

文章编号: 1000-0585(2000)02-0209-08

流域降雨径流路径的数字模拟技术

李清河¹, 李昌哲¹, 齐 实², 孙保平²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 流域内降雨径流流动过程的水文分析具有重要意义。此文基于地理信息系统的栅格系统, 利用数字高程模型 (DEM) 提供地形特征的能力, 通过一系列相连的数据集, 用计算机对流域降雨径流路径进行了数字模拟, 其可以实现以正确的水文顺序跟踪地表径流在流域空间范围内的流动路径, 并确定地表径流在流域空间内流动路径的水文计算等级, 为基于流域降雨径流关系的建模研究提供了空间分析基础。最后把该项研究成果应用于黄家二岔小流域, 证实该模拟技术具有一定的可靠性和实用性。

关 键 词: 流域; 地表径流路径; 数字模拟; 地理信息系统

中图分类号: P333.9 **文献标识码:** A

在自然界中, 降雨引起地表径流会导致土壤侵蚀、造成土壤营养物质的流失, 从而污染水质等。因此对降雨-径流过程进行水文分析是特别重要的^[3]。对降雨径流进行水文分析首先需要研究降雨径流的路径问题, 也即研究在整个流域空间内, 降雨形成的地表径流从起点沿坡面从坡上部向坡下部流动, 直至流域出口的过程。

1 研究思想

在该项研究中, 我们针对降雨所产生的地表径流进行水文分析, 下面所提到的径流都是专指地表径流。我们知道在现实流域内, 降雨所引起地表径流在流域空间内经历了产流、汇流, 这些汇流的时间顺序基本反映了地表径流向下游流动的顺序。如何用计算机来模拟现实径流的这种流动路径? 在此可结合地理信息系统对流域地表径流路径进行模拟, 而且采用一种全部数字的数据形式来实现。

首先需要对流域进行离散化处理, 在此我们采用栅格化离散处理, 它是将流域空间划分为一个个正方形栅格, 这种栅格称为单元格 (Cell)。每个单元格对应流域空间范围内的某个具体位置^[4]。流域的栅格划分通过地理信息系统的矢量转栅格功能来完成。流域栅格划分时应遵循以下原则: 地理信息系统的矢量转栅格功能执行的要求及其局限性; 流域的具

收稿日期: 1999-08-20; 修订日期: 2000-03-27

基金项目: 国家“九五”科技攻关课题 (96-004-05-10)

作者简介: 李清河 (1971-), 男, 内蒙古包头市人。1998年毕业于北京林业大学水土保持学院并获博士学位。现为中国林业科学研究院林业研究所水土保持室助理研究员, 主要从事流域治理规划、林业生态工程及荒漠化防治等方面的研究工作。

体情况及栅格化的空间数据的变异大小; 空间数据处理分析所要求的精度。在本技术中, 流域栅格单元的编码以从图形左上角为原点的矩阵 (ROW, COLUMN) 表示, 称之为栅格矩阵编码坐标体系。

在栅格化模型计算基础上, 如何用数字形式准确反映各个栅格的水流汇合的情况, 以便准确地反映径流的先后次序, 同时反映栅格化单元格之间的水流传递, 是十分重要的^[5, 7, 8]。为此我们设计了一系列算法, 采用相邻技术通过几个相连的数据集依次类推, 并用数字形式记录每个单元格的各种水文属性值, 如高程值、水流方向、相邻单元格、最后对流域内各条水流路径进行等级划分, 产生水文学意义上的径流路径计算顺序。模拟过程的结构如图 1 所示:

通过上述思路, 我们即可实现对流域降雨径流的数字模拟过程, 为进一步进行土壤侵蚀、水质分析等分布型建模研究提供基础^[2]。

2 流域降雨径流路径的数字模拟流程

流域降雨径流路径主要解决地表径流在流动过程中具有水文学意义的流动顺序和径流汇合情况以及路径计算等级。根据以上研究思路, 其具体实现方法如下:

2.1 栅格化单元格的生成

栅格化单元格是指栅格数据的生成。流域地形图经过地理信息系统处理即可实现该步骤。我们是通过中国林科院资信所开发的 WINGIS 地理信息系统实现的, 其具体流程见图 2。

2.2 单元格高程矩阵数据集生成

它是由每个栅格化单元格的高程值组成的矩阵数据集。可通过读取上一步所获取的地形图栅格数据文件中标记为 (Row, Column) 的每个单元格的值即可获取。

2.3 水流方向数据集生成

2.3.1 水流方向代码 栅格化单元格的水流方向是指水流流出该单元格的方向。对于空间内某一栅格化单元格, 与其相邻的共有 8 个相邻单元格 (水平、垂直和对角线)。其代码表示如右图所示。

2.3.2 水流方向数据集的生成 降雨形成的地表径流总是由高处向低处流动, 又总是沿着最陡坡的方向流动, 最后经流域出口排出流域。这意味着处于或达到单元格中心的水流方向上的坡度值, 应是该单元格的最佳代表值, 是 8 个坡度中的最大值, 水流方向就是其坡度最陡的方向。

具体的水流方向确定步骤为按下式计算每个单元格与周围 8 个相邻单元格的坡度值:

$$\theta = \arctg \left(\frac{h_i - h_j}{D} \right)$$

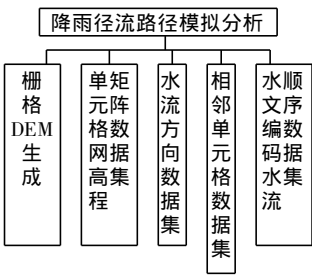


图1 流域径流路径模拟的分析结构
Fig.1 The analysis structure of overland flow routing simulation

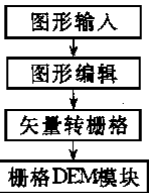
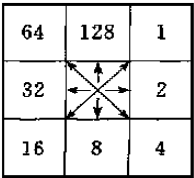


图2 栅格化单元格生成流程图
Fig.2 The flow diagram of grided cell producing



式中 h_i 是本单元格高程; h_j 是相邻的一个单元格高程; D 是这两个单元格的中心之间的距离。若为水平、垂直方向相邻, 该值取 $\sqrt{2} \times$ 单元格的尺寸; 若为对角线方向, 该值取单元格的尺寸;

取这 8 个坡度的最大值, 为该单元格的坡度:

$$\theta = \max \theta \quad j = 1, 2, 3, \dots, 8$$

则 j 为什么方向, 该单元格的水流就流向单元格, 并记录其方向代码。

2.4 相邻单元格数据集生成

相邻单元格数据集主要是给每个单元格指定一个表示入流相邻单元格数目的整数值。即表示在中心单元格的八个相邻单元格中有几个的水流流向该中心单元格, 其中 0 表示没有一个相邻单元格的水流流向本单元格, 这种单元格为开始单元格 (Start Cell)。通常开始单元格形成流域边界, 然而在流域空间范围内的某些具体位置, 其局部微地形也可以形成开始单元格。开始单元格形成地表径流路径的起点。另外在相邻单元格数据集中, 若其相邻值大于或等于 2, 这种单元格为汇合单元格 (Junction Cell)。同时统计流域空间范围内开始单元格的数目 (开始单元格总数的累加值), 并记录下它们的坐标。

2.5 水文编码水流顺序数据集生成

它主要用于确定水流流向下流的流动过程中, 考虑到水流的汇流及其先后次序, 得到水文学上的水流计算等级及其水流路径表达^[6]。通过水文编码水流顺序数据集, 就可以用计算机真实地模拟地表径流在流域空间内从地势高处向地势低处直到流域出口的具有水文学意义的流动路径及流动顺序。

2.5.1 径流路径描述 通常从每一个开始单元格到流域出口的全程地表径流路径中会有两种不同类型的路径段。一是开始单元格路径 (Start Cell Path), 它是由开始单元格开始, 到下游碰到的第一个汇合单元格终止; 二是汇合单元格路径 (Junction Cell Path), 它是从一个汇合单元格开始, 到下游碰到的第一个汇合单元格终止。

用以下几个所谈到的变量来描述地表径流路径。变量 Cell Number 对某路径段上的单元格进行依次顺序计数, 因此其值都是从 1 到该段路径结束的路径上的单元格总数; Path Number 对全流域内的路径数进行计数, 其在不同的路径段是全局变量。最终得到的数目即为整个流域空间内的路径段数目, 包括开始单元格路径数和汇合单元格路径数; 汇合单元格的计数器 Routing 变量记录通过该汇合单元格的径流路径的次数。这样的过程继续 n 遍 (n 为开始单元格总数)。但汇合单元格路径的 Path Number 和其单元格坐标只用第一次模拟时所赋予的路径描述值, 但是其 Routing 值要递增。

2.5.2 径流路径等级 开始单元格没有上游的水文影响, 每条路径都同等重要。因而也就没有必要对开始单元格路径进行排序。只要生成一个流域内每条开始单元格路径的单元格坐标列表即可。

汇合单元格路径段的水流顺序的最终确定是通过编辑一个汇合单元格路径顺序列表, 并储存与之相联的路径数 (Path Number)。排序是以每个汇合单元格的 Routing 变量值来支配的, 并将其定义为等级变量, 其在 $2 \sim n$ (开始单元格总数) 之间变动。变量 Counter, 储存同一水文等级的路径段的数目。最后先以 Level、后以 Counter 排序, 并列出对应的 Path Number, 以及相应路径上的单元格坐标, 就生成了流域内以水文顺序排列的每条汇合单元格路径的单元格坐标列表。

这种流域降雨径流路径模拟技术具有重要意义,可把它作为分布型参数水文模型的输入量或模型运算基础。把这种方法与降雨-径流-侵蚀分布型参数模型相结合,在一个时间段,降雨-径流模型按照得到的水流顺序支配的单元格计算顺序运用到每个单元格。从一个单元格得到的出流结果又变成顺序上的下一个单元格的入流,就可以准确地反映流域内的径流水文图式及土壤侵蚀状况^[1]。

3 流域降雨径流路径的数字模拟技术应用

黄家二岔小流域位于黄河中游地区的黄土高原中心地带,宁夏回族自治区西吉县西部干旱丘陵地区,地理座标为东经 105°29'~105°31'40",北纬 35°17'18"~35°58'40",面积为 5.7 km²,流域长 3.75 km,是葫芦河最大支流滥泥河的源头。

首先把流域的等高线地形图通过 WINGIS 地理信息系统输入计算机, 确定栅格后的栅格尺寸大小 (X 向、 Y 向象元大小) 为 $250\text{m} \times 250\text{m}$, 即可产生黄家二岔小流域地形的栅格数据。栅格图在 X 向有 13 个栅格, 在 Y 向有 9 个栅格, 即 13×9 个单元格就完整地覆盖了整个流域 (为了便于显示成果, 选取的栅格尺寸较大, 在具体应用时, 要根据栅格选取原则。比如我们选取 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 进行模拟, 就有 124×90 个单元格)。然后通过该模拟技术产生各数据集, 模拟流域降雨径流的流动路径。各数据集的内容如下:

黄家二岔小流域的单元格高程矩阵数据集

[illegible]

黄家二岔小流域的单元格坡度矩阵数据集

[illegible]

黄家二岔小流域的单元格水流方向数据集

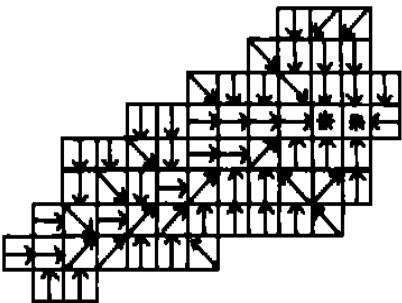
- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	8	16	16	- 1
- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	4	8	8	8	- 1
- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	4	8	8	4	8	8	8
- 1	- 1	- 1	- 1	8	8	2	2	2	2	0	0	32	
- 1	- 1	8	8	4	8	2	2	1	128	128	128	- 1	
- 1	- 1	8	4	8	2	1	128	128	64	1	128	- 1	
- 1	2	4	2	1	1	128	128	128	128	64	- 1	- 1	
2	2	1	1	128	128	64	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	
- 1	128	128	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	

黄家二岔小流域的相邻单元格矩阵数据集

- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	0	0	0	- 1
- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	0	2	1	0	- 1
- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	0	0	0	2	1	1	0
- 1	- 1	- 1	- 1	0	0	0	3	2	3	4	3	1	
- 1	- 1	0	0	1	1	0	3	3	0	0	2	- 1	
- 1	- 1	1	1	0	3	3	1	1	2	0	0	- 1	
- 1	0	2	1	5	2	0	0	0	0	0	- 1	- 1	
0	2	2	1	0	0	0	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	
- 1	0	0	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	

黄家二岔小流域的汇合单元格 Routing 数据集

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	3	4	23	28	4	0	
0	0	0	0	0	0	0	15	18	0	0	2	0	
0	0	0	0	0	10	13	0	0	2	0	0	0	
0	0	2	0	8	2	0	0	0	0	0	0	0	
0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	



黄家二岔小流域的单元格水流方向图

对黄家二岔小流域降雨径流路径模拟中的一些分析值进行统计，其结果如表 1 所示。

水流方向数据集主要用于为径流汇流路径提供分析基础。从水流方向数据集及水流方向图可以看出，一般水流从高处向下流动，位于面南背北的阳坡上单元格，其水流方向一般是向下，即水流方向代码多为 8，而位于朝北背南的阴坡上单元格，其水流方向一般是向上，即水流方向代码多为 128 (当然这是针对地图在输入时是上北下南的情况)。这种水流方向也表明水流一般都是汇入主干沟道；而位于沟道内的单元格，其水流方向一般朝向流域出口的方向，这也表明水流汇入沟道后，然后经流域出口排出流域。这也从一个方面证实了径流模拟在此部分的工作是正常的和合理的。

我们从相邻单元格数据集上可以明显地判断出某个单元格是开始单元格，还是汇合单元格。另外位于流域边界上的单元格，其相邻单元格数一般为 0，即为开始单元格。

黄家二岔小流域开始单元格路径坐标列表

Path No.	Cell No.	Row	Col
1	1	1	10
	2	2	10
4	1	1	11
	2	2	10
5	1	1	12
	2	2	11
	3	3	11
6	4	4	11
	1	2	9
7	2	3	10
	1	2	12
8	2	3	12
	3	4	12
	1	3	7
12	2	4	8
	1	3	8
13	2	4	8
	1	3	9
14	2	4	9
	1	3	13
	2	4	13
15	3	4	12
	1	4	5
	2	5	5
20	3	6	6
	1	4	6
	2	5	6
21	3	6	6
	1	4	7
22	2	4	8
	1	5	3
25	2	6	3
	3	7	3
	1	5	4
	2	6	4
	3	7	5

Path No.	Cell No.	Row	Col
26	1	5	7
	2	5	8
27	1	5	10
	2	4	10
28	1	5	11
	2	4	11
29	1	6	5
	2	7	5
30	1	6	11
	2	5	12
32	1	6	12
	2	5	12
33	1	7	2
	2	7	3
34	1	7	7
	2	6	7
35	1	7	8
	2	6	8
36	3	5	8
	1	7	9
	2	6	9
37	3	5	9
	1	7	10
	2	6	10
39	1	7	11
	2	6	10
40	1	8	1
	2	8	2
43	1	8	5
	2	7	5
44	1	8	6
	2	7	6
46	1	8	7
	2	7	6
47	1	9	2
	2	8	2
48	1	9	3
	2	8	3

黄家二岔小流域汇合单元格路径坐标列表

Level	Counter	Path No.	Cell No.	Row	Col
2	1	2	1	2	10
			2	3	10
2	2	31	1	5	12
			2	4	12
2	3	38	1	6	10
			2	5	9
2	4	23	1	7	3
			2	8	4
2	5	45	3	7	5
			1	7	6
			2	6	7
2	6	41	1	8	2
			2	8	3
3	1	3	1	3	10
			2	4	11
3	2	9	1	4	8
			2	4	9
3	3	42	1	8	3
			2	7	4
			3	7	5
4	1	10	1	4	9
			2	4	10
8	1	24	1	7	5
			2	6	6
10	1	16	1	6	6
			2	6	7
13	1	17	1	6	7
			2	5	8
15	1	18	1	5	8
			2	5	9
18	1	19	1	5	9
			2	4	10
23	1	11	1	4	10
			2	4	11
28	1	49	1	4	11
			1	4	12
4	1	50	1	4	12

流域径流的水文分析的最后一步，也是最复杂和最关键的一步就是生成径流路径描述的一些数据文件，一是径流路径途经次数 Routing 数据集，二是开始单元格路径坐标列表文件，三是汇合单元格路径列表文件。首先对于 Routing 数据集，它是表明径流路径途经某汇合单元格的次数。因此应该是各级沟系内的 Routing 数值比较大，而主干沟道的 Routing 数值更大，而且，在流域空间内从上游到下游，其 Routing 数值是递增的。这表明“水流一般都是先汇入各级沟系，然后汇入主干沟道，经流域出口排出流域”的现象可以得到合理的

模拟，因为水流越汇集的地方，其 Routing 数值越大。这样我们可以明显地看出，Routing 数值大的地方，就是流域的沟道，而且从外形上可以看出 Routing 大的地方连接起来形成了各级沟系。这种情况在栅格尺寸较小，数据量大时，更为明显。

对于开始单元格坐标列表文件，其主要记录了每条路径的编号，以及其上的单元格编号，和对应的各单元格的栅格矩阵编码坐标（ROW，COLUMN），这样沿着每条路径上的单元格坐标，就可以遍历位于开始单元格路径上的每个单元格。

对于汇合单元格坐标列表文件，其对路径和单元格坐标的表示同开始单元格路径一样，据此，可以跟踪路径上的每个单元格。同时，汇合单元格路径是按照路径水文等级大小进行先后排序，因此还有各级水文等级号，它主要起到一个对流域内地表径流进行各个汇合单元格路径段模拟时的先后次序。这样在对流域内降雨径流路径进行模拟时，先根据开始单元格路径坐标列表文件模拟开始单元格路径，然后再按照水文顺序排列的汇合单元格路径列表文件模拟汇合单元格路径，就可构成径流水文图式。

4 结论与讨论

我们开发的流域降雨径流路径的数字模拟功能是计算机自动处理，很少有人的参与，因而减少了分析时间。另外，最终结果具有精确的与数字高程模型 DEM 相联的优点。虽然这种算法本质上是基于栅格的，但产生的一些结果，如流域多边形、地表水流方向、路径流线网络、表格属性信息等，都可以转换成矢量形式。当然，这有待于本项研究的进一步深入开展，使整个流域系统模拟更加完善。

参考文献:

[1] 李纪人. 遥感和地理信息系统在分布式流域水文模型研制中的应用[J]. 水文, 1997(3): 8~12.

[2] 李清河. 黄土区小流域土壤侵蚀系统模拟的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 1998. 40~60.

[3] 梁天刚, 张胜雷, 戴若兰 等. 基于 GIS 栅格系统的集水农业地表产流模拟分析[J]. 水利学报, 1998(7): 26~29.

[4] Kovar K, Nachtnabel H P (editor). Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management[C]. International Association of Hydrological Sciences(IAHS) Publication No.211. 143~225.

[5] Smith M B & Brilly M. Grid Element Ordering for GIS- based Overland Flow Modeling[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, 58(5): 579~585.

[6] Jenson S K, Domingue J O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54(11): 1593~1600.

[7] Garbrecht J. Determination of the Execution Sequence of Channel Flow for Cascade Routing in a Drainage Network [J]. Hydrosoft, 1988, 1(3): 129~138.

[8] Onstad C A, Brakensiek D L. Watershed Simulation by Stream Path Analogy[J]. Wat. Resour. Res., 1968, 4(2): 965~971.

表 1 黄家二岔小流域径流路径水文分析统计结果

Tab. 1 The statistical result of runoff path in Huangjiaercha Small Watershed

栅格数目	X 向	13
	Y 向	9
流域单元格网的栅格数		117
开始单元格数		32
交叉单元格数		18
开始单元格路径数		32
交叉单元格路径数		18
全流域路径数 (Path Number)		50

Numerical simulation technique for routing precipitation-runoff in watershed

LI Qing-he¹, LI Chang-zhe¹, QI Shi², SUN Bao-ping²

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China;

2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Hydrological analysis of precipitation-runoff routing process in watershed is of very importance. Based on the grid system in GIS, the precipitation-runoff routing was numerically simulated with the computer through a series of related data sets making use of DEM's function to provide topographic features. It makes overland flow in the spatial range of a watershed be traced with the correct hydrological sequence and the hydrological computation rank of the runoff path in the watershed be determined of a spatial range. This provides spatial analysis basis for the modeling research based on the precipitation-runoff relation in the watershed. Finally the research achievement was applied in the Huangjiaercha small watershed, the simulation technique was verified to have a definite reliability and practicability.

Key words: watershed; overland flow path; numerical simulation; Geographical Information System