

# 基于 GIS 的南方红壤丘陵区小流域汇流网络提取研究<sup>\*</sup>

李忠武<sup>1,2</sup>, 黄金权<sup>1,2</sup>, 李裕元<sup>3</sup>, 蔡晓迪<sup>1,2</sup>, 曾光明<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学 环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学 环境生物与控制教育部重点实验室, 长沙 410082; 3. 中国科学院 亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

**摘 要:** 以南方红壤丘陵区宝洞峪小流域作为实验样区, 在地理信息系统技术空间分析和水文分析模块的支持下, 采用不同分辨率的 DEM 为基本信息源, 探讨了汇流阈值与汇流网络密度间的定量关系。研究结果表明: 汇流阈值与汇流网络密度呈定量统计关系。经过对所得数据的回归分析, 得出了汇流阈值与汇流网络密度的定量回归模型, 其中系数  $b$  呈较明显的空间分异特征并随着 DEM 精度的变化而变化。还提出了一种基于栅格个数的汇流网络密度计算方法, 通过在实际研究中的应用, 表明该方法可以有效地应用到汇流网络结构研究中。

**关键词:** 红壤丘陵区; DEM; 汇流网络; 汇流阈值

中图分类号: X143; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)06-0082-04

## Extraction of Drainage Structure for a Small Watershed in the Red Soil Regions in Southern China Based on GIS

LI Zhongwu<sup>1,2</sup>, HUANG Jinquan<sup>1,2</sup>, LI Yuyuan<sup>3</sup>, CAI Xiaodi<sup>1,2</sup>, ZENG Guangming<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China; 3. Institute of Subtropical Agriculture, the Chinese Academy of Science, Changsha 410125, China)

**Abstract:** The Baodongyu catchment in red soil hilly region of Southern China was selected as the study site. Under the support of spatial analysis and hydrological analysis module of ArcGIS, the research discussed the quantitative relationship between conflux threshold value and densities of conflux network using DEM with different resolving power. The result showed that there is a quantitative relationship between conflux threshold value and densities of conflux network, which can be expressed by a formula. And the parameters  $b$  presented on a change trend with the precision of DEM. The research put forward a good approach of computing conflux network density based on raster number, which could be effectively used to determine drainage structure.

**Key words:** red soil hilly regions; digital elevation model; conflux network; conflux threshold value

利用 DEM 生成的集水流域和汇流网络, 是大多数地表水文分析模型的主要输入参数<sup>[1]</sup>, 也是目前表面水文分析的研究热点问题<sup>[2]</sup>。由于数据来源的多源性, 地形条件的复杂性以及提取方法的问题, 使得基于 DEM 的河流汇流网络提取具有鲜明的不确定性<sup>[3]</sup>, 其中汇流网络的提取方法是一个非常关键的影响因素。河流汇流网络的提取方法有很多种, 例如 D8 法中的单向和多向流法<sup>[4]</sup>, 地貌单元法

(morphological thinning based on algorithms method)<sup>[5]</sup>, 也有很多的水文和水利研究人员在开展这方面的工作<sup>[6,7]</sup>。熊立华和郭生练利用流域集水面积和临界支撑面积探讨了基于 DEM 的数字河网的生成后认为, 流域的临界支撑面积对于汇流网络的提取具有非常重要的影响<sup>[8]</sup>; 有研究在对两个不同比例尺条件下(1:250 000, 1:24 000)影响汇流网络提取因子进行研究后表明在不同尺度条件

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-05-19

基金项目: 国家 863 高技术项目(2007AA10Z222); 国家杰出人才基金项目(50425927); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(0651054040)

作者简介: 李忠武(1972-), 男, 湖南长沙人, 博士, 副教授, 主要从事环境信息系统方面的研究。E-mail: lizw@hnu.cn

下,影响汇流网络提取的因素有很大的差异<sup>[9]</sup>。在以上所有基于 DEM 的汇流网络相关研究中,D8 法均是汇流网络提取的基础。

尽管有研究认为该 D8 法具有一定的缺陷,如在平地 and 凹陷区域不能正确的确定水流方向<sup>[10]</sup>,并提出了改进的途径<sup>[11]</sup>,但是该方法在研究区域地面其他信息缺乏的条件,仍然是一种解决汇流网络提取的最好途径。目前,国内关于基于 DEM 的汇流网络研究多集中在黄土高原<sup>[1215]</sup>,而以南方红壤丘陵区这一特殊的地貌类型为例开展的相关研究相对较少。南方红壤丘陵区地处亚热带湿润气候区,气候温和,雨量充沛,日照充足。地跨南方 11 个省(区),619 个县(市),共约 113 万 km<sup>2</sup>,占国土面积的 11%。由于不合理的开发利用,目前,红壤丘陵区土壤肥力退化,水土流失严重,生态环境恶化,已成脆弱生态环境区域<sup>[16]</sup>。南方红壤丘陵区具有非常独特的地貌空间分异特征,地形破碎,以低山丘陵区为主,与其他的地貌类型具有非常显著的差异<sup>[17]</sup>。因此,本研究主要采用 D8 法,以南方红壤丘陵区的典型小流域为例,在对汇流网络提取原理进行理论分析的基础上,研究了汇流阈值和 DEM 精度对于汇流网络密度的影响,这对于深入认识红壤丘陵区的地形地貌特征,对于完善汇流网络提取理论均具有非常重要的意义。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域

试验区设在中国科学院桃源农业生态试验站定位观测试验场附近的宝洞峪小流域(图 1)。宝洞峪小流域位于湖南省桃源县漳江镇宝洞峪村(111b30c E, 28b55cN),面积为 2.086 km<sup>2</sup>,是武陵山区向洞庭湖平原过渡的丘岗地带,海拔 92.2~125.3 m,坡度 8~11b,所属流域为桃源县延溪水系(流域面积为 456 km<sup>2</sup>)。年平均气温 16.5e,年平均降雨量约为 1440 mm,日照 1520 h。主要土壤类型为第四纪红土发育的红壤和红壤性水稻土,植被为武陵山植被区系。根据地形地貌特征,宝洞峪流域属于典型的南方红壤丘陵区。

### 1.2 研究方法

水文分析立足于水流在该流域的流向、走势和汇聚趋势等情况进行的分析。研究主要在 ArcGIS 中通过将中心栅格的 8 个邻域栅格编码<sup>[18]</sup>,水流方向便可以其中的某一值来确定,并采用 D8 单向流法对流域汇流进行分析。所谓 D8 单向流法就是将矢量数据转化为栅格数据(DEM)后,在地形等高线

信息的基础上,系统以周边 8 个单元格的坡度大小自动对水流向进行判定,坡度落差最大的即为水流方向。在"Arc Hydro Tools- Terrain Preprocessing- Flow Direction"工具中即可生成 D8 网格,水流方向以 2 的指数幂形从 0 位置到 8 位置在矩阵中按顺时针方向排列。最终判定结果,以不同颜色填充于单元格内,以进行下一步的分析。

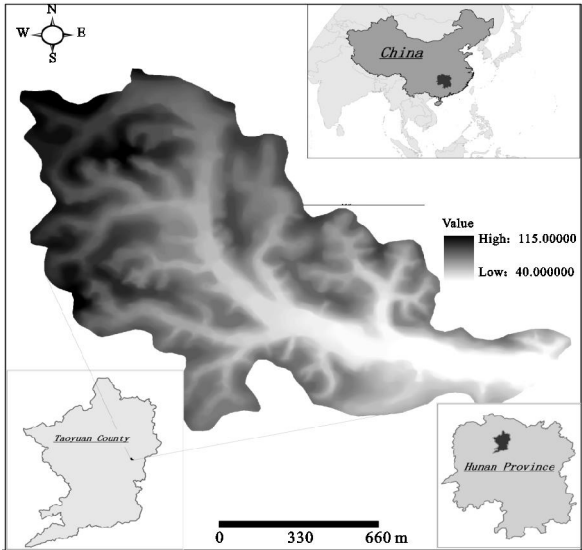


图 1 宝洞峪流域区位图

## 2 结果与讨论

### 2.1 DEM 精度与汇流网络密度相关分析

根据相关数据(表 1),在 DEM 精度为 0.35 m 下,选择汇流阈值 7347(起始面积 900 m<sup>2</sup>)其汇流密度仅为 0.68%,即全流域中被判定为汇流网络的栅格数仅占总的网格数的 0.68%;当调高汇流阈值为 20408(起始面积 2500 m<sup>2</sup>),其汇流密度缩小到仅 0.42%;相应的,继续调高汇流阈值为 81633(起始面积 10000 m<sup>2</sup>),其汇流密度继续缩小到仅 0.23%;最终当汇流阈值为所选数据的最大值时 183673(起始面积 22500 m<sup>2</sup>),其相应的汇流密度也出现最小值仅 0.15%。在不同的 DEM 精度下,其规律几乎相同,例如在 DEM 精度为 1 m 时,当汇流阈值由 1837 提升为 5102(即起始面积从 900 m<sup>2</sup> 变为 2500 m<sup>2</sup>),其汇流密度由 1.42% 缩小到仅 0.83%;相应的继续调高汇流阈值为 20408(起始面积 10000 m<sup>2</sup>),其汇流密度继续缩小到 0.45%;最终当汇流阈值为所选数据的最大值时 45918(起始面积 22500 m<sup>2</sup>),其相应的汇流密度也出现最小值仅 0.31%。

综合上述数据分析,不难看出在统一的 DEM 精度下,汇流网络密度随着汇流阈值的增大而减小,二者成负向相关。参阅相关资料<sup>[1215]</sup>,根据汇流阈

值在汇流网络上体现的特征,对 11 组不同精度(0.35, 0.70, 1.00, 1.20, 1.56, 1.80, 3.00, 4.00, 5.00, 6.00, 9.00 m)下的 DEM 数字高程模型进行汇流网络提取,以多个阈值提取汇流网络,统计不同

表 1 不同 DEM 精度下汇流阈值与汇流网络密度关系

起始 面积/m <sup>2</sup>	汇流阈值				汇流栅格数目/个				汇流密度/%			
	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4
900	7347	1837	900	625	116436	60258	43343	36774	0.68	1.42	2.08	2.54
2500	20408	5102	2500	1736	71275	35189	24906	20850	0.42	0.83	1.19	1.44
10000	81633	20408	10000	6944	38910	19264	13435	11314	0.23	0.45	0.64	0.78
22500	183673	45918	22500	15625	26171	13026	9059	7623	0.15	0.31	0.43	0.53

注: D1、D2、D3、D4 分别指 DEM 精度为 0.35 m、0.7 m、1.0 m 和 1.2 m。

表 2 不同 DEM 精度下汇流阈值与汇流网络密度关系模型

DEM 精度/m	拟合方程	拟合相关系数
0.35	y= 0.406x- 0.4595	R <sup>2</sup> = 0.9995
0.70	y= 0.4731x- 0.4698	R <sup>2</sup> = 0.9986
1.00	y= 0.5325x- 0.4804	R <sup>2</sup> = 0.9984
1.20	y= 0.5491x- 0.482	R <sup>2</sup> = 0.9978
1.56	y= 0.6018x- 0.4916	R <sup>2</sup> = 0.9988
1.80	y= 0.5909x- 0.49	R <sup>2</sup> = 0.9984
3.00	y= 0.6295x- 0.4956	R <sup>2</sup> = 0.9973
4.00	y= 0.6675x- 0.5058	R <sup>2</sup> = 0.9969
5.00	y= 0.5927x- 0.4852	R <sup>2</sup> = 0.9953
6.00	y= 0.6324x- 0.501	R <sup>2</sup> = 0.9981
9.00	y= 0.5542x- 0.4761	R <sup>2</sup> = 0.994

2.2 基于栅格的汇流网络密度分析

表 1 反映了在小流域范围内(约 5 km<sup>2</sup>)利用高精度的数字高程模型( DEM 精度小于 1.2 m)选择不同的汇流阈值对提取汇流网络密度的影响。据表 1 可以看出,汇流网络密度在不同的 DEM 精度下,其变化趋势均随汇流阈值递减,而随 DEM 精度递增。在单一 DEM 精度下,汇流网络密度总体趋势符合幂指数形式,经验证明在不同 DEM 精度下每组数据的拟合相关系数均大于 99.7%。

汇流网络计算是汇流网络密度计算的基础。对于汇流网络的计算,提出了一种新的计算方法。此前国内外有许多研究者使用 ArcGIS 技术进行相应的水文计算所得到的不同汇流阈值下的汇流网络密度,是指在单位流域面积下所生成的汇流网络长度。虽然该数据有实际的地理意义,然而 ArcGIS 系统在生成汇流网络时会产生大量冗余的汇流长度(图 2),这些汇流长度也被计算进了汇流的总长度,所以在较高的 DEM 精度下( DEM 精度小于 1 m)产生的汇流密度偏高,而相反的在较低的 DEM 精度下( DEM 精度大于 4 m)产生的汇流密度偏低。

为了减小误差,本研究直接使用了汇流栅格的个数作为判定密度的标准,因为 DEM 精度的变化

阈值下的汇流网络的密度,并对其以乘幂函数格式进行拟合,并得到 11 个拟合方程(表 5)。可将汇流网络密度(Y)和阈值(X)的关系表达如式(1)。

Y= aX<sup>- b</sup> (1)

使得总的栅格面积也在改变,这种改变能抵消这种波动而不会影响汇流面积所占总面积的百分比,所以汇流网络密度的变化趋于一致。



图 2 高精度 DEM 下生成的汇流网络图

在高精度的数字高程模型中每组的汇流密度随着汇流阈值的增加而减小,其变化趋势如表 1 和图 4 所示,图中 X 轴显示的虽然只是起始面积,但考虑到起始面积等于汇流阈值乘以单位栅格的面积,所以该趋势关系图反映出了汇流网络密度随着汇流阈值变换减小的趋势。

2.3 汇流阈值与汇流网络密度相关分析

在不同 DEM 精度下的汇流密度有随着 DEM 精度减小而增大的趋势。在 DEM 精度 1.56 m 下,选择汇流阈值 370(起始面积 900 m<sup>2</sup>)其汇流密度仅有 3.35%,即全流域中被判定为汇流网络的栅格数仅占总的网格数的 3.35%;而在 DEM 精度提高到 1.8 m 后选择汇流阈值 278(相同的起始面积 900 m<sup>2</sup>)其汇流密度小幅上升至 3.85%;相应的在更小精度的 DEM 栅格精度下期汇流网络的密度大幅上升为 6.63%(DEM 精度 3 m)和 9.02%(DEM 精度 4 m)。以上实验研究表明汇流网络密度的计算是

基于相应的 DEM 精度的。在同一起始面积下 (900, 2 500, 10 000, 22 500 m<sup>2</sup>) 汇流网络的密度随着 DEM 精度的减小而变大。

为了进一步探讨汇流阈值和网络密度之间的定量关系, 论文对不同精度下汇流阈值和网络密度进行了幂函数拟合, 分别得到 11 个拟合方程(表 2, 图 3), 从图 5 中我们可以更加直观的看到汇流阈值和网络密度两者之间的紧密联系。从 11 组拟合方程中将系数 a 和 b 提取出来, 两者存在如图 4 的关系, 综合公式(1)和图 4 的结果, 可以得到 DEM 精度和汇流网络密度的关系(图 5)。

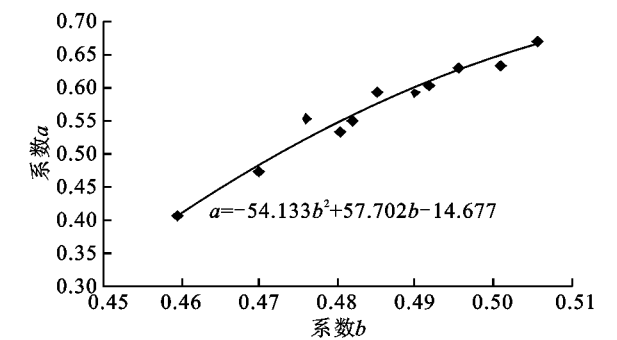


图 4 系数 a 与系数 b 之间的关系

由图 4, 图 5 可见, 汇流阈值与所提取的汇流密度呈负相关, 而系数 b 的大小决定着两者具体的定量关系。根据前人的研究成果系数 b 在特定地形特征下具有较为明显的地域空间分异特征<sup>[12]</sup>, 如果在大尺度下进行汇流网络提取, 可以先进行多实验区实验以获得系数 b 分布情况。

利用理论阈值和对应地貌的系数 b 值可直接得出该地区的汇流密度; 相反在一定程度上, 利用南方红壤丘陵区汇流密度空间分异图等相关资料, 也可以直接得出所需汇流网络的理论阈值, 这样也为理论阈值的确定提供了新的途径。

除此之外实验结果显示, 在不同精度的 DEM 下系数 b 与其有着数量关系。根据试验数据分析, 在小流域范围内, 若 DEM 精度小于 5 m 时, 汇流网络密度系数 b 与之成正相关(图 5)。

推出经验公式  
$$b = 0.4788(D)^{0.0386}$$
式中: b))) 汇流网络密度系数; D))) DEM 的精度。

### 3 结论

汇流网络的提取是非河道水文研究的重要基础, 在提取的汇流网络上可以处理该地区非点源污染控制和监测等问题。汇流网络密度是描述南方红壤丘陵区水文与侵蚀的重要参数, 基于 DEM 提取汇流网络密度, 虽然已经有了较为成熟的技术方法,

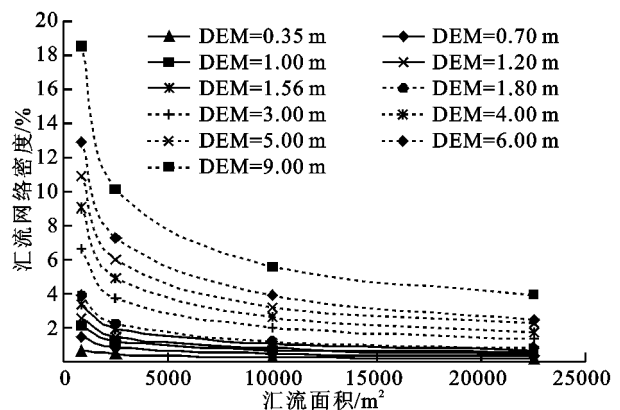


图 3 汇流网络密度和阈值关系

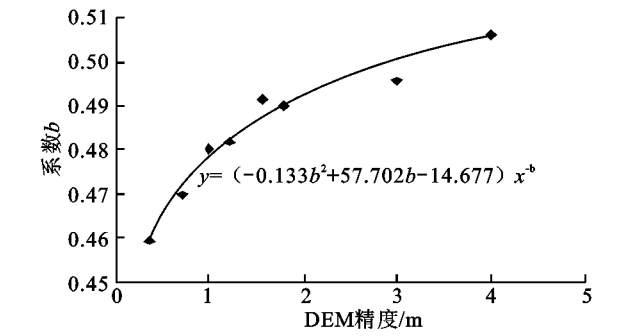


图 5 DEM 精度与汇流网络密度系数 b 关系

但是汇流阈值的正确确定, 是保证高精度的提取结果的关键所在。

实验结果显示, 汇流阈值 X 与汇流网络密度 Y 具有  $y = (-54.133b^2 + 57.702b - 4.677)x^{-b}$  的关系。其中系数 b 呈较明显的空间分异特征并随着 DEM 精度的变化而变化, 根据所获得的不同地区 b 值, 可有效地构建汇流阈值与汇流网络密度之间的定量关系。这对于两者之间的相互求解, 特别是科学、合理地确定汇流阈值, 提供了理论依据。

本研究主要着眼于南方红壤丘陵区, 对在小流域范围内汇流网络成型的相关规律进行了研究。另外在此基础上针对以往研究中对于汇流网络密度的问题进行了优化, 并提出了基于栅格个数的汇流网络密度计算方法, 这对于不同 DEM 精度下汇流网络提取提供了相对统一和更精确的标准。

#### 参考文献:

[1] 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, 2007: 4292452.  
[2] 孙友波, 宫辉力, 赵文吉, 等. 基于 DEM 的数字沟谷网络生成方法的浅议[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2005, 26(2): 1062111.  
[3] John B. Lindsay. Elevation error and uncertainty in DEM-derived channel networks[J]. Geophysical Research Abstracts, 2005, 7: 07758.

## 4 结 语

通过对长武县用水结构以及水资源承载力平衡指数的计算与分析, 结果表明: 长武县用水结构中, 农业、工业、生活、养殖业用水量比例为 0.65 B 0.29 B 0.04 B 0.01, 农业用水占总用水量的一半以上, 工业次之, 表明长武县社会经济是以农业发展为主导; 长武县可利用水资源量大于总用水量, 水资源承载力供需平衡指数大于 0, 说明长武县水资源供给充足, 具备当前规模的经济社会系统的支撑能力。根据长武县实际情况, 总结并提出了简单而实用的水资源承载力的计算方法, 以期为长武县水资源的合理配置提供借鉴。

针对长武县水资源利用现状, 建议增加有效农业灌溉面积, 提倡节水型灌溉农业, 打破部分地区只浇救命水的现状, 提高作物产量; 有计划地对现有水利工程进行挖潜改造和修复配套, 提高现有水利工程的利用率; 适当兴建地表水利用工程和人畜供水工程; 同时建设投资少、水费成本低的工业企业, 以充分利用丰富的客水资源。

### 参考文献:

[1] 赵西宁, 吴普特, 王万忠. 水资源承载力研究现状与发展趋势分析[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 1732 177.

[2] 朱一中, 夏军, 谈戈. 西北地区水资源承载力分析预测与评价[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 4348.

[3] 田园, 王韶华, 徐建新. 海河流域农业用水量研究[J]. 河北水利水电技术, 1995 (1): 21226.

[4] 徐建新, 温随群, 谷红梅, 等. 黄淮海平原区农业用水量估算方法探讨[J]. 华北水利水电学院学报, 2000, 21(1): 528.

[5] 秦伟, 朱清科, 吴宗凯, 等. 吴起县 2015 年水资源承载力评价[J]. 干旱区研究, 2007, 24(1): 7076.

[6] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262269.

[7] 谢宝丰, 刘香军. 岷江上游生态需水量的计算[J]. 黑龙江水利科技, 2008, 36(3): 1012.

[8] 王化齐, 蔡焕杰, 董增川, 等. 民勤绿洲生态环境需水量计算研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 3235.

[9] 长武县统计局. 长武 2007 年统计年鉴[M]. 2008: 4.

(上接第 87 页)

[4] Tarboton D G and Ames D P. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data[EB/OL]. [http://dx.doi.org/10.1061/40569\(2001\)166](http://dx.doi.org/10.1061/40569(2001)166).

[5] Dinesh S. Extraction of Hydrological Features from Digital Elevation Models Using Morphological Thinning[J]. Asian Journal of Scientific Research, 2008, 1(4): 310323.

[6] Meisels A, Raizman S, Karnieli A. Skeletoning a DEM into a drainage network[J]. Computer and Geosciences, 1995, 21(1): 182196.

[7] Bekithemba Gumbo, Nelson Munyamba, George Sit2 hole, et al. Coupling of digital elevation model and rainfall runoff model in storm drainage network design[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27: 7552764.

[8] 熊立华, 郭生练. 基于 DEM 的数字河网生成方法的探讨[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(4): 1417.

[9] Wang Xinhao, Yin Zhiyong. A comparison of drainage networks derived from digital elevation models at two scales[J]. Journal of Hydrology, 1998, 210: 2212241.

[10] Turcotte R, Fortin J P, Rousseau A N, et al. Vill2 neuve. 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: 2252242.

[11] Maria Jose Lopez Garcia, Ana M, Camarasa. Use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a DEM: Comparison between automated extraction and photointerpretation methods in the Carraixet catchment (Valencia, Spain) [J]. In2 ternational Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 1999, 1(3/4): 182195.

[12] 李俊, 汤国安, 张婷, 等. 利用 DEM 提取陕北黄土高原沟谷网络的汇流阈值研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 75278.

[13] 陈楠, 王钦敏, 汤国安. 黄土高原 DEM 分辨率对提取坡度精度的影响[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2006, 27(3): 320324.

[14] 陈楠, 王钦敏, 汤国安. 黄土高原丘坡信息 DEM 提取算法的应用[J]. 地球信息科学, 2006, 8(3): 69275.

[15] 朱庆, 赵杰, 钟正, 等. 基于规则网格 DEM 的地形特征提取算法[J]. 测绘学报, 2004, 33(1): 77282.

[16] 曹学章, 张更生. 红壤丘陵脆弱生态环境的形成与整治对策[J]. 农业生态环境, 1995, 11(4): 452484.

[17] 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施[J]. 土壤, 2000 (4): 198209.

[18] Andrea Tribe. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method[J]. Journal of Hydrology, 1992, 139: 2632293.