

DOI: 10.20103/j.stxb.202211023129

祁兰兰, 王敏, 王卿, 吴建强, 张小乐, 卢蒙, 徐锐, 黄晶心. 基于 SDR 模型的抚仙湖流域生态安全空间分异特征研究. 生态学报, 2023, 43(22): 9527-9538.

Qi L L, Wang M, Wang Q, Wu J Q, Zhang X L, Lu M, Xu R, Huang J X. Spatial differentiation characteristics of ecological security in Fuxian Lake basin based on SDR model. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9527-9538.

# 基于 SDR 模型的抚仙湖流域生态安全空间分异特征研究

祁兰兰<sup>1,3</sup>, 王敏<sup>2</sup>, 王卿<sup>2</sup>, 吴建强<sup>2</sup>, 张小乐<sup>4</sup>, 卢蒙<sup>3</sup>, 徐锐<sup>1</sup>, 黄晶心<sup>1,\*</sup>

1 云南师范大学能源与环境科学学院, 昆明 650500

2 上海市环境科学研究院, 上海 200233

3 云南大学生态与环境学院, 昆明 650500

4 云南开放大学基础教育学部, 昆明 650599

**摘要:** 抚仙湖流域作为我国重要的战略水资源储备区, 生态安全地位重要。本研究以该流域为研究对象, 采用“状态-隐患-响应”模型, 探索性空间分析法, 基于格网尺度分析其 1987—2020 年生态安全空间分异特征。结果表明: (1) 抚仙湖流域生态安全空间差异性明显, 生态安全状况以中度安全(Ⅳ级)与高安全(Ⅴ级)状态为主, 主要分布于流域四周, 生态不安全(Ⅰ级)、较不安全(Ⅱ级)、临界安全(Ⅲ级)成片地集中于流域南北岸及东岸中部的人口农业密集区。(2) 研究区生态安全空间集聚效应明显, 全局空间自相关系数较高, 且逐期上升, 集聚效应增强, 并以高高(HH), 低低(LL)集聚为主, HH 区域集中于流域西北, 东南, 西岸中部片区, LL 区域分布于流域北岸人口密集区及南岸的农业地带。(3) 研究区生态安全在不同土地利用类型、坡度、人口密度上空间分异规律明显, 生态不安全(Ⅰ级)在建设用地分布居多, 生态较不安全(Ⅱ级)和生态临界安全(Ⅲ级)以耕地分布为主, 生态中度安全(Ⅳ)和高安全(Ⅴ级)主要分布在林地。生态安全分别与坡度、人口密度存在明显的分异特征, 坡度增加, 生态安全水平高, 人口密度变大, 生态安全质量越低。

**关键词:** 生态安全评价; 格网尺度; SDR 模型; 抚仙湖流域; 空间分异

## Spatial differentiation characteristics of ecological security in Fuxian Lake basin based on SDR model

QI Lanlan<sup>1,3</sup>, WANG Min<sup>2</sup>, WANG Qing<sup>2</sup>, WU Jianqiang<sup>2</sup>, ZHANG Xiaole<sup>4</sup>, LU Meng<sup>3</sup>, XU Rui<sup>1</sup>, HUANG Jingxin<sup>1,\*</sup>

1 School of Energy and Environmental Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

2 Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China

3 College of Ecology and Environment, Yunnan University, Kunming 650500, China

4 Basic Education Department of Yunnan Open University, Kunming 650599, China

**Abstract:** As an importantly strategic water resource reserve area in China, Fuxian Lake basin plays an important role in ecological security. This study takes the watershed as the research object, adopts the State-Hidden-Response(SDR) model, exploratory spatial analysis method, and analyzes the spatial differentiation characteristics of ecological security from 1987 to 2020 based on grid scale. The results indicate that: (1) Spatial difference of ecological security in Fuxian Lake basin is obvious. The ecological security status is mainly moderate security (Grade IV) and high security (Grade V), which are

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31800443); 云南省应用基础研究重点项目(202201AS070020, 202201AU070061); 云南省应用基础研究面上项目(202201AT070159)

**收稿日期:** 2022-11-02; **采用日期:** 2023-03-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huangjingxin17@163.com

mainly distributed around the basin. Ecological insecurity (Grade I), relatively insecurity (Grade II), and critical security (Grade III) are concentrated in the densely populated agricultural areas on the north and south banks of the basin and the middle of the east bank. (2) The spatial agglomeration effect of ecological security in the study area is obvious overall spatial autocorrelation coefficient is high and rises gradually. The agglomeration effect is enhanced, which is mainly high (HH) and low (LL). The HH area is concentrated in the northwest, southeast, and central areas of the west bank of the basin. The LL area is distributed in the densely populated areas on the north bank of the basin and the agricultural areas on the south bank. (3) The spatial differentiation of ecological security in the study area is obvious in different land use types, slopes and population densities. Ecological insecurity (Grade I) is mainly distributed in construction land, ecological insecurity (Grade II) and ecological critical security (Grade III) are mainly distributed in cultivated land, and ecological medium security (IV) and high security (V) are mainly distributed in forest land. Ecological security has obvious differentiation characteristics with slope and population density respectively. With the increase of slope, the level of ecological security is high, the population density is larger, and the quality of ecological security is lower.

**Key Words:** ecological security evaluation; grid scale; SDR model; Fuxian Lake Basin; spatial differentiation

近代以来随着经济快速发展以及工业化城镇化进程的推进,人类活动对自然资源、环境造成了压力,接踵而来的是环境污染、生态系统服务下降、人类社会自然持续发展的平衡状态被打破等问题,因此生态安全仍然是 21 世纪国际社会广泛关注的议题<sup>[1-5]</sup>。生态安全是指人类生活、生产过程中所需的生态资源与环境不受或少受威胁的状态<sup>[6]</sup>,也指生态系统能够保持自身完整稳定性及其维持人类社会可持续发展的状态<sup>[7]</sup>。20 世纪初,生态安全已被多国提升至与国家安全同等地位<sup>[8]</sup>,生态安全的研究已从最初的定性研究向定量研究过渡,多以生态环境脆弱区为研究对象,以空间尺度为核心,从区域深入到城市<sup>[9]</sup>、土壤<sup>[10]</sup>、湿地<sup>[11]</sup>、森林<sup>[12]</sup>、草地<sup>[13]</sup>、水<sup>[14]</sup>等更具体的生态系统,开展生态安全研究工作有利于掌握生态系统动态变化趋势,及时做出相应地举措,维持生态系统服务功能,促进生态系统的可持续发展<sup>[7]</sup>。

生态安全评价是生态安全研究的核心与关键,并且生态安全评价指标体系的构建对研究结果非常重要<sup>[15]</sup>,而目前并没有统一的构建标准,现有文献基于“PSR(压力-状态-响应)<sup>[16]</sup>”、“DPSIR(驱动力-压力-状态-影响-响应)<sup>[17]</sup>”、“DPSIRM(驱动力-压力-状态-影响-响应-管理)<sup>[18]</sup>”等评价模型针对不同的区域对象开展生态安全评价的研究较多,且以 PSR 模型应用最为广泛,而王耕等<sup>[19]</sup>认为该模型对生态安全演变机理与空间差异研究不足,危害生态安全的因素是具有跨空间边界传递要素的各种隐患,基于自然与人类活动的隐患因素的作用过程是解析区域生态安全机理的基础,从而提出“SDR(状态-隐患-响应)模型”阐述其机理,基于此理论认定流域生态安全的空间性,表征生态安全空间免受人与自然综合互动下产生的隐患的威胁状态<sup>[20]</sup>。隐患层中囊括了大气、水、生物等多个方面,极其适合湖泊流域生态系统生态安全研究。

湖泊流域是集自然资源、社会经济、水资源于一体的复合生态系统,其生态安全对于提升湖泊水质、维持流域面积稳定、改善入湖湿地环境具有重要意义。湖泊流域生态安全受到自然基底,气候变化、土地利用等隐患因素影响产生空间异质性,并在自然与人为的共同作用下,处于一个动态变化的过程<sup>[21]</sup>。因此研究湖泊流域生态安全的动态变化,探索其空间分异特征具有一定的科学实践意义。抚仙湖作为典型的高原深水贫营养湖泊,是珠江源头第一大湖,是我国重要的战略水资源储备区,具有极其重要的生态战略地位,随着流域城镇化水平提高与社会经济发展加速,流域内水土流失与土地退化、水污染压力加剧、库塘湿地生态系统遭受迫害,水资源生态安全问题、能源生态安全问题等制约着抚仙湖流域生态系统可持续发展<sup>[22-24]</sup>。目前抚仙湖流域生态安全研究集中于生态风险评价<sup>[25-26]</sup>,土地生态安全压力、状态、响应系统间的耦合分析<sup>[27]</sup>。缺乏生态安全空间分异特征分析,尤其是整体生态安全格局与土地利用类型、坡度、人口密度因子的分异规律。

基于上述,本研究以抚仙湖流域为研究对象,采用 SDR 模型从格网尺度对抚仙湖流域进行生态安全评价,研究各生态等级与人文及自然因子的空间分异规律,探寻抚仙湖流域生态系统特征与变化机制,揭示生态

安全空间分异特征规律,为抚仙湖流域生态安全和发展规划提供科学依据。

### 1 研究区概况与数据来源

#### 1.1 研究区概况

抚仙湖流域地处滇中腹地,位于云南省玉溪市境内,北纬 24°21'28"—24°38'00",东经 102°49'12"—102°57'26"之间,截至 2019 年底,流域涵盖澄江县(凤麓街道、龙街街道、九村街道、右所镇、海口镇)、江川区(路居镇、江城镇)、华宁县(青龙镇)3 县 8 个乡镇(图 1)。总面积达 675.27km<sup>2</sup>。流域内抚仙湖水域面积占比较大,为珠江源头湖泊,平均水深 95.3m,通过隔河与星云湖相连,是云南省九大高原湖泊唯一常年保持 I 类水质的湖泊。流域四周群山环绕,中部为湖泊,呈四周高、中间洼的地势形态。此外,流域位于北回归线附近,地处亚热带季风气候区,属于中亚热带湿润高原季风气候。四季温差小,干(11—次年 4 月)湿(5—10 月)季分明的特征显著。流域内得天独厚的自然条件促使其开发较早,经济发展迅速,2019 年,流域内 3 县的地区国内生产总值达到 388.73 亿元。

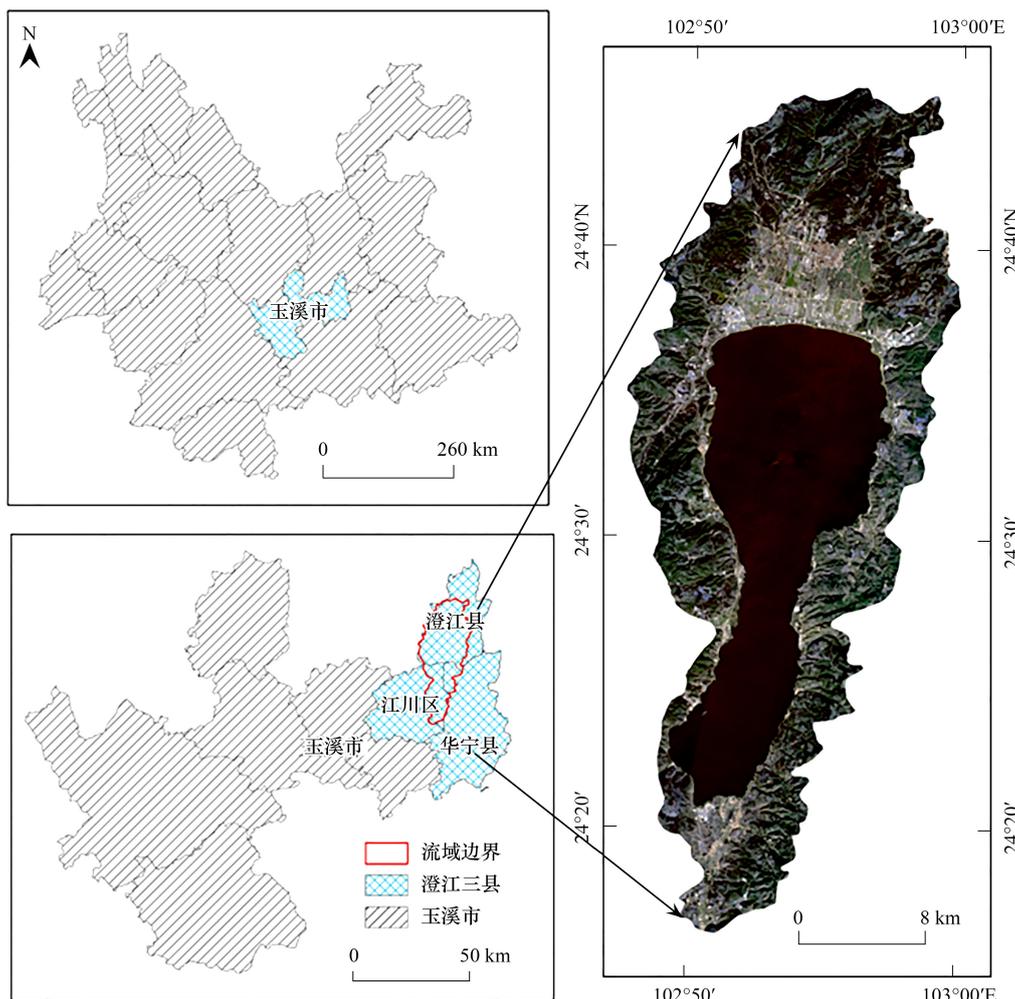


图 1 抚仙湖流域位置示意图

Fig.1 Location of Fuxian Lake Basin

#### 1.2 数据源

本研究中主要用到遥感影像数据(表 1)、DEM 数据(来源于地理空间数据云,空间分辨率为 30m)、气象数据(来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>))的 1901—2020 年中国 1km 分辨率逐

月平均气温数据集、1901—2020 年中国 1km 分辨率逐月降水量数据集)、社会统计数据(来源于澄江、江川、华宁三县统计局的统计年鉴,以乡镇级别为统计单元,具体年份为 1987,2000,2009,2020 年)、土地利用数据。影像数据为 1987、2000、2009 年的 Landsat 卫星系列数据,来源于 USGS(<https://glovis.usgs.gov/>),2020 年的 GF-2 号遥感影像申请于高分辨率对地观测系统云南数据与应用中心;研究中 1987、2000、2009 年的土地覆被结果数据为云南师范大学地理学部承担的国家测绘地理信息局地理国情监测示范项目“抚仙湖流域生态环境动态监测”(测国土函[2014]35 号)成果。土地利用分类体系参照《GDPJ01—2014》确定。2020 年的土地利用数据基于 GF-2 号遥感影像,参考 2014 年的土地利用结果数据目视解译完善所得。

表 1 研究区遥感数据

Table 1 Remote sensing data in the study area

轨道号/产品序列号(GF-2) Track number/Product serial number (GF-2)	获取时间 Get time	卫星 Satellite	分辨率 Resolving power
129/043	1987-02-08	Landsat5 TM	30m
	2000-01-11		
	2009-02-04		
129/043	2020-01-18	Landsat8 OLI	
2728719	2017-10-31	GF-2 PMS1	多光谱(4m)
2728720			全色(1m)
2728721			
2728446		GF-2 PMS2	
2728433			
2728431			
5307893	2020-12-13	GF-2 PMS1	
5307897			
5307899			
5307732	2020-12-13	GF-2 PMS2	
5307737			
5307739			

## 2 研究方法

### 2.1 基于 SDR 框架模型建立评价指标体系

指标体系是生态安全内涵的具体化与成效的度量<sup>[28]</sup>,SDR 框架模型的优势在于可以更好地进行生态安全空间动态分析及其空间差异性的比较<sup>[19]</sup>。本研究在考虑抚仙湖面积约占总流域的 32.5%,流域水生态安全对流域生态安全至关重要的基础上,结合近年流域的生态环境压力及其潜在的生态安全隐患,遵循科学性、代表性、可获取性、可行性、整体性、区域性的指标选取原则构建研究区生态安全评价指标体系。SDR 模型构建的指标体系主要包含 3 个准则层(状态、隐患、响应)共 16 个要素指标,并标注了指标的性质(表 2)其中状态指标主要反映人类消耗自然资源及破坏生态环境后的人文及生态环境状况,隐患指标通常指在人为干扰的生态系统状态下,极易引发生态安全问题的潜在因子,响应指标即人类通过相应地优化政策及补救措施对生态环境做出的反馈。在遴选指标过程中,将水土流失、洪涝、水质等水生态直接关联指标间接地隐含于其他指标之中,因为长时序地抚仙湖流域站点水质数据属于保密数据,此外乡镇级别的诸如水土流失等此类数据,可获取性低,抚仙湖属于高原断陷湖泊,特殊的地质构造导致其汇水面积小,无外流补水,洪涝的可能性较小,因此通过土壤侵蚀模数描述其水土流失的强度,通过人口密度,人均耕地面积指标能间接地折射出污水排放量,农业面源污染等信息,间接地反映水质。其次采用 SPSS 软件分析了 33 年间 16 项指标因子的相关性,结果表明,在同一准则层内,除了隐患准则层中 D6(景观多样性指数)与 D7(生态系统弹性度)的相关性较高,其余

各评价指标的相关性均小于 0.9,从客观的角度考虑区域的景观多样性程度与生态系统弹性能力确实是潜在地影响区域生态安全的因素,故本文并未剔除(表 2)。

表 2 抚仙湖流域生态安全评价指标体系

Table 2 Ecological security assessment indicators in Fuxian Lake Basin

目标层 Target level	准则层 Criterion level	指标层 Indicator level	指标趋向 Indicator trend	均方差赋权法 Mean square deviation weighting method	层次分析法 Analytic hierarchy process	组合赋权法 Combined weighting method
区域生态安全评价 Regional ecological security assessment	区域环境状态 指标(S)	人口密度 S1	-	0.0217	0.0411	0.0314
		人为干扰指数 S2	-	0.0769	0.0867	0.0818
		人均耕地面积 S3	+	0.0580	0.0300	0.0440
		森林覆盖率 S4	+	0.1179	0.1006	0.1092
		土壤侵蚀模数 S5	-	0.0031	0.1273	0.0652
	区域环境隐患 指标(D)	坡度 D1	-	0.0459	0.0300	0.0380
		地形起伏度 D2	-	0.0276	0.0399	0.0337
		年平均气温 D3	-	0.0595	0.0188	0.0392
		多年平均降水量 D4	+	0.0631	0.0261	0.0446
		植被覆盖度 D5	+	0.0428	0.0911	0.0669
		景观多样性指数 D6	+	0.0641	0.0528	0.0585
		生态系统弹性度 D7	+	0.0693	0.0676	0.0684
	区域环境响应 指标(R)	农民人均纯收入 R1	+	0.0599	0.0408	0.0503
		粮食单产 R2	+	0.0893	0.0273	0.0583
		生物丰度指数 R3	+	0.0842	0.1355	0.1099
		区域开发指数 R4	-	0.1168	0.0844	0.1006

## 2.2 评价指标计算格网化表达

现有文献<sup>[29-30]</sup>基于格网尺度进行生态安全评价能够打破常规地以行政区划作为评价单元的桎梏,便于统计数据与其余栅格数据源之间的数据转化及分析,能够使得研究结果进行空间可视化,使研究尺度细化至每一个格网,定量分析其空间差异特征。鉴于本研究区较小,因此选择 30m×30m 格网作为评价单元。人口密度、人均耕地面积、粮食单产指标的格网化表达与土地覆被类型密切联系,如人口多分布于建设用地,基于此原理,获取行政界线的人口统计数据,将其赋值于单个格网建设用地,进行空间化;依此类推,坡度,气温等栅格数据直接格网化;农民人均纯收入等统计指标通过权重插值进行格网化。

## 2.3 评价指标权重确定

通过参考相关文献<sup>[31-32]</sup>,本研究采用组合赋权法即主客观赋权重方法结合的方法,即均方差决策法与层次分析法计算指标权重,最后通过线性加权法计算组合权重(表 2),具体公式如下:

$$w = \sum_{k=1}^q a_k w_k \quad (1)$$

式中,  $a_k$  为第  $k$  种赋权方法的加权参数,  $w_k$  为组合权重向量。

## 2.4 综合指数计算及等级划分

基于指标标准化后的数据,采用综合指数法计算抚仙湖流域生态安全值,具体计算公式如下:

$$ESI = \sum_{i=1}^n X_i \times W_i \quad (2)$$

式中,ESI 为生态安全值,值域为[0,1],值越大,生态安全状况越好; $X_i$ 为标准化处理之后的指标因子数据; $W_i$ 为各指标的权重值。

本研究根据抚仙湖流域的实际情况,结合研究区的生态安全值,同时参考相关文献<sup>[33]</sup>,将生态安全指数

划分为 5 个等级(表 3)。

表 3 抚仙湖流域生态安全等级分级标准

Table 3 Ecological security classification standard in Fuxian Lake Basin

生态安全指数 Ecological security index	安全等级 Grade	生态状态 Ecological state	生态安全特征 Ecological security characteristics
$\leq 0.45$	I	不安全	生态环境受到人为干扰较大,生态功能退化,生态系统极其脆弱。
(0.45,0.50]	II	较不安全	生态系统结构遭受较大的破坏,恢复系统服务功能较为困难。
(0.50,0.55]	III	临界安全	该状态下,仍具有一定的生态系统服务功能,但是生态环境状态较不稳定,一旦受到外界干扰,将会加剧生态环境的压力。
(0.55,0.60)	IV	中度安全	当前状态下,生态环境抗干扰能力增强可自行恢复,生态系统功能良好,生态环境问题不显著。
$\geq 0.6$	V	高安全	生态系统结构和服务价值较为完善,受外界干扰较小,生态环境状态稳定。

## 2.5 空间自相关分析

地理学第一定律指出,任何事物都是与其他事物相关的,关系紧密度随地理距离的缩减而增强。空间自相关系数能够定量地描述事物在空间上的依赖关系,常见的测度方法即 Moran's *I* 指数分析,全局 Moran's *I* 指数能整体上判读其事物是否具有存在集聚,局部 Moran's *I* 指数能从空间分布角度分析其集聚特征。本研究采用全局自相关与局部自相关指标度量生态安全水平的空间模式。两种指标的具体表达形式见相关文献<sup>[8]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 抚仙湖流域生态安全空间特征

根据上述生态安全等级划分标准将抚仙湖流域生态安全划分为 5 级,发现抚仙湖流域 1987—2020 年生态安全存在明显的空间分异性,空间格局大致成中间低,四周高的分布态势,以中度安全,高安全等级为主,共计占流域陆地面积的 65%以上(图 2),表明该流域生态系统处于相对安全状态,该两类等级区域均匀地分布于流域四周,以流域北岸外边界及东南角处分布最为广泛。不安全(I 级)、较不安全(II 级)、临界安全(III 级)区域以片状形式围绕北岸的龙街街道、凤麓街道、右所镇、南岸路居镇、东岸的海口镇的环湖周边的湖滨

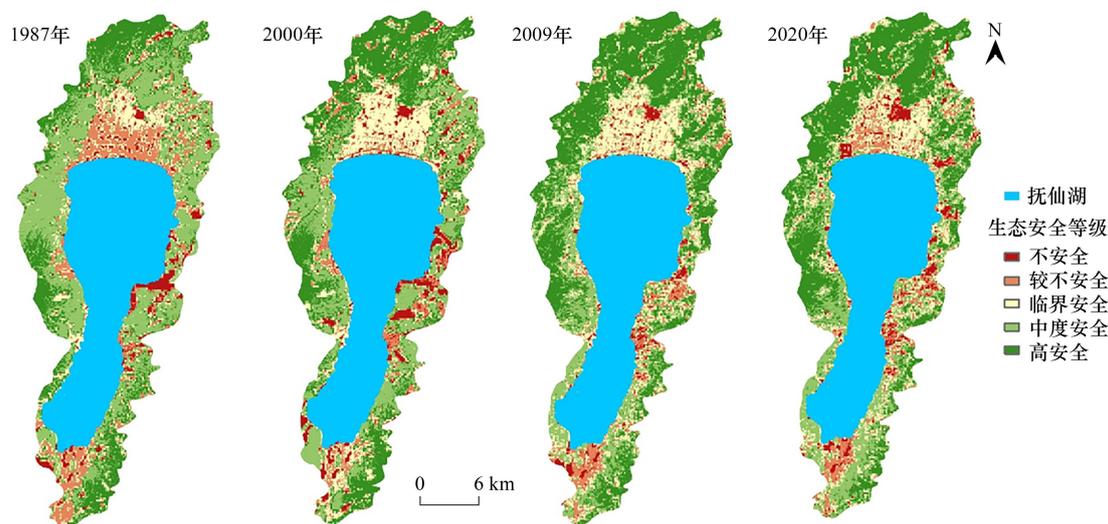


图 2 1987—2020 年抚仙湖流域生态安全等级分布

Fig.2 Distribution of ecological security levels in Fuxian Lake Basin from 1987 to 2020

区连续蔓延。

### 3.2 抚仙湖流域生态安全空间集聚特征

为了明晰抚仙湖流域生态安全在空间上的集聚性,采用空间计量 GeoDa 软件分别对流域 1987—2020 年的生态安全值进行空间自相关分析,通过全局 Moran's  $I$  指数测度得出 Moran 散点图(图 3),Moran 散点图的一三象限分别为高值,低值聚集区,在空间上凸显集聚性,称为“热点”区域;二四象限表明其邻近区域生态安全值分别高于或低于其生态安全水平,离散型明显,称为“冷点”区域<sup>[34]</sup>。抚仙湖流域 4 期的 Moran 散点图均聚焦于一三象限,且 Moran's  $I$  指数值均大于 0.72,且呈逐期上升的趋势,另参数检验  $P$  值均为 0.00,通过了 99% 的显著性校验,表明抚仙湖流域生态安全等级表现出高度空间正相关,空间集聚性增强。

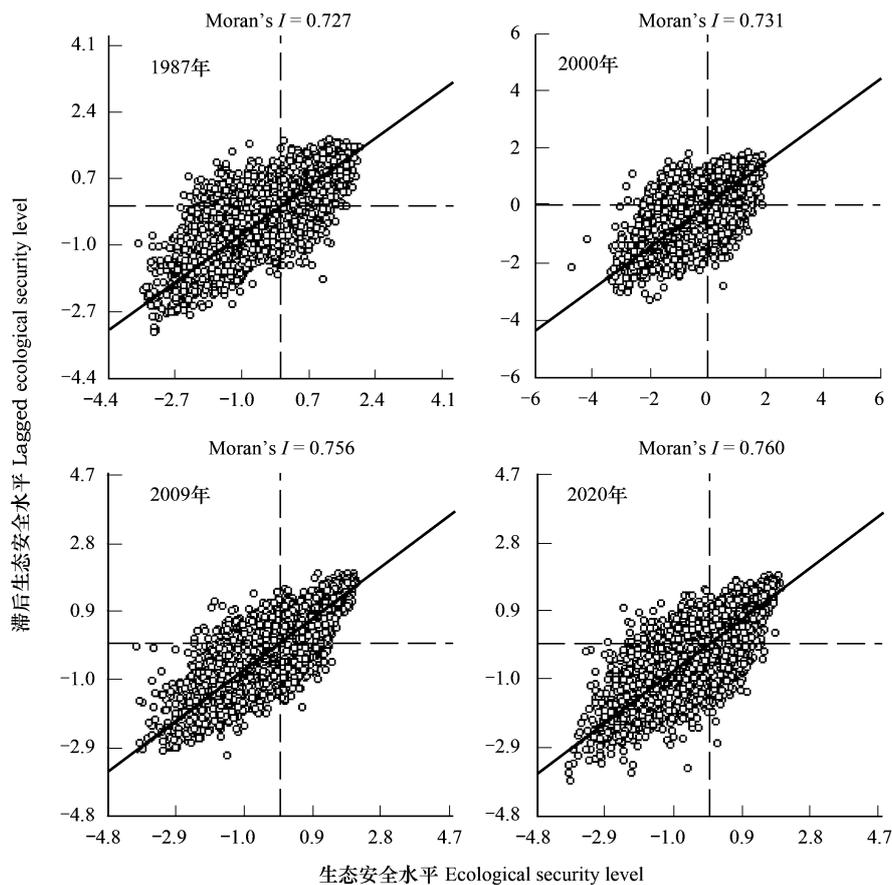


图 3 1987—2020 年抚仙湖流域生态安全 Moran 散点图

Fig.3 Moran scatter plot of ecological security in Fuxian Lake Basin from 1987 to 2020

全局 Moran's  $I$  指数无法全面的展示出生态安全的空间分布状况,需要局部 Moran's  $I$  指数分析进一步探讨生态安全的空间集聚特征,在空间上表征为高高(HH)、低低(LL)、高低(HL)、低高(LH)、不显著 5 种类型,以 LISA 聚类图呈现(图 4)。抚仙湖流域 1987—2020 年生态安全在空间上呈现明显的集聚特征,以高高集聚与低低集聚为主。高高集聚区多分布于流域的西北角,东南角及西岸的中部区域,以龙街街道、青龙镇、路居镇最为集中,从地形地貌角度来看,该片区坡度及地形起伏度较大,以山地地貌为主,森林覆盖率较高,生境质量较好。低低集聚区主要分布于湖泊水体南北两岸及东岸的中部区域,包括风麓街道、右所镇、海口镇等,主要由于湖滨带南北两岸人口密度较高,农业比重大,在人为干扰下,区域开发强烈,导致生态安全水平较低。

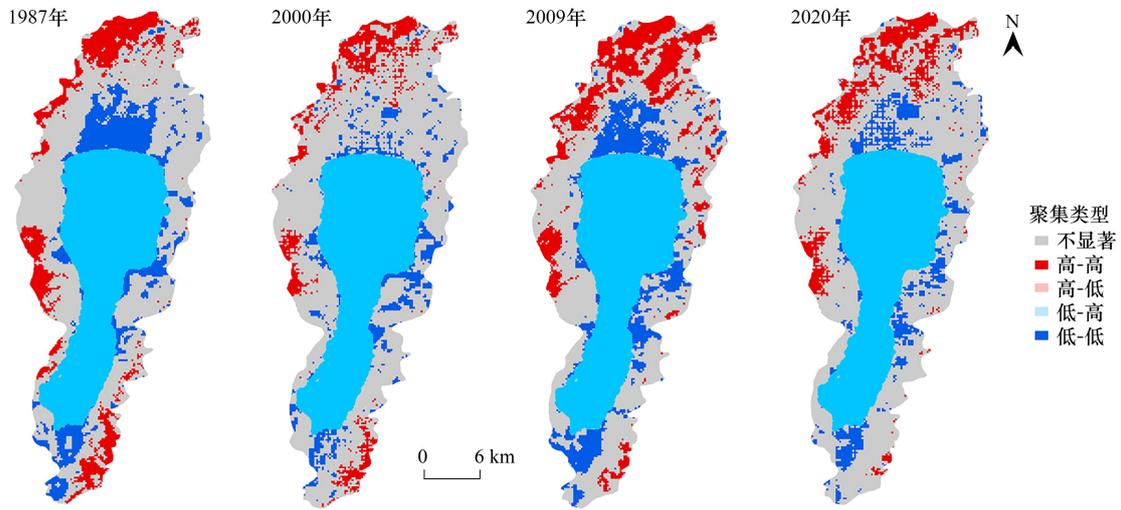


图 4 1987—2020 年抚仙湖流域生态安全 LISA 聚类图

Fig.4 LISA cluster map of ecological security in Fuxian Lake Basin from 1987 to 2020

### 3.3 抚仙湖流域生态安全空间分异规律

#### 3.3.1 不同土地利用上生态安全分异规律

通过分析 1987—2020 年抚仙湖流域土地利用与生态安全等级的相关关系(图 5)可知,五类生态安全等级在不同年份,不同土地利用类型上的分布比例存在差异,但 4 期年份的变化趋势尤其相似。耕地以较不安全与临界安全等级为主,且每一期这两类生态安全等级在耕地类型上的比重均接近乃至超过 60%,2000 年的临界安全等级占比已高达 87.64%。这些耕地主要分布在抚仙湖流域南北两岸的坝区及海口镇及青龙镇的湖体周边,这些区域常年种植大水大肥蔬菜,复种指数非常高,另外南北两岸的径流区存在土壤侵蚀,水土流失现象,导致耕地资源的压力大,不利于生态环境的修复。林地以中度安全和高安全生态等级为主,主要分布在流域四周区域,植被覆盖度高。草地在 1987、2000、2009 年都以不安全等级为主,至 2020 年转变为临界安全

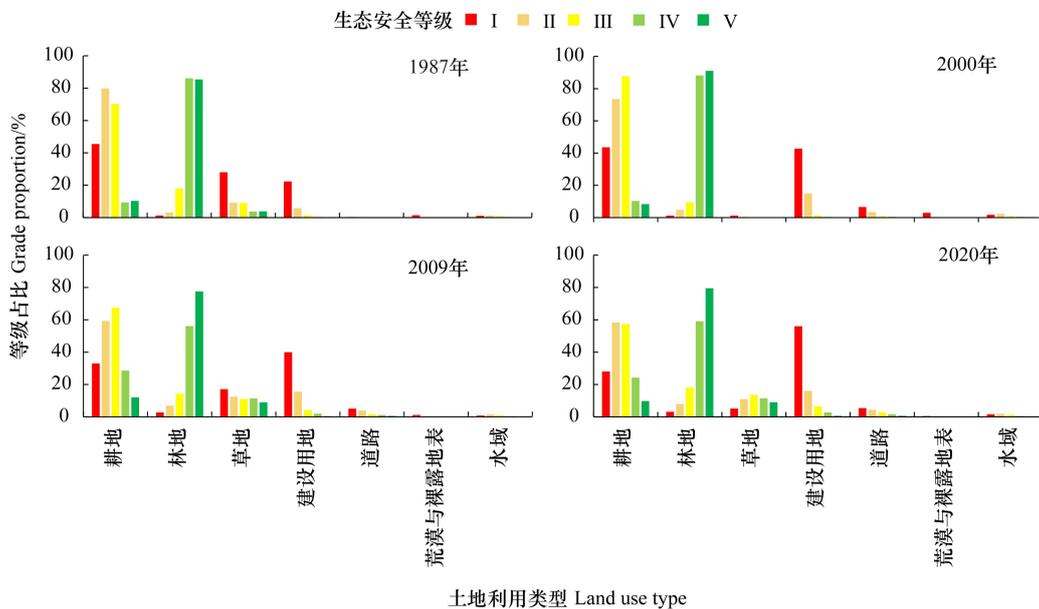


图 5 抚仙湖流域生态安全等级与土地利用相关分析

Fig.5 Correlation analysis between ecological security level and land use in Fuxian Lake Basin

与中度安全等级。草地分布均匀,分布范围与林地类似,高覆盖度草地的生态环境较好,但是受人类活动的影响,中、低覆盖度草地很容易发生草地退化,影响区域的整体生态安全。建设用地以生态 I 级为主,且逐期迅猛增长,由 1987 年的 22.31% 增长至 2020 年的 56.04%,空间格局上以流域的南北两岸为主,主要集中于凤麓街道、龙街街道、右所镇、路居镇 4 个行政单元的建城区区域,这些街道聚集于湖积-冲积平原,开发较早,人口密度大,加剧了生态不安全性。道路、荒漠与裸露地表两种地类上主要分布生态安全等级 I 级, II 级,但是所占比例均小于 7%。水域(指抚仙湖湖区以外的水体)类型上的各等级分布均较小,均小于 3%。

### 3.3.2 不同坡度上生态安全分异规律

按照坡的划分标准进行坡度分级,共分了 6 级,0—5°(平坡)、6—15°(缓坡)、16—25°(斜坡)、26—35°(陡坡)、36—45°(急坡)、>46°(险坡),并统计不同坡度等级下生态安全等级面积占比(图 6),不同坡度等级下生态安全呈现出了明显的分异规律,生态安全 I、II、III 等级集中分布于平坡与缓坡,且随着坡度的增加面积占比逐渐减少,生态安全 IV、V 等级以缓坡与斜坡最为集中,坡度上升,面积占比逐渐增加。生态不安全,较不安全等级主要分布于缓坡,每一期的占比分别均高于 44%, 41%。这一现象主要与平坡与缓坡区域较适宜人类居住,城镇开发活动强烈,人类干扰程度较高,导致生态环境承载压力大有关。生态临界安全等级主要分布于坡度 0—5°, 6—15° 区间,在该坡度等级区域的面积占比之和均超过 67%,形成这一结果主要由于此类坡度主要分布于抚仙湖南北两岸平原,其他零星部分均匀地分布于整个流域且以耕地草地景观为主。生态较安全与高安全等级均分布于坡度大于 6° 的缓坡,斜坡与陡坡区域,陡坡面积占比较高,且二者在坡度 6—35° 区域总的面积占比分别大于 85%, 89%,表明退耕还林的流域治理政策促进了植被的生长。

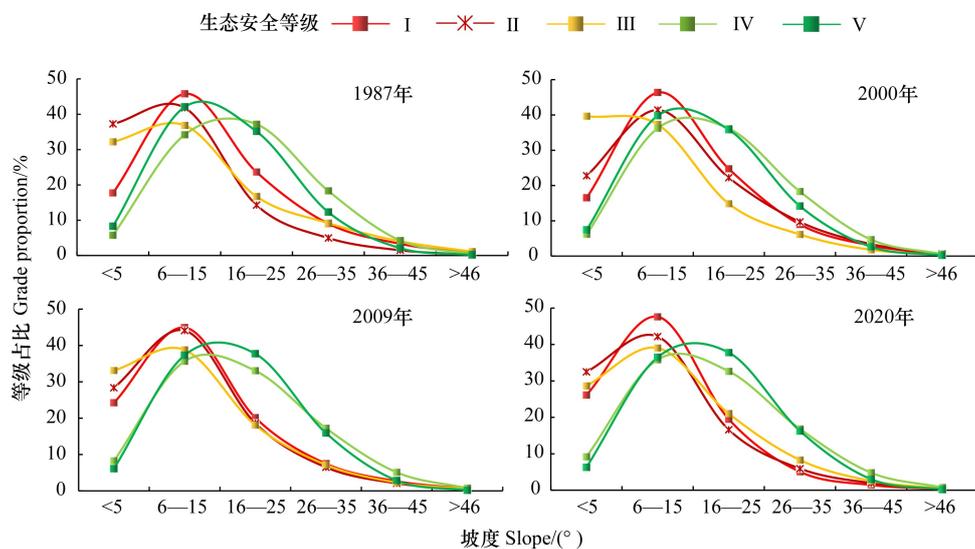


图 6 抚仙湖流域生态安全等级与坡度相关分析

Fig.6 Correlation analysis between ecological security level and slope in Fuxian Lake Basin

### 3.3.3 不同人口密度上生态安全分异规律

生态安全空间分布特征与人口聚集特征具有很强的关联性(图 7)。生态不安全、较不安全、临界安全等级(I、II、III 级)主要分布于人口极稀区与人口密集区,且随着人口密度的增大,在人口密集区的生态不安全等级面积占比整体呈上升趋势,共增长了 34.284%,该 3 类生态安全等级下的人口极稀区主要分布于龙街街道、右所镇、海口镇的耕地与低覆盖草地片区,而人口密集区集中于凤麓街道、龙街街道、右所镇、路居镇的城镇建城区。生态中度安全与高安全等级(IV、V 级)基本全面覆盖了人口极稀区,覆盖率达到 97% 以上,该区域主要分布在流域的外围,集中于江城镇、龙街街道、青龙镇生态环境较优区域,此片区基本以林地为主,人口

密度最低。

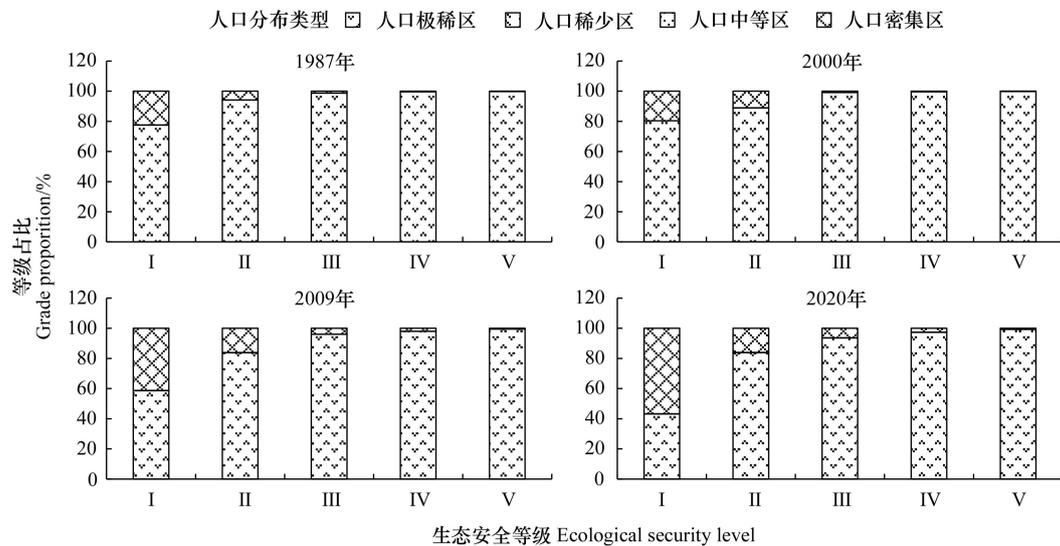


图7 不同人口密度上的生态安全等级分析

Fig.7 Analysis of ecological security levels in different population densities

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

研究发现,抚仙湖流域内部生态安全水平空间分异明显,呈流域外围高,中心低的空间结构(图2),这与相关研究结果类似,如济南市2006—2016年间土地生态安全水平的明显区域异质性表现为“中中高”整体分布格局<sup>[35]</sup>。本研生态安全等级低区域以团或片状分布于水体北岸城市建城区及东,南岸农业耕作区,生态安全等级高片区均匀地分布在流域山地区域。生态安全存在该空间格局的主要原因如下:生态安全水平高区域位于海拔较高的山地和丘陵,面积广阔,植被覆盖度高,生物多样性丰富,自然基础优秀,具有很好地生态系统调节能力,同时经过“十一五”期间的修复,改善了流域的生态环境。生态安全状况较差区域位于湖泊水体周边的湖积平原,以北岸凤麓街道与右所镇,南岸路居镇,东岸海口镇内分布广泛,这与凤麓镇作为澄江县的经济发展中心密切相关,境内建设用地不断扩张,人类对土地资源不断施加压力,区域开发强度高,导致生态系统服务价值低,而路居镇与海口镇作为流域的主要农业生产区,土地利用结构单一,生态系统弹性能力低,直接影响研究区的生态安全水平,本研究的生态安全高水平空间分布研究结果与尹娟<sup>[27]</sup>不同。尹娟研究结果显示抚仙湖流域东部生态安全较好(青龙镇最为突出),这种差异的产生与各自选择的研究范围、评价尺度,评价模型及其指标密切相关。

进行抚仙湖流域生态安全空间探索分析发现其生态安全在空间上存在明显集聚效应(图4),以高高和低低集聚为主,高高集聚区主要分布于植被覆盖度高,人为干扰指数低的山地,低低集聚区集中于经济活跃,人口密集,坡度较低的农耕区,与相关研究结果类似,如银川市生态安全高高集聚区主要分布于贺兰山国家级自然保护区境内,低低集聚区以城镇工业片区为主<sup>[29]</sup>。流域内局部生态环境的变化会引起周边生态状况随之改变。高高集聚区要进一步强化流域内部土地资源管理,低低集聚区应利用经济发展优势,对生态环境做出正反馈响应,提升生态安全水平。

本研究结果显示,抚仙湖流域生态安全在土地利用类型、坡度、人口密度上空间分异规律明显(图5、图6、图7)。已有研究表明皇甫川流域灌丛与林草地的生态安全水平高于耕地,沙裸地<sup>[36]</sup>;济南市建设用地对区域的生态安全具有较高的解释力<sup>[35]</sup>,本研究结果与其有相同的趋势。现有文献表明地形地貌是固有自然因

素,易引发各种生态环境问题,如星云湖流域坡度低于 $7^{\circ}$ 生态安全水平越高,且二者之间呈正比关系<sup>[37]</sup>,与本研生态安全等级随坡度增大相对提升的分异特征相反。主要因为抚仙湖流域坡度较小区域地势平坦,经济开发活动强烈,生态安全水平较低。此外,本研究证明人口密度因素与生态安全演变趋势呈负相关关系,人口密度增大导致区域人为干扰强度增大,进而加大了区域开发的强度,增加了对生态安全构成威胁的因素。因此,掌握抚仙湖流域内部生态安全的空间分异规律有助于分析其生态安全的空间格局及成因,制定精准改善政策,促进流域可持续健康发展。

## 4.2 结论

本研究基于格网尺度进行抚仙湖流域 1987—2020 年的生态安全水平综合分析,并利用探索性空间分析工具重点分析了生态安全空间格局分异特征与规律,结果表明:

(1) 抚仙湖流域生态安全空间格局呈四周高,中心低的特征。空间格局上生态安全较好区域分布于植被覆盖度高的流域外围,生态安全低值区分布在流域北岸,南岸的环湖地带。

(2) 基于空间自相关分析结果,研究区 4 期的全局 Moran's  $I$  指数皆 $>0$ ,且呈逐期上升的趋势,表明研究区生态安全水平在空间上存在正向集聚效应,且集聚程度增强;在空间内部以 HH 及 LL 聚集为主,HL 和 LH 分布较少,HH 区域主要分布在流域西北,东南,西岸中部片区,LL 区域主要分布在流域北岸人口密集区及南岸的农业地带。

(3) 探索抚仙湖流域生态安全结果与不同土地利用类型、坡度、人口密度空间分异规律可得,各生态安全等级在不同期、不同土地利用类型上的分布差异明显,但变化趋势一致,生态安全 I 级主要分布于建设用地,生态安全 II 及 III 级多分布在耕地,生态安全 IV, V 级遍布林地片区,草地类型在研究期内由生态安全 I 级向生态 III 级转变。生态安全与坡度存在明显的分异特征,随坡度增加,生态安全水平越好。生态安全水平与人口密度存在显著的正向分异规律,人口密度增大,生态安全水平越低。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] Wood S L R, Jones S K, Johnson J A, Brauman K A, Chaplin-Kramer R, Fremier A, Girvetz E, Gordon L J, Kappel C V, Mandle L, Mulligan M, ÓFarrell P, Smith W K, Willemen L, Zhang w, DeClerck F A. Distilling the role of ecosystem services in the Sustainable Development Goals. *Ecosystem Services*, 2018, 29:70-82.
- [ 2 ] Macleod N D, Mcivor J G. Reconciling economic and ecological conflicts for sustained management of grazing lands. *Ecological Economics*, 2006, 56(3): 386-401.
- [ 3 ] Gong J Z, Liu Y S, Xia B C, Zhao, G W. Urban ecological security assessment and forecasting, based on a cellular automata model: A case study of Guangzhou, China. *Ecological Modelling*, 2009, 220(24): 3612-3620.
- [ 4 ] Han B L, Liu H X, Wang R S. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods. *Ecological Modelling*, 2015, 318:217-225.
- [ 5 ] 陈利顶,景永才,孙然好.城市生态安全格局构建:目标、原则和基本框架. *生态学报*, 2018, 38(12): 4101-4108.
- [ 6 ] Rogers K S. Ecological security and multinational corporations. *Environmental change and Security Project Report*, 1997, 3: 29-36.
- [ 7 ] 应凌霄,孔令桥,肖焱,欧阳志云.生态安全及其评价方法研究进展. *生态学报*, 2022, 42(5): 1679-1692.
- [ 8 ] 崔旺来,陈梦圆,钟海玥.基于 ESDA 和 GA 的湾区生态安全空间分异及差异化管理——以浙江大湾区为例. *生态学报*, 2023, 43(5): 2074-2087.
- [ 9 ] 张中浩,聂甜甜,高阳,谈晨荟,谈晨荟,高峻.长三角城市群生态安全评价与时空跃迁特征分析. *地理科学*, 2022, 42(11): 1923-1931.
- [ 10 ] Pereira A S, José Cerejeira M J, Daam M A. Ecological risk assessment of imidacloprid applied to experimental rice fields: Accurateness of the RICEWQ model and effects on ecosystem structure. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 142:431-440.
- [ 11 ] 向丽,周伟,任君,黄雨晗,官炎俊.基于 DPSIRM 模型的高原城市湿地生态安全评价——以湟水流域西宁段为例. *生态学杂志*, 2022, 41(10): 2064-2071.
- [ 12 ] 王怡然,王雅晖,杨金霖,赵田野,寇林,张大红.黄河流域森林生态安全等级评价与时空演变分析. *生态学报*, 2022, 42(6): 2112-2121.
- [ 13 ] 董世魁,吴娱,刘世梁,苏旭坤,赵海迪,张勇.阿尔金山国家级自然保护区草地生态安全评价. *草地学报*, 2016, 24(4): 906-909.
- [ 14 ] Chen Y, Wang J L. Ecological security early-warning in central Yunnan Province, China, based on the gray model. *Ecological Indicators*, 2020,

111:106000.

- [15] 王如松, 欧阳志云. 对我国生态安全的若干科学思考. 中国科学院院刊, 2007, 22(3): 223-229.
- [16] Bai X R, Tang J C. Ecological security assessment of Tianjin by PSR model. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2:881-887.
- [17] Wang Z, Zhou J Q, Loaiciga H, Guo, H C, Hong, S. A DPSIR Model for Ecological Security Assessment through Indicator Screening: A Case Study at Dianchi Lake in China. *Plos One*, 2015, 10(6): e0131732.
- [18] Dong Z H, Zhang J Q, Tong Z J, Han A R, Zhi F. Ecological security assessment of Xilingol grassland in China using DPSIRM model. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109336.
- [19] 王耕, 王利, 吴伟. 区域生态安全概念及评价体系的再认识. *生态学报*, 2007, 27(4): 1627-1637.
- [20] 王耕, 吴伟. 区域生态安全机理与扰动因素评价指标体系研究. *中国安全科学学报*, 2006, 16(5): 11-15, 148.
- [21] 刘丽娜, 马春子, 张靖天, 何卓识, 霍守亮, 席北斗. 东北湖区典型流域生态安全评估. *环境科学研究*, 2019, 32(7): 1108-1116.
- [22] 马骊驰, 王金亮, 李石华, 周峻松, 金宝轩. 抚仙湖流域土壤侵蚀遥感监测. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 65-70, 76.
- [23] 杨超, 王金亮, 李石华, 王丽霞, 马骊驰, 潘继亚, 高帆, 刘广杰. 抚仙湖流域土地退化动态遥感监测研究. *遥感技术与应用*, 2016, 31(2): 388-396.
- [24] 冯慕华, 潘继征, 柯凡, 李文朝. 云南抚仙湖流域废弃磷矿区水污染现状. *湖泊科学*, 2008, 20(6): 766-772.
- [25] Liu G J, Wang J L, Li S H, Li J, Duan P. Dynamic Evaluation of Ecological vulnerability in a Lake Watershed Based on RS and GIS Technology. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, 28(3): 1785-1798.
- [26] 杨恩秀. 抚仙湖流域非点源污染风险评价研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [27] 尹娟. 抚仙湖流域土地生态安全评价与优化. *玉溪师范学院学报*, 2019, 35(3): 98-106.
- [28] 黄宝强, 刘青, 胡振鹏, 钟菊芳. 生态安全评价研究述评. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(S2): 150-156.
- [29] 李建春, 袁文华. 基于 GIS 格网模型的银川市土地生态安全评价研究. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 988-1001.
- [30] 段锦, 康慕谊, 戴诚, 江源. 基于格网的东江流域生态安全空间综合评价. *生态学杂志*, 2012, 31(8): 2075-2081.
- [31] 崔馨月, 方雷, 王祥荣, 康俊锋. 基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究. *生态学报*, 2021, 41(1): 302-319.
- [32] 钟振宇, 柴立元, 刘益贵, 陈灿. 基于层次分析法的洞庭湖生态安全评估. *中国环境科学*, 2010, 30(S1): 41-45.
- [33] 解雪峰, 吴涛, 肖翠, 蒋国俊, 边华菁, 马勇, 陈建华. 基于 PSR 模型的东阳江流域生态安全评价. *资源科学*, 2014, 36(8): 1702-1711.
- [34] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 蔡接接. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 771-784.
- [35] Liu J H, Cao X Y, Zhao L S, Dong, G L, Jia K. Spatiotemporal Differentiation of Land Ecological Security and Its Influencing Factors: A Case Study in Jinan, Shandong Province, China. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 824254.
- [36] 喻锋, 李晓兵, 王宏, 余弘婧. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价. *地理学报*, 2006, 61(6): 645-653.
- [37] 李益敏, 朱军, 余艳红. 基于 GIS 和几何平均数模型的流域生态安全评估及在各因子中的分异特征——以星云湖流域为例. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 198-205.