

滇池生态安全综合评估研究

冯宁,毛锋*,李晓阳,张安地

(北京大学环境科学与工程学院,北京 100871)

摘要 湖泊水库的生态安全是湖库区(流)域人民赖以生存和社会经济可持续发展的重要基础.通过深入剖析湖库生态安全的内涵,运用湖库生态安全综合评估模型,从人类活动压力、湖库水体健康和湖库生态服务功能三方面评价了滇池 1999~2007 年间的生态安全状况.结果表明,通过污染物排放总量的控制,至 2007 年人类活动对滇池产生的直接压力已有效减轻,然而湖库水质状况却未得以根本改善,多年来滇池生态安全状况处于Ⅳ级,即生态安全状况较差.

关键词 湖库 生态安全 综合定量评估 滇池

中图分类号 X820.2 文献标识码 A 文章编号 0250-3301(2010)02-0282-05

Research on Ecological Security Assessment of Dianchi Lake

FENG Ning, MAO Feng, LI Xiao-yang, ZHANG An-di

(College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Through thorough analysis of the ecological security of lakes and reservoirs, which is the foundation of people's living and regional sustainable development, the related mechanism between water system and social activities is elaborated. Then on the basis of pressure of human activities, the water quality and the service functions, the ecological security situations and trends of Dianchi Lake at time scale from 1999 to 2007 are analyzed. The results indicate that contamination gross control effectively relieves the pressure of human activities to some extent. But the water quality isn't obviously improved, and the grade of ecological security is not optimistic according to increasing index from 2005.

Key words lakes and reservoirs; ecological security; comprehensive and quantitative assessment; Dianchi Lake

伴随科学技术的蓬勃发展,人类改造和控制自然的欲望及能力亦在急速膨胀.一方面,人类活动破坏了生态系统原有的自然平衡,另一方面则试图建立起满足人类需求的新平衡,其后果往往易使生态系统组织结构破缺,导致自调节能力丧失,进而会危及到人类社会的可持续发展.面对人与自然矛盾冲突的日益加剧,“生态安全(ecological security)”逐渐成为生态学和可持续发展等领域研究的热点.

湖泊和水库(简称“湖库”)是地表水资源的主要组分之一,在用水供水、水利防洪、水产养殖及气候调节等方面发挥着重要作用.然而,由于环保意识淡薄、污染治理滞后和保护措施不力等原因,导致我国近年来众多湖库水体被严重污染,水华暴发事件频繁发生,不仅危及湖库生态系统的安全运行,同时威胁到区(流)域人民的健康生存和经济社会的可持续发展.保障湖库的生态安全,既涉及湖库自身水体的健康演化,亦需要调控外部人类活动的压力和满足区(流)域人民生存、生活质量提升对其生态服务的需求.因此,围绕上述内容和目标要求,运用科学、可行的定量评估方法开展实证研究,对于保障我国湖库的生态安全和促进区(流)域乃至全国的可持续发展至关重要.

1 湖库生态安全的内涵剖析

1989 年国际应用系统研究所(IIASA)阐述了生态安全的含义,嗣后国内外学者竞相探索,使得生态安全的内涵不断得以拓展和深化,其实践对象涉及区域、流域和城市的生态安全问题,以及某一自然生态系统对周边社会经济安全保障等.综合众多学者的观点,对生态安全的理解可从以下 2 个角度切入^[1,2].第一,生态系统自身的安全性,即是否具备健康、完整和可持续性,以及生态服务功能是否增强或不至于衰退.第二,生态系统对于人类的安全性,即能否满足当代和未来人类社会的可持续发展需求,以及对发生灾变的风险抵御程度.

我国现阶段面临着严峻的湖库水生态系统恶化威胁,保障湖库的生态安全,则有助保障区(流)域社会经济的稳定发展和增强其健康演化的能力.环湖区域通常拥有优越的自然条件,如优良的地形、土壤、水源、气候、运输等,使得区域呈现人口密度大、

收稿日期 2008-10-18 修订日期 2009-08-17

作者简介 冯宁(1986~),女,硕士研究生,主要研究方向为区域可持续发展与水环境治理, E-mail fengning0216@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail zfmiao@pku.edu.cn

经济增长潜力大和城市化水平高等特征,往往是粮食的主产区和工商业发展的聚集地,然而亦是生态环境易受危害的灾变之地^[3]。因此,湖库的生态安全同样关系着国家的粮食安全和人口的福祉与健康。开展湖库生态系统的安全评估是施行有效治理、保护策略与措施的前奏,而明晰湖库生态安全的内涵则是评估工作的基础。笔者认为其内涵应包括以下 3 个方面:第一,湖库生态系统自身健康、稳定,具有良好的水质状况与水生态结构,维持自身活力和能够自然有序演化;第二,湖库生态系统能够抵御自然环境(如气候、地质等)突变带来的不利生态后果,消纳人类社会生活和经济活动产生的污染物,保持抵御干扰的柔韧性;第三,湖库生态服务功能完好,能够为人类提供清洁水源、养殖、旅游、发电等服务功能,对湖库区社会、经济的可持续发展起到良好的支撑作用。

影响湖库生态安全虽与自然因素有关,但人类社会经济活动则起着关键的作用。由自然因素导致的水污染过程缓慢,加上水体自身的自净作用,其自然富营养化乃至消亡过程往往需要几百年甚至数千年,而人为因素却能够大大加速这样的进程,如云南滇池富营养化过程仅历时十余年^[4]。开展湖库生态安全的评估,不仅有助于掌握湖库水体的健康状况和演化态势,更有助于清晰认知周边社会经济发展对其影响的程度和湖库水体能否满足人们的生态服务需求,进而为改善湖库水环境提供技术和政策支持。

2 湖库生态安全评估方法

目前,国内外生态安全评估大多面向区(流)域生态系统,坊间已有的生态安全评估方法体系若直接运用于湖库研究,尚存诸多弊端,专门针对湖库的生态安全评估工作才刚刚起步。联合国经济合作开发署(OECD)建立的压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)指标框架模型对生态安全的研究产生了重大的影响。左伟等^[5]在此基础上进行扩展,提出的驱动力-PSR 模型也得到了广泛的引用。然而,基于 PSR 框架的评估体系存在如下局限性:第一,指标选取时过于追求综合性和广覆盖面,因而忽视了指标间客观上易于存在的相关关系,且将这类具有相关度较高的不同量纲、不同内涵的指标进行加权求和,缺乏基本科学依据;第二,频繁使用权重而牵涉较多人为主观因素,一定程度上偏离了评估的客观性要求;第三,外界环境与生态系统之间的作

用关系复杂多变,本质上具有非线性机制,而 PSR 框架遵循线性加和原理有悖于客观现实的作用机制。

由于湖库生态系统的演化状态和能量输出与人类活动影响和服务需求直接相关,因而客观上存在非线性机制,且为了在评估湖库生态系统安全与否的同时能够揭示出人类活动压力的大小和其生态服务的程度,文献[6]基于“乘法原理”创建了一套较为科学的湖库生态安全评估框架和方法体系。与基于线性加和原理的“指标筛选-权重赋值-加权综合”的评估模式不同,该套评估方法体系着重从人类社会活动带来的直接压力和对生态服务功能索取带来的间接压力 2 个角度,探析了湖库水体生态系统与社会环境之间的关联机制,进而从人类活动压力、湖库水体健康和湖库生态服务功能综合有机关联方面创建了湖库生态安全与交叉影响的定量评估模型。

在湖库生态系统中,湖库的水体是主体,其生态健康状况是系统安全的基础,而水体富营养化以及由水华引起的水资源供给受损问题则是制约水体生态健康的核心。因此,以水质指标为评价对象,可采用综合指数法分别得出相对独立的人类活动压力指数 P 、水体健康指数 H 和生态服务需求指数 S 。为了反映人类活动对湖库系统健康状况的影响程度和湖库系统健康状况满足人类需求的服务程度,在该套评估方法体系中又创造性地提出和构建了人类胁迫指数和需求服务指数及其计算模型。进而,为了综合评价湖库系统的安全,该套评估方法体系基于人类胁迫指数和需求服务指数构建了湖库生态安全综合指数和相应的计算模型。此外,为了从整体上综合评估人类活动对湖库的胁迫程度、湖库对人类需求的服务程度以及湖库整体的生态安全状况,且便于同一湖库不同时期状态的纵向比较或不同湖库间生态安全程度的横向判别,在该套评估方法体系中以 COD(化学需氧量)、TP(总磷)、TN(总氮)和 M (该指标可针对评估对象具体情况选定,如超标严重的指标或发生灾变的特征性指标)为主要水质指标进行上述指数的换算和评估,以映射湖库生态安全的程度。该套评估方法体系如图 1 所示,其详细原理和公式说明可参见文献[6]。

3 滇池概况

滇池北临昆明市区,东经 $102^{\circ}36' \sim 102^{\circ}47'$,北纬 $24^{\circ}40' \sim 25^{\circ}02'$,呈南北向分布,总面积 298.34 km^2 ,蓄水量 15.6 亿 m^3 ,系我国第六大淡水湖泊。滇

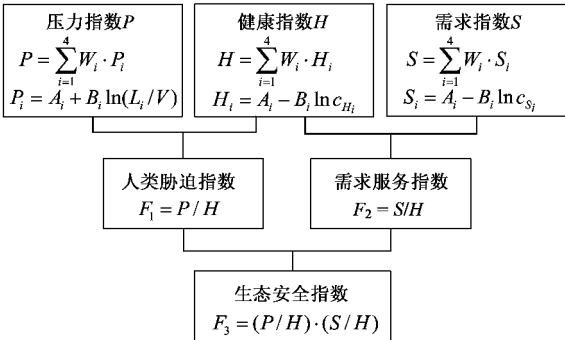


图 1 湖库生态安全综合评估框架

Fig. 1 Framework of comprehensive ecological security assessment of lakes and reservoirs

池北部有一天然湖堤将其分隔为南北两水区,北区称草海(内湖),南区为其主体,称外海.入湖河流 20 多条,流域覆盖 7 个县 40 个乡镇,因多数河流流经城镇、农田、磷矿工业区,从而携带大量氮、磷等营养物质入湖.滇池既是昆明市生活及工农业用水的主要水源地,又是流域城乡生活污水及工业废水等的主要纳污水体,已经不堪重负.20 世纪 60 年代滇池草海和外海为Ⅱ类水质,70 年代为Ⅲ类水质,80 年代初期逐渐污染,90 年代以后迅速恶化成劣Ⅴ类.由于草海受流域河流污染物严重排放影响,水质指标浓度值远高于外海水质,呈现出明显的空间分布规律,即高锰酸盐指数、BOD₅、TP、TN 等指标总体上由北向南逐渐降低,浓度梯度明显.富营养化是滇池面临的最大威胁,藻类的异常增殖和由此带来的水质退化严重制约了湖泊生态服务功能的输出^[7-9].自“七五”以来,滇池一直被国家列为三大重点污染治理湖泊之一.但据新发布的 2008 年云南省环境质量公报显示,滇池草海和外海水质仍为劣Ⅴ类,分别处于重度富营养状态和中度富营养状态,其水污染恶化态势迄今尚未得到有效控制.

4 滇池生态安全综合评估

本文运用前述方法对滇池 1999 ~ 2007 年间的生态安全状况进行评估.在计算压力指数 P 时,由于缺少连年入湖各污染物总量的详细数据,故利用多年昆明市污水总量结合滇池各污染物入湖量之比的经验值估算期间入湖各污染物的总量.依据滇池水质污染物构成,以 COD、BOD₅ 表征滇池有机物污染程度,TN、TP 衡量其富营养化水平.此外,需求指数 S 采用Ⅳ类水的标准,各指数的测算数据来源于云南省和昆明市多年的统计年鉴及环境状况公

报等.

4.1 权重与等级标准的确定

根据滇池 1999 ~ 2007 年间 COD、BOD₅、TN 和 TP 的数据,运用熵值法计算该 4 项指标的权重,并划分评估等级,其结果如表 1 和表 2 所示.

表 1 滇池生态安全评估指标权重

Table 1 Weight of indicators of ecological security assessment in Dianchi Lake

指标	COD	BOD ₅	TN	TP
权重	0.244	0.247	0.254	0.253

表 2 滇池生态安全评估等级划分

Table 2 Grade division of each index of ecological security assessment in Dianchi Lake

指数	等级				
	I (弱)	II (较弱)	III (中等)	IV (较强)	V (强)
P	≤2.74	≤3.87	≤5.07	≤6.17	≤10
H	≤2.19	≤6.21	≤7.48	≤8.95	≤10
S	≤3.43	≤4.64	≤5.92	≤7.11	≤10
F_1	≤0.31	≤0.52	≤0.82	≤2.82	>2.82
F_2	≤0.38	≤0.62	≤0.95	≤3.25	>3.25
F_3	≤0.12	≤0.32	≤0.78	≤9.14	>9.14

根据前述模型设计,指数 P 、 H 和 S 的取值区间正常情况下应介于 0 ~ 10 之间.若 $P > 10$,则表明人类活动压力强度极大,该年度的污染负荷超过了预先设定的最大可能污染负荷;若 $P < 0$,则表明人类活动对湖库的污染负荷影响极小,但当前几乎不存在这两种极端社会实践状态.若 $H < 0$,表明该年度有极端污染事件发生;若 $H > 10$,则表明湖库的健康状况异常良好. S 值由于依据规划目标计算求得,通常在一段时期内视其保持不变.

在指数 P 、 H 和 S 上述理论取值区间界定的基础上,依据 1999 ~ 2007 年间滇池水质指标的实际最小值和最大值,由前述 F_1 和 F_2 计算公式可得两者的取值区间均为 [0, 5].即 $F_1 = 0$ 时人类活动对滇池水体健康影响的压力强度最弱, $F_1 = 5$ 时则最强; $F_2 = 0$ 时人类需求对滇池水体健康的潜在压力强度最弱,而 $F_2 = 5$ 为最强.相应地, F_3 的取值区间则为 [0, 20],即 $F_3 = 0$ 时滇池的生态安全程度最高,而 $F_3 = 20$ 时其生态安全程度最低,意味着滇池生态系统已“崩溃”.诚然,上述指数理论和实践取值区间的 2 种极端情形通常不会发生,因为人类社会的认知能力和自组织机制不至于毁灭自然生态而使自身无立足之地.

4.2 评估结果分析

利用前述模型方法计算的结果表明,压力指数 P (图 2) 除 2003 年有所反弹外,已由 1999 年的 9.77 下降至 2007 年的 6.47,减幅为 34%。压力指数的下降趋势表明滇池流域污染物排放总量逐步得以控制,从而较有效地减小了人类生产生活活动施加于滇池水体的危害性压力。然而,滇池水体健康指数 H 变化曲线 8 a 间基本稳定于 II 级“较弱”级别,表明湖体水质状况较差,且多年来未能从根本上得以有效改善。这与湖底沉积物作用直接相关,沉积物中营养盐等有害物质的释放是水体污染负荷的重要来源,即使外源输入被切断,长期沉积在底泥中的内源污染物却仍在继续释放,导致湖体水质难以在短期内得以有效净化^[9]。

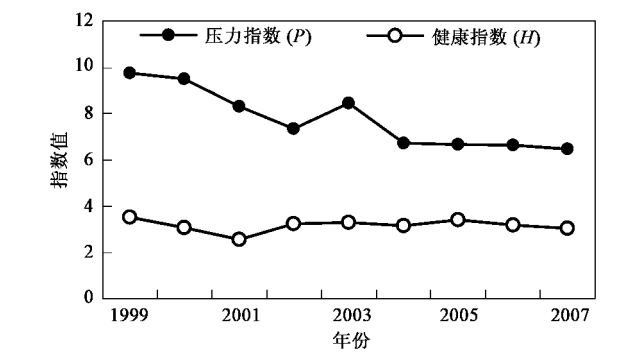


图 2 1999 ~ 2007 年滇池压力指数、健康指数变化曲线
Fig. 2 Changes of pressure index and health index of Dianchi Lake from 1999 to 2007

就图 3 而言,人类胁迫指数 F_1 在小幅波动中基本呈现下降态势。即 1999 ~ 2001 年间胁迫指数进入 V 级(强),嗣后显著下降,2004 年始则趋于平缓。这表明,随着人类活动压力的减小对滇池水体的危害亦在减少,但迫于湖体健康情况未有明显改观,因此 1999 ~ 2007 年间的人类胁迫指数降幅仅为 23%。

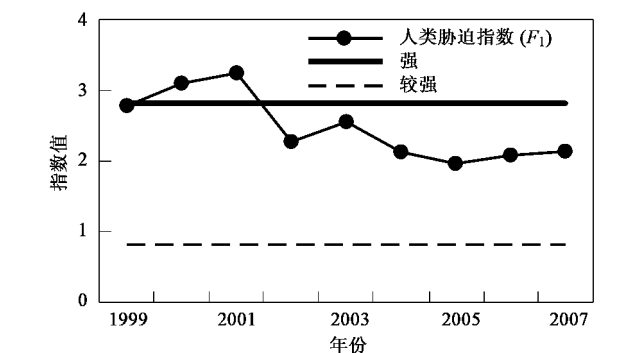


图 3 1999 ~ 2007 年滇池人类胁迫指数变化曲线
Fig. 3 Changes of human stress index of Dianchi Lake from 1999 to 2007

由图 4 可知,需求服务指数 F_2 除 2001 年明显上升外基本保持稳定,所处级别为 IV 级“较强”,表明滇池水体状况近多年来较难满足市域人口生活质量亟待改善下的水质需求。诚然,较之于人类活动所带来的直接危害压力,人类需求的生态服务压力虽相对较小,但改善滇池水体健康状况刻不容缓,采用有效措施提升其对昆明市经济社会发展可持续支持的能力势在必行。

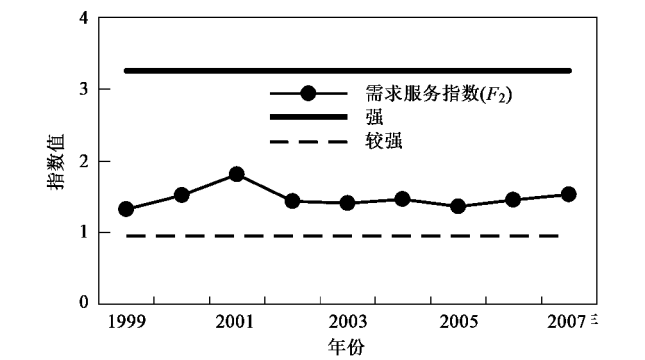


图 4 1999 ~ 2007 年滇池需求服务指数变化曲线
Fig. 4 Changes of demand services index of Dianchi Lake from 1999 to 2007

在 1999 ~ 2007 年间,滇池生态安全指数 F_3 (图 5) 均属于 IV 级“较强”,表明生态安全状况较差,存在灾变安全隐患。尽管 2001 年生态安全指数 F_3 快速下降后趋于稳定,但近 3 年来则略呈上升趋势,意味着生态安全状况仍不稳定,存在继续恶化的可能。

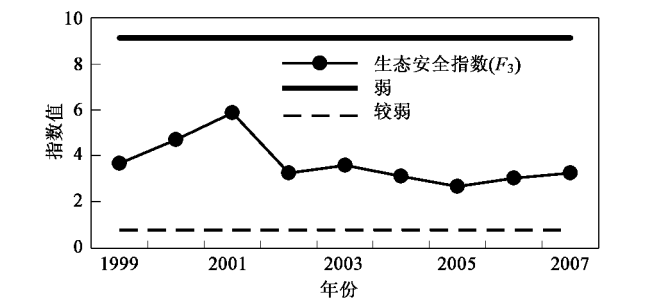


图 5 1999 ~ 2007 年滇池生态安全指数变化曲线
Fig. 5 Changes of ecological security index of Dianchi Lake from 1999 to 2007

上述时序分析表明,近年来虽然人类活动对滇池的排污危害趋于递减之势,且生态服务需求压力变化较小,但由于滇池水体自身健康状况较差,导致其生态安全状况迄今依然严峻。由于水体受污染时间长、污染物来源复杂,短时间内扭转湖体水质状况并非易事。可喜的是,十多年来国家和地方政府投入巨资进行滇池的污染整治已取得了一定的成效。目

前这些成效反映在生态安全指数上虽不显著,但年入湖污染物的总量控制减小了人类活动对湖库的压力,从而为湖体休养生息营造了良好条件,为净化水体、维护滇池生态安全提供了重要保障。

5 结论

滇池生态安全评估结果表明,近多年来入湖污染物总量控制起到了一定的效果,人类活动对湖泊生态安全造成的压力指数呈下降趋势,但湖泊健康指数多年来变化较小,水质改善的效果仍不明显。由于压力指数的降低,人类胁迫指数有所回落,同时需求服务指数基本稳定,生态安全状况自2001年后得到一定的改善,但2005年起又略微上升。目前湖体的水质健康程度是关系滇池生态安全保障的重要因素,因此在降低入湖污染负荷的前提下,控制内源释放、保护和修复水生态系统至关重要。

参考文献:

[1] 曲格平. 关注生态安全之一:生态环境问题已经成为国家安

全的热门话题[J]. 环境保护, 2002, 5: 3-5.

[2] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.

[3] 宁森, 叶文虎. 我国淡水湖泊的水环境安全及其保障对策研究[J]. 北京大学学报(自然科学版)网络版(预印本), 2009, 1: 62-69.

[4] 刘文祥, 耿世刚, 刘金洁, 等. 水资源危机[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2001.

[5] 左伟, 王桥, 王文杰, 等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(1): 67-71.

[6] 毛锋, 李晓阳, 张安地, 等. 湖库生态安全综合评估的方法探析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(2): 327-332.

[7] 张秀川, 黄波. 滇池水资源保护战略[J]. 云南环境科学, 2004, 23: 94-96.

[8] 毛战坡, 彭文启, 王世岩, 等. 滇池水体富营养化及控制措施评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(2): 135-142.

[9] 毛建忠, 王雨春, 赵琼美等. 滇池沉积物内源磷释放初步研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(3): 229-233.