

DOI: CNKI: 32-1309/ P. 20110514. 1445. 007

平原河网地区汇水区的划分方法

——以上海市为例

左俊杰, 蔡永立

(华东师范大学资源与环境科学学院, 上海 200062)

摘要: 借助 DEM 提取汇水区是分布式水文模型计算和面源污染计算的前提条件。在平坦地区直接使用 DEM 提取出的水系、汇水区边界与现实情况差异很大。针对现有汇水区提取方法存在的问题, 在 RIDEM 模型的基础上提出了一种平原河网地区汇水区划分的方法, 该方法通过将道路、建筑物、水系、沟渠、坑塘等影响径流途径的地物要素融合进 DEM, 达到细化 DEM 的目的, 从而使由细化的 DEM 生成的河网与实际河网能够精确拟合, 优于原始 DEM 和 RIDEM 的提取效果, 提高了水系提取和汇水区划分的精度, 建筑物对径流的阻碍作用也能够得到体现。实证研究表明, 该方法是一种方便、快捷、高效的处理方法。

关键词: 汇水区; 河网; 平原; 数字高程模型; 汇流

中图分类号: P343.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)03-0337-07

汇水区划分(watershed delineation)是分布式水文模型计算和面源污染计算的基础和前提^[1-2], 常常借助数字高程模型(DEM)基于“八向法”(D8 算法)提取水文要素信息, 完成汇水区边界的划分。然而, 在平原河网地区, 地势过于平坦, 直接使用 D8 算法从 DEM 提取出的径流方向与水文要素常常出现错误(如出现平行状汇水线), 导致提取出的汇水区边界与实际情况有很大的差异^[3-4]。国内外不少学者对此问题进行了研究与改进, 先后出现了多流向算法、Burn in 算法, DRLN 算法等^[5-7], 这些算法和模型对人类活动影响较低的平原地区有较好的适用性, 提高了平坦区域水系提取与汇水区划分的精度。然而, 在快速城市化的平原区域, 利用这些改进的算法和模型并不能得到满意的汇水区边界, 究其原因, 除了平坦的地形外, 人类活动(道路建设、高密度建筑物、排水沟渠等)也会影响汇水路径与汇水区边界^[8-9]。

为了解决道路、河流、沟渠等地物要素对汇流方向和路径的影响, Duke 等^[8]提出了 RIDEM 模型(Rural Infrastructure Digital Elevation Model), 模型考虑了人类活动对汇水区边界的影响, 将道路、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。但是, 在快速城市化的平原河网地区, 除了道路、水系、田间沟渠外, 密集建筑物也是影响地表径流方向与路径的主要因素, 加之该地区水系等级较多, 不同等级的水系使用 Burn in 算法一次性叠加进 DEM 并不能很好的反映河网汇流方向。因此, 有必要结合平原河网地区汇流特点, 探索一种新的汇水区划分方法与流程。

1 划分方法

划分的主要思路是在确定研究范围基础上, 通过航片解译建立土地利用/覆盖类型、DEM 和排水管网等三大类数据库, 依次将影响地表径流途径和方向的地物要素(道路、建筑物、水系、沟渠、坑塘等)叠加到 DEM 信息中, 起到提高、细化 DEM 精度的目的, 使 DEM 能够反映出真实的地表信息。对细化后的 DEM 进行洼地填充

收稿日期: 2010-06-15; 网络出版时间: 2011-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110514.1445.007.html>

基金项目: 上海市科学技术委员会重大项目(09DZ1200901); 上海市科学技术委员会基础研究重点项目(08JC1408800)

作者简介: 左俊杰(1981-), 男, 江苏镇江人, 博士研究生, 主要从事河岸植被缓冲带宽度规划研究。

E-mail: zuojunjie1981@163.com

后使用传统的 D8 算法完成汇流方向和数字水系的提取,再确定各个水系出口所对应的汇水区和次汇水区边界。在此基础上,对暗管(涵管)或排水管网对应的次汇水区进行修正操作^[8,10],得到最终的汇水区边界。

1.1 研究范围确定

平原河网地区河道纵横相连,水系多为“干流”型和“井”型网状结构^[11],骨干河道围合的网状地块成为该地区相对独立的汇水单元^[12],本研究以网状地块作为研究范围确定的依据。

1.2 数据库建立

数据库包括土地利用/覆盖类型、DEM 和排水管网等三大类信息,具体为 DEM、道路类型、水系、坑塘、排水沟渠、沟渠出水口点、建筑物、水系出水口、暗管、涵管位置等空间数据图层。所有空间数据经过投影变换与范围裁减处理,矢量数据均进行格式转换,以栅格形式存储。

1.3 影响汇流途径的土地利用/覆盖

在程文辉等^[13]确定的太湖流域土地利用/覆盖分类体系基础上,确定影响汇流途径的土地利用/覆盖类型主要包含道路、建筑物、水系、坑塘和排水沟渠等地物。

(1) 道路(含田埂) 道路往往高出周边地表,对自然径流起到一定的汇流和导流作用,道路旁的洼地或沟渠会将径流汇入临近河流,改变了自然汇水区的面积和边界形状。农村区域的田埂常常将农田隔离成独立的汇水单元,每一单元的径流只能通过田间沟渠流入周边河流^[14]。

(2) 建筑物 平原河网地区人口密度较大,建筑物呈现密集分布的格局。单个的建筑物对径流的影响不大,仅相当于 DEM 过程中一个较高的制高点^[10];而连续分布的建筑物常常阻隔自然径流的途径,自然径流常常沿建筑物或排水沟渠汇入河流。

(3) 水系、坑塘 水系或坑塘所在的位置与地形上的流域边界并不吻合,从而影响地表径流的方向,对地表径流途径产生收集作用。

(4) 排水沟渠 由于农业生产和城市排水的需要,常常修筑沟渠和排水设施,这些设施会对自然状态下的径流方向与入河方式起到干扰作用^[8],对自然径流途径具有“分割”作用,自然汇流途径减弱或消失,改变了自然状态下的汇流情况与汇水区形状。

1.4 DEM 细化

原始的低精度的 DEM 数据中不包含道路、建筑物、水系、坑塘和排水沟渠等地物高程信息(如一般道路的宽度一般为 10 m,栅格尺寸大于 10 m 的 DEM 即难以反映出道路的高程值),这就造成平原区 DEM 的高程值相差很小,甚至完全一样的情况。原有的 DEM 难以真实地反映地表特征,出现错误的汇流流向与河网提取中的“伪河道”^[3],导致汇水区边界提取的错误。如果能够将影响径流方向的地物高程信息“强迫”叠加进 DEM,达到细化 DEM 精度的目的,这对正确提取水文要素与划分汇水区具有重要作用。

(1) 叠加处理的基本思想 修正影响汇流途径的地物要素所占高程栅格处的高程值,高出地表的地物类型(道路、建筑物等)所占栅格处的高程值增加一个值 h_1 ,而低于地表的地物类型(坑塘、水系等)所占栅格处的高程值减去一个值 h_2 , h_1 和 h_2 依据现场调查获取。通过这种处理,可以修正并细化原有 DEM,反映出真实的地表形态,使得 DEM 产生的汇流方向与真实情况一致,提高数字河网水系提取的准确性。

(2) 主要步骤 ① 根据道路类型将道路分为普通道路与带有排水渠的道路,对普通道路只进行 DEM 高程数据和道路图层数据进行叠加,即将道路所在的高程栅格增加一定高度;对带有排水渠的道路,在完成道路高程增加的同时,将道路排水渠所占的栅格与 DEM 数据进行“相减”操作。② 建筑物周边存在散水建筑物结构,有效的引导地表径流沿建筑物散水处流动,为了模拟这一汇流过程,对建筑物(矢量形式)进行缓冲区操作(模拟散水建筑物结构),将缓冲区转为栅格图层后与 DEM 栅格数据进行“相减”操作。③ 将水系、沟渠、坑塘等融合进 DEM 融合。由于平原河网地区水系等级较多,如果将不同等级的水系一次性通过 burn in 的方式叠加进 DEM,则难以反映水系的等级结构和水系汇流方向,因此,本研究按照水系等级,逐级将水系通过“减法”操作叠加进 DEM,最终完成 DEM 的细化与修正。

1.5 汇水区划分

使用 ArcGIS 中水文分析工具箱对细化的 DEM 进行洼地填充操作, 利用 D8 算法进行汇流方向分析, 计算每一栅格处流过的水量以得到该栅格的汇流累积值, 提取数字水系, 与现实水系进行比对的方式进行检验^[4], 在此基础上, 结合水系出水口所在的位置依次分析各个出水口对应的汇水区域与次汇水区边界^[10], 根据暗管(涵管)或排水管网、排水沟渠对应的次汇水区进行关联操作, 修正汇水区边界, 完成汇水区划分。

2 实证区域概况

以上海市浦东水利片临港新城区域内的一个河网地块开展汇水区划分方法的实证研究, 河网地块被石家港、白龙港、中港河和五尺港等 4 条骨干河道围合, 地块地理坐标为 $30^{\circ}54'6''N \sim 30^{\circ}55'29''N$ 和 $121^{\circ}51'31''E \sim 121^{\circ}51'58''E$, 面积共计 341.5 hm^2 (图 1), 地势平坦, 地表高程介于 $3.8 \sim 4.8 \text{ m}$ 之间, 平均坡度为 $3\% \sim 5\%$ 。实证区域处于快速城市化区域, 人为活动强度较大, 多种土地利用并存, 地块内共有 12 种土地利用/覆盖类型, 主要的 3 种土地利用类型分别为水田、河流水系、建筑物, 所占的比例分别为 66.21% , 16.36% , 7.36% 。

本研究采用的数据主要包括航空影像图(2008 年)、DEM 数据(2007 年)、土地利用/覆盖类型图(2008 年)、河流等级分布图(2008 年), 以上数据由上海市临港新城建设公司提供, 所有空间数据均通过 ArcGIS9.3 进行投影变换、格式转换等数据预处理, 数据统一采用上海当地坐标系统。实证研究在对 DEM 细化处理后进行填洼处理, 并在此基础上提取水系, 然后将提取结果与实际水系作对比, 以检验提取的精度, 在满足精度的前提下, 进行汇水区划分。

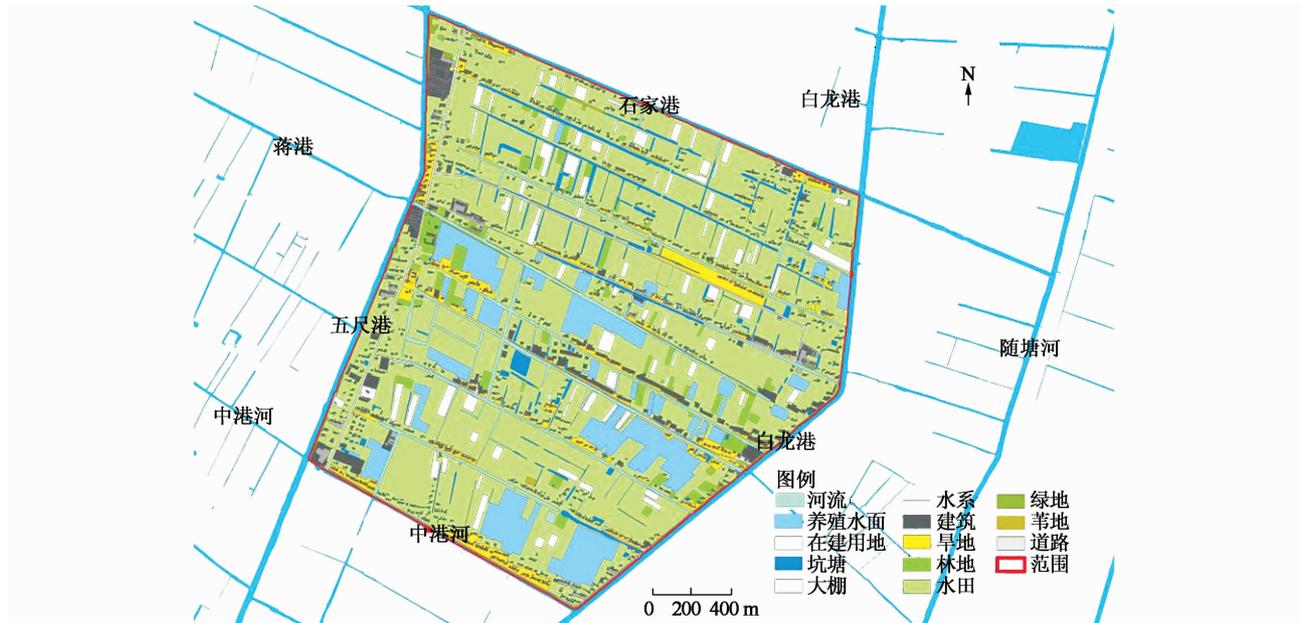


图 1 验证区域内土地利用/覆盖类型

Fig. 1 Land use and land cover types in the research area

3 结果与讨论

3.1 数字水系提取

基于 ArcGIS 软件的可视化操作平台, 从径流累积矩阵中提取出主要河道的大致形状。通过在 DEM 中依次加入道路、建筑物、水系、沟渠、坑塘等地物信息后(图 2), 从经过细化的 DEM 提取出的主要水系也与现状水系的吻合程度也逐渐增加, 这主要是由于随着 DEM 中地物信息量的增加, DEM 也更贴近真实地表形

态，道路、建筑物、河流水系对地表径流的影响作用能够得到体现。

分别设定汇流阈值为 100、200、500 和 1000 的情景下，提取出数字水系，通过与现状水系叠加发现，随着阈值的增大，虽然数字水系中末端支流逐渐缺失，但是主要的河道形态保存完好，与现状水系的叠合程度较高，能正确的反映出现状水系结构与形态(图 3)。

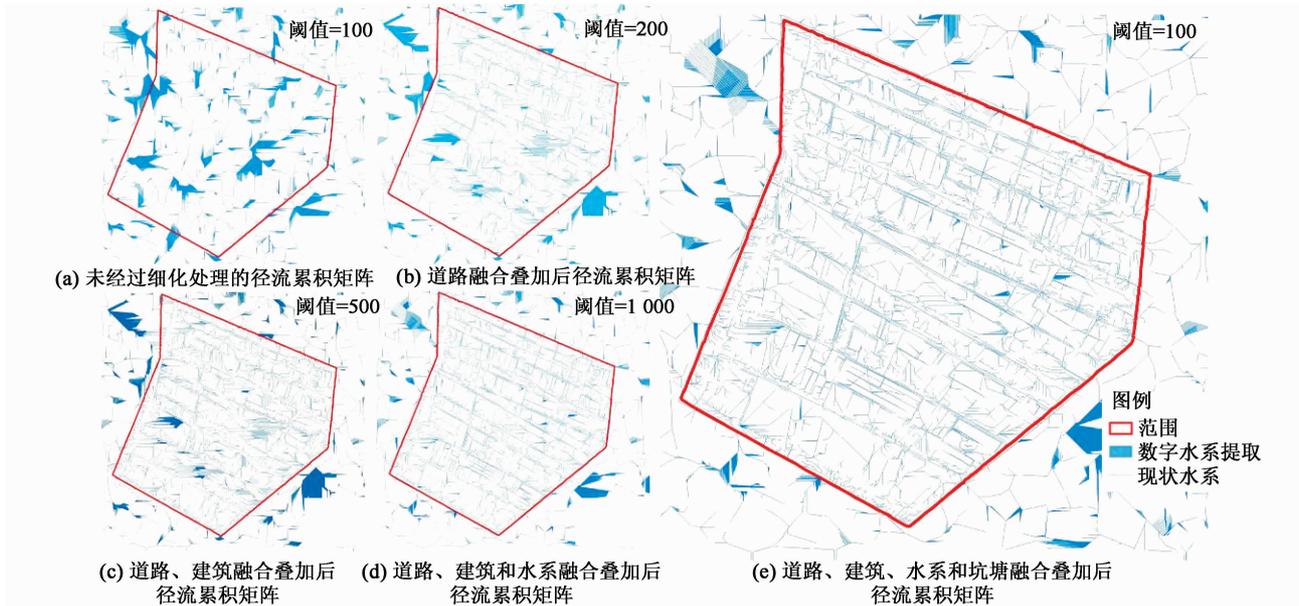


图 2 不同 DEM 叠加融合阶段径流累积矩阵分析

Fig. 2 Analysis of runoff accumulation during the different refined processes

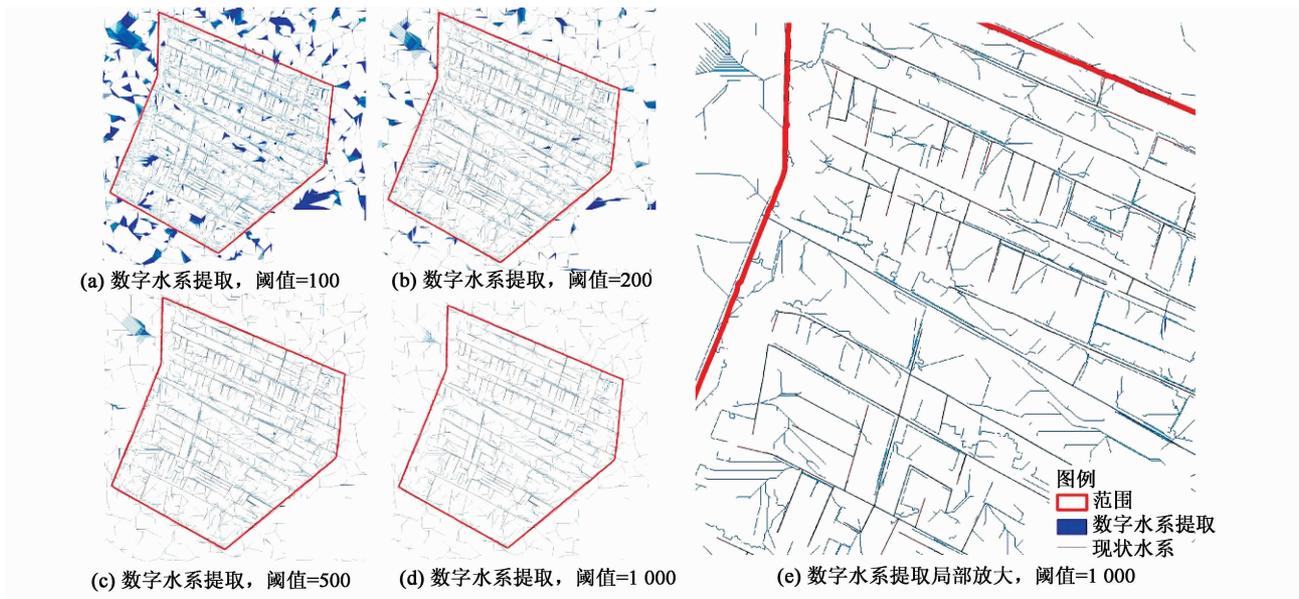


图 3 不同阈值情景下数字水系提取结果

Fig. 3 Extraction from digital river network under the different thresholds

3.2 与其它方法的比较

汇水区划分是否准确取决于数字水系是否准确^[3,7-8]，从这个角度来说，数字水系的提取是汇水区划分的前提条件。通过与原始的未经修正的 DEM 和 RIDEM 提取的数字水系进行对比发现，利用原始的 DEM 不

能正确地提取水文信息, 提取出的水系形态、位置与现状水系几乎不重合。RIDEM 能够提取出主要水系, 但是对支流的提取效果不佳, 这主要是由于平原河网地区水系等级较多, RIDEM 直接将不同等级水系通过 burn in 方法一次性融合进 DEM 后, 水系的等级结构难以得到反映, 导致提取出的水系与现状水系存在较大偏差。本研究在对水系进行分级的基础上(河流等级越高, 河流规模越大), 将水系逐级融合进 DEM, 使得各等级水系之间形成高程差, 得到水系从低级河道流向高一级河道的逻辑流向。同时, 上海地区人口密集, 建筑密度较高, 高密度建筑对径流方向的改变也是必须考虑的一个因素。而 RIDEM 算法中并没有考虑建筑物对地表径流方向和路径的改变, 本研究采用在建筑物周边设立缓冲区的方法来模拟建筑物散水结构对地表径流方向的改变, 体现建筑物对地表径流的阻碍作用。从水系提取结果可以看出, 使用本方法的提取结果避免了水系穿越建筑物的现象, 水系能够沿建筑物周边流动(图 4(d)), 优于直接使用 DEM 和 RIDEM 的提取效果(图 4(a)~图 4(c))。

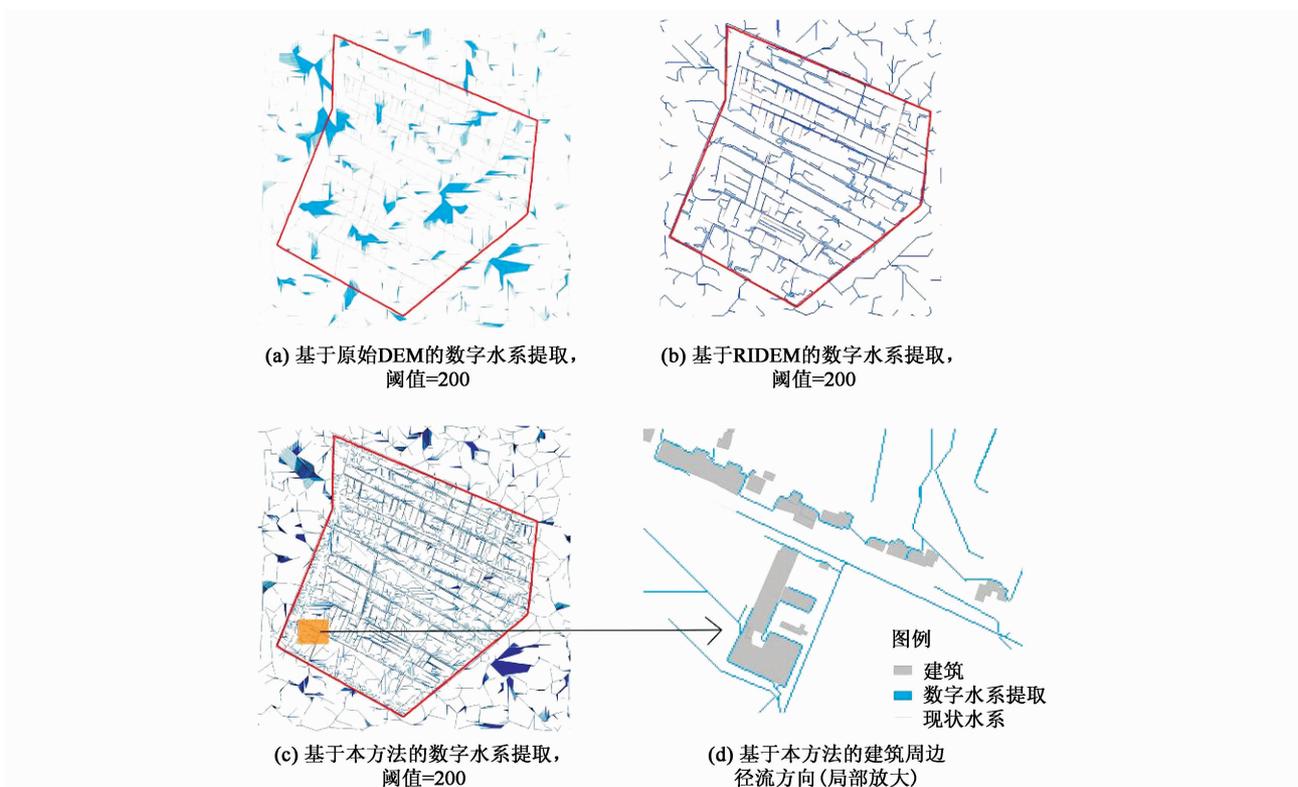


图 4 基于原始 DEM、RIDEM 与本方法的水系提取结果对比

Fig. 4 Comparison of river network based on the original DEM and RIDEM

3.3 汇水区划分

利用细化的 DEM 提取水系后, 根据水系出口划分自然状态下的汇水区(图 5(a)), 由于在实证区域内存在灌溉沟渠, 这些灌溉沟渠必然会对汇水区边界产生影响, 需要对划分的汇水区边界进行修正, 对排水管网对应的次汇水区边界进行关联操作(图 5(b)), 修正自然状态下的汇水区边界, 得到最终的汇水区划分结果(图 5(c))。从划分结果来看, 实证区域内共可以划分为 35 个汇水区, 大部分汇水区面积分布在 $1.23 \sim 6.64 \text{ hm}^2$ 之间。面积最大的汇水区为 32 号(77.28 hm^2), 占到总面积的 22.63%, 其次为 20 号汇水区(49.01 hm^2), 约占总面积的 14.35%。最小的汇水区为 16 号(0.24 hm^2), 占总面积的 0.07%。

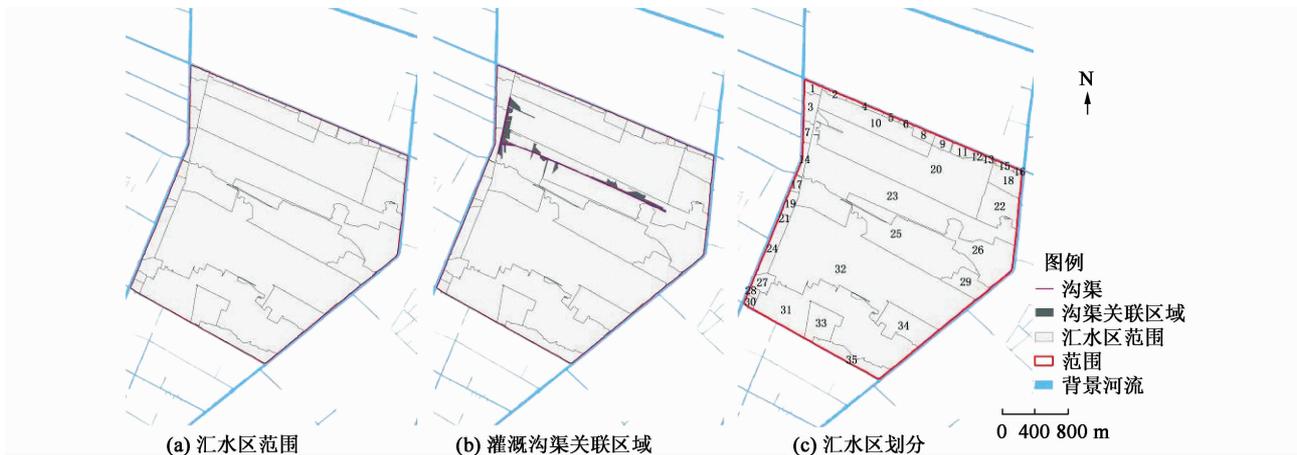


图 5 汇水区划分结果

Fig. 5 Results of watersheds delineation

4 结 论

平原河网地区地形平坦, 人类活动对地表覆盖的改变会影响径流路径与汇水区边界, 为了解决这一问题, 本文分析了影响平原河网地区汇流途径的土地利用/覆盖类型, 依次将道路、建筑物、水系、沟渠、坑塘等信息融合到 DEM 信息中, 达到细化 DEM 的目的, 为水系提取与汇水区边界的提取奠定了基础。从实证研究的结果来看, 在将道路、建筑物、水系、沟渠、坑塘强迫叠加进 DEM 后, 提取出的水系与现状水系的拟合程度和不做叠加时候的结果相比较, 均有了不同程度的提高, 建筑物对径流的阻碍作用也能够得到体现, 这也从另外一个角度证明该方法有助于提高汇水区边界划分的精度。

虽然该方法考虑了农田排水管网以及不同道路形态对汇流路径与方向的影响, 但是对于建有完整排水管网的城市区域而言, 汇水区的划分不仅依赖于高程数据, 还与排水管网、出水口、雨水收集口的位置有关, 研究这些因素对汇水区边界的影响, 这将是后续研究的重点。

参考文献:

- [1] AUGUSTO C V G, MARIE P B, OTTO C R F, et al. Improving hydrological information acquisition from DEM processing in flood-plains[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23: 502-514.
- [2] 李辉, 陈晓玲, 张利华, 等. 基于三方向搜索的 DEM 中洼地处理方法[J]. *水科学进展*, 2009, 20(4): 473-479. (LI Hui, CHEN Xiao-ling, ZHANG Li-hua, et al. New method for treating flat areas and closed depressions in the digital elevation models [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20 (4): 473-479. (in Chinese))
- [3] 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. (KONG Fan-zhe, RUI Xiao-fang. New method for treating flat areas and closed depressions in the digital elevation models[J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14 (3): 290-294. (in Chinese))
- [4] JOHN N C, KIMBERLY P V N, GUY S B. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 332:30-39.
- [5] QUINN P, BEVEN K, CHEVALLIER P, et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models [J]. *Hydrological Processes*, 1999, 5: 59-79.
- [6] Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis [EB/OL]. [2010-07-10] <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap802/p802.htm>.
- [7] 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.

- [8] 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.
- [9] MAKSIMOVIC C, PRODANOVIC D, BOONYA-AROONNET S, et al. Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, 47(4): 512-523.
- [10] ZHAO D Q, CHEN J N, WANG H Z, et al. GIS-based urban rainfall-runoff modeling using an automatic catchment-discretization approach: A case study in Macau [J]. *Environ Earth Sci*, 2009, 59: 465-472.
- [11] 袁雯, 杨凯, 吴建平. 城市化进程中平原河网地区河流结构特征及其分类方法探讨[J]. *地理科学*, 2007, 27(3): 401-407. (YUAN Wen, YANG Kai, WU Jian-ping. River structure characteristics and classification system in river network plain during the course of urbanization [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(3): 401-407. (in Chinese))
- [12] 王船海, 王娟, 程文辉, 等. 平原区产汇流模拟[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(6): 627-632. (WANG Chuan-hai, WANG Juan, CHENG Wen-hui, et al. Numerical simulation of runoff-yield and confluence in plain area[J]. *Journal of Hohai University: Natural Science*, 2007, 35(6): 627-632. (in Chinese))
- [13] 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. (CHENG Wen-hui, WANG Chuan-hai, ZHU Yan. *Taihu Basin model* [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2006: 134-135. (in Chinese))
- [14] CERDAN O, SOUCHERE V, LECOMTE V, et al. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management [J]. *Catena*, 2001, 46: 189-205.

An automated watershed delineations approach for plain river network regions: A case study in Shanghai*

ZUO Jun-jie, CAI Yong-li

(*School of Resource and Environment, East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

Abstract: The extraction of hydrological information from Digital Elevation Models (DEM) is an initial step in the application of spatially distributed hydrological models. Although, many automated methods have been proposed to extract the drainage structure from DEMs, the realistic river network and watershed boundary may not always be derived from conventional DEM processing methods. As a result, enhanced (or corrective) approaches have been proposed to improve the performance of existing single flow direction (D8) algorithms. However, those corrective measures may not always work over flat regions where the great uncertainty exists in DEM. Ambiguities in flow direction and parallel flow paths may arise if the surrounding cells have the same elevation as the central cell. In this paper, to downscale the DEM and extract drainage structures and watershed boundaries with improved accuracy a new method is proposed based on the Rural Infrastructure Digital Elevation Model is able to incorporate ancillary data and take into consideration of anthropogenic land cover features (i. e. roads and streams, buildings, some ponds and pipe systems) that influence drainage patterns. The method is applied to a watershed in the Shanghai drainage basin. The watershed can be characterized as a flat area undergoing a rapid urbanization process. The delineated maps and extracted stream networks are compared to those of using traditional methods. The result shows that the proposed method is able to produce more realistic results. The method is effective and easy to implement.

Key words: watershed; river network; flat region; DEM; flow concentration

* The study is financially supported by the Basic Research Program of Shanghai Science and Technology Commission (No. 08JC1408800).