

DOI: 10.5846/stxb201807091491

何彦龙,袁一鸣,王腾,张昊飞,陈耀辉.基于 GIS 的长江口海域生态系统脆弱性综合评价研究.生态学报,2019,39(11): - .

He Y L, Yuan Y M, Wang T, Zhang H F, Chen Y H. Integrated assessment of marine ecological vulnerability in the Yangtze River Estuary using GIS. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): - .

基于 GIS 的长江口海域生态系统脆弱性综合评价研究

何彦龙^{1,2,*}, 袁一鸣^{1,2}, 王 腾^{1,2}, 张昊飞^{1,2}, 陈耀辉^{2,3}

1 国家海洋局东海环境监测中心, 上海 201206

2 国家海洋局海洋赤潮灾害立体监测技术与应用重点实验室, 上海 201206

3 上海海洋大学, 海洋生态与环境学院, 上海 201306

摘要:气候变化、富营养化、生境破碎等是全球普遍面临的生态问题,科学评估生态系统外部压力及其弹性力,对生态系统管理和生态修复具有重要的指导意义。使用空间主成分分析(SPCA)和层次分析法(AHP)构建评价指标体系,结合地理信息系统软件,对长江口海域生态环境脆弱性进行综合评价,并根据生态环境脆弱性指数(EVI)值,将研究区生态环境脆弱性分为5级:微度脆弱(<0.5)、轻度脆弱(0.5—0.8)、中度脆弱(0.8—1.0)、重度脆弱(1.0—1.2)、极度脆弱(1.2—1.5)。结果表明:空间尺度上,长江口口门内生态环境脆弱度最高,生态环境脆弱度从口门内向口门外呈显著的降低趋势,近五年,口门内极度脆弱区空间分布南移;评估区域内,约2000 km²的极度脆弱区发生了转变,极度脆弱区、重度脆弱区面积占比分别下降了7%和5%,长江口海域生态环境脆弱性明显好转。总体上,近年来大量陆源污染物输入以及生态系统结构变化,是导致长江口生态环境脆弱度较高的重要因素。

关键词:生态系统; 综合评价; 脆弱性; 地理信息系统; 长江口

Integrated assessment of marine ecological vulnerability in the Yangtze River Estuary using GIS

HE Yanlong^{1,2,*}, YUAN Yiming^{1,2}, WANG Teng^{1,2}, ZHANG Hao-fei^{1,2}, CHEN Yaohui^{2,3}

1 East China Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, People's Republic of China, Shanghai 201206, China

2 Key Laboratory of Integrated Monitoring and Applied Technology for Marine Harmful Algal Blooms, State Oceanic Administration, People's Republic of China, Shanghai 201206, China

3 College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Climate change, eutrophication, and habitat fragmentation are ubiquitous ecological problems in the world. It is important to conduct scientific assessment of the external pressure and the resilience of ecosystems for the ecological management and restoration. In the case of the Yangtze River Estuary, as the end of the basin, huge amounts of pollutants were carried into the area, which resulted in the degeneration of the ecosystem during the past decades. However, little is known about the tendency of ecological vulnerability in this area under the effects of human activities and climate change. Consequently, the ecological vulnerability in the Yangtze River Estuary was assessed using geographic information system (GIS) software combined with spatial principal component analysis (SPCA). An analytical hierarchy process (AHP) was used to determine the evaluation factor weightings. According to the ecological vulnerability index (EVI) values, the eco-environmental vulnerabilities of the study area were classified into five levels: potential (< 0.5), light (0.5—0.8), moderate (0.8—1.0), heavy (1.0—1.2) and very heavy (1.2—1.5). The results showed that the inner mouth area of the

基金项目:海洋公益性行业科研专项经费项目(201505008)

收稿日期:2018-07-09; 网络出版日期:2018-00-00

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

Yangtze River Estuary was the most vulnerable. There was a significant decrease tendency in EVI from the inside to the outside of the mouth. The spatial distribution of the very heavy vulnerable areas within the mouth has shifted southward in the last five years. The extremely vulnerable area of about 2000 km² has changed in the assessment area with extremely vulnerable area decreased by 7% and severely vulnerable area decreased by 5%. On the other hand, the ecological environment status out of the Yangtze River Estuary has obviously improved from 2013—2017. In general, the input of large amount of land-based pollutants and the instability of the ecosystem caused by human activity were the main factors for the high vulnerability of the Yangtze River Estuary.

Key Words: ecosystem; integrated assessment; vulnerability; GIS; Yangtze River Estuary

健康的生态系统取决于生态系统的物质输入、能量流动和信息传递能否保持平衡,研究表明生态系统的动态平衡主要由其弹性力维持^[1]。近年来,由于经济开发等人类干扰活动,输入到生态系统的物质、能量等已超出生态系统自恢复的能力,导致生态系统的脆弱性显著增加^[2]。对区域生态环境脆弱性进行评估,是国内外学者可持续发展研究普遍采用的方法^[3]。

至今对脆弱性定义仍然存在一定争议,但脆弱性被普遍用于表征生态系统对外部压力的响应。如 IPCC 定义的生态系统脆弱性:在外部压力下系统倾向受到不利影响,包括敏感性或易受危害、缺乏应对以及适应的能力^[4]。总体上,生态脆弱性可从 3 个方面进行表征:1) 相对于生态系统本身的外部压力,2) 生态系统自身的敏感性,以及 3) 生态系统自适应能力或弹性力^[5-6]。国内外对脆弱性评价方法开展了大量研究,如基于模糊理论、灰色评价模型、人工神经网络、层次分析方法等^[7-10]。然而,目前的研究方法普遍存在一些不足,首先,评估等级主要依靠专家打分;其次,大多数研究仅能定性地开展脆弱性评价;再次,基于个体的室内实验数据难以支撑生态系统水平上脆弱性评估需要^[5-6,11-12]。

河口是海陆直接交汇的区域,长期以来一直是人类活动最为频繁的区域,生态系统往往较为脆弱。近 40 年来我国河口海域生态环境状况发生了显著变化,长江口及毗邻海域生态系统生物量和环境容量明显下降,重要生境如产卵场和索饵场发生变迁等^[13-14]。然而,对于长江口海洋生态环境脆弱性状况仍不十分清楚,尤其在人类活动和全球气候变化加剧的情景下,长江口生态环境脆弱性变化趋势如何,导致其脆弱性的主导因素是什么。因此,本研究利用空间主成分分析方法建立长江口生态环境脆弱性评估指标体系,分析近五年长江口生态环境脆弱性的动态变化趋势,试图为长江口基于生态系统的管理提供依据。

1 实验方法

1.1 研究区概况

本研究以长江口(范围 31°48.54'N—30°45.36'N, 121°6.66'E—123°E)近岸海域为研究区域(图 1)。长江口呈扇形分叉分布,在徐六泾以下,崇明岛、长兴岛、横沙岛以及九段沙将河口划分为“三级分叉、四口分流”的格局^[13]。

近年来,长江口生态环境状况不容乐观,由于处于流域末端,长江径流不断将流域内的污染物输入该区域。目前,富营养化已成为该区域的主要环境污染问题,其污染物来源主要有三个方面,流域面源污染、市政排污、沿岸工业排污,研究表明,长江口废水排放总量约为 3353 万 m³/d^[15]。《2017 年中国生态环境状况公报》

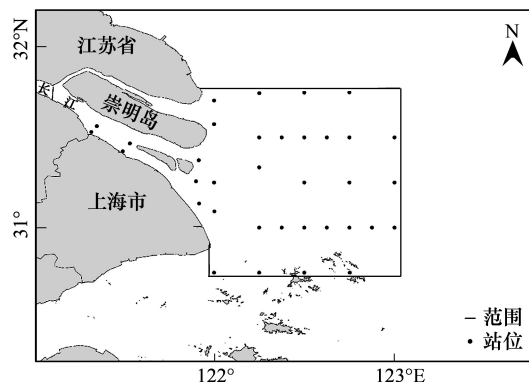


图 1 研究区域与站位分布图

Fig.1 The study area and sampling sites

最新结果显示,长江口海域生态环境状况仍然较差,环境污染问题较为突出^[16]。

1.2 数据来源及处理

研究所用数据均为 2013 年、2015 年和 2017 年 8 月份长江口海域生态环境监测数据。由于不同指标的量级不同,在评价之前首先对数据进行标准化处理,标准化公式如下:

(1) 当评价指标为正指标

$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{1}$$

(2) 当评价指标为负指标

$$p_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{2}$$

式中, P_{ij} 为各指标标准化结果, X_{ij} 为实际数值, $X_{\max}$, $X_{\min}$ 分别代表最大值和最小值。将标准化后的属性数据在 ArcGIS 中利用普通克里金插值转换为空间栅格数据,得到指标的空间化数据。

1.3 指标体系构建方法

本研究依据脆弱性定义以及国内外研究的相关成果从生态暴露度、生态敏感性和生态适应能力 3 个方面,构建 11 个指标作为初选指标,为减少评价指标间的相关性,避免由于指标重复导致评价结果的准确性降低,本研究采用主成分分析方法对评价指标进行筛选,空间主成分分析在 ArcGIS 中实现。空间主成分分析是基于 GIS 的统计方法,其优点是将众多指标参数通过正交变换去除关联指标,但仍能保持所提供大量原有信息的方法,从一定程度避免了指标选择的主观性^[17]。本研究通过主成分分析,去除对主成分贡献较小的指标石油类浓度、浮游动物密度及鱼卵密度,最终评价指标由 8 个指标构成(表 1)。

表 1 长江口海域生态环境脆弱性评估指标

Table 1 The ecological vulnerability index in the Yangtze River estuary

目标层 Target layer	第一层 Level 1	第二层 Level 2	第三层 Level 3
脆弱性指数 Eco-environmental vulnerability index, EVI	生态暴露度	环境质量	化学需氧量(+)
			溶解氧浓度(-)
			无机氮浓度(+)
			活性磷酸盐浓度(+)
			悬浮物含量(+)
	生态敏感性	生态系统结构	浮游植物密度(-)
			底栖生物密度(-)
	生态适应能力	抗干扰能力	叶绿素 a 浓度(-)

“+”表示脆弱性正指标,“-”表示脆弱性负指标

一般地,在主成分分析过程中,选取方差累积贡献率大于 95%的主成分作为计算指标^[18]。本研究选取前 5 个主成分作为研究区域生态环境脆弱性的计算指标进行分析。前三主成分特征值见表 2。

1.4 指标权重的确定

本研究采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)确定评价指标的权重,首先根据前五个主成分方差贡献率确定各主成分之间的重要性,其次两两比较各主成分之间的关系,确定各主成分相对的得分值,然后在 Yaahp 软件中计算不同指标的权重,最后进行一致性检验,若检验结果为随机一致性比率(CR)小于 0.1,表明各指标权重计算结果合理^[19]。本研究前 5 个主成分的权重见表 3。

1.5 脆弱性指数及分类方法

根据 Wang 等脆弱性生态环境定量评价方法^[10],对研究海域每个像元计算脆弱性指数(Eco-environmental vulnerability index, EVI),计算公式:

$$EVI = \sum_{i=1}^n w_i f_i \tag{3}$$

式中, EVI 为生态环境脆弱性指数, w_i 为评价指标的权重, f_i 为评价指标的等级。

表 2 长江口海域生态环境脆弱性评估指标前三主成分特征值

Table 2 The eigenvalues of the first three principal component of the indices

评估指标 Assessment index	主成分分析结果 The results of principal component analysis								
	2013			2015			2017		
	PCA1	PCA2	PCA3	PCA1	PCA2	PCA3	PCA1	PCA2	PCA3
底栖生物 Benthonic organism	0.11	0.23	0.15	0.05	-0.36	0.09	0.19	-0.34	0.20
叶绿素 a Chlorophyll a	0.28	-0.46	0.15	0.16	0.21	-0.08	0.11	-0.07	0.04
化学需氧量 Chemical oxygen demand	0.04	-0.11	0.01	0.38	0.06	-0.46	0.22	0.30	-0.32
溶解氧 Dissolved oxygen	0.23	-0.39	0.25	0.04	-0.28	0.37	0.13	0.30	0.83
无机氮 Inorganic nitrogen	0.70	0.48	-0.09	0.52	-0.13	0.24	0.64	0.02	-0.20
浮游植物 Phytoplankton	0.27	-0.42	-0.02	0.10	-0.04	0.21	0.13	0.03	0.16
活性磷酸盐 Reactive phosphate	0.45	-0.14	-0.57	0.47	-0.27	0.21	0.55	-0.47	0.11
悬浮物 Suspended substance	0.28	0.20	0.73	0.42	-0.16	-0.11	0.30	0.19	-0.13

表 3 长江口海域生态环境脆弱性评估指标各主成分权重

Table 3 The weight of Principal component of the indices

年 Year	主成分 Principal component				
	第 1 主成分 PCA1	第 2 主成分 PCA2	第 3 主成分 PCA3	第 4 主成分 PCA4	第 5 主成分 PCA5
2013	0.7552	0.1093	0.091	0.026	0.0185
2015	0.8598	0.0914	0.038	0.0074	0.0034
2017	0.7152	0.1204	0.0936	0.0548	0.016

根据 Liu 等研究方法^[6], 本研究计算了区域综合脆弱性等级指数 (Regional integrated eco-environmental vulnerability grades, RIEVG), 计算公式:

$$RIEVG = \sum_i^m G_i \times \frac{A_i}{S_i} \quad (4)$$

式中, RIEVG 为区域综合脆弱性等级, G_i 为 i 区域脆弱性评价等级, A_i 为 i 脆弱性等级对应的面积, S_i 为区域总面积。

本研究在 ArcGIS 软件中, 利用 Reclassify 函数, 采用自然断点法 (Natural Breaks (Jenks)) 将脆弱性等级分为 5 级。

2 结果与分析

2.1 长江口海域生态环境脆弱性分级

2013—2017 年, 长江口海域生态环境脆弱性指数 (EVI) 均值在 0.5—1.5 之间, 平均值为 1.2, 其中 0.6、1.1、1.3 是频率分布较多的 EVI 值。脆弱性等级分级为: 微度脆弱 (<0.5)、轻度脆弱 (0.5—0.8)、中度脆弱 (0.8—1.0)、重度脆弱 (1.0—1.2)、极度脆弱 (1.2—1.5)。不同的脆弱度面积占比不同, 2013—2017 年, 极度脆弱度区域面积减少, 微度和中度脆弱度区域面积增加 (见表 4)。

2.2 长江口海域生态环境脆弱性时空分布

2013 年, 长江口海域生态环境脆弱度主要以极度脆弱和重度脆弱为主, 空间分布上, 长江口门内为极度脆弱区, 尤其是长江口南支海域脆弱性普遍较高, 面积约为 2039 km², 占本次评价海域面积的 15%。微度脆弱区和轻度脆弱区均分布在长江口门外部海域。2015 年, 极度脆弱区、重度脆弱区仍主要分布于长江口南支海域, 北支重度脆弱性分布区域减少; 2017 年, 长江口海域极度脆弱区和重度脆弱区分布面积显著减少, 北支海域逐渐转为中度脆弱区, 南支海域极度和重度脆弱区普遍南移, 主要分布于上海市南汇嘴两侧近岸海域, 与操文颖等人的研究结果基本一致^[15]。总体上, 长江口海域生态环境脆弱度从口内向口门外逐渐降低, 呈显著

的梯度变化(图 2)。

表 4 长江口海域生态环境脆弱度等级及分布面积占比										
Table 4 The total area and the proportion of different eco-environmental vulnerability level in Yangtze River estuary										
脆弱性等级	EVI 值 EVI value	栅格数 Raster number	2013			2015			2017	
			面积 Area/km ²	占总面积比 Percent of total area/%	栅格数 Raster number	面积 Area/km ²	占总面积比 Percent of total area/%	栅格数 Raster number	面积 Area/km ²	占总面积比 Percent of total area/%
微度 Potential	<0.5	24795	2324	17	27986	4830	36	24269	4238	32
轻度 Light	0.5—0.8	26680	2660	20	17829	3892	29	16342	3157	24
中度 Medium	0.8—1.0	17382	3247	24	8379	1373	10	20192	2795	21
重度 Heavy	1.0—1.2	14265	3033	23	23086	1465	11	19340	2066	16
极度 Very heavy	1.2—1.5	12478	2039	15	28642	1735	13	25107	1020	8

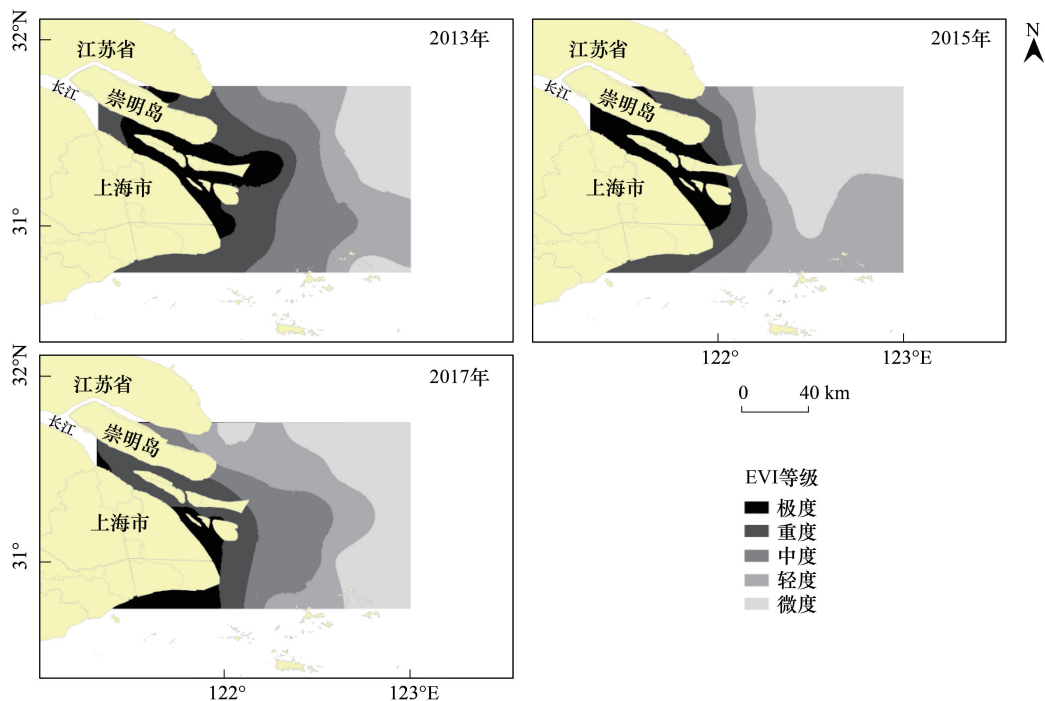


图 2 长江口海域生态环境脆弱度空间分布

Fig.2 Spatial distribution of the eco-environmental vulnerability in Yangtze River Estuary

EVI:生态环境脆弱性指数,Eco-environmental vulnerability index

2.3 近 5 年长江口海域生态环境脆弱度变化趋势

对 2013 年至 2017 年近 5 年长江口海域生态环境脆弱度趋势分析表明,近五年,长江口海域极度和重度脆弱区面积占比显著减少,极度脆弱区、重度脆弱区面积占比分别下降了 7%和 5%。微度脆弱区面积增加趋势显著,相比于 2013 年,2015 年和 2017 年分别增加了 19%和 15%。中度和轻度脆弱区面积变化不大(图 3)。

对 2013 年至 2017 年长江口海域生态环境区域综合脆弱性等级 (Regional integrated eco-environmental vulnerability grades,RIEVG)分析表明(图 4),RIEVG 值 2013 年最大,2015 年和 2017 年显著减小,2013 年、2015 年及 2017 年,RIEVG 分别为 2.98、2.35、2.43。近五年区域脆弱性等级下降了 18%,极度脆弱区和重度脆弱区显著减少对区域总体脆弱性下降贡献较高,表明长江口生态环境状况好转。

2.4 近 5 年长江口海域生态环境脆弱区转化矩阵分析

近五年长江口生态环境脆弱度存在显著变化,表现为极度脆弱区和重度脆弱区面积显著减少,2013 年到

2015 年,约 661 km²极度脆弱区转变为其他类型的区域,约 1500 km²重度脆弱区转变为中度、轻度和微度脆弱区(表 5)。2015 年到 2017 年,长江口区域脆弱性进一步改善,约 1200 km²的极度脆弱区转变为中度和重度脆弱区(表 6)。

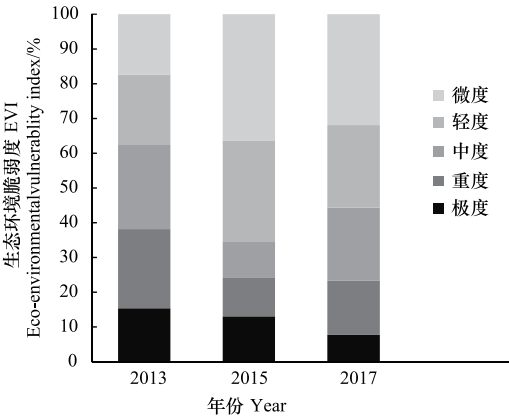


图 3 近五年长江口海域生态环境脆弱度变化趋势
Fig.3 The changing trend of percentages of vulnerability grades in the last five years

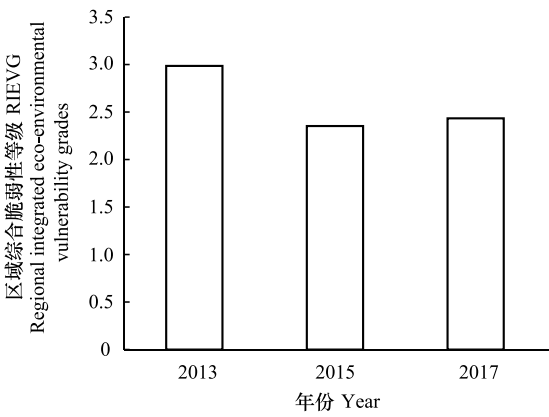


图 4 近五年长江口海域生态环境综合脆弱性等级变化趋势
Fig. 4 The changing trend of regional integrated eco-environmental grade (RIEVG) values in the past five years

表 5 2013—2015 年长江口海域生态环境脆弱区转换矩阵

2013		2015				
		微度脆弱区 Potential	轻度脆弱区 Light	中度脆弱区 Medium	重度脆弱区 Heavy	极度脆弱区 Very heavy
微度脆弱区	Potential	1838.8	480.1	0.0	0.0	0.0
轻度脆弱区	Light	1163.6	1492.5	0.0	0.0	0.0
中度脆弱区	Medium	1498.9	1552.9	188.9	0.0	0.0
重度脆弱区	Heavy	235.5	221.2	1047.7	1170.3	352.3
极度脆弱区	Very heavy	88.7	141.1	136.8	294.4	1378.3

表 6 2015—2017 年长江口海域生态环境脆弱区转换矩阵

2015		2017				
		微度脆弱区 Potential	轻度脆弱区 Light	中度脆弱区 Medium	重度脆弱区 Heavy	极度脆弱区 Very heavy
微度脆弱区	Potential	2232.5	1647.9	922.3	0.0	0.0
轻度脆弱区	Light	1915.3	1090.4	880.3	0.0	0.0
中度脆弱区	Medium	72.0	236.1	688.3	316.5	58.4
重度脆弱区	Heavy	0.0	182.6	254.6	553.9	473.0
极度脆弱区	Very heavy	0.0	0.0	44.0	1195.7	488.6

3 讨论

生态系统的脆弱性具有定量和定性两方面的特征,并且是一个复杂的持续变化的过程^[20-22],近年来,生态环境脆弱度被广泛应用于局域生态环境受损程度及主要威胁要素的评估^[23-26]。目前脆弱性评价指标体系中,有关外部压力指标的选择更多考虑人口分布密度和经济发展总量^[27-28],并赋以较高的权重。但是,人类活动对生态系统的影响并非全是负面,往往也有正向的促进作用^[11]。对于海洋生态系统而言,海域空间并无

直接的人口密度压力,人类活动的干扰更多体现在陆源污染物汇入到海洋生态系统造成的间接影响。因此,对于海洋生态系统脆弱性评价,选择经济发展总量或人口密度等指标可能会放大外部压力,导致脆弱性评价结果受主观性影响较大。同时,大多数陆源污染通过多种传播途径(河流、大气等)最终汇聚到海洋生态系统中,随着海洋潮汐及洋流的变化处于动态变化中^[2]。从而表明海洋生态系统的脆弱性具有动态变化的特点。本研究指标的构建主要从生态系统内部考虑,通过分析主要污染物质迁入对生态环境造成的影响,从海洋生态环境基本状况和生态系统结构入手,选择主要监测指标作为评估指标,一定程度上避免了过度考虑经济指标对评估的不利影响。

评估结果表明,长江口门内生态环境脆弱度最高,重度脆弱区和极度脆弱区均分布于长江口门内南支海域,而造成该区域脆弱性较高的主要因素是氮、磷等污染物浓度高所导致,这与王保栋、张勇等人的研究结果基本一致^[29-30]。表明长江流域污染物输入是导致河口地区生态环境脆弱度高的主要原因。同时,由于近年来长江流域水沙输入的变化,以及全球气候变化下河口区湿地生态系统萎缩^[31],降低了河口生态系统的生态服务功能。通过近 5 年数据分析发现,长江口门内生态系统的初级生产力较低,浮游生物物种密度年间变幅较大,生态系统结构不稳定,表明该海域生态系统弹性力降低,也进一步加剧了该区域生态环境的脆弱性。

从近 5 年脆弱性变化趋势来看,长江口生态环境脆弱度具有空间变化的特点,脆弱性等级从口门内到口门外呈显著的梯度变化。长江口海域极度脆弱区和重度脆弱区面积显著减少,口门内大部分海域从极度脆弱区降为重度脆弱区,表明近 5 年长江口生态环境脆弱度得到改善。由于受台湾暖流北上制约,口门内污染物扩散受到一定程度的抑制,长江口悬浮物和污染物分布主要局限于近岸一带(123°以西)^[30],同时黄浦江径流携带的氮磷、以及上海近岸、杭州湾污染物共同作用,导致长江口南汇嘴海域脆弱度增加,近 5 年长江口南支极度脆弱区移向南汇嘴至杭州湾北岸海域。研究表明,从 20 世纪 80 年代开始,长江口从低度富营养化水平逐渐上升到高度富营养化水平,随之导致了长江口生态系统结构发生了一系列变化,加速了河口区域的脆弱度^[29]。因此,导致长江口生态环境脆弱度较高的主导因素是人类活动的干扰所致,加大对长江口海域重要生态系统的保护以及流域污染物减排是改善该区域脆弱度的重要手段。

4 结语

总体上,生态脆弱性评估是认识区域生态环境问题的主要方法,通过 GIS 技术结合空间主成分分析方法和层次分析法,可以避免过多依赖于专家打分而可能造成的主观影响。然而,在生态系统水平上,脆弱性评价仅能辨识关键的影响因素,但就外部压力如何影响生态系统结构与过程,影响程度如何等更为深层次的问题,目前脆弱性评估方法仍然难以解决。因此,将来脆弱性评估研究首先应进一步夯实脆弱性评估的理论基础,在此基础上,拓展脆弱性评估的方法;其次,进一步探讨不同尺度脆弱性定量评估的方法,使得脆弱性评估从定性向定量评估发展。另外,本研究仅是对短期内长江口生态系统脆弱性变化趋势的评估,也未考虑气候变化对生态系统造成的影响。因此,结合气候变化,应进一步开展长江口中长期生态脆弱性评估研究,进一步理解大河口区域人类活动与气候变化双重压力下生态系统运维机制及其主导因素。

参考文献(References):

- [1] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [2] Zacharias M, Gegr E J. Sensitivity and vulnerability in marine environments: an approach to identifying vulnerable marine areas. *Conservation Biology*, 2005, 19(1): 86-97.
- [3] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, Folke C, Walker B. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 2001, 413(6856): 591-596.
- [4] IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D. J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy,

- S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014: 1-32.
- [5] De Lange H J, Sala S, Vighi M, Faber J H. Ecological vulnerability in risk assessment — A review and perspectives. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(18): 3871-3879.
- [6] Liu D, Cao C X, Dubovyk O, Tian R, Chen W, Zhuang Q F, Zhao Y J, Menz G. Using fuzzy analytic hierarchy process for spatio-temporal analysis of eco-environmental vulnerability change during 1990- 2010 in Sanjiangyuan region, China. *Ecological Indicators*, 2017, 73(2): 612-625.
- [7] Enea M, Salemi G. Fuzzy approach to the environmental impact evaluation. *Ecological Modelling*, 2001, 136(2/3): 131-147.
- [8] 郝永红, 周海潮. 区域生态环境质量的灰色评价模型及其应用. *环境工程*, 2002, 20(4): 66-68.
- [9] Park Y S, Chon T S, Kwak I S, Lek S. Hierarchical community classification and assessment of aquatic ecosystems using artificial neural networks. *Science of the Total Environment*, 2004, 327(1/3): 105-122.
- [10] Wang X D, Zhong X H, Liu S Z, Liu G W, Wang Z Y, Li M H. Regional assessment of environmental vulnerability in the Tibetan Plateau: development and application of a new method. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(10): 1929-1939.
- [11] 廖富强, 刘影, 叶慕亚, 郑林. 鄱阳湖典型湿地生态环境脆弱性评价及压力分析. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(1): 133-137.
- [12] Zou T H, Yoshino K. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal components approach in the Daxing'anling region, China. *Ecological Indicators*, 2017, 78(7): 405-415.
- [13] 陈吉余, 陈沈良. 近 20 年来长江口生态环境变化. *净水技术*, 2002, 21(S1): 1-3.
- [14] 单秀娟, 钱薇薇, 武云飞. 长江河口生态系统鱼类浮游生物生态学研究进展. *海洋湖沼学报*, 2004, 48(4): 87-93.
- [15] 操文颖. 长江口“健康状况”诊断研究//第三届湖北科技论坛水利分会学术研讨会论文集. 武汉: 湖北省水利学会, 2005: 174-179.
- [16] 中华人民共和国生态环境部. 2017 年中国生态环境状况公报. 2018: 33-34.
<http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201805/P020180531534645032372.pdf>
- [17] 刘正佳, 于兴修, 李蕾, 黄玫. 基于 SRP 概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2084-2090.
- [18] 徐庆勇, 黄玫, 陆佩玲, 李仁强. 基于 RS 与 GIS 的长江三角洲生态环境脆弱性综合评价. *环境科学研究*, 2011, 24(1): 58-65.
- [19] 黄方, 刘湘南, 张养贞. GIS 支持下的吉林省西部生态环境脆弱态势评价研究. *地理科学*, 2003, 23(1): 95-100.
- [20] 沈珍瑶, 杨志峰, 曹瑜. 环境脆弱性研究述评. *地质科技情报*, 2003, 22(3): 91-94.
- [21] 刘康, 欧阳志云, 王效科, 徐卫华, 苗鸿. 甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布. *生态学报*, 2003, 23(12): 2711-2718.
- [22] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究. *生态学报*, 2000, 20(1): 9-12.
- [23] 王效科, 欧阳志云, 肖寒, 苗鸿, 傅伯杰. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究. *生态学报*, 2001, 21(1): 14-19.
- [24] 李东梅, 吴晓青, 于德永, 高正文, 吴钢. 云南省生态环境敏感性评价. *生态学报*, 2008, 28(11): 5270-5278.
- [25] 潘竟虎, 董晓峰. 基于 GIS 的黑河流域生态环境敏感性评价与分区. *自然资源学报*, 2006, 21(2): 267-273.
- [26] 陈杰, 欧阳志云, 郑华, 徐卫华. 淮河流域脆弱生态区生态系统特征及区划. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(10): 169-174.
- [27] 肖荣波, 欧阳志云, 王效科, 赵同谦. 中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析. *生态学杂志*, 2005, 24(5): 551-554.
- [28] 黄宝荣, 欧阳志云, 张慧智, 张利华, 郑华. 海南岛生态环境脆弱性评价. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 639-646.
- [29] 王保栋. 长江口及邻近海域富营养化状况及其生态效应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006: 62-77.
- [30] 张勇. 基于 GIS 的长江口及邻近海域环境时空多维分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 41-63.
- [31] 崔利芳, 王宁, 葛振鸣, 张利权. 海平面上升影响下长江口滨海湿地脆弱性评价. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 553-561.