

基于图论边连通度的平原水网区水系连通性定量评价

赵进勇¹,董哲仁¹,杨晓敏²,张晶¹,马栋^{1,3},徐征和³

(1. 中国水利水电科学研究院,北京 100089;

2. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司,江苏 淮安 223001;

3. 济南大学资源与环境学院,山东 济南 250000)

摘要:河湖水系保持连通是流域内河流与湖泊、河道与河漫滩之间物质流、能量流、信息流和物种流保持畅通的基本条件,也是优化水资源配置战略格局、提高水利保障能力、促进生态文明建设的有效举措。利用 GIS 平台和图论理论,研究河湖水系的系统性连通程度定量评价技术,以胶东地区为例,分析了胶东调水东线工程和引黄济青工程实施后山东半岛东部地区水网连通情况。结果表明,胶东调水东线工程实施后连通度可提高 50%。此方法可为平原水网区水生态保护与修复、河湖水系连通规划及闸坝调度方案优化等提供技术支持。

关键词:河湖水系;图论;边连通度;邻接矩阵;水生态保护与修复

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2017)05-0001-06

河湖水系连通包括水系物理通道连通和水文连通。河湖水系物理连通性是流域内河流与湖泊、河道与河漫滩之间物质流、能量流、信息流和物种流保持畅通的基本条件,也是水生态系统结构参数之一;河湖间的自然连通保证了注水和泄水的畅通,维持着湖泊最低蓄水量和河湖间营养物质交换。水流在连通河湖水系内各种地貌单元的过程中发挥了重要作用,这种连通作用使碳和营养物质的交换成为可能,从而影响河湖系统的整体生产力,水文连通性在时空尺度上对大型无脊椎动物的组成和多样性均有重要影响(董哲仁等,2013)。因此,河湖水系连通性是其生态保护与修复、生态文明建设工作中的一项重要内容;如河流健康评估指标、标准与方法(中华人民共和国水利部,2010)、健康长江评价指标体系(吴道喜和黄思平,2007)、健康珠江评价指标体系(金占伟等,2009)以及水生态状况评价指标体系中(朱党生等,2011),均将水系连通性作为一个重要指标。在长江流域综合规划修编工作中,广泛吸取了近年来国内外生态系统研究的先进理念与技术成果,对生态系统的完整性与承载力、生物多样性、生态系统服务功能等生态学原理进行了解析与

考虑(常剑波等,2013);其中河湖水系连通是保障水生态系统完整性、提高水生态系统承载力的重要基础。

目前,国内外对于河湖水系的连通性定量评价方法研究较少,大多数是利用河流地貌调查方法进行地貌特征的定性描述或通过水文情势数据的分析间接反映河湖水系的连通性。Vikrant & Tandon (2010)把河湖水系的连通性分为物理连接和物质输移 2 种类型,根据不同的连通条件,定义了连通性指数;Pedro 等(2013)在分析葡萄牙塔霍河的连通性时,引入了中介性核心和整体连通性指数的概念;Fazlul(2013)利用 MIKE11 建立一维水动力模型,按照时间序列模拟了澳大利亚塔利-墨累河流域自然-人工复合水系网络的连通性。河湖水系中,任何一条河道的连通与否均会对系统的整体性造成一定影响,因此可从系统论的整体性角度研究河湖水系连通等问题。

有学者利用图论理论并结合水系的水动力特性,在水系连通性定量评价方面陆续开展了一些工作(赵进勇等,2011;徐光来等,2012;杨晓敏,2014;陈星等,2016),但对图论方法的应用仍停留在初步阶段。根据河湖水系的构造特点和 GIS、图论方法的相关特性,可利用 GIS 平台提取河湖水系,并利用图论理论对河湖水系的物理通道进行数学概化,利用边连通度参数描述河湖水系的物理连通程度。本文提出了应用 GIS 和图论方法对流域尺度下的河湖水系连通性进行定量评价的方法。

收稿日期:2016-12-22

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201501030);国家自然科学基金项目(51509271;51279113)。

作者简介:赵进勇,1976年生,男,博士,教授级高级工程师,主要从事生态水利工程、河流生态修复等方面的研究工作。E-mail: zhaoyj@iwhr.com

1 研究过程与方法

1.1 基本概念

图论中的“图”是以一种抽象形式来表达事物之间相互联系的数学模型。为实际对象建立图模型后,可利用图的性质进行分析,为研究各种系统特别是复杂系统提供了一种有效的方法(图1)。

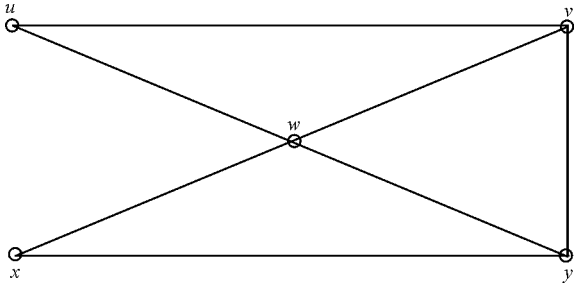


图1 图G中的链

Fig. 1 Linkage for graph G

如果图G中存在连接点u和点v的路径,那么就称u和v是连通的;如果图G中每对不同顶点均连通,那么图G称为是连通图,否则称为不连通图。

设图G中有n个顶点, v_1, v_2, \dots, v_n , 则 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 为G的邻接矩阵, 记为 $A(G)$, 其中 $a_{ij} = \mu(v_i, v_j)$ 表示图G中连接顶点 v_i 和 v_j 边的数目。

$A(G)$ 的k次方记为 $A^k = [a_{ij}^{(k)}]_{n \times n}$, 若 $\sum_{k=1}^{n-1} a_{ij}^{(k)} = 0$, 说明 $a_{ij}^{(1)}, a_{ij}^{(2)}, a_{ij}^{(3)}, \dots, a_{ij}^{(n-1)}$ 均为0, 则根据连通图定义可判断图G是不连通图。从而可得出下面基于邻接矩阵图的连通性判定准则: 对于矩阵 $S = (S_{ij})_{n \times n} = \sum_{k=1}^{n-1} A^k$, 如果矩阵S中的元素全部为非零元素, 则图G为连通图, 否则如果矩阵S中存在t ($t \geq 1$) 个零元素, 则图G为不连通图(贾进章等, 2003)。可见, 利用图的邻接矩阵进行连通性判别, 并借助计算机工具进行复杂的矩阵分析计算, 可为图的连通程度分析提供数学基础。

在不同的连通图中, 其连通程度是不相同的, 连通图经删除某些边后最终可能变成不连通图。直观来看, 需要删除较多边之后才不连通的连通图, 其连通程度较强, 即其连通性不容易遭受破坏。所谓从图G中删除若干边, 是指从图G中删除某些边(定义为子集 E_1), 但G中的顶点全部保留, 剩下的子图记为 $G-E_1$ 。如果 $G \neq K_1$ 是一个非平凡图, $\emptyset \neq E_1 \subset E(G)$, 若从图G中删除 E_1 所包含的全部边后所形成的新图不连通, 即 $G-E_1$ 非连通, 则称 E_1 是图G的边割, 若边割 E_1 含k条边, 也称 E_1 是k边割。若 $G = K_1$ 是一个平凡图, 即图只包含1个顶点, 则平凡

图的边割 E_1 含0条边。由此得出图的边连通度定义:

$$\lambda(G) = \begin{cases} \min |E_1|, & G \neq K_1 \\ 0, & G = K_1 \end{cases} \quad (1)$$

$\lambda(G)$ 称为图G的边连通度, 即非平凡图的连通度就是使这个图成为不连通图所需要去掉的最小边数, 平凡图的连通度为0。可见利用图的边连通度参数, 可用使非平凡图变为不连通图所必须删除的最少边数来衡量一个非平凡图的连通程度, 从而使图的连通程度分析量化。

1.2 河湖水系图模型

河湖水系连通性通过横向和纵向的连通实现。水系图模型方法是指利用图论中的图模型概念, 将水系连通性状况通过图形的方式简单明了表达出来。在河流纵向, 连通性特征比较容易识别, 河流横向的连通性特征相对复杂。在河流横向的地貌特征中, 不同类型的河流将会产生不同类型的河漫滩。典型的河漫滩一般具有如下微地貌特点:

- (1) 牛轭湖或牛轭弯道;
- (2) 河漫滩水流通道;
- (3) 鬃岗地形;
- (4) 局部封闭小水域;
- (5) 自然堤。

河湖水系概化示意如图2-a所示。其中包括纵向和横向的干支流、湖泊、河漫滩水流通道、局部封闭小水域、牛轭湖、牛轭弯道等连通特征。

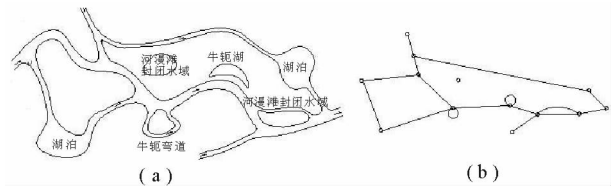


图2 河湖水系概化示意图(a)和河湖水系图模型(b)

Fig. 2 Digital model of river-lake water system (a) and its graphical model (b)

水系图模型方法的重点是将水系中不同地貌特点利用图论中的相关元素进行表征。在河流纵向, 一条河流可以用线来表示, 河流汇合处用点来表示。在河流横向, 主河槽与河漫滩共同组成河道-滩区系统, 其连通性受到河漫滩的微地貌特征、地形特点、水文特性、滩槽水流动态交换等因素的综合影响。河道-滩区系统内错综复杂的水流通道构成系统连通网络, 在不同的水位状况下, 系统具有不同的连通程度。根据河道-滩区系统的特点以及图模型概念, 牛轭湖或牛轭弯道可用环表示, 单独的小型水

域可用孤立点表示,仅与一条水流通道相通的小型水域可用悬挂点表示,鬃岗地形中沙坝之间多个低洼地形成的多条水流通道可用多重边表示,河漫滩水流通道或自然堤受水流冲积后形成的水流通道网络可用边表示,水流通道的汇合点可用顶点表示。两点间存在水流通道则表明其相邻,水流通道的形状不影响河道-滩区系统中点与点之间的邻接关系,可见图模型可用来表示整个水系的连通性状况。图 2-b 为河湖水系概化的模型示意图。

1.3 连通性评价方法和流程

在进行水系连通性措施效果评价时,应重点考虑的是相关工程措施对于整个水系连通性的改善效果,以便改进方案,满足有效性和经济性需求。对于单独的一条河流和一个湖泊,可以简单地判断为连通还是不连通,但对于整体系统而言,需要进行系统性综合分析,以便确定最优的工程措施。水系连通性的系统性分析可采用水系图模型连通度分析方法,其流程如图 3 所示。

(5) 如果图不连通,结束程序流程,得出结论;如果图连通,则进行下面的边连通度判别。

(6) 将图从边 1 到 k , 依次删除一条边;利用所形成的新的邻接矩阵,判断删除 1 条边后所形成新图的连通性。若删除某条边后,所形成的新图不连通,则原图连通性为 1,结束流程,得出结论;如果删除任意一条边后所形成的新图仍然连通,则继续下一步。

(7) 将图从 1 到 k , 任意选择 2 条边进行删除,根据删除 2 条边后所形成的邻接矩阵判断所形成新图的连通性。若删除某 2 条边后,所形成的新图不连通,则原图连通性为 2,结束流程,得出结论;如果删除任意 2 条边后所形成的新图仍然连通,则继续下一步。

(8) 依此类推,若删除某 l ($l < k$) 条边后,所形成的新图不连通,则原图连通性为 l ,同时说明非完全连通图的连通度就是使这个图成为非连通图的最小边割所包含的边的数目。

1.4 实例验证

本文以胶东地区为例,对胶东调水东线工程和引黄济青所在的山东半岛东部地区水网进行连通度分析。通过 1 : 1 000 地形数据,采用 5 m × 5 m 的网格建立 DEM,在 ArcGIS 平台中,经投影变化,再利用相关方式转换成不规则三角网 TIN,最后生成水平栅格分辨率为 10 m 的 DEM,加载 DEM,提取出山东半岛东部地区不同规划方案下的水系图。根据山东水网的总体规划原则以及胶东调水和引黄济青两项调水工程,建立 3 种情形方案分析水网连通状况,即原始状态、引黄济青和胶东调水。

2 结果与讨论

所选区域左方以胶莱河和大沽河为界,右方以母猪河为界,上方和下方为水路交界处。首先分析原始状态下水系的连通状况图及其图模型,如图 4 所示。在连通状况图 4-a 中,不同颜色的曲线表示不同层次的河流,对于整个河湖水网中仅与 1 条河道相连接的点,若有小的水域形成,就设立悬挂点,否则不设置;对于整个河湖水系边界处仅与 1 条河道相连接的点,无论能否形成小的水域,都设立悬挂点。上述连通图中,其图模型 4-b 的邻接矩阵如图 4-c 所示。通过公式(1)进行连通度定量分析,此时的河湖水系连通度为 2。

在连通状况图 5-a 中,蓝色线为引黄济青工程及其所建立的泵站,上述图模型的邻接矩阵均可按

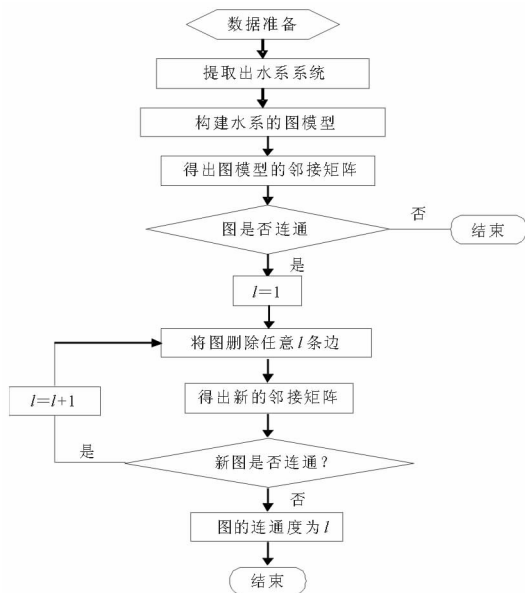


图 3 水系图模型连通度分析流程

Fig. 3 Flow chart for connectivity analysis of graphical model

(1) 数据准备,包括对利用遥感图、实地调查等途径所获取的资料进行整理分析。

(2) 通过水系连通性调查,提取河湖水网,建立水系图模型 G 。

(3) 根据图模型顶点和边的相互关系,得出图的邻接矩阵 $A(G)$ 。

(4) 根据图的连通性判定准则进行矩阵运算,判断图是否连通。

照邻接矩阵的定义进行构建,所以不再列出矩阵(下同)。通过连通度定量分析(图5-b),此时的河湖水系连通度为2。引黄济青工程及其泵站的修建,增加了新点20,由于新点的形成,使得点1和点20之间增加了水流通通道⑳,并且在点10和20之间形成了一条新的水流通通道㉓,但因是系统边界处连通状况改变,因此对整个系统的连通度并没有太大影响。

在连通状况图6-a中,紫色线为胶东调水东线工程及其所建立的泵站。通过连通度分析(图6-b),此时的河湖水系连通度为3,水系连通程度增加50%。胶东调水工程及其泵站的修建,增加了点21和22,由于新点的形成,使得点1和点21、点20和

点21、点21和点22、点22和点14形成新的水流通通道㉗、㉘、㉙、㉚,并且点14和点15、点15和点16、点17和点5以及边界点5和6之间也形成了水流通通道㉛、㉜、㉝和㉞。新增加的水流通通道使多个悬挂点与整体系统的连通状态得到改善,系统的整体连通性得到加强,但因连通路线主要将悬挂点与水系主体部分进行了连通,水系核心区域的连通路线仍然较少,所以连通程度的改善不是太强。

由此可见,引黄济青和胶东调水工程建设,对整个山东半岛蓝色经济区东部地区水网的连通度有直接影响。通过调水工程及其泵站的建立,使一些单独的水流河道串联起来,并且形成了新的水流通通道,提高了整个河湖水系的连通度。

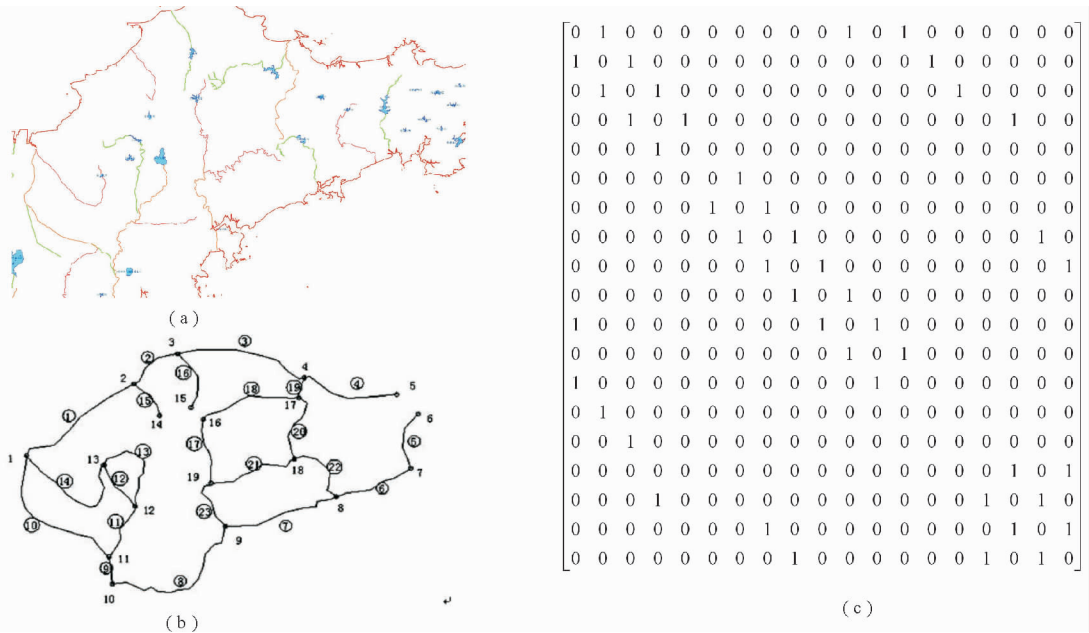


图4 原始状态下水系的连通状况图(a)、图模型(b)和邻接矩阵(c)

Fig. 4 Connectivity (a) original water system, (b) graphical model and (c) adjacency matrix

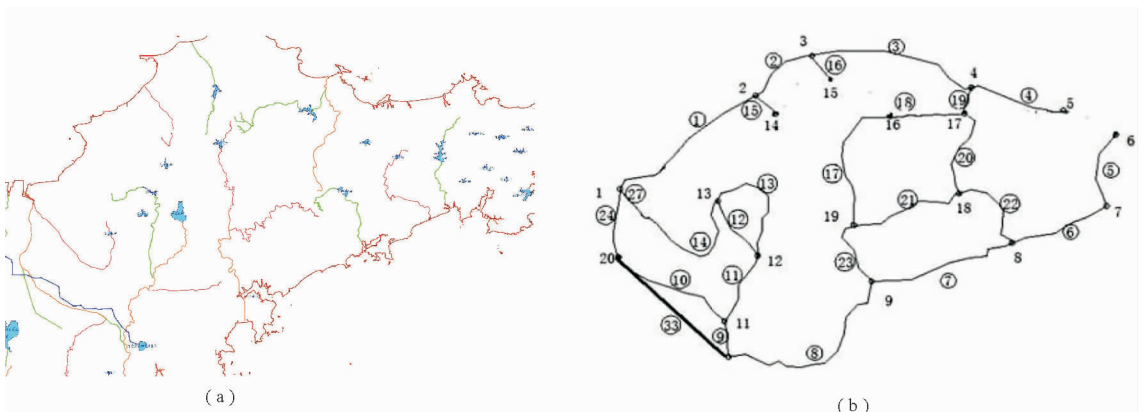


图5 引黄济青工程下水系的连通状况(a)和图模型(b)

Fig. 5 Connectivity (a) water diversion project from the Yellow River into Qingdao and (b) its graphical model

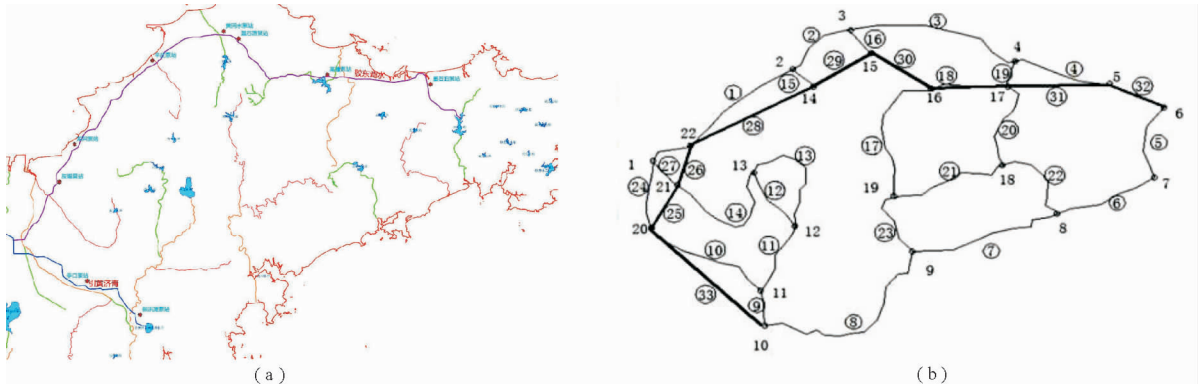


图 6 胶东调水工程下水系的连通状况图(a)和图模型(b)

Fig. 6 Connectivity (a) Jiaodong water diversion project and (b) its graphical model

3 结语

(1) 基于图论边连通度理论,提出了河湖水系连通性定量评价方法。通过 ArcGIS 平台和 DEM 提取流域水系分布图,将水系中的水流通、湖泊、闸坝等用图模型概化表述,建立图的邻接矩阵,计算河湖水系的边连通度,从而实现不同闸坝调度方案下河湖水系连通程度的定量化分析,这种对于水系连通度的量化表达可作为水域生态系统结构描述的一个重要参数。

(2) 水域生态系统中物质(含物种)循环和能量流动的结构化过程包含了特定的信息传递,水流本身是一个驱动因素,河湖水系连通格局是水流驱动因素作用于水生态系统关键过程的重要前提。

(3) 在考虑河湖水系的网格化地貌连通特征之外,需关注水流传递的动态过程以及不同连通格局和这种动态过程的响应关系;同时还需进一步考虑水流方向和闸坝开启程度对于河湖水系连通性的定量影响,从而为水生态修复工程中的水系河道比降确定、闸坝群调度方案制定等工作提供定量的技术支持。

参考文献

常剑波,陈小娟,乔晔,2013. 长江流域综合规划中的生态学原理及其体现[J]. 人民长江,44(10):15-17.

陈星,许伟,李昆朋,等,2016. 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,32(2):26-34.

董哲仁,2008. 河流生态系统结构功能模型研究[J]. 水生生态学杂志,28(5):1-7.

董哲仁,2013. 河流生态修复[M]. 北京:中国水利水电出版社:4-7.

董哲仁,王宏涛,赵进勇,等,2013. 恢复河湖水系连通性生态调查与规划方法[J]. 水利水电技术,44(11):8-10.

贾进章,刘剑,宋寿森,2003. 基于邻接矩阵图的连通性判定准则[J]. 辽宁工程技术大学学报,22(2):158-160.

金占伟,李向阳,林木隆,等,2009. 健康珠江评价指标体系研究[J]. 人民珠江,(1):20-22.

李原园,酃建强,李宗礼,等,2011. 河湖水系连通研究的若干问题与挑战[J]. 资源科学,33(3):386-391.

吴道喜,黄思平,2007. 健康长江指标体系研究[J]. 水利水电快报,28(12):1-3.

徐光来,许有鹏,王柳艳,2012. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J]. 水科学进展,23(6):776-781.

徐俊明,2004. 图论及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社.

杨晓敏,2014. 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.

赵进勇,董哲仁,翟正丽,等,2011. 基于图论的河道-滩区系统连通性评价方法[J]. 水利学报,42(5):537-543.

中华人民共和国水利部,2010. 河流健康评估指标、标准与方法(办资源[2010]484号)[S].

朱党生,张建永,李扬,等,2011. 水生态保护与修复规划关键技术[J]. 水资源保护,27(5):59-64.

Fazlul K, 2013. Modelling hydrological connectivity of tropical floodplain wetlands via a combined natural and artificial stream network [EB/OL]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.10065/abstract.com>.

Pedro S, Paulo B, Maria T F, 2013. Prioritizing restoration of structural connectivity in rivers: a graph based approach [J]. Landscape Ecol, 28: 1231-1238.

Vikrant J, S K Tandon, 2010. Conceptual assessment of (dis)connectivity and its application to the Ganga River dispersal system[J]. Geomorphology, 118: 349-358.

Connectivity Evaluation Technology for Plain River Network Regions based on Edge Connectivity from Graph Theory

ZHAO Jin-yong¹, DONG Zhe-ren¹, YANG Xiao-min², ZHANG Jing¹, MA Dong^{1,3}, XU Zheng-he³

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100089, P. R. China;

2. Huaian Water Conservancy Survey Design and Research Institute Co., LTD, Huaian 223001, P. R. China;

3. School of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan 250000, P. R. China)

Abstract: The connectedness of river-lake systems promotes the flow of material, energy and information and supports species diversity in river-lake and river-floodplain systems. Identifying and evaluating the connectedness is important for optimizing water allocation, improving water conservation and promoting awareness of the water environment. Quantitative evaluation of river-lake connectivity using GIS and graph theory was the subject of this study. Modeling an aquatic system involves several steps. A digital map of the system is extracted and key elements, including water channels, lakes and reservoirs, sluices and dams and the operating modes of sluices and dams are graphically modeled. An adjacency matrix for the graphical model is then constructed and the connectivity of the river-lake water system is calculated using the matrix analysis tool of MATLAB. A case study of the river-lake system in the Jiaodong area was carried out using the quantitative evaluation system and connectivity of the river-lake system under three conditions was analyzed: (1) the original connectivity, (2) connectivity after implementation of the water diversion project from the Yellow River into Qingdao and (3) connectivity after the implementation of Jiaodong water diversion project. The calculated connectivities under the three conditions were 2, 2 and 3 respectively, and the results indicate that connectivity increased by 50% after the implementation of the Jiaodong water diversion project. The water diversion project from the Yellow River into Qingdao and the Jiaodong water diversion project directly influenced the connectivity of the water network in the eastern Shandong Peninsula. Newly established pump stations connected previously separated rivers and lakes, forming new water channels and increasing connectivity of the entire river-lake system. This evaluation method provides technical support for protecting water resources and restoring river networks in plain regions, planning river-lake connectivity and optimizing sluice and dam operations.

Key words: river-lake water system; graph theory; edge connectivity; adjacency matrix; water ecological protection and restoration