

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2019.0111

李鑫川,贺巧宁,张友静. SCS-CN模型的改进及其空间尺度效应[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 64-70, 130. LI X C, HE Q N, ZHANG Y J. Improved SCS-CN model and its spatial scale effect analysis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 64-70, 130. (in Chinese)

SCS-CN模型的改进及其空间尺度效应

李鑫川^{1,2}, 贺巧宁¹, 张友静³

(1. 淮阴师范学院 城市与环境学院, 江苏 淮安 223300;

2. 中国科学院 流域地理学重点实验室, 南京 210008; 3. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 210098)

摘要: SCS-CN (Soil Conservation Service Curve Number) 模型是广泛应用经验性水文模型, 其模型参数的确定与空间尺度效应对径流模拟结果有着重要的影响。选取淮河上游为研究区, 分析 SCS-CN 模型参数的敏感性并对模型进行改进, 探讨了 9 种栅格尺度(100~2 000 m)下径流模拟结果的空间尺度效应。研究表明: SCS-CN 模型输入参数中, 系数 b 的敏感性高于初损系数(λ), 将参数 b 值作为模型需要修正的参数; 随着空间尺度增加, 下垫面各要素的尺度变化使得参数 b 呈指数递减趋势; 模型模拟精度的最佳空间尺度范围是 250~500 m 尺度。

关键词: SCS-CN 模型; 参数敏感性分析; 空间尺度效应; 淮河上游

中图分类号: TV121 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improved SCS-CN model and its spatial scale effect analysis

LI Xinchuan^{1,2}, HE Qiaoning¹, ZHANG Youjing³

(1. School of Urban and Environmental Sciences, Normal University, Huai'an 223300, China; 2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) method is a widely used empirical hydrologic model. Determination of its parameters and spatial scale effect of parameters have important influences on the accuracy of runoff simulations. With the upstream area of Huaihe River as the research area, we analyzed the sensitivity of SCS-CN model parameters and further modified the model. Spatial scale effects of parameters were analyzed based on the runoff simulation results at nine spatial resolutions (100-2 000 m). The results show that the sensibility of the basin water storage capacity parameter b was higher than that of the initial abstraction ratio (λ), which should be calibrated in the model. The spatial resolutions of underlying surface features had an important effect on the calibrated parameter b , which showed an exponential decreasing trend as the pixel scale increased. The optimal spatial resolution of the modified SCS model was 250-500 m.

Key words: SCS-CN model; parameter sensitivity analysis; daily runoff simulation; spatial scale effect; upstream of Huaihe River

收稿日期: 2019-04-12 修回日期: 2019-06-10 网络出版时间: 2019-06-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190624.1021.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41801075); 中国科学院流域地理学重点实验室开放基金(WSGS2017009); 江苏省高等学校自然科学研究项目(18KJB170002); 中国博士后科学基金(2018M642349)

作者简介: 李鑫川(1988—), 男, 江苏常州人, 讲师, 博士, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: rs_lxc@126.com

简单实用的水文模型对水资源研究具有重要的实际应用价值^[1]。径流曲线法(SCS-CN 模型)是由原美国农业部水土保持局(Soil Conservation Service, SCS)于 20 世纪 50 年代开发的地表径流模型。该模型结构简单、所需参数较少、模拟结果准确度较高,所需的资料易于通过多种手段获取,而且可用于无资料地区,被广泛应用于次降雨地表径流预测、水土保持、城市水文以及流域工程规划等诸多方面^[2-3]。但是,不同的研究区域,其流域面积、气候、植被、土壤、地形等多方面存在一定差异,若直接应用该模型必然存在适用性以及模拟精度问题^[4-5]。SCS-CN 模型将初损率定义为 0.2,而一些研究表明,其值存在地域性差异,如陈正维等^[6]发现初损率在 0.3 时修正的 SCS 模型在紫色土坡地径流模拟效果最理想,初损率为 0.2 只适用于小降雨产流模拟;Yuan 等^[7]以美国 Walnut Gulch 流域的 10 个子流域为研究对象,发现各流域最佳初损率在 0.01 到 0.53 之间。同时,相关研究也对模型定义的最大滞留量系数为 254 提取质疑,如高蕴钰和许有鹏^[8]以西溪流域为例,发现原始模型计算得到的最大滞留量偏大,利用实测洪水资料优选出其系数以 139 较为合适;姚蕾^[9]以黄泥庄和七邻流域的 23 场雨径流资料,将原系数重新修订为 103。因此,模型应用中有必要对 SCS 模型参数进行分析、修正。

流域地形、土壤以及植被等下垫面要素的空间异质性对水文过程的模拟和水文模型参数具有重要影响。Dutta and Nakayama^[10]研究发现栅格大小严重影响洪峰流量和洪水淹没范围。刘宁等^[11]研究发现生态水文模型 WASSI-C 模型对模型响应单元空间尺度的变化具有高度依赖性。叶许春和张奇^[12]分析了不同网格划分大小对分布式水文模型模拟结果的影响,发现网格精细化不一定能够提高模拟效果,分布式水文模型存在一个最佳的网格尺度。

本文以淮河流域上游的 3 个水文站(大坡岭、长台关和息县)为研究区域,利用 EFAST(extended Fourier amplitude sensitive test)方法对 SCS-CN 模型参数进行敏感性分析,修正相关参数从而进行模型改进,并通过在不同栅格尺度的日径流模拟,并分析了流域下垫面特征与水文模型的空间尺度效应。

1 SCS-CN 模型及其改进

1.1 SCS-CN 模型

SCS-CN 模型是基于水量平衡方程(式(1))和

两个比例假设^[13],即直接径流与潜在最大径流的比等于入渗和潜在最大保持量的比(式(2)),初损量与潜在最大保持量成比例(式(3))。

$$P = F + Q + I_a \quad (1)$$

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (2)$$

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

式中: P 为降雨量(mm); I_a 为初损(mm); F 为实际入渗量(mm); Q 为实际径流(mm); S 为潜在最大滞留量(mm); λ 为初损系数,常取 0.2。由式(1)至(3)结合解得 Q 的表达式为

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & P \geq 0.2S \\ Q = 0 & P < 0.2S \end{cases} \quad (4)$$

式中: S 用无因次系数 CN(curve number)来表示,通常 CN 值在 30~100 变化,其转换关系为

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (5)$$

式中:参数 CN 是流域下垫面条件的定量表达,与流域土地覆盖或土地利用、土壤质地和前期土壤湿润程度有关。

1.2 SCS-CN 模型参数敏感性分析

SCS-CN 模型是在大量实验数据的基础上建立起来的,最大滞留量 S 与 CN 存在经验性的转换关系(式(5)),其常数 254 单位为 mm,但并没有实际物理意义,其大小仅能定性反应流域蓄水能力的大小^[13]。然而不同的流域其自然条件差异显著,进而影响流域的蓄水能力,因此本文将常数 254 设定为变量 b ,作为需要修正的模型参数。

SCS-CN 模型以降雨 P 为输入数据,径流 Q 为输出结果,模型参数包括 CN, λ 和 b 。采用扩展傅里叶幅度敏感性检验方法(extended Fourier amplitude sensitive test, EFAST)对模型的 3 个输入变量进行敏感性分析。EFAST 方法是基于方差的定量全局敏感性方法,即认为模型输出结果的敏感性可以用模型结果的方差来反映。该方法可计算分析模型中每一个参数在忽略与其他参数耦合以后的一阶敏感性值(first order sensitivity index),以及该参数在考虑参数耦合作用后的总敏感性值(total sensitivity index)^[14]。参数的敏感性指数越大,说明该参数对模型结果的直接或间接影响或者贡献程度越大,反之亦然。敏感性分析通过 Simlab 2.2.1 软件实现^[15]。模型各参数变化范围设置见表 1,并在取值范围内认定为均匀分布。

表 1 SCS-CN 模型参数设置

Tab. 1 The parameters setting of the SCS-CN model

参数	表达	基础值	变化范围
CN	曲线数	75	40~100
λ	初损系数	0.2	0~0.4
b	蓄水能力系数	254	10~300

总敏感性不仅能够反映各参数本身对模型模拟结果的敏感程度,还综合考虑参数之间的相互作用对模型结果的影响,其敏感性在绝对量上有所增加,同时还更能够突显出敏感性不显著的参数^[16]。由图 1 可见,各参数的总敏感性排序与一阶敏感性分析所得结果一致,依次为:CN、 b 和 λ 。CN 值作为下垫面综合特征(一般包括地质、地貌、土壤和植被和人类活动形成的土地利用方式等)的定量描述,能够反映不同下垫面类型的产流能力,可通过各类下垫面数据结合美国《国家工程手册》给出 CN 查找表得到每个像元的 CN 值,并被许多研究者直接采用^[3,6,17-18],因此可作为已知参数。参数 b 的一阶敏感性和总敏感性都显著高于 λ ,参数 b 的总敏感性权重是 λ 的 5 倍。

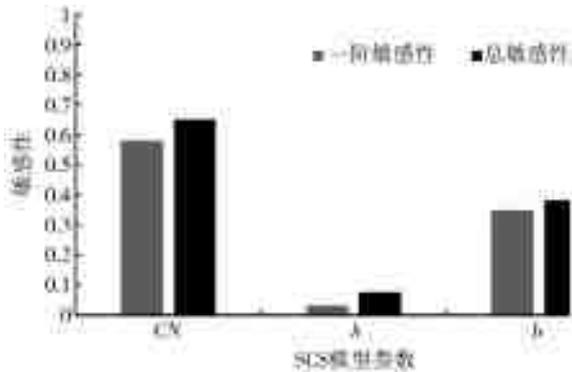


图 1 SCS-CN 模型参数敏感性分析

Fig. 1 Sensitivity analysis results of SCS-CN model parameters

为进一步分析参数 b 与 λ 的敏感性,给定不同条件下的 P 值($P=20, 40$ 和 80 mm)和 CN 值($CN=56, 75$ 和 87),分析参数 b 与 λ 在基础值的 $\pm 20\%$ 变化区间内的总敏感性,结果见图 2(注:在 $P=20$ mm 和 $CN=56$ 时未能达到产流条件)。从图中可

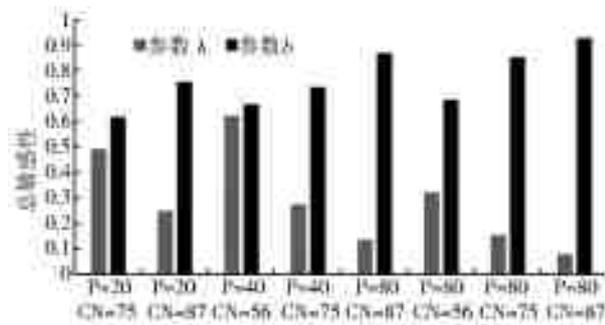


图 2 参数 b 与 λ 敏感性分析

Fig. 2 Sensitivity analysis of the parameter b and λ

以看出,在不同的降雨 P 与下垫面条件 CN 下,参数 b 与 λ 的总体敏感性差异显著。当 $P=40$ mm 和 $CN=56$ 时,这两个总敏感性差异最小。但随着 P 值或 CN 增大(即产流条件越好时),参数 b 的总敏感性逐步增强,而参数 λ 的总敏感性逐步降低。

1.3 SCS-CN 模型的改进

目前大多数研究将初损系数 λ 作为模型需要修正的区域化参数^[6-7,19]。由 SCS-CN 模型公式(4)和式(5)可知,参数 b 和 λ 都与 Q 成反比,调整参数 b 或系数 λ 都得到相同的径流。同时通过上一节参数敏感性分析得出参数 b 的敏感性高于参数 λ 。因此本研究将参数 b 作为 SCS-CN 模型需要修正的模型参数,即

$$S = b \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (6)$$

原模型利用前 5 天的降雨总量来反应流域前期土壤湿润程度(Antecedent Moisture Condition,简称 AMC),并划分为干旱、正常和湿润 3 个等级,分别对应 CN_1, CN_2 和 CN_3 。 CN_1 和 CN_3 是由正常条件下的 CN_2 计算得到,公式为^[20]

$$CN_1 = \frac{4.2CN_2}{10 - 0.058CN_2} \quad (7)$$

$$CN_3 = \frac{23N_2}{10 + 0.13CN_2} \quad (8)$$

将 AMC 划分为 3 个等级进而确定 CN,这种分级具有明显的跳跃性,影响流域产流模拟结果,为此采用前期影响雨量 P_a 来反映土壤的干湿程度,计算公式^[21]为

$$P_{a,t+1} = K(P_{a,t} + P_t) \quad (9)$$

式中: $P_{a,t+1}$ 为第 $t+1$ 天的前期影响雨量(mm); $P_{a,t}$ 为第 t 天的前期影响雨量(mm); P_t 为第 t 天的降雨量(mm); K 为日消退系数或折减系数。将前期影响雨量的 20 mm、60 mm 和 100 mm 对应 CN_1, CN_2 和 CN_3 ,各像元根据其前期影响雨量通过线性内插,得到修订后的 CN 值表。

SCS-CN 模型提供的是流域平均坡度为 5% 时的 CN 值,可根据实际坡度,对 CN 值进行修正^[22]。

$$CN_{2s} = \frac{CN_3 - CN_2}{3} (1 - 2e^{-13.86i}) + CN_2 \quad (10)$$

式中: i 表示坡度(%); CN_{2s} 为进行坡度修正的 CN 值。

1.4 模型的评价方法

流域水文站实测径流主要包括地表径流和地下径流两部分,而 SCS-CN 模型模拟计算径流为地

表径流。利用实测日径流数据采用 Baseflow 进行基流分割^[23],进而得到实测的地表径流。以年径流总量模拟相对误差(RE)和 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)作为评价指标,进行参数 b 的率定和径流模拟结果精度评价,计算公式为

$$RE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_{m,i} - \sum_{i=1}^n Q_{0,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{0,i}} \right) \times 100 \quad (11)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{0,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{0,i} - Q_{0,ave})^2} \quad (12)$$

式中: $Q_{0,i}$ 为第 i 日的观测值; $Q_{0,ave}$ 为观测均值; $Q_{m,i}$ 为第 i 日的模拟值; n 为时间序列长度。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

选择淮河上游息县水文站以上流域作为研究区域(图 3),流域范围为东经 $113^{\circ}15' \sim 114^{\circ}50'$,北纬 $31^{\circ}28' \sim 32^{\circ}44'$ 。流域内地形以低平的平原和缓丘为主,小部分为平原洼地,呈现西高东低趋势,由西南逐渐向东北倾斜。流域地处北亚热带与暖温带气候过渡地带,季风气候明显,雨热同季,光热资源丰富。选取流域内 3 个水文站点(大坡岭、长台关和息县),各对应的控制面积为 1 640、3 090 和 10 190 km^2 。

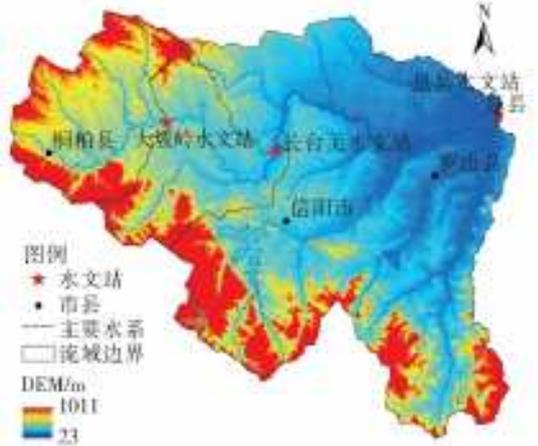


图 3 研究区位置及水文站点分布

Fig. 3 The location of the study area and the distribution of hydrological and meteorological stations

2.2 研究数据

土地覆盖数据基于 16 m 的高分 1 号卫星影像数据,采用多分类器与知识规则结合的方法^[24],将地表覆盖类型分类 5 类,即耕地、林地、不透水、水体和裸地。并结合实际情况将耕地分为水田、旱地和坡耕地,林地按照覆盖度划分为高、中、低 3 个等级,

不透水按照不透水率高、中、低 3 个等级,裸地着按高覆盖度和地覆盖度划分高、低 2 个等级。采用 1:100 万土壤数据,依据土壤类型分为 A、B、C、D 四类土壤水文分组。参照美国国家工程手册列出 CN 值查算表^[25]及实际分类数据,建立不同下垫面特征的 CN 值表(表 2)。

表 2 CN 值表

Tab. 2 The table of runoff curve number (CN)

类别	土壤水文分组	A	B	C	D
水体		100	100	100	100
耕地	坡耕地	68	76	82	85
	水田	62	71	78	81
	旱地	57	66	73	76
林地	低覆盖度	45	66	77	83
	中覆盖度	36	60	73	79
	高覆盖度	30	55	70	77
不透水	高不透水率	89	92	94	95
	中不透水率	81	88	81	93
	低不透水率	77	85	90	92
裸地	高覆盖度	77	86	91	94
	低覆盖度	74	83	88	90

由国家水文年鉴,获取研究区流域内的 3 个水文站(大坡岭、长台关和息县)2007—2010 年实测日径流数据。同时获取流域内常规气象观测站(60 个)2007—2010 年逐日降雨数据。研究区 DEM 数据为 30 m 的 ASTER GDEM V2 (<http://www.gscloud.cn/>)。

采用 9 种像元尺度,具体为:100、250、500、750、1 000、1 250、1 500、1 750 和 2 000 m,对各下流域面数据进行尺度转换:由 16 m 土地覆盖数据和 1 km 土壤数据,通过重采样,结合 CN 值表,得到不同尺度下的 CN 数据;采用克里金法进行降雨站点数据进行不同尺度下降雨数据的插值;对 DEM 数据进行重采样,计算不同尺度下流域坡度数据。将各组尺度数据输入 SCS-CN 模型中,分析不同尺度下,流域下垫面特征参数与水文模型参数的变化,以及对径流模拟结果的影响。

3 结果分析

3.1 SCS-CN 模型改进前后对比分析

在 100 m 尺度下,对比分析 SCS-CN 模型改进前后日径流模拟效果(表 3)。从 2007—2010 年径流模拟总量来看,原始 SCS-CN 模型在 3 个流域的模拟结果都偏小,特别是大坡岭和长台关的相对误差都偏 30% 以上,表明原模型估算结果明显偏低。改

进的 SCS-CN 模型将这 3 个流域的模型参数 b 修正为 113, 127 和 129 后, 各流域年均径流误差在 1% 以内。从 Nash-Sutcliffe 效率系数 (NSE) 来看, 相对于原始的 SCS-CN 模型改进的 SCS-CN 模型的 NSE 都有显著提升, 特别是息县的 NSE 为 0.87。

表 3 SCS-CN 模型改进前后径流模拟结果对比

Tab. 3 Comparison of runoff simulations with original and modified SCS model

流域	原始 SCS-CN 模型		改进 SCS-CN 模型	
	RE/%	NSE	RE/%	NSE
大坡岭	-36.0	0.53	0.4	0.63
长台关	-39.3	0.61	0.6	0.81
息县	-25.3	0.69	0.5	0.87

3.2 下垫面参数多尺度空间变化

地表覆盖类型面积比例、坡度、高程等下垫面信息对空间尺度变化差异明显。以整个研究区域为例, 对于四类主要地表覆盖类型(水体、耕地、不透水面和林地), 由于水体和不透水面单元面积小、分布分散, 随着空间尺度的上升, 不断的并入周围的耕地中, 水体和不透水面比例不断缩小, 使得耕地面积比例更加。而林地由于分布较为集中, 总体面积变化不显著(表 4)。

表 4 不同像元尺度下息县土地覆盖面积比例变化

Tab. 4 Land cover changes in Xixian Station under different pixel scales

像元尺度/m	单位: %			
	水体	耕地	不透水面	林地
100	2.50	55.48	4.58	37.43
250	2.27	57.47	3.14	37.12
500	1.87	59.56	1.84	36.74
750	1.38	60.11	1.57	36.94
1 000	1.01	60.92	1.35	36.72
1 250	0.85	61.18	1.33	36.65
1 500	0.71	61.54	1.23	36.52
1 750	0.64	61.55	1.21	36.56
2 000	0.56	61.56	1.11	36.77

随着栅格单元的扩大, 地形差异变小、坦化作用更明显, 研究区流域平均高程和平均坡度都呈下降趋势(图 4)。平均高程由 149.72 m 降低到 148.69 m, 下降比例为 0.69%; 而平均坡度由 5.01° 下降到 0.87°, 下降比例为 82.6%, 空间尺度越大下降趋势进一步减小。网格大小对流域坡度影响更显著。

由流域下垫面基表覆盖分类、土壤类型和流域

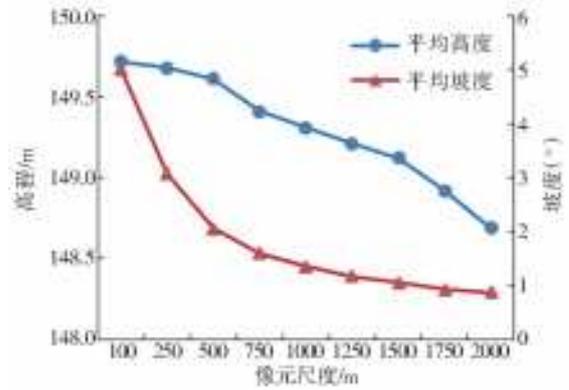


图 4 息县高程与坡度尺度变化

Fig. 4 Changes in mean elevation and slope at nine pixel scales in Xixian Station

坡度, 结合表 2 和式 (10), 进行流域修正后 CN 值 (CN_{2s}) 的计算, 完成各流域平均 CN_{2s} 的多尺度统计(图 5)。从上游大坡岭至下游息县, 地形逐步变缓, 林地面积比例由 60% 减小至 37%, 而林地的 CN 值在各土地覆盖类型中最小, 使得流域平均 CN_{2s} 从上游向下游逐步增大 ($CN_{2s, 大坡岭} < CN_{2s, 长台关} < CN_{2s, 息县}$)。随着空间尺度的增大, 主要受到坡度的尺度效应影响, 各流域的 CN_{2s} 随也呈指数下降趋势。

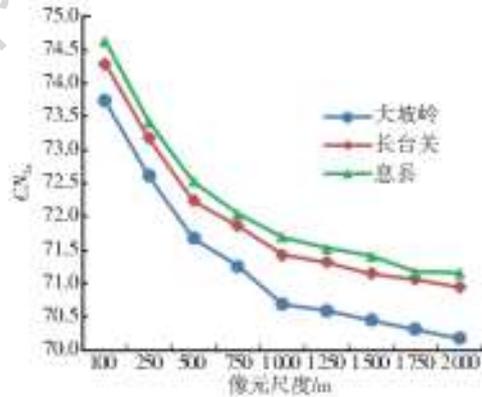


图 5 各流域 CN_{2s} 尺度变化

Fig. 5 Variations of CN_{2s} at nine spatial resolutions in each watershed

3.3 径流模拟多尺度分析

利用多尺度数据进行各流域日径流模拟结果分析。首先将 100 m 尺度数据进行参数 b 值的率定, 并将修正后的 b 值作为其他尺度的径流模拟输入值, 分析径流模拟结果的尺度效应。以息县为例, 由图 6 可见, 100 m 尺度下参数 b 的率定值为 129, RE 为 0.4%, NSE 为 0.869。随着空间尺度的拓展, 模拟径流总量减小, 模型拟合相对误差逐渐增大, 2 000 m 尺度时, RE=17.0%, 而 NSE 虽然呈下降趋势, 但总体变化并不显著。说明参数 b 具有明显的尺度效应, 影响模型模拟总量误差, 在不同尺度下需分别率定。

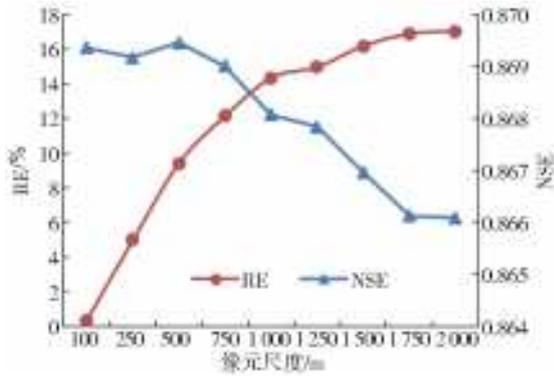


图6 息县径流模拟结果多尺度分析($b=129$)

Fig. 6 Variations in runoff simulation results at nine resolutions in Xixian station ($b=129$)

将9种空间尺度数据输入 SCS-CN 模型,根据实测日径流数据率定各尺度下最优参数 b 值,得到各流域最优 b 值的尺度变化趋势(图7)。参数 b 值大小反映流域蓄水能力,其值越小产流能力越大,同时参数 b 作为一个需要修订的区域性参数,综合反映了流域特征对产流的影响, b 值大小一定程度上与流域的面积大小、地形地貌、气候、土壤类型和植被覆盖等有关。上游大坡岭地区,以次生林和中幼林为主,同时土层较薄、坡度较大,使得流域产流能力较强;而至下游地区农田面积增加、坡度变缓,使得流域蓄水能力增强。100 m 尺度下, b 值基本呈现由上游至下游递增的趋势(即 $b_{\text{大坡岭}} > b_{\text{长台关}} > b_{\text{息县}}$)。随着空间尺度的增大,流域下垫面各特征发生相应变化,其中坡度的空间尺度差异最为显著、呈指数递减趋势,流域平均 CN_{2s} 也呈指数递减趋势,使得各流域 b 值呈指数下降趋势。

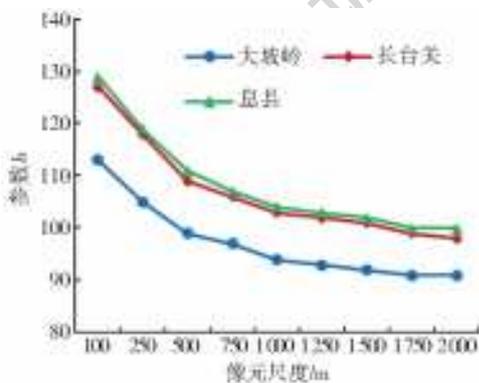


图7 模型率定后各流域参数 b 值的尺度变化

Fig. 7 Variations in the calibrated parameter b at nine resolutions in each watershed

对不同尺度下各流域水文模型率定结果进行精度评价(图8)。100 m 尺度下,大坡岭径流模拟精度为 $NSE=0.63$,长台关精度为 $NSE=0.81$,息县精度为 $NSE=0.87$,表明从上游至下游,随着流域面积的增大、汇流时间变长,径流模拟结果提高。随

着栅格尺度的增大,各流域的模拟精度都呈现先增大后减小的趋势,其中 250 m 和 500 m 空间尺度的模拟精度最高,但各尺度差异并不显著,主要原因是 SCS-CN 模型结构简单、参数较少。孙立群等^[26]以 10 m 分辨率的 DEM 为原始数据,生成 10~1 000 m 等 17 种分辨率的 DEM,发现 150 m 分辨率是建立 TOPMODEL 模型的最佳值,300 m 分辨率是保证模型结果有效的基本要求。

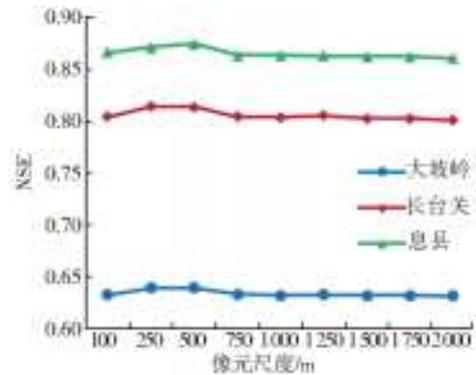


图8 各流域率定后径流模拟结果尺度变化

Fig. 8 Variations in runoff simulation results at nine resolutions in each watershed

4 结论

本文在深入分析 SCS-CN 模型参数的敏感性的基础上,进行了栅格尺度的水文模型日径流模拟,分析了 9 种空间尺度下的下垫面参数、水文模型参数与径流模拟结果,得到以下结论。

(1)利用 EFAST 方法对 SCS-CN 进行模型参数的敏感性分析,参数 b 的敏感性优于 λ ,并作为模型需要修正的参数。

(2)随着空间尺度的增加(100~2 000 m),流域平均高程减小幅度较小,流域平均坡度下降幅度较大;下垫面地表覆盖中,水体和不透水面的面积比例不断下降,耕地面积增加,林地面积变化不大;这些流域下垫面要素的变化,使得 CN_{2s} 随着空间尺度的增加而呈指数递减趋势。

(3)参数 b 对空间尺度变化较为敏感,不同尺度下修正的 b 值呈指数递减趋势。

(4)研究区中下游流域模型模拟精度优于上游流域,模型模拟精度的最佳空间尺度范围是 250 m 和 500 m 尺度。

本文模型构建以淮河上游为研究区,模型的汇流过程较为简单,并未考虑土壤水运动、植被蒸发等影响因素,需要在后期进一步改进。同时对于参数 b 的参数区域化方案也是需要深入研究,以实现模型在其他流域的应用。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 洪林,罗琳,江海涛. SCS 模型在流域尺度水文模拟中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 582-586. (HONG L, LUO L, JIANG H T. Application of SCS model to hydrological simulation at an agricultural watershed scale[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(5): 582-586. (in Chinese))
- [3] 蒋尚明,金菊良,许浒,等. 基于径流曲线数模型的江淮丘陵区塘坝复蓄次数计算模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 117-124. (JIANG S M, JIN J L, XU H, et al. Computational model of pond re-storage times in Jianghuai hilly area based on SCS model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(18): 117-124. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.18.015.
- [4] SURESH BABU P, MISHRA S K. Improved SCS-CN-Inspired Model [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(11): 1164-1172. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000435.
- [5] XIAO B, WANG Q H, FAN J. Application of the SCS-CN Model to Runoff Estimation in a Small Watershed with High Spatial Heterogeneity [J]. Pedosphere, 2011, 21(6): 738-749. DOI: 10.1016/S1002-0160(11)60177-X.
- [6] 陈正维,刘兴年,朱波. 基于 SCS-CN 模型的紫色土坡地径流预测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 72-81. (CHEN Z W, LIU X N, ZHU B. Runoff estimation in hillslope cropland of purple soil based on SCS-CN model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(7): 72-81. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.07.009.
- [7] YUAN Y, NIE W, MCCUTCHEON S C, et al. Initial abstraction and curve numbers for semiarid watersheds in Southeastern Arizona [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(3): 774-783. DOI: 10.1002/hyp.9592.
- [8] 高蕴珏,许有鹏. SCS 遥感水文模型在曹娥江流域应用研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 1992, 28(1): 150-159. (GAO Y Y, XU Y P. An application research of SCS model based on remote sensing information in Cao E river basin [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1992, 28(1): 150-159. (in Chinese))
- [9] 姚蕾. 缺资料地区产汇流模型研究[D]. 南京:河海大学, 2014. (YAO L. Research of runoff model in ungauged basins[D]. Nanjing: Hohai University, 2014. (in Chinese))
- [10] DUTTA D, NAKAYAMA K. Effects of spatial grid resolution on river flow and surface inundation simulation by physically based distributed modelling approach[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(4): 534-545. DOI: 10.1002/hyp.7183.
- [11] 刘宁,孙鹏森,刘世荣,等. WASSI-C 生态水文模型响应单元空间尺度的确定——以杂古脑流域为例[J]. 植物生态学报, 2013, 37(2): 132-141. (LIU N, SUN P S, LIU S R, et al. Determination of spatial scale of response unit for the WASSI-C eco-hydrological model: A case study on the upper Zagunao River watershed of China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(2): 132-141. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1258.2013.00000.
- [12] 叶许春,张奇. 网格大小选择对大尺度分布式水文模型水文过程模拟的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 112-116. (XU Y C, ZHANG Q. Effects of grid size on hydrological process modeling as a distributed hydrological model at large scale [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(3): 112-116. (in Chinese))
- [13] HAWKINS R, WARD T, WOODWARD D, et al. Curve Number Hydrology: State of the Practice [M]. American Society of Civil Engineers, 2008.
- [14] SALTELLI A, RATTI M, ANDRES T, et al. Global Sensitivity Analysis: The Primer [M]. 2008.
- [15] Joint Research Centre of the European Commission [EB/OL]. <https://ec.europa.eu/jrc/en/samo/simlab>.
- [16] 姜志伟,陈仲新,周清波,等. CERES-Wheat 作物模型参数全局敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 236-242. (JIANG Z W, CHENG Z X, ZHOU Q B, et al. Global sensitivity analysis of CERES-Wheat model parameters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 236-242. (in Chinese))
- [17] 蔡维英,刘兴朋,张继权. 基于分布式 SCS 模型的山地景区山洪灾害模拟研究[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 15-18. (CAI W, LIU X P, ZHANG J Q. The study of mountain flood disaster simulation based on distributed SCS model [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2): 15-18. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.02.004.
- [18] AJMAL M, WASEEM M, AHN J, et al. Improved runoff estimation using event-based rainfall-runoff models [J]. Water Resources Management, 2015, 29(6): 1995-2010. DOI: 10.1007/s11269-015-0924-z.

(下转第 130 页)

- shallow groundwater quality based on improved grey clustering analysis method[J]. *Technology of soil and water conservation*, 2017(5):1-3. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-5366.2017.05.01.
- [19] 马腾飞,陈文波,黄莹波. 主成分分析法在高州水库水质评价中的应用[J]. *四川环境*, 2018, 37(1):65-71. (MA T F, CHEN W B, HUANG Y B. Application of principal component analysis in water quality evaluation of Gaozhou Reservoir[J]. *Sichuan Environment*, 2018, 37(1):65-71. (in Chinese)). DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2018.01.012.
- [20] 刘剑. 主成分分析法在沙河水质评价分析中的应用[J]. *广东水利水电*, 2018(2):31-33. (LIU J. Application of principal component analysis in water quality assessment and analysis of Shahe River [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2018(2):31-33 (in Chinese)). DOI: 10.11905/j.issn.1008-0112.2018.02.006.
- [21] 李晓英,苏志伟,周华,等. 基于主成分分析的 GA-BP 模型在城市需水预测中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(6):39-44. (LI X Y, SU Z W, ZHOU H, et al. Application of GA-BP model based on principal component analysis in urban water demand prediction [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(6):39-44. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2017.06.006.
- [22] 崔晓雨. 主成分分析法在乌鲁木齐河水质评价中的应用[J]. *水资源开发与管理*, 2017(10):25-27. (CUI X Y. Application of principal component analysis in water quality assessment of Urumqi River[J]. *Water Resources Development and Management*, 2017(10):25-27. (in Chinese)). DOI: 10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2017.010.008.
- [23] GB/T 14848—2017, 地下水质量标准[S]. (GB/T 14848-2017. *Quality Standard for Groundwater* [S]. (in Chinese)).
- [24] 朱谱成,耿新新,马琳娜,等. 牯牛川上中游区地下水水化学特征及其成因分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(19):162-169. (ZHU P C, GENG X X, MA L N, et al. Analysis of hydrochemical characteristics and causes of groundwater in the upper and middle reaches of Baniuchuan [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(19):162-169. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.19.025.
- [25] 王仕琴,郑文波,孔晓乐. 华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(10):1476-1482. (WANG S Q, ZHENG W B, KONG X L. Distribution characteristics and spatial differences of nitrate in shallow groundwater in North China Agricultural Region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10):1476-1482. (in Chinese)) DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180639.
- [26] 周锴镠,王赫生,龚建师,等. 淮河流域平原区浅层地下水铁锰分布特征及成因浅析[J]. *华东地质*, 2014, 35(2):147-151. (ZHOU K E, WANG H S, GONG J S, et al. Distribution characteristics and causes of iron and manganese in shallow groundwater in plain area of Huaihe River Basin [J]. *East China Geology*, 2014, 35(2):147-151. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-4814.2014.02.010.

(上接第 70 页)

- [19] AJMAL M, MOON G, AHN J, et al. Investigation of SCS-CN and its inspired modified models for runoff estimation in South Korean watersheds[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2015, 9(4):592-603. DOI: 10.1016/j.jher.2014.11.003.
- [20] MILIANI F, RAVAZZANI G, MANCINI M. Adaptation of precipitation index for the estimation of antecedent moisture condition in large mountainous basins[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2011, 16(3):218-227.
- [21] 包为民. 水文预报[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009. (BAO W M. *Hydrologic Forecast* [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2009. (in Chinese))
- [22] MISHRA S K, CHAUDHARY A, SHRESTHA R K, et al. Experimental verification of the effect of slope and land use on SCS runoff curve number[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(11):3407-3416. DOI: 10.1007/s11269-014-0582-6.
- [23] ARNOLD J G, ALLEN P M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records [J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35(2):411-424. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb03599.x.
- [24] 孙璐. 多分类器与知识规则结合的流域下垫面分类及水文参数区域化[D]. 南京:河海大学, 2015. (SUN L. *Combined multiple classifiers with a rule-based basin underlying surface classification and regionalization* [D]. Nanjing: Hohai University, 2015. (in Chinese))
- [25] USDA-SCS. *National Engineering Handbook. Section 4. Hydrology* [K]. 1985.
- [26] 孙立群,胡成,陈刚. TOPMODEL 模型中的 DEM 尺度效应[J]. *水科学进展*, 2008, 19(5):699-706. (SUN L Q, HU C, CHEN G. Effects of DEM resolution on the TOPMODEL [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5):699-706. (in Chinese))