

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.003

基于自相似河网结构的中小流域蓄量消退系数计算方法

童睿轩¹, 吴勇拓², 王春阳², 李致家¹, 杨子菁¹, 黄迎春¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013)

摘要: 为探讨不依赖降雨径流资料的汇流参数——蓄量消退系数 C_s 的计算方法, 选取位于不同水文气象分区的 4 个典型中小流域, 根据 DEM 信息提取河网水系, 构建基于 Strahler 分级规则的河网精简方案, 改进基于自相似河网结构的蓄量微分方程, 分析不同河长占比对 C_s 计算结果的影响。研究表明: 改进的方法能有效降低原始河网和精简方案河网之间 C_s 计算结果的差异, 提高 C_s 计算结果的稳定性; 流域中河网复杂程度的增加会导致 C_s 计算结果的增大; 河长占比通过影响河网所涵盖的信息进而影响精简方案的适用性, 对于 3 级河网结构的中小流域, 1 级河网河长占总河长比例小于 70% 时, 可采用保留至 2 级的河网精简方案作为替代输入。

关键词: DEM; 蓄量消退系数; 自相似河网; 河网简化方案; 中小流域

中图分类号: P338.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)02-0017-09

Study on estimating method of confluence parameter for small and medium-sized watershed based on self-similar river networks

TONG Ruixuan¹, WU Yongtuo², WANG Chunyang², LI Zhijia¹, YANG Zijing¹, HUANG Yingchun¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: This study aims to construct the estimation method of river network regression coefficient C_s that does not depend on the rainfall-runoff data. Four typical small and medium-sized river basins located in different hydrometeorological divisions are selected in this study. River networks are extracted from the DEM information, simplification schemes for the river network is constructed based on Strahler's rule, the differential equation for the storage based on the self-similar river network method is improved, and the influence of different river length ratios on the C_s calculation results is analyzed. The results show that: the improved method proposed in this paper can effectively reduce the difference of C_s between the original river network and the simplified scheme to improve the stability; the increase of river network complexity in the basin usually leads to the increase of C_s calculation results; the river length ratio affects the applicability of simplified scheme by influencing the information covered by the river network. For small and medium-sized basins with the 3-level structure, when the length ratio of the level 1 river network is less than 70%, the simplification solution of river network retained to level 2 can be used as an alternative input.

Key words: DEM; river network regression coefficient; self-similar river network; simplification scheme of river network; small and medium-sized watershed

我国中小河流分布广泛,流域居住人口众多,其水文模型研究日益受到重视。但是中小流域普遍存在水文站点设站时间晚、缺乏代表性流量资料的现象,参数率定问题是水文模型应用的难点。在 PUB (prediction in ungauged basins) 计划的推动下,国内外无资料水文预测研究取得了大量的成果^[1],其中有两个主流方向:①利用有资料和无资料地区的水文相似性,进行资料或参数的移用,如参数移植法^[2-5];②通过统计回归方法建立地形地貌和参数的经验关系,如函数关系法^[6-8]。上述两个方向在水文学界应用广泛,其思路在于通过

基金项目: 国家自然科学基金(52079035,51909059); 江苏省自然科学基金(BK20190492)

作者简介: 童睿轩(1997—),男,硕士研究生,主要从事流域水文模拟与洪水预报研究。E-mail:tong_ruixuan@qq.com

通信作者: 李致家(1962—),男,教授,博士,主要从事流域水文模拟与水文模型研究。E-mail:zjli@hhu.edu.cn

引用本文: 童睿轩,吴勇拓,王春阳,等. 基于自相似河网结构的中小流域蓄量消退系数计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):17-25.

TONG Ruixuan, WU Yongtuo, WANG Chunyang, et al. Study on estimating method of confluence parameter for small and medium-sized watershed based on self-similar river networks[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 17-25.

大量现象反映共性或推求原理,其局限性在于当研究流域较少时,较难归纳相似特征和函数关系;函数关系符合数值规律,但缺少物理规律的支撑。为了拓宽思路,应寻求基于水文规律的参数计算方法。

1973 年,赵人俊^[9]提出的新安江模型是具有明确水文规律的概念性水文模型,在我国湿润、半湿润地区的水文预报中应用广泛。其中汇流计算的蓄量消退系数 C_s 极其敏感,反映了洪水消退速率,对汇流计算结果影响显著。相关研究表明^[10-11], C_s 取决于河网结构、地形、地貌等因素。为了解决无资料地区 C_s 的计算问题,许多学者尝试建立 C_s 和下垫面特征的关系。赵人俊^[12]建立了 C_s 随时间和流量变化的方程;蔡峰等^[13]利用数字高程模型分析了 C_s 与地貌特征间的规律。上述方法属于函数关系法,需要多个流域进行回归分析,且不具备物理意义。为了能直接推求 C_s ,李致家等^[14]提出了描述河网汇流动态变化的微分方程,构建了基于自相似河网结构的 C_s 计算方法;臧帅宏等^[15]在此基础上探讨了单元流域 C_s 和全流域 C_s 的关系,并验证了该 C_s 计算方法在不同气候分区的有效性。自相似河网推求 C_s 方法的优势在于不依赖历史流量资料,所以在无资料地区具有适用性,但是该方法基于 DEM 提取河网,原始河网支流密集,不利于水文建模,需要对河网进行精简。由于传统的河网简化过程需要人工操作,导致自相似河网推求 C_s 方法所估算的 C_s 受到主观因素的影响。因此,有必要构建客观的精简规则,并对自相似河网推求 C_s 方法(简称原方法)的不稳定性进行分析和改进。

本文通过 Strahler 分级规则构建河网精简方案,利用考虑河链河长的蓄量微分方程对自相似河网结构 C_s 计算方法加以改进,分析不同精简方案下自相似河网 C_s 计算方法改进前后计算结果的精确性差别,探讨在中小流域中改进方法的合理性以及该方法在不同精简方案下的适用条件。

1 研究方法

1.1 基于自相似河网的 C_s 计算方法

C_s 反映了河网汇流速度的快慢,相关研究^[16-17]表明:汇流速度取决于下垫面特征和河网结构。下垫面特征包括比降、地形指数等,可通过 DEM 提取;河网结构反映了上下游水文要素的递推关系^[18],可通过二叉树结构描述^[19]。二叉树结构是自相似河网方法的基础,最早由 Menabde 等^[20]提出并应用于研究拓扑结构对流量衰减影响,通过河链的蓄量函数 $W(t)$ 来反映蓄量随时间 t 的变化。基于线性水库的假设,出口断面流量与蓄量正相关,由此求出各时段始末 $W(t)$ 的比值即为 C_s 。

1.1.1 原方法蓄量通式

原方法有以下 3 个基本假设:①河网由若干个二叉树结构组成,每个二叉树结构包含两条上游河链、一个汇流节点和一个下游河段,见图 1;②各河链长度、河宽、坡度、流速相等,河床形态均一,无区间入流;③降雨强度空间分布均匀。

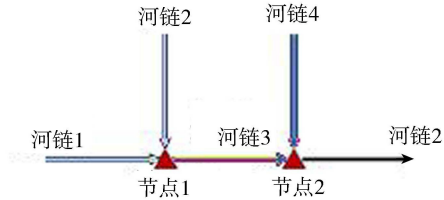


图 1 自相似河网结构

Fig. 1 Structure of self-similar river network

河链 k 水量平衡方程为

$$\frac{dW_k(t)}{dt} = Q_{k,in}(t) - Q_{k,out}(t) \tag{1}$$

式中: t 为时间; $W_k(t)$ 为河链 k 的蓄量函数, m^3 ; $Q_{k,in}(t)$ 为河链 k 的入流量; $Q_{k,out}(t)$ 为河链 k 的出流量, m^3/s 。

在忽略区间入流的情况下, $Q_{k,in}(t)$ 由上游两河链出流量组成

$$Q_{k,in}(t) = Q_{k_1,out}(t) + Q_{k_2,out}(t) \tag{2}$$

式中 $Q_{k_1,out}(t)$ 、 $Q_{k_2,out}(t)$ 分别为上游河链 k_1 和河链 k_2 的出流量, m^3/s 。

在矩形河道中,河链 k 的出流量和蓄量的计算公式如下:

$$Q_{k,out}(t) = BDv \tag{3}$$

$$W_k(t) = BDL \tag{4}$$

式中: B 为平均河宽, m ; D 为平均水深, m ; L 为河链平均长度, km ; v 为平均流速, m/s 。联立式(3)和式(4),可推求河链 k 出流量和蓄量的关系式:

$$Q_{k,out}(t) = \frac{v}{L} W_k(t) \tag{5}$$

将式(5)代入式(2),得到河网蓄量函数的微分形式为

$$\frac{dW_k(t)}{dt} = \frac{v}{L} W_{k_1}(t) + \frac{v}{L} W_{k_2}(t) - \frac{v}{L} W_k(t) \tag{6}$$

则河链 k 的蓄量函数为

$$W_k(t) = \exp\left(-\frac{vt}{L}\right) \left\{ W_k(0) + \frac{v}{L} \int_0^t \exp\left(\frac{v\tau}{L}\right) \left[W_{k_1}\left(-\frac{v\tau}{L}\right) + W_{k_2}\left(-\frac{v\tau}{L}\right) \right] d\tau \right\} \tag{7}$$

式中 τ 为时间, $0 \leq \tau \leq t$ 。

最上游河链无支流汇入,设其编号为 k_0 ,可求得其蓄量函数为

$$W_{k_0}(t) = W_{k_0}(0) \exp\left(-\frac{vt}{L}\right) \tag{8}$$

1.1.2 考虑河链长度差异的蓄量通式

原方法中假定流域中所有河链长度相等,由于实际河网形态复杂,可能导致计算结果出现偏差,因此需要考虑各河链河长的差异,则式(6)的蓄量微分方程修改为

$$\frac{dW_k(t)}{dt} = \frac{v}{L_1} W_{k_1}(t) + \frac{v}{L_2} W_{k_2}(t) - \frac{v}{L} W_k(t) \tag{9}$$

式中 L_1, L_2 分别为 k 链上游两支流河链的河长, m 。则河链蓄量函数为

$$W_k(t) = \exp\left(-\frac{vt}{L}\right) \left\{ W_k(0) + \int_0^t \exp\left(\frac{v\tau}{L}\right) \left[\frac{v}{L_1} W_{k_1}\left(-\frac{v\tau}{L_1}\right) + \frac{v}{L_2} W_{k_2}\left(-\frac{v\tau}{L_1}\right) \right] d\tau \right\} \tag{10}$$

1.1.3 最小二乘法推求 C_s

在无资料地区,流速计算常使用经验公式法^[21]。该方法参数较多,且依赖于观测降雨资料。本文采用董丰成等^[22]提出的基于地形参数直接计算平均流速的方法,其公式为

$$v = \lg\left(D_\Omega + \frac{D_\Omega^2}{L_\Omega}\right) \tag{11}$$

式中: D_Ω 为最高级河链海拔差, m ; L_Ω 为最高级河链河长, km 。

根据滞后演算汇流法假定, C_s 计算方法为

$$C_s = \frac{Q_{out}(t_{n+1})}{Q_{out}(t_n)} = \frac{W(t_{n+1})}{W(t_n)} \tag{12}$$

为了提高样本的代表性,使用 n 组数据 $(W(t_0), W(t_1)), (W(t_1), W(t_2)), \dots, (W(t_{n-1}), W(t_n))$ 进行计算:

$$C_s = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} W(t_i) W(t_{i+1})}{\sum_{i=0}^{n-1} W^2(t_i)} \tag{13}$$

1.2 河网精简方案

Strahler 于 1957 年提出一种河网分级方法,已广泛应用于河链级别的计算:假定所有无上游支流的河链级别为 1;不同级河链交汇时,下游河链级别取二者中最高者;同级的河链交汇时,其下游河链增加 1 级^[23]。流域中的 1 级河链位于河源,处于河网结构的最外层,随着河链交汇,河链级别逐渐加大,出口断面处河链级别最高。根据河链的级别,将第 i 级河链集合称为 i 级河网。通过 DEM 提取的原始河网分布密集,导致蓄量函数推求过程繁琐,因此实际应用中需要对复杂水系进行简化,即通过删除部分支流、保留重要干流河链的方法对河网结构进行调整。为避免主观影响,基于 Strahler 分级规则对复杂河网构建精简方案:在原始河网的基础上,按级别从低到高的顺序依次删去 i 级河网($i=0$ 表示河网未删减),剩余保留的河网最高级为 $i+1$,即保留至 $i+1$ 级河网,称为 $R(i+1)$ 精简方案。

2 研究流域水文模型构建

选取 4 个典型中小流域为研究对象:安徽省的呈村流域,福建省的平和、龙山流域,河北省的县北沟流域。研究流域选取原则为:①面积 $50 \sim 800 \text{ km}^2$ 的闭合中小流域,包括县北沟(37 km^2)和呈村(290 km^2)两个

小流域,龙山(484 km²)和和平(631 km²)两个中等流域;②涵盖不同气候分区,呈村、平和和龙山为湿润区气候,县北沟为半湿润区气候。各流域平均海拔为 200 ~ 800 m,径流过程受人类农业活动和水工建筑干扰较少,土壤类型主要为壤土和砂壤土,分布较均匀。

采用美国航空航天局(NASA)公开的 ASTER GDEM 30 m 分辨率数字高程数据,利用 Arcgis10.6 软件平台和 IntelliJ IDEA2021Java 编程系统进行流域水系的提取和特征值计算。采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)公开的 0.3°分辨率月均降水数据计算流域多年平均降水量。研究流域水系见图 2,基本概况见表 1。在湿润区的呈村、龙山和和平流域采用蓄满产流^[24]与滞后演算汇流法,在半湿润区的县北沟流域采用格林安普特产流^[25]与滞后演算汇流法构建降雨-径流模型,模型参数率定结果见表 2。

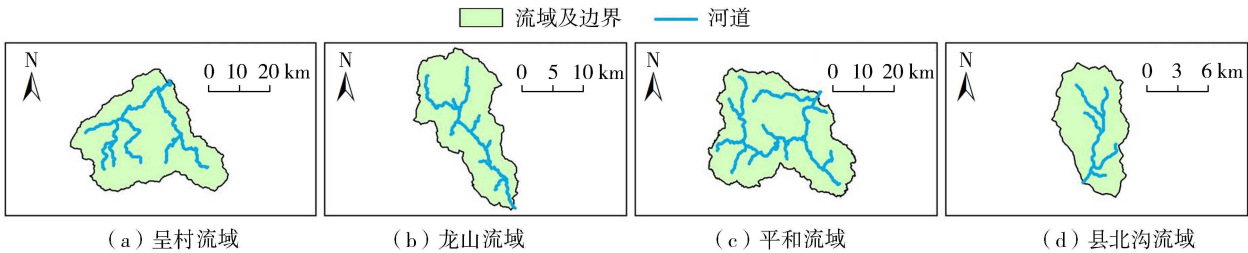


图 2 研究流域水系

Fig. 2 River network of experimental catchments

表 1 研究流域基本概况

Table 1 Basic condition of experimental catchments

流域	经纬度	年平均降水量/mm	资料时段	使用模型
呈村	29°40'N,117°45'E	1 800	1985—2001 年	蓄满产流模型和滞后演算汇流法
平和	24°22'N,117°12'E	1 822	2004—2014 年	
龙山	24°45'N,117°17'E	1 921	1990—2018 年	
县北沟	38°48'N,114°08'E	630	1986—1996 年	格林安普特模型和滞后演算汇流法

表 2 流域水文模型参数率定结果

Table 2 Calibration results of hydrological model parameters for study catchments

流域	蓄满产流模型										格林安普特模型				滞后演算模型		
	K	B	C	W_m/mm	W_{um}/mm	W_{lm}/mm	S_m/mm	E_x	K_G	K_I	η	θ_e	ψ/cm	$K_s/$ ($cm \cdot h^{-1}$)	C_G	C_s	t_{lag}/h
呈村	0.9	0.4	0.2	160	27	76	48	1.3	0.36	0.33	0.40	0.33	21.8	0.15	0.61	0.79	3
龙山	0.9	0.4	0.2	160	20	60	89	1.4	0.40	0.30					0.96	0.88	2
平和	0.9	0.3	0.1	150	28	60	85	1.4	0.40	0.30					0.63	0.85	2
县北沟															0.95	0.60	1

注: K 为蒸散发折算系数, B 为蓄水容量分布曲线指数, C 为深层散发系数, W_m 为张力水容量, W_{um} 为上层张力水容量, W_{lm} 为下层张力水容量, S_m 为自由水容量, E_s 为自由水分布曲线指数, K_C 为地下水出流系数, K_I 为壤中流出流系数, η 为孔隙度, θ_e 为有效孔隙度, ψ 为湿润峰吸力, K_s 为饱和水力传导度, C_G 为地下水消退系数, t_{lag} 为河网汇流滞时。

研究流域率定期和验证期 Nash 效率系数均值和合格率见表 3,其中呈村、平和流域模拟效果较好,洪峰和洪量的平均合格率大于 80%,且 Nash 效率系数大于 0.8,达到 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》甲级精度标准;龙山、县北沟流域模拟效果次之,洪峰和洪量的平均合格率大于 70%,Nash 效率系数大于 0.6,达到《水文情报预报规范》乙级精度标准。说明基于滞后演算汇流法构建的汇流模型在不同的气候分区均具有较好的适用性。

3 结果与分析

3.1 构建河网精简方案

根据 Strahler 分级规则,各流域分级结果见图 3。

表 3 各流域率定期和验证期模拟精度

Table 3 Simulation accuracy of calibration and verification periods for each watershed

流域	模拟阶段	径流量 合格率/%	洪峰 合格率/%	Nash 效率 系数均值
呈村	率定期	96	96	0.92
	验证期	100	100	0.94
平和	率定期	90	100	0.83
	验证期	100	60	0.91
龙山	率定期	87	73	0.71
	验证期	80	80	0.61
县北沟	率定期	88	88	0.65
	验证期	100	50	0.73

以呈村流域为例,河网精简方案如图 4 所示。按照 Strahler 分级规则,R2 方案表示在原始河网(R1 方案)的基础上删除了 1 级河网全部河链,保留了 2 级及以上的河网;R3 方案表示在 R2 方案的基础上删除了全部 2 级河链,保留了 3 级及以上的河网。

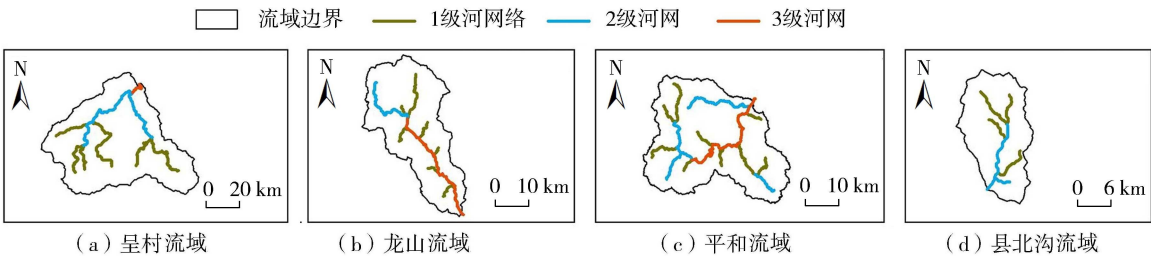


图 3 研究流域 Strahler 分级结果示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Strahler classification results in study catchments

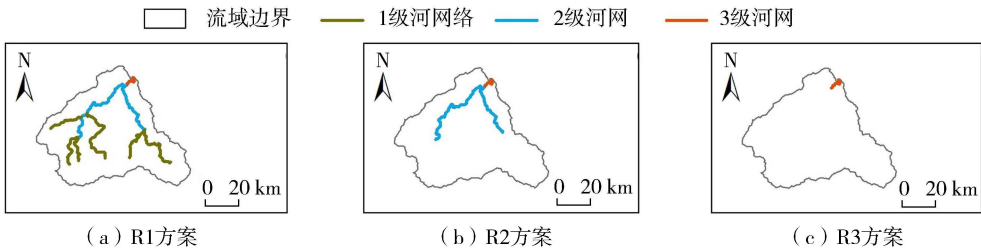


图 4 呈村流域河网结构精简方案

Fig. 4 Simplification schemes of the river network for the Chengcun catchment

3.2 自相似河网推求 C_s 方法改进前后计算结果比较

由图 4 可见,河网结构的精简导致河链数量减少,进而改变了 C_s 的计算输入条件。各流域在不同简化方案下,原方法和改进方法 C_s 的计算结果如表 4 所示。采用滞后演算汇流法在 4 个流域建立汇流模型,进行次洪模拟和参数率定,得到 C_s 的率定值。表中 $C_{s\text{率定}}$ 为参数率定结果, $C_{s\text{原}}$ 、 $C_{s\text{改}}$ 分别为原方法和改进方法的计算值,计算结果的精度由相对误差 R_E 表示。

$$R_E = \frac{C_{s\text{计算}} - C_{s\text{率定}}}{C_{s\text{率定}}} \times 100\%$$

(14)

式中 $C_{s\text{计算}}$ 为原方法或改进方法的计算结果。

从表 4 可知:在呈村、龙山和平和流域,两种方法在 R1 和 R2 简化方案时 C_s 计算值的相对误差不超过 15%,说明河网保留至 1 级和 2 级时,两种方法的计算结果较为合理。县北沟流域面积较小,该流域 R1 方案计算结果较准确。但只保留干流河道时,如 R2 方案和其他流域 R3 方案, C_s 计算值的相对误差明显偏大。结合图 4 中对应方案的河网结构,说明对河网进行简化时,若保留干流和部分支流河链, C_s 计算值相对准确,如呈村、龙山、平和流域的 R1 和 R2 方案;若只保留干流河链,则 C_s 计算值的误差较大,如呈村、龙山、平

表 4 不同简化方案的河网地理特征和 C_s 计算结果

Table 4 Geographical characteristics of river network and C_s estimation results for different simplified schemes								
流域	$C_{s\text{率定}}$	简化方案	河链数	$\bar{L}/\text{km}$	$C_{s\text{原}}$	$R_{E\text{原}}/\%$	$C_{s\text{改}}$	$R_{E\text{改}}/\%$
呈村	0.79	R1	25	23.70	0.75	-5.06	0.82	3.80
		R2	13	9.81	0.81	2.53	0.80	1.27
		R3	3	13.60	0.47	-40.50	0.45	-43.0
龙山	0.88	R1	20	4.75	0.92	4.55	0.87	1.14
		R2	10	14.70	0.86	-2.27	0.85	-3.41
		R3	6	32.80	0.71	-19.30	0.68	-22.70
平和	0.85	R1	53	3.82	0.97	14.10	0.88	3.53
		R2	24	13.10	0.88	3.53	0.85	0
		R3	11	38.60	0.75	-11.70	0.70	-17.70
县北沟	0.60	R1	9	0.85	0.62	3.33	0.61	1.67
		R2	4	5.30	0.13	-78.90	0.13	-78.30

和流域的 R3 方案以及县北沟流域的 R2 方案。图 5 对比了不同方案时两种方法的表现,对角线表示 C_s 率定的标准线,散点距离标准线越近,表示 C_s 计算值越接近于 C_s 率定值,反之则结果越差。

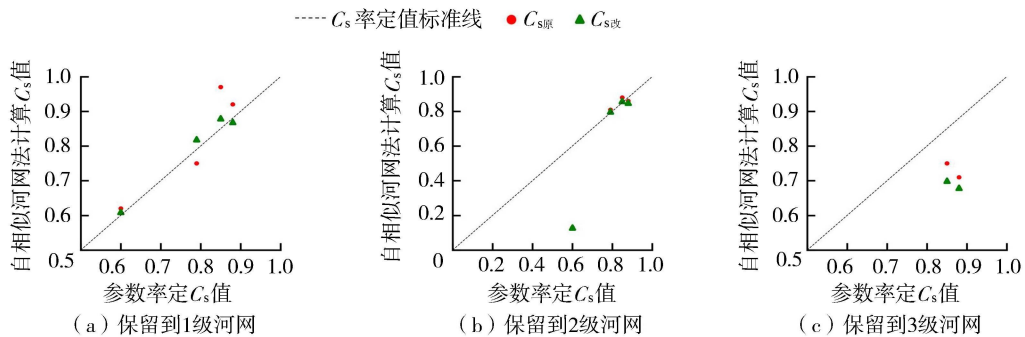


图 5 不同方案原方法和改进方法结果对比

Fig. 5 Comparison of the results of the original method and the improved method for different schemes

从图 5 可知,R1 方案中, $C_{s原}$ 散点偏离对角线, $C_{s改}$ 散点更接近对角线,误差更小;R2 方案中,两种方法的散点紧密地分布在对角线周围,结果均较准确;R3 方案中,两种方法的散点均远离对角线,相对误差超过 20%,效果较差。两种方法在各方案中的结果差异源于河网结构的改变,对比计算结果较好的 R1 和 R1 方案可知;R2 方案是在 R1 方案的基础上删减了 1 级河网,R1 方案河链数远多于 R2 方案,河网更复杂,平均河长有显著差异。R1 方案中,原方法在河网更完整的情况下效果不佳,且与 R2 方案结果偏差较大,说明河网结构的改变会造成原方法计算结果的波动;改进方法考虑了河长的影响,在不同精简程度时表现更稳定。

原方法和改进方法 C_s 计算值随保留河链数的变化见图 6,图 6 反映了 3 个 3 级河网结构流域不同简化方案之间 C_s 计算值的过渡情况,进一步对比了两种方法的稳定性差异。

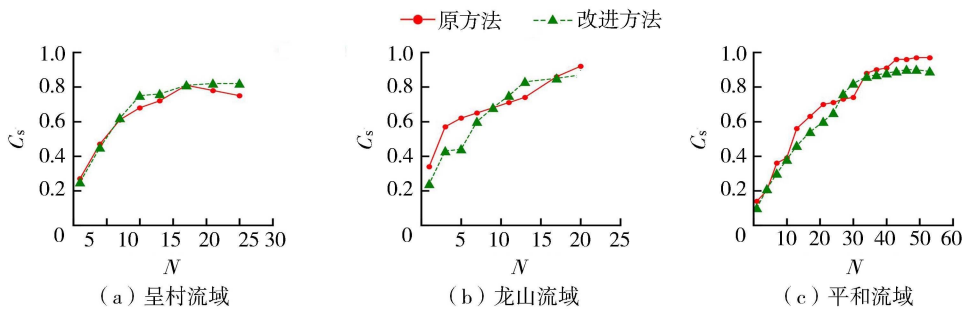


图 6 原方法和改进方法 C_s 变化过程对比

Fig. 6 Comparison of C_s change process between the original method and the improved method

由图 6 可知,原方法和改进方法的 C_s 计算值均随着保留河链数的增加而提高,但 C_s 计算值变化过程存在差异:

a. $C_{s原}$ 的连线起伏较大,呈村流域 $C_{s原}$ 先增后减,龙山流域存在 $C_{s原}$ 突增的现象,平和流域 $C_{s原}$ 增大趋势较稳定。

b. $C_{s改}$ 连线为平滑的单增曲线, $C_{s改}$ 的变化幅度逐渐减小。根据保留河链数 N 将 $C_{s改}$ 的变化划分为 3 个阶段,采用分段平均法计算改进方法在 3 个阶段 $C_{s改}$ 的变化幅度。

$$S = \left(\sum_{i=1}^{\Delta N} \frac{\left| C_{s改,i} - C_{s改,i-1} \right|}{\Delta N} \right)^{0.5} \quad (15)$$

表 5 各流域不同简化阶段改进方法计算 C_s 变化幅度

式中 ΔN 为不同简化阶段增加的河链数。

各流域不同简化阶段 $C_{s改}$ 的变化幅度见表 5。结果表明,随着河网复杂程度的增加, $C_{s改}$ 的增大幅度减小,且趋于稳定,因此可考虑用 R2 方案的精简河网代替 R1 方案的原始复杂河网作为计算输入。当保留的河链数增加时,净雨运输至流域出口的路径增加,传播时间延长,

简化阶段	$C_{s改}$ 变化幅度		
	呈村	龙山	平和
$N < N_{R3}$	0.067	0.072	0.056
$N_{R2} < N \leq N_{R3}$	0.049	0.034	0.031
$N_{R1} < N \leq N_{R2}$	0.014	0.008	0.004

衰减速率减小,导致 C_s 计算值增大;由于各河链长度差距增大,原方法中河链长度平均分布的假设与实际情况相差较大,而改进方法中考虑河长差异的思路更符合实际情况,使结果更加准确。

综上所述,基于 Strahler 分级规则构建的河网精简方案具有客观性,改进方法考虑了河长差异的影响,修正了蓄量函数的推求方法,计算结果较准确,相较于原方法稳定性有所提高。在改进方法中, C_s 随着河链数的增加而增大,且趋于稳定,证明精简河网代替原始河网具有可行性。

3.3 河网精简方案适用条件

河链保留越多,精简河网越符合真实情况, C_s 计算值越接近 C_s 率定值。但是复杂的河网结构不利于建立水文模型,需要在河网精简程度和模拟结果准确度之间寻找平衡。对于河网构成为 3 级的中小流域,R1 和 R2 方案误差均较小, C_s 计算值趋于稳定。可以认为,河网结构影响着汇流过程和相关参数,随着河网变得复杂,总河链数和河链长增加,新增河链作为输入条件对于整体计算结果的影响相对减小, C_s 计算值增大且趋于稳定。对河网复杂的流域进行适当简化后,保留的河网仍可以概括该流域的地理特征信息和汇流过程。各流域 1 级河网河长占总河长的比例分别为 47.6% (呈村)、50.3% (龙山)、55.0% (平和)、64.5% (县北沟),保留到 2 级河网可以取得较为准确的结果。

为了进一步验证该结论的适用性,在总河长不变的情况下,对 4 个中小流域的河链长度分布进行修改,研究 1 级河网的河长占总河长的比例对 C_s 计算误差的影响,计算结果见表 6 和图 7。在呈村、龙山和平和流域,当总河长保持不变时,增加 1 级河网河长的占比,R1 和 R2 方案 C_s 计算值的计算偏差逐渐增大,当 1 级河网的河长所占比例超过 70% 时,两种方案的 C_s 计算值出现了显著偏差。县北沟流域情况较特殊,河网最高为 2 级, C_s 计算值的变化趋势与其他 3 个流域相同,且在 1 级河网占比 10% 时,可利用简化后的河网求得偏差较小的 C_s 计算值。但实际上县北沟流域 1 级河网占比达 64.5%,河网精简后引起的流域特征变化较大,导致精简后 C_s 计算结果误差偏大。

表 6 1 级河网河长占比对 R1 和 R2 方案 C_s 计算结果相对误差的影响

Table 6 Influence of the proportion of river length in the level 1 river network on the relative error of C_s between R1 and R2 schemes

1 级河网河长占总河长比例/%	$R_E/\%$			
	呈村	龙山	平和	县北沟
10	0	0	0	16.9
30	1.22	1.15	3.4	45.5
50	2.44	2.30	3.6	78.7
70	15.10	17.60	12.2	84.6
90	45.70	55.20	32.3	92.6

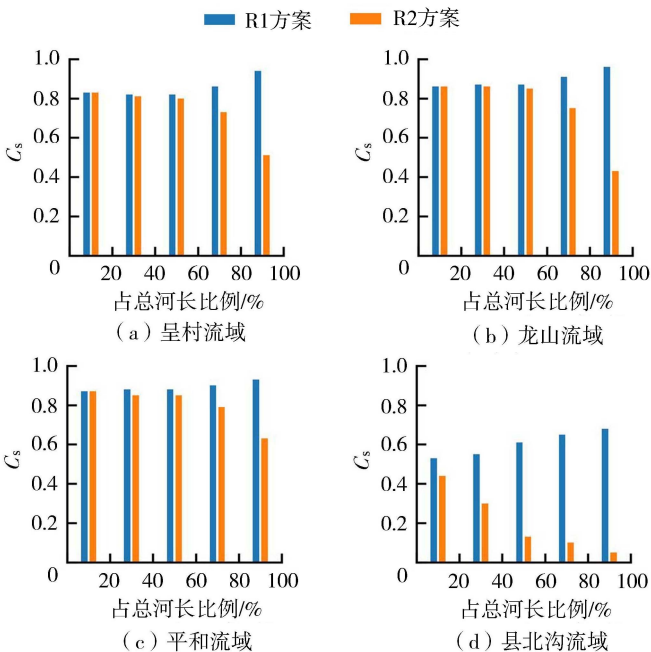


图 7 1 级河网不同河长占总河长比例 C_s 计算结果对比

Fig. 7 Comparison of C_s calculation results with different proportions of river lengths in level 1 river networks

综上所述,不同级别的河网河长占总河长比例一定程度上反映了保留至该级河网所能概括的流域特征。

当 1 级河网占总河长比例不同时,河网密度、平均坡度、平均高程等自然特征会发生改变,说明从河长占比变化的角度能够反映流域特征的变化。当河长占比小于某个阈值时,流域特征的变化不会超过某一范围,能够满足河网精简的条件。以本文具有 3 级河网结构的中小流域为例,若 1 级河网河长占总河长比例不超过 70%,可直接将保留至 2 级河网的 C_s 计算值作为模型参数值,简化河网结构和计算步骤;对于只有 2 级河网的中小流域,则无须精简;对于河网达到 4 级以上的中小流域,则需要调整该阈值。

4 结 论

- a. 本文基于 DEM 信息和自相似河网结构推求河网消退系数,在原有方法的基础上考虑了不同河链长度的影响。改进方法提高了 3 级河网结构 C_s 计算值的精度。改进的蓄量函数推求方法考虑到河长分布的非均匀性,对复杂河网 C_s 的推求结果更合理。
- b. 利用 Strahler 分级规则提出河网精简方案。河网精简方案在不降低 C_s 计算精度的情况下,简化了计算步骤。以本文选取的 1 000 km² 以下中小流域为例,可将 1 级河网河长占总河长的比例是否超过 70% 作为河网简化的阈值,使用保留至 2 级的河网结构计算 C_s 参数。
- c. 无资料地区参数计算是目前水文研究的难点,本文提出的 C_s 计算改进方法和精简方案物理规律明确,为无资料流域参数计算提供了新的思路。研究涉及不同气候分区的中小流域,具有一定的代表性,但研究区样本较少,研究结论仍存在一定的局限性,对于方法假设中的河宽、坡度等因素以及精简条件中的其他判别指标有待深入探讨。

参考文献:

[1] 杨雪,袁丹,罗军刚,等. 无资料流域径流模拟预测研究进展综述[J]. 西安理工大学学报,2021,37(3):354-360. (YANG Xue,YUAN Dan,LUO Jungang, et al. A review of runoff prediction in ungauged basins[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2021,37(3):354-360. (in Chinese))

[2] SALIHA A H,AWULACHEW S B,CULLMANN J,et al. Estimation of flow in ungauged catchments by coupling a hydrological model and neural networks:case study[J]. Hydrology Research,2011,42(5):386-400.

[3] 孔凡哲,芮孝芳. 基于地形特征的流域水文相似性[J]. 地理研究,2003(6):709-715. (KONG Fanzhe,RUI Xiaofang. Hydrological similarity of catchments based on topography[J]. Geographical Research,2003(6):709-715. (in Chinese))

[4] 姚成,章玉霞,李致家,等. 无资料地区水文模拟及相似性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(2):108-113. (YAO Cheng,ZHANG Yuxia,LI Zhijia, et al. Hydrological simulations and similarities in ungauged basins[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,41(2):108-113. (in Chinese))

[5] ZHENG S,TAN H X,CHEN H B,et al. Hydrological parameter analysis based on similarity theory and 3S technology[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science,2019,218(1):12132.

[6] ATHIRA P,SUDHEER K P,CIBIN R,et al. Predictions in ungauged basins:an approach for regionalization of hydrological models considering the probability distribution of model parameters[J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment,2016,30(4):1131-1149.

[7] 龚珩夫,陈红兵,朱芳,等. 新安江模型在资料匮乏的长江中下游山区中小流域洪水预报应用[J]. 湖泊科学,2021,33(2):581-594. (GONG Junfu,CHEN Hongbin,ZHU Fang, et al. Application of Xin'anjiang model in the flow prediction of ungauged small-and medium sized catchments in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(2):581-594. (in Chinese))

[8] 姚成,邱桢毅,李致家,等. API 模型和新安江模型的参数区域化研究与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):6. (YAO Cheng, QIU Zhenyi,LI Zhijia, et al. Parameter regionalization study and application of API model and Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(3):6. (in Chinese))

[9] 赵人俊. 流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社,1984.

[10] 吴滨滨,喻海军,穆杰,等. 考虑下渗的河道与蓄滞洪区洪水演进过程模拟[J]. 水资源保护,2019,35(6):8. (WU Binbin,YU Haijun,MU Jie, et al. Flood simulation in river and flood storage-detention area considering infiltration[J]. Water Resources Protection,2019,35(6):8. (in Chinese))

[11] 张文婷,刘永志,张行南,等. 联安围防洪保护区洪水演进模拟分析[J]. 水资源保护,2022,38(2):6. (ZHANG Wenting, LIU Yongzhi,ZHANG Xingnan, et al. Flood routing simulation and analysis of Lian'anwei flood protection zone[J]. Water

- Resources Protection,2022,38(2):6. (in Chinese))
- [12] 赵人俊.时变线性系统流域汇流模型[J].水文,1991(4):3. (ZHAO Renjun. Watershed bust model for time-varying linear systems[J]. Journal of China Hydrology,1991(4):3. (in Chinese))
- [13] 蔡峰,范娟,李致家.新安江模型汇流参数与地貌特征规律分析及应用[J].水电能源科学,2011,29(5):19-21. (CAI Feng,FAN Juan,LI Zhijia. Analysis and applications of relationship between concentration parameters of Xin'anjiang model and topographic attributes[J]. Water Resources and Power,2011,29(5):19-21. (in Chinese))
- [14] 李致家,梁珂,阚光远,等.新安江模型中河网汇流参数 C_s 的一种计算方法[J].水科学进展,2016,27(5):652-661. (LI Zhijia,LIANG Ke,KAN Guangyuan,et al. A method for deriving the river network flow concentration parameter C_s of the Xin'anjiang model[J]. Advances in Water Science,2016,27(5):652-661. (in Chinese))
- [15] 臧帅宏,李致家,黄迎春,等.基于自相似河网结构的河网消退系数 C_s 计算方法研究[J].湖泊科学,2019,31(3):788-800. (ZANG Shuaihong,LI Zhijia,HUANG Yingchun,et al. Calculation method and application of river network regression coefficient C_s based on self-similarity of river network structure[J]. Journal of Lake Sciences.,2019,31(3):788-800. (in Chinese))
- [16] DIXON S J,SMITH G H S,BESTJ L,et al. The planform mobility of river channel confluences:insights from analysis of remotely sensed imagery[J]. Earth-Science Reviews,2018,176:1-18.
- [17] BENDA L, ANDRAS K, MILLER D, et al. Confluence effects in rivers: interactions of basin scale, network geometry, and disturbance regimes[J]. Water Resources Research,2004,40(5):154-157.
- [18] 付晓花,董增川,韩锐,等.基于气候-水文-水动力单向耦合模型的复杂河网地区水流演进模拟及预估[J/OL].水资源保护;1-13[2022-06-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20220519.1548.006.html>. (FU Xiaohua,DONG Zengchuan,HAN Rui,et al. Simulation and prediction of water flow evolution in complex river network area based on climate-hydrology-hydrodynamic one-way coupling model[J/OL]. Water Resources Protection;1-13[2022-06-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20220519.1548.006.html>. (in Chinese))
- [19] 王皓,李铁键,高洁,等.大尺度流域河网二叉树编码方法[J].河海大学学报(自然科学版),2009,37(5):499-504. (WANG Hao,LI Tiejian,GAO Jie,et al. Binary-tree coding for drainage network of large-scale basins[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2009,37(5):499-504. (in Chinese))
- [20] MENABDE M, VEITZER S, GUPTA V, et al. Tests of peak flow scaling in simulated self-similar river networks[J]. Advances in Water Resources,2001,24(9):991-999.
- [21] 李琪,文康.地貌单位线通用公式中动力因子-流速计算的研究[J].海河水利,1989,000(1):6-12. (LI Qi,WEN Kang. Research on dynamic factor-flow velocity calculation in general formula of geomorphic unit line[J]. Haihe Water Resources,1989,000(1):6-12. (in Chinese))
- [22] 董丰成,石朋,纪小敏,等.基于地形地貌参数确定地貌单位线中的平均流速[J].中国农村水利水电,2019(12):6. (DONG Fengcheng,SHI Peng,JI Xiaomin,et al. Determination of average flow velocity in geomorphologic instantaneous unit hydrograph based on terrain and topographic parameters[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(12):6. (in Chinese))
- [23] TARBOTON D G, BRAS R L, RODRIGUZE-ITURBE I. On the extraction of channel networks from digital elevation data[J]. Hydrological Processes,1991,5(1):81-100.
- [24] 李超,黄薇,向小华,等.产流模型蓄水容量的一种尺度校正方法[J].水资源保护,2021,37(3):74-79. (LI Chao,HUANG Wei,XIANG Xiaohua,et al. A scale correction method for water storage capacity of runoff generation model[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):74-79. (in Chinese))
- [25] 李致家,霍文博,张珂.格林-安普特降雨径流模型改进及初步应用[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):385-391. (LI Zhijia,HUO Wenbo,ZHANG Ke. Improvement and preliminary application of Green-Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(5):385-391. (in Chinese))

(收稿日期:2022-04-10 编辑:胡新宇)