

文章编号: 1000-5862(2019)03-0320-11

基于粗糙集理论的 淡水湖泊湿地生态系统健康评价研究

林艺双, 刘 青*, 王 盼, 余梦舒, 邢贝贝, 罗清云, 周海利, 曾 森

(江西农业大学园林与艺术学院, 江西 南昌 330045)

摘要: 该文旨在通过构建淡水湖泊湿地生态健康评价指标体系, 对比分析长江流域中的鄱阳湖、西洞庭湖、洪湖 3 个淡水湖泊湿地的生态系统健康状况。首先从水环境、土壤、生物、景观和社会等 1 级指标中列出 13 个 2 级指标, 并利用粗糙集理论对 13 个指标进行约简, 得到由 5 个 1 级指标和 8 个 2 级指标构成的湖泊湿地生态系统健康评价指标体系; 然后运用层次分析法对 1 级指标进行主观赋权, 以及采用基于信息粒度的属性重要度原理对 2 级核心指标进行客观赋权, 再将 2 种权重组合起来得到评价指标的权重系数; 最后通过加权的方式计算出 3 个淡水湖泊湿地的综合健康指数, 以便进行生态系统健康状况比较。研究结果表明: 3 个湖泊湿地生态系统的健康等级均为中等, 综合健康指数排序为洪湖(6.063) > 鄱阳湖(5.997) > 西洞庭湖(5.458)。

关键词: 粗糙集理论; 湿地生态系统健康; 评价指标体系; 淡水湖泊; 综合健康指数

中图分类号: K 928.43; X 171.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2019.03.17

0 引言

湿地被认为是“地球之肾”^[1-2], 是介于陆地和水域之间的独特斑块, 兼具水、陆 2 种生态特征, 具有丰富的资源和强大的功能, 如涵养水源、调节气候、调蓄防洪、保护生物多样性等生态功能, 以及许多的经济和社会休闲娱乐功能。湿地系统是最具活力的生态系统之一, 对人类的生存也意义重大。在《世界自然保护大纲》中, 湿地与森林、海洋 3 者被称为全球 3 大生态系统类型^[3]。由于人类社会的发展给全世界的湿地造成了很大的破坏, 到 20 世纪全世界约有 50% 的湿地已经消失。近年来, 由于经济的飞速发展及不合理的开发, 中国湿地面积也急剧下降, 湿地水源不同程度地受到污染, 服务功能退化严重, 湿地生态系统的评价和保护工作迫在眉睫。

在湿地生态系统评价中的一个研究热点是湿地生态系统健康评价, 近年来关于湿地生态系统健康评价指标体系的研究越来越受到了国内外许多学者的关注并取得了一些进展。20 世纪 50 年代美国以湿地物种为主要研究对象对湿地进行了评价^[4]; 20

世纪 90 年代美国环保局(EPA)提出了 Level 3 层框架的湿地监测和评估的方法^[5]。贾慧聪等^[6]以青海省三江源地区湿地为研究对象, 基于压力-状态-响应(PSR)模型对湿地生态系统健康构建了综合评价指标体系, 再结合层次分析法计算出各指标的权重, 利用地理信息系统技术对青海省三江源地区湿地生态系统健康进行评价; 王斌等^[7]以 PSR 模型作为评价基础框架, 运用层次分析赋权法对华北地区滨海湿地进行生态系统健康评价研究; 谭娟等^[8]以上海市滩涂湿地为研究对象, 在 PSR 模型基础上构建评价指标体系, 将专家打分法与熵权法结合起来对上海市滩涂湿地生态系统健康状况进行了评价; 张淼^[9]以位于干旱地区的黄旗海流域为研究对象, 采用景观开发强度法和快速评价法对其湿地进行生态系统健康评价; 王书可等^[10]运用集对分析的方法对三江平原湿地生态健康情况进行了分析; 宋创业等^[11]按照层次分析法确定各指标的权重, 对黄河三角洲人工恢复芦苇湿地生态系统的健康状况进行评价; 张容^[12]以北京翠湖为研究对象, 利用美国环保署提出的景观发展强度指数法与景观格局分析法、湿地快速评价法、生物完整性指数法 3 个层次的湿

收稿日期: 2019-01-10

基金项目: 国家社会科学基金(17BJL025)和江西省教育厅科技计划(GJJ170253)资助项目。

通信作者: 刘 青(1977-), 男, 江西赣州人, 副教授, 主要从事园林规划研究。E-mail: liuqing_77@126.com

地评价方法,结合“3S”技术对翠湖湿地进行生态系统健康评价研究;冯倩等^[13]以鄱阳湖国家湿地公园湿地生态系统为研究对象,运用模糊综合评价法对湿地生态系统健康状况进行了综合分析;吴春莹等^[14]通过遥感信息提取、实地采样、数据统计和问卷调查等方式构建了评价指标体系,利用层次分析法赋权对北京市3处重要湿地进行生态系统健康评价;姚萍萍等^[15]以长江流域内的湿地和水域为研究对象,以PSR模型为评价框架,在GlobeLand30土地覆盖数据的基础上,结合层次分析法对长江流域2000—2010年湿地健康进行了综合评价;周静等^[2]对湿地生态系统健康评价的几种国内外常用方法做了一些重点回顾总结,并归纳了各种方法的优缺点,以及对湿地生态系统评价方法的展望进行了讨论;赵志江等^[16]从湿地生态系统健康评价的指标体系构建、指标权重确定和标准化处理、健康等级划分和综合评价等方面进行了系统梳理。

在评价指标选定之后,科学、合理地确定指标权重是在进行综合评价过程中的关键环节,权重的大小反映了各个指标在评价决策中重要的程度或所处的地位和作用,它直接影响到指标体系评价的最终结果^[17]。指标权重的确定方法已经成为综合评价领域研究的一项重要内容,目前常用的方法主要有层次分析法、德尔菲法、模糊综合评价法、主成分分析法等,这些方法一般都依赖于先验知识^[18],从而在综合评价分析中往往存在较强的主观性,且难以判断经验的可靠性。因此,探讨合理客观的湿地生态系统健康综合评价方法是亟待需要解决的问题。粗糙集理论是由波兰数学家Z. Pawlak^[19]提出的一种数据分析处理方法,它具有在没有提供先验信息的前提下,仅依赖于数据本身所隐含的信息来揭示问题内在规律的优点,是一种完全数据驱动的多指标综合评价方法。该方法仅依赖于客观数据且具有科学性、便利性、可操作性的优势^[20]。近年来一些学者尝试将粗糙集理论与评价指标的权重赋值结合起来,并应用到湖泊生态、景观美学、湿地生态、道路生态等风景园林领域中,如庞发虎等^[21]运用粗糙集理论对意大利西西里岛30个湖泊健康评价指标进行研究,并将所得结论与赵臻彦等的研究结论相比较;文益君等^[22]以龙山森林公园5大景区为例构建了风景林景观美学评价指标体系,利用粗糙集理论的属性重要度计算了各指标的权重,经过加权和运算得到了各景区的景观美学指数;闫正龙等^[23]借助粗糙集理论的属性约简方法,选取了影响河流系统健康的重要因子,对平原地区河流系统健康提出了一套

评价指标体系;黄国如等^[24]改进了传统的粗糙集理论,给出了基于条件信息熵的指标权重确定方法,并将该方法应用于东江流域水基系统健康的综合评价中;吕勇等^[25]利用粗糙集理论分别对5个1级指标下的29个2级指标进行筛选,构建了湿地景观质量评价指标体系,并对阿蓬江国家湿地公园景观进行了评价;史果香等^[26]利用粗糙集理论的属性重要度和条件信息熵计算了每个1级指标和2级指标的权重,再结合级差法得到了5个评价指标以及相应的权重系数,构建了自然保护区道路生态恢复评价指标体系。

然而,通过对现有文献的梳理发现,关于粗糙集理论对湖泊湿地生态系统健康评价的研究鲜有报道。本文先根据粗糙集理论的属性约简原理,对淡水湖泊湿地生态系统健康评价指标体系进行筛选,在每个1级指标下选取出核心的2级指标;再将层次分析法所得的1级指标权重与粗糙集理论所得的2级指标权重结合,得出组合的权重系数;最后对鄱阳湖、西洞庭湖、洪湖3个淡水湖泊的湿地生态系统健康进行综合评价。

1 粗糙集理论

粗糙集理论作为一种处理不确定性问题的数据分析工具,它的主要特点在于不需要提供问题所需要处理的数据集合之外的任何先验知识,可以直接对数据进行分析 and 推理,从中发现隐含的知识,揭示潜在的规律^[27]。正因为如此,基于粗糙集理论的指标权重确定方法体现了数据的客观性,在一定程度上避免了主观因素的不利影响。目前粗糙集理论已经广泛应用于多指标综合评价问题^[28],并在经济学、管理学、社会学、风景园林学等多个领域取得了一定的研究成果。基于粗糙集理论的指标体系优化和评价方法逐渐成为学术界关注的热点之一,该方法的原理^[29]是在数据挖掘和数据驱动的基础上,先结合粗糙集理论的属性约简原理删除一些冗余的指标,提取出重要的核心指标,再计算各个核心指标的属性重要度,从而得到评价指标的客观权重,最后对研究对象进行综合评价。该方法的优点是具有科学性、易操作性,且最大限度地保留了指标体系的信息数据。本文在粗糙集理论中所涉及的一些概念及符号可参见文献[30]。

1.1 信息系统

定义1 4元组 $S = (U, A, V, f)$ 是一个信息系

统,其中研究对象集 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ (也称为论域) 和属性集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 都为非空有限集合; $V = \bigcup_{a \in A} V_a$ 是属性 a 的值域; $f: U \times A \rightarrow V$ 是一个信息关系函数, $\forall a \in A, x \in U, f(x, a) \in V_a$.

在信息系统中的信息关系函数 f 是对象集与属性集之间的纽带,也是知识表示、约简和发现的信息基础. 信息关系函数为每个对象的每个属性赋予一个信息值,对象的信息由指定对象的各属性值来表示,如 $f(x_i, a_j) = V_{a_j}$ 表示对象 x_i 在属性 a_j 下的值为 V_{a_j} . 信息系统的数据以关系表的形式描述,其中关系表的行对应对象的属性,列对应所研究的对象,对象的信息是通过指定对象的各属性值来表示.

定义2 设信息系统 $S = (U, A, V, f)$, $\forall P \subseteq A$, $P \neq \emptyset$ 称

$\rho_P = \{(x_i, x_j) \in U \times U \mid \forall a \in P, f(x_i, a) = f(x_j, a)\}$ 为 P 上的不可分辨 (indiscernibility) 关系,记为 $\text{ind}(P)$.

若 $[x_i]_P = \{x_j \mid (x_i, x_j) \in \text{ind}(P)\}$ 为包含 $x_i \in U$ 的 P 等价类,则 $U/\text{ind}(P) = \{[x_i]_P \mid x_i \in U\}$ 是 U 上的一个划分. 划分就是分类,即将研究对象分成不同类型,这些类之间互不相交,且任一对象均包含于某一类中. 人们需要通过分类去认识那些不能用分类来精确描述的对象集,称这种集合为粗糙集.

1.2 信息系统的属性约简

属性约简是粗糙集理论的核心内容之一. 在信息系统中,属性通常并不是同等重要的,其中某些属性甚至是冗余的. 属性约简就是以信息系统分类能力未改变为前提,删除一些不必要的属性,简化数据以进行科学地分析问题^[27].

定义3 设给定一个信息系统 $S = (U, A, V, f)$, 对于 $P \subseteq A$ 和一个属性 $a \in P$, 如果 $\text{ind}(P) = \text{ind}(P - \{a\})$, 则称属性 a 在 P 中是不必要的,否则称属性 a 在 P 中是必要的. 如果信息系统 S 中的每一个属性 a 都是在 P 中必要的,则称属性集 P 为独立的;否则称属性集 P 为依赖的.

定义4 设给定一个信息系统 $S = (U, A, V, f)$, $Q \subseteq A$, 如果 Q 是独立的,且 $\text{ind}(Q) = \text{ind}(A)$, 则称属性子集 Q 为信息系统 S 中 A 的一个约简. A 的所有约简的交集被称为 A 的核.

1.3 基于信息粒度的属性重要度

信息粒是通过信息系统中不可分辨关系来区分的对象集合,即在信息系统中具有相同属性值的对

象集合^[31]. 一个基本信息粒可看作信息系统中的一个等价类. 信息粒度是等价关系下信息粒大小的平均度量.

定义5^[32] 设 $R \subseteq U \times U$ 为论域 U 上的一个等价关系,定义 $G(R) = |R|/|U|^2$ 为 R 的信息粒度.

R 的信息粒度 $G(R)$ 可用来刻画信息系统中等价关系 R 的分辨能力, $G(R)$ 越小 R 的分辨能力越强. 若 R 为相等关系,则 $G(R)$ 取最小值 $1/|U|$; 若 R 为全域关系,则 $G(R)$ 取最大值 1, 即 $1/|U| \leq G(R) \leq 1$.

设 $S = (U, A, V, f)$ 是一个信息系统, $P \subseteq A$, $U/\text{ind}(P) = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 则 $G(P) = \sum_{i=1}^n |X_i|^2 / |U|^2$. 属性子集 P 的信息量 $I(P)$ 可以表示为

$$I(P) = \sum_{i=1}^n |X_i| (1 - |X_i|/|U|) / |U| = 1 - \sum_{i=1}^n |X_i|^2 / |U|^2 = 1 - G(P).$$

属性集信息量的大小直接反映了属性集对信息系统的分类能力. 属性的变化 (剔除或加入) 会直接影响到信息系统对研究对象的分类结果,属性集中不同属性所反映的信息量大小有所不同.

定义6^[33] 设 $S = (U, A, V, f)$ 是一个信息系统, $P \subseteq A$, 属性 $r \in P$, 则称 $\gamma_{P-\{r\}}(r) = I(P) - I(P - \{r\})$ 为属性 r 对属性子集 P 的重要度.

属性 r_i 在属性集 $P = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 中的重要性是由 P 剔除 r_i 后所引起的信息量变化的大小来衡量的; 若某属性在信息系统中被删除后,信息系统的分类能力变化越大,则该属性越重要. 由此可以给出属性 $r_i \in P$ 的权重计算公式,即

$$w_i = \gamma_{P-\{r_i\}}(r_i) / \sum_{j=1}^n \gamma_{P-\{r_j\}}(r_j) = (I(P) - I(P - \{r_i\})) / (nI(P) - \sum_{j=1}^n (I(P - \{r_j\}))).$$

2 淡水湖泊湿地生态系统健康评价指标体系

湿地生态系统健康是生态系统健康的一个重要组成部分. 生态系统健康思想最早来源于土地健康^[34],从生态系统健康的内涵出发,考虑湿地的自然属性,湿地生态系统的健康可定义为湿地生态系统内部组织结构完整,功能健全,对周围生态系统和人类健康不造成危害,且在长期或突发的自然或人为扰动下能保持弹性和稳定性.

2.1 湿地生态系统健康评价指标体系构建

国内湿地生态系统健康评价大多数都选定一个概念模型作为指标选择的基础,以概念模型评价的几个方面作为所构建指标体系的 1 级指标,常用的概念模型是压力-状态-响应(PSR)模型^[35]和活力-组织结构-恢复力(VOR)模型^[36].本文湿地生态系统健康评价指标体系采用新的分类体系,在 PSR 模型和 VOR 模型的基础上,从湿地生态学的原理出发,以湿地水、土壤和植被 3 要素为主线,综合考虑景观格局变化及社会经济、人类活动的影响.指标选取以科学性、逻辑性、可操作性、可测量性和可报告性为主要原则.

通过广泛查阅国内外湿地健康评价研究的有关文献,本文的候选指标选取了在文献中出现频率较高、在国内外学者中受到关注较多的指标,并综合考虑中国湖泊湿地各方面的因素,构建了湿地生态系统健康评价指标体系,最后分别从水环境、土壤、生物、景观和社会角度建立了 5 个 1 级指标和 13 个 2 级指标^[37-38],如图 1 所示.对于湿地生态系统健康评价指标的有关描述可参见文献[37-38].

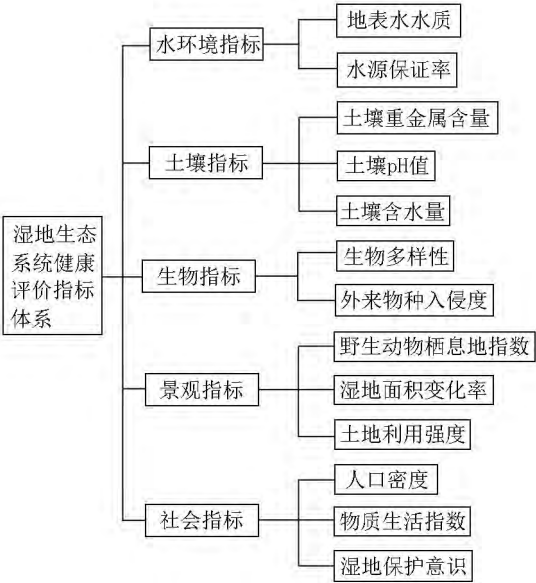


图 1 湿地生态系统健康评价指标体系基本框架

2.2 湿地生态系统健康评价指标计算方法

2.2.1 地表水水质 地表水水质指标反映了该地域湿地被污染的状况,对水环境质量有着直接影响,并间接地表征湿地的净化能力.根据国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)将地表水划分为 6 大类^[38](见表 1).由当地湿地主管部门提供水质类别数据.

表 1 地表水水质类别及其功能说明

类别	功能	分值
I	主要适用于国家级自然保护区 比如水的源头	10
	主要适用于集中生活饮用水区域的地表	
II	水源地的 一级保护区、鱼虾类产卵场所、幼鱼的索饵水域、珍稀水生生物栖息地等	8
	主要适用于集中生活饮用水区域地表水	
III	源地的 二级保护区、水产养殖、鱼虾类越冬场所、洄游通道等区域及游泳区	6
	主要适用于人体非直接接触的一般工业用水区及娱乐用水区域	
IV		4
V	主要适用于农业用水及一般景观需求用水区域	2
劣 V	无利用价值、严重污染的水源	0

2.2.2 水源保证率 水源保证率是湿地非常重要的水文指标;它体现了湿地生态系统的水文状态.水源保证率 $P_{sy} = W/\bar{Q}$,其中 W 为湿地生态系统的当年蓄水量, \bar{Q} 为湿地生态系统的多年平均需水量.该指标的分值 S_{sy} 的计算公式为

$$S_{sy} = \begin{cases} P_{sy} & 0 \leq P_{sy} \leq 10, \\ 0 & P_{sy} > 10. \end{cases}$$

2.2.3 土壤重金属含量 湿地作为一种特殊的生态系统,易遭受重金属的污染.湿地底泥和周围土壤中的重金属污染物含量是评价湿地生态系统健康的重要指标之一.内梅罗综合污染指数是目前应用较多的一种环境质量指数,可以直接表征各污染物对土壤的作用,其计算公式为

$$P_N = [(P_{l_{mean}}^2 + P_{l_{max}}^2)/2]^{1/2},$$

其中单项污染指数 P_l 用土壤污染物实测值与土壤污染物标准之间的比值来表示, $P_{l_{mean}}$ 为平均单项污染指数, $P_{l_{max}}$ 为最大单项污染指数.

根据中华人民共和国环境保护行业标准《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)中的土壤内梅罗综合污染指数评价标准,土壤重金属含量分值 S_N 的计算公式为

$$S_N = \begin{cases} 0, & P_N > 3, \\ 10(3 - P_N)/2.3, & 0.7 < P_N \leq 3, \\ 10, & P_N \leq 0.7. \end{cases}$$

2.2.4 土壤 pH 值 土壤 pH 值是湿地土壤重要的化学性质之一,在一定程度上反映了湿地生态系统对动植物提供栖息地的土壤适宜度.湿地土壤大多数呈微酸性至中性,即 pH 值为 5.5 ~ 7.0.该指标的归一化公式为

$$S_{pH} = \begin{cases} 0, & p_H \leq 4 \text{ 或 } p_H \geq 9, \\ 10(9 - p_H)/2, & 7 < p_H < 9, \\ 10(p_H - 4)/1.5, & 4 < p_H < 5.5, \\ 10, & 5.5 < p_H \leq 7, \end{cases}$$

其中 p_H 为实测土壤 pH 值.

2.2.5 土壤含水量 土壤含水量是土壤的重要物理性质,是评价湿地生态系统健康的重要依据之一. T_R 表示土壤含水量,采用质量百分比表示. T_{Ravg} 表示湿地区域内所有采样点的土壤平均含水量,土壤含水量的归一化分值 S_{T_R} 的计算公式为

$$S_{T_R} = \begin{cases} 10T_{Ravg} & 0 \leq T_{Ravg} < 1, \\ 10, & T_{Ravg} \geq 1. \end{cases}$$

2.2.6 生物多样性 生物多样性是湿地生态系统健康的重要特征之一. 针对湿地生态系统,其生物多样性分级标准可参照中华人民共和国国家环境保护标准《区域生物多样性评价标准》(HJ 623—2011),该指标的表达式描述为

$B_I = [0.25 \times \text{野生维管束植物种类} / 3662 + 0.25 \times \text{野生高等动物种类} / 635 + 0.25 \times \text{物种特有性} + 0.125 \times \text{受威胁物种的丰富度} + 0.125 \times (1 - \text{归一化外来物种入侵度})] \times 100$.

从而生物多样性指数的归一化分值 S_{B_I} 的计算公式为

$$S_{B_I} = \begin{cases} 0, & B_I \leq 20, \\ (B_I - 20)/4, & 20 < B_I < 60, \\ 10, & B_I \geq 60. \end{cases}$$

2.2.7 外来物种入侵度 外来生物极易入侵脆弱而敏感的湿地生态系统,可采用外来物种入侵度来间接地刻画湿地生态系统健康状态. 外来物种入侵度 P_{in} 用评价湿地区域内外来入侵物种数与本地野生高等动物和维管束植物种数之和的比值来表示. 该指标的归一化分值 S_{in} 的计算公式为

$$S_{in} = \begin{cases} 10(0.1441 - P_{in})/0.1441 & 0 \leq P_{in} \leq 0.1441, \\ 0, & P_{in} > 0.1441. \end{cases}$$

2.2.8 野生动物栖息地指数 野生动物栖息地指数反映湿地对野生动植物的承载能力,它从景观破碎化和植被覆盖度 2 方面综合表征湿地野生动物提供栖息地的适宜度. 参照胡嘉东等^[39] 构建的模型,分别对有效湿地斑块面积、单位面积湿地斑块数量和植被覆盖度进行标准化,形成 S_{size} 、 S_{num} 、 S_{cover} 3 个指标来综合表征湿地的野生动物栖息地功能. 野生动物栖息地指数 S_{WI} 的计算公式为

$$S_{WI} = 0.4S_{size} + 0.3S_{num} + 0.3S_{cover}.$$

2.2.9 湿地面积变化率 湿地生态环境改变将导致湿地面积的变化. 湿地面积变化率是湿地生态系统健康状况的直观表现,它以湿地现有面积占前一年同时期湿地面积的百分比值 A_{bh} 来表示. 该指标的归一化分值 S_{bh} 的计算公式为

$$S_{bh} = \begin{cases} 0, & A_{bh} \leq 0.65, \\ 10(A_{bh} - 0.65)/0.35, & 0.65 < A_{bh} < 1, \\ 10, & A_{bh} \geq 1. \end{cases}$$

2.2.10 土地利用强度 土地利用强度 P_{lu} 以待评价区域内农业、建设用地、沙地、畜牧业土地面积占评价区域土地总面积的百分比来表示^[40]. 该指标的归一化分值 S_{lu} 的计算公式为

$$S_{lu} = \begin{cases} 10 - 2P_{lu}/0.1, & P_{lu} < 0.1, \\ 8 - 2(P_{lu} - 0.1)/0.1 & 0.1 \leq P_{lu} \leq 0.2, \\ 6 - 2(P_{lu} - 0.2)/0.2 & 0.2 < P_{lu} \leq 0.4, \\ 4 - 2(P_{lu} - 0.4)/0.4 & 0.4 < P_{lu} \leq 0.8, \\ 2 - 2(P_{lu} - 0.8)/0.2 & P_{lu} > 0.8. \end{cases}$$

2.2.11 人口密度 人类活动对湿地存在很多潜在的威胁,人口密度间接地反映人类活动的强度,显示湿地系统当前所承受的人口压力,是湿地生态系统健康状况的胁迫社会指标. 人口密度 R_d (人·km⁻²) 用评价湿地区域内人口总数与湿地面积的比值来表示,该指标归一化分值 S_{R_d} 的计算公式为

$$S_{R_d} = \begin{cases} (600 - R_d)/60 & 0 \leq R_d < 600, \\ 0, & R_d \geq 600. \end{cases}$$

2.2.12 物质生活指数 物质生活指数直接表征社会经济发达的程度,反映人类社会对湿地生态系统健康的潜在压力. 物质生活指数 Y_{income} (元·(人·年)⁻¹) 用评价湿地区域内居民的总体收入与评价湿地区域内总人口的比值来表示. 该指标的归一化分值 S_{income} 的计算公式为

$$S_{income} = \begin{cases} (10000 - Y_{income})/10000 & 0 \leq Y_{income} \leq 10000, \\ 0, & Y_{income} > 10000. \end{cases}$$

2.2.13 湿地保护意识 湿地保护意识是指湿地科研知识与保护教育思想在周边区域居民中的普及程度,是湿地生态系统健康的响应指标. 通过问卷调查的方式来获取居民湿地保护意识的状况,湿地保护意识以被调查民众中具有湿地保护意识的人员占问卷调查中总人数的比例来表示. 从所有问卷中提取有效问卷,以问卷满分为 100 分为标准,得分为 50 分以上视为合格,即被调查的居民具有湿地保护意识. 湿地保护意识指标归一化分值的计算公式为 $S_{ys} = 10N_y/N_v$,其中 N_v 为有效问卷的数量, N_y 为有

效问卷中具有湿地保护意识的问卷数量.

3 湿地生态系统健康指数

湿地生态系统健康由综合健康指数表示,通过计算所有标准化后的 2 级指标归一化分值的加权和得到,各个指标权重由层次分析法和粗糙集理论给出.根据湿地生态系统综合健康指数的大小来衡量湿地生态系统的健康程度.

根据湿地生态系统综合健康指数的分值,将湿地生态系统健康分为好、中、差 3 个等级(见表 2).湿地生态系统健康评价的最终结果表示为湿地生态系统健康等级,并辅以对应健康等级的描述性文字^[38].

4 基于粗糙集的淡水湖泊湿地生态系统健康评价

4.1 研究地自然状况

江西鄱阳湖湖泊湿地、湖南西洞庭湖湖泊湿地

和湖北洪湖湖泊湿地都位于长江流域,在地图上 3 个湖泊湿地地理位置成三角形分布(如图 2 所示).3 个淡水湖泊面积相当,都为 300 km² 左右.

表 2 湿地生态系统健康等级表

等级	分值	健康状况
好	[7,10]	湿地生态系统功能完善,系统稳定且活力很强,湿地景观保持良好的自然景观,系统活力极强,外界压力小
中	(3,7)	湿地生态系统结构较为完整,具有一定的系统活力,可发挥基本的生态功能,外界存在一定压力,湿地景观发生了一定的改变,部分功能退化,已有少量的生态异常出现
差	[0,3]	湿地生态系统结构不完整、不合理,系统不稳定,外界压力大,湿地景观受到很大破坏,结构破碎,活力较低,系统功能退化严重



图 2 3 大淡水湖泊的地理位置

4.1.1 江西鄱阳湖湖泊湿地自然状况 江西鄱阳湖湖泊湿地位于长江南岸,北纬 29°02′~29°19′,东经 115°54′~116°12′.根据国务院发布的第 2 次全国湿地资源调查结果显示,鄱阳湖湖泊湿地总面积约为 349.393 2 km².鄱阳湖湖泊湿地属于亚热带季风气候,水文特点是湿度相对稳定,水位存在着明显的季节性差变化,7 月水位最高,1 月水位最低.土壤类型主要为红壤、水稻土、黄褐土、冲击土和潮土.鄱阳湖湿地生态系统结构完整,动植物资源丰富.兽类、鸟类、爬行类、鱼虾贝类等多种多样,品种丰富.国家一级保护野生动物 10 种,国家二级野生保护动

物 44 种.湿地及周边地区植被丰富,各种湿生植物、挺水植物、浮叶植物、沉水植物等共 95 科 352 属 456 种(含变种).

4.1.2 湖南西洞庭湖湖泊湿地自然状况 湖南西洞庭湖湖泊湿处长江南岸汉寿县境内,坐标为北纬 28°47′48″~29°7′22″,东经 111°55′14″~112°17′25″.西洞庭湖湖泊湿地总面积约为 294.128 0 km²,气候属于亚热带季风气候,西洞庭湖湿地水系发达,附近有 8 条河流流入西洞庭湖.土壤类型主要为潮土、草甸土和沼泽土.湿地内共有维管束植物 414 种,其中国家一级保护野生植物 1 种(即水杉),国家二级保

护野生植物 5 种. 洞庭湖湿地底栖动物、鱼类、两栖类、哺乳类、鸟类等动物品种丰富, 共 264 种. 国家一级保护的有 6 种, 国家二级保护的有 26 种.

4.1.3 湖北洪湖湖泊湿地自然状况 湖北洪湖湖泊湿地位于长江中游北岸. 地理位置为北纬 $29^{\circ}40' \sim 29^{\circ}58'$, 东经 $113^{\circ}12' \sim 113^{\circ}26'$. 根据国务院发布的第 2 次全国湿地资源调查结果显示, 洪湖湖泊湿地总面积约为 343.1083 km^2 . 洪湖湖泊湿地属于亚热带季风气候. 洪湖水资源十分丰富, 是调蓄型湖泊, 集灌溉、生产生活供水、养殖、物质保护等功能为一体. 土壤类型主要有水稻土和潮土. 洪湖湿地浮游生物和底栖动物较多, 鱼类、爬行类、鸟类等动物也品种繁多. 国家一级保护野生动物 6 种, 国家二级野生保护动物 16 种. 湿地维管束植物 116 科 303 属 494 种, 其中国家一级保护野生植物 4 种.

4.2 湿地生态系统健康评价

4.2.1 数据来源 鄱阳湖、西洞庭湖和洪湖 3 大湖泊湿地的原始数据及其来源参见文献 [38].

根据湿地生态系统健康评价指标体系, 将原始数据代入各指标的归一化计算公式得到 3 大湖泊湿地的评价样本数据(见表 3).

表 3 3 大湖泊的评价指标及其归一化值

评价指标	鄱阳湖 U_1	西洞庭湖 U_2	洪湖 U_3
地表水水质 a_1	4.00	6.00	7.00
水源保证率 a_2	6.69	6.21	4.15
土壤重金属含量 a_3	10.00	0.00	9.14
土壤 pH 值 a_4	10.00	9.25	6.22
土壤含水量 a_5	2.61	2.66	5.08
生物多样性 a_6	1.97	3.07	0.51
外来物种入侵度 a_7	6.46	7.56	9.65
野生动物栖息地指数 a_8	4.00	6.20	3.80
湿地面积变化率 a_9	10.00	9.61	10.00
土地利用强度 a_{10}	9.10	6.81	7.74
人口密度 a_{11}	0.00	3.30	9.44
物质生活指数 a_{12}	4.87	0.00	3.00
湿地保护意识 a_{13}	1.84	6.00	3.52

4.2.2 基于粗糙集理论的湿地生态系统健康评价具体过程如下:

1) 构建评价指标体系的信息系统. 为应用粗糙集理论, 先对连续的原始数据进行离散化处理, 在评价时将各指标的评分等级分为 $10 \sim 8$ 、 $8 \sim 6$ 、 $6 \sim 4$ 、 $4 \sim 2$ 、 $2 \sim 0$. 按上限排外法进行相应的赋值为 5、4、3、2、1, 最终得到各指标的属性值如表 4 所示.

表 4 给出了一个信息系统 $S = (U, A, V, f)$, 其中论域 $U = \{U_1, U_2, U_3\}$, 属性集 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\} = \{\{a_1, a_2\}, \{a_3, a_4, a_5\}, \{a_6, a_7\}, \{a_8, a_9, a_{10}\}, \{a_{11}, a_{12}, a_{13}\}\}$, 值域 $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$.

表 4 评价指标离散化后的信息系统表

评价指标	鄱阳湖 U_1	西洞庭湖 U_2	洪湖 U_3
地表水水质 a_1	3	4	4
水源保证率 a_2	4	4	3
土壤重金属含量 a_3	5	1	5
土壤 pH 值 a_4	5	5	4
土壤含水量 a_5	2	2	3
生物多样性 a_6	1	2	1
外来物种入侵度 a_7	4	4	5
野生动物栖息地指数 a_8	3	4	2
湿地面积变化率 a_9	5	5	5
土地利用强度 a_{10}	5	4	4
人口密度 a_{11}	1	2	5
物质生活指数 a_{12}	3	1	2
湿地保护意识 a_{13}	1	4	2

2) 约简指标集. 由于评价对象只有 3 个, 在利用粗糙集理论同时对 13 个评价指标进行约简时, 可能会导致剩余的指标数量太少, 甚至出现一些 1 级指标下的 2 级指标都被剔除的情况, 从而给出的权重无法用于综合健康指数的得分计算. 因此, 按照 1 级指标分别对每个 1 级指标下的 2 级指标进行属性约简. 如对于水环境指标, 由属性约简原理知,

$$U/\text{ind}(A_1) = \{U_1, U_2, U_3\},$$

$$U/\text{ind}(A_1 - \{a_1\}) = \{\{U_1, U_2, U_3\} \neq U/\text{ind}(A_1)\},$$

$$U/\text{ind}(A_1 - \{a_2\}) = \{\{U_1, U_2, U_3\} \neq U/\text{ind}(A_1)\},$$

这表明指标 a_1 、 a_2 在属性集 A_1 中都是必要的, 因此, 水环境指标下有 1 个约简 $\{a_1, a_2\}$. 同理可得, 土壤指标下有 2 个约简 $\{a_3, a_4\}$ 和 $\{a_3, a_5\}$; 生物指标下有 1 个约简 $\{a_6, a_7\}$; 景观指标下有 1 个约简 $\{a_8\}$; 社会指标下有 3 个约简 $\{a_{11}\}$ 、 $\{a_{12}\}$ 和 $\{a_{13}\}$. 结合湿地生态学中指标的重要性程度, 最后给出湿地生态系统健康评价指标集的一个约简 $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_6, a_7, a_8, a_{11}\}$. 经过粗糙集理论的属性约简后, 将原有的 13 个 2 级指标保留了地表水水质、水源保证率、土壤重金属含量、土壤 pH 值、生物多样性、外来物种入侵度、野生动物栖息地指数、人口密度等 8 个指标, 它们与 5 个 1 级指标一起构成了新的湿地生态系统健康评价指标体系(见表 5). 约简后的信息系统及其属性值如表 6 所示.

表 5 属性约简后湿地生态系统健康评价指标体系

目标层	1 级指标	2 级指标
淡水湖泊生态系统健康评价指标体系	水环境 A_1	地表水水质 a_1
		水源保证率 a_2
	土壤 A_2	土壤重金属含量 a_3
		土壤 pH 值 a_4
	生物 A_3	生物多样性 a_6
		外来物种入侵度 a_7
	景观 A_4	野生动物栖息地指数 a_8
	社会 A_5	人口密度 a_{11}

表 6 属性约简后的信息系统

评价指标	鄱阳湖 U_1	西洞庭湖 U_2	洪湖 U_3
地表水水质 a_1	3	4	4
水源保证率 a_2	4	4	3
土壤重金属含量 a_3	5	1	5
土壤 pH 值 a_4	5	5	4
生物多样性 a_6	1	2	1
外来物种入侵度 a_7	4	4	5
野生动物栖息地指数 a_8	3	4	2
人口密度 a_{11}	1	2	5

3) 确定指标权重. 对于 5 个 1 级指标, 利用层次分析法, 根据专家经验进行两两对比, 构造判断矩阵 (见表 7) 来计算各指标的权重; 采用求和法, 经计算得到该判断矩阵的一致性检验的指标 $C_I = (5.093 - 5) / (5 - 1) \approx 0.023$, 由当 $n = 5$ 时随机一致性指标 $R_I = 1.12$ 知, 该判断矩阵的随机一致性比率 $C_R = C_I / R_I \approx 0.021 < 0.1$, 所以该判断矩阵通过了一致性检验. 因此, 根据表 7 的判断矩阵计算得到各 1 级指标的权重分别为 $w_{A_1} = 0.422$, $w_{A_2} = 0.266$, $w_{A_3} = 0.156$, $w_{A_4} = 0.106$, $w_{A_5} = 0.050$.

表 7 1 级指标的判断矩阵

	水环境 指标	土壤 指标	生物 指标	景观 指标	社会 指标
水环境指标	1	2	3	4	6
土壤指标	1/2	1	2	3	5
生物指标	1/3	1/2	1	2	3
景观指标	1/4	1/3	1/2	1	3
社会指标	1/6	1/5	1/3	1/3	1

对于 2 级指标, 采用粗糙集理论, 根据信息粒度对属性重要度进行计算, 将各指标的属性重要度进行归一化处理后得出每个指标的权重. 如在水环境指标下, 属性 a_1 对属性集 A_1 的重要度 $\gamma_{A_1 - \{a_1\}}(a_1) = I(A_1) - I(A_1 - \{a_1\}) = 2/9$, 属性 a_2 对属性集 A_1 的重要度 $\gamma_{A_1 - \{a_1\}}(a_2) = 2/9$. 归一化处理后可知, 在水环境指标下地表水水质和水源保证率的权重分别为 $w_{a_1} = 0.5$ 和 $w_{a_2} = 0.5$. 同理可得, 在土壤指标下土壤

重金属含量和土壤 pH 值的权重分别为 $w_{a_3} = 0.5$ 和 $w_{a_4} = 0.5$; 在生物指标下生物多样性和外来物种入侵度的权重分别为 $w_{a_6} = 0.5$ 和 $w_{a_7} = 0.5$; 在景观指标下野生动物栖息地指数的权重为 $w_{a_8} = 1$; 在社会指标下人口密度的权重为 $w_{a_{11}} = 1$.

将层次分析法所得的 1 级指标权重和粗糙集理论所得的 2 级指标权重进行组合, 可得湿地生态系统健康评价指标体系的权重系数, 如地表水水质的权重为 $w_{db} = w_{A_1} w_{a_1} = 0.422 \times 0.5 = 0.211$. 属性约简后各评价指标的权重如表 8 所示.

表 8 各评价指标的权重计算结果

评价指标	水环境 0.422	土壤 0.266	生物 0.156	景观 0.106	社会 0.050	权重
地表水水质	0.5					0.211
水源保证率	0.5					0.211
土壤重金属含量		0.5				0.133
土壤 pH 值		0.5				0.133
生物多样性			0.5			0.078
外来物种入侵度			0.5			0.078
野生动物栖息地指数				1		0.106
人口密度					1	0.050

4) 计算综合健康指数. 湿地生态系统综合健康指数的计算公式为 $I_h = \sum_{i=1}^n w_i S_i$, 其中 w_i 为第 i 个指标的权重系数, S_i 为第 i 个指标的归一化分值. 在属性约简后的湿地生态系统评价指标体系中, 根据综合健康指数的计算公式可得 3 大淡水湖泊的综合健康指数, 并将它们的得分值进行排序, 结果如表 9 所示. 如鄱阳湖的综合健康指数为 $I_h^{PY} = 0.211 \times 4 + 0.211 \times 6.69 + 0.133 \times 10 + 0.133 \times 10 + 0.078 \times 1.97 + 0.078 \times 6.46 + 0.106 \times 4 + 0.050 \times 0 = 5.997$.

表 9 3 大淡水湖泊综合健康指数排序

排名	湖泊	湿地生态系统综合健康指数
1	洪湖	6.063
2	鄱阳湖	5.997
3	西洞庭湖	5.458

由表 9 可知, 3 大淡水湖泊湿地生态系统综合健康指数的排序为洪湖 (6.063) > 鄱阳湖 (5.997) > 西洞庭湖 (5.458); 在综合健康指数方面, 洪湖与鄱阳湖较为接近, 而西洞庭湖比其他 2 个湖泊稍微偏低; 根据湿地生态系统健康等级的划分可得, 洪湖、鄱阳湖、西洞庭湖的生态系统健康等级均为“中”. 这意

味着洪湖、鄱阳湖、西洞庭湖的湖泊湿地生态系统结构较为完整,具有一定的系统活力,可发挥基本的生态功能,其中洪湖、鄱阳湖的湖泊湿地生态系统健康状况略优于西洞庭湖。

为了分析在各 1 级指标方面 3 大湖泊之间的差异情况,结合表 3 的指标归一化值和表 8 的指标权重值得出 3 大湖泊湿地各指标的健康指数结果(见表 10)。

表 10 3 大淡水湖泊各指标健康指数

评价指标	鄱阳湖	西洞庭湖	洪湖
地表水水质	0.844	1.266	1.477
水源保证率	1.412	1.310	0.876
土壤重金属含量	1.330	0	1.216
土壤 pH 值	1.330	1.230	0.827
生物多样性	0.154	0.239	0.040
外来物种入侵度	0.504	0.590	0.753
野生动物栖息地指数	0.424	0.657	0.403
人口密度	0	0.165	0.472

由表 10 可以得出:

1) 在水环境指标中,洪湖的地表水质最优,西洞庭湖的次之,鄱阳湖的地表水污染较严重;鄱阳湖的湖泊湿地水源保证充沛,西洞庭湖的湖泊湿地水源较为充足,而洪湖的湖泊水源保证率偏低。从总体上看,3 大湖泊的湿地水环境均处于中等水平,其中西洞庭湖的水环境健康指数较优于鄱阳湖和洪湖,这表明 3 大淡水湖泊的湿地水质较适宜各种动植物的繁衍栖息以及水产养殖生产的进行,且 3 大湖泊的湿地水源能够保持湿地生态系统的长期稳定;

2) 在土壤指标中,鄱阳湖湖泊湿地的土壤基本没有受到重金属污染且呈弱酸性,洪湖的土壤局部受到轻微重金属污染且呈弱碱性,而西洞庭湖的土壤受重金属污染较为严重且呈中性。从土壤的综合健康指数来看,鄱阳湖的土壤环境良好,洪湖的土壤环境整体一般,而西洞庭湖的土壤对生物生存会产生一定程度的危害。这表明鄱阳湖的土壤达到一级标准,适宜大多数动植物的生存;洪湖的土壤可以适合碱性生物生存;西洞庭湖的土壤存在某些重金属含量过高,应加强治理以降低对农业生产、动植物及人体健康的不利影响;

3) 在生物指标中,西洞庭湖湖泊湿地具有较高的生物多样性,物种多样性健康指数大约是鄱阳湖的 1.5 倍,洪湖的 6 倍;洪湖是 3 大湖泊中湿地生态系统受外来物种干扰程度最低的,鄱阳湖的外来物种入侵状况与西洞庭湖较为相当。从生态系统的组织结构角度来看,3 大湖泊的生物综合健康指数值

均超过 0.65,其中西洞庭湖最优(0.829),洪湖次之(0.793),鄱阳湖最低(0.658),这说明西洞庭湖、洪湖、鄱阳湖在一定程度上都具有保护原有群落或自然生态系统的能力;

4) 从景观指标中的野生动物栖息地指数来看,西洞庭湖的健康指数是 3 个湖泊中最高的,该湖泊湿地为野生动物提供了较好的栖息地,植被覆度较高,景观破碎化程度较低;鄱阳湖和洪湖指数相当且处于低位值,这表明 2 个湖泊景观破碎化程度较高,物种种类较为单一,生态环境较差,野生动植物栖息地环境有待进一步改善;

5) 以社会指标中的人口密度为视角来分析,洪湖湖泊湿地内人口稀疏,人为干扰较少;西洞庭湖湿地内人口密度较大,这对湿地的生态健康稳定会造成很大的影响;鄱阳湖的人口密度健康指数为 0,这意味着鄱阳湖周边人口非常稠密,对湿地生态系统干扰强烈,已经严重危及了湖泊湿地的生态健康。

5 结论与讨论

湿地生态系统健康指标体系是湿地生态系统评价体系的重要组成部分。本文借鉴国内有关湿地生态系统健康的已有研究成果,归纳总结了影响湿地生态系统健康的主要因素,以 3 大淡水湖泊湿地(即鄱阳湖、西洞庭湖和洪湖)为研究对象,基于粗糙集理论保留了湖泊湿地健康的关键影响因子,构建了淡水湖泊湿地生态系统健康评价模型。本文主要结论如下:

1) 在 PSR 模型和 VOR 模型的基础上,从湿地生态学的原理出发,以湿地水、土壤和植被 3 要素为主线,综合考虑景观格局变化及社会经济、人类活动的影响,形成了 2 级 5 大类的湖泊湿地生态系统健康评价指标体系框架,分别从水环境、土壤、生物、景观和社会 5 个方面分析了影响湿地生态系统健康的因子,共有 13 个 2 级指标;

2) 在对鄱阳湖、西洞庭湖、洪湖 3 大淡水湖泊进行实例分析中,先基于粗糙集理论的不可分辨关系的分类功能,利用属性约简方法对指标进行筛选,构建了由 5 个 1 级指标、8 个 2 级核心指标组成的淡水湖泊湿地生态系统健康评价指标体系;然后由层次分析法得出各 1 级指标的权重,运用基于信息粒度的属性重要度原理计算出各 2 级指标的权重,从而给出各指标的综合权重;最后采用加权和的方式得到了 3 大淡水湖泊的综合健康指数,即洪湖为

6.063,鄱阳湖为5.997,西洞庭湖为5.458,它们的健康等级均为“中”;

3)通过比较3大湖泊各1级指标的综合健康指数发现,西洞庭湖、洪湖、鄱阳湖的湿地水质较适宜各种动植物的繁衍栖息以及科学水产养殖生产的进行,它们的湿地水源能够保持湿地生态系统的长期稳定,且3大湖泊在一定程度上都具有保护原有群落或自然生态系统的能力;

4)3个湖泊湿地在生态系统健康方面虽然处于中等健康级别,但也还存在一些问题。如西洞庭湖的土壤有过高的重金属含量,对农业生产、动植物及人体健康会产生不利影响;鄱阳湖周边人口密集,对湿地生态系统干扰强烈,已经严重危及了湖泊湿地的生态健康;鄱阳湖和洪湖2个湖泊的景观破碎化程度较高,生物多样性不高,生态环境较差,野生动植物栖息地环境有待进一步改善。

本文在湖泊湿地生态系统健康评价时,仅选取了长江流域的鄱阳湖、西洞庭湖、洪湖3个淡水湖泊湿地,原因其一是考虑它们的自然状况有很多相似之处,能够较好处地进行对比分析。由于湿地资料获取渠道有限,本文所涉及的湖泊湿地数量较少,从而造成某些核心指标仅有1个,因此,在今后的研究中有必要补充数据使得评价模型更加系统全面。基于粗糙集理论的权重确定方法具有较强的适用性,一方面可以推广应用于其他类型的湿地生态系统健康评价中,只是选取的核心指标可能会有所不同;另一方面还能够对湿地生态系统的功能、价值等方面的评价问题展开研究,这是下一步工作中的一个探索内容。

6 参考文献

- [1] 吕宪国,刘红玉.湿地生态系统保护与管理[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [2] 周静,万荣荣.湿地生态系统健康评价方法研究进展[J].生态科学,2018,37(6):209-216.
- [3] 吕宪国.中国湿地与湿地研究[M].石家庄:河北科学技术出版社,2008.
- [4] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands [M]. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993: 507-527.
- [5] Stapanian M A, Waite T A, Krzys G, et al. Rapid assessment indicator of wetland integrity as an unintended predictor of avian diversity [J]. Hydrobiologia, 2004, 520(1): 119-126.
- [6] 贾慧聪,曹春香,马广仁,等.青海省三江源地区湿地生态系统健康评价[J].湿地科学,2011,9(3):209-217.
- [7] 王斌,郭胜华,张震.华北地区滨海湿地生态系统健康评价体系构建研究[J].中国环境监测,2012,28(4):29-32.
- [8] 谭娟,黄沈发,王卿.上海市滩涂湿地生态系统健康评价及成因分析[J].长江流域资源与环境,2014,23(12):1706-1713.
- [9] 张森.黄旗海湿地生态系统健康评价[D].北京:北京林业大学,2014.
- [10] 王书可,李顺龙,谢学军,等.基于集对分析法的三江平原湿地生态系统健康评价研究[J].林业经济,2015(8):68-73,115.
- [11] 宋创业,胡慧霞,黄欢,等.黄河三角洲人工恢复芦苇湿地生态系统健康评价[J].生态学报,2019,36(9):2705-2714.
- [12] 张容.翠湖湿地生态系统健康评价[D].北京:北京林业大学,2016.
- [13] 冯倩,刘聚涛,韩柳,等.鄱阳湖国家湿地公园湿地生态系统健康评价研究[J].水生态学杂志,2016,37(4):48-54.
- [14] 吴春莹,陈伟,曹春香,等.北京市重要湿地生态系统健康评价[J].湿地科学,2017,15(4):516-521.
- [15] 姚萍萍,王汶,孙睿,等.长江流域湿地生态系统健康评价[J].气象与环境科学,2018,41(1):12-18.
- [16] 赵志江,崔丽娟,朱利,等.指标体系法在我国湿地生态系统健康评价研究中的应用进展[J].湿地科学,2018,14(4):9-13.
- [17] 钟嘉鸣,李订芳.基于粗糙集理论的属性权重确定最优化方法研究[J].计算机工程与应用,2008,44(20):51-53.
- [18] 彭连贵,阎瑞霞,陈昭君.多粒度粗糙集粒度权重确定的综合方法[J/OL].计算机应用研究,2019,36(11). [2018-08-10]. <http://www.aocmag.com/article/02-2019-11-027.html>.
- [19] Pawlak Z. Rough set [J]. International Journal of Information and Computer Science, 1982, 11(5):341-356.
- [20] 施振佳,陈世平.基于粗糙集和知识粒度的特征权重确定方法[J].科技管理研究,2018(12):248-253.
- [21] 庞发虎,庞振凌,杜瑞卿.粗糙集理论对湖泊生态系统健康评定指数法的评价[J].生物数学学报,2008,23(2):337-344.
- [22] 文益君,周根苗,张晓蕾,等.基于粗糙集的风景林景观美学评价[J].林业科学,2009,45(1):1-7.
- [23] 闫正龙,高凡,黄强.基于PSR模型和粗糙集的平原地区河流系统健康评价指标体系研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(12):200-208,219.
- [24] 黄国如,武传号,向碧为.基于粗糙集理论的东江流域水基系统健康集对分析[J].系统工程理论与实践,2014,34(5):1345-1351.
- [25] 吕勇,孙谦,张超家.基于粗糙集的湿地景观质量评价研究:以重庆市阿蓬江国家湿地公园为例[J].中南林

- 业科技大学学报 2014 34(7):12-18.
- [26] 史果香,周彤,杜艳爽,等.基于粗糙集的旅游区道路生态恢复评价体系研究[J].河北工业大学学报,2016,45(5):112-118.
- [27] 苗夺谦,李道国.粗糙集理论、算法与应用[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [28] 万伟,王命延,陈熹.一种基于 Rough 集理论的多属性综合评价方法[J].计算机与现代化,2007(1):49-51,59.
- [29] 张文修,仇国芳.基于粗糙集的不确定决策[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [30] 张文修,吴伟志,梁吉业,等.粗糙集理论与方法[M].北京:科学出版社,2001.
- [31] 徐优红,竺定宏.粗糙集近似与信息粒度[J].计算机科学,2008,35(3):222-224.
- [32] 周辉,鲁燕飞,王黔英,等.基于信息粒度的属性权重确定方法[J].统计与决策,2006(10):134-136.
- [33] 陈悦华,黄刚.基于改进的粗糙集与 AHP 法的组合权重确定方法[J].测控技术,2017,36(6):132-135,141.
- [34] 吴良冰,张华,孙毅,等.湿地生态系统健康评价研究进展[J].中国农村水利水电,2009(10):22-26.
- [35] Rapport D J, Friend A M. Towards a comprehensive framework for environmental statistics: a stress-response approach[M]. Ottawa: Statistics Canada, 1979: 11-510.
- [36] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. Ecosystem health: new goals for environment management[M]. Washington D C: Island Press, 1992.
- [37] 吴昊.国际重要湿地生态系统评价:以辽宁双台河口为例[D].杭州:浙江农林大学,2014.
- [38] 马广仁,鲍达明,曹春香,等.中国国际重要湿地生态系统评价[M].北京:科学出版社,2016.
- [39] 胡嘉东,郑丙辉,万峻.潮间带湿地栖息地功能退化评价方法研究与应用[J].环境科学研究,2009,22(2):171-175.
- [40] 孙永光.长江口不同年限围垦区景观结构与功能分异[D].上海:华东师范大学,2011.

The Study on Ecosystem Health Evaluation of Freshwater Lake Wetlands Based on Rough Set Theory

LIN Yishuang, LIU Qing*, WANG Pan, YU Mengshu, XING Beibei, LUO Qingyun, ZHOU Haili, ZENG Sen
(College of Landscape Architecture and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang Jiangxi 330045, China)

Abstract: The purpose of this paper is to compare the ecosystem health condition of three freshwater lake wetlands, including Poyang Lake, Dongting Lake and Honghu Lake in the Yangtze River basin, by constructing the evaluation index system of ecological health on freshwater lake wetland. For achieving this objective, 13 second grade indexes are firstly given under 5 first grade indexes that involve water environment, soil, biology, landscape and society. Thirteen indexes are reduced by using rough set theory, and so a set of evaluation index system of ecosystem health on lake wetland, which is composed of five first grade indexes and eight second grade indexes, is obtained. Secondly, the subjective weights are used to assign five first grade indexes by the analytic hierarchy process (AHP) method, and the objective weights are used to assign eight second grade core indexes by using the attribute significance principle based on information granularity, then two kinds of weight are combined to get the weight coefficients of the evaluation indexes. Lastly, the comprehensive health indexes of three freshwater lake wetlands are calculated by means of weighted sum so as to compare the ecosystem health conditions of three freshwater lake wetlands. The results show that all of the ecosystem health grade of three lake wetlands are medium, and the value of comprehensive health index follows the order of Honghu Lake (6.063) > Poyang Lake (5.997) > West Dongting Lake (5.458).

Key words: rough set; wetland ecosystem health; evaluation index system; freshwater lake; comprehensive health index

(责任编辑:曾剑锋)