

基于模糊可变模型的秦淮河健康评价

侯佳明¹, 胡 鹏¹, 刘 凌², 张梦婕¹, 曾庆慧¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对河流生态系统的复杂性和模糊性, 本文以可变模糊集理论为基础, 提出了基于模糊可变模型的城市河流健康评价方法, 并将其运用于评价实例当中。以南京市秦淮河为例, 根据城市河流健康的内涵和特点, 提出由目标层、控制层、状态层、指标层组成的4级19项评价指标体系, 对秦淮河的河流健康状况进行综合评价。相较于传统评价方法, 利用模糊可变模型的评价结果更为直观和合理, 是处理和解决河流生态系统中模糊概念和现象的有效方法。通过对评价结果的分析, 识别出秦淮河目前主要存在水环境、防洪安全以及自然形态3方面问题, 并提出了相应的保护修复措施。

关键词: 河流健康评价; 可变模糊集; 层次分析法; 秦淮河

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2020)03-0001-08

河流是大气环流与下垫面共同作用的产物, 对人类发展具有极其重要的作用。一方面, 河流能够为人类提供水资源和水景观, 以其自然、经济、社会与环境价值推动人类发展; 另一方面, 河流也能够为各种水生生物提供生存环境, 是地球生物圈最重要的生态系统类型之一(Karr & Chu, 2000)。但是, 随着经济社会的快速发展, 人类活动和气候变化对河流的影响愈加强烈, 河流生态系统的健康状况日益衰退(Malveira et al, 2012; Beechie et al, 2013), 诸多地区产生了天然湿地萎缩、河口径流量降低、地方性鱼类物种消失等现象, 造成河流生态系统退化, 影响自然、社会、经济的可持续发展(Li et al, 2011; He et al, 2016; Matysik et al, 2015)。

河流健康程度是河流生态系统结构与功能完整性的评判工具(吴阿娜等, 2005)。河流健康概念的提出, 加强了公众与河流保护之间的联系, 促使社会更加关注人类活动对河流健康的影响(杨文慧等, 2005)。对河流的健康状况进行评价, 不仅能够展示河流健康现状, 同时也能够展示已被破坏河流的修

复及改善情况, 政府可据此制定更具针对性的管理政策。因此, 河流生态系统健康状况的评价和适应性管理成为近几年国内外的热点研究问题(Zhai et al, 2014; Aleksanyan et al, 2015)。

河流健康是一个多层次、多结构、单目标的复杂系统, 具有强烈的模糊性。模糊性(Lee et al, 1972)是指由于事物之间的差异存在中间过渡带而导致的边界不清晰问题。对于这种复杂系统, 传统的评价方法会存在评价标准不明确的现象, 难以反映评价过程中的模糊性。陈守煜(2005)基于工程模糊集理论提出了可变模糊集理论, 使经典模糊集合的发展趋于相对性与动态多样性, 建立的模糊可变评价模型通过吸引域、排斥域、优化准则和距离变化计算相对隶属度, 描述评价样本与评价等级的接近程度, 有效解决评价标准中的边界模糊问题; 陈守煜和郭瑜(2005)应用该理论, 对北京市永定河水质进行了评价, 实现了从定性到定量的综合集成评价; 陈守煜和柴春岭(2007)提出区域水资源可持续利用评价的可变模糊评价方法, 对西安市水资源可持续利用情况进行评价, 得到了更为可靠的评价结果, 并认为模糊可变评价方法在其他学科领域也具有广泛的应用价值。高学平等(2009)建立基于模糊理论的河流健康状况多层次评价模型, 能够定量地从各分项指标和总体角度反映河流健康状况。

本文以可变模糊集理论为基础, 建立模糊可变评价模型, 并将其运用于秦淮河河流健康评价实例中。通过与传统方法的对比分析, 验证了模糊可变

收稿日期: 2018-10-22

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0404503); 国家自然科学基金(51509265, 51625904); 中国水科院基本科研业务费项目(WR0145B522017)。

作者简介: 侯佳明, 1994年生, 男, 硕士研究生, 主要从事生态水文学研究。E-mail: hjmpersonal@qq.com

通信作者: 胡鹏, 1985年生, 男, 高级工程师, 主要从事生态水文和生态水力学研究。E-mail: hp5426@126.com

评价模型的科学性和适用性,并根据评价结果提出相应的保护修复措施,为河流管理保护提供参考依据,对目前“一河一策”的河流管理保护有重要参考价值。

1 研究方法

1.1 评价模型

根据模糊可变评价模型(陈守煜,2005),一个等级识别问题中,假设包含 m ($i=1,2,3,\dots,m$) 个评价等级和 n ($i=1,2,3,\dots,n$) 个评价指标,把每个评价等级都视为一个论域 B_{ij} ,模糊可变评价模型认为论域 B_{ij} 通常包含吸引域和排斥域两部分,见图1。

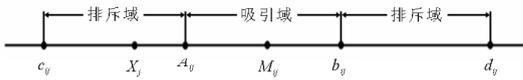


图1 论域 B_{ij} 的判断区间

Fig.1 Judgment interval of domain B_{ij}

用相对隶属度 V_{ij} 表示实测值 x_j 与论域 B_{ij} 的接近程度。在吸引域中 $V_{ij} \geq 0.5$,在排斥域中 $0 < V_{ij} < 0.5$;由于评价等级的第一级和最后一级不存在吸引域和排斥域,因此相对隶属度 $V_{ij} = 1$,按如下公式计算:

当 $x_j > M_{1j}$ 时:

$$\begin{cases} V_{1j} = 1 \\ V_{ij} = 0, i = 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (1)$$

当 $x_j < M_{5j}$ 时:

$$\begin{cases} V_{5j} = 1 \\ V_{ij} = 0, i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (2)$$

其他情况:

$$\begin{cases} 0.5 \times \frac{x_{ij} - c_{ij}}{a_{ij} - c_{ij}} & c_{ij} < x_{ij} < a_{ij} \\ 0.5 + 0.5 \times \frac{x_{ij} - a_{ij}}{M_{ij} - a_{ij}} & a_{ij} < x_{ij} < M_{ij} \\ 0.5 + 0.5 \times \frac{b_{ij} - x_{ij}}{b_{ij} - M_{ij}} & M_{ij} < x_{ij} < b_{ij} \\ 0.5 \times \frac{d_{ij} - x_{ij}}{d_{ij} - b_{ij}} & b_{ij} < x_{ij} < d_{ij} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}, M_{ij}$ 需要根据各指标的评价标准进行确定。一般情况下, M_{ij} 为第 j 个指标第 i 级评价标准上下界的中值, a_{ij}, b_{ij} 分别对应第 j 个指标第 i 级评价标准的上下界, c_{ij}, d_{ij} 分别对应第 j 个指标第 $i-1$ 级和第 $i+1$ 级的 M 值。

根据权距离最优化理论,可以推导出模糊可变

合成算子。

$$U_i = \frac{1 + \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n [\omega_j (1 - v_{ij})]^p}{\sum_{j=1}^n (\omega_j v_{ij})^p} \right\}^{a/p}}{\sum_{i=1}^m \left\{ 1 + \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n [\omega_j (1 - v_{ij})]^p}{\sum_{j=1}^n (\omega_j v_{ij})^p} \right\}^{a/p} \right\}} \quad (4)$$

式中, ω_j 为第 j 个评价指标的权重系数; α 为优化准则: $\alpha=1$ 为一乘方准则, $\alpha=2$ 为二乘方准则; p 为距离: $p=1, p=2$ 分别为海明、欧氏距离。

综合隶属度向量 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ 。

1.2 评价指标体系

秦淮河发源于南京市溧水区天生桥,流经南京市雨花区、江宁区、白下区等8区,是典型的城市河流。杨文慧(2005)等人认为城市河流是一个复杂系统,其包括自然生态、社会经济以及景观环境子系统。耿雷华(2006)等人根据河流健康的内涵,从河流各项功能的角度出发,提出由目标层、准则层和指标层3个层次构成的评价指标体系。根据城市河流健康的内涵和特点,结合秦淮河的实际情况,从自然属性和社会服务功能2个角度出发,构建了由目标层、控制层、状态层、指标层组成的4级评价指标体系,见图2。

1.2.1 自然属性 通过河流的水文、形态、环境、生态特征评价河流自然属性的健康状况。能够反映河流水文特征的指标因素众多,其中最重要的就是流速和流量,根据秦淮河的实际情况,选用河流流动性、年径流量变化率、最小生态需水量保证率反映河流的水文特征;选用断面形态多样性、纵向蜿蜒性、河岸稳定性、岸边植被缓冲带宽度反映河流的形态特征;水质类别是河流环境特征最直接的表征。此外,由于秦淮河属于城市缓流水体,富营养化指数也是秦淮河环境特征的重要表征;河流的生态特征包括生境完整性和生物多样性2个方面,生境完整性选择综合性较好的岸坡植被结构完整性作为代表指标。由于浮游植物生境固定、生命周期短、对污染物反应敏感,能够直接反映水体的污染情况(唐涛等,2002),因此选择浮游植物的生物多样性和初级生产力作为河流生物多样性的代表指标。

1.2.2 社会服务功能 社会服务功能是指河流为人类提供水资源与能量、调蓄洪水、通航和景观娱乐等功能,是社会经济系统支撑能力的体现,秦淮河的社会服务功能主要体现在防洪、供水、景观娱乐3个

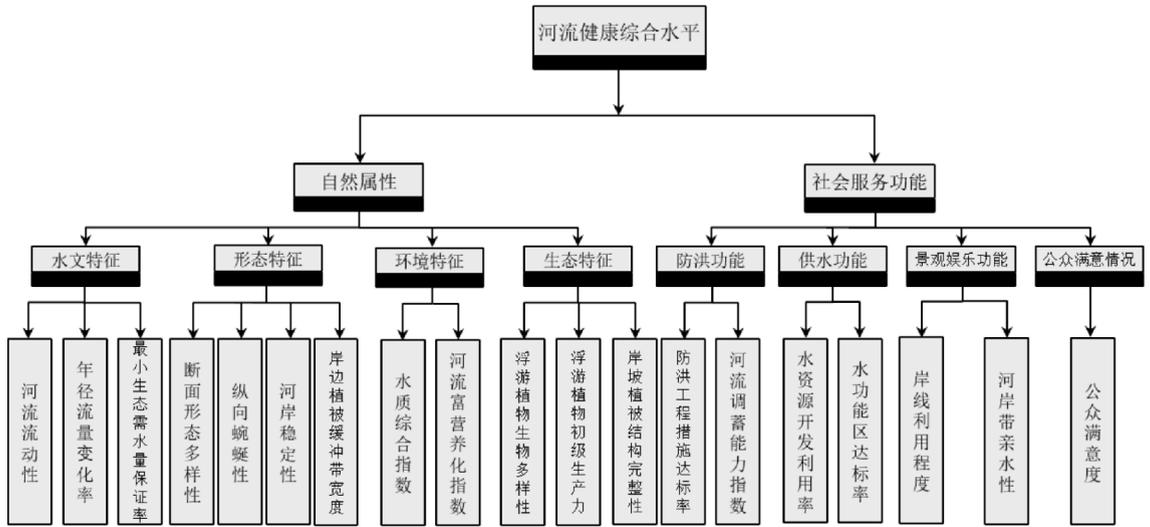


图 2 秦淮河河流健康评价指标体系

Fig.2 Health assessment index system for Qinhuai River

方面。选用防洪工程措施达标率反映河流的防洪功能,表明防洪工程是否满足设计标准及其完善程度;选用水资源开发利用率反映人类开发利用的水资源是否侵占了生态用水,表明经济发展与水资源开发利用的协调程度;选择岸线利用程度和河岸带亲水性综合反映城市河流景观娱乐功能的健康状况。另外,用公众满意度(王婧等,2009)表现公众对河流滨水景观的整体满意程度,采用问卷调查的方式进行统计,以夫子庙段、清凉门大桥段的游客作为调查对象,分析公众对秦淮河综合健康情况整体满意程度。

1.3 评价标准及指标权重

从河流的自然属性和社会服务功能评价秦淮河的河流健康情况,将评价等级分为“健康”、“良好”、“亚健康”、“不健康”、“病态”5个等级。结合历史资料和专家咨询结果,借鉴国内外河流健康评价标准和相关国家标准,综合确定各项指标的评价标准。向水文、环境科学领域的专家发放评分表,运用层次分析法计算各指标的权重系数。本次共发放评分表18份,回收18份,通过一致性检验的有效问卷16份,计算各权重系数的平均值并进行排序,见表1。

表 1 河流健康评价指标评价标准、权重系数及现状值

Tab.1 Criterion, weight and present value for each index of the urban river health evaluation system

| 评价指标 | 评价等级 | | | | | 权重系数 | 现状值 |
|------------------|-----------------|---------------|-----------------|----------------|----------------|-------|-------|
| | 健康 | 良好 | 亚健康 | 不健康 | 病态 | | |
| 河流流动性 D11 | [0.8,1.0] | [0.6,0.8] | [0.4,0.6] | [0.2,0.4] | [0.0,0.2] | 0.051 | 0.39 |
| 年径流量变化率 D12/% | [10,15] | [15,30] | [30,45] | [45,60] | [60,80] | 0.064 | 64 |
| 最小生态需水量保证率 D13/% | [95,100] | [90,95] | [80,90] | [50,80] | [0,50] | 0.071 | 100 |
| 断面形态多样性 D21 | [0.8,1.0] | [0.6,0.8] | [0.4,0.6] | [0.2,0.4] | [0.0,0.2] | 0.016 | 0.17 |
| 纵向蜿蜒性 D22 | [0.8,1.0] | [0.6,0.8] | [0.4,0.6] | [0.2,0.4] | [0.0,0.2] | 0.014 | 0.21 |
| 河岸稳定性 D23 | [0.8,1.0] | [0.6,0.8] | [0.4,0.6] | [0.2,0.4] | [0.0,0.2] | 0.043 | 0.83 |
| 岸边植被带缓冲带宽度 D24 | [0.8,1.0] | [0.5,0.8] | [0.25,0.5] | [0.1,0.25] | [0.0,0.2] | 0.019 | 0.55 |
| 水质综合指数 D31 | [4,5] | [3,4] | [2,3] | [1,2] | [0,1] | 0.124 | 1.64 |
| 富营养化指数 D32 | [0,30] | [30,50] | [50,60] | [60,70] | [70,100] | 0.135 | 64.6 |
| 浮游植物多样性 D41 | ≥3.0 | [2.0,3.0] | [1.0,2.0] | [0.5,1.0] | [0.0,0.5] | 0.075 | 1.34 |
| 浮游植物初级生产力 D42 | [0.8,1.0] | [0.6,0.8] | [0.4,0.6] | [0.2,0.4] | [0.0,0.2] | 0.042 | 0.89 |
| 岸坡植被结构完整性 D43 | [0.85,1.0] | [0.6,0.85] | [0.4,0.6] | [0.2,0.4] | [0.0,0.2] | 0.077 | 0.36 |
| 防洪工程措施达标率 D51/% | [95,100] | [85,95] | [65,85] | [50,65] | [0,50] | 0.053 | 72 |
| 河流调蓄能力指数 D52/% | [90,100] | [60,90] | [30,60] | [10,30] | [0,10] | 0.066 | 60.3 |
| 水资源开发利用率 D61/% | [0,10] | [10,20] | [20,30] | [30,40] | [40,45] | 0.051 | 12.01 |
| 水功能区达标率 D62/% | [80,100] | [70,80] | [50,70] | [20,50] | [0,20] | 0.074 | 0 |
| 岸线利用程度 D71 | [0.9,1.0] | [0.7,0.9] | [0.5,0.7] | [0.3,0.5] | [0.0,0.3] | 0.010 | 0.88 |
| 河岸带亲水性 D72 | [0.8,1.0] | [0.6,0.8] | [0.4,0.6] | [0.2,0.4] | [0.0,0.2] | 0.006 | 0.76 |
| 公众满意度 D81 | 很满意 [95,100] | 满意 [80,95] | 基本满意 [65,80] | 不满意 [50,65] | 很不满意 [0,50] | 0.010 | 82.5 |

1.4 数据来源

用于评价的现状值采用实地观测、卫星图像、查阅文献、专家评分、调查访问等方法进行获取。其中流量资料通过查阅水文年鉴,得到秦淮河的武定门和秦淮新河的西善桥两个采样点的流量资料;水质资料由江苏省水利厅提供,得到位于南京市江宁区的彩虹桥测站、东山大桥测站,鼓楼区的草场门桥测站以及建邺区的风台桥测站 2015 年的逐月水质资料;其余需要实地观测的指标,选择外秦淮河的武定门节制闸、清凉门大桥以及内秦淮河文正桥至平江桥一段为代表断面进行实地观测。

2 结果及分析

2.1 评价模型

根据模糊可变评价模型及评价标准,建立评价指标的 M 值矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} 0.9 & 7 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 12.5 & 22.5 & 37.5 & 52.5 & 70 \\ 97.5 & 92.5 & 85 & 65 & 25 \\ 0.9 & 0.7 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 0.9 & 0.7 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 0.9 & 0.7 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 0.9 & 0.65 & 0.375 & 0.175 & 0.05 \\ 4.5 & 3.5 & 2.5 & 1.5 & 0.5 \\ 15 & 40 & 55 & 65 & 85 \\ 3.5 & 2.5 & 1.5 & 0.75 & 0.25 \\ 0.9 & 0.7 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 0.925 & 0.725 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 97.5 & 90 & 75 & 57.5 & 25 \\ 95 & 75 & 45 & 20 & 5 \\ 5 & 15 & 25 & 35 & 42.5 \\ 90 & 75 & 60 & 35 & 10 \\ 0.95 & 0.8 & 0.6 & 0.4 & 0.15 \\ 0.9 & 0.7 & 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ 0.975 & 87.5 & 72.5 & 57.5 & 25 \end{bmatrix}$$

根据实测值 x_{ij} 与 M 值的大小关系,通过式

表 2 不同模型参数计算的综合隶属度向量和期望值

Tab.2 Comprehensive membership vector and expected value in different parameter choice

| 参数取值 | 综合隶属度向量 U | 期望值 E |
|------------------------|-----------------------------------|---------|
| $\alpha=1, p=1$ 线性系统 | 0.211, 0.292, 0.154, 0.092, 0.251 | 3.121 |
| $\alpha=1, p=2$ 弱非线性系统 | 0.205, 0.304, 0.183, 0.103, 0.206 | 3.198 |
| $\alpha=2, p=1$ 弱非线性系统 | 0.193, 0.403, 0.092, 0.027, 0.286 | 3.190 |
| $\alpha=2, p=2$ 强非线性系统 | 0.182, 0.460, 0.137, 0.037, 0.184 | 3.418 |

(1~3)计算指标对各评价等级的相对隶属度,得到相对隶属度向量 V :

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.45 & 0.55 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0.7 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.35 & 0.65 \\ 0 & 0 & 0 & 0.55 & 0.45 \\ 0.65 & 0.35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.667 & 0.333 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.147 & 0.853 & 0 \\ 0 & 0 & 0.04 & 0.96 & 0 \\ 0 & 0 & 0.84 & 0.16 & 0 \\ 0.97 & 0.03 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.85 & 0.15 & 0 \\ 0 & 0.51 & 0.49 & 0 & 0 \\ 0.299 & 0.701 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.667 & 0.333 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由式(4)计算综合隶属度向量 U ,并根据一阶矩原则,通过式(5)计算期望值 E ,见表 2:

$$E = \sum_{i=1}^m (m-i+1) \times U_i \quad \text{式(5)}$$

当期望值 E 满足 $t-0.5 \leq E \leq t+0.5$ 时,评价等级即为 t 。由表 2.1 可知,4 种不同参数取值组合的期望值都介于 2.5~3.5 之间,即 $t=3$,评价等级均为“亚健康状态”。此外,根据不同 α 和 p 参数取值组合的评价结果均一致,可见系统的线性程度对评价结果的影响不大。

2.2 评价结果

结合评价指标的相对隶属度向量,将健康、良好、亚健康、不健康、病态五个等级分别赋予 5~1 分的分值,计算评价指标的健康分值,对评价结果进行分析,见图 3。

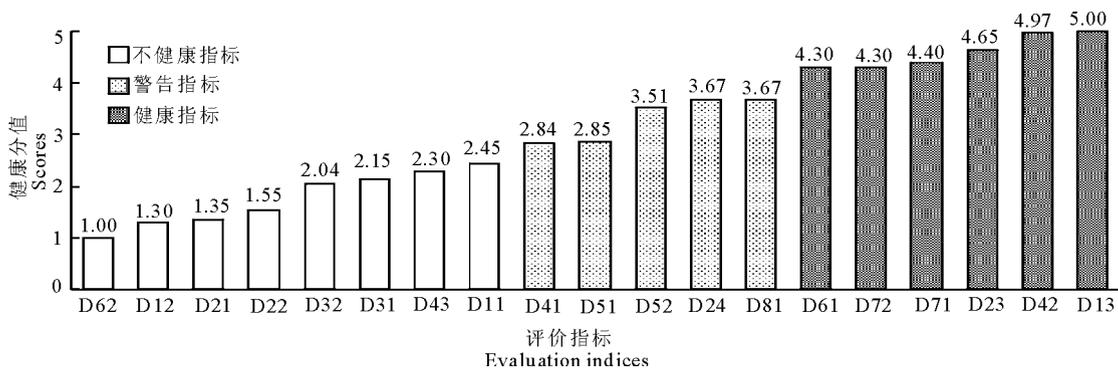


图3 评价指标健康分值柱状图

Fig.3 Health score and rank for each evaluation index

将低于 2.5 分的评为不健康指标, 高于 4.0 分的评为健康指标, 其余评为警告指标。对不健康指标和警告指标进行归纳分类, 大体可分为三类, 即水环境指标(水功能区达标率 D62、富营养化指数 D32、水质综合指数 D31、浮游植物多样性 D41)、防洪功能指标(防洪工程达标率 D51、河流调蓄能力指数 D52)、自然形态指标(年径流量变化率 D12、断面形态多样性 D21、纵向蜿蜒性 D22、岸坡植被结构完整性 D43、河流流动性 D11、岸边植被带缓冲带宽度 D24), 见图 4。

流堤防近期需达到 100 a 一遇、远期需达到 200 a 一遇的防洪标准。目前秦淮河仅有干流河口的防洪标准达到 100 a 一遇, 与规划的防洪标准差距较远。由于秦淮河是典型的城市河流, 沿线河滩地不可避免地被城市侵占, 降低洪水调蓄能力。另外, 多座跨河桥梁的建设也削弱了河流的泄洪能力。

(3) 自然形态问题

70 年代后, 秦淮河开始实施治河工程, 开挖了秦淮新河及河口枢纽工程, 包括节制闸、鱼道、抽水站、船闸等(张雪颖等, 2004), 这些治河工程建设在河道中, 阻碍河流流动、降低河流流动性。外秦淮河全段河岸均采用混凝土护坡, 这种硬质河岸阻隔了土壤与水体之间的连接(孙志毅等, 2005), 河岸带垂直方向的理化性质变化不明显。此外, 外秦淮河的河岸植被带遭到破坏, 植被群落结构趋于简单化、一致化(石晓丹等, 2007), 导致其功能被削弱甚至丧失对地表径流的过滤和拦截作用, 污染物更容易随冲刷流入水体, 加剧水体污染。

3 讨论

3.1 评价方法对比

为验证模糊可变模型的有效性, 相同参数条件下, 利用综合指数法评价秦淮河的健康状况, 分别对 5 个评价等级赋予 5~1 分, 在不考虑评价标准边界模糊性的情况下, 对评价指标的现状值进行赋分, 并根据权重系数进行加权求和, 其综合加权得分为 2.767 分, 位于 [2, 3) 之间, 评价结果亦为“亚健康状态”。两种判别结果基本一致, 这表明模糊可变模型是一种有效的判别模型。

此外, 由表 1 可以看出, 河流流动性、纵向蜿蜒性、浮游植物多样性等指标的现状值介于两个相邻的评价等级之间, 例如: 河流流动性的现状值为 0.39, 位于 [0.2, 0.4) 的区间内, 但其距离 [0.4, 0.6)

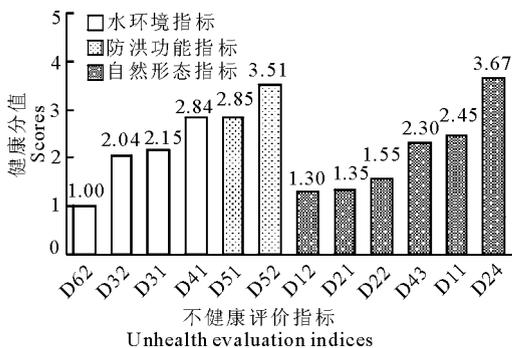


图4 不健康指标分类图

Fig.4 Scores of the unhealthy evaluation indices

根据分类结果, 可发现秦淮河目前主要存在水环境、防洪安全和自然形态 3 大问题:

(1) 水环境问题

秦淮河的污染源主要为工业污水与生活污水, 秦淮河流域日纳入污水水量约为 105 万 t/d, 流入外秦淮河的占 46%, 其中 79% 为生活废水, 流入内秦淮河的占 38%, 其中 80% 为生活污水(刘久根, 2003)。总得来说, 秦淮河的水环境问题主要出现在下游河段, 并以生活污水为主。

(2) 防洪安全问题

按照规划发展, 秦淮河干流防洪标准近期需达到 50 a 一遇、远期需达到 100 a 一遇; 其中城区段河

的区间也十分接近,综合指数法忽略这一点,直接将其归类为不健康指标,这显然是不合理的。运用模糊可变模型,计算相对隶属度向量 V ,可得该指标“亚健康等级”的相对隶属度为0.45,“不健康等级”的相对隶属度为0.55,这样计算考虑了评价等级中的边界模糊问题,克服评价过程中硬性分级的缺点。

运用模糊可变评价模型进行河流健康评价,综合考虑河流系统的复杂性和模糊性,使评价结果更加全面、准确,是处理和解决水生态系统中模糊概念和现象的有效方法。

3.2 保护措施建议

针对目前存在的水环境、防洪安全以及自然形态三方面问题,分别提出了相应的保护措施:

3.2.1 水环境保护措施 从本质上讲,水环境问题就是因河流污染负荷超过环境容量造成的。因此,应当从减少污染物输入、增加污染物输出、扩大环境容量3方面加强保护,改善水环境问题:

(1)减少污染物输入

秦淮河的污染源大部分来自生活污水,需完善污水收集管网,实施污水处理厂的扩容改造,提高生活污水的收集处理率。另外,污水处理厂处理后的尾水,不除了达到国家排放标准,还应满足河段容量的要求(刘久根,2003)。

(2)增加污染物输出

在控制污染物排放的基础上,修复河岸带植被结构,利用河岸带植被加快水生生物的繁殖,恢复原有的食物链网结构,促进水体有机质和营养盐的迁移转化,增加污染物的降解和输出。

(3)扩大环境容量

利用水闸、水泵等水利工程,从相邻的河流湖泊进行引水、调水,扩大河流的环境容量。数据表示,通过引水、调水等方式增加秦淮河的环境容量对河流的水质状况有明显改善,但耗资巨大、消耗人力财力。因此,应当统筹规划其他保护措施,综合治理水环境问题。

3.2.2 防洪安全保护措施 上游要加强蓄水能力,增建或改造水库,增强水土保持能力;中游要加强滞洪能力,扩大滞洪区,加固堤防、整治干支流;下游要加强泄洪能力,清除河流中的障碍物,加快规划实施新的排洪通道建设,增强秦淮河的防洪能力,保障南京市民的安全。此外,对于已经建成的防洪堤,应当在满足防洪功能的前提下,建设景观、绿化等方面的改造工程;对于未建成防洪堤的河段,要结合河道环境,加快防洪工程的建设,进行综合整治。

3.2.3 自然形态保护措施 河流形态多样性和水文条件的修复是河流修复同一层次的2个方面,二者紧密相联,河流形态多样性为水文模式创造条件,水文条件也为河流形态多样性提供了保障(高永胜等,2007)。由于河道淤积,致使河流的流动性下降、水流紊乱、河床断面狭窄,同时也影响防洪功能的发挥。因此,应当对秦淮河全河段进行清淤、对河床狭窄的断面进行拓浚工程,改建阻水桥梁结构,丰富河流断面形态,增强河流流动性。

另外,河岸带植被类型及分布面积对生态系统结构和功能的发挥起到重要作用。应当根据河岸带原生植被特征,种植沉水植物、浮叶植物以及观赏性植物,保护河岸带的稳定性,为水生生物提供适宜的栖息环境,保持水陆生态系统之间的物质与能量传递,同时发挥景观娱乐功能,增强河岸带亲水性,为人类提供观赏、娱乐等休闲场地。

4 结论

河流健康是一个多层次、多结构、单目标的复杂系统,该系统具有强烈的模糊性。鉴于河流生态系统的复杂性与模糊性,本文以可变模糊理论为基础,运用模糊可变评价模型,对秦淮河的河流健康状况进行综合评价。该方法考虑到常规方法中忽略的评价等级边界模糊问题,克服了评价过程中硬性分级的缺点,提高了评价结果的可靠性。根据城市河流健康的内涵和特点,建立适用于秦淮河的4级19项评价指标体系,将模糊可变模型应用于秦淮河健康评价实例当中。结果表明,秦淮河的健康水平属于“亚健康”状态,主要存在水环境、防洪安全以及自然形态3方面问题。通过对各方面问题产生原因的分析,提出了相应的保护措施。受资料可得性的影响,本次研究中评价指标的选取受到一定影响,同时在各项指标权重系数的确定过程中如何有效利用模糊可变模型,减少主观评价造成的误差和影响值得进一步深入研究。

参考文献

- 陈守煜,2005.工程可变模糊集理论与模型——模糊水文水资源学数学基础[J].大连理工大学学报,45(2):308-312.
- 陈守煜,郭瑜,2005.水质综合评价的模糊可变集合方法[J].水资源保护,21(6):19-22.
- 陈守煜,柴春岭,2007.区域水资源可持续利用评价的模糊可变评价方法[J].水利水电科技进展,27(5):1-5.
- 高学平,赵世新,张晨,等,2011.河流系统健康状况评价体系

- 及评价方法[J].水利学报,40(8):962-968.
- 高永胜,叶碎高,郑加才,2007.河流修复技术研究[J].水利学报,(s1):597-601.
- 耿雷华,刘恒,钟华平,等,2006.健康河流的评价指标和评价标准[J].水利学报,37(3):253-258.
- 刘久根,2003.南京外秦淮河水污染控制对策[J].现代城市研究,18(5):51-53.
- 石晓丹,阮晓红,吕学研,2007.南京外秦淮河河岸带原生植被初步调查[J].环境科学与管理,32(3):84-88.
- 孙志毅,钱陈,钦佩,2005.外秦淮河生态系统健康评价及南京城市水环境改善对策[J].现代城市研究,(4):25-31.
- 唐涛,蔡庆华,刘建康,2002.河流生态系统健康及其评价[J].应用生态学报,13(9):1191-1194.
- 王婧,徐峰,郭子一,2009.以公众满意度为价值取向的城市带状公园景观节点设计[J].北京农学院学报,24(4):47-50.
- 吴阿娜,杨凯,车越,等,2005.河流健康状况的表征及其评价[J].水科学进展,16(4):602-608.
- 杨文慧,严忠民,吴建华,2005.河流健康评价的研究进展[J].河海大学学报自然科学版,33(6):607-611.
- 张雪颖,王冬梅,吴杰,2004.秦淮河流域水质分析及综合整治方案探讨[J].水资源与水工程学报,15(3):74-77.
- Aleksanyan A, Khudaverdyan S, Vaseashta A, 2015. Modeling River Ecosystem Vulnerability Assessments Due to Climate Change: Case Study of Armenia [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 24(2): 871-877.
- Beechie T, Imaki H, Greene J, et al, 2013. Restoring Salmon Habitat for A Changing Climate [J]. River Research & Applications, 29(8): 939-960.
- He Y, Wang F, Tian P, et al, 2016. Impact Assessment of Human Activities on Runoff and Sediment of Beiluo River in the Yellow River Based on Paired Years of Similar Climate [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 25(1).
- Karr J R, Chu E W, 2000. Sustaining living rivers [J]. Hydrobiologia, 422-423(4): 1-14.
- Lee H K, Oh K D, Park D H, et al, 1997. Fuzzy expert system to determine stream water quality classification from ecological information [J]. Water Science & Technology, 36(12): 199-206.
- Li Q, Yu M, Lu G, et al, 2011. Impacts of the Gezhouba and Three Gorges reservoirs on the sediment regime in the Yangtze River, China [J]. Journal of Hydrology, 403(3): 224-233.
- Malveira V T, Araújo J C, Güntner A, 2012. Hydrological Impact of a High-Density Reservoir Network in Semiarid Northeastern Brazil [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 17(1): 109-117.
- Matysik M, Absalon D, Ruman M, 2015. Surface Water Quality in Relation to Land Cover in Agricultural Catchments (Liswarta River Basin Case Study) [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 24(1): 175-184.
- Zhai X, Zhang Y, Wang X, et al, 2014. Non-point source pollution modelling using Soil and Water Assessment Tool and its parameter sensitivity analysis in Xin'anjiang catchment, China [J]. Hydrological Processes, 28(4): 1627-1640.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Health Assessment of Qinhuai River Ecosystem Based on Variable Fuzzy Sets

HOU Jia-ming¹, HU Peng¹, LIU Ling², ZHANG Meng-jie¹, ZENG Qing-hui¹

(1.State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,China Institute of Water Resources and Hydropower Research,Beijing 100038,P.R.China;

2.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098,P.R.China)

Abstract: River health assessment is an important tool for evaluating the structural and functional integrity of river ecosystems. The assessment indicates the current status of rivers, reflects the effect of restoring damaged rivers and provides data for decision making on the protection and restoration of rivers. River health is complex; a multi-layered, multi-structured, single-target system with strong ambiguity. Because of the complexity of river ecosystems, a fuzzy ecosystem health evaluation system was developed for urban rivers based on variable fuzzy sets. In this study, Qinhuai River in Nanjing was selected as a case study for health assessment using the health evaluation model. The health evaluation index for Qinhuai River includes 19 indicators, including both natural properties and social service functions. Natural properties describe the hydrological, morphological, environmental and ecological characteristics of the rivers and social services include flood control, water supply, landscape aesthetics and public satisfaction. Weighting for each of the 19 indicators was determined by the analytic hierarchy process (AHP). A five-level ecosystem health ranking was developed with ranking levels of (1) very healthy, (2) healthy, (3) sub-healthy, (4) unhealthy and (5) very unhealthy. Our results show that Qinhuai River is in an unhealthy state, consistent with assessment results using the traditional assessment method. The primary factors limiting the health of Qinhuai River were water quality, flood control safety and natural features. Protection and restoration measures were recommended to address problems and improve river health. In general, the variable fuzzy evaluation model for river health assessment in this study was found to be valid, reasonable and feasible. The study provides a reference for managing and protecting the health of urban rivers.

Key words: river health assessment; variable fuzzy sets; analytic hierarchy process(AHP); Qinhuai River