

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201800224

面向大尺度区域分布式水文模型的子流域划分方法改进

刘欢, 杜军凯, 贾仰文*, 刘佳嘉, 牛存稳, 甘永德

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘 要:子流域划分是构建流域/区域分布式水文模型的基础工作, 关系到流域/区域水文模拟和预报精度的好坏。在针对大尺度区域进行子流域划分时, 目前普遍使用基于地表径流漫流模型, 通过单一集水面积阈值进行河网提取和子流域划分的方法在准确描述研究区的空间范围、确定流域出水口、提取内流区河网等方面存在一定不足。为此, 作者对传统子流域划分方法进行改进, 面向大尺度区域分布式水文建模提出一套基于流域出水口自动识别和多阈值虚拟河网融合技术的子流域划分方法, 该方法包括4大部分, 即流域出水口的识别, 大、小集水面积阈值的确定, 多阈值虚拟河网融合, 子流域划分与编码。应用该方法对全国范围内进行了水系提取和子流域划分, 共划分子流域25 174个, 子流域平均面积381 km², 最大面积5 512 km², 最小面积4 km², 模拟范围与全国水系实际范围的吻合程度达到99.92%。进一步地, 将研究结果与全国实测水系和现行流域区划成果进行对比分析, 验证了该方法的适用性。该方法高效快速, 在准确刻画大尺度区域范围的同时大幅降低了子流域个数, 兼顾了模型模拟效率, 较好地解决了传统子流域划分方法在大尺度区域分布式水文建模中面临的难题。相关研究可为大尺度区域分布式水文模型构建提供基础支撑, 有助于更好地为大面积区尤其是国家宏观层面的水文水资源管理服务。

关键词:子流域划分; 大尺度区域; 流域出水口识别; 多阈值虚拟河网融合

中图分类号:TU43

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)01-0036-09

Improvement of Watershed Subdivision Method for Large Scale Regional Distributed Hydrology Model

LIU Huan, DU Junkai, JIA Yangwen*, LIU Jiajia, NIU Cunwen, GAN Yongde

(National Key Lab. of Basin Water Cycle Simulation and Control, China Inst. of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Watershed subdivision is an important basic work of distributed hydrological model, which is related to the accuracy of basin hydrological simulation and prediction. In the process of watershed subdivision in large-scale and complicated terrain area, the traditional method has some shortcomings in accurately describing the spatial extent of the study area, determining the outlet of the basin, and extracting the river network of the inflow area, which commonly uses a single catchment area threshold to extract the river network and divide the watersheds based on surface runoff and flow model. Consequently, a watershed subdivision method, using stem-branch topological codification, was proposed based on automatic recognition of the outlets of basin and the fusion of river network with variable catchment area thresholds. The method mainly includes the determination of basin outlets, the determination of the maximum and minimum catchment area thresholds, the multi-threshold virtual river network integration and watershed subdivision and coding. Taking China as an example, 25 174 watersheds were divided, with an average area of 381 km², a maximum area of 5 512 km² and a minimum area of 4 km². The coincidence degree between the simulated area and the actual area reached 99.92%. While using the traditional method, the number of watersheds was 21 768, and the average area was 434 km², and the coincidence degree was only 98.5%. Moreover, the results were compared with the actual water systems and the current basin of China to verify the applicability of the method. The program is realized through programming that is fast and efficient. It takes into account the computational efficiency of the model and the accuracy of watershed subdivision, which lays a good foundation for developing distributed hydrological model in large scale region and helps to better serve the management of hydrology and water resources in the region, especially at the national macro level.

Key words: watershed subdivision; large scale region; basin outlet identification; multi-threshold virtual river network integration

收稿日期:2018 - 03 - 04

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401301); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB452701); 国家重点实验室自主研究课题资助项目(2016ZY03)

作者简介:刘欢(1992—), 男, 博士生. 研究方向: 水文模型研究. E-mail: zdlhuan@163.com

* 通信联系人 E-mail: jiaYW@iwhr.com

网络出版时间:2018 - 12 - 24 08 : 36 : 02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20181220.1656.003.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

近年来,考虑水文参数和过程的空间异质性的分布式水文模型成为流域/区域水文研究的重要工具^[1]。按照研究对象地理特征,分布式水文模拟可分为两类:一是,针对完整流域的流域分布式水文模拟;二是,针对行政区或人工划定区的区域分布式水文模拟^[2]。无论是何种模拟类型,分布式水文模型均需将研究区离散成许多较小的空间单元,并假设其内部同质,以这些小单元的水文模拟为基础,进而实现对整个研究区水循环过程的模拟。目前,分布式水文模型主要通过栅格和子流域两种形式实现研究对象的空间离散^[3-4],当研究对象空间尺度较大时,为兼顾模拟的精度和效率,常采用后一种离散方式,即:将研究区划分为一定数量的子流域,以子流域作为基本模拟单元。因此,合理进行子流域划分,准确刻画研究区范围对区域/流域分布式水文建模至关重要。

目前,普遍使用的基于地表径流漫流模型的子流域划分方法多以完整流域为对象,相关研究集中于数字河网提取算法^[5-7]和子流域编码方法^[8-10]的创新,不同DEM数据源对子流域划分的影响^[11-13],以及适宜集水面积阈值的确定^[14-16]等方面。然而,该方法尚不能较好满足在平原河网区和大尺度区域分布式水文建模的需求。其中,平原河网区地形平坦,密集交织的河网、星罗棋布的湖库和圩区等导致水系提取和子流域划分一直是平原河网区分布式水文建模的瓶颈问题^[17]。针对这一问题,国内外学者开展了大量研究^[18-20],提出了河网叠加修正、增设虚拟水库、交叉和网状河网处理等一系列解决方案,取得了较为满意的应用效果。然而,针对大尺度区域开展分布式水文建模的研究还比较少,面向大尺度区域的子流域划分主要具备以下特征:1)研究对象非完整

的流域,不具备“封闭”特性,外边界流域出水口数目不固定;2)河流众多且相互独立,水系特征相差较大,内流水系和外流水系并存;3)复杂的地形地貌导致水系空间分布有较大差异性;4)高程变化剧烈的微地形区的存在造成研究区内无汇流联系的各流域之间集水面积相差悬殊。在使用传统子流域划分方法时,不仅流域出水口不易确定,定位工作量大,部分出水口易遗漏,且单一集水面积阈值无法兼顾模型计算效率和区域模拟范围精度的双重需求。由于平原河网区分布式水文建模的研究成果已较为丰富,本研究不做过多探讨,而是重点关注解决大尺度区域的子流域划分面临的难题。

由此,面向大尺度区域分布式水文模拟,立足于DEM河网干支拓扑编码规则^[8],作者提出了一种基于流域出水口自动识别和多阈值虚拟河网融合技术的子流域划分方法,以期在准确把握研究区范围的基础上控制子流域数量,兼顾模型计算精度和效率,为大尺度区域分布式水文建模提供支撑。最后,选择全国流域作为研究实例,完成全国分布式水文模型构建中的子流域的划分及统一编码。

1 子流域划分方法及流程

1.1 基于河网干支拓扑编码规则的子流域划分方法

基于DEM河网干支拓扑编码规则开展流域分布式水文模型的子流域划分研究,从原始DEM数据处理,到最后完成子流域的划分与编码,主要包括虚拟河网提取、流域出水口与分割点确定、子流域划分及编码3大步骤。具体流程如图1所示。

干支拓扑编码采用继承式编码规则,从流域出水口开始逆流而上,逐河段、逐级别按河段汇流流程

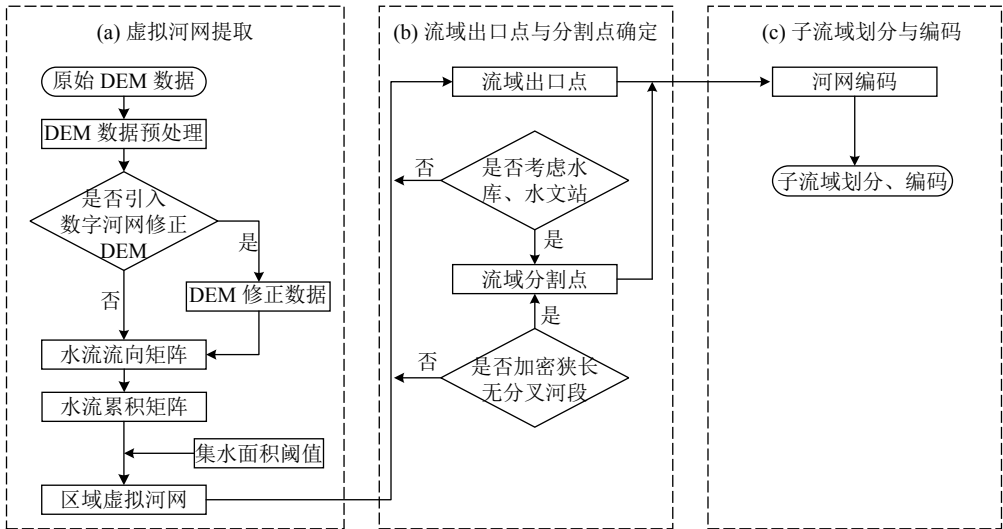


图 1 基于DEM河网干支拓扑编码规则的子流域划分流程

Fig. 1 Watershed subdivision process based on stem-branch topological codification

进行编码。此外,可以根据水库、水文站的位置以及狭长无分叉河段的加密需求,人工设置若干分割点,对河段进一步分割、编码。基于此,对所有流入相同河段的栅格区赋值当前河段编码作为子流域编码,即认为子流域编码等同河网编码^[21]。对于完整的流域来说,该套方法和流程可以很好地完成研究流域的子流域划分和编码。然而,针对大尺度区域,该划分模式难以直接应用。

1.2 大尺度区域分布式水文建模中的子流域划分难点

1.2.1 难以准确把握研究区的空间范围

模拟范围确定是区域分布式水文模拟的基础,合适的子流域划分要既能精确描述研究区的空间范围,又可避免过多的资料及计算量。大尺度区域包含多个完整流域和非完整流域,相互之间无汇流关系的流域集水面积相差悬殊。在进行虚拟河网提取和模拟范围控制时,集水面积阈值是其中的关键参数。面积阈值越小,河网水系越密,划分的子流域数相应越多,也就越能反映下垫面的变化情况。同时,小面积自然流域的河网也可以被提取。但是,随着子流域划分数量的增多,对流域下垫面的空间变化考虑因素也会增加,造成模型计算时间变长,模拟效率下降。对于大尺度地区分布式水文模拟来说,庞大的子流域数将使模型陷入计算灾难。若考虑模型计算效率,将集水面积阈值升高,那么在一些高程起伏变化剧烈的微地形区中将无法提取流域面积很小的独立河网,造成部分模拟区域丢失。

1.2.2 难以精准确定流域出水口

传统基于干支拓扑编码的子流域划分方法中,一般需要根据生成的虚拟河网人工设置流域出水口。对于大尺度复杂地形区,水系河流众多,由此会产生数量庞大的流域出水口。同时,流域边界上会存在一些伪出水口(图2中的点1和2)。手动确定流域出水口的方式工作量大,效率低,而且一些流域出水口还可能被遗漏或错选。

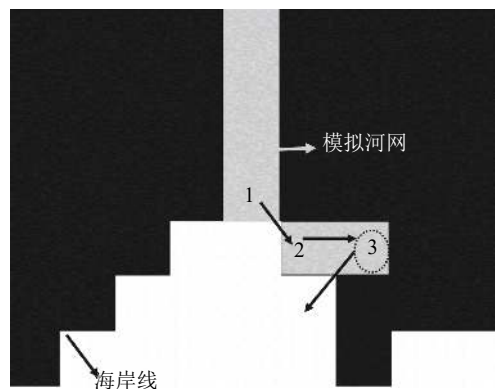


图 2 某入海水系流域出水口分布示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the distribution of basin outlet

1.2.3 难以准确反映内流区的真实状况

基于坡面流累积方法提取虚拟河网时,需要对DEM进行填洼,解决“数字负地形”的问题。J & D算法的主要思想就是先将洼地填平,再在平地上寻找潜在出口,进行逐步垫高,最终使流域内每个栅格水流都能到达流域出水口^[22]。若研究区内存在内流水系,在对DEM数据进行填洼处理时,流域出水口算法将沿研究区边界寻找潜在出口进行逐步填洼,最终使得内流区河流栅格流出研究区,提取出的虚拟河网与实际河网严重不符。如此,将无法准确完成内流区的子流域划分。

1.3 面向大尺度区域分布式水文建模的子流域划分方法

针对以上难点问题,在前人研究的基础上,作者提出一套基于流域出水口自动识别和多阈值虚拟河网融合技术的子流域划分方法。该套方法主要分为4个步骤:1)流域出水口的自动识别及确定;2)大、小集水面积阈值确定;3)多阈值虚拟河网融合;4)子流域划分与编码。方法流程见图3。

1.3.1 流域出水口的自动识别及确定

需要在两类区域(内流区和研究区外边界)进行流域出水口识别与确定。内流区的流域出水口采用人工判定的方法进行处理:以实测水系的末端作为内流区的潜在出口,将其所在栅格的高程值设置为空。

研究区外边界上的流域出水口的识别与判定方法如下:1)引入实测水系和已知流域边界对DEM数据进行修正,计算研究区水流流向矩阵和水流累积矩阵;2)按照D8流向编码,遍历研究区中流域边界附近范围内的栅格流向,如果某栅格流向的下一个栅格无流向值,则将此栅格标记为“备选”流域出水口;3)确定研究区的小集水面积阈值(详见第1.3.2节)基于此汇流累积数阈值从“备选”出口中确定最终的流域出水口。

1.3.2 多阈值虚拟河网提取

针对单一集水面积阈值在应用于大尺度区域的子流域划分中遇到的难题,设计一种多阈值的河网提取与融合方法,一方面,使提取的河网能准确反映研究对象的水系特征;另一方面,将区域水系密度控制在合理的范围内,实现对子流域划分数量的控制。

1)确定河网提取的大集水面积阈值

确定一个适宜于宏观描述研究区水系特征的阈值,作为本研究中所选择的大集水面积阈值。该阈值可准确提取研究区范围内的大部分子流域。目前,针对完整流域,最佳集水面积阈值的确定方法大致包括平均坡降法、试错法、河网密度法等^[15]。其中,河网密度法方法简单,应用广泛,故作者选其作为确定研究区大集水面积阈值的方法。该方法通过选取不同的集水面积阈值,生成一系列模拟河网,统计模拟

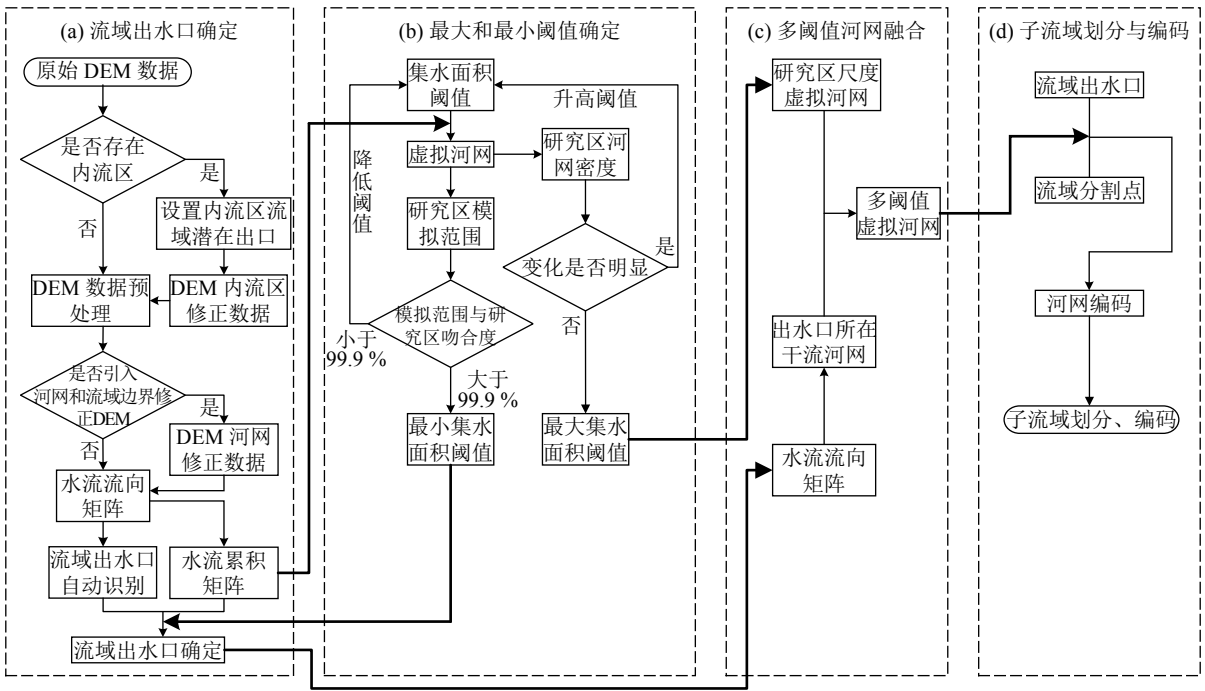


图 3 基于流域出水口自动识别和多阈值虚拟河网融合技术的子流域划分流程

Fig. 3 Watershed subdivision process based on the automatic identification of basin outlets and multi-threshold virtual river network integration

河网密度随集水面积阈值的变化关系曲线;随着阈值的不断增大,模拟河网密度在骤降后变化趋于平缓,找出模拟河网密度随阈值的增大变化不再显著的点,即为流域最佳集水面积阈值;在对大尺度区域进行子流域划分时,将其作为大集水面积阈值。

2) 确定河网提取的小集水面积阈值

通过大集水面积阈值确定仅能把控研究区的面上特征,却无法处理研究区边界附近高程起伏较大,集水面积小于该阈值的微地形区,因此需确定一个能够用于精确描述研究区范围的小集水面积阈值的方法。关于研究区范围的模拟精度,多采用研究区模拟范围与实际范围的相对误差衡量,但无固定标准。刘远等^[23]在对面积为30 112 km²的韩江流域进行流域提取时,认为相对误差0.57%效果良好。吴冰和李昌文^[24]针对流域面积6 497 km²的盘龙河流域,得出相对误差为1.32%,认为已满足精度要求。作者针对大尺度区域分布式水文建模,基于前人研究,并咨询长期从事水文模拟研究的专家后综合考虑,取相对误差绝对值为0.1%作为精度标准,即当研究区模拟范围与实际范围的吻合度为99.9%及以上,研究区就可以被准确描述。基于以上思想,不断减小集水面积阈值并划分子流域,当吻合程度达到99.9%时的阈值即为本研究中的小集水面积阈值。

3) 多阈值提取虚拟河网的概化与融合

在选用小集水面积阈值时,会出现大量狭小子

流域,其对大尺度分布式水文模拟作用甚微,但却显著增加模型计算量。为解决上述问题,作者对由小集水面积阈值提取的虚拟河网进一步概化处理。概化原则如下:以微地形区流域出水口所在栅格为起点(目标栅格),根据水流流向栅格判断识别该栅格的上游河道汇入栅格,可能有一个或多个。若为一个,则将此上游河道栅格直接作为干流汇入栅格;若为多个(图4河道A、B同时汇入河网栅格①),比较上游河道(A、B)汇入栅格的水流累积数大小,选择其中最大值所在栅格(河道A汇入栅格)作为干流汇入栅格,赋值为1。接着,将此干流栅格作为目标栅格,继续向上游追溯,直至河道源头。由此,基于微地形区的每个流域出水口,均可追迹出一条干流河网(图4

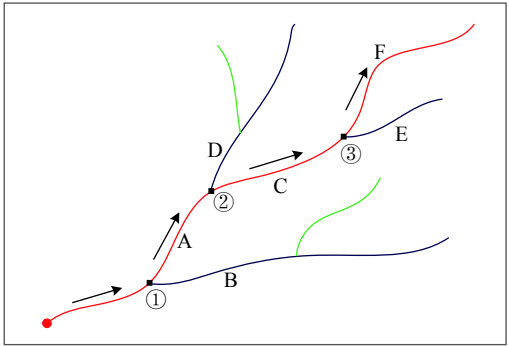


图 4 小集水面积阈值下虚拟河网概化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of virtual river network generalization under the minimum threshold

中红线)。这种做法相当于利用微地形区每个流域出水口处水流累积数对应的集水面积作为该流域虚拟河网提取的阈值,这些阈值大小不一,介于大、小集水面积阈值之间。最后,将微地形区概化的干流河网与大集水面积阈值下得到的研究区尺度虚拟河网相融合。

1.3.3 子流域划分与编码

基于流域出水口和分割点,采用干支拓扑编码规则进行子流域划分与编码。其中,干流由最大集水面积或最大河段长度确定。确定干流后,所有流入干流的河流均认为是支流。流域分割点将干流分割成若干段,称之为干流河段,每个干流河段内无其他支流汇入。基于干支流拓扑关系的编码体系由4部分组成:流域出水口码、干流码、支流码和上游子流域数目码,用 $\{O, S, B, U\}$ 表示。该规则在编码上可以反映河流级别及上下游拓扑关系,根据某一流域编码可快速定位其相邻的上游或下游流域。关于干支拓扑编码规则的细节详见文献[8]。

2 实例研究

2.1 研究区概况

中国是一个典型的大尺度复杂地形区,具有以下显著特征:1)幅员面积大,南北跨越约50个纬度,东西横跨61个经度;2)河湖众多,内流水系和外流水系并存,拥有多条界河,包括额尔古纳河、黑龙江、乌苏里江、图们江、鸭绿江等;3)海岸线长,近海地区地形起伏变化剧烈。中国拥有18 000 km的大陆海岸线和14 000 km的岛屿海岸线,是世界上海岸线最长的国家之一^[25]。因此,以中国作为研究区进行实例分析,具有较好的代表性,也可为建立全国宏观尺度的“自然-社会”分布式水文模型奠定基础。

2.2 方法应用

将SRTM 90 m空间分辨率的栅格DEM重采样至1 km×1 km,作为全国分布式水文模型子流域划分的原始DEM数据,并以全国1:400万实测水系和10个一级区边界对原始DEM数据进行进一步修正。在此基础上,使用本文提出的基于出水口自动识别和多阈值河网融合技术的子流域划分方法,开展面向全国分布式水文建模的子流域划分。中国存在的平原河网区的子流域划分问题不做过多探讨,相关成果已较为丰富,此处对平原区的河网和子流域提取主要借鉴文献[19]。

2.2.1 内流区流域潜在出口确定

中国内流区面积广阔,约占国土面积的1/3,但由于降雨稀少,河网稀疏。以内流区的实测水系为基础,在所有4级以上河流以及部分5级河流的末端人

工设定流域潜在出口,共计67个。以内流水系为例,通过设定流域潜在出口,数字河网可以被准确提取,其与实际河网水系吻合良好,如图5所示。

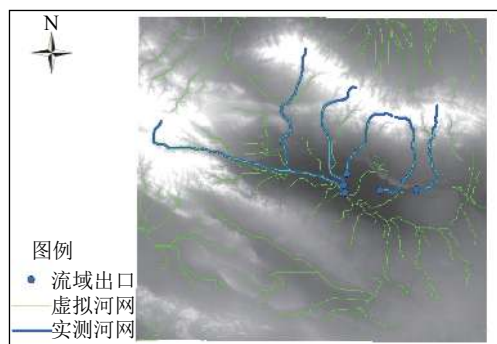


图 5 人工设定流域潜在出口内流区虚拟河网提取

Fig. 5 Virtual river network extraction based on artificial river basin potential outlets in internal flow area

2.2.2 大、小集水面积阈值选取

1) 大集水面积阈值

在10~1 000 km²的范围内选取若干集水面积阈值,计算所对应的虚拟河网密度,绘制两者变化关系曲线,面积阈值在200~300 km²范围内曲线趋于稳定。通过进一步排查,最终确定以240 km²作为全国尺度的大集水面积阈值,确定流域出水口共计715个。

2) 小集水面积阈值

通过不断调试,当集水面积阈值降低至4 km²时,子流域模拟范围与全国范围吻合程度达到99.92%,但划分的子流域数增至100.26万。因此,选择4 km²作为全国子流域划分的小集水面积阈值,用其确定流域出水口,同时进一步结合多阈值虚拟河网融合技术控制子流域数。

2.2.3 流域出水口和分割点选择

根据全国水流流向栅格数据判断全国边界范围以及内流区潜在出口周边范围内的栅格流向,识别全国所有流域出水口。随后参考全国水流累积栅格数据,筛选出汇流累积数大于3的流域出水口作为最终流域出水口。关于界河出口的处理借鉴雷晓辉等方法,详见文献[26]。最终共确定流域出水口4 121个,分布于海岸线、边境线和内流区。同时,选择全国2 140个水文站点作为流域分割点。

2.2.4 多阈值虚拟河网融合

首先,以240 km²作为全国尺度上虚拟河网的提取阈值。其次,以未能成功提取河网的3 406个流域出水口为起点逆流而上,通过全国水流流向矩阵和水流累积矩阵向上游追迹流域出水口所在河网干流。这些虚拟河网的集水面积阈值在4~240 km²之间。最后,将两种方式得到的多阈值河网融合,进行全国子流域划分与编码。以海南岛局部示意,见图6。

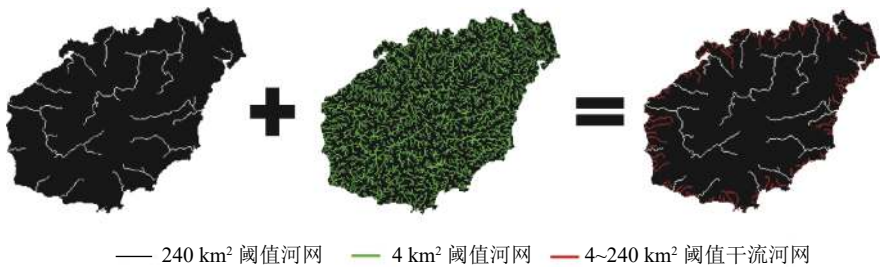


图 6 海南岛多阈值虚拟河网融合示意图

Fig. 6 Local schematic diagram of multi-threshold virtual river network integration in Hainan

2.3 结果分析

基于人工设定的内流区流域潜在出口,分别采用基于干支拓扑编码规则的子流域划分方法(方法1)以及基于流域出水口自动识别方法和多阈值河网融合技术的子流域划分方法(方法2),对全国范围内进行水系提取和子流域划分,检验方法2在大尺度区域分布式水文建模中的适用性。

2.3.1 水系提取结果

使用方法1,以240 km²作为集水面积阈值进行水系提取时,众多集水面积较小的流域水系无法被提取。

采用方法2,可较好地实现独立小流域的河网提取。同时,对比实测水系与方法2的结果,二者吻合良好。局部示意意见图7。

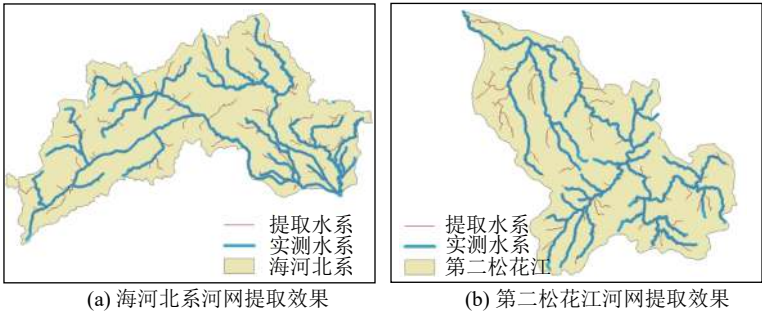


图 7 提取水系与实测水系的比较

Fig. 7 Comparison of extracted and actual water systems

2.3.2 子流域划分结果

利用方法1,全国范围内划分子流域21 768个,子流域平均面积为434 km²,最大面积5 512 km²,最小面积10 km²。模拟范围与实际范围的吻合程度仅为98.51%,沿海岸线大量高程起伏剧烈的微地形区未

完成子流域划分。而通过方法2,全国范围内共划分子流域25 174个,子流域平均面积381 km²,最大面积5 512 km²,最小面积4 km²,吻合度达到99.92%,效果良好。局部示意意见图8,左边为方法1结果,右边为方法2结果。

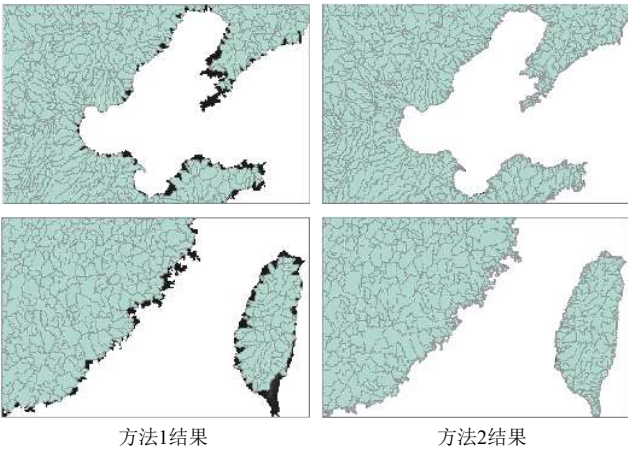


图 8 全国子流域划分结果局部示意图

Fig. 8 Local schematic diagram of watershed subdivision of China

进一步地,选取全国10个水资源一级区和80个水资源二级区,计算模拟范围与实际范围的吻合程度。由表1可知,水资源一级区的模拟面积与实际面积之比为99.73%~100.13%,偏差不超过0.5%。

表 1 全国水资源一级区的子流域划分结果

Tab. 1 Watershed subdivision of the first-class water resources regions in China					
水资源一级区	子流域平均面积/km ²	模拟与实际吻合程度/%	水资源一级区	子流域平均面积/km ²	模拟与实际吻合程度/%
松花江区	305.18	99.82	长江区	431.40	100.13
辽河区	271.63	99.79	东南诸河区	160.92	99.73
海河区	438.27	99.92	珠江区	274.82	99.81
黄河区	434.46	100.08	西南诸河区	389.14	99.86
淮河区	307.85	100.02	西北诸河区	409.01	99.89

在此基础上,绘制二级区模拟范围与实际范围吻合程度变化的箱型线图,见图9。由图9可知,除个别二级区外,其余分区的吻合程度介于99.00%~101.00%,平均数在99.5%~100.5%间,具有较好模拟效果。

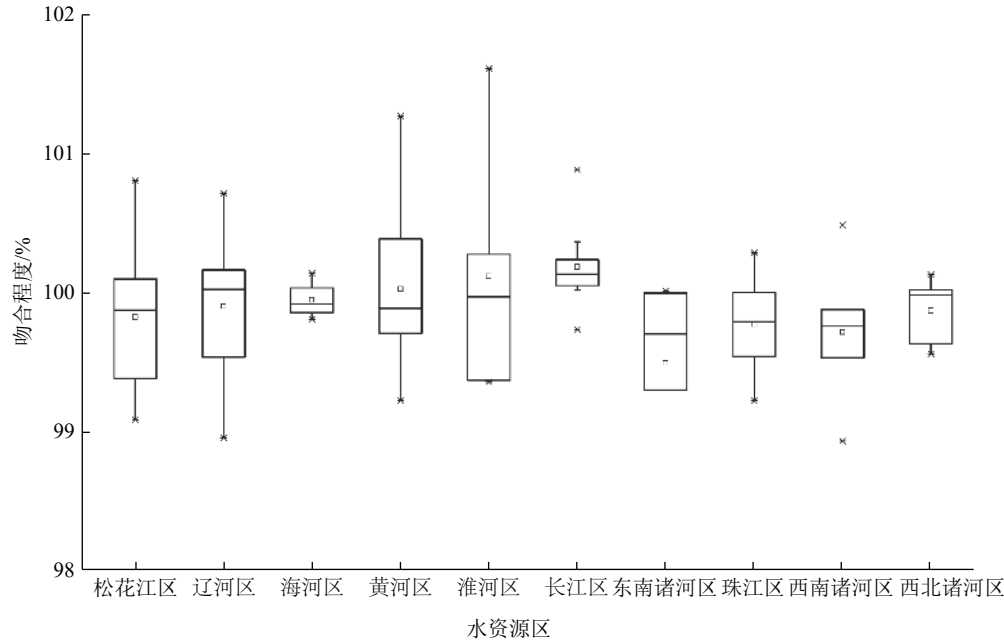


图 9 全国水资源二级区模拟范围与实际范围吻合程度箱型线图

Fig. 9 Box chart of the coincidence degree between the simulated areas and the actual areas of the second-class water resources regions in China

3 结 语

从服务于地区尤其是国家水资源管理的角度出发,开展宏观尺度区域分布式水文模拟可为相关战略性决策提供良好基础支撑。针对大尺度区域分布式水文建模中进行子流域划分时存在的难题,作者立足于河网干支拓扑关系编码规则,提出了一套基于流域出水口自动识别方法和多阈值虚拟河网融合技术的子流域划分方法,并将其成功应用到全国分布式水文模型的构建中。该方法主要包括4部分:流域出水口的自动识别及确定,大、小集水面积阈值确定,多阈值虚拟河网融合,子流域划分与编码。相对于传统流域分布式水文模型构建中的子流域划分方法,该套方法具有以下优点:

- 1)可实现流域出水口的自动识别,高效快速;
- 2)初步解决了内流区河网提取失真问题,可准确描述所划分子流域间的拓扑关系;
- 3)在准确拟合研究区范围的同时有效控制了子流域数量,兼顾了模型模拟的精度和效率需求。该方法在大尺度区域的子流域划分上适用性良好,相关结果可对宏观尺度区域分布式水文模型构建给予有力支持。

参考文献:

[1] Xu Zongxue,Cheng Lei.Progress on studies and applications of the distributed hydrological models[J].Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(9):1009–1017.[徐宗学,程磊.分布式水文模型研究与应用进展[J].水利学报,2010,

- 41(9):1009–1017.]
- [2] Lei Xiaohui, Wang Haichao, Tian Yu, et al. Subbasin delineation for the service areas of South-to-North Water Diversion Project[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7(3): 10–13. [雷晓辉, 王海潮, 田雨, 等. 南水北调中线受水区分布式水文模型子流域划分研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(3): 10–13.]
- [3] 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. [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.]
- [4] Shu Dongcai, Cheng Genwei, Lin Sanyi. Spatial discretization of digital watershed based on DEM for the upper reach of Minjiang River[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2004, 36(6): 6–11. [舒栋才, 程根伟, 林三益. 基于DEM的岷江上游数字流域的离散化[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2004, 36(6): 6–11.]
- [5] Barnes R, Lehman C, Mulla D. An efficient assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models[J]. *Computers and Geosciences*, 2014, 62: 128–135.
- [6] Zhang H, Yao Z, Yang Q, et al. An integrated algorithm to evaluate flow direction and flow accumulation in flat regions of hydrologically corrected DEMs[J]. *Catena*, 2017, 151: 174–181.
- [7] Wang Yuzhuo, Liu Xiuguo, Zhang Wei. Raster river networks extraction based on parallel multiple flow direction algorithms[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(12): 1646–1652. [王玉着, 刘修国, 张唯. 并行化多流向策略的栅格河网提取算法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(12): 1646–1652.]
- [8] Liu J, Zhou Z, Jia Y, et al. A stem-branch topological codification for watershed subdivision and identification to support distributed hydrological modelling at large river basins[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4): 2074–2081.
- [9] Fürst J, Hörhan T. Coding of watershed and river hierarchy to support GIS-based hydrological analyses at different scales[J]. *Computers and Geosciences*, 2009, 35(3): 688–696.
- [10] Luo Xiangyu, Jia Yangwen, Wang Jianhua, et al. Method for delineation and codification of a large basin based on DEM and surveyed river network[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(2): 259–264. [罗翔宇, 贾仰文, 王建华, 等. 基于DEM与实测河网的流域编码方法[J]. *水科学进展*, 2006, 17(2): 259–264.]
- [11] Wu M, Shi P, Chen A, et al. Impacts of DEM resolution and area threshold value uncertainty on the drainage network derived using SWAT[J]. *Water S A*, 2017, 43(3): 450–462.
- [12] Sousa T M I, Paz A R. How to evaluate the quality of coarse-resolution DEM-derived drainage networks[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31: 3379–3395.
- [13] Ren Yan, Zhang Fei, Wang Juan, et al. Comprison of Ebinur Lake basin water system simulation from different DEM data sources[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(3): 35–44. [任岩, 张飞, 王娟, 等. 不同DEM数据源的艾比湖流域仿真水系对比[J]. *测绘科学*, 2018, 43(3): 35–44.]
- [14] Reddy G P O, Kumar N, Sahu N, et al. Evaluation of automatic drainage extraction thresholds using ASTER GDEM and Cartosat-1 DEM: A case study from basaltic terrain of Central India[J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2018, 21(1): 95–104.
- [15] Zhang Jianxun, Tang Lei, Xie Tao, et al. Determination of catchment area threshold for extraction of digital river-network[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016, 47(11): 1–4. [张建勋, 汤雷, 谢桃, 等. 数字河网提取时集水面积阈值的确定[J]. *水利水电技术*, 2016, 47(11): 1–4.]
- [16] Chang Zhiyang, Wang Jian, Bai Shibiao, et al. Determination of accumulation area based on the method of applying mean of change-point analysis[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 37(1): 147–150. [常直杨, 王建, 白世彪, 等. 均值变点分析法在最佳集水面积阈值确定中的应用[J]. *南京师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 37(1): 147–150.]
- [17] Li Tianhao, Wang Kan, Cheng Junrui, et al. Extration study of plain river network in yaojiang river bain of ningbo city based on dem of different contour[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4): 166–171. [李天昊, 王侃, 程军蕊, 等. 基于轮廓不同的DEM对宁波市姚江流域平原河网的提取研究[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(4): 166–171.]
- [18] Turcotte R, Fortin J P, Rousseau A N, et al. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 240(3/4): 225–242.
- [19] Zuo Junjie, Cai Yongli. An automated watershed delineations approach for plain river network regions: A case

- study in Shanghai[J].*Advances in Water Science*,2011,22(3): 337–343.[左俊杰,蔡永立.平原河网地区汇水区的划分方法:以上海市为例[J].*水科学进展*,2011,22(3):337–343.]
- [20] Li Shuo,Lai Zhengqing,Wang Qiao,et al.Distributed simulation for hydrological process in plain river network region using SWAT model[J].*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2013,29(6):106–112.[李硕,赖正清,王桥,等.基于SWAT模型的平原河网区水文过程分布式模拟[J].*农业工程学报*,2013,29(6):106–112.]
- [21] Liu Jiajia,Zhou Zuhao,Jia Yangwen,et al.A rule for delineation and codification of sub-watersheds based on stem-branch topological relationship of DEM digital river network[J].*Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2013,41(4):288–293.[刘佳嘉,周祖昊,贾仰文,等.基于DEM河网干支拓扑关系的子流域编码规则[J].*河海大学学报(自然科学版)*,2013,41(4):288–293.]
- [22] Jenson S K,Domingue J O.Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis[J].*Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*,1988,54(11):1593–1600.
- [23] Liu Yuan,Zhou Maichun,Chen Zhijing,et al.Comparison of drainage network extraction from different dem data sources:A case study of Hanjiang River basin[J].*Science Geographica Sinica*,2012,32(9):1112–1118.[刘远,周买春,陈芷菁,等.基于不同DEM数据源的数字河网提取—以韩江流域为例[J].*地理科学*,2012,32(9):1112–1118.]
- [24] Wu Bing,Li Changwen.Extraction of drainage network in the Panlonghe River basin based on SRTM DEM[J].*Journal of Water Resources & Water Engineering*,2013,24(6): 157–162.[吴冰,李昌文.基于SRTM DEM的盘龙河流域河网提取研究[J].*水资源与水工程学报*,2013,24(6):157–162.]
- [25] Fan Xiaoting.Strategy choice of the preservation and management of Chinese coastline[J].*Geological Survey and Research*,2008,31(1):28–32.[范晓婷.我国海岸线现状及其保护建议[J].*地质调查与研究*,2008,31(1):28–32.]
- [26] Lei Xiaohui,Zhou Zuhao,Ding Xiangyi,et al.How to process boundary rivers and coastline in watershed subdivision of distributed hydrological model[J].*Journal of China Hydrology*,2009,29(6):1–5.[雷晓辉,周祖昊,丁相毅,等.分布式水文模型子流域划分中界河、海岸线的处理研究[J].*水文*,2009,29(6):1–5.]

(编辑 张 琼)

引用格式: Liu Huan,Du Junkai,Jia Yangwen,et al.Improvement of watershed subdivision method for large scale regional distributed hydrology model[J].*Advanced Engineering Sciences*,2019,51(1):36–44.[刘欢,杜军凯,贾仰文,等.面向大尺度区域分布式水文模型的子流域划分方法改进[J].*工程科学与技术*,2019,51(1):36–44.]