

## 湖泊生态系统服务生产函数构建研究——以博斯腾湖为例\*

刘倩倩<sup>1,2</sup>, 徐昔保<sup>1\*\*</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 南京学院, 南京 211135)

**摘要:** 湖泊生态系统服务(LES)在维持区域乃至全球生态安全格局中发挥重要作用,是目前生态系统服务研究的热点之一。由于湖泊面广量大、类型丰富、区域差异大及基础数据较为缺乏等原因,适用于LES定量评估且较为便捷、可行的模型方法较少。本文以博斯腾湖为例,基于生态系统最终服务与关键特征指标构建湖泊生态系统服务生产函数(LEPF),用于定量评估湖泊生态系统服务价值(LESV)并甄别关键特征指标的贡献度。结果表明:(1)博斯腾湖1990—2019年生态系统最终服务年均价值量为2226.84亿元,总体呈“上升—下降—上升”的变化趋势,气候调节、防洪蓄水为主导生态系统服务;(2)LEPF拟合结果较好地反映了5类关键特征指标对LESV的贡献度,从高到低依次为:湖泊水位>蒸发量>面积>水生植被面积>综合营养状态指数;(3)5类关键特征指标中水位的产出弹性较高,表明水位波动与生态系统最终服务价值变化密切相关。

**关键词:** 湖泊生态系统服务生产函数;最终服务;关键特征指标;博斯腾湖

## Construction of lake ecosystem service production function: A case study of Lake Bosten, China\*

Liu Qianqian<sup>1,2</sup> & Xu Xibao<sup>1\*\*</sup>

(1: *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *Nanjing College, University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China*)

**Abstract:** Lake ecosystem services (LES) is of great importance in guaranteeing regional and global ecological security, which provides a research hotspot in ecological economics at home and abroad. However, there are only few models and methods suitable for LES evaluation quantitatively, under the circumstance of large lake areas, a variety of types, large regional differences, lack of basic data, and so on. Based on final ecosystem services and key characteristic indicators, this paper took Lake Bosten as an example, built a model named lake ecosystem service production function (LEPF) to assess lake ecosystem services valuation (LESV) and identify the contributions of key characteristic indicators quantitatively. The results showed that: (1) From 1990 to 2019, the average final services of Lake Bosten reached ¥2226.84 billion yuan, with an overall trend of "rising-falling-rising", and the dominant ecosystem services included climate regulation, flood control and water storage; (2) The LEPF fitting results nicely reflected the contribution degree of the selected key characteristic indicators on the LES, from high to low, as follows: lake water level>evaporation>area>aquatic vegetation area>integrated nutritional status index; (3) The output elasticity of the water level in the five types of the key characteristic indicators was relatively high, indicating that the fluctuation of the water level was closely related to the changes in the ultimate service value of the ecosystem.

**Keywords:** Lake ecosystem service production function; final services; key characteristic indicators; Lake Bosten

1990s 以来生态系统服务的价值评估逐渐成为国内外生态经济学的研究热点,随着 1997 年 Costanza 等

\* 2022-01-17 收稿;2022-05-05 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2019YFA0607100)资助。

\*\* 通信作者;E-mail: xbxu@niglas.ac.cn。

在 *Nature* 上发表了针对全球生态系统服务的价值评估研究,2005 年联合国在千年评估报告中将生态系统服务分为供给服务、支持服务、文化服务、调节服务 4 类并相继开展生态系统服务价值评估与影响分析,有关生态系统服务价值评估的认识逐步提高<sup>[1-8]</sup>。现有研究主要有围绕物质质量与价值量的评估<sup>[9]</sup>、生态系统服务价值动态变化与影响机理分析<sup>[10]</sup>、生态系统服务权衡关系的定性/半定量分析研究等<sup>[11-12]</sup>,已形成了生态系统结构—过程与功能—服务的研究框架<sup>[13]</sup>。过去几十年来,国内外学术机构在生态系统服务内涵、评估框架、模型应用等方面作了大量的探索和尝试,为我国湖泊生态系统服务研究快速发展奠定了基础<sup>[14]</sup>。然而,湖泊生态系统高度复杂,缺乏较为完整的监测体系与数据,针对湖泊生态系统服务价值 (lake ecosystem service valuation, LESV) 评估的过程模型以及湖泊生态系统特征和生态系统最终服务的尺度关联等研究较少,导致湖泊生态系统服务研究相对较为滞后,在内在传递机制、影响因素定量甄别、生态系统服务权衡与优化调控等方面仍较为薄弱<sup>[15]</sup>。本文尝试构建湖泊生态服务生产函数 (lake ecosystem service production function, LEPF) 以探求一种专门针对湖泊生态系统服务价值评估的方法模型,拟通过在湖泊生态系统最终服务价值与关键特征指标间构建一定的函数关系,揭示一段时间内维持湖泊生态系统产生使用服务的各种生态生产要素与其所能产生的最大生态系统最终服务之间的关系。研究可作为生态服务生产的主要理论基础和分析方法<sup>[16]</sup>,为 LESV 的评估及关键特征指标贡献度的定量甄别提供方法借鉴。

数学家 Charles Cobb 与经济学家 Paul Douglas 于 1928 年提出生产函数 (CD 生产函数) 用于研究既定的技术水平下生产要素投入量的组合与产品的最大产量之间的技术关系,此后该函数不断发展并作为工具被广泛应用于人才、社会经济、企业管理、旅游业等经济学领域<sup>[17]</sup>。随着生态系统服务研究的不断发展,生态学家尝试基于过程模型与统计学方法将生产函数与生态过程相结合,提出构建一种生态系统产生生态系统服务过程的可用表达式 (模型),即生态生产函数<sup>[18-21]</sup>。Jonsson 等在提出生态生产函数概念框架的基础上构建一种新型景观模型,将生产函数与描述作物生长的模型相结合以预测土地利用对天敌害虫生物防治的影响<sup>[22]</sup>;Maltby 等利用定量生态生产函数或外推因子外推的改进方式评估生态系统服务权衡关系,以此量化生态系统服务的权衡,但同时存在资源和数据密集的问题<sup>[23]</sup>;Faber 等基于文献综述,对 25 种生态系统服务 121 个生态生产函数的量化程度和因果关系进行归类,认为目前只有少数生态系统服务建立了合理的生态生产函数<sup>[24]</sup>。现有生态生产函数研究通常仅根据生物物理措施来定义生态系统服务,缺乏了一些必要投入的非生态因素<sup>[25]</sup>;涉及最终服务的同时涉及到中间服务,二者之间的混淆导致大部分用于关联生态系统结构、过程与功能的回归模型并非严格意义上的生态生产函数<sup>[20]</sup>。基于此,部分学者进一步引进“生态服务生产函数”概念,谢高地等根据计量经济学理论和生态服务研究积累的理论成果,提出生态服务生产函数可以被看成是生态服务生产的主要理论基础<sup>[16]</sup>;Wainger 等在链接生态和经济建模框架的基础上提出一系列量化生态系统服务价值的函数关系,逐步揭示生态系统服务价值与人类福祉之间的关系<sup>[25]</sup>。目前生态服务生产的理论框架仍然是个空白,大多处于定性的描述阶段,量化构建函数的研究实例较少,构建生态系统服务生产的基本理论框架首先需要构建生态服务生产函数<sup>[16]</sup>。

本研究借鉴生态服务生产函数的内涵与框架,在湖泊面广量大、类型丰富、区域差异大及基础数据较为缺乏等情形下,首先根据生态学和生态系统服务的原理确定最终指标体系,采用市场价值法、影子工程法和替代成本法等生态经济学方法对博斯腾湖近 30 年来生态系统最终服务价值进行评估,评估结果作为被解释变量;在此基础上,从生态系统结构—过程与功能—服务的机理层面分析并综合考虑湖泊生态本底、区位因素影响及生态系统服务之间的联系等,最终选取了湖泊面积、水位、蒸发量、水生植被面积、综合营养状态指数这 5 类关键特征指标作为解释变量;最后基于湖泊生态系统最终服务与关键特征指标构建出 LEPF 以定量甄别 LESV 主导因素贡献度,并为拓展到区域尺度的 LESV 评估提供一定的理论基础与数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

新疆博斯腾湖 (41°56'~42°14'N, 86°40'~87°26'E) 位于天山南麓,地处巴州焉耆盆地博湖县境内,是我国最大的内陆淡水湖、西北地区最大的淡水湖、新疆典型的吞吐型湖泊,同时也是一个不完整的天然调节水库,具有调节河川径流、净化水质、蓄洪灌溉、产品提供、生态调节及促进地区经济发展等功能,为水资源匿

乏的干旱地区提供了重要的生态系统服务,被誉为巴州人民的母亲湖<sup>[26-29]</sup>。博斯腾湖作为塔里木河的主要配水湖泊及塔克拉玛干沙漠和库鲁克大沙漠之间绿色走廊水源的重要补给湖泊,其对流域生态安全保障、“丝绸之路经济带”和中国—蒙古国—俄罗斯经济走廊建设均具有举足轻重的作用<sup>[30]</sup>。然而近年来由于受自然和人为两种因素的制约,博斯腾湖湖区的湿地生态系统结构向着更加简化和脆弱的方向演化,在生态环境中有着多重角色的博斯腾湖面临着一系列的环境问题<sup>[31-34]</sup>。此外,相比于森林、草原、荒漠和农田等其他生态系统,湖泊面积及其在陆地中占比都非常有限,其重要性和生态系统服务价值往往被严重低估,也缺乏必要的量化表征以及区域时空多尺度的研究方法<sup>[30]</sup>。在当前生态优先、绿色发展的大背景下,博斯腾湖长期生态系统服务价值评估及关键特征指标定量甄别可为湖泊生态保护与优化调控提供理论与科学依据,以博斯腾湖为例构建 LEPF,可为拓展到区域尺度上的 LESV 评估提供一定的理论基础与数据支撑。

## 1.2 研究方法

1.2.1 理论框架 LEPF 将生态服务生产函数运用到 LESV 评估上,主要揭示一段时间内湖泊生态系统最终服务价值(被解释变量)与关键特征指标(解释变量)之间的函数关系<sup>[35]</sup>。基本思路包括:(1)对湖泊生态系统最终服务进行价值量评估,价值评估结果作为最终被解释变量。评估主要针对供给服务、调节服务、文化服务 3 类,由于支持服务在起到中间过程作用(即支持服务通常是其他三类服务的形成条件),为了避免重复计算,在评估过程中不涉及<sup>[3]</sup>; (2)从生态系统结构—过程与功能—服务机理层面分析并综合考虑湖泊生态本底、区位因素影响及生态系统服务之间的联系等,确定影响湖泊生态系统最终服务价值的关键特征指标;(3)将生态系统最终服务与关键特征指标分别作为被解释变量与解释变量代入生态服务生产函数框架,通过统计检验遴选最终的输入变量,完成 LEPF 构建(图 1)。

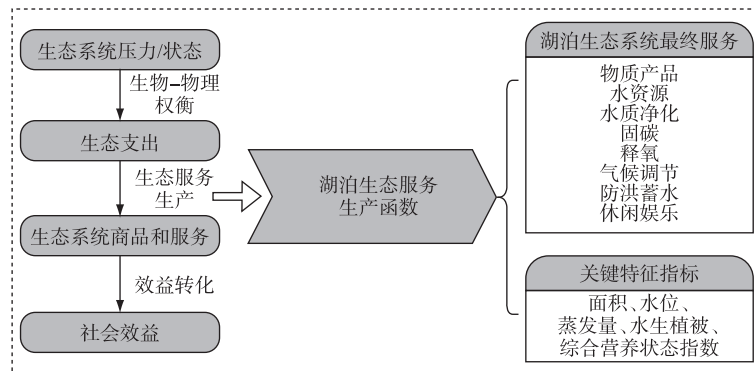


图 1 LEPF 理论框架<sup>[25,35]</sup>

Fig.1 Theoretical framework for the LEPF<sup>[25,35]</sup>

1.2.2 函数构建 基于长时间序列的生态系统服务价值研究,更有助于揭示生态系统服务价值变化趋势,故研究选取 1990—2019 年近 30 年作为研究时段,根据湖泊生态系统特征和社会经济状况,结合《湿地生态系统服务评估规范》(LY/T 2899—2017),制定了生态系统最终服务评估指标体系,将博斯腾湖生态系统最终服务划分为供给服务、调节服务、文化服务价值 3 大类共 8 项服务价值。其中,供给服务直接使用市场价值法进行计算;调节服务使用影子工程法、造林成本法、工业制氧法、替代成本法等;文化服务获得的收益直接从政府统计数据中获得。价值评估结果作为被解释变量(表 1)。

公式如下:

$$V = \sum_i V_i \quad (1)$$

式中, $V$  为湖泊提供的生态系统最终服务价值(亿元/a); $V_i$  为湖泊第  $i$  项生态系统服务价值(亿元/a)。

因为几乎不可能对所有影响湖泊生态系统服务价值的直接或潜在特征指标进行建模,所以缩小度量集合的一个有用策略是从生态系统结构—过程与功能—服务的机理层面综合考虑湖泊生态本底、区位因素影响及生态系统服务之间的联系等因素,将研究的重点放在关键特征指标上。在生态系统结构方面,随着气

表 1 被解释变量指标体系\*

Tab.1 Indicators system of the explained variable

服务类别	评估指标	评估公式	评估方法	参数单位均价及依据
供给服务	物质产品	物质产品价值 = 物质产量 × 市场价格	市场价值法 <sup>[33-34]</sup>	经济鱼类价值为 75.96 元/kg 芦苇价值为 777.97 元/t
	水资源	水资源价值 = 水资源供给量 × 单位平均水价		《博湖年鉴》《巴音郭楞统计年鉴》
调节服务	水质净化	水质净化价值 = 污染物净化量 × 污染物净化单价	影子工程法 <sup>[36]</sup>	净化总氮单价为 1500 元/t 净化总磷单价为 2500 元/t 参考文献[37-38]
	固碳	固碳价值 = 固碳量 × 造林成本价格	造林成本法 <sup>[39]</sup>	1320 元/t 参考文献[40]
	释氧	释氧价值 = 释氧量 × 工业释氧价格	工业制氧法 <sup>[39]</sup>	1000 元/t http://wsb.moh.gov.cn/
	气候调节	气候调节价值 = 降温价值 + 增湿价值	影子工程法 <sup>[36,41]</sup>	参考文献[42]
调蓄洪水	调蓄洪水价值 = 调蓄洪水量 × 单位库容成本	影子工程法 <sup>[41]</sup>	单位库容价值 6.11 元/m <sup>3</sup> 《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721-2008)	
文化服务	休闲旅游	—	—	《博湖县国民经济和社会发展统计公报》《博湖县人民政府网站》

\* 使用市场价值法进行价值评估时,根据国家统计局历年价格指数,统一将价格修正到 2019 年,以避免通货膨胀等因素造成的误差。

候环境变化和人类活动影响加剧,作为典型的干旱区内陆湖泊,博斯腾湖面积、水位都发生了明显阶段性变化,且湖区地处亚欧大陆中心,气候干燥少雨且蒸发量大<sup>[43-46]</sup>。在生态系统过程和功能方面,水生植被是生态系统的重要组成部分,在湖库生态系统中发挥稳定沉积物、净化水质、平衡水生生态系统等作用,对湖库生态环境具有重要作用,而各种社会因素的影响导致的湖泊生态环境改变,主要体现在水生植被面积的变化方面<sup>[47]</sup>;湖泊水环境对整个生态系统起关键性作用,而富营养化影响水体水质,降低水的透明度,影响水中植物的光合作用,可能造成溶解氧急剧减少,使鱼类大量死亡等<sup>[48]</sup>,叶绿素 *a* 浓度常常作为反映水体富营养化程度的重要评价指标<sup>[49]</sup>,透明度是湖泊水体重要的物理参数之一,是水体光学组分的综合反映,二者对研究湖泊生态环境具有重要科学意义<sup>[50]</sup>。在生态系统服务方面,湖泊面积、水位、蒸发量 3 类水文气象要素的波动会严重影响区域的稳定与经济的发展,可在反映干旱区湖泊水文情况的基础上进一步系统研究湖泊生态系统服务价值变化情况,主要解释水资源供给服务及大部分调节服务尤其是气候调节服务;水生植被是博斯腾湖长期保持淡水特色的主要原因之一,在促进区域经济发展和湖区水域环境保护方面发挥了重要的作用<sup>[51]</sup>,主要用于解释物质产品供给及部分调节服务;营养状态评价方法是识别湖库营养状态和水污染程度的主要技术手段<sup>[52]</sup>,本文主要参照《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》中的综合营养状态指数(TLI)法对叶绿素 *a* (Chl.a)、透明度(SD)两种水质特征指标进行评价,评价结果主要用于解释部分供给服务及调节服务,尤其是水质净化服务。基于研究区域关键特征及数据可得性,最终选定湖泊面积、水位、蒸发量、水生植被面积、综合营养状态指数这 5 类关键特征指标作为解释变量(表 2)。博斯腾湖 1990—2019 近 30 年生态系统最终服务价值与 5 类关键特征指标分别作为被解释变量与解释变量共同构成 LEPPF(表 3)。

LEPPF 公式如下:

$$V = F(A_t, B_t, \Gamma_t, \Delta_t, E_t) = A_t^\alpha \cdot B_t^\beta \cdot \Gamma_t^\gamma \cdot \Delta_t^\delta \cdot E_t^\varepsilon \cdot e^c \quad (2)$$

式中, *A*、*B*、 $\Gamma$ 、 $\Delta$ 、*E* 分别代表 5 类关键特征指标,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ 、 $\varepsilon$  分别代表 5 类关键特征指标相对产出弹性系数, *c* 代表生态服务水平常数; *t* 代表不同年份。

对(2)式作对数处理,得回归方程(3):

$$\ln V = \alpha \ln A_i + \beta \ln B_i + \gamma \ln \Gamma_i + \delta \ln \Delta_i + \varepsilon \ln E_i + c \quad (3)$$

表 2 解释变量数据来源

Tab.2 Data source of the explanatory variable

时间	名称	解释	数据源	提供单位
1990—2019 年	面积	30 m 空间分辨率、时间分辨率为 1 年	Landsat TM/ETM+/OLI 和 Sentinel 多源、多时相、多季相卫星影像	中国科学院南京地理与湖泊研究所
	水位	卫星测高/水边线结合 DEM 高程		
	蒸发量	时间分辨率为 1 年	历年蒸发量根据博斯腾湖水位—蒸发量变化曲线计算得出	参考文献[27]
	水生植被面积	1990—2015 年:30 m 空间分辨率/2016—2019 年:10 m 空间分辨率、时间分辨率为 1 年	Landsat、Sentinel 等卫星影像	中国科学院东北地理与农业生态研究所
	湖泊水质参数	30 m 空间分辨率、时间分辨率为 1 年	Landsat、MODIS/MERIS 等卫星影像	

表 3 解释变量与被解释变量要素指标

Tab.3 Indicators of explanatory variables and explained variables

变量	要素指标	指标代码(产出弹性系数)
被解释变量 (产出要素)	生态系统最终服务价值(亿元)	V
解释变量 (投入要素)	关键特征指标	
	面积(km <sup>2</sup> )	A <sub>i</sub> (α)
	水位(m)	B <sub>i</sub> (β)
	蒸发量(亿 m <sup>3</sup> )	Γ <sub>i</sub> (γ)
	水生植被面积(km <sup>2</sup> )	Δ <sub>i</sub> (δ)
	综合营养状态指数	E <sub>i</sub> (ε)
	叶绿素 a(mg/L)	
	透明度(m)	

## 2 结果分析

### 2.1 生态系统最终服务价值变化

博斯腾湖 1990—2019 近 30 年来生态系统最终服务价值为 1900.26 亿~2560.66 亿元/年,年均 2226.84 亿元/年,其单位面积生态系统提供的各项服务功能的价值,即年平均生态系统最终服务价值系数<sup>[53]</sup>为 2.14 亿元/km<sup>2</sup>,远高于世界陆地平均单位面积生态服务功能价值(691400 元/km<sup>2</sup>)和我国陆地平均单位面积生态服务功能价值(583100 元/km<sup>2</sup>)<sup>[54]</sup>。其中气候调节、防洪蓄水在 8 类生态系统服务价值评估中占据主导地位,为主导生态系统服务,分别占生态系统最终服务价值的 89.43%、10.15%,其年平均生态系统最终服务价值系数分别为 1.91 亿、0.22 亿元/km<sup>2</sup>。生态系统最终服务价值总体呈“上升—下降—上升”的变化趋势且与水位变动密切相关(图 2)。第 1 阶段为 1990—2002 年,水位持续上升,生态系统最终服务价值量随之不断增加;第 2 阶段为 2003—2012 年,生态系统最终服务价值随水位下降持续下降;第 3 阶段为 2013—2019 年,水位和生态系统最终服务价值量同步回升。

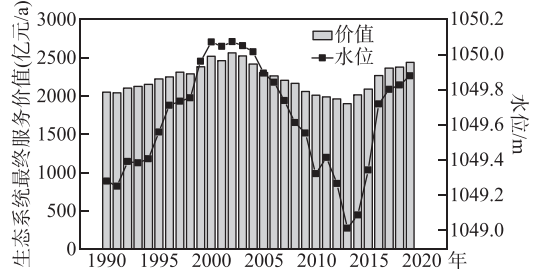


图 2 生态系统最终服务价值与水位变化趋势

Fig.2 Change trend of final ecosystem service value and water level

## 2.2 生态服务生产函数

将博斯腾湖生态系统最终服务价值(被解释变量)与关键特征指标(解释变量)一并代入湖泊生态服务生产函数模型,在 E-views 软件中采用最小二乘法(OLS)进行回归模拟(表 4)。

表 4 湖泊生态服务生产函数回归结果  
Tab.4 Regression results of the LEPF

变量	模型 1			模型 2		
	回归系数	标准差	P 值	回归系数	标准差	P 值
$\ln A_i$	0.111 **	0.006	<0.001	0.111 **	0.006	<0.001
$\ln B_i$	31.955 **	2.183	<0.001	31.813 **	2.106	<0.001
$\ln \Gamma_i$	0.871 **	0.008	<0.001	0.871 **	0.007	<0.001
$\ln \Delta_i$	-0.002 *	0.001	0.031	-0.002 **	0.001	<0.001
$\ln E_i$	0.001	0.003	0.730	—	—	—
c	-217.674 **	15.150	<0.001	-216.683 *	14.618	0.027
	调整 $R^2 = 0.99982, P$ 值<0.001			调整 $R^2 = 0.99982, P$ 值<0.001		

\*\*、\* 分别表示 1%、5% 的置信水平上显著。

模型 1 中综合营养状态指数这个关键特征指标不显著,剔除该变量后得模型 2 以便比较。结果显示,两个模型调整  $R^2$  都趋近于 1 且  $P$  值都趋近 0,拟合度都较高,整体都通过显著性检验,且模拟效果良好。本文主要尝试构建 LEPF,未来研究将进一步通过尺度外推开展区域尺度的 LESV 评估,该关键特征指标的可获取性与可推广性较强,故予以保留,即最终选取模型 1。

$$\ln V = 0.111 \ln A_i + 31.955 \ln B_i + 0.871 \ln \Gamma_i - 0.002 \ln \Delta_i + 0.001 \ln E_i - 217.674 \quad (4)$$

经对数变换得博斯腾湖 1990—2019 年近 30 年来的生态服务生产函数:

$$V = F(A_i, B_i, \Gamma_i, \Delta_i, E_i) = A_i^{0.111} \cdot B_i^{31.955} \cdot \Gamma_i^{0.871} \cdot \Delta_i^{-0.002} \cdot E_i^{0.001} \cdot e^{-217.674} \quad (5)$$

从公式(5)可知,湖泊水面面积的产出弹性为 0.111,表明湖泊水面面积增加 1%,则年均生态系统最终服务价值增加 0.111%;湖泊水位的产出弹性为 31.955,表明湖泊水位增加 1%,则年均生态系统最终服务价值增加 31.955%;湖泊蒸发量的产出弹性为 0.871,表明湖泊蒸发量增加 1%,则年均生态系统最终服务价值增加 0.871%;湖泊水生植被面积的产出弹性为-0.002,表明湖泊水生植被面积增加 1%,则年均生态系统最终服务价值减少 0.002%;湖泊综合营养状态指数的产出弹性为 0.001,表明湖泊综合营养状态指数增加 1%,则年均生态系统最终服务价值增加 0.001%。5 类关键特征指标中,水位的产出弹性较高,表明水位波动与生态系统最终服务价值变化最为密切,占据绝对主导地位。综合比较各关键特征指标对博斯腾湖生态系统最终服务价值的贡献度为:湖泊水位>蒸发量>面积>水生植被面积>综合营养状态指数。

## 3 讨论

由于湖泊面广量大、类型丰富、区域差异大及基础数据较为缺乏等原因,适用于湖泊生态系统服务定量评估的方法较少。现有大部分针对 LESV 的研究主要是采用生态经济价值评估方法针对单个湖泊的某个年份开展研究。以博斯腾湖为例,江波等评估其 2002 年生态系统最终服务价值为 91.89 亿元,价值量从高到低依次为径流调节>休闲娱乐>释氧>原材料生产>固碳>淡水产品>非使用价值>水资源供给>水质净化<sup>[34]</sup>;孙玉芳等从直接利用价值(物质生产、休闲旅游功能)和间接利用价值(涵养水源、调蓄洪水、降解污染、生物栖息地、文化科研功能)两个维度,评估了 2004 年博斯腾湖湿地间接和直接服务价值分别为 1.49 亿和 76.8 亿元<sup>[33]</sup>。同时,北方区域的青海湖湿地生态系统最终服务总价值评估表明,按最终服务价值从高到低依次为水源涵养>气候调节>休闲娱乐>非使用价值>释氧>原材料生产>固碳>食物生产<sup>[39]</sup>,由此可见气候调节服务对干旱区生态系统具有巨大的生态价值,不可忽视。由于评估指标选取差异,尤其是气候调节服务的选取与否,可能造成最终服务价值评估结果的巨大差异。上述关于博斯腾湖的两项研究均未包括气候调节服务,而本研究中气候调节为主导生态系统服务,扣除气候调节服务价值后,2002 年与 2012 年 LESV 分别为

299.40 亿和 293.21 亿元。因此,不同 LESV 研究之间差异深受评估指标选取、评估方法及价值系数差异影响。

目前鲜有研究将生态服务生产函数运用到 LESV 评估中,本研究尝试构建的 LEPF 可为区域尺度上定量评估湖泊生态系统服务提供方法借鉴。同时,目前仍存在部分基础数据匮乏、未充分考虑湖泊本身生态机理影响、部分解释变量不够具体等问题,本文构建的 LEPF 也存在一定的不确定性。首先,针对被解释变量,湖泊生态系统服务价值评估受限于数据可得性,渔获量、芦苇产量等存在某些年份的缺失,故导致对应的生态系统服务价值长期变化趋势的缺乏,并且在指标的选取、定量化评价等方面还有待进一步深入、完善。其次,对于解释变量,特征指标的选取需兼顾特征指标的可获取性与可推广性以及排除指标数据内部可能存在的冗余性等,因此本研究采取了缩小度量集合的有用策略,即从生态系统结构—过程与功能—服务的机理层面综合考虑湖泊生态本底、区位因素影响及生态系统服务之间的联系等因素,将研究的重点放在关键特征指标上,导致无法涵盖更多其他重要但非关键影响因素。此外,特征指标的选取还受到时间、数据限制。除了文中提到的 5 类特征指标外,水鸟物种数也在考虑范围内。不同种群的鸟类对栖息环境有着特殊的依赖性,受环境变化的直接影响,湿地鸟类是湿地环境质量变化中极其敏感的指示物种<sup>[55-56]</sup>。但由于获取的数据时间范围主要是 2000 年以后,且多是按时间段来搜集的,结果并不足以揭示 30 年来的数量变化,故未作选择。

最后,从模型结果上看,以水生植被为例,模拟结果表明水生植被与博斯腾湖生态系统最终服务价值呈较弱负相关,可能存在的原因是研究仅提取了湖泊水生植被整体数据,并未对不同植被类型加以区分,再加上研究未充分考虑湖泊本身生态机理的影响,导致该结果在一定程度上仅反映了水生植被整体情况,无法甄别出具体哪类植被类型影响较大。未来研究需重点加强遴选水生植被优势物种作为关键表征指标之一,进一步定量探讨其与 LESV 之间的影响关系。以综合营养状态指数为例,一方面由于本文只利用 Chl. *a*、SD 进行湖泊(水库)营养状态评价,参评指标较少,导致评价结果在综合表征营养状态水平方面存在一定的不足;另一方面对于显著水平不高的问题,可能受近 30 年来博斯腾湖营养水平没有发生明显变化影响,导致其对博斯腾湖 LESV 变化的影响不显著。该关键特征指标未来需通过搜集其他长时间序列参评指标数据(如总氮(TN)、总磷(TP)等)进一步完善。目前有关 LESV 的定量评估模型较少,本研究从理论到应用作了初步探讨,未来 LEPF 评估与应用方向可更多集中于区域 LESV 的定量评估中,其关键特征指标的选取可结合不同湖区特点作进一步的区分筛选,即关键特征指标的选取需根据湖泊生态本底特征而定,从而使 LEPF 模型在区域尺度上评估更具有普适性。

综上,LEPF 的构建及应用与推广还需进一步补充。构建 LEPF 首先需要大数据支撑,针对部分数据匮乏问题,可通过广泛收集历史监测数据,并利用多源卫星数据获取更精确、长时间序列的数据;其次,函数模型中应充分考虑湖泊本身生态机理影响,在遴选关键特征指标的基础上进一步重点突出生态要素比例。此外,函数模型需重点考虑生态系统服务时空权衡关系、生态系统特征对生态系统服务的边际效应及未来人类活动和气候变化不同情景下的 LESV 变化趋势,切实为湖泊生态系统保护与管控而提供有效的手段与科学依据。

## 4 结论

本研究在高度复杂、监测数据与体系较为缺乏的湖泊生态系统背景下以及湖泊面广量大、类型丰富、区域差异大及基础数据较为缺乏等情形下,借鉴生态服务生产函数的内涵与框架,构建 LEPF 以定量评估 LESV 价值。以博斯腾湖为研究对象,研究结果如下:

1) 1990—2019 年近 30 年来博斯腾湖生态系统最终服务价值总体呈“上升—下降—上升”的变化趋势且与水位变动密切相关,在 8 类最终生态系统服务价值评估中,气候调节、防洪蓄水占据主导地位。

2) LEPF 模拟结果较好地反映了研究最终选取的 5 类关键特征指标的波动对最终生态系统服务价值变化的贡献情况,其指标贡献度从高到低依次为:湖泊水位>蒸发量>面积>水生植被面积>综合营养状态指数。其中,水位的产出弹性较高,表明水位波动与生态系统最终服务价值的变化密切相关。

致谢:感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所刘凯、中国科学院东北地理与农业生态研究所贾明明、刘阁等

对相关数据的共享与支持!

## 5 参考文献

- [ 1 ] Costanza R, d'Arge R, de Groot R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **387**: 253-260. DOI: 10.1038/387253a0.
- [ 2 ] Millennium Ecosystem Assessment ed. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Washington DC: Island Press, 2005.
- [ 3 ] Li W, Cui LJ, Pang BL *et al.* Thinking of solving double counting in wetland ecosystem services valuation. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(10): 1716-1724. [李伟, 崔丽娟, 庞丙亮等. 湿地生态系统服务价值评价去重复性研究的思考. 生态环境学报, 2014, **23**(10): 1716-1724.]
- [ 4 ] Wong CP, Jiang B, Kinzig AP *et al.* Linking ecosystem characteristics to final ecosystem services for public policy. *Ecology Letters*, 2015, **18**(1): 108-118. DOI: 10.1111/ele.12389.
- [ 5 ] Ouyang ZY, Zheng H, Xiao Y *et al.* Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, **352**(6292): 1455-1459. DOI: 10.1126/science.aaf2295.
- [ 6 ] Xu XB, Chen MK, Yang GS *et al.* Wetland ecosystem services research: A critical review. *Global Ecology and Conservation*, 2020, **22**: e01027. DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e01027.
- [ 7 ] Jenny JP, Anneville O, Arnaud F *et al.* Scientists' warning to humanity: Rapid degradation of the world's large lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 2020, **46**(4): 686-702. DOI: 10.1016/j.jglr.2020.05.006.
- [ 8 ] Buckley R. The economics of ecosystems and biodiversity: Ecological and economic foundations. *Austral Ecology*, 2011, **36**(6): e34-e35. DOI: 10.1111/j.1442-9993.2011.02253.x.
- [ 9 ] Reynaud A, Lanzanova D. A global meta-analysis of the value of ecosystem services provided by lakes. *Ecological Economics*, 2017, **137**: 184-194. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.03.001.
- [ 10 ] Tolonen KT, Hämäläinen H, Lensu A *et al.* The relevance of ecological status to ecosystem functions and services in a large boreal lake. *Journal of Applied Ecology*, 2014, **51**(3): 560-571. DOI: 10.1111/1365-2664.12245.
- [ 11 ] de Groot RS, Alkemade R, Braat L *et al.* Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, **7**(3): 260-272. DOI: 10.1016/j.ecocom.2009.10.006.
- [ 12 ] Grizzetti B, Liqueste C, Pistocchi A *et al.* Relationship between ecological condition and ecosystem services in European rivers, lakes and coastal waters. *Science of the Total Environment*, 2019, **671**: 452-465. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.155.
- [ 13 ] Fu BJ, Yu DD, Lv N. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(2): 341-348. DOI: 10.5846/stxb201611092273. [傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. 生态学报, 2017, **37**(2): 341-348.]
- [ 14 ] Jiang B, Wong CP, Ouyang ZY. Beneficiary analysis and ecological production function to measure lake ecosystem services for decision-making in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(8): 2422-2430. DOI: 10.5846/stxb201410192051. [江波, Christina P. Wong, 欧阳志云. 湖泊生态服务受益者分析及生态生产函数构建. 生态学报, 2016, **36**(8): 2422-2430.]
- [ 15 ] Xu XB, Yang GS, Jiang B. Progress in lake-wetland ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(20): 7149-7158. DOI: 10.5846/stxb201804040768. [徐昔保, 杨桂山, 江波. 湖泊湿地生态系统服务研究进展. 生态学报, 2018, **38**(20): 7149-7158.]
- [ 16 ] Xie GD, Zhen L, Lu CX *et al.* Supply, consumption and valuation of ecosystem services in China. *Resources Science*, 2008, **30**(1): 93-99. [谢高地, 甄霖, 鲁春霞等. 生态系统服务的供给、消费和价值化. 资源科学, 2008, **30**(1): 93-99.]
- [ 17 ] Huang Q, Yi H. A summary of the application of Cobb Douglas production function in economics. *Advances in Applied Mathematics*, 2020, **9**(12): 2353-2357. DOI: 10.12677/AAM.2020.912274. [黄琪, 易欢. 柯布-道格拉斯生产函数在经济学的的应用综述. 应用数学进展, 2020, **9**(12): 2353-2357.]
- [ 18 ] Polasky S, Segerson K. Integrating ecology and economics in the study of ecosystem services: Some lessons learned. *Annual Review of Resource Economics*, 2009, **1**: 409-434. DOI: 10.1146/annurev.resource.050708.144110.
- [ 19 ] Wong CP, Jiang B, Bohn TJ *et al.* Lake and wetland ecosystem services measuring water storage and local climate regulation. *Water Resources Research*, 2017, **53**(4): 3197-3223. DOI: 10.1002/2016wr019445.
- [ 20 ] Jiang B, Wang XY, Yang MF *et al.* Application of ecosystem services research on a protection effectiveness evaluation of the ecological red-line policy. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(9): 3365-3371. DOI: 10.5846/stxb201801180133. [江波, 王晓媛, 杨梦斐等. 生态系统服务研究在生态红线政策保护成效评估中的应用. 生态学报, 2019, **39**(9): 3365-3371.]
- [ 21 ] Bruins RJ, Canfield TJ, Duke C *et al.* Using ecological production functions to link ecological processes to ecosystem services. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, **13**(1): 52-61. DOI: 10.1002/ieam.1842.
- [ 22 ] Jonsson M, Bommarco R, Ekbom B *et al.* Ecological production functions for biological control services in agricultural landscapes. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, **5**(3): 243-252. DOI: 10.1111/2041-210X.12149.



- [23] Maltby L, Brown R, Faber JH *et al.* Assessing chemical risk within an ecosystem services framework: Implementation and added value. *Science of the Total Environment*, 2021, **791**: 148631. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148631.
- [24] Faber JH, Marshall S, Brown AR *et al.* Identifying ecological production functions for use in ecosystem services-based environmental risk assessment of chemicals. *Science of the Total Environment*, 2021, **791**: 146409. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146409.
- [25] Wainger L, Mazzotta M. Realizing the potential of ecosystem services: A framework for relating ecological changes to economic benefits. *Environmental Management*, 2011, **48**(4): 710-733. DOI: 10.1007/s00267-011-9726-0.
- [26] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [27] Hu AY. Analysis on the influence of climate change and the human activities on inland lake. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, **21**(5): 1-5. [胡安焱. 流域气候变化和人类活动对内陆湖泊影响的分析. 干旱区资源与环境, 2007, **21**(5): 1-5.]
- [28] Zuo QT, Xia J, Shao MC *et al.* The control system of sustainable utilization of water resources in Bosten Lake. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2003, **34**(2): 1-4, 66. [左其亭, 夏军, 邵民诚等. 博斯腾湖水资源可持续利用调度系统. 水利水电技术, 2003, **34**(2): 1-4, 66.]
- [29] Li YJ, Chen YN, Zhang QF *et al.* Analysis of the change in water level and its influencing factors on Bosten Lake from 1960 to 2018. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(1): 48-58. DOI: 10.13866/j.azr.2021.01.06. [李玉焦, 陈亚宁, 张齐飞等. 1960—2018年博斯腾湖水位变化特征及其影响因素分析. 干旱区研究, 2021, **38**(1): 48-58.]
- [30] Zhang YL, Qin BQ, Zhu GW *et al.* Importance and main ecological and environmental problems of lakes in China. *Chinese Sciences Bulletin*, 2022, **67**: 3503-3519. DOI: 10.1360/TB-2022-0178. [张运林, 秦伯强, 朱广伟等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题. 科学通报, 2022, **67**: 3503-3519.]
- [31] Ba TNS, Cai J, Zhou L *et al.* Removal of nitrogen and phosphorus in the *Phragmites australis* wetland in arid area, China. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(4): 38-42, 47. DOI: 10.13205/j.hjgc.201904008. [巴图那生, 蔡舰, 周蕾等. 干旱地区芦苇湿地对氮、磷营养盐的去除效果及机制. 环境工程, 2019, **37**(4): 38-42, 47.]
- [32] Saimire T, Dilinuer A. Impact of climate change in the Bosten Lake Basin on the Kaidu River runoff. *Climatic and Environmental Research*, **27**(2): 323-332. [赛米热·托合提, 迪丽努尔·阿吉. 博斯腾湖流域气候变化对开都河径流量的影响. 气候与环境研究, 2022, **27**(2): 323-332.]
- [33] Sun YF, Liu WZ. Evaluation on the service functional values of the wetland ecosystem in the Bosten Lake Basin, Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2008, **25**(5): 741-744. DOI: 10.13866/j.azr.2008.05.012. [孙玉芳, 刘维忠. 新疆博斯腾湖湿地生态系统服务功能价值评估. 干旱区研究, 2008, **25**(5): 741-744.]
- [34] Jiang B, Chen YY, Rao EM *et al.* Final ecosystem services valuation of Bosten Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(4): 1113-1120. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2015.0122. [江波, 陈媛媛, 饶恩明等. 博斯腾湖生态系统最终服务价值评估. 生态学杂志, 2015, **34**(4): 1113-1120.]
- [35] Jiang B, Wong CP, Chen YY *et al.* Monitoring indicators and methods for lake wetland ecosystem services. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(10): 2956-2964. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2015.0284. [江波, Wong CP, 陈媛媛等. 湖泊湿地生态服务监测指标与监测方法. 生态学杂志, 2015, **34**(10): 2956-2964.]
- [36] Cui LJ, Pang BL, Li W *et al.* Evaluation of ecosystem services in the Zhalong wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(3): 828-836. DOI: 10.5846/stxb201405161006. [崔丽娟, 庞丙亮, 李伟等. 扎龙湿地生态系统服务价值评价. 生态学报, 2016, **36**(3): 828-836.]
- [37] Zhang XF, Liu ZW, Xie YF *et al.* Evaluation on the changes of ecosystem service of urban lakes during the degradation process: A case study of Xiannü Lake in Zhaoqing, Guangdong Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(6): 2349-2354. [张修峰, 刘正文, 谢贻发等. 城市湖泊退化过程中水生态系统服务功能价值演变评估——以肇庆仙女湖为例. 生态学报, 2007, **27**(6): 2349-2354.]
- [38] Du TT, Luo W, Li ZH *et al.* Evaluation of lake ecosystem services: A case study of Taihu Lake. *China Population, Resources and Environment*, 2012, **22**(S2): 208-211. [杜婷婷, 罗维, 李中等. 湖泊生态系统服务功能价值评估——以太湖为例. 中国人口·资源与环境, 2012, **22**(S2): 208-211.]
- [39] Jiang B, Zhang L, Ouyang ZY. Ecosystem services valuation of Qinghai Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(10): 3137-3144. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20150921.019. [江波, 张路, 欧阳志云. 青海湖湿地生态系统服务价值评估. 应用生态学报, 2015, **26**(10): 3137-3144.]
- [40] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.
- [41] Jiang B, Ouyang ZY, Miao H *et al.* Ecosystem services valuation of the Haihe River Basin wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(8): 2236-2244. [江波, 欧阳志云, 苗鸿等. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价. 生态学报, 2011, **31**(8): 2236-2244.]
- [42] 刘晓丽, 赵然杭, 曹升乐. 城市水系生态系统服务功能价值评估初探. 见: 任立良, 陈喜, 章树安. 环境变化与水安全. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 321-324.
- [43] Yao JQ, Chen J, Tuoliewubiek D *et al.* Trend of climate and hydrology change in Bosten Lake Basin and its influence on the lake level. *Pearl River*, 2021, **42**(4): 19-27. [姚俊强, 陈静, 迪丽努尔·托列吾别克等. 博斯腾湖流域气候水文变化及对湖泊水位的影响研

- 究. 人民珠江, 2021, 42(4): 19-27.]
- [44] Gao HZ, Yao YF. Quantitative effect of human activities on water level change of Bosten Lake in recent 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(3): 3305-3309. [高华中, 姚亦锋. 近 50 年来人类活动对博斯腾湖水位影响的量化研究. 地理科学, 2005, 25(3): 3305-3309.]
- [45] Wan HX, Sun ZD, Wang R. Influence of water level change of Bosten Lake on wetland eco-environment. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(2): 260-266. [万洪秀, 孙占东, 王润. 博斯腾湖水位变动对湿地生态环境的影响. 自然资源学报, 2006, 21(2): 260-266.]
- [46] Peng YF, Li ZQ, Yao XJ *et al.* Area change and cause analysis of Bosten Lake based on multi-source remote sensing data and GEE platform. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(6): 1131-1153. DOI: 10.12082/dqxxkx.2021.200361. [彭妍菲, 李忠勤, 姚晓军等. 基于多源遥感数据和 GEE 平台的博斯腾湖面积变化及影响因素分析. 地球信息科学学报, 2021, 23(6): 1131-1153.]
- [47] Xie Y, Li JS, Li JY *et al.* Progress and prospect of optical remote sensing monitoring of aquatic vegetation in lakes and reservoirs. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2019, 11(5): 52-58. [谢娅, 李俊生, 李景宜等. 湖库水生植被光学遥感监测研究进展和展望. 环境监控与预警, 2019, 11(5): 52-58.]
- [48] Fu AH, Li WH, Chen YN. Analysis on water quality and eutrophication in Bosten Lake. Hongkong: Proceedings of 2012 International Conference on Earth Science and Remote Sensing, 2012: 585-591. [付爱红, 李卫红, 陈亚宁. 博斯腾湖水质及富营养化变化特征分析. 香港: 2012 地球科学与遥感国际会议, 2012: 585-591.]
- [49] Niu T, Wen F, Chang MD *et al.* Study on the inversion of chlorophyll a concentration in Bosten Lake based on TM image. *Technology Innovation and Application*, 2021, 11(26): 7-15. [牛婷, 文方, 常梦迪等. 基于 TM 影像的博斯腾湖叶绿素 a 浓度反演研究. 科技创新与应用, 2021, 11(26): 7-15.]
- [50] Niu T, Chen L, Bai ZL *et al.* Estimation of water clarity based on Landsat-8 data in Lake Bosten. *Environmental Protection of Xinjiang*, 2021, 43(3): 1-9. [牛婷, 陈丽, 白泽龙等. 基于 Landsat-8 数据的博斯腾湖透明度反演. 新疆环境保护, 2021, 43(3): 1-9.]
- [51] Liu B, Wang Q, Zhang HY. Analysis of ecological environment situation and affecting factors of reed biomass in reed wetland of Bosten Lake in Xinjiang. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35(3): 335-339. [刘彬, 王琴, 张海燕. 博斯腾湖芦苇湿地生态环境现状及芦苇生物量影响因素分析. 农业现代化研究, 2014, 35(3): 335-339.]
- [52] Shen XF, Ma W, Luo JC *et al.* Evaluation method of nutritional status and its applicability analysis in lakes and reservoirs. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2013, 11(1): 74-80. [沈晓飞, 马巍, 罗佳翠等. 湖库营养状态评价方法及适用性分析. 中国水利水电科学研究院学报, 2013, 11(1): 74-80.]
- [53] Li T, Ye YP. Evaluation on the eco-service value of Nanhu marsh in Changshu City. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(12): 92-95. [李婷, 叶亚平. 常熟市南湖荡生态服务价值评估. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12): 92-95.]
- [54] Xie ZY, Li WH, Xie ZJ *et al.* Evaluation of the ecological service of Ebinur Lake Wetland Nature Reserve. *Arid Land Geography*, 2011, 34(3): 532-540. [谢正宇, 李文华, 谢正君等. 艾比湖湿地自然保护区生态系统服务功能价值评估. 干旱区地理, 2011, 34(3): 532-540.]
- [55] Liu B, Zhang HY. Birds fauna and diversity in Bosten Lake wetland in Xinjiang. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(7): 160-165. [刘彬, 张海燕. 博斯腾湖湿地鸟类区系及类群多样性分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 160-165.]
- [56] Qian GZ, Wang PC, Zhu LB *et al.* A preliminary analysis of the last twenty-year bird community changes in the Tianmu Shan. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(3): 262-268. [钱国桢, 王培潮, 祝龙彪等. 二十年来天目山鸟类群落结构变化趋势的初步分析. 生态学报, 1983, 3(3): 262-268.]