

丹江口水库生态系统健康综合评价*

张红叶^{1,2} 蔡庆华^{1**} 孔令惠¹ 徐耀阳¹ 张敏^{1,2} 王岚^{1,2}

(¹中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室 武汉 430072)

(²中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 2007年7月~2008年5月按季度对丹江口水库4个库区(丹江库区、汉江库区、取水口和五青入库区)的水环境和浮游生物进行了调查,采用生态系统健康指数(EHI)法和营养状态指数(TSI)法对该水库的生态系统健康状态进行定量的综合评价。结果表明:2007年7月~2008年5月,丹江口水库整体处于中营养状态,健康状态中等,健康状态总趋势是丹江库区>取水口>汉江库区>五青入库区;各库区生态系统健康状态存在季节性差异,丹江库区、取水口两库区全年为中等,汉江库区在夏季为较差,其它季节中等,五青入库区在冬季最差,其它季节较差。此外,对两种评价方法进行了比较,表明丹江口水库属于响应型生态系统,生态系统健康指数(EHI)适用于丹江口水库生态系统健康的评价。图6 参34

关键词 丹江口水库;水域生态系统;健康状态评价;营养状态评价;时空差异

CLC X821 : X524

Comprehensive Assessment of Danjiangkou Reservoir Ecosystem Health*

ZHANG Hongye^{1,2}, CAI Qinghua^{1**}, KONG Linghui¹, XU Yaoyang¹, ZHANG Min^{1,2} & WANG Lan^{1,2}

(¹State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

(²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Seasonal investigations on water environment and plankton were carried out from July 2007 to May 2008 in the four selected regions of Danjiangkou Reservoir (Regions Danjiang, Hanjiang, Qushuikou and Wuqing). Ecosystem health index (EHI) and trophic state index (TSI) were used to assess the ecosystem health state of the reservoir. The results showed that, the health state of the whole reservoir was at medium eutrophication level during the study periods and displayed a decreasing trend spatially as follows: Danjiang, Qushuikou, Hanjiang and Wuqing regions. Besides, the health state of some regions displayed seasonal variations: It was at medium eutrophication level in the regions of Danjiang and Qushuikou in the whole year; it became worse in Hanjiang region in summer, but medium in other seasons; the state of the Wuqing region was worst or worse in the whole year. Moreover, the comparison of assessment results from the two methods concluded that Danjiangkou Reservoir belonged to response ecosystems, and EHI method was suitable for the assessment of its ecosystem health state. Fig 6, Ref 34

Keywords Danjiangkou Reservoir; aquatic ecosystem; health state assessment; trophic state assessment; spatio-temporal variation

CLC X821 : X524

生态系统为人类提供了自然资源和生存环境两个方面的多种服务功能^[1]。淡水生态系统作为一类重要的生态系统,对人类发展的重要性不言而喻。然而,随着工业文明的迅速发展,人类对水资源的需求量大增,大量污染物的排入,以及森林特别是河岸植被带的破坏严重影响了淡水生态系统的水质和水量情况,使其结构受到极大的破坏,诸多服务功能也因此而逐渐丧失^[2]。因此,维持健康的淡水生态系统迅速成为生态学家的共识,用健康来描述一个环境的状况是科

学发展和社会价值观进步的必然结果,维持和恢复一个健康的生态系统已成为近年来生态管理的重要目标^[3-5]。

生态系统健康由Rapport于1989年首次论述,他认为生态系统健康是指一个生态系统所具有的稳定性和可持续性,即在时间上具有维持其组织结构、自我调节和对胁迫的恢复能力,并认为生态系统健康可以通过活力(Vigor)、组织结构(Organization)和恢复力(Resilience)3个特征来定义^[6]。生态系统健康评价是环境管理的一种新方法,其目的是确切掌握生态系统的运行状况,找出生态系统在结构和功能上存在的问题,采取相应手段进行调整,实现生态系统的健康和可持续发展^[7]。因此,生态系统结构组成及其健康评价不仅具有重要的应用价值,且已成为当前生态系统综合评估的核心内容和热点领域之一^[8]。

收稿日期: 2011-03-03 接受日期: 2011-04-28

*国家“十一五”科技支撑课题(No. 2006BAC10B02)和水利部公益性行业科研专项(No. 201101001)资助 Supported by the Key Science & Technology Pillar Program of China during “11th 5-year Plan” Period (No. 2006BAC10B02) and the Public Welfare Special Fund of Ministry of Water Resources of China for Scientific Research (No. 201101001)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: qhcai@ihb.ac.cn)

近些年来,在湖泊生态系统健康研究方面形成的评价方法主要有Jorgenson提出的一套初步评价程序^[9],徐福留等提出的实测计算(DMM)和生态模型(EMM)两种评价方法^[10-11],刘永等提出的综合健康指数法^[12],徐福留等提出的定量评价方法——生态系统健康指数(EHI)法^[13]等.上述这些方法是针对湖泊生态系统健康提出来的评价方法,而水库是在山沟或河流的狭口处建筑拦河坝形成的人工湖泊,其生态系统健康状况也越来越受到人们的关注.水库生态系统健康是评价其健康维护和科学管理的首要环节.丹江口水库是南水北调中线工程的水源地,其生态系统的健康状态的评价具有重要的实际意义.本研究采用生态系统健康指数(EHI)法,结合营养状态指数法(TSI)对丹江口水库进行健康评价,旨在了解其水生态状况,为其健康管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概述和样点设置

丹江口水库位于丹江汇入汉江以下0.18 km处,是由丹江和汉江两个库区组成的并联水库,库区跨越鄂、豫、陕三省,流域面积 $9.52 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年平均径流量 $4.09 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[14],是一座具防汛、发电、灌溉等综合效益的大型水利工程,也是南水北调中线工程的水源地.

依据丹江口水库的地形特征,将水库划分为4个区域设置采样点:丹江库区、汉江库区、取水口、五青入库区(图1).丹江库区设置4个采样点(D01、D02、D03、D04);汉江库区设置4个采样点(Dam、H01、H02、H03);陶岔取水口设置1个采样点(TC);五青入库区设置2个采样点(T01、T02).于2007年7月~2008年5月按季度进行采样:夏季(2007年7月)、秋季(2007年11月)、冬季(2008年1月)、春季(2008年5月).

1.2 样品采集与处理

对本研究11个样点分别采集水样和浮游轮虫样品:用柱状采水器采集10 L表层水样并混合均匀,取610 mL混合水样用于藻类叶绿素a(Chl.a)含量的测定,带回实验室用UV-1800测定,具体方法参照文献^[15-16];取1.2 L混合水样现场用鲁哥氏液固定,经48 h沉淀后添加甲醛保存,用于浮游轮虫鉴定及定量分析,具体计数、鉴定方法参照文献^[15-17];另取610 mL混合水样,现场用浓硫酸将其酸化值 $\text{pH} < 2$,低温保存,用于水化学指标的测定,后带回实验室利用连续流动水质分析仪(SAN++, Skalar)测定;水体透明度用萨氏圆盘(Secchi disc)现场测定.野外采样及样品处理等参照中国生态系统研究网络(CERN)规范^[18-19]进行.

1.3 评价方法

生态系统的健康指数法(EHI)借鉴徐福留等提出的相

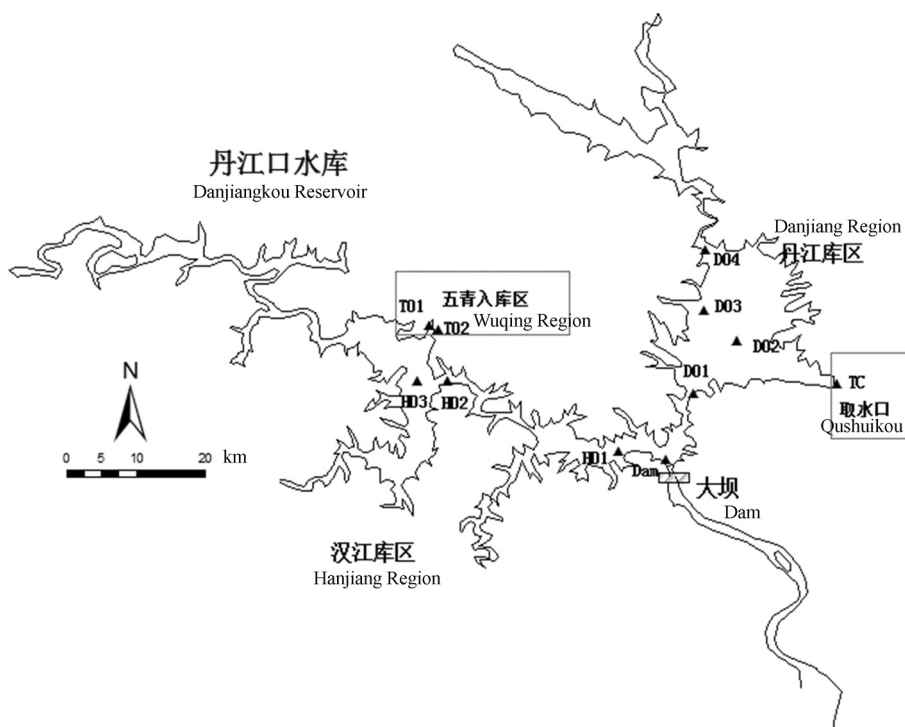


图1 丹江口水库样点设置图

Fig. 1 Sampling sites in the Danjiangkou Reservoir

丹江库区设置4个采样点(D01、D02、D03、D04);汉江库区设置4个采样点(Dam、H01、H02、H03);陶岔取水口设置1个采样点(TC);五青入库区设置2个采样点(T01、T02)

D01, D02, D03, D04 in Danjiang Region; Dam, H01, H02, H03 in Hanjiang Region; TC in Qushuikou; and T01, T02 in Wuqing Region

关方法和思路^[13], 遵循可测性、可比性、灵敏性及综合性的指标选择原则^[20], 选取浮游植物生物量 (BA) 作为基准指标, 浮游动物生物量 (BZ)、浮游动物生物量 (BZ) 与浮游植物生物量 (BA) 的比值 (BZ/BA)、能质 (Ex) 和结构能质 (Ex_{st}) 作为扩展指标; 再计算5个指标的生态系统健康分指数 (EHI_i) 及各指标的权重值 (i); 最后通过下列公式计算生态系统健康指数 (EHI).

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

式中, EHI为生态系统健康综合指数; n 为选取的标价指标的个数, 本研究中 $n = 5$; EHI_i 表示第 i 个指标的生态系统健康分指数; i 表示第 i 个指标的权重值.

在各指标的计算中, 基准指标浮游植物生物量 (BA) 由叶绿素a的实测值按 $B = 405chl.a (\mu g/L)$ ^[21] 换算所得; 浮游动物生物量 (BZ) 由浮游轮虫生物量按 $B = \text{浮游轮虫生物量}/24.39\%$ ^[22] 换算所得; 热力学指标能质 (Ex) 和结构能质 (Ex_{st}) 由如下公式^[23]计算:

$$Ex = \sum_{i=1}^m W_i B_i \quad (2)$$

$$Ex_{st} = \sum_{i=1}^m \frac{B_i W_i}{B_i} \quad (3)$$

式中, Ex为能质 (J/L); Ex_{st} 为结构能质 (J/mg); m 为属于生物有机成分的指标个数, 本研究中 $m = 2$; W_i 为第 i 种生物有机成分的权重转换因子 (J/mg); B_i 为生态系统中第 i 种生物有机成分的生物量 (mg/L); B_i 为系统的总生物有机成分的生物量 (mg/L). 本文选取浮游植物和浮游动物两项生物有机成分指标, 其权重系数分别为3.4和144^[20].

各指标的权重值由下列公式计算:

$$\omega_i = \frac{r_{ii}^2}{\sum_{j=1}^n r_{ij}^2} \quad (4)$$

式中, ω_i 为第 i 个因子的权重值; r_{ii} 是第 i 个指标与基准指标BA的相关系数; n 为评价指标个数, 本研究中 $n = 5$.

营养状态指数法 (TSI) 采用Carlson营养状态指数^[24], 依据营养状态指数评价标准^[25], 选取Chl.a ($\mu g/L$)、SD (m)、TP ($\mu g/L$) 3个指标计算营养状态分指数, 最后用相关加权营养指数法进行营养状态评价, 计算公式^[26]为:

$$TSI (Chl.a) = 9.81 \ln (Chl.a) + 30.6 \quad (5)$$

$$TSI (SD) = 60 - 14.42 \ln (SD) \quad (6)$$

$$TSI (TP) = 14.42 \ln (TP) + 4.15 \quad (7)$$

$$TSI = 0.540 \times TSI (Chl.a) + 0.297 \times TSI (SD) + 0.163 \times TSI (TP) \quad (8)$$

1.4 数据分析方法

用Linear Regression分析了不同区域EHI和TSI的线性关系, 有关统计分析在SPSS 13.0软件中进行. 利用ORIGIN 8.0软

件对不同区域4个季度的EHI和TSI分别进行对比分析.

2 结果

2.1 健康状态评价

根据生态系统健康指数 (EHI) 计算公式, 对丹江口水库2007年7月~2008年5月期间的健康状态进行评价, 结果见图2. 由图可知, 调查期间丹江口水库各样点中75%的生态系统健康指数 (EHI) 值集中在40~60的变化范围内, 按照湖泊生态系统健康指数与健康状态的关系^[22], 可知在这期间丹江口水库的整体健康状态为中等.

丹江口水库各样点年平均EHI值 (图2) 显示: 除五青入库区2个样点的年平均EHI值在20~40的变化范围内外, 其他3个库区9个样点的年平均EHI值均在40~60的变化范围内; 且由丹江口水库各库区年平均EHI值 (图3-a) 可知: 丹江库区、取水口及汉江库区的4季度平均EHI值的变化范围也均在40~60的变化范围内, 而五青入库区的平均EHI值在20~40范围内. 这说明丹江、汉江和取水口3个库区的生态系统健康状态为中等, 五青入库区属于健康状态较差的库区; 且4个库区健康状态总趋势是丹江库区>取水口>汉江库区>五青入库区, 即丹江口水库生态系统健康状态存在空间差异.

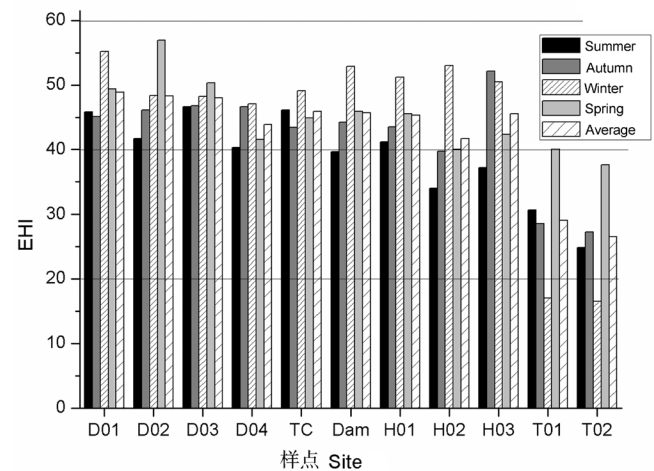


图2 丹江口水库各样点4个季度的EHI值和年平均EHI值
Fig. 2 The EHI values for four seasons and its annual mean in different sites of the Danjiangkou Reservoir

丹江口水库各库区4季度平均EHI值 (图3-b) 显示: 各库区生态系统健康状态存在季节性波动. 夏季丹江库区和取水口健康状态为中等, 汉江和五青入库区为较差; 其它三季丹江、取水口和汉江3个库区健康状态均为中等, 而五青入库区在秋、春两季为较差, 在冬季很差; 且丹江口水库整体生态系统健康状态也存在季节性波动 (图3-b), 总趋势是春季>冬季>秋季>夏季.

2.2 营养状态评价

水库生态系统健康状态与富营养化程度密切相关, 富营

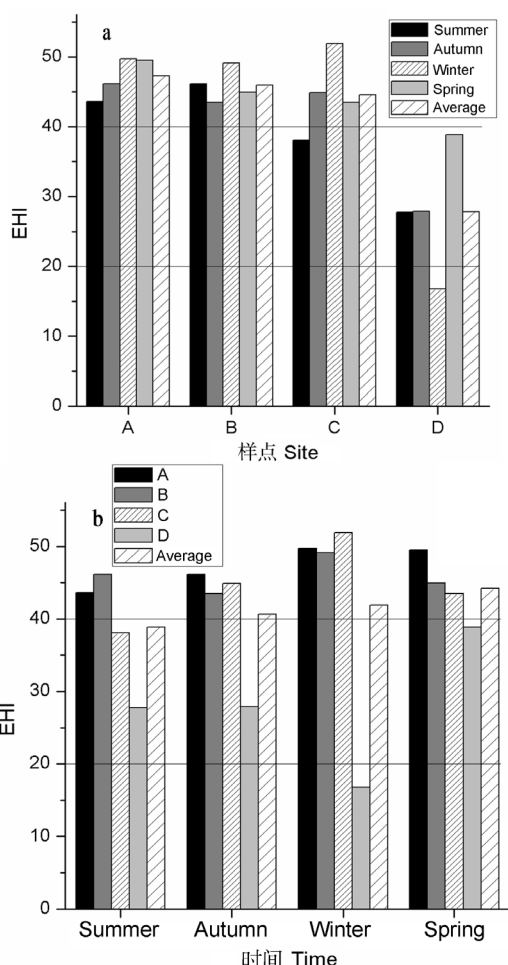


图3 丹江口水库各库区年平均EHI值 (a) 和 4个季度平均EHI值 (b)

Fig. 3 The EHI values for annual (a) and seasonal (b) means in four selected regions of the Danjiangkou Reservoir

A: 丹江库区; B: 取水口; C: 汉江库区; D: 五青入库区

A: Danjiang; B: Qushuikou; C: Hanjiang; D: Wuqing

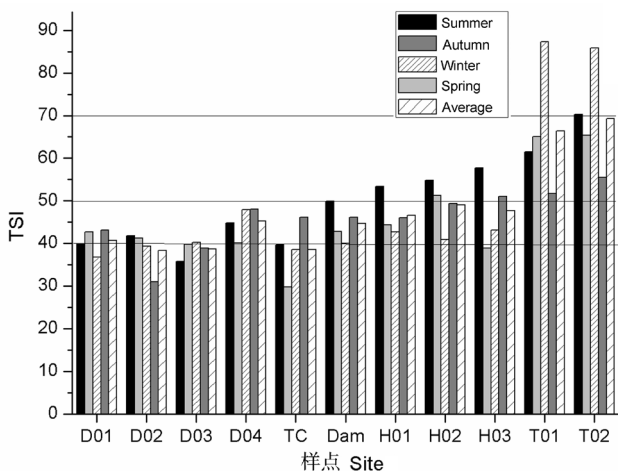


图4 丹江口水库各样点4个季度的TSI值和年平均TSI值

Fig. 4 The TSI values for four seasons and its annual mean in different sites of the Danjiangkou Reservoir

养化程度高,则生态系统健康状态相对较差.通过1.2.2节TSI的计算方法,可得丹江口水库的营养状态指数(图4).依据TSI法的评价标准: $TSI < 40$ 为贫营养, $40 \leq TSI < 50$ 为中营养, $50 \leq TSI < 70$ 为富营养, $TSI \geq 70$ 为超富营养^[27-28],可得丹江口水库各样点45.5%的TSI值在 $40 \leq TSI < 50$ 的范围内,25%的TSI值 < 40 ,22.7%在 $50 \leq TSI < 70$ 的范围内;由此可知丹江口水库整体营养状态为中营养.

图4的各样点年平均TSI值和图5的各库区不同季节的TSI值显示出丹江口水库营养状态存在时空动态.其中丹江库区和汉江库区营养状态为中营养;取水口为贫营养,五青入库区为富营养(图4和图5-a);且四库区营养状态总趋势为五青入库区>汉江库区>丹江库区>取水口.夏季丹江库区为中营养,取水口为贫营养,汉江库区和五青入库区均为富营养;秋

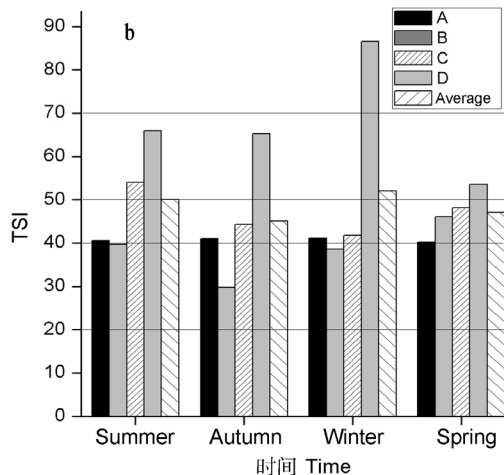
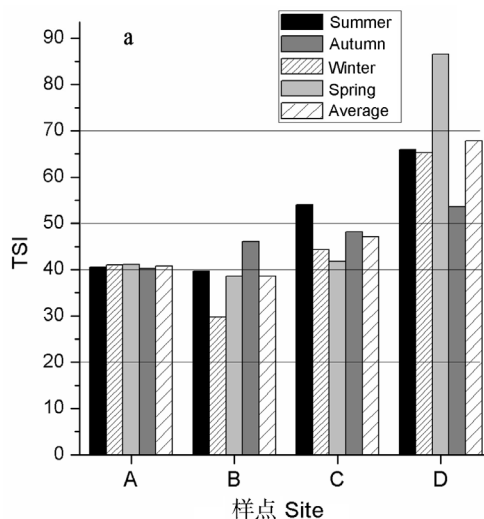


图5 丹江口水库各库区年平均TSI值 (a) 和 各个季度平均TSI值 (b)

Fig. 5 The TSI values for annual (a) and seasonal (b) means in four selected regions of the Danjiangkou Reservoir

A: 丹江库区; B: 取水口; C: 汉江库区; D: 五青入库区

A: Danjiang; B: Qushuikou; C: Hanjiang; D: Wuqing

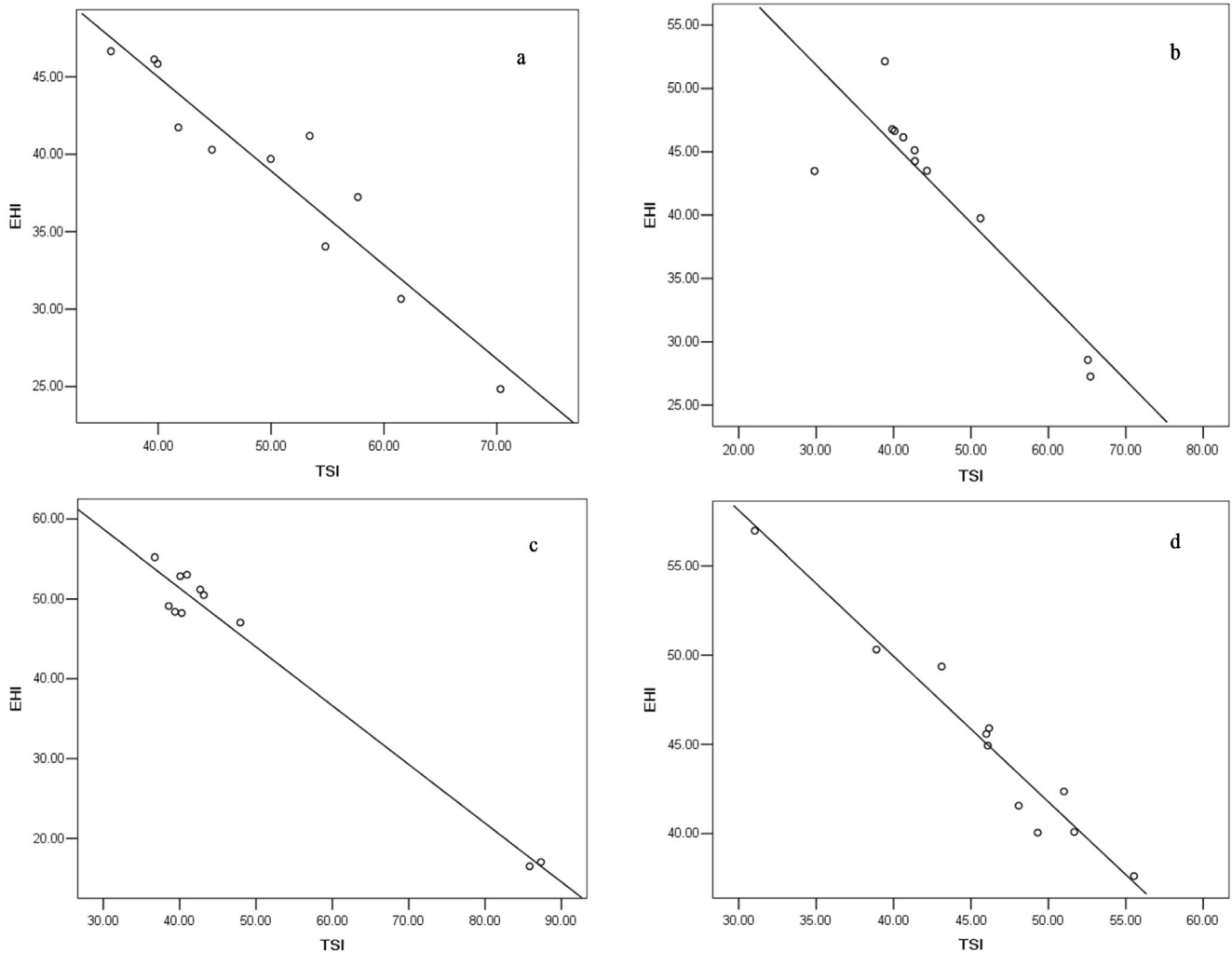


图6 丹江口水库4个季度生态系统健康指数EHI和营养状态指数TSI的回归关系
Fig. 6 The regression relationship between EHI and TSI in the Danjiangkou Reservoir

a: 夏季; b: 秋季; c: 冬季; d: 春季 a: Summer; b: Autumn; c: Winter; d: Spring

季丹江库区和汉江库区为富营养,取水口为贫营养,五青入库区为富营养;冬季丹江库区和汉江库区为富营养,取水口为贫营养,五青入库区为超富营养;春季除五青入库区为富营养外,其他3个库区均为中营养(图5, b);且四季度营养状态总趋势为冬季>夏季>春季>秋季。

2.3 两种评价方法的对比

TSI营养状态指数显示丹江口水库基本处在中营养状态(图4),营养盐和生物量基本成正相关,即属于响应型生态系统^[29-30]。在响应型生态系统中,EHI与生物量成反比,由此可以推导出TSI营养状态指数与EHI近似呈线性负相关关系。图6显示丹江口水库4个季度生态系统健康指数(EHI)与其营养状态指数(TSI)均呈显著负相关,其关系式见公式(9)(10)(11)(12);说明丹江口水库属于响应型生态系统,且生态系统健康指数(EHI)适用于丹江口水库生态系统健康的评价。

$$EHI = -0.607 \times TSI + 69.277, r^2 = 0.899, P \leq 0.01 \quad (9)$$

$$EHI = -0.622 \times TSI + 70.507, r^2 = 0.792, P \leq 0.01 \quad (10)$$

$$EHI = -0.737 \times TSI + 80.832, r^2 = 0.974, P \leq 0.01 \quad (11)$$

$$EHI = -0.816 \times TSI + 82.577, r^2 = 0.949, P \leq 0.01 \quad (12)$$

3 讨论

生态系统健康指数(EHI)极大地丰富和完善了基于热力学的生态系统健康评价的理论体系和方法,解决了过去不能对生态系统健康进行定量评价,以及对不同生态系统也不能相互比较的两大难题^[21];但该方法是针对响应型生态系统研究的基础上提出来的,对于非响应型的生态系统,其营养状态、生态系统结构等都具有明显的特殊性,则该方法不太适用^[21]。本文采用生态系统健康指数EHI和TSI营养状态指数两种评价方法同时对丹江口水库生态系统健康状态进行评价,结果显示两种方法的评价结果一致,由此说明生态系统

指数 (EHI) 法适合于评价丹江口水库的生态系统健康状况, 也说明丹江口水库属于响应型生态系统。

1993年汉江库区为中营养型, 丹江库区属贫-中营养型^[32], 2005年丹江口水库仍处于中营养状态^[14]。本研究结果显示丹江口水库整体健康状态为中等, 属于中营养状态, 这表明丹江口水库一直保持良好的水体营养状态。另外, 其生态系统健康状态存在空间的差异和季节性的波动。在空间上, 五青入库区的生态系统健康状态较其它3个库区差, 处于富营养状态。原因可能是, 该区域为污染较为严重的青塘河和五龙池的入口, 受河流汇入的影响较大^[33]。丹江库区和汉江库区属于中营养库区, 生态系统健康状态为中等, 这主要是因为丹江和汉江的大量来水净化作用^[34], 这也保证了丹江口水库整体生态系统健康状态维持在中营养水平。在季节上, 冬季丹江口水库生态系统整体健康指数较其它三季较高, TSI营养状态指数也显示其基本处于贫营养与中营养的边界。原因是这个季节水温较低, 限制着藻类等浮游植物的生长, 使得浮游植物生物量较低, 生态系统健康状态较好。夏季则由于温度等各种环境因子都有助于浮游植物的大量繁殖, 导致浮游植物生物量猛增, 生态系统健康状态较差。

作为南水北调中线工程的重要水源地, 丹江口水库的水质要求很高, 水质的保护越来越受到重视。虽然目前水库生态系统健康状态为中等, 但是随着水库大坝加高, 水位升高, 水面积扩大, 以及水库沿岸人类活动的加剧, 将可能影响水库的水质^[32]。另外丹江库区因承担供水任务, 其入库河流应加强水质保护, 避免受污染的河流不断注入水库。因此保护好水库生态环境和水质安全极其重要, 应该定期对其生态系统健康做出评价, 及时有效地采取相应措施, 保护水库的水质。

References

- 1 Constanza R, D'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naem S, O'Neill RV, Paruelo J, G. Raskin R, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **387**: 253-260
- 2 Cai QH (蔡庆华), Tang T (唐涛), Deng HB (邓红兵). Discussion on freshwater ecosystem service and its evaluation index system. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2003, **14** (1): 135-138
- 3 Karr JR. Biological integrity: A long-neglected aspect of water resource management. *Ecol Appl*, 1991, **1** (1): 66-84
- 4 Norris RH, Hawkins CP. Monitoring river health. *Hydrobiologia*, 2000, **435** (1-3): 5-17
- 5 Rapport DJ. Myths in the foundations of economics and ecology. *Biol J Linn Soc*, 1991, **44** (3): 185-202
- 6 Rapport DJ. What constitute ecosystem health? *Perspect Biol Med*, 1989, **33**(1): 120-132
- 7 Mi WB (米文宝), Fan XG (樊新刚), Liu ML (刘明丽). Health assessment of Shahu Lake aquatic ecosystem in Ningxia. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 2007, **26**(2): 296-300
- 8 Li FQ (李凤清), Cai QH (蔡庆华), Tang T (唐涛), Li DF (黎道丰), Yang SY (杨顺益), Xu YY (徐耀阳). Comprehensive assessment of river health based on river environment factors and aquatic organisms. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2010, **16** (1): 38-45
- 9 Jorgenson SE. Exergy and ecological buffer capacities as measures of ecosystem health. *Ecosyst Health*, 1995, **1** (3): 150-160
- 10 Xu FL, Tao S, Dawson RW, Li PG, Cao J. Lake ecosystem health assessment: Indicators and methods. *Water Res*, 2001, **35** (13): 3157-3167
- 11 Xu FL, Dawson RW, Tao S. A method for lake ecosystem health assessment: An ecological modeling method and its application. *Hydrobiologica*, 2001, **443** (1-3): 159-175
- 12 Liu Y (刘永), Guo HC (郭怀诚), Dai YL (戴永立), Lu YF (陆轶峰). An assessing approach for lake ecosystem health. *Acta Sci Circumst* (环境科学学报), 2004, **24** (4): 723-729
- 13 Xu FL, Zhao YZ, Zhan W, Zhan W, Zhao SS, Dawson R W, Tao S. An ecosystem health index methodology (EHIM) for lake ecosystem health assessment. *Ecol Model*, 2005, **188** (2-4): 327-339
- 14 Cheng QL (成庆利), Zhang J (张杰). Analysis and Assessment on Present Water Quality in Danjiangkou Reservoir. *Environ Sustain Develop* (环境与可持续发展), 2007, **1** (1): 12-14
- 15 Zhang ZS (章宗涉), Huang XF (黄祥飞). 淡水浮游生物研究方法. Beijing, China: Science Press (北京: 科学出版社), 1991. 252-269
- 16 Wang JJ (王家骥). 中国淡水轮虫志. Beijing (北京): Science Press (科学出版社), 1961. 21-282
- 17 Zhu GY (诸葛燕). Studies on taxonomy and distribution of *Rotifera* in typical zones of China: [Degree Dissertation]. Wuhan, China: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Science (武汉: 中国科学院水生生物研究所), 1997. 25-152
- 18 Huang XF (黄祥飞), Chen WM (陈伟民), Cai MQ (蔡启铭) eds. Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology. Beijing (北京), China: China Standards Press (中国标准出版社), 1999. 27-105
- 19 Cai QH (蔡庆华) ed. Protocols for Standard Observation and Measurement in Aquatic Ecosystems. Beijing, China: Chinese Environmental Science Press (北京: 中国环境科学出版社), 2007. 29-110
- 20 Zhao ZY (赵臻彦), Xu FL (徐福留), Zhan W (詹魏), Hao YJ (郝君宜), Zhang Y (张颖), Zhao SS (赵珊珊), Hu WP (胡维平), Tao P (陶澎). A quantitative method for assessing lake ecosystem health. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2005, **25** (6): 1466-1474
- 21 Wang J (王骥), Wang J (王建). Some problems in the coversion among

- chlorophyll a, biomass, and production of phytoplankton. *Wuhan Bot Res* (武汉植物学研究), 1984, **2** (2): 249~258
- 22 Li YY (李玉英), Gao WL (高宛莉), Wang QL (王庆林), Liang ZA (梁子安), Hu LQ (胡兰群), Cheng X (程序). Research on the biological monitoring of water source areas in the Mid line Project of Water Adjustment from South to North. *J Anhui Agric Sci* (安徽农业科学), 2008, **3** (16): 6929~6931, 6955
- 23 Xu FL. Exergy and structural exergy as ecological indicators for the development state of the Lake Chaohu ecosystem. *Ecol model*, 1997, **99** (1): 41~49
- 24 Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnol Oceanogr*, **22** (2): 361~369
- 25 Matisoff G, Wang XS, McCall PL. Biological redistribution of lake sediments by tubificid oligochaetes: *Branchiura sowerbyi* and *Limnodrilus/Tubifex*. *J Gt Lakes Res*, 1999, **25** (1): 205~219
- 26 Cai QH, Liu JK, King L. A comprehensive model for assessing lake eutrophication. *Chin J Appl Ecol*, 2002, **13** (12): 1674~1678
- 27 Kratzar CR, Brezonik PL. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resour Bull*, 1981, **17** (4): 713~715
- 28 Xu YY, Cai QH, Han XQ, Shao ML, Liu RQ. Factors regulating trophic status in a large subtropical reservoir, China. *Environ Monit Assess*, 2010, **169** (1~4): 237~248
- 29 Zhao ZY (赵章元), Wu YY (吴颖颖), Zheng JM (郑清明). Study on the trend of lake eutrophication in China. *Res Environ Sci* (环境科学研究), 1991, **4** (3): 18~24
- 30 Jin XC (金向灿), Liu SK (刘树坤), Zhang ZS (章宗涉). 中国湖泊环境 (第一册). Beijing (北京): Ocean Press (海洋出版社), 1995. 268~275, 317
- 31 Long ZX (龙邹霞), Yu XG (余兴光). Lake ecosystem elasticity coefficient: theory and application. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 2007, **26** (7): 1119~1124
- 32 Han DJ (韩德举), Peng JH (彭建华), Jan D (简东), Zou Q (邹清), Wu HJ (邬红娟). The assessment of food organism and trophic states of Danjiangkou Reservoir. *J Lake Sci* (湖泊科学), 1997, **9** (1): 57~62
- 33 Kong LH (孔令惠), Cai QH (蔡庆华), Xu YY (徐耀阳), Wang L (王岚), Zhang M (张敏). Seasonal dynamics of rotifer community and its correlation with environment factors in Danjiangkou Reservoir. *J Lake Sci* (湖泊科学), 2010, **22** (6): 941~949
- 34 Li YY (李玉英), Wang QL (王庆林), Liang ZA (梁子安), Zhang NQ (张乃群), Hu LQ (胡兰群), Han JZ (韩建忠). Bacteria and Plankton in the Danjiangkou Reservoir. *Reservoir Fisheries* (水利渔业), 2005, **25** (3): 56~57