

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.06.09

# 复杂下垫面城市暴雨内涝汇水区划分方法研究

沈黎达<sup>1,2</sup>, 李瑶<sup>1,2</sup>, 李东臣<sup>3</sup>, 范津津<sup>1,2</sup>, 胡潭高<sup>1,2</sup>

(1. 杭州师范大学 遥感与地球科学研究院, 浙江 杭州 311121; 2. 浙江省城市湿地与区域变化研究重点实验室, 浙江 杭州 311121; 3. 石河子大学 理学院地理系, 新疆 石河子 832003)

**摘要:** 汇水区(catchment)是径流控制的结构单元,也是水文模型中重要的输入数据。在城市地区,由于复杂的下垫面特征,使用传统的汇水区划分方法得到的结果和现实情况差异较大。在已有的汇水区划分方法基础上,结合城市地区实际径流特点,提出了新的汇水区划分方法。首先,将影响地表汇流路径的不同地物高程信息融入到DEM中;然后,对概化后的排水管网进行缓冲区分析并修正对应范围内的DEM数据,进一步优化DEM;再次,结合研究区范围确定合适的DEM空间分辨率,保证子汇水区划分的合理性;最终,根据精细化的DEM数据,利用D8算法划分子汇水区。以海宁地区为研究区,并将新方法与传统方法进行对比。结果表明:细化后的DEM能够更加真实地反映地表高程,汇水区划分结果可以准确刻画地表径流过程,提高了汇水区划分的合理性。

**关键词:** 城市暴雨内涝; 汇水区划分方法; 数字高程模型; 复杂下垫面; 汇流; 排水管网

中图分类号:P333.2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)06-0050-09

## Study on dividing method of rainstorm waterlogging catchment area in urban area with complex underlying surface

SHEN Lida<sup>1,2</sup>, LI Yao<sup>1,2</sup>, LI Dongchen<sup>3</sup>, FAN Jinjin<sup>1,2</sup>, HU Tangao<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Urban Wetlands and Regional Change, Hangzhou 311121, China;

3. Department of Geography, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** Catchment area is not only the structural unit of runoff control, but also an important input data in hydrological model. In urban areas, the results obtained using the traditional catchment division method are quite different from the actual situation due to the complex underlying surface characteristics. In this paper, a new catchment division method is proposed based on the existing watershed division methods and by combining with the actual runoff characteristics of urban areas. First, the elevation information of different objects affecting the surface confluence path was integrated into DEM. Then the buffer analysis of the generalized drainage pipe network was carried out and fused into the DEM data in the corresponding range, and the DEM was further optimized. We determined the appropriate DEM spatial resolution to ensure the rationality of the division of sub-catchment area based on the study area ranges. Finally, the traditional D8 algorithm was used to draw the molecular catchment area according to the refined DEM data. Taking Haining area as the study area, and comparing the new method with three traditional methods, the experimental results showed that the refined DEM reflects the surface elevation more truly, and the watershed division results can accurately depict the surface runoff process and improve the rationality of the division of catchment area.

**Key words:** urban rainstorm waterlogging; catchment division method; digital elevation model; complex underlying surface; confluence; drainage pipe network

收稿日期:2019-04-15; 修回日期:2019-07-15

基金项目:浙江省基础公益研究计划项目(LY19D010004、LGF18D010005); 杭州市科技发展计划项目(20191203B19)

作者简介:沈黎达(1996-),男,浙江杭州人,硕士研究生,研究方向为水文及水资源。

通讯作者:胡潭高(1983-),男,浙江奉化人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为城市内涝灾害监测。

## 1 研究背景

汇水区划分(catchment delineation)是分布式水文模型中汇水区数据输入的基础和前提<sup>[1]</sup>。汇水区划分的尺度、准确性及流向真实性等会对模拟精度和效率产生重要影响<sup>[2]</sup>。通过城市雨洪模型来研究城市暴雨积涝问题时,由于庞大的数据量和复杂的输入参数,汇水区划分的准确性对模型结果尤为重要。同时,由于城市下垫面具有高度复杂、破碎、起伏微小却突兀等特征,诸如道路隔断、河道堤坝、地下空间、建筑结构等城市微地形会显著改变水流方向,对地表径流以及积水扩散过程产生明显影响,进而增加了汇水区划分的难度。因此,在建模前如何科学合理地划分子汇水区成为相关研究中的重要前提工作。

目前,子汇水区划分方法可大致归纳为以下类型:(1)人工勾画法。以遥感影像图为背景,通过人工勾绘得到,但是人工勾画难以考虑到地形以及管网对于径流的影响,对于面积较大的城市平原地区,勾画结果存在较大的误差<sup>[3]</sup>。(2)基于排水管网的汇水区划分方法。该方法主要根据雨水井的空间位置采用泰森多边形的方法进行汇水区划分,使得每个雨水井处于汇水区的中心。张书亮等<sup>[4]</sup>、张家立等<sup>[5]</sup>在雨水管网的基础上划分外接多边形,自动分配雨水管网所服务汇水区域,最后综合生成出水口汇水区。该方法虽然考虑了排水管网的影响,但是未充分考虑地形对径流的影响,难以准确模拟城市地表径流的真实情况。(3)基于地形数据的汇水区划分方法。该方法借助 DEM 数据,通过 D8 算法计算水流方向,进一步通过水文分析完成汇水区边界的划分<sup>[1]</sup>。Callow 等<sup>[6]</sup>发现在平坦的平原河网地区,D8 算法提取出的汇水区边界与真实情况差异较大,先后出现了多流向算法、Burn in 算法<sup>[7]</sup>、DRLN 算法、DEMOM 算法<sup>[8]</sup>等改进算法<sup>[9]</sup>。这些算法和模型适用于自然地形,但在复杂的城市下垫面地区,道路、建筑物、地下管网等都会改变原有的径流方向和途径<sup>[10]</sup>。Duke 等<sup>[11]</sup>和左俊杰等<sup>[12]</sup>将道路、水系、水渠等影响径流途径的地物要素融合进 DEM,达到细化 DEM 的目的,提高了汇水区划分的准确性。但是在城市区域,汇水区的划分除了与地面高程有关,还受到地下管网的影响。因此,需要综合考虑城市复杂地表信息和管网排水系统对降水径流的影响,从而使模型运行结果更加贴近真实情况。(4)综合地形和管网的汇水区划分方法。该方法主

要利用 GIS 水文分析、泰森多边形法和人工手动修正法进行子汇水区划分,是对前面 3 种方法的改进并在实际应用中取得了较好的划分效果。赵冬泉等<sup>[13]</sup>首先基于 DEM 数据提取自然汇水区;然后利用泰森多边形方法,将获得的自然汇水区进一步划分,使得每一个节点对应一个汇水区;最后手动调整二次划分后的子汇水区。薛丰昌等<sup>[14]</sup>首先依据城市排水主干水系进行汇水区一级划分,然后将影响中心城区和郊区的不同径流因子分别融入 DEM,利用细化的 DEM 进行二级汇水区划分;最后根据实际汇流情况,对中心城区进行三级划分。王伟<sup>[15]</sup>结合城市地区地表径流特点,将土地利用类型数据、管网数据融合到原始数据中,得到高精度 DEM 数据,在此基础上通过 D8 算法计算得到汇水区边界。综合地形和管网的汇水区划分方法既结合了传统的基于 DEM 数据生成汇水区的算法,又考虑了城市排水管网分布特征,较好地满足了城市地区的需要。上述研究表明,单纯依靠单一的排水管网或者地形数据来进行汇水区划分方法,在地表高程差异较小且建有完整排水管网的地区,其在应用上具有局限性。而综合地形和管网的汇水区划分方法,根据划分组合方式的不同以及 DEM 数据的精细化程度等因素都会对子汇水区划分结果产生重要影响。

因此,本研究利用高精度 DEM 数据、城市排水管网和研究区土地利用类型数据,结合城市地区地貌地形和排水管网分布特点,充分考虑城市地区实际地表径流特点和 DEM 分辨率对于汇水区划分结果的影响,探索一种适用于复杂城市下垫面的汇水区划分新方法,并将该方法与传统的方法进行比较分析,验证适用性以及合理性。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

海宁隶属于浙江省嘉兴市,位于中国长江三角洲南翼,是杭嘉湖平原的重要组成部分,境内地势平坦,地表高程介于 4~8 m 之间,河网稠密,河道总长 1 865.4 km,河网率为 5.1%。海宁属于亚热带季风气候区,年平均降水量为 1 187 mm,降水充沛且雨热同季,容易受到季风和台风天气的影响,持续性降雨和短时强降雨天气时有发生。同时,伴随着海宁城镇化水平的快速提升,道路、建筑用地等不透水面持续增加,加之部分城区的地下排水管网建设不完善,排水能力不足,导致城市暴雨积涝现象严重。2018 年 8 月,受台风影响,海宁市 24 h 降水量 142.3

mm,居全国第四,市区多处积水严重,海昌路、文宗路、海宁大道等主干道积水严重,桐溪景苑、东苑小区等小区发生内涝,多处河道超危急水位,并出现河水倒灌情况,给人民生命财产和经济社会发展造成巨大损失。

研究区位于海宁主城区(30°30′57″N ~ 30°32′

33″N 和 120°39′50″E ~ 120°41′35″E),北面是主干道,东西南三面为自然河流,相对封闭,形成一个相对独立的汇水单元。研究区东面是旧城区域,排水设施相对落后,加上相对封闭的地形以及城市区域大面积的不透水面,导致在短时强降雨的情况下,内涝灾害频发。

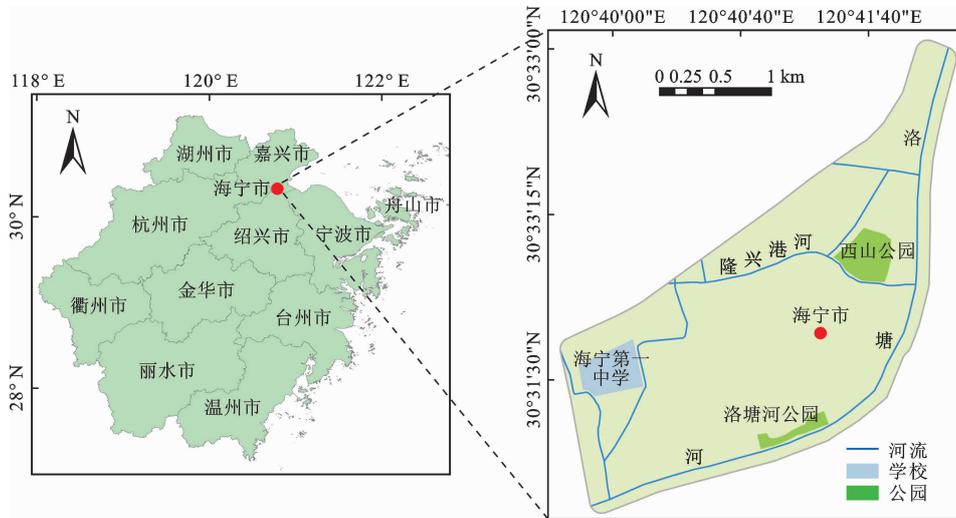


图1 研究区区位图

## 2.2 数据来源

(1)数字高程模型。本研究案例采用政府部门提供的分辨率为2 m的DEM数据,由数字表面模型(digital surface model, DSM)处理后得到。其中DSM是由点密度为0.2 m的激光雷达(LiDAR)点数据创建的,经过噪声去除、系统误差校正、表面激光光斑分类和平滑后,重采样获得2 m网格的DEM<sup>[16]</sup>。

(2)高分辨率遥感影像和土地利用分类图。研究区高分辨率遥感影像通过无人机航拍得到,空间分辨率为0.5 m。在此基础上,通过人工目视解译,获取研究区土地利用分类图(包括:运河和池塘、公园绿地、建设用地、道路、林地、建筑物以及人工沟渠)。同时,对分类结果进行实地验证,确保分类精度符合要求。

(3)地下管网数据。研究区地下管网数据来自海宁市住房和城乡建设局,显示为基于GIS的数据集。该数据集包含大约4 133个雨污合流管道、8 731个污水管道和30 767个雨水管道,其中包含详细的地理和几何信息。通过在线地图(<https://www.amap.com/>)中的手动目视解译进一步纠正并与DEM相匹配。

## 2.3 研究方法

主要技术流程如下:(1)城市地形和排水管网

的DEM修正。将地表径流主要影响因子的高程值融合进原始DEM,并利用排水管网数据对DEM进一步修正,从而在反映出城市真实地表形态的基础上,充分考虑排水管网对径流的影响;(2)DEM最优空间分辨率确定。不同空间分辨率的DEM数据对子汇水区划分会产生重要影响,通过设计多组实验,确定符合研究区尺度的最佳分辨率;(3)利用D8算法,模拟积水在地表的径流过程,从而提取研究区的汇水区划分结果。(4)将改进后的汇水区划分方法与传统的划分方法(地形数据为主的汇水区划分方法;排水管网为主的汇水区划分方法)进行对比分析。流程如图2所示。

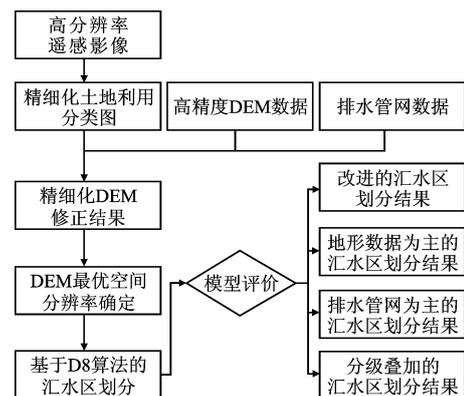


图2 改进的汇水区划分流程图

2.3.1 综合城市地表覆盖和排水管网的DEM精细化修正 原始DEM数据精度为2 m,在地势较为平坦的城市河网地区,地表真实的高程信息无法在DEM数据上显示出来,从而在水文分析提取汇水区边界的过程中出现较大的偏差。如果能将地物高程值融入原始DEM,对于精确划分汇水区具有重要作用。因此,DEM修正处理的基本思路是:将影响地表汇流路径的不同地物信息融入DEM后,人为地修正高程值,模拟出真实的城市地表形态和地表径流方向。

针对不同的地物类型,进行以下叠加操作:

(1)道路:道路高于周边环境且作为城市典型的不透水面,对地表径流起到一定的引导作用,道路的凸起容易阻止水系的生成,两侧低洼地势会将降雨引入周边河流或者排水口。因此,对道路图层所占栅格处的高程值增加相应的值 $h_1$ ;

(2)建筑物:城市地区建筑物呈密集分布的格局。密集分布的建筑物常常阻隔自然径流,使之沿建筑物边界流动<sup>[17]</sup>。因此,对建筑物所占栅格高程值增加相应的值 $h_2$ ;

(3)绿地:绿地作为城市地表的透水面,可以吸收部分水分,使得降雨到达地表后部分水量耗损于植被截留,并且绿地的粗糙系数较大,对地表径流有较大的阻碍作用。在短时强降雨时,降雨量远大于绿地可以吸收的最大水量,因此会影响地表径流的方向,对地表径流产生收集作用。对绿地所占栅格高程值减少相应的值 $h_3$ <sup>[18]</sup>;

(4)沟渠:沟渠的地势较低,对于地表径流起到分流作用。因此,对沟渠图层的高程值减去一个值 $h_4$ ;具体的修正值依据现场调查获取。

通过上述方法,完成初步的DEM数据的细化。然而,在地下管网分布密集城市区域,除了地表高程以外,地下管网也会对真实地表径流产生很大影响。在宏观上,主干河网对较大区域的降水起汇集作用,被河网分割的区域形成若干个独立的自然汇水区块;在汇水区块内部,降水的聚集方向主要由城市地形所决定,城市地下管网也会对汇流产生次要影响,从而改变径流方向和排水点位置<sup>[19]</sup>。排水设施在建设时往往考虑到了汇水特征,在较小区域内,雨水在沿着自然地形汇集时,不再流入自然河网,而是流入就近的地下排水管网。因此在进行城市地区汇水区划分时,需考虑到地下管网对于城市汇流的影响作用。

以研究区的地下管网数据为基础,根据主干道交叉点和建筑物的分布,对排水节点进行概化。排水点会增加其附近积涝的风险,因此对其附近区

域的高程进行降低处理,以每1个排水点为中心建立三级缓冲区,相邻两级之间的距离根据DEM精度设置。缓冲区减少的具体高程值由公式(1)确定:

$$h = \frac{d \cdot S_{\text{截面}}}{n \cdot S_{\text{范围}}} \quad (1)$$

式中: $h$ 为减少的高程值 $m$ ;  $d$ 为排水点雨水井的深度, $m$ ;  $S_{\text{截面}}$ 为排水管网的横截面积, $m^2$ ;  $n$ 为缓冲区分级数量;  $S_{\text{范围}}$ 为受排水点影响的面积, $m^2$ 。

2.3.2 DEM最优空间分辨率确定 DEM数据是汇水区划分的基础,除了DEM数据本身的地形起伏模拟精度以外,其空间分辨率也会直接影响研究区水文特征信息的准确性和可靠性。魏林宏等<sup>[19]</sup>对DEM分辨率研究后发现低的DEM分辨率能产生坡度平坦化,并导致模型响应不敏感。刘金涛等<sup>[20]</sup>分析了在不同DEM分辨率下通过水文分析所提取流域的变化情况,发现随着分辨率的降低,径流长度减小,流域的地形也会变得逐渐平坦。理论上,DEM栅格单元分辨率越高,越能反映真实地形特征,提取出的水系越准确,得到的汇水区划分结果也越合理<sup>[21]</sup>。但是在实际操作中却发现,分辨率过高,例如空间分辨率为2 m的DEM数据,在划分汇水区时会对地物过度划分,产生过多不合理的破碎化的汇水区,不能准确反映真实的地表汇水情况。因此,需要根据特定的研究区,确定最优空间分辨率的DEM数据。本研究首先对DEM数据重采样,将得到的不同分辨率的高程数据分别提取子汇水区;然后将提取结果和以遥感影像图为背景人工勾画得到的结果进行比较;最终,综合确定DEM分辨率为6 m时,得到的汇水区边界和真实地物边界的重合性较好,且汇水区数量和面积符合实际情况,可以比较准确地反映真实情况下的地表汇水情况。

2.3.3 基于D8算法的汇水区划分 在精细化DEM数据基础上,利用ArcGIS软件的水文分析模块,基于D8算法对汇水区进行划分,主要过程包括:

(1)无洼地DEM生成。DEM能较为准确地模拟出地表形态,但是由于DEM数据的误差和真实地形中的凹陷区域,使得直接通过原始DEM得到的水流方向往往存在较大误差。因此在计算前应先对原始DEM数据进行填洼处理,得到无洼地DEM。

(2)提取水流方向。提取水流方向即计算栅格数据中每个单元上最陡的下降方向。在 $3 \times 3$ 的DEM栅格上,计算中心栅格和各相邻栅格的距离权重差,计算值最大的栅格中心即为水流的流出方向。

(3)汇流累积量计算。以规则格网表示的数字

高程模型每点处有一个单位的水量,通过水流方向数据计算每一点处所流过的水量数值,得到了该区域的汇流累积量<sup>[22-23]</sup>。

(4)河网提取。提取出的水系的准确性直接影响汇水区的准确性<sup>[21]</sup>。在汇流累积量数据的基础上,设定合适的阈值范围,从而提取出准确的河网栅格图层,不同区域对应的阈值不同,所以应根据研究区实际的地物状况,通过实地调查、试验和其他辅助资料来确定最佳阈值,提取出较为准确的水系<sup>[24]</sup>。本文中,利用海市的地形数据,通过反复实验,将最佳阈值设定为450。

(5)流域分割。流域,即所需的汇水区,是指流向同一个出水口的径流所流经的地表区域。集水流域先确定每个出水口,通过水流方向数据计算得到所有上游流入各个出水口的栅格单元,形成相应的子汇水区。

2.3.4 模型评价 本文选取3种常见的汇水区划分方法(地形数据为主的汇水区划分方法、基于排水管网的汇水区划分方法和分级叠加汇水区划分方法)为参照,对改进后的方法进行模型评价。将4种模型得到的汇水区划分结果与高分辨率遥感影像进行叠加,比较其划分子汇水区的面积和数量,分析汇水区边界和真实地物的贴合情况以及是否符合真实地形条件下的汇流特点,以此判断不同模型汇水区划分结果的合理性。

(1)基于地形数据的汇水区划分方法。DEM的坡面流累计方法(D8算法)是目前应用最广泛的水流路径汇水区算法,该方法借助DEM数据提取水文要素信息,利用ArcGIS 10.2软件的水文分析模块,通过流向分析、汇流累积量计算、河网提取、流域分割等步骤划分汇水区边界。这种方法适用于高程差较大的自然区域,但城市区域地形较为平坦,直接利用D8算法提取出的径流方向误差较大<sup>[9]</sup>,与实际情况有较大差异。

(2)基于排水管网的汇水区划分方法。该方法主要根据雨水井的空间位置采用泰森多边形的方法进行汇水区划分,使得每个雨水井在理论上处于汇水区的中心。城市区域地下管网分布密集,降水大部分会流入排水管网,因此,排水点的位置会成为影响城市区域汇水区划分的重要因素<sup>[25]</sup>。但是该方法虽然考虑了排水管网的影响,但是未充分考虑地形对径流的影响,难以准确模拟城市地表径流的真实情况。

(3)分级叠加汇水区划分方法。该方法主要利用GIS水文分析功能、泰森多边形法和人工手动修

正法进行子汇水区划分,是对前面2种方法的改进,并在实际应用中取得了较好的划分效果。薛丰昌等<sup>[14]</sup>依据城市排水主干水系进行汇水区一级划分,然后将影响径流的因子融入DEM,进行二级汇水区划分,最后通过排水点位置按照最邻近原则划分平面,并结合实际汇流情况,对中心城区汇水区进行三级分级。该方法较好地满足了城市地区子汇水区划分的需要,然而不同的划分组合方式和DEM精细化程度会对子汇水区结果产生重要影响。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 改进的汇水区划分方法

利用本文提出的改进后的划分方法分别对研究区进行DEM精细化、最优分辨率确定、D8算法汇水区划分,最终得到汇水区划分结果。

3.1.1 融合典型地物的DEM修正结果 由于研究区地势较为平坦,原始DEM数据(如图3(a)所示)高程值变化幅度很小,地表起伏形态不明显,无法显示地物的高程信息。因此通过海市土地利用类型图,将研究区内影响地表径流方向的因子:建筑物、道路、水渠等的高程信息融合进原始DEM。图3(b)为融合地物要素的DEM,融合后图中的线性地物更加明显,高程值变化幅度较大,城市建筑物、道路等地物信息均能在图中较好体现。

3.1.2 融合排水管网的DEM修正结果 以研究区的地下管网数据为基础,对排水节点进行概化后得到研究区内355个排水点。排水点会增加其附近积涝的风险,因此对其附近区域的高程作降低处理,以每1个排水点为中心建立三级缓冲区,相邻两级之间的距离根据DEM精度设置为6m。各排水节点缓冲区减少的高程值由公式(1)确定。得到利用排水管网数据修正后的DEM示意图如图3(c)所示。

通过上述步骤将研究区典型地物高程值和城市管网数据融合进原始DEM数据,得到新的高精度DEM数据。

3.1.3 DEM最优空间分辨率确定结果 对精细化的DEM数据进行重采样,分别得到分辨率为2、4、6、8m的DEM数据,并利用D8算法对不同分辨率的DEM进行子汇水区划分,得到对应的划分结果(图4)。对不同分辨率下的划分结果进行局部放大比较,可以发现:2和4m分辨率的DEM数据所划分的汇水区较为细碎,遥感图像上的建筑物区块被分为独立的子汇水区数量过多,不符合实际汇流情况,且过高分辨率DEM划分产生了一些错误的平形

状汇水区。8 m 分辨率的 DEM 数据所划分的汇水区数量过少,6 m 分辨率 DEM 得到的结果沿主干道将建筑物区块划分为 4 个主要的子汇水区,且成功将 4 个相对独立的社区区块进行独立划分,汇水区边界也较为贴合建筑物和道路,更加符合实际的汇

流情况。

因此,综合确定针对本研究区,DEM 的最优空间分辨率为 6m,得到的汇水区边界和真实地物边界的重合性较好,且汇水区数量和面积符合实际情况,可以比较准确地反映真实情况下的地表汇水情况。

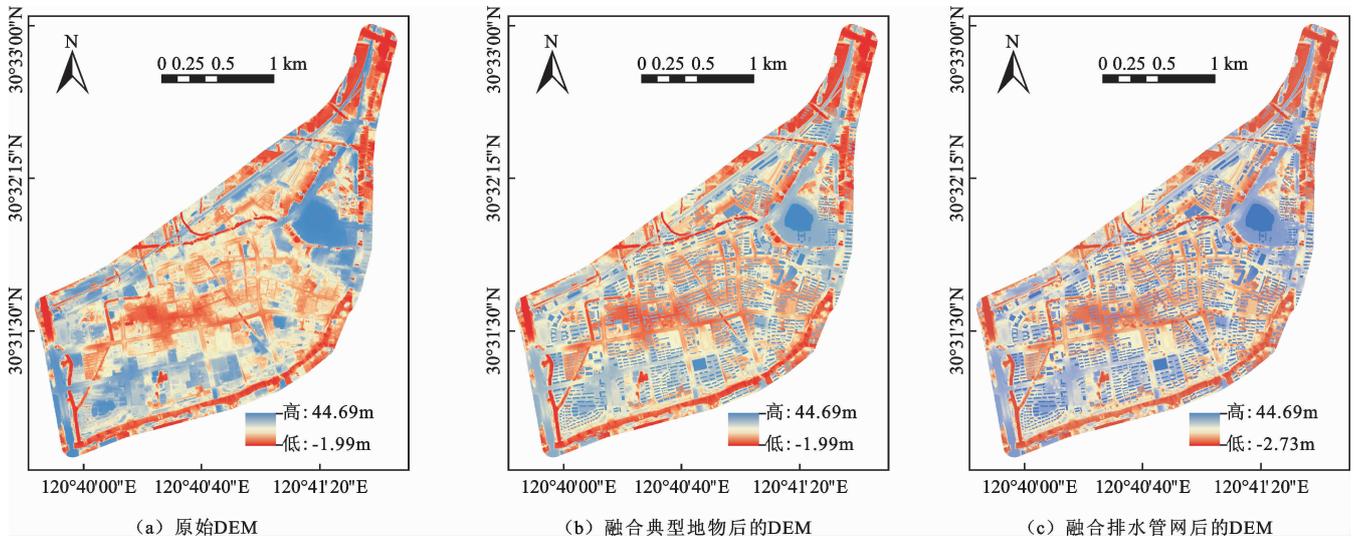


图 3 融合地物和排水管网前后 DEM 变化图

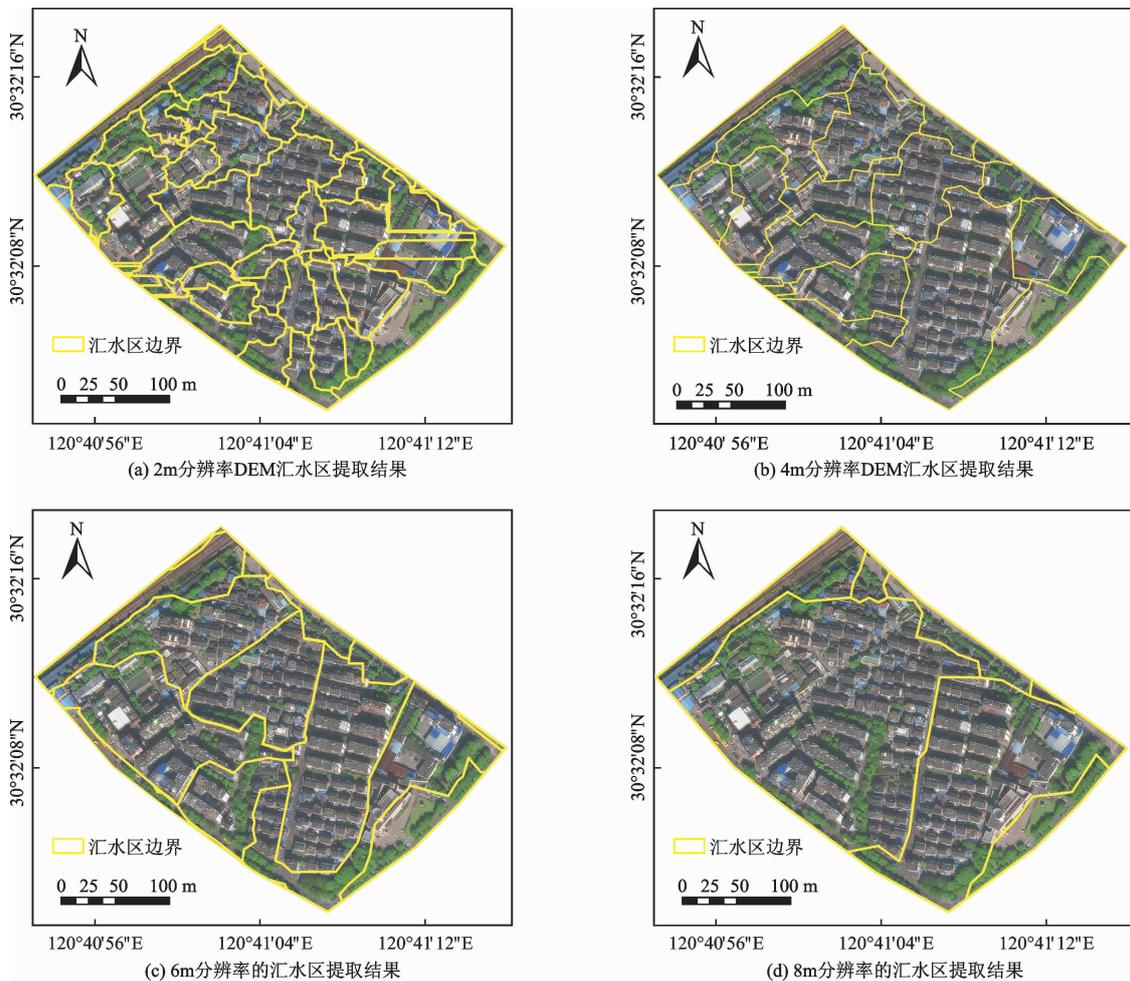


图 4 不同 DEM 分辨率的汇水区提取结果

### 3.2 模型评价结果

利用3种传统的汇水区划分方法和本文提出的改进型汇水区划分方法,分别对研究区进行汇水区提取。

**3.2.1 基于水文模型的汇水区划分结果** 传统的利用水文模型的汇水区划分方法借助原始DEM数据,通过D8算法提取水文要素信息,通过水流方向计算等水文分析的步骤完成汇水区边界的划分,得到研究区的数字化水系,由此方法得到研究区共220个独立的汇水区(图5(a))。

**3.2.2 基于排水管网的汇水区划分结果** 通过海宁市的地下管网数据得到研究区共1112个雨水井,根据雨水井的空间位置,采用外接泰森多边形的方法,按照最邻近原则划分平面,得到排水点的Voronoi图,使得每个雨水井位于汇水区的中心位置,每一个泰森多边形理论上即为1个独立的集水区域,由此方法得到研究区共划分为345个汇水区

(图5(b))。

**3.2.3 分级叠加的汇水区划分结果** 首先,将研究区影响汇流途径的建筑物、沟渠、道路等地物高程信息叠加进原始DEM。再通过ArcGIS水文分析对精细化的DEM经过D8算法得到数字化水系,并由此提取出一级汇水区。在研究区管网数据的基础上对排水节点进行概化,分析得到450个雨水井,并建立每一个雨水井的泰森多边形,得到二级汇水区划分结果。再将一、二级的汇水区划分结果进行叠加,参照高分辨率遥感图像,利用GIS修改工具对叠加结果进行修正,最终形成第三级汇水区划分结果图(图5(c))。

**3.2.4 基于本文方法的汇水区划分结果** 首先,对研究区的DEM进行典型地物高程正修正和排水管网高程负修正;然后,确定研究区的最优分辨率;最后,利用D8算法对精细化DEM数据进行汇水区划分,最终得到汇水区划分结果(图5(d))。

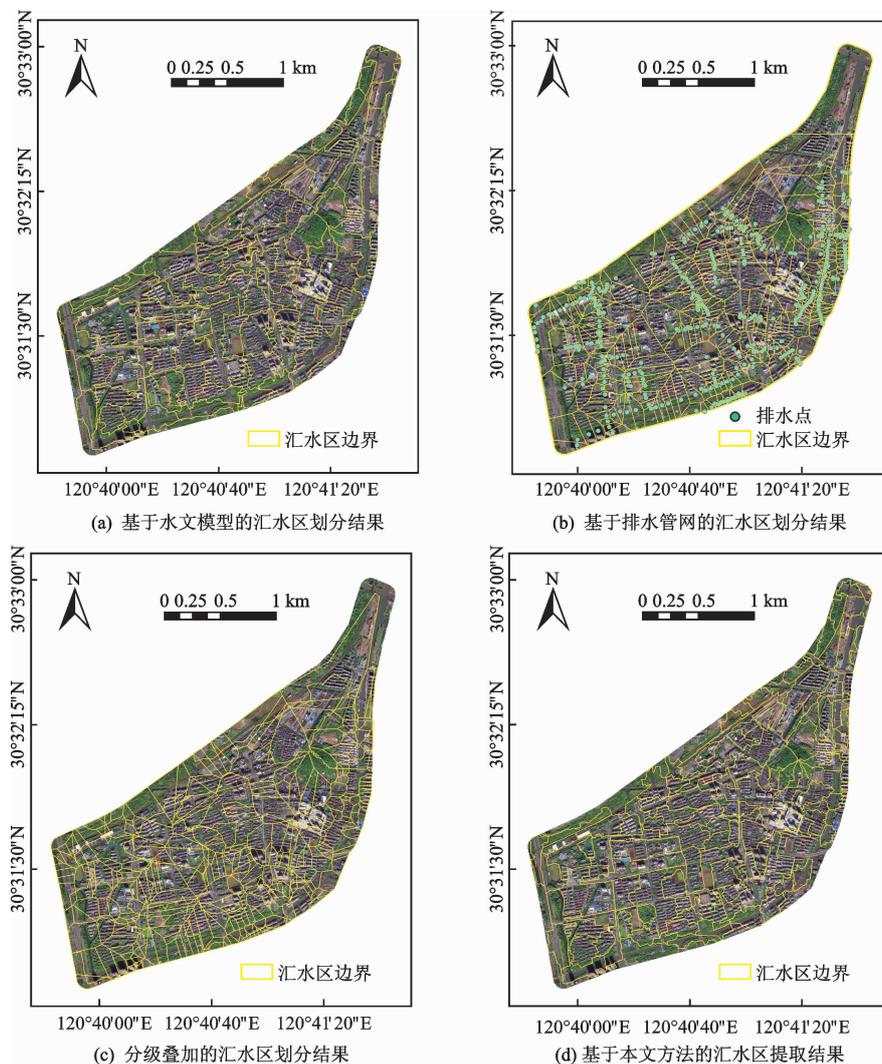


图5 不同汇水区划分方法的结果

### 3.3 讨 论

对 4 种方法得到的汇水区划分结果与高分辨率遥感影像进行叠加(图 6),并进行局部放大比较其划分的合理性。

基于水文模型的汇水区划分结果(图 6(a))考虑到了地形对于汇水区边界的影响,借助融合地物信息的 DEM,使得划分结果可以反映地物的差异,体现出建筑物对地表径流的阻碍作用。但是分辨率为 2 m 的 DEM 数据在划分汇水区时产生了过多不合理的小区块汇水区,例如左上方的海宁大道和下方的水月亭西路道路区域出现一些多余的不规则汇水区边界。

基于排水管网的汇水区划分结果(图 6(b))根据雨水井的空间位置,采用外接泰森多边形的方法,使得每个汇区内都有 1 个雨水井且每个雨水井位于汇区的中心位置,但该方法只根据排水管网的服务范围来确定汇水区域,没有考虑城市区域的地形状况,汇水区边界由直线段组成,径直穿过建筑物、林地等地物,无法体现出地表径流的真实情况。

分级叠加的汇水区划分结果(图 6(c))是将基于地形的划分结果与泰森多边形进行叠加,但是二次划分后的子汇水区数量过多,两者的边界吻合度

较低,需要利用 GIS 修改工具对二次划分后的子汇水区进行调整,并且不同的划分组合方式和人工勾画的精细化程度会对结果产生重要影响。

基于本文方法的汇水区划分结果(图 6(d))综合了地形和管网对于汇流的影响。重分类后 6 m 分辨率的 DEM 得到的汇水区面积较为均匀且符合实际汇水情况。左下方的海宁第一中学操场作为一个相对独立的子汇水区,汇水区边界贴合操场边界,划分结果和真实汇流情况较为接近,细化的 DEM 体现出建筑物对于地表径流方向的阻碍作用,汇水区边界沿着建筑物边界划分,避免了水系直接穿越建筑物的现象,很好地反映地物的差异。该方法还考虑实际的排水管网情况,结果优于直接使用 DEM 和排水管网数据的提取效果。

将只叠加了地物高程值的 DEM 所得到的汇水区划分结果和在此基础上利用排水管网数据对高程值进行调整后得到的汇水区划分结果进行比较(图 7)。由图 7 可以发现,综合排水管网的影响,利用本文方法得到的汇水区边界紧贴建筑物和公园绿地,边界对于地物的拟合程度更高,并且排水点聚集处形成子汇水区,体现出城市地区排水井点对于雨水的汇聚作用,更符合城区地表水流流动的特点。

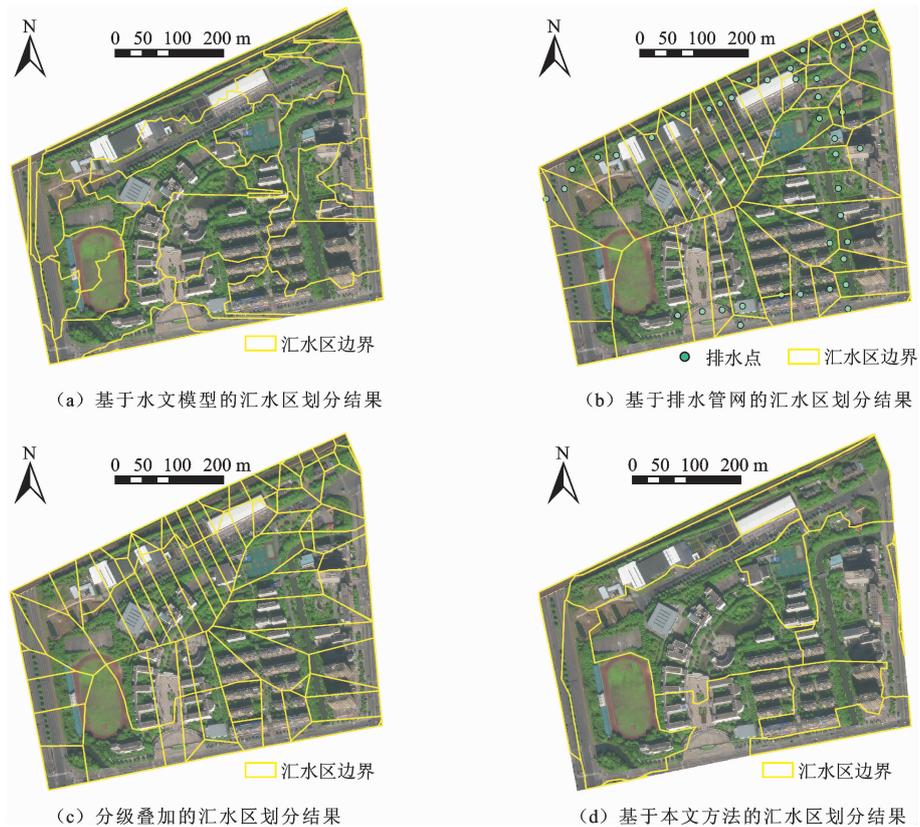


图 6 不同汇水区划分方法结果对比

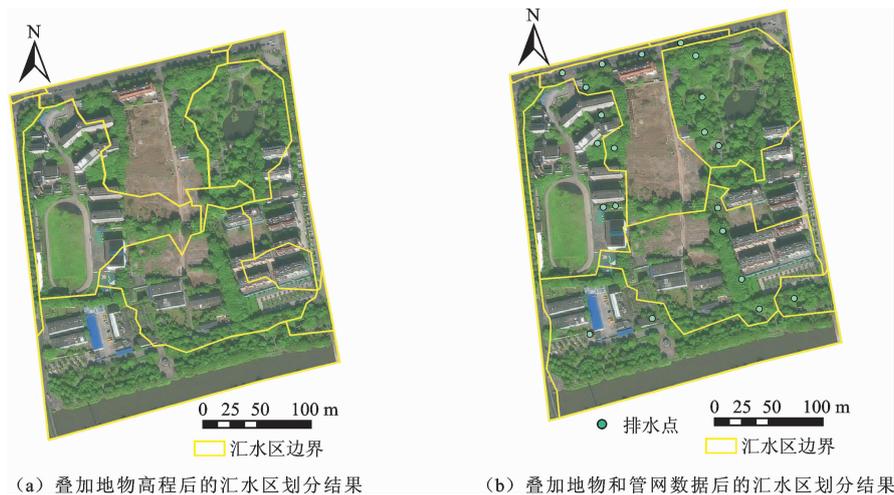


图7 叠加地物高程与融入排水管网数据后汇水区边界的比较

## 4 结论

本文通过分析城市地区实际的径流特点,提出了综合城市复杂下垫面特征和管网数据的汇水区划分方法。主要研究结论如下:

(1)该方法将影响城区汇流途径的不同地物信息融入DEM,反映出真实的城市地表形态,对概化后的排水点进行缓冲区分析,进一步修正其所在范围的高程值,使得精细化的DEM数据能够更加准确地刻画城市地表径流过程。

(2)讨论分析了DEM空间分辨率与研究区范围的相互关系,确定在本研究区条件下,6m分辨率的DEM数据为最优空间分辨率,在该分辨率下子汇水区划分数量、面积等与真实情况相适应。

(3)与传统的3种汇水区划分方法相比较,本文方法综合考虑了排水管网和城市复杂下垫面特征对于径流的综合影响,划分结果和真实汇流情况有较高的拟合度。

本文的汇水区划分方法在城市区域总体上有较好的适用性,但是城市下垫面高度复杂的情况下,如何将一些细小、破碎但对径流方向产生影响的因子(例如小范围绿地、地下空间等城市微地形)融入DEM中将是研究中需要完善之处。同时,目前只能通过与高分辨率遥感影像的叠加对比来定性评价汇水区划分效果,如何通过构建模型进一步定量地对比分析不同汇水区划分方法的差异性将是下一步研究工作的重点。

### 参考文献:

[1] KHAN H H, KHAN A, SREEDEVI P D, et al. Mapping

- potential infiltration patterns using digital elevation model [J]. *Journal of Geographic Information System*, 2014, 28 (2):345-357.
- [2] 周思斯,杜鹏飞,逢勇. 城市暴雨管理模型应用研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2014, 34(6):89-97.
- [3] 张灵敏. 排水管网水力计算及暴雨积水模拟方法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
- [4] 张书亮,干嘉彦,曾巧玲,等. GIS支持下的城市雨水出水口汇水区自动划分研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(3):325-329+336.
- [5] 张家立,丁华凯,高成,等. 外河水位顶托下雨水管网排水能力变化的SWMM模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(6):44-49+55.
- [6] CALLOW J N, NIEL K P V, BOGGS G S. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 332(1-2):30-39.
- [7] SHRIVASTAVA S K, MANCINI L V, RANDELL B. Linking parameters across scales: Subgrid parameterizations and scale dependent hydrological models [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 9(5-6):507-525.
- [8] COSTA-CABRAL M C, BURGESS J. Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(6):1681-1692.
- [9] 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.
- [10] 何霄嘉,王国庆,鲍振鑫,等. 气候、植被变化与水文循环响应研究进展及展望[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(6):1-5.

(下转第67页)

- [11] 郭冬冬,郭树龙,李彩霞,等. 基于SPI的淮河流域旱涝时空分布特征研究[J]. 灌溉排水学报,2014,33(6):117-121.
- [12] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, MA: Americal Meteorological Society, 1993.
- [13] 刘敏,秦鹏程,刘可群,等. 洪水水位对不同时间尺度SPEI/SPI干旱指数的响应研究[J]. 气象,2013,39(9):1163-1170.
- [14] 周扬,李宁,吉中会,等. 基于SPI指数的1981-2010年内蒙古区域干旱时空分布特征[J]. 自然资源学报,2013,28(10):1694-1706.
- [15] 孙赫. 基于SPI指数的辽宁省气象干旱时间特征分析[J]. 国土与自然资源研究,2018(5):60-62.
- [16] VICENTE - SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ - MORENO J I. A Multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.
- [17] BEGUERÍA S, VICENTE - SERRANO S M, REIG F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(10):3001-3023.
- [18] 陶辉,毛炜峰,黄金龙,等. 塔里木河流域干湿变化与大气环流关系[J]. 水科学进展,2014,25(1):45-52.
- [19] SHI Benlin, ZHU Xinyu, HU Yunchuan, et al. Drought characteristics of Henan province in 1961-2013 based on standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(3):311-325.
- [20] 马荣,张明军,王圣杰,等. 近50a西北干旱区冬季积雪日数变化特征[J]. 自然资源学报,2018,33(1):127-138.
- [21] 王景才,郭佳香,徐蛟,等. 近55年淮河中上游流域气候要素多时间尺度演变特征及关联性分析[J]. 地理科学,2017,37(4):611-619.
- [22] 王文圣,丁晶,向红莲. 水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J]. 四川大学学报(工程科学版),2002,34(6):14-17.

(上接第58页)

- [11] DUKE G D, KIENZLE S W, Johnson D L, et al. Improving overland flow routing by incarnating ancillary road data into digital elevation models [J]. Journal of Spatial Hydrology, 2003, 3(2):1-27.
- [12] 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.
- [13] 赵冬泉,陈吉宁,佟庆远,等. 基于GIS构建SWMM城市排水管网模型[J]. 中国给水排水,2008,24(7):88-91.
- [14] 薛丰昌,盛洁如,钱洪亮. 面向城市平原地区暴雨积涝汇水分级划分的方法研究[J]. 地球信息科学学报,2015,17(4):462-468.
- [15] 王伟. 基于GIS和SWMM模型的城市内涝模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2017.
- [16] 俞志强,付仲良,陈文志,等. 基于地物要素与DEM融合的水文信息提取方法研究[J]. 测绘通报,2016(3):66-69+125.
- [17] ZHAO Dongqiang, CHEN Jining, WANG Haozheng, et al. GIS-based urban rainfall-runoff modeling using an automatic catchment-discretization approach: A case study in Macau [J]. Environmental Earth Sciences, 2009, 59(2):465-472.
- [18] CALLOW J N, NIEL K P V, BOGGS G S. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? [J]. Journal of Hydrology, 2007, 332(1-2):30-39.
- [19] 魏林宏,郝振纯,李丽. 坡面微地形DEM最佳分辨率的选择方法[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(5):129-134+142.
- [20] 刘金涛,陆春雷. DEM分辨率对数字河网水系提取的影响趋势分析[J]. 中国农村水利水电,2009(3):7-9.
- [21] 邱临静,郑粉莉. DEM栅格分辨率和子流域划分对太子河流域水文模拟的影响[J]. 生态学报,2012,32(12):3754-3763.
- [22] 范玉燕,汪诚文,喻海军. SWMM模型河道及明满流模拟能力分析研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(1):1-5.
- [23] 刘军志,朱阿兴,秦承志,等. 分布式水文模型的并行计算研究进展[J]. 地理科学进展,2013,32(4):538-547.
- [24] 夏伟,周维博,李文溢,等. 气候变化和人类活动对洋河流域径流量影响的定量评估[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(6):47-52.
- [25] 高玉芳,陈耀登,蒋义芳,等. DEM数据源及分辨率对HEC-HMS水文模拟的影响[J]. 水科学进展,2015,26(5):625-630.