

【水文·泥沙】

基于动力网络的分布式运动波汇流模型

叶爱中¹, 夏 军^{1,2}, 王纲胜²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 在传统的运动波汇流模型基础上, 建立了基于动力网络的分布式运动波汇流模型。该模型将分布式水文模型中的产流单元与河网组合建立成无尺度网络模型, 汇流计算分成节点汇流与网络汇流两阶段完成, 根据积水面积的不同分成坡面汇流与河道汇流。应用结果表明: 所建模型的汇流计算更加接近流域的实际汇流过程, 理论更合理, 并充分利用了 DEM 所提供的地形地貌信息, 模拟效果较好。

关 键 词: 无尺度网络; 汇流; 分布式水文模型; 动力网络

中图分类号: P333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1379(2006)02-0026-03

随着大型网络的飞速发展, 动力网络的理论研究取得了重大的突破与进展。复杂动力网络是目前数学与各工程领域研究的热点。尤其是自 Watts D J 等人^[1]的小世界网络、Barabasi 和 Albert 的无尺度网络^[2]相继在《自然》、《科学》杂志上发表以来, 动力网络的数学理论研究日趋成熟与完善, 动力网络的应用研究也在各个领域展开, 如林国基等人就利用小世界网络研究 SARS 的传播问题^[3]。

分布式水文模型是现在国内外水文界研究的热点, 但现在的研究偏重于产流的研究, 往往认为汇流简单而对其研究较少^[4]。其实在分布式水文模型中, 汇流模型的合理与优劣程度直接影响着整个水文模型的模拟效果。分布式水文模型的产流是在网格或划分的子流域中进行的, 比集总模型要精细得多, 所以必须配备同样精细的汇流模型。现有的分布式模型常用的汇流方法是马斯京根法与运动波法, 对于产流单元间的汇流计算, 不同的模型做了不同的简化, 如将流域分层计算^[5]等。这些简化在很多情况下同流域中实际的汇流是不一致的。

笔者结合动力网络理论, 将河网建立成无尺度网络^[6], 并将网络分成坡面与河道两部分来进行汇流计算。在每个节点(产流单元)内用运动波计算, 节点间通过网络连接汇流计算。该法完全模拟实际的流域汇流路径与模式进行计算, 理论合理, 模拟结果较好。

1 动力网络简介

所谓动力网络就是具有拓扑结构和动力行为的大规模网络, 它是由大量的节点通过边的相互连接而构成的图^[7]。具有不同拓扑结构的复杂网络可以分为规则网络、随机网络、小世界网络、无尺度网络、演化网络等。规则网络是指人们常见的具有规则拓扑结构的网络; 随机网络是由一些节点通过随机布置的连接而组成的复杂网络; 小世界网络是一类特殊的复杂网络, 它具有大的串系数和小的平均最段距离; 无尺度网络是节点与节点之间的连接分布遵循幂次定律的网络。

2 河网与动力网络模型的结合

无尺度网络模型是 1999 年 Barabasi 和 Albert 在《科学》上发表提出的^[2]。无尺度网络的主要特点为: 度分布为幂指数的形式; 极少数节点有大量的连接, 而大多数节点只有很少的连接。某个节点的“度”即到达该节点的边的个数, 度分布即随机选一个节点具有 k 个连接的概率。动力网络度分布符合幂指数的形式, 即

$$P(k) = k^{-r} \quad (1)$$

式中: $P(k)$ 为网络中节点的概率; k 为节点的度; r 为参数, $r = 2 \sim 3$ 。

无尺度网络的建立具有增长性与倾向性选择的特点。

分布式水文模型产流计算是在 DEM (数字高程模型) 的栅格或由这些栅格划分的子流域上进行的, 通称这些栅格或子流域为产流单元, 这些单元通过河网连接成一个整体。不妨定义这些单元为节点, 河道为边。由于河网一般都是有向无环的, 因此产流单元与河网构成了一个无尺度网络。研究表明, 河网所生成的网络节点分布呈现幂指数规律, 并且河网的结构也符合无尺度网络的建立原则, 这样就可以将一个复杂的流域简化成一个无尺度的动力网络。

3 节点(栅格)内汇流计算

为使汇流模型简单可行, 首先假设忽略动量方程中的摩擦项, 认为摩擦比降 s_f 等于坡度比降 s_0 , 径流深度 h 采用下式计算^[8]:

收稿日期: 2005-09-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50239050); 高等学校博士点基金资助项目(20040486038)。

作者简介: 叶爱中(1978-), 男, 安徽安庆人, 博士, 主要研究方向为系统水文学。

$$h = \frac{A}{w} \quad (2)$$

式中: h 为断面平均深度, m ; A 为断面面积, m^2 ; w 为断面平均宽度, m 。

流速 v 则采用曼宁公式计算:

$$v = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: n 为糙率, 根据流域下垫面和土地利用类型的不同而选取相应的值^[9]。

结合式 (1)、式 (2), 则断面流量 Q 为

$$Q = Av \quad (4)$$

流域中的汇流一般分成坡面汇流与河道汇流。若有实测流域的河道资料, 则很容易区分坡面汇流与河道汇流, 但实际上很难得到实测的河道资料。笔者采用 DEM 直接提取河道数据, 通过汇水面积的大小来判断栅格是坡面汇流还是河道汇流, 即给一个阈值 N , 大于该阈值的认为是河道汇流, 小于该阈值的认为是坡面汇流。

对于坡面汇流, 断面平均宽度即为网格的宽度:

$$w = x \quad (5)$$

式中: w 为断面平均宽度, m ; x 为网格宽度, m 。

联立式 (2)~式 (5) 可得

$$Q = Av = \frac{1}{n} x^{-\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} A^{\frac{5}{3}} = A \quad (6)$$

$$\text{式中: } = \frac{1}{n} x^{-\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}}, = \frac{5}{3}。$$

对于河道汇流, 断面平均宽度是随水深变化的, 即随着流量的增大, 断面面积增大, 水深增大, 断面平均宽度增大, 故假设断面平均宽度与平均水深成线性关系, 即

$$w = ah \quad (7)$$

式中: h 为断面平均深度, m ; a 为参数, 由河道属性决定; w 为断面平均宽度, m 。

联立式 (2)~式 (4) 及式 (7) 可得

$$h = \left(\frac{A}{a}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$Q = Av = \frac{1}{n} a^{-\frac{1}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} A^{\frac{4}{3}} = A \quad (9)$$

$$\text{式中: } = \frac{1}{n} a^{-\frac{1}{3}} S_0^{\frac{1}{2}}, = \frac{4}{3}。$$

河道水流属于明槽非恒定渐变流, 其连续性方程为

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (10)$$

式中: A 为断面面积, m^2 ; t 为时间, s ; Q 为流量, m^3/s ; x 为流程, m ; q 为测向入流, m^3/s 。差分分解得

$$A_x + Q_t = q_x \quad (11)$$

在一个栅格中, 测向入流主要是净雨, 则

$$A_x + Q_t = RA \quad (12)$$

对于 t 时刻, 有

$$A = A_t - A_{t-1}, \quad Q = Q_0 - Q_1 \quad (13)$$

式中: A 为节点面积; A 为断面面积, m^2 ; t 为时间, s ; Q_1 为流入栅格的流量, m^3/s ; Q_0 为流出栅格的流量, m^3/s 。

流入栅格的流量 Q_1 等于上游汇入的网格流出流量的和, 流出栅格的流量 Q_0 可由下式计算:

$$Q_0 = \left(\frac{A_t + A_{t-1}}{2}\right) \quad (14)$$

将式 (13)、式 (14) 代入式 (12) 可得

$$(A_t - A_{t-1}) = [Q_1 - \left(\frac{A_t + A_{t-1}}{2}\right)] \frac{t}{x} + R \frac{A}{x} \quad (15)$$

令

$$f(A_t) = [Q_1 - \left(\frac{A_t + A_{t-1}}{2}\right)] \frac{t}{x} + R \frac{A}{x} - A_t + A_{t-1} \quad (16)$$

$$f(A_t) = -\frac{1}{2} \left(\frac{A_t + A_{t-1}}{2}\right) \frac{t}{x} - 1 \quad (17)$$

则牛顿迭代式为

$$A_t^{(k)} = A_t^{(k-1)} - \frac{f(A_t^{(k-1)})}{f'(A_t^{(k-1)})} \quad (18)$$

通过迭代可求出断面面积 A_t , 代入式 (14) 中即可以计算出栅格的出流 Q_0 。

4 节点(栅格)间汇流计算

利用文献 [10] 提出的提取河网的方法, 通过 DEM 能够得到每个网格的流向、水流累积值, 确定出每个栅格的流入、流出栅格。该法将整个流域建成了一个有向无环图, 能够保证流域中的每个栅格的水流都能够流到流域的出口。

取阈值为 -1 提取河网, 则提取的河网将包含流域中的所有栅格。河网的编码是从流域出口到流域边界逐河段编码的, 汇流计算则需要从河源向流域出口逐河段计算, 即按照编码从大到小计算。给出区分坡面与河道的阈值 N , 该阈值需要结合网格尺度的大小与流域特性确定。如在黄河流域的丘陵沟壑区 N 比较小, 平原区 N 则比较大。将该阈值与每个网格的水流累积值进行比较, 小于该阈值的按坡面汇流计算, 大于该阈值按河道汇流计算。如此即可计算出每个网格的入流与出流。一般流域中至少有流域出口的实测流量, 因此可通过实测流量来拟定模型中的参数。

5 应用

小理河是无定河上的一条支流, 属山溪性河流, 流域面积 807 km^2 。小理河流域属于黄土丘陵沟壑区^[11], 其出口控制站是李家河水文站(图 1)。笔者采用 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 网格的 DEM, 网格总数为 788 (由于流域边界及 DEM 精度的影响, 同实际流域大小存在误差)。建立的无尺度网格节点数为 788, 边数为 787, 度分布参数 $r = 2.1$ 。

1994 年 8 月小理河出现历史特大洪水, 洪峰超过了 $1000 \text{ m}^3/s$ 。笔者选取此月的日降水径流过程进行模拟, 产流采用的是时变增益模型。汇流模型中由于该流域多沟壑, 因此取坡面汇流阈值为 1 km^2 。模拟结果为: 效率系数为 0.825, 相关系数为 0.931, 水量平衡系数为 1.059 (图 2)。

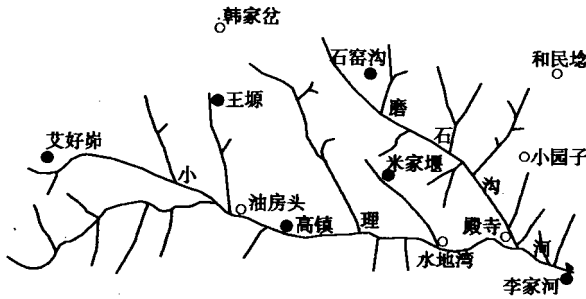


图 1 小利河流域站网布设

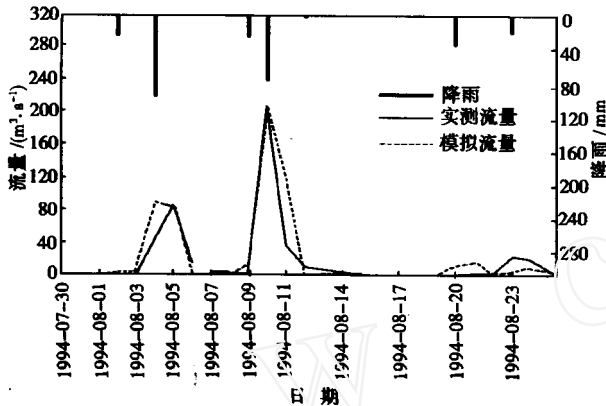


图 2 模型模拟结果

6 结论

复杂动力网络源于实际中的网络,通过最近 10 年的理论提升,已经有了一套完整的复杂动力网络理论体系。这套理论现在可以应用于实践,并在应用中得到发展。笔者尝试将动力网络应用于分布式水文模型的汇流中,将产流单元与河网组合建立一个无尺度网络模型,并应用运动波进行汇流计算。结果表明:所建模型比以前汇流模型的改进在于其汇流计算更加接近流域的实际汇流过程,理论更合理,并充分利用了 DEM 所提供的地形地貌信息。经验证该模型是可行的,模拟效果也较好。

参考文献:

[1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small - world [J]. Nature, 1998, (393).

[2] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, (286).

[3] 林国基,贾王旬,欧阳颀.用小世界网络模型研究 SARS 病毒的传播 [J]. 北京大学学报 (医学版), 2003, (5).

[4] 熊立华,郭生练.分布式流域水文模型 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004.

[5] 王纲胜,夏军,牛存稳.分布式水文模拟汇流方法及应用 [J]. 地理研究, 2004, (2).

[6] Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, (74).

[7] 吕金虎.复杂动力网络的数学模型与同步准则 [J]. 系统工程理论与实践, 2004, (4).

[8] 曹文洪,祁伟,郭庆超,等.小流域产汇流分布式模型 [J].

水利学报, 2004, (9).

[9] Podmore T H, Huggins L F. Surface Roughness Effect on Overland Flow [J]. Tr of the ASAE, 1980, (6).

[10] 叶爱中,夏军,王纲胜.基于数字高程模型的河网提取及子流域生成 [J]. 水利学报, 2005, (5).

[11] 许珂艳,王秀兰,赵书华,等.小利河流域产汇流特性变化 [J]. 水资源与水工程学报, 2004, (3).

【责任编辑 翟成亮】

(上接第 25 页)利津站大于 2 000 m³/s 的天数达 52 d,对河势影响较大,使河势向合理的发展方向发展,也验证了“大水出好河”的正确性。

表 4 2002 年调水调沙前与 2004 年调水调沙后利津站同流量水位对比

2002 年试验前 (6月 22 日 ~ 7月 7 日)		2004 年试验后 (9月 10 日 ~ 12月 28 日)		水位差 / m
流量 / (m ³ · s ⁻¹)	水位 / m	流量 / (m ³ · s ⁻¹)	水位 / m	
500	12. 27	500	11. 40	- 0. 87
455	11. 94	453	11. 65	- 0. 29
154	11. 65	157	11. 02	- 0. 63
164	11. 63	165	10. 92	- 0. 71
146	11. 60	142	10. 84	- 0. 76
148	11. 62	156	10. 89	- 0. 73

5 建议

(1)适当延长调水调沙的时间。应根据上游水库蓄水承受能力,多蓄一些水量后再进行调水调沙,调水调沙的时间应不少于 20 d,并且保证利津站大于 2 000 m³/s 的流量持续 20 d 以上,这样调水调沙效果更好。

(2)对调水调沙试验的效果分析要有一个统一的标准,数据要一致,以便于掌握和对外宣传调水调沙的作用。

(3)从 2005 年调水调沙转入正常运行,对于运行期间的有关指标也要进行统一观测,以便进一步检验调水调沙的可行性,为实现黄河的长治久安提供技术支持。

(4)经过 3 次调水调沙,西河口控导工程上首坝塌严重,建议对此工程未建坝岸进行完善,以发挥工程的整体效能。

(5)加强对小浪底水库运用后下游河道变化的研究。通过模型试验与实际运行情况进行对比,以了解是否存在冲上游淤下游的问题,特别是河口河段是否存在翘尾淤积。

参考文献:

[1] 黄河水利委员会.黄河首次调水调沙试验效果 [N]. 黄河报, 2002 - 10 - 17 (2).

[2] 廖义伟,赵咸榕. 2003 年黄河调水调沙试验 [J]. 人民黄河, 2003, (11).

[3] 李国英. 黄河第三次调水调沙试验 [J]. 人民黄河, 2004, (10).

[4] 刘自国,李肖强,白波. 黄河第三次调水调沙试验圆满结束 [N]. 黄河报, 2004 - 07 - 17 (1).

【责任编辑 翟成亮】