

面向城市平原地区暴雨积涝汇水区分级划分的方法研究

薛丰昌, 盛洁如*, 钱洪亮

(南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044)

摘要 汇水区划分是分布式水文模型计算的基础。针对现有方法使用DEM在平原城市地区划分的汇水区不符合实际地形情况, 本文提出了一种面向城市平原地区分级划分汇水区的技术方法。该方法从城市用地分类角度出发将城市分为中心城区和郊区, 依据城市排水主干水系进行汇水区一级划分, 将影响中心城区和郊区的不同径流因子分别融入DEM中, 利用细化的DEM进行二级汇水区划分; 在此基础上, 根据实际汇流情况, 结合Voronoi图, 对中心城区进行三级划分, 最后通过GIS技术进行修正。该方法既结合了传统DEM生成子流域的算法, 又融入了城市区域地物地貌特点, 能更好地满足城市地区的需要。选择上海市嘉定区西北部地区为实验样区, 利用该方法进行汇水区划分比较表明, 其对于城市平原地区具有很好的适用性。

关键词 汇水区; 平原; 分级划分; DEM; Voronoi图

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2015.00462

1 引言

汇水区划分是构建分布式水文模型的重要步骤, 通过汇水区划分可使用更丰富的数据来解释水文过程空间上的异质性, 在一定程度上减少水文模拟过程中的不确定性。分布式水文模型中的每个子汇水区是独立的水力学单元, 在这些单元中, 地形和排水系统因子使得地表径流直接汇入到一个排出点^[1]。在研究城市暴雨积涝水文模型时, 由于要涉及到复杂的模型结构、更多的模型参数及更大的数据量, 汇水区划分的合理性与否对模型预测的不确定性影响更大。因此, 进行城市暴雨积涝汇水区划分是一项基础性且很有意义的工作。

目前, 应用最广泛的水流路径划分汇水区的算法是O' Callaghan和Mark^[1]在1984年提出来的DEM的坡面流累积方法(D8算法)^[2], 即根据地表径流在地形作用下的重力作用, 通过计算每个DEM中栅格的水流方向, 确定其下游栅格的汇流累积量(所谓的汇流累积量是指其上游有多少个栅格的水

流方向最终汇流经过该栅格), 并根据汇流累积量的大小, 利用计算机自动实现流域河网水系的准确提取。河网水系的正确提取是各种水文分析的前提和基础, 只有提取出正确的河网, 才能得到正确的汇水脊线点, 从而确定符合实际地形的汇水区域。平坦地区利用D8算法易造成栅格水流流向一致而产生平行伪河道, 对此先后出现了多流向算法、Burn in算法、DEMON^[4]法、Dinf^[5]法等, 然而这些算法和模型, 对人类活动影响较高的城市平原地区有很大的不适用性。

为了真实反映城市平原地区汇水区的分布情况, Duke等^[6]提出了RIDEM模型(Rural Infrastructure Digital Elevation Model), 该模型将影响汇流流向的道路、水系、田间沟渠等地物信息叠加进DEM, 利用Burn in算法和D8算法划分汇水区。但RIDEM模型存在以下缺陷: (1)未考虑密集的建筑对地表径流方向的影响, (2)不同等级的水系使用Burn in算法一次性叠加进DEM并不能很好地反映汇流流向。左俊杰等^[7]在RIDEM模型基础上考

收稿日期 2014-05-16; 修回日期: 2014-10-28.

基金项目 江苏省博士后科研基金项目(1101024B); 中国气象局北京城市气象研究所城市气象科学研究基金项目(IUMKY&UMRF 2011103); 南京信息工程大学科研基金项目(S8111133001)。

作者简介 薛丰昌(1970-), 男, 内蒙呼盟人, 副教授, 主要从事GIS气象应用研究。E-mail: xfc9800@126.com

*通讯作者 盛洁如(1990-), 女, 江苏苏州人, 硕士生, 主要从事GIS气象应用研究。E-mail: shensuijiyi@163.com

虑建筑物对径流的阻碍作用,并将水系逐级融合进DEM,以上海市为例提出了一种便捷、高效的汇水区划分方法,提高了城市地区汇水区划分的精度。该方法虽然考虑了农田排水沟渠及不同道路形态对汇流路径的影响,然而,对城市不同功能区都考虑采用相同的影响汇流途径的因子,并未考虑对于建有完整排水管网的区域而言影响汇流途径因子的差异,因此,该方法在应用上具有局限性。本文结合城市排水体制和地形地貌特点,在前人研究基础上,提出了一种新的城市地区暴雨积涝汇水区分级划分技术。根据程文辉等^[8]确定的影响太湖流域汇流途径土地利用分类体系基础上,即考虑对城市平原地区影响较大的道路、建筑物、水系、坑塘和排水沟渠。另外,本文着重考虑建有完整排水管网系统的区域,而暂不考虑其他影响因子复杂的因素,如圩区、排涝站位置等因素导致的汇流单元变化。

2 城市暴雨积涝汇水区特征分析

城市暴雨积涝汇水区划分的实质,是建立一个雨水汇合和集中排出的地形单元。城市排涝通常采用二级排涝体系:一级排涝系统负责较大区域暴雨积水,以及市政雨水管网所汇集积水排至外江,该系统主要由区域内主干河网组成;二级排涝系统负责将城市小区、街道等小区域的雨水排入主干河网,由雨水管网、泵站和涵闸等组成。二级排涝系统是自然地形、人工建筑、人工排水设施共同构成的排水系统。以上排水模式决定了城市雨水汇集具有鲜明的层次性特征:在宏观上,主干河网对区域进行了整体分割,形成了若干独立的自然汇水区块;在独立汇水区块内,地形特征决定了雨水的主要聚集方向,人工排水设施依据地形汇水特征而建设,同时又对雨水自然汇集形成干扰,从而形成了以自然地形为主、结合人工排水设施影响的汇水区片;在汇水区片内,由于人工建设影响,人工建筑物与构筑物已经改变了自然地形,雨水不再沿着地形走向汇集,而是就近流入排水节点,雨水由排水节点进入二级排涝系统,集中排除。

根据以上城市雨水集聚特征,提出以下城市汇水区三级划分技术思路:(1)按照城市实际汇流情况,将研究区覆盖范围内的整个汇水区,划分为若干个子汇水区,形成围绕具有实际汇流能力的主干河流的宏观汇水流域,形成一级汇水区划分;(2)在

一级子汇水区内,将影响汇流途径的因子信息融合进DEM,使DEM能反映出真实的地表信息,利用细化后的DEM进行二级汇水区划分;(3)在二级汇水区内,根据排水设施空间分布状况,利用Voronoi图确定排水节点空间服务范围,依据该服务范围进行三级汇水区划分。(4)利用GIS中的修改工具对三者进行调整,完成汇水区的最终划分,流程如图1所示。

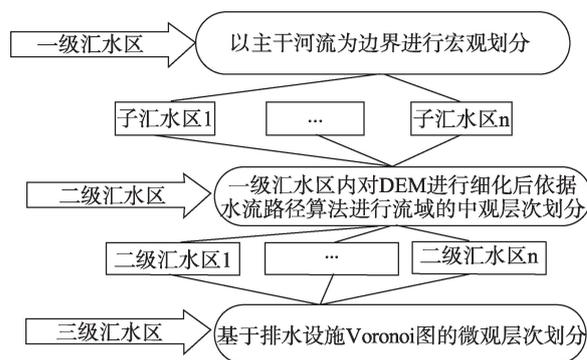


图1 城市暴雨积涝分级划分流程图

Fig. 1 Flowchart of urban storm flood classification

3 城市暴雨积涝汇水区分级划分方法

3.1 基于地形的宏观尺度一级汇水区划分

城市区域通常面积比较大,某些主干河流发挥着宏观汇集区域雨水的作用。依据城市排水模式和地形情况,一级集水区的划分以城市地形为主要影响因素。一级汇水区从整体上将整个城市划分为若干排水流域,反映雨水的总体流向。一级汇水区与城市流域的地形分割基本吻合,采用具有实际汇水能力的主干河流为划分边界,根据城市地区分级水系,参照城市排涝手册和河流汇集关系,明确城市地区各主干河流、渠道的级别和汇水关系,只针对具有流域排水功能的主干河流进行流域划分,将研究区覆盖范围内的整个汇水区划分为若干个子汇水区,形成围绕具有实际汇流能力的河流的宏观汇水流域。在保证汇流关系的基础上,划分出一级汇水区划分图。

3.2 基于DEM的中观尺度二级汇水区划分

划分的主要思路是在确定城市中心地区和郊区的基础上,找出影响中心城区和郊区汇流途径的地物后,将这些地物融入DEM中,对DEM进行修正,并通过水流路径算法对细化后的DEM进行洼地填

充、水流方向和汇流累积量的计算,通过水文分析的basin功能,从中观尺度对城市进行二级汇水区划分。

3.2.1 影响汇流途径因子的选取

对于城市来说,中心城区往往建有完整的排水管网,城市小区、市政街道的雨水绝大部分由排水管网流走。此外,中心城区下垫面不透水比例增大,道路纵横交错,交通网络的快速发展,将城市下垫面分割成一个个小区域,因此,道路也成为影响城市径流汇流和导流作用的重大因素。对于中心城区影响汇流途径因子的选取,主要考虑排水管网和道路的影响。对于郊区来说,地表形态比较复杂,一般由水泥、砖块、沥青和混凝土等构成,同时也伴有绿地、建筑物、构筑物 and 松散的土地等^[8],排水管网设施发展比较弱后。因此,对于城市郊区影响汇流途径因子的选取,重点考虑道路、建筑物、水系、坑塘和排水沟渠。

3.2.2 二级汇水区划分模型的构建

构建二级汇水区划分模型关键是对DEM进行细化,其基本思想是将影响中心城区和郊区汇流途径的不同地物信息融入DEM后,通过对含有这些地物信息的DEM栅格点的高程值,人为地增高或降低一定的高度或比例来增加或降低这些栅格的汇水能力,从而达到细化后的DEM能更加突出面向水文分析,综合反映排水系统空间状态的目的。其次,对细化后的DEM进行洼地填充、流向分析、汇流累积量计算、河网提取和子汇水区的提取,其主要步骤如下:

(1)DEM的细化。对于高出城市地表的地物信息(如道路、郊区建筑物),将其叠加进DEM后,对其所占栅格处的高程值增加一定高度 h_1 。由于郊区的道路分为普通道路和带有排水沟渠的道路,建筑物也有普通建筑物和带有散水建筑物结构,对带有排水沟渠的道路将道路沟渠所占的栅格与DEM数据进行“相减”操作^[6];对带有散水建筑物结构的建筑物,将建筑物作缓冲区转为栅格后与DEM数据进行“相减”操作^[6];对于其他低于地表的地物信息,如城区排水管网、水系、坑塘和排水沟渠,由于排水管网、水系、坑塘和排水沟渠是矢量线状图层,未考虑其宽度,在进行对排水管网的融合过程中,需设一定的缓冲区宽度作为道路和管道宽度,在做好缓冲区后,降低其所在栅格高程的高度 h_2 ,而 h_1 和 h_2 通过现场调查获取。对于郊区不同等级的水系,通过设定不同的高度值,逐级将水系融

合进DEM。

(2)流向分析。通过ArcGIS的水文分析工具对修正后的DEM进行洼地填充,然后确定水文表面水的流向,即计算栅格数据中每个单元上最陡的下降方向。通常对中心栅格的8个邻域栅格进行编码,编码取2的幂值。从中心栅格的右上方栅格开始,按顺时针方向,编码值分别为2的0、1、2、3、4、5、6、7次幂值,即1、2、4、8、16、32、64、128,分别代表中心栅格单元的水流流向为东、东南、南、西南、西、西北、北、东北8个方向。每一个中心栅格的水流方向都由这8个值中的某一个值来确定。

(3)汇流累积量计算。流向分析通过计算栅格汇流累积水量实现,栅格汇流累积汇水量就是对于每个水文表面,确定其上游有多少个栅格的水流方向最终汇流经过该栅格,创建一个汇水网络显示每个栅格单元的累积汇水量。计算汇流累积量的基本思路是:假定栅格数据中的每个单元格处有一个单位的水量,依据水流方向图顺次计算每个单元格所能累积到的水量。

(4)河网提取。汇水区划分的准确性取决于河网提取是否准确^[9-11],河网提取是在汇流累积矩阵的基础上进行的。根据研究区实际的地物状况,设定不同的汇水阈值,从而确定具有一定汇水量的栅格相互连接形成汇水脊线,该过程需要通过多次实验和利用现有地形图数据辅助检验的方法,提取出符合实际的河网水系。

(5)汇水区计算。依据栅格流向数据为每个栅格单元分配唯一汇水区的过程。栅格累积汇水量数据提供了每个栅格的汇水量,依据该数据能够识别出高汇水量栅格,这些栅格形成了栅格汇水脊线,计算汇水区时,先根据汇水脊线确定主干汇水脊线交汇点(汇水点),以汇水点为起点,以流向该汇水脊线的所有栅格构成独立汇水区。

3.3 基于排水设施Voronoi图的微观尺度三级汇水区划分

上述方法的汇水区划分,充分考虑了地形地物因素对汇水区划分的影响,但城市在建设过程中自然地形已经发生改变,城市集水特征既受宏观地形影响,又受人工建设排水系统限制引导。城市雨水井及其类似设施可看作城市地表排水节点,排水节点在建设规划时,充分考虑排水节点排放服务能力,因此,排水节点服务范围体现了城市人工地形改造中形成的集水范围,利用排水节点服务范围

对上述方法划分的汇水区进行加密剖分,就形成了既反映城市地形,又体现城市排水设施服务能力的精细化汇水区分划,即三级汇水区分划。城市排水节点服务范围利用泰森多边形(Voronoi图)技术确定。

4 汇水区划分的实例分析

4.1 实验样区与实验数据

以上海市嘉定区西北部地区作为实验样区(图2)。嘉定区位于上海西北部,其中心位置在东经 $121^{\circ}15'$,北纬 $31^{\circ}23'$ 。东与宝山、普陀两区接壤;西与江苏省昆山市毗邻;南襟吴淞江,与闵行、长宁青浦三区相望;北依浏河,与江苏省太仓市为邻。河道总长1800多km,平均河网密度为 $4\text{ km}/\text{km}^2$ 。其东部的马陆地区地势平坦,既有城市化比较发达的区域,也有农田郊区,多种土地利用类型并存。本研究采用的实验数据主要有: $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的DEM数据(2013年)、嘉定区2013年SPOT数据(精度为1m)。其在影像配准、几何校正和影像拼接后,参照国家土地资源遥感调查分类体系,将图像识别分为建筑物、绿地、水系、道路及排水管网5个类型。

4.2 汇水区划分结果与分析

4.2.1 一级汇水区划分

通过提取的数字化水系图,根据城市地区河流之间的汇流关系,以河道及分水线为界限划分汇水区,从总体上将城市地区划分为若干排水流域,进行研究区的一级汇水区划分,反映雨水的总体流向。共划分出5个一级子流域,如图3所示。

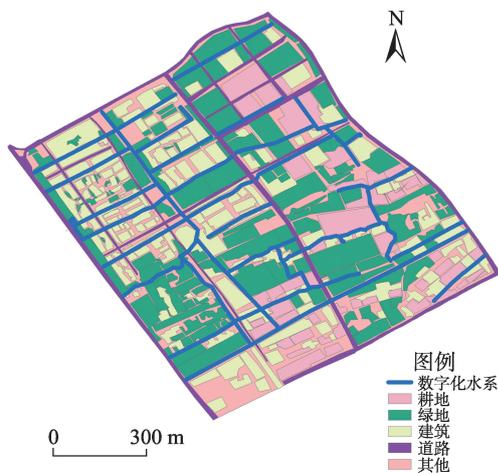


图2 研究区土地利用图

Fig. 2 Land use map in the research area

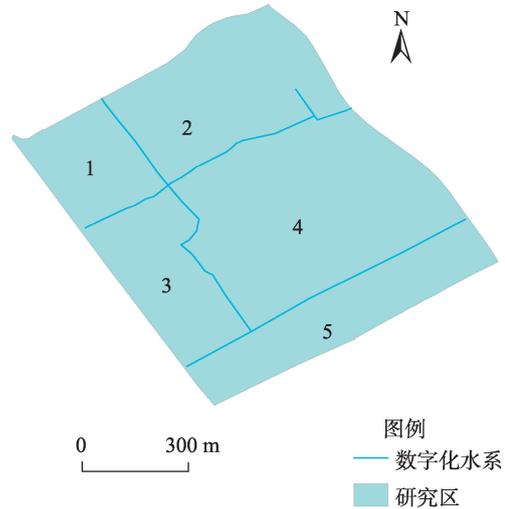


图3 研究区一级汇水区划分

Fig. 3 First-level catchment division in the research area

4.2.2 二级汇水区划分

二级汇水区系选取一级汇水区中兼具郊区和中心城区特色的汇水区2为例,进行二级汇水区的划分,在中心城区,将影响汇流途径的排水管网和道路信息融入DEM;在郊区,将影响汇流途径的道路、建筑物、水系和排水沟渠分别融入DEM。DEM经过细化后,通过ArcGIS的水文分析模块对细化的DEM经过洼地填充、水流方向计算、汇流累积量计算等一系列水文分析过程,提取出数字化水系(图4),并结合水系出水口位置利用水文分析模块Hydrology工具集中的basin工具进行二级汇水区划分。

4.2.3 三级汇水区划分

将一级汇水区中的第2汇水区块作为三级汇水区划分示例研究区。如图5所示,统计分析研究区分布的管网节点,同时,根据主干道路的交叉点对研究区内节点进行概化,共确定出研究区内22个雨水井,并以雨水井生成研究区内的泰森多边形(图5)。

4.2.4 汇水区调整确定

在对每个一级汇水区进行划分后,结合二、三级汇水区划分结果,将最终划分的汇水区与遥感影像图进行叠加,并通过GIS的修改工具(删除、修改、合并等)对三级汇水区进行调整,最终形成城市平原地区汇水区划分图,此处仍以一级汇水区2为例,对二、三级汇水区进行调整。结果表明,每个汇水区内至少有一个雨水井,作为每个汇水区的出口(图6)。

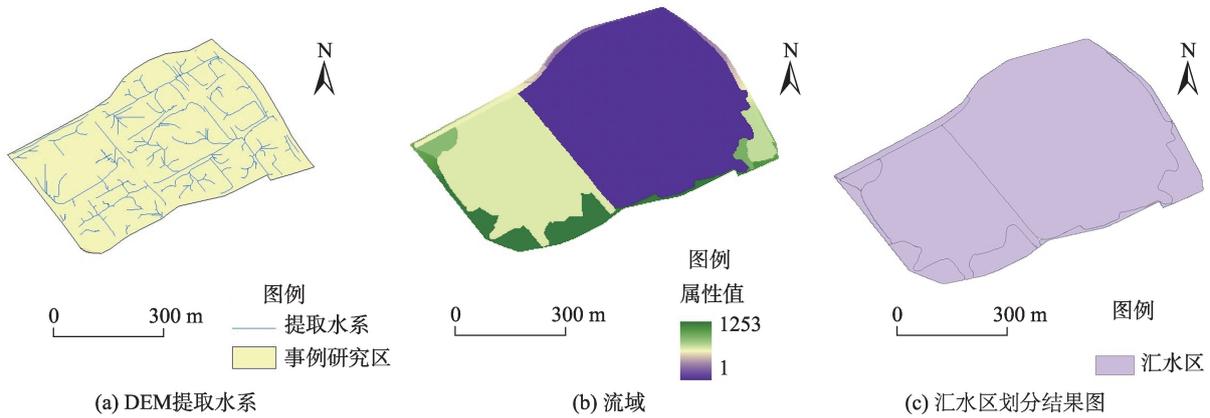


图4 研究区二级汇水区划分过程

Fig. 4 Second-level catchment division in the research area

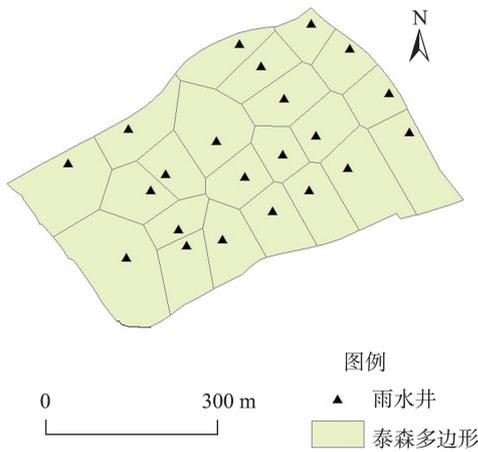


图5 雨水井及泰森多边形确定

Fig. 5 Catch basins and Thiessen polygons

4.3 方法比较

汇水区划分是否准确取决于数字化水系的准确性。数字化水系的正确提取是汇水区划分的前提条件。通过将一级汇水区2与未经细化的DEM

及在RIDEM基础上改进方法细化的DEM提取的水系对比发现,未经细化的DEM提取出来的水系(图7(a),阈值=200)与研究区实际提取的数字化水系有很大差异。左俊杰等^[7]在RIDEM基础上考虑建筑物对径流的阻碍作用,并将水系逐级融合进DEM,虽然提取出的水系(图7(b),阈值=200)跟现状水系吻合度高,也体现出建筑物对地表径流的阻碍作用,但其方法未考虑不同地区影响汇流因子的不同,在排水管网发达的地方未体现水流沿排水管网流动的实际状况,与城市实际地形和水流情况仍有细微差异,效果不佳。而本方法提取出来的水系(图7(c),阈值=200),根据中心城区和郊区影响汇流途径因子的不同细化DEM,能很好地反映地物的差异,其水系不仅与现状水系有较高的拟合度,体现建筑物对地表径流的阻碍作用,而且还反映城市实际的排水管网情况,效果更优于直接使用DEM和改进的RIDEM的提取效果。

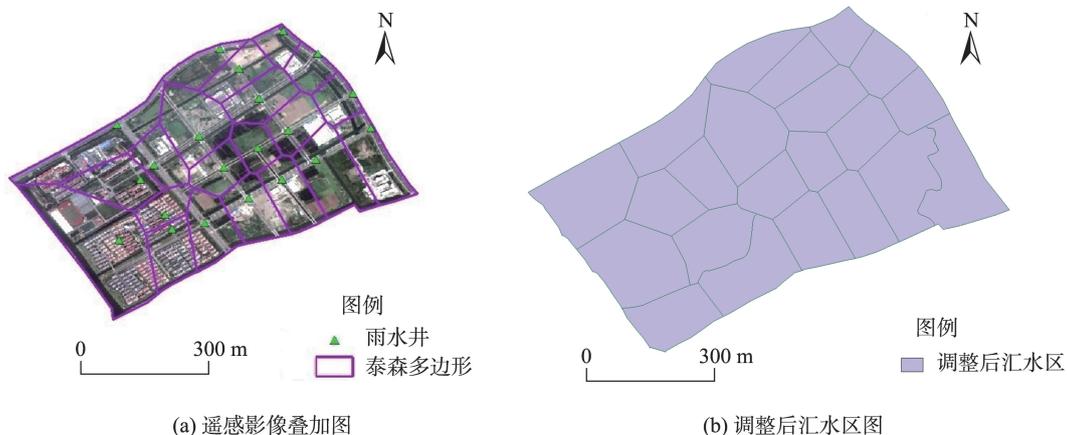


图6 汇水区调整结果

Fig. 6 Adjusted results of watershed delineation

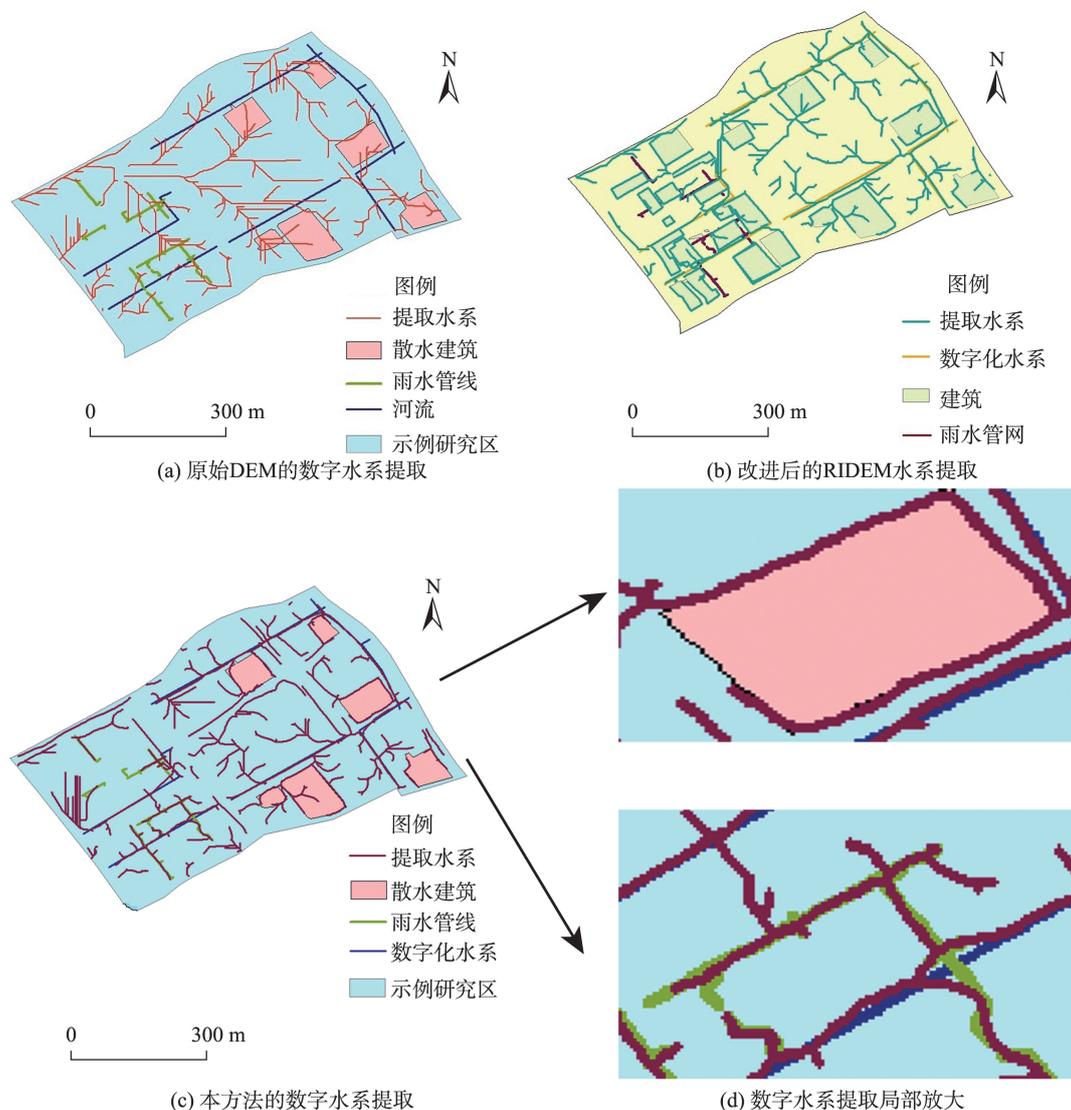


图7 方法比较

Fig. 7 Comparison of different methods

5 结论

平原城市地区土地利用类型复杂,人类活动、城市排水管网的分布改变了地表覆盖,会影响径流路径。通过分析城市平原地区实际汇流规律,提出了分级划分汇水区的技术方法。该方法依据具有汇流关系的河流进行一级划分,再通过将影响中心城市和郊区汇流途径的土地利用因子,例如道路、水系和排水管网等信息融合于DEM信息中,依据细化的DEM进行二级汇水区划分,最后,对城市排水管网比较发达的地方,利用Voronoi图进行三级汇水区划分。

实验表明,本文方法优于现有的汇水区划分方法,在建有完整排水管网的平原城市地区具有较高

的适用性,是城市平缓区域汇水区划分的一个切实有效的方法。

参考文献:

- [1] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. *Computer Vision Graphics. and Image Processing.* 1984,28:323-344.
- [2] 唐从国,刘从强.基于Arc Hydro Tools的流域特征自动提取:以贵州省内乌江流域为例[J].*地球与环境*,2006,34(3):30-37.
- [3] 汤国安,杨昕.ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社,2012:8-10.
- [4] Mariza C, Costa C, Stephen J, *et al.* Digital elevation model networks(DEMON): A model of flow over hill slopes for computation of contributing and dispersal areas

- [J]. *Water Resource Research*, 1994, 30(6):1681-1692.
- [5] Tarboton D. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33:309-319.
- [6] Callow J N, Van Niel K P, Boggs G S. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis[J]. *Hydrological Processes*, 1999, 5:59-79.
- [7] 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.
- [8] 程文辉,王船海,朱琰.太湖流域模型[M].南京:河海大学出版社,2006:134-135.
- [9] 刘俊,徐向阳.城市雨洪模型在天津市排水分析中的应用[J].*海河水利*,2001(1):9-11.
- [10] 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*, 2001,240:225-242.
- [11] Duke G D, Kienzle S W, Johnson D L, *et al.* Improving overland flow routing by incorporating ancillary road data into digital elevation models[J]. *Journal of Spatial Hydrology*, 2009,3(2):1-27.
- [12] 孔凡哲,芮孝芳.处理DEM中闭合洼地和平坦区域的一种新方法[J].*水科学进展*,2003,14(3):290-294.
- [13] 秦承志,朱阿兴,李宝林,等.基于栅格DEM的多流向算法述评[J].*地学前缘*,2006,13(3):91-98.
- [14] 谢华,黄介生.平原河网地区城市两级排涝标准匹配关系[J].*武汉大学学报(工学版)*,2007,40(5):39-42, 52.
- [15] 蒙海花,王腊春,苏维词.基于DEM的流域特征提取研究——以贵州省普定县后寨河流域为例[J].*测绘科学*, 2010,35(4):87-88.
- [16] 郑子彦,张万昌,邵庆国.基于DEM与数字化河道提取流域河网的不同方案比较研究[J].*资源科学*,2009,31(10):1730-1739.
- [17] 张维,杨昕,汤国安,等.基于DEM的平缓地区水系提取和流域分割的流向算法分析[J].*测绘科学*,2012,37(2):94-96.
- [18] 乔飞,张万顺,崔鹏,等.基于DEM和水箱理论识别流域河网方法研究[J].*测绘科学*,2006,31(4):95-97.
- [19] 康婷婷,王茜,赵苗琦,等.不同比例尺水系修正DEM的流域河网提取对比[J].*地理与地理信息科学*,2011,27(1):111-112.
- [20] 李丽,郝振纯.基于DEM的流域特征提取综述[J].*地球科学进展*,2003,18(2):251-256.
- [21] 刘学军,王永君,任政,等.基于不规则三角网的河网提取算法[J].*水利学报*,2008,9(1):27-34.

Research on Classification of Rainstorm Watershed Delineation Approach for Plain Urban Regions

XUE Fengchang, SHENG Jieru* and QIAN Hongliang

(Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The compartmentalization of urban rainwater catchment basin is an initial step in the application of spatially distributed hydrological models. Traditional watershed delineation approach has a better application in the plain region where less human activities are involved. However, in the flat areas of city it cannot get a correct watershed boundary and accurate watershed delineations. The realistic river network and watershed boundary may not always be derived from conventional DEM processing methods. In this paper, in order to reflect the city morphologies and represent the real situation of drainage network, a new method is proposed based on city classification and anthropogenic land cover features that influence the drainage patterns. According to the city drainage system and urban land classification, this method divides the city into the inner-city and suburban neighborhoods. According to the ability of river catchment, we take the rainwater catchment basins into lower divisions, and then find the anthropogenic land cover features that influence the convergence of the inner-city and suburban neighborhoods. To downscale the DEM and extract drainage structures and watershed boundaries with improved accuracy, we take the anthropogenic land cover features (i. e. roads and streams, buildings, some pond and drainage networks) into the DEMs, divide the catchment basin based on D8 algorithm and modify the catchment areas using Thiessen polygon. The results show that the method is effective and matches well with the real situation of city, which not only take the advantage of anthropogenic land cover features. but also combine with the spatial distribution of urban drainage facilities. The method is applied to a watershed in the Shanghai Jiading drainage basin based on high accuracy DEM and topographic river map, and we compare the proposed method with traditional methods. The results show that the proposed method has a good applicability for the plain urban areas and is able to produce more realistic results. Above all, we conclude that this method is effective and easy to implement.

Key words: watershed; classification; flat region; DEM; Voronoi

*Corresponding author: SHENG Jieru, E-mail: shensuijiyi@163.com