

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.01.005

城市水系连通性评价体系研究

孟祥永¹, 陈 星¹, 陈栋一², 张其成¹, 朱引弟¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 淮安区水利局, 江苏 淮安 223200)

摘要: 在参考城市水系结构连通性评价的基础上, 对其指标进行筛选, 从水系连通的驱动因素和水力效果出发, 增加了水系水力连通性评价的内容, 选用河频率、河网密度、水系连通度、区域水流动势及河道输水能力等评价指标构建了区域尺度下的城市水系连通性评价体系。淮安区城区水系的应用实例表明, 城市水系连通性评价体系能够综合地反映城市水系连通状况。

关键词: 城市水系; 水系连通性; 水流动势; 评价体系; 淮安市淮安区水系

中图分类号: TV212.5⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)01-0024-05

Evaluation system of urban water system connectivity

MENG Xiangyong¹, CHEN Xing¹, CHEN Dongyi², ZHANG Qicheng¹, ZHU Yindi¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Huai'an Water Conservancy Bureau, Huai'an 223200, China)

Abstract: Based on a survey of the evaluations of the structure connectivity of urban water systems, we selected the evaluation indicators, increased the content of evaluation of the water systems' hydraulic connectivity from the perspectives of the driving factors and hydraulic effect of the water system connectivity, and constructed a regional-scale evaluation system for urban water system connectivity using indices including the amount of rivers per unit area, the river network density, the connectivity of the river system, regional water flow potential, and water transport capacity of the river. An application of this evaluation system to the urban water system of the Huai'an District shows that the system can comprehensively reflect the connectivity of urban water systems.

Key words: urban water system; water system connectivity; water flow potential; evaluation system; water system of Huai'an District in Huai'an City

人类经济社会活动对城市河湖水系的影响不断加剧, 导致河湖水系连通性不足或减弱, 进而引发水资源与水环境承载能力不足、洪涝宣泄不畅、水安全风险加大等问题^[1]。近年来关于河湖水系连通的研究在不断增加, 国内部分学者^[2-3]做了探索性的研究, 讨论了河湖水系连通概念及内涵, 初步构建了河湖水系连通概念框架和理论体系; 一些学者对水系连通性概念及内涵在一定程度上进行了界定, 探讨了水系连通性的重要意义及评价方法。长江水利委员会^[4]在2005年编写的《维护健康长江, 促进人水和谐研究报告》中, 将水系连通性定义为: 河道干支流、湖泊及其他湿地等水系的连通情况, 反映水流的连续性和水系的连通状况。这一概念强调了河流、湖泊等实体在形态结构上对维持水流连续的重要作用。张欧阳等^[5-6]进而提出水系连通性应包含满足一定需求的保持流动的水流和水流的连接通道, 并从改善湿地生态环境、维持湿地生态环境及生物多样性、保障防洪安全和水资源可持续利用等方面分析了水系连通性对河湖健康的影响。赵进勇等^[7]将图论中连通度的概念应用于河道-滩区系统连通性评价, 实现了河道-滩区系统连通程度分析的定量化。

收稿日期: 2013-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(51209071, 51309078); 水利部公益性行业科研专项(201001030); “十二五”国家科技支撑计划(2012BAK10B04)

作者简介: 孟祥永(1988—), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: xymenghu@163.com

通信作者: 陈星, 讲师。E-mail: chenxing@hhu.edu.cn

城市水系连通性评价是实施河湖连通的基础工作,是河湖水系连通研究的重要组成部分。笔者从河湖水系的形态结构、地形地貌、水力特性出发,对河湖水系连通性的内涵进行探讨,旨在构建城市水系连通性基础评价体系、科学地反映城市水系连通状况。

笔者从水系连通的概念出发,在考虑水系形态结构连通的基础上着重考察区域水体流动及其强弱的固有驱动因素,包括河道平均坡降、河道平均宽度、河网密度等与水力连通性相关的水系自然属性^[8-9],即城市水系连通性评价体系还应包括城市水系水力连通性评价的内容。水系的结构连通性评价和水力连通性评价有着密切的联系。结构连通性是基础,缺少了结构连通性,水力连通性就失去了意义,只有在水系结构连通性评价之后,才便于通过增加河道规模、新建水利工程及水利工程合理调度等措施,改善水系的水力连通性。不同地区的水系水力连通特性不同,在实施水系连通时应结合水系水力连通性评价结果,提出适合的水系结构连通方案。因此,在实施城市河湖水系连通时应同时对水系的结构连通性和水力连通性进行评价,真实地反映水系连通现状,为城市水系连通实践提供依据。

1 城市水系连通性评价体系构建

1.1 城市水系结构连通性评价指标

本文把水系连通度、河频率作为水系结构连通性评价特征指标。水系连通度能定量地反映水系结构连通特性,但缺少区域的概念,减弱了不同地区不同尺度水系连通度的可比性,而补充河频率指标可以很好地弥补这一不足。

a. 河频率 R_f 。 R_f 指单位区域面积上的河流数,用于表示河流的数量发育状况^[10]。

$$R_f = \frac{N}{A} \tag{1}$$

式中: N ——区域内河道的数目; A ——区域面积。

b. 水系连通度 γ 。与天然状态下树枝状水系不同,城市水系是一个经人类改造过的复杂的网络系统,一般把河流交汇点称为节点,把相邻 2 个节点之间的河道称为河链。有学者^[11]借用图论中连通度的概念将水系连通度定义为 2 个节点通过河链的连接程度,即对于一个原来连通的水系,要使其任意 2 个节点变为不连通所要删除的河链的最少数目称为这 2 个节点的连通度,记为 r_{ij} ,那么所有节点连通度的平均值称为该水系的连通度。也有学者^[12-13]将地理网络中连通性测度的概念应用于交通运输网络连通性评价,把图论中的 γ 测度指标作为衡量路网结构连通性的重要指标,借鉴此概念可将水系连通度定义为水网内河链的实际数目与河链可能存在的最大数目之间的比率。由于前一定义主要适用于分析河网连通性的变化特性,笔者采用后一定义反映水系连通状况,其计算公式为

$$\gamma = \frac{m}{3(n - 2p)} \tag{2}$$

式中: m ——河链数; n ——节点数; p ——水网中的亚图数。

网络中,每一个亚图内各点必须是连通的,即从亚图中某一任意点到其他各点之间至少有一条连通路径,否则此图可分若干亚图。

1.2 城市水系水力连通性评价指标

笔者着眼于引起水体流动及其强弱基本驱动要素,即河底比降及河道横断面宽度,提出水流动势的概念,对区域水体流动性进行评价,同时利用水动力模型对城市水系的整体输水能力进行模拟,以反映水力连通效果。

a. 河网密度 R_d 。 R_d 表示单位区域面积上的河流长度,它表达了系统排水的有效性^[10]。

$$R_d = \frac{\sum_{j=1}^N L_j}{A} \tag{3}$$

式中: L_j ——区域内第 j 条河道的长度, $j=1, 2, \dots, N$ 。

b. 水流动势 E_p 。由于河底存在坡降,使河道内水体具有流动的可能性,河道中水体的流动能力是由河道坡降、河道横断面及河道横断面形态沿纵断面的变化情况决定的,河道坡降决定了水体的流动速度,河道

横断面决定了水体可能具有的最大势能,河道横断面形态沿纵断面的变化情况是对河道进行分段的主要依据。水体流动能力可通过水流动势来反映,计算公式如下:

$$E_p = \frac{\rho_w g \sum \frac{h_i(h_{i上} - h_{i下}) D_i}{L_i}}{2A} \tag{4}$$

式中: ρ_w ——水的密度; g ——重力加速度; h_i ——河段平均水深,在参照一般河道平均水深的基础上选取 $h_i = 1\text{ m}$ 作为水流动势的计算标准; $h_{i上}$ 、 $h_{i下}$ ——河段初、末断面的水位(或成功驱动水体流动的河底比降); D_i ——河段水面面积; L_i ——河段长度。

c. 河道输水能力 Q 。根据区域河网水系的现状特点,应用水动力学模型尝试模拟在河道水位不超出河道堤防高度情况下城市河道的最大输水量。单位区域面积上河道的最大输水量即河道输水能力,是反映城市水系整体水力连通性水平的综合指标。

1.3 评价方法

为得到指标评价结果,水系连通性评价的一般步骤如下:

a. 基础数据搜集整理。搜集区域内所有河道的特性数据,包括河网形态、河长、河道横断面形态、河底高程、河道纵断面变化特征。利用地理信息系统技术,确定水系点线面空间实体的空间位置、关系特征及属性信息,得到相应的河网矢量数据图。

b. 河网概化。水系连通度计算和河道输水能力模拟时都需要对区域内河网进行概化,得到河网概化图,将河网概化成节点和连接节点的河链两类要素。对于人类活动剧烈的城镇化地区,河网水系人工化程度很高,河道功能定位明确,空间尺度较小,概化时应尽可能考虑城区内的所有河道,以充分反映原有的水系特征。

c. 数量统计与模型建立。统计区域内的河道总长度和河道、节点、河链及亚图的数目;依据河道纵断面变化划分河段,计算各段的长度、平均断面宽度,以及始、末断面的河底坡降;结合河网概化结果及河道要素建立一维水动力学模型。应用 MIKE11 中的 HD 模块模拟区域内河道的流量和水位,并以下游水位作为控制边界、上游输入恒定的流量边界。通过不断改变区域上游入流河道的流量,寻找在满足河道堤防要求下的区域河网最大输水量。模型基于一维圣维南方程组,采用追赶法求解,可模拟单一河道及河网水流。模型基本方程如下:

连续方程
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \tag{5}$$

动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 |u| Q}{R^{1.33}} = q_L v_x \tag{6}$$

式中: Q ——流量; x ——距离; A ——过水断面面积; t ——时间; q_L ——旁侧入流,入流为正,出流为负; Z ——水位; n ——糙率; u ——流速; R ——水力半径, $R \approx A/B$ (B 为水面宽); v_x ——入流沿水流方向的速度,若旁侧入流垂直于主流则 $v_x = 0$ 。

d. 评价分析。计算各连通性指标,综合评价区域内水系的连通状况。其中水系连通度表达了水系河道之间相互的连通程度,而河频度反映了进行水系连通度计算的河道级别,当水系连通度比相似地区小时应通过适当新开河道增加水系的结构连通性。河道输水能力结合水流动势与河网密度可分析河道平均排水能力,在相同的水流动势下,河网密度越小,单个河道的排水能力越强,若水流动势过小就需要另建排水工程,同时应增加河道规模和区域内湖泊水库的滞蓄水能力,以改善水系的水力连通性。

2 案例分析

2.1 研究区概况

江苏省淮安市淮安区地处淮河下游,里运河与淮河水道穿城而过,是城区主要的引水来源和排水通道,城区面积 142.20 km^2 ,区域内水系丰富,河网密集,河道功能明确,水系脉络清晰、连通性较好。由于淮河水道和里运河的天然阻断,城区水系分割成水力联系较独立的 3 个片区,分别为渠北片、河西片、渠南

片,各个片区的河流数量、河段数目及节点数等水系特征见表 1。淮安区城区水系和水系概化见图 1、图 2。

2.2 结果与讨论

基于 GIS 平台及水动力模型,应用各指标的计算方法分别对渠北片、河西片、渠南片水系连通性进行评价,结果见表 2。

河频度和水系连通度的评价结果表明:渠南片的水系连通度最低,为 0.275;河西片较高,介于 0.36~0.40 之间;渠北片最高,介于 0.41~0.45 之间。渠北片为主城区,受人类活动的影响最显著,是导致其水系连通度高的重要原因。河西片的河频率为 0.65 条/km² 远高于渠北片的河频率(0.36 条/km²),而其水系连通度稍低于渠北片,原因可能是面积较小,水系结构相对简单。

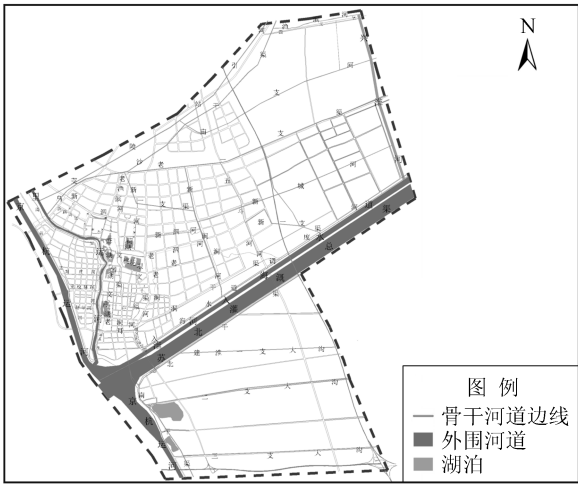


图 1 淮安区城区水系

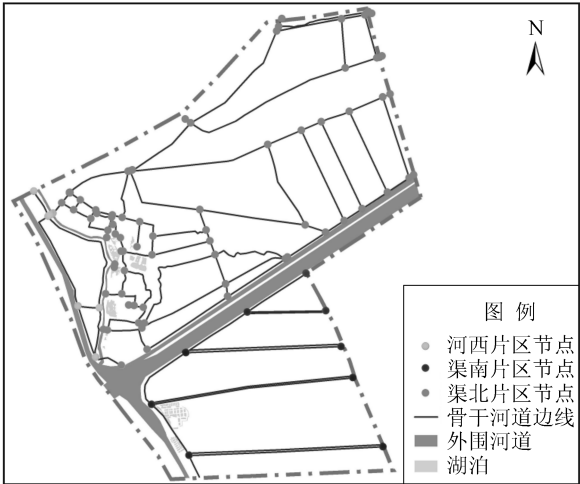


图 2 淮安区城区水系概化

Fig. 1 Urban water system in Huai'an District

Fig. 2 Generalization of urban water system in Huai'an District

通过水流动势、河道输水能力及河网密度的评价结果可以看出:渠北片和河西片的水流动势较接近,分别为 2.95 J 和 3.31 J,远大于渠南片的河流动势(1.33 J),而渠南片的河网密度并不低于渠北片,可能与渠南片地势较平坦、水体流动性较弱有关;河西片的河道输水能力最强,为 1.63 m³/(km²·s),而渠北片和渠南片的河道最大输水能力为 1.00 m³/(km²·s) 左右,可见渠南片的河道规模较大,弥补了因地势平坦导致的水体流动不足。

由以上分析可得出结论:河西片的水系连通性最好,其次为渠北片,最后为渠南片。渠北片的结构连通性较好,而水力连通性较差,建议增加骨干排水河道规模,改善水系引排格局;渠南片结构连通性与水力连通性均较差,建议先新开连通河道,改善结构连通性,在此基础上建设泵站,增加排水能力。

3 结 语

目前国内关于区域尺度的河湖水系连通理论研究还处在探索阶段,笔者构建的水系连通性评价体系能够科学地反映城市水系的内在连通状况,其中结构连通性是提高水资源统筹调配能力、改善水生态环境状况的基础,而水力连通性则体现了水系水旱灾害防御能力,对城市水系连通实践有较强的指导意义。在进行水系水力连通性评价时采用了河道水流动势反映区域水体流动性,仅将其应用于本区域可能具有一定的片面

表 1 淮安区城区分片区水系特征参数

Table 1 Water system characteristics of urban sub-areas in Huai'an District

片区	面积/ km ²	河流数/ 条	河道总长度/ km	河链数/ 条	节点数/ 个
渠北片	96.31	35	125.39	89	73
河西片	6.14	4	14.57	7	8
渠南片	39.75	10	58.64	14	19

表 2 淮安区城区水系连通性评价结果

Table 2 Evaluation results of urban water system connectivity in Huai'an District

分区	结构连通性指标		水力连通性指标		
	$R_f/$ (条·km ⁻²)	γ	$R_d/$ (km·km ⁻²)	$E_p/$ J	$Q/$ (m ³ ·(km ² ·s) ⁻¹)
渠北片	0.36	0.438	1.30	2.95	0.99
河西片	0.65	0.389	2.37	3.31	1.63
渠南片	0.25	0.275	1.48	1.33	1.01

性,在后续研究中建议加强水流动势在其他城市的应用研究,使这一指标得到扩展。河道输水能力这项指标能够很好地反映城市水系的综合输水效率,但需加强其与城市抵御洪涝水平之间关系的研究,挖掘其应用价值。

参考文献:

- [1] 杨凯. 平原地区城市内河河道结构与水质恢复间关系的实验研究[D]. 苏州:苏州大学,2007.
- [2] 李宗礼,李原园,王中根,等. 河湖水系连通研究:概念框架[J]. 自然资源学报,2011,26(3):513-522. (LI Zongli, LI Yuanyuan, WANG Zhonggen, et al. Research on interconnected river system network: conceptual framework[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 513-522. (in Chinese))
- [3] 左其亭,崔国韬. 河湖水系连通理论体系框架研究[J]. 水电能源科学,2012,30(1):1-5. (ZUO Qiting, CUI Guotao. Study on theoretical system and framework of interconnected river system network [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(1): 1-5. (in Chinese))
- [4] 长江水利委员会. 维护健康长江,促进人水和谐研究报告[R]. 武汉:长江水利委员会,2005.
- [5] 张欧阳,熊文,丁洪亮. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析[J]. 人民长江,2010,41(1):1-5, 78. (ZHANG Ouyang, XIONG Wen, DING Hongliang. Drainage connectivity characteristics and influential factors of Yangtze River Basin[J]. Yangtze River, 2010, 41(1): 1-5, 78. (in Chinese))
- [6] 张欧阳,卜惠峰,王翠平,等. 长江流域水系连通性对河流健康的影响[J]. 人民长江,2010,41(2):1-5. (ZHANG Ouyang, PU Huifeng, WANG Cuiping, et al. Impact of drainage connectivity on river health in Yangtze River Basin[J]. Yangtze River, 2010, 41(2): 1-5. (in Chinese))
- [7] 赵进勇,董哲仁,翟正丽,等. 基于图论的河道-滩区系统连通性评价方法[J]. 水利学报,2011,42(5):537-543. (ZHAO Jinyong, DONG Zheren, ZHAI Zhengli, et al. Evaluation method for river floodplain system connectivity based on graph theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(5): 537-543. (in Chinese))
- [8] 袁雯,杨凯,吴建平. 城市化进程中平原河网地区河流结构特征及其分类方法探讨[J]. 地理科学,2007,27(3):401-407. (YUAN Wen, YANG Kai, WU Jianping. River structure characteristics and classification system in river network plain during the course of urbanization[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(3): 401-407. (in Chinese))
- [9] 袁雯,杨凯,唐敏,等. 平原河网地区河流结构特征及其对调蓄能力的影响[J]. 地理研究,2005,24(5):717-724. (YUAN Wen, YANG Kai, TANG Min, et al. Stream structure characteristics and their impact on storage and flood control capacity in the urbanized plain river network[J]. Geographical Research, 2005, 24(5): 717-724. (in Chinese))
- [10] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004:28-31.
- [11] 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 the 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))
- [12] 秦霞,顾政华,李旭宏. 区域公路网布局规划方案的连通度评价指标研究[J]. 土木工程学报,2006,39(1):112-116. (QIN Xia, GU Zhenghua, LI Xuhong. Research on evaluative index of connectivity for regional road network layout planning project [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(1): 112-116. (in Chinese))
- [13] 高洁. 交通运输网络连通性评价指标分析[J]. 交通运输工程与信息学报,2010,8(1):35-38. (GAO Jie. Analysis of transportation network connectivity evaluation Index [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2010, 8(1): 35-38. (in Chinese))