

## 基于 DPSIRM 模型的苏州吴江区湿地生态安全评价

朱 颖<sup>1,2</sup>, 顾春望<sup>1</sup>, 李 欣<sup>2,3</sup>, 周婷婷<sup>2,3</sup>, 冯育青<sup>2,3</sup>

(1. 苏州科技大学 建筑与城市规划学院, 江苏 苏州 215011; 2. 江苏太湖湿地生态系统国家定位观测站, 江苏 苏州 215000; 3. 苏州湿地保护管理站, 江苏 苏州 215000)

**摘要:** 【目的】科学评价水网地区湿地生态安全状况, 为区域生态安全与高质量发展提供依据。【方法】基于水网地区湿地在城市发展过程中所面临的威胁, 以苏州市吴江区为研究对象, 运用驱动力-压力-状态-影响-响应-管理 (DPSIRM) 模型构建评价指标体系, 采用组合赋权法赋予指标权重, 结合地理信息系统 (GIS) 格网技术将部分指标进行空间量化, 最终通过综合评价法对 2012—2020 年吴江区的湿地生态安全进行评价。【结果】2012、2016、2020 年吴江区湿地生态安全值分别为 0.394 4、0.455 2 和 0.516 4, 总体由低安全和中度安全向较高安全等级演变; 各时期的高值区域集中于太湖沿岸、震泽片区、北麻漾片区、同里湖片区、三白荡片区以及元荡片区; 基于 DPSIRM 模型分析, 管理、影响、驱动力子系统安全值明显提升, 压力子系统有所下降, 状态、响应子系统呈先降低后升高的态势。【结论】研究时段内吴江区湿地生态安全值总体呈上升状态。今后湿地的生态保护应当注重对压力指标的调节, 加强对生态安全等级较低区域的管控, 并保持较高强度的管理措施。图 8 表 1 参 31

**关键词:** 湿地生态安全; DPSIRM 模型; GIS 格网; 水网地区

中图分类号: S759.9 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)05-1114-10

## Evaluation of wetland ecological security in Wujiang District of Suzhou based on DPSIRM model

ZHU Ying<sup>1,2</sup>, GU Chunwang<sup>1</sup>, LI Xin<sup>2,3</sup>, ZHOU Tingting<sup>2,3</sup>, FENG Yuqing<sup>2,3</sup>

(1. School of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China; 2. National Positioning Observation and Research Station of Taihu Wetland Ecosystem, Suzhou 215000, Jiangsu, China; 3. Suzhou Wetland Conservation and Management Station, Suzhou 215000, Jiangsu, China)

**Abstract:** [Objective] This study is aimed to conduct a scientific evaluation of wetland ecological security in water network area so as to provide basis for regional ecological security and high-quality development. [Method] With Wujiang District of Suzhou as the research object, on the basis of the threats faced by the wetland in the water network area in the process of urban development, first, an evaluation index system was constructed employing the DPSIRM model (driving-force-pressure-state-impact-response-management) after which the combined weighting method was used to give the index weight; then some indexes were spatially quantified in combination with Geographic Information System (GIS) grid technology; finally, the comprehensive evaluation method was adopted to evaluate the wetland ecological security of Wujiang District from 2012 to 2020. [Result] In 2012, 2016 and 2020, the ecological security values of wetlands in Wujiang District were 0.394 4, 0.455 2 and 0.516 4 respectively, which evolved from low security and medium security

收稿日期: 2021-11-23; 修回日期: 2022-04-25

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目 (17YJAZH137); 苏州科技大学风景园林学学科建设项目

作者简介: 朱颖 (ORCID: 0000-0002-2861-7577), 副教授, 博士, 从事风景园林规划设计、区域景观规划与生态修复研究。E-mail: zhuying@mail.usts.edu.cn。通信作者: 冯育青 (ORCID: 0000-0002-2414-790X), 教授级高级工程师, 博士, 从事苏州市湿地保护与修复研究。E-mail: szwetland@163.com

to high security. The high value areas in each period were mainly concentrated along the coast of Taihu Lake, Zhenze area, Beimayang area, Tongli Lake area, Sanbaidang area and Yuandang area. Based on the analysis of DPSIRM model, the safety value of management, impact and driving force subsystem had increased significantly, that of the pressure subsystem had decreased, whereas that of the state and response subsystem had first decreased and then increased. [Conclusion] During the study period, the ecological security values of wetlands in Wujiang District showed an overall upward state. However, in the future ecological protection of wetlands, devoted efforts should be made to the regulate pressure indicators, strengthen the control of areas with low ecological security level, and maintain high-intensity management measures. [Ch, 8 fig. 1 tab. 31 ref.]

**Key words:** wetland ecological security; DPSIRM model; GIS grid; water network area

湿地是水网地区最重要的生态资源,湿地的生态安全关系着地区生态健康与可持续发展。在高强度的城镇建设、农业发展、水运开发过程中,湿地往往成为各类建设用地的来源<sup>[1]</sup>,结果给地区内湿地造成特殊的生态风险<sup>[2-3]</sup>。由此,对湿地进行生态安全评价,不仅可以反映湿地生态质量状况,还能够为湿地保护政策制定提供量化支撑,促进地区生态安全建设<sup>[4]</sup>。目前,关于湿地生态安全的研究以区域安全状况评价、发展预测以及影响因素探究等方面研究居多,主要运用综合指数法<sup>[5]</sup>、生态足迹法<sup>[6]</sup>、景观格局指数<sup>[7]</sup>、生境质量模型<sup>[7]</sup>等方法对湿地生态安全进行评价分析,以及通过灰色关联模型<sup>[8]</sup>、景观模拟演化<sup>[9]</sup>等对安全趋势进行影响因素探究和模拟预测。相关研究主要以区域或行政区单元生态安全为对象进行评价,对湿地生态安全的空间分异化研究相对缺乏,且针对湿地生态安全的研究多集中于干旱区<sup>[5]</sup>、高原<sup>[10]</sup>、滨海<sup>[11]</sup>等地域特色鲜明区域,对湿地资源丰富的水网地区生态安全评价指导有待提升。长江三角洲是中国水网最密集、社会经济发展最快的地区之一。2018 年,长江三角洲一体化发展上升为国家战略,苏州市吴江区是长江三角洲区域一体化发展示范区之一,在高质量发展的背景下面临湿地生态系统优先保护的壓力<sup>[12]</sup>。本研究以吴江区为例,构建基于驱动力-压力-状态-影响-响应-管理(DPSIRM)模型的湿地生态安全评价指标体系,突出水网地区人与环境之间的相互关系,通过地理信息系统(GIS)格网技术将生态安全值进行空间量化,探析吴江区湿地生态安全状况,以期为吴江区湿地生态保护管理提供依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

吴江区位于苏州市最南部,是苏州主城区面积最大的板块,东接上海市青浦区,南连浙江省嘉兴市,西临太湖,北靠苏州市吴中区。吴江区既是苏、浙、沪两省一市的地理交界处,又是长江三角洲区域一体化发展国家战略的中心区域,具有重要的地理、经济、生态地位。吴江区总面积为 1 176.68 km<sup>2</sup>,下辖 7 个乡镇和 4 个街道(本研究为方便数据统计,按照 2012 年下辖的 8 个乡镇进行分析),2020 年常住人口 131.26 万,城镇化率超过 70%。吴江区内河道纵横交错,湖泊星罗棋布,湿地总面积(保有量)为 431.09 km<sup>2</sup>,占全区总面积的 36.64%,自然湿地保护率达 71.10%。吴江区湿地分布见图 1。

### 1.2 数据来源

本研究数据包括以下 3 类:①土地利用/覆被类型数据。通过 2012、2016、2020 年 SPOT-5 遥感卫星影像经 ENVI 5.3 解译获取,借助 ArcGIS 10.8 和 Fragstats 4.2 处理获得景观格局指数。②社会统计数据、资源调查数据和环境保护规划数据。来源于

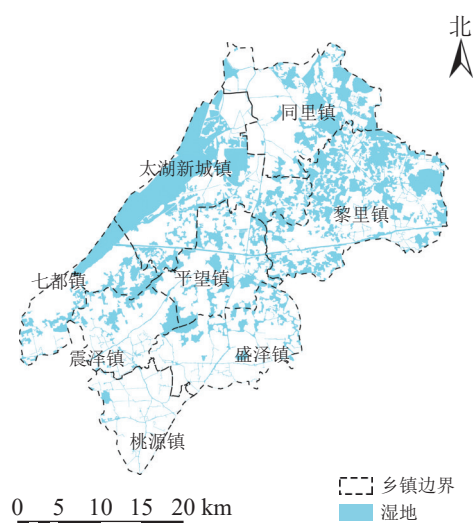


图 1 吴江区湿地分布示意图

Figure 1 Distribution map of wetland in Wujiang District

《吴江年鉴(2013—2020年)》《苏州市湿地保护年报(2015—2020年)》《苏州市水土保持规划(2016—2030年)》《苏州市鸟类物种调查与统计(2012—2020年)》《吴江区湿地保护规划(2018—2030年)》等。  
③其他数据。年度归一化植被指数来自资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),路网数据来自开放街道地图 OpenStreetMap 平台(<https://www.openstreetmap.org>)。

## 2 评价指标体系构建与计算

### 2.1 DPSIRM 框架模型

DPSIRM 模型是基于压力-状态-响应(PSR)模型演变而来,是一种被广泛运用于环境质量评价中,生态系统健康评价的因果关系模型<sup>[13]</sup>。框架内各子系统具体含义参照王欣等<sup>[14]</sup>的相关研究,针对湿地生态系统对模型各子系统进行如下界定:①“驱动力”是驱使湿地生态系统自然演替或退化的根本因素和原始动力,分为自然和社会2个方面;②“压力”可理解为驱动力作用于湿地生态系统,对湿地资源产生的需求和作用,表现为征占湿地、用水需求、污染排放等;③“状态”即湿地生态系统在压力作用下所发生的最直接变化,包括湿地生态系统的物理化学特征和景观状态特征;④“影响”为湿地生态系统状态发生改变之后对人类生存发展产生的影响;⑤“响应”和“管理”都是湿地生态系统中的人类社会在感应到系统影响之后采取的各种弥补及治理措施,有所区别的是响应指标代表生态系统受到安全威胁后较为被动的补救性举措,管理指标是人类为了提升系统的安全性,通过法律、政策,提高人类社会生态保护意识,进行全过程的管理措施,更能体现人在湿地生态安全过程中的主观能动性。这6个因子具有因果作用关系,它们共同表达着影响湿地生态安全的信息耦合关系。

### 2.2 评价指标选取

根据 DPSIRM 框架模型,参考相关研究<sup>[15-16]</sup>和吴江区湿地实际状况,遵循指标数据的代表性、独立性、易获得性、可操作性和系统性原则<sup>[17]</sup>,从驱动力、压力、状态、影响、响应和管理6个方面建立了吴江区湿地生态安全评价指标体系(表1)。

### 2.3 指标权重确定

组合赋权法是将专家理论知识和丰富经验的主观赋权法与充分挖掘数据组合信息的客观赋权法相结合的赋权方法,可以减少系统误差和随机误差<sup>[18]</sup>。本研究分别通过 yahhp1.03 和 Excel 计算层次分析法和熵权法的结果,选择将两者结果相结合,综合考虑主客观因素的指标权重。

### 2.4 生态安全值计算

结合相关研究<sup>[19]</sup>,充分考虑研究区面积和范围特征,本研究确定基础网格的尺度为 1 km×1 km。通过空间插值和数据链接方法将各指标数据链接至各格网,采用综合评价法对研究区各格网的湿地生态安全状况进行计算:

$$C_{EI} = \sum_{i=1}^n W_i \times P_i$$

其中:  $C_{EI}$  表示某时段各格网区域的综合湿地生态安全值,  $P_i$  为第  $i$  个指标的标准化值,  $W_i$  为第  $i$  个指标的综合权重,  $n$  为评价指标的个数。根据相关研究<sup>[20]</sup>,将研究区湿地生态安全等级划为5级,即高度安全( $C_{EI} > 0.8$ )、较高安全( $0.8 \geq C_{EI} > 0.6$ )、中等安全( $0.6 \geq C_{EI} > 0.4$ )、低度安全( $0.4 \geq C_{EI} > 0.2$ )、不安全( $C_{EI} \leq 0.2$ )。通过综合评价法计算研究区各格网湿地生态安全值,并在 ArcGIS 中通过空间插值法绘制吴江区湿地生态安全定量空间分布图。

## 3 结果与分析

### 3.1 吴江区湿地生态安全时空演变分析

吴江区 2012、2016 和 2020 年湿地生态安全指数平均值分别为 0.394 4、0.455 2 和 0.516 4,湿地生态安全指数逐步攀升,增长较为平稳,说明吴江区的湿地生态状况呈现稳步提升的趋势。湿地生态安全指数极值区域分布基本一致(图2),高值区域主要位于吴江区东部沿太湖区,包括中部偏南的震泽-雪落漾-长漾片区、北麻漾-庄西漾片区、东北部同里湖-九里湖-沐庄湖片区以及东部的三白荡、元荡片区。

表 1 吴江区湿地生态安全评价指标体系及含义

Table 1 Evaluation index system and meaning of wetland ecological security in Wujiang District

目标层	准则层	指标层	正负性	数据来源	综合权重
湿地生态安全	驱动力	人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	-	各镇人口/镇域面积	0.022 5
		国内生产总值(GDP)/万元	+	《吴江年鉴(2013—2021年)》	0.018 9
		城市化水平/%	-	各镇非农业人口/各镇总人口	0.030 7
		降水/m <sup>3</sup>	+	《吴江年鉴(2013—2021年)》	0.019 1
	压力	区域开发指数/%	-	(建设用地面积+耕地面积)/国土面积	0.035 1
		万元GDP耗水量/(t·万元 <sup>-1</sup> )	-	《吴江年鉴(2013—2021年)》	0.016 4
		公路密度/%	-	公路面积/国土面积	0.020 4
		航道密度/%	-	航道等级缓冲区分析	0.017 5
		农药、化肥施用强度/t	-	《吴江年鉴(2013—2021年)》	0.027 3
		企业生产污水排放/t	-	苏州市重点排污企业名单	0.030 3
		城镇生活污水排放/t	-	《吴江年鉴(2013—2021年)》	0.029 6
	状态	水域面积占比/%	+	水域面积/国土面积	0.035 6
		水环境质量/%	+	吴江区重要断面水环境质量状况	0.038 5
		水土流失等级/%	-	《苏州市水土保持规划》	0.035 6
		植被覆盖度/%	+	资源环境科学与数据中心	0.019 5
		景观结构指数/%	-	景观破碎度、分离度和分维数加权函数式 <sup>[21]</sup>	0.022 5
		湿地连通性指数*/%	+	景观形态空间格局分析(MSPA)结合Conefor2.6 <sup>[22]</sup>	0.036 4
	影响	生境质量/%	+	生境质量(Invest)模型 <sup>[23]</sup>	0.022 3
		人均水资源量/(m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup> )	+	《吴江年鉴(2013—2021年)》	0.030 8
		农业产值占比/%	+		0.027 6
		环境调节服务/%	+	生态系统服务价值计算 <sup>[24]</sup>	0.034 6
		鸟类多样性*/种	+	《苏州市鸟类物种调查与统计》	0.042 1
	响应	污水处理率/%	+		0.026 3
		无害化垃圾处理率/%	+		0.023 3
		水功能区达标率/%	+	《吴江年鉴(2013—2021年)》	0.034 3
		河道治理/%	+		0.040 6
		地区生产总值能耗下降比率/%	+		0.023 7
		查处环境违法案件数/件	+		0.030 4
	管理	湿地保护等级*/%	+	《苏州市湿地保护年报(2015—2020年)》	0.043 6
		自然湿地保护率*/%	+		0.037 8
		湿地执法巡查次数	+		0.026 7
		退渔还湖及池塘标准化改造*	+	《吴江年鉴(2013—2021年)》	0.020 4
		高标准农田建设	+		0.028 4
		湿地科普宣教情况*/万元	+	《苏州市湿地保护年报(2015—2020年)》	0.049 1
		环保投资占GDP比重/%	+	《吴江年鉴(2013—2021年)》	0.047 9

说明：\*表示反映吴江区湿地特质的指标。+表示对湿地生态安全起促进作用；-表示对湿地生态安全起抑制作用

上述区域湿地保护安全等级高，湿地斑块面积较大，水面开阔，河网密布，支流众多，连通性较好，有利于水体之间的水文交换，同时远离建设区域，污染排放影响较小。低值区域分布于同里镇、太湖新城镇、黎里镇和桃源镇建设用地密集区域，湿地面积较小，城市开发、污染排放等对湿地造成的压力较大，故相对湿地密集区域而言安全值较低。

### 3.2 子系统安全值时空演变分析

3.2.1 驱动力子系统安全值时空演变分析 由图 3 可知：驱动力子系统安全值由 0.032 8 增长至 0.050 1，



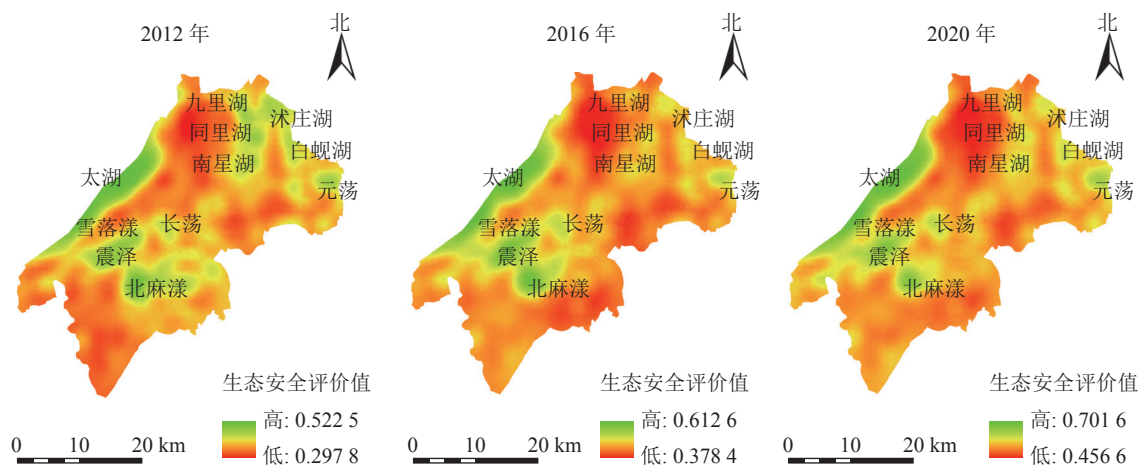


图2 2012、2016、2020年吴江区湿地生态安全评价示意图

Figure 2 Evaluation value of wetland ecological security in Wujiang District in 2012, 2016 and 2020

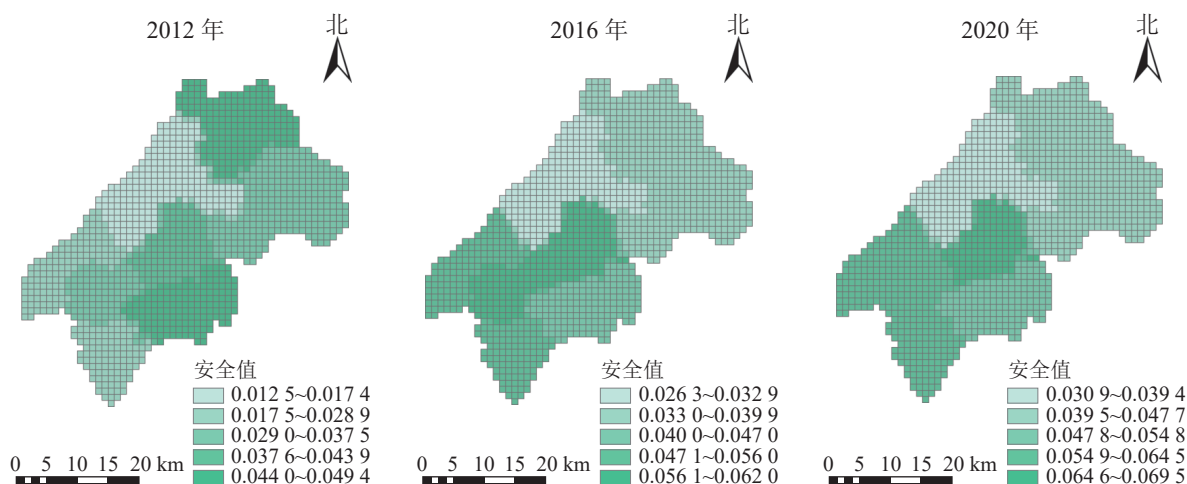


图3 驱动力子系统安全值空间分布示意图

Figure 3 Spatial distribution of safety value of driving force subsystem

呈逐年升高的趋势, 增长幅度平缓, 说明驱动力子系统总体情况稳中向好。2012年驱动力安全值较高的区域集中于同里镇、盛泽镇和平望镇, 2016年安全值高值区域主要位于平望镇、七都镇、震泽镇和桃源镇, 2020年安全值高值分布与2016年分布相仿, 原因在于上述几镇人口总数略有减少, 对环境的压力有所降低, 而由于吴江经济开发区的高速发展, 使得同里镇的城市化快速提升, 农业人口占比降低26%, GDP增长近7倍, 同时也伴随着人口的急剧增长, 仅2012—2016年, 同里镇总人口数由4.3万增至10.4万, 使得其驱动力安全值提升幅度相对较低。

**3.2.2 压力子系统安全值时空演变分析** 由图4可知: 压力子系统安全值由0.1253降低至0.1034, 说明近年来湿地生态系统受人为扰动压力逐渐升高, 对地区生态安全造成了压力。城市扩张以及生活、生产污水排放等问题给湿地生态安全带来一定的压力。2012—2020年, 吴江区建设用地面积占比增加了10%, 城镇生活污水排放年均增长150万t, 市重点排污企业增长50余家。但另一方面, 生态农业的推广使得农药、化肥的施用量分别减少了128和3438t, 减轻了对湿地生态系统的干扰。压力安全值较高的区域主要位于开发程度较低的区域, 如沿太湖区、震泽镇、桃源镇湖荡区域、同里湖、白蚬湖、三白荡及元荡片区、北麻漾片区, 而城区、乡村、路网密布、航运发达等区域压力安全值较低。从整体看来, 高值区域分布未发生明显改变, 但随着城市扩张的影响, 高值区域面积有所减少。

**3.2.3 状态子系统安全值时空演变分析** 由图5可知: 状态子系统安全值由0.0922降至0.0897, 经历了先降低后升高的变化过程。该变化趋势反映了在负面影响和正向提升的双重作用下, 湿地状态整体上有所下降, 但2016—2020年有好转的趋势。原因在于, 虽然湿地受到城市扩张的侵占, 部分地区湿地

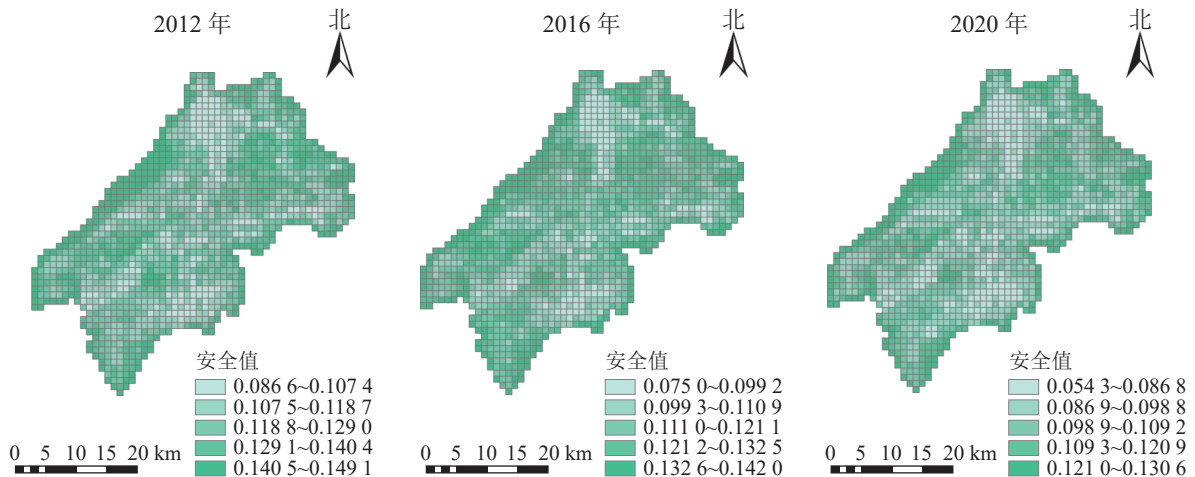


图 4 压力子系统安全值空间分布示意图

Figure 4 Spatial distribution of safety value of pressure subsystem

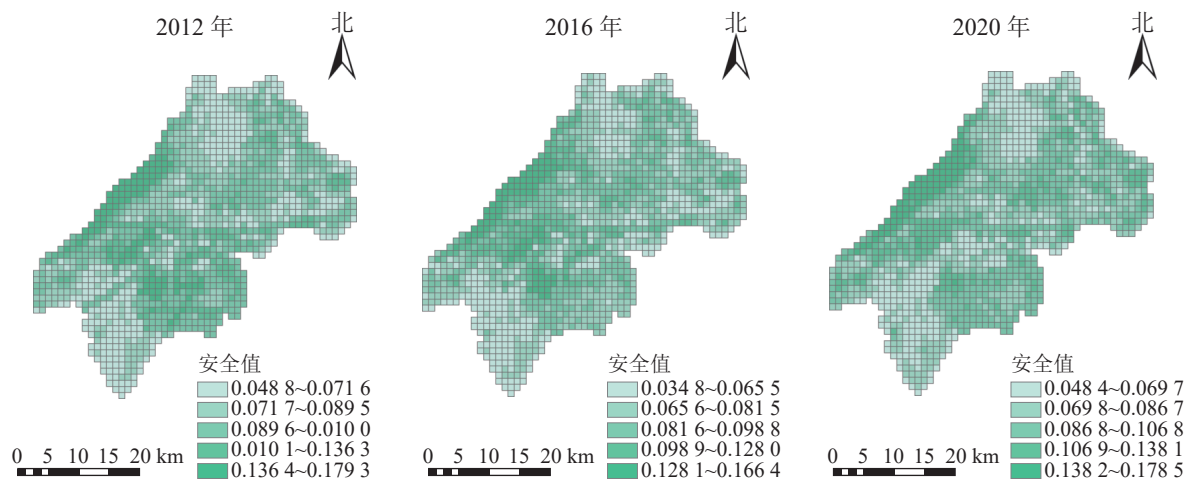


图 5 状态子系统安全值空间分布示意图

Figure 5 Spatial distribution of safety value of state subsystem

的连通性受阻,景观破碎化加剧,但由于整体水环境质量有所好转,水质综合污染指数由 0.64 降低至 0.59,导致状态子系统变化幅度较小。状态子系统安全值的高低值分布与水域空间分布关系紧密,高值分布区主要为水域周边,建设区安全值较低;此外,由于水质较好、景观结构较为稳定,故盛泽镇状态安全值相对较高,而震泽、北麻漾片区、太浦河沿岸、同里湖、白蚬湖、元荡、三白荡片区的湿地连通性较高导致区域内状态安全值较高。

**3.2.4 影响子系统安全值时空演变分析** 由图 6 可知:影响子系统安全值由 0.026 0 升高至 0.074 9,呈明显升高趋势。影响子系统反映了湿地生态系统的扰动与人类活动之间的紧密联系,湿地生态系统的变化影响着人们的生产生活,反映从自然生态系统获益情况。3 个时段,影响子系统安全值的极值区域分布大致相同,高值区域集中在吴江区沿太湖区域、西南与东北之间的湖荡群区域。从镇域分布上看,震泽镇的影响子系统安全值较高,得益于农业产值占比相较于其他镇处于较高水平,震泽镇农业产值占生产总值比例约 10%,而其他镇的农业产值占比仅 5%。低值区域集中在太湖新城和同里镇、盛泽镇的城区附近,主要是受生态系统服务价值的影响,沿太湖和湖荡片区的湿地区域所创造的环境调节服务价值较高,因此成为了影响子系统的高值分布区。总体上,建设用地的扩张使得城区生态系统服务价值降低,进一步导致高值区域呈现减少趋势,但由于受到鸟类物种多样性和人均水资源量提升等影响,总体系统安全值呈现升高趋势。

**3.2.5 响应子系统安全值时空演变分析** 由图 7 可知:响应子系统安全值由 0.081 5 提升至 0.085 7,总体变化幅度较小。2012—2016 年安全值有所下降,即当地对于湿地状态变化响应有所减弱,原因为河

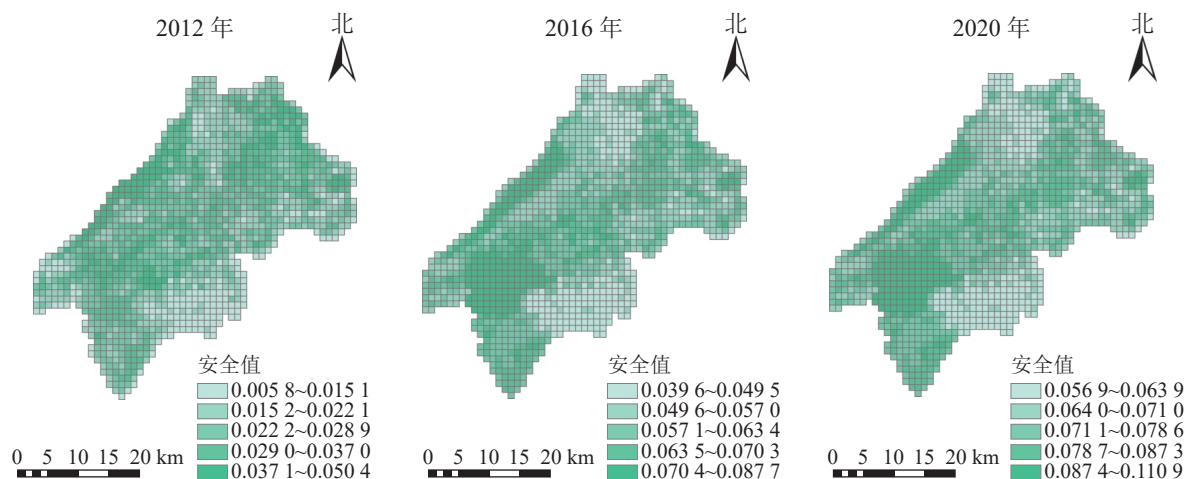


图 6 影响子系统安全值空间分布示意图

Figure 6 Spatial distribution of safety value of affected subsystem

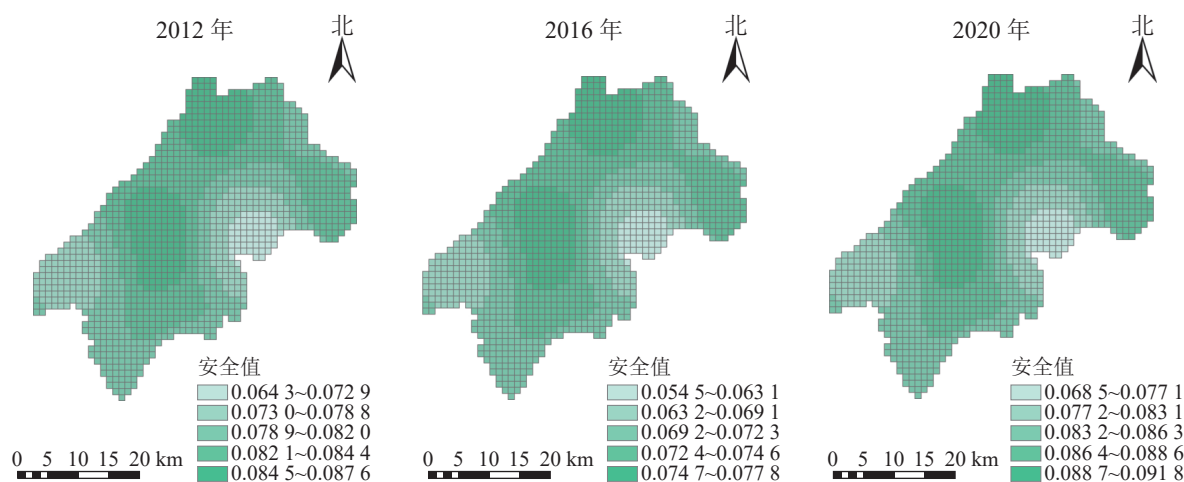


图 7 响应子系统安全值空间分布示意图

Figure 7 Spatial distribution of safety value of response subsystem

道疏浚距离以及地区生产总值能耗下降比率的减少, 2016—2020 年安全值有所提升, 主要得益于无害化垃圾处理率、查处环境违法案件数以及水功能区达标率的提升, 其中无害化垃圾处理率提升 22%, 环境违法案件查处数量增加 380 余件, 水功能达标率提升 25%。空间分布上, 3 个时段的响应子系统安全值空间分布情况一致, 受污水处理能力的影响较大, 低值区域分布在太湖新城西南部和黎里镇北部, 其余区域为高值区域, 因为吴江芦墟、盛泽桥北、七都、盛泽以及汾湖南部几座污水处理厂相较于其余处理厂对周边的污水处理能力相对较弱。

**3.2.6 管理子系统安全值时空演变分析** 由图 8 可知: 管理子系统安全值在所研究时段内由 0.036 6 升高至 0.112 6, 增长幅度明显。管理子系统的变化反映了吴江区对湿地的保护管理工作日益加强, 着重体现在湿地保护率的提升、环保投入增加、生态农业的推广以及湿地公园的科普宣教等。其中, 随着湿地保护管理制度的完善, 吴江区自然湿地保护率提升了 49%, 越来越多的湿地被纳入保护管理区域, 形成了湿地公园-湿地保护小区-水源地保护小区-水产种质资源保护区多类型、省级重要湿地-市级重要湿地-一般湿地多层级的保护体系; 当地政府更加重视生态文明建设, 环保投入占 GDP 比例增长了 1.2%, 不断推进鱼塘标准化改造、高标准农田建设和重点湿地公园科普宣教课程研发推广, 湿地管理工作成效提升明显。空间分布上, 受湿地保护等级的影响, 管理子系统安全值呈现一定的空间分异规律。高值区域大多集中在省级重要湿地, 如太湖、震泽湿地公园周边和同里湿地公园, 其次为市级重要湿地及其周边, 一般湿地和非湿地区域次之。总体看来, 管理子系统增长趋势相对于其他系统最为明显, 增长幅度最高。



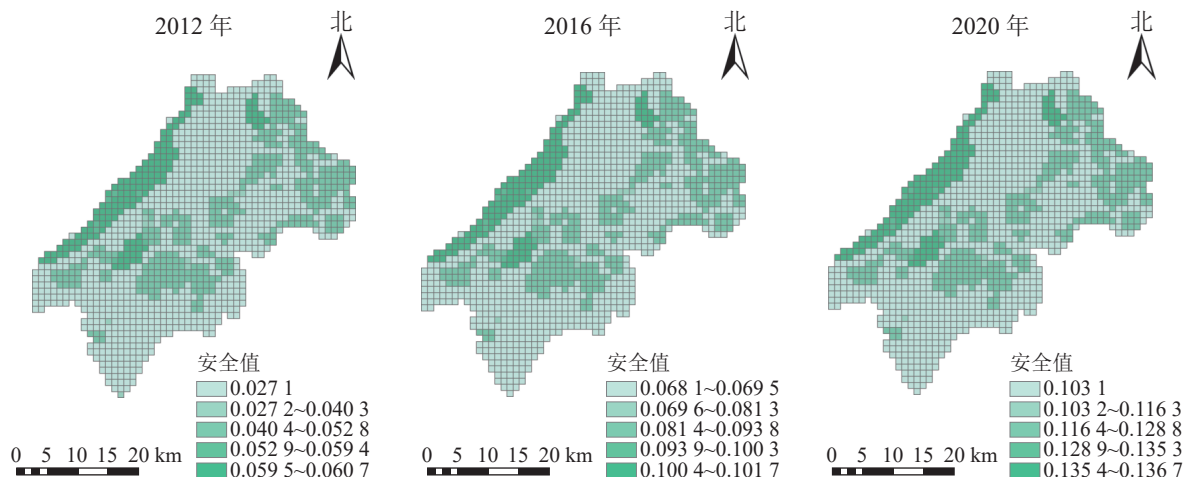


图 8 管理子系统安全值空间分布示意图

Figure 8 spatial distribution of safety value of management subsystem

## 4 讨论

吴江湿地生态高安全值的空间分布，与戈弋<sup>[25]</sup>研究的吴江高敏感区域分布相似，生态安全格局的核心源地区的空间分布与陈琪<sup>[26]</sup>的研究相符。此外，杜健<sup>[27]</sup>从景观生态风险的角度对于吴江区开展了相应的评价，表明 2012—2016 年吴江区的演变趋势与本研究结果存在差异，可能是研究方法及数据的差异性所致。杜健<sup>[27]</sup>采用景观格局指数法进行景观生态风险分析，这种方法是自然因素相关数据为基础，社会经济类因素涉及不多，故 2 种研究结论不同。吴江区湿地在景观格局上确实存在日渐破碎化趋势，导致景观生态风险日趋严重，但是在综合自然、经济、社会等多系统指标后，湿地生态安全更加侧重于全面反映湿地生态系统面临的多重威胁与应对挑战的能力，因此，在综合因素影响下区域湿地生态安全呈现逐渐好转的趋势，这与崔馨月等<sup>[28]</sup>的研究结果相似。此外，本研究中，湿地管理对生态安全的贡献逐渐占据较为重要的地位，这也与秦趣等<sup>[10]</sup>的研究结果相同。

目前针对湿地生态安全的评价，以 PSIR<sup>[29]</sup>、驱动力-压力-状态-影响-响应 (DPSIR) 模型<sup>[30]</sup>为依据构建评价指标体系的研究居多，在湿地管理重要性日渐提升的背景下，将改进后的 DPSIRM 框架模型应用于湿地生态安全评价研究中，有利于更全面系统地分析湿地生态安全发生变化的全过程<sup>[13]</sup>。其次，通过 GIS 格网方法将评价指标数据进行空间量化，能够较为直观地反映湿地生态安全空间差异和演变特征，有利于管理者针对性地对区域采取相应措施<sup>[31]</sup>。最后，本研究对于格网尺度的选择主要借鉴以往学者的经验，尚未考虑到格网尺度差异对安全值大小分布的影响，未来的研究可进一步探寻生态安全值的尺度效应。

## 5 结论

2012—2020 年，研究区湿地生态安全综合指数由 0.394 4 提升至 0.516 4，呈明显提升趋势。空间分布上，各时期的高低值分布区域发生较大变化，高值区域集中于吴江区东部的沿太湖片区、中部的震泽片区、北麻漾片区、东北部的元荡片区、三白荡片区以及同里湖片区，低值区域集中分布于同里镇、太湖新城镇、黎里镇和桃源镇建设用地密集区域。从影响湿地生态安全的 6 个子系统分析来看，管理、影响、驱动力子系统安全值提升相对显著，压力子系统安全值有所降低，而状态和响应子系统安全值呈现波动上升趋势。因此，在未来的湿地保护管理工作中，应当注重加强对湿地面临的压力因素的调节，降低经济发展对湿地的影响，关注生态安全较低等级的区域，着力提升防范生态风险的能力。

## 6 参考文献

- [1] 朱颖, 王杉, 冯育青. 近 30 年太湖流域湿地生态系统服务价值对景观格局变化的响应: 基于“退田还湖”工程的实施[J]. 中国园林, 2022, 38(1): 88–93.  
ZHU Ying, WANG Shan, FENG Yuqing. Response of the value of wetland ecosystem service in Taihu Basin to the change of landscape pattern in the past 30 years: based on the implementation of the project of restoring the lake from the land [J]. Chin Landscape Archit, 2022, 38(1): 88–93.



- [2] 吴雷, 许有鹏, 徐羽, 等. 平原水网地区快速城市化对河流水系的影响[J]. *地理学报*, 2018, **73**(1): 104 – 114.  
WU Lei, XU Youpeng, XU Yu, *et al.* Impact of rapid urbanization on river system in a river network plain [J]. *J Geogr Sci*, 2018, **73**(1): 104 – 114.
- [3] 翟可, 徐惠强, 姚志刚, 等. 江苏省湿地保护现状、问题及对策[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, **37**(3): 175 – 180.  
ZHAI Ke, XU Huiqiang, YAO Zhigang, *et al.* Present situation, problems and measures for Jiangsu wetland conservation [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2013, **37**(3): 175 – 180.
- [4] 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.  
LIU Yanyan, WU Dafang, WANG Chaohui. Research review on ecological security assessment of wetland [J]. *Geogr Geo-Inf Sci*, 2011, **27**(1): 69 – 75.
- [5] 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.  
WANG Rongjun, XIE Yuchu, ZHANG Ying, *et al.* Ecological security evaluation of urban wetland in arid China based on PSR model [J]. *Ecol Sci*, 2015, **34**(3): 133 – 138.
- [6] 姚敏奇. 白洋淀流域湿地生态安全评价及生态补偿研究[D]. 保定: 河北大学, 2019.  
YAO Minqi. *Study on Ecological Security and Ecological Compensation of Wetland in Baiyangdian Watershed*[D]. Baoding: Hebei University, 2019.
- [7] 吴健生, 张茜, 曹祺文. 快速城市化地区湿地生态安全评价——以深圳市为例[J]. *湿地科学*, 2017, **15**(3): 321 – 328.  
WU Jiansheng, ZHANG Qian, CAO Qiwen. Ecological security assessment of wetlands in rapidly urbanizing areas: a case study of Shenzhen, China [J]. *Wetland Sci*, 2017, **15**(3): 321 – 328.
- [8] 李楠, 李龙伟, 陆陆盛, 等. 杭州湾滨海湿地生态安全动态变化及趋势预测[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, **43**(3): 107 – 115.  
LI Nan, LI Longwei, LU Dengsheng, *et al.* Ecological security dynamics and trend forecast of coastal wetlands in Hangzhou Bay [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2019, **43**(3): 107 – 115.
- [9] 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.  
ZHU Weihong, MIAO Chenyu, ZHENG Xiaojun, *et al.* Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(6): 1379 – 1390.
- [10] 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.  
QIN Qu, LIANG Zhenmin, LIU Anle, *et al.* The ecological safety evaluation of plateau wetland based on DPSIRM framework model [J]. *J Glaciol Geocryol*, 2020, **42**(4): 1363 – 1375.
- [11] 秦鹏, 张志辉, 刘庆. 黄河三角洲滨海湿地生态安全评价[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, **41**(8): 145 – 153.  
QIN Peng, ZHANG Zhihui, LIU Qing. Ecological security assessment of coastal wetland in the Yellow River Delta [J]. *Chin J Agric Resour Reg Plann*, 2020, **41**(8): 145 – 153.
- [12] 徐毅松, 吴燕, 邵一希. 国家战略与规划使命——从长三角一体化示范区规划看新时代国土空间治理[J]. *城乡规划*, 2020(4): 1 – 6, 20.  
XU Yisong, WU Yan, SHAO Yixi. National strategy and planning mission: territorial space governance in the new era inspired by the planning of yangtze river delta integration demonstration area [J]. *Urban Rural Plann*, 2020(4): 1 – 6, 20.
- [13] 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.  
ZHANG Fentai, WANG Lachun, SU Weici. The safety evaluation of water resources based on DPSIRM conceptual framework in karst region [J]. *China Environ Sci*, 2015, **35**(11): 3511 – 3520.
- [14] 王欣, 侯效灵, 侯保灯, 等. 基于 DPSIRM 模型的城市化进程与水安全耦合关系分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2021, **42**(2): 50 – 57.  
WANG Xin, HOU Xiaoling, HOU Baodeng, *et al.* Analysis of the coupling relationship between urbanization process and water security based on DPSIRM model [J]. *J North China Univ Water Resour Power Nat Sci Ed*, 2021, **42**(2): 50 – 57.
- [15] 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.  
LI Yue, YUAN Ruoyu, LIU Yang, *et al.* Ecological security evaluation of wetlands in Qingdao based on the comprehensive weighting method [J]. *Chin J Ecol*, 2019, **38**(3): 847 – 855.
- [16] 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.

- QIN Qu, CHEN Zhongquan, YAO Shimei. Ecological safety evaluation of Caohai lake wetland in Weining [J]. *J Hydroecol*, 2018, **39**(2): 27 – 33.
- [17] 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.
- YANG Shimin, LI Yuwen, LÜ Yuzhe. The assessment index system of Zhalong wetland eco-security [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42**(5): 127 – 132.
- [18] 司锦锦, 王世东. 基于组合赋权法的焦作矿区生态安全评价与时空分异[J]. *水土保持研究*, 2021, **28**(3): 348 – 354.
- SI Jinjin, WANG Shidong. Ecological security and spatiotemporal differentiation of Jiaozuo mining area based on combined weighting method [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2021, **28**(3): 348 – 354.
- [19] 奥勇, 蒋嶺峰, 白召弟, 等. 基于格网 GIS 的黄河流域土地生态质量综合评价[J]. *干旱区地理*, 2021, **45**(1): 164 – 175.
- AO Yong, JIANG Lingfeng, BAI Zhaodi, *et al.* Comprehensive evaluation of land ecological quality in the Yellow River Basin based on Grid-GIS [J]. *Arid Land Geogr*, 2021, **45**(1): 164 – 175.
- [20] 田欣. 星海湖湿地生态安全评估与预警研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
- TIAN Xin. *Study on Ecological Security Evaluation and Warning of Xinghaihu Wetland*[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018.
- [21] 谢余初, 巩杰, 张玲玲. 基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J]. *地理科学*, 2015, **35**(6): 790 – 797.
- XIE Yuchu, GONG Jie, ZHANG Lingling. Dynamics of landscape ecological security based on PSR model in the Bailongjiang river watershed [J]. *Sci Geogr Sin*, 2015, **35**(6): 790 – 797.
- [22] 张梦嫚, 吴秀芹. 近 20 年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变[J]. *生态学报*, 2018, **38**(12): 4205 – 4213.
- ZHANG Mangman, WU Xiuqin. Changes in hydrological connectivity and spatial morphology of Baiyangdian wetland over the last 20 years [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(12): 4205 – 4213.
- [23] 欧维新, 张伦嘉, 陶宇, 等. 基于土地利用变化的长三角生态系统健康时空动态研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, **28**(5): 84 – 92.
- OU Weixin, ZHANG Lunjia, TAO Yu, *et al.* A land-cover-based approach to assessing the spatio-temporal dynamics of ecosystem health in the Yangtze River Delta region [J]. *China Popul Resour Environ*, 2018, **28**(5): 84 – 92.
- [24] 朱颖, 吕寅超. 基于生态系统服务价值优化模型的生态安全格局构建虚拟——以苏州市吴江区为例[J]. *现代城市研究*, 2020(8): 89 – 97.
- ZHU Ying, LÜ Yinchao. Simulation research for ecological security pattern construction based on ecosystem service value optimization model: a case study of Wujiang District of Suzhou [J]. *Modern Urban Res*, 2020(8): 89 – 97.
- [25] 戈弋. 苏南乡村水域生态安全格局构建策略研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2016.
- GE Yi. *Research on the Construction Strategy of Ecological Security Pattern in Rural Area of South of Jiangsu* [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2016.
- [26] 陈琪. 基于 GIS 技术的苏南水网密集地区生态空间格局优化研究——以苏州吴江区为例[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
- CHEN Qi. *Ecological Spatial Pattern Optimization of Sunan Water Network-Intensive Areas Based on GIS: A Case Study of Suzhou Wujiang Area*[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015.
- [27] 杜健. 水网地区湿地景观格局演变及景观生态风险研究——以吴江区为例[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2021.
- DU Jian. *Study on Wetland Landscape Pattern Evolution and Landscape Ecological Risk in Water Network Region: A Case Study of Wujiang District* [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2021.
- [28] 崔馨月, 方雷, 王祥荣, 等. 基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究[J]. *生态学报*, 2021, **41**(1): 302 – 319.
- CUI Xinyue, FANG Lei, WANG Xiangrong, *et al.* Urban eco-security assessment in the urban agglomerations based on DPSIR model: a case study of Yangtze River Delta, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **41**(1): 302 – 319.
- [29] 王点. 基于 PSR 模型鄱阳湖湿地生态安全评价[D]. 南昌: 江西师范大学, 2016.
- WANG Dian. *Assessment of Ecological Security of Poyang Lake Wetland Based on PSR Model*[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2016.
- [30] 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 Henian, ZHANG Manyin, CUI Lijuan, *et al.* Evaluation of ecological environment quality of Hengshui lake wetlands based on DPSIR model [J]. *Wetland Sci*, 2019, **17**(2): 193 – 198.
- [31] 汤旭, 郑洁, 冯彦, 等. 云南省县域森林生态安全评价与空间分析[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, **35**(4): 684 – 694.
- TANG Xu, ZHENG Jie, FENG Yan, *et al.* County-level forest ecological security evaluation and spatial analysis in Yunnan Province [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(4): 684 – 694.