

# RSN 符号代码及其在水系地貌特征提取中的应用

董淑华<sup>1</sup>, 宫兴龙<sup>2</sup>, 邢贞相<sup>2</sup>

(1.黑龙江省水文局,黑龙江 哈尔滨 150001; 2.东北农业大学水利与建筑学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:**研究了自相似河网模型的发生元构成,提出用符号代码标识 RSN 的初始元和发生元,这种代码依据三个参数:河网的价、发生的元节点数、外链分叉夹角。给出了由此代码计算地貌特征的流程图。采用四种常用内链和外链发生元作为发生元,利用模拟流域基于宽度函数的地貌瞬时单位线为优化目标生成 RSN,并计算其地貌特征。

**关键词:**RSN 代码;初始元;发生元;宽度函数;地貌瞬时单位线

中图分类号:P339

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)01-0051-04

## 1 引言

1983年 Mandelbrot 首次提出河系具有分形特征<sup>[1]</sup>。自此,人们对河网的自相似特点进行了广泛的研究,建立了多种确定性自相似河网(SSNS)模型,如 Peano 模型<sup>[1-4]</sup>、MV (Mandelbrot-Vicsek)模型<sup>[5]</sup>、Hinrichsen 模型等。所有这些模型生成的河网都是严格的自相似河网,而自然界的河网多是统计意义上的自相似河网。为了使自相似河网模型产生的河网与自然界河网更接近,水文学家提出了随机自相似河网(Random Self-similar River Network 或 RSN)模型<sup>[6-7]</sup>。现有的 RSN 模型虽然可以模拟自然界河网的复杂多变性,但模拟出来的河网只是图形形式,不便于求得河网的霍顿地貌参数、宽度函数等水系地貌特征,以致难于在实际计算中应用。本文提出用符号代码标识 RSN 模型的初始元和发生元,由此代码生成的河网标识字符串保存了河网的拓扑信息,这一字符串容易转换成栅格形式河网,便于实际应用。采用有限布局水系的基本部分作为发生元,利用 RSN 代码生成的宽度函数(WF)构造出地貌瞬时单位线,并用于流域水文响应的模拟。

## 2 自相似河网模型

自相似河网模型认为河网发展起始于初始元,河

网发育时,其所有链由发生元替换产生一个新的河网,这一过程可用一个递归过程来描述:自相似河网起始于1级河网称为初始元,河网的发展取决于发生元,发生元是初始元继续发展的可能形式, $i(i>1)$ 级河网是由 $i-1$ 级河网的所有链被发生元替换而产生的。基于确定性理论构建的自相似河网模型主要有 MV 模型和 Peano 模型。他们的主要区别是发生元的不同。MV 模型认为河网每次发育产生的河源数等于河网的链数。每条链产生一个河源,此河源位于该链垂直平分线上,与该链距离为半个链长,如图1所示。图中符号“·”表示河源,其流向指向链长为 $1/2$ 处;符号“—”表示新产生的河道。Peano 模型认为,河网发育时,每一条链产生两个河源,它们位于链垂直平分线上,与链的距离为半个链长,其流向指向链长 $1/2$ 处,如图2所示。

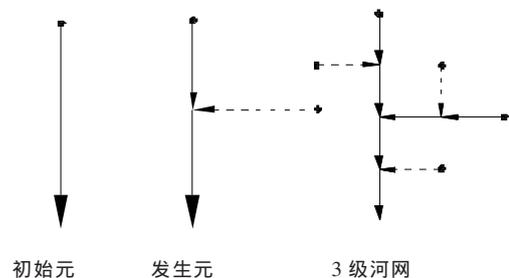


图1 MV 河网发展示意图

Fig. 1 The development of MV river network

收稿日期:2014-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51109036);水利部公益性行业科研专项经费项目(201301096);中国博士后科学基金资助项目(2013M541332);黑龙江省博士后资助项目(LBH-Z12041);黑龙江省水利厅科研开发项目(201318);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20112325120009);黑龙江省级领军人才梯队后备带头人资助项目(500001);黑龙江省博士后启动金(LBH-Q12147);黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11541022)

作者简介:董淑华(1960-),女,黑龙江肇东人,教授级高工,学士,主要从事水文预报方面的研究。E-mail:zyg\_0807@163.com.

通讯作者:宫兴龙(1978-),男,内蒙古阿荣旗人,讲师,博士,主要从事水文过程模拟方面的研究。E-mail:gongxinglong5188@126.com.

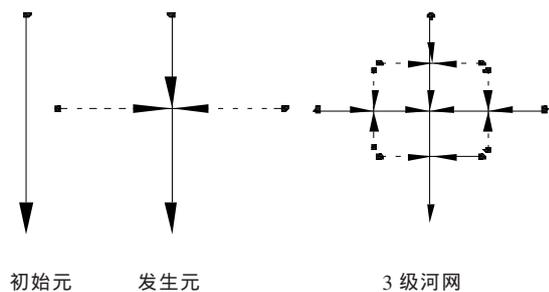


图2 Peano 河网发展示意图

Fig.2 The development of Peano river network

为了使自相似河网模型产生的河网与自然界河网更接近, 水文学家提出了不同于上述确定性自相似河网模型的 RSN 模型, 此模型认为河网发育时其河源产生规律不同于 MV 模型和 Peano 模型而具有随机性, 且其内链和外链的河源产生规律不同, 内链河源的产生是由内链发生元控制的, 外链河源的产生是由外链发生元控制。图 3 是 RSN 模型的 4 个常用发生元。 $R_{01}$  表示节点数为 1 个的外链发生元, 用此发生元替换外链相当于在该外链河源产生 2 分叉河网。 $R_{02}$  表示节点数为 2 个的外链发生元, 用此发生元替换外链相当于在该外链河源产生 2 分叉河网, 在链上产生 1 个分支的河网。 $R_{11}$  表示节点数为 1 个的内链发生元, 用此发生元替换内链相当于在内链上产生 1 个分支的河网。 $R_{12}$  表示节点数为 2 个的内链发生元, 用此发生元替换内链相当于在内链上产生 2 个分支的河网。RSN 模型中的链是以概率进行发生元替换, 为了确定每个发生元的发生概率, 本文规定每个发生元的发生概率区间, 如定义  $R_{01}$  的发生概率区间为  $[0, 0.5]$ ,  $R_{02}$  的发生概率区间为  $(0.5, 1]$ 。在每次替换外链之前, 由 VB 语言 Rnd 函数产生一个  $0\sim 1$  之间的随机数  $\varepsilon$ , 由  $\varepsilon$  所属的区间选择外链发生元。对于内链发生元的选择与外链相同, 由  $\varepsilon$  所属的区间选择内链发生元。图 4 是利用图 3 所示的发生元由初始元产生 3 级河网的示例, 其中 (a) 为初始元, (b) 为初始元被  $R_{02}$  替换产生的 2 级河网, (c) 为根据图 3 的发生元替换 (b) 的过程, (d) 为根据图 3 的发生元替换 (b) 形成的 3 级河网。

### 3 RSN 的发生元及代码

为了使 RSN 河网便于实际应用, 本文用数学语言来描述 RSN 的初始元、发生元及河网生成过程。由发生元的意义可知其结构由三个参数控制: 节点数、节点价 (与节点直接连接的上游链数) 和外链分叉夹角。

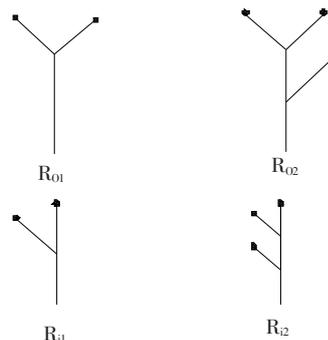


图3 RSN 发生元

Fig.3 Replacement generators of RSN

RSN 的生成主要受控于发生元的外链分叉夹角、价和节点数, 因此把发生元分五部分标识 (见图 5)。标识过程是从河网出口出发, 按图 6 中箭头方向逆流并以左岸优先的顺序追踪, 在河源点改变追踪方向, 顺流向下直遇到节点, 之后继续逆流追踪直到所有源点和链标识完。标识过程为: 出口  $\rightarrow$  内链 (标识为 I)  $\rightarrow$  节点 (标识为  $[]$ )  $\rightarrow$  逆时针方向外链 (标识为  $-O$ )  $\rightarrow$  河源返回节点 (标识为  $]$ )  $\rightarrow$  内链 (标识为 I)  $\rightarrow$  节点 (标识为  $[]$ )  $\rightarrow$  左岸优先选定逆时针方向外链 (标识为  $-O$ )  $\rightarrow$  河源返回节点 (标识为  $]$ )  $\rightarrow$  顺时针方向外链 (标识为  $+O$ )  $\rightarrow$  河源返回 (节点标识为  $]$ ), 最终标识码为:  $I[-O]I[+O][-O]$ 。

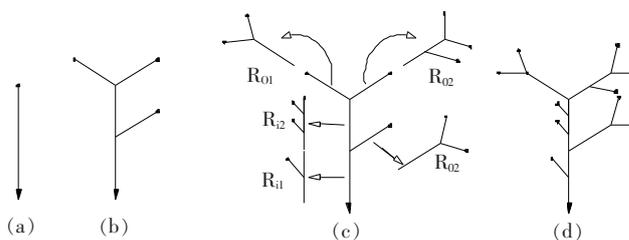


图4 RSN 河网发展示意图

Fig. 4 The development of RSN

图 4 所示的 RSN 河网发展过程: 初始元  $O$  被外链发生元  $I[-O]I[+O][-O]$  替换产生 2 级河网, 对 2 级河网  $I[-O]I[+O][-O]$  中标识旋转方向的内链  $I$  和外链  $O$  用图 4 中箭头指向的发生元替换产生三级河网  $I[+O]I[-I[+O][-O]]I[+O]I[+O]I[+I[+O][-O]]I[-O]I[+O][-O]$ 。如果对此代码中各链用其河网等级代替, 则 3 级 RSN 代码为  $3[+1]3[-2[+1][-1]]3[+1]3[+1]3[+2[+1][-1]][-2[-1]2[+1][-1]]$ 。

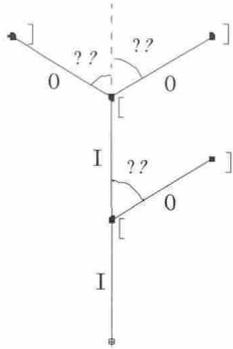


图 5 发生元代码

Fig. 5 The replacement generator codes

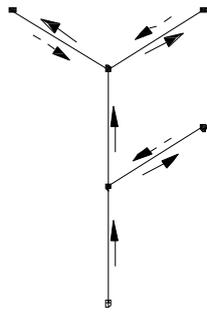


图 6 标识路线

Fig.6 Marking line

### 4 由 RSN 代码提取水系地貌特征

水系的地貌特征主要有宽度函数、分叉比、河长比等来表现。宽度函数由 Surkan 于 1968 年提出,它是表示距流域出口断面  $i$  处的链数与  $i$  之间的函数关系,记为  $WF(i)$ ,其中  $i$  为拓扑长度。拓扑长度是以链为单位计算的,还可以用几何长度或面积表示。本文假定河网中各级链长度相等。由 RSN 代码生成宽度函数过程为,从 RSN 字符串第一个字符开始(流域出口),按字符在字符串中位置顺序,逐个字符搜索其代表的信息,以获得其距流域出口的拓扑距离,计入宽度函数,其计算流程如图 7 所示,其中  $j$  保存河网分叉信息, $N(j)$  记录当前字符返回到的节点距离流域出口的拓扑距离。在求分叉比和河长比之前首先对代码字符串中标识旋转角度的链用其河网等级代替。通过计算字符串中各级河流的数目和河长就可以计算分叉比。各级河流的河长和河数计算流程如图 8 所示。

利用 1 级河网 0 作为初始元,图 9 中有箭头的发生元为外链发生元,其余为内链发生元。按照它们在图中从左到右的位置,发生概率区间依次取  $[0-0.25)$ ,  $[0.25-0.5)$ ,  $[0.5-0.75)$ ,  $[0.75-1)$ 。邻近链间夹角为  $90^\circ$ 。外链发生元代码:  $I[+O]I[+O]I[-O]$ ;  $I[-O]I[+O]I[-O]$ ;  $I[-O]I[+O]I[+O]I[-O]$ ;  $I[O]I[-O]I[+O]I[-O]$ 。内链发生元代码:  $I[+O]I$ ;  $I[-O]I$ ;  $I[-O]I[+O]I$ ;  $I[+O]I[-O]I$ 。

利用本文提出的 RSN 代码生成河网字符串,由模拟流域基于宽度函数  $WF$  的地貌瞬时单位线[8]作为优化目标,模拟流域选沿渡河,其宽度函数来自 3sDEM,如图 10 虚线所示。最优 RSN 河网的其宽度函数如图 10 实线所示。由 3sDEM 计算的宽度函数的平均值为 27,而由 RSN 河网计算的宽度函数为 23。由 3sDEM 和 RSN 河网计算的分叉比和河长比如图 11 所示,图

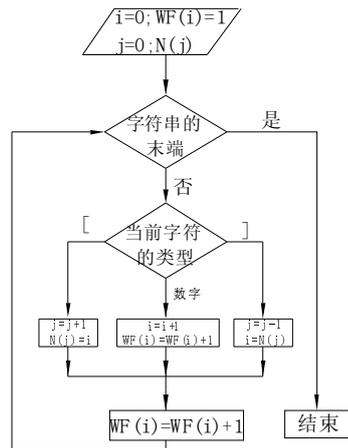


图 7 宽度函数的计算流程图

Fig. 7 The calculation flow of width function

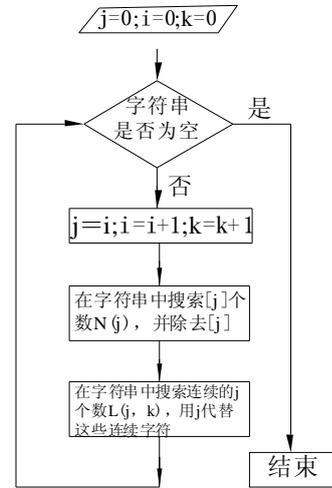


图 8 河数和河长的计算流程图

Fig.8 The calculation flow of the channel length and river numbers

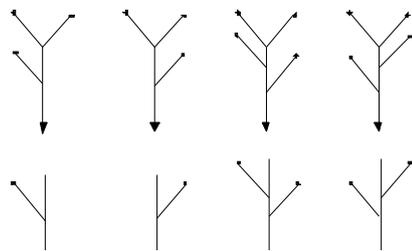


图 9 发生元

Fig. 9 The replacement generators

11 中 RSN-RB 和 RSN-RL 表示由 RSN 河网计算的分叉比和河长比,DEM-RB 和 DEM-RL 表示由 3sDEM 计算的分叉比和河长比。由 DEM 计算沿渡河的分叉比为 4.3,河长比为 2.37。由 RSN 模型模拟的分叉比和河长比分别为 4.62 和 2.49。RSN 河网的分叉比 4.62

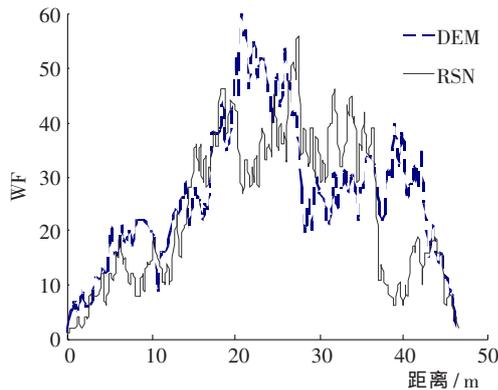


图10 宽度函数对比图

Fig.10 The width functions comparison

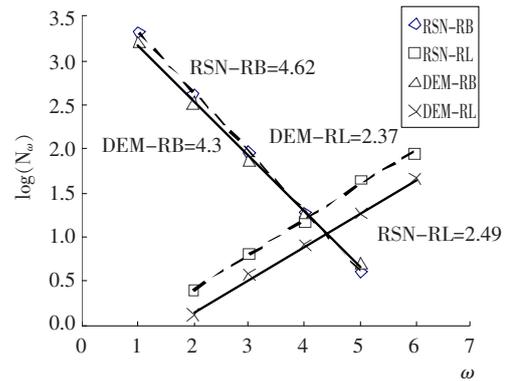


图11 分叉比和河长比插图

Fig. 11 The bifurcation ratio and channel length ratio

大于实测的 4.3,这是由于分叉角采用  $90^\circ$ 时,河网发展中减少了河网之间的兼并。RSN 河网的河长比 2.49 大于实测的 2.37 是因为生成河网时采用链长等长的原因。

## 5 结论

提出用符号代码标识 RSN 模型的初始元和发生元,由此代码生成的河网标识字符串保存了河网的拓扑信息,可以描述 RSN 图形,使其从理论图形转换到实际应用中。由代码河网可以容易得到河网等级、宽度函数、分叉比、河长比等地貌特征。RSN 河网模型假设链长相等,分叉角取  $90^\circ$ ,这两点存在不尽合理之处。这些问题可以通过调查链的分布规律和分叉角分布规律加以解决。此代码可以与 DEM 结合,以流域边界为界研究流域河网的分布规律,是今后需要进一步研究的课题。

参考文献:

[1] Mandelbrot, B. The Fractal Geometry of Nature [M]. New York;

Freeman, 1982.

- [2] Peano, G., Sur une Courbe, qui remplit toute une aire plane [J]. Mathematische Annalen, 1890,36:157-160.
- [3] Hilbert, D., Ueber die stetige Abbildung einer Linie auf ein Flächenstück [J]. Mathematische Annalen, 1891,(38):459-460.
- [4] Tarboton, D. Fractal river networks, Horton's laws and Tokunaga cyclicity [J]. Journal Hydrology, 1996,187:105-117.
- [5] Mandelbrot, B., Vicsek, T. Directed recursive models for fractal growth[J]. A Math. Gen., 1989,22:337-383.
- [6] Veitzer, Gupta. Random self-similar river networks and derivations of generalised Horton laws in terms of statistical simple scaling [J]. Water Resour Res, 2000,36:1033-1048.
- [7] Hung, C.-P., Wang, R.-Y. Coding random self-similar river networks and calculating geometric [J]. Hydrological Sciences-Journal des Hydrologiques, 2005,50(5).
- [8] 芮孝芳,石朋. 基于地貌扩散和水动力扩散的流域瞬时单位线研究[J]. 水科学进展, 2002,13(4):439-444. (RUI Xiaofang, SHI Peng. Study on WGIUH by means of geomorphologic and hydrodynamic dispersion[J]. Advance in Water Science, 2002,13 (4):439-444. (in Chinese))

## RSN String Codes and Its Application in Extraction of Geomorphological Characteristics of River System

DONG Shuhua<sup>1</sup>, GONG Xinglong<sup>2</sup>, XING Zhenxiang<sup>2</sup>

(1. Hydrology Bureau of Heilongjiang Province, Harbin 150001, China; 2. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In this paper, a self-similar river networks model was put forward, which uses string codes to identify the original unit and the generator unit of RSN (Random Self-similar River Network). These string codes are consist of four parameters: the river networks price, the node number in generator unit, the angle between adjacent chains, and the probability of replacement of generator unit. Set the basic part of limit distribution of water system as the generator unit, and then use the Width Function (WF) of RSN to construct a Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) based on WF, which is used to simulate hydrological response.

**Key words:** RSN code; general unit; generator unit; width function; GIUH