



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

基于DPSIR模型的云南省湖泊生态安全评价

侯磊, 卢江蓉, 梁启斌, 王琛

引用本文:

侯磊, 卢江蓉, 梁启斌, 王琛. 基于DPSIR模型的云南省湖泊生态安全评价[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 485–492.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0127>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

集中连片贫困区耕地安全性评价及影响因素分析——以忻州市为例

高艳珍, 郑庆荣, 罗淑政, 李晓

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 919–927 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0535>

杞麓湖径流区不同湿地沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价

浦江, 张翠萍, 刘淑娟, 杨小燕, 赵斌, 李淑英, 陆轶峰, 王媛媛, 周元清

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 755–763 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0484>

基于移动窗口法的半干旱生态脆弱区景观破碎化及驱动力分析

胡荣明, 杜嵩, 李朋飞, 姚燕子, 王睿哲, 滕坤阳

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 502–511 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0490>

老少边山穷地区城镇化与国土空间生态修复耦合协调机制研究

张中秋, 劳燕玲, 胡宝清, 韦金洪

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 882–893 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0144>

新时代广州市耕地多功能评价及时空演变分析

唐春云, 臧俊梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 332–343 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0648>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

侯磊, 卢江蓉, 梁启斌, 等. 基于 DPSIR 模型的云南省湖泊生态安全评价[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 485–492.

HOU L, LU J R, LIANG Q B, et al. Evaluation of lake ecological security in Yunnan Province based on the DPSIR model[J]. *Journal of*

Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(3): 485–492.



开放科学 OSID

基于 DPSIR 模型的云南省湖泊生态安全评价

侯磊, 卢江蓉, 梁启斌, 王琛

(西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224)

摘要:为探究云南省湖泊的生态安全变化趋势及驱动机制,在驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)模型框架下,建立了5个相应的项目层,选取16个反映生态安全状态的因子建立评价指标体系,基于公报、统计年鉴和规划数据对2009—2018年云南省湖泊生态安全状态进行评价。结果表明:云南省湖泊生态安全指数呈先下降后上升的趋势,2011年达到最低值0.153,其生态安全等级经历了3个类型,由Ⅳ级(较危险)经Ⅴ级(危险)向Ⅲ级(预警)转变,2014—2018年呈现稳步变好趋势;项目层指数变化趋势与生态安全指数一致,对生态安全指数贡献最大的状态层和影响层指数值偏低,湖泊水体化学需氧量、总氮及富营养化指数是限制因素;生态安全指数与压力层外的各指数间呈极显著正相关($P<0.01$),反映出化学需氧量和氨氮排放量调控难度最大。研究表明,产业结构调整、截污治污、生态恢复等政策调控举措对改善云南省湖泊生态安全状态具有积极作用。

关键词:高原湖泊;生态安全评价;驱动力-压力-状态-影响-响应模型;政策调控

中图分类号:X826

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)03-0485-08

doi: 10.13254/j.jare.2021.0127

Evaluation of lake ecological security in Yunnan Province based on the DPSIR model

HOU Lei, LU Jiangrong, LIANG Qibin, WANG Chen

(College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: In order to understand the trends and driving factors of the ecological security of lakes in Yunnan Province, 16 factors reflecting the ecological security state of the lakes were chosen and divided into five corresponding project layers based on the drivers–pressures–states–impacts–responses (DPSIR) model, allowing for an ecological security evaluation index system of such lakes to be constructed. Using data collected from bulletins, statistical year-books, and planning books from 2009 to 2018, the ecological security status of lakes in Yunnan Province was evaluated. The results showed that the ecological security index of these lakes showed a trend of first decreasing and then increasing and that the ecological security level of these lakes could be categorized into three types, from grade Ⅳ (dangerous) to grade Ⅴ (more dangerous) and then grade Ⅲ (early warning). The ecological security index reached the lowest value of 0.153 in 2011 and showed a steady improving trend from 2014 to 2018. The variation trend of the project layer index was consistent with that of the ecological security index, and the values of state and impact project layer indices, which contributed the most to the ecological security index, were relatively low. This phenomenon was attributed to the limiting factors such as chemical oxygen demand, total nitrogen, and eutrophication index. There were significant positive correlations ($P<0.01$) between the ecological security index and the index of each project layer with the exception of the pressure layer, which indicates that it was more difficult to regulate the emission load of chemical oxygen demand and ammonia nitrogen than other indicators. The results indicate that policy control measures such as the adjustment of industrial structures, pollution prevention and control, and ecological restoration have played a positive role in improving the ecological security of lakes in Yunnan Province.

Keywords: plateau lake; ecological security evaluation; drivers–pressures–states–impacts–responses model; policy regulation

收稿日期:2021-03-04 录用日期:2021-05-17

作者简介:侯磊(1985—),男,四川成都人,博士,讲师,主要从事流域污染物环境行为与污染治理研究。E-mail:houlei_1985@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(22066023,41663016);云南省科技计划项目(2018FD043)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(22066023, 41663016); The Science and Technology Program of Yunnan Province, China(2018FD043)

高原湖泊因独特的自然地理特征及发育成因,具有流域面积小、补给水源有限、换水周期长、环境容量小、生态环境脆弱等特点,同时高原湖泊也是区域经济发展的重要载体^[1-2]。云南省湖泊众多,且分布广泛,承载着云南省多样的生态系统和壮丽的自然景观,其生态环境质量和生态安全状态是云南省经济社会发展的命脉所在^[3]。科学评价云南省湖泊生态安全对于掌握生态安全现状、剖析关键影响因素、找准改善现状途径等具有重要的现实意义。

目前,学者针对湖泊生态环境质量和生态安全评价开展了不少研究,包括人类活动对湖泊产生的环境影响评价、基于遥感(RS)或地理信息系统(GIS)等技术的水环境动态监测和湖泊流域生态环境质量监测与评价,以及基于模型或调查的湖泊生态系统健康与安全评估^[4-9]。研究通过统计年鉴查询、现场调查与实测等方法收集反映湖泊生态环境质量和生态安全状况的生态因子,包括理化指标、生态指标和社会经济指标,然后通过主观、客观或主客观相结合的方法确定各因子权重,建立完整的评价指标体系^[10]。朱泓等^[7]基于遥感生态指数(RSEI)对滇中五湖流域1988—2018年的生态环境质量进行了监测与评价,揭示了湖泊流域环境质量变化的时空特征,但因影像不连续,未进行RSEI年际变化规律的分析,同时也未能对导致变化的因素进行定量描述。

模型框架的使用为湖泊生态环境质量和生态安全评价提供了系统和定量的分析方法,在综合分析环境问题和经济社会问题的关系后,欧洲环境署在1999年提出将“驱动力”和“影响”加入到压力-状态-响应模型中,形成了驱动力-压力-状态-影响-响应(Drivers-Pressures-States-Impacts-Responses, DPSIR)模型^[11],用于研究社会经济活动与环境间的因果关系^[12-15]。之后,DPSIR模型广泛应用于湖泊流域生态评价和分析,如DE WIT等^[16]对法国南部沿海浅水湖泊的生态恢复程度评价,BALKANLOU等^[17]对伊朗的Urmia湖泊流域退化生态系统服务功能的时空动态评价,以及ZHANG等^[18]对内陆湖的生态安全评价;同时也有研究关注特定指标,如针对水中有色可溶性有机物或抗生素而进行的地表水体生态风险评价^[19-20]。此外,该模型还用于粤港澳大湾区海岸带生态安全评价^[21]、湖泊湿地生态环境质量和健康评价^[22-25],但对高原湖泊生态安全的连续时间序列评价鲜有报道。

为此,本研究以九大高原湖泊状况代表云南省湖泊状况,基于DPSIR模型框架构建云南省湖泊生态安

全评价指标体系,通过公报、统计年鉴和规划数据定量评估2009—2018年云南省湖泊生态安全状态,分析驱动因素和政策响应的动态变化过程,以期为高原湖泊生态安全评价、驱动力和政策响应分析提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省湖泊总面积约1 100 km²,总容量约300亿m³,面积大于1 km²的湖泊共有30余个,其中大于30 km²的有9个,即九大高原湖泊(简称“九湖”),包括滇池、阳宗海、洱海、抚仙湖、星云湖、杞麓湖、程海、泸沽湖和异龙湖^[26]。2018年九湖的湖泊总面积和容量分别为1 020 km²和293亿m³,分别占云南省湖泊面积和容量的92.73%和97.67%^[27],九湖在水量上能够较好地代表云南省湖泊。九湖在云南省的位置分布较广(图1),涉及包括昆明在内的5个地(州、市)的17个县(市、区),流域总人口约占云南省总人口的10%^[28]。九湖水水质跨度大,包括了多个级别,如水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3822—2002) I类的抚仙湖和泸沽湖,达到Ⅲ类的洱海和阳宗海,达到Ⅳ类的滇池草海、滇池外海和程海,以及处于V类或劣V类的杞麓湖、异龙湖和星云湖^[29]。此外,九湖流域是云南省

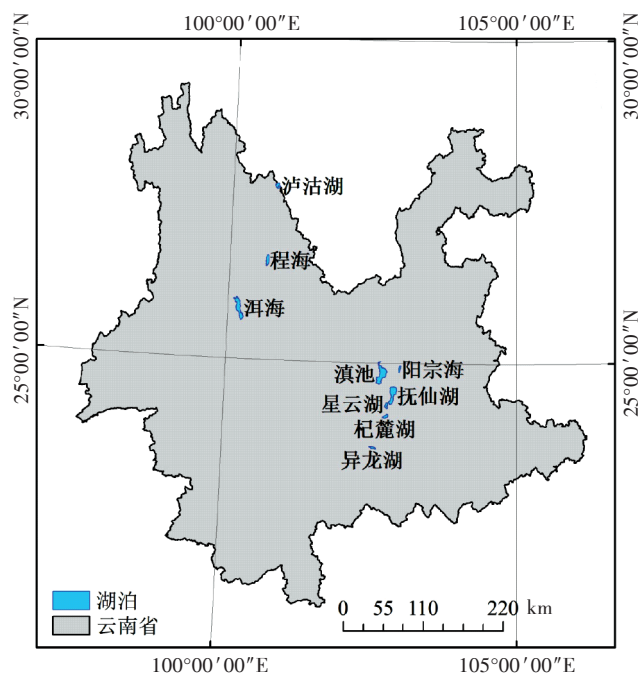


图1 云南九大高原湖泊位置分布图

Figure 1 Location and distribution of nine plateau lakes in Yunnan Province

的风景名胜区和粮食主产区,汇集了全省70%以上的大中型企业^[30],每年创造的国内生产总值占全省总量的1/3以上^[31]。

无论是从湖泊面积、分布位置、流域人口来看,还是就湖水水质、湖泊流域经济发展水平等因素而言,九湖均能较好地反映云南省湖泊状况。因此,本研究以九湖的生态安全状况代表云南省湖泊总体生态安全状态,并基于DPSIR模型开展生态安全评价和分析,具有较好的科学性。

1.2 数据来源

本研究选用指标的原始数据来源于2009—2018年《云南省环境状况公报》《云南省国民经济和社会发展统计公报》《云南省水资源公报》,以及九湖的“十一五”“十二五”和“十三五”规划等。

1.3 指标体系构建与评价

1.3.1 基于DPSIR模型的云南省湖泊生态安全评价指标体系

基于DPSIR模型框架和湖泊生态安全的内涵,根据当前云南省湖泊生态面临的主要问题,综合考虑国家和云南省政府对湖泊生态环境保护的要求,遵照系统性、科学性、代表性、可操作性相结合的原则^[32],将云南省湖泊生态安全划分为驱动力、压力、状态、影响和响应5个项目层,参考文献[18,21–22],结合云南省湖泊的具体情况,选取16个反映云南省湖泊生态安全的特征因子,构建评价指标体系,如表1所示。其

中,驱动力层选取反映人口增加、农业和工业发展等驱动环境问题发生的指标;压力层选取反映水资源消耗、污染物排放等减小环境容量的指标;状态层选取反映湖泊水体有机碳、氮、磷等污染物浓度的指标;影响层选取反映云南省湖泊水体主要污染——富营养化程度的指标;响应层指标的选取反映了湖泊及流域治理财政投资力度、流域污染源控制力度、上游水土流失控制力度以及保护区建设成果等。响应层全为正向指标,其余4个项目层则全为负向指标,正向(负向)指标表示指标数值越大(小),对湖泊生态安全的正向贡献越大。

该指标体系中,驱动力层、压力层和响应层采用云南省数据,而状态层和影响层采用九湖数据。每一个指标的当年数值为该指标对应的九个湖泊数值加权平均值,以湖泊污染负荷占总污染负荷的比值作为权重,如表2所示。其中,流域人口和湖泊容量使用2015年数据,滇池按照水域面积占比算得草海和大海权重分别为0.010 5和0.288 6。众所周知,流域人口数量与污染排放量正相关,湖泊容量越大,其环境容量也越大,因此,本研究使用单位湖泊容量承载的人口数表示湖泊的污染负荷。

1.3.2 评价指标隶属度计算

因指标量纲差异,各指标数值大小对湖泊生态安全指数的贡献不同,需要借助2个类型的隶属度分段函数将指标数值(x)转化为隶属度(M)。正向和负向

表1 云南省湖泊生态安全评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of lake ecological security in Yunnan Province

项目层 Project level	指标层 Indicator level	指标意义 Significance of indicator	下限 Low limit	基准 Median	上限 High limit
驱动力	总人口/万人	社会经济发展的环境需求	4 580	4 700	4 820
	第一产业占比/%	农业对环境的压力	13.2	15.0	16.8
	第二产业占比/%	工业对环境的压力	39.6	42.0	44.4
压力	总用水量/亿 m ³	水资源需求	14.9	15.2	15.5
	化学需氧量排放量/万 t	生产活动排放的化学需氧量	32	41	50
	氨氮排放量/万 t	生产活动排放的氨氮	2.64	3.90	5.16
状态	化学需氧量含量/(mg·L ⁻¹)	湖泊水体有机碳污染情况	15	20	40
	总磷含量/(mg·L ⁻¹)	湖泊水体氮污染情况	0.01	0.05	0.20
	总氮含量/(mg·L ⁻¹)	湖泊水体磷污染情况	0.2	1.0	2.0
影响	水体富营养化指数	湖水富营养化程度	30	50	70
响应	九大湖泊治理累积投入/亿元	湖泊治理财政投资力度	236	455	674
	环境公共设施年度投资/亿元	环境治理财政投资力度	1 100	2 000	2 900
	城镇污水处理率/%	污染源控制力度	71	80	89
	累计造林面积/万 hm ²	上游水土流失控制力度	120	200	280
	累计水土流失治理面积/km ²	水土流失治理力度	10 400	21 500	32 600
	国家湿地公园数量	保护区建设成果	4	10	16

表2 九大湖泊污染负荷及权重分配

Table 2 Pollution load and weight distribution of the nine lakes in Yunnan Province

湖泊 Lake	流域人口/万人 Basin population/ 10 ⁴	湖泊容量/亿 m ³ Lake capacity/ 10 ⁸ m ³	污染负荷 ^a Pollution load ^a	权重 Weight
滇池	400.00	15.82	25.28	0.299 1
阳宗海	5.21	5.41	0.96	0.011 4
洱海	84.47	29.03	2.91	0.034 4
抚仙湖	17.80	201.40	0.09	0.001 0
星云湖	20.77	2.05	10.13	0.119 9
杞麓湖	26.55	1.19	22.24	0.263 0
程海	3.89	16.71	0.23	0.002 8
泸沽湖	0.36	20.72	0.02	0.000 2
异龙湖	13.95	0.62	22.67	0.268 2

注:^a污染负荷为单位湖泊容量(亿 m³)需要承载的人口数(万人)。

Note:^a Pollution load is the number of people (10⁴) needed to be carried by per unit of lake capacity (10⁸ m³).

指标分别使用公式(1)和(2)所示的隶属度函数进行转化。参考文献[18,22]报道的方法,将各指标10年内数值由小到大排列,再平均分为5段。第1、2段和第4、5段分段节点数值分别作为下限值(L)和上限值(U)的取值, L 和 U 的中点数值则作为基准值(B)的取值,具体取值如表1所示。确定反映湖泊水质指标的数值时, L 、 B 和 U 值分别选取《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)对应指标的Ⅰ类、Ⅲ类和Ⅴ类标准限值。

$$M=f(x)=\begin{cases} 0.1 & x \leq L \\ \frac{0.45(x-L)}{B-L} + 0.1 & L < x \leq B \\ \frac{0.45(x-B)}{U-B} + 0.55 & B < x \leq U \\ 1 & x \geq U \end{cases} \quad (1)$$

$$M=f(x)=\begin{cases} 1 & x \leq L \\ \frac{0.45(B-x)}{B-L} + 0.55 & L < x \leq B \\ \frac{0.45(U-x)}{U-B} + 0.1 & B < x \leq U \\ 0.1 & x \geq U \end{cases} \quad (2)$$

1.3.3 权重确定

采用层次分析(主观)和主成分分析(客观)相结合的方法确定指标权重。先使用层次分析法对项目层进行两两比较,判断各因素间的相对重要性,建立判断矩阵,经过层次排序后得到项目层权重值(W_p),其与湿地生态环境质量评价^[22]、湖泊生态安全评价的结果相似^[18],状态层权重占比为40%左右。每一个项目层下的指标,对10年数值进行主成分分析,得到各指标的公因子方差,计算各指标公因子方差占公因子方差总和的百分数,确定为指标层权重(W_i)。最后将项目层权重与指标层权重相乘,得到每一个指标的归一化权重(W_n),见表3。

1.3.4 湖泊生态安全指数的计算和分级

根据指标属性利用公式(1)、(2)将指标数值转化为隶属度,再分别利用公式(3)、(4)计算各年目标层

表3 云南省湖泊生态安全评价指标权重值

Table 3 The weight value of evaluation index of lake ecological security in Yunnan Province

项目层 Project level	项目层权重(W_p) Weight of project	指标层 Indicator level	指标层权重(W_i) Weight of indicator	归一化权重(W_n) Normalized weight
驱动力	0.036 5	总人口	0.387 4	0.014 1
		第一产业占比	0.301 3	0.011 0
		第二产业占比	0.311 2	0.011 4
压力	0.081 3	总用水量	0.014 2	0.001 2
		化学需氧量排放量	0.495 8	0.040 3
		氨氮排放量	0.490 0	0.039 8
状态	0.467 3	化学需氧量含量	0.312 5	0.146 0
		总磷含量	0.351 6	0.164 3
		总氮含量	0.335 9	0.156 9
影响	0.268 6	水体富营养化指数	1.000 0	0.268 6
响应	0.146 3	九大湖泊治理累积投入	0.036 0	0.005 3
		环境公共设施年度投资	0.182 1	0.026 6
		城镇污水处理率	0.203 2	0.029 7
		累计造林面积	0.164 2	0.024 0
		累计水土流失治理面积	0.213 0	0.031 2
		国家湿地公园数量	0.201 5	0.029 5

指数(LEI_o)和项目层指数(LEI_p),其中 LEI_o 为云南省湖泊生态安全指数。

$$LEI_o = \sum_{j=1}^{16} W_{nj} \times M_j \quad (3)$$

$$LEI_p = \sum_{j=1}^a W_{ij} \times M_j \quad (4)$$

式中:16为所有指标个数; a 为每个项目层下设的指标个数。 LEI_o 和 LEI_p 的取值范围均为[0,1],数值越大表示湖泊生态安全状况越好,反之风险越高。结合湖泊生态安全现状并参考相关研究,将云南省湖泊生态安全状态划分为5个等级(表4)^[18,21-22]。

表4 湖泊生态安全等级划分

Table 4 The levels of lake ecological security

项目 Item	I	II	III	IV	V
状态 State	安全	较安全	预警	较危险	危险
数值范围 Range	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2

2 结果与讨论

2.1 云南省湖泊生态安全评价结果

基于建立的湖泊生态安全评价指标体系,计算得到2009—2018年间云南省湖泊生态安全指数,变化情况如图2a所示。由图可知,云南省湖泊生态安全指数呈先下降后上升的趋势,由2009年的0.251下降至2011年的最低值0.153,随后逐渐上升,在2018年升至最大值0.422。对应的云南省湖泊生态安全等级经历了3个类型,由Ⅳ级(较危险)经Ⅴ级(危险)向Ⅲ级(预警)转变,2014—2018年呈现稳步变好趋势。

研究结果与近年来关于九湖生态环境质量、流域生态系统健康状况或流域景观生态风险的评价结果一致。朱泓等^[7]使用RSEI模型评价滇中五大湖泊的

生态环境质量,发现2018年流域整体状况欠佳,但近10年变化趋势为持续向好,与本研究结果一致,但因影像选取间隔为10年,无法洞察2008—2018年生态环境质量恶化又好转的趋势。张红叶等^[33]应用生态系统健康指数法定量评价2009年洱海流域湖泊,结果显示生态系统健康状态为较差;刘培等^[34]应用PSR框架模型评价2013年异龙湖流域湿地,结果显示生态系统健康状态为脆弱;王涛等^[35]基于Landsat数据评价1985—2015年杞麓湖流域,发现景观生态风险呈恶化趋势。这些研究结果均显示2009—2015年云南省湖泊生态安全状况出现过低谷,与本研究得到的2011年生态安全指数最低的结果一致。

云南省湖泊生态安全项目层指数变化情况如图2b所示,DPSIR框架下的驱动力层、压力层、状态层和影响层指数与生态安全指数表现出一致的变化趋势,先下降后上升,2011年附近达最低值,而响应层指数表现出明显且持续向好的变化趋势,由2009年的0.100持续升高至2018年的1.000。驱动力层指数值相对较高,范围为0.428~0.621,状态层和影响层指数值相对较低,范围在0.100~0.300之间,压力层和响应层指数跨度最大,由0.100变化至1.000。状态层和影响层权重累加得0.7359,对生态安全指数的贡献最大,而九湖中污染负荷高的湖泊权重高,如滇池、星云湖、杞麓湖和异龙湖,这些湖泊水体的化学需氧量、总氮及富营养化指数在研究时间范围内均处于较差水平,导致状态层及影响层指数偏低。

2.2 DPSIR项目层间关系与驱动机制分析

为进一步分析项目层对生态安全指数的贡献及各项目层间的关系,对项目层指数间及其与生态安全指数的两两组合进行相关性分析,结果显示驱动力层与响应层、压力层与其他项目层间的相关性均不显著

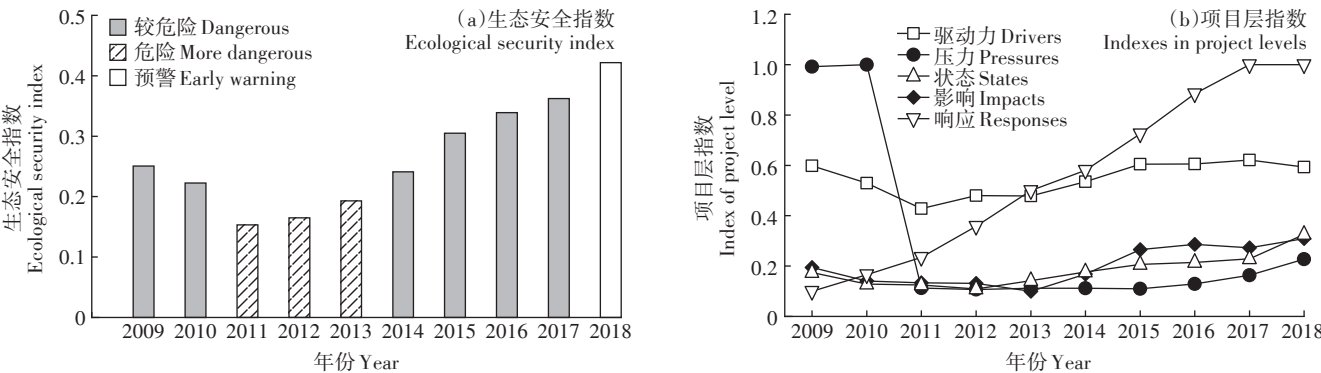


图2 云南省湖泊生态安全指数年际变化

Figure 2 Inter-annual changes of lake ecological security index in Yunnan Province

($P>0.05$),其余两两组合的相关性均达到极显著水平($P<0.01$),相关系数分布情况如图3a所示。由图可知,生态安全指数与压力层相关性不显著($P>0.05$),而与其他项目层均呈极显著正相关关系($P<0.01$)。压力层与除驱动力层以外的项目层相关性均不显著($P>0.05$),其他项目层两两之间均呈极显著正相关关系($P<0.01$)。

项目层间及其与生态安全指数的相关关系体现了云南省湖泊生态安全项目层指标间的相互作用。如果按照DPSIR框架项目层间作用的逻辑关系(如图3b红色箭头所示),流域人口增长和经济发展带来资源消耗与污染排放量的增加,进而导致流域水体污染物浓度升高,富营养化程度加重,治理措施强度提高,那么所有项目层间及各项目层与生态安全指数间均应呈正相关关系。压力层表现出与其他项目层不同的相关关系可能是压力层指标对响应层指标调控作用(图3b绿色箭头)的反应最弱,或压力层指标最难控制。2011年后,压力层指数是所有项目层指数中数值最低的,主要原因是化学需氧量和氨氮的排放量在2009年分别为27.31万t和1.90万t,2011年分别增长至55.47万t和5.93万t,之后逐年递减,2018年分别降为45.57万t和5.06万t,但仍远高于起始排放量,由此导致压力层指数自2011年后一直处于较低水平。

云南省2009年GDP达6 169.75亿元,而后连续4年GDP同比增长超过12%^[36],进入了经济高速发展时期。九湖流域开发力度加大,城镇人口增加、经济快速发展等因素导致污染物排放量急剧增加,在2011

年甚至出现翻倍情况,入湖污染负荷提高,滇池、杞麓湖、星云湖和异龙湖水体富营养化程度在2009—2013年持续恶化,在DPSIR各项目层上均为最低值,导致云南省湖泊生态安全状况在2011年出现低谷,诸多学者通过其他评价方法也得到了类似的结果^[33-35]。然而,2014—2018年响应层指数的持续升高反映出政府多层面调节措施实施力度的不断加大。《云南省国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》中提出,云南省需要以“调优一产、调强二产、调快三产”为产业发展导向,同时要加大环境保护和治理力度,建立工业、城镇、农业农村污染防控体系。此外,云南省政府2012年工作报告提出,按照“一湖一策”部署,抓好以滇池为重点的九大高原湖泊水污染综合防治工作。在针对九湖流域水污染防治的具体规划中,《滇池流域水污染防治规划(2011—2015年)》推动了截污治污、生态恢复和环境监管三大类型九大类别工程项目,全面改善了湖泊生态环境质量,确保湖泊生态安全。驱动力层产业结构调整使得压力层污染物排放量逐年降低,进一步结合修建环保公共设施、提高城镇污水处理率、增加林地面积、开展湿地恢复与保护区建立等全面提升湖泊流域环境容量的措施,降低状态层湖泊水体有机碳、氮和磷污染物浓度,改善影响层湖泊水体富营养化状况,多项举措的持续推行,使得2014—2018年云南省湖泊生态安全状态持续向好。综上所述,产业结构调整、截污治污、生态恢复等政策调控举措在维持云南省湖泊生态安全方面发挥积极作用。

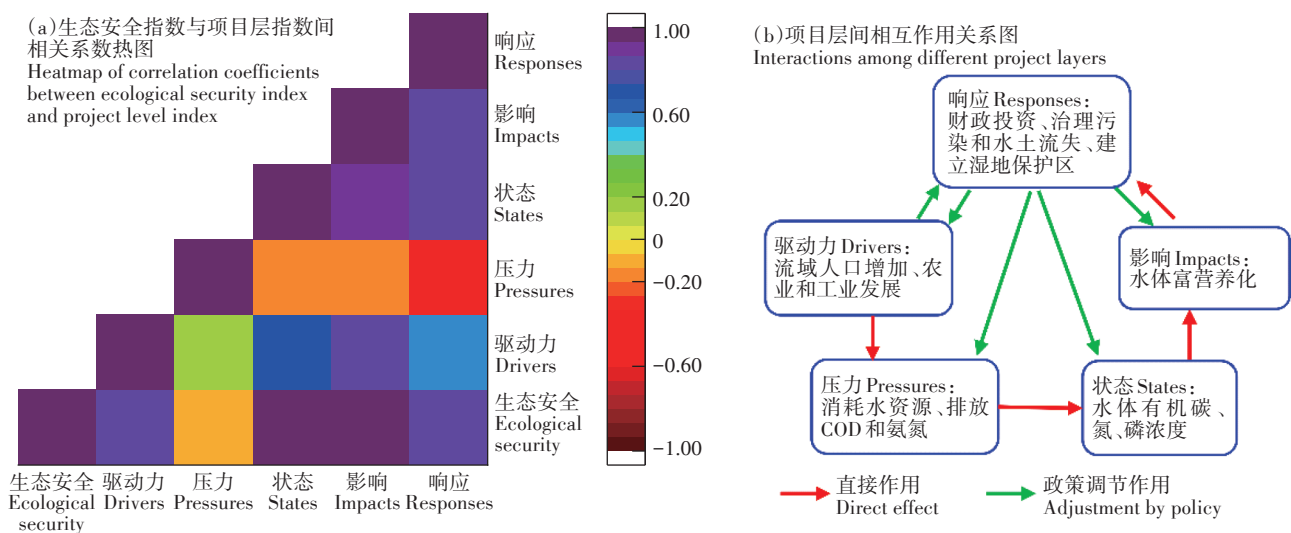


图3 云南省湖泊生态安全的项目层间关系

Figure 3 The inter-project level relationship of lake ecological security in Yunnan Province

3 结论

(1)云南省湖泊生态安全指数在2009—2018年间呈现先下降再上升的变化趋势,2011年达到最低值0.153,其生态安全等级经历了3个类型,由Ⅳ级(较危险)经Ⅴ级(危险)向Ⅲ级(预警)转变,2014—2018年呈现稳步向好趋势。

(2)DPSIR框架下云南省湖泊生态安全各项目层指数与生态安全指数表现出一致的变化趋势,响应层指数变化最明显且逐年持续升高。对生态安全指数贡献最大的状态层和影响层指数数值偏低,反映出九湖中污染负荷较高的湖泊水体化学需氧量、总氮含量及富营养化指数是限制因素。

(3)云南省湖泊化学需氧量和氨氮排放量调控难度最大,产业结构调整、截污治污、生态恢复等政策调控举措在维持湖泊生态安全方面发挥了积极作用。

参考文献:

- [1] DAI X Y, ZHOU Y Q, MA W C, et al. Influence of spatial variation in land-use patterns and topography on water quality of the rivers inflowing to Fuxian Lake, a large deep lake in the plateau of southwestern China[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 99:417-428.
- [2] 赵立君, 刘云根, 王妍, 等. 砷污染湖滨湿地底泥微生物群落结构及多样性[J]. 中国环境科学, 2019, 39(9):3933-3940. ZHAO L J, LIU Y G, WANG Y, et al. Microbial community structure and diversity of arsenic-contaminated lakeshore wetland sediments[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(9):3933-3940.
- [3] 李华勇, 张虎才, 陈光杰, 等. 云南高原湖泊表层沉积物粒度特征及环境指示意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(3):499-507. LI H Y, ZHANG H C, CHEN G J, et al. The grain size distribution characteristics of surface sediments from plateau lakes in Yunnan Province and their environmental significances[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(3):499-507.
- [4] 李松志, 李源, 陈烈, 等. 基于旅游调控规划的湖泊旅游环境评价研究——以云南高原湖泊为例[J]. 人文地理, 2005(4):69-73. LI S Z, LI Y, CHEN L, et al. Study on environmental assessment of lakes tourism based on adjustive and manipulative planning: A case study of Plateau in Yunnan[J]. *Human Geography*, 2005(4):69-73.
- [5] 郑刚, 刘庄, 张永春, 等. 基于模糊综合评价的流域社会经济活动对太湖生态影响评价研究[J]. 环境工程学报, 2008(12):1705-1710. ZHENG G, LIU Z, ZHANG Y C, et al. Research on the ecological impact of Taihu Lake affected by basin's society and economy based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008(12):1705-1710.
- [6] 于明洋, 孟飞, 张玉茜. 基于SuperMap IS.net的南四湖水环境动态监测WebGIS构建研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(27):13519-13521. YU M Y, MENG F, ZHANG Y X. The construction and study of Nansihu water environment assessment and management WebGIS based on SuperMap IS.net[J]. *Journal of Anhui Agriculture and Science*, 2012, 40(27):13519-13521.
- [7] 朱泓, 王金亮, 程峰, 等. 滇中湖泊流域生态环境质量监测与评价[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4):1289-1297. ZHU H, WANG J L, CHENG F, et al. Monitoring and evaluation of eco-environmental quality of lake basin regions in central Yunnan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4):1289-1297.
- [8] 邵志云, 陈晓娟, 文一, 等. 美国湖泊调查评价技术及对我国湖泊生态环境管理的启示[J]. 中国环境管理, 2020, 12(1):18-23. GAO Z Y, CHEN X J, WEN Y, et al. Survey and assessment technology of lake in US and its revelation for China lake environmental management[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2020, 12(1):18-23.
- [9] 朱凌, 王举位, 桂凌, 等. 基于生态威胁的湖泊生态安全指标体系研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(11):6649-6650, 6672. ZHU L, WANG J W, GUI L, et al. Study on the index system of lake ecological security based on ecological threats[J]. *Journal of Anhui Agriculture and Science*, 2011, 39(11):6649-6650, 6672.
- [10] 赵思琪, 代嫣然, 王飞华, 等. 湖泊生态系统健康综合评价研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12):98-104. ZHAO S Q, DAI Y R, WANG F H, et al. Progress on comprehensive assessment methods of lake ecosystem health[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 41(12):98-104.
- [11] SMEETS E, WETERINGS R. Environmental indicators: Typology and overview. Technical report No.25[R]. Copenhagen: European Environment Agency, 1999.
- [12] 熊曦. 基于DPSIR模型的国家级生态文明先行示范区生态文明建设分析评价——以湘江源头为例[J]. 生态学报, 2020, 40(14):5081-5091. XIONG X. Analysis and evaluation of ecological civilization construction in national ecological civilization pilot demonstration zone based on DPSIR model: A case study in the river source of Xiangjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14):5081-5091.
- [13] SVARSTAD H, PETERSEN L K, ROTHMAN D, et al. Discursive biases of the environmental research framework DPSIR[J]. *Land Use Policy*, 2008, 25(1):116-125.
- [14] WANG Z, ZHOU J Q, LOAICIGA H, et al. A DPSIR model for ecological security assessment through indicator screening: A case study at Dianchi Lake in China[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(6):e0131732.
- [15] TSCHERNING K, HELMINGA K, KRIPPNER B, et al. Does research applying the DPSIR framework support decision making?[J]. *Land Use Policy*, 2012, 29(1):102-110.
- [16] DE WIT R, LERUSTE A, LE FUR I, et al. A multidisciplinary approach for restoration ecology of shallow coastal lagoons: A case study in south France[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2020, 8:108.
- [17] BALKANLOU K R, MÜLLER B, CORD A F, et al. Spatiotemporal dynamics of ecosystem services provision in a degraded ecosystem: A systematic assessment in the Lake Urmia basin, Iran[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716:137100.
- [18] ZHANG J S, GAO J Q. Lake ecological security assessment based on SSWSSC framework from 2005 to 2013 in an interior lake basin, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(10):888.

- [19] LI S J, ZHANG J Q, GUO E L, et al. Dynamics and ecological risk assessment of chromophoric dissolved organic matter in the Yinma River watershed: Rivers, reservoirs, and urban waters[J]. *Environmental Research*, 2017, 158:245-254.
- [20] LI S J, JU H Y, ZHANG J Q, et al. Occurrence and distribution of selected antibiotics in the surface waters and ecological risk assessment based on the theory of natural disaster[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(27):28384-28400.
- [21] 何晔宇, 匡耀求. 基于驱动力-压力-状态-影响-响应模型的粤港澳大湾区惠州海岸带生态安全评价分析[J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(3):362-368. HE Y Y, KUANG Y Q. Evaluation and analysis of ecological security of coastal zone in Huizhou of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on DPSIR model[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2020, 42(3):362-368.
- [22] 王贺年, 张曼胤, 崔丽娟, 等. 基于DPSIR模型的衡水湖湿地生态环境质量评价[J]. *湿地科学*, 2019, 17(2):193-198. WANG H N, ZHANG M Y, CUI L J, et al. Evaluation of ecological environment quality of Hengshui Lake wetlands based on DPSIR model[J]. *Wetland Science*, 2019, 17(2):193-198.
- [23] 喻立, 王建力, 李昌晓, 等. 基于DPSIR与AHP的宁夏沙湖湿地健康评价[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(2):124-130. YU L, WANG J L, LI C X, et al. Health assessment of the Shahu Lake wetland based on DPSIR model and AHP[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2014, 36(2):124-130.
- [24] 高家骥, 李雪铭, 张峰, 等. 南四湖湖泊湿地生态环境预警研究[J]. *地理科学*, 2016, 36(8):1219-1226. GAO J J, LI X M, ZHANG F, et al. Early warning of wetland eco-environmental in Nansihu Lake[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(8):1219-1226.
- [25] 徐艺扬, 钱敏蕾, 李响, 等. 基于DPSIR的太平湖流域(黄山区)生态安全综合评估[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2015, 54(4):407-415. XU Y Y, QIAN M L, LI X, et al. Assessment of ecological security for Taiping Lake watershed based on the DPSIR model[J]. *Journal of Fudan University(Natural Science)*, 2015, 54(4):407-415.
- [26] 种丹. 基于多源遥感数据的云南省九大高原湖泊水质反演[D]. 西安:西北大学, 2017. CHONG D. Inversion of water quality in nine plateau lakes in Yunnan based on multi-source remote sensing data[D]. Xi'an:Northwest University, 2017.
- [27] 云南省水利厅. 2018年云南省水资源公报[EB/OL]. (2019-10-14)[2021-04-09]. <http://web.yn.gov.cn/uploads/file/20200106/20200106151345189.pdf>. Department of Water Resources of Yunnan Province. Bulletin on the water resources of Yunnan Province in 2018[EB/OL]. (2019-10-14)[2021-04-09]. <http://web.yn.gov.cn/uploads/file/20200106/20200106151345189.pdf>.
- [28] 董学仙, 吴学灿, 盛世兰, 等. 基于生态文明建设的云南九大高原湖泊保护与治理实践路径[J]. *生态经济*, 2014, 30(11):151-155.
- DONG Y X, WU X C, SHENG S L, et al. Paths for protection and treatment of the nine plateau lakes in Yunnan under ecological civilization development[J]. *Ecological Economy*, 2014, 30(11):151-155.
- [29] 云南省生态环境厅. 2018年云南省环境状况公报[EB/OL]. (2019-06-04)[2021-01-10]. http://sthjt.yn.gov.cn/hjzl/hjzkgb/201906/t20190604_190327.html. Department of Ecology and Environment of Yunnan Province. Bulletin on the environmental status of Yunnan Province in 2018[EB/OL]. (2019-06-04)[2021-01-10]. http://sthjt.yn.gov.cn/hjzl/hjzkgb/201906/t20190604_190327.html.
- [30] 郑季良, 杜静. 云南九大高原湖泊的生态补偿机制选择研究[J]. *昆明理工大学学报(社会科学版)*, 2020, 20(3):65-74. ZHENG J L, DU J. Selection of ecological compensation mechanism on the nine plateau lakes in Yunnan Province[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology(Social Science)*, 2020, 20(3):65-74.
- [31] 张召文. 云南九大高原湖泊治理的复杂性、艰巨性和长期性[J]. *环境科学导刊*, 2012, 31(1):19-20. ZHANG S W. Complexity, hardness and chronicity of treatment of the nine plateau lakes in Yunnan[J]. *Environmental Science Survey*, 2012, 31(1):19-20.
- [32] GUPTA A K, SURESH I V, MISRA J, et al. Environmental risk mapping approach: Risk minimization tool for development of industrial growth centres in developing countries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2002, 10:271-281.
- [33] 张红叶, 蔡庆华, 唐涛, 等. 洱海流域湖泊生态系统健康综合评价与比较[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(4):715-720. ZHANG H Y, CAI Q H, TANG T, et al. Comprehensive assessment and comparison of lakes' ecosystem health in Erhai watershed[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(4):715-720.
- [34] 刘培, 常凤琴, 吴红宝, 等. 异龙湖流域湿地生态系统健康评价[J]. *湿地科学与管理*, 2016, 12(3):28-32. LIU P, CHANG F Q, WU H B, et al. Health evaluation of wetland ecosystem in Yilong Lake basin[J]. *Wetland Science and Management*, 2016, 12(3):28-32.
- [35] 王涛, 肖彩霞, 刘娇, 等. 云南高原湖泊杞麓湖动态演变及景观生态风险评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, 37(1):9-17. WANG T, XIAO C X, LIU J, et al. Dynamic evolution and landscape ecological risks assessment of Qilu Lake in Yunnan Plateau[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2020, 37(1):9-17.
- [36] 云南省统计局, 国家统计局云南调查总队. 云南省2014年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2015-11-29)[2021-01-10]. http://www.yn.gov.cn/zwgk/zfxgkpt/fdzdgknr/tjxx/tjsj/202003/t20200319_200258.html. Yunnan Provincial Statistics Bureau, Yunnan Survey Team in National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of national economic and social development of Yunnan Province, 2014[EB/OL]. (2015-11-29)[2021-01-10]. http://www.yn.gov.cn/zwgk/zfxgkpt/fdzdgknr/tjxx/tjsj/202003/t20200319_200258.html.