

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.012

产流模型蓄水容量的一种尺度校正方法

李超¹, 黄薇², 向小华¹, 王志伟¹, 吴晓玲¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 杭州市水文水资源监测中心, 浙江 杭州 310016)

摘要:针对不同尺度下地形指数以及蓄水容量的差异问题,以流域栅格地形为依托,提出了蓄水容量的一种尺度校正方法。以地形指数作为辅助因子,通过引入分辨率因子和分形理论分别对决定地形指数的上游集水面积和坡度两个变量进行尺度校正,并根据地形指数与蓄水容量之间的关联关系,计算地形指数校正后的不同尺度蓄水容量。实例验证结果表明,校正后的尺度蓄水容量均趋近于目标尺度蓄水容量,蓄水容量面积分布曲线逼近目标曲线;在仅考虑地形因素下,所提出的校正方法不仅能够有效降低尺度对地形指数和蓄水容量计算的影响,而且能够大幅减小计算工作量,提高计算效率。

关键词:水文尺度;蓄水容量;产流模型;地形指数;尺度校正

中图分类号:TV121;P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0074-06

A scale correction method for water storage capacity of runoff generation model//LI Chao¹, HUANG Wei², XIANG Xiaohua¹, WANG Zhiwei¹, WU Xiaoling¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hangzhou Hydrology and Water Resources Monitoring Center, Hangzhou 310016, China)

Abstract: In view of the difference of topographic index and water storage capacity in different scales, a scale correction method for water storage capacity is proposed based on the raster topography of the basin. Using the topographic index as an auxiliary factor, two variables that determine the topographic index, namely the upslope catchment area and slope, were respectively scale corrected by introducing the resolution factor and fractal theory; Then, the storage capacity of each scale grid under the corrected topographic index was calculated according to the correlation between the topographic index and the storage capacity. The experiment results showed that the corrected storage capacity of each scale tended to the respective storage capacity of target scale, and the calculated storage capacity area distribution curves approached the target curve. Considering terrain factors, the proposed correction method can not only effectively reduce the influence of grid scale on the calculation of topographic index and water storage capacity, but also greatly reduce the calculation workload and improve the calculation efficiency.

Key words: hydrological scale; storage capacity; runoff generation model; topographic index; scale correction

与集总式模型相比,分布式水文模型能更加细致地描述降水和下垫面的空间异质性,模型参数的物理意义也更加明确,从而能降低模型对于参数率定的依赖性^[1-5]。但分布式水文模型也存在尺度选择的难题,国际地学研究领域多次举办尺度专题研讨会,以深化对水文尺度问题的认识并探讨解决途径^[6-7]。不同尺度的水文规律以及水文尺度间的转化关系已成为水文研究的热点问题^[8-10]。在流域水文模型中,产流计算一直是水文研究的核心课

题^[11-12]。新安江模型采用蓄水容量面积分配曲线来考虑土壤缺水量分布不均的问题,其中流域平均蓄水容量需要通过资料率定得到^[13]。当流域缺乏实测水文资料时,就无法反映下垫面空间异质性,导致模型模拟结果不佳^[14]。目前,通过下垫面因子间接推求蓄水容量已有大量研究,石朋等^[15]考虑到地形指数实质上反映了土壤缺水量的空间分布不均匀性,这与蓄水容量的本质一致,从而建立了蓄水容量同地形指数的定量函数关系;孔凡哲等^[16]根据地形

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2018B10914);国家重点研发计划(2016YFA0601000)

作者简介:李超(1995—),男,硕士研究生,研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。E-mail: 414727428@qq.com

通信作者:向小华(1981—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源及分布式流域水文模拟研究。E-mail: xxhxiang@hhu.edu.cn

坡度对产流的影响,建立了各子流域蓄水容量同地形坡度的关系,并在淮河大坡岭流域的应用中取得较佳的模拟结果;Chen 等^[17]提出了基于地形指数的不易产流度指数曲线(IRDC 曲线),用于代替传统新安江模型中的蓄水容量面积分布曲线;向小华等^[14]以 Van Genuchten 模型(VG 模型)表述的土壤水分特征曲线为基础,建立了融合地形和土壤特征影响的蓄水容量显式表达式,为空间尺度的产流计算和无资料区的水文模拟提供了计算方法。

高分辨率的数据会带来较大的计算量,而低分辨率的数据通过校正,可在获得接近高分辨率数据计算结果的同时大幅度减小计算量、提高计算效率,进而将分布式水文模型用于实时问题。本文以地形指数与蓄水容量之间的定量函数关系^[18-19]为依托,通过引入分辨率因子和分形理论^[20-21]对上游集水面积和坡度因子进行尺度校正,构建地形指数尺度校正公式,实现蓄水容量的尺度转换计算。

1 尺度校正方法

1.1 地形指数的尺度校正

地形指数由上游集水面积和坡度共同决定,单点地形指数计算公式为

$$\lambda_i = \ln\left(\frac{A_i}{l_i \tan \beta_i}\right) \quad (1)$$

式中: λ_i 为流域内某一点的地形指数; A_i 为流域内某一点的上游集水面积, m^2 ; l_i 为流域内某一点的等高线长度, m ; β_i 为流域内某一点的坡度。

研究表明,DEM 数据分辨率的降低会导致流域平均集水面积的增加以及地形整体坡度的减小^[22-24],尺度差异越大,偏差也就越大。针对上游集水面积 A_i ,在较低分辨率下,可以通过引入分辨率因子校正获得较高分辨率的上游集水面积^[25]:

$$A_{si} = \frac{A_i}{N_s I_r} \quad (2)$$

式中: A_{si} 为校正到目标尺度的流域内某一点上游集水面积, m^2 ; A_i 为实际尺度的流域内某一点上游集水面积, m^2 ; N_s 为实际尺度与目标尺度栅格尺寸比的平方; I_r 为分辨率因子。

目前,坡度的尺度校正主要基于分形理论、直方图匹配和坡度图谱,本文引入分形理论^[25-26]对坡度衰减现象予以纠正,期望较低分辨率下的坡度与目标高分辨率下的坡度维持统计规律的一致性,计算公式为

$$\beta_{si} = \alpha_{\max} d_s^{1-D} \quad (3)$$

其中

$$\alpha_{\max} = \frac{\beta_{\max}}{(dX^2 + dY^2)^{\frac{1-D}{2}}}$$

$$d_s = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$$

式中: β_{si} 为校正到目标尺度的坡度; $\beta_{\max}$ 为实际尺度的最大坡度; dX 、 dY 分别为实际尺度下沿 x 、 y 轴的栅格尺寸; ΔX 、 ΔY 分别为目标尺度下沿 x 、 y 轴的栅格尺寸; D 为分形维数。

将式(2)(3)代入式(1)中,得到地形指数的校正公式为

$$\lambda_{si} = \ln\left(\frac{A_{si}}{l_i \tan \beta_{si}}\right) \quad (4)$$

式中 λ_{si} 为校正到目标尺度的流域内某一点地形指数。

1.2 蓄水容量的尺度校正

单点地形指数与蓄水容量之间的关联关系已被广泛认知,通过将上述校正后的地形指数代入蓄水容量与地形指数的定量函数关系式^[15,27],即可得到流域各点的蓄水容量:

$$\frac{W_i}{W_{\max}} = \exp\left\{-\left[\frac{\ln(\lambda_i - \lambda_{\min} + 1)}{\theta}\right]^\gamma\right\} \quad (5)$$

式中: W_i 为流域内某一点的蓄水容量, mm ; $W_{\max}$ 为流域内最大蓄水容量, mm ; $\lambda_{\min}$ 为流域内最小地形指数; θ 、 γ 分别为网格的尺度参数和形状参数。

基于式(5),采用地形因子推求栅格蓄水容量时,以流域内最大单点蓄水容量 $W_{\max}$ 为参数,通过提取流域内各栅格地形指数来推求栅格蓄水容量。

2 实例验证

2.1 研究区概况与资料

以紫罗山水文站上游控制流域(图1,以下简称紫罗山流域)实际资料来验证前文提出的蓄水容量的尺度校正方法(以下简称本文方法)。紫罗山水文站($112^\circ 31'E$, $34^\circ 10'N$)地处淮河流域沙颍河水系北汝河上游,河南省洛阳市汝阳县小店乡紫罗山坡下,控制面积约为 $1\,800\text{ km}^2$,其中山丘面积约占 75%,干流长度约为 100 km ,平均海拔约为 820 m ,地

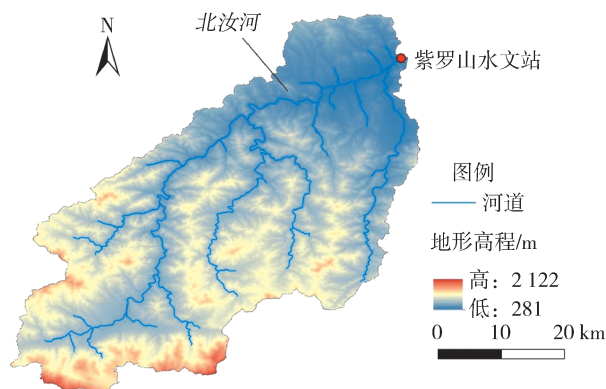


图1 紫罗山流域

Fig.1 The Ziluo Mountain watershed map

形呈西南向东北倾斜的形态。流域属暖温带半干旱大陆性气候,四季分明,1980—1996 年多年平均降水量约为 900 mm,降水年内分布极不均匀,多集中于 6—8 月,占全年的 60%~70%。

研究采用的 DEM 数据为公开的 ASTGTM 数据,原始精度为 30 m,通过重采样获得分辨率为 50 m、100 m、500 m 以及 1 000 m 的 DEM 数据作为研究数据。

2.2 地形指数降尺度

选取 DEM 数据的 1 000 m 分辨率作为实际尺度,分别以 50 m、100 m、500 m 分辨率作为目标尺度,采用式(4)对实际尺度提取的地形指数进行尺度校正。图 2 为目标尺度和实际尺度向目标尺度校正的地形指数空间分布,其中,图 2(a)(b)(c)(d)为采用 4 种分辨率直接计算得到的地形指数分布图,图 2(e)(f)(g)为以 1 000 m 为实际分辨率,校正后的 50 m、100 m、500 m 分辨率地形指数分布图。总体来看,各尺度校正后的地形指数空间分布与目标尺度

的直接计算值都较接近。校正 50 m 分辨率(图 2(e))与目标尺度实际 50 m 分辨率(图 2(a))地形指数空间分布最接近。图中绿色为地形指数值较小的区域,黄色部分逐渐增大。整体观察校正前后地形指数的空间分布,实际尺度中浅绿色部分的区域经过校正后颜色有所加深,呈现深绿色,河道中的黄色部分逐渐向浅绿色转变,这表明校正后的地形指数值整体上有变小的趋势,向目标尺度的实际值靠拢。

图 3 为尺度校正前后地形指数面积分布曲线,可以看出,随着 DEM 数据分辨率的降低,地形指数面积分布曲线逐渐上移远离横轴,且尺度差异越大,曲线向上偏移越明显。这表明较小的地形指数占比越小,流域各点地形指数差异性越小。校正后地形指数面积分布曲线同目标尺度面积分布曲线呈现出极高的相似性,整体基本重合,曲线上移现象得到纠正,地形指数整体向较小值集中。尤其是地形指数的最小值,如 1 000 m 分辨率降尺度至 50 m 分辨率

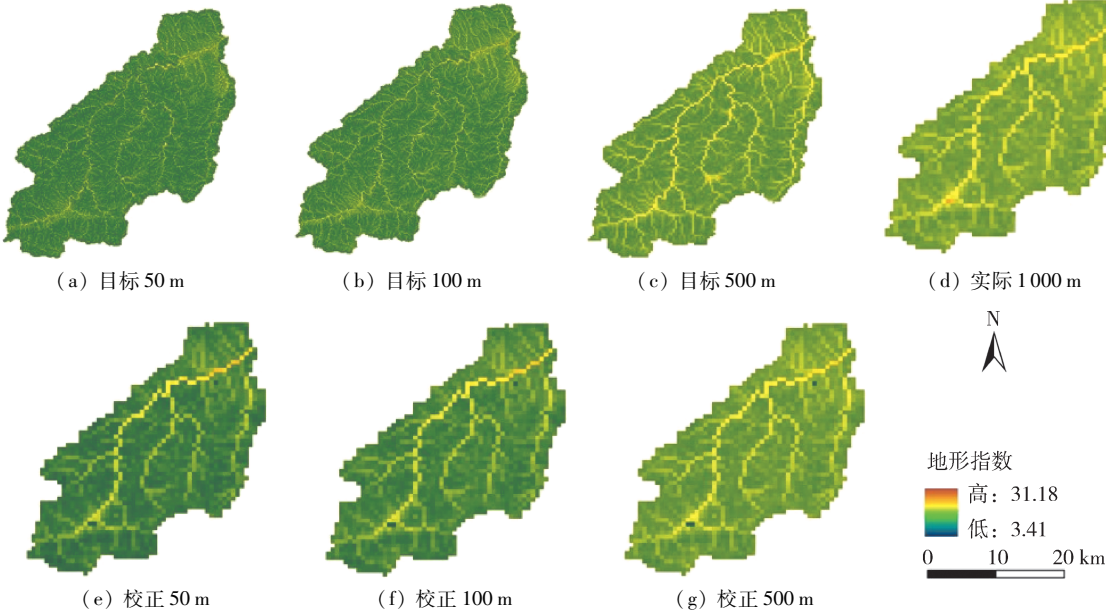


图 2 不同分辨率地形指数空间分布对比

Fig. 2 Comparison of spatial distribution of topographic index with different resolutions

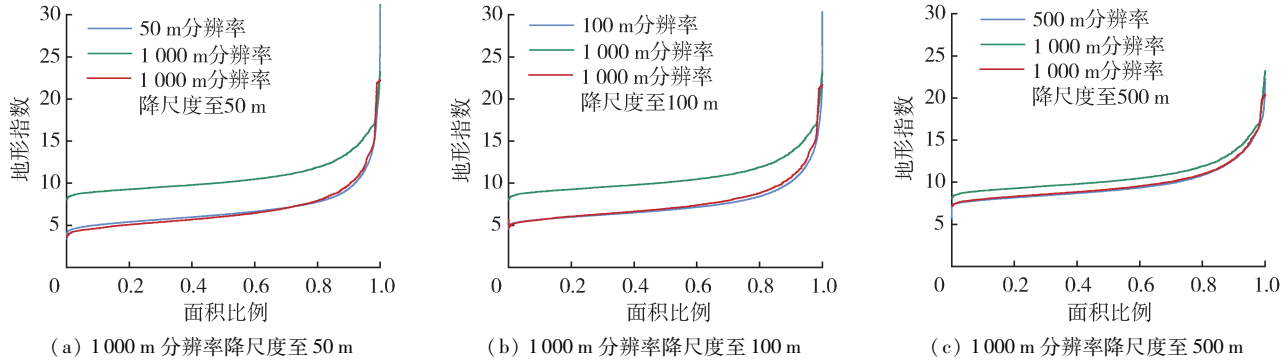


图 3 尺度校正前后地形指数面积分布曲线

Fig. 3 Area distribution curves of topographic index before and after scale correction

结果(图 3(a)),最小值基本上减小到 1 000 m 分辨率的一半,与 50 m 分辨率结果基本重合。

表 1 为尺度校正前后地形指数的空间统计特性,可以看出,校正之前随着 DEM 分辨率的降低,地形指数均值逐渐增加,尺度差异越大,地形指数被高估的偏差越明显。校正后的地形指数与目标地形指数之间误差较小,其中校正 500 m 分辨率的地形指数均值最接近目标 500 m 分辨率的地形指数均值,最小均值误差只有 1.44%;与实际尺度 1 000 m 分辨率相比,校正后的地形指数均值有所减小,其中校正 500 m 分辨率的地形指数均值最接近实际 1 000 m 分辨率的地形指数均值,均值误差为 -8.64%。这表明上述地形指数尺度校正方法可以有效地降低地形指数计算的偏差。

表 1 尺度校正前后地形指数空间统计特性

Table 1 Spatial statistical characteristics of topographic index before and after scale correction				
分辨率/m	尺度类别	地形指数均值	均值误差/%	与实际 1 000 m 分辨率误差/%
50	目标	6.92		
50	校正	6.80	-1.73	-36.80
100	目标	7.48		
100	校正	7.71	3.07	-28.35
500	目标	9.69		
500	校正	9.83	1.44	-8.64
1 000	实际	10.76		

2.3 蓄水容量降尺度

选取 DEM 数据的 1 000 m 分辨率作为实际尺度,分别以 50 m、100 m、500 m 分辨率作为目标尺度,采用式(5)对蓄水容量进行尺度校正。图 4 为目标

尺度和实际尺度向目标尺度校正的蓄水容量空间分布,其中图 4(a)(b)(c)(d)为采用 4 种分辨率直接计算得到的蓄水容量分布,图 4(e)(f)(g)为以 1 000 m 为实际分辨率,校正后的 50 m、100 m、500 m 分辨率蓄水容量分布。总体来看,流域河道处的蓄水容量较小(图中对应着绿色区域),而远离河道和流域分水岭部分蓄水容量较大(图中对应着淡蓝色至深蓝色的区域),与实际情况相符。相比实际 1 000 m 分辨率尺度(图 4(d)),尺度校正后的分布图中淡蓝色、深蓝色对应的区域颜色有所淡化,在校正 50 m 分辨率(图 4(e))下变化尤为明显,说明校正后蓄水容量整体上有减小的趋势。而与目标尺度相比,尺度校正后蓄水容量分布图中淡蓝色、深蓝色对应的区域较大,但河道处对应的绿色区域也相对较大,因而蓄水容量总体上非常接近。

图 5 为尺度校正前后蓄水容量面积分布曲线,与 1 000 m 分辨率实际尺度相比,校正后的蓄水容量面积分布曲线逐渐下移,趋近目标尺度,流域平均蓄水容量逐渐减小,由于 1 000 m 与 500 m 分辨率尺度在实际提取地形指数时差异较小,因而对应的蓄水容量差异也非常小。

表 2 为尺度校正前后的蓄水容量空间统计特性,可以看出,校正前流域平均蓄水容量随着 DEM 数据分辨率的降低不断增大,尺度差异越大,蓄水容量高估的偏差越大。校正后的蓄水容量与各自目标尺度蓄水容量均值误差较小,其中校正 500 m 分辨率的蓄水容量均值最接近目标 500 m 分辨率的蓄水容量均值,均值误差只有 -1.47%。校正之后,与

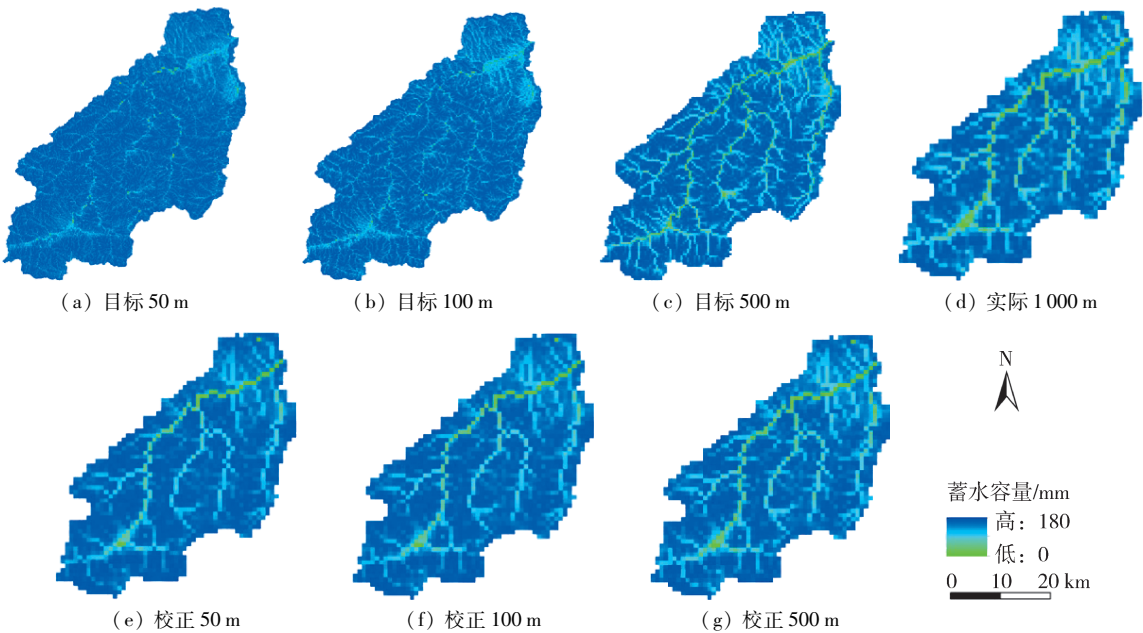


图 4 不同分辨率蓄水容量空间分布对比

Fig. 4 Comparison of spatial distribution of water storage capacity with different resolutions

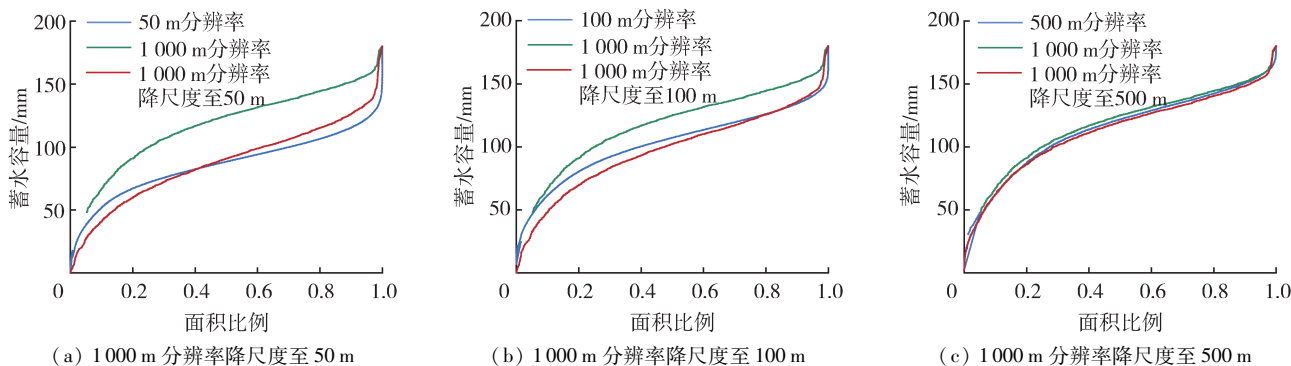


图5 尺度校正前后蓄水容量面积分布曲线

Fig.5 Area distribution curves of water storage capacity before and after scale correction

1000 m 分辨率实际尺度相比,校正后的流域平均蓄水容量均有所下降,其中校正 500 m 分辨率的蓄水容量均值最接近实际 1000 m 分辨率的蓄水容量均值,均值误差为 -4.00%。可见,考虑地形因素的蓄水容量降尺度方法能够有效地纠正大尺度下蓄水容量高估的偏差,使得蓄水容量的空间分布更接近于实际分布。

表2 尺度校正前后蓄水容量空间统计特性

Table 2 Spatial statistical characteristics of water storage capacity before and after scale correction

分辨率/m	尺度类别	蓄水容量 均值/mm	均值误差/%	与实际 1000 m 分辨率误差/%
50	目标	85.9		
50	校正	87.3	1.63	-25.38
100	目标	102.4		
100	校正	97.0	-5.25	-17.09
500	目标	114.0		
500	校正	112.3	-1.47	-4.00
1000	实际	117.0		

3 结 语

不同尺度产流模型的计算偏差与蓄水容量的尺度敏感性有关,这也是导致不同尺度水文响应差异的原因之一。本文在前人研究的基础上,针对蓄水容量提出了相应的尺度校正方法,以地形指数作为辅助因子,通过引入分辨率因子和分形理论分别对决定地形指数的上游集水面积和坡度两个变量进行尺度校正。以紫罗山流域作为实例进行验证,结果表明,上述尺度校正方法不仅能够有效地降低地形指数计算的偏差,使得在低分辨 DEM 数据条件下可以获得较高分辨率的地形指数分布;而且对蓄水容量的校正效果明显,能够有效地纠正大尺度下蓄水容量高估的偏差,使得蓄水容量的空间分布更接近于实际分布。使用该尺度校正方法不仅可以运用低分辨率的数据获得接近高分辨率数据的计算结果,而且计算量大幅度减小,计算效率得到显著提高,从而可以将分布式水文模型用于实时问题。

参考文献:

- [1] 张金存,芮孝芳. 分布式水文模型构建理论与方法述评[J]. 水科学进展,2007(2):286-292. (ZHANG Jincun, RUI Xiaofang. Discussion of theory and methods for building a distributed hydrologic model[J]. Advances in Water Science,2007(2):286-292. (in Chinese))
- [2] 姚成,李致家,章玉霞. DEM 分辨率对分布式水文模拟的影响[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):11-14. (YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Yuxia. Effects of DEM resolution on distributed hydrologic simulation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013,33(5):11-14. (in Chinese))
- [3] 刘淑雅,江善虎,任立良,等. 基于分布式水文模型的山洪预警临界雨量计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):384-390. (LIU Shuya, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. Calculation of critical rainfall for early-warning of mountain flood based on distributed hydrological model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017,45(5):384-390. (in Chinese))
- [4] 包红军,王莉莉,李致家,等. 基于 Holtan 产流的分布式水文模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(4):340-346. (BAO Hongjun, WANG Lili, LI Zhijia, et al. A distributed hydrological model based on Holtan runoff generation theory [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016,44(4):340-346. (in Chinese))
- [5] 赵娜娜,王贺年,张贝贝,等. 若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应[J]. 水资源保护,2019,35(5):40-47. (ZHAO Nana, WANG Henian, ZHANG Beibei, et al. Runoff variation in Zoige Wetland Basin and its response to climate change [J]. Water Resources Protection, 2019,35(5):40-47. (in Chinese))
- [6] 于翠松. 水文尺度研究进展与展望[J]. 水电能源科学,2006(6):17-19. (YU Cuisong. Progress and prospect of hydrological scale study [J]. Water Resources and Power, 2006(6):17-19. (in Chinese))
- [7] 戚晓明. 流域水文尺度若干问题研究[D]. 南京:河海大学,2006.

- [8] 杨卫华,孙文叶,许志欣,等. 水文尺度转换问题的探讨[J]. 人民珠江,2016,37(5):51-53. (YANG Weihua, SUN Wenyue, XU Zhixin, et al. Research on problem of scale in hydrology[J]. Pearl River,2016,37(5):51-53. (in Chinese))
- [9] 王鸣远,杨素堂. 水文过程及其尺度响应[J]. 生态学报,2008,28(3):1219-1228. (WANG Mingyuan, YANG Sutang. Hydrological processes as well as their responses to scales[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(3):1219-1228. (in Chinese))
- [10] 彭立,苏春江,徐云,等. 水文尺度问题及尺度转换研究进展[J]. 西北林学院学报,2007,22(3):179-184. (PENG Li, SU Chunjiang, XU Yun, et al. Research progress on the problems of scale in hydrology and hydrologic scaling [J]. Journal of Northwest Forestry University,2007,22(3):179-184. (in Chinese))
- [11] 刘昌明,李军,王中根. 水循环综合模拟系统的降雨产流模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):377-383. (LIU Changming, LI Jun, WANG Zhonggen. Study on rainfall-runoff model of hydro-informatic modeling system [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2015,43(5):377-383. (in Chinese))
- [12] 瞿思敏,包为民,张明,等. 新安江模型与垂向混合产流模型的比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,31(4):374-377. (QU Simin, BAO Weimin, ZHANG Ming, et al. Comparison of Xin'anjiang model with vertically-mixed runoff model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2003,31(4):374-377. (in Chinese))
- [13] 俞彦,张行南,张鹏,等. 基于 SCS 模型和新安江模型的雨量预警指标综合动态阈值对比[J]. 水资源保护,2020,36(3):28-33. (YU Yan,ZHANG Xingnan,ZHANG Peng, et al. Comparison of comprehensive dynamic threshold of rainfall warning indicators based on SCS model and Xin'anjiang model [J]. Water Resources Protection,2020,36(3):28-33. (in Chinese))
- [14] 向小华,宋琪峰,陈喜,等. 融合地形和土壤特征的流域蓄水容量模型[J]. 水科学进展,2013,24(5):651-657. (XIANG Xiaohua, SONG Qifeng, CHEN Xi, et al. A storage capacity model integrating terrain and soil characteristics[J]. Advances in Water Science,2013,24(5):651-657. (in Chinese))
- [15] 石朋,芮孝芳,瞿思敏,等. 一种通过地形指数计算流域蓄水容量的方法[J]. 水科学进展,2008,19(2):264-267. (SHI Peng, RUI Xiaofang, QU Simin, et al. Calculating storage capacity with topographic index[J]. Advances in Water Science,2008,19(2):264-267. (in Chinese))
- [16] 孔凡哲,宋晓猛. 一种新安江模型中土壤水蓄水容量空间分布的计算方法[J]. 水文,2011,31(5):1-5. (KONG Fanzhe, SONG Xiaomeng. A computation method for spatial distribution of soil moisture storage capacity in Xin'anjiang Model[J]. Journal of China Hydrology,2011,31(5):1-5. (in Chinese))
- [17] CHEN X, CHEN Y D, XU C. A distributed monthly hydrological model for integrating spatial variations of basin topography and rainfall[J]. Hydrological Processes, 2010,21(2):242-252.
- [18] 颜梅春,陈贝贝,李致家,等. 基于土壤地形指数和下垫面水文分区的流域模型参数率定[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(3):197-202. (YAN Meichun, CHEN Beibei, LI Zhijia, et al. Parameter calibration for watershed hydrology model based on soil topography index and hydrological partition of underlying surface [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2015,43(3):197-202. (in Chinese))
- [19] 解河海,黄国如. 地形指数若干计算方法探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(1):46-50. (XIE Hehai, HUANG Guoru. Some calculation methods for topographic index [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2006,34(1):46-50. (in Chinese))
- [20] GUPTA V K, WAYMIRE E. Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions[J]. Journal of Geophysical Research,1990,95(3):1999-2009.
- [21] 汪富泉,李后强. 分形几何与动力系统[M]. 哈尔滨:黑龙江教育出版社,1993.
- [22] 杨锦玲. 基于多尺度 DEM 的流域特征提取研究[D]. 福州:福州大学,2010.
- [23] 冷佩,宋小宁,李新辉. 坡度的尺度效应及其对径流模拟的影响研究[J]. 地理与地理信息科学,2010,26(6):60-62. (LENG Pei, SONG Xiaoning, LI Xinhui. Study on slope' scale effect and its impact on runoff simulation[J]. Geography and Geo-Information Science, 2010,26(6):60-62. (in Chinese))
- [24] 王程. 坡度直方图匹配变换的适用性分析[D]. 西安:西北大学,2012.
- [25] PRADHAN N R, TACHIKAWA Y, TAKARA K. A downscaling method of topographic index distribution for matching the scales of model application and parameter identification[J]. Hydrological Processes,2006,20(6):1385-1405.
- [26] KLINKENBERG B,GOODCHILD M F. The fractal properties of topography: a comparison of methods[J]. Earth Surface Processes & Landforms,1992,17(3):217-234.
- [27] 马易君,张行南,方园皓. 基于山坡 Pe'clet 数推求土壤水蓄水容量[J]. 水电能源科学,2017,35(9):22-24. (MA Yijun, ZHANG Xingnan, FANG Yuanhao. Soil storage capacity calculation by using hillslope Pe'clet number[J]. Water Resources and Power,2017,35(9):22-24. (in Chinese))

(收稿日期:2020-09-08 编辑:熊水斌)