李新,石建屏,曹洪. 2011. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究[J]. 环境科学学报,31(6):1338-1344
Li X, Shi J P, Cao H. 2011. Water environment carrying capacity of Erhai Lake based on index system and analytic hierarchy process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(6): 1338-1344

基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究

李新[1,*],石建屏[2],曹洪[1]

1. 绵阳师范学院资源环境工程学院,绵阳 621000
2. 绵阳职业技术学院材料工程系,绵阳 621000

收稿日期:2010-08-29　　**修回日期**:2010-10-31　　**录用日期**:2010-11-30

摘要:为了定量分析人口增长、经济发展、资源短缺和环境污染等因素对流域水环境的综合影响,根据水环境承载力概念模型并结合洱海流域水环境现状,建立了水环境承载力多目标优化模型. 同时,选取人口、灌溉面积、国民生产总值(GDP)、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)作为水资源和水质量承载力指标,并运用层次分析法(AHP)确定各指标对湖区水环境承载力的权重,最后,运用指标体系评价法分别计算出 2003—2009 年洱海流域水环境承载力. 结果表明,流域内人口承载超标,经济承载压力增长显著,富营养化指标——总氮(TN)多数年份超标且波动较大;洱海流域水环境承载力过载与实际情况吻合,相对而言,水资源承载力影响程度更大. 水环境承载力的研究可为该流域的经济发展规划、生态环境保护和水资源可持续利用提供科学的依据和建议.

关键词:水环境承载力;指标体系;洱海流域;层次分析法(AHP);国民生产总值(GDP);化学需氧量(COD)

文章编号:0253-2468(2011)06-1338-07　　**中图分类号**:X17　　**文献标识码**:A

Water environment carrying capacity of Erhai Lake based on index system and analytic hierarchy process

LI Xin[1,*], SHI Jianping[2], CAO Hong[1]

1. School of Natural Resource and Environmental Engineering, Mianyang Normal University, Mianyang 621000
2. Materials Engineering Department, Mianyang Occupation Technical College, Mianyang 621000

Received 29 August 2010; **received** in revised form 31 October 2010; **accepted** 30 November 2010

Abstract: In this work, we assess quantitatively the comprehensive effect of population increase, economic development, resource shortage and environment pollution on the water environment of Erhai Lake in Yunnan. According to the basic concept of water environment carrying capacity (WECC) and the specific conditions of Erhai lake, a model was established to optimize the water environment carrying capacity with population, irrigation area, gross domestic product (GDP), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) selected as an index system (IS) of water resource carrying capacity (WRCC) and water quality carrying capacity (WQCC). Analytic hierarchy process (AHP) was used to determine the weight of the indexes on the water environment carrying capacity. The 2003—2009 water environment carrying capacity was calculated by IS-AHP. The results indicated that population exceeded the carrying standard, economic pressure has increased rapidly and the eutrophication index (TN) exceeds the carrying standard, fluctuating violently in most years in the water basin. The overloaded WECC is in accord with the real conditions of Erhai lake and the WRCC has greater influence than the WQCC. The research may provide scientific reasons and suggestions for an economic development plan, ecological environment protection and sustainable development of the water resource.

Keywords: water environment carrying capacity; index system (IS); Erhai Lake; analytic hierarchy process (AHP); gross domestic product (GDP); chemical oxygen demand (COD)

1　引言(Introduction)

随着人口的增长及社会经济的发展,水资源短缺和水环境污染逐渐成为制约社会经济可持续发展的重要因素. 水环境承载力(water environment carrying capacity, WECC)研究是从水环境、宏观经

基金项目: 四川省教育厅资助科研项目(No. 10ZC117);绵阳师范学院科研基金项目(No. QD2007A002)
Supported by the Scientific Research Fund of Sichuan Provincial Education Department (No. 10ZC117) and the Foundation for the Scientific Research Program from the Mianyang Normal University (No. QD2007A002)

作者简介: 李新(1962—),男,副教授,E-mail:lixinshijianping@163.com; * **通讯作者(责任作者)**
Biography: LI Xin (1962—), male, associate professor, E-mail: lixinshijianping@163.com; * **Corresponding author**

济、人口、社会等众多因素之间的关系入手,从本质上反映环境与人类活动间的辩证关系,从而为人口、社会、经济与环境的协调发展提供科学依据. 目前,国内外尚无统一和成熟的水环境承载力研究方法,且国外大都将其纳入可持续发展的范畴进行研究(Clarke,2002;Campbell,1998). 近年来,我国学者通过对水环境承载力概念和内涵的研究,提出了水环境承载力的定义:即在某一时期、一定环境质量要求下,在某种状态或条件下,某流域(区域)水环境在自我维持、自我调节能力和水环境功能可持续正常发挥的前提下,所支撑的人口、经济及社会可持续发展的最大规模(李清龙等,2004;2005;赵卫等,2007). 通过对水环境承载力的深入研究,研究人员提出了包括指标体系评价法、系统动力学法、多目标最优化法、人工神经网络法等水环境承载力的量化研究方法(陈长安等,2007;孙楠等,2008;李川等,2008;),如张文国等(2002)研究指出,模糊优选模型较矢量模法能够更好地反映水环境承载力问题的实质;李如忠等(2005)针对水环境承载力评价模糊优选模型和矢量模法存在的不足,建立了区域水环境承载力评价的模糊随机优选模型;汪彦博等(2006)采用系统动力学方法,建立了石家庄市水环境承载力的模型,并对承载力指标进行量化;涂峰武等(2006)以西洞庭湖为例,构建了湖泊流域水环境承载力模型,预测分析其水资源承载力;王俭等(2007)从阈值角度出发,建立了基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型,并将其应用于辽宁省水环境承载力评价研究中.

我国湖泊众多,面积在 1000 km^2 以上的有 13 个,湖泊总面积约 1200 万 km^2. 目前面临的主要问题包括:湖泊水面面积萎缩、富营养化严重、有机物污染严重、内陆淡水湖泊向咸水湖转化等. 洱海是我国第七大淡水湖泊,也是云南第二大高原淡水湖泊,流域面积约 2565 km^2. 同时,洱海是苍山洱海国家级自然保护区的核心和大理市的主要饮用水源地,具有自然保护、景观旅游、城市用水、气候调节及维护水生生物多样性等多种功能,是大理州乃至整个流域社会经济可持续发展的基础. 但是,洱海同样面临着湖泊富营养化、藻类水华全湖暴发、沉水植物大片死亡等问题,自然保护、饮用水源和景观旅游等多项功能受到严重威胁(王玉敏等,2004;Feng *et al.*,2008;余进祥等,2009). 目前,针对洱海流域水环境承载力方面的研究工作比较少,并且是将水资源和水质量承载力两者分开单独进行研究,采用的研究方法较为单一.

因此,本文以典型水环境承载力概念模型为依据,构建湖泊水环境承载力多目标优化模型及指标体系;运用指标体系评价与层次分析(AHP)相结合的方法,计算洱海流域水环境承载力;分析洱海流域水环境是否能承载社会、经济的发展,提出水资源利用和水环境保护对策及建议. 以期为该流域的经济发展规划、生态环境保护和水资源可持续利用提供科学的依据.

2　水环境承载力模型(Environment model)

2.1　研究区概况

洱海流域位于云南省澜沧江、金沙江和元江三大水系的分水岭地带(图 1),属澜沧江-湄公河水系,位于大理白族自治州境内,地跨大理市和洱源县,流域面积约 2565 km^2. 流域地处低纬高原亚热带季风气候区,区内气候温和,日照充足,四季如春,年均气温约 15 ℃,年均日照时数 2250 ~ 2480 h,年均相对湿度 66%;主导风向为西南风,平均风速 2.3 $m \cdot s^{-1}$;年均降雨量 1048 mm,主要降雨集中在 6—10 月(数据来源于《大理白族自治州 2006 年度气候公报》). 区内土壤类型有红壤、紫色土、棕壤、暗棕壤、水稻土、石灰岩土、亚高山草甸土等. 2009 年,洱海流域总人口 350 万人左右,国民生产总值(GDP)406 亿元,耕地面积 20.48 万 hm^2(数据来源

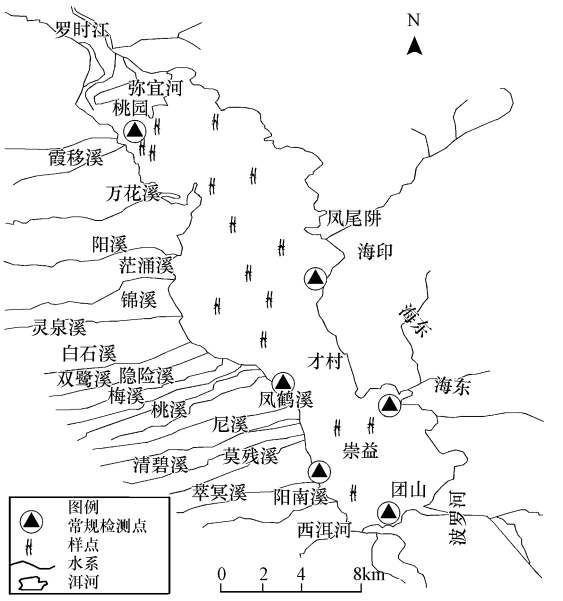


图 1　洱海流域水系

Fig. 1　The water system of Erhai Lake

于《2009 年大理白族自治州国民经济和社会发展统计公报》).

洱海南北较狭长,海拔 1974 m,湖面积 251 km^2,湖容量 28.8 亿 m^3,南北长 42.5 km,岛屿面积 0.748 km^2,最大水深 21.3 m,平均水深 20.6 m. 洱海主要入湖河流有 23 条,承纳了流域内的所有来水,多年平均入湖水量为 8.25 亿 m^3. 洱海唯一的出湖河流为西洱河,多年平均出湖水量为 8.63 亿 m^3;自 1992 年在西洱河完成"引洱济宾"工程后,每年调蓄放水约 0.5 亿 m^3(数据来源于《2008 年云南省水资源公报》).

2009 年洱海水环境质量类别为Ⅲ类,未达到水环境功能要求,湖泊中主要污染指标年均值($mg \cdot L^{-1}$)为:TP 0.023、TN 0.61、高锰酸盐指数 2.58,主要超标指标为 TN. 综合污染指数为 3.26,营养状态指数为 41.1,处于中营养状态. 由于干旱、来水减少等原因,部分污染指标较上年有所上升(数据来源于《2009 年云南省环境状况公报》).

2.2 水环境承载力概念模型

水环境承载力与湖泊生态系统、社会经济系统的概念模型见图 2. 水环境承载力由水资源承载力和水质量承载力构成,其中,水资源承载力(water resource carrying capacity, WRCC)是湖泊满足生态需水量和环境需水量条件下的承载能力,水质量承载力(water quality carrying capacity, WQCC)是湖泊不发生富营养化和有机污染满足水质要求的承载能力.

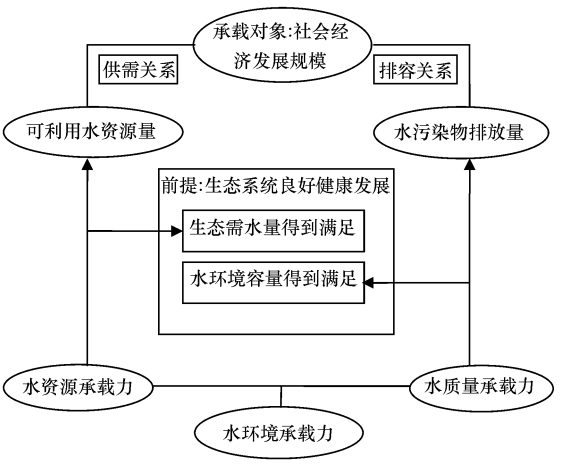


图 2 水环境承载力概念模型

Fig. 2 The concept system of water environment carrying capacity

2.3 水环境承载力多目标模型

根据水环境承载力概念模型,构建水环境承载力多目标模型(图 3). 其中,水资源子系统包括社会指标(人口)、经济指标(灌溉面积、GDP);水质量子系统分为社会指标(人口)、经济指标(灌溉面积、GDP)和污染物指标(富营养化、有机污染). 整个系统分成 3 个层次:目标层(A)中只有水环境承载力 1 个元素,是问题的预定目标或理想结果;领域层(B)包括水资源承载力、水质量承载力 2 个元素,是要实现目标所涉及的中间环节;指标层(C) 包括 6 个为实现目标而选择的各种指标.

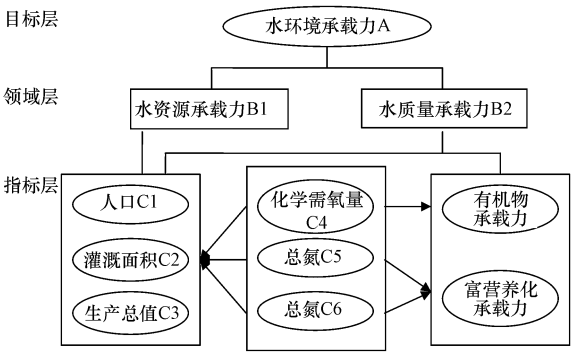


图 3 水环境承载力多目标模型

Fig. 3 The model of water environment carrying capacity

2.4 水环境承载力数学模型

水环境承载力中,水资源承载力是指水资源可承载的社会指标(人口)、经济指标(灌溉面积、生产总值 GDP);水质量承载力是指水质可承载的有机污染指标(COD_{Mn})、富营养化指标(TN、TP). 单项指标承载力模型、水资源承载力模型、水质量承载力模型 、水环境承载力模型分别如式(1)~(4)所示.

$$CS_i = \frac{CC_i}{CC_{max,i}} \qquad CS_j = \frac{CC_j}{CC_{max,j}} \tag{1}$$

$$CCPL = \sum_{i=1}^{n} CS_i \cdot w_i \tag{2}$$

$$CCPZ = \sum_{j=1}^{n} CS_j \cdot w_j \tag{3}$$

$$CCP = CCPL \cdot w_L + CCPZ \cdot w_Z \tag{4}$$

式中,CS_i(CS_j)为第 i(j)个指标的承载度;i 为分别表示人口、灌溉面积 GDP,j 分别表示 COD_{Mn}、TN、TP 等指标;CC_i(CC_j)为第 i(j)指标的压力指数,即实际监测或调查值;$CC_{max,i}$($CC_{max,j}$)为第 i(j)个指标的承载指数,即满足某一生态环境功能要求的标准限值;CCPL 为水资源子系统的承载力;CCPZ 为水质量子系统的承载力;w_i(w_j)为第 i(j)个指标的权重;CCP 为水环境承载力;w_L、w_Z分别为水资源承载力、水质量承载力的权重.

当承载力等于 1 时,承载状况恰好满足水环境承载能力;当承载力小于 1 时,承载状况在水环境承载能力之内;当承载力大于 1 时,承载状况超出了水环境承载能力. 水环境承载力偏离 1 的绝对值越大,说明水环境承载状况满足(或超出)水环境湖泊(或河流)承载能力越多.

3　指标体系权重分配(Index system)

层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)通过把复杂问题分解成各个组成因素,进而将这些因素按支配关系分组形成递阶层次结构. 通过两两比较的方式确定各个因素相对重要性,然后综合决策者的判断,确定决策方案相对重要性的总排序.

3.1　判断矩阵的构造

对同一层次的各元素关于上一层中某一准则的重要性进行两两比较,构造判断矩阵. 比较任意两个因素的重要性时,需要对它们的相对重要性做出判断,给予量化. AHP 法设计了范围为 1 ~9 的标度,取相应元素的值,可得到判断矩阵,具体如表 1 所示.

表 1　AHP 标度表

Table 1　The scale of AHP

标度	定义(比较因数 i 与 j)
1	因数 i 与 j 一样重要
3	因数 i 比 j 稍微重要
5	因数 i 比 j 较强重要
7	因数 i 比 j 强烈重要
9	因数 i 比 j 绝对重要
2、4、6、8	两相邻判断的中间值
倒数	当比较因数 j 比 i 时

以水环境承载力为总目标(A),相当于对总体目标而言,根据水资源承载力、水质量承载力二大领域(B1、B2)之间的相对重要性,构造判断矩阵,结果如表 2 所示;同理,根据 AHP 标度表可以得出各个子系统的判断矩阵,结果如表 3、表 4 所示.

表 2　水环境承载力判断矩阵(A)表

Table 2　The decision matrix of WECC

	水资源承载力	水质量承载力
水资源承载力	1	1/2
水质量承载力	2	1

表 3　水资源承载力判断矩阵(B1)表

Table 3　The decision matrix of WRCC

	人口	灌溉面积	GDP
人口	1	6	2
灌溉面积	1/6	1	1/2
GDP	1/2	2	1

表 4　水质量承载力判断矩阵(B2)表

Table 4　The decision matrix of WQCC

	COD_{Mn}	TN	TP
COD_{Mn}	1	1/2	1/2
TN	2	1	1
TP	2	1	1

3.2　各指标权重的计算

采用归一化方法,计算得到各判断矩阵的特征向量矩阵,进而求得指标体系中各指标的权重(表 5).

表 5　洱海水环境承载力的各指标权重系数

Table 5　The weights of the indexes of WECC

目标层	领域层	权重	指标体系	权重
水环境承载力	水资源承载力	0.3333	人口	0.6353
			灌溉面积	0.1176
			GDP	0.2471
	水质量承载力	0.6667	COD_{Mn}	0.2000
			TN	0.4000
			TP	0.4000

3.3　一致性检验

在对系统要素进行相对重要性判断时,由于运用的主要是专家经验知识,不可能一次性完全准确地判断出两元素相对重要性的比值,只能对其进行估计,存在着一定的误差,因此,必须进行相容性和误差分析,对判断矩阵的一致性进行检验. 当一致性指标 CR <0.1 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,权重分配合理;当 CR ≥0.1 时,应该对判断矩阵做适当修正.

按照一致性检验的计算公式及方法计算得到各矩阵 CR 分别为:CR(**A**) =0.0000 <0.1,CR(**B1**) =0.0220 <0.1,CR(**B2**) =0.0019 <0.1. 则判断矩阵 **A**、**B1**、**B2** 的一致性可以接受,即权重的分配是合理的.

4　计算结果与分析(Computing results)

根据《2003—2009 年云南省环境状况公报》、《2003—2009 年大理白族自治州国民经济和社会发展统计公报》和《2003—2009 年中国水资源公报》得到 2003—2009 年洱海水环境承载力的各指标压力指数见表 6. 人口、灌溉面积、生产总值(GDP)的承载指数采用《全国生态示范区建设试点考核验收指标》Ⅰ类用水量指标,分别为 427 $m^3 \cdot 人^{-1}$、水田 4500 $m^3 \cdot hm^{-2}$(旱地 3000 $m^3 \cdot hm^{-2}$)、200 $m^3 \cdot 万元^{-1}$. 化学需氧量(COD_{Mn})、总氮(TN)、总磷(TP)

的承载指数采用《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》的Ⅱ类水质标准,分别为4、0.5、0.025 $mg \cdot L^{-1}$.按照洱海多年平均入湖水量为8.25亿m^3计算承载能力.

表6 洱海水环境承载力的各指标压力指数

Table 6 The indexes of the WECC of Erhai Lake

年份	人口/10^4人	灌溉面积/$10^4 hm^2$	GDP/10^8元	COD_{Mn}/($mg \cdot L^{-1}$)	TN/($mg \cdot L^{-1}$)	TP/($\mu g \cdot L^{-1}$)
2003	335.83	14.47	175.50	2.50	0.57	34
2004	338.34	14.02	201.24	3.42	0.57	31
2005	342.96	13.92	235.18	3.46	0.54	26
2006	343.97	14.04	275.28	3.10	0.66	25
2007	345.69	14.07	322.03	2.85	0.54	21
2008	347.48	14.40	371.70	2.59	0.41	19
2009	350.80	20.48	406.80	2.58	0.61	23

应用公式(1)分别计算得2003—2009年洱海水环境承载力的各指标承载度,应用公式(2)、公式(3)、公式(4)和权重表5计算洱海流域2003—2009年的水资源承载力、水质量承载力及水环境承载力,结果见图4.

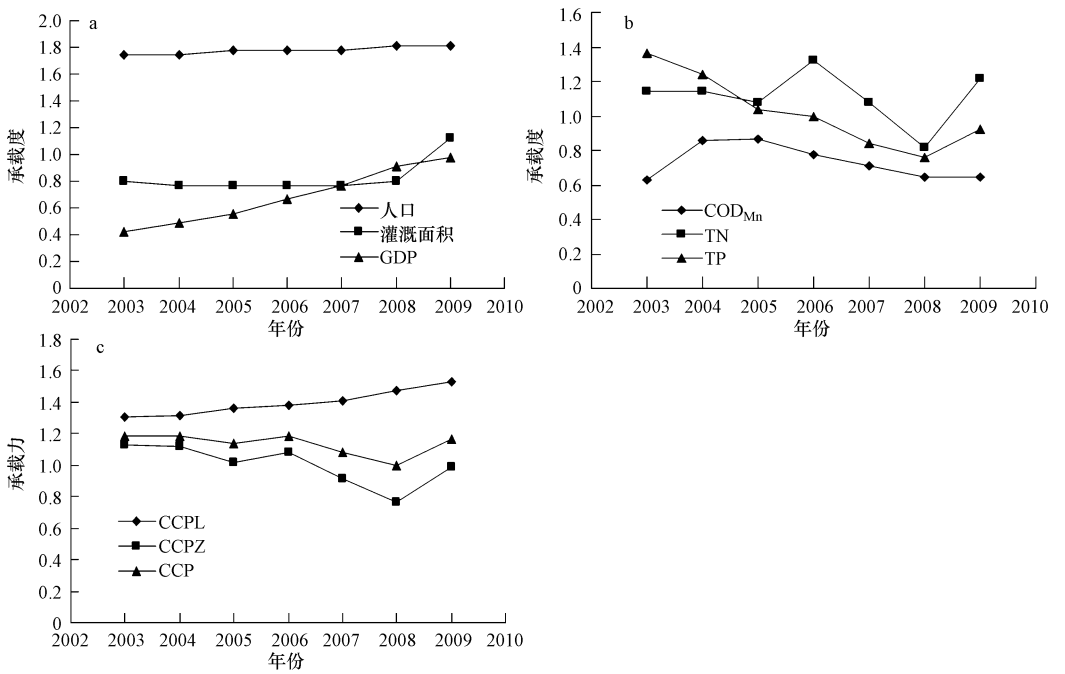


图4 2003—2009年洱海流域水资源(a)、水质量(b)、水环境(c)承载情况变化趋势

Fig. 4 Water resource carrying capacity(a), water quality carrying capacity(b) and water environment carrying capacity(c) of Erhai lake during 2003—2009

由2003—2009年洱海流域水资源承载情况变化趋势(图4a)可知:社会经济指标中每年人口承载度均大于1,在1.75~1.81之间变化,说明洱海流域人口超载负荷比较大,但每年变化幅度比较小;灌溉面积承载度除2009年超载为1.12外,其余年份在0.77~0.80之间均小于1;每年GDP承载度在0.41~0.98之间均小于1,但呈逐年上升趋势.

由2003—2009年洱海流域水质量承载情况变化趋势(图4b)可知:有机污染指标中COD_{Mn}承载度在0.63~0.87之间均小于1,呈下降趋势;富营养化指标中总氮(TN)承载度除2008年为0.82外,其余年份在1.08~1.32之间均大于1,2006—2009年变化幅度比较大;总磷(TP)承载度呈下降变化趋势,从2007年起均小于1,2009年比上年度略有

升高.

从 2003—2009 年洱海流域水环境承载情况变化趋势(图 4c)中可以看出:洱海流域水环境承载力除 2008 年外均大于 1,2009 年比上年度略有升高;其中每年水资源承载力均大于 1,且呈逐年上升趋势;水质量承载力呈下降趋势,从 2007 年起均小于 1,2009 年比上年度略有升高. 计算结果说明洱海流域内人口承载超标,经济承载压力增长显著,富营养化指标总氮(TN)多数年份超标且波动大. 相比而言,水资源承载力对洱海流域水环境承载力的影响程度更大.

洱海流域水环境承载社会、经济发展的能力计算结果与实际情况吻合,近几年人口数量增加、工业快速增长导致需水量增加,大量生活污水、工业废水和农业面源污染物是导致洱海流域污染的主要原因. 洱海流域水环境承载力对湖区当前和未来的人口和社会经济发展具有一定的制约作用,水环境的超载在社会经济层面主要表现为人口数量的负承载,在污染物质层面主要表现为富营养化指标总氮(TN)的负承载.

加强洱海流域水资源管理,保护好洱海水环境质量,才能提高水环境承载力,确保流域内经济社会可持续发展,实现生态环境良性循环. 对于洱海流域水资源利用和水环境保护建议如下:①优化配置水资源,以科学调度为手段,合理利用流域内地表水;②调整用水结构,发展生态绿色农业、鼓励工业循环用水,大力宣传节约用水;③科学管理排污口,控制污水排放总量,加强督查执法力度;④控制农业化肥施用,防治农村人畜粪便污染,加快城镇固废、污水处理设施建设,减少流域水体中氮磷营养物质含量.

5　结论(Conclusions)

1)洱海流域水资源承载能力表现为流域内社会经济指标中人口承载超标,人口承载度在 1.75 ~ 1.81 之间均大于 1;每年 GDP 承载度呈逐年上升趋势,经济承载压力增长显著.

2)洱海流域水质量承载能力正逐渐增强,COD_{Mn}承载度在 0.63 ~ 0.87 之间均小于 1,呈下降趋势;湖泊富营养化指标中总氮(TN)多数年份呈负承载且波动幅度大.

3)洱海流域水环境承载力多数年份大于 1,其中水资源承载力均为负承载,且呈逐年上升趋势,水质量承载力呈下降趋势. 相比而言,水资源承载力对洱海流域水环境承载力的影响程度更大.

责任作者简介:李新(1962—),男,硕士,副教授,主要从事环境污染控制与资源循环利用、环境规划与评价方向的研究工作. 发表论文 30 余篇,出版教材 2 部. E-mail: lixinshijianping@163.com.

参考文献(References):

陈长安,张丽,张惠芬. 2008. 水环境承载力的研究进展[J]. 水利科技与经济,14(5):389-391

Chen C A, Zhang L, Zhang H F. 2008. Review on water environmental carrying capacity[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 14(5): 389-391 (in Chinese)

Clarke A L. 2002. Assessing the carrying capacity of the Florida keys [J]. Population & Environment, 23: 405-418

Campbell D E. 1998. Emergy analysis of human carrying capacity and regional sustainability: An example using the state of Maine[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 51: 531-569

Feng L H, Huang C F. 2008. A risk assessment model of water shortage based on information diffusion technology and its application in analyzing carrying capacity of water resources [J]. Water Resource Management, (22): 621-633

李清龙,王路光,张焕祯. 2004. 水环境承载力理论研究与展望[J]. 地理与地理信息科学,20(1):87-89

Li Q L, Wang L G, Zhang H Z. 2004. Research and prospect on theoretical framework of water environmental bearing capacity[J]. Geography and Geo-Information Science, 20 (1): 87- 89 (in Chinese)

李清龙,闫新兴. 2005. 水环境承载力量化方法研究进展与展望[J]. 地学前缘,12(4):43-49

Li Q L, Yan X X. 2005. Progress and prospect of research on quantifying method of water environmental carrying capacity (WECC) [J]. Earth Science Frontiers, 12(4): 43-49 (in Chinese)

李川. 2008. 水环境承载力量化方法的研究进展[J]. 环境科学与管理,33(8):66-70

Li C. 2008. Progress of research on quantifying method of water environmental capacity [J]. Environmental Science and Management, 33(8): 66-70 (in Chinese)

李如忠, 钱家忠, 孙世群. 2005. 模糊随机优选模型在区域水环境承载力评价中的应用[J]. 中国农村水利水电,(1): 31-34

Li R Z, Qian J Z, Sun S Q. 2005. Application of fuzzy-stochastic optimization model in regional water environment carrying capacity assessment[J]. China Rural Water and Hydropower, (1): 31-34 (in Chinese)

孙楠,付强,戚颖. 2007. 城市水环境承载力研究进展[J]. 农业系统科学与综合研究,23(3): 307-312

Sun N, Fu Q, Qi Y. 2007. Advances of research on city water environmental carrying capacity [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 23 (3): 307- 312 (in

Chinese)

涂峰武. 2006. 西洞庭湖流域水环境承载力分析与建模[J]. 湖南水利水电, (3): 77-78

Tu F W. 2006. Analysis on bearing capacity and modeling for aquatic environment in West Dongting Lake area[J]. Hunan Hydro & Power, (3): 77-78 (in Chinese)

汪彦博,王嵩峰,周培疆. 2006. 石家庄市水环境承载力的系统动力学研究[J]. 环境科学与技术, 29 (3): 26-27

Wang Y B, Wang S F, Zhou P J. 2006. Estimating water environmental carrying capacity in Shijiazhuang City using system dynamics[J]. Environmental Science & Technology, 29(3): 26-27 (in Chinese)

王俭,孙铁珩. 2007. 基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型及其应用[J]. 生态学杂志, 26 (1): 139-144

Wang J, Sun T H. 2007. Evaluation model of regional water environment carrying capacity based on artificial neural network and its application in Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Ecology,26 (1): 139-144 (in Chinese)

王玉敏,周孝德,冯成洪. 2004. 湖泊水环境承载力研究[J]. 水土保持科学, 18 (1): 179-184

Wang Y M, Zhou X D, Feng C H. 2004. Research on theory of water environment carrying capacity in lake[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 18 (1): 179-184 (in Chinese)

余进祥,刘娅菲,钟小兰. 2009. 鄱阳湖水环境承载力及主要污染源研究[J]. 江西农业学报,21(3):90-93

Yu J X, Liu Y F, Zhong X L. 2009. Study on cater environment carrying capacity and main pollution sources of Poyang Lake[J]. Acta Agriculturae Jiangxi,21(3):90-93 (in Chinese)

赵卫,刘景双,孔凡娥. 2007. 水环境承载力研究述评[J]. 水土保持研究,14(1):47-50

Zhao W, Liu J S, Kong F E. 2007. Review on water environmental carrying capacity[J]. Research of Soil and Water Conservation,14 (1):47-50 (in Chinese)

张文国, 杨志峰. 2002. 基于指标体系的地下水环境承载力评价[J]. 环境科学学报, 22 (4): 541-544

Zhang W G, Yang Z F. 2002. Assessment on bearing capacity of ground water environment based on indicator system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 22 (4): 541-544 (in Chinese)