

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0105

QIN Qu, LIANG Zhenmin, LIU Anle, et al. The ecological safety evaluation of plateau wetland based on DPSIRM framework model[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1363–1375. [秦趣, 梁振民, 刘安乐, 等. 基于DPSIRM框架模型的高原湿地生态安全评价[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1363–1375.]

# 基于DPSIRM框架模型的高原湿地生态安全评价

秦 趣<sup>1</sup>, 梁振民<sup>2</sup>, 刘安乐<sup>1</sup>, 赵增友<sup>1</sup>

(1. 六盘水师范学院 旅游与历史文化学院, 贵州 六盘水 553004; 2. 上海对外经贸大学 会展与旅游学院, 上海 201620)

**摘 要:** 综合考虑高原湿地生态安全的资源、环境、生态、社会、经济等影响因素, 以驱动力-压力-状态-影响-响应-管理(DPSIRM)框架模型建立高原湿地生态安全DPSIRM评价指标体系, 采用灰色关联法对各评价指标赋权重值, 运用集对分析法建立评价模型, 对威宁草海2011–2016年的湿地生态安全进行评价研究。结果显示: 人口自然增长率、单位工业产值废水排放量、生活污水排放量、化肥施用强度、农药施用强度、人均水资源量、物种多样性、水土流失率、物质生产、湿地面积退化率、污水处理率、物质生活指数、环保投资指数和政策法规实施力度等是影响威宁草海湿地生态安全的主要因素; 威宁草海湿地生态安全逐渐转好, 2011–2012年草海湿地生态安全属于不安全等级, 2013–2016年属于临界安全等级; 从各子系统情况看, 驱动力子系统为较安全等级, 压力、状态、影响、响应和管理子系统均为临界安全等级, 响应子系统为不安全等级, 成为影响威宁草海湿地生态安全的重要系统。研究成果可为威宁草海湿地的生态安全和环境建设提供科学参考。

**关键词:** DPSIRM框架模型; 灰色关联法; 集对分析法; 湿地生态安全; 威宁草海

**中图分类号:** X826      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1363-13

## 0 引言

湿地是自然界重要的自然资源, 是陆地生态系统和水生生态系统相互作用形成的不同于陆地和水域的独特生态系统<sup>[1-4]</sup>。近些年, 因经济快速发展, 我国湿地面积不断萎缩, 质量下降, 生态服务功能退化, 不仅影响社会经济持续发展, 而且影响到区域的生态安全。学界对湿地生态安全的研究内容主要包括湿地生态安全的定义<sup>[5]</sup>、湿地生态安全评价指标体系<sup>[6]</sup>和评价模型构建<sup>[7]</sup>、湿地生态安全对策<sup>[8]</sup>、湿地生态安全监测<sup>[9]</sup>和预警<sup>[10]</sup>等方面。研究对象主要集中在城市湿地生态安全<sup>[11-12]</sup>、流域湿地生态安全<sup>[10]</sup>和河口湿地生态安全<sup>[13]</sup>等。研究区域主要集中在中东部发达地区和湿地资源较少的西北干旱地区<sup>[14]</sup>。这些研究对湿地生态安全进

行深入探讨具有重大促进作用, 但对西南部的湿地研究较少, 针对西南高原湿地生态安全的研究更是不多见。

目前, 国内学者运用模糊数学法、神经网络模型、层次分析法和粗糙集理论与方法等对湿地生态进行了研究。邹长新等<sup>[15]</sup>利用模糊数学法评价了若尔盖湿地的生态安全; 宋国利等<sup>[16]</sup>以模糊综合评价法对温州乐清湾湿地的生态安全进行了研究。然而, 模糊数学法运用线性加权平均模型得到评判集, 其结果会出现失真、均化、跳跃和失效等情况。王莹等<sup>[17]</sup>采用神经网络模型研究了崇明东滩湿地生态系统健康; 薛亮等<sup>[18]</sup>以神经网络模型的原理和方法对洞庭湖湿地生态系统健康进行了评价。但是, 神经网络方法要求在相应的建模情景下才具备非线性逼近和泛化能力, 否则会陷入局部的极小点

收稿日期: 2018-10-17; 修订日期: 2020-08-27

基金项目: 贵州省教育厅创新群体重大项目(黔教合KY字[2016]056号); 国家社会科学基金项目(15CJY025); 贵州省科技合作计划项目(黔科合LH字[2015]7625号; [2015]7634号); 贵州省教育厅自然科学基金(黔教合KY字[2014]284号); 六盘水市科技计划项目(52020-2018-03-08); 六盘水师范学院科技创新团队项目(LPSSYKJTD201604)资助

作者简介: 秦趣(1978–), 男, 贵州毕节人, 教授, 2009年在重庆师范大学获硕士学位, 从事环境规划、环境管理与评价研究。

E-mail: qinqu2008@126.com.

而产生最优的结果,因为这种方法是根据局部搜索而得的优化方法和无约束非线性最优化的计算过程。薛亮等<sup>[19]</sup>应用层次分析法研究了西安灞柳湿地公园的生态安全;王斌等<sup>[20]</sup>以华北地区滨海湿地为例,运用层次分析法对湿地生态系统健康进行了探讨。可是,层次分析法在运用过程中,人为主观因素较强,所考虑的因素可能会与实际有偏差,其取值具有不确定性。林艺双等<sup>[21]</sup>运用粗糙集理论对洪湖、鄱阳湖和西洞庭湖的湿地生态系统健康进行了对比分析。但粗糙集理论不能准确评定各自属性下的属性值,一些难以得到的信息通常用属性的近似值代替,这会影响研究的结果。同时,上述方法中指标选择过于片面,湿地生态安全演化过程及内在机制未得到反映,未能体现湿地生态安全管理的重要性。基于此,本研究构建驱动力-压力-状态-影响-响应-管理(DPSIRM)框架模型的高原湿地生态安全评价指标体系,建立集对分析-灰色关联模型对高原湿地威宁草海的生态安全进行评价,以期对威宁草海湿地的生态安全 and 环境建设提供参考依据。

## 1 研究区概况

贵州威宁草海国家级自然保护区位于 $26^{\circ}47'32''\sim 26^{\circ}52'52''$  N,  $104^{\circ}10'16''\sim 104^{\circ}20'40''$  E(图1),处于云贵高原中部的乌蒙山麓腹地,是典型的高原湖泊湿地,保护区总面积 $96.00\text{ km}^2$ ,水域面积 $23.25\text{ km}^2$ ,海拔约 $2\,170\text{ m}$ ,同时也是贵州省最大的天然淡水湖泊,正常情况下蓄水面积为 $19.80\text{ km}^2$ ,平均水深约 $2\text{ m}$ 。其气候为亚热带季风气候,年平均气温 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量 $950.9\text{ mm}$ ,主要集中在夏季,干湿季节分明。汇入草海的河流主要有

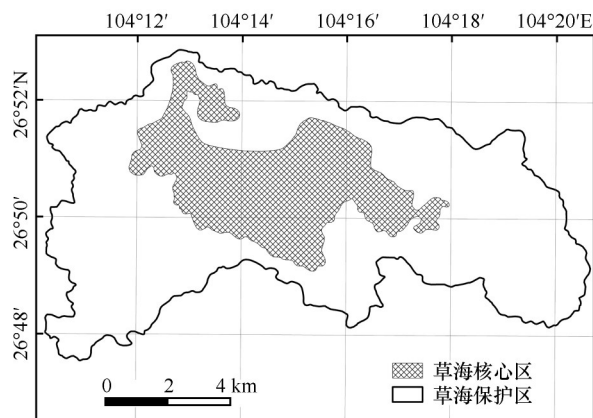


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Map showing the Caohai National Nature Reserve

白马河、卯家海子河、中河和东山河等小河流。近年来,随着经济社会的不断发展,人类生产生活等活动对湿地生态安全形成了巨大威胁,草海湿地生态环境遭到严重破坏,湿地退化进程加快,需尽快采取有效措施进行保护<sup>[22-24]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 DPSIRM框架模型构建

1970年,加拿大著名学者安东尼·弗雷德提出压力-状态-响应(PSR)模型,随后被OECD(经济合作和发展组织)所应用<sup>[25]</sup>。20世纪90年代初,OECD和UN在环境政策报告中发展PSR模型并形成了DSR(驱动力-状态-响应)模型。在PSR模型和DSR模型的基础上<sup>[26]</sup>,欧洲环境署(European Environment Agency, EFA)提出DPSIR模型,即驱动力-压力-状态-影响-响应模型,该模型强调评价要素之间的因果关系,涵盖社会、经济、环境和政策等要素<sup>[27-28]</sup>,在流域生态安全<sup>[29]</sup>、土地节约利用<sup>[30]</sup>、低碳城市发展<sup>[31]</sup>、生态环境效应评估<sup>[32]</sup>、农业可持续发展<sup>[33]</sup>等方面应用广泛。后来,杨俊等<sup>[6]</sup>将管理引入到DPSIR模型中,以大连市为研究对象,构建了人居环境安全评价模型,即DPSIRM(驱动力-压力-状态-影响-响应-管理)模型,张峰等<sup>[34]</sup>运用该模型评价了南四湖湖泊生态系统健康状况,张凤太等<sup>[35]</sup>基于DPSIRM概念框架,构建了岩溶区水资源安全评价模型。然而,至今把DPSIRM模型应用到湿地生态安全评价中的文献不多。在湿地面积不断减少、生态功能不断退化、生态安全面临危机的情况下,对湿地进行有效管理是促进湿地生态安全的重要途径。因此,这里把改进后的DPSIRM框架模型引入到湿地生态安全评价中,以便更好的分析湿地生态安全复杂的因果关系。

本研究根据湿地生态安全<sup>[36]</sup>、湖泊生态安全DPSIR框架模型<sup>[37]</sup>,参照湿地生态系统健康<sup>[34]</sup>、人居环境<sup>[6]</sup>和水资源安全评价<sup>[35]</sup>的DPSIRM模型,把DPSIRM框架模型引入到湿地生态安全评价中。DPSIRM框架模型由六类因子构成,即驱动力、压力、状态、影响、响应和管理。框架具体含义为:湿地区域人口、社会 and 经济发展给湿地生态环境带来巨大压力和挑战,把人口、社会 and 经济发展作为“驱动力-D”子系统;这导致对湿地环境资源需求增强,并增加排放各种污染物,因此水资源供需、水体污染构成“压力-P”子系统;由此,湿地水质、

水量和水生态发生变化,把水质、水量和水生态作为“状态-S”子系统;此时,湿地资源与自然和社会之间的矛盾突出,把供需矛盾和湿地退化作为“影响-I”子系统;由于湿地生态安全受到胁迫,该胁迫在经济社会中形成反馈,迫使人类社会进行生态恢复,把湿地水资源开发、生态恢复作为“响应-R”子系统;与此同时,通过各种管理政策和措施加强湿

地生态安全调控,使得湿地生态环境与社会经济良性耦合发展,进而减少人类活动对湿地生态环境产生的压力,降低对湿地生态系统和社会经济发展的制约和影响,把政策和管理投入作为“管理-M”子系统。整个框架模型通过胁迫过程、健康变化过程、服务过程和管理过程来实现。具体框架模型如图2。

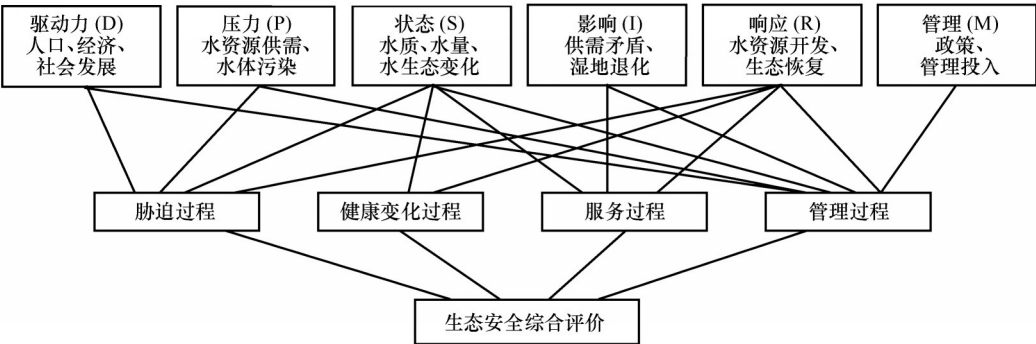


图2 高原湿地生态安全评价DPSIRM框架模型

Fig. 2 DPSIRM framework model for ecological security assessment of plateau wetlands

2.2 构建评价指标体系和评价标准

2.2.1 构建评价指标体系

根据构建的DPSIRM框架模型,参考现有的研究文献<sup>[11,29,36,38-39]</sup>,遵循指标数据的代表性、独立性、易得性、可操作性和系统性,从驱动力、压力、状态、影响、响应和管理6个方面建立了基于DPSIRM框架模型的高原湿地生态安全评价指标体系(表1)。

(1) 驱动力指标。人与自然相互作用对湿地生态安全造成了重大威胁,随着经济社会快速发展,人口不断增长,人类活动成为湿地生态安全的主要驱动因子。因此,选择人均GDP、城镇化率、恩格尔系数和人口自然增长率4个因子作为驱动力指标。

(2) 压力指标。压力指标是由驱动力导致的对湿地生态安全的压力,由于人口、经济、社会的发展,导致水资源供需、水体污染等压力,所以这两类指标的因果关系非常紧密。压力指标由人类活动产生的影响因子来反映,这里选取万元GDP水耗、化肥施用强度、农药施用强度、单位工业产值废水排放量、生活污水排放量、年平均降水、年平均气温和干旱指数8个因子作为压力指标。

(3) 状态指标。状态指标是指在驱动力和压力作用下产生的湿地水质、水量和水生态变化等状态。选取人均水资源量、水质状况指数、水土流失

率和物种多样性4个指标作为状态指标。

(4) 影响指标。是指在驱动力、压力、状态等因素影响下湿地生态安全发生的变化结果,选取水源稳定状况、物质生产和湿地面积退化率3个因子构建影响指标。

(5) 响应指标。是指湿地生态安全发生的各种变化通过相关影响因子对人类社会产生作用,人类社会感受到这些变化后则采取相应的安全措施反作用于湿地生态系统。这里用湿地水资源开发利用率、污水处理率、工业废水排放达标率、用水普及率和物质生活指数5个指标构成响应指标。

(6) 管理指标。是指人类主动采取积极的干预和恢复措施作用于湿地生态系统,目的是使湿地生态安全得以改善并形成良性发展。所以采用环保投资指数、政策法规实施、湿地管理水平3个指标构成管理指标。

2.2.2 指标评价标准

湿地生态安全评价具有复杂性和地区差异性特点,考虑到高原湿地环境较脆弱的问题,在参考前人对湿地生态安全评价标准的基础上<sup>[25,35,40]</sup>,结合威宁草海湿地的实际情况,把威宁草海湿地生态安全评价标准划分为5个等级,即安全、较安全、临界安全、不安全和极不安全,具体分级标准见表2。



表 1 高原湿地生态安全评价指标体系及含义

Table 1 The plateau wetland ecosystem security assessment index system and meaning

目标层	因子层	指标层	单位	指标解释
	驱动力	人均 GDP $X_1$	元·人 <sup>-1</sup>	表征经济发展情况对湿地生态安全的驱动,用研究区一定时期 GDP 总量与总人口的比值反映
		城镇化率 $X_2$	%	表征区域发展对程度对湿地生态安全的驱动,用研究区非农业人口数与总人口数的比值反映
		恩格尔系数 $X_3$	%	表征经济富裕程度对湿地生态安全的驱动,用居民家庭食品消费支出与生活消费总支出的比值反映
		人口自然增长率 $X_4$	‰	表征人口自然增长程度对湿地生态安全的驱动,用出生率减死亡率来反映
	压力	万元 GDP 水耗 $X_5$	m <sup>3</sup> ·(万元) <sup>-1</sup>	表征经济发展水平对湿地水资源数量安全的压力,用 GDP 与用水总量的比值反映
		化肥施用强度 $X_6$	kg·hm <sup>-2</sup>	表征农业生产对湿地水资源质量安全的压力,用每年每公顷化肥施用量反映
		农药施用强度 $X_7$	kg·hm <sup>-2</sup>	表征农业生产对湿地水资源质量安全的压力,用每年每公顷农药施用量反映
		单位工业产值废水排放量 $X_8$	t·(万元) <sup>-1</sup>	表征工业生产对湿地水资源质量安全的压力,用工业万元产值排污量反映
		生活污水排放量 $X_9$	t·人 <sup>-1</sup>	表征居民生活对湿地水资源质量安全的压力,用居民人均排放的污水量反映
		年平均降水 $X_{10}$	mm	表征区域降水对湿地水资源数量安全的压力,用区域内多个观测点测得的年降雨量均值反映
		年平均气温 $X_{11}$	℃	表征区域气温变化对湿地水量蒸发产生的压力,用全年各日的日平均温度的算术平均值反映
		干旱指数 $X_{12}$	/	表征区域干旱变化对湿地水量安全的压力,用年蒸发能力和年降水量的比值反映
湿地生态 安全	状态	人均水资源量 $X_{13}$	m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup>	表征水资源保障状态,用水资源量与总人口数的比值反映
		水质状况指数 $X_{14}$	/	表征对湿地水环境质量的的状态,用《地面水环境质量标准》(GB3838-88)中Ⅲ类及以上等级水质监测数占湿地监测数的比值反映
		水土流失率 $X_{15}$	%	表征区域内水土保持状态,用水土流失面积与土地总面积的比值反映
		物种多样性 $X_{16}$	%	表征湿地物种变化状态,用湿地地区植物种数与所在生物地理区湿地植物种数的比值反映
	影响	水源稳定状况 $X_{17}$	%	表征湿地的水量平衡变化的影响,用水源保证或补给率来反映
		物质生产 $X_{18}$	%	表征湿地生态系统的生产能力,用水产品年收获量变化率来反映。
		湿地面积退化率 $X_{19}$	%	表征各种人类活动对湿地生态安全的影响,用现有湿地面积与 2000 年的湿地面积对比分析反映
	响应	湿地水资源开发利用率 $X_{20}$	%	表征湿地水资源数量安全的响应,以区域工农业、生活等用水量占该区域水资源总量的比值反映
		污水处理率 $X_{21}$	%	表征湿地水资源质量安全的响应,用区域内污水处理量占污水排放量的的比值反映
		工业废水排放达标率 $X_{22}$	%	表征水资源质量安全的响应,用工业废水排放达标量与工业废水排放总量的比率反映
		用水普及率 $X_{23}$	%	表征供水普及的平均水平,用城市非农业用水人口数与城市非农业人口数的比值反映
		物质生活指数 $X_{24}$	元	表征物质生活对湿地安全的响应,用农民人均纯收入来反映
	管理	环保投资指数 $X_{25}$	%	表征湿地管理投入资金的充足性,用湿地环境保护投资占 GDP 的比值反映
		政策法规实施力度 $X_{26}$	%	表征湿地管理的有效性,用接受政策法规人数占总人口的比值反映
		湿地管理水平 $X_{27}$	%	表征群众对湿地管理的满意度,用湿地管理队伍的整体水平反映

2.3 评价方法

2.3.1 灰色关联方法

灰色关联理论是对反映各因素变化特性的数据序列进行几何比较,若干个统计数列构成的各条曲线几何形状越接近,则关联度就越大,这具有数

理模型的客观性,而分辨系数则反映一定的主观性,其求出的权重值更加合理<sup>[41]</sup>。

(1) 原始数据标准化处理

本研究的标准化方法采用线性插值法对原始数据作无量纲化处理,评价某区域  $m$  年共  $n$  个指标

表 2 高原湿地生态安全评价等级

Table 2 The level standards of plateau wetland ecosystem security assessment

目标层	因子层	指标层	权重	分项权重	安全	较安全	临界安全	不安全	极不安全
湿地生态安全	驱动力	X <sub>1</sub>	0.0630	0.3284	>12 000	12 000~8 000	8 000~5 000	5 000~2 000	<2 000
		X <sub>2</sub>	0.0561	0.2979	<20	20~35	35~50	50~65	>65
		X <sub>3</sub>	0.0471	0.2571	<20	20~30	30~50	50~60	>60
		X <sub>4</sub>	0.0156	0.1166	<5	5~6	6~7	7~8	>8
	压力	X <sub>5</sub>	0.0185	0.0939	<300	300~600	600~1 000	1 000~1 500	>1 500
		X <sub>6</sub>	0.0144	0.0803	<100	100~250	250~400	400~500	>500
		X <sub>7</sub>	0.0106	0.0673	<2	2~2.5	2.5~3.5	3.5~4	>4
		X <sub>8</sub>	0.0353	0.1505	<5	5~15	15~30	30~45	>45
		X <sub>9</sub>	0.0149	0.0820	<10	10~12	12~14	14~16	>16
		X <sub>10</sub>	0.0302	0.1333	>1 500	1 500~1 100	1 100~700	700~300	<300
		X <sub>11</sub>	0.0494	0.1978	<6	6~10	10~14	14~18	>18
		X <sub>12</sub>	0.0485	0.1949	<0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	1.0~1.2	1.2~1.4
	状态	X <sub>13</sub>	0.0234	0.2219	>3 000	3 000~2 500	2 500~1 500	1 500~500	<500
		X <sub>14</sub>	0.0562	0.4129	>80	80~60	60~40	40~20	<20
		X <sub>15</sub>	0.0146	0.1707	<20	20~40	40~60	60~80	>80
		X <sub>16</sub>	0.0187	0.1945	>50	50~30	30~20	20~10	<10
	影响	X <sub>17</sub>	0.0399	0.3051	>70	70~60	60~50	50~40	<40
		X <sub>18</sub>	0.0399	0.3051	水产品年收获量增加,变化率>6%	水产品年收获量增加,变化率2%~6%	水产品年收获变化率-2%~2%	水产品年收获量减少,变化率2%~6%	水产品年收获量减少,变化率>6%
		X <sub>19</sub>	0.0543	0.3898	<2	2~4	4~6	6~8	>8
	响应	X <sub>20</sub>	0.0232	0.1399	<10	10~20	20~40	40~60	>60
		X <sub>21</sub>	0.0067	0.0723	>80	80~70	70~60	60~45	<45
		X <sub>22</sub>	0.0559	0.2862	>90	90~80	80~70	70~60	<60
		X <sub>23</sub>	0.0454	0.2672	>90	90~70	70~50	50~30	<30
		X <sub>24</sub>	0.0461	0.2344	>4 000	4 000~3 000	3 000~2 000	2 000~1 000	<1 000
	管理	X <sub>25</sub>	0.0602	0.3475	>2.5	2.5~2	2~1.5	1.5~1	<1
		X <sub>26</sub>	0.0551	0.3220	>70	70~50	50~40	40~20	<20
		X <sub>27</sub>	0.0568	0.3305	>80	80~70	70~60	60~50	<50

的湿地生态安全状况，原始数据矩阵为：

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在本研究中，湿地生态安全的指标分为正向指标和逆向指标两种，正向指标是指标数据越大越好的指标，标准化方法为：

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

逆向指标即成本型指标，是指指标数值越小越好的指标，标准化方法为：

$$y = 1 - \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

式中： $x_{\max}$ 为最大值； $x_{\min}$ 为最小值。

(2) 找出评价指标数据的最优向量：

$$G = (g_1, g_2 \cdots g_n) = (y_{11} \vee y_{12} \cdots \vee y_{1m}, y_{21} \vee y_{22} \cdots \vee y_{2m}, y_n \vee y_{n2} \cdots \vee y_{nm}) \quad (4)$$

式中： $\vee$ 代表最大运算符。

(3) 计算第  $j$  个指标  $y_i$  与最优向量  $G$  的关联系数：

$$\delta_i(y_i, G) = \frac{\min_i \min_j |y_{ij} - g_i| + \rho \max_i \max_j |y_{ij} - g_i|}{|y_{ij} - g_i| + \rho \max_i \max_j |y_{ij} - g_i|} \quad (5)$$

式中： $\delta_i(y_i, G)$ 代表第  $j$  个指标  $y_i$  与最优向量  $G$  的关联系数； $\rho$ 代表分辨系数， $0 < \rho < 1$ ，通常为  $\rho = 0.5$ ； $\min_i \min_j |y_{ij} - g_i|$ 代表两级极小差； $\max_i \max_j |y_{ij} - g_i|$ 代表两级极大差。

(4) 求第  $j$  个评价指标  $y_j$  的权重  $w_j$ ：

$$w_j = \delta_i / \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (6)$$

### 2.3.2 集对分析法

集对分析理论是我国学者赵克勤于1989年提出的解决不确定性问题有效的系统分析方法,其原理是在分析单个指标和评价等级隶属关系的基础上,综合集成评价目标的安全等级,能准确反映湿地生态安全的演化过程和内存机制<sup>[42]</sup>。本研究运用集对分析模型对威宁草海湿地生态安全进行评价<sup>[35,43-44]</sup>,步骤为:

构建集对  $H(X_i, B_k) (k=1, 2, 3, 4, 5; i=1, 2, \dots, n)$  得到  $k$  元联系度, 即:

$$\eta(X, B) = w\eta(x_i, B) = \sum_{l=1}^m w_l a_{il} + \sum_{l=1}^m w_l b_{l,1} i_1 + \sum_{l=1}^m w_l b_{l,2} i_2 + \sum_{l=1}^m w_l b_{l,3} i_3 + \sum_{l=1}^m c_l J \quad (7)$$

$$\text{令 } f_1 = \sum_{l=1}^m w_l a_{il}, f_2 = \sum_{l=1}^m w_l b_{l,1} i_1, f_3 = \sum_{l=1}^m w_l b_{l,2} i_2,$$

$$f_4 = \sum_{l=1}^m w_l b_{l,3} i_3, f_5 = \sum_{l=1}^m c_l J$$

则公式(7)变化为:

$$\eta(X, B) = f_1 + f_2 I_1 + f_3 I_2 + f_4 I_3 + f_5 J \quad (8)$$

式中:  $I_1, I_2, I_3$  和  $J$  取值1。

本研究分为正向指标和逆向指标,当指标数据越小越优时,样本值  $x_i$  与该指标  $k$  级评价标准的联系度  $\eta(x_i, B_k)$  为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1+0i_1+0i_2+0i_3+0j, & x_i \leq s_1 \\ \frac{s_1+s_2-2x_i}{s_2-s_1} + \frac{2x_i-2s_1}{s_2-s_1} i_1 + 0i_2+0i_3+0j, & s_1 < x_i \leq \frac{s_1+s_2}{2} \\ 0 + \frac{s_2+s_3-2x_i}{s_3-s_1} i_2 + \frac{2x_i-s_2-s_3}{s_3-s_1} i_3 + 0j, & \frac{s_1+s_2}{2} < x_i \leq \frac{s_2+s_3}{2} \\ 0+0i_1 + \frac{s_3+s_4-2x_i}{s_4-s_2} i_2 + \frac{2x_i-s_2-s_3}{s_4-s_2} i_3 + 0j, & \frac{s_2+s_3}{2} < x_i \leq \frac{s_3+s_4}{2} \\ 0+0i_1+0i_2 + \frac{2s_1-2x_i}{s_4-s_3} i_3 + \frac{2x_i-s_3-s_4}{s_4-s_3} j, & \frac{s_3+s_4}{2} < x_i \leq s_4 \\ 0+0i_1+0i_2+0i_3+1j, & x_i \leq s_4 \end{array} \right. \quad (9)$$

当指标数据越大越优时,样本值  $x_i$  与该指标  $k$  级评价标准的联系度  $\eta(x_i, B_k)$  为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1+0i_1+0i_2+0i_3+0j, & x_i \leq s_1 \\ \frac{2x_i-s_1-s_2}{s_1-s_2} + \frac{2s_1-2x_i}{s_1-s_2} i_1 + 0i_2+0i_3+0j, & \frac{s_1+s_2}{2} \leq x_i < s_1 \\ 0 + \frac{2x_i-s_2-s_3}{s_1-s_3} i_1 + \frac{s_2+s_3-2x_i}{s_1-s_3} i_3 + 0j, & \frac{s_3+s_4}{2} < x_i \leq \frac{s_2+s_3}{2} \\ 0 + \frac{2x_i-s_2-s_3}{s_2-s_4} i_1 + \frac{s_1+s_2-2x_i}{s_2-s_4} i_3 + 0j, & \frac{s_3+s_4}{2} \leq x_i < \frac{s_2+s_3}{2} \\ 0+0i_1+0i_2 + \frac{2x_i-2s_4}{s_3-s_4} i_3 + \frac{s_3+s_4-2x_i}{s_3-s_4} j, & s_4 \leq x_i < \frac{s_3+s_4}{2} \\ 0+0i_1+0i_2+0i_3+j, & x_i < s_4 \end{array} \right. \quad (10)$$

式中:  $s_1, s_2, s_3, s_4$  分别为威宁草海湿地生态安全等级安全、较安全、临界安全、不安全和极不安全的边界值。

用置信度准则来确定样本的等级,公式为:

$$h_k = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) > \lambda, k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (11)$$

式中:  $\lambda$  为置信度。通常,  $0.5 \leq \lambda \leq 0.7$ 。

## 2.4 数据来源

相关数据主要来自贵州省水利厅网站发布的《贵州省水资源公报》(2008-2017),《贵州省统计年鉴》《威宁县统计年鉴》《贵州草海湿地生态环境综合治理总体规划》《草海研究》<sup>[45]</sup>及2016年实地问卷调查数据以及相关文献<sup>[46]</sup>等。

## 3 结果与分析

### 3.1 评价结果

把草海湿地2011-2016年相关指标数据代入式(1)~(6),得到草海湿地各评价指标的权重值(表2)。以2016年为例,介绍相关运算过程。首先把2016年原始数据代入式(9)、式(10),求出2016年各相关指标的联系度(表3),再把各指标的权重值与联系度结合,将各指标的联系度值代入式(8),计算出2016年各评价等级的联系度(表4)。取  $\lambda=0.5$ , 2016年的置信度值分别为:  $h_1=f_1=0.1102 < \lambda$ ,  $h_2=f_1+f_2=0.1102+0.2094=0.3196 < \lambda$ ,  $h_3=f_1+f_2+f_3=0.1102+0.2094+0.4085=0.7281 > \lambda$ , 根据置信度准则即可得出2016年草海湿地生态安全等级属于第三等级,即处于临界安全等级。同理得到2011-2016草海湿地生态安全等级和历年湿地驱动力子系统、压力子系统、状态子系统、影响子系统和管子系统的等级(表4、表5)。

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 草海湿地生态安全综合评价分析

由表4可以看出,2011-2012年草海湿地生态安全属于不安全等级,2013-2016年属于临界安全等级,草海湿地生态安全近年来逐渐转好。说明近年来对草海湿地的保护和治理是有效的,特别是2008年贵州省毕节市成立草海湿地管理委员会,开展草海综合治理工作后,经过2009-2011三年的综合治理,草海湿地的生态环境得到改善,促进了当地社会经济和湿地生态环境的协调发展,湿地生态安全级别提升。但目前仅为临界安全等级,湿地生态环境保护任重道远。

表3  2016年各指标联系度					
Table 3  The connection degree of each index in 2016					
联系度	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>
$\eta_1$	0	0.0439	0.0191	0	0
$\eta_2$	0	0.0049	0.0512	0	0
$\eta_3$	0	0.0232	0.0239	0	0
$\eta_4$	0	0.0139	0.0017	0	0
$\eta_5$	0	0.0045	0.0140	0	0
$\eta_6$	0	0.0042	0.0102	0	0
$\eta_7$	0	0.0036	0.0070	0	0
$\eta_8$	0	0	0	0.0058	0.0295
$\eta_9$	0	0	0.0025	0.0124	0
$\eta_{10}$	0	0	0.0165	0.0137	0
$\eta_{11}$	0	0	0.0185	0.0309	0
$\eta_{12}$	0.0485	0	0	0	0
$\eta_{13}$	0	0.0005	0.0229	0	0
$\eta_{14}$	0	0	0.0331	0.0232	0
$\eta_{15}$	0	0.0093	0.0053	0	0
$\eta_{16}$	0	0.0085	0.0102	0	0
$\eta_{17}$	0.0399	0	0	0	0
$\eta_{18}$	0	0	0.0199	0.0199	0
$\eta_{19}$	0	0	0.0257	0.0286	0
$\eta_{20}$	0	0	0.0105	0.0127	0
$\eta_{21}$	0	0.0060	0.0007	0	0
$\eta_{22}$	0	0.0425	0.0134	0	0
$\eta_{23}$	0	0.0449	0.0005	0	0
$\eta_{24}$	0	0	0	0	0.0461
$\eta_{25}$	0	0	0.0277	0.0325	0
$\eta_{26}$	0	0	0.0155	0.0396	0
$\eta_{27}$	0	0.0258	0.0310	0	0

3.2.2 各评价子系统分析

(1) 驱动力子系统(表5)。草海湿地驱动力子系统 2011 – 2012 年属于临界安全等级, 2013 – 2016 属于较安全等级, 其属于较安全等级的置信度值从2013年的0.5157上升到2016年0.5623, 说明驱动力子系统总体情况较好, 并向良好态势发展, 这与草海所处的毕节市威宁县经济社会发展相对

落后, 对草海湿地生态环境驱动影响较小有关。同时, 人口自然增长率过高, 2016 年, 威宁县人口自然增长率为 5.33‰, 使得人口从 2005 年的 120.41 万人增加到 2016 年的 148.82 万人。这说明人口增长过快, 给生态环境驱动带来较大影响, 成为驱动力子系统发展的关键因素。

(2) 压力子系统(表5)。在压力子系统方面, 2011 – 2015 年属于不安全等级, 2016 年属于临界安全等级, 其临界安全置信度值为 0.5969。这主要是因为草海湿地周边地区工业污水、生活污水排放量多, 化肥农药施用量大导致。据统计, 2014 年每天排入草海的城市生产和生活废水多达 3 000 m<sup>3</sup> 以上, 依据草海湖滨农业调查表明, 草海周边农业用地 4 238.71 hm<sup>2</sup>, 其中, 606.33 hm<sup>2</sup> 种植蔬菜, 年平均施用复合肥 900 kg·hm<sup>-2</sup>, 施用尿素 900 kg·hm<sup>-2</sup>; 1 076.4 hm<sup>2</sup> 种植土豆、玉米, 年平均施用复合肥 450 kg·hm<sup>-2</sup>, 施用尿素 300 kg·hm<sup>-2</sup>, 同时使用农药 2.67 t。表明工业污水和生活污水排放量多, 化肥农药施用量大, 给草海湿生态安全造成极大压力。而气温和降水也给草海湿地带来较大压力。2011 年和 2016 年, 草海年平均气温分别为 10.1 ℃ 和 10.6 ℃, 说明受全球气候变化影响, 草海年平均气温呈上升趋势。气温升高, 水分蒸发增强, 气温每升高 3 ℃, 需要降水增加 20% 才能补偿因气温升高而对湿地生态安全带来的影响。在降水方面, 2011 年区域年均降水量为 859.4 mm, 2013 年下降为 792.6 mm, 降幅为 7.78%, 表明草海区域年均降水量变化幅度较大, 受全球气候变化影响, 区域年均降水量不稳定性增强, 湿地生态安全受到影响。

(3) 状态子系统(表5)。在状态子系统方面, 2011 – 2016 年均为临界安全等级, 其置信度值在 0.8293~0.9009 之间小幅波动。这主要是因为人均水资源量、物种多样性、水土流失等未得到有效改善所致。湿地水资源量给湿地生态安全带来严重

表4  草海湿地生态安全综合评价联系度( $f_n$ )及其 $h_k$ 值(2011 – 2016)											
Table 4  The connection degree( $f_n$ ) and $h_k$ of wetland ecosystem security assessment in Caohai (2011 – 2016)											
年份	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	安全等级
2011 年	0.0399	0.0759	0.3525	0.2889	0.2428	0.0399	0.1158	0.4683	0.7572	1	不安全
2012 年	0.0399	0.0756	0.3757	0.3194	0.1894	0.0399	0.1155	0.4912	0.8106	1	不安全
2013 年	0.0457	0.1651	0.3518	0.2866	0.1508	0.0457	0.2108	0.5626	0.8492	1	临界安全
2014 年	0.0307	0.2114	0.3483	0.3144	0.0952	0.0307	0.2421	0.5904	0.9048	1	临界安全
2015 年	0.0399	0.2062	0.4223	0.2537	0.0779	0.0399	0.2461	0.6684	0.9221	1	临界安全
2016 年	0.0884	0.2357	0.381	0.2193	0.0756	0.1768	0.3241	0.7051	0.9244	1	临界安全



表5 湿地生态安全DPSIRM等级及 $h_k$ 值(2011–2016)

Table 5 The standards and  $h_k$  of wetland ecosystem security DPSIRM (2011–2016)

年份	类别	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	安全等级
2011年	D	0	0.1532	0.8717	1		临界安全
	P	0	0	0.4527	0.8414	1	不安全
	S	0	0.0913	0.8518	1		临界安全
	I	0.3051	0.3051	0.4824	1		不安全
	R	0	0.0228	0.2738	0.5831	1	不安全
	M	0	0	0	0.2377	1	极不安全
2012年	D	0	0.2954	1			临界安全
	P	0	0	0.4809	0.8321	1	不安全
	S	0	0.0916	0.8579	1		临界安全
	I	0.3051	0.3051	0.4422	1		不安全
	R	0	0.398	0.494	0.7124	1	不安全
	M	0	0	0	0.3784	1	极不安全
2013	D	0	0.5157	1			较安全
	P	0.037	0.0673	0.4952	0.8750	1	不安全
	S	0	0.2885	0.9009	1		临界安全
	I	0.3051	0.4577	0.7323	1		临界安全
	R	0	0.2036	0.4311	0.7320	1	不安全
	M	0	0	0	0.5807	1	不安全
2014年	D	0.1073	0.5538	1			较安全
	P	0.0639	0.1648	0.5681	0.8897	1	不安全
	S	0.0266	0.3802	0.8816	1		临界安全
	I	0	0.3966	0.7453	1		临界安全
	R	0	0.2121	0.4311	0.7628	1	不安全
	M	0	0	0.1364	0.8643	1	不安全
2015年	D	0.0793	0.5554	1			较安全
	P	0	0.1807	0.5816	0.8646	1	临界安全
	S	0	0.2065	0.8514	1		临界安全
	I	0.3051	0.4577	0.7739	1		临界安全
	R	0	0.2836	0.5850	0.7656	1	临界安全
	M	0	0	0.4524	1		不安全
2016年	D	0	0.5623	1			较安全
	P	0.1949	0.2643	0.5969	0.8741	1	临界安全
	S	0	0.2020	0.8293	1		临界安全
	I	0.3051	0.3051	0.6422	1		临界安全
	R	0	0.3286	0.6201	0.7656	1	临界安全
	M	0	0.1503	0.5812	1		临界安全

影响,大气降水是草海湿地的主要水源补给方式,近年来,草海地区年降水量表现出下降趋势,2016年,草海湿地湖区降水量仅为 $0.24\times10^8\text{ m}^3$ 。同时,人口增多,用水量随之增加,使得入湖水量减少。湿地水资源量减少,导致湿地植物生长受到影响,动物的生存与发展受到制约。而且,草海自然保护

区水土流失加剧,保护区总面积 $96.00\text{ km}^2$ ,水土流失面积 $36.19\text{ km}^2$ ,水土流失面积占自然保护区总面积的37.70%,水土流失使得每年库容淤积泥沙6.47~10.13万吨。意味着人均水资源量下降、物种多样性减少、水土流失未得到控制,对草海湿地状态子系统影响较大<sup>[47]</sup>。

(4) 影响子系统(表5)。在影响子系统方面,2011–2013年属于不安全等级,2014–2016年属于临界安全等级,其临界安全等级的置信度值分别为0.7453、0.7739和0.6422。影响子系统虽然往好的方向发展,但总体态势仍不理想。这主要是因为物质生产低和湿地面积退化率高所致。据统计,近年来草海湿地的鱼类年产量下降幅度较大,从年产量最高值15 000 kg下降到10 000~15 000 kg,年均下降1.52%<sup>[40]</sup>。同时,草海湿地历史上面积最大达到 $46.60\text{ km}^2$ ,现在仅为 $23.25\text{ km}^2$ ,缩减近50%。由此可以看出,草海湿地自然保护区物质生产低,湿地面积退化率高,成为制约草海湿地影响子系统的胁迫因子。

(5) 响应子系统(表5)。在响应子系统方面,2011–2014年属于不安全等级,2015–2016年为临界安全等级。原因主要有物质生活指数低、污水处理率和工业废水排放达标率不高,草海周边农民年均纯收入为952元,远低于全县农民年均纯收入1 745元的水平,草海周边农民迫于生计向草海要“效益”,不合理的捕鱼等现象时有发生;草海污水处理率约为66.70%,其周边城镇生活污水和企业生产污水约1/3未经处理直接排入草海从而污染水体。由此可知,草海湿地自然保护区人们物质生活指数低、污水处理率和工业废水排放达标率不高,对响应子系统的影响较大。

(6) 管理子系统(表5)。在管理子系统方面,2011–2012年为极不安全等级,2013–2015年为不安全等级,2016年为临界安全等级。在2008年草海湿地管理委员会成立之时,管理人员学历职称不高,人员不齐,政策法规实施不到位,环保投资占GDP比重小,使得管理子系统处于极不安全状态,在贵州省生态立省的大背景下,草海湿地环保投资比例从2011年的1.23%增加到2016年的1.67%,政策实施力度加强,管理水平提高,管理子系统等级有所上升,但仍然需要加强。因此,增加环保投资力度,提高环保投资指数,强强政策法规实施力度,是管理子系统需要解决的问题。



## 4 讨论

### (1) 湿地生态安全评价框架模型改进

本研究在 PSR、DSR 和 DPSIR 等模型的基础上,把改进后的 DPSIRM(驱动力-压力-状态-影响-响应-管理)框架模型应用于湿地生态安全评价研究,建立威宁草海高原湿地生态安全评价评价指标体系,从《贵州省水资源公报》《贵州省统计年鉴》《威宁县统计年鉴》《贵州草海湿地生态环境综合治理总体规划》《草海研究》等资料获取相关数据,较清晰地反映了威宁草海湿地生态安全变化状况。但是,由于湿地生态系统本身的复杂性和湿地变化演进的差异性,很难构建统一的评价标准<sup>[48-49]</sup>。由此,本研究结合威宁草海高原湿地的实际,从驱动力、压力、状态、影响、响应和管理六个方面选取 27 个评价指标建立评价模型,并分为安全、较安全、临界安全、不安全和极不安全 5 个安全等级,综合评价结果比较客观地反映了威宁草海高原湿地生态安全变化情况。

### (2) 湿地生态安全变化驱动因素

在 2011 - 2016 年期间,草海湿地生态安全整体呈上升趋势。其中,2011 - 2012 年草海湿地生态安全属于不安全等级的置信度值分别为: 0.7572 和 0.8106; 2013 - 2016 年属于临界安全等级的置信度值分别为: 0.5626、0.5904、0.6684 和 0.7051,目前仅为临界安全等级,说明其生态安全受到影响,驱动因素主要有以下两个方面:

一是自然环境因素。包括年平均气温、年均降水量、人均水资源量、物种多样性、水土流失等。在高原地区,湿地对气候变化更加敏感,气温升高和降水减少的响应比平原湿地更加强烈。气温升高,水分蒸发增强,气温每升高 3℃,需要降水增加 20% 才能补偿因气温升高而对湿地生态安全带来的影响。受全球气候变化影响,草海湿地区域年均降水量不稳定,湿地生态安全受到影响。廖柳文等<sup>[11]</sup>2016 年的研究也表明,在气候变化影响下,湿地水资源数量和质量发生变化,从而影响湿地生态功能和区域生态安全。同时,人均水资源量少、使得入湖水量少,水土流失加剧、湿地面积退化严重、物种多样性下降。为制约草海湿地生态安全的重要因素<sup>[23]</sup>。

二是人文环境因素。包括人口自然增长率、工业污水排放量、生活污水排放量、污水处理率、化肥施用量、农药施用量、政策实施力度,管理水平

等。据统计,2005 - 2016 年,威宁县人口增长 28.41 万人,增长率为 23.59%,人口增加,生活污水和工业污水排放量随之增加,为解决人口增加所需的粮食问题,农业生产所用的化肥施用量、农药施用量增多,对湿地生态安全形成巨大压力。由此可以看出,人口与社会经济等人文因素是影响湿地生态安全的关键驱动因素<sup>[50-51]</sup>。也有学者认为,自然环境因素对湿地生态系统的影响较小<sup>[52]</sup>,而人文环境因素对湿地生态的系统的的影响较大,间接制约着湿地生态系统的安全<sup>[10]</sup>。同时,政策因素也是湿地生态安全变化的重要驱动因素<sup>[53]</sup>。2008 年贵州省毕节市成立草海湿地管理委员会,开展草海综合治理工作,政策实施力度加强,管理水平提高,在“绿水青山就是金山银山”理念的指引下,经过综合治理,草海湿地的生态环境得到改善,湿地生态安全级别提升。

### (3) 湿地生态保护建议

根据威宁草海湿地生态安全的评价结果,提出相应的湿地生态保护建议,具体建议如下:①针对单位工业产值废水排放量、生活污水排放量、污水处理率存在的问题,建立健全生产生活污水、固体废物处理系统,完善污水收集系统,提高污水处理率。同时,建立生活垃圾处理厂,开展农村社区环境整治改善农村社区生活环境质量。②针对化肥施用强度、农药施用强度存在的问题,建议大力发展生态农业,探寻高效、环保的农业发展模式,建立生态农业实验户,农业生产以农家肥为主,肥料施用为辅,降低化肥施用强度。在病虫害防治方面,以生物防治为主,药剂防治为辅,降低农药施用强度,建成污染小,效益高的环保农业发展道路。③针对水土流失率、湿地面积退化率存在的问题,建议建设一定面积的生态林、经济果林和人工草场等,提高区域森林覆盖率,降低水土流失,缓解草海淤积程度,减少湿地面积退化。④针对物种多样性和物质生产存在的问题,建议合理引种,谨慎引种,引种之前,必须以法律为依据,规范引种行为,严格科学论证,方可引种。同时,坚持科学捕捞,禁止乱捕滥捞,倡导捕大留小,并在湿地生物栖息和幼鱼索饵场设置禁鱼期和禁渔区,严格禁止捕杀繁殖群体和集群幼鱼,以稳定物质生产量,保护物种多样性。⑤此外,政府应加大草海湿地的环保投入,加强各方面政策措施综合协调力度,提高管理水平,同时加强宣传力度,在区域内开展

“国际湿地日”和“爱鸟周”等形式多样的宣传活动,充分利用网络、电视、广播、报刊、宣传画册、学校教育等多种形式,提高人们的湿地保护意识,树立尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念,增强政策法规实施力度,有效进行湿地生态环境保护。

## 5 结论

本研究综合考虑高原湿地生态安全的资源、环境、生态、社会、经济等影响因素,以DPSIRM框架模型建立评价指标体系并确定评价等级,采用灰色关联法对各评价指标赋权重值,运用集对分析法建立评价模型,对威宁草海2011—2016年的湿地生态安全进行评价,得到结论如下:

(1) 评价结果表明,2011—2012年草海湿地生态安全为不安全等级,2013—2016年为临界安全等级,虽有明显提高,但前景不容乐观。草海周边人口过多,人均年收入低,农民收入对农业依赖性强,农业生产过程中农药化肥施用量大,工业污水、生活污水排放量多,且污水处理率低,给草海生态安全造成巨大压力;同时,水土流失严重,影响了草海湿地的生态安全。在政策方面,草海湿地生态安全已得到各级政府高度重视,现有政策已起到明显效果,今后应加大草海湿地的环保投入,加强各方面政策措施综合协调力度,提高管理水平,促进草海湿地生态安全向良性方向发展。

(2) 在各评价子系统方面,驱动力子系统为较安全等级,压力、状态、影响、响应和管理子系统均为临界安全等级,影响威宁草海湿地生态安全的重要因素是人口自然增长率、单位工业产值废水排放量、生活污水排放量、化肥施用强度、农药施用强度、人均水资源量、物种多样性、水土流失率、物质生产、湿地面积退化率、污水处理率、物质生活指数、环保投资指数和政策法规实施力度等。在以后草海湿地生态环境建设中,应从以上因素开展工作。

## 参考文献(References):

- [1] Holland M M. Wetlands and environment gradients[M]//Mullamootil G, Warner B G, McBean E A. Wetland environment gradients, boundaries and buffers[J]. CRC Press Inc., 1996: 112—131.
- [2] Keddy P A. Wetland ecology principles and conservation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 12—238.
- [3] Liu Hongyu. Characteristics of wetland resources and ecological safety in China[J]. Resources Science, 2005, 27(3): 54—60.
- [4] Jiang Weiguo, Li Jing, Li Jiahong, et al. Assessment of wetland ecosystem health in the Liaohe River delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 408—415. [蒋卫国, 李京, 李加洪, 等. 辽河三角洲湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 408—415.]
- [5] Liu Yanyan, Wu Dafang, Wang Chaohui. Research review on ecological security assessment of wetland[J]. Geography and Geo-Information Science, 2011, 27(1): 69—75. [刘艳艳, 吴大放, 王朝晖. 湿地生态安全评价研究进展[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(1): 69—75.]
- [6] Yang Jun, Li Xueming, Li Yonghua, et al. Assessment on spatial differences of human settlement environment in communities based on DPSIRM model: the case study of Dalian[J]. Geographical Research, 2012, 11(31): 135—143. [杨俊, 李雪铭, 李永化, 等. 基于DPSIRM模型的社区人居环境安全空间分异——以大连市为例[J]. 地理研究, 2012, 11(31): 135—143.]
- [7] Gao Xingguo, Wang Lei, Qi Daihua, et al. Eco-security evaluation of wetland based on PSR model: taking Dashanbao Wetland as an example[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2013, 36(1): 86—90. [高兴国, 王磊, 齐代华, 等. 基于PSR模型的湿地生态安全评价——以大山包湿地为例[J]. 湖南师范大学学报(自然科学版), 2013, 36(1): 86—90.]
- [8] Kuang Yixuan. Study on ecological security strategy of wetland in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration: perspective of value evaluation of ecosystem services[J]. Journal of Wuling, 2013, 38(3): 15—19. [邝奕轩. 长株潭城市群湿地生态安全保障策略研究——基于生态系统服务价值评价视角[J]. 武陵学刊, 2013, 38(3): 15—19.]
- [9] Du Peijun, Chen Yu, Tan Kun. Monitoring and analyzing wetland landscape pattern change and ecological security using remote sensing images: a case study of Jiangsu coastal wetland[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(1): 158—166. [杜培军, 陈宇, 谭琨. 湿地景观格局与生态安全遥感监测分析——以江苏滨海湿地为例[J]. 国土资源, 2014, 26(1): 158—166.]
- [10] Zhu Weihong, Miao Chengyu, Zheng Xiaojun, et al. Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1379—1390. [朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 等. 基于3S技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1379—1390.]
- [11] Liao Liuwen, Qin Jianxin. Ecological security of wetland in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration[J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(9): 1217—1226. [廖柳文, 秦建新. 环长株潭城市群湿地生态安全研究[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(9): 1217—1226.]
- [12] Hua Dezun, Li Chunyan, Ren Jia. Analysis of ecological security of the urban wetland of Songbei District of Harbin[J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(6): 131—134. [华德尊, 李春艳, 任佳. 哈尔滨松北区城市湿地的生态安全分析[J]. 环境科学研究, 2006, 19(6): 131—134.]
- [13] Yu Rongrong, Xie Wenxia, Zhao Quansheng, et al. Ecological safety assessment of Dagou estuary wetland in Jiaozhou Bay of Shandong Province, East China based on landscape pattern[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11): 2891—2899. [于蓉蓉, 谢文霞, 赵全升, 等. 基于景观格局的胶州湾大沽河口湿地生态安全[J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2891—

2899. ]
- [14] Wang Rongjun, Xie Yuchu, Zhang Ying, et al. Ecological security evaluation of urban wetland in arid China based on PSR model[J]. *Ecological Science*, 2015, 34(3): 133 – 138. [王荣军, 谢余初, 张影, 等. 基于 PSR 模型的旱区城市湿地生态安全评估[J]. *生态科学*, 2015, 34(3): 133 – 138. ]
  - [15] Zou Changxin, Chen Jinlin, Li Haidong. Fuzzy comprehensive assessment of ecological security evaluation in Zoige Wetland [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2012, 36(3): 53 – 58. [邹长新, 陈金林, 李海东. 基于模糊综合评价的若尔盖湿地生态安全评价[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(3): 53 – 58. ]
  - [16] Song Guoli, Zang Shuying, Wang Xueyan, et al. Ecological security assessment of wetland in Yueqing bay based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(5): 24 – 31. [宋国利, 藏淑英, 王雪燕, 等. 基于模糊综合评价法的乐清湾湿地生态安全评价[J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(5): 24 – 31. ]
  - [17] Wang Ying, Zheng Libo, Yu Lizhong, et al. Assessment of wetland ecosystem health in Dongtan, Chongming island based on neural network[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(7): 776 – 78. [王莹, 郑丽波, 俞立中, 等. 基于神经网络模型的崇明东滩湿地生态系统健康评估[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(7): 776 – 78. ]
  - [18] Xue Liang, Feng Chao, Wu Zhonghong, et al. The application of neural network BP to healthy assessment of wetland ecosystem in Dongting Lake [J]. *Forest Inventory and Planning*, 2009, 34(5): 47 – 49. [薛亮, 冯超, 吴中虹, 等. BP 神经网络在洞庭湖湿地生态系统健康评价中的应用[J]. *林业调查规划*, 2009, 34(5): 47 – 49. ]
  - [19] Xue Liang, Reng Zhiyuan. Assessment of influence of wetland park on urban ecological security based on AHP: a case of Baoliu Wetland Park, Xi'an [J]. *Wetland Science*, 2007, 5(3): 237 – 242. [薛亮, 任志远. 基于层次分析的湿地公园对城市生态安全影响评价研究——以西安灞柳湿地公园为例[J]. *湿地科学*, 2007, 5(3): 237 – 242. ]
  - [20] Wang Bin, Guo Shenghua, Zhang Zhen, et al. Research on the constructing of Huabei region coastal wetland ecosystem health evaluation system [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2012, 28(4): 29 – 32. [王斌, 郭胜华, 张震, 等. 华北地区滨海湿地生态系统健康评价体系构建研究[J]. *中国环境监测*, 2012, 28(4): 29 – 32. ]
  - [21] Lin Yishuang, Liu Qing, Wang Pan, et al. The study on ecosystem health evaluation of freshwater lake wetlands based on rough set theory[J]. *Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science)*, 2019, 43(3): 320 – 330. [林艺双, 刘青, 王盼, 等. 基于粗糙集理论的淡水湖泊湿地生态系统健康评价研究[J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(3): 320 – 330. ]
  - [22] Xia Pinghua, Kong Xiangliang, Yu Lifei. Effects of land-use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Caohai wetland watershed [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(8): 2983 – 2989. [夏品华, 孔祥量, 喻理飞. 草海湿地小流域土地利用与景观格局对氮、磷输出的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(8): 2983 – 2989. ]
  - [23] Xu Ting, Xu Yue, Jiang Bo, et al. Evaluation of the ecosystem services in Caohai Wetland, Guizhou Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(13): 4295 – 4303. [徐婷, 徐跃, 江波, 等. 贵州草海湿地生态系统服务价值评估[J]. *生态学报*, 2015, 35(13): 4295 – 4303. ]
  - [24] Qin Qu, Zhang Meizhu, Yang Hong. Evaluation of eco-environmental quality in Caohai of Weining county based on fuzzy matter-element method[J]. *Water Saving Irrigation*, 2015, 40(2): 54 – 57. [秦趣, 张美竹, 杨洪. 基于模糊物元模型的威宁草海湿地生态环境质量评价[J]. *节水灌溉*, 2015, 40(2): 54 – 57. ]
  - [25] Cao Qi, Chen Xingpeng, Shi Manjiang. Evaluation of water resources security in the urban area and regulating methods based on DPSIR: a case of Zhangye City [J]. *Resources Science*, 2012, 34(8): 1591 – 1599. [曹琦, 陈兴鹏, 师满江. 基于 DPSIR 概念的城市水资源安全评价及调控[J]. *资源科学*, 2012, 34(8): 1591 – 1599. ]
  - [26] Smeets E, Weterings R. Environmental indicators: typology and overview [M]. Copenhagen: Technical Report, European Environmental Agency, 1999.
  - [27] Elliott M. The role of the DPSIR approach and conceptual models in marine environmental management: an example for offshore wind power [M]. *Marine Pollution Bulletin* 44, 2002: iii-vii.
  - [28] Cao Qi, Chen Xingpeng, Shi Manjiang. Simulation the model of water resource managing based on system dynamic and DPSIRM model: a case study at Heihe River watershed, Ganzhou district [J]. *Economic Geography*, 2013, 33(3): 36 – 41. [曹琦, 陈兴鹏, 师满江. 基于 SD 和 DPSIRM 模型的水资源管理模拟模型——以黑河流域甘州区为例[J]. *经济地理*, 2013, 33(3): 36 – 41. ]
  - [29] Li Yuzhao, Liu Yong, Yan Xiaopin. A DPSIR-based indicator system for ecological security assessment at the basin scale [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(6): 971 – 981. [李玉照, 刘永, 颜小品. 基于 DPSIR 模型的流域生态安全评价指标体系研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(6): 971 – 981. ]
  - [30] Li Jintao, Tan Shukui, Wang Wenxiong. Empirical study of spatial-temporal differences of urban land use intensity based on DPSIR Model: a case of Hubei Province [J]. *China Land Science*, 2009, 23(3): 49 – 54. [李进涛, 谭术魁, 汪文雄. 基于 DPSIR 模型的城市土地集约利用时空差异的实证研究——以湖北省为例[J]. *中国土地科学*, 2009, 23(3): 49 – 54. ]
  - [31] Zhu Qian, Tang Zhengzheng, Liu Xuemin, et al. Evaluation of low-carbon city development based on DPSIR model: a case study of Jiyuan City [J]. *Urban Problem*, 2012, 31(12): 42 – 47. [朱婧, 汤争争, 刘学敏, 等. 基于 DPSIR 模型的低碳城市发展评价——以济源市为例[J]. *城市问题*, 2012, 31(12): 42 – 47. ]
  - [32] Zhou Zhengda, Wang Chenxing, Fu Xiao, et al. Evaluation index system on ecological effect of national large-scale coal fired power base based on the DPSIR conceptual model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11): 2830 – 2836. [周政达, 王辰星, 付晓, 等. 基于 DPSIR 模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系[J]. *生态学报*, 2014, 34(11): 2830 – 2836. ]
  - [33] Yu Bohua, Lü Changhe. Application of DPSIR Framework for analyses of sustainable agricultural development [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2004, 14(5): 68 – 72. [于伯华, 吕昌河. 基于 DPSIR 概念模型的农业可持续发展宏观分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2004, 14(5): 68 – 72. ]
  - [34] Zhang Feng, Yang Jun, Xi Jianchao, et al. Ecosystem health assessment of Nansihu Lake based on DPSIRM and health distance model [J]. *Resources Science*, 2014, 36(4): 831 – 839. [张峰, 杨俊, 席建超, 等. 基于 DPSIRM 健康距离法的南四湖湖泊生态系统健康评价[J]. *资源科学*, 2014, 36(4): 831



- 839. ]
- [35] Zhang Fengtai, Wang Lachun, Su Weici. The safety evaluation of water resources based on DPSIRM conceptual framework in karst region[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 3511 - 3520. [张凤太, 王腊春, 苏维词. 基于DPSIRM概念框架模型的岩溶区水资源安全评价[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(11): 3511 - 3520. ]
- [36] Yang Shimin, Li Yuwen, Lü Yuzhe. The assessment index system of Zhalong Wetland eco-security[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(5): 127 - 132. [杨时民, 李玉文, 吕玉哲. 扎龙湿地生态安全评价指标体系研究[J]. *林业科学*, 2006, 42(5): 127 - 132. ]
- [37] Jin Xiangchan, Wang Shengrui, Xi Haiyan. Lake ecological security and assessment methodology framework[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(4): 357 - 362. [金相灿, 王圣瑞, 席海燕. 湖泊生态安全及其评估方法框架[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(4): 357 - 362. ]
- [38] Wu Jinhong, Yang Han, Yang Fangshe, et al. Assessment of wetland ecosystem health in Irtysh River[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(6): 149 - 154. [吴金鸿, 杨涵, 杨方社, 等. 额尔齐斯河流域湿地生态系统健康评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(6): 149 - 154. ]
- [39] Zhu Shuang, Lin Liyang, Wu Yan, et al. Application of the matter-element extension method to the ecosystem health assessment of the wetland: a case study on Hengshui Lake wetland national natural reserve[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(1): 348 - 353. [朱爽, 林黎阳, 吴衍, 等. 基于物元可拓法的湿生生态系统健康评价——以衡水湖国家湿地自然保护区为例[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(1): 348 - 353. ]
- [40] Peng Yishu, Fu Pei, Yang Ruidong. Assessment of wetland ecosystem health in the Caohai lake of Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 2014, 42(1): 68 - 81. [彭益书, 付培, 杨瑞东. 草海湿地生态系统健康评价[J]. *地球与环境*, 2014, 42(1): 68 - 81. ]
- [41] Zhang Fengtai, Su Weici, Zhou Jixia. Assessment of urban ecological security based on entropy-weighted gray correlation analysis[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7): 1249 - 1254. [张凤太, 苏维词, 周继霞. 基熵权灰色关联分析的城市生态安全评价[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1249 - 1254. ]
- [42] Zhao Keqin. An Applications of the scheme-appraisal decision matrix based on set pair analysis[J]. *Systems Engineering*, 1994, 12(4): 67 - 72. [赵克勤. 基于集对分析的方案评价决策矩阵与应用[J]. *系统工程*, 1994, 12(4): 67 - 72. ]
- [43] Wang Wensheng, Li Yueqing, Jin Juliang, et al. Analysis of hydrology and water resources collection[M]. Beijing: Science Press, 2010. [王文圣, 李跃清, 金菊良, 等. 水文水资源集对分析[M]. 北京: 科学出版社, 2010. ]
- [44] Qin Qu, Cui Xiaoping, Dai Wen. Study on the ecological security of urban artificial wetland park based on set pair analysis[J]. *Journal of Hydroecology*, 2014, 35(3): 42 - 47. [秦趣, 崔小平, 代稳. 基于集对分析的城市人工湿地公园生态安全研究[J]. *水生态学杂志*, 2014, 35(3): 42 - 47. ]
- [45] Zhang Huahai, Li Mingjing, Yao Songlin. Caohai Lake research[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2007. [张华海, 李明晶, 姚松林. 草海研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2007. ]
- [46] Zhang Zhenming, Lin Shaoxia, Zhang Qinghai, et al. The distribution characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus under different land use patents in Caohai Plateau Wetland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6): 199 - 204. [张珍明, 林绍霞, 张清海, 等. 不同土地利用方式下草海高原湿地土壤碳、氮、磷分布特征[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 199 - 204. ]
- [47] Qin Qu, Chen Zhongquan, Yao Shimei. Ecological safety evaluation of Caohai Lake Wetland in Weining[J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(2): 27 - 33. [秦趣, 陈忠全, 姚世美. 贵州威宁草海湿地生态安全评价[J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(2): 27 - 33. ]
- [48] Song Yuqin, Cao Minglan. Landscape ecological security assessment of Beijing City based on RS and GIS[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2889 - 2895. [宋豫秦, 曹明兰. 基于RS和GIS的北京市景观生态安全评价[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2889 - 2895. ]
- [49] Lei Jinrui, Chen Zongzhu, Chen Yiqing, et al. Dynamic analysis of wetland landscape ecological security pattern of Hainan Island in 1990 - 2018[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(2): 293 - 302. [雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 等. 1990 - 2018年海南岛湿地景观生态安全格局演变[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 293 - 302. ]
- [50] Li Yue, Yuan Ruoyu, Liu Yang, et al. Ecological security evaluation of wetlands in Qingdao: based on the comprehensive weighting method[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(3): 847 - 855. [李悦, 袁若愚, 刘洋, 等. 基于综合权重法的青岛市湿地生态安全评价[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(3): 847 - 855. ]
- [51] Chen Kunlun, Qi Man, Wang Xu, et al. Study of urban lake landscape ecological security pattern evolution in Wuhan, 1995 - 2015[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5): 1725 - 1734. [陈昆仑, 齐漫, 王旭. 1995 - 2015年武汉城市湖泊景观生态安全格局演化[J]. *生态学报*, 2019, 39(5): 1725 - 1734. ]
- [52] Wang Quanquan, Wang Hang, Zhang Weiguo, et al. The correlations between wetland landscape and social-natural factors on Northwestern Yunnan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 726 - 738. [王泉泉, 王行, 张卫国. 滇西北高原湿地景观变化与人为、自然因子的相关性[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 726 - 738. ]
- [53] Shi Hui, Yang Zhaoping, Han Fang, et al. Characteristics of temporal-spatial differences in landscape ecological security and the driving mechanism in Tianchi scenic zone of Xinjiang[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(3): 475 - 485. [时卉, 杨兆萍, 韩芳, 等. 新疆天池景区生态安全度时空分异特征与驱动机制[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(3): 475 - 485. ]



## The ecological safety evaluation of plateau wetland based on DPSIRM framework model

QIN Qu<sup>1</sup>, LIANG Zhenmin<sup>2</sup>, LIU Anle<sup>1</sup>, ZHAO Zengyou<sup>1</sup>

(1. College of Tourism and Historical Culture, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, Guizhou, China; 2. School of Tourism and Event Management, Shanghai University of International Business and Economics, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** The resource, environment, ecology, society, economy etc. , which are the factors influence the plateau wetland ecological security, had been comprehensively considered; the driving force - pressure - state - impact - response - management (DPSIRM) evaluation index system of plateau wetland ecological security had been established with a framework model, the gray correlation method had been utilized to assign weight to each evaluation index, and an evaluation model had been built with set pair analysis method to evaluate and research the wetland ecological security of Caohai in Weining Town from 2011 to 2016. The results reviewed the natural population growth rate, waste water discharge of per unit industrial output value, domestic sewage discharge, fertilizer application intensity, pesticide application intensity, per capita water resources, species diversity, water and soil loss rate, material production, wetland area degradation rate, sewage treatment rate, material life index, environmental protection investment index, and policy and law enforcement are the main factors affecting the ecological security of the wetlands in Caohai of Weining Town. Ecological security of Caohai wetland had been gradually improved. From 2011 to 2012, the ecological security of Caohai wetland had been belonged to the unsafe level, and from 2013 to 2016, had been belonged to the critical safety level. From the situation of each subsystem, the driving force subsystems were relatively safe, the pressure, state, impact, response and management subsystem were in critical safety level. This study will be useful for the ecological security and environmental construction of Caohai wetland in Weining Town.

**Key words:** DPSIRM framework model; gray correlation analysis; set pair analysis; wetland ecological safety; Caohai of Weining Town

(责任编辑: 王根绪; 编辑: 周成林)