

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 06. 05

基于改进图论与水文模拟方法的河网水系 连通性评价模型

高玉琴, 汤宇强, 肖璇, 陈鸿玉, 刘云萍, 周桐

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为弥补图论法无法考虑水量动态传输能力的缺陷,在运用图论连通度理论评价河网水系连通状况的基础上,通过建立 HEC_HMS 水文模型模拟河道流量,构造表征河网水量交换能力的连通因子,构建了基于改进图论与水文模拟方法的河网水系连通性评价模型。秦淮河流域河网水系连通状况实例评价结果表明,秦淮河流域水系连通度由 2000 年的 0.0044 下降至 2010 年的 0.0029,且 2010 年水系连通度水平不高,符合实际情况,模型评价结果合理可靠。

关键词:河网;水系连通性;改进图论;水文模拟;评价模型;秦淮河流域

中图分类号:P343.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2018)06 - 0033 - 05

Evaluation model of river network hydrologic connectivity based on improved graph theory and hydrological simulation

GAO Yuqin, TANG Yuqiang, XIAO Xuan, CHEN Hongyu, LIU Yunping, ZHOU Tong

(College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To make up for the deficiency that graph theory can not consider the dynamic transmission capacity, the HEC_HMS hydrological model is set up to simulate the flow, and construct the connectivity factor that characterizes the exchange capacity of river network and the hydrologic connectivity evaluation model based on improved graph theory and hydrological simulation on the basis of using graph theory about connectivity degree to evaluate the connectivity condition of river network. The case evaluation results of the river network hydrologic connectivity in the Qinhuai River Basin indicate that the connectivity degree of Qinhuai River Basin decreased from 0.0044 in 2000 to 0.0029 in 2010, and the river network hydrologic connectivity level is not high in 2010, which is in line with the actual situation. The results of this evaluation model are reasonable and reliable.

Key words: river network; hydrologic connectivity; improved graph theory; hydrological simulation; evaluation model; Qinhuai River Basin

水系连通是河流生态保护与修复以及河流健康评价的重要指标,畅通的河网水系能够改善流域应对环境变化的能力,实现水资源的高效配置,是流域防洪抗旱、保障供水及水生态安全的重要基础^[1]。近年来,国内外学者逐步开始了对水系连通概念及其评价方法的研究。徐慧等^[2]将河流廊道理论和景观生态

学方法应用于太仓市水系规划前后水系连通度的对比分析中,用以验证城市水系规划的效果;Lane 等^[3]通过构建 CURM2D 水文模型,提出了可以用流域湿度分布来评价水系的景观水文连通性;Cui 等^[4]基于图论中的最短路径算法对低流量和高流量两种情况下的河网结构进行了优化;Karim 等^[5]通过 MIKE21

基金项目:国家自然科学基金(51309076);中央高校业务费科技前瞻性研究专项(2014B05814);江苏省优势创新平台(3014-SYS1401)
作者简介:高玉琴(1978—),女,副教授,博士,主要从事水利规划与水利经济研究。E-mail:178164576@qq.com

构建了水动力学模型来量化湿地与河流之间的连通程度;孟慧芳^[6]基于水流运动阻力与水文连通性,提出河流连通性计算模型,反映了河网水系的自然和社会属性对河流连通的影响;窦明等^[7]构建了描述水系连通形态和连通功能的两套指标体系,定量分析了二者之间的相关性,进一步探究了水系连通形态的变化对连通功能的影响。

目前的水系连通模型多数仅对水系结构进行分析,忽视水流的运动状态^[8-10];或基于水力学的评价方法,所需数据量大且不易获得,计算步骤烦琐^[11-12]。因此有必要完善现有水系连通评价方法,综合考虑影响水系连通程度的多方面、多层次因素。本文在文献[13]的基础上进一步改进评价方法,基于改进图论算法与水文模拟方法,计算连通因子 w ,以 w 表征河道的动态输水能力,实现对流域水系的动态输水连通与静态结构连通的综合评价。

1 评价模型的建立

基于水文模拟得到的河道径流量 q 计算连通因子 w ,以其作为边的权值得到加权邻接矩阵 B ,进而计算出判断矩阵 T ,将该判断矩阵中的各元素与传统图论得到的判断矩阵 S 中的各元素相除得到各顶点平均连通度 u_{ij} ,取均值作为水系整体连通度 U 。为使评价结果更具有可比性,进一步提出连通水平的概念,以更加直观地了解流域水系连通程度。

1.1 水量传输能力指标选取

可以表征水量传输能力的指标有年平均径流保证率、河道流量、河道水位、平均流速等^[14],这些指标从多角度反映了河网水系的水量传输能力。基于流动性和连续性两个角度对指标进行优选,用河道流量作为评价指标时,其值大于零表示水流连续,且值越大流动性越好,因此河道流量既能表征连续性也能表征流动性,是水量传输能力最直观的表征参数。此外,水系连通的目的是实现特定的服务功能,包括防洪、供水、排污、通航等,而这些功能均要求河网具有较大的流量,以达到强化洪涝外排能力、增大供水量、促进以清释污等效果,因此选用河道流量作为水量传输能力指标^[15]。

1.2 模拟流量基准选取

河道流量采用水文模型 HEC_HMS 模拟得到,该

模型通过划分子流域的方式充分考察流域下垫面的区域性差异,各子流域独立设置参数并进行径流模拟,然后再以子流域为单位进行产汇流演算得到流域出口的径流过程^[16],充分考虑了地形、土壤含水率、土壤类别以及土地利用方式等因素对径流模拟的影响,模拟结果符合实际情况,合理可信。

通过对数场降雨进行模拟,得到河网各节点处的峰值流量,运用上述方法计算连通度,发现大部分数值偏小且集中分布在较小范围内,无法较好地基于连通水平对连通程度进行分级。此外,为充分发挥河道潜在的排涝、排污能力,需要尽可能提高设计降雨标准以检验河道最大过流能力,但需要满足区域内防洪要求,因此在模拟河网产汇流过程时,选用满足一定防洪标准的典型设计降雨过程作为模型输入,将得到的峰值流量作为水系连通评价的流量基准。城市与乡村防护区的防洪等级和标准如表 1 所示。

综合考虑城市和农村地区的防洪要求,选取重现期为 50 年一遇的设计洪水作为防洪标准,可满足一般城市和重要乡村的防洪需求。假定设计洪水与设计暴雨同频率,本文采用适线法绘制经验频率曲线,并用同倍比放大法计算经验频率为 2% 的设计降雨过程。

1.3 连通度计算

1.3.1 基于水文模拟方法的连通因子计算

将 HEC_HMS 模型模拟得到的河网各节点处的峰值流量作为水量传输能力指标值。通过大量实例运算,发现若直接将流量值替换邻接矩阵中的元素,会由于邻接矩阵本身包含的数据量巨大,且含有大量乘方运算,导致程序运行缓慢、容易超出计算能力而报错,因此,进一步构造连通度因子 $w_{ij} \in (0,1)$,用该连通度因子来表征连通程度的好坏,计算公式为

$$w_{ij} = 1 - \frac{1}{e^{q_i}} \tag{1}$$

式中 q_i 为顶点 i 处河道峰值流量, m^3/s 。当 $q_i = 0$ 时, $w_{ij} = 0$,表示顶点 i 与顶点 j 完全不连通;当 $q_i \rightarrow +\infty$ 时, $w_{ij} = 1$,表示顶点 i 与顶点 j 完全连通; q_i 越大则 w_{ij} 越接近于 1。

1.3.2 流域平均连通度计算

将连通度因子 w_{ij} 替换邻接矩阵中的元素,得

表 1 防洪保护区的防洪等级和防洪标准

防护等级	城市防护区			乡村防护区		
	常住人口/万人	当量经济规模/万人	防洪标准/a	人口/万人	耕地面积/万 hm ²	防洪标准/a
I	≥150	≥300	≥200	≥150	≥20	[50,100)
II	[50,150)	[100,300)	[100,200)	[50,150)	[6.67,20)	[30,50)
III	[20,50)	[40,100)	[50,100)	[20,50)	[2,6.67)	[20,30)
IV	<20	<40	[20,50)	<20	<2	[10,20)

到改进后的邻接矩阵 $B_{n \times n} = (b_{ij})_{n \times n}$, 则判断矩阵

$T_{n \times n} = (t_{ij})_{n \times n}$, $t_{ij} = \sum_{k=1}^{n-1} b_{ij}^k$, 任意两河流节点间的连通度为

$$u_{ij} = \frac{t_{ij}}{s_{ij}} \tag{2}$$

式中: n 为节点数; t_{ij} 为顶点 i 和顶点 j 之间连接长度为 1、2、 $\cdots$ 、 $n-1$ 的所有路径的连通度因子之和; s_{ij} 为顶点 i 和顶点 j 之间连接长度为 1、2、 $\cdots$ 、 $n-1$ 的所有路径的总数, $s_{ij} \neq 0$ 。

节点间连通度 u_{ij} 可以衡量流域中任意两河流节点间的连通性, 对流域整体来说, 对所有节点间连通度求均值可得到流域平均连通度 U :

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}}{n^2} \tag{3}$$

1.3.3 连通水平计算

为使评价结果更具有可比性, 本文提出连通水平的概念。将研究区历史最大降雨过程作为 HEC_HMS 模型输入, 得到历史最大连通度, 以该值作为标准连通度 U_s , 则水系连通水平 L 可表示为

$$L = \frac{U}{U_s} \times 100\% \tag{4}$$

综上, 基于改进图论与水文模拟方法的河网水系连通评价模型的主要特点有:

- a. 综合考虑城市和农村地区的防洪要求, 选取一定重现期下的设计洪水作为防洪标准, 推求相应设计降雨作为模型输入。
- b. 将表征水量传输能力的指标——河道流量 q , 转化为邻接矩阵中的元素, 使邻接矩阵不仅能反映河网节点间是否连通, 还能反映连接通道的过流能力。
- c. 进一步提出了连通水平的概念及计算方法, 可直观反映出区域在某段时间内的连通程度。

2 实例验证

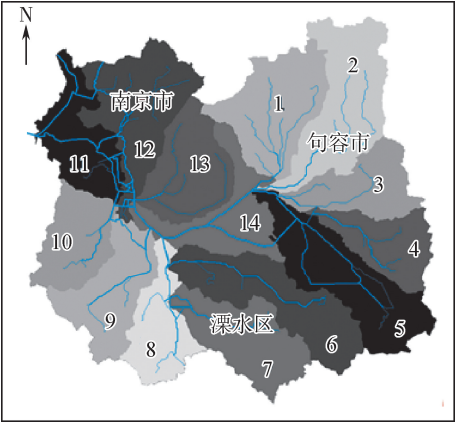
2.1 秦淮河流域概况

秦淮河流域位于长江下游江苏省境内, 流域面积 2631 km², 地势由东南向西北倾斜。流域地处亚热带湿润、半湿润季风气候区, 四季分明, 降水丰沛, 汛期在 5—9 月, 平均降雨量为 652 mm, 占年均降水量的 63%。秦淮河全长 110 km, 干支流纵横交错, 有溧水区、句容市两源, 两源在江宁县西北村汇为秦淮河干流, 流至江宁区东山街道又分为两支: 北支为主河道, 过市区后于三汊河口入长江; 西支为秦淮新河, 经西善桥至金胜村入长江^[17]。

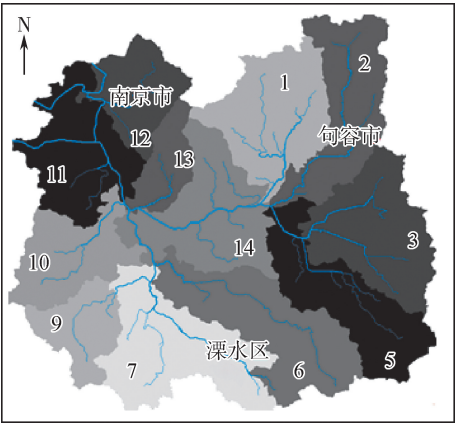
2.2 数据处理

2.2.1 数字水系图获取

分别选取 2000 年和 2010 年的高程数据, 基于 ArcGIS 软件中水文分析工具箱, 对数据执行填洼、流向、流量、栅格计算器、栅格河网矢量化等命令, 提取数字河流网络, 并对照 Google Earth 影像图进行适当修正, 进一步概化为包含 40 个顶点的拓扑结构图。图 1 为秦淮河流域数字水系, 图 2 为 2010 年研究区拓扑结构。



(a) 2000 年



(b) 2010 年

图 1 秦淮河流域数字水系

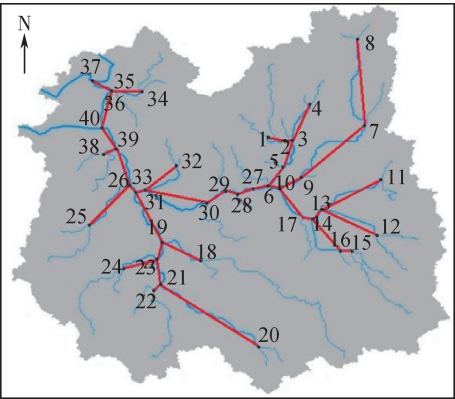


图 2 2010 年秦淮河流域拓扑结构

2.2.2 洪水过程模拟

- a. HEC_HMS 模型率定与验证。对 HEC_HMS

模型构建过程中使用的大量估算参数进行率定与验证^[18],秦淮河流域 HEC_HMS 模型模拟评价指标如表 2 所示。由表 2 可见,率定期 3 场洪水的洪量及洪峰相对误差均在 20% 以内,Nash 系数及相关系数均大于 0.7;验证期 4 场洪水的洪量及洪峰相对误差基本控制在 20% 以内,Nash 系数及相关系数均大于 0.7,模拟值与实测值吻合较好,模拟的峰值流量可用于评价模型的计算。

b. 2000 年和 2010 年洪水过程模拟。对秦淮河流域武定门闸 1986—2006 年年最大降雨量进行排序,选用皮尔逊Ⅲ型曲线进行水文频率计算,采用矩法计算曲线参数,得到 $C_s = 1.63$ 、 $C_v = 0.68$ 、 $\bar{x} = 213.16$,通过查询皮尔逊Ⅲ型曲线离均系数 ψ 值表,可计算得到 $P = 2\%$ 时的设计降雨量为 618.08 mm。选择洪峰流量最大的 198606 次洪水作为最不利降雨过程,采用同倍比放大法得到 50 年一遇设计降雨过程。将放大后的降雨过程导入 HEC_HMS 模型,即可模拟全流域相应的流量过程,以其峰值流量作为该水文要素的水量传输能力指标值。

2.2.3 连通度及连通水平计算

由图论连通度计算可得,2000 年和 2010 年秦淮河流域河网水系连通度均为 2。由此可见,仅使用图论对秦淮河流域进行水系连通评价时,结论为流域水系连通水平在 10 年间无显著变化,这显然不符合实际情况。运用本文提出的评价模型计算,秦淮河流域水系 2010 年连通度 $U_{2010} = 0.0029$,该值代表了流域在满足防洪要求下的连通状态。根据秦淮河流域内有观测记录以来的降雨资料,最大降雨过程发生在 2007 年 7 月,总降雨量为 729.2 mm,以该历史最大降雨过程作为 HEC_HMS 模型输入,可求得标准连通度 $U_s = 0.0053$,则 $L_{2010} = 54.7\%$ 。采用同样的方法,可得 $U_{2000} = 0.0044$, $L_{2000} = 83.0\%$ 。

表 2 秦淮河流域 HEC_HMS 模型模拟评价指标

率定期或验证期	年份	洪量相对误差/%	洪峰相对误差/%	峰现滞时/d	Nash 系数	相关系数
率定期	1996	7.72	11.36	0	0.82	0.91
	1998	9.72	-18.82	1	0.92	0.96
	2002	15.04	18.66	0	0.90	0.97
验证期	1991	-6.67	23.97	0	0.73	0.95
	1999	-21.59	-24.63	1	0.88	0.94
	2003	11.73	16.37	1	0.83	0.96
	2004	-15.52	-13.91	1	0.80	0.93

表 3 秦淮河流域 2000 年和 2010 年水系结构指标

年份	河流长度/km				河网密度/ (km·km ⁻²)	水面率/%
	一级水系	二级水系	三级水系	河流总长		
2000	291.6	221.14	204.89	717.63	0.27	0.33
2010	291.19	125.59	105.77	522.55	0.20	0.21

2.3 结果分析

表 3 为秦淮河流域 2000 年和 2010 年水系结构指标统计,可以看出,从 2000—2010 年秦淮河流域水系的河流长度、河网密度以及水面率均呈缩减趋势,水系连通性变差。基于本文提出的评价模型的计算结果可知,秦淮河流域水系连通度由 2000 年的 0.0044 下降至 2010 年 0.0029,水系连通水平由 83.0% 下降至 54.7%,2010 年水系连通度处于较低水平,这与水系结构指标变化情况一致,说明本文提出的评价模型是合理、可靠的。

秦淮河流域 2000 年和 2010 年水系连通性变差的原因,可能与该期间秦淮河流域内以南京为代表的城市群加速推进城市化进程有关,剧烈的人类活动导致流域不透水面积增加,部分天然河道萎缩甚至消失,土地覆被退化,区域防洪、供水与生态安全受到严重威胁,流域连通水平受到极大影响。

3 结 语

进入 21 世纪以来,图论方法被国内学者不断应用于水系连通评价领域,本文模型利用水文模型模拟出的峰值流量对边赋权值,将河网结构特性与河道实际水文特性相结合,避免了用传统图论方法进行水系连通评价过程中出现的“连”却不“通”的现象,使评价结果更符合实际情况。较目前流行的水流阻力与图论相结合的评价方法而言,本文模型计算过程简单,数据易获取,有较大的推广意义。

本文对水系连通评价方法进行了探索与研究,但仍存在不足,未将该方法与水资源调配、洪旱灾害、水生态环境等实际问题相联系,因此,可进一步进行水系连通性与可调配水量、洪涝风险因子、水质变化规律的相关性分析,验证评价模型的准确性。此外,2000—2010 年期间水系连通性是否一直呈现下降趋势,还有待进一步分析研究。

参考文献:

[1] 崔国韬,左其亭,窦明. 国内外河湖水系连通发展沿革与影响[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(4):73-76. (CUI Guotao, ZUO Qiting, DOU Ming. Development evolution and influences of the interconnected river system network at home and abroad [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9 (4) : 73-76. (in Chinese))

[2] 徐慧,徐向阳,崔广柏. 景观空间结构分析在城市水系规划中的应用[J]. 水科学进展,2007,18(1):108-113. (XU Hui, XU Xiangyang, CUI Guangbai. Application of landscape spatial structure analysis to urban river system planning [J]. Advances in Water Science, 2007, 18 (1) : 108-113. (in Chinese))

[3] LANE S N, REANEY S M, HEATHWAITE A L. Representation of landscape hydrological connectivity using a topographically driven surfaceflow index [J]. Water Resources Research, 2009, 45 (8) : 1-10.

[4] CUI B S, WANG C F, TAO W D, et al. River channel network design for drought and flood control: a case study of Xiaoqinghe River Basin, Jinan City, China [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90 (11) : 3675-3686.

[5] KARIM F, HENDERSON A K, WALLACE J, et al. Modelling wetland connectivity during overbank flooding in a tropical floodplain in north Queensland, Australia [J]. Hydrological Processes, 2012, 26 (18) : 2710-2723.

[6] 孟慧芳. 鄞东南平原河网区水系结构与连通变化及其对调蓄能力的影响研究[D]. 南京:南京大学,2014.

[7] 窦明,靳梦,张彦,等. 基于城市水功能需求的水系连通指标阈值研究[J]. 水利学报,2015,46(9):1089-1096. (DOU Ming, JIN Meng, ZHANG Yan, et al. Research on the threshold of interconnected river system network's indexes based on demand of the city's water function [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (9) : 1089-1096. (in Chinese))

[8] 李丽,徐文,叶长青,等. 基于联系数的河湖水系连通等级评价模型[J]. 中国农村水利水电,2017(9):93-99. (LI Li, XU Wen, YE Changqing, et al. Research on the interconnected river system network evaluation model based on connection number [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017 (9) : 93-99. (in Chinese))

[9] 赵进勇,董哲仁,杨晓敏,等. 基于图论边连通度的平原水网区水系连通性定量评价[J]. 水生态学杂志,2017,38(5):1-6. (ZHAO Jinyong, DONG Zheren, YANG Xiaomin, et al. Connectivity evaluation technology for plain river network regions based on edge connectivity from graph theory [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38 (5) : 1-6. (in Chinese))

[10] 靳梦. 郑州市水系连通的城市化响应研究[D]. 郑州: 郑州大学,2014.

[11] 徐光来,许有鹏,王柳艳. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J]. 水科学进展,2012,23(6):776-781. (XU Guanglai, XU Youpeng, WANG Liuyan. Evaluation of river network connectivity based on hydraulic resistance and graph theory [J]. Advances in Water Science, 2012, 23 (6) : 776-781. (in Chinese))

[12] 陈星,许伟,李昆朋,等. 基于图论的平原河网区水系连通性评价:以常熟市燕泾圩为例[J]. 水资源保护,2016,32(2):26-29. (CHEN Xing, XU Wei, LI Kunpeng, et al. Evaluation of plain river network connectivity based on graph theory: a case study of Yanjingwei in Changshu City [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (2) : 26-29. (in Chinese))

[13] 高玉琴,肖璇,丁鸣鸣,等. 基于改进图论法的平原河网水系连通性评价[J]. 水资源保护,2018,34(1):18-23. (GAO Yuqin, XIAO Xuan, DING Mingming, et al. Evaluation of plain river network hydrologic connectivity based on improved graph theory [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (1) : 18-23. (in Chinese))

[14] 姜翠玲,王俊. 我国生态水利研究进展[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):168-175. (JIANG Cuiling, WANG Jun. Progress in ecological water conservancy research in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (5) : 168-175. (in Chinese))

[15] 孟祥永,陈星,陈栋一,等. 城市水系连通性评价体系研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(1):24-28. (MENG Xiangyong, CHEN Xing, CHEN Dongyi. Evaluation system of urban water system connectivity [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42 (1) : 24-28. (in Chinese))

[16] 杨晓敏. 基于图论的水系连通性评价研究:以胶东地区为例[D]. 济南:济南大学,2014.

[17] 王怀志,高玉琴,袁玉,等. 基于 SWAT 模型的秦淮河流域气候变化水文响应研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):81-87. (WANG Huaizhi, GAO Yuqin, YUAN Yu, et al. Hydrological responses to climate change in Qinhuai River Basin based on SWAT model [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28 (1) : 81-87. (in Chinese))

[18] 袁玉,高玉琴,吴锡. 基于 HEC_HMS 水文模型的秦淮河流域圩垸式防洪模式洪水模拟[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2015,37(5):34-39. (YUAN Yu, GAO Yuqin, WU Xi. Flood simulation of flood control model for polder type based on HEC-HMS hydrological model in Qinhuai River Basin [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2015, 37 (5) : 34-39. (in Chinese))

(收稿日期:2017-11-13 编辑:熊水斌)