin using the SWAT Model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 102-109, 126.
- [5] 金鑫,金彦香,杨登兴. 基于 LU-SWAT 模型的土地利用/覆被变化对水 文过程的影响研究:以黑河上游为例[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 114-121..

JIN Xin, JIN Yanxiang, Yang Dengxing. Study on the impact of land use/ Cover Change on hydrological process based on lu-swat model-Taking the upper reaches of Heihe River as an example[J]. Journal of irrigation and drainage, 2019, 38(5): 114-121

[6] 曹飞凤. 基于 MCMC 方法的概念性流域水文模型参数优选及不确 定性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010. CAO Feifeng. Study on parameter optimization and uncertainty analysis for conceptual hydrological model based on MCMC method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

- [7] HENGADE N, ELDHO T I. Assessment of LULC and climate change on the hydrology of Ashti Catchment, India using VIC model[J]. Journal of Earth System Science, 2016, 125(8): 1 623-1 634.
- [8] SONG J H, HER Y, PARK J, et al. Exploring parsimonious daily rainfall-runoff model structure using the hyperbolic tangent function and Tank model[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 574-587.
- [9] 王哲,李涛涛,马金一,等. 多种水文模型在潘家口水库流域中的应用比较研究[J]. 海河水利, 2016(6): 45-47, 64.
 WANG Zhe, LI Taotao, MA Jinyi, et al. Comparative study on the application of various hydrological models in Panjiakou Reservoir Basin[J]. Haihe Water Resources, 2016(6): 45-47, 64.
- [10] YANG W T, LONG D, BAI P. Impacts of future land cover and climate changes on runoff in the mostly afforested river basin in North China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570(12): 201-219.
- [11] 王国庆,乔翠平,刘铭璐,等. 气候变化下黄河流域未来水资源趋势 分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(2): 1-8.
 WANG Guoqing, QIAO Cuiping, LIU Minglu, et al. The future water resources regime of the Yellow River Basin in the context of climate change[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(2): 1-8.
- [12] 孟玉婧,李喜仓,白美兰,等. RCP 情景下内蒙古黄河流域径流预估 及其对水资源的影响[J]. 气象科技, 2021, 49(1): 124-130.
 MENG Yujing, LI Xicang, BAI Meilan, et al. Runoff estimate and its impact on water resources in Yellow River Basin of Inner Mongolia under RCP scenarios[J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(1): 124-130.
- [13] CARENZO M, PELLICCIOTTI F, RIMKUS S, et al. Assessing the transferability and robustness of an enhanced temperature-index glacier-melt model[J]. Journal of Glaciology, 2009, 55(190): 258-274.
- [14] 张淑敏. 基于森林作用的流域降雨径流模型研究:以浑河上游流域 为例[D]. 泰安:山东农业大学, 2012. ZHANG Shumin. Study on the watershed rainfall-runoff model based on the effort of forest—take the upper Hun-river watershed as an example[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012.
- [15] 刘海滢,甘永德,贾仰文,等.考虑土壤膨胀性的流域水文模型应用研究[J].中国农村水利水电,2020(4):92-96,101.
 LIU Haiying, GAN Yongde, JIA Yangwen, et al. The application of basin hydrological model considering soil swelling effect[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(4): 92-96, 101.
- [16] 郭纯青,方荣杰,代俊峰. 漓江流域上游区水资源与水环境演变及 预测[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
 GUO Chunqing, FANG Rongjie, DAI Junfeng. Evolution and prediction of water resources and water environment in the upper reaches of Lijiang River Basin[M]. Beijing: China Water Power Press, 2011.
 [17] 刘文丽. 上游水库调蓄对桂林水文站洪水预报的影响分析[J]. 广西
 - 水利水电, 2016(2): 5-9, 16. LIU Wenli. Influence of upstream reservoir storage and regulation on flood forecasting of Guilin Hydrological Station[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2016(2): 5-9, 16.
- [18] 蔡德所,马祖陆. 漓江流域的主要生态环境问题研究[J]. 广西师范 大学学报(自然科学版), 2008, 26(1): 110-112.
 CAI Desuo, MA Zulu. Main ecological problems in Lijiang River watershed[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2008, 26(1): 110-112.
- [19] 粟维斌、康峰峰,马钦彦,等. 漓江水资源环境问题的景观生态学思考[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(S2): 149-155.
 SU Weibin, KANG Fengfeng, MA Qinyan, et al. Some thoughts about the landscape ecology of water resources in Lijiang River[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(S2): 149-155.
- [20] KNOBEN W J M, FREER J E, FOWLER K J A, et al. Modular

Assessment of Rainfall–Runoff Models Toolbox (MARRMoT) v1.2: An open-source, extendable framework providing implementations of 46 conceptual hydrologic models as continuous state-space formulations[J]. Geoscientific Model Development, 2019, 12(6): 2 463-2 480.

- [21] SPENDLEY W, HEXT G R, HIMSWORTH F R. Sequential application of simplex designs in optimisation and evolutionary operation[J]. Technometrics, 1962, 4(4): 441-461.
- [22] GUPTA H V, KLING H, YILMAZ K K, et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1/2): 80-91.
- [23] DONIGIAN A, BICKNELL B, IMHOFF J, et al. Hydrological simulation program fortran (HSPF)[M]. 1995: 30-50
- [24] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004:42-46.
 RUI Xiaofang. Principles of hydrology[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004: 42-46.
- [25] SAVENIJE H H G. HESS Opinions "Topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo)"[J]. Hydrology and Earth System Sciences,

2010, 14(12): 2 681-2 692.

- [26] 胡金明,邓伟,夏佰成. LASCAM 水文模型在流域生态水文过程研 究中的应用:模型理论基础[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 427-433.
 HU Jinming, DENG Wei, XIA Baicheng. Application of LASCAM in study on the ecohydrological processes of catchment: Theoretical bases[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4): 427-433.
- [27] CLARK M P, SLATER A G, RUPP D E, et al. Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models[J]. Water Resources Research, 2008, 44(12): 1-14.
- [28] BEVEN K, KIRKBY M. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrol. Sci. Bull., 1979, 24: 39.
- [29] 张如强,高红凯,刘俊国,等.不同目标函数对水文模型模拟效果影响研究[J].中国农村水利水电,2017(4):106-111.
 ZHANG Ruqiang, GAO Hongkai, LIU Junguo, et al. The influence of different objective functions on hydrological model performance[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(4): 106-111.

Comparison of Conceptual Hydrological Models for Lijiang River Basin

YANG Yang^{1,2}, ZHAI Luxin^{1,2,3*}, JIA Yanhong^{1,2}, XUE Kaiyuan^{1,2}

(1. School of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China; 2. Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Guilin 541004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Landscape Resources Conservation and Sustainable Utilization in Lijiang River Basin, Guilin 541004, China)

Abstract: [Background and objective] Hydrological process is a complex phenomenon and affected by many biological and physical processes. Its modelling in water resource management and decision-making in watershed or catchment is often based on conceptual models where the complicated processes that directly or indirectly modulate water flow in different components are highly simplified. Such models are mathematically simple and have been widely used in both practical and scientific communities. Different conceptual hydrological models are available, but how they compare with each other for simulating hydrological processes in watersheds is not well studied. The purpose of this paper is to fill this gap. [Method] We compared 45 conceptual hydrological models for their application in the Lijiang River Basin. For each model, we simulated daily runoff in the basin from 2008 to 2016 using the same dataset, and compared and analyzed their performance in terms of model structure, calculated evapotranspiration and runoff, from which we identified main factors which affect model applicability and accuracy most. [Result] MODHYDROLOG was the model that worked best for simulating hydrological flow in the basin, followed by GR4J, IHACRES and Hillslope models. Model which was least accurate for simulating runoff did not work well for modelling real evapotranspiration and other runoff components neither. An accurate evapotranspiration calculation was not decisive for accurate runoff simulation, and dividing the runoff into different components was the key factor in applicability and accuracy of the models. We also found that the generalized semi-distributed model not only simplified the operation process of the model, but also affected the simulation accuracy. [Conclusion] Among the 45 conceptual models we compared, MODHYDROLOG, GR4J, IHACRES and Hillslope models worked best for simulating hydrological processes in the Lijiang River Basin and similar basins. Key words: hydrology; models; applicability; basin

责任编辑:赵宇龙