

# 博斯腾湖生态服务功能评估模型及应用\*

王显丽<sup>1</sup> 贾尔恒·阿哈提<sup>2#</sup> 王君丽<sup>3</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆环境保护科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 广东水利电力职业技术学院水利工程系, 广东 广州 510635)

**摘要** 博斯腾湖具有丰富的水产与芦苇资源,对当地人的生产、生活起着支撑作用。因此,对其生态服务功能进行评估,能更好地掌握当前湖泊的生态服务状态,为流域的后期开发提供参考。通过博斯腾湖的流域特点与实际情况,建立起由4个要素、12个指标所组成的博斯腾湖生态服务功能状态评估体系。应用系统多级灰关联综合评价方法对该体系进行评估,获取了该流域2001—2012年的生态服务功能状态等级。研究结果表明,2001—2012年博斯腾湖生态服务功能综合状态指数等级为“不太好”,平均分值为67.60分,总体呈先下降后上升趋势,因此应联系实际更好地开发博斯腾湖流域的生态服务功能。

**关键词** 博斯腾湖 多级灰关联评价 生态服务功能评估

**Evaluation model of ecosystem services function of Bosten Lake and its application** WANG Xianli<sup>1</sup>, AHATI Jiaerheng<sup>2</sup>, WANG Junli<sup>3</sup>. (1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang 830052; 2. Xinjiang Academy of Environmental Protection Science, Urumqi Xinjiang 830011; 3. Department of Hydraulic Engineering, Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou Guangdong 510635)

**Abstract:** Bosten Lake has abundant resources of aquatic product and phragmites communis and plays an important role in the local people's production and life. Therefore, it is necessary to evaluate the ecosystem services function of Bosten Lake for better understanding its ecosystem services grade and providing the reference for the later development of Bosten Lake. Based on the basin's characteristics and actual situation of Bosten Lake, an ecosystem services evaluation system which involving 4 elements and 12 indexes was built. By using the multi-level gray correlation method, researchers calculated the established evaluation system and got the ecosystem services grade of Bosten Lake from 2001 to 2012. The results show that the ecosystem services ranked the general grade and the average score is 67.60. The ecosystem services score was decreased first and then increased slowly in the past 12 years, so the Bosten Lake basin's ecological services should be further developed with practice.

**Keywords:** Bosten Lake; multilevel gray correlation evaluation; eco-system services evaluation

博斯腾湖位于新疆巴音郭楞蒙古自治州,湖区介于东经 $86^{\circ}40' \sim 87^{\circ}56'$ ,北纬 $41^{\circ}56' \sim 42^{\circ}14'$ <sup>[1]</sup>。流域范围主要包括了开都河流域(也可称为焉耆盆地,包含博斯腾湖泊湿地)和孔雀河流域。博斯腾湖区由大湖、小湖和苇沼3个部分组成,湖泊总集水面积为 $4.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。大湖水面面积为 $972.0 \text{ km}^2$ ,平均水深为 $7.5 \text{ m}$ ,最大水深为 $19.0 \text{ m}$ ,周长为 $220 \text{ km}$ ;小湖区位于大湖西南的苇沼区,水面面积为 $44.5 \text{ km}^2$ ;苇沼主要分布在大湖西南及西北角,面积约为 $350 \text{ km}^2$ <sup>[2]</sup>。博斯腾湖是当地人的“母亲湖”,它主要起着水产品供给、鱼类栖息地、游泳休闲娱乐及湖滨带对面源污染物的截流与净化这4项生态服务

功能,是巴音郭楞蒙古自治州经济发展和各族人民的命脉。因此,对博斯腾湖生态服务功能进行评估,有助于把握目前博斯腾湖的生态服务水平,从而更好地利用及开发该流域的生态服务潜能。

## 1 评估范围及数据来源

本研究的评估空间范围为博斯腾湖流域及其周边地区的和静县、和硕县、焉耆县、博湖县和库尔勒市及新疆生产建设兵团所属21~30团的10个农业团场。评估时间范围为2001—2012年。

该流域生态服务功能评估的数据来源主要包括:(1)由巴音郭楞蒙古自治州统计局编制的

第一作者:王显丽,女,1988年生,博士研究生,研究方向为水工水力学。# 通讯作者。  
\* 国家自然科学基金资助项目(No. 50909047);全国水质良好型湖泊生态环境保护试点项目。

表 1 博斯腾湖生态服务功能评估指标集合及权重  
Table 1 Index system and weights of ecosystem services evaluation in Bosten Lake

目标层	要素层	要素层权重	指标层	指标层权重
博斯腾湖生态服务功能	水产品供给服务功能	0.273	单位渔产量	0.255
			异味物质	0.266
			藻毒素	0.275
			水产品质量(色、香、味)	0.204
			鱼类种类数(占 20 世纪 80 年代前的比例)	0.283
	鱼类栖息地服务功能	0.251	水产品尺寸(个体质量)变化	0.215
			候鸟种类变化	0.251
			候鸟种群数量变化	0.251
			湖泊休闲娱乐服务功能水平	0.500
	游泳休闲娱乐服务功能	0.258	湖泊游泳服务功能水平	0.500
			湖滨带最优植被损失率	0.530
	湖滨带对面源污染物的截流与净化服务功能	0.218	自然湖滨带受破坏情况	0.470

2001—2012 年《巴音郭楞统计年鉴》；(2)由当地水文站提供的 2001—2012 年博斯腾湖水质监测数；(3)通过走访当地,获得问卷调查及实地调研数据。

## 2 评估方法介绍

### 2.1 评估体系的建立

针对博斯腾湖 4 项生态服务功能,并结合博斯腾湖的实际情况,提出多个备选指标。通过数据的可得性、独立性、显著性及指示性原则,对各个备选指标进行筛选,从而建立博斯腾湖生态服务功能评估指标集合(见表 1)。

### 2.2 系统多级灰关联综合评价方法

#### 2.2.1 样本矩阵与标准矩阵归一化

采用系统多级灰关联综合评价方法<sup>[3]</sup>,首先需对样本矩阵进行归一化处理。样本矩阵由博斯腾湖 2001—2012 年各指标数据构成,归一化后矩阵记为  $(a_{ij})_{n \times m}$ ;标准矩阵由《湖泊生态安全调查与评估技术指南》所制定的标准构成,归一化后矩阵记为  $(b_{ij})_{c \times m}$ 。本研究采用的归一化方法为分段线性变化,对于指标为越小越好型,采用式(1)和式(2)进行变换;对于指标为越大越好型,采用式(3)和式(4)进行变换。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & A_{ij} \leq S_{1j} \\ \frac{S_{cj} - A_{ij}}{S_{cj} - S_{1j}} & S_{1j} < A_{ij} < S_{cj} \\ 0 & A_{ij} \geq S_{cj} \end{cases} \quad (1)$$

$$b_{ij} = \frac{S_{cj} - S_{1j}}{S_{cj} - S_{1j}} \quad (2)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & A_{ij} \geq S_{1j} \\ \frac{A_{ij} - S_{cj}}{S_{1j} - S_{cj}} & S_{1j} > A_{ij} > S_{cj} \\ 0 & A_{ij} \leq S_{cj} \end{cases} \quad (3)$$

$$b_{ij} = \frac{S_{ij} - S_{cj}}{S_{1j} - S_{cj}} \quad (4)$$

式中: $i$  为评估指标的年份序号; $j$  为评估指标序号; $n$  为评估指标的年份最大数; $m$  为评估指标个数的最大值; $c$  为标准的级别数; $A_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  个指标的实测数据; $S_{cj}$  为第  $c$  个等级第  $j$  个指标的标准值; $S_{1j}$  为第  $j$  个指标标准限值的均值; $S_{1j}$  为第  $j$  个指标的边界值。

#### 2.2.2 要素层及指标层的权重计算

权重计算方法采用主成分分析法,其优点在于它的权重计算是根据指标真实数据的内在相关关系来确定的,从而避免了主观随意性,实现了客观赋权。其计算步骤为:(1)根据  $(a_{ij})_{n \times m}$  计算相关系数矩阵  $(R_{m \times m})$ ;(2)求出  $R_{m \times m}$  的特征值  $(\lambda_j)$  及对应的特征向量,并计算  $\lambda_j$  的方差贡献率  $(E)_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \times 100\%$ ;(3)计算因子载荷矩阵  $(D_{m \times m}) = Q\Lambda^{\frac{1}{2}}$  (其中,  $Q$  为相应的特征值矩阵; $\Lambda^{\frac{1}{2}}$  为特征向量矩阵);(4)各指标的权重计算,先建立  $R_{m \times m}$  与  $D_{m \times m}$  的回归方程,求得系数向量  $(\bar{\alpha}_j)$ ,公式为  $\bar{\alpha}_j = R_{m \times m}^{-1} d_j$  (其中,  $d_j$  为  $D_{m \times m}$  的元素值),其次根据  $\bar{\alpha}_j$  与  $E_j$  计算出第  $j$  个因子的权重值  $(w_j)$ ,公式为  $w_j = \sum_{i,j=1}^m |\alpha_{ij}| E_j$ 。权重计算结果见表 1。

2.2.3 关联离散函数的计算

对样本矩阵与标准矩阵进行归一化,并在求得各指标的权重分配后,并基于灰色系统理论构造满足关联空间的关联离散函数<sup>[4]</sup>。其计算步骤为:(1)计算关联离散函数样本向量与标准向量中第  $j$  个指标的绝对差,公式为  $\Delta_i(j) = |\alpha_{ij} - b_{ij}|$ 。(2)计算关

表 2 波斯腾湖各生态服务功能状态指数评估标准  
Table 2 Evaluative criteria of Bosten Lake ecosystem services functional index

等级	好	较好	不太好	不好	很不好
指数	[4,5]	[3,4)	[2,3)	[1,2)	[0,1)

表 3 波斯腾湖生态服务功能综合状态评估标准  
Table 3 Evaluation criteria of integrate state of Bosten Lake ecosystem services function

等级	好	较好	不太好	不好	很不好
指数	[90,100]	[70,90)	[55,70)	[40,55)	[0,40)

表 4 波斯腾湖各生态服务功能状态指数评估结果  
Table 4 The evaluation result of ecosystem service functional index of Bosten Lake

年份	水产品供给 服务功能		鱼类栖息地 服务功能		游泳休闲娱乐 服务功能		湖滨带对面源污染物的 截流与净化服务功能	
	指数	等级	指数	等级	指数	等级	指数	等级
2001	4.09	好	3.34	较好	3.73	较好	2.60	不太好
2002	4.08	好	3.34	较好	3.73	较好	2.60	不太好
2003	4.16	好	3.34	较好	3.73	较好	2.60	不太好
2004	4.26	好	3.34	较好	3.73	较好	2.60	不太好
2005	4.45	好	3.28	较好	3.73	较好	2.27	不太好
2006	4.56	好	3.34	较好	3.73	较好	2.27	不太好
2007	4.64	好	3.34	较好	3.73	较好	2.27	不太好
2008	4.59	好	3.29	较好	3.00	较好	1.97	不好
2009	4.76	好	3.29	较好	3.00	较好	1.97	不好
2010	4.86	好	3.29	较好	3.00	较好	1.97	不好
2011	4.86	好	3.75	较好	3.25	较好	2.27	不太好
2012	4.92	好	3.84	较好	3.33	较好	2.34	不太好

联系数  $(\xi_i(a_j, b_t))$ , 公式为  $\xi_i(a_j, b_t) = \frac{\min_i \Delta_i(j) + \rho \max_i \Delta_i(j)}{\Delta_i(j) + \rho \max_i \Delta_i(j)}$  (其中,  $\rho$  为分辨系数,  $0 < \rho < 1$ , 本研究  $\rho$  取 0.5;  $t$  为指标标准限值的均值)。(3) 计算关联度  $(\gamma_{\mu}(a_j, b_t))$ , 公式为  $\gamma_{\mu}(a_j, b_t) = \sum_{j=1}^m \omega_j \xi_i(a_j, b_t)$ 。由  $\gamma_{\mu}(a_j, b_t)$  可确定关联度最大、隶属度最高的某个子序列, 即可得到各指标的综合评价结果。

### 3 评估标准及评估结果

#### 3.1 评估标准

波斯腾湖水产品供给、鱼类栖息地、游泳休闲娱乐及湖滨带对面源污染物的截流与净化等生态服务功能状态指数评估标准见表 2。波斯腾湖生态服务功能综合状态评估标准见表 3。

#### 3.2 评估结果

通过计算模型, 得到波斯腾湖 2001—2012 年各生态服务功能指数及波斯腾湖生态服务功能综合状态指数, 见表 4、表 5。

由波斯腾湖历年各生态服务功能状态指数趋势

表 5 波斯腾湖生态服务功能综合状态指数评估结果  
Table 5 The evaluation results of integrate state of Bosten Lake ecosystem services function

年份	指数	等级
2001	69.84	不太好
2002	69.87	不太好
2003	69.68	不太好
2004	69.51	不太好
2005	68.22	不太好
2006	68.68	不太好
2007	68.78	不太好
2008	63.00	不太好
2009	63.34	不太好
2010	63.62	不太好
2011	68.00	不太好
2012	69.60	不太好

(见表 4) 可知, 目前波斯腾湖的水产品供给服务能力正得到不断提升, 这是由于波斯腾湖在近几年实行大型水产养殖企业联手制度。2007 年, 波斯腾湖各类水产品产量达 7 800 t 多, 实现产值 4 907 万元, 同比增长 14%。鱼类栖息地服务功能总体呈现震荡上升趋势。近年来, 随着波斯腾湖生态环境的不断改善和群众保护野生动植物意识的不断提高, 波斯腾湖野生鱼类品种及数量不断增加, 湖内现有

32个鱼类品种,部分鱼类已通过国家有机认证。2001—2010年波斯腾湖流域的游泳休闲娱乐服务功能总体呈下降趋势,原因是波斯腾湖的水质恶化导致,2008年波斯腾湖水体透明度为1.41 m,为近12年最低。自2011年起波斯腾湖流域采取一系列生态保护措施,使得波斯腾湖水水质有所好转,至2012年底,波斯腾湖的水体透明度达到2.31 m,从而使得该湖的游泳休闲娱乐服务功能有所恢复。湖滨带对面源污染物的截流与净化服务功能总体呈现下降趋势,这是由于湿地的退化减少了湖泊的净化能力,2001—2007年湖滨湿地由1 709.01 km<sup>2</sup>变为1 287.59 km<sup>2</sup>,减少了421.42 km<sup>2</sup>[5]。自2011年起,政府致力于波斯腾湖的湿地恢复工程建设,目前正在进行2万hm<sup>2</sup>人工育苇工程,这些措施的顺利实施使得该服务功能较2010年相比有所上升。

由波斯腾湖历年生态服务功能综合状态指数趋势(见表5)显示,该流域的生态服务功能综合状态指数平均分为67.60,生态服务功能发展趋势可划分为2个阶段:第1阶段为2001—2010年,在此阶段波斯腾湖的生态服务功能总体呈下降趋势,主要原因是波斯腾湖流域的湿地破坏严重,水环境污染加剧,导致湖泊的景观娱乐功能有所下降,并影响了水产品的质量;第2阶段为2011—2012年,在此阶段波斯腾湖的生态服务功能有明显上升,近年来波斯腾湖流域不断实施各项生态治理措施,2011年建立入湖河口湿地、生态缓冲带及修复工程,恢复湿地面积1 533 hm<sup>2</sup>;2012年进行焉耆县水源地规范化建设并开展波斯腾湖湖滨退耕工程项目。这些措施的实施,使得波斯腾湖的各生态服务功能逐步得到恢复,流域的生态服务潜能也得到了较好的开发。

#### 4 结语及建议

(1) 波斯腾湖目前的生态服务功能等级为“不太好”,但若继续保持合理开发并加大生态环境保护力度,则波斯腾湖的生态服务功能综合状态指数等级有望上升一个等级。

(2) 实施湖滨湿地生态保护建设工程,在有效恢复湖滨湿地及保护湿地的野生植物的同时,建立部分人工湿地,从而去除水中大量的有机物及无机物,使得波斯腾湖的湖滨带对面源污染物的截流与净化服务功能得到恢复。

(3) 积极改善水域生态环境,降低湖泊污染负荷。加强对工业废水处理措施,减少点源入湖量。

建立农业缓冲带,实现养分、农田废物管理及畜禽、水产养殖污染控制,从而有效削减农业面源污染。污染负荷降低,有助于波斯腾湖水质的提高,从而使得湖泊的游泳休闲娱乐服务功能、水产品供给服务功能及鱼类栖息地服务功能得到提升。

#### 参考文献:

- [1] 万洪秀,孙占东,王润. 波斯腾湖水位变动对湿地生态环境的影响[J]. 自然资源学报,2006,21(2):260-266.
- [2] 李新虎,宋郁冬,张奋东,等. 波斯腾湖最低生态水位计算[J]. 湖泊科学,2007,19(2):177-181.
- [3] 王红莉,姜国强,陶建华. 渤海湾水环境系统多级灰关联评价[J]. 海洋技术,2004,23(4):48-52.
- [4] 夏军. 区域水环境质量灰关联度评价方法的研究[J]. 水文,1995(2):4-9.
- [5] 曾光,高会军,朱刚,等. 近32年新疆波斯腾湖湿地动态变化及机制分析[J]. 国土资源遥感,2010(86):213-218.

编辑:贺锋萍 (修改稿收到日期:2013-06-14)

(上接第23页)

- [10] 曹海鹏,杨先乐,钱云云,等. 异育银鲫肠道蛭弧菌的分离及其生物学特性的研究[J]. 微生物学通报,2007,34(1):52-56.
- [11] 童晋荣. 土壤细菌的荧光染色计数方法研究及一株放线菌的分离鉴定[D]. 南京:南京农业大学,2009.
- [12] 温崇庆,薛明,张金燕,等. 水产养殖用蛭弧菌类生物制剂的检测[J]. 水产学报,2009,33(2):326-333.
- [13] 秦生巨,司稷东. 噬菌蛭弧菌简易保存方法的研究[J]. 中国微生物学杂志,1990,2(4):62-64.
- [14] 王秀芬,高敏,梁刚,等. 噬菌蛭弧菌噬斑斑的鉴别与纯化的研究[J]. 微生物学通报,1994,21(4):228-232.
- [15] 温崇庆,薛明,周世宁,等. 四个类群海洋蛭弧菌类生物生长特性的比较[J]. 微生物学通报,2009,36(6):815-820.
- [16] BAER M L,RAVEL J,CHUN J, et al. A proposal for the re-classification of *Bdellovibrio stolpii* and *Bdellovibrio starrii* into a new genus, *Bacteriovorax* gen. nov. as *Bacteriovorax stolpii* comb. nov. and *Bacteriovorax starrii* comb. nov. respectively[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology,2000,50(6):219-224.
- [17] 梁思成,房文红,汪开毓,等. 蛭弧菌 Bdh5221 株理化特性和 16S rDNA 序列分析[J]. 水生生物学报,2009,33(5):911-916.
- [18] 彭宗辉,蔡俊鹏,吴冰,等. 两株海洋蛭弧菌的分离及生物学性质[J]. 微生物学报,2008,48(11):1425-1431.
- [19] 徐静,张晓君,秦蕾,等. 海洋蛭弧菌 LBd02-1 的分离及其生物学特性的研究[J]. 水产科学,2010,29(10).
- [20] 李戈强,章勇良,徐伯亥. 不同条件下蛭弧菌裂解河流弧菌的研究[J]. 水生生物学报,1998,22(3):265-271.
- [21] 曹海鹏. 异育银鲫肠道蛭弧菌 BDF-H16 的分离与生物学特性研究及其在水产动物病害防治中的应用[D]. 上海:上海海洋大学,2007.

编辑:黄苇 (修改稿收到日期:2013-04-25)