



基于DPSIR模型的滇池流域水生态安全评价

谢华晶, 李克飞, 李继清, 肖峰

Water ecological security evaluation of Dianchi Lake Basin based on DPSIR model

XIE Huajing, LI Kefei, LI Jiqing, XIAO Feng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.06.017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

基于 DPSIR 模型的滇池流域水生态安全评价

谢华晶¹, 李克飞², 李继清¹, 肖峰¹

(1. 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206;
2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 文章基于滇池流域水生态安全现状, 采用 DPSIR 模型构建了滇池流域水生态安全评价指标体系, 利用熵权法和主成分分析法加权平均得到各评价指标权重, 运用综合指数评价法计算水生态安全综合指数, 分析了 2005~2017 年滇池流域水生态安全状况, 利用耦合协调模型探究了滇池流域水生态安全与城市化水平的内在联系。结果表明: 滇池流域水生态安全综合指数由 2005 年的 0.447 上升至 2017 年的 0.612, 表征状态由敏感级转变为良好级; “驱动力”所做贡献最大, 其次是“响应”, 而“压力”、“状态”和“影响”贡献较小; 水生态安全与城市化水平的耦合度及耦合协调度均表现为“先快速, 后稳步”的增长态势。

关键词: DPSIR; 滇池流域; 水生态安全评价; 熵权法; 主成分分析法

中图分类号: X321

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.06.017

Water ecological security evaluation of Dianchi Lake Basin based on DPSIR model

XIE Huajing¹, LI Kefei², LI Jiqing¹, XIAO Feng¹

(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Based on the current status of water ecological security in the Dianchi Lake Basin, the DPSIR model was used to construct a water ecological security evaluation index system, and the weighted average of the entropy weight method and the principal component analysis method were used to obtain the weight of each evaluation index, and the comprehensive index evaluation method was used to calculate the comprehensive water ecological security index and analyze the water ecological security status of the Dianchi Lake Basin from 2005 to 2017. This paper also explored the internal relationship between the water ecological security of the Dianchi Lake Basin and the level of urbanization using the coupling coordination model. The results showed that the comprehensive water ecological security index of the Dianchi Lake Basin increased from 0.447 in 2005 to 0.612 in 2017, and the characterization status changed from sensitive to good. The "driving force" made the most contribution, followed by the "response" and the "pressure". The contribution of "state" and "impact" was small. The degree of coupling and coordination between the water ecological security and the urbanization all showed a "fast first, then steady" growth trend.

Keywords: DPSIR; Dian Lake River Basin; water ecological safety evaluation; entropy weight method; principal component analysis

CLC number: X321

水生态安全由可持续发展理念中产生, 包括社会、自然和经济等, 制约着经济的可持续发展、农业生活的正常运行及社会供需问题。水生态安全评价是水生态安全的重要内容, 对区域可持续发展具有重要参考价值。DPSIR 模型由国外引入时最先应用于战略环境评估^[1], 在水生态安全评价中已有一定成效。黄文琳等^[2]利用 DPSIR 模型与集对分析法对三峡库区水生态安全进行评价, 得知三峡库区水生态安全状况在

逐渐恢复; 高震霖等^[3]运用 DPSIR 模型系统得出未来许昌市水生态安全的变化趋势将上升; 孙莹莹^[4]基于 DPSIR 模型和综合指数法得出森林覆盖率、富营养化和生态响应等对研究区域水生态安全影响较大; LU et al^[5]运用 DPSIR 模型对城市河流进行综合评价, 发现影响河流生态系统最大的几个因素; ZHANG et al^[6]基于 DPSIR 模型和健康距离模型建立了由水质、生态和社会经济组成的评价指标体系, 表明南四湖

收稿日期: 2021-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52179014); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402208)

作者简介: 谢华晶(1996-), 女, 硕士研究生。研究方向: 水文水资源。E-mail: 1537736285@qq.com

引用格式: 谢华晶, 李克飞, 李继清, 等. 基于 DPSIR 模型的滇池流域水生态安全评价[J]. 环境保护科学, 2021, 47(6): 94-99.

总体处于健康状态。DPSIR 模型能够充分的体现水生态安全状况,尤其是社会经济活动对生态系统的影响层次和等级,具有层次性、灵活性和综合性的特点。

近 20 年来,随着城市规模的扩大和人口剧增,滇池流域水生态恶化加剧,严重影响到区域经济的可持续发展和居民生活质量的提高,国家为此投入大量人力物力开展对滇池的保护治理工作,却收效甚微^[7]。为全面诊断滇池流域水生态安全状况,依托前人在水资源承载力^[8]、水环境承载力^[9]和水生态补偿^[10]等研究的基础上,进行滇池流域水生态安全评价。本文结合滇池流域水生态安全现状,运用 DPSIR 模型建立滇池流域水生态安全评价指标体系,利用熵权法和主成分分析法加权平均确定评价指标权重,进而运用综合指数评价法评价了流域水生态安全状况及其重要影响因素,并针对城市化发展对滇池流域水生态安全带来的影响进行耦合协调分析,以期提出相应的响应措施,为流域水生态安全治理和修复提供参考依据。

1 研究区概况

滇池流域位于昆明市主城区下游,地处长江、

珠江和红河三大水系分水岭地带,流域面积为 2 920 km²,占昆明市总面积的 13.8%。流域内整体海拔约 1 900 m,最低海拔约 746 m,地势总体上由北到南逐渐降低^[11]。2015 年滇池流域人口密度为 1 393 人/km²,是昆明市的 4.4 倍,地区生产总值达 3 168 亿元,占昆明市地区生产总值的 80%^[12]。滇池流域人类活动频繁,水体环境压力大,据云南省环境状况公报显示,滇池流域水质从 20 世纪 60 年代的 II 类水恶化为劣 V 类水,且持续近 20 年之久。随着社会经济的发展,昆明城市化扩张,人口数量不断增大和集中,将会持续影响滇池流域未来经济与环境的健康发展。

2 评价方法

滇池流域水生态安全评价方法:基于 DPSIR 模型,结合滇池流域水生态安全现状构建滇池流域水生态安全评价指标体系;利用熵权法和主成分分析法加权平均确定评价指标权重;运用综合指数评价法进行滇池流域水生态安全综合指数计算,进一步分析滇池流域水生态安全变化趋势与城市化水平的耦合协调程度。安全评价框架,见图 1。

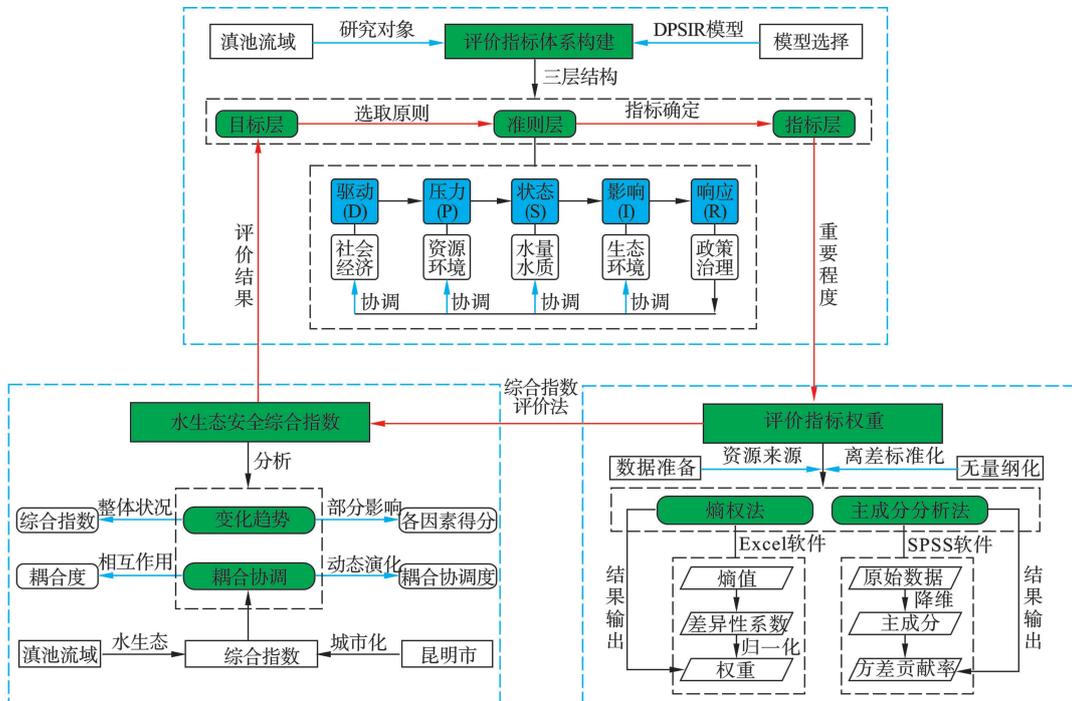


图 1 滇池流域水生态安全评价框架

2.1 评价指标体系的构建

结合滇池流域水生态现状及目前较为突出的水生态问题,对滇池流域水生态安全评价指标体系拟构建 3 个层次,分别为目标层、准则层和指标

层。以水生态安全综合指数作为目标层, DPSIR 模型的“驱动力”“压力”“状态”“影响”“响应”5 个子因素作为准则层,与各子因素相对应的 20 个评价指标作为指标层,见表 1。

表 1 滇池流域水生态安全评价指标体系及指标性质

目标层A	准则层B	指标层D (权重)	单位	指标性质	计算公式
水生态安全综合指数	驱动力B1	人口密度D1 (0.045)	人·km ⁻²	-	流域人口数/流域面积
		人均GDP D2 (0.060)	万元·人 ⁻¹	+	GDP(亿元)×10000/流域人口数
		第三产业占GDP比重D3 (0.045)	%	+	第三产业GDP/全年总的GDP
		建设用地比例D4 (0.056)	%	-	建设用地/流域面积
		城镇化率D5 (0.046)	%	+	流域城镇常住人口/流域区常住人口
	压力B2	人均水资源量P1 (0.052)	m ³ ·人 ⁻¹	+	水资源总量/流域人口数
		万元GDP耗水量P2 (0.046)	m ³ ·万元 ⁻¹	-	总耗水量×10000/GDP (亿元)
		单位GDP废水排放量P3 (0.058)	t·万元 ⁻¹	-	(工业废水量+生活污水量)×10000/GDP (亿元)
		侵蚀面积占比P4 (0.033)	%	-	侵蚀面积/流域面积
	状态B3	年平均降雨量S1 (0.039)	mm	+	累计多年降雨量总和/总年数
		人均年用水量S2 (0.043)	m ³ ·人 ⁻¹	-	流域用水总量/流域人口数
		氨氮浓度S3 (0.046)	mg·L ⁻¹	-	滇池湖泊氨氮浓度
		高锰酸盐指数S4 (0.055)	mg·L ⁻¹	-	滇池湖泊高锰酸盐指数
	影响B4	森林覆盖率I1 (0.037)	%	+	森林面积/陆域总面积
		草地面积占比I2 (0.068)	%	+	草地面积/陆域总面积
		水资源开发利用率I3 (0.065)	%	-	流域用水总量/地表水资源可利用量
响应B5	农田平均用水量R1 (0.054)	m ³ ·hm ⁻²	-	农田用水量/公顷	
	污水处理率R2 (0.052)	%	+	(生活污水量+工业废水量)/污水排放总量	
	生态投入占GDP比例R3 (0.052)	%	+	生态投入/全年总的GDP	
	累计生态投入占比R4 (0.050)	%	+	累计生态投入/全年总的GDP	

指标性质是根据所选评价指标对水生态安全影响作用不同做出的推断^[3,13-14]。正向指标值越大,表明水生态安全状况越好,如人均水资源量、森林覆盖率等。负向指标值越大,表明水生态安全状况越差,如人口密度、万元 GDP 耗水量等。

2.2 数据来源及标准化处理

上述滇池流域水生态安全评价指标数据主要来源于 2005~2017 年《昆明市统计年鉴》、《中国城市建设统计年鉴》和昆明市环境质量状况公报等。昆明市城市化水平评价指标体系参考文献 [15] 关于昆明城市化进程评价中评价指标体系的构建,评价指标数据主要来源于 2005~2017 年《昆明市统计年鉴》。根据评价指标性质,采用离差标准化法对原始数据进行标准化处理^[16],见式(1~2)。

正向指标标准化。

$$R_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (1)$$

负向指标标准化。

$$R_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (2)$$

式(1~2)中, x_{ij} 为第*i*评价指标的第*j*年的原始数据($i=1, 2, 3, \dots, 13; j=1, 2, 3, \dots, 20$); x_j 为评价指标的第*j*年原始数据; R_{ij} 为经过标准化后处于[0, 1]之间的标准化值。

2.3 评价指标权重确定方法

由于评价指标重要程度不同,可采用指标权重反映指标的重要性水平。为了客观评价滇池流域水生态安全状况,由熵权法和主成分分析法取平均确定滇池流域水生态安全评价指标权重,可减少单一权重计算方法带来的误差影响。昆明市城市化水平评价指标权重见文献 [13]。

2.3.1 熵权法 熵权法通过计算熵值来确定权重,反应了信息的无序程度。对滇池流域 20 个评价指标的原始数据进行无量纲化处理后,熵权法计算步

骤^[17], 见式(3)。

首先, 求第 i 评价指标熵值 E_i 。

$$E_i = -\ln(n)^{-1} \sum_{j=1}^n f_{ij} \times \ln f_{ij} \quad (3)$$

式(3)中, n 为评价指标年份个数, 这里 $n=13$;

$$f_{ij} = \frac{R_{ij}}{\sum_{j=1}^n R_{ij}}, \text{ 若 } f_{ij} = 0 \text{ 时, } E_i = 0.$$

其次, 计算第 i 评价指标权重 w_{i1} , 见式(4)。

$$w_{i1} = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^m (1 - E_i)} \quad (4)$$

式(4)中, m 为评价指标个数, 这里 $m=20$ 。

2.3.2 主成分分析法 主成分分析是通过对高维

变量进行空间降维, 使每个主成分都能反映大部分原始变量信息。利用 SPSS 软件对滇池流域 20 个评价指标进行主成分分析。以特征向量的分量值为权数, 第 j 个主成分计算原理^[18], 见式(5)。

$$Y_j = \gamma_{j1}Z_1 + \gamma_{j2}Z_2 + \dots + \gamma_{jp}Z_p (j = 1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

式(5)中, $\gamma_j = (\gamma_{j1}, \gamma_{j2}, \dots, \gamma_{jp})$ 为特征向量的分量值; $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_p)$ 为 SPSS 软件系统内原始数据的标准化值。

方差贡献率越大, 主成分表征的原始变量信息越多。选择以方差累计贡献率 > 85% 为条件的主成分, 见表 2, 其旋转后对方差的累积贡献率为 88.822%, 说明 6 个主成分可以表征所有信息的 88.822%。

表 2 主成分特征值及方差贡献率

成分	特征根	方差贡献率/%	方差累积贡献率/%	旋转后		
				特征根	方差贡献率/%	方差累积贡献率/%
1	8.008	40.038	40.038	5.884	29.420	29.420
2	3.692	18.461	58.498	3.657	18.286	47.706
3	2.123	10.616	69.115	2.329	11.644	59.351
4	1.607	8.036	77.150	2.064	10.318	69.668
5	1.263	6.314	83.464	1.922	9.612	79.280
6	1.072	5.358	88.822	1.908	9.542	88.822

由上述特征向量分量值和方差贡献率计算各评价指标权重^[13], 见式(6)。

$$w_{i2} = \sum_{j=1}^p a_j (\gamma_j)^2 \quad (6)$$

式(6)中, w_{i2} 为各评价指标权重 ($i=1, 2, 3, \dots, 20$); a_j 为第 j 主成分方差贡献率 ($j=1, 2, 3, \dots, p$)。

最后, 得到最终的评价指标权重 w_i , 见式(7)。

$$w_i = \frac{w_{i1} + w_{i2}}{2} \quad (7)$$

式(7)中, w_{i1} 为熵权法确定的评价指标权重; w_{i2} 为主成分分析法确定的评价指标权重。

2.4 综合指数计算及健康等级判定

2.4.1 综合指数计算 依据滇池流域水生态安全、昆明市城市化水平的评价指标权重和无量纲值, 采用综合指数来表征滇池流域水生态安全状况及昆明市城市化水平。

首先, 确定各准则层得分^[19], 见式(8)。

$$B_q = \sum R_{ij} \times w_i \quad (8)$$

式(8)中, B_q 为第 q 准则层的得分; R_{ij} 为 B_q 对应的第 i 评价指标的第 j 年的无量纲值; w_i 为第 i 评价

指标权重。

其次, 根据准则层得分计算水生态安全综合指数及城市化水平综合指数, 见式(9)。

$$WESI = \sum B_q \quad (9)$$

2.4.2 健康等级判定 为了更好的表达水生态安全综合指数, 给水生态安全综合指数大小赋予一定的含义。根据相关学者的划分标准^[20-21], 对评价结果进行分级, 见表 3。

表 3 流域水生态安全评价分级标准

水生态安全综合指数	表征状态分级	流域水生态系统指标特征
0.00~0.20	恶劣级	无法进行运转
0.21~0.40	风险级	很难进行修复
0.41~0.60	敏感级	处于临界状态
0.61~0.80	良好级	能够自我修复
0.81~1.00	安全级	基本不受干扰

2.5 耦合协调度模型

耦合协调程度是对系统内要素间相互混乱程度及变化趋势的描述, 对滇池流域水生态安全与昆明市城市化水平的内在关联可利用耦合概念模型

进行探讨^[22], 见式(10~12)。

$$T = \alpha U_i + \beta U_j \quad (10)$$

$$C = \left\{ U_i \times U_j / [(U_i + U_j) / 2]^2 \right\}^k \quad (11)$$

$$D = \sqrt{T \times C} \quad (12)$$

式(10~12)中, C 为耦合度; D 为耦合协调度; T 为综合协调指数; α, β 为待定系数(取 $\alpha = \beta = 0.5$); k 为调节系数(取 $k = 0.5$); U_i, U_j 分别为水生态安全综合指数、城市化水平综合指数。

耦合度 C 越高表征 2 个系统之间相互作用程度越高, 耦合协调度 D 越高表征 2 个系统动态演化过程的协调程度越高。通过上述对耦合度和耦合协调度的计算, 依据耦合协调分析类型划分情况^[23], 耦合类型分为无耦合状态(0.0)、低水平耦合(0.0, 0.3]、拮抗阶段(0.3, 0.5]、磨合阶段(0.5, 0.8]、高水平耦合(0.8, 1.0)、共振耦合(1.0), 协调类型分为严重失调 [0.0, 0.2]、中度失调(0.2, 0.4]、勉强协调(0.4, 0.6]、中度协调(0.6, 0.8]、优质协调(0.8, 1.0]。

3 结果分析

3.1 水生态安全综合指数趋势分析

滇池流域 2005~2017 年水生态安全综合指数, 见图 2。水生态安全综合指数整体呈现波动上升趋势, 由 2005 年的 0.447 上升至 2017 年的 0.612, 根据流域水生态安全评价分级标准, 水生态安全表征状态由敏感级转变为良好级。2005~2014 年以及 2016 年综合指数在 0.4~0.6 之间, 表征状态为敏感级, 流域水生态系统处于临界状态。2015 和 2017 年的综合指数分别为 0.627、0.611, 受单位废水排放量、氨氮浓度和水资源开发利用率的影响, 表征状态为良好级, 流域水生态系统能够自我修复。

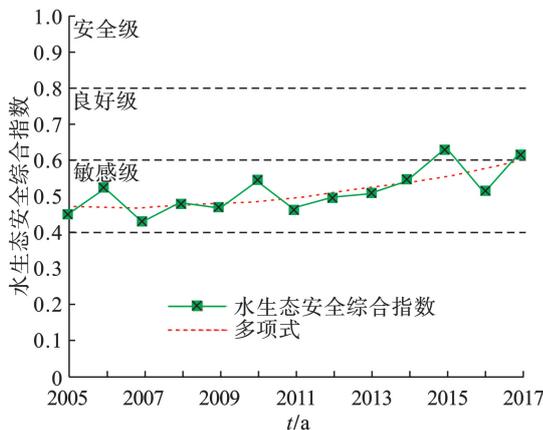


图 2 流域水生态安全综合指数变化趋势

3.2 准则层综合分析

根据 2005~2017 年准则层综合得分, 绘制准则层“驱动力、压力、状态、影响、响应”的得分雷达图, 见图 3。

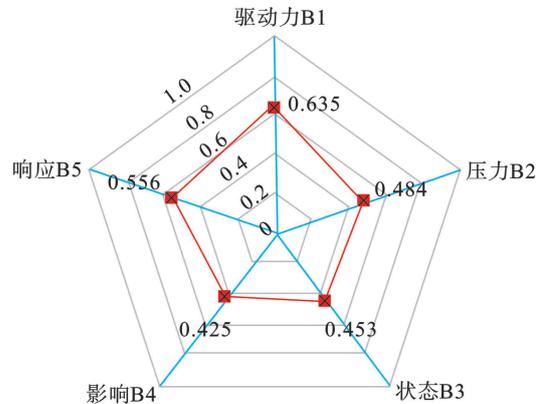


图 3 准则层各影响因素变化趋势

图 3 可知, 1) “驱动力”得分为 0.635, 所处状态等级为良好级, 由于人均 GDP、第三产业占 GDP 比重等经济发展指标在流域水生态安全中起到的正向作用较大, 因而在准则层中得分最高; 2) “压力”、“状态”、“影响”得分分别为 0.484、0.453 和 0.425, 所处状态等级均为敏感级, 由于万元 GDP 耗水量、单位 GDP 废水排放量 2 个资源环境压力的负向影响, 使流域水生态安全面临压力较大。氨氮浓度、高锰酸盐指数 2 个水质指标偏高, 成为“状态”的重要限制性因素。草地面积占比整体偏低, 加之水资源开发利用率较高, 使流域水生态受“影响”最大; 3) “响应”得分为 0.556, 所处状态等级为敏感级, 较“驱动力”得分小, 较其余 3 个子因素得分大。“响应”贡献得分较大的主要原因是历年来政策实施及资金投入使生态投入占 GDP 比重较高, 同时污水处理效果不断改善。

3.3 耦合度及耦合协调度趋势分析

基于水生态安全综合指数与城市化水平综合指数, 计算出 2005~2017 年滇池流域水生态安全与昆明市城市化水平的耦合度及耦合协调度, 其变化趋势和划分类型, 见图 4。

图 4 可知, 耦合度及耦合协调度均表现为“先快速, 后稳步”的增长趋势, 可进一步细分为 3 个阶段: 1) 2005~2006 年, 水生态安全与城市化水平的耦合度及耦合协调度均略有下降, 分别保持在低水平耦合水平、中度失调的阶段; 2) 2007~2010 年, 该阶段水生态安全与城市化水平的耦合度及耦合协调度飞速提升, 耦合类型由磨合阶段水平向高水

平耦合的转变,耦合协调类型由勉强协调到优质协调的转变;3)2011~2017年,这一阶段水生态安全与城市化水平的耦合度及耦合协调度变化较为平缓,耦合类型为耦合度接近于1的高水平耦合水平,耦合协调类型由中度协调缓慢向优质协调的转变。以上分析表明,昆明市在进行城市化发展的同时兼顾流域水生态安全健康状况,并且联系越来越紧密。

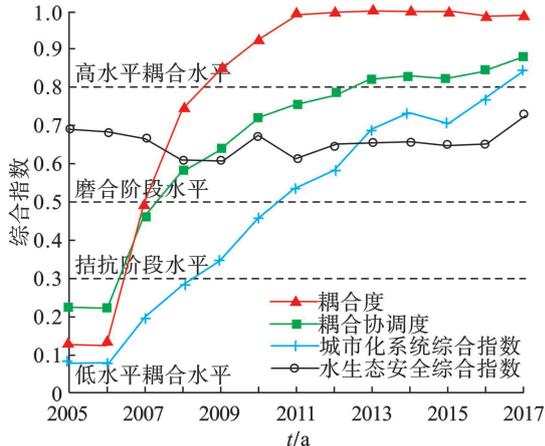


图 4 滇池流域水生态安全与昆明市城市化水平耦合关系

4 结论

文章基于 DPSIR 模型,利用主成分分析法、熵权法及综合指数评价法分析了 2005~2017 年滇池流域水生态安全状况及模型各子因素的贡献程度,运用耦合协调模型探究了水生态安全与城市化水平的内在联系。结果表明:水生态安全综合指数整体呈现出缓慢上升趋势,由 2005 年的 0.447 上升至 2017 年的 0.612,表征状态由敏感级转变为良好级,其中 2005~2014 年及 2016 年表征状态为敏感级,2015 和 2017 年表征状态为良好级;准则层中“驱动力”所做贡献最大,其次是“响应”,表明政府和人民所做的努力是维护滇池流域水生态可持续发展的关键,资源环境压力、生态环境影响和水质水量状态应受到重视;水生态安全与城市化水平的耦合度及耦合协调度均表现为“先快速,后稳步”的增长态势,表明昆明市在进行城市化发展的同时注重对滇池流域水生态的治理与修复,并且联系越来越紧密。

参考文献

[1] 王海宾,陈晓文,于婧. DPSIR 框架研究综述[J]. 经济研究导刊,

2013(19): 4-5.

- [2] 黄文琳,王鹏,杜温鑫,等. 基于 DPSIR 模型与集对分析法的三峡库区水生态安全评价[J]. 中国市场, 2017(14): 33-35.
- [3] 商震霖,王志齐,魏梦现. 基于 DPSIR 模型的许昌市水生态安全评价[J]. 水资源开发与管理, 2019(1): 29-33+6.
- [4] 孙莹莹. 茆窝水库及周边地区水生态环境调查与安全评估[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2019.
- [5] LU W, XU C, WU J, et al. Ecological effect assessment based on the DPSIR model of a polluted urban river during restoration: A case study of the Nanfei River, China[J]. Ecological indicators, 2019, 96: 146-152.
- [6] ZHANG F, ZHANG J, WU R, et al. Ecosystem health assessment based on DPSIRM framework and health distance model in Nansi Lake, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016, 30(4): 1235-1247.
- [7] 王铎. 滇池流域污染源归因识别与新时期治理策略[J]. 绿色科技, 2017(2): 28-31.
- [8] 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.
- [9] 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): 1777-1784.
- [10] 范毅. 滇池流域水生态补偿机制及政策建议研究[J]. 生态经济, 2010(1): 154-158.
- [11] 肖茜. 近 30 年滇池流域地表覆盖关键要素变化对滇池水质的影响研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2018: 2-19.
- [12] 段仲昭,王明净,高伟,等. 1951—2017 年滇池流域极端降水变化及湖体水质响应[J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 615-622.
- [13] 万生新,王悦泰. 基于 DPSIR 模型的沂河流域水生态安全评价方法[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019(3): 1-6.
- [14] 郑炜. 基于改进灰靶模型的广州市水生态安全评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 72-77.
- [15] 黎海林,张洪,金杰. 昆明城市化进程及对滇池水环境的影响研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(9): 5493-5495.
- [16] 郭巧玲,杨云松,韩瑶瑶. 人水和谐视角下的水生态文明城市评价——以焦作市为例[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019, 38(4): 82-89.
- [17] 燕敏飞,彭勇,王国利. 基于熵权权重的可变模糊理论在大连市地下水水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 58-61.
- [18] 杜华民. 河南省水资源承载力评价[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 58-62.
- [19] 孟令爽,唐德善,史毅超. 基于主成分分析法的用水效率评价[J]. 人民长江, 2018, 49(5): 36-40.
- [20] 商震霖. 许昌市水生态安全评价与调控对策研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [21] 谢飞,顾继光,林彰文. 基于主成分分析和熵权的水库生态系统健康评价——以海南省万宁水库为例[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1773-1779.
- [22] 冯文文,郭梦,钱会,等. 西安市城市化与水资源环境耦合关系研究及预测[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 113-118.
- [23] 买哲,梁留科,张佳莹,等. 城市创新能力与城市化水平耦合协调——以河南省为例[J]. 洛阳师范学院学报, 2019, 38(10): 13-19.