

城市河湖生态系统健康评价 ——以北京市“六海”为例

张凤玲, 刘静玲*, 杨志峰

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘要: 健康的城市河湖才能发挥生态环境功能, 体现景观和人文价值。城市河湖健康评价是城市河湖科学管理和生态恢复的前提和基础。对城市河湖生态系统健康概念和内涵进行了探讨, 建立了评价指标体系和评价模型。以北京“六海”为例, 对各子湖的健康状况进行比较评价。结果表明, 中海和南海处于不健康向临界转化的状态, 其余 4 个湖均处于不健康状态; 水环境质量、水生态系统结构和功能以及水滨空间结构是影响“六海”健康水平的制约因素; 除南海外, 各湖的健康程度都处于很差的级别。中海和南海的整体生态环境好于其余 4 湖, 对健康和临界状态的隶属度之和接近 0.6, 可恢复程度处于中等水平; 其余 4 湖对健康和临界状态的隶属度之和均小于 0.3, 恢复困难。对“六海”的生态恢复和科学管理提出建议: 控制点源、面源污染, 改善入湖和湖水水质; 改善“六海”的水文条件; 恢复水生态系统结构和水滨空间。

关键词: 城市河湖; 生态系统健康评价; 指标体系; 北京“六海”

文章编号: 1000-0933(2005)11-3019-09 **中图分类号:** Q 178.5, X522 **文献标识码:** A

Ecosystem health assessment of urban rivers and lakes for six lakes in Beijing

ZHANG Feng-Ling, LIU Jing-Ling*, YANG Zhi-Feng (State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (11): 3019~3027.

Abstract Urban rivers and lakes include canals, channels (include the underdrain), rivers naturally forming or artificially excavated running through the urban area, as well as lakes and reservoirs within urban area.

Urban rivers and lakes in healthy state provide environmental services, and have the aesthetic and humanistic value. The assessment of ecosystem health of urban rivers and lakes is the scientific basis for their management and ecological restoration. Urban rivers and lakes ecosystems are complex ecosystems that interact with human ecosystem. Therefore, the concept of ecosystem health of urban rivers and lakes has two properties. The first is the natural property, the urban rivers and lakes ecosystems are intact, steady, natural and sustainable, and have the ability to resist the external unfavorable factors. The second is the social property, the urban rivers and lakes ecosystems provide ecosystem services and meet the people's needs for recreation.

The indicator system for assessment of urban rivers and lakes ecosystem health is based on the concept of ecosystem health of urban rivers and lakes. The indicator system contains three levels, the objectives, the elements and the indicators. The system includes six elements and sixteen indicators. These elements are: hydrological characteristics, water quality, structure and function of aquatic ecosystems, structure of waterfront areas, scenic effects and stress factors. These elements cover four aspects such as hydrology, ecology, environment and society.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2003AA 601010); 国家自然科学基金重点资助项目(50239020)

收稿日期: 2005-03-04; **修订日期:** 2005-09-15

作者简介: 张凤玲(1980~), 女, 河北唐山人, 硕士生, 从事水资源与水环境研究. E-mail: fengling0216@126.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jingling@bnu.edu.cn

致谢: 感谢北京市水利科学研究所李其军所长和孟庆义总工为本研究提供了部分资料

Foundation item: The project was financially supported by the state plan of high-tech research (No. 2003A 601010) and Key Program of Natural Science Foundation of China (No. 50238020)

Received date: 2005-03-04; **Accepted date:** 2005-09-15

Biography: ZHANG Feng-Ling, Master candidate, mainly engaged in water resource and water environment. E-mail: fengling0216@126.com

Ecosystem health is relative to the assessment criteria, therefore, the health of urban rivers and lakes ecosystems can be dealt with as a fuzzy problem. In this paper, an assessment model was established using the fuzzy set theory. The analytic hierarchy process was used to calculate weights of indicators.

The six lakes of Beijing include Xihai, Houhai, Qianhai, Beihai, Zhonghai and Nanhai. Employing the indicator system and model described above, the health of the six lakes were compared. It was found that: Zhonghai and Nanhai were in the state of transition from unhealthy to critical state, other lakes were all in unhealthy state. Water quality, structure and function of aquatic ecosystems, structure of waterfront areas were constraints of health. Nanhai was ranked as poor, the others were all ranked as very poor. However, the ecological environment of Zhonghai and Nanhai were better than the others, the sum of the degree of membership to the healthy state and critical state were all close to 0.6, the restoration of these lakes was moderate; the sum of degree of membership to the healthy state and critical state of other lakes was under 0.3, it was difficult to restore these lakes.

Suggestions on scientific management and ecological restoration of six lakes were proposed: To control non-point source pollution and to improve water quality of six lakes and the water entering into these lakes; To improve the hydrological conditions of six lakes; To rehabilitate aquatic ecosystem and the waterfront areas.

Key words: urban rivers and lakes; ecosystem health assessment; indicator system; Beijing lakes

随着城市经济的发展,人民生活水平的提高,对城市河湖的功能需求趋于多元化,旅游、休闲、改善生态环境、创造景观和丰富水文化等逐渐成为城市河湖生态系统服务于当地社会及经济发展的重要内容^[1],而这些功能的实现是以城市河湖生态系统健康为基础的。由于北方地区缺水,加之近年来人口的增加和经济发展对水资源的大量需求,挤占了城市河湖生态环境用水,严重影响了城市河湖的水文特征和物理结构,造成河湖水体流动不畅,水质恶化,混凝土裸露,沿岸景观单调乏味,生态环境质量和景观功能下降。因此,以改善城市水环境为目标的城市河湖生态系统健康评价,将为城市水环境改善和研究提供依据。

生态系统健康概念自 20 世纪 80 年代末提出以来,研究多针对自然河流^[2~7]、湖泊^[8~11]、湿地^[12~14]、海岸^[15,16]等生态系统健康而言,对于城市河湖,主要集中在河流水质及水环境质量评价^[17~20]、土地利用对河流水体的生态风险及对生物健康的影响^[21,22]、水利工程对水生态系统的影响^[23~25]、河湖生态系统需水量^[26]等方面的研究,城市河湖生态系统健康层面的研究却不多见,赵彦伟^[27]建立了城市河流生态系统健康评价指标体系,包括水质、水量、水生生物、物理结构与河岸带 5 个要素,并应用到宁波市 4 条河流的健康评价中。本文着重探讨城市河湖生态系统健康概念和内涵,建立以改善城市水环境为目标的城市河湖生态系统健康评价指标体系,并以北京“六海”为例进行健康评价,明确“六海”生态系统健康的胁迫因子,以期科学管理城市河湖和生态环境恢复提供依据。

1 城市河湖生态系统健康评价

1.1 城市河湖生态系统健康概念及内涵

城市河湖包括自然形成和人工开挖的流经城市区域的运河、河流、渠道(含暗渠)和市区湖泊和水库。

城市河湖生态系统是城市的资源 and 环境载体,关系到城市生存和发展,是与人类生态系统交互作用的复合生态系统。健康的城市河湖生态系统不仅意味着能保持生态系统自身完整性,而且还能够提供合乎自然和人类需求的生态服务。因此,城市河湖生态系统健康的概念应具有双重属性:从自然属性来说,整个生态系统是完整的、稳定的、可持续的,对外界不利因素具有抵抗力;从社会属性来说,具有持续提供完善的生态系统服务功能和满足城市居民休闲娱乐的需要。

据此,健康的城市河湖生态系统应具备以下特征:能够保证生态功能和服务功能的适宜水量;水质良好,具有一定的流动性;水生态系统结构完整,具有自动适应和自调控能力,能在人工调节下持续发展;能够发挥正常的生态功能、景观功能、旅游休闲功能,体现水文化内涵。

与自然河湖相比,城市河湖与区域人类活动的交互影响较大,一方面,城市的社会经济活动高度依赖于区域健康的河湖提供的各种服务功能;另一方面,城市高强度的社会经济活动对河湖的水量、水质、水循环、水生态和总体健康状况都有显著的影响。人类活动和城市河湖生态系统健康的关系如图 1 所示。当人为干扰的强度小于生态系统的自调控阈值时,城市河湖生态系统保持一种动态的平衡(图 1A~B 段),处于健康的状态;当人为干扰的强度超过生态系统的自调控阈值时,城市河湖生态系统结构和功能改变,使城市河湖生态系统健康受到损害,生态质量不断下降,处于临界状态(图 1B~C 段),此时,可以通过人工或自然恢复对其进行改善;当到达 C 点(临界状态的最小值)时,城市河湖生态系统进一步恶化,处于不健康的状态(图 1C~D 段),其自然恢复难度加大,采取人为调控对城市河湖进行人工恢复,其恢复的可能性较大。

1.2 城市河湖生态系统健康评价指标体系

指标体系法是目前比较常用的生态系统健康评价方法,评价指标要根据生态系统健康的概念和内涵,选取可定量的、可操作的、可广泛推广的指标,切实反映出被评价对象的生态环境特点。

根据城市河湖生态系统健康概念和内涵,构建了3层次的城市河湖生态系统健康评价指标体系。第1层次是目标层,即城市河湖生态系统健康程度;第2层次是要素层,包括水文特征、水环境质量、水生态系统结构与功能、水滨空间结构、景观效果、胁迫因素;第3层次是指标层,即每一个评价要素由哪些具体指标来表达。具体结果见表1。

1.3 评价指标权重确定

应用层次分析法,结合专家咨询,确定要素层和指标层权重。首先请生态学家、水文学家、环境质量评价专家和城市河湖管理部门官员,填写各指标权重的判断矩阵;采用和积法计算指标的权重,具体步骤如下^[30]。将判断矩阵每一列正规化;将每一列正规化的判断矩阵按行相加得到向量;对向量做正规化处理,依次得到的列向量即为所求特征向量;计算判断矩阵的最大特征根;对判断矩阵进行一致性检验,得到各个评价指标对上一层的权重以及各要素对目标层的权重。要素层和指标层的权重计算结果见表2。

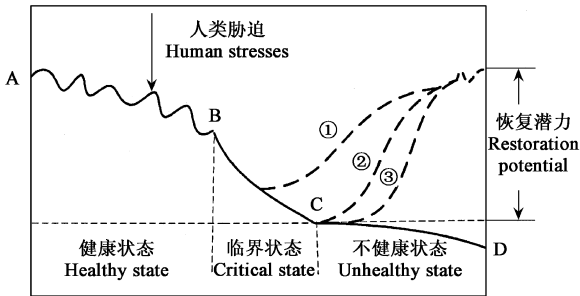


图1 人类活动与城市河湖生态系统健康的关系
Fig 1 The relationship between human activities and urban rivers and lakes ecosystem s health

临界状态下的自然或人工恢复; 人工恢复; 自然恢复
Natural or artificial restoration at critical state; A rtificial restoration; Natural restoration

表1 城市河湖生态系统健康评价指标体系

Table 1 Indicator system for assessment of urban rivers and lakes ecosystem s health			
目标层 Objective level	要素层 Element level	指标层 Indicator level	
		指标 Indicators	计算方法及说明 Calculational methods and explanations
城市河湖生态系统健康程度 Degree of ecosystem health of urban rivers and lakes	水文特征 Hydrological characteristics	水量 Water quantity	水深: 蓄水量/河湖面积 (m) 补给量/损失量 流量/过水断面面积
		河湖补给系数 Coefficient of rivers or lakes supply	
		流速 Velocity	
	水环境质量 Water quality	地表水质 Quality of surface water	《地面水环境质量标准》(GB 3838-2002) TSM 营养状态指数 底质污染指数 $P^{[28]}$: $P = [(I_{\text{最大}}^2 + I_{\text{平均}}^2)/2]^{1/2}$
		水营养状况 Water nutrition	
		底质污染状况 Sediment pollution status	
	水生态系统结构与功能 Structure and function of aquatic ecosystem s	水生植物覆盖率 Coverage of aquatic plants	水生植物面积/河湖面积 底栖动物 Shannon 多样性指数 $0.28\text{chl}a(\mu\text{g}/\text{L}) + 0.96^{[29]}$
		物种多样性 Species diversity	
		浮游植物初级生产力 Primary productivity of plankton plants	
	水滨空间结构 Structure of waterfront areas	水陆交错带状况 Condition of land/inland water ecotones	$F_1 = f(\text{坡度、人工湿地比例})$ 宽度 ¹⁰ (m)
植被缓冲带宽度 Width of the buffer zone of vegetation			
景观效果 Scenic effects	观赏游憩价值 View and tourism value	$F_2 = f(\text{自然景观、人文景观、游人数})^{11}$ 满意人数/调查总人数 ¹²	
	公众对环境满意率 Percentage of public satisfaction on environment		
	最小需水保证率 Minimum guarantee rate of water demand		
胁迫因素 Stress factors	污水处理率 Treating rate of sewage	现状蓄水量/最小生态环境需水量 ¹³ 污水处理量/排放量 ¹⁴ 平均降雨径流量 × 污染物浓度/河湖蓄水量 (mg/L) ¹⁵	
	面源污染强度 Intensity of non-point source pollution		

Water depth: water storage capability/rivers and lakes area; Water supply/ water loss; Flow rate/cross-section area; Environmental quality standard for surface water (GB3838-2002); TSM nutrition index; Sediment pollution index $P^{[28]}$: $P = [(I_{\text{max}}^2 + I_{\text{avg}}^2)/2]^{1/2}$; A quatic plants area/rivers or lakes area; Shannon diversity index of benthic animals; $F_1 = f(\text{gradient, proportion of artificial wetland})$; ¹⁰ Width (m); ¹¹ $F_2 = f(\text{natural scenery, humanistic scenery, number of tourists})$; ¹² The satisfaction number of people/the number of investigation; ¹³ Current water storage capability/minimum water demand of ecological environment; ¹⁴ Quantity of treated wastewater/quantity of discharged wastewater; ¹⁵ A verage rainfall runoff × concentration of contaminant/water storage capability of rivers or lakes (mg/L)

1.4 健康评价方法

生态系统健康与否是一个相对的概念,是相对于标准值而言的,因此,城市河湖生态系统的健康与否可以作为一个模糊问题来处理。应用模糊数学的概念和方法建立城市河湖生态系统健康评价模型:

$$A = W \times R \quad (1)$$

式中, A 为城市河湖生态系统健康状况矩阵, W 为评价要素的权矩阵, $W = (w_1, w_2, \dots, w_6)$; R 为各健康要素对各级健康标准(本文把健康评价标准分为“健康、临界状态、不健康”3个级别)的隶属度矩阵。

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} \\ R_{51} & R_{52} & R_{53} \\ R_{61} & R_{62} & R_{63} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$R_{ij} = (W_{i1} \quad W_{i2} \quad \Lambda \quad W_{ik}) \begin{pmatrix} r_{1j} \\ r_{2j} \\ M \\ r_{kj} \end{pmatrix} \quad (3)$$

公式(2)和(3)中, R_{ij} 为第 i 要素对第 j 级健康标准的隶属度,如 R_{33} 表示第 3 要素(水生态系统结构和功能)对第 3 级标准(不健康)的隶属度; W_{ik} 指第 i 评价要素对其包含的第 k 个指标所赋予的权重,其中 k 为各评价要素所包含的指标个数, r_{kj} 为第 k 指标对第 j 级标准的相对隶属度, r_{kj} 的计算对正向指标(指标值越大,健康程度越高)和负向指标(指标值越小,健康程度越高)有所不同,其计算方法(以第 y 项指标值 x_y 为例, $y = 1, 2, \dots, k, S_{y,j}$ 为第 y 项指标的第 j 级健康标准值)如下:

(1) 正向指标 如河湖补给系数、物种多样性等

$$\text{当 } x_y > S_{y,1} \text{ 时,} \quad r_{y1} = 1, r_{y2} = r_{y3} = 0;$$

$$\text{当 } S_{y,j} \geq x_y \geq S_{y,j+1} \text{ 时,} \quad r_{y,j+1} = \frac{S_{y,j} - x_y}{S_{y,j} - S_{y,j+1}}, r_{y,j} = 1 - r_{y,j+1}; (j = 1, 2) \quad (4)$$

而对其它健康标准的隶属度均为 0;

$$\text{当 } x_y < S_{y,3} \text{ 时,} \quad r_{y3} = 1, r_{y1} = r_{y2} = 0$$

(2) 负向指标 如水营养状况、底质污染指数等

$$\text{当 } x_y < S_{y,1} \text{ 时,} \quad r_{y1} = 1, r_{y2} = r_{y3} = 0;$$

$$\text{当 } S_{y,j} \leq x_y \leq S_{y,j+1} \text{ 时,} \quad r_{y,j+1} = \frac{x_y - S_{y,j}}{S_{y,j+1} - S_{y,j}}, r_{y,j} = 1 - r_{y,j+1}; (j = 1, 2) \quad (5)$$

而对其它健康标准的隶属度均为 0;

$$\text{当 } x_y > S_{y,3} \text{ 时,} \quad r_{y3} = 1, r_{y1} = r_{y2} = 0$$

2 实例研究——北京市“六海”生态系统健康评价

“六海”湖泊群是北京市重要的景观之一,由西海、后海、前海、北海、中海和南海 6 个子湖组成(图 2)。近年来随着社会经济的发展,水资源补给量的减少,加之人类活动干扰,“六海”的生态环境发生了变化:水生态系统完整性遭到破坏;水深变浅,流动性差,水体更新缓慢;水质严重恶化,多次暴发水华,“六海”健康状况受到损害,也严重影响了“六海”的景观功能。

2.1 评价指标和标准

根据“六海”的生态环境特点,共选取了 14 个指标进行评价。对于城市河湖生态系统健康评价,目前尚无明确的统一的标准。评价标准的确定是城市河湖生态系统健康评价的难点。处于不同区域、不同规模、不同类型的河湖,面对不同人群的社会期望,评价标准也不同。Munawar 等认为生态系统健康评价的目的不是为生态系统诊断疾病,而是在一个生态学框架下,结合人

表 2 各层指标权重计算结果

Table 2 Results of weight of indicators

要素层 Element level	权重 Weight	指标层 Indicator level	权重 Weight
水文特征 Hydrological characteristics	0.162	水量 河湖补给系数 流速	0.349 0.260 0.391
水环境质量 Water quality	0.157	地表水质 水营养状况 底质污染状况	0.481 0.376 0.143
水生态系统结构与功能 Structure and function of aquatic ecosystems	0.273	水生植物覆盖率 物种多样性 浮游植物初级生产力	0.291 0.490 0.219
水滨空间结构 Structure of waterfront areas	0.085	水陆交错带状况 ¹⁰ 植被缓冲带宽度 ¹¹	0.716 0.284
景观效果 Scenic effects	0.066	观赏游憩价值 ¹² 公众对环境满意率 ¹³	0.367 0.633
胁迫因素 Stress factors	0.257	最小需水保证率 ¹⁴ 污水处理率 ¹⁵ 面源污染强度 ¹⁶	0.466 0.216 0.318

Water quantity; Coefficient of rivers or lakes supply; Velocity; Quality of surface water; Water nutrition; Sediment pollution status; Coverage of aquatic plants; Species diversity; Primary productivity of plankton plants; 10 Condition of land/inland water ecotones; 11 Width of the buffer zone of vegetation; 12 View and tourism value; 13 Percentage of public satisfaction on environment; 14 Minimum guarantee rate of water demand; 15 Treating rate of sewage; 16 Intensity of non-point source pollution

类健康观点对生态系统特征进行描述——定义人类所期望的生态系统状态^[31]。也就是说, 评价标准的制定须在现状基础上, 以最大发挥生态系统服务功能为目标, 来定义生态系统健康状态。

根据上述观点, 结合“六海”的实际情况, 通过实地考察、借鉴国家标准与相关研究成果、专家咨询、公众参与等方法确定评价标准, 提出基于“六海”现状的合理的指标标准和人类期望的目标。健康标准分级过程如下:

水量 以水深表示, “六海”的水深一般在 1~2m, 本着以现状为依据的原则, 考虑景观娱乐的需要, 以 1.2m 作为不健康的上限值, 其它级别根据景观需要人为设定。

河湖补给系数 “六海”的水量损失主要是蒸发和渗漏, 这里的补给系数是补水量/蒸发渗漏量, 考虑北京缺水现状, 以补水量正好满足蒸发、渗漏量作为健康的下限。

流速 城市河湖的流动性是健康的重要标志, 根据北京城市河湖管理部门多年监测数据, 以使“六海”生态环境逐渐好转的最小流速 0.02 m/s 作为不健康的上限, 以防止水华出现的最小流速 0.04 m/s 作为健康的下限。

地表水质 “六海”水体为景观用水, 考虑水体景观功能要求, 以满足《地面水环境质量标准》(GB 3838-2002) III 类水作为健康的下限。

水营养状况 根据湖泊富营养化评价方法 TSM 指数划分^[18]。

水生植物覆盖率 对北京什刹海(前海和后海)进行水生植物恢复的试验表明, 水生植物群落覆盖率达到水域 50% 以上时, 抑制蓝藻“水华”作用明显^[32], 这里考虑“六海”行船的需要, 结合专家咨询, 以 60% 作为健康标准, 考虑水生植物的生态环境功能, 以 30% 作为不健康的上限。

底栖动物多样性 以底栖动物 Shannon 多样性指数划分等级。

浮游植物初级生产力 根据湖泊富营养化标准, 结合“六海”富营养化程度很高的现状, 以 2.5 g/(m²·d) 作为健康的上限, 2.5~7.5 g/(m²·d) 作为临界状态, 以“六海”浮游植物初级生产力最高值作为不健康的上限。

水陆交错带状况 考虑城市居民的亲水以及城市防洪要求, 结合专家咨询, 以坡度 30 作为健康的上限; 人工湿地比例越高越好, 但“六海”部分湖岸紧邻居民区和商业区, 以人工湿地比例为 70% 作为健康的下限, 其余级别向下浮动 20% 确定。

10 植被缓冲带宽度 参考相关文献^[5], 以 5m 作为不健康的上限, 考虑“六海”湖岸高地景观空间不足的局限性, 本着以现状为依据的原则, 将 10m 作为健康的下限。

11 观赏游憩价值 通过专家打分确定, 满分 100 分, 考虑“六海”的景观和历史文化价值, 健康的分数值应比较高, 这里以 90 分作为健康的下限, 其余级别向下浮动 20 分确定。

12 公众对环境满意率 通过调查“六海”周边的居民和游人获得数据, 体现公众对“六海”生态环境的满意程度, 经过调查, 公众对“六海”的满意率比较低, 这里以现状为依据, 以 70% 作为健康的下限, 其余级别向下浮动 20% 确定。

13 最小需水保证率 以“六海”最小生态环境需水量的满足程度划分, 根据“六海”生态环境现状, 其生态环境需水量包括湖泊蒸发需水量、自身存在需水量、净化需水量、景观娱乐需水量, 最小生态环境需水量根据最差的水质级别(取 IV 类)、湖泊水深(取 0.8m)和换水系数(取 1.25/a)确定^[33], 根据北京实际供水状况, 结合专家咨询, 采用 90% 作为健康的下限, 其余级别向下浮动 20% 确定。

14 污水处理率 参考相关文献^[13], 将 70% 作为健康的下限, 结合“六海”周边进行节污的现状, 以 60% 作为不健康的上限。

具体的评价指标及各分级标准的标准值见表 3。

2.2 “六海”生态系统健康评价

2.2.1 健康评价结果 依据 2002 年监测数据、实地调查结果并结合上述评价模型进行计算, 得出“六海”各子湖 6 个要素对各健康级别的隶属度与各子湖对各健康级别的隶属度(图 3, 表 4)。

2.2.2 分析与讨论 由评价结果(图 3)可知, 影响前 4 个湖健康水平的限制因子主要为水环境质量、水生态系统结构与功能以及水滨空间结构。尤其是后海、前海和北海, 此 3 要素对不健康状态的隶属度分别高达 1。主要原因是水量少、水质差, 人工化严重, 水生态系统结构不完整。制约中海和南海健康的主要因素是水滨空间结构, 对不健康状态的隶属度均在 0.6 以上。因此, 对“六海”进行生态恢复的重点应放在水量、水质、水生态系统完整性和水滨空间结构方面。

按照最大隶属度原则, 前 4 个湖均处于不健康状态, 隶属度分别为 0.778、0.742、0.742、0.783, 而中海以及南海对不健康和

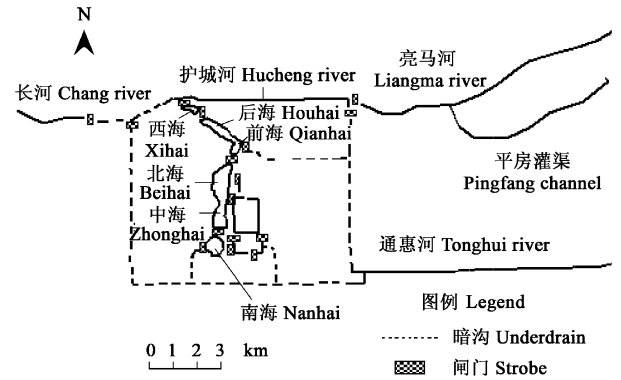


图 2 北京“六海”示意图

Fig 2 The sketch map of six lakes in Beijing

临界状态的隶属度相差不大, 中海为 0.410、0.402, 南海为 0.408、0.315, 因此认为中海和南海处于不健康向临界转化的状态。各湖对不健康状态的隶属度排序为: 南海< 中海< 前海= 后海< 西海< 北海; 对临界状态隶属度的排序为: 北海< 后海< 西海< 前海< 南海< 中海; 对健康状态隶属度的排序为: 西海< 前海< 北海< 后海< 中海< 南海。

表3 “六海”生态系统健康评价指标和标准

Table 3 Assessment indicators and criteria for ecosystem health of six lakes			
指标 Indicators	健康 Healthy	临界状态 Critical state	不健康 Unhealthy
水量 Water quantity (m)	≥ 1.6	1.2~ 1.6	≤ 1.2
河湖补给系数 Coefficient of rivers or lakes supply	≥ 1	0.5~ 1	≤ 0.5
流速 Velocity (m/s)	≥ 0.04	0.02~ 0.04	≤ 0.02
地表水质 Quality of surface water	Ⅲ类 Ⅲ class	Ⅳ类 Ⅳ class	V类或劣于V类 V class or worse than V class
水营养状况 Water nutrition	TSM 指数 ≤ 37 TSM Index ≤ 37	38~ 53	≥ 54
水生植物覆盖率 Coverage of aquatic plants (%)	60	30~ 60	≤ 30
底栖动物多样性 Species diversity	≥ 2	1~ 2	0~ 1
浮游植物初级生产力 Primary productivity of plankton plants (g/(m ² · d))	≤ 2.5	2.5~ 7.5	7.5~ 14
水陆交错带状况 Condition of land/inland water ecotones	坡度 ≤ 30°; 人工湿地 ≥ 70% Gradient ≤ 30°; artificial wetland ≥ 70%	坡度 30~ 45°; 人工湿地 50%~ 70% Gradient 30~ 45°; artificial wetland 50%~ 70%	坡度 45~ 90°; 人工湿地 ≤ 50% Gradient 45~ 90°; artificial wetland ≤ 50%
植被缓冲带宽度 Width of the buffer zone of vegetation (m)	≥ 10	5~ 10	≤ 5
观赏游憩价值 View and tourism value (Score)	≥ 90	70~ 90	≤ 70
公众对环境满意率 Percentage of public satisfaction on environment (%)	≥ 70	50~ 70	≤ 50
最小需水保证率 Minimum guarantee rate of water demand (%)	≥ 90	70~ 90	≤ 70
污水处理率 Treating rate of sewage (%)	≥ 70	60~ 70	≤ 60

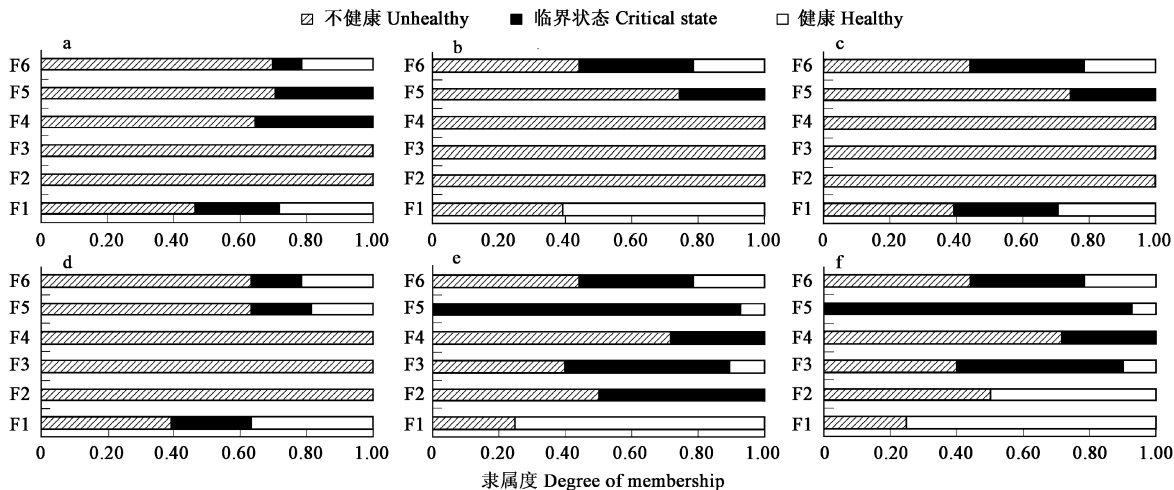


图3 健康评价结果

Fig 3 Result of health assessment

a 西海 Xihai; b 后海 Houhai; c 前海 Qianhai; d 北海 Beihai; e 中海 Zhonghai; f 南海 Nanhai; F1 水文特征 Hydrological characteristics; F2 水环境质量 Water quality; F3 水生生态系统结构与功能 Structure and function of aquatic ecosystems; F4 水滨空间结构 Structure of waterfront areas; F5 景观效果 Scenic effects; F6 胁迫因素 Stress factors

表 4 “六海”生态系统健康评价结果

Table 4 Results of ecosystem health assessment of six lakes						
项目 Item	西海 Xihai	后海 Houhai	前海 Qianhai	北海 Beihai	中海 Zhonghai	南海 Nanhai
健康状态 Healthy	0.097	0.154	0.103	0.127	0.188	0.277
临界状态 Critical state	0.125	0.104	0.155	0.090	0.402	0.315
不健康状态 Unhealthy	0.778	0.742	0.742	0.783	0.410	0.408
状态描述	不健康	不健康	不健康	不健康	不健康-临界	不健康-临界
Description	Unhealthy	Unhealthy	Unhealthy	Unhealthy	Unhealthy-Critical state	Unhealthy-Critical state

表中数字为各个湖对各级健康标准的隶属度 The data in table 4 are the degree of membership of each sub lake to each assessment criterion

从表 4 可以看出, 前 4 个湖对不健康的隶属度差别不大, 均在 0.7 以上, 以北海最差, 达到 0.783; 中海和南海均在 0.42 以下, 远低于前四个湖。而且与前四个湖相比, 中海和南海对临界状态的隶属度明显高于前四湖, 分别为 0.402, 0.315, 因此从整体看, 中海和南海的整体生态环境要好于其它湖。

2.2.3 “六海”生态系统健康等级及可恢复程度划分 为了便于比较“六海”生态系统健康程度和可恢复程度, 将健康度细分为 5 个等级, 可恢复程度划分为 3 个等级, 等级划分范围为[0, 1], 按基本等量的原则来划分等级(表 5)。

表 5 “六海”各子湖生态系统健康等级及可恢复程度

Table 5 Ecosystem health ranks division and restorable degree of six lakes						可恢复程度 ^{b)} Restorable degree		
健康等级 ^{a)} Health ranks								
优 Excellent	良好 Good	一般 Moderate	差 Poor	很差 Very poor		容易 Easy	中等 Moderate	困难 Difficult
(1.0~ 0.8)	(0.8~ 0.6)	(0.6~ 0.4)	(0.4~ 0.2)	(0.2~ 0)		(0.65~ 1.0)	(0.35~ 0.65)	(0~ 0.35)
西海 Xihai				0.097				0.222
后海 Houhai				0.154				0.258
前海 Qianhai				0.103				0.258
北海 Beihai				0.127				0.217
中海 Zhonghai				0.188			0.590	
南海 Nanhai			0.277				0.592	

a) 数字为对健康状态的隶属度 The data are the degree of membership of each sub lake to healthy state; b) 数字为对临界状态和健康状态的隶属度之和 The data are the sum degree of membership of each sub lake to critical state and healthy state

从健康等级划分结果看出(表 5), 除南海外, 各个湖的健康程度都处于很差的级别, 尤以西海、前海和北海最差, 需要受到更多的关注; 从各个湖生态系统可恢复程度难易来说, 前 4 个湖的恢复困难, 尤其是西海和北海, 需加大治理力度, 控制生态系统恶化趋势, 采取人工恢复措施使其向良性方向发展; 中海和南海对健康和临界状态的隶属度之和均接近 0.6, 可恢复程度处于中等级别, 说明与其余 4 个湖相比, 中海和南海具有良好的发展潜力, 只要采取有效的生态系统管理措施, 改变影响中海和南海健康的限制因子状况, 中海和南海可以向更好的方向发展。

2.3 建议

研究结果表明, 制约“六海”健康水平的因素主要是水环境质量、水生态系统的结构、功能以及水滨空间结构, 因此, 对“六海”的生态恢复和管理提出以下措施:

- (1) 控制点源、面源污染, 改善入湖和湖水水质 “六海”水质差的原因主要是入水水质差和湖区点、面源污染(如生活污水、暴雨径流、底泥释放、养鱼垂钓等活动), 因此应减少上游工业废水和生活污水的排放, 恢复湖区植被缓冲带以对地表径流进行部分截流, 同时对“六海”水体(主要针对前四湖)及其沿岸农贸市场和餐饮业进行严格的管理, 尽量减少人为活动对水质的影响; 在工程方面, 需采取水污染治理技术和生态恢复工程措施, 改善“六海”的水质。
- (2) 改善“六海”的水文条件 历史上“六海”各子湖相互连通, 湖水可以自由流动, 但近年来由于水量不足, 各子湖之间都设置闸门进行控制, 各湖的水流动性很差, 需要科学调度水资源, 适当控制闸门开启, 使“六海”的水体联通, 保持流动性。
- (3) 恢复水生态系统以及水滨空间结构 研究表明, 对于富营养浅水湖泊来说, 恢复以沉水植物为主的植被, 可以有效降低 N、P 营养循环速度, 控制浮游植物过度增长^[34]。因此, 对“六海”来说, 应重建和恢复湖泊原有的以沉水植物为主的系统, 并保持其良性循环; 拆除“六海”水泥、石块湖岸, 重建湿地, 恢复水生态系统的完整性。

3 小结

(1) 本文建立了以城市水环境改善为目标的城市河湖生态系统健康评价指标体系, 包括水文特征、水环境质量、水生态系统结构与功能、水滨空间结构、景观效果、胁迫因素 6 个评价要素, 涵盖水文、生态、环境和社会 4 个方面。

(2)不同区域城市河湖的生态环境特点不同,针对不同评价对象,评价指标的选取和各级标准值应有所变化。

(3)城市河湖生态系统健康评价作为城市河湖生态恢复的基础研究,应得到足够的重视。

(4)根据生态系统健康理论,生态系统的健康状况可通过生态系统的活力、组织结构、恢复力、生态系统服务功能的维持、管理选择、外部输入减少、对邻近系统的影响及人类健康 8 个方面来衡量,目前主要集中在活力、组织结构和恢复力的研究,本文根据现有的城市河湖监测数据,主要针对城市河湖生态系统的活力、组织结构进行健康评价,根据健康状况划分确定可恢复程度的等级。生态系统恢复力与生态系统健康状况二者的定量关系还有待于进一步研究。

References

- [1] Peng J, Liao W G, Luo H H. The Environmental Reshape of Urban Water System Construction *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2003, 1(4): 255~ 259
- [2] Wright J F, Amitage P D, Furse M T, et al Prediction of invertebrate communities using stream measurements *Regul Rivers: Res Manag.*, 1989, 4: 147~ 155
- [3] Smith M J, Kay W R, Edward DH, et al AusRivA S: Using macroinvertebrates to assess ecological condition of rivers in Western Australia *Freshwater Biology*, 1999, 41: 269~ 282
- [4] Karr J R. Defining and measuring river health *Freshwater Biology*, 1999, 41: 221~ 234
- [5] Ladson A R, White L J, Doolan J A, et al Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia *Freshwater Biology*, 1999, 41: 453~ 468
- [6] Tang T, Cai Q H, Liu J K. River ecosystem health and its assessment *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (9): 1191~ 1194
- [7] Hill B H, Herlihy A T, Kaufmann P R, et al A assessment of streams of eastern United States using a periphyton index of biotic integrity. *Ecological Indicators*, 2003, 2(4): 325~ 338
- [8] Xu F L, Tao S, Dawson R W, et al Lake Ecosystem Health Assessment: indicators and methods *Wat Res*, 2001, 35(13): 3157~ 3167.
- [9] HUBERT G, GERHARD T, JOSEF W. Ecological Integrity Assessment of Lakes Using Fish Communities—— Suggestions of New Metrics Developed in Two Austrian Prealpine Lakes *Internat Rev. Hydrobiol*, 2003, 88(6): 635~ 652
- [10] Hu H F, Xu F L, Zhao Z Y, et al An Assessment of Ecosystem Health for Qinghai Lake *Urban Environment & Urban Ecological*, 2003, 16(3): 71~ 75
- [11] Liu Y, Guo H C, Dai Y L, et al An assessing approach for lake ecosystem health *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(4): 723~ 729
- [12] Cui B S, Yang Z F. Establishing an indicator system for ecosystem health evaluation on wetlands I. A theoretical framework *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1005~ 1011
- [13] Cui B S, Yang Z F. Establishing an indicator system for ecosystem health evaluation on wetlands II. An application *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1231~ 1239
- [14] Wang Z H, Wang K L, Xu L F. The assessment indicators of wetland ecosystem health *Territory & Natural Resources Study*, 2003, 4: 63 ~ 64
- [15] Xu F L, Lam K C, Zhao Z Y, et al Marine coastal ecosystem health assessment: a case study of the Tolo Harbour, Hong Kong, China *Ecological Modelling*, 2004, 173: 355~ 370
- [16] Wells P G Assessing health of the Bay of Fundy—concepts and framework *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46: 1059~ 1077.
- [17] Marco Rizzoni, Bianca G, Cristina F, et al An integrated approach to the assessment of the environment quality of the Tiber river in the urban area of Rome: A mutagenesis assay (micronucleus test) and an analysis of macrobenthic community structure *The Science of the Total Environment*, 1995, 162(2-3): 127~ 137.
- [18] Du G S, Wang J T, Zhang W H. The Analysis of Trophic State of Urban Rivers and Lakes in Beijing *Beijing Hydrology*, 2002, 6: 25~ 28
- [19] Zhang M F, Chen Y S, Xu Y L. The Water Quality Assessment of instream in Fu Zhou *Journal of Fujian Normal University (Natural Science)*, 2003, 19(4): 56~ 61.
- [20] Liu H J, Qu J H. Water Quality Evaluation of the Three Gorges Reservoir Area *Environmental Science*, 2002, 23(1): 74~ 77.
- [21] Zandbergen P A. Urban watershed ecological risk assessment using GIS: a case study of the Brunette River watershed in British Columbia, Canada *Journal of Hazardous Materials*, 1998, 61(1-3): 163~ 173
- [22] Miltner R J, White D, Yoder C, et al The biotic integrity of streams in urban and suburbanizing landscapes *Landscape and Urban Planning*, 2004, 69(1): 87~ 100
- [23] Gowns IO, Gowns J E. Ecological effects of flow regulation on crotinvertebrate and periphytic diatom assemblages in the Hawkesbury-Nepean River, Australia *Regulated Rivers: Research & Management*, 2001, 17: 275~ 293
- [24] Howard R F, Robert L W, Heather M M. Impact of river regulation and climate change on the barred estuary of the Oued Massa Southern

- Morocco. *Regulated Rivers: Research & Management*, 2001, 17: 235~ 250
- [25] Angela T B. Undamming rivers: a review of the ecological impacts of dam removal *Environmental Management*, 2001, 27(6): 0803~ 0814
- [26] Tian Y, Yang Z F, Liu J L. Preliminary study on urban eco-environmental water requirements *Journal of Environmental Science*, 2003, 23(1): 100~ 106
- [27] Zhao Y W, Yang Z F. Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health *Advances in Water Science*, 2005, 16(3): 349~ 355
- [28] Zhang C. *Environmental assessment tutorial* Beijing: China's Environmental Science Press, 2002 108~ 109
- [29] Wang J, Wang J. Some problems on the calculation among chlorophyll concentration, biomass and production of phytoplankton *Wuhan Botany Research*, 1984, 2(2): 249~ 258
- [30] Fan Y F, Liu L, Chen X, et al. Application of analytic hierarchy process method to comprehensive evaluation of water environmental safety system. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2004, 32(5): 512~ 514
- [31] Munawar M, Munawar I F, Weisse T. The significance and future potential of using microbes for assessing ecosystem health: The Great Lakes example *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 3(4): 295~ 310
- [32] Tu Q Y, Zhang Y T, Yang X Z. Approaches to the ecological recovery engineering in lake Shishahai, Beijing *Journal of Lakes Sciences*, 2004, 16(1): 61~ 67
- [33] Xiao F, Liu J L, Yang Z F. Case study: calculation of eco-environmental water demand of urban lake for six lakes of Beijing *Advances in Water Science*, 2004, 15(6): 781~ 786
- [34] Wu Z B, Qiu D R, He F, et al. Effects of rehabilitation of submerged macrophytes on nutrient level of a eutrophic lake *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1351~ 1353

参考文献:

- [1] 彭静, 廖文根, 骆辉煌. 城市水系建设的环境重塑 *中国水利水电科学研究院学报*, 2003, 1(4): 255~ 259
- [6] 唐涛, 蔡庆华, 刘健康. 河流生态系统健康及其评价 *应用生态学报*, 2002, 13(9): 1191~ 1194
- [10] 胡会峰, 徐福留, 赵臻彦, 等. 青海湖生态系统健康评价 *城市环境与城市生态*, 2003, 16(3): 71~ 75
- [11] 刘永, 郭怀成, 戴永立, 等. 湖泊生态系统健康评价方法研究 *环境科学学报*, 2004, 24(4): 723~ 729
- [12] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 I. 理论 *生态学报*, 2002, 22(7): 1005~ 1011
- [13] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 II. 方法 *生态学报*, 2002, 22(8): 1231~ 1239
- [14] 汪朝辉, 王克林, 许联芳. 湿地生态系统健康评估指标体系研究 *国土与自然资源研究*, 2003, 4: 63~ 64
- [18] 杜桂森, 王建行, 张为华. 北京城市河湖的营养状态分析 *北京水利*, 2002, 6: 25~ 28
- [19] 张明凤, 陈寅山, 许友勤. 福州市内河水水质评价 *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 19(4): 56~ 61
- [20] 刘会娟, 曲久辉. 三峡库区城市江段总体水环境质量综合评价 *环境科学*, 2002, 23(1): 74~ 77
- [26] 田英, 杨志峰, 刘静玲, 等. 城市生态环境需水量研究 *环境科学学报*, 2003, 23(1): 100~ 106
- [27] 赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探 *水科学进展*, 2005, 16(3): 349~ 355
- [28] 张从主编. *环境评价教程* 北京: 中国环境科学出版社, 2002, 108~ 109
- [29] 王骥, 王建. 浮游植物叶绿素含量、生物量、生产量相互换算中的若干问题 *武汉植物学研究*, 1984, 2(2): 249~ 258
- [30] 樊彦芳, 刘凌, 陈星, 等. 层次分析法在水环境安全综合评价中的应用 *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(5): 512~ 514
- [32] 屠清瑛, 章永泰, 杨贤智. 北京什刹海生态修复试验工程 *湖泊科学*, 2004, 16(1): 61~ 67
- [33] 肖芳, 刘静玲, 杨志峰. 城市湖泊生态环境需水量计算——以北京市六海为例 *水科学进展*, 2004, 15(6): 781~ 786
- [34] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响 *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1351~ 1353