

滇池流域水资源承载力评价与驱动力研究

费鑫鑫¹, 李京东¹, 李磊², 温庆², 张刘东^{1*}

(1. 云南农业大学 水利学院, 昆明 650201; 2. 云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650201)

摘要:【目的】探求滇池流域水资源承载力与流域社会经济发展、环境的协调关系。【方法】选取水资源、社会经济、环境相关指标,构建滇池流域水资源承载力综合评价模型,计算分析流域2011—2015年的压力指数、承载力指数、协调指数、水资源承载力指数的变化趋势,并用因子分析法进一步对流域水资源承载力进行评价,利用提取出的主要因子构建水资源承载力驱动力模型,识别出影响滇池流域水资源承载力的主要驱动力。【结果】滇池流域2011—2015年水资源承载力指数呈上升趋势;滇池流域水资源承载力的主要驱动力有人类活动因素和自然因素,包括城镇化率、经济发展因素以及年均气温和年降水量。人均GDP和年降水量属于正向驱动因子,城镇化率和年均气温是负向驱动力。【结论】基于社会经济可持续发展与水资源系统协调发展,应加大外流域向滇池流域调水工程的建设,形成多水源联合调水的格局,同时在保证大力发展经济的基础上控制人口数量,建立健全流域水资源系统多水源供水的水资源高效配置与统一调度方案。

关键词: 水资源承载力; 协调度; 综合评价模型; 滇池流域; 驱动力

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20190247

费鑫鑫,李京东,李磊,等.滇池流域水资源承载力评价与驱动力研究[J].灌溉排水学报,2019,38(11):109-116.

0 引言

水资源是万物赖以生存的资源,不仅是工农业生产,而且是人类生活及生态环境所必需的资源因子,人口的不断增加以及社会经济的快速发展,导致人类对水资源的需求量持续加大,导致水资源危机加重,随之而来的水资源短缺、水生态破坏、水质恶化等一系列问题^[1],这些问题又反过来制约经济发展。为了解决水资源供需矛盾,实现水资源与社会、经济、生态环境协调发展^[2],正确评价流域水资源承载力将对流域水资源合理开发利用具有重大意义。

目前对水资源承载力进行评价的方法主要有3种:经验公式法、系统分析法、综合评价法^[3]。经验公式法计算简单,但没有综合考虑水资源耦合大系统的复杂联系;系统分析法综合考虑了水资源与社会经济、生态环境的联系,但计算复杂,应用范围有限,常见的系统分析法为系统动力学法^[4]。综合评价法首先要选定评价指标体系,并应用数学方法综合评价水资源承载力。目前,针对滇池流域水环境承载力研究颇多,但缺乏对滇池流域水资源承载力的研究,而针对滇池流域水资源承载力时间序列演变的评价与驱动力的研究更是没有。本研究综合考虑滇池流域水资源与社会经济、环境的复杂关系,通过构建水资源承载力综合评价模型,采用滇池流域2011—2015年社会经济和水资源数据进行水资源承载力综合评价,然后运用因子分析法对滇池流域水资源承载力进行更加准确的综合评价,并将结果与综合评价模型对比,然后基于因子分析确定影响滇池流域水资源承载力的最主要影响因子,利用多元回归方程构建水资源承载力驱动力模型,找出影响滇池流域水资源承载力的主要驱动因素,为滇池流域水资源合理开发利用,实行最严格水资源管理制度提供科学依据。

1 研究区概况

滇池流域位于云南省滇中地区的昆明市,目前是昆明市社会经济核心区,未来也将是重要的发展区域,

收稿日期:2019-05-31

项目基金:国家自然科学基金项目(51669035)

作者简介:费鑫鑫(1996-),女。硕士研究生,主要从事水资源高效利用与管理研究。E-mail: 2947412651@qq.com

通信作者:张刘东(1980-),男。副教授,主要从事水资源高效利用与管理研究。E-mail: zld8066@163.com

同时也是全国重点保护区域之一。滇池流域总面积2 920 km²,占昆明市面积的13.8%,分布有昆明市盘龙区、五华区、官渡区、西山区、晋宁县、呈贡区共6县(区),是云南省重要的政治、经济和文化中心。滇池流域属于金沙江水系,位于普渡河流域的上游段,范围为东经102°29′—103°01′、北纬24°29′—25°28′之间,属于高海拔低纬度的高原季风气候,冬春季干燥风大且少雨,流域水面蒸发量大;夏秋两季湿润多雨^[5]。流域内多年降雨量为980 mm,多年平均蒸发量为1 871 mm,多年平均温度为14.7~16.2℃,日照强烈。随着人口的持续增长,滇池流域城镇化率逐渐提高,社会经济不断发展,导致需水量不断增加进而导致水资源危机日益加重,根据《云南省水资源综合规划》的研究成果,滇池流域的年径流深188.7 mm,地表水资源量5.55亿m³,人均水资源量不足200 m³,大大低于云南省平均水平,属水资源严重缺乏地区。再加上,滇池流域水环境问题日益突出,资源性和水质性缺水共存。通过对滇池流域水资源状况及开发利用现状调查,流域内已建成了松华坝大型水库,宝象河、果林、横冲、松茂、大河、柴河、双龙共7座中型水库,滇池流域各类工程供水量为8.34亿m³,由于外流域引水及滇池湖水的循环利用,导致实际用水量大大超过了本区水资源量,水资源开发利用程度已经大大超过了国际公认的40%合理上限,进一步开发的余地非常小^[6]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究所用的经济社会数据(总人口、城镇化率、人均GDP、绿化覆盖率、污水集中处理率)来源于《昆明市统计年鉴》(2011—2015年),水资源数据(人均水资源量、河道外供水量、大中型水库蓄水量、水资源开发利用、人均用水量、万元GDP用水量、农田平均用水量、生态环境用水量)来源于《昆明市水资源公报》(2011—2015年),流域气象数据(年均气温、年降水量)(昆明站)来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)^[8]。

2.2 水资源承载力综合评价模型

2.2.1 评价指标体系构建

水资源承载力系统包括流域内的社会经济、水资源、生态环境等多个方面,是一个复杂的耦合系统^[7],基于社会、经济、水量、环境等指标构建滇池流域水资源承载力综合评价指标体系^[7-9]。总人口是社会系统的核心,流域人口数量等的变化会对区域发展、水资源开发利用产生影响。城镇化率从城市化水平和用户方面反映人对区域水资源承载力的影响。人均GDP表征区域经济发展水平。生态环境用水量反映生态系统对区域水资源的需求。污水经净化处理后排放的水量可增加水源的补给量,可作为水源进一步提供给供水系统,故污水集中处理率可反映水环境保护能力。人均水资源量反映水资源丰、缺状况。河道外供水量反映区域供水水平。大中型水库蓄水量表征流域内水利工程建设状况对水资源承载力的影响,同时也体现了水利工程对区域经济发展的带动作用^[10]。水资源开发利用程度体现水资源开发利用程度和区域水资源管理水平。绿化覆盖率反映流域调节气候和涵养水源的能力。人均用水量反映流域内人们生活用水状况以及生产水平。万元GDP耗水量反映水资源与流域内经济发展之间的协调性。农田平均用水量表征农业用水量对水资源承载力的影响。根据以上原则,建立滇池流域水资源复合系统评价指标体系,水资源承载力指标体系包括压力指标、支持力指标、协调指标^[11],详见表1。

表1 滇池流域水资源承载力综合评价指标体系

指标		2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
压力指标	总人口/万人	390.24	392.5	394.7	396.8	399.3
	城镇化率/%	87.21	88.14	88.68	89.52	90.43
	人均GDP/元	48 674	59 187	69 025	74 435	77 838
	生态环境用水量/亿m ³	0.12	0.11	0.16	0.24	0.36
支持力指标	人均水资源量/(m ³ ·人 ⁻¹)	116.6	118.5	169.2	225.1	246.2
	河道外供水量/亿m ³	8.52	8.46	8.65	7.62	7.37
	大中型水库蓄水量/亿m ³	0.433	0.567	0.809	1.321	1.531
	水资源开发利用/%	158.00	157.00	160.00	141.00	136.00
	绿化覆盖率/%	42.35	42.94	39.5	41.38	40.22
	污水集中处理率/%	91.95	93.64	95.04	94.89	92.69
协调指标	人均用水量/(m ³ ·人 ⁻¹)	218	216	219	192	185
	万元GDP耗水量/(万元·m ³)	73	61	55	49	45
	农田平均用水量/(m ³ ·hm ²)	25.47	22.40	20.40	24.67	28.20

2.2.2 指标标准化

为了使各指标免受量纲不同的影响,需要将各指标标准化处理,目前常用的指标归一化处理有归一化法、样本标准变换法、取倒数法、极差变换法等,参考以往研究,在资源与环境承载力的评价中,常用方法是极差变换法。指标分为正向指标和逆向指标,这里采用极差变换法最适用,计算前需要先判断评价指标所属类型^[8]。计算式为:

正向指标标准化公式:

$$b = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}), \quad (1)$$

逆向指标标准化公式:

$$b = (x_{\max} - x) / (x_{\max} - x_{\min}), \quad (2)$$

式中: b 为标准化后的指标值; x 为各指标的原始值; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为所选样本序列中的最大值与最小值。

2.2.3 评价指标权重的确定

确定指标权重的计算方法大致有3类^[11]:主、客观赋权法以及组合赋权法。其中,包括主观赋权法中的层次分析法^[17]、专家盲评主观赋权法^[18]、Delphi法;客观赋权法中的熵值法、变异系数法^[20]、因子分析和主成分分析法^[21]等。由于主观赋权法往往受主观意识影响,不确定性大,而客观赋权法以数据为基础,可靠性较大。本研究采用熵值法来确定各指标的权重^[8]。

熵值法确定权重计算方法如下^[12]:

1)将指标值 Y_{ij} 作正向化处理,计算式为:

$$P_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m Y_{ij}}, \quad (3)$$

式中: P_{ij} 为第 i 年第 j 项指标标准化后值所占比例;本研究选取2011—2015年相关数据, $1 \leq m \leq 5$ 。

2)计算指标信息熵,计算式为:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m (P_{ij} \cdot \ln P_{ij}), \quad (4)$$

式中: E_j 为各项指标信息熵; $k = \frac{1}{\ln m}$, m 为指标值所处样本区域。

3)计算各指标权重,计算式为:

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)}, \quad (5)$$

式中: W_j 各项指标权重; n 为指标数。

2.2.4 综合评价模型构建

1)压力指数

压力指数用来表征各项压力指标给水资源带来的压力。若压力指数高,说明社会经济发展水平越高,生产生活用水越多,水资源承载水平随之越高。计算式为:

$$PI = \sum_{i=1}^n W_i Y_i, \quad (6)$$

式中: PI 为压力指数; W_i 为评估指标在压力指标中的权重; Y_i 评估指标的标准化值; n 为压力指标数。

2)支持力指数

$$SI = \sum_{i=1}^n S_i Y_i, \quad (7)$$

式中: SI 为支持力指数; S_i 为评估指标在支持力指标中的权重; Y_i 为评估指标的标准化值; n 为压力指标数。

3)承载指数

承载指数表征流域内水资源复合系统所承载的压力,计算式为:

$$CI = \frac{PI}{SI}, \quad (8)$$

式中： CI 为承载指数； PI 为压力指数； SI 为支持力指数。

4)协调指数

协调指数表征所在流域内水资源与社会经济人口、生态环境总体协调度^[11]，计算式为：

$$HI = \sum_{i=1}^n H_i Y_i, \tag{9}$$

式中： HI 为协调指数； H_i 、 Y_i 分别为协调指标中各项指标的权重和标准化值。

5)水资源承载力综合评价模型

构建水资源承载力综合评价模型以达到定量分析水资源承载力的大小的目的^[13]。计算式为：

$$WCI = \sqrt[3]{PI \cdot CI \cdot HI}, \tag{10}$$

式中： WCI 为水资源承载力综合评价指数； PI 为压力指数； CI 为承载指数； HI 为协调指数。

2.3 驱动力模型

为了更加准确的评价滇池流域水资源承载力状况，运用因子分析法以及构建多元线性回归模型来进一步识别滇池流域水资源承载力的主要驱动因素，判断影响程度并与熵值法结果进行比较。因子分析法运用降维的思想，根据变量之间的相关性进行分组，使组内相关性高而组间较低^[18]。采用多元线性回归模型构建水资源承载力指数与流域自然、人为因子之间响应关系，从而识别水资源承载力变化的驱动力。根据最小二乘法原理，构建多元线性回归模型^[15]：

$$WCI = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n, \tag{11}$$

式中： WCI 为水资源承载力综合评价指数； b 为待定系数； X 为驱动因子。

3 结果与分析

3.1 指标标准化与熵权值

根据2011—2015年统计数据，采用式(1)－式(5)将滇池流域13个指标数据先进行标准化处理后，再计算出各个指标的权重如表2所示。对于压力指标，各指标所占权重大致相当，权重相对比较平均，表明流域内总人口、社会经济数据在研究时间区间内没有发生显著变化。对于支持力指标而言，各指标权重相对比较平均，表明流域内供水水平没有发生显著变化。对于协调指标来说，人均用水量指标的权重相对较高，说明流域内生产、生活用水量变化较为显著。

表2 熵值法计算滇池流域指标权重值

指标类型	指标名称	权重
压力指标	总人口	0.168 343 441
	城镇化率	0.153 007 144
	人均GDP	0.093 900 041
	生态环境用水量	0.584 749 373
支持力指标	人均水资源量	0.195 73
	河道外供水量	0.142 09
	大中型水库蓄水量	0.168 27
	水资源开发利用率	0.209 46
	绿化覆盖率	0.143 02
	污水集中处理率	0.141 44
协调度指标	人均用水量	0.550 20
	万元GDP耗水量	0.211 49
	农田平均用水量	0.238 31

3.2 压力指数分析

滇池流域2011—2015年水资源复合系统压力指数变化情况如图1所示。总体上压力指数呈线性增长趋势，从2011年的0.006 7增长到2015年的1.000 0。查阅统计数据得知，滇池流域总人口从2011年的390.24万人增加到2015年的399.3万人，人均GDP从2011年的48 674元增加到2015年的77 838元，增长了160%，城镇化率、生态环境用水量也呈增长趋势，压力指数不断增长表明了滇池流域人民生活水平不断提高，生产力水平不断提高，经济发展水平不断提高。

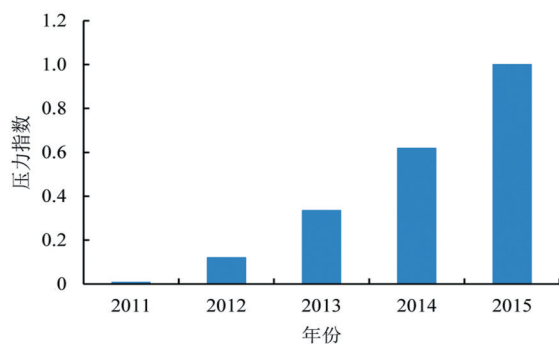


图1 2011—2015年滇池流域压力指数变化

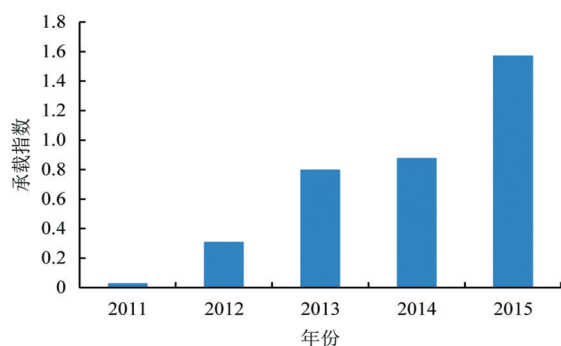


图2 2011—2015年滇池流域承载指数变化

3.3 承载指数分析

滇池流域2011—2015年水资源复合系统承载指数如图2所示。表明滇池流域在2011—2013年的承载指数呈上升趋势,2014年增势不明显。2015年承载指数超过了1.0,说明滇池流域水资源承载的社会发展和工农业生产及环境压力超过了支持力。据统计资料显示,2014年滇池流域河道外供水量和水资源开发利用率都出现呈下降趋势,从而造成承载指数增长缓慢。2015年由于大中型水库蓄水量增加,表明流域内水利工程建设给流域水资源系统提供了一定的支持力^[19],使滇池流域承载指数出现回升趋势。

3.4 协调指数分析

滇池流域2011—2015年水资源复合系统协调指数变化如图3所示。表明滇池流域协调指数呈增长趋势,据统计数据及滇池流域相关规划报告介绍,由于滇池流域实施高效节水,新建的水库、调水工程等水利工程增加了其供水能力,特别是滇池流域牛栏江-滇池补水工程等水利工程建设^[20],极大地改善了滇池流域供水和水环境现状,使滇池流域人均用水量呈减少趋势,并增加了工农业供水量,同时最严格水资源管理制度的落实,工业企业开展节水对标达标行动,改进了生产的工艺,建立和完善了循环用水系统,大大提高了工业用水的重复利用率,推进工业园区污(废)水处理回用,提高污(废)水处理回用率,实现节水减排。积极开展水量平衡测试,创建节水型企业^[17],使工业节水水平大大提高^[18],万元GDP耗水量呈逐年减少的趋势。

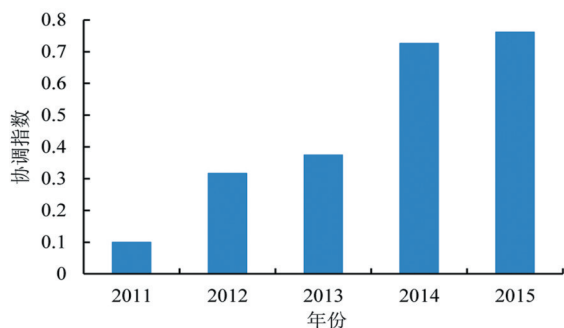


图3 2011—2015年滇池流域协调指数变化

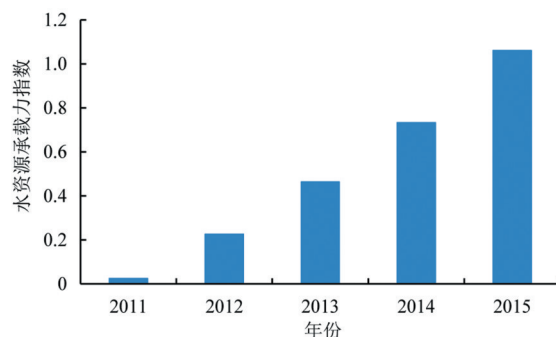


图4 2011—2015年滇池流域水资源承载力指数变化

3.5 水资源承载力指数变化趋势分析

滇池流域2011—2015年水资源承载力指数变化如图4所示。水资源承载力指数是将压力指数、承载指数、协调指数综合起来反应滇池流域水资源复合系统的总体承载水平^[10],从图4可以看出,2011—2015年滇池流域水资源承载力指数呈上升趋势,表明在有跨流域调水工程供水情况下,滇池流域水资源承载能力状况有逐渐变好趋势。

3.6 水资源承载力变化驱动力分析

对滇池流域水资源承载力综合评价指标体系,运用SPSS19.0软件对原始指标变量作因子分析^[23],结果见表3,由表3可知,影响滇池流域水资源承载力的主要是前2个因子,这2个因子的特征值都大于1,旋转后累积贡献率为94.109%,远大于85%,可以全面反映滇池流域水资源承载力情况。

表3 旋转前后的特征值与累积贡献率

因子	旋转前			旋转后		
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	9.852	75.783	75.783	9.165	70.498	70.498
2	2.382	18.326	94.109	3.069	23.611	94.109

进一步对2个主成分进行分析,得到因子分析旋转后因子载荷矩阵,如表4所示,由表3和表4可知,第1因子贡献率为70.498%,与总人口、城镇化率、人均GDP、生态环境用水量、人均水资源量、河道外供水量、大中型水库蓄水量、水资源开发利用、人均用水量、万元GDP用水量、农田平均用水量显著相关,反映的是社会经济发展水平和流域供水水平;第2因子贡献率为23.611%,主要与污水集中处理率、绿地覆盖率显著相关,反映的是流域生态环境水平。

表4 因子分析旋转后因子载荷矩阵

因子	第1因子	第2因子
总人口	0.888	0.446
城镇化率	0.899	0.413
人均GDP	0.775	0.628
生态环境用水量	0.974	0.127
人均水资源量	0.916	0.371
河道外供水量	-0.983	0.031
大中型水库蓄水量	0.945	0.322
水资源开发利用	0.986	-0.018
绿化覆盖率	-0.365	-0.694
污水集中处理率	-0.090	0.921
人均用水量	0.987	0.026
万元GDP耗水量	0.790	0.587
农田平均用水量	-0.780	0.609

2011—2015年滇池流域水资源承载力的2个因子的综合得分见表5。由表5可以看出,第1因子得分在2013—2015年保持持续增长,第2因子得分先增加后减少。综合来看,2011—2015年,滇池流域水资源承载力上升后保持平稳,查阅滇池流域相关规划报告得知,2013年牛栏江-滇池补水工程建成通水后,滇池流域水资源短缺问题得到一定改善,但调水部分水质与滇池保护治理水质存在一定差距。

表5 2011—2015年滇池流域水资源承载力因子得分和排名

年份	第1因子	第2因子	综合得分	排序
2011	-0.675 805	-1.343 540	-1.740 821	5
2012	-0.693 865	-0.231 844	-0.707 347	4
2013	-0.720 002	1.375 881	0.787 241	3
2014	0.620 528	0.437 537	0.849 222	1
2015	1.469 143	-0.238 034	0.811 705	2

由因子分析提取的主成分可作为选取水资源承载力主要影响因素的基准,故确定总人口、城镇化率、人均GDP作为驱动水资源承载力变化的表征人类活动的因素,但是由于水资源复合系统是自然生态环境与社会经济等人类活动相耦合的大系统,因此,本研究选择了滇池流域昆明气象站的年均气温、年降雨量代表自然因素^[21],以上这些指标作为构建多元线性回归方程的自变量,将水资源承载力指数作为模型因变量,采用SPSS19.0软件及最小二乘法原理进行回归分析,得到以下线性回归模型:

$$WCI = -0.152X_1 + 0.045X_2 - 0.963X_3 + 0.158X_4, \quad (12)$$

式中:WCI为水资源承载力综合评价指数; X_1 为年均气温; X_2 为年降水量; X_3 为城镇化率; X_4 为人均GDP。

运用SPSS19.0软件对模型进行拟合度检验,可知模型因变量与自变量的相关系数R值为1,表明此模型的拟合度非常好,相应P值为0.000,由此判断该回归模型非常显著。由回归模型可以得出,影响滇池流域水资源承载力的主要驱动力有人类活动因素和自然因素,包括城镇化率、经济发展因素以及年均气温和年降水量。人均GDP和年降水量属于正向驱动因子,年降水量增加提高流域供水的补给能力。经济的快速发展带动加大投资水利工程建设,新建的水利工程建设增加了其供水能力,特别是滇池流域牛栏江-滇池补水工程等水利工程的建成通水,极大地改善了滇池流域供水和水环境现状^[22],水资源承载力状况得以改善,随着

流域社会经济的发展,人民生活水平提高,人民素质提高,节水意识也不断增强。城镇化率和年均气温是负向驱动力,年均气温增加使流域蒸发量增加。年鉴资料显示滇池流域城镇化率很高,人口的增加特别是城镇人口的发展导致了用水量的不断增加,水资源利用量也越来越多。社会经济活动的增加所带来的水环境污染对水资源系统带来的压力也是不可避免的^[7]。因此,在保障经济不断增长的基础上控制人口的数量,加大外流域调水工程的建设,进一步落实高效节水政策以及建立健全水资源高效配置与统一调度方案,这对滇池流域水资源承载力的提升具有长远意义。

4 讨论

水资源承载力是评价一个流域水资源是否安全以及能否支撑社会经济、生态环境协调发展的重要指标,具有时间属性和空间属性^[9],因为在不同时段内,社会发展水平、科技水平、用水定额、水资源利用率等均有可能不同,并且它是针对某一区域来说的,因为不同区域的水资源量、水资源可利用量、经济结构、需水量及社会发展水平、生态与环境问题等方面也不同,导致水资源承载力不同,因此研究水资源承载力需要指明研究时段与研究区域。本文构建流域水资源承载力综合评价模型对滇池流域水资源承载力进行评价并进行其驱动力研究,研究结果对滇池流域水资源合理开发利用具有一定指导意义。但鉴于目前对于指标体系的选取尚无确切规范,仅通过参考国家现行标准、相关参考文献、研究区域实际情况以及数据获取难易程度来确定,在一定程度上具有主观性,指标体系确定有待进一步深入研究。

5 结论

1)权重计算结果表明总人口、生态环境用水量、人均用水量、水资源开发利用率、人均水资源量等指标权重较高,是影响模型评价的主要指标。

2)滇池流域2011—2015年水资源承载力指数呈上升趋势,主要原因是牛栏江-滇池补水工程、清水海引水工程等大型引调水工程的建设,同时节水水平的不断提升,使得滇池流域供水能力不断增强,水资源承载能力状况在不断改善。

3)2011—2015年滇池流域生产力水平和经济发展水平都提高影响压力指数增长。流域内蓄水量增加和引调水工程供水能力增强是导致水资源复合系统承载指数上升的主要原因。跨流域调水工程是流域水资源承载能力状况转好的主要影响因素。

4)影响滇池流域水资源承载力的主要的人类活动驱动因素为城镇化率、经济发展因素。主要自然驱动因素为年均气温和年降水量。

5)建议持续增强滇池流域水资源承载力主要措施在于控制区域人口数量,大力发展经济,加大节水力度,建立水资源高效配置方案;加大流域内蓄水工程和外流域调水工程的建设,形成多水源联合供水的格局。

参考文献:

- [1] 王杰,毛建忠,谢永红,等.2008—2014年滇池水质时空变化特征分析[J].人民长江,2018,49(5):11-15.
- [2] 张倩,谢世友.基于水生态足迹模型的重庆市水资源可持续利用分析与评价[J].灌溉排水学报,2019,38(2):93-100.
- [3] 左其亭.水资源承载力研究方法总结与再思考[J].水利水电科技进展,2017,37(3):1-6,54.
- [4] 薛冰,宋新山,严登华.基于系统动力学的天津市水资源模拟及预测[J].南水北调与水利科技,2011,9(6):43-47.
- [5] 金栋,张玉蓉,陈刚,等.高原山区水系结构及连通性初探:以滇池流域为例[J].长江科学院院报,2016,33(11):116-121,132.
- [6] 左其亭,张修宇.气候变化下水资源动态承载力研究[J].水利学报,2015,46(4):387-395.
- [7] 施开放,刁承泰.重庆市三峡库区水资源承载力评价[J].灌溉排水学报,2012,31(5):108-112.
- [8] 高伟,翟学顺,刘永.流域水生态承载力演变与驱动力评估:以滇池流域为例[J].环境污染与防治,2018,40(7):830-835.
- [9] 左其亭.城市水资源承载力:理论·方法·应用[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [10] 薛辰影,方红远,吉久伟.水资源承载力评价指标约简方法研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):23-30,78.
- [11] 王建华,翟正丽,桑学锋,等.水资源承载力指标体系及评判准则研究[J].水利学报,2017,48(9):1 023-1 029.
- [12] 姜北,孙美,纪玉琨,等.基于熵值法的地表水水质模糊综合评价[J].灌溉排水学报,2018,37(S1):47-50.
- [13] 石建屏,李新.滇池流域水环境承载力及其动态变化特征研究[J].环境科学学报,2012,32(7):244-251.
- [14] 孙瑞山,吴丛,唐品.关于评估指标体系中权重计算方法的探讨[J].统计与决策,2014(22):14-16.
- [15] 陈琼华.综合评价中的赋权方法[J].统计与决策,2004(4):118-119.
- [16] 伍文琪,罗贤,黄玮,等.云南省水资源承载力评价与时空分布特征研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(7):1 517-1 524.

- [17] 郭晓娜, 苏维词, 杨振华, 等. 城乡统筹背景下重庆市水生态足迹分析及预测[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2):69-75.
- [18] 赵自阳, 李王成, 王霞, 等. 基于主成分分析和因子分析的宁夏水资源承载力研究[J]. 水文, 2017, 37(2):64-72.
- [19] 陈威, 艾婵. 基于多元线性回归模型的武汉市水资源承载力研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(1):75-79.
- [20] 桂耀, 肖昌虎, 侯丽娜. 跨流域引调水工程规划方案优选研究: 以滇中引水工程为例[J]. 中国农村水利水电, 2017(9):63-66.
- [21] 王海英, 贾萍. 武陵山特困区脆弱生态环境与贫困耦合关系空间分布研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(6):18-26.
- [22] 陈丽萍, 赵华东, 赵华军. 基于气候变化情况下的水资源动态承载力分析[J]. 水资源开发与管理, 2017(11):55-58.
- [23] 昆明市水资源承载能力及供水配置规划(初步成果)[R]. 昆明: 昆明市水资源承载能力及供水配置规划(初步成果)研讨会, 2015.
- [24] 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013:262-279.

Evaluation and Driving Force of Water Resources Carrying Capacity in Dianchi Basin

FEI Xinxin¹, LI Jingdong¹, LI Lei², WEN Qing², ZHANG Liudong^{1*}

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Yunnan Water and Hydropower Engineering Investigation, Design and Research Institute, Kunming 650201, China)

Abstract: **【Objective】** The purpose of this paper to explore the coordination relationship between the water resources carrying capacity of the Dianchi Lake Basin and the socio-economic development and environment of the basin. **【Method】** Select the water resources, social economy and environment-related indicators to construct a comprehensive evaluation model for the water resources carrying capacity of the Dianchi Lake Basin. The trend of pressure index, bearing capacity index, coordination index and water resources carrying capacity index of the basin from 2011 to 2015 was calculated and analyzed. The factor analysis method was used to further evaluate the water resources carrying capacity of the basin, and the main factors extracted were used. The driving force model of water resources carrying capacity was constructed to identify the main driving forces that affect the water resources carrying capacity of the Dianchi Lake Basin. **【Result】** The water resources carrying capacity index of Dianchi Lake Basin showed an upward trend from 2011 to 2015; The main driving forces of water resources carrying capacity in Dianchi Basin were human activity factors and natural factors, including urbanization rate, economic development factors and annual average temperature and annual. Precipitation. GDP per capita and annual precipitation were positive drivers, and urbanization rates and annual average temperatures are negative drivers. **【Conclusion】** Based on the sustainable development of social economy and the coordinated development of water resources system, the construction of water transfer project from the outer basin to Dianchi Lake Basin should be increased to form a multi-water source combined water transfer pattern, and the population quantity should be controlled on the basis of ensuring vigorous economic development. Establish a sound water resource efficient allocation and unified scheduling scheme for multi-source water supply in the basin water resources system.

Key words: water resources carrying capacity; coordination degree; comprehensive evaluation model; Dianchi basin; driving force

责任编辑: 赵宇龙