

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.01.009

黄河河口区生态系统健康评价指标体系探讨

牛明香^{1,2,3}, 王 俊^{1,2,3}

(1. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:在探讨河口生态系统特征和健康内涵的基础上,从生态系统健康的完整性出发寻求河口生态系统健康评价的适宜指标。根据河口生态系统健康评价指标体系构建原则,在充分考虑黄河河口区生态特征的基础上,基于“压力-状态-响应 (pressure-state-response, PSR)”模型,从黄河河口区的生物生态、环境质量、社会经济、管理措施和人类健康等方面筛选出 50 个评价指标,并对每个指标的获取方式和计算方法进行了详细说明,构建了黄河河口区生态系统健康评价指标体系。该指标体系是一个由目标层、子系统、准则层、指标层构成的 4 层递阶层次指标体系结构。

关键词:生态系统健康评价;指标体系;PSR 模型;黄河河口

中图分类号:X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)01-0057-07

Discussion over health assessment indicator system of ecosystem in Yellow River estuary area

NIU Mingxiang^{1,2,3}, WANG Jun^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Qingdao 266071, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Ecological Environment (SFREE), Qingdao 266071, China; 3. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the discussion over the characteristic and health connotation of estuary ecosystem, the appropriate indices for estuary ecosystem health evaluation from the view of ecosystem integrity were created. With comprehensive consideration of the actual status of the Yellow River estuary ecosystem, on the basis of the PSR (pressure-state-response) model, 50 indices were selected from the evaluation indices including biological ecology, environmental quality, social economy, management measures and human health of the study area, according to the principle of building estuary ecosystem health evaluation indicator system. In addition, the acquisition ways and calculation methods were detailed explained for these indices, then an index system appropriate for the evaluation of Yellow River estuary ecosystem health was established. This system is a four-layer hierarchy-structured index system involving the target layer, the subsystem layer, criterion layer and the evaluation index layer.

Key words: ecosystem health evaluation; indicator system; PSR model; Yellow River Estuary

受人类活动和气候变化的影响,全球性的环境问题不断出现,国际社会对环境的评价也从单纯的物理化学指标、单一物种或种群的监测评价扩展到对整个生态系统健康状况的评价^[1],生态系统健康已成为全球环境管理的新目标。河口生态系统是流域和海洋物质交换的主要通道,各种过程(物理、化学、生物和地质过程)耦合多变^[2];同时河口区域也是人口密集、经济发达地区^[3]。在自然变化和非理

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303050);黄海水产研究所级基本科研业务费(20603022013001)
作者简介:牛明香(1977—),女,助理研究员,博士,主要从事生态系统健康、渔业生物环境与生态研究。E-mail:nmx77@163.com
通信作者:王俊,研究员。E-mail:wangjun@ysfri.ac.cn

性人类活动的双重压力下,河口生态环境遭受严重破坏,其生态系统健康状况备受国内外科学家的关注^[4-7]。目前,对河口生态系统健康的研究主要集中在概念及内涵的界定、评价指标的选择和评价模型以及评价方法的确定等方面。指示物种法和指标体系法是河口生态系统健康评价的常用方法,基于多指标综合的指标体系法可以全面、系统地反映河口生态系统的状态,并且易于将人类的影响纳入评价中,是目前河口生态系统健康评价的主要方法^[8-9]。科学合理的评价指标体系是河口生态系统健康评价的关键。本研究借鉴国内外的成功经验和最新研究成果,基于“压力-状态-响应”(pressure-state-response, PSR)模型,构建涵盖生物生态、环境质量、社会经济、管理措施和人类健康等方面的黄河河口区生态系统健康评价模型,根据研究区的生态状况和社会经济发展,筛选出河口区生态系统健康评价指标,构建评价指标体系,为客观评价河口生态系统健康状况提供研究基础和方法借鉴。

1 河口生态系统特征及健康内涵

河口是流域和海洋物质交换的主要通道,受陆地和海洋的交互作用,它是融淡水生态系统、海水生态系统、咸淡水混合生态系统、潮滩湿地生态系统、河口岛屿和沙洲湿地为一体的复杂生态系统^[10],是社会-经济-自然复合生态系统的组成部分之一^[11-12]。河口处在流域的最下游,来自流域、河口海岸带和海洋的自然压力和人类活动的压力共同影响着河口生态系统的健康状况^[13],应在整体水平上考虑各因素之间的交互影响^[14]。由此,着眼于生态系统的完整性,河口生态系统健康评价范围不能仅限于河口水域。本研究从广义上定义河口生态系统,包括河口水域及毗邻的陆域生态系统和海洋生态系统。

目前,对河口生态系统健康内涵的认识尚不统一。广泛受到学术界认可的生态系统健康概念是McMichael等^[15]提出的,认为一个健康的生态系统对外界的压力必须有恢复力,保持内部结构和组织的多样性和稳定性,保持新陈代谢的能力。根据McMichael等^[15]及他人^[7,14,16]论述,本研究将健康的河口理解为系统内的关键生态组分和有机组织完整且没有疾病,受突发的自然或人为扰动后能保持原有的功能和结构,物质循环和能量流动未受到损害,整体功能表现出多样性、复杂性和活力,且能满足人类合理需求和社会经济发展的要求。

2 研究区概况

黄河是世界上含沙量最高的河流,也是我国北

方最大的河流,每年向渤海输入巨量的淡水、泥沙和各种营养盐类。黄河入海口位于渤海西南岸,处在渤海湾与莱州湾之间。黄河携带的大量泥沙在入海口处沉积形成全国最大的三角洲——黄河三角洲,也是世界上暖温带保存最广阔、最完善、最年轻的湿地生态系统。与黄河河口淤积延伸、摆动改道演变直接有关的海域称为黄河三角洲海域,海水温度、盐度受大陆气候和黄河径流影响较大,生物资源丰富。研究区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,季风影响显著,冬寒夏热,四季分明。20世纪80年代以来,黄河断流,黄河水入海量锐减,河口冲淤、油田开发建设、三角洲开发、捕捞强度增大及海水养殖面积迅速扩增等多种因素的影响,使黄河口及邻近海域生态环境面临严重威胁。

为便于健康评价指标如经济指标、人口指标等的统计,以临海的东营市河口区、东营区和垦利县的行政区域、黄河河口及相邻海域为研究范围。

3 评价指标体系构建原则

评价指标是度量河口生态系统特征的参数,指标的选取对客观评价河口生态系统健康状况起着决定性的作用,因此,在构建河口生态系统健康评价指标体系时,必须遵循以下原则^[12,17-19]。

3.1 科学性原则

评价指标的选择、数据的获取与计算都要建立在科学的基础上,选取的评价指标既能科学、系统、公正地评价河口生态系统健康状况,又要基于现有的技术水平。指标概念、意义明确,能够客观地反映黄河河口区生态系统的特征。

3.2 整体性原则

本研究的黄河河口区生态系统包含黄河口水域及其相邻陆地和海域,是复杂的自然-社会-经济复合生态系统,受自然因素和人为因素的共同影响。各子系统、各因素之间相互作用、相互影响,因此评价指标体系既要从反映黄河河口区自然状况的物理、化学、生物等因素和体现河口功能的指标以及反映人类活动的社会经济指标等多方面综合考虑,又要避免指标之间的重叠,使评价目标与评价指标有机地联系起来,组成一个层次分明的整体。

3.3 代表性与敏感性原则

构建的指标体系应能全面反映河口生态系统的主要特征。在众多指标中,应选择具有代表性的指标,能从不同角度表征河口生态系统的健康状况,且具有实际指示意义,体现区域的生态变化过程。指标能响应生态系统某一层面的变化,用于说明河口生态系统健康状况变化的原因。

3.4 规范化原则

河口生态系统健康评价是一项长期性工作,采用的数据和资料无论在时间上还是空间上都应具有可比性,因而,选择的指标内容和评价标准都应做到统一和规范。选用的指标尽可能与现行国际指标接轨,指标的逻辑结构符合生态系统的客观结构。

3.5 简明性与可操作性原则

选取的评价指标概念明确、易于理解和获取。指标的选择应考虑现有的生产力水平和技术水平,在方法、人力和物力上均应切实可行。

3.6 动态与稳定性原则

河口生态系统具有很强的时空特征,健康评价指标的选取随着时空变动而不同;但同时应具有稳定的测定周期,便于比较其变化。

3.7 定性与定量相结合的原则

河口属于复合生态系统,具有复杂多变的特点,健康是包含很多因素的复杂概念,不能简单地定量化,因此应综合定性指标和定量指标,进行综合评价。

4 生态系统健康评价指标体系的建立

4.1 PSR 模型概念框架

PSR (press-state-response) 模型是 20 世纪 80 年代由 OECD 和 UNEP 共同发展起来的环境问题研究框架体系,体现了人与自然生态系统中各种因素之间的因果关系,回答了“发生了什么、为什么发生、我们将如何做”三个可持续发展的基本问题,是目前生态系统健康评价研究中指标体系构建的主要方法。该模型包括压力、状态、响应三部分,压力子模型表征来自自然界和人类的压力、正向和负向的驱动力,是引起系统改变的外在因素;状态子模型是系统在遭受外界干扰后呈现的状态改变,是系统改变的内在因素;响应子模型是系统在功能发生改变后做出的反映。本研究选取 PSR 模型作为黄河河口区生态系统健康评价指标体系的构建模式(图 1)。

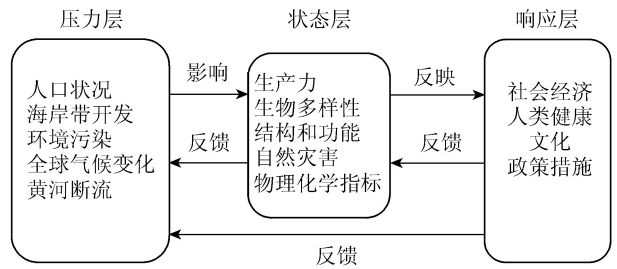


图 1 压力-状态-响应模型的框架结构

4.2 生态系统健康评价指标体系

基于评价指标体系构建原则和 PSR 模型,全面分析研究区的生态特征,按目标层-子系统-准则层-

指标层构建了黄河河口区生态系统健康评价指标体系,共包含 50 个评价指标(表 1)。

4.2.1 压力指标

影响黄河河口区生态系统的压力主要包括对环境起驱动作用的人类活动和自然变化,反映某一特定时期内的资源利用强度及其变化趋势。研究区内石油开采、农业开垦及非农业建设等开发活动使黄河三角洲和海域遭受不同程度的生态破坏和环境污染,造成湿地水资源生态调蓄功能减弱、植被退化、面积萎缩;浅海和滩涂养殖的盲目扩大干扰并破坏了重要经济繁育场的环境条件,饵料等废弃物的大量排放促进了海域无机氮浓度过高;过度捕捞致使主要传统经济鱼类资源全面衰退,海洋生物资源结构破坏严重。全球气候变化下,气温上升,降水减少,黄河断流,严重影响了区域的水循环,黄河三角洲“失退”现象正在发生^[20]。

根据黄河河口区的生态特征及问题分析,借鉴相关研究成果^[21-24],确定黄河河口区生态系统健康的压力主要来自陆源污染、海岸带开发及自然变化和人口压力。陆源污染指标主要包括工业废水排放和城市污水处理指标、反映土壤污染状况的农药和化肥使用指标;海岸带开发主要考虑土地利用、海洋捕捞、滩涂开发、浅海养殖和油田建设等,其中土地利用以人类干扰度指数表示,滩涂开发以人工盐田指数和养殖用地指数表示;自然压力包括黄河断流天数、黄河入海年径流量、气温、降水指标等;研究区的人口压力以人口密度表征。

4.2.2 状态指标

状态指标描述了黄河河口区生态系统的现状,包括生产力、生物多样性、结构和功能以及物理化学等因素。

生产力因素表明了生态系统的生产能力,是一切生态系统存在的物质基础;由于研究区包括陆地生态系统和海域生态系统,因此通过 NDVI 值代表的植被覆盖率表达陆地区域的生产力水平,通过 Chl-a 浓度表征海域的浮游生物生产力水平。生物多样性描述了生态系统中物种的丰富程度,体现了生态系统的复杂性,对维护生态系统的稳定具有重要作用;景观多样性是指不同类型的景观在空间结构、功能机制和时间动态方面的多样性和变异性^[25],是人类活动与自然因素综合作用的结果,在区域尺度能很好地反映湿地的生物多样性;本研究以湿地景观多样性、滩涂生物多样性、鱼类生物多样性、底栖生物多样性和浮游生物多样性等多个指标表征研究区不同生态类型的生物多样性。

表 1 黄河河口区生态系统健康评价指标体系				
目标层	子系统层	准则层	指标层	指标来源
黄河河口生态系统健康评价	压力指标	人口压力	人口密度	统计资料
			工业废水排放达标率	统计资料
			生活污水处理率	统计资料
		陆源污染	农药施用强度	统计资料
			农用化肥施用强度	统计资料
			人类干扰度指数	据 OLI 解译计算
		海岸带开发	人工盐田指数	据 OLI 解译计算
			养殖用地指数	据 OLI 解译计算
			浅海养殖面积	统计资料
			海洋捕捞产量	统计资料
			油田建设占用面积	统计资料
		自然压力	黄河断流天数	统计资料
			黄河入海年径流量	统计资料
			降水	统计资料
			气温	统计资料
	状态指标	生产力	陆地区域 NDVI 指数	据 OLI 计算
			河口及邻近海域叶绿素浓度	NASA modis Level3 级数据提取
		生物多样性	陆地景观多样性指数	据 OLI 计算
			滩涂生物多样性指数	据实地调查数据计算
			鱼类生物多样性指数	据实地调查数据计算
			底栖生物多样性指数	据实地调查数据计算
			浮游动物多样性指数	据实地调查数据计算
		结构和功能	湿地面积指数	据 OLI 解译计算
			天然湿地面积指数	据 OLI 解译计算
			林草覆盖率	据 OLI 解译计算
			裸地指数	据 OLI 解译计算
			陆地景观破碎度指数	据 OLI 解译计算
			湿地退化指数	据 OLI 解译计算
			海岸侵蚀	据 OLI 解译计算
			平均弹性度指数(陆地区域)	据 OLI 解译计算
			水文调节指数(陆地区域)	据 OLI 解译计算
			滩涂生物量	实地调查
			鱼类生物量	实地调查
	响应指标	自然灾害	年度河口及邻近海域赤潮发生天数	统计资料
			年度河口及邻近海域赤潮发生面积	统计资料
		物理化学	河口及邻近海域化学需氧量	实地取样分析
			河口及邻近海域石油类	实地取样分析
			河口及邻近海域溶解氧	实地取样分析
			河口及邻近海域无机氮	实地取样分析
			河口及邻近海域活性磷酸盐	实地取样分析
			河口及邻近海域有机污染物	实地取样分析
		经济	人均 GDP	统计资料
			GDP 增长率	统计资料
			海洋经济比重	统计资料
		人类健康	人口健康状况	统计资料
	文化	国民受教育程度	国民受教育程度	统计资料
			环保认知程度	抽样统计
		政策法规贯彻力度	政策法规贯彻力度	定性
			保护区建设投入	统计资料
	政策措施	生态恢复工程	生态恢复工程	据 OLI 解译计算

注：OLI:Operational Land Imager,Landsat-8 卫星遥感数据。

结构和功能指标表明生态系统中不同类型的组成及其服务和产出功能。以湿地面积指数、天然湿

地面积指数、林草覆盖率、裸地指数、陆地景观破碎度表示黄河三角洲景观的结构组成;湿地退化指数和海岸侵蚀两个动态指标强调了湿地变化的过程和演替特点;滩涂生物量和鱼类生物量表达系统的食物自然产出功能;平均弹性度指数表示系统结构与功能的稳定性,是一个生态系统是否健康的重要指示;水文调节指数表明了湿地的蓄水能力。河口及邻近海域赤潮发生会导致鱼类及其他海洋生物因缺氧死亡,同时释放出大量有害气体和毒素,严重污染环境,使海洋的正常生态系统遭受严重破坏,因此,以河口及邻近海域每年赤潮发生天数表示自然灾害。

物理化学指标用于衡量河口及邻近海域生态系统的非生物环境状况。考虑研究区的生态特点及数据的获得性,确定将河口及邻近海域的化学需氧量、石油类、溶解氧、无机氮、活性磷酸盐和有机污染物等指标用于黄河河口区生态系统健康评价。

4.2.3 响应指标

响应指标反映了社会或个人为了改变或预防不利于人类生存和发展的生态环境而做出的改变,主要考虑社会经济、人类健康、文化、政策措施等因素。社会经济指标包括人均 GDP、GDP 增长率和海洋经济比重,人均 GDP 和 GDP 增长率综合反映了区域的人均消费能力和经济增长活力,海洋经济比重表示海洋经济占区域经济的重要程度和海洋开发强度。人类健康指标以人口健康状况表示,表达区域环境对人类健康的影响。以国民受教育程度和对环境保护的认知程度表示文化层指标,以政策法规的贯彻力度、保护区建设投入和生态恢复工程实施效果表征政策措施指标。

5 评价指标的数据获取

5.1 人口压力指标

人口密度以区域内单位面积的人口数表示(人/km²),包括东营河口区、东营区和垦利县的人口数量和行政区域面积,利用统计年鉴资料即可获得。

5.2 陆源污染指标

工业废水达标排放率(%)、生活污水处理率(%)指研究区内工业和生活污水的处理情况,数据可从相关环保部门统计资料获得。农药施用强度(kg/hm²)、农用化肥施用强度(kg/hm²)分别指每年实际用于农业生产的农药施用量、化肥施用量(包括氮肥、磷肥、钾肥和复合肥)与耕地总面积之比。该数据从统计年鉴和农业部门统计资料获得。

5.3 海岸带开发指标

人类干扰度指数为耕地、建设用地、道路、盐田、

陆地养殖水面面积之和占研究区陆域面积的百分比;人工盐田指数为盐田面积占研究区陆域面积的百分比;养殖用地指数为陆地养殖水面面积占研究区陆域面积的百分比。

以上各地类面积由 OLI 遥感数据解译获取。通过 $V=I_{\text{OLI5}}-I_{\text{OLI3}}$ 模型结合人机交互分析提取养殖水面和盐田的面积;以非监督分类提取耕地、建设用地的面积。其中 I_{OLI3} 、 I_{OLI5} 指第 5 波段、第 3 波段的光谱值。

浅海养殖面积指东营市行政区邻近浅海海域的养殖面积,由东营市海洋与渔业局相关统计数据、东营市统计年鉴等方式获取。海洋捕捞产量指整个渤海的渔业捕捞产量,由《渔业统计年鉴》获得。油田建设占用面积由相关部门的统计资料获取。

5.4 自然压力

表征自然压力的 4 个指标都是常见指标,其中黄河断流天数、黄河入海年径流量由水文观测站获取,降水和气温数据由当地气象部门获取。

5.5 生产力指标

陆地 NDVI 指数由 OLI 数据获取,公式如下:

$$I_{\text{NDVI}} = \frac{I_{\text{OLI5}} - I_{\text{OLI4}}}{I_{\text{OLI5}} + I_{\text{OLI4}}} \tag{1}$$

式中: I_{OLI4} 、 I_{OLI5} 分别为第 4 波段和第 5 波段的光谱值。

河口及邻近海域叶绿素浓度由 NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) 提供的 modis L3 数据提取后获得。

5.6 生物多样性指标

陆地景观多样性指数 H 的计算式为

$$H = - \sum_{k=1}^m (p_k) \log_2(p_k) \tag{2}$$

式中: p_k 为第 k 种景观类型占总面积的比例; m 为陆地区域景观类型的总数。

滩涂生物、鱼类、底栖生物和浮游动物的多样性指数均根据实地调查数据,利用 Shannon-wiener 指数进行计算获得,公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i \tag{3}$$

其中 $P_i = N_i/N$

式中: N_i 为种 i 的个体数; N 为所有物种的个体数之和。

5.7 结构和功能指标

湿地面积指数为盐田、陆地养殖水面、林草地、河流、人工水域、滩涂面积之和占研究区陆域面积的百分率;天然湿地面积指数为林草地、河流、人工水域、滩涂面积之和占研究区陆域面积的百分率;林草

覆盖率为林草地面积占研究区陆域面积的百分率;裸地指数为裸地面积占研究区陆域面积的百分率;陆地景观破碎度为景观的斑块数量与景观的总面积比值;湿地退化指数为天然湿地退化面积占原有天然湿地面积的百分率;海岸侵蚀指数为海岸线退化面积占原有区域总面积的百分率;平均弹性度指数为不同地类面积与相应地类弹性度分值之积累值与研究区陆域总面积的比值,不同地类的弹性度分值参考文献[26-27]获得。

水文调节指数为河流、水库、池塘、沟渠、滩涂面积之和占研究区陆域面积的百分率。

以上各指标中用到的各湿地类型面积均由 OLI 遥感数据提取获得。提取方法见 5.3。

滩涂生物量和鱼类生物量指标由实地调查数据计算获取。

5.8 自然灾害指标

自然灾害指标包括年度内河口及邻近海域赤潮发生天数及面积,从相关的海洋环境报告中即可获得数据。

5.9 物理化学指标

物理化学指标包含的所有指标均属项目水质监测指标,经实地取样后测定分析获得。

5.10 经济指标

人均 GDP 属常规经济数据,GDP 增长率指本年度 GDP 相比对照年度 GDP 的增长速率,海洋经济比重指涉海海洋产品经济收入占总经济的百分比,相关数据由地方统计数据均可获得。

5.11 人类健康指标

以人口健康状况表征,以发病率包括死亡率进行统计计算,数据由地方相关部门获得。

5.12 文化指标

国民受教育程度以初中以上文化程度人口所占的百分比进行统计,利用统计部门数据计算获得;环保认知程度以具有生态保护意识的人口所占百分比表示,通过设计调查表格随机发放获得数据。

5.13 政策措施

政策法规贯彻力度根据区域内相关政策法规的实施状况进行定性评价;保护区建设投入以每年内对保护区建设投入的资金数量表示;生态恢复工程以生态恢复工程实施面积占退化面积的百分比表示,根据 OLI 遥感数据进行信息提取,获得增加的天然湿地面积(林草地、河流、人工水域及滩涂)和退化的天然湿地面积,两者进行比值计算即可获得。

6 结论与讨论

a. 本研究在界定河口生态系统特征及健康内

涵的基础上,针对黄河河口区域这一复杂的自然-社会-经济系统,基于压力-状态-响应(PSR)模型,借鉴相关研究成果,结合研究区域的生态特征和所收集的数据特点及其可获取性等,经过反复筛选与提炼,形成由压力层、状态层、响应层共 50 个具体评价指标组成的综合指标体系。该指标体系包含了人为压力、自然压力、生产力、生物多样性、结构和功能、物理化学指标以及经济、人类健康、文化和政策措施等各个方面,全面反映了人类活动和自然生态系统的响应,充分体现了黄河河口区生态系统健康的现状与水平。基于 PSR 模型的河口生态系统健康评价指标体系,可以直观认识河口在外部压力下的状态改变及其响应,便于决策者识别河口生态系统的变化并制定管理措施。

b. 指标体系构建时应注意如下问题:PSR 模型框架虽然因果关系清晰,为生态系统健康评价指标体系构建提供了明确的指标分类方法,但其难以对所有指标进行严格的分类,如经济指标和文化指标既可以作为对生态系统健康产生影响的压力因子,也可以是生态系统变化后对被生态系统变动所影响的响应因子。因此,实际操作中一定要根据生态系统的演化特征和所处阶段,合理分配评价指标。

c. 在构建的评价指标体系中,不同指标对维护黄河河口区生态系统健康的重要性程度不同,这种差异要通过赋予各个指标不同的权重来体现。权重的确定是进行生态系统健康评价的重要步骤之一,目前的研究中多利用层次分析法(AHP, analytic hierarchy process)^[7-8,28],也可将层次分析法、主成分分析与信息熵赋权法结合^[19,29]确定指标权重。研究目标不同,权重的设定也不同,下一步研究中,应根据研究区的生态特征综合分析,合理设置各评价指标的权重。另外,各指标因子健康分级标准及健康程度确定也是生态系统健康评价的重要环节,研究中需详细分析区域的生态特征,比对历史资料进行确定。

d. 本研究基于 PSR 模型构建的评价指标体系是以研究区现有的生态特征和发展水平为基础的,随着黄河河口区生态系统的自然演变、人类对河口价值期望的改变以及人类对河口科学认知水平的提高,反映河口生态系统健康水平的指标也会发生相应的变化,因此,河口生态系统健康评价指标体系具有动态性和时效性。

参考文献:

[1] 李瑾,安树青,程小莉,等.生态系统健康评价的研究进展[J].植物生态学报,2001,25(6): 641-647. (LI Jin,

AN Shuqing, CHENG Xiaoli, et al. Advances in assessment of ecosystem health [J]. Acta Phytocologica Sinica,2001,25(6): 641-647. (in Chinese))

[2] 刘瑜,杨慧,刘小川,等.基于 PSR 模型的独流减河河口生态系统健康评价[J].环境工程,2014(3): 121-125. (LIU Yu, YANG Hui, LIU Xiaochuan, et al. Health assessment of Duliujianhe River estuary ecosystem based on PSR model [J]. Environmental Engineering,2014(3): 121-125. (in Chinese))

[3] 陈吉余,陈沈良.河口海岸环境变异和资源可持续利用[J].海洋地质与第四纪地质,2002,22(2): 1-7. (CHEN Jiyu, CHEN Shenliang. Estuarine and coastal environment changes and resource sustainable utilization [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(2): 1-7. (in Chinese))

[4] WHITE L, WOLANSKI E. Flow separation and vertical motions in a tidal flow interacting with a shallow-water island[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 77(3): 457-466.

[5] WOLF B, KIEL E, HAGGE A, et al. Using the salinity preferences of benthic macroinvertebrates to classify running waters in brackish marshes in Germany [J]. Ecological Indicators, 2009, 9: 837-847.

[6] 彭涛,陈晓宏.海河流域典型河口生态系统健康评价[J].武汉大学学报(工学版),2009,42(5): 631-634. (PENG Tao, CHEN Xiaohong. Assessment of ecosystem health for typical estuary in Haihe River Basin [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(5): 631-634. (in Chinese))

[7] NIEKERK L V, ADAMS J B, BATE G C, et al. Country-wide assessment of estuary health: an approach for integrating pressures and ecosystem response in a data limited environment [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, 130: 239-251.

[8] FRASHURE K M, BOWEN R E, CHEN R F. An integrative management protocol for connecting human priorities with ecosystem health in the Neponset River Estuary [J]. Ocean & Coastal Management, 2012, 69: 255-264.

[9] 戴本林,华祖林,穆飞虎,等.近海生态系统健康状况评价的研究进展[J].应用生态学报,2013,24(4): 1169-1176. (DAI Benlin, HUA Zulin, MU Feihu, et al. Offshore ecosystem health status assessment: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(4): 1169-1176. (in Chinese))

[10] 陆健健.河口生态学[M].北京:海洋出版社,2003.

[11] 马世骏,王如松.社会-经济-自然复合生态系统[J].生态学报,1984,9(1): 1-9. (MA Shijun, WANG Rusong. The social-economic-natural complex ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 1984, 9(1): 1-9. (in Chinese))

[12] 叶属峰,刘星,丁德文.长江河口海域生态系统健康评

- 价指标体系及其初步评价[J]. 海洋学报, 2007, 29 (4): 128-136. (YE Shufeng, LIU Xing, DING Dewen. Ecosystem health assessment of the Changjiang River Estuary: indicator system and its primarily assessment [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29 (4): 128-136. (in Chinese))
- [13] 杨志, 赵冬至, 林元烧. 河口生态安全评价方法研究综述[J]. 海洋环境科学, 2011, 30 (2): 296-300. (YANG Zhi, ZHAO Dongzhi, LIN Yuanshao. Review on assessment methods of estuarine ecological safety [J]. Marine Environmental Science, 2011, 30 (2): 296-300. (in Chinese))
- [14] MENG W, LIU L. On approaches of estuarine ecosystems health studies[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 86: 313-316.
- [15] MCMICHAEL A J, BOLIN B, COSTANZA R, et al. Globalization and the sustainability of human health: an ecological perspective [J]. Biosciences, 1995, 49 (3): 205-210.
- [16] 刘佳. 九龙江河口生态系统健康评价研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [17] 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): 408-414. (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): 408-414. (in Chinese))
- [18] 牛明香, 王俊. 河口生态系统健康评价研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33 (7): 1977-1982. (NIU Mingxiang, Wang Jun. Review on estuary ecosystem health assessment [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33 (7): 1977-1982. (in Chinese))
- [19] 谢飞, 顾继龙, 林彰文. 基于主成分分析和熵权的水库生态系统健康评价: 以海南省万宁水库为例[J]. 应用生态学报, 2014, 25 (6): 1773-1779. (XIE Fei, GU Jilong, LIN Zhangwen. Assessment of aquatic ecosystem health based on principal component analysis with entropy weight: a case study of Wanning Reservoir (Hainan Island, China) [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25 (6): 1773-1779. (in Chinese))
- [20] 赵生才. 全球变化与中国水循环前沿科学问题: 香山科学会议第 187 次学术讨论会[J]. 地球科学进展, 2002, 17 (4): 628-630. (ZHAO Shengcai. Frontier problem of global change and water circulation in China: the 187th Session of Xiangshan Science Conferences [J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17 (4): 628-630. (in Chinese))
- [21] 孟岩, 赵庚星. 基于卫星遥感数据的河口区生态环境状况评价: 以黄河三角洲垦利县为例[J]. 中国环境科学, 2009, 29 (2): 163-167. (MENG Yan, ZHAO Gengxing. Ecological environment condition evaluation of estuarine area based on quantitative remote sensing: a case study in Kenli County [J]. China Environmental Science, 2009, 29 (2): 163-167. (in Chinese))
- [22] 安乐生, 刘贯群, 叶思源, 等. 黄河三角洲滨海湿地健康条件评价. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41 (4): 1157-1165. (AN Lesheng, LIU Guanqun, YE Siyuan, et al. Health assessment of coastal wetlands in the Yellow River Delta [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41 (4): 1157-1165. (in Chinese))
- [23] 王薇, 陈为峰, 李其光, 等. 黄河三角洲湿地生态系统健康评价指标体系[J]. 水资源保护, 2012, 28 (1): 13-16. (WANG Wei, CHENG Weifeng, LI Qiguang, et al. Assessment indicator system for ecosystem health of wetlands in Yellow River Delta [J]. Water Resources Protection, 2012, 28 (1): 13-16. (in Chinese))
- [24] 纪雅宁, 牛文涛, 黄丁勇, 等. 基于 PSR 模型的珊瑚礁生态系统健康评价指标体系的构建与应用[J]. 应用海洋学报, 2014, 33 (3): 343-347. (JI Yaning, NIU Wentao, HUANG Dingyong, et al. Establishment and application of coral reef ecosystem health indicator system based on the PSR model [J]. Journal of Applied Oceanography, 2014, 33 (3): 343-347. (in Chinese))
- [25] 盛连喜, 冯江, 王妮. 环境生态学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 27-29.
- [26] 刘晓丹. 基于遥感图像的湿地生态系统健康评价: 以大沽河河口湿地为例[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [27] 徐明德, 李静, 彭静, 等. 基于 RS 和 GIS 的生态系统健康评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19 (8): 1809-1814. (XU Mingde, LI Jing, PENG Jing, et al. Ecosystem health assessment based on RS and GIS [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19 (8): 1809-1814. (in Chinese))
- [28] 王一涵, 周德民, 孙永华. RS 和 GIS 支持的洪河地区湿地生态健康评价[J]. 生态学报, 2011, 31 (13): 3590-3600. (WANG Yihan, ZHOU Demin, SUN Yonghua. Assessment of the ecological health of wetlands in Honghe supported by RS and GIS techniques [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (13): 3590-3600. (in Chinese))
- [29] 周晓蔚. 河口生态系统健康与水环境风险评价理论方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.

(收稿日期: 2015-03-24 编辑: 徐娟)

