

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.01.04

基于改进图论法的平原河网水系连通性评价

高玉琴¹, 肖璇¹, 丁鸣鸣², 汤宇强¹, 陈鸿玉¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京市水务局, 江苏 南京 210036)

摘要:基于改进的图论法, 概化河网水系为图模型, 考虑水量对河网水系连通性的影响, 以反映流域水量指标的连通因子为权值, 构建水系连通度定量评价模型, 应用 MATLAB 计算河网加权连通度, 实现对河网水系连通性的定量评价。以秦淮河流域为例, 构建 HEC-HMS 水文模型, 模拟流域短期和长期洪水过程, 分析不同规模洪水过程下流域河网水系的连通程度, 基于连通度定量评价结果对连通性进行等级划分。结果表明洪量与连通度基本符合线性关系; 短期洪水过程与长期洪水过程相比的连通等级较差; 构建的评价模型具有良好的适用性和可靠性。

关键词:改进图论法; 平原河网; 水系连通性; 水量动态评价

中图分类号: TV212

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2018)01-0018-06

Evaluation of plain river network hydrologic connectivity based on improved graph theory

GAO Yuqin¹, XIAO Xuan¹, DING Mingming², TANG Yuqiang¹, CHEN Hongyu¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Water Conservancy Bureau of Nanjing, Nanjing 210036, China)

Abstract: Based on improved graph theory, the river network was generalized by a graph model. Considering the influence of water quantity on the hydrologic connectivity of river network, the connectivity factor reflecting the water quantity index was taken as the weight and the quantitative evaluation model of hydrologic connectivity degree was built. MATLAB was used to calculate the river network weighted connectivity degree, and the quantitative evaluation of river network hydrologic connectivity was conducted. Taking the Qinhuai River Basin as an example, the HEC-HMS hydrological model was established and the short-term and long-term floods were simulated. The connectivity degree of the river network in the basin under different scale floods was analyzed. The connectivity was graded according to the evaluation results. The results show that the flood volume and the connectivity degree are basically linear. The short-term flood has a poor connectivity degree compared to the long-term flood. The evaluation model has good applicability and reliability.

Key words: improved graph theory; plain river network; hydrologic connectivity; water quantity dynamic evaluation

水系连通格局的变化会影响水循环的路径与河流的调蓄能力, 从而影响河网水系连通功能的发挥。当今社会经济的高速发展在很大程度上依赖于河网水系的连通功能, 因此, 水系连通性对区域经济发展的作用不容小觑^[1]。

水系连通性评价方法经历了从定性向定量化发展的过程, 国内对水系连通性评价研究随着防洪减灾、水资源调配及改善水环境的需求日益增加而越来越受到重视, 然而这方面的研究尚处于起步阶段。图论法是利用图的性质来研究各种系统的数学方

法,由于其可实现对河网水系连通性的定量评价,使其在该方面的应用日趋增加。邵玉龙等^[2]将河网水系中所有节点连通度的均值作为水系连通度分析了苏州市中心区河网连通性的变化;徐光来等^[3]将河道水流阻力作为边的权值构建河道水流畅度矩阵,取所有顶点水流畅度的均值作为河网加权连通度;杨晓敏^[4]基于传统图论方法对原始状态、胶东调水工程及引黄济青工程下胶东地区的水网进行连通性评价;陈星等^[5]分类应用图论,对水系规划前、后的常熟市燕泾圩平原河网的结构连通性和水力连通性进行定量评价研究;Tibor 等^[6]基于图论的网络分析功能搜索河流中的关键河段,以对其进行保护和环境管理,并进一步借助图论量化淡水生态系统栖息地的连通性,证明了图论可用于淡水生态资源的保护;Pedro 等^[7]使用图论的相关理论来确定影响流域结构连通性的障碍,进而判断哪些障碍应优先清除以便更加有效地提高水系整体连通度。本研究以图论法为基础,做出改进,通过计算改进图论法的连通度来反映河网水系的连通程度。

1 基于改进图论法的河网水系连通评价模型的建立

1.1 基本原理

传统图论法首先由一个图中的顶点与顶点间的邻接关系建立邻接矩阵,然后,通过计算该图中任意两顶点之间所有连接路径数之和构建判断矩阵,通过判定准则判断该图是否连通。连通图去掉某些点后可能变为非连通图,由连通图变为非连通图需要去掉的最少顶点数即被定义为该图的点连通度,传统图论方法的连通度只能是自然数^[8]。

图1为河网图模型 $G(V,E)$ 概化图,可用邻接矩阵 $A(a_{ij})_{n \times n}$ 表示, a_{ij} 是顶点 V_i 和 V_j 之间直接相连的所有边数。若一条河链不仅可用点对 (i,j) 表示,也可用点对 (j,i) 表示,则该图为无向图,否则为有向图^[9]。对于有向图,边的方向可用来表示河流水流的方向,图1为无向图。根据图的判定准则,若判断矩阵 $S(s_{ij})_{n \times n} = \sum_{k=1}^{n-1} A^k(a_{ij}^{(k)})$ 中全部为非0元素,则图 $G(V,E)$ 为连通图,否则为非连通图。图1的矩阵表示为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

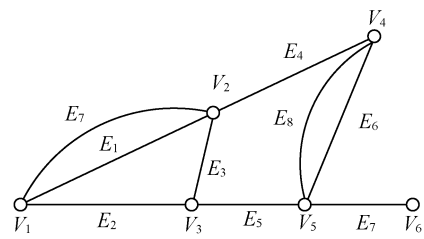


图1 河网水系模型 $G(V,E)$ 概化

1.2 评价模型的建立

现有的图论法只能反映河道之间是否相连,无法体现河网水系之间动态的水量传输能力,也无法分析流域水量的大小对水系连通性的影响,流域水量与连通度之间的定量关系更是无从得知。针对上述不足做出改进,首先基于流域水量计算连通因子,建立加权邻接矩阵 B ;然后,计算任意两顶点之间所有连接路径的连通因子之和构建判断矩阵 T ,结合传统图论中建立的判断矩阵 S ,计算顶点平均连通度 D ;水系整体连通度 Z 按所有顶点平均连通度的均值计算。改进图论法的主要特点有:①基于河道中的水量,以连通因子作为边的权值建立加权邻接矩阵,考虑了河道中水量对水系连通性的影响;②通过比较河网水系中相邻节点间连通因子的大小,反映河网中水流的流动趋势,进而可以体现河流间动态的水量传输能力;③两顶点之间的连通程度用两顶点之间所有连接路径的平均连通度表示,即:两顶点之间所有连接路径的连通因子之和除以两顶点之间所有连接路径之和,用来反映河道中水量大小对水系连通性的影响。

对于赋权图,可用加权邻接矩阵 $B(b_{ij})_{n \times n}$ 表示, b_{ij} 表示顶点 V_i 和 V_j 之间的边权值。因平原河网地区的水流方向多变,若作为有向图研究,则过程烦琐、复杂,本研究中暂不考虑流向,将水系网络图概化为无向图。此时,判断矩阵 $T(t_{ij})_{n \times n} = \sum_{k=1}^{n-1} B^k(b_{ij}^{(k)})$, t_{ij} 表示从顶点 V_i 到顶点 V_j 长度为 $k(1,2,\dots,n-1)$ 的连通因子之和。

1.2.1 水量指标选取

研究发现,如果河流水系能够最大化的拦蓄水量,一方面可以使流域内的水资源得到合理调配,河流水环境净化功能和物质能量传递效率均会有所提高,洪灾防御能力也会有所增强;另一方面,可以改善由于水利工程建设导致的水系连通性变差的情况,为流域内水利规划的进行和生态恢复工作的落实提供保障^[10-11]。可见,河道中水量的大小对于河网水系连通功能的发挥起着重要作用。

表征河道中水量大小的指标很多,有流量 Q 、径流总量 W 、径流模数 M 、径流深 R 和径流系数 α

等^[12]。流量反映的是单位时间内通过某一过水断面的水量;径流总量则是一个累计值,反映的是时段内通过某一过水断面的总水量;径流模数指的是流域面积对于形成流域出口断面流量的平均贡献度;径流深指径流总量全部摊铺在流域面积时所形成的平均水深;径流系数则是时段径流深与时段降雨深的比值。

降雨是形成地表径流的重要因素,而降水量并不能完全形成径流,要有一部分损失,比如下渗、蒸发等。径流系数可以体现出降雨和径流的这种相对关系,从而综合反映流域内各种自然因素对径流形成的影响,而其他指标只能反映地表径流这一结果,无法体现形成径流的原因,因此,选择径流系数作为反映河道水量的指标更切合实际。

1.2.2 边权值的确定

由于径流系数 $\alpha \in (0,1)$, 避免了选用流量等数值过大的指标而导致计算过程复杂、计算时间过长的问題。可将径流系数作为边权值来表征河网图模型 $G(V,E)$ 的边权值,因此,边权值 b_{ij} 的计算公式为

$$b_{ij} = \frac{R_i}{P_i} \tag{1}$$

其中

$$W_i = \int_0^{\Delta t} Q_i dt$$

$$R_i = \frac{W_i}{A_1}$$

式中: W_i 为河网节点处的洪量, m^3 ; Q_i 为河网节点处的瞬时流量, m^3/s ; Δt 为研究时段, h ; R_i 为河网节点处的径流水深, mm ; A_1 为研究区域面积, km^2 ; P_i 为时段河网节点处的降雨深度, mm , 由泰森多边形法来确定, 该法假定流域内各点的降雨量由其距离最近的雨量站代表。

1.2.3 河网加权连通度计算

各顶点连通度用顶点 V_i 与顶点 V_j 之间所有连接路径的平均连通度表示, 计算公式为

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

式中: D_{ij} 为各定点连通度; s_{ij} 为顶点 V_i 到顶点 V_j 之间长度为 $1, 2, \dots, n-1$ 的路径数之和; t_{ij} 为顶点 V_i 到顶点 V_j 之间长度为 $1, 2, \dots, n-1$ 的边权值之和。

水系整体连通度 Z 按照所有顶点平均连通度的均值计算, 计算公式为

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

1.3 评价等级的确定

基于水系整体连通度的大小及河道水量满足工农业和生态需水量的程度^[13], 对连通性进行等级划分, 将水系连通水平划分为 5 个等级: 好、较好、一般和差, 各等级含义见表 1。

表 1 水系连通性各评价等级含义

评价等级	等级含义
好	水系连通水平较高, 能满足工、农业和生态需水量要求, 物质能量传递效率和河流环境净化效率高, 洪灾防御能力强
较好	水系连通水平高, 能满足工、农业和生态需水量要求, 物质能量传递效率和河流环境净化效率有所下降, 洪灾防御能力降低
一般	水系连通水平存在缺陷, 基本满足工、农业和生态需水量要求, 人水关系紧张
差	水系连通水平低, 必须采取流域水量的优化调度或修建水利工程才可以满足工、农业和生态需水量要求

2 案例分析

2.1 研究区概况

秦淮河流域位于长江下游江苏省境内, 坐标为东经 $118^{\circ}39' \sim 119^{\circ}19'$, 北纬 $31^{\circ}34' \sim 32^{\circ}10'$, 流域面积约 $2\,631\,km^2$, 地形为构造盆地, 周高中低, 四周为丘陵山地, 腹部为低洼圩区。流域属亚热带湿润、半湿润季风气候区, 降水年内分配不均匀, 年际变化大, 多年平均降水量 $1\,047.8\,mm$ 。秦淮河有两源, 北源为主要流经句容市境内的句容河, 南源为发源于溧水县东庐山的溧水河。两河在江宁区西北村汇合, 成为秦淮河干流, 流至江宁东山镇时分为两支流, 北支沿主河道流经南京城区从武定门闸流出, 西支为秦淮新河, 向西经铁心桥、西善桥从秦淮新河闸流出, 两支均汇入长江(图 2)。

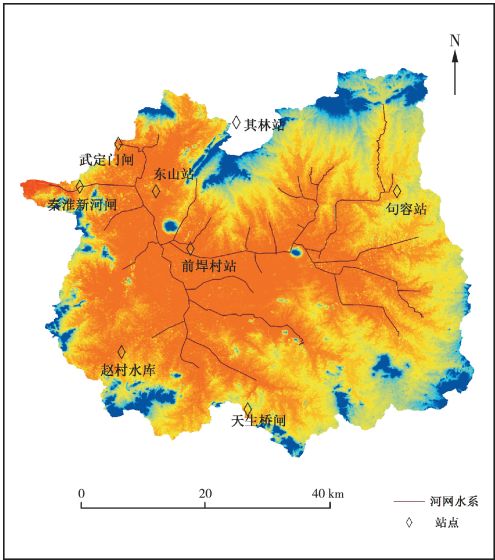


图 2 秦淮河流域河流分布

2.2 数据处理

a. 研究区雨量站泰森多边形的建立。基于 GIS 进行水系提取并将研究区划分为 18 个子流域,由流域内雨量站的分布情况建立泰森多边形,1 个子流域大部分或者全部被 1 个泰森多边形覆盖的,取该多边形内雨量站的实测值作为子流域的降雨数据^[12],秦淮河流域子流域划分及雨量站泰森多边形见图 3。

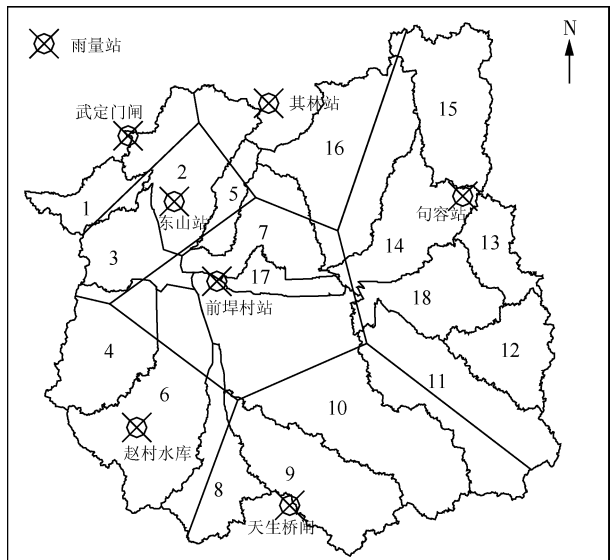


图 3 秦淮河流域子流域划分及雨量站泰森多边形

b. 研究区数字水系图的获取。由于基于 GIS 提取的水系与实际河网的分布有偏差,故将提取后的河网水系导入 Google Earth 中进行修正,最终得到流域数字水系图,并进一步将其概化为包含 25 个顶点的主要河网结构拓扑图。通过对秦淮河流域在研究时间范围内多年水系图的分析,发现主要河网结构变化不大,故本文忽略主要河网结构的变化,在研究期限内采用相同的主要河网水系图(图 4)。

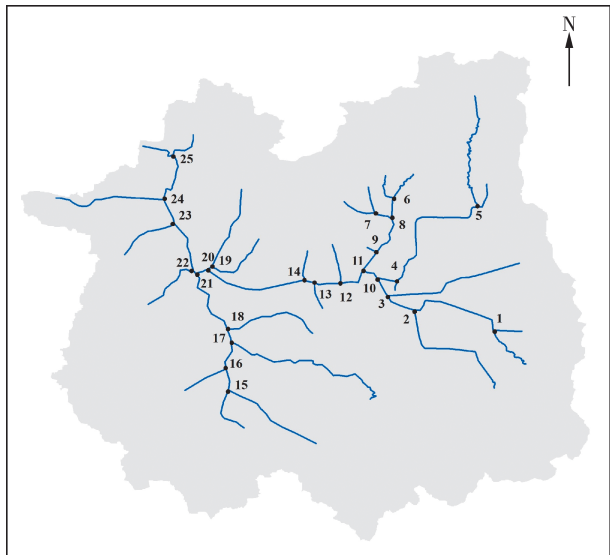
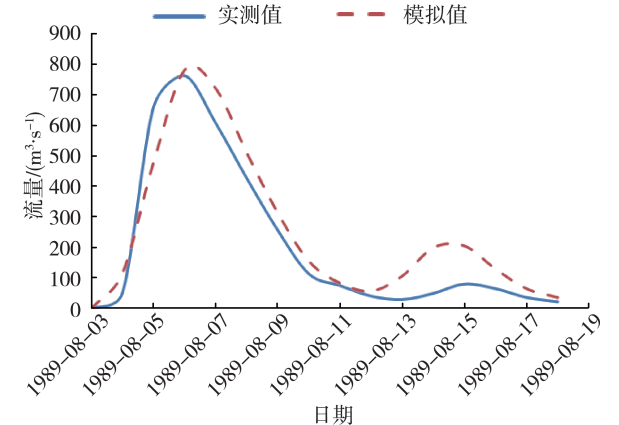


图 4 研究区主要河网数字水系

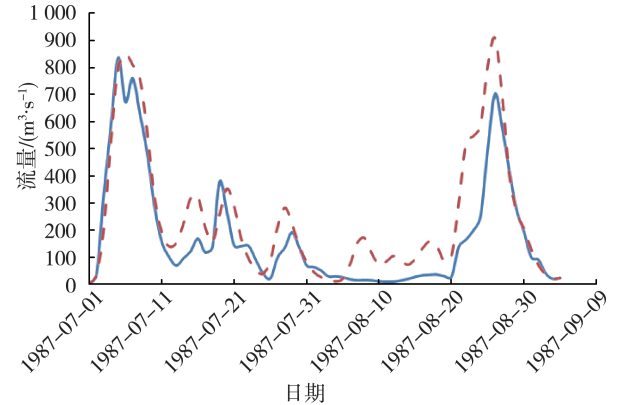
2.3 洪水过程模拟

大量研究表明 HEC-HMS 水文模型可较好地模拟秦淮河流域短期及长期洪水过程^[14-16],故采用 HEC-HMS 水文模型进行水文模拟。模型率定期和验证期的洪量、洪峰的相对误差均在 20% 以内, Nash 系数及相关系数均大于 0.8,且长期洪水模拟过程的 Nash 系数也均在 0.7 以上^[14]。

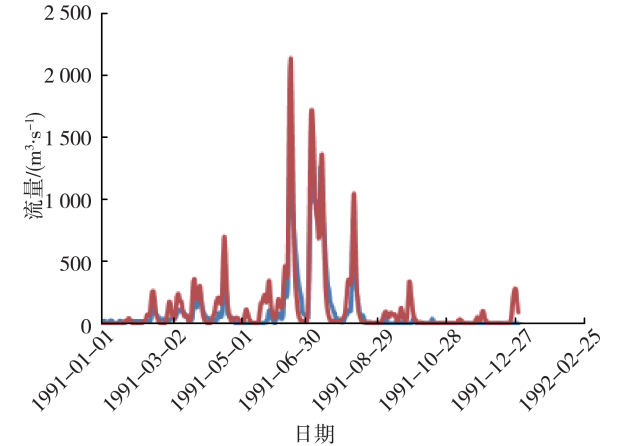
在研究时间范围内选取 3 次短期洪水过程和 4 次长期洪水过程进行研究。短期洪水过程的洪号分别为 199603、198908 和 199106,长期洪水过程的洪号分别为 19870701-0904、20030620-1020、199105-199110 和 1991,部分洪水过程模拟值与实测值对比见图 5。



(a) 198908 洪水过程



(b) 19870701-0904 洪水过程



(c) 1991 洪水过程

图 5 部分洪水过程模拟值与实测值对比

表 2 研究区在各个降雨过程下的水系整体连通度

洪水类型	洪号	洪峰模拟值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪量模拟值/mm	Nash 系数	连通度
短期洪水	19960326	169.4	19.15	0.758	0.0013
	19890803	782.7	138.04	0.888	0.0066
	19910630	1336.9	400.53	0.751	0.0083
长期洪水	19870701-0904	910.2	564.72	0.705	0.0195
	20030620-1020	1376	803.46	0.784	0.0327
	199105-199110	2058.7	1314.92	0.753	0.0545
	1991	2140.6	1827.39	0.702	0.0617

2.4 洪量-连通度关系推求

基于改进图论法的河网水系连通评价模型,计算研究区在各个洪水过程下的水系整体连通度,结果见表 2。由表 2 可见,随着洪量的增加,连通度呈增加的趋势,进一步研究二者之间的关系。历史资料显示,1991 年秦淮河流域爆发了特大流域性洪水,因此选用其洪量作为研究值的上限^[17];因秦淮河流域的 3 月为旱季,故将洪号为 199603 的洪量作为研究值的下限。以洪量为自变量,连通度为因变量,得到两者之间的散点图(图 6),可见二者基本符合线性关系。利用最小二乘法推求线性回归方程,得到相关系数 $r=0.982$,拟合优度为 0.965。但是,当选择样本相关系数去推断总体时,还要检验其是否具有显著性,对于小样本事件,采用费希尔的 t 检验法^[18],经计算 $t=11.6895$ 。取信度水平为 0.05,自由度为 5,查得临界值 $r_{\text{临界}}=0.754$, $r > r_{\text{临界}}$,说明两变量之间具有显著的线性关系。在同等条件下,查得临界值 $t_{\alpha/2}=2.571$,可见 $t > t_{\alpha/2}$,说明用相关系数 r 来推断总体具有显著性。综上,可确定洪量与连通度之间正相关。

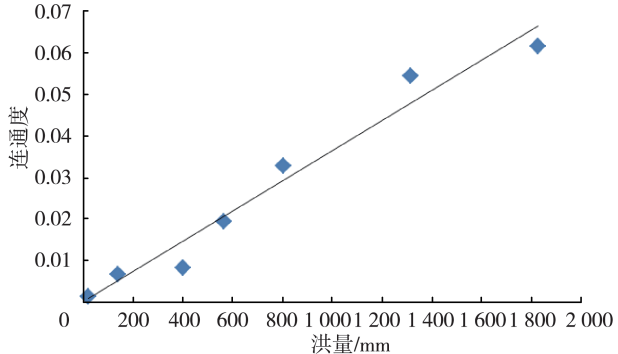


图 6 洪量-连通度散点图

2.5 结果与分析

由计算结果可知,秦淮河流域河网水系结构在研究期限内是连通的,且静态水系结构连通度为 1,说明秦淮河流域内的河网水系可以正常发挥连通功能,对于该地区经济发展有一定的促进作用。在考虑河道水量对水系连通性的影响下,由表 2 可见研究期限内 $Z \in (0,0.0617]$, 1991 次洪水的水系连

通度为 0.0617,是研究期限内的最大值,连通效果好。该次洪水下,图 4 中节点 15 的连通因子为 0.978,节点 16 的连通因子为 0.984,说明水流由节点 15 流向 16,其他节点间具有相同特性,符合流域内河流的实际流动情况,体现了河流间动态的水量传输效果。

因研究期限内,1991 年爆发了特大流域性洪水,取 1991 年洪水过程计算出的连通度作为最高水系连通度,并将其作为标准值,通过比较各时段流域连通度与标准值的关系,确定该流域在各时段所处的水系连通等级。不同评价等级对应的评价标准见表 3。根据评价标准,确定模拟的不同洪水过程的连通等级见表 4。由表 4 可见,短期洪水的连通性都是差的,分析原因,虽然洪峰流量大,但是由于时段短,流域内的水量少,以致无法满足工、农业用水需求,评价结果是合理的。

表 3 水系连通性不同评价等级对应的评价标准

评价等级	评价标准
好	标准值 $\times 70\% \leq$ 水系整体连通度 $\leq$ 标准值
较好	标准值 $\times 50\% \leq$ 水系整体连通度 $<$ 标准值 $\times 70\%$
一般	标准值 $\times 25\% \leq$ 水系整体连通度 $<$ 标准值 $\times 50\%$
差	水系整体连通度 $<$ 标准值 $\times 25\%$

表 4 不同洪水过程下连通等级划分

洪水类型	洪号	连通度	连通等级
短期洪水	19960326	0.0013	差
	19890803	0.0066	差
	19910630	0.0083	差
长期洪水	19870701-0904	0.0195	一般
	20030620-1020	0.0327	较好
	199105-199110	0.0545	好
	1991	0.0617	好

3 结论与展望

a. 根据洪水模拟结果,不论是短期洪水还是长期洪水过程,随着洪量增加,连通度呈增加趋势,符合实际情况,说明基于改进图论法的河网水系连通评价模型是可靠的。

b. 基于本文所提出的河网水系连通评价模型,证明洪量与连通度正相关。流域在满足城市供水、农业灌溉、生态补水等要求的前提下,河流若能最大化地拦蓄水量,就可保证河道水流通畅,对于流域水量的优化调度具有重要的指导意义。

c. 基于相应等级评价标准对秦淮河流域发生不同规模洪水过程时的连通性评价具有较大的推广意义,只需根据流域水文特性确定出相应标准值即可,方便适用。

d. 本研究是在年尺度下确定的连通性划分等级标准值,因此,只能对流域年尺度下各个时段的连通性进行评价,更长时间尺度下的连通度及连通性评价有待进一步研究。

参考文献:

[1] 茹彪,陈星,张其成,等. 平原河网区水系结构连通性评价[J]. 水电能源科学,2013,31(5):9-12. (RU Biao, CHEN Xing, ZHANG Qicheng, et al. Evaluation of structural connectivity of river system in plain network region[J]. Water Resources and Power,2013,31(5):9-12. (in Chinese))

[2] 邵玉龙,许有鹏,马爽爽. 太湖流域城市化发展下水系结构与河网连通变化分析-以苏州市中心区为例[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(10):1167-1172. (SHAO Yulong, XU Youpeng, MA Shuangshuang. Change of river structure and stream network connectivity in taihu lake basin under the urbanization development-a case study in urban Suzhou[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(10): 1167-1172. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 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.

[5] 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))

[6] TIBOR Erős, DÉNES Schmera, ROBERT S. Schick. Network thinking in riverscape conservation:a graph-based approach[J]. Biological Conservation,2011,144(1):184-192.

[7] SEGURADO P, BRANCO P, FERREIRA M T. Ferreira. Prioritizing restoration of structural connectivity in rivers:a graph based approach[J]. Landscape Ecology, 2013, 28(7):1231-1238.

[8] 王海英,黄强,李传涛,等. 图论算法及其与 Matlab 实现[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010:1-46.

[9] 方富贵. 图论的算法和应用研究[J]. 计算机与数字工程,2012,40(2):115-117,132. (FANG Fugui. Study on the algorithm and applications in graph theory[J]. Computer & Digital Engineering,2012,40(2):115-117,132. (in Chinese))

[10] 郭亚萍,李丹,曹滨,等. 水量优化调度对水系连通性的影响分析[J]. 中国农村水利水电,2016(12):109-112. (GUO Yaping, LI Dan, CAO Bin, et al. An analysis of influence of water system connectivity on the optimal dispatch of water[J]. China Rural Water and Hydropower,2016(12):109-112. (in Chinese))

[11] 夏琨,王华,秦文浩,等. 水量调度对内秦淮河水质改善的效应评估[J]. 水资源保护,2015,31(2):74-78. (XIA Kun, WANG Hua, QIN Wenhao, et al. Assessment on effects of water quality improvement in Inner Qinhuai River by water dispatching[J]. Water Resources Protection,2015,31(2):74-78. (in Chinese))

[12] 梁于婷. 降雨径流系数影响因素的试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.

[13] 涂晶晶,陈森林,艾学山,等. 河流生态流量特征图及生态流量评价方法[J]. 水资源保护,2016,31(1):99-105. (TU Jingjing, CHEN Senlin, AI Xueshan, et al. Diagram of river ecological flow characteristics and evaluation method of ecological flow[J]. Water Resources Protection,2015,31(1):99-105. (in Chinese))

[14] 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))

[15] 左天慧. 基于 HEC-HMS 的秦淮河流域城市化水文效应研究[D]. 南京:南京大学,2010.

[16] 李向新,和红强. HEC-HMS 水文建模系统原理·方法·应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015:1-100.

[17] 李倩. 秦淮河流域城市化空间格局变化及其水文效应[D]. 南京:南京大学,2012.

[18] 南英子. 简单线性相关与回归分析中各种检验及其相互关系的探讨[J]. 统计与决策,2011(2):26-28. (NAN Yingzi. Discussion on various tests and their relationships in simple linear correlation and regression analysis[J]. Statistics and Decision,2011(2):26-28. (in Chinese))