

基于水系改进高分辨率 DEM 的 流域水系结构特征分析

倪九派, 高明, 魏朝富, 谢德体

西南大学 资源环境学院, 重庆 400715

摘要: 以重庆市万州区五桥河流域为例, 在构建基于水系改进的高分辨率 DEM 的基础上, 运用 ARCGIS 的水文分析模块(Arc Hydro Tools) 进行流域边界的确定、河网的提取、子流域的剖分以及水系结构特征分析。研究结果表明: 五桥河流域的各种水系结构参数的值均在一般水系的范围内, 河网水系总体上 Horton 表现较为明显, 河网水系在数量上的发育程度高于其长度上的发育, 流域内不同区域河网水系的结构与功能密切相关。运用基于水系改进的高分辨率 DEM 和 ARCGIS 的水文分析模块(Arc Hydro Tools) 提取的水系与实际水系特征完全吻合且连续完整, 是一种进行流域水文分析的优良方法。

关键词: 高分辨率 DEM; 水系结构特征; ARCGIS; 流域

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

流域水系是无价的自然遗产, 是流域生态恢复与调控的重要影响因子, 发达国家在基本完成水环境质量控制后, 已开始逐步恢复河流的自然状态的实践^[1-8]。水系结构是分析流域生态系统形态和功能的重要基础, 随着地理信息系统(GIS)技术的广泛应用, 流域数字高程模型(DEM)已成为水系结构特征分析的重要数据, 但由于受到 DEM 本身精度、数据结构、内插算法以及相关误差处理方法等因素的影响, 生成的水系在空间位置的精确性和合理性方面并不是总能够满足流域地形分析的需要^[9-13]。对于高程落差变化较大的地区, 主要问题是生成的水系破碎和不连续, 而对于平坦地区, 则存在生成的水系比较平直不自然, 与自然水系的偏差较大等问题。针对上述问题, 本文以重庆市万州区五桥河流域为例, 运用基于水系改进的高分辨率 DEM, 进行流域河网的提取、子流域的剖分以及水系结构特征分析, 以期三峡库区生态敏感型流域的生态恢复与调控提供依据。

1 研究区概况

五桥河流域位于重庆市万州区境内, 地处三峡工程影响最为集中的区域—三峡库区中部, 流域面积 114 57 km², 三峡工程生态与环境监测系统生态环境实验站子系统系统中的 4 个监测实验站之中的万县生态环境实验站位于该流域内。流域地貌类型以丘陵、低山为主, 气候为中亚热带湿润季风气候, 旱灾特别是伏旱频繁发生。土壤为紫色砂页岩为主体的成土母质所发育的紫色土和黄壤, 河谷平坝区为冲积土。三峡库区中部的种植制度, 水田以水稻—小麦(或水稻—油菜)为主, 旱坡地以小麦—玉米—红苕为主的种植制度

* 收稿日期: 2009 10 29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40701093); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAC01A16)。

作者简介: 倪九派(1976), 男, 湖北孝感人, 副教授, 博士, 主要从事水土保持、地理信息系统及土地资源管理与利用等方面的研究。

在五桥河流域内有较好的体现。五桥河流域耕地园地占土地总面积的比例高达 48.88%，其中陡坡耕地占旱地的比重达 40% 以上，林地面积仅占土地总面积的 12.49%，强度、极强度水土流失面积占水土流失面积的比重高达 24.57%，因水土流失而造成裸岩、石砾地不断增加，裸岩和石砾地面积的比重达到 8.54%，反映了三峡库区中部因人类活动强度大、自然生态环境严重退化的典型特征。五桥河流域下游有 3 个村属淹没区或消落区，也有移民安置和城镇化而引起土地利用快速变化区，由于人口密度大、人类活动影响强烈，生态环境退化，水土流失、非点源污染问题突出^[14]，五桥河流域充分表现了三峡库区中部移民安置与城镇化所表现的自然环境、社会经济特征和剧烈变化过程，因此，对五桥河流域进行研究，能较好地反映三峡工程对库区中部的社会-经济-自然复合生态系统的影响。

2 研究方法

2.1 基于水系改进的高分辨率 DEM 的生成

本研究以五桥河流域数字化地形图(1:10 000)为数据源，包括等高线(等高距为 5 m)、高程点和河流 3 个图层，所有的图件及相关点的坐标均采用高斯-克吕格投影坐标体系。利用 ARCVIEW 3.2 的显示和编辑功能，对照原地形图对数字化地形图进行查错和校正，确保数据源的准确。生成 DEM 的插值计算以等高线为主，在 ARCGIS 环境下，以 2.5 m 的分辨率生成研究区域的 DEM。在生成的 DEM 的基础上，加入已知的水系数据(河流图层)进行校正，通过设置水系强制条件，使生成的 DEM 在不损失其精度的基础上，保留了河流结构的连续性，使其能较好地反映了地表的水文特征，从而可以更好地进行后期的流域水文分析，基于水系改进的研究区域高分辨率 DEM 如图 1。

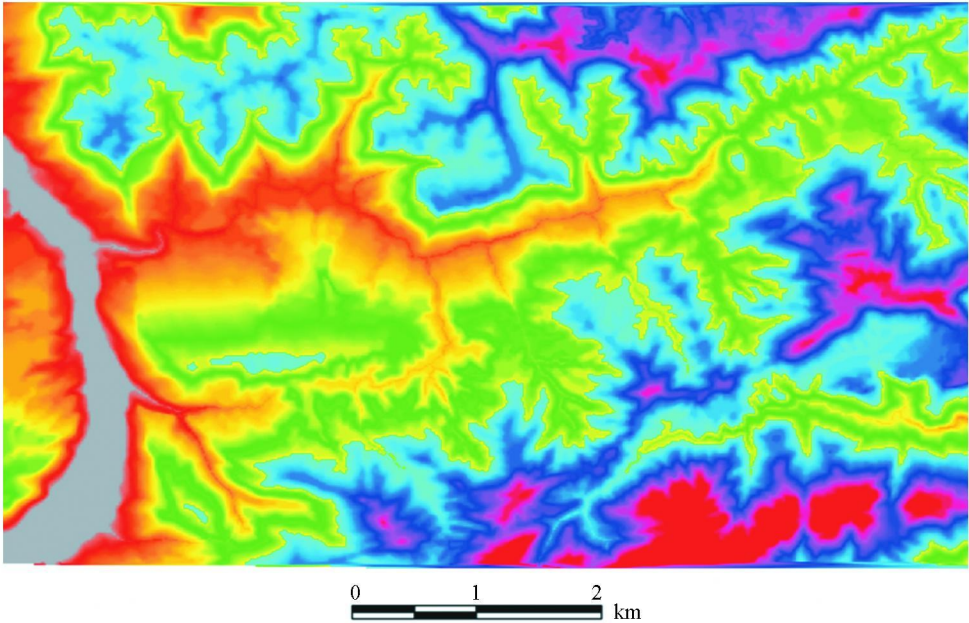


图 1 研究区域 DEM 示意图

2.2 流域河网的提取与子流域的剖分

ARCGIS 的水文分析模块(Arc Hydro Tools) 是美国环境系统研究所公司(ESRI) 为 ARCGIS 推出的一个水文分析模块，主要用于地形和河流网系的提取和分析，实现地形模型可视化，其强大的流域特征分析功能可以满足各种流域 DEM 处理的需要。流域河网自动提取和子流域的剖分利用 ARCGIS 软件的水文分析模块(Arc Hydro Tools) 进行。

1) 洼地填补：利用 Arc Hydro Tools 的 Fill 指令，处理 DEM 的洼地(sink) 以及突起(peak)，在进行这个指令之前可以先使用 Sink，找出 sink 和 peak 的所在地，利用 Fill 后的影像与原始影像相减，可得到洼地

填补的位置以及填补量。

2) 生成水流方向栅格. 应用 Arc Hydro Tools 下的流向确定(Flow Direction)命令, 生成8方向水流流向, 对 DEM 进行流向分析. ARCGIS 的流向分析是比较网点与周边8个网点间的高程大小与落差, 将高程下降最大的方向视为该网点的流向, 因此产生的流向网格图层为8方位分析的结果。

3) 生成流向累积栅格. 根据 DEM 水流方向栅格图层, 应用 Arc Hydro Tools 下的流向累积(Flow Accumulation)命令进行流向累积栅格的计算. 此功能的原理是假想在集水区的每一网格上降下一单位的水量, 而后按网格的流向来向下移动, 其移动经过的网格则使其累积流量值提升一个单位, 每一网格皆可计算出其所累积的上游流量值, 由于投入每一网格的水量皆为一单位, 故流量累积值亦代表各网格的上游集流网格数量, 将之乘上网格面积便可得到每一网点的上游集水面积。

4) 流向累积栅格阈值的确定. 应用 Arc Hydro Tools 下的定义河系(Stream Definition)命令对流向累积栅格设置集流阈值. 集流阈值(threshold of flow accumulation)为河系网络提取的关键因子, 利用所订定的累积流量值(或称为集水面积)作为河道认定的门槛标准. 初始进行分析时, 可选择自小至大的几个集流阈值, 以便观察最适宜的河系提取集流阈值大致的坐落范围, 本研究最终确定 3 584 为集流域值。

5) 水系提取. 以设定的集流阈值为标准, 应用 Arc Hydro Tools 下的流径处理(Drainage lane Processing)命令自流量累积值网格图层中提取河系网格图层, 凡是累积流量大于等于集流阈值的网格即被定义为河道。

6) 子流域的提取. 应用 Arc Hydro Tools 下的集水区栅格描绘(Catchments Grid Delineation)、集水区矢量化(Catchments Polygon Processing)命令进行子流域剖分. ARCGIS 是根据水流网络上每条流径的分叉和水流方向决定子流域边界, 每一条子流域上只有一条流径, 同时该子流域内的所有栅格都应指向流径。

2.3 流域水系分级方案

河网结构是分析河流形态和功能的重要理论基础, 流域水系分级方案采用 Horton 和 Strahler 提出的水系结构组成定律和河流等级的划分方法. 这种方法, 将最上游的河道定名为“1次河道”, 1次河道与1次河道合流的河道定名为“2次河道”, 2次河道与1次河道再合流, 仍为2次河道, 2次河道与2次河道合流后的河道成为“3次河道”, 也就是说次数相等的2支“i次河道”合流时, 成为“i+1次河道”, i次河道与小于i次的河道合流时, 仍为“i次河道”。

2.4 水系结构参数与计算

1) 分枝比(R_b)、长度比(R_l)、坡降比(R_u)和面积比(R_a)

Horton 认为河道的数目(N)、长度(L)、比降(U)和面积(A)等水系结构参数随河道级别呈几何级数变化, 即:

$$N_n = R_b^{(m-n)} \quad L_n = L_1 R_l^{(m-n)} \quad U_n = U_1 R_d^{(m-n)} \quad A_n = A_1 R_a^{(m-n)}$$

式中, R_b 、 R_l 、 R_d 和 R_a 分别为河道水系分枝比、长度比、比降比和面积比; n 为河道级别序号, m 为河流最高级别序号; L_1 、 L_n 分别为第1、 n 级河道的平均长度; U_1 、 U_n 分别为第1、 n 级河道的平均坡降; A_1 、 A_n 分别为第1、 n 级河道的平均流域面积。

2) 水系分维特征(D)

Horton 认为不同等级水系的发育具有自相似特征, 国内外已就水系分维展开了部分研究^[15-16]. Barbera 和 Rosso 定义的水系分维数(D)的计算公式如下: $D = \frac{\log R_b}{\log R_l}$. Barbera 和 Rosso 水系分维应在 1-2 之间, 平均值为 1.6-1.7. 水系分维数越大, 说明水系越复杂, 反之则水系越简单。

3) 河网密度(R_D)与河网结构自然度(R_C)

河网密度 (R_D) 反映了流域水系的长度和面积的比值, 河网结构自然度(R_c) 反映了河网数量和长度的发育程度, 其值越大说明河网构成层次越丰富, 支撑主干河道的支流水系越发达^[17]. 计算公式分别为:

$$R_D = \frac{L_s}{A_s}$$

$$R_c = \frac{L_s}{L_z}$$

式中, L_s 为区域河网水系河道总长, A_s 为区域总面积, L_z 为区域内最高级别河道总长.

3 结果与讨论

3.1 五桥河流域河网与子流域的属性特征

以基于水系改进的研究区域高分辨率 DEM 为基础, 利用 ARCGIS 软件的水文分析模块(Arc Hydro Tools) 生成的流域边界、河网、子流域以及相关属性特征分别如图 2, 3 和表 1.

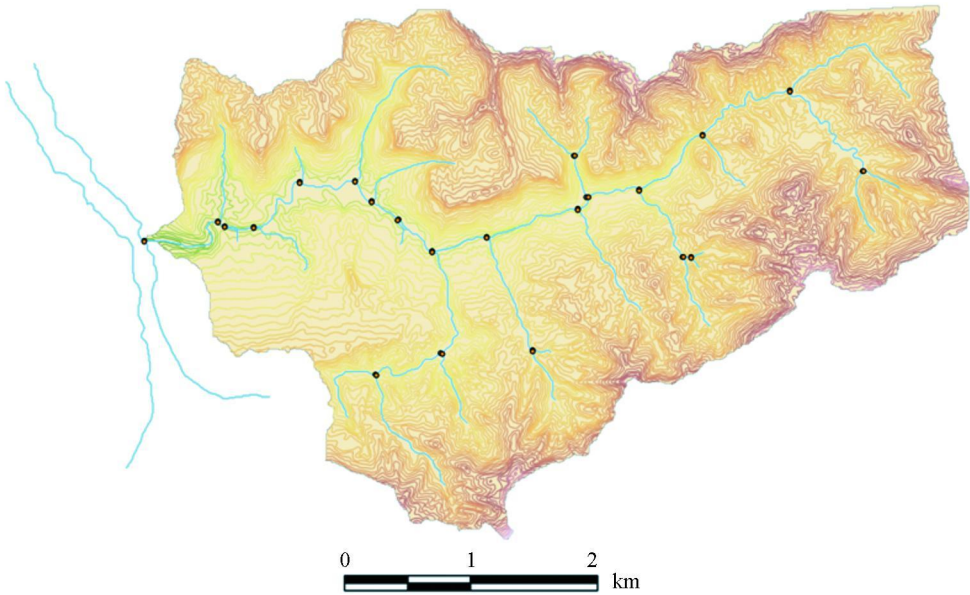


图 2 五桥河流域河网示意图

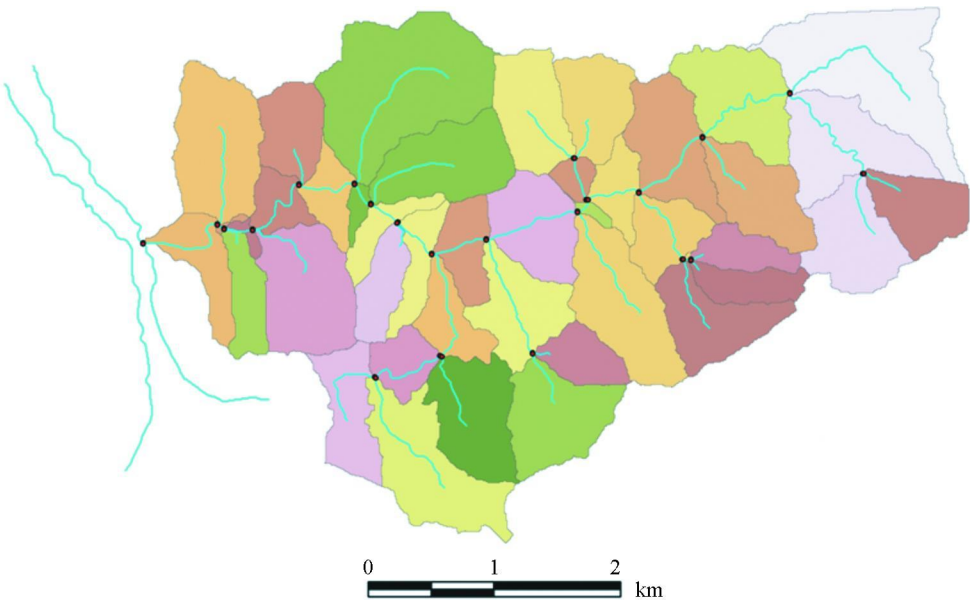


图 3 五桥河流域子流域示意图

经过分析, 五桥河流域被划分成 43 段河道和 43 个个子流域, 河道长度和子流域面积之间差异相对较

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

大, 河道最长为 3 817 m, 最短仅为 189 m, 子流域面积最大的为 847. 04 hm², 最小的只有 2. 24 hm².

表 1 五桥河流域河网和子流域属性

序号	子流域 标识号	汇流子流域 标识号	河道级别	河道长度 / m	子流域周长 / m	子流域面积 / hm ²
1	5	11	1	3 234	18 560	738. 24
2	8	24	1	3 817	16 280	847. 04
3	11	17	2	2 070	11 760	420. 12
4	12	11	2	2 463	13 480	433. 32
5	14	20	1	1 174	9 280	325. 28
6	15	20	1	807	8 840	273. 96
7	16	37	1	2 356	12 080	487. 52
8	17	27	2	2 116	12 280	375. 28
9	18	17	1	1 263	10 800	325. 60
10	19	25	1	496	7 880	230. 44
11	20	29	2	1 013	4 000	60. 36
12	21	26	1	1 506	11 400	396. 16
13	22	12	1	1 016	11 000	348. 72
14	23	12	1	635	8 600	260. 84
15	24	25	3	1 043	7 640	140. 60
16	25	40	3	1 280	6 560	125. 96
17	26	24	3	934	3 880	38. 96
18	27	29	3	1 075	7 600	140. 60
19	28	27	2	2 106	8 080	207. 96
20	29	33	3	228	3 680	21. 20
21	30	26	3	1 149	8 640	118. 12
22	33	42	3	1 990	9 520	329. 00
23	34	33	1	2 438	13 280	477. 32
24	35	30	3	1 288	9 520	154. 04
25	36	30	1	367	7 880	176. 36
26	37	13	3	2 784	9 800	208. 96
27	38	37	3	197	2 360	8. 28
28	39	38	1	354	8 080	169. 80
29	40	38	3	462	3 480	23. 64
30	41	40	1	1 223	11 200	459. 76
31	42	35	3	1 287	7 760	185. 00
32	43	42	2	2 284	11 680	320. 92
33	45	35	2	2 340	8 760	185. 32
34	46	48	1	254	7 560	148. 08
35	47	28	1	1 271	11 560	313. 20
36	48	28	2	189	840	2. 24
37	49	48	1	262	8 040	153. 08
38	56	43	1	204	7 080	161. 00
39	57	43	1	566	11 280	380. 04
40	58	45	2	1 458	6 520	146. 64
41	59	45	1	1 382	11 640	380. 36
42	60	58	1	2 818	11 080	261. 80
43	61	58	1	1 675	16 640	495. 44

由表 1 可知, 子流域的数目在各级河道的分布顺序依次为 1 级, 3 级, 2 级. 但就分布的面积而言, 随着河道级别的升高, 在其上分布的子流域的总面积急剧减少, 就五桥河流域而言, 1 级河道上分布的子流域的总面积占了流域总面积的 68. 17%, 2 级和 3 级河道上分布的面积依次减少.

3 2 五桥河流域河网水系总体上具有 Horton 表现

根据流域水系分级方案,五桥河流域水系由 3 个等级的河道组成,1、2、和 3 等级的河道数目分别为 22、5 和 1. 根据水系结构参数的计算公式,五桥河流域水系分枝比(R_b)、长度比(R_l)、坡降比(R_u)和面积比(R_a)分别如下: $R_b = 4.69$, $R_l = 2.76$, $R_u = 2.25$, $R_a = 5.78$. 根据水系分维数的计算公式,五桥河流域的水系分维数为 1.52.

由前面的分析可知,运用基于水系改进的高分辨率 DEM 和 ARCGIS 的水文分析模块(Arc Hydro Tools)提取的水系与实际水系特征完全吻合且联系完整,五桥河流域的各种水系结构参数的值均在一般水系的范围内,河网水系总体上 Horton 表现较为明显. 河网水系在数量上的发育程度反映了水系发育的成熟程度,总体上,河网水系在数量上的发育程度高于其长度上的发育,但这种趋势只是在流域的上游为显著,随着向流域出口的靠近,河网水系在数量上的发育程度逐渐减小,而在长度上的发育程度逐渐增大.

3 3 河网水系的结构与功能密切相关

根据社会经济发展状况,五桥河流域可以划分为城镇化快速发展区(由 35, 36, 30, 21, 26, 8, 24, 19, 25, 41, 40, 39, 38, 16 和 37 等 15 个子流域构成)、农业景观功能区(由 29, 34, 33, 56, 57, 43, 42, 60, 61, 58, 59 和 45 等 12 个子流域构成)和生态恢复协调区(由 22, 23, 12, 5, 11, 18, 17, 46, 47, 48, 49, 28, 14, 15, 20 和 27 等 16 个子流域构成)3 个区域. 城镇化快速发展区位于流域下游,是三峡移民搬迁安置而城镇化快速发展区,农业景观功能区位于流域中游,是传统的农业耕作区,生态恢复协调区位于流域上游,是流域重要的水源涵养区. 各区域河网密度(R_D)与河网结构自然度(R_C)如表 2.

表 2 区域河网密度与河网结构自然度

区 域	面积 / hm^2	河道总长 / m	最高等级河道长 / m	河网密度 / $(\text{m} \cdot \text{hm}^{-2})$	河网结构自然度
城镇化快速发展区	3 859.60	20 063	9 137	5.20	2.20
农业景观功能区	3 777.36	21 133	3 505	5.59	6.03
生态恢复协调区	4 526.88	20 948	1 075	4.63	19.49

由表 2 可知,对五桥河流域的 3 个区域而言,河网密度的数值大小顺序为农业景观功能区,城镇化快速发展区,生态恢复协调区. 但差异并不显著. 河网结构自然度的数值大小顺序为生态恢复协调区,农业景观功能区,城镇化快速发展区. 从生态恢复协调区到农业景观功能区,再到城镇化快速发展区,河网结构自然度急剧减小,而河网结构自然度反映了河网数量和长度的发育程度,其值越大说明河网构成层次越丰富,支撑主干河道的支流水系越发达. 从 3 个区域河网结构自然度可以看出,五桥河流域作为因三峡移民搬迁安置而快速发展的区域,人类活动已对流域水系结构产生了显著影响,在进行五桥河流域可持续发展规划时,应注重对城镇化快速发展区和农业景观功能区水系的保护与恢复,以达到生态效益和经济效益“双赢”的目标^[18-19].

4 结 语

目前,利用 DEM 数据,在 GIS 平台支持下可以快速地获取流域的河网结构,并可以根据汇流累积单元数的阈值来生成不同密度的河网,但 DEM 的空间分辨率、DEM 资料生产方式,集流面积阈值的选取以及不同地形特色等因素对提取结果有一定影响^[20-21]. 本研究以三峡库区中部五桥河流域为研究对象,采用 1 : 10 000 的数字化地形图和 2.5 m 最佳分辨率,建立了基于水系改进的研究区高分辨率 DEM. 在此基础上,运用 ARCGIS 的水文分析模块(Arc Hydro Tools)进行流域边界的确定、河网的提取、子流域的剖分以及水系结构特征分析. 在五桥河流域的实践表明,运用基于水系改进的高分辨率 DEM 和 ARCGIS 的水文分析模块(Arc Hydro Tools)提取的水系与实际水系特征完全吻合且联系完整,是一种进行水文分析的良好方法.

参考文献:

[1] 杨 凯,袁 雯,赵 军,等. 感潮河网地区水系结构特征及城市化响应[J]. 地理学报,2004,59(4): 557-564.
[2] 李 丽,郝振纯. 基于 DEM 流域特征提取综述[J]. 地球科学进展,2003,18(2): 251-256.
[3] 赵 健,贾忠华,罗 纳. ARCGIS 环境下基于 DEM 的流域特征提取[J]. 水资源与水工程学报,2006,17(1): 74-76.

- [4] 倪九派. 三峡库区水土流失空间尺度效应及其尺度转换研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2005.
- [5] 吴 璟. 西苕溪流域水生甲虫群落与环境以及底栖动物完整性与土地利用关系 [D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [6] 孙庆艳, 余新晓, 胡淑萍, 等. 基于 ArcGIS 环境下 DEM 流域特征提取及应用 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 144-147.
- [7] 穆方驰. 渭河下游洪水预报模型开发与应用研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [8] 高鑫磊. GIS 环境下基于 DEM 的流域自动提取方法 [J]. 北京水务, 2009, 2: 46-48.
- [9] 张彩霞, 杨勤科, 段建军. 高分辨率数字高程模型的构建方法 [J]. 水利学报, 2006, 37(8): 1009-1014.
- [10] Menamara J P, Kane D L, Hinzman L D. An Analysis of an Arctic Channel Network Using a Digital Elevation Model [J]. Geomorphology, 1999, 29: 339-353.
- [11] 康 玲, 王学立, 姜铁军, 等. 基于数字高程模型的流域变动等流时线方法 [J]. 水利学报, 2006, 37(1): 40-44.
- [12] 范红梅, 王秋兵, 边振兴. 基于 GIS 技术的宽甸县居民点空间分布特征分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2008, 33(2): 99-103.
- [13] 贺中华, 梁 虹, 黄法苏, 等. 基于 ASTER 的喀斯特流域地表水系自动提取研究 [J]. 中国岩溶, 2007, 26(4): 312-315.
- [14] 高阳华, 陈志军, 居 焯, 等. 基于 GIS 的三峡库区精细化甜橙气候生态区划 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(7): 1-6.
- [15] 陈彦光. 吉林省水系构成的分形研究 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 178-184.
- [16] 冯 平, 冯 焱. 河流形态特征的分维计算方法 [J]. 地理学报, 1997, 52(4): 324-330.
- [17] Schuller D J, Rao A R. Fractal Characteristics of Dense Stream Networks [J]. Journal of Hydrology, 2001, 243: 1-16.
- [18] 史兴民, 李有利, 杨景春. 玛纳斯河流域地貌初步研究 [J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2007, 30(3): 406-410.
- [19] 彭书凤, 田 盈. 基于改进主成分分析法的全国城市化水平研究 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2007, 24(3): 69-73.
- [20] 沈 涛, 李成名, 苏山舞. 基于水系改进的数字高程模型内插研究 [J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(4): 535-539.
- [21] 黄金柏, 桧谷治, 梶川勇树. 分步型流域“降雨-流出”过程数值模拟方法的研究 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 52-55.

Analysis on the Traits of Watershed Streams Based on High Resolution Digital Elevation Model

NI Jiur-pai, GAO Ming, WEI Chao-fu, XIE De-ti

School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The boundary, streams and sub-watersheds were identified and the streams traits were analyzed based on high resolution digital elevation model (DEM) and Arc hydro tools of ARCGIS in Wuqiaohe watershed, Wanzhou county, Chongqing. Results indicated that the values of stream structure parameters were in the range of ordinary streams and Horton law played an important role. The streams of the river network were more developed in number than in length and there existed significant relationship of dissimilar area between stream structure and its function in Wuqiaohe watershed. The generated streams were completely accordant with actual streams and were uninterrupted based on high resolution DEM and Arc hydro tools of ARCGIS in Wuqiaohe watershed. So, it was a feasible method for watershed hydrology analysis.

Key words: high resolution digital elevation model; the structural traits of streams; ARCGIS; watershed

责任编辑 陈绍兰