

湖泊生态系统健康定量评价方法

赵臻彦¹, 徐福留^{1*}, 詹 巍¹, 郝君宜¹, 张 颖¹, 赵珊珊¹, 胡维平², 陶 澍¹

(1. 北京大学环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要:提出了湖泊生态系统健康定量评价的一种新方法:生态系统健康指数法。该方法首先设计了一个 0~100 的生态系统健康指数作为定量尺度,然后通过评价指标选择、各指标生态系统健康分指数计算、各指标权重计算、生态系统健康综合指数计算等基本步骤,评价湖泊生态系统健康状态。以实用实例对意大利西西里湖泊群及单个湖泊进行了生态系统健康评价。结果表明,该方法原理简单,计算简便,结果可靠、直观,既可用于同一湖泊又可用于不同湖泊生态系统健康状态的定量评价与比较,是一种值得推广的定量评价方法。

关键词:生态系统健康指数;定量评价;湖泊生态系统健康

文章编号:1000-0933(2005)06-1466-09 中图分类号:Q14,Q178,X52 文献标识码:A

A quantitative method for assessing lake ecosystem health

ZHAO Zhen-Yan¹, XU Fu-Liu^{1*}, ZHAN Wei¹, HAO Jun-Yi¹, ZHANG Ying¹, ZHAO Shan-Shan¹, HU Wei-Ping², TAO Shu¹ (1. College of Environmental Sciences and MOE Laboratory for Earth Surface Process, Peking University, Beijing, 100871, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1466~1474.

Abstract: A quantitative method, Ecosystem Health Index (*EHI*) for assessing lake ecosystem health has been proposed in this paper, based on data from 30 lakes in Italy. The method were three major steps. Firstly, a numerical *EHI* in a scale of 0 to 100 was developed. Secondly, in order to calculate the specific and synthetic *EHI*, phytoplankton biomass (*BA*) was selected to serve as a basic indicator, while zooplankton biomass (*BZ*), the ratio of *BZ* to *BA* (*BZ/BZ*), exergy and structural exergy were used as additional indicators. Thirdly, the specific and synthetic *EHI* were calculated. The quantitative assessment results for lake ecosystem health could be obtained according to the synthetic *EHI* values. The *EHI* method was successfully applied to the assessment and comparison of ecosystem health for Italy lakes. The results show that the *EHI* method is a valuable method with the advantage of uncomplicated principle, handy calculation, reliable and intuitionistic results. It can be widely used for the quantitative assessment and comparison of ecosystem health states for single and different lakes.

Key words: ecosystem health index; quantitative assessment; lake ecosystem health

生态系统健康研究,是在全球许多自然生态系统(如海洋、湖泊、森林等)的健康状况日趋恶化的严峻形式下,于 20 世纪 80 年代中期在北美兴起的。近年来,在可持续发展思想的推动下,生态系统健康研究已成为国际生态环境领域的热点和联系地球科学、环境科学、生态学、经济学及社会科学等学科的桥梁^[1]。生态系统健康学被认为是在传统的自然科学、社会科学和健康科学相互交叉和综合的基础上发展起来的一门新学科^[2,3]。在北美,生态系统健康学已成为环境、生态、公众健康、医学、兽医等专业的课程^[4,5]。北美及欧洲一些国家已完成和启动了一批重大项目^[6~12]。近年来,生态系统健康研究也开始引起我国有关部门的高度重视。如,在 2000 年启动的 973 项目“长江流域生物多样性变化、可持续利用与区域生态安全”中,山地生态系

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40271101,40024101, 40332015);国家水利部资助项目(JJ-XX-2002029)

收稿日期:2004-04-08;修订日期:2005-02-02

作者简介:赵臻彦(1980~),男,重庆市人,硕士生,主要从事生态系统健康研究。

* 通讯作者 Author for correspondene. E-mail: xufl@urban.pku.edu.cn

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China(No. 40271101,40024101, 40332015) and Water Conservation Department of China(No. JJ-XX-2002029)

Received date: 2004-04-08; **Accepted date:** 2005-02-02

Biography: ZHAO Zhen-Yan, Master candidate, mainly engaged in ecosystem health.

统健康诊断与恢复技术被列为其三级子课题^[13];在国家基金委重大研究计划“中国西部环境和生态科学”2001 年项目指南中,“生态系统健康评价的理论和方法”被列为“十五”期间优先研究的 15 个科学问题之一;近两年来,基金委已批准了草地、农业、阔叶红松林、黄淮海湿地、浅层地下水、湖泊及矿区等生态系统的健康评价课题。国内期刊从 1999 年开始报道有关研究,并且绝大多数以综述性文章出现^[14~27]。

在湖泊生态系统健康研究方面,已提出了许多评价指标,如毛生产力指标(GEP)^[28],生态系统压力指标^[29],生物完整性指数^[30],热力学指标(exergy and structural exergy)^[31,32],包含湖泊生态结构、生态功能和生态系统方面的综合生态指标体系^[33,34],以及包含生物、生态、社会经济和人口健康等方面的综合指标体系^[6]等。在评价方法方面,Jorgenson 于 1995 提出了一套初步评价程序^[31],徐福留等于 2001 年提出了实测计算和生态模型两种评价方法^[34,35]。然而,由于缺乏定量标准,这些方法只能对单一湖泊生态系统健康状态进行相对评价,不能反映湖泊生态系统健康的真实状态,并且难以对不同湖泊生态系统健康状态进行比较^[34]。为了解决这些问题,本文提出了一种新的定量评价方法:生态系统健康指数法,并将该方法应用于意大利湖泊生态系统健康的定量评价与比较。

1 湖泊生态系统健康评价的定量方法:生态系统健康指数法

1.1 生态系统健康指数(EHI)的设计

为了度量湖泊生态系统的健康状态,本文设计了一个 0~100 连续数值的生态系统健康指数(EHI),并定义当 EHI 为 0 时,健康状态最差;当 EHI 为 100 时,健康状态最好。为便于描述,本文将 0~100 的连续数值按间隔 20 从小到大分为 5 段,即:0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100,分别对应于很差、较差、中等、较好和很好 5 种健康状态。湖泊生态系统健康指数与健康状态的关系如图 1 所示。

1.2 生态系统健康指数(EHI)的计算

$$EHI = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot EHI_i$$

(1)

式中,EHI 为生态系统健康综合指数;EHI_{*i*} 表示第 *i* 个指标的生态系统健康分指数;ω_{*i*} 表示第 *i* 个指标的权重。

(1)式表明,生态系统健康综合指数取决于各评价指标的权重及其分指数的大小。要得到综合 EHI,必须首先选择评价指标,并计算各指标的分指数及其权重。

1.3 生态系统健康指数法的基本步骤

生态系统健康指数法的基本步骤如图 2 所示。由图 2 可以看出,该方法有 5 个基本步骤,其中,选择评价指标是最重要步骤之一。指标的选择应遵循可测性、可比性、灵敏性及综合性原则。可测性是指所选指标的具体的数值可以通过监测、统计或计算等方法获得;可比性是指所选指标应该使得同一湖泊不同时空以及不同湖泊的评价结果可以相互对比;敏感性是指所选指标能够比较灵敏地反映湖泊物理的或化学的或生物的或系统水平的变化;综合性是指所选指标体系应尽可能涵盖湖泊物理、化学、生物、生态等方面的指标,以综合反映湖泊生态系统的健康状况。该方法把所选指标分为基准指标和扩展指标。基准指标是湖泊生态系统健康评价的关键指标,在单独使用时,基本上能够反映湖泊生态系统的健康状况,如叶绿素 a 浓度和浮游植物生物量等指标;扩展指标是指基准指标之外的一些指标,它们能对基准指标的评价结果在物理、化学、生物、生态系统等方面进行修正,以使评价结果更综合。

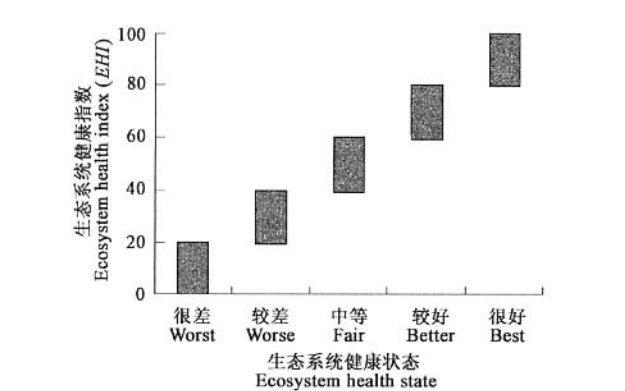


图 1 湖泊生态系统健康指数与健康状态的关系

Fig. 1 Health index and its relationships with health status in a lake ecosystem

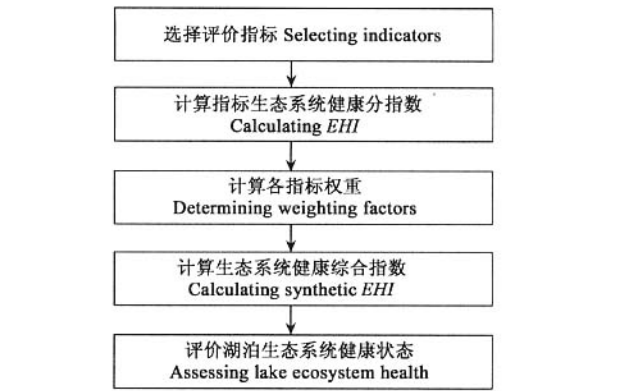


图 2 生态系统健康指数法基本步骤

Fig. 2 The procedure for assessing lake ecosystem health using EHI

2 生态系统健康指数法的应用实例

本研究以意大利西西里岛的 30 个湖泊为研究对象。这些湖泊的流域面积在 1~577 km² 之间,大多数小于 100 km²;湖泊水面面积在 0.2~14 km² 之间;湖泊水量在 0.1×10⁶~154×10⁶ m³ 之间^[36]。这些湖泊的一些基本特征见表 1。

表 1 30 个意大利湖泊的基本特征^[36]

Table 1 Basic limnological characteristics for 30 Italian lakes ^[36]					
湖泊名称 Lake name	电导率 Conductance uctance (mS/cm)	总磷 TP (μg/l)	氨氮 N-NH ₄ (μg/l)	硝态氮 N-NO ₃ (μg/l)	二氧化硅 SiO ₂ (mg/l)
Ancipa	0.18	30.66	12	77	2.0
Arancio	0.72	166.65	667	676	4.8
Biviere di Cesro	0.08	46.02	31	76	0.6
Biviere di Gela	2.72	45.15	22	78	2.3
Castello	0.96	109.88	775	263	2.9
Cimia	2.15	49.57	199	803	4.0
Comunelli	2.51	45.33	331	129	3.4
Dirillo	0.53	60.54	60	514	4.1
Disueri	1.21	1093.43	684	2226	3.6
Fanaco	0.53	54.34	199	1143	3.3
Gammauta	0.49	183.07	154	446	2.7
Garcia	0.77	51.36	22	1165	3.6
Gorgo	4.51	80.87	33	65	6.1
Guadalani	0.42	38.89	111	459	0.3
Nicoletti	1.42	35.18	46	66	1.5
Ogliastro	2.72	40.87	173	1710	2.9
Olivo	0.91	38.00	71	69	1.6
Piana degli Albanesi	0.37	46.77	349	412	0.4
Piana del Leone	0.41	46.85	160	546	2.4
Poma	0.74	51.11	73	994	1.4
Pozzillo	1.13	49.38	91	355	1.6
Prizzi	0.46	52.99	86	503	2.5
Rubino	1.05	28.94	18	711	1.0
San Giovanni	1.49	80.56	658	283	2.7
Santa Rosalia	0.42	55.81	125	279	3.4
Scanzano	0.50	61.65	300	1283	2.3
Soprano	1.85	2962.96	7671	57	12.7
Trinita	1.86	83.24	26	417	3.8
Vasca Ogliastro	0.32	106.69	28	177	3.4
Villarsosa	2.27	64.06	524	276	1.0

本研究数据来源于 1987~1988 年 4 个季节意大利西西里 30 个湖泊的调查资料^[36],共有 120 个样本点,其中藻类响应型数据点 114 个,非藻类响应型数据点 6 个。本文剔除了湖泊的非藻类响应型阶段的 6 个数据点,以 114 个藻类响应型数据点作为分析计算各指标生态系统健康分指数和综合指数的依据。

2.1 评价指标选择

根据意大利湖泊实测数据和徐福留等 1999 和 2001 研究结果^[33,34],本文选择湖泊生态结构指标(包括浮游植物生物量(BA)、浮游动物生物量(BZ)和两者的比值(BZ/BA))以及湖泊生态系统指标(包括能质(E_x)和结构能质(E_{xst}))作为评价指标,并将 BA 作为基准指标,其他 4 个指标作为扩展指标。

2.2 各指标生态系统健康分指数(EHI_i)的计算

2.2.1 基准指标 BA 的生态系统健康分指数 $EHI(BA)$ 的计算 浮游植物生物量(BA)是一个表征湖泊生态系统健康状态的重要指标,BA 越大,湖泊生态系统的健康状况越差^[33,34]。因此,BA 可作为湖泊生态系统健康评价的基准指标。当 BA 最小时, $EHI(BA)$ 最大,即 $EHI(BA)=100$;当 BA 最大时, $EHI(BA)$ 最小,即 $EHI(BA)=0$ 。根据文献^[37, 38]的研究成果,湖泊中 BA 符合对数正态分布,可采用下列对数级差规格化公式计算 $EHI(BA)$:

$$EHI(BA) = 100 \times \frac{\ln C_x - \ln C_{\min}}{\ln C_{\max} - \ln C_{\min}}$$

(2)

式中, $EHI(BA)$ 为基准指标 BA 的 EHI 分指数; C_x 为 BA 的实测值; $C_{\min}$ 和 $C_{\max}$ 分别是对应于 $EHI(BA)$ 为 100 和 0 时的

BA 的实测值。

(2)式化简后,可得到如下计算 $EHI(BA)$ 的公式:

$$EHI(BA) = 10(a + b\ln C_x)$$

(3)

式中, a 、 b 是由 $C_{\min}$ 和 $C_{\max}$ 所确定的常数。计算公式如下:

$$\begin{cases} a = -10 \times \frac{\ln C_{\min}}{\ln C_{\max} - \ln C_{\min}} \\ b = 10 \times \frac{1}{\ln C_{\max} - \ln C_{\min}} \end{cases}$$

(4)

根据意大利 30 个湖泊实测数据, $C_{\min}=0.004(\text{mg/L})$, $C_{\max}=150(\text{mg/L})$ 。代入式(4),求得: $a=5.2425$, $b=-0.94948$ 。将 a 、 b 代入公式(3),可得到意大利湖泊 $EHI(BA)$ 的计算公式如下:

$$EHI(BA) = 10 \times (5.2425 - 0.94948 \times \ln(BA))$$

(5)

由上述公式看出,基准指标 BA 经过对数级差规格化公式转换以后可以得到 $EHI(BA)$ 。BA 与 $EHI(BA)$ 的关系见图 3。

2.2.2 扩展指标 BZ 的生态系统健康分指数 $EHI(BZ)$ 的计算 根据卢小燕 2001 年研究^[38],由于受浮游生物种群结构变化、浮游植物的毒性效应以及浮游动物食物来源等因素的影响,意大利湖泊浮游植物生物量(BA)与浮游动物生物量(BZ)的相互关系可以分为 3 个层次。第 1 个层次表现为,随着 BA 的增加 BZ 显著增加;第 2 个层次表现为,随着 BA 的增加 BZ 减少;第 3 个层次表现为,随着 BA 的增加 BZ 缓慢增加。

意大利湖泊 BA 与 BZ 的相互关系见图 4。由该图可以看出,上述第 1 和第 3 两个层次的关系较为明显;然而,由于湖泊较多,并且不同的湖泊出现 BZ 开始减小时的 BA 值不同,因此,第 2 个层次的关系不明显,可认为是第 1 和第 3 两层关系的过渡。为了更好的描述 BA 与 BZ 的这种变化关系,本文用两个线性函数表达式 f_1 和 f_2 分别模拟上述第 1 和第 3 层关系(见图 4);对于所有数据点特别是位于第 2 层过渡关系的样点,可以利用模糊数学方法,通过比较隶属于第 1 和第 3 层关系的隶属度大小,来确定其归属于哪层关系。

定义图 4 中属于第 1 层相关关系的全部样点的集合为 α ,属于第 3 层相关关系的全部样点的集合为 β ,则通过回归分析可分别求出 f_1 和 f_2 的表达式:

$$f_1 \quad \ln(BA) = 0.1036 + 0.7997 \times \ln(BZ), \quad N = 95, \quad r = 0.702, \quad p < 0.01$$

(6)

$$f_2 \quad \ln(BA) = 2.7359 + 0.6766 \times \ln(BZ), \quad N = 19, \quad r = 0.563, \quad p < 0.01$$

(7)

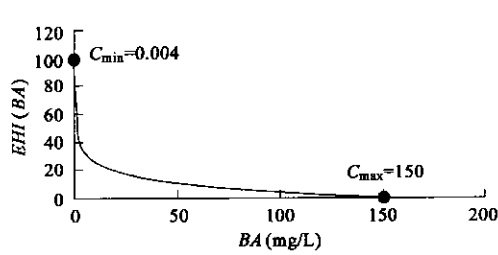


图 3 BA 与 $EHI(BA)$ 的关系

Fig. 3 Relationships between BA and $EHI(BA)$

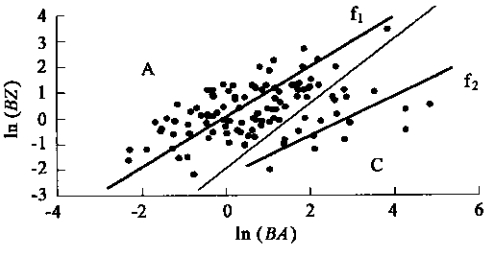


图 4 BA 与 BZ 的相关关系

Fig. 4 Relationships between BA and BZ in Italy lakes

将(6)、(7)式分别代入(5)式可得到对应于 f_1 和 f_2 的生态系统健康分指数 $EHI(BZ)$ 的计算公式:

$$EHI(BZ)_1 = 10(5.2425 - 0.94948 \times (0.1036 + 0.7997 \times \ln(BZ)))$$

(8)

$$EHI(BZ)_2 = 10(5.2425 - 0.94948 \times (2.7359 + 0.6766 \times \ln(BZ)))$$

(9)

由(8)、(9)式可得到计算扩展指标 BZ 的生态系统健康分指数 $EHI(BZ)$ 的综合表达式:

$$EHI(BZ) = \begin{cases} EHI(BZ)_1 & (BA, BZ) \in \alpha \\ EHI(BZ)_2 & (BA, BZ) \in \beta \end{cases}$$

(10)

式中,实测样本点(BA, BZ)隶属于 α 和 β 的隶属度,分别由下列隶属函数计算:

$$\alpha(BA, BZ) = \begin{cases} 1 & 0 < BA \leq 2.5 \\ 1 - \frac{(\ln(BA) - f_1(BZ))^2}{(\ln(BA) + f_1(BZ))^2} & 2.5 < BA \leq 50 \\ 0 & 50 < BA \leq 150 \end{cases}$$

(11)

$$\beta(BA, BZ) = \begin{cases} 0 & 0 < BA \leq 2.5 \\ 1 - \frac{(\ln(BA) - f_2(BZ))^2}{(\ln(BA) + f_2(BZ))^2} & 2.5 < BA \leq 50 \\ 1 & 50 < BA \leq 150 \end{cases} \quad (12)$$

式中, BA 为实测值; $f_1(BZ)$ 和 $f_2(BZ)$ 表示由第 1 和第 3 层关系式计算的 BA 值, 分别由公式(6)和(7)计算; 2.5 为第 3 层关系的 β 集合中实测 BA 数据的最小值; 50 为第 1 层关系的 α 集合中实测 BA 数据的最大值。

根据(11)、(12)式, 有如下判别规则: 对于实测点 (BA, BZ) , 当 $\alpha(BA, BZ) \geq \beta(BA, BZ)$ 时, 则 $(BA, BZ) \in \alpha$, 其生态系统健康分指数 $EHI(BZ)$ 应由(8)式计算; 当 $\alpha(BA, BZ) < \beta(BA, BZ)$ 时, 则 $(BA, BZ) \in \beta$, 其生态系统健康分指数 $EHI(BZ)$ 应由(9)式计算。

2.3.3 扩展指标 BZ/BA 的生态系统健康分指数 $EHI(BZ/BA)$ 的计算 意大利湖泊 BA 与 BZ/BA 的相互关系见图 5。由该图可以看出, BA 与 BZ/BA 具有明显的负相关关系, 通过回归分析确定其关系式如下:

$$\ln(BA) = 0.3878 - 0.7742 \times \ln(BZ/BA) \quad (13)$$

将(13)式代入(5)式, 可得到扩展指标 BZ/BA 的生态系统健康分指数 $EHI(BZ/BA)$ 的计算公式:

$$EHI(BZ/BA) = 10 \times (5.2425 - 0.94948 \times (0.3878 - 0.7742 \times \ln(BZ/BA))) \quad (14)$$

2.2.4 扩展指标 Ex 的生态系统健康分指数 $EHI(Ex)$ 的计算 能质(exergy)和结构能质(structural exergy)是热力学指标, 已被成功的用于湖泊^[31~35]、海洋^[39]、农业^[40]等生态系统的健康评价。Exergy 计算公式^[31]如下:

$$Ex = \sum_{i=1}^n W_i C_i \quad (15)$$

式中, Ex 为能质(J/L); C_i 为生态系统中第 i 种有机成分的浓度或生物量(mg/L); W_i 为第 i 种有机成分的权重转换因子(J/mg), 可根据储存在有机体基因内的信息进行计算^[31]。

根据意大利湖泊的实测数据, 本研究选取浮游植物和浮游动物计算 Ex , 两者的权重转换因子分别为 3.4 和 114(J/mg)^[31]。根据上述对意大利湖泊浮游植物和浮游动物的变化特点及其两者相互关系的分析, 其能质(Ex)与浮游植物生物量(BA)亦具有 3 层关系。第 1 层关系表现为, 随着 BA 的增加 Ex 增加; 第 2 层关系表现为, 随着 BA 的增加 Ex 减少; 第 3 层关系表现为, 随着 BA 的增加 Ex 增加; 并且上述第 1 和第 3 两层关系较为明显, 而第 2 层关系不明显, 同样可认为是第 1 和第 3 两层关系的过渡(图 6)。为了更好地描述 BA 与 Ex 的这种变化关系, 本文用两个线性函数表达式 f_3 和 f_4 分别模拟上述第 1 和第 3 层关系(图 6); 对于所有数据点特别是位于第 2 层过渡关系的样点, 可以利用模糊数学方法, 确定其归属于哪层关系。

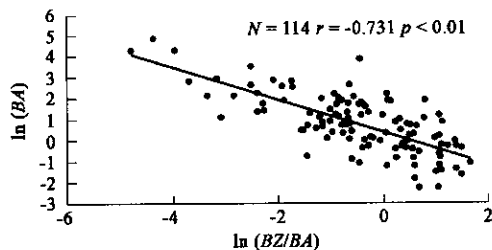


图 5 BA 与 BZ/BA 的相关关系

Fig. 5 Relationships between BA and BZ/BA in Italy lakes

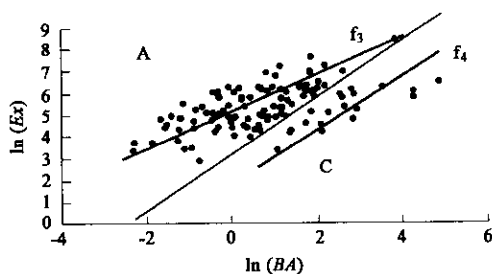


图 6 BA 与 Ex 的相关关系

Fig. 6 Relationships between BA and Ex in Italy lakes

定义图 6 中属于第 1 层相关关系的全部样点的集合为 γ , 属于第 3 层相关关系的全部样点的集合为 δ , 则通过回归分析可分别求出 f_3 和 f_4 的表达式。

$$f_3 \quad \ln(BA) = -4.0256 + 0.8236 \times \ln(Ex), \quad N = 95, r = 0.717, \quad p < 0.01 \quad (16)$$

$$f_4 \quad \ln(BA) = -2.5380 + 0.9899 \times \ln(Ex), \quad N = 19, r = 0.829, \quad p < 0.01 \quad (17)$$

将(16)、(17)式分别代入(5)式可得到对应于 f_3 和 f_4 的生态系统健康分指数 $EHI(Ex)$ 的计算公式:

$$EHI(Ex)_1 = 10(5.2425 - 0.94948 \times (-4.0256 + 0.8236 \times \ln(Ex))) \quad (18)$$

$$EHI(Ex)_2 = 10(5.2425 - 0.94948 \times (-2.538 + 0.9899 \times \ln(Ex))) \quad (19)$$

由(18)、(19)式可得到计算扩展指标 Ex 的生态系统健康分指数 $EHI(Ex)$ 的综合表达式:

$$EHI(Ex) = \begin{cases} EHI(Ex)_1 & (BA, Ex) \in \gamma \\ EHI(Ex)_2 & (BA, Ex) \in \delta \end{cases} \quad (20)$$

式中,实测样本点 (BA, Ex) 隶属于 γ 和 δ 的隶属度,分别由下列隶属函数计算:

$$\gamma(BA, Ex) = \begin{cases} 1 & 0 < BA \leq 2.5 \\ 1 - \frac{(\ln(BA) - f_3(Ex))^2}{(\ln(BA) + f_3(Ex))^2} & 2.5 < BA \leq 50 \\ 0 & 50 < BA \leq 150 \end{cases} \quad (21)$$

$$\delta(BA, Ex) = \begin{cases} 0 & 0 < BA \leq 2.5 \\ 1 - \frac{(\ln(BA) - f_4(Ex))^2}{(\ln(BA) + f_4(BZ))^2} & 2.5 < BA \leq 50 \\ 1 & 50 < BA \leq 150 \end{cases} \quad (22)$$

式中, BA 为实测值; $f_3(Ex)$ 和 $f_4(Ex)$ 表示由第1和第3层关系式计算的 BA 值,分别由(16)式和(17)式计算;2.5为第3层关系的 δ 集合中实测 BA 数据的最小值;50为第1层关系的 γ 集合中实测 BA 数据的最大值。

根据(21)、(22)式,有如下判别规则:对于实测点 (BA, Ex) ,当 $\gamma(BA, Ex) \geq \delta(BA, Ex)$ 时,则 $(BA, Ex) \in \gamma$,其生态系统健康分指数 $EHI(Ex)$ 应由公式(18)计算;当 $\gamma(BA, Ex) < \delta(BA, Ex)$ 时,则 $(BA, Ex) \in \delta$,其生态系统健康分指数 $EHI(Ex)$ 应由(19)式计算。

2.2.5 扩展指标 $Exst$ 的生态系统健康分指数 $EHI(Exst)$ 的计算 结构能质(structural exergy)($Exst$)计算公式^[31]如下:

$$Exst = \sum \frac{C_i}{C_t} W_i \quad (23)$$

式中, $Exst$ 为结构能质(J/mg); C_i 为参加计算的所有有机成分的总浓度或生物量(mg/L); C_i 和 W_i 同(15)式。
意大利湖泊结构能质($Exst$)的计算结果及其与浮游植物生物量(BA)的相互关系见图7。通过回归分析确定其关系式如下:

$$\ln(BA) = 5.1119 - 0.0688 \times (Exst) \quad (24)$$

将(24)式代入(5)式可得到扩展指标 $Exst$ 的生态系统健康分指数 $EHI(Exst)$ 的计算公式:

$$EHI(Exst) = 10 \times (5.2425 - 0.94948 \times (5.1119 - 0.0688 \times (Exst))) \quad (25)$$

2.2.6 生态系统健康指数及各参数分级标准 根据上述各指标的生态系统健康分指数计算公式,可得到意大利湖泊生态系统健康的完整指数及各有关参数的分级标准(见表2)。

2.3 各分指数权重 ω_i 的计算

湖泊生态系统健康状态受多种因子影响,并且不同因子的影响程度可能不同;因此,必须确定因子的权重。目前,确定因子权重的方法主要有经验法、专家咨询法、层次分析法、主成分分析和相关加权指数法等。考虑到经验法过于简单、专家咨询法过于耗时、层次分析法必须判断因子相对重要性、主成分分析法必须进行多因子选择等原因,本研究利用相关加权指数法确定各因子的权重,即利用各指标与基准指标的相关关系来确定其权重。各指标归一化权重计算公式^[36]如下:

$$\omega_i = \frac{r_{i1}^2}{\left(\sum_{i=1}^m r_{i1}^2 \right)} \quad (26)$$

式中, ω_i 为第 i 个因子的权重值; r_{i1} 是第 i 个指标与基准指标 BA 的相关系数; m 为评价因子个数,本研究 $m=5$ 。
各指标与基准指标 BA 的相关系数计算结果见表3。由于扩展指标 BZ 和 Ex 与 BA 具有两层相关关系,在计算时必须首先判断其属于哪一层相关关系,然后选择对应的相关系数参与权重的计算。

2.4 意大利湖泊生态系统健康状态的定量评价结果

作为应用实例,本文仅对1988年夏季意大利西西里30个湖泊以及1987~1988四季湖泊Soprano的健康状态进行定量评价和比较,其结果分别见表4和表5。

由表4可以看出,1988夏季,意大利湖泊生态系统健康指数值 EHI 的变化范围为12~60.5,健康状态从较好到很差;其中以湖泊Ogliastro的健康状态最好, EHI 最大;湖泊Disueri的健康状态最差, EHI 最小。在30个湖泊中,20个湖泊处于中等健康状态,6个湖泊的健康状态较差,3个湖泊达到了很差的的健康状态,只有1个湖泊的健康状态较好。

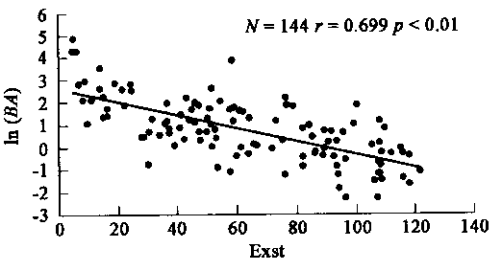


图7 BA 与 $Exst$ 的相关关系
Fig.7 Relationships between BA and $Exst$ in Italy lakes

表 2 意大利湖泊生态系统健康指数及各有关参数的分级标准

Table 2 Completed ecosystem health index and its associated parameters as well as their standards for Italy lakes								
<i>EHI</i>	健康状态* Health state	<i>BA</i> (mg/L)	<i>BZ</i> (mg/L) ^①	<i>BZ</i> (mg/L) ^②	<i>BZ/BA</i>	<i>Ex</i> (J/L) ^①	<i>Ex</i> (J/L) ^②	<i>Exst</i> (J/mg)
0	很差 Worst	150		60.7	0.001319		3434.7	1.47
10		52.3		12.81	0.004576		1185.3	16.78
20		18.3	62.9	2.71	0.01588	8385.6	409.02	32.10
30	较差 Worse	6.37	16.84	0.5713	0.0551	2334.3	141.15	47.42
40		2.22	4.512	0.1206	0.191	649.8	48.71	62.73
50	中等 Fair	0.775	1.209		0.663	180.9		78.05
60		0.271	0.324		2.30	50.36		93.36
70	较好 Better	0.094	0.0868		7.98	14.02		108.68
80		0.033	0.0233		27.7	3.9023		124.00
90	很好 Best	0.011	0.00623		96.1	1.0863		139.31
100		0.004	0.00167		333	0.3024		154.63

①代表第 1 层相关关系 The first relationship;②代表第 3 层相关关系 The third relationship

表 3 意大利 31 个湖泊 *BA* 与其它指标的相关系数

Table 3 Statistic correlative ratios between <i>BA</i> and each indicators							
相关指标 Indicator	$\ln(BA) - \ln(BA)$	$\ln(BA) - \ln(BZ)^{\text{①}}$	$\ln(BA) - \ln(BZ)^{\text{②}}$	$\ln(B - \ln(BZ/BA)$	$\ln(BA) - \ln(Ex)^{\text{①}}$	$\ln(BA) - \ln(Ex)^{\text{②}}$	$\ln(BA) - (Exst)$
样本数 Sample number	114	95	19	114	95	19	114
r_{ij}	1	0.702	0.563	-0.731	0.717	0.829	-0.699
r_{ij}^2	1	0.4928	0.3170	0.5344	0.5141	0.6872	0.4886

①代表第 1 层相关关系 The first relationship;②代表第 3 层相关关系 The third relationship

表 4 1988 夏季意大利湖泊生态系统健康状态定量评价与比较结果

Table 4 Quantitative assessment and comparison of ecosystem health states for Italy lakes in summer, 1988								
湖泊名称 Lake name	<i>EHI(BA)</i>	<i>EHI(BZ)</i>	<i>EHI(BZ/BA)</i>	<i>EHI(Ex)</i>	<i>EHI(Exst)</i>	<i>EHI</i>	健康状态 Health state	排序(好→差) Order (good→bad)
Ogliastro	63.6	52.3	61.5	52.6	69.4	60.5	较好 Better	1
Fanaco	60.4	49.6	61.7	49.8	69.9	58.6	中 Fair	2
Ancipa	60.6	56.1	55.0	56.5	52.8	56.9	中 Fair	3
Prizzi	55.3	43.2	64.1	43.2	74.7	56.0	中 Fair	4
Vasca	55.3	44.5	62.8	44.5	72.2	55.7	中 Fair	5
Comunelli	56.5	50.6	57.4	50.8	59.5	55.2	中 Fair	6
Nicoletti	54.2	50.0	56.0	50.2	55.6	53.4	中 Fair	7
Garcia	52.8	48.3	56.7	48.4	57.5	52.8	中 Fair	8
Cesaro	50.6	41.9	61.6	41.9	69.5	52.7	中 Fair	9
Poma	50.0	45.1	57.7	45.2	60.2	51.4	中 Fair	10
Pozzillo	51.4	52.4	51.2	52.5	42.0	50.2	中 Fair	11
Villarosa	45.6	42.5	56.7	42.5	57.4	48.4	中 Fair	12
Rosalia	48.6	52.9	48.2	53.0	33.8	47.6	中 Fair	13
Trinita	42.5	37.6	59.2	37.5	64.0	47.3	中 Fair	14
Dirillo	46.0	51.6	47.4	51.6	31.7	45.8	中 Fair	15
Gela	48.1	59.7	40.6	59.5	17.4	45.6	中 Fair	16
Olivo	47.3	57.0	42.7	56.9	21.3	45.5	中 Fair	17
Llbanesi	40.2	43.7	50.8	43.6	41.0	43.3	中 Fair	18
Castello	34.7	31.2	59.4	30.8	64.6	42.6	中 Fair	19
Rubino	41.4	51.6	43.5	51.3	22.8	42.1	中 Fair	20
Guadalami	34.9	36.3	54.2	36.1	50.6	41.3	中 Fair	21
Cimia	33.0	40.2	48.5	39.9	34.6	38.3	较差 Worse	22
Scanzano	33.8	42.9	46.3	42.6	29.1	38.2	较差 Worse	23
Giovanni	33.9	45.5	43.6	45.1	23.0	37.6	较差 Worse	24
Leone	31.4	41.7	45.5	41.3	27.2	36.6	较差 Worse	25
Gorgo	34.6	26.4	37.9	28.5	13.5	29.4	较差 Worse	26
Gammauta	28.2	21.1	39.2	20.9	15.2	25.7	较差 Worse	27
Arancio	11.8	29.6	14.6	21.9	2.0	15.3	很差 Worst	28
Soprano	11.8	24.4	21.2	19.2	3.0	15.3	很差 Worst	29
Disueri	6.2	23.2	18.0	15.2	2.4	12.0	很差 Worst	30

表 5 表明,湖泊 Soprano 生态系统健康指数值 *EHI* 的变化范围为 15.3~41.3,健康状态从中等到很差,其中在冬季最好,

秋季次之,夏季最差。

表 5 1987~1988 年四季 Soprano 湖生态系统健康状态定量评价与比较结果

Table 5 Quantitative assessment and comparison of ecosystem health states for lake Soprano in 1987~1988								
季节 Season	$EHI(BA)$	$EHI(BZ)$	$EHI(BZ/BA)$	$EHI(Ex)$	$EHI(Exst)$	EHI	健康状态 Health state	排序(好→差) Order (good→bad)
冬 Winter	35.6	41.2	49.6	40.9	44.1	41.3	中 Fair	1
秋 Fall	40.2	52.2	41.9	51.9	19.7	41.1	中 Fair	2
春 Spring	27.8	22.1	37.6	22.0	13.1	25.3	较差 Worse	3
夏 Summer	11.8	24.4	21.2	19.2	3.0	15.3	很差 Worse	4

3 结论与讨论

本文提出的生态系统健康指数(EHI)法可用于同一湖泊不同时空以及不同湖泊之间的健康状态的定量评价与比较。该方法以湖泊生态系统的实际特征为基础,原理简单,计算简便,结果可靠、直观,解决了目前湖泊生态系统健康定量评价的难题^[34],是一种值得推广的定量评价方法。

由于实际数据的限制,本文中能质(Ex)与结构能质($Exst$)的计算仅考虑了浮游植物和浮游动物,而没有考虑诸如细菌、水生植物、底栖动物及鱼类等其它湖泊生物。建议在做类似研究时,应利用尽可能多的湖泊生物成分计算 Ex 和 $Exst$,以便得到更符合实际的评价结果。

本文提出的方法,可较好应用于藻型湖泊。对于非藻型湖泊,如湖泊 Pergusa,其夏季藻类生物量很低,而浮游动物生物量却非常高,如何应用该方法进行评价,需做进一步研究。

从文中意大利湖泊各扩展指标 BZ 、 BZ/BA 、 Ex 、 $Exst$ 与基本指标 BA 的关系式中可以看出,随着 BA 的增加, BZ/BA 和 $Exst$ 具有减少的趋势;而 BZ 和 Ex 的变化则较为复杂,表现为增加→减少→增加。这与许多湖泊生态研究结果^[42~46]相似。在湖泊富营养化的初始阶段,随着 BA 的增加,由于可以获得充足的食物, BZ 也随之增加。当湖泊发展到严重富营养化阶段,藻类爆发并以大型藻类为主, BZ 反而减少,并且主要为小型浮游动物;这也许因为毒性藻类的出现以及小型浮游动物啃食大型藻类的困难。随着富营养化程度的进一步增加,适应新环境的浮游动物种群将会增加,这就导致 BZ 随 BA 增加而再次增加。 BA 和 BZ 的这些变化,造成了 BZ/BA 、 Ex 、 $Exst$ 的上述变化^[46]。

References:

[1] Rapport D J. Ecosystem Health; Exploring the Territory. *Ecosyst. Health*, 1995, **1**(1): 5~13.

[2] McMichael A J, Bolin B, Costanza R, *et al.* Globalization and the sustainability of human health: an ecological perspective. *BioSciences*, 1995, **49**(3): 205~210.

[3] Rapport D J, Costanza R, Epstein P R, *et al.* eds. *Ecosystem Health*. Boston: Blackwell Science, 1998. 372.

[4] Rapport D J, Costanza R & McMichael A J. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution (TREE)*. 1998, **13**(10): 397~402.

[5] Ribble C, Hunter B, Lariviere M, *et al.* Ecosystem health as a clinical rotation for senior students in Canadian veterinary schools. *Ecosyst. Health*, 1999, **5** (2): 118~124.

[6] Shear H. The development and use of indicators to assess ecosystem health state in the Great Lake. *Ecosyst. Health*, 1996, **2**(2): 241~58.

[7] Noble LR & Dirzo R. Forests as human-dominated ecosystems. *Sciences*, 1997, **277**: 522~525.

[8] McMichael A J & Haines A. Global climate changes the potential effects on health. *Br. Med. J.*, 1997, **315**: 805~808.

[9] NWRI, 2002. Aquatic Ecosystem Health Assessment Project. <http://www.cciw.ca/nwri/aecb/aquatic-eco-health.html>.

[10] IDRC, 2002a. Indicators of Urban Ecosystem Health. <http://www.idrc.ca/ecohealth/indicators.html>.

[11] IDRC, 2002b. Management for Agroecosystem Health. <http://www.idrc.ca/ecohealth/Agro/nielsen.html>.

[12] WRI, 2002. Stresses on Ecosystem Health-Chemical Pollution. <http://www.wri.org/health/ecohealt.html>.

[13] Zao L H. State Key Basic Research and Development Plan of China: Dynamics and Sustainable Use of Biodiversity and Regional Ecological Security in the Yangtze Valley. *Acta Botanica Sinica*, 2000, **42**(8): 879~880.

[14] Zen D H, Jian F R, Fan Z P, *et al.* Ecosystem health and sustainable development for human. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(6): 751~756.

[15] Xu F L. and Tao S. On the study of ecosystem health: the state of the art. *J. Envir. Sci.*, 2000, **12**(1): 33~38.

[16] Ren H, Wu J G, Peng S L. Evaluation and monitoring of ecosystem health. *Tropical Geography*, 2000, **20**(4): 310~316.

[17] Ma K M, Kong H M, Guan W B, *et al.* Ecosystem health assessment: methods and directions. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(12): 2106~2116.

[18] Li J, An S Q, Cheng X L, *et al.* Advance in assessment of ecosystem health. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(06): 641~47.

[19] Yuan X Z, Liu H, Lu J J. Assessment of ecosystem health: conceptual framework and indicator selection. *Chinese Journal of Applied*

Ecology, 2001, **12**(4): 627~629.

- [21] Cui B S, Yang Z F. Research review on wetland ecosystem health. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, **20**(3): 31~36.
- [22] Shen H M, Zhao J Z, Wu G, *et al.* Ecosystem health and environmental management. *Environmental Science*, 2002, **23**(1): 1~5.
- [23] Shen H M, Zhao J Z, Ji L Z. Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(4): 486~490.
- [24] Cui B S, Yang Z F. Establishing and Indicator System for Ecosystem Health Evaluation on Wetlands I. A Theoretical Framework. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(7): 1005~1011.
- [25] Cui B S, Yang Z F. Establishing and Indicator System for Ecosystem Health Evaluation on Wetlands II: Application. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(8): 1231~1239.
- [26] Lang W J, Wu Z J, Wen D Z. Research directions of agroecosystem health in the early 21th century. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(8): 1022~1026.
- [27] Xiao F J, Ouyang H. Ecosystem health and its evaluation indicator and method. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17**(2): 203~209.
- [28] Hannon B. Ecosystem Flow Analysis. *Can. Bul. Fish. & Aqu. Sci.*, 1985, **213**: 97~118.
- [29] Rapport D J, Regier H A & Hutchinson T C. Ecosystem Behavior Under Stress. *Am. Nat.*, 1985, **125**: 617~640.
- [30] Karr J R, Fausch K D, Angermeier P L, *et al.* Assessing Biological Integrity in Running Waters: A Method and its Rationale. Champaign: Illinois Natural History Survey, Special Publication 5, 1986.
- [31] Jorgensen S E. Exergy and Ecological Buffer Capacities as Measures of Ecosystem Health. *Ecosystem Health*, 1995, **1**(3): 150~160.
- [32] Xu F L. Ecosystem health assessment for Lake Chao, a shallow eutrophic Chinese lake. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 1996, **2**: 101~109.
- [33] Xu F L, Jørgensen S E and Tao S. Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health. *Ecol. Model.*, 1999, **116** (1): 77~106.
- [34] Xu F L, Tao S, Dawson R W, *et al.* Lake ecosystem health assessment: indicators and methods. *Wat. Res.*, 2001, **35**(13): 3157~3167.
- [35] Xu F L, Dawson R W & Tao S. A method for lake ecosystem health assessment: an Ecological Modeling Method and its application. *Hydrobiologica*, 2001, **443**(1~3): 159~175.
- [36] Calvo S, Barone R, Naselli L, *et al.* Limnological studies on lakes and reservoirs of Sicily. *Naturalista sicil*, 1993. XVII (Supplemento): 19~257.
- [37] Jin X C. *Investigation on Chinese Lakes and Reservoirs*. Beijing: Chinese Environmental Sciences Press, 1990. 133~135.
- [39] Lu X Y. The dynamics of lake ecological structure and its effects on lake ecosystem health. Master Thesis, Peking University, 2001.
- [40] Jorgensen S E. Application of exergy and specific exergy as ecological indicators of coastal areas. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2000, **3**: 419~430.
- [41] Dalsgaard J P T. Applying systems ecology to the analysis of integrated agricultur-aquaculture farms. *NAGA, The ICLARM Q.*, 1995, **18** (2): 15~19.
- [42] McCauley E & Kalff J. Empirical relationships between phytoplankton and zooplankton biomass in lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1981, **38**: 458~463.
- [43] Rast W, Holland M. Eutrophication of lakes and reservoirs: a framework for making management decisions. *Ambio*, 1988, **17**: 2~12.
- [44] Ryding S O, Rast W. The Control of Eutrophication of Lakes and eservoirs. Man and the Biosphere Series, 1989. **1**. UNESCO, Paris, 256.
- [45] Cooke D G, Welch E B, Peterson S A, *et al.* *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*, Second Edition. Lewis Publishers, 1993. 548.
- [46] Xu F L. Exergy and structural exergy as ecological indicators for the development state of the Lake Chao ecosystem. *Ecol. Model.*, 1997, **99**: 41~49.

参考文献:

- [13] 赵丽惠. 国家重点基础研究发展规划项目: 长江流域生物多样性变化、可持续利用与区域生态安全项目简介. *植物学报*, 2000, **42**(8): 879~880.
- [14] 曾德慧, 姜凤歧, 范志平, 等. 生态系统健康与人类可持续发展. *应用生态学报*, 1999, **10**(6): 751~756.
- [16] 任海, 邬建国, 彭少麟. 生态系统健康的评估. *热带地理*, 2000, **20**(4): 310~316.
- [17] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 等. 生态系统健康评价: 方法与方向. *生态学报*, 2001, **21**(12): 2106~2116.
- [18] 李瑾, 安树青, 程小莉, 等. 生态系统健康评价的研究进展. *植物生态学报*, 2001, **25**(06): 641~647.
- [19] 袁兴中, 刘红, 陆健健. 生态系统健康评价——概念框架与指标选择. *应用生态学报*, 2001, **12**(4): 627~629.
- [21] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康研究进展. *生态学杂志*, 2001, **20**(3): 31~36.
- [22] 孔红梅, 赵景柱, 吴钢, 等. 生态系统健康与环境管理. *环境科学*, 2002, **23**(1): 1~5.
- [23] 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 等. 生态系统健康评价方法初探. *应用生态学报*, 2002, **13**(4): 486~490.
- [24] 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.
- [25] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 II. 方法与案例. *生态学报*, 2002, **22**(8): 1231~1239.
- [26] 梁文举, 武志杰, 闻大中. 21 世纪初农业生态系统健康研究方向. *应用生态学报*, 2002, **13**(8): 1022~1026.
- [27] 肖风劲, 欧阳华. 生态系统健康及其评价指标和方法. *自然资源学报*, 2002, **17**(2): 203~209.
- [37] 金相灿. 中国湖泊水库环境调查研究. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 133~135.
- [39] 卢小燕. 湖泊生态结构变化规律及其对湖泊生态系统健康的影响. 北京大学硕士论文, 2001.