

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.02.007

水量水质系统控制的流域水系连通方案

田传冲,陈 星,湛忠宇,卢婉莹

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:以临海市大田港流域为例,统筹水量水质综合效益,根据流域地形、各子流域特性、土地利用类型及人口分布等关键因素,利用 ArcGIS 分析计算流域暴雨水及水质管理关键点,再通过径流分析梳理水系廊道,拟定水系连通方案,最后利用 MIKE11 构建降雨径流-水动力-水质耦合模型,确定基于水量水质系统控制的最优连通方案,进而构造雨洪安全及水质安全格局。结果表明:构建的一维耦合模型在大田港流域有较好的适用性;最优连通方案不仅使流域满足行洪排涝标准,而且也使断面水质达标率超过 90%。

关键词:水量;水质;水系连通;耦合模型;大田港流域

中图分类号:TV213 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)02-0030-05

Watershed system connectivity scheme based on water quantity and quality control system

TIAN Chuanchong, CHEN Xing, ZHAN Zhongyu, LU Wanying

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A case study was conducted in the Datiangang Basin in Linhai City. The comprehensive benefits of water quantity and quality, and the key factors, including the basin's terrain, the characteristics of sub-basins, the types of land use, and the population distribution were considered in the study. ArcGIS was used to analyze and calculate the key factors of rainstorm and water quality management in the basin, and the water system connectivity scheme was developed through runoff analysis in the Datiangang Basin of Linhai City. The MIKE11 model was used to build the runoff-hydrodynamic-water quality coupling model, and the optimal connectivity scheme based on the water quantity and quality control system was determined, in order to construct the rainstorm and flood safety and water quality safety pattern. The results show that the established one-dimensional coupled model has strong applicability in the Datiangang Basin, and the optimal scheme meets the requirements of flood drainage in the basin and enables the water quality compliance rate to exceed 90%.

Key words: water quantity; water quality; water system connectivity; coupled model; Datiangang Basin

河湖水系是水资源的载体,也是生态环境的重要组成部分,河湖水系及其连通状况直接影响水资源的格局、水资源承载能力、水资源的可持续利用、水旱灾害的风险状况及生态环境等^[1]。水系连通是国家新时期保障水安全的治水方略,通过调整、优化河湖水系格局,可以改善水资源时空分布不均状况,提高水资源分布格局与经济社会格局的协调

性^[2]。随着生活水平的提高,特别是在浙江省提出“五水共治”之后,临海市对水环境的要求也越来越高,传统的主要考虑水量、以行洪排涝为目的水系连通方案已然不能满足实际需求,水系连通必须要在“推进五水共治、突出治污治涝”的大背景下,同时构造雨洪安全格局和水质安全格局。笔者以临海市大田港流域为例,统筹水量水质的综合效益,根据流

基金项目:国家自然科学基金(51579148)

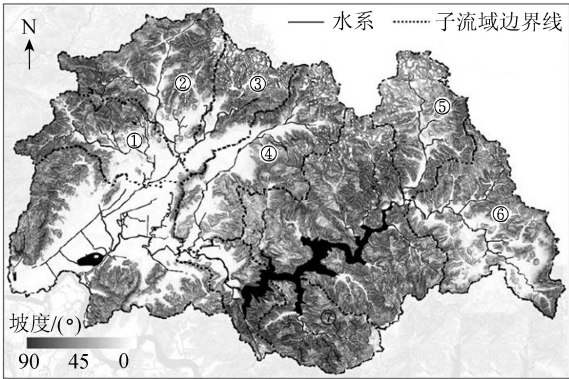
作者简介:田传冲(1989—),男,硕士研究生,研究方向为水文预报、水系规划。E-mail:798924778@qq.com

域地形、各子流域特性、土地利用类型及人口分布等关键因素,基于 ArcGIS 分析,计算分析流域暴雨水及水质管理关键点,并以此为突破口,利用 MIKE11 构建降雨径流-水动力-水质耦合模型,进而确定基于水量水质系统控制的流域水系最优连通方案,为水系连通的研究提供新思路。

1 研究区概况

大田港流域位于临海市中部,流域面积约 570 km²,平均坡度为 13.3°,主要包括白石溪、两头门溪、后湖溪、琅坑溪、康谷溪、小芝溪、严坑溪等水系。利用 ArcGIS 中的水文分析工具,将研究区划分 7 个子流域(图 1),各子流域属性统计见表 1。大田港流域三面环山,地势中部低四周高,呈“锅底”形状;流域上游河短坡陡,集流快、洪水猛,下游地势低,牛头山水库虽然可以调控部分子流域来水,但由于集雨面积较大且只有大田港闸一个排水通道,又受灵江潮水顶托,故易发生洪涝灾害。

临海市主城区主要集中在大田港流域,人口密度大,点源、非点源污染比较严重,考核断面基本全部为劣 V 类断面,流域面临的水环境问题较为严峻。



注:①~⑦为子流域编号

图 1 大田港流域水系地形及子流域划分

表 1 子流域属性统计

子流域编号	水系名称	水系长度/m	子流域面积/km ²	子流域平均坡度/(°)	有无调控工程
①	白石溪	8 850	34.07	18.58	无
②	两头门溪	14 780	52.47	22.18	无
③	后湖溪	7 350	30.64	17.28	无
④	琅坑溪	12 460	57.31	17.92	无
⑤	康谷溪	9 760	37.05	20.29	有
⑥	小芝溪	15 120	64.10	18.19	有
⑦	岩坑溪	1 980	13.36	26.94	有

2 研究方法与应用

2.1 暴雨水关键点

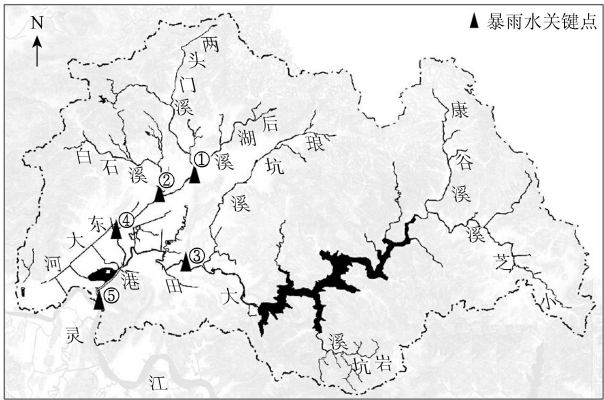
暴雨水控制点主要包括两部分:①指同级径流交汇点;②河道地势低洼点,即易发生洪涝灾害点。

暴雨水关键点是在已确定的暴雨水控制点基础上进一步筛选的,其确定原则为:上游集水区面积相对较大且无控制工程,上下游坡度骤减处(多位于山地、平原交会处)。

研究区暴雨水关键点属性统计见表 2,暴雨水关键点分布见图 2。

表 2 暴雨水关键点属性统计

暴雨水关键点编号	点位	上游集雨区面积/km ²	上下游坡度变化率/%	备注
①	后湖溪与两头门溪交汇处	83.11	34	
②	白石溪与后湖溪交汇处	117.18	168	
③	琅坑溪与大田港交汇处	57.31	177	扣除牛头山水库控制面积
④	东大河与后湖溪交汇处	163.24	24	
⑤	大田港与灵江交汇处	349.65	5	扣除牛头山水库控制面积



注:①~⑤为暴雨水关键点编号

图 2 暴雨水关键点分布

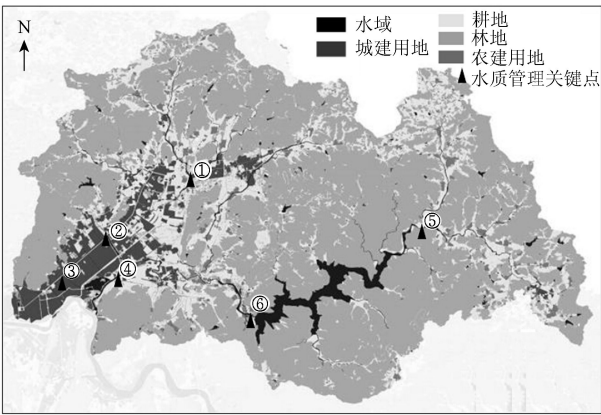
2.2 水质管理关键点

水质改善需要在确定研究区水质管理关键点的基础上,加强污染源控制管理,同时考虑水系连通工程,增加补水水源。水质管理关键点确定原则为:附近有较多点源、非点源污染的水系河道,人口密度或农田所占比例较大的流域出水口,同级径流交汇点。

研究区水质管理关键点属性统计见表 3,土地利用现状及水质管理关键点分布见图 3。

表 3 水质管理关键点属性统计

水质管理关键点编号	点位	现状水质
①	白石溪与后湖溪交汇处	V 类
②	东大河与洛河交汇处	劣 V 类
③	东大河与大寨河交汇处	劣 V 类
④	洛河与大田港交汇处	劣 V 类
⑤	小芝溪与康谷溪交汇处	Ⅱ 类
⑥	牛头山水库出口口	Ⅱ 类



注:①~⑥为水质管理关键点编号

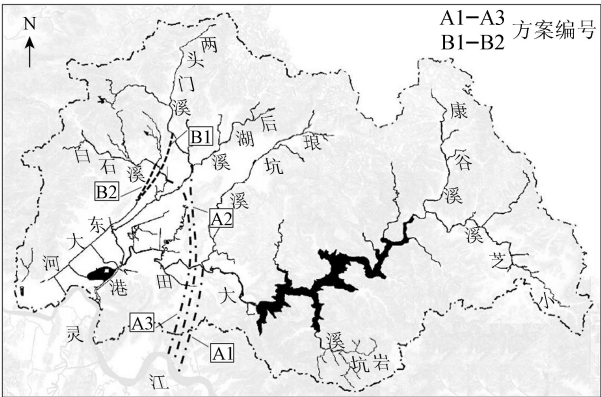
图3 土地利用现状及水质管理关键点分布

2.3 拟定水系连通方案

在研究区暴雨水关键点及水质管理关键点分析确定的基础上,根据径流途径,梳理并新增水系串联廊道,首先满足行洪排涝达标(20年一遇),同时考虑断面水质达标(平水年,水质达到Ⅳ类及以上)。先根据暴雨水关键点确定行洪排涝水系连通方案,在此基础上,再根据水质管理关键点确定水质改善连通方案,考虑到水质管理关键点主要集中在主城区,为减轻上游洪水对主城区的威胁,水质改善连通方案要有节制闸控制。水系连通具体拟订方案见表4,水系连通布局见图4。

表4 拟订方案统计

类别	方案编号	具体方案
暴雨水 水系连 通方案	A1	琅坑溪与大田港交汇处,新开河渠直排灵江(河长6.52 km,河底宽28~40 km)
	A2	后湖溪与两头门溪交汇处,新开河渠连接大田港,直排灵江(河长11.54 km,河底宽28~40 km)
	A3	白石溪下游新开河渠,经后湖溪、大田港,直排灵江(河长11.02 km,河底宽28~40 km)
水质改 善连通 方案	B1	两头门溪下游新开河渠,并修建节制闸,经白石溪,连接东大河(河长7.7 km,河底宽20 m)
	B2	白石溪下游新开河渠,并修建节制闸,连接东大河(河长3.9 km,河底宽20 m)



注:A1—A3;B1—B2为方案编号

图4 水系连通方案布局

2.4 模型计算

2.4.1 模型介绍

MIKE11 是丹麦水利科学研究所开发的一维水量水质模型,具有人机界面友好、可视化程度高等特点,在很多地区都已得到广泛应用^[3-8],本文主要应用其降雨径流、水动力及对流扩散模块构建耦合模型,进行模拟计算。

a. 降雨径流模块。降雨径流(NAM)模块是一个由一系列以简单定量关系描述的水文循环中各种陆相特征连接起来的集总参数的概念性水文模型,模拟自然流域的降雨径流过程。模块分4层蓄水体进行流域产汇流模拟计算,分别为融雪蓄水体、地表蓄水体、浅层蓄水体及地下蓄水体。

b. 水动力模块。水动力模块(HD)是 MIKE11系统的核心程序,基本方程为圣维南方程组,其微分形式为

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} = q \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n^2 |u|}{R^{\frac{4}{3}}} Q \right] = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q 为流量; x 为沿水流方向空间坐标; B_w 为调蓄宽度,指包括滩地在内的全部河宽; Z 为水位; t 为时间坐标; q 为旁侧入流流量,入流为正,出流为负; u 为断面平均流速; g 为重力加速度; A 为主槽过水断面面积; B 为主流断面宽度; n 为糙率; R 为水力半径。

c. 对流扩散模块。对流扩散模块(AD)以对流—扩散方程为基础,该方程同时考虑水环境中污染物的对流扩散及污染物线性消解过程,其微分形式为

$$\begin{cases} \frac{\partial (AC)}{\partial t} + \frac{\partial (QC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + S_c - S = 0 \\ \sum_{i=1}^N (QC)_{i,j} = (C\Omega)_j \left(\frac{dZ}{dt} \right)_j \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_x 为纵向分散系数; C 为水流输送的物质浓度; Ω 为河道叉点—节点的水面面积; j 为节点编号; I 为与节点 j 相连接的河道编号; S_c 为与输送物质浓度有关的衰减项,可写为 $S_c = K_d AC$, K_d 为衰减因子; S 为外部的源或汇项。

2.4.2 模型建立与率定验证

a. 河网概化。规划区内河道多而复杂,大部分都属天然河道。概化时将主要的输水河道纳入计算范围,将次要的河道和水体根据等效原理,归并为单一河道和节点,使概化前后河道的输水能力相等、调蓄能力不变。对于规划区内不参加水流输送的一些小河、池塘等,其调蓄作用不可忽视,采用调蓄不变

原则模拟概化河网以外的调蓄作用,使概化前后河道的总调蓄容积不变。牛头山水库的设计标准为百年一遇,故对其上游河道不进行概化,只按照牛头山水库出流增加流量边界。研究区河网概化见图 5。

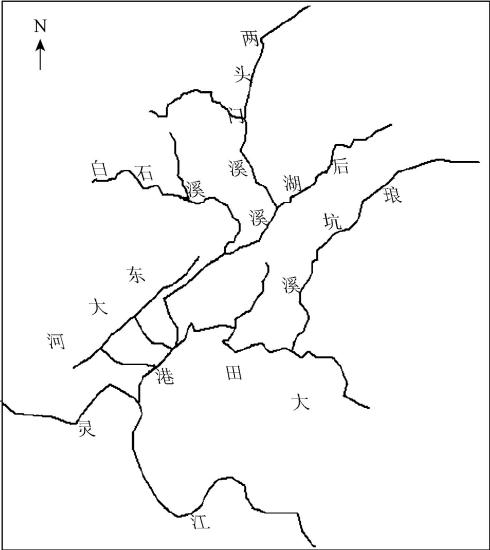


图 5 大田港流域河网概化

b. 污染源概化。污染源主要分为点源和非点源,其中点源包括排入污水厂的城镇生活源和工业企业源,非点源包括未接入城市污水管网的城镇生活源、农村生活源、农田面源和畜禽源。点源根据排污口的位置直接加入到概化的河网中;非点源根据流入的河道分布概化到一定长度的河道中,按完全混合模型进行计算。

c. 模型率定与验证。根据研究区子流域划分及土地利用现状构建 NAM 模块,NAM 和 HD 模块率定的数据采用 2005 年 14 号和 2007 年 17 号台风洪水的降雨径流序列,验证的数据采用 2003 年 16 号台风洪水的降雨径流序列。在 NAM 和 HD 模块率定验证的基础上,采用 2013 年临海市江北城区 3 次调水实验数据对 AD 模块进行率定与验证。

2.4.3 设计暴雨及模拟方案对比

a. 设计暴雨。大田港流域洪水主要由台风暴雨形成,本文在临海市台风暴雨资料的基础上,进行设计暴雨计算,结果见表 5。设计暴雨的时程分配采用暴雨衰减指数法,采用的计算公式为《浙江省短历时暴雨》中推荐的经验公式:

$$\begin{cases} n_{1,6} = 1 + 1.285\lg(H_1/H_6) & 1\text{ h} \leq t_i < 6\text{ h} \\ n_{6,24} = 1 + 1.661\lg(H_6/H_{24}) & 6\text{ h} \leq t_i < 24\text{ h} \\ n_{24,72} = 1 + 2.096\lg(H_{24}/H_{72}) & 24\text{ h} \leq t_i < 72\text{ h} \end{cases} \quad (3)$$

式中: H_i 为 i 时段的累计雨量, H_1 、 H_6 、 H_{24} 和 H_{72} 分别为降雨 1 h、6 h、24 h 和 72 h 雨量; $n_{1,6}$ 、 $n_{6,24}$ 、 $n_{24,72}$ 分别为 1~6 h 时段、6~24 h 时段、24~72 h 时段的暴

雨衰减系数。

表 5 大田港流域设计暴雨成果

时段	各频率雨量/mm				
	$P=2\%$	$P=5\%$	$P=10\%$	$P=20\%$	$P=50\%$
H_{24}	400	320	259	199	92
H_{72}	477	385	315	245	167

b. 方案对比分析。在 20 年一遇设计暴雨情况下,将 A1、A2、A3 方案分别带入 NAM+HD 模块,进行模拟计算,模拟结果见表 6。由表 6 可知,只有 A3 方案满足实际要求,故选取 A3 方案。在平水年的情况下,将 A3+B1 和 A3+B2 方案分别带入 NAM+HD+AD 模块,进行模拟计算,模拟结果见表 6,由结果可知 A3+B1 要优于 A3+B2 方案,最终确定水系连通方案为 A3+B1。

表 6 方案模拟结果对比

类别	方案编号	模拟结果
暴雨水 水系连通方案	A1	行洪排涝校核满足率<55%
	A2	行洪排涝校核满足率<80%
	A3	行洪排涝校核满足率>95%
暴雨水+水质改善 水系连通方案	A3+B1	断面水质达标率>90%
	A3+B2	断面水质达标率<50%

3 结 论

a. 统筹考虑大田港流域地形、土地利用、人口及污染源分布等因素,利用 ArcGIS 水文分析模块,分别对比行洪排涝及水质标准,确定流域暴雨水及水质关键点;在此基础上,以暴雨水、水质管理关键点为突破口,拟定以行洪排涝和改善水环境为目的导向的水系连通方案。该方法统筹水量水质的综合效益,比传统的以行洪排涝为目标的水系连通方案,更加符合实际需求。

b. 基于 ArcGIS 划分的子流域,根据土地利用类型,利用 MIKE11,建立大田港流域降雨径流-水动力-水质耦合模型,模拟对比分析拟定的水系连通方案,进而确定出最优方案。结果表明:构建的一维耦合模型在大田港流域有较好的适用性;最优方案不仅使流域满足行洪排涝标准,而且也使断面水质达标率超过 90%;验证了以暴雨水、水质关键点为突破口建立基于水量水质系统控制的水系连通方案这一思路的可行性,为水系连通的研究提供了新方法。

参考文献:

[1] 李宗礼,郝秀平,王中根,等. 河湖水系连通分类体系探讨[J]. 自然资源学报,2011,26(11): 1975-1982. (LI Zongli,HAO Xiuping,WANG Zhonggen,et al. Exploration on classification of interconnected river system network[J].

Journal of Natural Resources, 2011, 26 (11) : 1975-1982.
(in Chinese))

[2] 李原园, 酈建强, 李宗礼, 等. 河湖水系连通研究的若干问题与挑战 [J]. 资源科学, 2011, 33 (3) : 386-391. (LI Yuanyuan, LI Jianqiang, LI Zongli, et al. Issues and challenges for the study of the interconnected river system network [J]. Resources Science, 2011, 33 (3) : 386-391. (in Chinese))

[3] 杨洵, 梁国华, 周惠成. 基于 MIKE11 的太子河观-菱河段水文水动力模型研究 [J]. 水电能源科学, 2010, 28 (11) : 84-87. (YANG Xun, LIANG Guohua, ZHOU Huicheng. Study on hydrology and hydrodynamic model in Guanying-Shenwo Section of Taizihe River based on MIKE11 [J]. Water Resources and Power, 2010, 28 (11) : 84-87. (in Chinese))

[4] 梁灵君, 杨忠山, 刘超. 基于 MIKE 11 的北京市典型区域降雨径流特征研究 [J]. 水文, 2012, 32 (1) : 39-42. (LIANG Lingjun, YANG Zhongshan, LIU Chao. Rainfall runoff simulation of Beijing typical area based on MIKE11 [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32 (1) : 39-42. (in Chinese))

[5] 朱茂森. 基于 MIKE11 的辽河流域一维水质模型 [J]. 水资源保护, 2013, 29 (3) : 6-9. (ZHU Maosen. One-dimensional water quality model based on MIKE11 for Liaoh River Basin [J]. Water Resources Protection, 2013, 29 (3) : 6-9. (in Chinese))

[6] 谭炳卿, 姜广斌, 房新勤. 分质水量综合评价方法的研究及应用 [J]. 水资源保护, 2005, 21 (4) : 47-51. (TAN Bingqing, JIANG Guangbin, FANG Xinqin. Study and application of integrated assessment method for water quantity with different qualities [J]. Water Resources Protection, 2005, 21 (4) : 47-51. (in Chinese))

[7] 黄琳煜, 聂秋月, 周全, 等. 基于 MIKE11 的白莲泾区域水量水质模型研究 [J]. 水电能源科学, 2011, 29 (8) : 21-24. (HUANG Linyu, NIE Qiuyue, ZHOU Quan, et al. Study of water quantity and water quality model of Bailianjing Region based on MIKE11 [J]. Water Resources and Power, 2011, 29 (8) : 21-24. (in Chinese))

[8] 林波, 刘琪璟, 尚鹤, 等. MIKE11/NAM 模型在挠力河流域的应用 [J]. 北京林业大学学报, 2014 (5) : 99-108. (LIN Bo, LIU Qijing, SHANG He, et al. Application of coupled MIKE11/NAM model in Naoli River Basin [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014 (5) : 99-108. (in Chinese))

(收稿日期: 2015 - 12 - 28 编辑: 徐 娟)

+++++

(上接第 29 页)

[4] 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 Yunlong, XU Youpeng, MA Shuangshuang. Water system structure and network connectivity change analysis influenced by urbanization development of Taihu City watershed in Suzhou downtown area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21 (10) : 1167-1172. (in Chinese))

[5] 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. River connectivity evaluation based on graph theory and resistance to water-flow [J]. Advances in Water Science, 2012, 23 (6) : 776-781. (in Chinese))

[6] 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.

[7] 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, 2015, 31 (5) : 9-12. (RU Biao, CHEN Xing, ZHANG Qicheng, et al. Evaluation of connectivity of river network in plain area [J]. Hydroelectric Energy, 2015, 31 (5) : 9-12. (in Chinese))

[8] 王中根, 李宗礼, 刘昌明, 等. 河湖水系连通的理论探讨 [J]. 自然资源学报, 2011, 26 (3) : 523-529. (WANG Zhonggen, LI Zongli, LIU Changming, et al. Theoretical research on river-lake system connectivity [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26 (3) : 523-529. (in Chinese))

[9] 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. Analysis of water system connectivity and its influence factors in the Yangtze River Basin [J]. Yangtze River, 2010, 41 (1) : 1-5, 78. (in Chinese))

[10] 王海英, 黄强, 李传涛, 等. 图论算法及其 MATLAB 实现 [M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2010.

[11] 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. (ZHANG 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))

[12] POULTER B, GOODALL J L, HALPIN P N. Applications of network analysis for adaptive management of artificial drainage systems in landscapes vulnerable to sea level rise [J]. Journal of Hydrology, 2008, 357 (3/4) : 207-217.

(收稿日期: 2015 - 12 - 28 编辑: 彭桃英)