

文章编号:1001-4179(2013)09-0015-05

子流域划分对 EasyDHM 径流模拟的影响分析

黄晓敏¹, 杨元月², 张 奇³, 雷晓辉⁴

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 南水北调工程设计管理中心, 北京 100038; 3. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100038; 4. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要:子流域划分是分布式水文模型构建的重要过程之一。对分布式水文模型子流域划分技术进行了综述, 简要介绍了 EasyDHM (Easy Distributed Hydrological Model) 模型及其子流域划分方法。选取第二松花江丰满水库以上流域作为研究区域, 使用 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 分辨率的数字高程 (DEM) 及 50 km^2 集水面积阈值提取数字河网, 并按 3 种子流域划分配置对该区域进行划分。结果表明, 子流域划分数越多, 纳什效率系数越大, 模拟效果越好。

关键词:子流域划分; 分布式水文模型; EasyDHM; 径流模拟; 第二松花江

中图法分类号: P334.92 文献标志码: A

1 研究背景

近些年来, 随着地理信息系统 (GIS) 和遥感 (RS) 技术不断完善、计算机技术以及数值分析理论的进一步发展, 分布式水文气象信息和下垫面信息越来越丰富、计算机运算能力快速提高, 分布式水文模型的发展十分迅速, 出现了如 SHE (System Hydrologic European)、TOPMODEL (TOP Graphy Based Hydrological MODEL)、SWAT (Soil and Water Assessment Tool)、EasyDHM (Easy Distributed Hydrological Model) 等各种模型。与传统的集总式水文模型相比, EasyDHM 模型作为分布式水文模型之一, 能够反映水文要素在空间上的变化, 并进行下垫面变化条件下的计算。特别是它具有更多的模拟功能, 把单一水量变化的模拟扩大到对广泛水文水资源与生态环境问题的模拟, 并可通过尺度转换与大气环流模式耦合来预测全球变化对水资源的影响, 从而纳入全球变化水文研究的前沿。

不同的分布式水文模型, 其反映下垫面和气象数据空间变异的实现方法不同。目前, 基于 DEM 构建的

分布式水文模型的计算单元主要有 3 种: 单元网格、地貌单元和自然子流域。另外, 部分半分布式水文模型采用分布函数的方法描述空间差异性。基于单元网格构建的紧密耦合型分布式水文模型, 如 SHE 模型及其衍生模型, 其优点是直接考虑各水文要素的相互作用及其时空变异规律, 物理概念清晰; 缺点是计算负担重、参数率定困难。基于地貌单元的分布式水文模型, 如 IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model) 模型等, 其优点是易于精确表示地形特征, 缺点是单元划分工作量和计算量比较大。基于自然子流域建立的分布式水文模型将每个自然子流域作为一个计算单元, 最大的优点是便于引进传统的集总式水文模型, 充分利用已有的大量研究成果和经验, 节省模型开发时间。半分布式水文模型也按照某种规则划分出基本计算单元, 但并不关心这些计算单元实际的空间位置, 而是采用分布函数描述产流的空间变异性。其优势在于既可以把流域下垫面的某些影响水文响应的关键因子 (如土壤蓄水容量、地形、植被类型等) 的空间变异性反映出来, 又不必像分布式模型那样引入过多的参数, 且模

收稿日期: 2012-12-18

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目 (201001024, 201101026)

作者简介: 黄晓敏, 女, 博士, 研究方向为流域水循环模拟。E-mail: Huangxiaomin123123@126.com

通讯作者: 雷晓辉, 男, 教授级高级工程师, 研究方向为水文水资源。E-mail: lxh@iwhr.com

型参数的确定也相对简单。每种方法都各有优缺点,在实际应用中,经常根据流域特征及掌握的资料组合使用以上方法。

在流域空间离散程度对分布式水文模型模拟结果的影响方面,现在已取得一定成果。J. C. Bathurst 将 SHE 模型应用于威尔士中部 Wye 流域,为使子单元具有相对均一性,子流域单元面积不应超过流域总面积的 1%^[1]。S. Mamillapalli 等将 SWAT 模型应用于美国 Bosque 流域,发现离散程度越高、土壤和土地利用组合数越多,模拟精度越高,但当超过某限值后,精度便不能再提高^[2]。R. L. Bingner 等将 SWAT 模型应用于美国 Goodwin Creek 流域,发现只要子流域数量不低于某限值,径流量受子流域数量影响不大^[3]。T. W. FitzHugh 和 D. S. Mackay 将 SWAT 模型应用于丹麦 Pheasant Branch 流域,发现径流和出口泥沙的模拟效果受子流域大小影响较小^[4]。M. Jha 等发现子流域数对径流的模拟效果影响不大^[5]。国内的郝芳华^[6]、张雪松等^[7]分别以黄河下游支流卢氏流域和美国 Lake Fork 流域为研究区,发现子流域的划分数目对流域产流的敏感性较低,并且存在一定的子流域划分水平,当子流域的数目超过 24 时,对流域产流几乎无影响。

自然子流域作为分布式水文模型的计算单元时,单元内和单元间的水文过程十分清晰、易于引进传统水文模型、可以简化计算、缩短模型开发时间等,EasyDHM 采用子流域的方法来表征下垫面及气候的变化。EasyDHM 在数字高程模型 (DEM) 基础上,根据设定的最小汇水面积阈值提取数字河网;然后根据设定的搜索支流数、搜索深度及汇水面积阈值进行子流域划分。EasyDHM 的子流域划分是基于改进的 Pfafstetter 法,可以对无分叉河道及人工建筑物进行自动加密处理。本文重点研究 EasyDHM 的子流域划分对模拟结果的影响。

2 资料与方法

2.1 研究区概况

本文选取的研究区域为第二松花江丰满水库以上流域(图 1),面积为 42 866.03 km²。该流域位于吉林省中南部地区,分布在东经 125°18′~128°45′、北纬 41°40′~44°05′之间,东亚大陆边缘,属寒温带大陆季风气候区。第二松花江有头、二道江两源。主源二道江发源于长白山天池。头道江、二道江汇合后称为第二松花江。第二松花江丰满以上河段沿程接纳的较大支流有辉发河和拉法河。整个流域分布在长白山的西北坡,高程自东南向西北递减,由河源处的 2 000 多米

降至丰满处的 200~500 m。根据 2000 年土地利用数据,第二松花江丰满以上流域 50.87% 为有林地,15.89% 为农村居民点,7.75% 为疏林地,6.27% 为中覆盖度草地。根据第二次全国土壤普查资料,第二松花江丰满以上流域 56.73% 为壤土,1.18% 为沙质黏土,42.09% 为黏壤土。

本文选取流域内干支流 8 个控制性水文站点和 3 个骨干水库参与模型的参数分区划分,其拓扑关系见图 2。各水文站所用观测数据为 1964 年 6~9 月,数据来源为松辽水利委员会(以下简称松辽委)。气象数据来源于中国气象局提供的第二松花江丰满以上流域及周边 15 个气象站点观测资料,包括平均气温、最高气温、最低气温、降水、日照时数、风速、相对湿度,观测年份为 1954~2008 年。另外,松辽委还提供了 140 个雨量站点的观测资料。流域内水文站、骨干水库和气象站分布如图 3 所示。文中使用 DEM 精度为 1 km × 1 km。

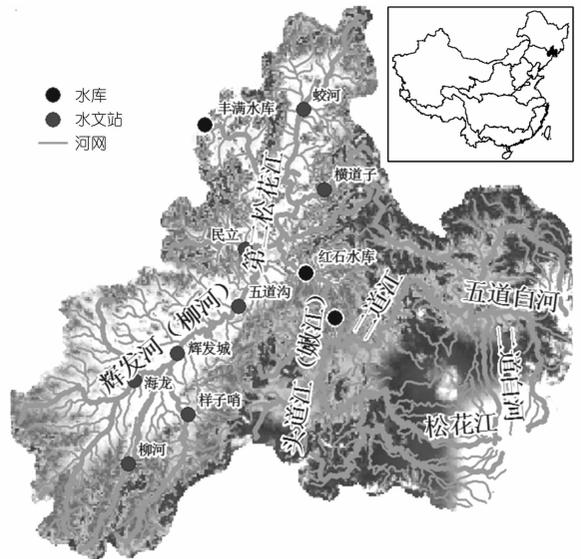


图 1 第二松花江丰满以上流域

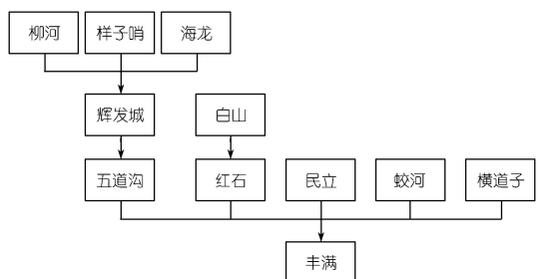


图 2 各参数分区拓扑关系

2.2 EasyDHM 模型简介

2.2.1 子流域划分

EasyDHM 的子流域划分技术不仅可支持少支流

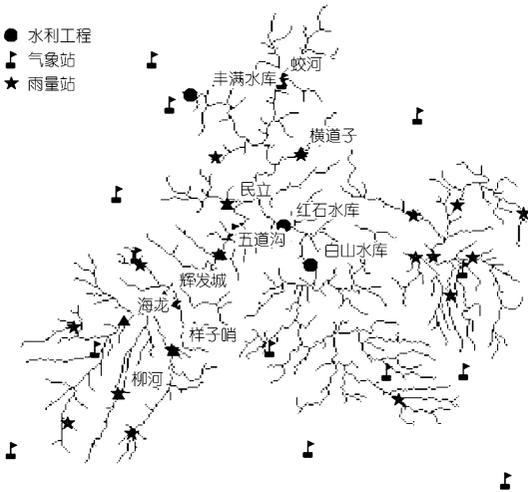


图 3 流域内水文气象站点分布

河网的编码,还可以支持多入口点、出口点的编码。对于有水文站、水库等人工建筑物的河流,无论支流大小都强制编码并进行自动加密。对于无分叉河段和狭长子流域,则当汇水累计数达到设定阈值时自动加密。

(1) 支持各种河网特征的 Pfafstetter 编码规则。传统 Pfafstetter 规则只考虑了 3 条支流以上河道的编码,见图 4(a),而对 3 条及少于 3 条支流的河道不进行编码处理,这可能导致最终划分出的子流域不均匀。EasyDHM 模型的子流域划分技术对有支流的河道都进行编码处理。若某河道有 3 条支流,则由下游到上游的 3 条支流和 4 段河道编码分别依次为 2,4,6 和 1,3,5,7,见图 4(b)。若某河道有 2 条支流,则由下游到上游的两条支流和 3 段河道编码分别依次为 2,4 和 1,3,5,见图 4(c)。若某河道只有 1 条支流,则支流和两段河道的编码分别依次为 2 和 1,3,见图 4(d)。

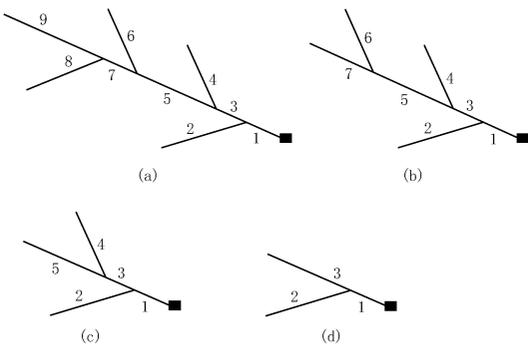


图 4 对于改进 Pfafstetter 规则的示意

(2) 支持多出口点、入口点的 Pfafstetter 编码算法。对于复杂流域或不完整流域,可能存在多个出口点的情况,改进的 Pfafstetter 编码引入了“出口点位”的概念。为编程方便,“出口点位”由多个非零数字组成,位数为 $N_{OutletLen}$ 。对于多出口点流域,首先对每个出口点编码,然后再对每个出口点控制流域的河网按照

上一步骤中的编码方式进行编码,见图 5。

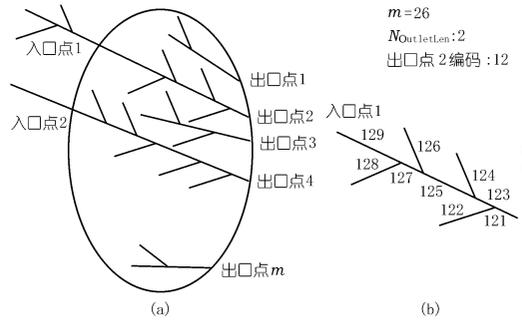


图 5 支持多出口点、入口点的改进 Pfafstetter 编码

为解决不完整(不闭合)流域的子流域划分,引入了流域入口点的判读。在生成数字河网时,从下游依次判读每个栅格的上游流入栅格,然后从当前栅格向其上游栅格搜索。当上游某方向栅格为入口点时,该方向停止搜索,同样也停止编码。

图 5 中给出了支持多出口点、入口点的 Pfafstetter 编码概念图。该流域有 2 个入口点, $m(m = 26)$ 个出口点,根据前面的理论, $N_{OutletLen}$ 可以设置为 2。以 2 号出口点为例,其 Pfafstetter 编码结果参见图 5(b)。

(3) 无分叉河段与狭长子流域自动加密方法。在采用改进的 Pfafstetter 编码河段后,循环检查所有河段,若当前河段的出入口间汇水累计数超过给定的累计数阈值,则将该河段拆分为 2,3,4 或 5 段,并在原本编码的后面自下游到上游分别加上 1,3,5,7 或 9。最后,搜索每个分段后的子河段的控制范围,并进行子流域划分。

(4) 考虑水库、水文站位置的子流域加密方法。对于水库、水文站的处理,是将其位置定义为子流域的出口点。首先搜索定位人工增加出口点所在的河段,若该河段上水库或水文站数多于一个,则根据水库、水文站数将该河段拆分为多段,并给各自河段进行编码和子流域划分。

2.2.2 子流域内的产汇流计算

根据不同类型的土地利用单元,EasyDHM 分别对其进行产流模拟,根据面积比例,将每类土地利用类型的产流量再汇总,得出当前计算单元上的总产流。土地利用单元有以下几种类型,即耕地,林地,草地,水域,城乡、工矿、居民用地和未利用土地。实际模拟时按是否是水域分为两大类,见图 6。水域的产流模拟较为简单,当气温高于融雪临界温度时,积雪全部融化。在产流过程中,实际蒸发使用水面的潜在蒸发,除去蒸发以后的净雨和融雪量全部产流。

对于其他 5 种非水域土地利用类型,各单元在垂向上均划分为 4 层:植被冠层、地表层、土壤层和地下

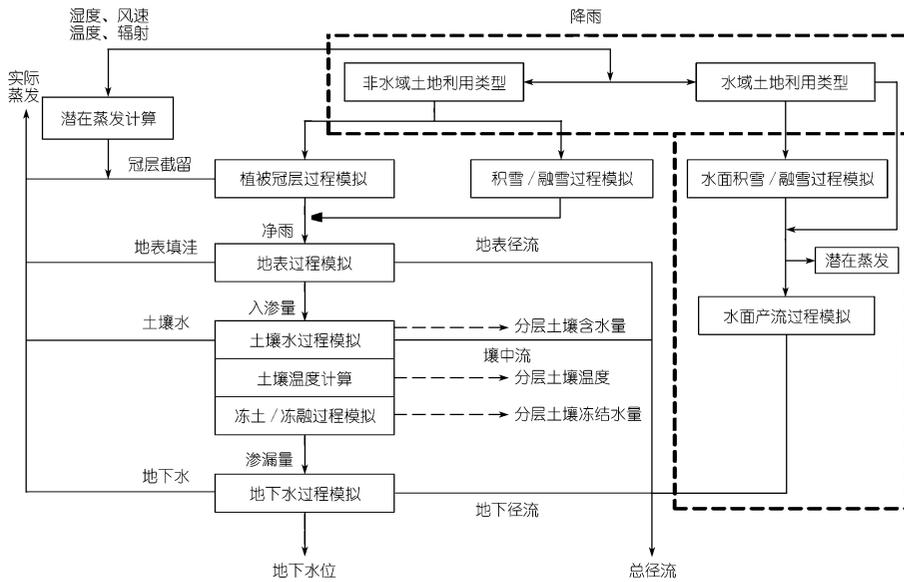


图6 EasyDHM 模型产流概化(垂向结构)

水含水层,其中土壤层可根据实际情况划分为若干层。在 EasyDHM 产流计算时,首先需要根据气温判断降水形态为降雨还是降雪,若为降雪,则降雪蓄积于地面,然后根据积雪温度是否高于融雪临界温度判断是否融雪。若为降雨,则判断是否有融雪发生,并经过植被截留过程,得出到达地表的净雨量。抵达地表的净雨,部分发生地表入渗,超渗部分发生地表填洼继而蒸发或形成地表径流。渗入土壤中的水部分蒸发,部分侧向流动产生壤中流,部分垂向流动进入地下含水层。地下含水层发生调蓄、蒸发及横向演进产生地下径流。植被冠层、地表填洼、土壤水和地下水都会产生蒸发,它们之和为实际蒸发。

EasyDHM 模型中,产流以子流域内部单元为基本单元进行计算,汇流则以子流域主河段为单元计算。河道汇流模型中基本控制方程均是圣维南方程组。

3 结果分析

使用 50 km^2 的集水面积阈值,生成河网水系栅格图。为比较不同子流域划分对率定结果的影响,使用支流个数和搜索深度分别为(0,1),(1,1),(4,1)3个配置,进行子流域划分和率定。支流个数和搜索深度为(0,1)、(1,1)和(4,1)时,可以分别划分出27,142和326个子流域,见图7,8。当子流域划分326个时, $60 \sim 70 \text{ km}^2$ 范围内子流域最多,为29个,全部子流域平均面积为 131.86 km^2 ;子流域划分145个时, $60 \sim 70 \text{ km}^2$ 范围内子流域最多,为12个,全部子流域平均面积为 296.35 km^2 ;子流域划分27个时, $50 \sim 60 \text{ km}^2$ 范围内子流域最多,为3个,全部子流域平均面积为 1595.78 km^2 。

为分析在第二松花江丰满以上全流域内子流域划分对率定结果的影响,在参数率定时,优化全流域通用最优参数,即,全流域的实测数据均参与每一个候选解的评价。全流域通用最优参数识别方法为,根据参数分区的拓扑关系(上下游关系),对研究区域内的参数分区采用当前解进行模型的产汇流计算。在有上游分区模拟计算时,可以按照需要选择读取上游计算的模拟径流或者实测径流(本文选用读取上游实测径流)。以流域内参数分区评价目标函数值的平均值作为评价目标函数值。

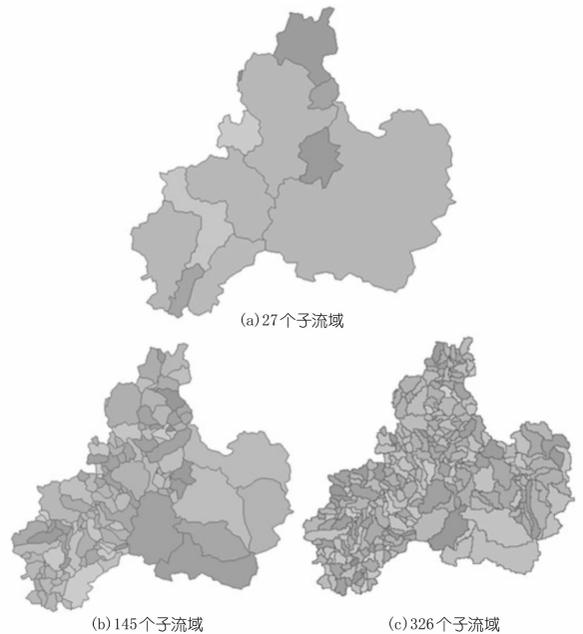


图7 子流域划分

本文采用纳什效率系数,评价每个参数分区的模拟径流与实测径流的拟合效果,故所有参与计算的参数分区的纳什效率系数的平均值为最终评价目标函数值。参数率定技术采用的是 DDS 算法。该研究区域内,因柳河和横道子两个分区无实测径流数据,故该两个站点不参与评价。3种配置相应的模型率定结果见表1。结果表明,除五道沟、蛟河和辉发城之外,其余各站随着子流域划分数增多,纳什效率系数有所增加,全流域纳什效率系数的平均值同样为增加趋势。对于五道沟、蛟河和辉发城的变化情况,不排除由优化算法随机性原因引起。总的来说,将第二松花江丰满以上

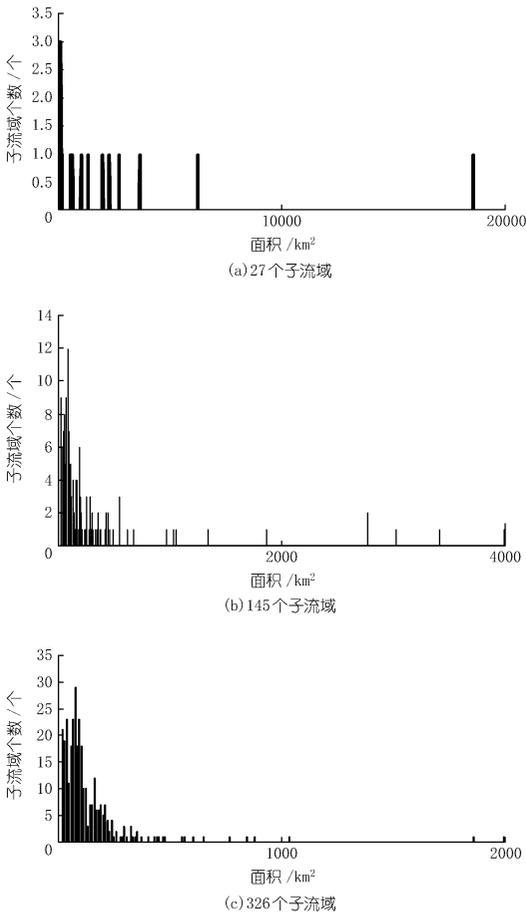


图 8 子流域面积频率分布

流域划分为 27 ~ 326 个子流域时,随着子流域划分数增多,纳什效率系数增大,模拟效果越好。

表 1 不同子流域划分数率定后的纳什效率系数

| 子流域数 | 样子哨 | 海龙 | 辉发城 | 白山 | 五道沟 | 红石 | 民立 | 蛟河 | 丰满 | 平均 |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| 27 | 0.79 | 0.54 | 0.91 | 0.66 | 0.80 | 0.98 | -1.16 | 0.53 | 0.86 | 0.56 |
| 145 | 0.86 | 0.65 | 0.89 | 0.80 | 0.89 | 0.98 | 0.02 | 0.50 | 0.86 | 0.72 |
| 326 | 0.87 | 0.71 | 0.87 | 0.88 | 0.88 | 0.99 | 0.40 | 0.50 | 0.89 | 0.76 |

4 结论

本文对 EasyDHM 中集成的子流域划分方法进行了简要介绍,并以第二松花江丰满以上流域为研究区域,分析了子流域划分对模型率定结果的影响。结果表明,将 42 866.03 km² 的研究区域划分为 27 ~ 326 个子流域时,随着子流域划分数增多,纳什效率系数增大,模拟效果越好。故子流域划分对分布式水文模型 EasyDHM 率定结果有一定影响,在计算条件允许的条件下,建议增加子流域划分数以提高模拟精度。

参考文献:

- [1] Bathurst J C. Sensitivity analysis of the system hydrologic European (SHE) for an upland catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 1986, (87): 103 - 123.
- [2] Mamillapalli S, Srinivasan R, Arnold J G, et al. Effect of spatial variability on basin scale modeling [C] // Third International conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. Santa Fe: National Center for Geographic Information and Analysis, 1996.
- [3] Bingner R L, Garbrecht J, Arnold J G, et al. Effect of watershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield [J]. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40(5): 1329 - 1335.
- [4] Fitz Hugh T W, Mackay D S. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, (236): 35 - 53.
- [5] Jha M, Gassman P W, Secchi S, et al. Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment, and nutrient predictions [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(3): 811 - 25.
- [6] 郝芳华,张雪松,程红光. 分布式水文模型亚流域合理划分水平当议 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 75 - 78.
- [7] 张雪松,郝芳华,程红光,等. 亚流域划分对分布式水文模型模拟结果的影响 [J]. *水利学报*, 2004, (7): 119 - 128.

(编辑:李慧)

Influence of sub - basin delineation on runoff simulation by EasyDHM

HUANG Xiaomin¹, YANG Yuanyue², ZHANG Qi³, LEI Xiaohui⁴

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Center of South to North Water Transfer Project of Designing and Management, Beijing 100038, China; 3. Beijing Institute of Water, Beijing 100038, China; 4. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Sub - basin delineation is one of the most important steps in distributed hydrological model establishment. We reviewed the sub - basin delineation technology of distributed hydrological models, and introduced the easy distributed hydrological model (EasyDHM) and its sub - basin delineation method. The Second Songhua River above Fengman Reservoir was selected as study area, DEM resolution with 1km × 1km and water catchment threshold value of 50 km² were used to extract the digital river networks. Three different configurations for sub - basin delineation were adopted. The results show that with the increase of sub - basins, the Nash - Sutcliffe coefficient increases, and the simulation accuracy is improved.

Key words: sub - basin delineation; distributed hydrological model; EasyDHM; runoff simulation; The Second Songhua River