

文章编号: 1008-2786-(2016)5-615-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000169

喀斯特山地流域边界多层次提取的径流树模型

余莉,甘淑*,袁希平

(昆明理工大学国土资源工程学院,云南 昆明 650093)

摘 要: 流域边界的确定是进行山地区域脆弱生态环境信息分析、评价及资源合理配置的重要基础,但提取过程中往往存在流域空间单元图斑破碎、流域空间粒度单一的不足。研究考虑了喀斯特山地的地表环境条件特殊性,综合数字水文地形模型在喀斯特流域边界提取的优势,提出了喀斯特山地流域边界多层次提取的径流树模型。方法基于坡面径流模拟算法对单一径流和集水区的准确划分,构建空间径流树模型,并以径流末端或出水口作为搜索终止条件,搜索判断所有径流的空间相交关系以控制不同层次的流域集水区合并,算法时间复杂度为 $O(n \log n)$ 。最后,实验验证运用算法对珠江源头流域进行了四个层次的流域提取处理,提取得到的不同层次细节的流域界线,并与综合云南省流域分布图、等高线和人工实测的流域界线相吻合。

关键词: 流域边界; 喀斯特山地; 空间粒度; 径流树模型

中图分类号: P2081

文献标志码: A

流域是生态环境研究中相对独立且又功能完整的自然地理单元,其边界的准确划分与快速提取是喀斯特山地生态环境研究的重要前提和基础。自 20 世纪 70—80 年代以来,移动窗口算法^[1]、坡面径流模拟算法^[2-3]、谷线搜索算法^[4]等数字水文地形模型的相继提出,较直观地从 DEM 数据中提取流域特征。随后,大量研究根据不同地形变化从流向^[5-9]、填洼^[10-13]、集水面阈值^[14-15]等水文模型参量的计算入手,改进流域提取和水系模拟的效果。

喀斯特是典型的脆弱生态区,“多石少土缺水”的自然条件使得水资源在区域研究中占有重要地位,以流域作为研究区能够较为准确和完整地揭示水土资源共同作用的变化规律^[16]。针对喀斯特流域复杂且独特的地质背景,部分学者开展了喀斯特流域特征提取实证研究^[17-18],研究表明,坡面径流

模拟算法是喀斯特流域提取中较为有效且成熟的方法,通过对 DEM 中垫高洼地、落水洞等闭合负地形和削平阻挡型洼地的预处理,构建明确的水流方向,定义集水面积阈值后生成连续地表水系,进而可提取水流长度、数量、集水区等水文特征。但是该算法以单一径流为单位提取集水区,得到的子流域图斑较为破碎,不利于区域生态环境系统特征的完整表达与分析。考虑到实际区域研究中,流域作为地学领域中典型的地理现象,其在空间域上延展范围的划定具有显著的尺度特征^[19],所隐含的地理信息具有清楚的细节层次^[20],因此,随着流域空间覆盖范围由广袤到狭窄,流域边界形态呈现出由粗到细的粒度变化,流域特征信息亦由粗略至细微表达^[21-22]。特别在自然环境复杂的区域,如峰林、峰丛、溶蚀洼地和盆地、溶沟和溶痕等喀斯特发育山

收稿日期(Received date): 2015-10-05; 修回日期(Accepted): 2015-11-26。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金-地区科学基金项目(41561083; 71163023; 41261092)。[National Natural Science Foundation of China(41561083; 71163023; 41261092).]

作者简介(Biography): 余莉(1987-),女,云南开远人,博士研究生,主要从事空间数据挖掘、建模与分析研究。[Yu Li(1987-),female,born in Kaiyuan,Yunnan province,Ph.D candidate, research on spatial data mining,modeling and analysis.] E-mail: woshiyuli@126.com

* 通信作者(Corresponding author): 甘淑(1964-),女,云南腾冲人,博士,教授,主要从事摄影测量与遥感、土地资源管理。[Gan Shu(1964-),female,born in Tengchong,Yunnan province,Ph.D,professor, research on photogrammetry,remote sensing and management of land resources.] E-mail: 18388180059@163.com

区不同层次喀斯特流域内的自然资源与人类活动状况呈现出显著的空间异质性,在对“整体-局部”的生态环境特征提取时,范围过小且粒度单一的流域往往难以满足区域资源环境问题的研究要求。

本文以多层次提取不同空间粒度流域边界为切入点,选取不同层次下径流的集水面积阈值,采用坡面径流模拟算法提取单一径流集水区域,通过判断径流的空间连接关系,以所有径流末端或特定径流出水口为终止条件,搜索空间相交的径流构建径流树结构,进而合并同一树结构内单一径流对应的集水区,最终实现喀斯特山地流域边界的多层次提取。

1 流域边界提取方法与处理流程

1.1 流域边界提取方法解析

喀斯特山地在地质环境与气候降雨的共同作用下,形成了峰林洼地交错、孤峰、漏斗、落水洞、湖泊等并存的正负地貌,水对可溶性岩石的侵蚀形成了地表与地下双层水结构,地表径流沿岩石缝隙下渗或从落水洞汇入地下,皆亦形成地表水系的“断流”和“突现”,实际测量受到地形限制,难以形成完整的地表水系网络,使得喀斯特区流域的边界难以确定。

研究首先选取坡面径流模拟算法对 DEM 进行逐条径流及其对应集水区域的提取与划分,主要出于以下两方面考虑:1) 喀斯特山地高低起伏的地形特征便于确定水流方向,使得坡面径流模拟算法执行稳定,不易生成平行水流;2) 坡面径流模拟算法中的填洼操作不仅可对 DEM 中的伪洼地、凸出的峰丛等地形进行修正,亦可对喀斯特区地表水系因下渗而不连续的部分进行补充,同时考虑到流域边界的划分是一个宏观的过程,对水系模拟的精度要求不高,主要是明确主体水系的流向及集水区域,填洼可模拟生成清晰的水流方向,形成连续河网,满足喀斯特流域边界的提取。

然而,坡面径流模拟算法对流域的划分是以单条无交汇的径流为单元,按栅格流向确定栅格流入的径流来划分支流的集水区^[13],所得到的集水区仅涵盖单一径流的局部特征,并非是具备完整生态学意义的自然地理单元,不利于区域生态环境的分析与管理。为解决这一问题,本文对坡面径流模拟算法进行扩展,搜索具有空间相交且不受入水口或出水口打断的径流以构建径流树,将每棵径流树包含

的径流对应的集水区域分别合并,对应一棵水系树得到一个子流域,见图 1。

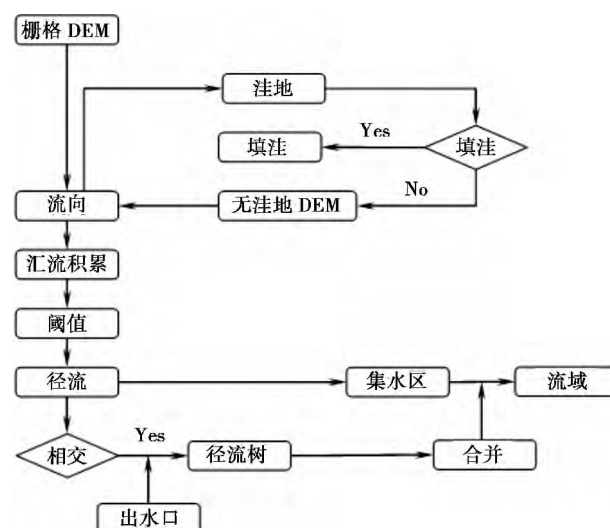


图 1 喀斯特山地流域边界的提取流程

Fig. 1 Extraction process of drainage boundary in karst mountains

1.2 流域边界提取处理流程分解

喀斯特山地流域边界多层次提取的处理过程可以分解为 6 个步骤,其中(1)~(4)为坡面径流模拟算法的基础步骤,仅简要描述;(5)~(6)为径流树模型的构建和集水区的合并为本文研究重点,将进行详细阐述。

1.2.1 洼地的确定与填充

根据水沿斜坡最陡方向流动的原理,DEM 中水流应从中心栅格流向邻域栅格,若中心栅格高程低于邻域栅格,导致水流流入中心栅格后就无法流出至邻域栅格,则判断该中心栅格为洼地。填洼是修改洼地高程以保证水流流出洼地的过程,采用 3×3 模板扫描栅格以寻找洼地,增加洼地高程使得 DEM 中所有栅格点的高程值均大于或等于最低出水口点的高程值,以保证提取水系的连续。通常情况下,喀斯特区的洼地填充需要计算洼地深度,并设置阈值以判断洼地是否属于真实地形,再确定洼地是保留还是铺填。但考虑到喀斯特区中填洼阈值受复杂地质条件的影响较大,且研究旨在提取较为宏观的流域边界,对生成水系的精细程度要求不高,仅需提取流域内主要的连续水系以判断集水区的合并,因此,算法采用完全填洼的方式得到无洼地 DEM 进行后续分析。

1.2.2 流向计算

采用 D8 算法计算栅格单元格内的水流方向,得到流向矩阵。设单个栅格中的水只能从其 8 邻域的方向流出,即计算中心栅格 i 的高程 h_i 与其 8 邻域栅格的高程 $H = \{h_1, \dots, h_8\}$ 的距离权重差,高程距离权重差最大,坡度最陡的栅格为中心栅格水流的流出栅格,即流向 $Dir(i)$:

$$Dir(i) = \max(\arctg|\frac{h_i - h_j}{D}|) \quad (1)$$

其中 $h_j \in H$, D 为两个栅格中心之间的距离,水平与垂直方向相邻栅格的距离为栅格分辨率,对角线方向相邻栅格的距离为栅格分辨率 $\times \sqrt{2}$ 。

1.2.3 汇流累积量的计算

汇流累积量用所有流入栅格单元的积累上游栅格数目来表征,具体算法为:从每个栅格单元出发依次扫描流向矩阵,沿水流方向追踪直到 DEM 边界,获得水流汇流累积量矩阵。汇流累积量矩阵的数值表示上游径流直接或间接流入指定栅格的栅格数目,栅格数目较大的区域即视为汇水区。

1.2.4 径流与集水区的生成

集水面积阈值是控制径流与集水区生成的主要参数,定义为形成永久性河道所需要的最小集水面积。集水面积阈值受到流域下垫面、地形、地表覆盖、人类活动等多因素相互作用影响,变化机制较为复杂,存在显著的空间异质性,现有研究方法难以满足该阈值的精确计算。流域边界提取以分水线的确定为目的,无需对径流长度的精确模拟,即以能形成流域内的主要永久性河道所需要的集水面积来确定集水面积阈值。另外,虽然集水面积阈值越小,生成河网越密集,其对应的集水区较小,但径流树是以径流的相交来判断集水区的合并,当主要河流不变时,小范围集水区合并后的结果与大范围集水区合并后的结果一致,因此径流树模型降低了对集水面积阈值设置的要求,一般按研究区内最大汇流累积量的百分比设置。

集水面积阈值确定后,将汇流累积量矩阵中数值大于该阈值的区域定义为径流,赋值为 1,小于阈值的区域赋值为 0,并将栅格径流转变为矢量径流,以折线段表示。继而采用水系系统分级方案^[22]对整个水系进行追索与分级。集水区的提取首先筛选汇流累积量最大的栅格定义为集水区,根据水流方向搜索流经该栅格的邻近栅格,若邻近栅格不是河流交点,则标记为同一集水区,继续追索,若邻近栅格是河流交点且流经该栅格的任一邻近栅格汇流累

积量大于阈值,则停止该集水区的追索。下一个集水区的追索在未标记的栅格中筛选汇流累积量最大的栅格,按照以上方法追索至发现所有径流集水区结束,并将所有集水区转换成矢量数据,以面要素表示。

1.2.5 径流树的生成

结合实际水系分布,空间粒度较粗时,河流经分水岭严格区分,不同流域间的河流不存在汇流现象,以空间关系表示为径流不相交;而空间粒度较细时,河流虽然保持连续,但在入水口或出水口处有明显的流域分界点,经分界点划分的子流域具有其独立的生态系统,因此,分界点亦可作为子流域内径流搜索的终止条件。图 2 为径流与出水口的空间分布图,任意选取径流作为搜索起点,遍历所有径流,将有空间相交关系的径流逐层搜索建树,直至到径流末端或出水口停止,出水口在径流 3、4、5 处打断,则将径流划分为 3 棵径流树(图 3)。

1.2.6 集水区合并

集水区合并主要是对同一棵径流树的结点所代表的径流对应的集水区进行合并,形成完整的流域。即对应图 3 生成的 3 棵径流树,将图 4 中 10 个集水区合并得到 3 个流域。

2 流域边界提取算法

2.1 径流树的生成算法

输入:单一径流的线要素图层 StreamLayer; 字符串数组 $string[] pNode[p]$,用于存储出水口或入水口的点要素 ID, p 表示点要素的个数,在大尺度流域划分时,该数组可为空。

输出:单一径流的线要素图层 StreamLayer; 字符串数组 $string[] pDrainage[q]$,用于记录流域 ID, p 表示流域(径流树)的个数,便于集水区的合并。

```
FeatureLayer StreamLayer {
    geometry _Shape; //以线要素存储径流的几何信息
    string _GridID; //存储径流标识码
    string _fromNode; //径流起始点 ID
    string _toNode; //径流终止点 ID
    string _strTreeID; //径流树的 ID,其表示径流树的划分结果,同一_strTreeID 值的径流表示其属于同一流域
    bool _isFlag; //标识径流是否被划分入径流树,
```



图2 径流与出水口分布

Fig.2 Distribution of streams and outlets

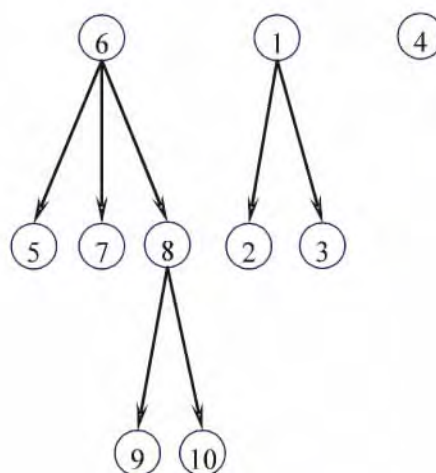


图3 径流树

Fig.3 Stream-trees

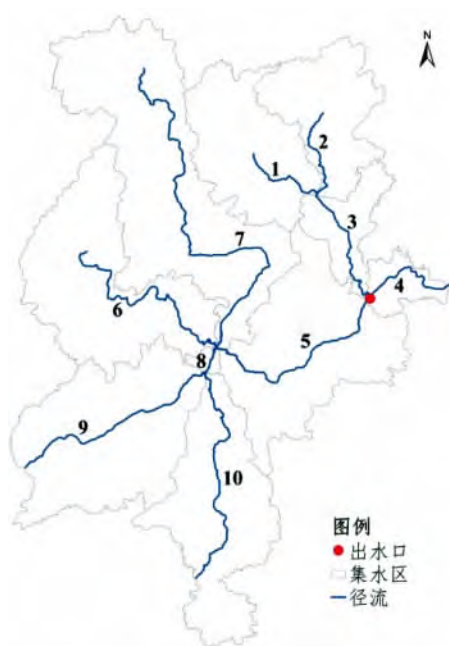


图4 集水区

Fig.4 Catchments



图5 流域

Fig.5 Drainage

$_isFlag = True$ 表示已划分

}

Procedure StreamTree {

[1]初始化径流树编号 $strTreeNum \leftarrow 1$ 。

[2]遍历 StreamLayer 图层中的所有径流,以 k 次遍历为例,新建临时栈 $pStack \leftarrow Null$,将单条径流 s_k 压入栈中 $pStack \leftarrow s_k$ 。

[3]当栈非空 $pStack \neq \emptyset$,出栈 s_j ,若 $s_j._isFlag = True$,Continue; 若 $s_j._isFlag = False$ 则:

[3.1]若 $s_j._fromNode \neq pNode[]$ && $s_j._toNode \neq pNode[]$,即径流 s_j 端点非出水口也非入水口,搜索 StreamLayer 图层中与 s_j 相交(Intersects)的径流集合,并将该集合中 $_isFlag$ 属性为 False 的径流压入栈 $pStack$, $s_j._strTreeID \leftarrow strTreeNum$, $s_j._isFlag \leftarrow True$;

[3.2]若 $s_j._fromNode = pNode[]$ || $s_j._toNode = pNode[]$, $s_j._strTreeID \leftarrow strTreeNum$, $s_j._isFlag \leftarrow True$ 。

[4] $pDrainage[k] \leftarrow strTreeNum, strTreeNum + 1$, 转至[2]进入第 $k+1$ 次遍历。

[5] 直至遍历 StreamLayer 图层中的所有径流, 算法结束

}

径流树的生成既可判断径流的空间连接关系来搜索同一流域内的径流, 又可将无子结点的叶子结点代表的径流的集水区识别为流域的边界, 以控制集水区的合并。

2.2 流域的合并生成算法

输入: StreamLayer; $pDrainage[q]$; 单一集水区的面要素图层 CatchmentLayer。

输出: CatchmentLayer 图层。

FeatureLayer CatchmentLayer{

geometry _Shape; //以面要素存储集水区或流域的几何信息

string _GridID; //存储集水区所属径流的标识码, 与 StreamLayer 图层中 _GridID 属性一一对应

}

Procedure CatchmentMerge {

[1] 遍历 $pDrainage[q]$ 数组, 以 k 次遍历为例, 初始化数组 string[] GridID[] 搜索得到 StreamLayer 图层中属性 $strTreeID = pDrainage[k]$ 的对象集合, 并将集合一中对象对应的 _GridID 属性值逐一添加入数组 GridID[]。

[2] 当 $GridID[] = \emptyset$, 搜索 CatchmentLayer 图层中 _GridID 属性与 GridID[] 数组中任意值相同的对象集合二, 并将集合二中所有集水区对象进行合并, 得到流域图斑。

[3] 转至[1], 进入第 $k+1$ 次遍历, 直至遍历 $pDrainage[q]$ 数组中的所有元组, 算法结束。

}

2.3 算法的时间复杂度分析

综合分析以上算法的时间复杂度, 径流树的生成算法是对径流的逐层搜索, 其结构类似于二叉树, 当集水区数量为 n 时, 时间复杂度为 $O(n \log n)$; 流域的合并生成算法是根据标识数组 $pDrainage[q]$ 对属于同一流域的集水区进行合并, q 的取值为 $q \leq n$, 且在 $q = n$ 时算法复杂度最高为 $O(n)$ 。整体分析步骤(5)~(6)的算法时间复杂度为 $O(n \log n) + O(n) \approx O(n \log n)$ 。

3 实验实证讨论

3.1 实验区及数据源

模型实验选取以珠江流域源头(云南部分)为研究区, 属亚热带季风气候, 地势西北高、东南低, 分布有滇东南喀斯特地质的湖盆区和山原区, 主要以溶蚀洼地、石林、漏斗、溶洞、无河区等形态为主, 地下水参与径流调节, 全年水位流量变化和缓, 是我国西南部典型的喀斯特流域。研究区内干流发源于云南省东北部沾益县乌蒙山脉马雄山北麓, 高程为 2 444 m, 流经曲靖、昆明、玉溪、红河、文山五个州市。流域内水系发达, 河流众多, 集水面积大于 100 km 的河流有 121 条, 一级支流有北盘江、右江、海口河、曲江、泸江、清水江等, 重点湖泊有阳宗海、抚仙湖、星云湖、杞麓湖、异龙湖等, 河段长 677 km, 径流总面积 58 303 km², 多年平均降水量 624×10^8 m³。

实验数据源为 NASA 的新一代对地观测卫星 Terra 观测结果制作完成的 ASTERGDEM(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model)数据, UTM/WGS84 投影, 空间分辨率为 1 弧度秒(约 30 m), 垂直精度 20 m, 水平精度 30 m。研究区范围为: 21°~29°N, 97°~106°E, 共计 90 幅栅格 DEM 进行拼接(图 6)。



图6 云南 DEM

Fig. 6 DEM of Yunnan province

3.2 实验结果分析探讨

实验进行 4 个层次的流域界线提取, 流域界线的空间粒度亦从粗到细渐变。将云南省的 DEM 进行完全填洼处理, 得到无洼地 DEM, 考虑到径流树模型通过判断径流的空间相交关系来控制集水区域的合并, 生成径流时所设置的集水面积阈值无需精确定义, 能表达明确的水流方向即可, 实验统一设置集水面积阈值为流域层次中所有生成径流中最大集

水面积的 20%。

层次一：以云南省行政界线为外围边界，运用坡面径流模拟算法对云南省 DEM 数据进行集水区的划分，共得到 171 条河段及其对应的 171 个集水区，如图 7 所示。集水区划分的流域图斑粒度较细，对大流域划分不够完整。进一步采用本文提出的径流树模型对单一径流和集水区进行判断与合并，按照径流树的生成和流域的合并生成算法得到第一层次的流域界线（图 8），最后叠加云南省行政界线得到云南省的大尺度流域界线图（图 9），包含了长江流域、珠江流域、元江-红河流域、澜沧江流域、怒江流域、独龙江流域。

层次二：选取层次一中珠江源头流域（部分）的汇流累积量，计算珠江源头流域（部分）的集水面积阈值，计算得到 64 条河段及其集水区，进而以径流

树模型优化流域划分，可细分得到可渡河流域、革香河流域、南盘江流域共 3 个流域（图 10）。

层次三：选取层次二中南盘江流域的汇流累积量，以其最大集水面积的 20% 为集水面积阈值得到该流域内的 56 条河段，因径流连续，以径流末端作为终止条件无法继续细分，因此，根据水流走势和实地调研，加入 11 个出水口，采用径流树模型将南盘江流域划分得到 25 个子流域（图 11）。

层次四：选取南盘江流域中划分得到的星云湖-抚仙湖流域继续细分，得到 41 条河段及其集水区，并根据实调的湖水流向，加入 1 个出水口，采用径流树模型得到两个独立且完整的高原湖泊流域——星云湖流域和抚仙湖流域（图 12）。

图 9 ~ 12 中，实际流域界线是根据云南省流域分布图，并综合等高线和实地调研后绘制所得，实验

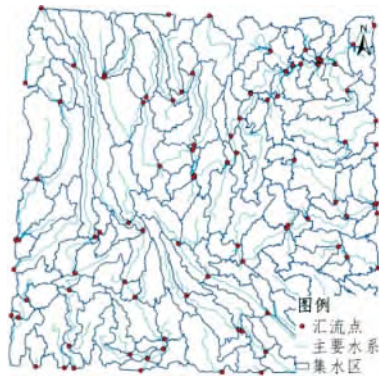


图 7 集水区
Fig. 7 Catchments

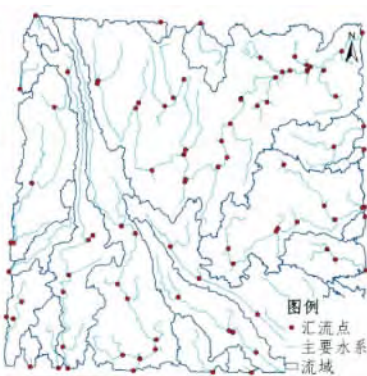


图 8 第一层次流域图
Fig. 8 Drainage of first level



图 9 云南流域图
Fig. 9 Yunnan basin



图 10 珠江(部分)流域
Fig. 10 Pearl drainage (part)



图 11 南盘江(部分)流域
Fig. 11. Nanpanjiang drainage(part)



图 12 星云湖-抚仙湖流域
Fig. 12. Xingyun lake and Fuxian lake drainage

结果显示,实验提取的多层次流域界线与实际流域界线大致相符。但算法的执行需要注意两方面问题:其一,出/入水口的选取需要结合实地考察调研水流方向来确定;其二,利用径流树模型提取流域的过程中出现了破碎的小流域图斑,如图9中的长江流域、珠江流域、怒江流域和图10中的南盘江流域皆出现了未能合并的小流域斑块,分析原因是受到DEM数据范围和云南省界线的限制,若DEM数据范围能包含完整的流域,运用径流树模型提取的流域边界就能保持完整且唯一。

4 结论

喀斯特流域分布于可溶性岩石地区,所构成的生态系统是极其敏感和脆弱的,区域社会经济的可持续发展亦受到石漠化的制约。考虑到水侵蚀,土流失是喀斯特区环境退化的最明显表征,以流域作为研究单元能合理而系统的分析喀斯特区的水土资源配置,同时,流域内相对稳定的自然条件(气候、降雨)对喀斯特环境信息的提取更具整体性。

本文对喀斯特山地多层次流域边界提取技术进行研究,旨在为喀斯特区生态环境信息多尺度多层次的空间关联分析研究提供基础,在坡面径流模拟算法准确划分径流与其集水区域的基础上,进一步扩展提出径流树模型。该方法通过判断径流的空间关系以控制集水区域的合并,以珠江源头(云南部分)不同空间粒度下的喀斯特山地流域边界提取为例,克服了以单一径流集水区来划分流域所导致的流域图斑范围过小、粒度较为单一的窘境,同时降低了集水面积阈值确定的复杂度。随着层次的增加,子流域的空间粒度逐步细化,有利于生态环境研究中对不同层次流域研究区的划定和进一步的对比分析。

参考文献(References)

- [1] Puecker T K, Douglas D H. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1975, 4(4): 375-387
- [2] 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(3): 323-344
- [3] Mark D M. Automated detection of drainage networks from digital elevation models [J]. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, 1984, 21(2-3): 168-178
- [4] Yoeli P. Computer-assisted determination of the valley and ridge lines of digital terrain models [J]. International Yearbook of Cartography, 1984, 24: 197-206
- [5] Fairfield J, Leymarie P. Drainage networks from grid digital elevation models [J]. Water Resources Research, 1991, 27(5): 709-717
- [6] Freeman T G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid [J]. Computers & Geosciences, 1991, 17(3): 413-422
- [7] Lea N L. An aspect driven kinematic routing algorithm [J]. Overland flow: Hydraulics and erosion mechanics, 1992: 393-407
- [8] Costa-Cabral M C, Burges S J. Digital elevation model networks (DEMOM): A model of flow over hillslope for computation of contributing and dispersal areas [J]. Water Resources Research, 1994, 30(6): 1681-1692
- [9] Tarboton D G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models [J]. Water Resources Research, 1997, 33(2): 309-319
- [10] Tribe A. 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(1): 263-293
- [11] Garbrecht J, Martz L W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models [J]. Journal of Hydrology, 1997, 193(1-4): 204-213
- [12] Martz L W, Garbrecht J. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM [J]. Computer & Geosciences, 1999, 25(7): 835-844
- [13] Martz L W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models [J]. Computer & Geosciences, 1992, 18(6): 747-761
- [14] Lin W T, Chou W C, Lin C Y, et al. Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds [J]. Hydrological Processes, 2006, 20(2): 289-306
- [15] Yi Weihua, Yang Ping. Determination of drainage area threshold for extraction of DEM-based digital drainage network [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2008, 34(4): 259-262 [易卫华, 杨平. 基于DEM数字河网提取时集水面积阈值的确定 [J]. 江西水利科技, 2008, 34(4): 259-262]
- [16] Gao Xiang, Cai Xiongfei, Wang Ji, et al. Distributed soil erosion estimation model for small watershed in Karst area [J]. Mountain Research, 2013, 31(5): 542-547 [高翔, 蔡雄飞, 王济, 等. 喀斯特小流域分布式土壤侵蚀估算模型 [J]. 山地学报, 2013, 31(5): 542-547]
- [17] He Zhonghua, Liang Hong, Huang Fasu, et al. ASTER supported research on automatic extraction of karst surface water - A case in Guizhou province [J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(4): 356-362 [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——以贵州省为例 [J]. 中国喀斯特, 2007, 26(4): 356-362]
- [18] Li Jinyi, Shu Dongcai, Liang Hong, et al. Construction of digital watershed in karst region based on Arc Hydro [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(1): 25-27 [李金益, 舒栋才, 梁虹, 等. 基

- 于 Arc Hydro 的喀斯特地区数字流域的构建[J]. 水电能源科学 2010 28(1): 25-27]
- [19] Ai Tinghua ,Cheng Jianguo. Key issues of multi scale representation of spatial data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University 2005 30(5): 377-382 [艾廷华 ,成建国. 对空间数据多尺度表达有关问题的思考[J]. 武汉大学学报: 信息科学版 2005 30(5): 377-382]
- [20] Liu Kai ,Long Yi ,Qin Yaochen. On the spatial granularity of geographical information [J]. Geography and Geo-Information Science 2014 30(1): 8-12 [刘凯 ,龙毅 ,秦耀辰. 论地理信息空间粒度[J]. 地理与地理信息科学 2014 30(1): 8-12]
- [21] Wang Jiayao ,Cheng Yi. The multiple character of spatial data and automated generalization [J]. Hydrographic Surveying and Charting 2004 24(4): 1-3 [王家耀 ,成毅. 空间数据的多尺度特征与自动综合[J]. 海洋测绘 2004 24(4): 1-3]
- [22] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology [J]. Transactions American Geophysical Union ,1957 ,38(6): 913-920

A Stream-tree Model for Drainage Boundary Extraction of Multi-hierarchical in Karst Mountains

YU Li , GAN Shu , YUAN Xiping

(Faculty of Land and Resource Engineering , Kunming University of Science and Technology , Kunming 650093 , China)

Abstract: Drainage boundary extraction is the foundation of analyzing and evaluating fragile eco-environment information and reasonably allocating resources in mountain areas. However , in single spatial granularity , some drainage is divided into small pieces with meaningless. Considering the particularity of land surface environment in Karst Mountains , and integrating the advantages of digital hydrology and geomorphology model in Karst drainage boundary extraction , our research proposed a stream-tree model for drainage boundary extraction of multi-hierarchical in Karst Mountains. The overland flow simulation approach is used to receive streams and catchments accurately. Taking the end of streams or outlets as terminal conditions , the algorithm searches and judges the spatial intersection relationship of streams to merge catchments what belong to the same drainage in different hierarchies. These features are within $O(n \log n)$ time , where n is the number of streams. Finally , by the stream-tree model , experiment extracts drainage boundaries with different details in four hierarchies at the source of Pearl River. Results were consistent with drainage boundary which is drawn by the figure of basin distribution , contours , and artificial surveying in Yunnan province.

Key words: drainage boundary; karst mountains; spatial granularity; a stream-tree model