

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.02.014

基于投影寻踪的湖泊生态健康评价

薛联青^{1,2,3}, 朱祎真¹, 王思琪¹, 迟艺侠^{1,3}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003;
3. 河海大学文天学院, 安徽 马鞍山 243031)

摘要:提出基于投影寻踪的模糊模式识别模型进行湖泊生态健康评价,介绍其主要的 4 个步骤:
①筛选能够反映湖泊健康状况的指标体系;②建立评价标准;③用投影寻踪法确定各指标权重;
④采用模糊模式识别模型评价湖泊健康等级,将此模型应用于洪泽湖生态健康评价。结果表明:洪泽湖健康状态处于微病态状态,TN、TP 含量过高是影响洪泽湖健康的主要原因;基于投影寻踪的模糊模式识别模型的评价结果符合湖泊实际生态健康状况;模型可推广应用于其他生态系统评价。
关键词:生态健康;评价指标;投影寻踪;模糊模式识别模型;洪泽湖
中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)02-0067-06

Lake ecosystem health assessment based on projection pursuit

XUE Lianqing^{1,2,3}, ZHU Yizhen¹, WANG Siqu¹, CHI Yixia^{1,3}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China;
3. Wentian College, Hohai University, Maanshan 243031, China)

Abstract: A fuzzy pattern recognition model based on projection pursuit for lake ecosystem health evaluation is proposed in this paper. There are four procedures in this method: (1) screening a set of indicators that can reflect the health status of lake ecosystem, (2) building the evaluation criteria, (3) determining the index weight using the projection pursuit method, and (4) evaluating the lake health status through adoption of the fuzzy pattern recognition model. The model was applied to the health assessment of Hongze Lake. The results suggest that Hongze Lake was in a slightly polluted state. The high concentrations of TN and TP were the main factors that affected the health status of Hongze Lake. The evaluation results of the model corresponded with the lake's actual health status. Therefore, the model can be widely applied to the evaluation of other ecosystems.

Key words: ecosystem health; assessment indicators; projection pursuit; fuzzy recognition model; Hongze Lake

湖泊作为自然生态系统的重要组成部分,具有水资源供给、径流调节、改善区域生态环境等多种服务功能,其健康状况与人类生存和发展密切相关。如何全面、科学地评价湖泊的健康状况,成为湖泊研究领域的热点之一,对湖泊监测和管理有重要的意义,同时为湖泊生态系统修复和功能开发利用也提供指导。

国内外在湖泊生态系统健康方面已陆续开展了一些研究。就评价指标体系而言,Rapport 等^[1]提出

了生态系统压力与响应指标,Karr 等^[2]提出了生物完整性指标 IBI(index of biological integrity);刘永等^[3]在对滇池的研究中建立了包含外部指标、环境要素状态指标和生态指标的指标体系,徐福留等^[4-5]提出包含湖泊生态系统结构、功能等方面的综合生态指标,2004 年对巢湖、青海湖的研究中提出以能质、结构能质和生态缓冲能力为主的指标体系。这些研究主要分析了生态类的指标,注重湖泊自身健康状态的评价,没有考虑湖泊所具有的社会服务功

基金项目:国家自然科学基金(41371052,U1203282);水利部公益性行业专项(201501059);江苏省“青蓝”工程项目
作者简介:薛联青(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事水资源规划与生态水文方面的研究。E-mail: lqxue@hhu.edu.cn

能,在有些情况下不能很好地反映湖泊的健康状况。在评价方法方面,赵臻彦等^[6]在对意大利湖群进行生态健康评价时提出了一个 0~100 的生态系统健康指数 EHI(ecosystem health index),用于评价湖泊生态健康状况,卢志娟等^[7]提出营养状态-综合指数 TSI-CI(trophic state-comprehensive index)法,并对西湖生态健康状况进行评价,许文杰等^[8]采用熵权综合健康指数法评估了滇池生态健康。上述方法在许多类型的生态系统中得以应用。然而,这些方法基本都需要对指标赋权,存在一定的主观性和人为干扰性,对处理高维度数据难度较大。

本文的目的在于:①基于对湖泊生态健康内涵的理解,构建涵盖湖泊水文特征、水质状况、水生态、物理形态结构、湖滨景观等 5 个方面的生态健康指标体系;②建立基于投影寻踪的模糊模式识别模型进行生态健康评价;③将构建的生态健康指标体系及评价方法应用于洪泽湖生态健康评价。

1 湖泊生态健康评价指标体系

1.1 指标体系建立原则

为了保证评价指标体系的建立构建在科学、客观的基础上,根据洪泽湖生态健康的内涵,在构建评价指标体系时,遵循以下原则:

a. 完整性。评价指标应能够全面、准确地反映湖泊的健康程度,针对洪泽湖生态系统结构、功能等特点,选取的指标应尽可能包括影响其生态健康的所有因素,构成一个完整的评价指标体系。

b. 独立性。影响洪泽湖健康评价的因素众多,为避免指标出现重复叠加,指标之间尽可能互相独立或弱关联性,对于关联性较强的指标,应选取最具有代表性的指标。

c. 层次性。指标体系应具有一定的合理性和清晰的层次结构,因此,在进行湖泊指标体系的构建时应采用分层的方法,不仅可以降低系统的复杂度,还可以更为直观地从不同的角度判断湖泊的健康状况。

d. 可操作性。指标体系应针对所要解决的问题,不仅科学上有充分依据,并且技术上可行和有效,所需数据应相对容易获得或测量,并尽可能与社会经济、环境统计数据等结合。

e. 定性定量结合。在进行湖泊健康评价时,往往会涉及一些描述性的指标,这些指标具有重要意义却很难做到量化,这种情况下,应采取定性定量结合的原则,使得指标体系保持其完整性。

1.2 评价指标筛选

湖泊健康是指湖泊系统在自身维持生态环境平

衡的同时能够稳定和持续地为人类社会提供资源、服务等,并且对自然干扰或人类的胁迫具有抵抗力和恢复力。因此,湖泊生态健康的核心内容是湖泊生态系统结构的健康和功能的健康。研究湖泊的健康状况,应从湖泊生态系统的结构和功能两方面入手,了解生态系统的形成、演变、发展规律及其与环境因子的作用机制,然后选用能够表征生态系统主要特征的指标。本文以洪泽湖为例,通过对其生态系统结构和功能的分析,构建适宜洪泽湖的生态健康评价指标体系。

洪泽湖是一个水库型湖泊,同时兼具供水、防洪、水产养殖和景观功能,具体来说,健康的洪泽湖应具有足够的调蓄能力、较强的水体自净能力、较丰富的生物多样性,保障防洪安全和饮用水安全,满足生活、生产对水量水质的要求;以健全的水体功能、自然稳定的湖泊形态、优良的水质、结构优化与功能完善的生态系统保障社会经济可持续发展。基于此,笔者主要从湖泊水文特征、水质状况、水生态、物理形态结构、湖滨景观等 5 个方面进行分析,筛选能够反映洪泽湖生态健康状况的指标。

a. 水文特征指标。湖泊的水文特征既包括水量也包括水文过程,入湖河流的水文情势及湖泊水情动态变化是影响湖泊生态系统的主导因子。洪泽湖属于过水性水库型湖泊,淮河上游 15.8 万 km² 的洪水汇集到洪泽湖,经调蓄后入海,湖水的季节性变化剧烈,年际变化也很大,变差系数较大。河流补给状况对湖泊水位变化、泥沙沉积、动植物生长分布、湖泊演变至关重要。水位的大起大落对湿地及水生动植物的生长与分布有很大的影响,枯水年份,水位过低会造成湖泊水生动物栖息地锐减,而低水位则有利于水生高等维管束植物的大量生长,引起水流不畅,长期发展会加剧湖泊的沼泽化过程,不利于湖泊健康发展。因此,入湖径流量以及湖泊蓄水量是湖泊生态健康的关键因子。另外,湖泊换水循环周期也是湖泊作为一个完整系统表现出来的特征。

b. 水质状况指标。水质标志着水体的物理特性、化学特性及其组成的状况,一般包括 DO、NH₃-N、TP、pH、透明度和水温等要素,这些物化指标对水体中生物生命活动有着重要影响。对湖泊水质因子的研究表明,NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN 等代表了湖泊水质的氮素污染;SS、TP、Chl-a 等代表了湖泊悬浮物及其与之密切相关的浮游植物生长情况;总铜、总汞等重金属代表湖泊重金属污染情况;电导率和硬度等代表湖泊水体的离子属性;DO 和大肠菌群等与生活污水的接纳和降解有关,代表湖泊生活类污染状况。根据其对洪泽湖生态健康影响的重要度,可选取

TN、TP、Chl-a、透明度、DO 值作为水质指标。

c. 水生生态指标。水体是水生生态系统的主要承载形式,为大量的鱼类、两栖类水生植物和微生物提供了栖息地。物种是生物分类的基本单位,物种的多样性指标是反映群落结构和功能特征的有效指标,也是生态系统稳定性的量度指标。浮游动植物是反映水体质量的一个重要的指示生物,浮游动植物的群落结构、种类和数量的变化能反映水质污染状况。底栖动物长期生活于水体底部,水体发生的变化,都直接影响它们的生长、繁殖和存活,因此,底栖动物能确切地反映水体的质量状况。

d. 物理形态结构指标。湖泊空间物理结构包括湖盆、湖岸的物理稳固性,岸线形态、河湖水系的连通性等。湖盆、湖岸的淤积及冲刷稳定性,反映了湖泊维持期形态结构的能力。河湖水系连通是维持湖泊湿地生境的重要条件,同时也影响到河湖水质状况及流域水资源的利用。如果水系不连通,湿地将会消失,河湖的蓄泄能力就没有保障,水资源开发利用也无法深入进行;水系的连通性好,水流的自净能力和纳污能力就会增强。

e. 景观指标。景观指标反映了湖泊能否为人类提供适宜的生存环境质量,主要包括湖滨绿化带宽度、植被覆盖情况、景观多样性指数等。

基于以上的分析,从生态系统健康内涵出发,删除极难获得数据的指标,并且在相关性较强的指标中择优选择,建立了洪泽湖生态健康评价指标体系(表1)。

1.3 评价等级确定

将洪泽湖生态健康状况划分为5个级别,分别为“很健康、健康、亚健康、微病态、病态”,可以比较

全面地概括湖泊生态健康的各种状况^[11]。综合全国及淮河流域研究中的指标取值范围,参考相关文献,对洪泽湖生态健康各项评价指标的标准值进行确定。各指标等级的划分依据如下:①有国家明确规定的适用标准,优先采用国家、行业制定的相关标准,如水质状况指标依据 GB3838—2002《地表水环境质量标准》进行划定;②参考国内外相关文献及研究成果,如水生生态指标、景观指标等;③如无相关标准或成果,查阅当地历史资料并结合洪泽湖区典型特征值,选取一个适宜的数值作为健康的标准,选取最差的数值作为微病态的标准,向上、向下浮动一定比例划分其他等级,如水文特征指标等。洪泽湖生态健康评价标准如表2所示,其中定性指标物理稳固性分级标准如表3所示。

2 湖泊生态健康评价方法研究

针对湖泊健康评价中指标体系层次多且复杂,具有高维、非线性、非正态的特点,本文选用一种新型的多指标数据降维处理方法——投影寻踪模型^[12]。另外,由于生态健康程度是一种外延模糊的概念,所以对其的评价也具有模糊性,模糊集理论和方法也比较多地被应用于生态健康评价中。事实上,在评价指标确定后,生态健康评价的过程是把这些指标的现状值与标准值进行分析和比较,在此基础上判断其与哪一级分类标准更接近。因此,生态健康评价属于模糊模式识别问题。

鉴于此,本研究将投影寻踪法与模糊模式识别模型相结合,用投影寻踪法确定样本的指标权重,并以此为基础构造模糊模式识别模型对洪泽湖生态健康进行评价^[13]。

表1 洪泽湖健康评价指标体系

目标层(A)	准则层(B)	指标层(C)	指标说明及计算方法
洪泽湖健康评价指标体系	水文特征指标(B ₁)	C ₁ :湖泊蓄水量	年平均蓄水位对应的蓄水量
		C ₂ :湖泊水循环周期	湖泊蓄水量/年平均入湖流量×86 400
		C ₃ :入湖流量偏差率	入湖流量偏差绝对值占多年平均入湖流量的百分比
	水质状况指标(B ₂)	C ₄ :TN	用于表征湖泊水体的质量及水体自净能力,采用湖泊各水质监测点的平均值
		C ₅ :TP	
		C ₆ :Chl-a	
		C ₇ :DO	
		C ₈ :透明度	
		C ₉ :浮游植物生物量	
	水生态指标(B ₃)	C ₁₀ :浮游动物生物量	表征湖泊生态系统结构的完整性,采用各采样点浮游生物量的平均值
		C ₁₁ :底栖动物多样性指数	采用 Shannon-Wiener 多样性指数公式 ^[9]
		C ₁₂ :水生植被覆盖率	湖滨带向水水域内的浮水植物、挺水植物和沉水植物总面积与湖泊面积之比
		C ₁₃ :河湖连通性	采用窦明等 ^[10] 提出的水文连接度
	空间物理结构指标(B ₄)	C ₁₄ :物理稳固性	包括河湖岸坡稳定性及湖泊湖盆稳定性,定性分析并赋予分值
		C ₁₅ :植被覆盖度	岸坡植被覆盖面积/岸坡总面积
	景观指标(B ₅)	C ₁₆ :景观多样性指数	$H = - \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i$, P_i 表示 i 景观斑块类型在整个景观中所占面积的比例; m 为景观斑块类型数目

表 2 洪泽湖生态健康评价标准

评价指标	湖泊蓄水量/ 亿 m ³	湖泊水循环 周期/d	入湖流量偏差 率/%	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Chl-a})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	SD 值/m	浮游植物 生物量/ (万个 · L ⁻¹)	浮游动物 生物量/ (个 · L ⁻¹)	底栖动物 多样性 指数	水生植 被覆盖 率/%	河湖连 通性	物理 稳固性	植被 覆盖 率/%	景观多样 性指数
很健康	≥37.3	≤33	0~40	≤0.2	≤0.01	≤10	≥7.5	≥2.5	<800	<1000	>3.5	>75	>0.5	9~10	>75	0.7~1
健康	19.21~37.3	33~50	40~60	0.2~0.5	0.01~0.025	10~30	6~7.5	1~2.5	800~1000	1000~3000	2.5~3.5	40~75	0.37~0.5	7~9	50~75	0.5~0.7
亚健康	6.72~19.21	50~100	60~80	0.5~1	0.025~0.05	30~50	5~6	0.5~1	1000~1500	3000~5000	1.5~2.5	10~40	0.35~0.37	5~7	25~50	0.3~0.5
微病态	5.46~6.72	100~200	80~90	1~1.5	0.05~0.1	50~70	3~5	0.3~0.5	1500~2000	5000~8000	1~1.5	0~10	0.3~0.35	3~5	5~25	0.1~0.3
病态	<5.46	>200	>90	1.5~2	0.1~0.2	70~100	2~3	0.1~0.3	>2000	>8000	<1	0	0~0.3	0~3	<5	0~0.1

表 3 湖泊物理稳固性分级标准

级别	湖泊护岸形式	分值
很健康	有植被覆盖的自然土质岸坡	9~10
健康	近自然的斜坡式生态护岸	7~9
亚健康	亲水平台护岸或无植被的土质岸坡	5~7
微病态	台阶式人工护岸或浆砌块石护岸	3~5
病态	直立式钢筋混凝土	0~3

设根据表 2 产生的样本的经验等级及其响应的指标分别为 $y(i)$ 及 $\{x^*(i,j) \mid j=1,2,\cdots,p\}, i=1,2,\cdots,n$ 。其中, n, p 分别为样本个数和指标个数。按照生态健康分级, “很健康、健康、亚健康、微病态、病态” 5 个等级分别对应“1、2、3、4、5” 5 个数值。用投影寻踪方法建立模糊模式识别模型的具体步骤为:

a. 数据预处理。对样本评价指标集进行归一化处理, 消除各指标值的量纲和统一各指标值的变化范围。

对于越大评价等级越高的指标:

$$x^*(i,j) = (x(i,j) - x_{\min}(j)) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \tag{1}$$

对于越小评价等级越高的指标:

$$x^*(i,j) = (x_{\max}(j) - x(i,j)) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \tag{2}$$

式中: $x_{\max}(j), x_{\min}(j)$ 分别为第 j 个指标的最大值、最小值。

b. 构造投影指标函数。所谓投影实质上就是从不同的角度去观察数据, 寻找最能充分挖掘数据特征的最佳投影方向。PP 方法就是把 p 维数据 $\{x^*(i,j) \mid j=1,2,\cdots,p\}$ 综合成以 $\mathbf{a}(j) = (a(1), a(2), \cdots, a(p))$ 为投影方向的一维投影值 $z(i)$, 即

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j)x(i,j) \tag{3}$$

式中, $\mathbf{A}$ 为单位长度向量。

在综合投影时, 要求投影值 $z(i)$ 应尽可能大地提取 $\{x(i,j)\}$ 中的变异信息, 即 $z(i)$ 的标准差 S_z 达到尽可能大; 同时要求 $z(i)$ 和 $y(i)$ 的相关系数的绝

对值 $|R_{zy}|$ 达到尽可能大, 即构造一个投影指标函数 $Q(a)$ 作为确定投影方向优化的依据, 当指标达到极大值时, 就认为是找到了最优投影方向。因此, 投影指标函数为

$$Q(a) = S_z |R_{zy}| \tag{4}$$

其中

$$S_z = \left\{ \sum_{i=1}^n [z(i) - E_z]^2 / (n-1) \right\}^{0.5} \tag{5}$$
$$R_{zy} = \frac{\sum_{i=1}^n [z(i) - E_z][y(i) - E_y]}{\left\{ \sum_{i=1}^n [z(i) - E_z]^2 \sum_{i=1}^n [y(i) - E_y]^2 \right\}^{0.5}} \tag{6}$$

式中: S_z 为投影值 $z(i)$ 的标准差; R_{zy} 为 $z(i)$ 和 $y(i)$ 的相关系数; E_z, E_y 分别为序列 $\{z(i)\}$ 和 $\{y(i)\}$ 的均值。

c. 优化投影指标函数。当各指标值的样本集给定时, 投影指标函数 $Q(a)$ 只随着投影方向的变化而变化。不同的投影方向反映不同的数据结构特征, 可以通过求解投影指标函数最大化问题来估计最佳投影方向, 即

$$\max Q(a) = S_z |R_{zy}| \tag{7}$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad a(j) \in [0,1] \tag{8}$$

这是一个以 $\mathbf{a}(j) = (a(1), a(2), \cdots, a(p))$ 为优化变量的复杂非线性优化问题, 用传统的优化方法较难处理, 因此, 笔者应用模拟生物优胜劣汰与群体内部染色体信息交换机制的基于实数编码的加速遗传算法 (RAGA) 来解决其高维全局寻优问题。

d. 建立投影寻踪模糊模式识别模型。设有对模糊子集 A 作识别的 l 个样本集合, 则有 l 个样本的 m 个指标组成矩阵 $\mathbf{X}' = \{x'_{ij}\}_{l \times m}, i=1,2,\cdots,l, j=1,2,\cdots,m$, 其中 x'_{hj} 为第 i 样本的第 j 个指标的属性值。将 m 项指标按 c 个级别标准评价, 则有指标标准矩阵 $\mathbf{Y}' = \{y'_{hj}\}_{c \times m}, h=1,2,\cdots,c, y'_{hj}$ 为级别 h 、指标 j 的标准特征值。

指标通常有以下两种类型:①指标标准特征值 y'_{hj} 随级别 h 的增大而减小;②指标标准特征值 y'_{hj} 随级别 h 的增大而增大。对于①类指标,确定小于、等于指标的 c 级标准特征值对 A 的相对隶属度为 1。对于②类指标,确定等于、大于指标的 c 级标准特征值对 A 的相对隶属度为 0;小于、等于指标的 1 级特征值对 A 的隶属度为 1。对于以上两类指标,其特征值介于 1 级和 c 级标准特征值之间者,对 A 的相对隶属度按现行变化确定。于是可得第①类指标以及 h 级标准特征值对 A 的相对隶属度为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x'_{ij} \leq y'_{cj} \\ \frac{x'_{ij} - y'_{cj}}{y'_{lj} - y'_{cj}} & y'_{lj} > y'_{ij} > y'_{cj} \\ 1 & x'_{ij} \geq y'_{lj} \end{cases} \quad (9)$$

$$s_{hj} = \begin{cases} 0 & y'_{hj} = y'_{cj} \\ \frac{y'_{hj} - y'_{cj}}{y'_{lj} - y'_{cj}} & y'_{lj} > y'_{hj} > y'_{cj} \\ 1 & y'_{hj} = y'_{lj} \end{cases} \quad (10)$$

同理可以得到第②类指标以及 h 级指标标准特征值对 A 的相对隶属度为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x'_{ij} \geq y'_{cj} \\ \frac{y'_{cj} - x'_{ij}}{y'_{cj} - y'_{lj}} & y'_{lj} < y'_{ij} < y'_{cj} \\ 1 & x'_{ij} \leq y'_{lj} \end{cases} \quad (11)$$

$$s_{hj} = \begin{cases} 0 & y'_{hj} = y'_{cj} \\ \frac{y'_{hj} - y'_{cj}}{y'_{lj} - y'_{cj}} & y'_{lj} < y'_{hj} < y'_{cj} \\ 1 & y'_{hj} = y'_{lj} \end{cases} \quad (12)$$

式中, S_{hj} 为级别 h 指标 j 的标准特征值对 A 的相对隶属度, $0 \leq s_{hj} \leq 1$; r_{ij} 为样本 i 指标 j 对 A 的相对隶属度, $0 \leq r_{ij} \leq 1$ 。

设指标的权向量为 $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_m)$, 满足 $\sum_{j=1}^m w_j = 1, 0 \leq w_j \leq 1$, 这里的 $\mathbf{W}_j = \frac{|a(j)|}{\sum_{j=1}^m |a(j)|}$ 。为

求解最优模糊矩阵, 提出目标函数为: 全体对象对于各标准模式间的加权广义距离平方和最小, 即

$$\min \{ F(u_{ih}) \} = \min \left\{ \sum_{i=1}^j \sum_{h=1}^c u_{ih}^2 \sum_{j=1}^m [w_j(r_{ij} - s_{hj})]^2 \right\} \quad (13)$$

对 u_{ih} 求偏导并解方程, 得样本集对各个健康级别的相对隶属度矩阵 $\mathbf{U}$ 为

$$u_{ih} = \left[\sum_{k=1}^c \frac{\sum_{j=1}^m [w_j(r_{ij} - s_{hj})^2]}{\sum_{j=1}^m [w_j(r_{ij} - s_{kj})]^2} \right]^{-1} \quad (14)$$

然后按式 (15) 可计算样本 i 的污染评价级别特征值 H_i 。

$$H_i = \sum_{h=1}^c hu_{ih} \quad (15)$$

3 实例应用

洪泽湖汇水面积 15.8 万 km^2 , 是淮河流域最大的泄洪蓄水湖泊, 也是南水北调东线工程重要的水利枢纽, 对流域中下游的工农业生产和自然生态环境具有十分重要的作用, 同时作为平原区的大型浅水湖泊型水库, 也是苏北地区的重要供水水源。社会经济发展、围网养殖的增多以及南水北调工程的实施对洪泽湖生态系统健康产生了不同程度的影响, 导致了洪泽湖生态系统结构和功能的退化, 因此对其生态进行健康评价十分重要。

采用基于投影寻踪的模糊模式识别模型对洪泽湖生态健康进行评价, 评价指标个数为 16 个, 15 个定量指标, 1 个定性指标。定量指标中湖泊蓄水量、湖泊水循环周期和年平均流量偏差率通过现状年水位流量资料计算得到; 各水质指标浓度、浮游植物生物量、浮游动物生物量、水生植被覆盖率根据现状年洪泽湖水环境调查统计而得; 植被覆盖率、景观多样性指数、景观破碎度通过卫星遥感图及洪泽湖周边土地利用图统计计算得到。定性指标 (物理稳固性) 根据洪泽湖岸坡结构类型, 按照分值量化标准 (表 3) 给定分值, 具体指标值见表 4。

表 4 洪泽湖生态健康评价指标值

指标	指标值	等级	指标	指标值	等级
湖泊蓄水量 (亿 m^3)	25.84	2	浮游植物生物量 (万个/L)	138.75	1
湖泊水循环周期 (d)	76	3	浮游动物生物量 (个/L)	818.8	1
入湖流量偏差率 (%)	58.3	2	底栖动物多样性指数	1.52	3
$\rho(\text{TN})$ (mg/L)	2.16	5	水生植被覆盖率 (%)	11.8	3
$\rho(\text{TP})$ ($\mu\text{g/L}$)	128.6	5	河湖连通性	0.36	3
$\rho(\text{Chl-a})$ ($\mu\text{g/L}$)	17.86	2	物理稳固性	9	1
$\rho(\text{DO})$ (mg/L)	10.7	1	植被覆盖率 (%)	82.8	1
SD 值 (m)	0.34	4	景观多样性指数	0.6	2

在表 2 各等级指标取值范围内均匀随机产生 10 个指标值, 得到 50 组样本, 将其与对应的健康等级标准值一起组成样本系列, 代入投影寻踪模型进行优化计算, 得到最大投影指标函数为 1.087 5, 最佳投影方向 (0.247 6 0.283 7 0.169 5 0.264 8 0.249 9 0.265 2 -0.137 3 0.260 2 0.294 3 0.200 8 0.288 7 0.313 0 0.300 7 0.200 1 0.273 9 0.162 3), 可得到权重向量为 $\mathbf{W} = (0.063\ 3\ 0.072\ 5\ 0.043\ 3\ 0.067\ 7\ 0.063\ 9\ 0.067\ 8\ 0.035\ 1\ 0.066\ 5\ 0.075\ 2\ 0.051\ 3\ 0.073\ 8\ 0.080\ 0\ 0.076\ 9\ 0.051\ 2\ 0.070\ 0\ 0.041\ 5)$, 将

现状年各指标带入模糊模式识别模型中,得到现状年洪泽湖健康等级为 4.1312,即洪泽湖健康状态处于微病态状态,该评价结果符合洪泽湖的实际情况。

由投影方向和权重向量可以看出各评价指标对湖泊健康的影响程度从大到小依次为:植被覆盖率、景观多样性指数、水生植物覆盖率、物理稳固性、TN、DO、浮游动物生物量、Chl-a、底栖动物多样性指数、浮游植物生物量、湖泊水循环周期、河湖连通性、湖泊蓄水量、TP、SD、入湖流量偏差率。对比各单项指标评价结果(表4)可知,洪泽湖 TN、TP 质量浓度过高,超过了湖体的自净能力,根据湖泊营养状态评价标准,达到富营养水平,是导致洪泽湖健康状况较差的主要原因。通过查阅文献,对比以往洪泽湖的水生植被的分布情况发现,洪泽湖水生植被的面积呈逐年递减的趋势,植物群落、生物量及分布面积的减少也是导致湖区自净能力减弱、水质变差的重要原因。另外,湖泊的水循环周期也是影响湖泊水环境质量及各项服务功能的重要因素。由于泥沙淤积及人类过度的围垦、围网养殖,洪泽湖面积与容积不断减小,湖区水流速度也受到一定的影响,湖泊水循环周期变长,湖泊的自净能力也随之减弱。

4 结 语

本文基于洪泽湖水文特征、水质状况、水生态、物理形态结构、湖滨景观 5 个方面,构建洪泽湖生态健康评价指标体系,并建立了全面体现洪泽湖生态健康状况的评价等级标准。构建了基于投影寻踪的模糊模式识别模型对洪泽湖生态健康进行评价。该模型采用投影寻踪法确定各指标权重,确保了权重分配的客观合理性;基于健康评价的外延模糊性,选用模糊模式识别模型判别湖泊生态健康等级。将评价指标体系和评价模型应用于洪泽湖,得到洪泽湖健康状况处于微病态状态,影响洪泽湖整体健康的限制因子主要是 TP、TN,湖泊水循环周期和水生植被覆盖率等指标。

本文对洪泽湖生态健康的评价结果与洪泽湖实际情况相符,验证了文中所采用的基于投影寻踪的模糊模式识别模型的可行性、可靠性,该模型可推广应用于其他的生态系统评价问题中。

鉴于洪泽湖目前的健康状况,建议应加强洪泽湖区水环境治理,严格控制污染物排放总量;实施退网、退耕还湖及河湖疏浚工程,增强湖泊调蓄功能;对洪泽湖区生态系统进行科学有效区划,进行湿地植被恢复与重建,逐步恢复其健康状况。

参考文献:

[1] RAPPORT D J, REGIER H A, HUTCHINSON T C.

Ecosystem behavior under stress [J]. Nature, 1985, 125 (5): 617-640.

[2] KARR J R, FAUSCH K D, ANGENMEIRE P L, et al. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981, 6 (6): 21-27.

[3] 刘永,郭怀成,戴永立,等.湖泊生态系统健康评价方法研究 [J]. 环境科学学报, 2004, 24 (4): 723-729. (LIU Yong, GUO Huaicheng, DAI Yongli, et al. An assessing approach for lake ecosystem health [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24 (4): 723-729. (in Chinese))

[4] XU F L, DAWSON R W, TAO S. A method for lake ecosystem health assessment: an ecological modeling method and its application [J]. Hydrobiologica, 2001, 443 (1-3): 159-175.

[5] XU F L, LAM K C, DAWSON R W, et al. Marine coastal ecosystem health assessment: a case study of Tolo Harbour, Hong Kong, China [J]. Ecological Modelling, 2004, 173 (4): 355-370.

[6] 赵臻彦,徐福留,詹巍,等.湖泊生态系统健康定量评价方法 [J]. 生态学报, 2005, 25 (6): 1466-1474. (ZHAO Zhenyan, XU Fuli, ZHAN Wei, et al. A quantitative method for assessing lake ecosystem health [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (6): 1466-1474. (in Chinese))

[7] 卢志娟,裴洪平,汪勇.西湖生态系统健康评价初探 [J]. 湖泊科学, 2008, 20 (6): 802-805. (LU Zhijuan, PEI Hongping, WANG Yong. Preliminary exploration of ecosystem health assessment for Lake West [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20 (6): 802-805. (in Chinese))

[8] 许文杰,曹升乐.基于 PSR-熵权综合健康指数法的城市湖泊生态系统健康评价 [J]. 水文, 2010, 30 (5): 64-67. (XU Wenjie, CAO Shengle. Health assessment of urban lake ecosystem based on PSR-entropy weight comprehensive health index method [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30 (5): 64-67. (in Chinese))

[9] 王晶,焦燕,任一平,等. Shannon-Wiener 多样性指数两种计算方法的比较研究 [J]. 水产学报, 2015, 39 (8): 1257-1263. (WANG Jing, JIAO Yan, REN Yiping, et al. Comparative study on two computing methods for estimating Shannon-Wiener diversity index [J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39 (8): 1257-1263. (in Chinese))

[10] 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. (DOU Ming, ZHANG Yuandong, ZHANG Yazhou, et al. Assessment on the water system interconnection degree of Huaihe River Basin [J]. China Water Resources, 2013 (9): 21-23. (in Chinese))

[11] HASLE G R. Phytoplankton manual: monographs on oceanographic methodology [M]. Paris: UNESCO, 1978.

[12] 付强,赵小勇.投影寻踪模型原理及其应用 [M]. 北京:科学出版社, 2006: 1-79.

[13] 刘丽.基于遗传算法的水资源系统评价方法的应用研究 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2004.

(收稿日期: 2015-12-28 编辑:徐娟)