

## 近十年青海湖水生态系统生产总值变化及其影响因素\*

李沁园<sup>1,2</sup>, 张思九<sup>1</sup>, 林育青<sup>1,3\*\*</sup>, 陈求稳<sup>1,3</sup>, 冯 韬<sup>1</sup>, 陈 默<sup>4</sup>

(1: 南京水利科学研究院生态环境研究所, 南京 210029)

(2: 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

(3: 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098)

(4: 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

**摘要:** 受气候变化和人类活动影响, 湖泊水生态系统及其服务功能发生改变, 研究湖泊水生态系统生产总值动态变化及其影响因素, 对于维护湖泊健康生命、实现湖泊功能永续利用具有重要意义。选择位于气候敏感区和生态脆弱区的青海湖作为研究对象, 根据青海湖水生态系统特征及当前保护状况, 筛选调节服务及文化服务 2 类 8 个评估指标, 构建湖泊水生态系统生产总值指标体系, 核算 2010—2020 年青海湖水生态系统生产总值, 分析其变化趋势及主要影响因素。结果表明, 2010—2020 年青海湖水生态系统生产总值总体呈波动上升趋势, 变化范围为 6903.47 亿~7848.55 亿元; 调节服务是青海湖水生态系统主要的服务类型, 占比高达 91%。近十年, 气候调节和水质净化价值有所减少, 其他服务功能价值均呈增加趋势。水源涵养价值增加最多, 增长 760.70 亿元; 气候调节价值下降最多, 减少 658.59 亿元。偏最小二乘回归分析表明, 水温、水位是影响青海湖水生态系统生产总值的主要因素。气候变化影响下, 水温升高引起初级生产力增加及鱼类数量增长, 同时近年来水体矿化度下降有利于水生生物生长, 提高了固碳释氧和物种保育价值。水位与水面面积增加引起水源涵养、洪水调蓄价值增长; 蒸发量减少导致气候调节价值下降。人类合理开发利用与保护作用下, 物种保育、休闲旅游和科研教育价值均得到了显著提升。本研究量化了青海湖水生态系统对人类的贡献, 为变化环境下退化水生态系统修复、生态保护措施效果定量评价提供了科学依据。建议定期核算青海湖水生态系统生产总值, 跟踪评估气候变化与人类活动共同影响下青海湖水生态系统变化, 对维持青藏高原东北部生态安全具有重要作用。

**关键词:** 青海湖; 水生态系统生产总值; 水生态系统服务功能; 气候变化; 生态脆弱区

## Changes and impact factors of gross aquatic ecosystem product of Qinghai Lake in recent ten years\*

Li Qinyuan<sup>1,2</sup>, Zhang Sijiu<sup>1</sup>, Lin Yuqing<sup>1,3\*\*</sup>, Chen Qiuwen<sup>1,3</sup>, Feng Tao<sup>1</sup> & Chen Mo<sup>4</sup>

(1: *Center for Eco-Environmental Research, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R.China*)

(2: *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China*)

(3: *Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, P.R.China*)

(4: *College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R.China*)

**Abstract:** Under the joint effects of climate change and human activities, lake ecosystem and its services have changed. It is crucial to study on the dynamics and impact factors of aquatic ecosystem services of lakes for maintaining ecosystem health and achieving sustainable utilization of their functions. Qinghai Lake, located in a climate-sensitive and ecologically vulnerable area, was selected as the study area. Based on the characteristics and current conservation status of aquatic ecosystem of Qinghai Lake, an index system for evaluating gross aquatic ecosystem product was established, including eight assessment indicators, which belonged to two categories including regulation services and cultural services. Gross aquatic ecosystem product of Qinghai Lake from 2010 to 2020 were calculated, and the change trend and major influencing factors were also analyzed. From 2010 to 2020, the gross aquatic ecosystem product of Qinghai Lake ranged from 690.347 billion RMB to 784.855 billion RMB, showing an overall fluctuating upward

\* 2023-08-27 收稿; 2023-11-27 收修改稿。

国家自然科学基金项目(52121006)资助。

\*\* 通信作者; E-mail: yqlin@nhri.cn。

trend. Regulation service was the major type of aquatic ecosystem services of Qinghai Lake, the value of which accounted for 91%. Over the decade, except for climate regulation and water purification, the value of other ecosystem services increased. The value of water conservation increased the most, by 76.070 billion RMB, while the value of climate regulation decreased the most, by 65.859 billion RMB. Partial least squares regression analysis showed that water temperature and water level were the major effect factors for gross aquatic ecosystem product of Qinghai Lake. Under the effect of climate change, the increase in water temperature raised primary productivity and fish population. Meanwhile, the salinity of Qinghai Lake decreased in recent years, contributing to the growth of aquatic organisms, increasing the value of carbon sequestration and oxygen release, and biodiversity conservation. The increase in water level and surface area increased the value of water conservation, flood regulation and storage. The decline in the value of climate regulation was due to the decrease in evaporation in Qinghai Lake Basin. Under the effect of human rational utilization and conservation, the value of biodiversity conservation, leisure tourism, and scientific research and education were significantly improved. This study quantitatively assessed the contribution of Qinghai Lake aquatic ecosystem to human, and provided a scientific basis of the quantitative evaluation of the restoration of degraded aquatic ecosystem and the effect of ecological conservation measures under the changing environment. We suggested to calculate the gross aquatic ecosystem product of Qinghai Lake regularly and conduct follow-up evaluation of the changes in the aquatic ecosystem of Qinghai Lake, which plays an essential role in maintaining the ecological security of the northeast Qinghai-Tibet Plateau.

**Keywords:** Qinghai Lake; gross aquatic ecosystem product; aquatic ecosystem services; climate change; ecologically vulnerable region

湖泊水生态系统及其生态过程提供了人类所需的自然环境条件和效用,发挥了重要的生态系统服务功能,如水源涵养、水质净化、洪水调蓄、休闲旅游等<sup>[1-3]</sup>。“绿水青山就是金山银山”,湖泊不仅提供了丰富的生态产品与服务,还具有巨大的生态经济效益,为经济社会可持续发展提供有力支撑。然而,在气候变化和人类活动的共同作用下,湖泊水生态系统面临着气候条件改变、水文情势变化和水污染问题日益严峻的多重挑战,其生态经济效益也随之改变<sup>[4-5]</sup>。亟需评估变化环境下湖泊水生态系统生态价值变化,了解湖泊水生态系统状况、指导退化水生态系统修复,以及定量评价生态保护措施效果。自1990s以来,Costanza等学者在全球开展了生态系统服务功能研究,用生态经济学方法揭示了自然生态系统对人类社会的贡献,定量分析了自然生态系统为人类提供的经济价值,极大地促进了人类对生态系统服务功能重要性的认识<sup>[1,6-7]</sup>。欧阳志云等<sup>[8-9]</sup>提出了生态系统生产总值(gross ecosystem product, GEP)核算方法体系,用于评估特定区域一年内生态系统为人类提供的产品与服务及其经济价值。GEP核算可以分析生态系统为人类生存与福祉提供的产品与服务的经济价值,包括物质产品、调节服务与文化服务,可帮助人们认识生态系统的状况以及变化,为生态效益纳入经济社会评价体系和生态补偿制度提供了系统的方法论<sup>[8]</sup>。目前已有研究针对不同地区<sup>[10-12]</sup>、不同生态系统类型<sup>[13-14]</sup>开展了GEP核算,针对水生态系统生产总值核算的研究较少<sup>[15]</sup>,缺乏对湖泊水生态系统生产总值核算的研究。由于湖泊水生态系统的特殊性和复杂性,尚未形成符合湖泊水生态系统特征的生态价值评估方法,缺乏湖泊水生态系统的保护效益的定量评估,难以指导湖泊水生态系统保护与修复。

青海湖位于青藏高原气候敏感区和生态脆弱区,是中国面积最大的咸水湖泊,对维持青藏高原东北部地区的生态安全具有重要作用。青海湖水生态系统为人类提供了许多生存所需的自然环境条件和生态服务,产生了巨大的生态经济效益<sup>[16-17]</sup>。已有研究计算了青海湖流域<sup>[17-18]</sup>、青海湖湿地<sup>[19]</sup>、青海湖湖泊<sup>[20-21]</sup>的生态系统服务价值,分析了青海湖生态系统服务价值的动态变化<sup>[20-22]</sup>以及人类活动的影响<sup>[18]</sup>。然而,已有研究结果时间较早,指标体系与计算方法的差异导致评价结果差异较大,无法直接比较已有结果来认识青海湖水生态系统的变化情况,导致近年来青海湖水生态系统质量和生态保护效益难以确定。受气候变化影响,青海湖地区近年气候暖湿化显著,冰川融化加速,年降水量和气温呈上升趋势,导致湖泊水位逐年上升,水面面积不断扩大<sup>[23-25]</sup>,对气候变化响应明显<sup>[18,26]</sup>。同时,国家和青海省政府也加大了对青海湖生态环境的保护力度,于2007年成立了青海湖景区保护利用管理局,增加了保护区建设和维护资金的投入,并采取了综合治理和保护措施<sup>[27-28]</sup>。在气候变化和人为保护的共同作用下,青海湖水生态系统的生态价值与保护效益尚不清楚,环境气候因子和人类活动的影响缺乏充分分析,亟需建立科学方法并开展定量评估与分

析,为未来青海湖保护措施与政策的制定提供指导。

本研究针对青海湖水生态系统特征,构建青海湖水生态系统生产总值评估指标体系,核算 2010—2020 年青海湖水生态系统生产总值,揭示其变化趋势,评估青海湖对人类经济社会发展的贡献,为评价青海湖生态保护成效提供科学依据。使用偏最小二乘回归分析青海湖水生态系统生产总值变化的主要影响因素,为青海湖水生态系统保护和应对气候变化提供科学参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区域概况

青海湖是我国面积最大的内陆高原咸水湖泊,位于青藏高原东北部(36°32′~37°15′N,99°36′~100°46′E),平均海拔 3195 m,平均水深 17.1 m,属高原半干旱气候。根据水文年鉴记录,2010—2020 年,青海湖平均年降水量为 438.3 mm,平均年蒸发量为 843.3 mm,平均水温为 6.3℃,平均气温为 2.5℃,pH 平均值为 9.1,平均矿化度为 15268.2 mg/L。青海湖水面面积从 4308.7 km<sup>2</sup>扩大至 4516.4 km<sup>2</sup>,水位从 3193.59 m 上升至 3196.34 m,蓄水量从 771.5 亿 m<sup>3</sup>增加至 896.0 亿 m<sup>3</sup>(附表 I)。

### 1.2 水生态系统生产总值核算指标体系

本研究通过实地调研和文献查阅结合的方式确定适用于青海湖水生态系统的生产总值核算指标。2010—2020 年间,青海湖水生态系统作为自然保护区受严格保护与管理,也因为湖泊的咸水特性,青海湖没有被取水用以周围地区生产生活,未提供水资源供给服务;为恢复急剧下降的青海湖裸鲤(*Gymnocypris przewalskii*)资源,青海湖曾经唯一的经济鱼类也由水产品成为了物种保育对象,青海省政府采取了封湖育鱼和增殖放流措施来恢复其资源量<sup>[20]</sup>;因此青海湖水生态系统未直接向人类提供物质产品服务。在调节服务价值方面,青海湖容纳了湖面降水、地表水和地下水入湖补给,增强土壤下渗和蓄积,调节降水径流和补充地下水,控制地区荒漠化,具有水源涵养功能<sup>[19,28]</sup>;青海湖水生态系统具有自净作用,接纳和净化了青海湖入湖水系中的废污水;受气候变化影响,青海湖流域年均气温较历史平均气温有增加趋势,青海湖水面蒸发能够对周围环境起到降温和增湿的作用<sup>[20]</sup>,从而调节青藏高原东北部区域的环境气候;水体中有大量浮游植物通过光合作用起到固碳释氧的作用;近年来,青海湖流域年降水量增加,流域内夏季暴雨洪涝灾害增多,青海湖巨大的湖盆可汇集流域洪水,发挥洪水调蓄作用;青海湖是国家级自然保护区,为珍稀濒危的水生生物提供了生存与繁衍的场所,具有重要的物种保育价值。在文化服务方面,青海湖自然风光优美、高原风景独特,吸引大量游客前往旅游消费,提供了休闲旅游观光的价值;每年有大量的科研投入和成果与青海湖相关,具有较高的研究价值和教育意义。

综上所述,本研究参考水生态系统生产总值核算指标体系<sup>[15]</sup>,根据近十年青海湖水生态系统特征及生态保护情况以及研究数据的可获得性,选取 8 个指标,包含调节服务和文化服务两类服务类型,采用替代成本法、影子工程法和旅行费用法等生态经济学方法进行计算<sup>[8,15]</sup>,构建了青海湖水生态系统生产总值核算体系(表 1)。为确切地反映各项服务的功能量的变化动态,本研究采用不变价格进行价值量计算,排除价格变动的影响,保证不同年份之间指标的可比性。

1.2.1 水源涵养 以青海湖湖泊蓄积水量表征其水源涵养能力的大小,以模拟建设与水生态系统水源涵养量相当的水利设施所需要的单位成本核算水源涵养价值,计算公式为:

$$V_{wc} = Q_{wc} \times P_{wc} \quad (1)$$

式中, $V_{wc}$ 为水源涵养价值(元); $Q_{wc}$ 为水源涵养能力(m<sup>3</sup>); $P_{wc}$ 为建设单位蓄水量库容成本(元/m<sup>3</sup>),我国单位库容的水库造价为 6.11 元/m<sup>3</sup><sup>[3]</sup>。

1.2.2 水质净化 由于青海湖水体自身净化污水潜力远大于入湖河流携带污染物排放量,核算废污水净化量时

表 1 青海湖水生态系统生产总值核算指标体系  
Tab.1 Index system of gross aquatic ecosystem product of Qinghai Lake

服务类型	评估指标	核算方法
调节服务	水源涵养	影子工程法
	水质净化	替代成本法
	气候调节	替代成本法
	固碳释氧	替代成本法
	洪水调蓄	影子工程法
	物种保育	替代成本法
文化服务	休闲旅游	旅游收入法
	科研教育	科研投入法

直接使用青海湖水系废污水排放量<sup>[8]</sup>, 计算公式为:

$$V_{WP} = Q_{WP} \times P_{WP} \quad (2)$$

式中,  $V_{WP}$  为水质净化价值(元);  $Q_{WP}$  为废污水净化量(t);  $P_{WP}$  为污水处理成本, 为 2.09 元/t。

1.2.3 气候调节 青海湖水面蒸发对区域气候起到了降温和增湿的作用<sup>[20]</sup>, 根据水面面积和蒸发相同水量所需的电量和电价计算蒸发降温增湿的价值, 计算公式为:

$$V_{CR} = E_w \times A \times y \times P_{CR} \quad (3)$$

式中,  $V_{CR}$  为气候调节价值(元);  $E_w$  为青海湖的年蒸发量(mm);  $A$  为湖面面积( $\times 10^6 \text{ m}^2$ );  $y$  为加湿器转化 1  $\text{m}^3$  水为水蒸汽消耗的电量( $\text{kW}\cdot\text{h}$ ), 以常见的功率为 32 W 的加湿器计算<sup>[29]</sup>, 取 125  $\text{kW}/\text{h}$ ;  $P_{CR}$  为电价(元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ ), 青海省居民生活用电价格第一档为 0.3771 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

1.2.4 固碳释氧 青海湖水生态系统中浮游植物通过光合作用发挥固碳释氧的功能, 水体中以硅藻、绿藻和蓝藻为主<sup>[30]</sup>, 浮游植物通过光合作用每产生 1 g 有机物固定 1.63 g  $\text{CO}_2$ 、释放 1.20 g  $\text{O}_2$ 。根据叶绿素  $a$  浓度计算青海湖水体的生产力<sup>[31]</sup>:

$$NPP = K \times r \times c(\text{Chl.}a) \times DH \quad (4)$$

式中,  $NPP$  为水体浮游植物每年的初级生产力( $\text{mg}/\text{m}^3$ ),  $K$  为经验常数, 取 1.97;  $r$  为同化系数, 取 3.2  $\text{mg}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ ;  $c(\text{Chl.}a)$  为水体叶绿素  $a$  的浓度( $\text{mg}/\text{m}^3$ );  $DH$  为全年日照时数( $\text{h}$ )<sup>[31]</sup>。仅考虑湖面表层 1 m 水深的浮游植物的固碳释氧能力。计算公式为:

$$V_{CO} = NPP \times A \times 1.0 \times (1.63 \times P_{CS} + 1.20 \times P_{RO}) \quad (5)$$

式中,  $V_{CO}$  为固碳释氧价值(元);  $P_{CS}$  为固碳功能价格(元/t), 取中国造林成本法和国际碳税标准价格的平均值 770 元/t;  $P_{RO}$  为释氧功能价格(元/t), 取造林成本法和工业制氧价格的平均值 376.47 元/t<sup>[32]</sup>。

1.2.5 洪水调蓄 根据青藏高原区的湖泊水量调节能力评价模型<sup>[33]</sup>, 计算青海湖的湖泊洪水调蓄价值。模型公式如下:

$$Q_{FS} = e^{6.636} \times A^{0.678} \times 0.14 \quad (6)$$

式中,  $Q_{FS}$  为湖泊的洪水调蓄能力( $\times 10^4 \text{ m}^3$ ),  $A$  为湖泊面积( $\text{km}^2$ )。洪水调蓄价值计算公式为:

$$V_{FS} = Q_{FS} \times P_{FS} \quad (7)$$

式中,  $V_{FS}$  为洪水调蓄价值(元);  $Q_{FS}$  为湖泊的洪水调蓄能力( $\times 10^4 \text{ m}^3$ );  $P_{FS}$  为单位水库库容工程造价(元/ $\text{m}^3$ ), 为 6.11 元/ $\text{m}^3$ <sup>[8]</sup>。

1.2.6 物种保育 根据保护区面积价值和特有物种保育价值两部分结合计算物种保育价值。青海湖裸鲤是青海湖特有物种, 2004 年被《中国物种红色名录》列为濒危物种。保护青海湖裸鲤对维持青海湖水生态系统稳定和生物多样性具有重要意义。参考国家《水生野生动物及其制品价值评估办法》计算青海湖裸鲤的价值, 价值计算方法为物种基准价值与各项系数相乘, 计算公式如下:

$$V_{fish} = V_{sp} \times K_p \times K_d \times K_s \times n \quad (8)$$

式中,  $V_{fish}$  为青海湖裸鲤总价值(元),  $V_{sp}$  为物种基准价值标准, 青海湖裸鲤按照“鲤科其他种”计算, 取 100 元/尾;  $K_p$  为保护级别系数, 取 5;  $K_d$  为发育阶段系数, 取 1;  $K_s$  为物种来源系数, 由于青海湖裸鲤未被列入《人工繁育国家重点保护水生野生动物名录》, 取 0.5;  $n$  为裸鲤数量(尾), 根据历年《青海湖生态环境状况公报》提供数据并换算, 2010—2014 年按照百斤 263 尾<sup>[34]</sup>, 体重 190 g 换算, 2015—2018 年按照体重 250 g/尾换算。物种保育总价值计算公式为:

$$V_{biop} = G_{biop} \times S_c + V_{fish} \quad (9)$$

式中,  $V_{biop}$  为物种保育价值(元);  $G_{biop}$  为自然保护区面积( $\text{km}^2$ ), 整个青海湖都为各种水生生物提供了栖息地, 湖面面积即为自然保护区面积;  $S_c$  为自然保护区单位面积保育成本(元/ $\text{km}^2$ ), 湖泊提供栖息地服务年生态效益为 439  $\text{USD}/\text{hm}^2$ <sup>[6]</sup> (平均汇率为 6.6318), 因此取 29.11 元/ $\text{km}^2$ ;  $V_{fish}$  为青海湖裸鲤总价值(元)。

1.2.7 休闲旅游 休闲旅游价值按照青海湖景区每年的旅游收入核算, 计算公式为:

$$V_{LE} = P_{LE} \quad (10)$$

式中,  $V_{LE}$  为休闲旅游价值(元);  $P_{LE}$  为青海湖景区旅游总收入(元), 其中包括入住、餐饮、景点门票等收入。

1.2.8 科研教育 分别以“青海湖”和“Qinghai Lake”为关键词在中国知网文献数据库和 Web of Science 文献

数据库搜索,以发表的相关论文价值评估青海湖科研教育价值<sup>[15]</sup>,计算公式为:

$$V_{RE} = Q_{REi} \times P_{REi} \quad (11)$$

式中, $V_{RE}$ 为科研教育价值(元); $Q_{REi}$ 为科研论文产出量(篇); $P_{REi}$ 为每篇论文产出需投入金额(元/篇),根据全国发表科技论文数量和基础研究经费折算每年每篇论文产出需投入的金额。

### 1.3 青海湖水生态系统生产总值变化的影响因素分析

综合考虑湖泊水生态系统自然特征和气候因素影响,分析了可能会对青海湖水生态系统生产总值产生影响的环境气候因子,结合数据可获得性,选取青海湖水位、气温、水温、降水量、蒸发量、矿化度、pH、水汽压差、日照时数、蓄水量、水面面积为自变量。首先使用 Spearman 相关性分析,筛选出与青海湖水生态系统生产总值变化有统计学意义的显著相关变量。利用方差膨胀系数(variance inflation factor, VIF)检验自变量之间的多重共线性<sup>[35]</sup>,VIF 值大于 10 说明变量之间存在多重共线性问题,一般会影响模型的运行结果。偏最小二乘回归(partial least-square regression, PLSR)模型集中了多元线性回归、主成分分析、典型相关分析 3 种方法的优点,能较好地解决自变量之间的多重共线性、样本量较少和计算复杂等问题,构建一个更为合理的回归模型,结果更加稳定可靠<sup>[36-37]</sup>。故本研究选择偏最小二乘回归模型来分析影响因素的贡献。

本研究以近十年青海湖水生态系统生产总值时间序列变化为因变量,以有显著相关关系的环境气候因子为自变量构建 PLSR 模型,从统计学角度量化分析影响因素的贡献度大小。PLSR 模型构建和统计分析过程使用 R 语言统计分析软件“pls”程序包(<https://cran.r-project.org/web/packages/pls/index.html>)完成。模型构建完成后经交叉验证法检验,结果中判定系数( $R^2$ )能够反映模型的稳定性, $R^2$ 越接近 1 说明模型稳定性越好,拟合程度越高;均方根误差(root mean squared error, RMSE)反映模型预报能力, RMSE 越小则模型估算能力越好;均方误差(mean square error, MSE)反映预测值与实际值的匹配程度。本研究数据分析均使用 R 语言统计软件完成统计分析与可视化。

### 1.4 数据来源

本研究数据主要包括湖泊特征指标、环境气候因子和社会经济指标数据(附表 I 和附表 II),来源于 2010—2020 年《中华人民共和国水文年鉴》《青海省水资源公报》和《青海省统计年鉴》、2010—2017 年《青海省环境状况公报》和 2018—2020 年《青海省生态环境状况公报》,部分统计信息来源于国家统计局以及青海省水文水资源测报中心(附表 III)。

## 2 结果与分析

### 2.1 近十年青海湖水生态系统生产总值变化

2010—2020 年,青海湖水生态系统生产总值变化总体呈波动上升趋势,2019 年最高(7848.55 亿元),2011 年最低(6903.47 亿元),平均总值为 7438.54 亿元,根据趋势拟合分析结果,每年增加 82.50 亿元(图 1a)。从各项服务功能来看,水源涵养、固碳释氧、洪水调蓄、物种保育、休闲旅游和科研教育价值均呈增加趋势,气候调节和水质净化价值呈下降趋势(附表 IV)。水源涵养价值呈逐年增加趋势,平均价值为 5035.47 亿元,2010 年最低(4713.87 亿元),2020 年最高(5474.56 亿元),2020 年比 2010 年增加了 760.70 亿元,增长了 16.1%,增加趋势为 72.7 亿元/年(图 1b)。水质净化价值波动下降,平均价值为 0.07 亿元,2020 年比 2010 年减少了 51.5%,减少趋势为 0.01 亿元/年(图 1c)。气候调节价值整体呈波动下降趋势,平均价值为 1736.23 亿元,2020 年最高(2077.73 亿元),2020 年最低(1419.14 亿元),2020 年比 2010 年减少了 658.59 亿元,降幅为 31.7%,减少趋势为 42.30 亿元/年(图 1d)。固碳释氧价值波动上升,平均价值为 0.91 亿元,2020 年比 2010 年增加了 1.18 亿元,增幅为 270.6%,增加趋势为 0.12 亿元/年(图 1e)。洪水调蓄价值呈上升趋势,平均价值为 19.17 亿元,2020 年比 2010 年增长了 3.21%,增加趋势为 0.06 亿元/年(图 1f)。物种保育价值呈波动增加趋势,近十年平均价值为 643.93 亿元,2020 年比 2010 年增加了 510.50 亿元,增幅为 129.4%,增长趋势为 51.46 亿元/年(图 1g)。休闲旅游价值整体呈上升趋势,平均价值为 2.59 亿元,2019 年最高(2019 年),增长趋势为 0.44 亿元/年(图 1h)。2020 年前,休闲旅游价值逐年上升,2020 年旅游价值受疫情影响骤减,2019 年比 2010 年增加了 6.0 亿元,提高了 20 倍,2020 年比 2010 年提高了 7 倍。科研教育价值逐渐提高,2020 年比 2010 年提高了 373.5%,平均价值为 0.16 亿元,增长趋势为 0.03 亿元/年(图 1i)。

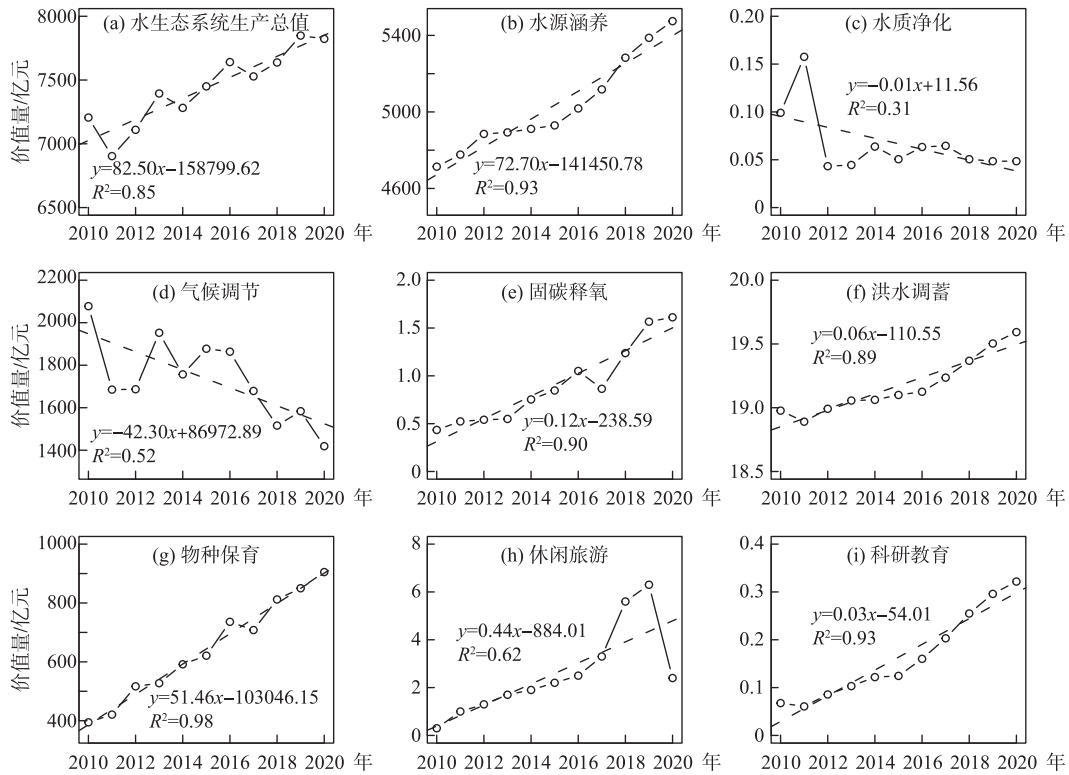


图 1 2010—2020 年青海湖水生态系统生产总值及各项服务功能价值变化

Fig.1 Change trends of gross aquatic ecosystem product and value of each ecosystem service of Qinghai Lake from 2010 to 2020

各项服务功能价值占比从大到小排序依次为:水源涵养>气候调节>物种保育>洪水调蓄>休闲旅游>固碳释氧>科研教育>水质净化(图 2,附表 V)。水源涵养是近十年青海湖水生态系统的主导功能,价值占比最大,平均值达到 67.69%,2010 年最低(65.42%),2020 年最高(69.98%),有小幅增加趋势。气候调节价值近十年平均占比为 23.42%,占比呈下降趋势,从 2010 年的 28.83%减少至 2020 年的 18.14%。物种保育价值近十年平均占比为 8.59%,占比呈上升趋势,从 2010 年的 5.48%增加至 2020 年的 11.57%。洪水调蓄价值平均占比为 0.26%,占比略有下降趋势,从 2010 年的 0.26%下降至 2020 年的 0.25%。休闲旅游价值近十年平

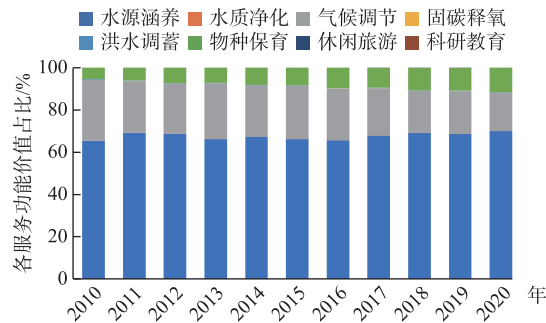


图 2 2010—2020 年生态系统各服务功能价值占比变化

Fig.2 Proportion changes of ecosystem services value from 2010 to 2020

均占比为 0.03%, 占比在 2020 年之前逐年提高, 最高时为 2019 年, 达 0.08%。固碳释氧价值平均占比为 0.01%, 呈逐年增加趋势, 从 0.006% 增长至 0.021%。科研教育价值平均占比为 0.002%, 呈逐渐上升趋势, 由 0.001% 增长至 0.004%。水质净化是占比最少的服务功能, 价值占比基本维持在 0.001%。总体而言, 近十年调节服务价值占青海湖水生态系统生产总值的 91% 以上, 一直是青海湖水生态系统最主要的服务类型, 提供了最多的生态效益。

## 2.2 环境因子对青海湖水生态系统生产总值的影响

相关性分析结果表明, 11 个自变量中有 5 个通过了 0.05 水平的显著性检验, 与青海湖水生态系统生产总值变化有显著相关关系 (图 3), 包括水温、矿化度、水面面积、蓄水量和水位。

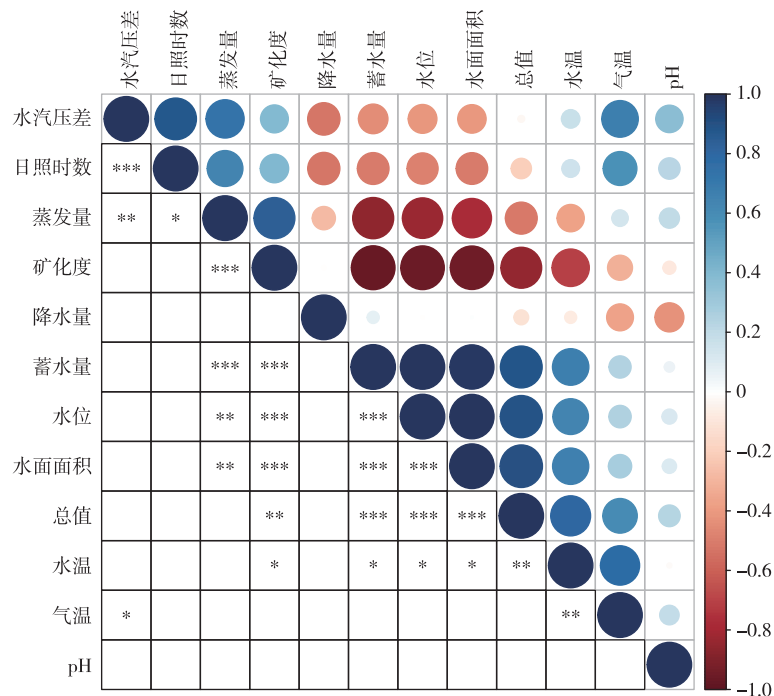


图 3 青海湖水生态系统生产总值与影响因子相关性热图

Fig.3 Heat map of correlation between gross aquatic ecosystem product and impact factors of Qinghai Lake

经 VIF 检验, 除水温外, 其余变量间的方差膨胀因子均大于 10 (附表 VI), 说明影响因素指标之间存在多重共线性问题。因此, 采用偏最小二乘回归进一步分析, 判断主要影响因素的影响力大小。

使用 R 语言统计与分析软件“pls”程序包, 对青海湖水生态系统生产总值 ( $y$ ) 与水温 ( $WT$ )、矿化度 ( $KH$ )、水位 ( $WL$ )、蓄水量 ( $WS$ )、水面面积 ( $LA$ ) 5 个显著相关的自变量进行偏最小二乘回归分析。根据模型的初步回归结果, 经交叉验证法检验, 主成分为 3 个时  $RMSE$  总和最小, 并且 3 个主成分的累积总方差解释率达到 99.62%。根据 PLSR 模型的  $MSE$  和  $R^2$  与成分数量的关系, 第一成分的贡献度最高, 前 3 成分的贡献最明显, 说明前 3 个成分足以表征数据的整体特征。由于模型中“ncomp”参数设置将影响后续对重要变量的识别, 不同设定值将明显影响变量重要性的排序, 根据前文分析, 主成分个数为 3 个, 因此设置“ncomp = 3”, 最后可根据回归系数分析变量的重要性。重新运行模型, 最后得到标准化偏最小二乘回归模型:

$$y^* = 0.4630WT^* + 0.6515KH^* + 0.4570WL^* + 0.0664WS^* + 0.6988LA^* \quad (12)$$

按照通过逆标准化过程, 将标准化变量还原成原始变量, 得到还原后的偏最小二乘回归方程:

$$y = -497700.8 + 277.853WT + 0.09783KH + 153.2567WL + 0.4811WS + 2.7162LA \quad (13)$$

根据还原标准化后的回归系数, 5 个变量的相对重要性排序为: 水温 > 水位 > 水面面积 > 蓄水量 > 矿化度。

前3个主要成分对青海湖水生态系统生产总值的影响最为重要,水温、水位和水面面积是最主要的变量。

### 3 讨论

#### 3.1 近十年青海湖水生态系统生产总值动态变化

青海湖是维系青藏高原东北部生态安全的重要水体,其生态环境变化影响着周围社会经济发展和生态安全<sup>[37]</sup>。2010—2020年期间,青海湖水生态系统的生产总值平均值为7438.54亿元,整体变化呈波动上升趋势,表明青海湖生态保护效益不断提高,青海湖水生态系统质量有所改善,为区域生态安全作出了重要贡献。以水源涵养和气候调节为主的调节服务价值不断提高,进一步体现了青海湖对青藏高原西北部生态安全的重要性,对调节区域水循环和气候的重要作用,与已有研究结论相符<sup>[17,19-20]</sup>。本研究发现青海湖水生态系统气候调节功能价值及其占比均有下降趋势,表明青海湖对周围环境增湿降温的调节能力有所减弱,与近年来青海湖水面蒸发量减少有关(附表II)。研究表明,气候变化导致青海湖地区气温日较差减小、降水量增加,使湖区蒸发能力减弱、相对湿度增加,导致青海湖湖面的蒸发量减少<sup>[38-39]</sup>。气候调节价值核算时主要考虑的是蒸发量、湖面面积等因素,其中蒸发量变化最大,对气候调节价值变化的贡献较大。气候调节是青海湖水生态系统的主要功能之一,气候变化导致的该项功能变化对该地区未来气候和生态的影响值得深入研究。水质净化价值减少主要是因为受到严格保护措施,入湖污染物减少,需要净化的污染物量减少、发挥的水质净化功能减少。固碳释氧价值的增加体现了青海湖减少温室气体和产生氧气的重要贡献,为青藏高原区提供了的气体调节作用。洪水调蓄价值提升说明青海湖在容纳区域降水、蓄积汇水方面发挥越来越重要的作用,这主要与近十年湖面面积扩大有关<sup>[33]</sup>。物种保育价值增加主要受到封湖养鱼、增殖放流等人为因素的影响<sup>[40]</sup>,说明人类保护的生态经济效益在不断增加。休闲旅游价值的增加间接证明了对青海湖生态环境保护的成效,发挥了青海湖优良生态环境的自然资源价值,并将其转化为社会经济价值,显示出生态环境保护对社会经济发展的重要贡献<sup>[41]</sup>。科研教育价值提高,表明目前对青海湖生态作用的认识不断提高,其重要的生态地位和研究价值也被不断挖掘,相关科研投入也随之增加,有利于今后提高对青海湖的研究投入与关注。各项服务功能占比变化趋势不大,说明青海湖水生态系统目前状态平衡稳定,各项服务功能处于正常状态,能够可持续地为经济社会发展提供生态效益。

本研究与前人研究结果存在一定差异,主要由划定的研究区域范围和指标体系差异导致。已有研究大多以青海湖湿地、青海湖流域为评价范围<sup>[21-22]</sup>,将部分陆面区域也划入评价范围,本研究将研究范围限定在青海湖水体,更准确地评估了青海湖水生态系统对人类的重要贡献。在评估指标和评估方法方面,本研究根据青海湖的生态保护现状进行选取,更符合近十年青海湖功能特征,避免了重复计算和不符合实际情况的问题,价值评估方法较前人研究有所改进。例如,已有研究中将青海湖裸鲤纳入水产品计算或未纳入计算<sup>[17,19]</sup>,均没有考虑青海湖裸鲤作为青海湖特有保护物种对生态系统功能改善的重要性,导致无法量化人为措施对物种保育价值恢复的贡献和效益。本研究以《水生野生动物及其制品价值评估办法》中的定价作为青海湖裸鲤的价值,为量化青海湖对特有物种的保育价值提供了合理计算和定价方法。受严格的生态措施保护,青海湖没有提供水资源供给服务,综合来看指标体系中未包含青海湖物质产品的服务。本研究评估结果较为合理,可为评估当前保护状态下的青海湖水生态系统健康状况和保护措施生态效益提供科学参考。

#### 3.2 青海湖水生态系统生产总值变化影响因素

影响因素分析的结果表明,2010—2020年,水温、水位和水面面积是影响青海湖水生态系统生产总值的主要因素。在气候变化和保护措施作用下,青海湖流域生态环境明显好转,青海湖水生态系统结构与功能优化<sup>[27,42]</sup>。2010—2020年,青海湖水体水温呈波动上升趋势,与青海湖水生态系统生产总值变化趋势一致。水温主要影响水生态系统生物生长进而影响群落结构,并且水温与矿化度共同作用影响了青海湖浮游植物和青海湖裸鲤的生长和群落结构。湖水的矿化度可以间接反映湖水的盐度,盐度变化会影响水生生物的生长,例如影响鱼类幼苗的渗透压、内分泌和免疫能力等,盐度超过藻类耐盐适宜阈值时会抑制藻类生长<sup>[43]</sup>。青海湖裸鲤属广盐性鱼类,高盐度会抑制青海湖裸鲤的生长<sup>[43-44]</sup>,盐度降低和水温升高为青海湖裸鲤提供了更适宜的生长环境,为增殖放流成活率的提高创造了条件。本研究中,青海湖水体矿化度逐年下降,水体



叶绿素 *a* 浓度逐年上升,与前人研究结论相反<sup>[30]</sup>。这主要是因为在水温上升和盐度下降的共同作用下,青海湖浮游植物优势种由硅藻门逐渐演变为蓝藻门,蓝藻受盐度变化的影响程度大于硅藻,且更偏好低盐环境,导致浮游植物丰度出现数量级程度上升<sup>[30]</sup>,使叶绿素 *a* 浓度增加,湖泊水体初级生产力上升,固碳释氧价值呈上升趋势。这也表明,未来青海湖生态管理中可能也需要考虑由藻类种群变化带来的环境问题,青海湖水生态系统在未来变化条件下,越来越适合蓝藻的生存环境,需要持续监测其变化状况,及时采取相应治理措施。水位是影响湖泊生态系统生产总值的重要因素,该结论与关于博斯腾湖生态系统服务价值研究结论一致<sup>[45-46]</sup>。在气候变化影响下,青藏高原受水汽条件变化影响,气候总体上呈现暖湿化趋势,区域降水量增加,冰川融化入湖径流量增加,湖面降水、入湖地表水和地下水补给增加,引起青海湖水位上涨、水面面积扩大和蓄水量增加<sup>[37,47]</sup>,提升了青海湖水源涵养和洪水调蓄的调节价值。在气候变化背景下,青海湖蓄水量增加、矿化度下降,同时水温升高,均对水生物有重要影响,应对青海湖水体盐度变化对水生生物的影响开展深入研究和长期监测,并加强盐度变化对青海湖水生态系统各项服务功能影响的研究。

### 3.3 不确定性分析

本研究结果的不确定性主要来源于数据和定价方面的因素。由于本研究使用了多样的数据来源,包括水文年鉴、统计年鉴和政府部门提供的数据,所以数据标准和采样时间地点可能存在一定的差异,从而导致计算结果存在一定的误差。其次,本研究没有考虑到社会经济发展对价格波动的影响,而是采用了静态价格核算方法,导致青海湖水生态系统对社会经济发展的真实贡献核算可能存在误差。

受限于数据可获得性,本研究仅评估了近十年青海湖水生态系统生产总值的变化趋势,时间序列较短,对预测未来气候变化下青海湖水生态系统生产总值的变化趋势存在局限性。目前,青藏高原地区的气候变化导致冰川融化,青海湖入湖径流量增加,导致青海湖水位上升、水面面积扩大、蓄水量增加。这种变化的可持续性仍有待持续监测和进一步研究分析<sup>[48-49]</sup>。水位、水面面积是影响青海湖水生态系统生产总值的主要因素之一,其变化趋势将直接影响到青海湖水生态系统生产总值的变化。因此,需要加强长期监测,获取更多数据系列,以便进行进一步观测与研究。

## 4 结论

本研究构建了青海湖水生态系统生产总值核算指标体系,结果表明 2010—2020 年间青海湖水生态系统生态保护效益显著提升,青海湖水生态系统质量逐渐改善。鉴于环境气候因子对水生态系统的复杂影响,青海湖水生态系统生产总值增加的可持续性还需要加强监测和长期评估。主要研究结论如下:

1) 近十年青海湖水生态系统生产总值的范围为 6903.47 亿~7848.55 亿元,平均为 7438.54 亿元,呈波动上升趋势,表明青海湖水生态系统质量不断改善。水质净化和气候调节价值呈减少趋势,其余服务功能均呈增加趋势;水源涵养价值增加幅度最大,气候调节价值下降幅度最大。

2) 2010—2020 年,调节服务始终是青海湖水生态系统主要的服务类型,占青海湖水生态系统生产总值的 91% 以上。各服务功能价值量从大到小依次为水源涵养>气候调节>物种保育>洪水调蓄>休闲旅游>固碳释氧>科研教育>水质净化。

3) 偏最小二乘回归分析结果表明,水温和水位是影响青海湖水生态系统生产总值的主要因素。人类合理开发利用与保护显著提高了物种保育、休闲旅游和科研教育价值。在未来变化环境下,青海湖水生态系统生产总值需要持续监测和长期评估,建议开展气候敏感区和生态脆弱区的湖泊水生态系统生产总值跟踪评价,积极采取应对措施,促进未来变化环境下水生态系统服务功能的可持续发挥。

致谢:感谢青海省水利厅、青海省河湖保护服务中心对相关数据的共享与支持!

## 5 附录

附表 I ~ VI 见电子版 (DOI: 10.18307/2024.0347)。

## 6 参考文献

[1] Ouyang ZY, Zhao TQ, Wang XK *et al.* Ecosystem services analyses and valuation of China terrestrial surface water system. *Acta Ecologica*

- Sinica*, 2004, **24**(10): 2091-2099. [欧阳志云, 赵同谦, 王效科等. 水生态服务功能分析及其间接价值评价. 生态学报, 2004, **24**(10): 2091-2099.]
- [ 2 ] Zhao R, Dong YX, Tan ZW. Review of service value evaluation of aquatic ecosystem. *Environmental Science Survey*, 2014, **33**(5): 33-39. [赵润, 董云仙, 谭志卫. 水生态系统服务功能价值评估研究综述. 环境科学导刊, 2014, **33**(5): 33-39.]
- [ 3 ] Huang Y, Xing Y, Sun XY *et al.* Research and prospect of river and lake water ecosystem service value evaluation. *Journal of Hydroecology*, 2023, **44**(1): 1-8. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202203140073. [黄羽, 幸悦, 孙晓玉等. 河湖水生态系统服务价值核算研究及应用展望. 水生态学杂志, 2023, **44**(1): 1-8.]
- [ 4 ] Jia JM, Luo W, Du TT *et al.* Valuation of changes of ecosystem services of Tai Lake in recent 10 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(7): 2255-2264. DOI: 10.5846/stxb201306031280. [贾军梅, 罗维, 杜婷婷等. 近十年太湖生态系统服务功能价值变化评估. 生态学报, 2015, **35**(7): 2255-2264.]
- [ 5 ] Chen MK, Xu XB. Lake Poyang ecosystem services changes in the last 30 years. *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 309-318. DOI: 10.18307/2021.0126. [陈曼坤, 徐昔保. 近30年来鄱阳湖生态系统服务变化. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 309-318.]
- [ 6 ] Costanza R, d'Arge R, de Groot R *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **387**(6630): 253-260. DOI: 10.1038/387253a0.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] Ouyang ZY, Zhu CQ, Yang GB *et al.* Gross ecosystem product: Concept, accounting framework and case study. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(21): 6747-6761. DOI: 10.5846/stxb201310092428. [欧阳志云, 朱春全, 杨广斌等. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究. 生态学报, 2013, **33**(21): 6747-6761.]
- [ 9 ] Ouyang ZY, Song CS, Zheng H *et al.* Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, **117**(25): 14593-14601. DOI: 10.1073/pnas.1911439117.
- [ 10 ] Wu ZJ, Du SM, Huang Y *et al.* Assessment of ecological conservation effect in southern Jiangxi Province based on gross ecosystem product. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(16): 6670-6683. DOI: 10.5846/stxb202104181007. [吴之见, 杜思敏, 黄云等. 基于生态系统生产总值核算的生态保护成效评估——以赣南地区为例. 生态学报, 2022, **42**(16): 6670-6683.]
- [ 11 ] Lin YY, Xu XB. Spatiotemporal variations of gross ecosystem product and identification of important ecological protection spaces in the Yangtze River Delta. *Resources Science*, 2022, **44**(4): 847-859. DOI: 10.18402/resci.2022.04.16. [林瑒焱, 徐昔保. 长三角地区生态系统生产总值时空变化及重要生态保护空间识别. 资源科学, 2022, **44**(4): 847-859.]
- [ 12 ] Song CS, Ouyang ZY. Research on GEP accounting of ecosystem Gross Product oriented to ecological benefit Assessment; A case study of Qinghai Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **40**(10): 3207-3217. [宋昌素, 欧阳志云. 面向生态效益评估的生态系统生产总值GEP核算研究——以青海省为例. 生态学报, 2020, **40**(10): 3207-3217.]
- [ 13 ] Chen ZZ, Lei JR, Wu TT *et al.* Gross ecosystem product accounting of National Park; Taking Hainan Tropical Rainforest National Park as an example. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(11): 3883-3892. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202111.010. [陈宗铸, 雷金睿, 吴庭天等. 国家公园生态系统生产总值核算——以海南热带雨林国家公园为例. 应用生态学报, 2021, **32**(11): 3883-3892.]
- [ 14 ] Zhao R, Ren XY, Su WZ *et al.* Study on the distribution of ecosystem GDP in Tuojiang River Basin by integrating value accounting system with material flow analysis. *China Industrial Economics*, 2023, **38**(3): 520-528. [赵锐, 任昕芸, 苏伟洲等. 价值核算体系融合物质流分析的沱江流域生态系统生产总值分配研究. 云南农业大学学报: 自然科学, 2023, **38**(3): 520-528.]
- [ 15 ] Chen M, Lin YQ, Zhang JY *et al.* Accounting system and application of gross water ecosystem product. *Water Resources Protection*, 2023, **39**(1): 234-242. [陈默, 林育青, 张建云等. 水生态系统生产总值核算体系及应用. 水资源保护, 2023, **39**(1): 234-242.]
- [ 16 ] Wu HF, Chen KL, Zhang LL. Study on ecological health evaluation of Qinghai Lake Basin under climate change. *Ecological Science*, 2022, **41**(4): 41-48. [吴恒飞, 陈克龙, 张乐乐. 气候变化下青海湖流域生态健康评价研究. 生态科学, 2022, **41**(4): 41-48.]
- [ 17 ] Lu H, Chen KL, Cao SK *et al.* Ecosystem services and its value evaluation of Qinghai Lake Watershed. *Ecological Economy*, 2011, **246**(11): 145-147. [卢慧, 陈克龙, 曹生奎等. 青海湖流域生态系统服务功能与价值评估. 生态经济, 2011, **246**(11): 145-147.]
- [ 18 ] Qi Y, Lian XH, Wang HW *et al.* Dynamic mechanism between human activities and ecosystem services: A case study of Qinghai Lake watershed, China. *Ecological Indicators*, 2020, **117**: 106528. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106528.
- [ 19 ] 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.]
- [ 20 ] Cao SK, Cao GC, Chen KL *et al.* Evaluation of use value of water ecosystem service functions in the Qinghai Lake. *Ecological Economy*, 2013, **271**(9): 163-167, 180. [曹生奎, 曹广超, 陈克龙等. 青海湖湖泊水生态系统服务功能的使用价值评估. 生态经济, 2013, **271**(9): 163-167, 180.]
- [ 21 ] Cao SK, Cao GC, Chen KL *et al.* Dynamic of alpine wetland ecosystem service values in the Qinghai Lake basin. *Journal of Desert Research*, 2014, **34**(5): 1402-1409. [曹生奎, 曹广超, 陈克龙等. 青海湖高寒湿地生态系统服务价值动态. 中国沙漠, 2014, **34**(5):

- 1402-1409.]
- [22] Jiang CH, Li GY, Cheng T *et al.* Spatial-temporal pattern variation and impact factors of ecosystem service values in the Qinghai Lake Watershed. *Resources Science*, 2016, **38**(8): 1572-1584. DOI: 10.18402/resci.2016.08.15. [姜翠红, 李广泳, 程滔等. 青海湖流域生态服务价值时空格局变化及其影响因素研究. 资源科学, 2016, **38**(8): 1572-1584.]
- [23] Luo CF, Xu CJ, Cao YX *et al.* Monitoring of water surface area in Lake Qinghai from 1974 to 2016. *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1245-1253. DOI: 10.18307/2017.0523. [骆成凤, 许长军, 曹银璇等. 1974—2016年青海湖水面积变化遥感监测. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1245-1253.]
- [24] Han WX, Huang CL, Wang YC *et al.* Study on the area variation of Qinghai Lake based on long-term landsat 5/8 multi-band remote sensing imagery. *Advances in Earth Science*, 2019, **34**(4): 346-355. [韩伟孝, 黄春林, 王昀琛等. 基于长时序 Landsat 5/8 多波段遥感影像的青海湖面积变化研究. 地球科学进展, 2019, **34**(4): 346-355.]
- [25] Hao MY, Luo Z. A dataset of Qinghai Lake water body periphery during 1987—2017. *Science Data Bank*, 2021, **6**(1): 191-197. DOI: 10.11922/csdata.2020.0082.zh. [郝美玉, 罗泽. 1987—2017年青海湖水体边界数据集. 中国科学数据(中英文网络版), 2021, **6**(1): 191-197.]
- [26] Sun YS, Li QJ, Liu T *et al.* Analysis of Qinghai Lake's water level changes and water balance analysis from 1956 to 2019. *Journal of China Hydrology*, 2021, **41**(5): 91-96. [孙永寿, 李其江, 刘孜等. 青海湖 1956-2019 年水位变化原因及水量平衡分析研究. 水文, 2021, **41**(5): 91-96.]
- [27] Cai GY, Song XY, Ma JL *et al.* Recognition and comprehensive evaluation on human well-being in Qinghai Lake basin under the background of regional ecological environment governance. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, **49**(12): 64-69. [蔡国英, 宋晓瑜, 马金莲等. 区域生态环境治理背景下青海湖流域人类福祉认知及综合评价. 安徽农业科学, 2021, **49**(12): 64-69.]
- [28] Gong SH, Xiao Y, Zheng H *et al.* Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(7): 2455-2462. DOI: 10.5846/stxb201512012406. [龚诗涵, 肖洋, 郑华等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, **37**(7): 2455-2462.]
- [29] Zhao W, Dong SL, Li DS *et al.* The primary productivity of phytoplankton in saline-alkaline ponds. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, **27**(1): 47-54. [赵文, 董双林, 李德尚等. 盐碱池塘浮游植物初级生产力的研究. 水生生物学报, 2003, **27**(1): 47-54.]
- [30] Sun X, Jiang XM, Song GF *et al.* Spatio-temporal patterns of phytoplankton communities and their driving environmental factors in Lake Qinghai. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 540-552. DOI: 10.18307/2023.0212. [孙兴, 蒋小明, 宋高飞等. 青海湖浮游植物群落时空格局及其环境驱动因子. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 540-556.]
- [31] Chen H, Zhou W, Chen WX *et al.* Simplified, rapid, and inexpensive estimation of water primary productivity based on chlorophyll fluorescence parameter  $F_o$ . *Journal of Plant Physiology*, 2017, **211**: 128-135. DOI: 10.1016/j.jplph.2016.12.015.
- [32] Chen M, Li SC, Sun HL *et al.* Impact of cascade hydropower development in the lower-reach of Yalong River on river ecosystem services. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, **30**(1): 89-93, 107. [陈敏, 李绍才, 孙海龙等. 雅砻江下游梯级开发对河流生态系统服务功能的影响. 水力发电学报, 2011, **30**(1): 89-93, 107.]
- [33] Rao EM, Xiao Y, Ouyang ZY *et al.* Status and dynamics of China's Lake water regulation. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(21): 6225-6231. [饶恩明, 肖焱, 欧阳志云等. 中国湖泊水量调节能力及其动态变化. 生态学报, 2014, **34**(21): 6225-6231.]
- [34] Shi JQ, Qi HF, Yang JX *et al.* Evaluation of proliferation and release effect of *Gymnocypris przewalskii* from Qinghai Lake. *Agricultural Extension Service*, 2016, **33**(12): 128-129. [史建全, 祁洪芳, 杨建新等. 青海湖裸鲤增殖放流效果评估. 农技服务, 2016, **33**(12): 128-129.]
- [35] Hair, JF, Risher, JJ, Sarstedt, M *et al.* When to use and how to report the results of PLS-SEM. *European Business Review*, 2019, **31**(1): 2-24. DOI: 10.1108/EBR-11-2018-0203.
- [36] Tahir M, Kristian HL, Lars S *et al.* A review of variable selection methods in Partial Least Squares Regression. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2012, **118**: 62-69. DOI: 10.1016/j.chemolab.2012.07.010.
- [37] Cheng J, Liu CH, Liu K *et al.* Potential impact of the dramatical expansion of Lake Qinghai on the habitat facilities and grassland since 2004. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): 922-934. DOI: 10.18307/2021.0325. [程俭, 刘昌华, 刘凯等. 2004年以来青海湖快速扩张对人居设施与草地的潜在影响. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 922-934.]
- [38] Dong HM, Song YG, Zhang MS. Hydrological trend of Qinghai Lake over the last 60 years; Driven by climate variations or human activities? *Journal of Water and Climate Change*, 2019, **10**(3): 524-534. DOI: 10.2166/wcc.2018.033.
- [39] Shi XH, Li SC, An D *et al.* A study of the change of Qinghai Lake evaporation. *Climatic and Environmental Research*, 2010, **15**(6): 787-796. [时兴合, 李生辰, 安迪等. 青海湖水面积蒸发量变化的研究. 气候与环境研究, 2010, **15**(6): 787-796.]
- [40] Shi JQ, Qi HF. Integration and demonstration of proliferation and release technology of naked carp in Qinghai Lake. *Qinghai Science and Technology*, 2018, **25**(1): 24-28. [史建全, 祁洪芳. 青海湖裸鲤增殖放流技术集成及示范. 青海科技, 2018, **25**(1): 24-28.]
- [41] Xue MY, Xiao JY, Gao LW *et al.* Comprehensive assessment of lake tourism scenic spot economic value—A case study of Qinghai Lake scenic spot. *Journal of Shanxi University: Natural Science Edition*, 2018, **41**(1): 241-247. [薛明月, 肖景义, 高丽文等. 湖泊型旅游景

- 区经济价值综合评估——以青海湖景区为例. 山西大学学报: 自然科学版, 2018, 41(1): 241-247.]
- [42] 青海湖流域生态环境保护条例. 青海日报, 2022.
- [43] 黄建蓉. 盐度对青藏高原湖泊微生物群落结构与功能稳定性的影响[学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
- [44] Huang S, Li CZ, Li ZX *et al.* Effects of different salinities on growth and osmotic regulation gene expression of *Gymnocypris przewalskii*. *Fisheries Science*, 2022, 41(4): 527-536. [黄岫, 李长忠, 李梓瑄等. 盐度对青海湖裸鲤生长及渗透调节基因的影响. 水产科学, 2022, 41(4): 527-536.]
- [45] Yu ZL, Xu XB, Li JY. Ecosystem service values of Bosten Lake from 1955 to 2019 and their influence factors. *Wetland Science*, 2022, 3: 395-403. [禹泽龙, 徐昔保, 李景宜. 1955—2019年博斯腾湖生态系统服务价值及其影响因素研究. 湿地科学, 2022, 3: 395-403.]
- [46] 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.]
- [47] Wang CH, Zhang SN, Zhang FM *et al.* On the increase of precipitation in the northwestern China under the global warming. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(9): 980-989. [王澄海, 张晟宁, 张飞民等. 论全球变暖背景下中国西北地区降水增加问题. 地球科学进展, 2021, 36(9): 980-989.]
- [48] Ye QH, Cheng WM, Zhao YL *et al.* A review on the research of glacier changes on the Tibetan Plateau by remote sensing technologies. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(7): 920-930. DOI: 10.3724/SP.J.1047.2016.00920. [叶庆华, 程维明, 赵永利等. 青藏高原冰川变化遥感监测研究综述. 地球信息科学学报, 2016, 18(7): 920-930.]
- [49] Li L, Shen HY, Liu CH *et al.* Response of water level fluctuation to climate warming and wetting scenarios and its mechanism on Qinghai Lake. *Climate Change Research*, 2020, 16(5): 600-608. [李林, 申红艳, 刘彩红等. 青海湖水位波动对气候暖湿化情景的响应及其机理研究. 气候变化研究进展, 2020, 16(5): 600-608.]

附表 I 青海湖 2010—2020 年湖泊特征和社会经济指标

Attached Tab.I Lake characteristics and socio-economic indicators of Qinghai Lake from 2010 to 2020

年份	水位/m	水面 面积 /km <sup>2</sup>	蓄水量/ 亿 m <sup>3</sup>	废污水排 放量/t	裸鲤数量/ 亿尾	旅游收入/ 亿元	相关论文 发表数量	全国基础研究 经费/亿元	全国总论文 数量/万篇
2010	3193.59	4308.7	771.5	474	1.58	0.3	295	324.50	141.6
2011	3193.72	4279.7	781.8	754	1.68	1.0	221	411.80	150.0
2012	3194.08	4313.5	799.5	207	2.07	1.3	261	498.81	152.0
2013	3194.31	4335.2	800.8	213	2.11	1.7	287	554.95	154.5
2014	3194.33	4337.0	803.8	305	2.37	1.9	312	613.54	157.0
2015	3194.44	4349.9	806.8	242	2.48	2.2	285	716.12	164.0
2016	3194.53	4358.3	821.3	303	2.94	2.5	321	822.89	165.0
2017	3194.93	4395.6	837.6	309	2.83	3.3	354	975.49	170.1
2018	3195.41	4440.2	864.7	242	3.25	5.6	431	1090.37	184.4
2019	3195.97	4486.1	881.7	232	3.40	6.3	432	1335.60	195.0
2020	3196.34	4516.4	896.0	232	3.62	2.4	428	1467.00	195.2

附表 II 青海湖 2010—2020 年环境气候因子指标\*

Attached Tab.II Indicators of environmental and climatic factors in Qinghai Lake from 2010 to 2020

年份	平均气温 /°C	平均水温 /°C	降水量 /mm	蒸发量 /mm	水汽压差/ (×10 <sup>2</sup> Pa)	日照时 数/h	矿化度/ (mg/L)	pH	叶绿素 <i>a</i> / (mg/L)
2010	2.3	6.0	443.6	1023.0	5.1	2757.7	17800	9.1	0.34
2011	1.4	5.9	458.7	835.4	4.6	2843.0	17200	9.0	0.40
2012	1.0	5.4	526.3	829.7	4.6	2480.0	17000	9.1	0.47
2013	2.7	6.2	342.0	955.5	5.6	3018.9	16600	9.3	0.39
2014	2.8	6.0	406.4	859.4	5.1	2882.4	15200	9.2	0.56
2015	3.1	6.3	386.5	915.7	5.4	2966.5	16000	9.1	0.61
2016	3.8	6.9	449.5	907.2	5.5	2948.1	15500	9.1	0.76
2017	3.0	6.6	454.3	810.3	5.0	2770.0	15150	9.0	0.66
2018	3.0	7.1	469.4	724.3	4.9	2755.6	12500	9.1	0.94
2019	2.6	6.7	499.3	748.9	4.6	2616.4	13000	9.2	1.24
2020	2.2	6.5	385.6	666.6	4.4	2457.1	12000	9.1	1.35

\* 水汽压差为水面和 15 m 高处的水汽压力差。

附表III 研究数据来源  
Attached Tab.III Data sources

数据指标	数据精度	数据来源
水位 (m)、水温 (°C)、气温 (°C)、蒸发量 (mm)、降水量 (mm)、水面和15 m高处的气压差 (10 <sup>2</sup> Pa)	月尺度数据	《中华人民共和国水文年鉴(第10卷第4册)》
蓄水量 (亿m <sup>3</sup> )、水面面积 (km <sup>2</sup> )、 废污水净化量 (t)	年尺度数据	《青海省水资源公报》
叶绿素 <sub>a</sub> (mg/L)、pH、矿化度 (mg/L)	采样监测数据	青海省水文水资源测报中心
日照时数 (h)、青海湖景区旅游总收入 (亿元)	年尺度数据	《青海省统计年鉴》
青海湖裸鲤数量 (尾)	年尺度数据	《青海省生态环境状况公报》
全国研究与试验发展基础研究经费支出 (亿元)、 发表科技论文数量 (万篇)	年尺度数据	国家统计局网站 ( <a href="https://data.stats.gov.cn/">https://data.stats.gov.cn/</a> )

附表IV 2010—2020年青海湖水生态系统生产总值及各项服务功能价值量  
Attached Tab.IV Gross aquatic ecosystem product and value of each ecosystem services of Qinghai Lake from 2010 to 2020

年份	总价值	水源 涵养	水质 净化	气候 调节	固碳 释氧	洪水调 蓄	物种 保育	休闲 旅游	科研 教育
2010	7205.97	4713.87	0.099	2077.73	0.435	18.98	394.50	0.3	0.068
2011	6903.47	4776.80	0.158	1685.29	0.524	18.89	420.75	1.0	0.061
2012	7109.67	4884.95	0.043	1687.01	0.541	18.99	516.75	1.3	0.086
2013	7394.41	4892.89	0.045	1952.57	0.549	19.06	527.50	1.7	0.103
2014	7281.79	4911.22	0.064	1756.92	0.753	19.06	591.75	1.9	0.122
2015	7450.45	4929.55	0.051	1877.58	0.847	19.10	621.00	2.2	0.124
2016	7640.79	5018.14	0.063	1863.75	1.051	19.13	736.00	2.5	0.160
2017	7528.33	5117.74	0.065	1678.92	0.865	19.24	708.00	3.3	0.203
2018	7637.79	5283.32	0.051	1515.96	1.238	19.37	812.00	5.6	0.255
2019	7848.55	5387.19	0.048	1583.65	1.566	19.50	850.00	6.3	0.296
2020	7822.67	5474.56	0.048	1419.14	1.612	19.59	905.00	2.4	0.322

单位：亿元。

附表V 2010—2020年青海湖水生态系统各项服务功能价值量占比

Attached Tab.V Proportion of value of each ecosystem services of Qinghai Lake from 2010 to 2020

年份	水源涵养	水质净化	气候调节	固碳释氧	洪水调蓄	物种保育	休闲旅游	科研教育
2010	65.416%	0.001%	28.833%	0.006%	0.263%	5.475%	0.004%	0.001%
2011	69.194%	0.002%	24.412%	0.008%	0.274%	6.095%	0.014%	0.001%
2012	68.708%	0.001%	23.728%	0.008%	0.267%	7.268%	0.018%	0.001%
2013	66.170%	0.001%	26.406%	0.007%	0.258%	7.134%	0.023%	0.001%
2014	67.445%	0.001%	24.128%	0.010%	0.262%	8.126%	0.026%	0.002%
2015	66.164%	0.001%	25.201%	0.011%	0.256%	8.335%	0.030%	0.002%
2016	65.676%	0.001%	24.392%	0.014%	0.250%	9.633%	0.033%	0.002%
2017	67.980%	0.001%	22.301%	0.011%	0.256%	9.404%	0.044%	0.003%
2018	69.173%	0.001%	19.848%	0.016%	0.254%	10.631%	0.073%	0.003%
2019	68.639%	0.001%	20.178%	0.020%	0.248%	10.830%	0.080%	0.004%
2020	69.983%	0.001%	18.141%	0.021%	0.250%	11.569%	0.031%	0.004%

附表VI 变量的方差膨胀因子检验结果

Attached Tab.VI Variance inflation factors among independent variables

变量	水温	矿化度	水位	蓄水量	水面面积
方差膨胀因子	2.404757	16.2386	165.5106	108.0947	56.01167