

# 基于生态系统服务价值的博斯腾湖小湖湿地生态需水核算

彭佳宾<sup>1,2</sup>, 黄 粤<sup>1,2</sup>, 刘 铁<sup>1,2</sup>, 张 勇<sup>3</sup>, 程 勇<sup>4,5</sup>, 姜立新<sup>5</sup>

(1.中国科学院新疆生态与地理研究所,新疆 乌鲁木齐 830011;

2.中国科学院大学,北京 100049;

3.新疆塔里木河流域和田管理局,新疆 和田 848000;

4.新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局,新疆 库尔勒 841000;

5.新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局博斯腾湖管理处,新疆 博湖 841400)

**摘要:**湖泊湿地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,适宜的水文条件保障着湖泊湿地生态系统的健康。以博斯腾湖小湖湿地为例,依据能值理论系统计算湖泊湿地各项生态系统服务价值量,并运用相关分析、层次聚类分析等方法,结合生态系统服务计算结果与4项关键水文参数,综合确定研究区适宜的生态需水范围。结果表明,博斯腾湖小湖湿地生态系统服务价值总量由2013年以前的上下波动(年均增幅-0.2%,其中有7年为负增长)转变为2013年后的持续增加状态(连续6年增加,年均增幅6%);区域来水量则经历了2000-2003年的丰水期、2005-2013年的枯水期以及2013年以来的水量持续增加共3个阶段;生态需水核算结果建议博斯腾湖小湖湿地应保证年度日均流量低于 $8.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 的时间不超过72 d,而一年之中日均流量超过 $20.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 的时间不低于80 d,湿地生态需水量在 $(8.0\sim 8.7)\times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,最适宜生态水位为 $1\ 047.4\sim 1\ 047.6 \text{ m}$ 。利用生态系统服务价值核算湖泊湿地生态需水,可为区域水资源调控提供决策依据。

**关键词:**博斯腾湖;湖泊湿地;生态系统服务;生态需水

**中图分类号:**X143,TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)05-0021-10

作为陆地生态系统的关键组成部分,湿地为自然环境与社会经济提供了一系列重要的服务功能,如调蓄洪水、调节气候、动植物栖息、娱乐观赏和净化水质等(崔保山和杨志峰,2001)。由于湿地生态系统处于陆地与水域的过渡带,兼具陆生与水生动植物资源,对于生物多样性保护具有不可替代的作用;湿地又是较为脆弱的生态系统,来水量的多少直接影响到整个系统的可持续性,维持生态需水量成为保护湿地生态系统的关键手段之一。近年来,多种水文学、水力学及综合性方法被应用到了湿地生态需水的研究当中,其中的数学方法如采用滑动T检验、差比频率分析等对湿地多年水位统计资料进行了均一化检测处理后,再通过水位的概率分布来确定生态需水(梁婕等,2013;赵晓瑜等,2018);此外,还有结合生态水位法、湖泊形态法、水质空间法、

生物空间需求法确定生态需水(李新虎等,2007;刘永泉等,2008;刘文盈和张秋良,2013;程俊翔等,2015)。这些成熟的方法已经成功在国内湖泊湿地研究中得到应用,但如果能综合考虑湿地生态系统服务和水文要素,将有力增强生态需水核算方法的普适性。

博斯腾湖是我国最大的内陆淡水湖,也是重要的优质芦苇产区之一。湖区湿地主要分布在大湖西南角的小湖区,对于当地自然环境与社会经济发展有着重要意义。近年来,由于绿洲农田面积不断扩张,加之上游来水不稳定,导致湿地水位波动剧烈,生态水位得不到保障。前期研究多聚焦于博斯腾湖大湖区的生态需水,研究人员从水质、水量、生境等角度出发,利用化学指标和整体生态系统健康(董雯等,2014;胡春明等,2019)、植被遥感动态监测(王影等,2010;买尔哈巴·买买提汗等,2016)、结合形态法和专家打分法(李新虎等,2007)以及水位法和芦苇适宜生境(Ye et al,2017)等方法确立湖区的适宜生态需水。上述研究对博斯腾湖大湖区水位调控提供了良好的参考,但由于大湖区与小湖湿地已长期水力隔绝,大小湖水位存在明显差异,大湖区相关研究成果难以应用到小湖区湿地生态系统。

**收稿日期:**2020-05-22

**基金项目:**国家重点研发计划(2017YFC0404501);新疆维吾尔自治区区域协同创新专项(2020E010110)。

**作者简介:**彭佳宾,1991年生,男,在读博士研究生,研究方向为生态水文学。E-mail:smilence2013@gmail.com

**通信作者:**刘铁,1977年生,男,研究员,主要从事水文学水资源研究。E-mail:liutie@ms.xjb.ac.cn

千年生态评估(Millennium Ecosystem Assessment, MEA)对生态系统服务提出了分类建议,即将生态系统服务分为支持服务、供给服务、调节服务和文化服务共四大类(Finlayson et al, 2005)。本研究以上述生态系统服务类型为依据,结合能值理论(Odum, 1996),逐个量化博斯腾湖小湖湿地的各项生态系统服务,并采用层次分类方法,系统地确定博斯腾湖小湖湿地的生态需水,为湖泊湿地水文调控提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

博斯腾湖小湖地处中国天山南麓焉耆盆地南部,与博斯腾湖大湖区相邻(图1中的湿地部分),上

游接纳开都河西支及众多农田排渠的来水,下游出流与解放一渠、大湖区出流一起汇入孔雀河。小湖湿地面积约为 342 km<sup>2</sup>,约为大湖区面积的 1/3。自 1991 年以来的监测数据显示,小湖区多年平均水位 1 047.07 m 明显高于大湖区平均水位 1 046.70 m。研究区气候类型属温带大陆性气候,干旱少雨、蒸发量大。历史气象资料显示,研究区多年平均气温为 9.64℃,多年平均降水量为 67.16 mm。

博斯腾湖小湖湿地植被类型以长苞香蒲(*Typha angustata*)、芦苇(*Phragmites australis*)和狭叶香蒲 *Typha angustifolia*)等挺水植物为主(张海燕和刘彬, 2015);其中,芦苇年产量达 20 万 t。湿地内有多处旅游景点,其中阿洪口景点为国家 5A 级旅游景区。

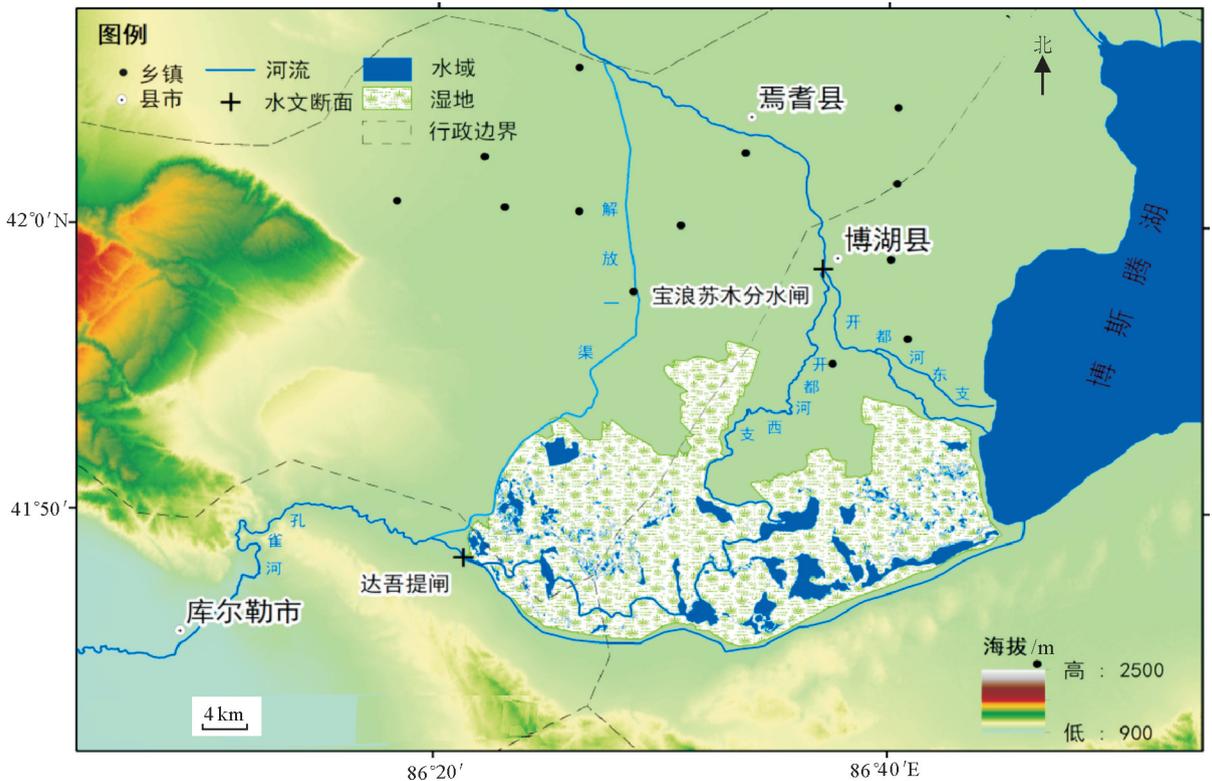


图1 博斯腾湖湿地及其周边

Fig.1 Small lake wetland of Bosten Lake and the surrounding area

### 1.2 数据来源

本研究所使用的水文数据(包括博斯腾湖达吾提闸水位数据和开都河宝浪苏木闸流量数据)来源于新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局博斯腾湖管理处;气象数据来源于新疆维吾尔自治区气象局;博斯腾湖小湖湿地的湖面面积与库容曲线等数据采用遥感测量加现场实时差分测量验证的方式获得;植物初级生产力数据由中国科学院新疆生态与地理研究所提供,采用法国空间研究中心的 SPOT 遥感数据

并经地面验证计算得到,时间选择 1998 - 2019 年,空间分辨率为 250 m。因未能获得研究区早于 1998 年的植被数据,故本研究的时间跨度为 1998 - 2019 年;同时,由于受湿地植物生长周期的影响,本研究的生态系统服务价值核算周期为 1 年。

### 1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值核算方法 对于博斯腾湖小湖湿地,生态系统服务可分为支持服务(初级生产力支持、生物多样性支持和物质循环支持)、供给

服务(水生植物供给和水产供给)、调节服务(局地气候调节、洪水调节、水资源净化和固碳释氧)和文化服务(科学研究和旅游业), 合计 11 个小类。根据能值理论, 所有服务类型均被转化为能值(以下称价值量)单位; 其中, 支持服务在本研究中与其他服务相重叠, 为避免重复计算, 故略去。

1) 供给服务。由于博斯腾湖小湖区鱼类产量较小且缺乏统计数据, 所以供给服务主要为水生植物的原材料供给。博斯腾湖小湖区的主要植物类型为芦苇, 其原材料供给价值可以通过以下公式(Odum, 1996)计算:

$$E_{11} = A_{\text{veg}} \times Q_{\text{veg}} \times k_c \times u_c \times 4186 \times Tr_{\text{veg}} \quad (1)$$

式中:  $A_{\text{veg}}$  为博斯腾湖小湖区的芦苇总面积 ( $\text{m}^2$ );  $Q_{\text{veg}}$  为植物初级生产力 ( $\text{g}/\text{m}^2$ , 干重);  $k_c$  为碳含量 (%);  $u_c$  为标准碳热量 (33.472 kJ);  $Tr_{\text{veg}}$  为芦苇的价值量转换率 ( $4.7 \times 10^3 \text{ sej}/\text{J}$ )。

2) 调节服务。包括气候调节、固碳、释氧、净化水源等服务, 气候调节通过蒸发进行, 可通过以下公式(Odum, 1996; Odum et al, 2000)计算:

$$E_{21} = A_{\text{water}} \times Z_{\text{evp}} \times \rho_{\text{water}} \times J_{\text{water}} \times Tr_{\text{water}} \quad (2)$$

式中:  $A_{\text{water}}$  为博斯腾湖小湖区水面面积 ( $\text{m}^2$ );  $Z_{\text{evp}}$  为年均蒸发量 (mm);  $\rho_{\text{water}}$  为水的密度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ );  $J_{\text{water}}$  为水的吉布斯自由能 (4.94 J/g);  $Tr_{\text{water}}$  为蒸发的价值量转换率 ( $1.5 \times 10^4 \text{ sej}/\text{J}$ )。

植物固碳和氧气释放服务计算公式(木村允, 1981; 杨青和刘耕源, 2018)如下:

$$E_{22} = A \times (\text{NPP}/0.614) \times u_c \times 4186 \times Tr_{\text{oc}} \quad (3)$$

$$E_{23} = A \times (\text{NPP}/0.614) \times (32/44) \times u_c \times 4186 \times Tr_{\text{oc}} \quad (4)$$

式中:  $A$  为博斯腾湖小湖区总面积 ( $\text{m}^2$ );  $\text{NPP}$  为植被净初级生产力 ( $\text{g}/\text{m}^2$ , 干重); 0.614 为  $\text{CO}_2$  的 NPP 转换系数; 44 和 32 分别是  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2$  的分子量;  $u_c$  为标准碳热量 (33.472 kJ);  $Tr_{\text{oc}}$  为固碳释氧的价值量转换率 ( $8.3 \times 10^3 \text{ sej}/\text{J}$ )。

芦苇能够有限地去除浅滩上的营养物质(Zhao et al, 2012)。本研究中包括芦苇对氮、磷等营养物的去除以及对湖水的脱盐作用, 计算公式(陈牧霞等, 2014)如下:

$$E_{24} = \sum (A \times \text{NPP} \times C_i \times Tr_i) \quad (5)$$

式中:  $A$  为博斯腾湖小湖区总面积 ( $\text{m}^2$ );  $\text{NPP}$  为植被净初级生产力 ( $\text{g}/\text{m}^2$ , 干重);  $C_i$  为单位芦苇干重中第  $i$  种营养物质或盐类的含量 (%);  $Tr_i$  为第  $i$  种营养物质或盐类的价值量转换率 ( $\text{sej}/\text{g}$ ); 本项目研究中对应的营养物质价值量转换率氮、磷均为  $3.8 \times$

$10^9 \text{ sej}/\text{g}$ , (赵晟等, 2007), 脱盐的价值量转换率为  $1.0 \times 10^9 \text{ sej}/\text{g}$  (Andres, 2001)。

洪水调节服务计算公式(毛德华等, 2014)如下:

$$E_{25} = V_{\text{water}} \times (\rho_{\text{water}} \times J_{\text{water}} \times Tr_{\text{che}}) \quad (6)$$

式中:  $V_{\text{water}}$  为可用于容纳洪水的容量 ( $\text{m}^3$ );  $\rho_{\text{water}}$  为水的密度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ );  $J_{\text{water}}$  为水的吉布斯自由能 (4.94 J/g);  $Tr_{\text{che}}$  为河流势能和动能的价值量转换率 ( $4.1 \times 10^4 \text{ sej}/\text{g}$ )。

3) 文化服务。主要包括科学研究与旅游业服务。

科学研究服务计算公式(Meillaud et al, 2005)如下:

$$E_{31} = P \times Tr_{\text{paper}} \quad (7)$$

式中:  $P$  为发表论文的总页数;  $Tr_{\text{paper}}$  为每页论文的价值量转化率 ( $3.39 \times 10^{15} \text{ sej}/\text{page}$ )。

旅游业服务计算公式(毛德华等, 2014)如下:

$$E_{32} = N \times F_{\text{tour}} \times Tr_{\text{rmb}} \quad (8)$$

式中:  $N$  为旅游人数;  $F_{\text{tour}}$  为人均门票费用 (元);  $Tr_{\text{rmb}}$  为中国单位货币的价值量转化率, 考虑到通货膨胀因素, 其值应为变化量。

1.3.2 层次聚类法 在本研究案例中, 湖泊水位及入流量等水文参数多年以来的数值分布较为连续, 简单的分析方法难以将其进行分类。经过对各种分类方法的学习和比较, 并参照相关案例研究, 本研究认为自下而上的层次聚类分析方法, 可以对湖泊湿地的水文生态相关数据进行有效分类, 从而能够更准确地判断湖泊湿地的生态需水、生态水位等相关参数。

层次聚类是在不同层次上对数据进行划分, 从而形成树状的聚类结构。AGNES 算法是自底向上的层次聚类算法。首先将数据集中的每个样本初始化为一个簇, 然后找到距离最近的两个簇, 将其合并并且不断重复这个过程, 直到达到预设的聚类数目为止。

AGNES 算法计算距离的 3 个公式如下:

$$d_{\text{avg}}(C_i, C_j) = \frac{1}{|C_i| |C_j|} \sum_{C_i} \sum_{C_j} \text{dist}(x, z) \quad (9)$$

$$d_{\text{min}}(C_i, C_j) = \min_{x \in C_i, x \in C_j} \text{dist}(x, z) \quad (10)$$

$$d_{\text{max}}(C_i, C_j) = \max_{x \in C_i, x \in C_j} \text{dist}(x, z) \quad (11)$$

式中:  $C_i, C_j$  为聚类簇;  $d_{\text{avg}}(C_i, C_j)$ ,  $d_{\text{min}}(C_i, C_j)$  和  $d_{\text{max}}(C_i, C_j)$  分别为两个簇之间的平均距离、最小距离和最大距离。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态系统服务价值核算

1998年以来,由于自然因素和人为因素的影响,博斯腾湖小湖湿地生态系统服务价值波动较大,1998-2019年生态系统服务价值量各分项变化趋势见图2。其中,就单项生态系统服务而言,水生植物供给、植物固碳、氧气释放、净化水源4项服务均由水生植物提供,因此这4项服务的变化趋势几乎一致(图2-a,c,d,e)。气候调节服务价值量波动虽

大,但并无显著的上升或下降趋势(线性相关系数为0.03,且未通过显著性检验);值得注意的是,其价值量在2003年出现了异常的低值(图2-b),洪水调蓄服务价值总体呈下降趋势(图2-f),充足的来水量是湖泊洪水发挥调蓄作用的前提,因此洪水调蓄服务价值量在21世纪初的丰水年期间达到最高,而在2013年左右的枯水期时降至最低;科学研究和旅游观赏的价值量主要由人为主导,一直处于不断攀升的状态(图2-g,h),尤其是旅游服务,其价值量在近22年增加了80多倍。

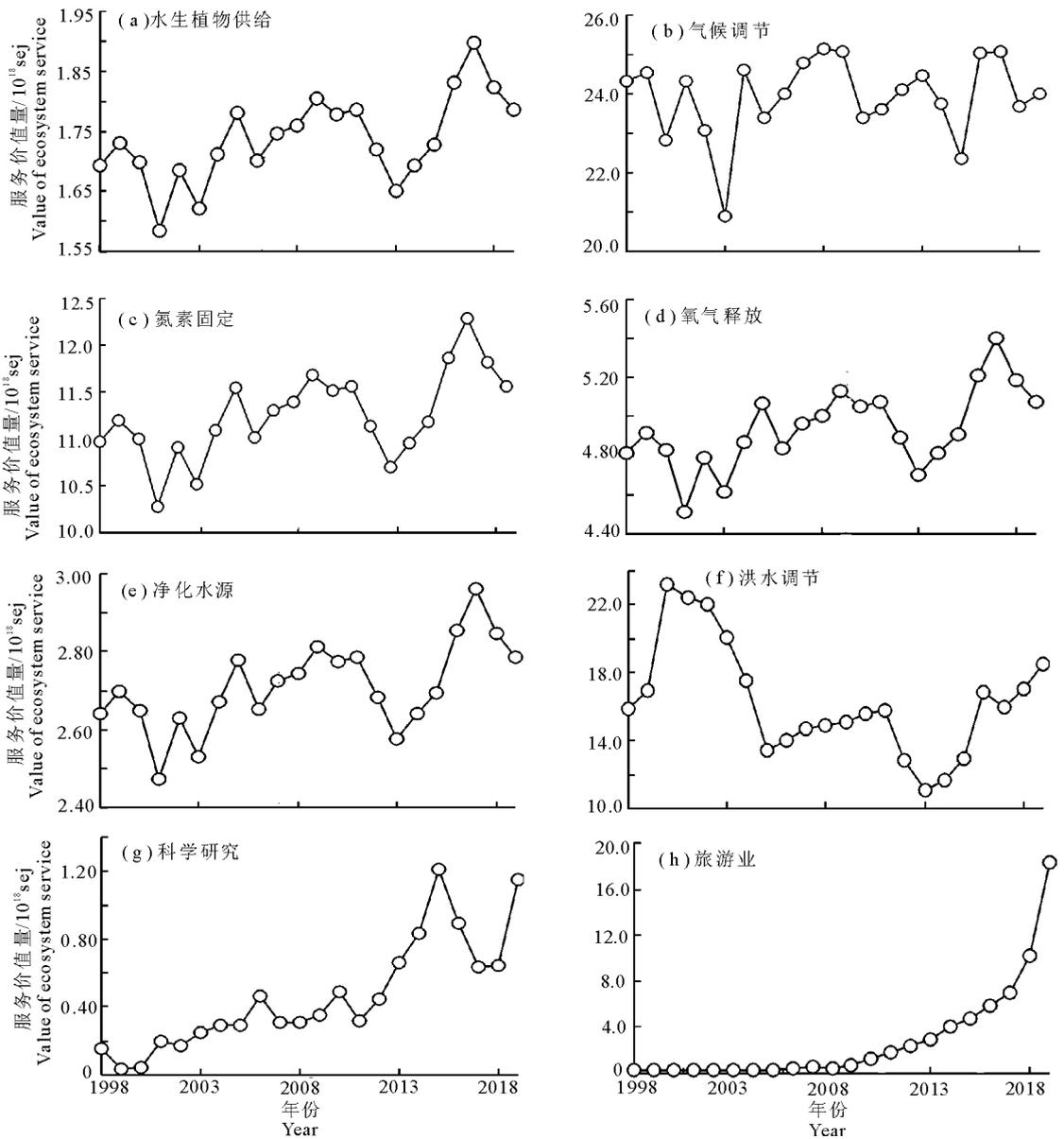


图2 博斯腾湖小湖湿地1998-2019年生态系统服务价值量各分项变化趋势

Fig.2 Value trend of each sub item of ecosystem service in Bosten Lake wetland (1998 - 2019)

就三大类服务而言,调节服务和文化服务则可以看作是湖泊湿地自然属性与社会经济属性的体现,1998年以来,调节服务从一开始的上下波动、到

后来逐渐趋于平稳上升(图3-a),除在2013年出现特大枯水年之外,其价值量一直处于稳步上升状态,近5年的增加速率约为 $9.25 \times 10^{18}$  sej/a;文化服务

价值量一直处于上升状态,且增幅越来越大,22 年的平均增加速率为  $9.12 \times 10^{17}$  sej/a,近 5 年增加速率达到了  $2.92 \times 10^{18}$  sej/a。总的来说,湿地生态系统服务价值总量在经历了波动之后呈不断上升趋势(图 3-b)。

## 2.2 与生态需水计算有关的水文参数

生态需水需要通过相关的水文参数来表征,参考相关文献并结合研究区的实际情况,本研究重点关注湖泊湿地上游来水的年入流量、洪水天数、干旱天数以及湖泊的年均水位(Yang & Yang, 2014)。由于博斯腾湖小湖湿地的入口处并无水文监测站点,故湖泊入流量采用相距约 15 km 处的开都河宝浪苏木水文站的年流量代替;洪水时日和干旱时日则根据水文站统计资料中日径流的出现频率获得,

对于博斯腾湖小湖湿地,定义洪水时日为一年之中日均流量超过  $20.8 \text{ m}^3/\text{s}$  的天数,干旱时日则定义为一年之内日均流量低于  $8.3 \text{ m}^3/\text{s}$  的天数(陶辉等, 2007)。年平均水位指一个日历年的湖泊表面平均水位,本文采用小湖区出口处达吾提闸的年均水位。图 4 表示 1998 年以来 4 项水文参数的变化情况。湖泊年入流量以及湖泊年均水位均为当年湖泊湿地水资源量的直接体现,因此二者的变化趋势较为相似(图 4-a),两项数据均在 21 世纪初的开都河丰水年份出现了高峰,在 2005 年及 2013 年附近出现了明显的低谷,并在近 6 年呈现稳步上升状态(2013-2019 年)。干旱天数与洪水天数则呈现出此消彼长的关系(图 4-b),其中干旱天数在 2005 年和 2008 年出现了两个明显的高峰。

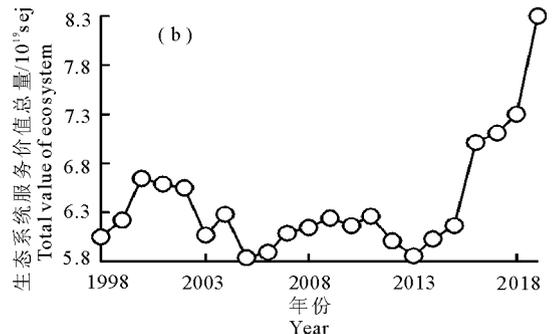
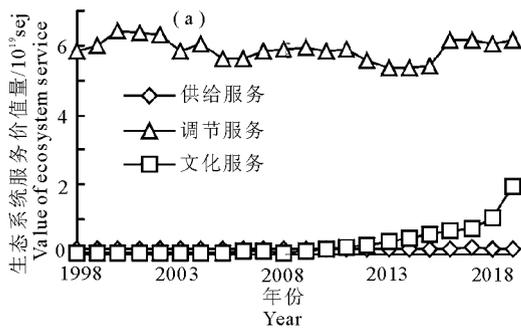


图 3 博斯腾湖小湖湿地 1998-2019 年不同类别生态系统服务价值量变化趋势

Fig.3 Value change trends of different ecosystem service types in small lake wetland of Bosten Lake (1998-2019)

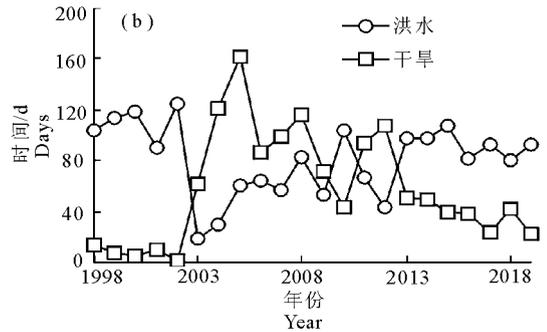
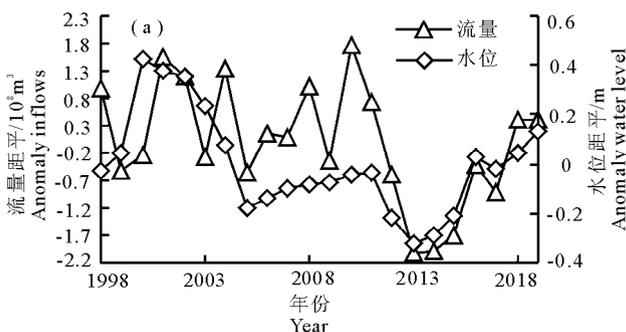


图 4 博斯腾湖流域 1998-2019 年水文要素变化情况

Fig.4 Variation of hydrological parameters in Bosten Lake basin (1998-2019)

## 2.3 水文参数与生态系统服务价值量的相关关系

分别将 3 种生态系统服务类型与 4 项水文参数进行相关分析,并通过其相关程度及类型来筛选适合的生态系统服务(图 5)。结果表明,调节服务与 3 项水文参数的相关关系较为显著,其中与干旱天数呈显著的负相关( $R^2=0.25, P=0.05$ ),与入流量存在着显著的正相关( $R^2=0.32, P=0.01$ ),调节服务与湖泊水位的相关系数达到了 0.99;然而,调节服务价值量中的主要部分由湖泊湿地库容直接参与

计算,而库容又由水位直接决定,因此调节服务与平均水位强自相关。就供给服务而言,平均水位与其相关系数为  $R^2=0.43(P=0.01)$ ,入流量与供给服务的相关性系数为  $R^2=0.27(P=0.1)$ ,而干旱天数及洪水天数与供给服务的相关系数分别为 0.23 与 0.14,且均未通过显著性检验;此外,相关分析结果还表明,由于文化服务主要由人为主导,与水文参数的相关性很小(与 4 项水文参数的相关系数分别为 0.03、0.07、0.02、0.01,均小于 0.1),因此无法通过文

化服务来判断小湖湿地的生态需水范围。

### 2.4 生态系统供给服务价值的层次分类

供给服务层次聚类分析结果表明(图6),各项

水文参数与供给服务价值量的关系可被分为0、1、2共计3个层次。虽然干旱天数、洪水天数与供给服务相关关系并不显著,但层次聚类的分析结果仍可

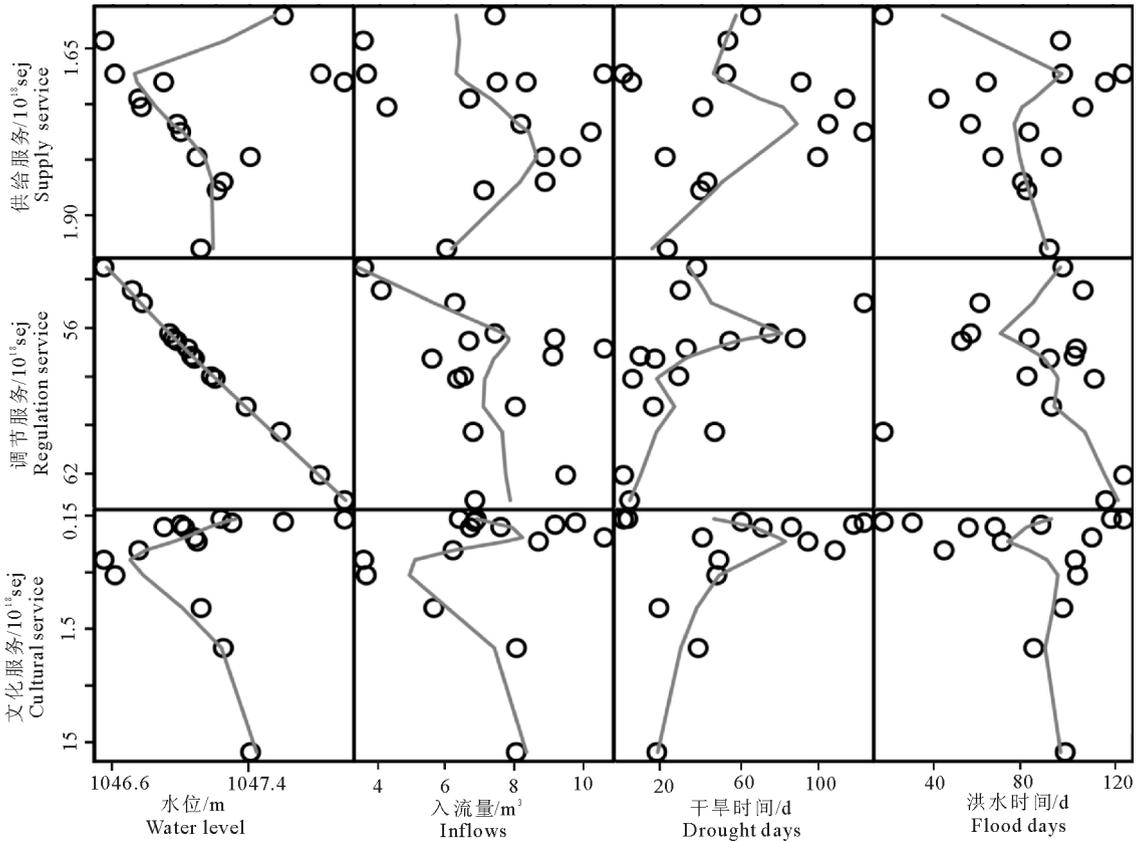
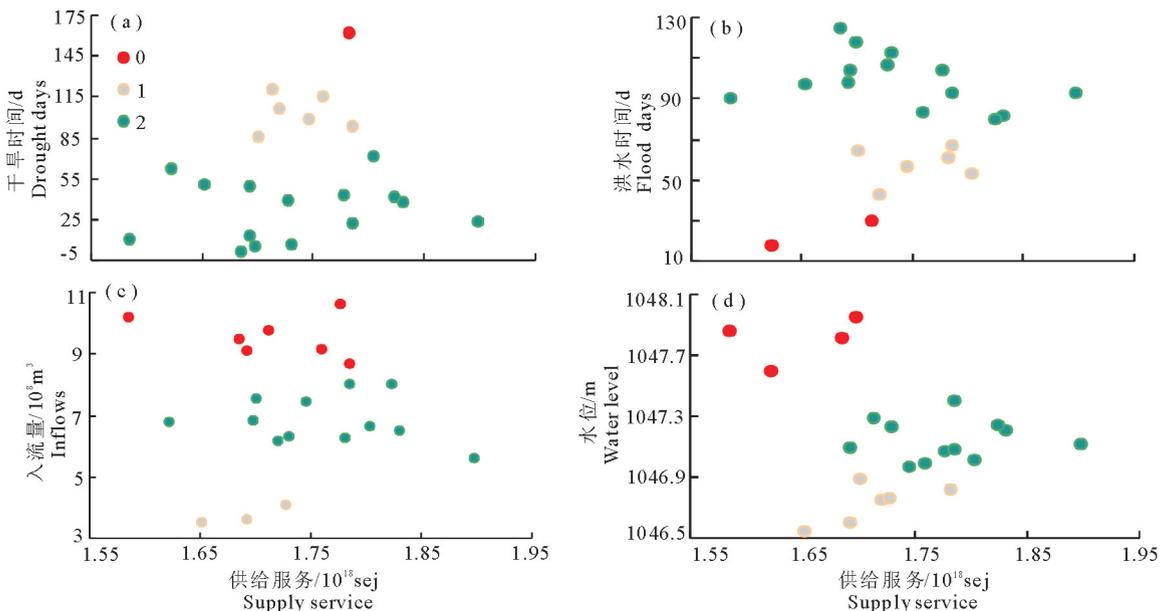


图5 供给服务、调节服务、文化服务与各项水文参数的相关关系

Fig.5 Relationship between supply service, regulation service, cultural service and hydrological parameters



(a) 干旱天数; (b) 洪水天数; (c) 入流量; (d) 湖泊水位

图6 供给服务与不同水文参数间的层次聚类分析结果

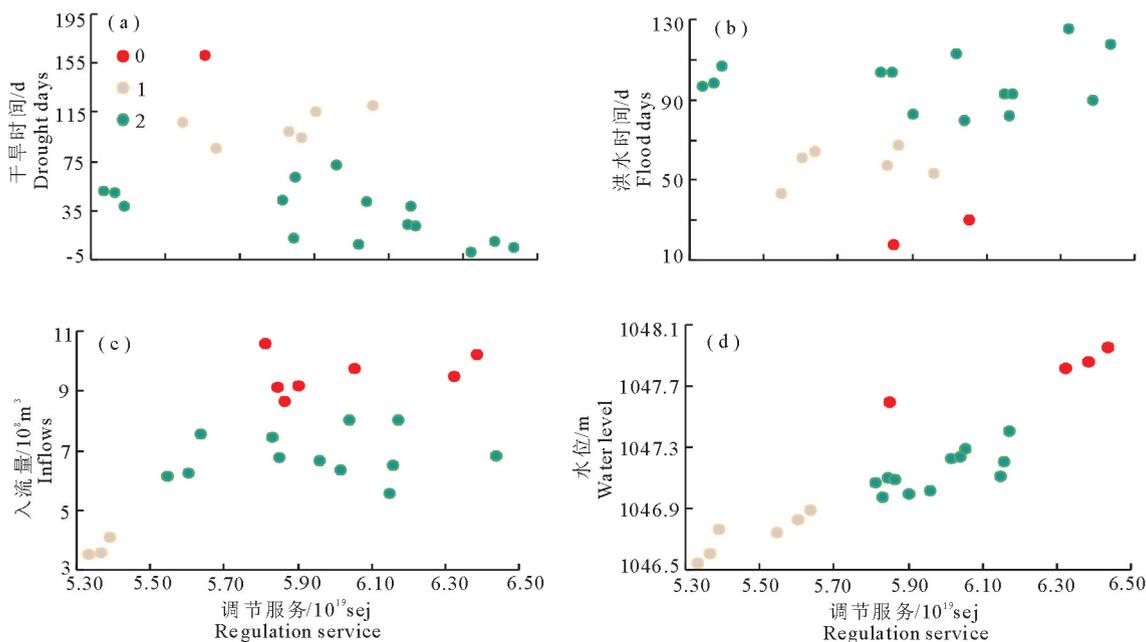
(a) drought days; (b) flood days; (c) inflows; (d) water level

Fig.6 Results of hierarchical cluster analysis between supply service and each hydrological parameter

作为参考。图 6-a 表明, 当干旱天数位于第三层次时, 更可能获得较多的服务价值, 即一年之内日均流量低于  $8.3 \text{ m}^3/\text{s}$  的天数不超过 72 d; 图 6-b 表明, 当洪水天数位于第一层次时更可能获得较多的服务价值, 即一年之中日均流量超过  $20.8 \text{ m}^3/\text{s}$  的天数不低于 80 d; 供给服务与年入流量及年均水位呈现出二次多项式相关关系, 表明水文参数位于图中的第二层次时, 最可能获得较多的服务价值。因此由图 6-c 可确定在供给服务下, 博斯腾湖小湖湿地最适宜的年入流量(生态需水)为  $(5.6 \sim 8.0) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ; 由图 6-d 可确定供给服务下, 博斯腾湖小湖湿地最适宜的年均水位, 即生态水位, 范围为  $1\ 047.0 \sim 1\ 047.4 \text{ m}$ 。

调节服务层次聚类分析结果表明(图 7), 各项

水文参数与调节服务价值量的关系可被分为 0、1、2 共计 3 个层次。图 7-a 可见, 当干旱天数位于第三层次时更可能获得较多的服务价值, 即一年之内日均流量低于  $8.3 \text{ m}^3/\text{s}$  的天数不超过 72 d; 图 7-b 表明, 当洪水天数位于第一层次时更可能获得较多的服务价值, 即一年之中日均流量超过  $20.8 \text{ m}^3/\text{s}$  的天数不低于 80 d; 调节服务与年入流量及年平均水位呈现出线性递增关系, 表明水文参数位于图中的第一层次范围内时, 最可能获得较多的服务价值。因此, 由图 7-c 可确定调节服务最优的情况下, 博斯腾湖小湖湿地最适宜的年入流量, 即生态需水不低于  $8.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ; 由图 7-d 可确定调节服务最优情况下, 博斯腾湖小湖湿地最适宜的年均水位, 即生态水位不低于  $1\ 047.6 \text{ m}$ 。



(a) 干旱天数; (b) 洪水天数; (c) 入流量; (d) 湖泊水位

图 7 调节服务与不同水文参数间的层次聚类分析

(a) drought days; (b) flood days; (c) inflows; (d) water level

Fig.7 Results of hierarchical cluster analysis between regulation service and each hydrological parameter

### 3 讨论

#### 3.1 生态系统服务价值量反映自然社会属性变化

生态系统服务价值量各个小项的变化是由其自身特点所决定的, 如气候调节服务在 2003 年的异常低值与当年的气温异常偏低有关, 根据当地气象站的实测数据, 2003 年平均气温为  $8.31^\circ\text{C}$ , 为近 22 年来最低; 而洪水调蓄服务则是受到了自然因素和人为因素的双重影响, 博斯腾湖流域的多项研究指出, 21 世纪初历史级的丰水年是由气候因素主导的 (Chen et al, 2008; Li et al, 2011), 而大量来水也使

得湿地的洪水调蓄服务得以充分的发挥。洪水调蓄所属的调节服务也是博斯腾湖小湖湿地所占比重最高的生态服务类型, 这一结果与小湖区之前的研究较为吻合; 相比之下, 博斯腾湖大湖区的调节服务价值量占比更高, 这与大湖区较大的库容量与较小的植被覆盖度有关 (江波等, 2015; 祖皮艳木·买买提等, 2016)。

在 2010 年以前, 其生态系统服务总量更多地体现了其自然属性, 此时天然芦苇所提供的供给服务价值量要高于文化服务价值量, 服务价值总量也起伏波动; 2010 年以后, 随着研究区旅游收入不断增

加,湿地来水与出水的调控更加精细,此时的生态系统服务价值总量则更多地体现了其社会经济属性。与此同时,人类过多地干扰也为湿地带来了诸多环境问题,这也是其在学术研究领域越来越受到关注的原因之一。总体而言,社会经济属性主导下的小湖湿地,其价值总量要远超过自然状态,表明人类对湖泊湿地的科学管理可最大化地发挥其生态系统服务价值。

### 3.2 生态系统供给服务更具有生态学意义

湖泊湿地最直观的水文参数为入流量和湖泊水位,需要说明的一点是,除入流量之外,博斯腾湖小湖湿地的年均水位还与湿地出流量、蒸发量、与博斯腾湖大湖的交换量、内部植物损耗等因素有关,因此小湖湿地水位、入流量的变化趋势并非完全一致。洪水天数和干旱天数这一对数据除了反映水资源量的多少以外,更重要的是其能够体现出水资源的年内分布状况,这与该地区极端天气出现的频率密切相关。如干旱天数在2005年和2008年出现的两个高峰,与此相对应的是2005年塔河流域出现了严重的旱灾,受灾面积达444 hm<sup>2</sup>,为30年内最大(覃新闻,2013);而在2008年,虽然当年的总来水量处于较高水平(图4-b),但水资源的分布不均仍然在局部地区造成了旱灾。

供给服务与入湖水量、平均水位两项水文参数呈现出典型的二次多项式相关关系,即在水文参数数值偏低时,随之增加而增加;而在水文参数增加到一定量时,又随之增加而减小。这种关系与水生植物的生长特性有关,过多或过少的水量均可抑制水生植物的生长,从而影响其生态系统服务(仲启铖等,2014)。因此,本研究认为供给服务最适合被用来建立湖泊湿地的生态-水文响应关系,而有效的生态-水文响应机制则是确定湿地生态需水的关键(杨薇等,2020)。对于本研究案例而言,调节服务又是其生态系统服务的主要类型。因此,本研究最终的生态需水量是综合考虑调节服务与供给服务来确定的。

### 3.3 生态需水核算受方法选取及数据精度影响

综合来说,最终的生态需水指标范围应使得生态系统服务价值量能达到最大。就本研究而言,价值量大小顺序为:调节服务>文化服务>供给服务,由于文化服务不由水文参数决定,因此以调节服务为标准获得的生态需水范围可使生态系统服务最大化。然而,在本研究中,调节服务的主要部分为洪水调蓄服务,这就导致了调节服务与各个水文参数的

相关关系呈现为单纯的线性递增(递减)关系,由此获得越多的生态系统服务,就需要越来越多的上游来水以及越来越高的湖泊湿地水位,这样不但不利于湿地水生植物的生长,还将威胁到湖泊湿地与堤防安全。因此,本研究生态需水的确定,最后综合考虑了供给服务与调节服务,将生态需水的范围确定在二者之间。

即使在同一区域,不同的研究方法也可能造成最终的生态需水核算结果出现差异(杨薇等,2020)。李卫红等(2012)采用1987-2000年的观测资料,建立了小湖区库容与芦苇面积的关系曲线,最终确定小湖湿地的生态水位为1 046.5 m;Ye等(2017)通过历史资料中的水位频率最终确定小湖湿地的生态水位为1 045.7~1 048.0 m。受数据精度、方法选取差异的影响,本研究最终确定的博斯腾湖小湖湿地生态水位为1 047.4~1 047.6 m,生态需水量则为(8.0~8.7)×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a。显然,略微偏高的年均水位并非湿地内植被生长的最佳水位,这是由于考虑到湿地的洪水调节服务所致。然而,对于整个湿地生态系统的价值总量而言,本研究所确定的生态需水及生态水位是合理的。

### 参考文献

- 陈牧霞,马燕武,孙世萍,等,2014. 新疆博斯腾湖水生植物氮、磷及盐分含量分析[J]. 干旱区研究, 31(5):844-849.
- 程俊翔,徐力刚,吴睿,等,2015. 东洞庭湖最低生态水位研究[J]. 江西科学, 33(6):932-937.
- 崔保山,杨志峰,2001. 湿地生态系统健康研究进展[J]. 生态学杂志, 20(3):31-36.
- 董雯,崔保山,海米提·依米提,等,2014. 基于不同盐度目标的博斯腾湖需水量研究[J]. 干旱区地理, 37(5):901-907.
- 胡春明,娜仁格日乐,尤立,2019. 基于水质管理目标的博斯腾湖生态水位研究[J]. 生态学报, 39(2):748-755.
- 江波,陈媛媛,饶恩明,等,2015. 博斯腾湖生态系统最终服务价值评估[J]. 生态学杂志, 34(4):1113-1120.
- 李卫红,陈忠升,李宝富,等,2012. 新疆开都-孔雀河流域绿洲需水量与稳定性分析[J]. 冰川冻土, 34(6):1470-1477.
- 李新虎,宋郁东,张奋东,等,2007. 博斯腾湖最低生态水位计算[J]. 湖泊科学, 19(2):177-181.
- 梁婕,彭也茹,郭生练,等,2013. 基于水文变异的东洞庭湖湿地生态水位研究[J]. 湖泊科学, 25(3):330-334.
- 刘文盈,张秋良,2013. 内蒙古沙漠盐沼湿地最低生态水位研究[J]. 广东农业科学, 40(23):150-152,166.

- 刘永泉, 王晓峰, 吴颜, 2008. 艾比湖最低生态水位研究[J]. 干旱区资源与环境, 22(10): 111 - 114.
- 买尔哈巴·买买提汗, 玉素甫江·如素力, 安尼瓦尔·阿布都热依木, 等, 2016. 近 26 a 博斯腾湖芦苇湿地的动态监测及其驱动因素[J]. 干旱区研究, 33(4): 797 - 804.
- 毛德华, 胡光伟, 刘慧杰, 等, 2014. 基于能值分析的洞庭湖区退田还湖生态补偿标准[J]. 应用生态学报, 25(2): 525 - 532.
- 木村允, 1981. 陆地植物群落的生产量测定法[M]. 北京: 科学出版社: 58 - 118.
- 覃新闻, 2013. 塔河流域干旱预警及灾害效应风险评估[M]. 南京: 东南大学出版社: 78 - 79.
- 陶辉, 宋郁东, 邹世平, 2007. 开都河天山出山径流量年际变化特征与洪水频率分析[J]. 干旱区地理, 30(1): 43 - 48.
- 王影, 李新国, 李会志, 等, 2010. 博斯腾湖小湖区湿地变化及其保护对策研究[J]. 海洋湖沼通报, (2): 123 - 129.
- 杨青, 刘耕源, 2018. 森林生态系统服务价值非货币量核算: 以京津冀城市群为例[J]. 应用生态学报, 29(11): 3747 - 3759.
- 杨薇, 赵彦伟, 刘强, 等, 2020. 白洋淀生态需水: 进展及展望[J]. 湖泊科学, 32(2): 294 - 308.
- 张海燕, 刘彬, 2015. 博斯腾湖湖滨湿地植被数量分类与排序[J]. 植物科学学报, 33(1): 36 - 43.
- 赵晟, 洪华生, 张珞平, 等, 2007. 中国红树林生态系统服务的能值价值[J]. 资源科学, 29(1): 147 - 154.
- 赵晓瑜, 杨培岭, 任树梅, 等, 2018. 基于生态水位差比法的高海拔湿地生态环境需水量研究——以乌梁素海湿地为例[J]. 灌溉排水学报, 37(5): 59 - 65.
- 仲启铖, 王江涛, 周剑虹, 等, 2014. 水位调控对崇明东滩围垦区滩涂湿地芦苇和白茅光合、形态及生长的影响[J]. 应用生态学报, 25(2): 408 - 418.
- 祖皮艳木·买买提, 赛迪古丽·哈西木, 玉米提·哈力克, 等, 2016. 1976 - 2011 年博斯腾湖小湖区湿地生态系统服务价值变化分析[J]. 水土保持研究, 23(3): 328 - 332, 337.
- Andres B, 2001. Emergy evaluation of water[D]. Gainesville: University of Florida: 223.
- Chen X, Wu J, Hu Q, 2008. Simulation of Climate Change Impacts on Streamflow in the Bosten Lake Basin Using an Artificial Neural Network Model[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 13(3): 180 - 183.
- Finlayson M, Cruz R D, Davidson N, et al, 2005. Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis[M]. St. Louis: Island Press: 7.
- Li X, Li L, Guo L, et al, 2011. Impact of climate factors on runoff in the Kaidu River watershed: path analysis of 50 - year data[J]. Journal of Arid Land, 3(2): 132 - 140.
- Meillaud F, Gay J B, Brown M T, 2005. Evaluation of a building using the emergy method[J]. Solar Energy, 79(2): 204 - 212.
- Odum H T, 1996. Environmental accounting: emergy and environmental decision making[M]. New York: Wiley Press: 23 - 178.
- Odum H T, Wojcik W, Pritchard L J, et al, 2000. Heavy metals in the environment: using wetlands for their removal[M]. Boca Raton: CRC Press: 29.
- Yang W, Yang Z, 2014. Integrating ecosystem-service tradeoffs into environmental flows decisions for Baiyangdian Lake[J]. Ecological Engineering, 71(1): 539 - 550.
- Ye Z, Li W, Chen Y, et al, 2017. Investigation of the safety threshold of eco-environmental water demands for the Bosten Lake wetlands, western China[J]. Quaternary International, 440: 130 - 136.
- Zhao Y, Yang Z, Xia X, et al, 2012. A shallow lake remediation regime with Phragmites australis: Incorporating nutrient removal and water evapotranspiration[J]. Water Research, 46(17): 5635 - 5644.

(责任编辑 万月华)

## Ecological Water Requirement Accounting of Small Lake Wetland of Bosten Lake based on Ecosystem Services Value

PENG Jia-bin<sup>1,2</sup>, HUANG Yue<sup>1,2</sup>, LIU Tie<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong<sup>3</sup>, CHENG Yong<sup>4,5</sup>, JIANG Li-xin<sup>5</sup>

(1.Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011,P.R.China;

2.University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049,P.R.China;

3.Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau Hotan Administration, Hotan 848000,P.R.China;

4.Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau Bayingol Administration, Korla 841000,P.R.China;

5.Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau Bayingol Administration Bosten Lake Management Office, Bohu 841400,P.R.China)

**Abstract:** Lake wetland ecosystems are an essential part of terrestrial ecosystems, and suitable hydrological conditions are the key factor for the health of lake wetlands. Taking the small lake wetland of Bosten Lake as a case study, we systematically assessed the value of ecosystem services for the small lake wetland using emergy theory. The ecosystem service value was then combined with four hydrological parameters (water level, inflow, drought days and flood days), the ecological water requirement range of the study area was determined using correlation analysis and hierarchical cluster analysis. The study period was 22 years (1998–2019) and data resources for the study included the primary productivity of plants, water area and storage capacity of the small lake wetland, as well as hydrological and meteorological data. The total value of ecosystem services fluctuated widely from 1998 to 2013 and then increased continuously from 2013 to 2019. Regional hydrological conditions fell into three periods: wet years (2000–2003), dry years (2005–2013) and runoff escalation years (2013–2019). The ecological water requirements of the wetland was  $(8.0 - 8.7) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  and the optimal ecological water level range was 1 047.4–1 047.6 m. Finally, recommendations were made to help insure that the ecological water requirement of the small lake wetland is maintained in order to protect wetland health and ecosystem services: days with average flow  $< 8.3 \text{ m}^3/\text{s}$  should not exceed 72 days per year, while days with average flow  $> 20.8 \text{ m}^3/\text{s}$  not be less than 80 days per year. This study provides scientific guidance for regulating water resources in the Bosten Lake region.

**Key words:** Boston Lake; lake wetland; ecosystem services; ecological water requirement