

湖泊生态系统健康评价的熵权综合健康指数法*

许文杰^{1,2},许士国²

(1. 山东建筑大学 理学院, 济南 250101; 2. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要:湖泊生态系统健康评价是湖泊生态系统科学管理和生态恢复的前提和基础。熵权综合健康指数法评价湖泊生态系统健康状况的主要步骤有:建立评价指标体系;计算各指标的归一化值;确定各指标的熵权;计算湖泊生态系统熵权综合健康指数。并以滇池为例验证该方法的可靠性和实用性。该方法可用于湖泊不同时空健康状况的对比,得出湖泊生态系统的演替趋势,为湖泊生态系统的管理、保护和生态恢复提供依据,从而促进湖泊水资源的可持续利用,最终实现湖泊生态系统的健康发展。

关键词:湖泊;生态系统健康评价;熵权综合健康指数;滇池

中图分类号:X171.4 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2008)01-0125-03

Entropy Weight Comprehensive Health Index Method for Assessment of Lake Ecosystem Health

XU Wenjie^{1,2}, XU Shi-guo²

(1. School of Science, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract :Assessment of ecosystem health is the premise and base of scientific management and ecological restoration for lake. The primary steps of entropy weight comprehensive health index method contains establishing assessment index system ,calculating unitary value of each index ,determining entropy weight of each index and calculating entropy weight comprehensive health index of lake ecosystem. The application of this method in Lake Dianchi is given as an example ,which validates the method is reliable and applied. This method can be used to compare health status of different time and space and to get the succession trend for lake ecosystem in order to provide basis for management ,protection and ecological restoration. Accordingly ,water resources of lake can be sustainably used and healthy development of lake ecosystem can be realized.

Key words :lake ;assessment of ecosystem health ;entropy weight comprehensive health index ;Lake Dianchi

生态系统健康(Ecosystem health)是 20 世纪 70 年代新兴的生态系统管理学概念,克服了单学科、单领域的局限,是一门集地球科学、环境科学、生态学、经济学及社会科学等于一体的边缘交叉学科。随着人们对生态系统服务功能认识的逐渐深入和对生态环境质量要求的不断提高,生态系统健康状况受到越来越多的关注^[1]。湖泊生态系统健康评价是湖泊生态系统科学管理和生态恢复的前提和基础。目前,湖泊生态系统健康评价还处于实验和摸索阶段,尚未形成一套成熟的方法^[2]。其中,生态系统健康指数(EHI)法可用于同一湖泊不同时空及不同湖泊之间健康状态的定量评价与比较,原理简单,计算简便,结果可靠、直观,是一种值得推广的定量评价方法^[3]。该方法的关键是评价指标的选取和指标权重的确定。采用熵权综合健康指数法评价湖泊生态系统健康状况,并以滇池为例说明评价结果的合理性和可靠性。

1 熵权综合健康指数法

生态系统健康应包含两方面内涵:满足人类社会合理需求的能力和生态系统本身自我维持与更新的能力^[4]。因此,在选择湖泊生态系统健康评价指标和评价方法时,应综合考虑自然因素和社会因素,宏观与微观相结合,熵权综合健康

指数法即是为满足这一要求提出的。它的计算公式为

$$EHI_C = \sum_{i=1}^n I_i \cdot w_i \tag{1}$$

式中: EHI_C ——湖泊生态系统综合健康指数; I_i ——第 i 个指标的归一化值, $0 \leq I_i \leq 1$; w_i ——第 i 个指标的权重,可由熵值法确定。熵权综合健康指数法分为以下几个基本步骤:建立评价指标体系;计算各指标的归一化值;确定各指标的熵权;计算湖泊生态系统熵权综合健康指数。

1.1 建立评价指标体系

鉴于湖泊生态系统是一个涵盖内、外因素的综合体,综合评价指标体系应包含外部、环境要素状态和生态 3 方面指标^[5]。外部指标主要包括 3 部分: 外源输入(主要是污染物质和能量)的量和系统的最大承载力; 湖泊生态系统对外界的输出,也就是系统的对外功能,包括生物物质和能量的输出以及水资源的输出; 湖滨带平均宽度和生态系统状况。环境要素状态指标制约着湖泊内浮游植物、浮游动物、鱼类、底栖动物生长和繁衍。在不同的湖泊条件下,这些指标有所不同,对已处于富营养化状态或有这种趋势的湖泊而言, TN、TP 及氨氮浓度、DO、COD、换水周期、水动力学条

* 收稿日期:2007-01-23
作者简介:许文杰(1974 -),女,山东高唐人,讲师,博士研究生,主要从事水环境、水文水资源研究。

件、沉积物的形态和释放速率,以及营养状态综合指数(TS-CD)等都是需要考虑的。生态指标用来衡量湖泊生态系统自身的状态,包含群落特征、群落结构、生态位和生命周期、营养物质循环以及综合状态。分3个方面:结构指标、功能指标和系统指标。结构指标反映湖泊生态系统中不同种群的构成和量的关系;功能指标表征生态系统内部的功能;系统指标是指生态系统作为整体表现出来的状态。

1.2 计算各指标的归一化值

湖泊生态系统健康是一个相对概念,需要建立基准点即参照系统,在对比的基础上进行生态系统健康状况的评估。由于生态系统健康的不可确定性,很难确定生态系统在何种状态下是健康的,不可避免地带有为主观性。该文的处理方法是:选取某一个时间序列,将序列中某个指标相对最佳的值归一化为1,其余值以其与最佳值的比值或者是比值的倒数作为归一化后的值。

1.3 熵值法确定指标权重

在多指标评价问题中,权重的确定是重点也是难点,目前有很多确定权重的方法,大致可分为两大类:主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法是专家根据各指标的重要性来确定权重,容易受专家主观意识的影响而带来偏差,并且不能反映各指标统计数据的相互关系;而客观赋权法中的熵值法是在客观条件下,由评价指标值构成的判断矩阵来确定指标权重的一种方法,它能尽量消除各因素权重的主观性,使评价结果更符合实际。

在信息论中,熵是系统无序程度的度量,它还可以度量数据所提供的有效信息量^[6]。信息熵越小,系统无序度越小,信息的效用值越大;信息熵越大,系统无序度越高,其信息的效用值越小。对于所讨论的 n 个方案 m 个评价指标的初始矩阵,利用熵值法计算各指标的权重,其本质就是利用该指标信息的效用值来计算的,效用值越高,其对评价的重要性越大。其计算步骤如下^[7-8]:

- (1) 构建 n 个样本 m 个评价指标的判断矩阵。
- (2) 将判断矩阵归一化处理,得到归一化判断矩阵 B , B 中元素的表达式为 $R = (x_{ji} \ n \times m)$

$$b_{ij} = \frac{x_{ji} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

(2)

式中: x_{\max} , x_{\min} ——同指标下不同样本中最满意者或最不满意者(越小越满意或越大越满意)。

- (3) 根据熵的定义, n 个样本 m 个评价指标,可确定评价指标的熵为

$$H_i = - \frac{1}{\ln n} \left(\sum_{j=1}^n f_{ji} \ln f_{ji} \right)$$

(3)

式(3)中,经修正,定义 $f_{ji} = \frac{1+b_{ji}}{\sum_{j=1}^n (1+b_{ji})}$ 。

$$R = \begin{bmatrix} 17.40 & 0.90 & 0.71 & 7.75 & 3.35 & 48.60 & 6.92 & 1.10 & 18.50 & 430.17 & 24.54 \\ 19.37 & 1.33 & 0.42 & 7.61 & 5.39 & 51.22 & 30.97 & 1.03 & 37.00 & 894.46 & 17.43 \\ 20.59 & 0.93 & 0.51 & 8.89 & 5.47 & 54.30 & 30.02 & 0.98 & 55.50 & 858.49 & 17.33 \end{bmatrix}$$

将判断矩阵 R 归一化处理,得到归一化判断矩阵 B

$$B = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 & 0.1094 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 0.6176 & 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.9623 & 0.4596 & 1.0000 & 0.4167 & 0.5000 & 1.0000 & 0.0139 \\ 1.0000 & 0.0698 & 0.3103 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0.9605 & 0.0000 & 1.0000 & 0.9225 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

根据熵的定义,可确定评价指标的熵 H

(4) 计算评价指标的熵权

$$w_i = - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{H_i}{H_i}$$

(4)

式(4)中,应满足 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。

1.4 计算湖泊生态系统熵权综合健康指数

各指标的归一化值和指标熵权确定后,代入式(1),即可求得湖泊生态系统熵权综合健康指数。

2 应用实例

滇池是我国著名的高原淡水湖泊,位于云南省中部,是一个具有城市生活供水、工农业供水、养殖、防洪、旅游、航运、调节径流和娱乐等多种功能的湖泊。滇池流域面积 2 920 km²,平均水深 4.4 m,水面面积 300 km²,容积 12.9 亿 m³,随着经济社会的发展,流域内的水质污染与水资源需求的矛盾将更加突出,因而迫切需要对其生态系统健康状况及变化趋势进行评价与分析,以便为其保护和治理提供科学依据。

2.1 选择评价指标及指标的归一化

选取 1988 年、1994 年和 2001 年组成的时间序列^[9],选择 CIVW(单位体积湖水年净污染物输入)、SD(透明度)等 11 个评价指标^[5]对滇池的生态系统健康状况进行评价,见表 1。

表 1 滇池生态系统健康评价指标值及其归一化值

指标	指标值			归一化值		
	1988 年	1994 年	2001 年	1988 年	1994 年	2001 年
CIVW/ (g · m ⁻³)	17.40	19.37	20.59	1.00	0.90	0.85
W/ WE	0.90	1.33	0.93	0.68	1.00	0.70
SD/ m	0.71	0.42	0.51	1.00	0.59	0.72
DO/ (mg · L ⁻¹)	7.75	7.61	8.89	0.87	0.86	1.00
BOD5	3.35	5.39	5.47	1.00	0.62	0.61
STOC/ (mg · L ⁻¹)	48.60	51.22	54.30	1.00	0.95	0.90
BP/ (mg · L ⁻¹)	6.92	30.97	30.02	1.00	0.22	0.23
ID	1.10	1.03	0.98	1.00	0.94	0.89
Chla/ (g · L ⁻¹)	18.50	37.00	55.50	1.00	0.50	0.33
Ex	430.17	894.46	858.49	0.48	1.00	0.96
Exst	24.54	17.43	17.33	1.00	0.70	0.71

注:CIVW:单位体积湖水年净污染物输入;W/ WE:年入湖水量与年出湖水量之比;SD:透明度;DO:溶解氧;BOD5:5 日生化需氧量;STOC:沉积物中的 TOC;BP:浮游植物生物量;ID:物种多样性指数;Chla:叶绿素 a;Ex:能质;Exst:结构能质。

2.2 熵值法确定指标权重

首先构建滇池生态系统健康评价 3 个样本 11 个指标的判断矩阵 R

$$H = [0.9659 \quad 0.9514 \quad 0.9623 \quad 0.9538 \quad 0.9611 \quad 0.9652 \quad 0.9612 \quad 0.9647 \quad 0.9656 \quad 0.9620 \quad 0.9475]$$

最后计算确定评价指标的熵权

$$w = [0.0776 \quad 0.1107 \quad 0.0858 \quad 0.1051 \quad 0.0885 \quad 0.0791 \quad 0.0884 \quad 0.0805 \quad 0.0783 \quad 0.0864 \quad 0.1196]$$

2.3 计算滇池生态系统熵权综合健康指数

将表 1 中评价指标的归一化值及其熵权代入式(1),可得滇池所选时间序列的生态系统熵权综合健康指数见表 2。

表 2 滇池生态系统熵权综合健康指数

指标	1988 年	1994 年	2001 年
熵权综合健康指数	0.906	0.756	0.721

3 结 论

由表 2 的计算结果可见,1988 年、1994 年和 2001 年滇池生态系统的熵权综合健康指数呈递减趋势,这表明滇池生态系统健康状况总体上呈下降趋势。近几十年来,人类的经济活动对滇池生态系统产生了巨大的影响,滇池生态目前严重恶化,其生态调解机制已不能保持系统的良性循环,系统向退化方向演替。该文的计算结果与滇池的实际情况相符合,验证了文中采用的熵权综合健康指数法的可靠性和实用性。该方法可用于湖泊不同时空健康状况的对比,得出湖泊生态系统的演替趋势,为湖泊生态系统的管理、保护和生态恢复提供依据,从而促进湖泊水资源的可持续利用,最终实现湖泊生态系统的健康发展。

参考文献:

[1] 张志诚,欧阳华,肖风劲,等. 生态系统健康研究现状及其定量化研究初探[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12 (3): 184-187.

[2] 马克明,孔红梅,关文彬,等. 生态系统健康评价:方法与方向[J]. 生态学报, 2001, 21 (12): 2106-2116.

[3] 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.

[4] Rapport D J, Bohn G, Buckingham D, et al. Ecosystem health: the concept, the ISEH, and the important tasks ahead[J]. Ecosystem health, 1999, 5: 82-90.

[5] 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.

[6] 孟庆生. 信息论[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1989: 19-36.

[7] 邱菀华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京:机械工业出版社, 2001: 32-86.

[8] 闫文周,顾连胜. 熵权决策法在工程评价中的应用[J]. 西安建筑科技大学学报, 2004, 36 (1): 98-100.

[9] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京:海洋出版社, 1995.

(上接第 124 页)

成蒸发量减少,土壤盐分下移,淋滤作用增强,使得大量盐分进入地下水,浅层地下水水质发生剧烈变化。

4 结 论

(1)地下水系统是一耗散结构系统,也是一个复杂的开放系统,其演化过程处于非平衡有序状态且不可逆,与其相关的各子系统之间的作用是非线性的,强烈的人为因素对其演变的影响显著,地下水系统的演化经历宏观稳定态 - 非稳定态 - 重建稳定态的过程。

(2)“冀枣衡”漏斗是人类活动强烈干扰下地下水系统演化过程中的产物。大规模超量开采地下水导致衡水市地下水动力场变异、地下水化学场变异等问题,人为活动使地下水系统进入人为因素强烈干扰下新的演化时期。

(3)人类目前还不能完全按照自己的意愿塑造新的地下水系统而不产生其它不良的环境问题,因此,系统的失稳或功能的改变往往是开发利用地下水时必须加以避免的约束条件之一。

参考文献:

[1] 吴雪娟. 耗散结构系统的负熵及其实现过程[J]. 系统辩证学学报, 1995, 3 (2): 74-77.

[2] 管晓刚. 系统演化的辩证法:耗散结构理论的整体观[J]. 系统辩证学学报, 1999, 7 (2): 12-15.

[3] 池英剑. 浅谈耗散结构理论的应用和科学价值[J]. 三明高等专科学校学报, 2002, 19 (2): 104-108.

[4] 陈剑平. 岩土体变形的耗散结构认识[J]. 长春科技大

学学报, 2001, 31 (3): 288-293.

[5] 廖吉方. 地下水系统进化的环境问题:下清河灌区地下水系统剖析[J]. 甘肃水利水电技术, 1997 (1): 28-30.

[6] 申维. 自组织理论和耗散结构理论及其地学应用[J]. 地质地球化学, 2001, 29 (3): 1-6.

[7] 畅建霞,黄强,王义民,等. 基于耗散结构理论和灰色关联熵的水资源系统演化方向判别模型研究[J]. 水利学报, 2002 (11): 107-112.

[8] 张光辉,聂振龙,陈宗宇. 全新世以来华北平原层圈间水循环演化过程与区域地下水演化周期性[J]. 地球学报, 2001, 22 (4): 293-297.

[9] 陈梦熊,马凤山. 中国地下水资源与环境[M]. 北京:地震出版社, 2002: 385-427.

[10] 张光辉,费宇红,刘克岩. 海河平原地下水演变与对策[M]. 北京:科学出版社, 2004: 30-46.

[11] 杨杰,张道明,贾丽萍,等. 从熵概念到耗散结构理论[J]. 石家庄经济学院学报, 1998, 21 (5): 500-505.

[12] 秦葆瑚. 耗散结构混沌分形等新理论在地质学研究中的应用[J]. 湖南地质, 1994, 13 (4): 241-249.

[13] 徐恒力,肖国强,李红. 人为活动条件下河北平原第四系地下水系统的演化[J]. 地质科技情报, 2002, 21 (1): 7-12.

[14] 张宗祜,施鸿德,任福弘,等. 论华北平原第四系地下水系统之演化[J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27 (2): 168-173.