

Optimum Cross-Section Design of Ecological River Based on Health Assessment

Li Li¹, Hua Bai², Xin Dong¹, Siyu Zeng^{1*}

¹School of Environment, Tsinghua University, Beijing

²China Academy of Urban Planning & Design, Beijing

Email: lili_la@163.com, *szeng@tsinghua.edu.cn

Received: Jun. 13rd, 2019; accepted: Jun. 28th, 2019; published: Jul. 4th, 2019

Abstract

In view of the river system in the newly-built XA urban area of Baiyangdian river basin, a river health assessment index system suitable for the planning stage is constructed to comprehensively evaluate the influence of different cross-section schemes on river health from three aspects of hydrology, water quality and river system structure, including 7 indexes in total. The results show that the main parameters affecting river health in the study area are bottom width and roughness coefficient. The health index can be improved by optimizing the cross-section schemes, but it is still limited by the amount of water supplement. Under the existing planning, the bottom width of unfavorable points of river should be less than 1 m, and the roughness coefficient should be about 0.05, in order to maintain the flow, depth and connectivity. Water surface rate satisfaction level, fluidity level and total nitrogen standard level are the main indexes restricting river health level in the case area, which cannot reach the standard of the planning by the method of cross-section optimization design. Therefore, it is suggested to further investigate the rationality of the existing planning and take other measures to improve the level of the indexes.

Keywords

River Health, Assessment Index System, Cross-Section Design, River System Planning

基于健康评价的生态河道断面优化设计

李莉¹, 白桦², 董欣¹, 曾思育^{1*}

¹清华大学环境学院, 北京

²中国城市规划设计研究院, 北京

Email: lili_la@163.com, *szeng@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2019年6月13日; 录用日期: 2019年6月28日; 发布日期: 2019年7月4日

*通讯作者。

摘要

针对白洋淀流域XA新建城区的水系建设,通过构建适用于规划阶段的河流健康评价指标体系,从水文、水质、水系结构三方面、共7项指标,综合评价不同断面设计方案对河流健康的影响。结果表明,影响研究区域河流健康的主要断面参数为底宽和糙率系数,通过优化断面方案可以提高水系健康指数,但整体水平仍受制于补水量大小。现有补水量条件下,河道不利点的底宽不宜超过1 m、糙率系数宜为0.05,以维持生态流量、生态水深、连通性等指标;水面率满足程度、流动性水平和总氮的达标程度是限制研究区域河流健康水平的主要指标,无法通过断面优化设计的方法使其充分达标,故建议进一步考察规划要求的合理性并采取其它措施来提高指标的达标程度。

关键词

河流健康,评价指标体系,断面设计,水系规划

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

河流是城市必需的自然要素,有防洪排涝、引水灌溉、景观旅游等功能[1],由功能要求决定其设计范围和侧重点。针对侧重景观生态功能的新建城市水系,在规划方案基本确定的情况下,从河流健康[2] [3]的角度出发,重点关注水体环境、不考虑岸线等横向延伸区域,则有必要对河流的断面设计进行讨论。断面设计既要使河流维持正常水文水质条件,也要考虑城市景观需求[4]。因此,需要通过一定的方法来综合评价断面设计对河流健康的影响。

传统河流评价多基于控制断面的监测结果,随着对河流健康的深入研究,结合水文、水质、生态结构及社会经济指标的综合评价方法得到迅速发展,澳大利亚、瑞典等国家早已相继开展了相关研究与实践,形成了ISC(澳大利亚溪流健康指数)、RCE(瑞典岸边与河道环境细则)等诸多评价方法;国内也已有黄河健康评价指标体系、健康长江指标体系以及水利部《河湖健康评估技术导则》(征求意见稿)等评价方法[5] [6] [7] [8]。由于河流健康涉及范围广泛、区域环境及河流问题不尽相同,因此各类评价方法的应用条件和评价标准也有所差异。现有的河流健康评价主要着眼于河流现状,对规划中的新建河流少有涉及,由于规划方案具有不确定性、且在规划阶段往往稀缺监测数据、无法通过实测数据分析评价新建河流的健康水平,因此现有的指标体系不适用于规划阶段。本文将针对某新建城区,通过建立水系模型、并构建适用于规划阶段的河流健康评价指标体系来评价不同断面方案对河流健康的影响,为优化生态河道的断面设计提供一定的参考方向。

2. 研究方法

2.1. 研究区域概况

研究区域位于白洋淀流域的XA新建城区,地势低洼平坦,规划水系呈环状河网形态,本文选取局部水系作讨论,涉及6条人工新建河流(见图1),流域面积约13 km²。根据水域共融的生态城市定位,新建河流需兼具生态和景观的功能特点,但由于水资源水环境条件较差,水系建设存在较大健康风险。规

划拟采用再生水、雨水、上游来水等多水源形式维持水系水量，其中再生水由城区新建再生水厂供给、雨水资源的利用需考虑城区 LID 设施建设。本文采用的数据来源于该城区规划方案以及历史气象、水文、水质资料等，实测数据缺乏时则通过查阅标准或华北相似地区的经验值作为参考。

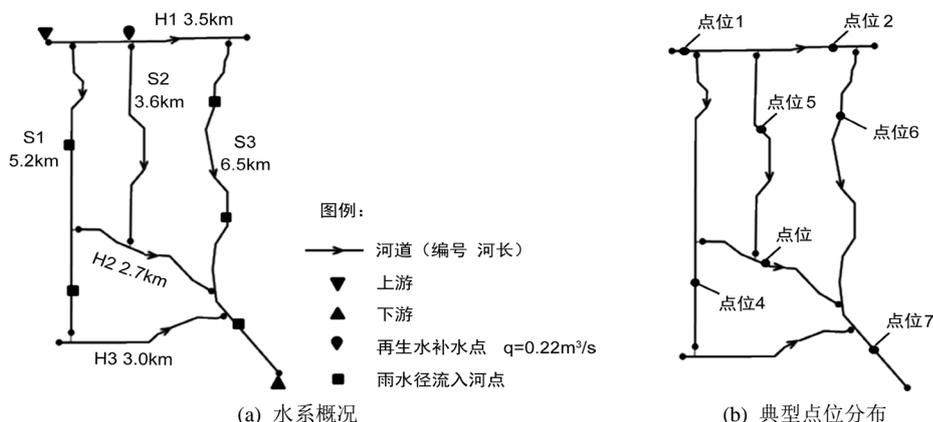


Figure 1. River system in the study area
图 1. 研究区域水系概化

2.2. 河流水动力水质模型构建

本研究选用丹麦 DHI 公司的水环境模型软件 Mike Hydro River，运用其降雨径流模块、水动力模块和 ECO lab 水质模块来模拟研究区域水系的水动力和水质演变过程。通过统计分析研究区域 30 年降雨序列数据，用运动波法模拟降雨径流。考虑城区用地类型和 LID 建设，设年径流总量控制率为 80%、径流污染物削减率为 50%。水动力模块采用 Abbott-Ionescu 六点隐式差分格式求解一维非恒定流圣维南方程组，输出河道沿程流量、流速、水深等结果。水质变量包括 BOD₅、氨氮、总氮、总磷及 DO，模拟过程中考虑污染物在水中的稀释扩散以及有机物降解、硝化/反硝化、磷的转化等生化反应过程。污染源包括点源和径流面源，输入负荷的确定参考再生水水质标准、类似区域径流污染水平和上游来水的水质数据。

2.3. 断面设计方案

按规划要求和场地高程设计断面深度和河底纵向坡度，因此在常时低水位状态下影响水流的断面参数应有底宽、边坡坡度、糙率系数和断面形状，如表 1 所示，通过方案 1~5 模拟多种断面设计条件下河流健康指标的变化情况；另外，通过模拟高补水量的情景(方案 2a、3a)与规划基础补水量情景(方案 2、3)相比较来讨论补水量大小对断面优化设计的影响。

Table 1. Cross-section design schemes

表 1. 断面设计方案

编号	底宽 m	顶宽 m	边坡坡度	糙率系数	断面形状	补水量 m ³ /s
方案 1	1	6	1:1	0.025	梯形断面	0.22
方案 2	1	6	1:1	0.05	梯形断面	0.22
方案 3	3	8	1:1	0.05	梯形断面	0.22
方案 4	1	11	1:2	0.05	梯形断面	0.22
方案 5	1	11	河槽 1:1 河滩 1:2	0.05	复式断面	0.22
方案 2a	1	6	1:1	0.05	梯形断面	0.55
方案 3a	3	8	1:1	0.05	梯形断面	0.55

2.4. 适用于规划阶段的河流健康评价指标体系

结合生态和景观河道的特点, 考虑规划方案的不确定性、实测数据在规划阶段的稀缺性和可得性, 以及河流模型模拟结果的支持程度, 构建适用于规划阶段的河流健康评价指标体系, 涉及水文、水质、水系结构 3 类、共计 7 个指标, 如表 2 所示。该指标体系适用于缺少监测数据、但通过模型模拟可得到基础水文水质输出数据、且已有相应的规划要求或经验数据可作为评价标准的情况。

Table 2. River health assessment index system suitable for the planning stage
表 2. 适用于规划阶段的河流健康评价指标体系

指标类型	指标名称	指标计算方法	备注
水文类 A_1	生态流量保证率 A_{11}	$A_{11} = \begin{cases} Q_s/Q_e, Q_s < Q_e \\ 1, Q_s \geq Q_e \end{cases} \quad (1)$ 式中: Q_s 为模拟流量; Q_e 为最小生态流量。	参考研究区域外围天然河道的历史多年平均流量, 根据 Tennant 法[9], 以该值的 30% 作为生态基流标准, 确定 $Q_e = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$ 。
	生态水深保证率 A_{12}	$A_{12} = \begin{cases} WD_s/WD_e, WD_s < WD_e \\ 1, WD_s \geq WD_e \end{cases} \quad (2)$ 式中: WD_s 为模拟水深; WD_e 为最小生态水深。	结合景观需求和白洋淀流域常见鱼种——鲤鱼生长所需的经验最小适宜水深 [10] [11], 取 $WD_e = 0.3 \text{ m}$ 。
	流动性水平 A_{13}	$A_{13} = \begin{cases} v_s/v_{e,\min}, v_s < v_{e,\min} \\ 1, v_{e,\min} \leq v_s \leq v_{e,\max} \end{cases} \quad (3)$ 式中: v_s 为模拟流速; v_e 为生态流速。	结合鲤鱼生长的适宜流速及再生水补给景观河道的停留时间标准[12], 取 $v_{e,\min} = 0.2 \text{ m/s}$, $v_{e,\max} = 0.8 \text{ m/s}$ 。
水质类 A_2	耗氧物质达标程度 A_{21}	$A_{21} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, X_i = \begin{cases} c_{mi}/c_i, c_i > c_{mi} \\ 1, c_i \leq c_{mi} \end{cases} \quad (4)$ 式中: c_i 为第 i 种耗氧物质的模拟浓度; c_{mi} 为第 i 种耗氧物质的标准浓度; X_i 为第 i 种耗氧物质的达标程度。	根据规划方案, 以地表水 IV 类为河流水质达标标准。
	营养物质达标程度 A_{22}	$A_{22} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_j, Y_j = \begin{cases} c_{mj}/c_j, c_j > c_{mj} \\ 1, c_j \leq c_{mj} \end{cases} \quad (5)$ 式中: c_j 为第 j 种营养物质的模拟浓度; c_{mj} 为第 j 种营养物质的标准浓度; Y_j 为第 j 种营养物质的达标程度。	根据规划方案, 以地表水 IV 类为河流水质达标标准。
水系结构类 A_3	水面率满足程度 A_{31}	$A_{31} = \begin{cases} S_w/(S \cdot W_e), S_w/S_i < W_e \\ 1, S_w/S_i \geq W_e \end{cases} \quad (6)$ 式中: S_w 为模拟河道水面总面积; S_i 为研究区域总面积; W_e 为规划要求的常时水面率。	根据规划方案, $W_e = 3.5\%$ 。
	连通性水平 A_{32}	$A_{32} = (\alpha' + \beta' + \gamma')/3 \quad (7)$ $\alpha = \frac{L-V+1}{2V-5}, \beta = \frac{L}{V}, \gamma = \frac{L}{3V-6} \quad (8)$ 式中: 将河流的起源和交汇点视为节点, V 为节点数; 河流视为连接节点的廊道, L 为廊道数; α 为水系环度; β 为节点连接率; λ 为水文连接度[13] [14]; α', β', γ' 为离差标准化到[0,1]区间后的数值。	根据景观破碎化理论, 景观破碎分离后河流水系的水文循环必受影响, 导致循环阻断、水系连通性下降。因此可采用该理论中描述区域景观廊道连通状况的指标来描述宏观尺度下河流水系间的连通程度。

采用河流健康指数 A 来描述指标的集成结果。各单项指标量化后的取值区间均为[0,1]、代表了对其相应的评价标准的达标程度, 本研究认为各指标重要性相当, 通过等权平均后得到指数 A 。

$$A = \sum (a_{ij} \cdot A_{ij}) \quad (9)$$

式中: A_{ij} 为各单项指标; a_{ij} 为该指标的权重, 取等权重, 即 $a_{ij} = 1/7$ 。

3. 结果与讨论

3.1. 基于河流健康的断面优化比选

取 7 个典型河道点位, 多为水力较不利点(见图 1), 分析断面方案 1~5 对各指标的影响。如图 2 所示, 生态流量保证率 A_{11} 和生态水深保证率 A_{12} 在糙率系数高、底宽小的方案 2、4、5 中表现较好, 除点位 1 外基本全部达标, 说明通过优化断面设计方案可使补水后的水系水量足够支撑该情景下河道不利点的生态基流和生态水深要求。流动性水平 A_{13} 在糙率系数低的方案 1 中表现最好, 但由于该方案的河流健康指数较差(见表 3), 故综合考虑不建议降低断面糙率系数。

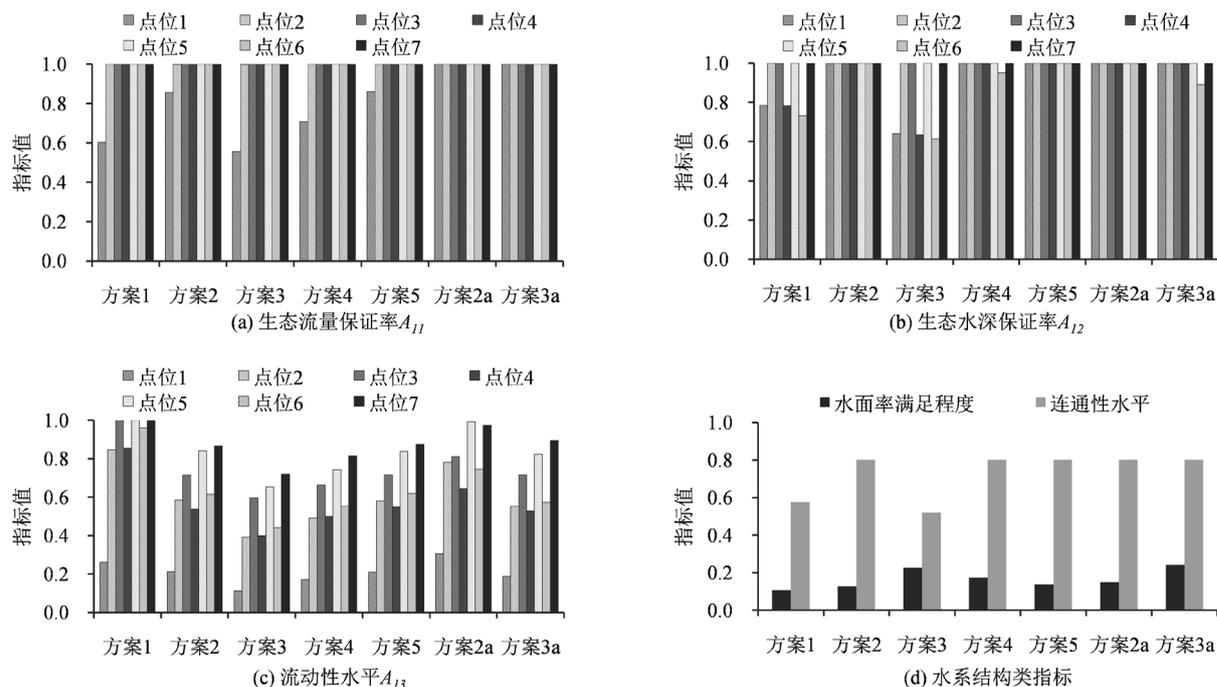


Figure 2. Indexes of hydrology and river system structure under different cross-section schemes

图 2. 不同断面方案下的水文类、水系结构类指标

Table 3. River health index under different cross-section schemes

表 3. 不同方案下的河流健康指数

方案排序	方案 3a	方案 2a	方案 2	方案 4	方案 5	方案 1	方案 3
河流健康指数 A	0.723	0.714	0.713	0.713	0.713	0.657	0.656

水质类指标中, 耗氧物质 BOD_5 、氨氮的达标程度取值范围分别为[0.99, 1]、[0.96, 1], 营养物质总磷的达标程度为 1、总氮为[0.55, 0.68], 水质较稳定。水系结构类指标中, 水面率满足程度不足 0.3, 增加断面底宽对水面率有一定提高, 但在水量不足时会降低生态水深保证率, 故不建议在低补水量情景下加大底宽。如表 3 所示, 低补水量情景下健康指数最高的方案 2、4、5 的断面底宽都为 1 m、糙率系数为 0.05, 是为该情景下较优的参数组合, 且其他参数的影响较小。高补水量情景对河道水文输出值有利, 但对在低水量条件下通过断面优化已达标的指标值无益, 故方案 2a 与方案 2 无明显差异; 方案 3a 的显著提高则说明了断面设计受制于水量, 高补水量可以增加相应优化断面的底宽、并使河道维持更高的健康水平。

3.2. 制约河流健康的主要指标

通过优化断面设计可使部分指标达到最优,但流动性水平、营养物质中总氮的达标程度和水面率满足程度3个指标的可达性整体偏低,是制约研究区域河流健康水平的主要指标。

水量不变的情况下影响流动性水平的自然因素有河底纵坡和糙率系数。但由于研究区域地势平缓及景观需求,不宜加大河底纵坡坡度;另外考虑河流健康指数的计算结果和生态河道的要求,河道走向应有一定弯曲性、河槽应存在草石淤滩等形貌,故断面糙率系数不宜偏低。建议在河道建设时加入跌水景观、水工建筑物或通过推流设备来加强水体流动。

营养物质总氮的达标程度取决于入河污染物负荷,现有的水体监测方案中常有总氮不参评的情况、再生水水质标准中也缺少总氮,因此建议加强监测力度和规范建设、同时合理设计沿河湿地等净化设施以提高污染物削减率、严格控制入河水体的水质指标。

河道水面面积主要取决于水量和断面宽度。通过健康评价可得到一定水量条件下较优的断面方案,提高补水量有利于增加优化断面的设计底宽、并增加水面面积。研究区域规划补水量下的较优断面方案的水面率满足程度仅0.13,高补水量情景下为0.24,但仍偏低。故建议在增加河道补水量的同时进一步论证研究区域规划水面率的合理性和降低标准的可能性。

4. 结论

本文建立了研究区域的水系模型,并通过构建适用于规划阶段的河流健康评价指标体系来评价不同断面设计方案对河流健康的影响。结果表明,在现有水量条件下,研究区域河道的水力不利点采用底宽1 m、糙率系数为0.05的断面,可基本使健康水平达到相对最优;适宜的断面底宽取决于补水量大小,高补水量情景有利于增加断面底宽并达到更高的健康水平。水面率和流动性水平由于水量和地形条件的制约,无法通过优化断面设计达到规划要求,需进一步研究其他措施、讨论其可达性;总氮为河道水质的主要制约因素,在控制入河污染物时应给予更多关注。综合所有指标,通过健康评价的手段可以比选得到一定水量条件下较优的断面设计方案。

基金项目

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110-008)。

参考文献

- [1] 乔光建,赵景窳.北方地区城市生态防洪河道规划设计[J].水科学与工程技术,2011(3):50-53.
- [2] Norris, R.H. and Thoms, M.C. (2010) What Is River Health? *Freshwater Biology*, **41**, 197-207. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.00425.x>
- [3] Boulton, A. (2010) An Overview of River Health Assessment Philosophies, Practice, Problems and Prognosis. *Freshwater Biology*, **41**, 469-479. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.00443.x>
- [4] 孙大勇,黄时锋.浅谈生态景观型河道横断面形式[J].水利科技,2005(1):31-33.
- [5] Ladson, A.R., White, L.J., Doolan, J.A., et al. (1999) Development and Testing of an Index of Stream Condition for Waterway Management in Australia. *Freshwater Biology*, **41**, 453-468. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.00442.x>
- [6] 曾小瑛,车越,吴阿娜.3种河流健康综合性评价方法的比较[J].中国给水排水,2007,23(4):92-96.
- [7] 蔡守华,胡欣.河流健康的概念及指标体系和评价方法[J].水利水电科技进展,2008,28(1):23-27.
- [8] 黄艺,文航,蔡佳亮.基于环境管理的河流健康评价体系的研究进展[J].生态环境学报,2010,19(4):967-973.
- [9] 孙甲岚,雷晓辉,蒋云钟,等.河流生态需水量研究综述[J].南水北调与水利科技,2012,10(1):112-115.
- [10] 曹玉萍,王伟,张永兵.白洋淀鱼类组成现状[J].动物学杂志,2003,38(3):65-69.

- [11] 李梅, 黄强, 张洪波, 等. 基于生态水深-流速法的河段生态需水量计算方法[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 738-742.
- [12] 周律, 邢丽贞, 段艳萍, 等. 再生水回用于景观水体的水质要求探讨[J]. 给水排水, 2007, 33(4): 38-42.
- [13] 窦明, 张远东, 张亚洲, 等. 淮河流域水系连通状况评估[J]. 中国水利, 2013(9): 21-23.
- [14] 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.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-8010, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: wpt@hanspub.org