

DOI: 10.5846/stxb201801140103

高伟, 杜展鹏, 严长安, 陈岩. 污染湖泊生态系统服务净价值评估——以滇池为例. 生态学报, 2019, 39(5): - .

Gao W, Du Z P, Yan C A, Chen Y. Evaluating net ecosystem services value of a polluted lake: A case study of Lake Dianchi. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): - .

污染湖泊生态系统服务净价值评估 ——以滇池为例

高 伟¹, 杜展鹏¹, 严长安², 陈 岩^{3,*}

1 云南大学生态学与环境学院, 昆明 650091

2 昆明市环境科学研究院, 昆明 650032

3 环境保护部环境规划院, 北京 100012

摘要: 水污染是我国湖泊生态系统面临的主要环境问题, 评估污染条件下湖泊生态系统服务价值对认识和恢复污染湖泊生态功能具有重要意义。针对当前湖泊生态系统服务价值评估方法中未体现水污染负面影响的问题, 本研究在传统生态系统服务功能价值评估框架的基础上, 将水污染造成的经济损失内化到生态系统服务功能价值中, 提出了针对污染湖泊的生态系统服务功能价值评估方法。应用该方法核算了滇池生态系统服务净价值。结果表明: 2006—2015 年滇池年均生态系统服务功能价值为 386.55 亿元/a, 水污染改变了滇池的价值结构, 供水价值丧失, 气候调节、旅游和蓄水等成为滇池生态系统服务功能价值的主体; 滇池水污染对流域内外经济社会发展造成的损失达到 15.23 亿元/a, 主要经济损失体现在生态补水费用和蓝藻去除费用; 综合湖泊生态系统服务的正向价值和水污染的负向损失, 滇池的净生态系统服务价值为 371.33 亿元/a, 占流域 GDP 的 11.7%。将水污染损失纳入湖泊生态系统服务功能价值评估中增强了评价结果的合理性, 能够更加真实地反映湖泊生态系统对人类经济社会发展的综合影响。

关键词: 生态系统服务; 水污染损失; 环境评估; 湖泊; 滇池

Evaluating net ecosystem services value of a polluted lake: A case study of Lake Dianchi

GAO Wei¹, DU Zhanpeng¹, YAN Chang'an², CHEN Yan^{3,*}

1 School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China

2 Kunming Institute of Environmental Science, Kunming 650032, China

3 Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China

Abstract: Water pollution is a key threat for lake ecosystems in China, and estimating ecosystem services value from the perspective of water pollution is of great significance to understand and restore ecosystem functions of a lake. Since the economic loss due to water pollution is ignored in the current evaluation of ecosystem services value, a new model for estimating the ecosystem services value of a polluted lake is established by incorporating the economic losses from water pollution to improve the conventional methodology. This model was applied to Lake Dianchi to obtain its net ecosystem services value. The results showed that the average ecosystem services value of Lake Dianchi reached 38.655 billion Yuan per year during the period of 2006—2015. Water pollution has altered the structure of ecological value of Lake Dianchi. The water supply service value of the lake dropped to zero, while the atmospheric adjustment, tourism, and water storage emerged as the major contributors. The economic losses caused by water pollution amounted to 1.523 billion Yuan per year,

基金项目: 国家自然科学基金(41701631); 云南省基础研究计划青年项目(Y0120160068); 云南大学服务云南行动计划(2016MS18)

收稿日期: 2018-01-14; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ychenychen@163.com

mainly from the costs of ecological water supply and algae removal in the lake. Taking into account both ecosystem services value and economic losses in the lake, the net ecosystem services value was 37.133 billion Yuan per year, accounting for 11.7% of the total local GDP. The rationality of the evaluation results was enhanced by incorporating the water pollution losses into the evaluation of ecosystem services of lake, making this ecosystem services value estimation model more authentic than the conventional methodology to reflect the comprehensive influence of human disturbance on the lake ecosystem.

Key Words: ecosystem services; water pollution loss; environmental assessment; lake; Dianchi

我国是一个湖泊众多的国家,拥有面积 1.0 km^2 以上的湖泊 2693 个,总面积 81414.6 km^2 ^[1],发挥着供给、调节、文化等多种生态系统服务功能^[2],具有巨大的经济价值^[3]。在我国经济社会迅速发展的压力下,湖泊水污染现象逐渐凸显^[1,4],水污染导致湖泊生态功能退化,生态系统服务价值下降^[5]。据 2016 年中国环境状况公报显示^[6],全国 112 个重点湖泊(水库)中,有 33.9% 达不到地表水环境质量的 III 类。湖泊污染不仅会降低湖泊生态系统服务功能,还可能对地区经济社会发展产生不利影响^[7]。在污染条件下,湖泊对经济社会发展已经表现出负效应,如湖泊水污染可降低工农业产品的产量和品质、损害周边人体健康、产生治理费用^[8-9],进而损害区域可持续发展能力。因此,对于污染型湖泊的生态系统服务价值评估有必要考虑湖体污染的经济损失,以全面反映湖泊生态系统变化对人类经济社会活动的影响。

生态系统服务的价值评估是国内外生态学和生态经济学的研究热点,以 Costanza^[10]等在 Nature 上发表的针对全球生态系统服务的价值评估研究为标志,生态系统服务价值评估成为生态学领域迅速增长的研究主题^[11]。湖泊生态系统服务价值评估最初作为森林、草地、水域等综合生态系统服务功能价值评估的组成部分,随着湖泊水环境问题的日益凸显,针对湖泊生态系统的服务价值评估开始逐步得到重视。目前在太湖、洪泽湖、仙女湖等多个湖泊均开展了案例研究^[5,7,12]。当前湖泊生态系统服务价值研究主要集中在价值的构成和时空变化上,评估的内容为湖泊各项生态系统服务对人类需求的正效益,缺乏对湖泊污染带来的经济损失研究,难以充分反映湖泊生态系统对人类经济社会发展的全面影响。滇池是云贵高原面积最大的湖泊,具有供水、气候调节、文化娱乐等多种生态系统功能。作为我国污染型湖泊的典型代表,滇池从 20 世纪 90 年代开始出现周年性蓝藻水华问题,湖泊生态系统功能严重退化,并对经济社会发展造成了一定的损失^[9,13-14]。为治理滇池水污染,从“九五”期间开始投入大规模资金进行污染控制,其中“十二五”期间投资达到 420 亿元^[15],滇池的水污染对地区经济社会发展造成了极大经济损失。滇池的生态系统对区域经济社会发展同时形成了正向和负向的双重影响,有必要考虑两者的效应去评估滇池的生态系统服务形成的净价值。

本研究以滇池为研究对象,首先采用市场价值法、造林成本法、替代工程法等方法对滇池的供水功能、大气调节、水质净化等 9 种生态系统服务价值进行估算,获得滇池的生态系统服务正价值。进而采用污染损失评价法计算出滇池水污染对流域内和下游区域发展造成的经济损失。最后将水污染造成的经济社会损失纳入生态系统服务功能价值评估中,计算出滇池生态系统服务净价值,以期为污染湖泊生态系统服务价值评估提供更加全面的方法借鉴与案例参考。

1 研究区概况

滇池位于云南省昆明市,是云贵高原上最大的淡水湖泊,属中国六大淡水湖之一(图 1)。1996 年滇池被海埂大堤分为南北两个子湖泊,其中北部的称为草海,面积 10.8 km^2 ,平均水深为 2.5 m;南部称为外海,面积 289.2 km^2 ,平均水深 4.4 m。滇池流域的总面积为 2920 km^2 ,流域范围全部位于昆明市境内。滇池流域以占云南省 0.78% 的面积承载了全省 18% 的人口和 23% 的 GDP,是西南地区人类活动最为活跃区域之一。由于高强度的人为干扰,滇池流域水资源十分短缺,人均水资源占有量不足 300 m^3 ,流域水资源供需面临巨大的压力。自 20 世纪 90 年代以来,滇池的草海和外海水质长期处于超标状态。近年来随着流域污染治理和外流

域调水等工程的实施,流域主要水质指标有所改善,但水质超标仍然十分严重^[16],湖体长期维持在地表水环境质量标准的 V 类和劣 V 类。

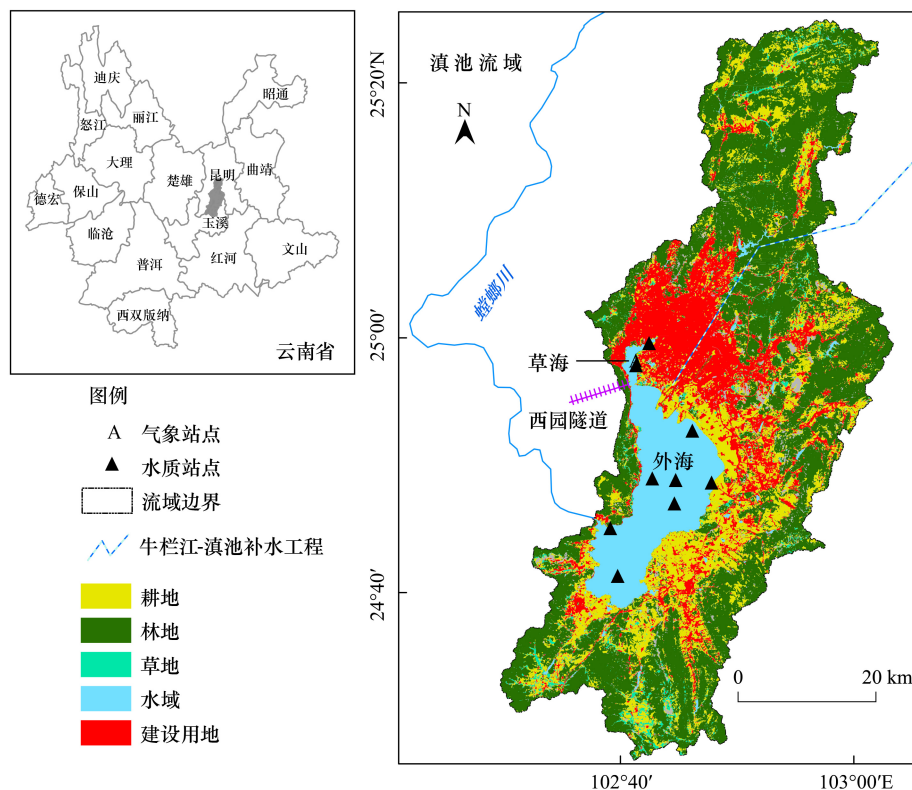


图 1 滇池地理位置与水质监测站点

Fig.1 Location of Lake Dianchi and water quality gauging stations

2 材料与方法

2.1 研究时段与数据来源

由于湖泊的生态系统服务价值存在年际波动^[7],研究单一年份的生态系统服务价值难以反映湖泊平均状况。根据资料可得性,本研究选取 2006—2015 年共 10 年作为研究时段,相关的计算参数取该时段的平均值。部分气象指标(如气温、降水等)使用 30 年以上的平均值,以反映滇池生态系统服务价值的多年平均情况。

本研究的气象数据来源于中国气象数据网(data.cma.cn);水质数据来源于昆明市环境监测中心;水文数据来源于长江流域水文年鉴;经济社会数据来自于昆明市统计年鉴;其他数据来源在计算方法中有相应说明。

2.2 湖泊生态系统服务价值评估方法

作为重要的水域生态系统,湖泊具有多种生态功能。根据现有文献^[17-22],湖泊的生态系统功能包括供水功能、提供水产品、提供植物产品、水力发电、大气调节、输沙、调蓄洪水、蓄水、土壤保持、净化空气、气候调节、提供栖息地、旅游教育、水质净化、科研、养分循环、维护生物多样性和航运等 18 种功能。从评估方法看,对湖泊生态系统服务价值的计算方法主要有市场价值法、支付意愿法、机会成本法、替代工程法、旅行费用法等。本研究根据滇池的调研和数据可得情况,评估其供水、提供水产品、大气调节等 9 项主要生态系统服务功能价值。

$$LESV = \sum_i LV_i \quad (1)$$

式中, $LESV$ 为湖泊提供的生态系统服务价值 (10^8 元/a); LV_i 为湖泊第 i 项生态系统服务价值 (10^8 m³/a)。

2.2.1 供水价值评估

供水功能价值是指湖泊对生产生活提供达标的水资源带来的经济价值。目前湖泊的供水功能价值评估主要有市场价值法和支付意愿法, 其中市场价值法应用最多。本研究采用市场价值法计算供水功能价值, 具体计算公式参见文献^[7]。

2.2.2 提供水产品价值评估

湖泊具有丰富的水产品资源, 其提供水产品价值是指湖泊提供各类水产品带来的经济收益, 目前主要采用市场价值法计算, 即湖泊产出水产品产量乘以该品种的单位价格, 具体计算公式参见文献^[7]。滇池的历年水产品数据来自于昆明渔政调查数据, 水产品价格来自于昆明市发改委公布的物价公报。

2.2.3 大气调节价值评估

湖泊的大气调节功能主要是指水体中浮游植物的固碳释氧功能。水体中的浮游植物可以通过光合作用固定 CO_2 同时释放 O_2 , 从而产生调节大气组分的作用。首先采用湖泊初级生产力算法估算释氧和固碳量, 再根据碳税法 and 工业制氧法确定单价, 最终估算其调节价值^[7,23]。湖泊大气调节价值的计算公式如下:

$$LV_{AA} = PP_{eu} \cdot 0.365 \cdot LA(CP + 2.666 \cdot OP) \cdot 10^{-8} \quad (2)$$

式中, LV_{AA} 为湖泊的大气调节价值 (10^8 元/a); PP_{eu} 为湖泊初级生产力 ($mgC\ m^{-2}\ d^{-1}$); LA 代表湖面面积 (km^2); CP 为固碳成本 (元/kg), 取 1200 元/t^[24]; OP 为氧气价格 (元/kg), 取 1000 元/t^[24]。

湖泊的初级生产力 PP_{eu} 采用 VGPN 模型^[25] 计算, 模型表达式如下:

$$PP_{eu} = 0.66125 \cdot P_{opt}^B \cdot \frac{E_o}{E_o + 4.1} \cdot Z_{eu} \times C_{opt} \times D_{irr} \quad (3)$$

其中,

$$Z_{eu} = 4.605/K_d$$

$$K_d = -\ln(0.2)/SD$$

式中, P_{opt}^B 为水柱最大碳固定速率 ($mgC\ mg\ Chla^{-1}\ h^{-1}$), 可用温度的经验公式计算, 具体公式见参考文献^[25-26]; E_o 为湖泊表面光合有效辐射强度 ($mol\ m^{-2}\ d^{-1}$); Z_{eu} 为有效辐射为表面光合有效辐射 1% 的深度 (m), 一般用真光层深度表示, 当水深小于真光层深度就用水深代替^[27], 参数值可采用透明度估算, 相关公式见文献^[28-29]; C_{opt} 为最大碳固定速率所在深度的叶绿素 a 浓度, 可用表层叶绿素 a 浓度代替 ($mg\ Chla\ m^{-3}$); D_{irr} 为光照周期 (h/d), 可根据日出日落时间估算^[26], 也可采用气象观测站的日照监测数据计算; K_d 为光衰减系数 (m^{-1}); SD 为透明度 (m)。

2.2.4 气候调节价值评估

湖泊的气候调节是指通过水分蒸发作用对大气温度和湿度的调节效应。参考现有研究方法^[30-31], 采用替代成本法估算湖泊的气候调节价值, 具体计算公式如下:

$$LV_{AC} = EVAP \cdot EP \left(LTG \cdot 0.2778/EER + \frac{1000}{ECP} \right) \quad (4)$$

式中, LV_{AC} 为湖泊的气候调节价值 (10^8 元/a); $EVAP$ 为夏季蒸发量 (10^8 m³/a); LTG 为水的汽化热, 取滇池夏季平均气温 (昆明站, 1951—2015 年统计, 20℃) 时 1 个标准大气压下水的气化热, 2453.46 kJ/kg; EER 为空调的制冷能效比, 参考《房间空气调节器能效限定值及能效等级 GB12021.3—2010》, 取不同类型空调器的平均能效限定值, 即 3.075; EP 为昆明市平均电价 (元 $kW^{-1}\ h^{-1}$), 取值 0.45 元 $kW^{-1}\ h^{-1}$; ECP 为加湿效率 ($mL\ W^{-1}\ h^{-1}$), 根据加湿器标准 GB/T23332—2009, 本研究取不同加湿器加湿效率限制的平均值 4.67 $mL\ W^{-1}\ h^{-1}$ 。

2.2.5 水质净化功能价值评估

湖泊通过降解、沉淀、挥发等生物、化学、物理作用净化进入湖体的污染物, 表现出净化功能。利用替代成本法估算湖泊的净化功能价值, 即湖体对总氮和总磷的净化能力乘以市场上各项的单位收费标准或治理成

本,具体计算公式如下:

$$LV_{pp} = \sum_i (PP_i \times PM_i) \cdot 10^{-8} \quad (5)$$

式中, LV_{pp} 为湖泊水质净化功能价值(10^8 元/a); PP_i 为湖泊第*i*种污染物的净化能力(t/a); PM_i 为代表市场上第*i*种污染物的削减成本或收费标准(元/t),根据我国污水处理厂处理成本统计结果^[32],每吨废水的处理成本为1.25元,进水浓度按环境保护部华南环境科学研究所编制的《生活源产排污系数及使用说明2011年》生活源进水浓度计算,出水按《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)一级B排放标准,可计算出单位投资的污水处理量和污染物削减量。由于污水处理厂同时削减多种污染物,本研究采用等标污染负荷方法计算不同污染物的削减量占比,以占比为依据分配削减费用,最后得到TN的治理成本为3286元/t,TP的治理成本为65724元/t。

2.2.6 调蓄洪水价值评估

湖泊利用自身库容可以调节一定体量的洪水,减轻洪涝灾害,发挥水量调蓄功能。利用替代工程法,根据建设费用估算湖泊的调蓄功能价值。以湖泊多年平均水位变化为标准,根据实际水位变化数据得出每年相应的蓄洪总量。采用替代工程法,根据市场上水库平均建设价格,得出相应的调蓄洪水价值,具体计算公式如下:

$$LV_{AF} = (LHS - LLS) \cdot DP \quad (6)$$

式中, LV_{AF} 代表调蓄洪水功能价值(10^8 元/a);LHS代表滇池多年平均最高水位对应的库容($10^8\text{m}^3/\text{a}$);LLS代表滇池多年平均最低水位对应的库容($10^8\text{m}^3/\text{a}$);DP代表研究区单位水库库容的平均造价(元/ m^3),取值6.11元/ m^3 ^[24]。

2.2.7 蓄水价值评估

湖泊具有一定的库容,能够有效的蓄积水资源。采用替代工程法,根据湖泊蓄水量和单位蓄水价值估算湖泊的总蓄水价值,具体计算公式如下:

$$LV_{WR} = LAS \cdot DP \quad (7)$$

式中, LV_{WR} 代表湖泊蓄水价值(10^8 元/a);LAS代表滇池多年平均水位对应的库容($10^8\text{m}^3/\text{a}$);DP代表研究区单位水库库容平均造价(元/ m^3),取值6.11元/ m^3 ^[24]。

2.2.8 土壤保持价值评估

水土流失进入湖泊之后,在湖泊底部沉积,湖泊保持了流域一定的土壤资源。利用机会成本法,采用湖底底泥淤积数据和单位耕地经济收益,即可得出土壤保持功能价值,具体计算公式如下:

$$LV_{sp} = SR \cdot BS \cdot EM/ET \cdot 10^{-6} \quad (8)$$

式中, LV_{sp} 代表土壤保持功能价值(10^8 元/a);SR代表底泥淤积速度(m/a);BS代表湖底面积(km^2);ET代表土壤有效土层深度(m);EM代表单位面积耕地的经济收益(元/ hm^2)。

2.2.9 旅游休闲价值评估

滇池是昆明市的著名景点,围绕滇池水体景观形成了昆明滇池国家级旅游度假区,发挥着重要的景观和旅游价值。本研究围绕滇池旅游度假区,采用比例折算法,计算出湖泊的休闲娱乐价值,具体公式参见文献^[33]。

2.3 湖泊水污染经济损失核算

根据影响途径的差异,水污染经济损失可分为直接经济损失和间接经济损失,后者指对非直接用水部门造成的经济损失或用水部门的污染防御费用^[14],即本研究所计算的水污染经济损失。如果湖泊受到污染,不符合某项用水的水质标准,理论上其提供的该项生态系统服务价值为零,至于取用不达标的水造成了经济损失,即水污染形成的直接经济损失,本质上属于管理问题,不当算是湖泊污染造成的经济损失。因此,本研究计算间接经济损失,以此作为湖泊水污染经济损失的核算内容,与现有的水污染损失计算内容有所不

同^[9,13-14]。此外,根据污染损失的客体差异,本研究还考虑湖泊污染对下游地区造成的经济损失,滇池水体通过海口河和西园隧道向下游泄水,由于水质不达标,对下游经济社会用水造成不利影响。综上,本研究中湖泊水污染经济损失包括对流域内造成的经济损失和下游用水造成的经济损失两部分,用公式表示如下:

$$LPEL = WIEL + WOEL \quad (9)$$

式中,LPEL 为湖泊水污染经济损失(10^8 元/a);WIEL 为流域内经济损失(10^8 元/a);WOEL 为流域外经济损失(10^8 元/a)。

2.3.1 流域内经济损失核算

根据现有湖泊污染治理措施与影响,污染湖泊造成间接经济损失主要包括底泥疏浚费用、引水换水费用、除藻费用和人体健康损失费用等。需要注意的是,必须区分湖泊污染带来的经济损失或防护费用与治理湖泊污染的经济费用。流域内的污染物削减措施费用(如污水处理厂建设)不应计入湖泊污染的间接经济损失,污染削减措施带来的费用属于恢复费用法,即达到一定水质目标时需要投入的经济费用。在恢复费用法假设下,湖泊的水质将恢复到非污染状态,那么其生态系统服务价值也要按水质达标重新计算,并不属于湖泊污染造成的经济损失核算内容。

根据滇池的实地调研和污染治理内容,同时考虑资料的可获得性,滇池水污染对流域内造成的主要经济损失体现在生态补水费用和蓝藻去除费用。因此,本研究主要计算滇池的引水换水费用和除藻费用等 2 项污染损失费用。其中引水换水费用根据调水的水资源价值估算,除藻费用采用实际支出计算。综上,滇池水污染对流域内造成的经济损失可采用如下计算公式:

$$WIEL = EWT \cdot (EWP + WRP) + ABI \cdot IRR + ABR \quad (10)$$

式中,EWT 为湖泊生态补水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$);EWP 为补水工程单位补水量的支出费用(元/ m^3);WRP 为水资源费(元/ m^3),根据国家发展改革委、财政部、水利部联合印发的《关于水资源费征收标准有关问题的通知》,云南省水资源费为 0.2 元/ m^3 ;ABI 除藻工程投资费用(10^8 元);IRR 为我国社会贴现率,取 8%;ABR 为除藻工程运行费用(10^8 元/a)。除藻费用参数来自于滇池蓝藻打捞工程项目预算^[34]。

2.3.2 流域外经济损失核算

滇池对下游造成的经济损失主要核算其超标排放导致下游水资源价值的损失。水资源损失量采用灰水足迹模型计算,水污染经济损失根据水资源损失量和水资源价值核算,采用的具体公式如下:

$$WOEL = \text{Max} \left[\frac{(AC_i - SIC_i) \cdot RO}{SOC_i - SNC_i}, 0 \right] \cdot WP \quad (11)$$

式中, AC_i 为第 i 种污染物出境断面实测浓度(mg/L); SIC_i 为第 i 种污染物在流域内的水质标准(mg/L); SOC_i 为第 i 种污染物在下游的水质标准(mg/L); SNC 为下游第 i 种污染物的自然背景浓度(mg/L),取滇池 1960 年未受污染时的浓度^[35];RO 代表湖泊年出流量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$);WP 为云南省水资源费(元/ m^3)。

2.4 污染湖泊生态系统服务净价值评估

对于污染型湖泊,其对经济社会表现出两种相反的影响,一种是通过各种生态功能对经济社会发展起支撑作用,另一种是由于水污染对经济社会造成的各种经济损失和治理费用。基于这两种效应,本研究提出湖泊生态系统服务净价值评估方法。评估的基本思路是首先根据湖泊生态系统提供的各种服务产品计算其对经济社会发展的正向经济价值;在此基础上,根据湖泊污染对经济社会造成的不利影响,核算其对经济社会发展造成的经济损失,分别从区域内和区域外两个角度评估;最后,综合湖泊的正向经济效益和负向经济损失,获得湖泊生态系统对经济社会发展表现出的净价值。该值可能为正,也可能为负,正值表示效益大于损失,负值表示损失大于效益。湖泊生态系统的正向经济价值评估方法如 2.2 节所示,负向经济损失如 2.3 节所示,两者综合后的净价值计算公式如下:

$$NESV = LESV - LPEL \quad (12)$$

式中,NESV 为湖泊生态系统服务净价值(10^8 元/a),其他符号同前文。

3 结果与分析

3.1 湖泊生态系统服务价值

3.1.1 供水价值

根据滇池草海和外海 10 个水质监测站点的污染物浓度监测数据,2006—2015 年草海和外海的水质类别均为地表水环境质量的劣 V 类,达不到饮用、灌溉、工业、景观等用水标准,因此本研究将供水价值计为 0。

3.1.2 提供水产品价值

滇池的主要水产品是鲢、鳙、鲤、鲫、红鳍鲌等大型鱼类,银鱼和虾。由于实施“以渔控藻”项目,滇池 2010—2011 年全面封湖,从 2012 年开始开湖捕捞。根据 2012—2017 年捕捞数据,滇池的水产品产量年际波动较大,主要受捕捞政策和捕捞期的气候条件影响。为反映滇池水产品的平均产量,根据资料可得性,本研究采用 2012—2017 年平均值。该期间滇池水产品的平均年产量为 2323 t,其中鱼虾年均产量为 713 t。根据昆明市发展和改革委员会公布的水产品价格,计算得到滇池年均的水产品供给价值为 0.38×10^8 元/a。

3.1.3 大气调节功能价值

根据 2006—2015 年水质监测数据,滇池草海和外海的平均透明度分别为 0.63 m 和 0.43 m、叶绿素 a 的年均浓度分别为 107 mg/m^3 和 70 mg/m^3 、水温分别为 18°C 和 18°C 。结合昆明气象站的辐射监测数据,采用 VGPN 模型计算得出滇池的草海和外海的初级生产力。结果表明,滇池草海和外海 2006—2015 年的平均初级生产力分别为 $4359 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $2005 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。相对于长江中下游湖泊而言^[36],滇池的初级生产力较高,主要原因是滇池的叶绿素 a 浓度高。

经核算,滇池的草海和外海 2006—2015 年大气调节价值计算结果如下图所示(图 2),滇池的大气调节价值具有年际波动性,变化范围为 $(6.17—12.08) \times 10^8$ 元,平均为 8.85×10^8 元,其中外海是滇池大气调节价值的主要贡献水体,占全湖大气调节价值的 92%。

3.1.4 气候调节价值

基于昆明气象站的监测数据,采用彭曼蒸发公式,计算出滇池夏季(6—8 月)的多年平均(1970—2015 年)蒸发量为 314 mm/a 。根据气候调节价值的计算公式和参数,得到滇池的气候调节价值为 184.78×10^8 元/a。

3.1.5 水质净化价值

根据 2002—2009 年滇池入湖和出湖氮磷计算结果显示^[37],滇池年均可分别净化 TN 和 TP 分别为 7275.81 t 和 881.76 t。根据氮磷单位削减费用,可以计算出滇池的水质净化价值为 0.82×10^8 元/a。

3.1.6 调蓄洪水价值

滇池(海埂站)的多年平均最高水位和最低水位分别为 1887.08 m 和 1886.06 m^[38]。根据滇池的库容曲线(图 3),可以得到滇池多年平均最高水位对应的库容为 $14.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,最低水位对应的库容为 $11.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据调洪蓄水价值计算公式,可以得到滇池的调洪蓄水价值为 18.75×10^8 元/a。

3.1.7 蓄水价值

滇池(海埂站)的多年平均水位为 1886.67 m^[38],对应的库容为 $13.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 3)。根据湖泊蓄水价值计算公式,可以得到滇池的蓄水价值为 82.25×10^8 元/a。

3.1.8 土壤保持价值

随着入湖泥沙的不断淤积,滇池的湖底高程呈现上升趋势。根据湖底高程变化数据^[38],得到滇池的淤积

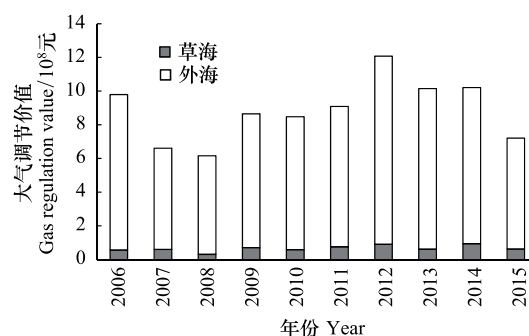


图 2 2006—2015 年滇池大气调节价值

Fig.2 Gas regulations value of Lake Dianchi from 2006 to 2015

速度为 0.0028 m/a ;湖底面积参数取多年平均值;土壤有效图层厚度取中国平均水平 $0.9893 \text{ m}^{[39]}$;单位耕地的经济收益根据昆明市 2006—2015 年农业增加值和耕地面积计算(昆明市统计年鉴),得到昆明市耕地的平均收益为 52875 元/hm^2 (2015 年可比价)。经核算,滇池土壤保持价值为 $0.04 \times 10^8 \text{ 元/a}$ 。

3.1.9 旅游功能价值

根据昆明市统计年鉴,昆明市 2006—2015 年旅游总收入年均为 $38068.83 \times 10^8 \text{ 元/a}$ (2015 年不变价)。昆明滇池国家旅游度假区的旅游人数约占昆明市的 22.2% (2012 年数据)。根据以上参数,估算滇池的旅游价值为 $90.68 \times 10^8 \text{ 元/a}$ 。

3.1.10 生态系统服务总价值

根据以上计算结果,滇池的生态系统服务价值总量为 $386.55 \times 10^8 \text{ 元/a}$,其中气候调节、旅游休闲和蓄水等 3 项功能是滇池生态系统服务价值构成的主体,占比 92.5% (表 1)。与已有滇池生态服务价值相关研究相比^[41],本文结果偏大,其主要原因是本文计算的气候调节和蓄水等 2 项生态服务价值,在文献 41 中未予考虑,而这 2 项的贡献率约占 70%。

表 1 滇池生态系统服务价值构成

Table 1 Ecosystem service values of Lake Dianchi

功能类型 Ecological function	价值量 Value /(10^8 元/a)	比例/% Proportion	单位面积价值 Value per area /(万元/km^2)	功能类型 Ecological function	价值量 Value /(10^8 元/a)	比例/% Proportion	单位面积价值 Value per area /(万元/km^2)
供水 Water supply	0	0	0	调蓄洪水 Flood protection	18.75	4.9	625.11
提供水产品 Provide aquatic products	0.38	0.1	12.65	蓄水 Water storage	82.25	21.3	2741.64
大气调节 Gas regulation	8.85	2.3	294.86	土壤保持 Soil reservation	0.04	0.0	1.50
气候调节 Climate regulation	184.78	47.8	6159.49	旅游休闲 Recreation	90.68	23.5	3022.59
水质调节 Water purification	0.82	0.2	27.29	合计 Total	386.55	100	12885.12

3.2 湖泊污染经济损失评估

3.2.1 流域内经济损失

牛栏江-滇池补水工程平均每年向滇池补水 $5.66 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,滇池 2000—2014 年平均水华面积为 256.15 km^2 ^[41],根据滇池生态补水和除藻费用计算公式,得到滇池水污染造成的年均流域内经济损失为 $13.23 \times 10^8 \text{ 元/a}$ 。

3.2.2 流域外经济损失

滇池湖水通过海口河进入流域下游的螳螂川,根据云南省地表水环境功能区划(2010—2020),螳螂川的中滩闸门至富民大桥段为农业用水和景观用水区,水质类别目标为 V 类。然而,2006—2015 年期间滇池出流水质为劣 V 类,因此滇池向下游地区超标输送了污染物。

根据 2006—2015 年的流量和水质监测数据,核算出滇池通过海口河下泄的 TN 和 TP 年均达到 1149.47 t/a 和 81.92 t/a (西园隧道出水用作工业供水,在此不作计算),而达标情况下输出的 TN 和 TP 应该分别为 239.51 t/a 和 11.98 t/a 。因此滇池每年向下游超标输送了 TN 909.96 t/a ,TP 69.95 t/a 。2006—2015 年滇池逐年超标输出的氮磷负荷如图 4 所示。

滇池的总氮和总磷超标将分别产生 $5.91 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $9.99 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的灰水足迹,根据外流域污染经济损

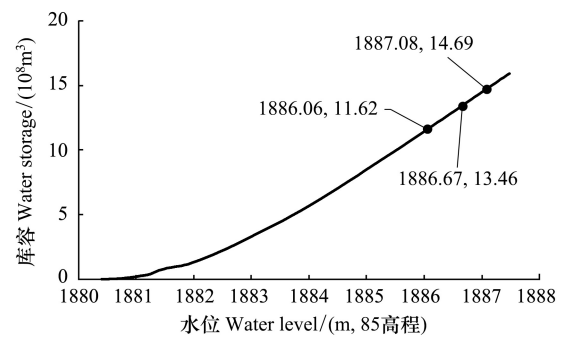


图 3 不同水位下滇池的库容量变化

Fig.3 Storage of Lake Dianchi with different water levels

失计算公式,得到滇池对下游造成的污染经济损失为 2.00×10^8 元/a。

3.2.3 流域总体经济损失

根据流域内外经济损失评估结果显示,滇池由于水污染造成的年均总损失为 15.23×10^8 元/a,按面积计算为 507.62 万元/km²。从损失构成来看,滇池污染对流域内的影响高于流域外,流域内的损失占总损失量的 86.9%(表 2)。滇池水环境改善将有利于降低对流域内外的经济损失,特别是流域内。

表 2 滇池水污染损失构成

Table 2 Economic loss due to water pollution of Lake Dianchi			
损失类型 Loss type	价值量/(10 ⁸ 元/a) Value	比例/% Proportion	单位面积价值/(万元/km ²) Value per area
流域内 Inner basin	13.23	86.9	441.00
流域外 External basin	2.00	13.1	66.62
合计 Total	15.23	100	507.62

3.3 湖泊净生态系统服务价值

从生态系统服务的正向效益看,滇池每年可提供的生态系统服务价值量为 386.55×10^8 元/a。然而,由于严重的水污染问题,滇池对流域内经济社会发展造成了一定的负担,产生了生态补水和藻类去除费用等负向影响,平均每年支出 15.23×10^8 元/a。综合考虑正向效益和负向影响,滇池每年的净生态系统服务价值为 371.33×10^8 元/a(图 5),导致生态系统服务价值降低 3.9%。

4 结论

基于污染湖泊与经济社会交互特征,本研究提出综合考虑湖泊生态系统服务价值和污染损失的净生态系统服务价值的评估方法,并对污染严重的滇池开展了案例研究,得到如下结论:(1)2006—2015 年滇池年均生态系统服务功能价值为 386.55×10^8 元/a,严重污染导致滇池丧失供水功能,气候调节、旅游和蓄水等成为滇池生态系统服务功能价值的主体;(2)滇池水污染对流域内和流域外经济社会发展均造成了经济损失,年均损失达到 15.23×10^8 元/a,占滇池生态系统服务功能价值的 3.9%,其中水污染对流域内造成的损失占损失总量的 86.7%;(3)综合考虑湖泊生态系统对经济社会的正向和负向影响,滇池的净生态系统服务价值小于生态系统服务价值,为 371.33×10^8 元/a,占 2015 年流域 GDP 的 11.7%。

本研究试图综合湖泊的生态服务与污染损失两种效应,开展湖泊生态系统对经济社会的综合影响评估。相对于生态系统服务价值评估,与本研究主题直接相关的湖泊污染损失研究较少,可借鉴的方法与参数有限,本研究仅提出一种评估思路,尚未充分考虑污染造成的多种经济损失项目,今后的研究需要进一步完善污染损失核算内容。此外,由于湖泊生态系统状态存在年际和年内波动,时间尺度的选取对计算结果可能产生影响。本研究虽根据可得的数据进行了多年平均处理,但部分数据的时间序列长度有限,难以规避趋势性变化因素。建议在数据量充足的条件下,尽可能使用多年平均数据或趋势剔除等方法,获得能够反映生态系统平均或稳定状态的参数。

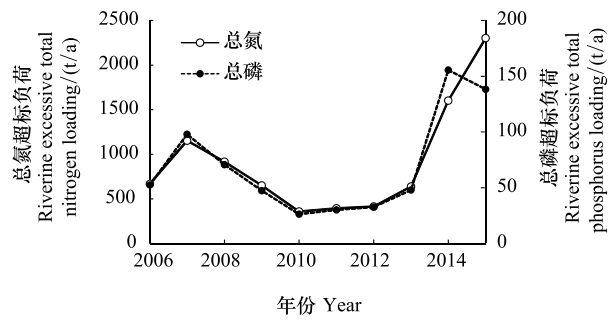


图 4 2006—2015 年滇池氮磷超标输出负荷量

Fig.4 Excess nutrients export of Lake Dianchi from 2006 to 2015

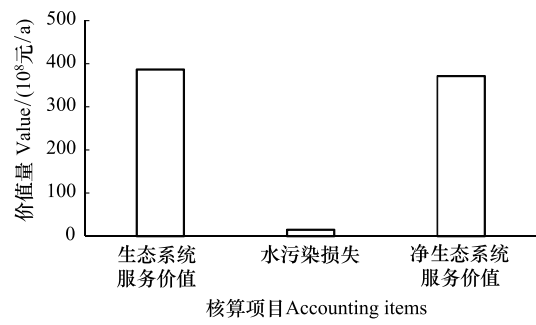


图 5 滇池净生态系统服务价值

Fig.5 Net ecosystem services values of Lake Dianchi

参考文献 (References):

- [1] 杨桂山, 马荣华, 张路, 姜加虎, 姚书春, 张民, 曾海鳌. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810.
- [2] 江波, Wong C P, 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.
- [3] Zhang Y R, Zhou D M, Niu Z G, Xu F J. Valuation of lake and marsh wetlands ecosystem services in China. Chinese Geographical Science, 2014, 24(3): 269-278.
- [4] 陈小锋, 揣小明, 杨柳燕. 中国典型湖区湖泊富营养化现状、历史演变趋势及成因分析. 生态与农村环境学报, 2014, 30(4): 438-443.
- [5] 张修峰, 刘正文, 谢贻发, 陈光荣. 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.
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 2016 中国环境状况公报. (2017-06-05) [2017-12-16]. <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/>.
- [7] 贾军梅, 罗维, 杜婷婷, 李中和, 吕永龙. 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.
- [8] Beier C M, Caputo J, Lawrence G B, Sullivan T J. Loss of ecosystem services due to chronic pollution of forests and surface waters in the Adirondack region (USA). Journal of Environmental Management, 2017, 191: 19-27.
- [9] 陈金发. 修正 Logistics 模型在水污染经济损失计算中的应用. 节水灌溉, 2015, (5): 57-59.
- [10] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [11] 马凤娇, 刘金铜, Eneji A E. 生态系统服务研究文献现状及不同研究方向评述. 生态学报, 2013, 33(19): 5963-5972.
- [12] 黄蕾, 段百灵, 袁增伟, 田丰, 毕军. 湖泊生态系统服务功能支付意愿的影响因素——以洪泽湖为例. 生态学报, 2010, 30(2): 487-497.
- [13] 谭晓, 刘春学, 杨树平, 李发荣. 滇池水污染经济损失估算. 长江流域资源与环境, 2012, 21(12): 1449-1452.
- [14] 方国华, 钟淋涓, 毛春梅. 水污染经济损失计算方法述评. 水利水电科技进展, 2004, 24(3): 54-56.
- [15] 何佳, 徐晓梅, 杨艳, 吴雪, 王丽, 李森, 周鸿斌. 滇池水环境综合治理成效与存在问题. 湖泊科学, 2015, 27(2): 195-199.
- [16] 梁中耀, 刘永, 盛虎, 杨永辉, 郭怀成, 赵磊, 贺彬. 滇池水质时间序列变化趋势识别及特征分析. 环境科学学报, 2014, 34(3): 754-762.
- [17] 杜婷婷, 罗维, 李中和, 吕永龙. 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.
- [18] 谢正宇, 李文华, 谢正君, 李新琪. 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.
- [19] 陈志平, 熊汉锋, 黄世宽, 万细华. 梁子湖湿地生态系统服务功能价值评估研究. 水土保持研究, 2009, 16(2): 231-233, 238.
- [20] 姜昊, 程磊磊, 尹昌斌. 洪泽湖湿地生态系统服务功能价值评估研究. 农业现代化研究, 2008, 29(3): 331-334.
- [21] 庄大昌. 洞庭湖湿地生态系统服务功能价值评估. 经济地理, 2004, 24(3): 391-394, 432.
- [22] 崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究. 生态学杂志, 2004, 23(4): 47-51.
- [23] 张运林, 冯胜, 马荣华, 刘明亮, 秦伯强. 太湖秋季真光层深度空间分布及浮游植物初级生产力的估算. 湖泊科学, 2008, 20(3): 380-388.
- [24] 国家林业局. LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [25] Behrenfeld M J, Falkowski P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. Limnology and Oceanography, 1997, 42(1): 1-20.
- [26] 殷燕, 张运林, 时志强, 刘笑菡, 冯龙庆. 基于 VGPM 模型和 MODIS 数据估算梅梁湾浮游植物初级生产力. 生态学报, 2012, 32(11): 3528-3537.
- [27] 乐成峰, 李云梅, 查勇, 孙德勇, 王莉珍. 真光层深度的遥感反演及其在富营养化评价中的应用. 生态学报, 2008, 28(6): 2614-2621.
- [28] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 陈宇炜, 吴生才. 太湖梅梁湾沿岸带水体生物学与光学特性. 生态学报, 2005, 25(3): 454-460.
- [29] Lorenzen M W. Use of chlorophyll-secchi disk relationships. Limnology and Oceanography, 1980, 25(2): 371-372.
- [30] 崔丽娟, 庞丙亮, 李伟, 马牧源, 孙宝娣, 张亚琼. 扎龙湿地生态系统服务价值评价. 生态学报, 2016, 36(3): 828-836.
- [31] 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.
- [32] 谭雪, 石磊, 马中, 张象枢, 陆根法. 基于污水处理厂运营成本的污水处理费制度分析——基于全国 227 个污水处理厂样本估算. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3833-3840.
- [33] 王斌, 杨艳刚, 张彪, 杨校生. 常州市水生态系统服务功能分析及其价值评价. 湖南农业科学, 2010, (23): 72-76.
- [34] 云南省公共资源交易信息网. 2018 年滇池重点区域蓝藻打捞处置工作监理项目 (二次) 公开招标公告. (2017-12-18) [2018-1-10]. <https://www.ynggzyxx.gov.cn/jyxx/jsgcZbggDetail?guid=efcf5ed5-14dd-4726-aa7a-af3e637a6fae&isOther=false>.
- [35] 余国营, 刘永定, 丘昌强, 徐小清. 滇池水生植被演替及其与水环境变化关系. 湖泊科学, 2000, 12(1): 73-80.
- [36] 曾台衡, 刘国祥, 胡征宇. 长江中下游湖区浮游植物初级生产力估算. 长江流域资源与环境, 2011, 20(6): 717-722.
- [37] Wu Z, Liu Y, Liang Z, Wu S, Guo H. Internal cycling, not external loading, decides the nutrient limitation in eutrophic lake: a dynamic model with temporal Bayesian hierarchical inference. Water Research, 2017, 116: 231-240.
- [38] 朱珊珊, 姚林. 滇池水位变化趋势及影响因素初步分析. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2): 182-184.
- [39] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征. 地理研究, 2001, 20(2): 161-169.
- [40] 吕磊. 滇池水质时空分布模拟及生态系统服务功能价值评价[D]. 昆明: 云南财经大学, 2010.
- [41] 蒋大林. 基于 GIS/RS 的滇池藻类水华时空变化及驱动因子分析[D]. 重庆: 西南大学, 2015.