

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.004

# 基于 PSR 模型的三门峡库区湿地生态系统健康评价

赵衡<sup>1</sup>,闫旭<sup>1</sup>,王富强<sup>1,2,3</sup>,康萍萍<sup>1</sup>

(1. 华北水利水电大学水资源学院,河南 郑州 450046;  
2. 资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心,河南 郑州 450046;  
3. 河南省水环境模拟与治理重点实验室,河南 郑州 450046)

**摘要:**为评价三门峡库区湿地生态健康状况,基于 PSR 模型,从压力、状态、响应 3 个层面构建了包括人口密度、水体面积、湿地管理水平等 15 个指标的湿地生态系统健康评价指标体系,采用层次分析法和模糊综合评价法计算指标权重和指标隶属度,将湿地生态系统健康状况划分为“健康、亚健康、脆弱、病态、疾病”5 个等级,根据综合评价指数确定三门峡库区湿地生态系统健康状况。结果表明,2017 年三门峡库区湿地生态系统健康综合评价指数为 0.696,处于“脆弱”等级,接近“亚健康”状态;压力、状态、响应 3 个目标层中,状态层的约束性最强(0.5485),响应层次之(0.2410),压力层最弱(0.2105);在 15 个评价指标中,物质供应、生态环境恢复、科研娱乐和湿地受胁迫程度是影响三门峡库区湿地生态系统健康状况的主要因素。

**关键词:**生态系统健康;PSR 模型;模糊综合评价;三门峡库区湿地

中图分类号:TV697;X826 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)04-0021-05

**Assessment on ecosystem health of Sanmenxia Reservoir wetland based on PSR model//**ZHAO Heng<sup>1</sup>, YAN Xu<sup>1</sup>, WANG Fuqiang<sup>1,2,3</sup>, KANG Pingping<sup>1</sup> (1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Protection Engineering, Zhengzhou 450046, China; 3. Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** In order to assess the ecosystem health of Sanmenxia Reservoir wetland, we construct a wetland ecosystem health assessment index system with 15 indexes, including population density, water area, wetland management level, etc. from 3 levels of pressure, state and response based on Pressure-State-Response (PSR) Model. The index weight and index membership degree were calculated by AHP and fuzzy comprehensive evaluation method. The health status of wetland ecosystem was divided into 5 grades: “health”, “sub-health”, “vulnerable”, “ill-health” and “sick”. According to the comprehensive evaluation index, the ecosystem health status of Sanmenxia Reservoir wetland was determined. The results show that the comprehensive evaluation index of ecosystem health status of Sanmenxia Reservoir wetland is 0.696 in 2017, locating in the grade of “vulnerable” and is close to the status of “sub-healthy”; Among the 3 levels of pressure, state and response, the state is the most restrictive (0.5485), the response is moderate (0.2410), the pressure is weakest (0.2105); Among the 15 evaluation indexes, material supply, ecological environment restoration, scientific research & entertainment and stress degree of the wetland are the dominant factors affecting the ecosystem health of Sanmenxia Reservoir wetland.

**Key words:** ecosystem health; PSR model; fuzzy comprehensive evaluation; Sanmenxia Reservoir wetland

湿地是珍贵的自然资源,也是重要的生态系统,具有不可替代的功能和地位,不仅维持了地球的生命支持体系,还是人类生存必需的环境条件。21世纪以来,我国开始实行最严格的湿地保护制度,全面

基金项目:国家自然科学基金(51709111,51879106);国家重点研发计划(2016YFC0401401);河南省高校科技创新团队支持计划(20IRTSTHN010)

作者简介:赵衡(1980—),女,讲师,博士,主要从事水资源规划与管理及生态水文学研究。E-mail: zhaoheng@newu.edu.cn

通信作者:王富强,教授。E-mail: wangfuqiang@newu.edu.cn

提升湿地管理与利用水平,使湿地生态系统的完整性和稳定性得到增强。然而,湿地是一个庞大且复杂的生态系统,任何生态因子的变化都可能影响其健康状况,这为湿地生态系统健康评估和湿地生态保护等工作带来了困难<sup>[1-2]</sup>。

生态系统健康是指生态系统没有病患反应,稳定且可持续发展,在外界胁迫下容易恢复<sup>[3]</sup>。这一概念引入湿地研究领域不仅为湿地生态系统健康研究提供了理论基础,也为湿地生态系统健康评价指标体系的建立提供了科学依据<sup>[4-5]</sup>。经过多年的研究与发展,生态系统健康评价作为一种综合性评价方法在湿地领域中被广泛应用。通过对湿地生态系统的健康评价,可以综合反映湿地生态系统总体特征和健康状况,同时通过对评价结果的分析判断,可以有针对性地提出湿地保护措施和管理建议,从而促进湿地生态系统能够健康发展<sup>[6]</sup>。

国外对湿地生态系统健康评价的研究开始较早,建立的评价体系也比较完善。Costanza 等<sup>[7]</sup>最早提出了生态系统的活力、恢复力和结构多样性是评价生态系统健康与否的重要指标,根据这些指标建立的生态系统健康指数也被广泛认可和采纳。此后,各国对湿地生态系统健康评价体系的构建开始了深入探索。国内相关研究起步较晚,早期的湿地生态系统健康评价较为片面,仅针对湿地某一项生态功能或湿地生态系统某一方面进行评价,主要集中对沼泽、海岸带和滩涂资源的调查和开发利用方面<sup>[8-9]</sup>。随着对湿地生态系统结构和功能了解的不断深入,湿地生态系统健康评价的研究内容也更加丰富,采用了多样化的评价方法,建立了更完善的评价体系<sup>[10]</sup>。如蒋卫国等<sup>[11]</sup>将 GIS 技术、PSR 模型(压力-状态-响应模型)和遥感技术相结合,对辽河三角洲的盘锦湿地生态系统健康状况进行了评价;赵臻彦等<sup>[12]</sup>建立了一套适用于湖泊湿地的量化评价体系,定量评价了意大利西西里湖泊群的生态系统健康状况;王治良等<sup>[13]</sup>应用 PSR 模型构建评价指标体系,采用层次分析法评价了洪泽湖湿地生态系统健康状况。我国关于湿地生态系统健康评价的研究已全面展开,涉及的研究领域也更加广泛,但对具备湿地类型多样、生态结构复杂、存在人类活动和工程设施共同影响等特点的区域尚未开展湿地生态系统健康评价研究。

长期以来,由于对三门峡库区湿地生态系统功能和价值缺乏充分认识,自然因素和人类活动的影响导致其健康状况下降明显。目前,关于库区湿地的研究主要集中在水资源的开发利用、自然资源的调查统计、景观格局的演变分析等方面,缺少对湿地

生态系统的整体研究。本文以 PSR 模型为研究框架,构建湿地生态系统健康评价指标体系,对 2017 年三门峡库区湿地生态系统健康状况进行评价,旨在为库区湿地保护和管理提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据

三门峡库区湿地(潼关—三门峡段)位于黄河中游,是在黄河中游特殊的水沙条件和三门峡水利枢纽不同运行水位共同作用下形成的独特生态系统。三门峡库区湿地物种丰富多样,资源种类繁多,在调节气候、调蓄洪水、资源生产等方面发挥着重要作用,是整个黄河中游湿地群的重要组成部分,因其独特的地理环境和重要的生态功能而闻名(图 1)。在三门峡水利工程的多年运用中,形成了稳定的湿地生态系统,具有河流湿地、滩地湿地、湖泊湿地及沼泽湿地等多种湿地类型,成了许多珍稀水禽、名贵鸟兽的越冬地和栖息地。



图 1 三门峡库区湿地示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Sanmenxia Reservoir wetland

研究采用的数据包括遥感数据、实地生态调查数据和相关统计数据。

a. 遥感数据。采用 2017 年 3 月、5 月、8 月、11 月(与实地生态调查时间相同)共 4 期 Landset-8 地球资源遥感影像,空间分辨率为 30 m。对遥感影像进行裁剪、辐射定标、大气校正、图像增强等预处理后,利用 ENVI 和 ArcGIS 软件进行人机交互解译获取研究区湿地类型分布、各类型湿地面积及水面面积等数据信息。

b. 调查数据。分别在 2017 年 3 月、5 月、8 月、11 月(因水利工程设施的影响,不同时段湿地实际情况变化明显)进行了 4 次实地生态调查,内容包括水体水质、植被分布、物种资源、湿地管理情况、水利工程设施等。

c. 其他数据包括黄河潼关站和三门峡站水文数据、中国气象数据共享网的气象数据以及相关部

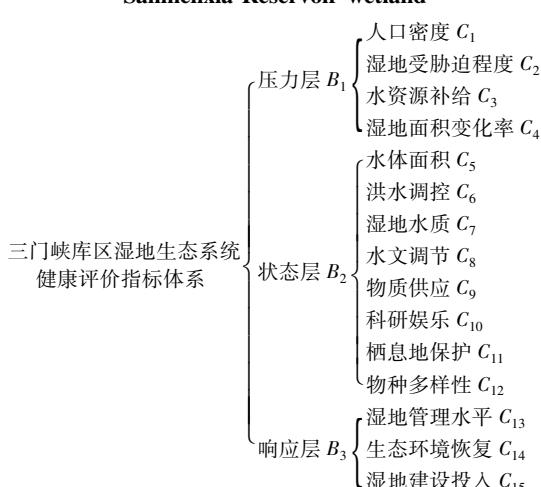
门的统计数据等。

## 2 评价模型

### 2.1 评价指标体系

PSR 模型主要用于分析人与环境之间的压力、状态和响应之间的相互联系与相互作用。PSR 模型因其在指标选取上自由灵活、逻辑关系上衔接紧密等优点得到广泛应用,是生态环境状况评估的有效模型之一<sup>[14]</sup>。结合三门峡库区湿地生态系统现状、湿地变化特征和资源分布状况,遵循针对性、合理性、全面性等原则选取评价指标,构建了由目标层、准则层和指标层组成的三门峡库区生态系统健康评价指标体系如表 1 所示。其中,湿地受胁迫程度表示湿地生态系统遭受人类破坏的影响程度,包括捕鱼、开垦、猎鸟等,以“优秀、良好、一般、较严重、严重”5 个等级衡量,分别赋值 5、4、3、2、1;水资源补给表示水资源的补给情况对库区湿地生态系统的影响,以上游来水量与湿地消耗水量之比表示;水文调节表示库区湿地为城市生活、农业灌溉、工业发展等供水,以年供水量来表示;物质供应表示库区湿地所提供的具有经济价值的鱼类、植物、木材等自然资源,以物质年产量的增减率来表示;科研娱乐表示库区湿地在科研教育与文化娱乐方面发挥的作用,以定量和定性相结合的方式分为“完善、较完善、一般、不完善、非常不完善”5 类,分别赋值 5、4、3、2、1;栖息地保护表示库区湿地生态系统是否有助于湿地动物的栖息繁衍,以具有代表性的珍稀保护动物种类来表示;湿地管理水平表示库区湿地管理水平和建设情况,分为“优秀、良好、一般、较差、差”5 类,分别赋值 5、4、3、2、1;生态环境恢复表示库区湿地生态系统现状及相关生态修复工程实施情况,以有无生态恢复工程和工程规模来表示,分为“大型、较大

表 1 三门峡库区湿地生态系统健康评价指标体系  
Table 1 Ecosystem health assessment index system of Sanmenxia Reservoir wetland



型、一般型、小型、无生态恢复工程”5 类,分别赋值 5、4、3、2、1;湿地建设投入表示相关政府部门或机构在湿地保护建设中投入的资金或政策性措施,将湿地建设的投入情况分为“大、较大、一般、较少、无”5 类,分别赋值 5、4、3、2、1。

### 2.2 评价指标权重确定方法

采用层次分析法确定评价指标的权重。将与评价内容相关的元素分解成若干层次和若干因素,由决策者和该领域内的专家学者基于研究区域的客观因素和实际情况,对各指标之间重要程度进行比较判断,实现对指标的评分和权重的赋值。该方法通过比较、判断、评价和决策的过程,避免了过于主观化确定指标权重的问题,使最终的评价结果更准确和更可靠。

根据三门峡库区湿地实地调研情况,结合专家意见及参考相关文献资料,采用 1~9 及其倒数的标度方法对指标两两对比的重要性进行赋值,得到评价指标体系中各个层次的判断矩阵,通过对各层次判断矩阵的最大特征值和对应特征向量的计算,最终得出各评价指标相对于总体目标的权重排列结果。

### 2.3 评价指标分级标准

根据湿地生态系统健康评价研究内容,参考相关文献资料<sup>[15-16]</sup>综合分析后将三门峡库区湿地生态系统健康程度划分为“健康、亚健康、脆弱、病态、疾病”5 个等级,并确定各评价指标的分级标准如表 2 所示。同时,结合 2017 年三门峡库区湿地生态系统健康各评价指标实际数据计算得出模糊隶属度关系矩阵。

### 2.4 模糊综合评价方法

模糊综合评价是对受多种因素影响的事物作出全面评价的一种十分有效的多因素决策方法。湿地生态系统健康与否是依据相关评价标准来判定的,湿地生态系统健康或不健康是相对概念,属于模糊问题,因此运用模糊综合评价法对评价指标体系中各项指标进行标准化处理。通过模糊关系矩阵,采用隶属函数表示指标在模糊集合中的隶属关系,定量计算各评价指标的隶属度。

在构建模糊综合评价模型的基础上,完成评价指标等级划分和指标隶属度的分析计算后,通过模糊算术运算将模糊隶属度矩阵与指标权重相结合,得到评估向量:

$$\mathbf{b} = \mathbf{w}\mathbf{r} = (w_1, w_2, \dots, w_m) \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (1)$$

表2 三门峡库区湿地生态系统健康评价指标分级标准

Table 2 Classification standard of ecosystem health assessment indexes of Sanmenxia Reservoir wetland

划分等级	$C_1/(人 \cdot km^{-2})$	$C_2$	$C_3/\%$	$C_4/\%$	$C_5/km^2$	$C_6/\text{亿 } m^3$	$C_7$
健 康	<200	5	≥50	≥1	≥100	≥10	I
亚健康	[200,500)	4	[30,50)	[0.5,1)	[80,100)	[1,10)	II
脆 弱	[500,800)	3	[20,30)	[0.3,0.5)	[50,80)	[0.1,1)	III
病 态	[800,1000)	2	[10,20)	[0.1,0.3)	[30,50)	[0.01,0.1)	IV
疾 病	≥1000	1	<10	<0.1	<30	<0.01	V
2017 年	605	3	38.59	0.75	91.5	60	IV
划分等级	$C_8/\text{亿 } m^3$	$C_9/\%$	$C_{10}$	$C_{11}/\text{类}$	$C_{12}/\text{类}$	$C_{13}$	$C_{14}$
健 康	≥8	≥5	5	≥200	≥1000	5	5
亚健康	[5,8)	[4,5)	4	150~199	800~999	4	4
脆 弱	[3,5)	[3,4)	3	100~149	400~799	3	3
病 态	[1,3)	[2,3)	2	50~99	100~399	2	2
疾 病	<1	<2	1	<50	<100	1	1
2017 年	4.5	3.32	3	167	1610	3	3

式中: $w_i$ 为评价指标  $i(i=1,2,\dots,m)$  的权重; $r_{ij}$ 为评价指标  $i$  的第  $j(j=1,2,\dots,n)$  级模糊隶属度; $b_j$ 为评价指标在评价等级划分中的隶属度; $m$ 为评价指标总数; $n$ 为评价等级数。

采用综合评价指数来反映三门峡库区湿地生态系统的健康状况。综合评价指数是将评价结果定量化的一种计算方法,将多指标进行整合形成一个综合性指数  $I_{CEI}$ ,最终通过指数对比达到评价目的。通常采用多目标线性加权函数计算,本文评价等级数  $n=5$ , $I_{CEI}$  计算公式为

$$I_{CEI} = \frac{1}{5}(5b_1 + 4b_2 + 3b_3 + 2b_4 + b_5) \quad (2)$$

参考相关文献<sup>[17-18]</sup>,结合三门峡库区湿地实际情况确定每个等级的综合评价指数,健康:0.85≤ $I_{CEI} \leq 1.00$ ;亚健康:0.7≤ $I_{CEI} < 0.85$ ;脆弱:0.55≤ $I_{CEI} < 0.7$ ;病态:0.4≤ $I_{CEI} < 0.55$ ;疾病: $I_{CEI} < 0.4$ 。

### 3 评价结果与分析

#### 3.1 评价结果

采用层次分析法确定湿地生态系统健康评价指标体系中各层次权重,得到准则层中压力、状态、响应的权重分别为0.2105、0.5485和0.2410,各评价指标权重见表3。应用模糊综合评价法构建模糊关系矩阵,得到了各评价指标的隶属度如表3所示。将指标隶属度矩阵与指标权重相结合,通过多目标线性加权函数计算,得到三门峡库区湿地生态系统健康综合评价指数为0.696,其中压力、状态、响应3个目标层的综合评价指数分别为0.157、0.394和0.145。

2017年三门峡库区湿地生态系统健康综合评价指数为0.696,生态系统健康状况处于“脆弱”等级,接近“亚健康”状态,评价结果与湿地生态系统

表3 三门峡库区湿地生态系统健康评价指标权重及隶属度

Table 3 Weight and membership of ecosystem health assessment indexes of Sanmenxia Reservoir wetland

评价指标	权重	各评价等级隶属度				
		健康	亚健康	脆弱	病态	疾病
$C_1$	0.0222	0	0.35	0.65	0	0
$C_2$	0.0916	0	0	1.00	0	0
$C_3$	0.0316	0.52	0.48	0	0	0
$C_4$	0.0651	0.50	0.50	0	0	0
$C_5$	0.0792	0.43	0.57	0	0	0
$C_6$	0.0325	1.00	0	0	0	0
$C_7$	0.0555	0	0	0	1.00	0
$C_8$	0.0590	0	0.25	0.75	0	0
$C_9$	0.1494	0	0.68	0.32	0	0
$C_{10}$	0.1244	0	0	1.00	0	0
$C_{11}$	0.0220	0.68	0.32	0	0	0
$C_{12}$	0.0265	1.00	0	0	0	0
$C_{13}$	0.0607	0	0	1.00	0	0
$C_{14}$	0.1419	0	0	1.00	0	0
$C_{15}$	0.0384	0	0	1.00	0	0

健康现状相符。根据对数据的统计分析,多项评价指标受季节性影响较小,年际变化不明显,因此需要充分重视三门峡库区湿地整体生态系统的保护与修复,确保湿地生态系统能够健康发展。

#### 3.2 分析与讨论

2017年三门峡库区湿地生态系统健康程度处于“脆弱”等级,物质供应、生态环境恢复、科研娱乐、湿地受胁迫程度是影响湿地生态健康状况的主要因素,对最终的评价结果制约性较强、影响较大。

a. 压力分析。从PSR模型中压力层的角度分析,三门峡库区湿地生态系统健康程度主要受湿地受胁迫程度的制约。三门峡库区湿地区域内除了有政府或相关部门统一规划、投资管理的区域外,其余区域处于自然状态,健康状况两极分化明显。有政府部门管理或政策保护的区域,湿地状况良好,物质

资源充足,服务功能发挥正常,生态效益可观,生态系统整体健康状况优秀。而没有政府部门管理或政策保护的区域面积更广泛,在该区域内自然灾害、人类活动影响、资源破坏等问题层出不穷,单靠生态系统自身的恢复能力是无法快速应对解决的,因此导致库区湿地整体生态系统健康状况评价等级较低。

**b. 状态分析。**从 PSR 模型中状态层的角度分析,三门峡库区湿地生态系统健康程度主要受物质供应和科研娱乐的制约。因三门峡库区湿地面积大,无法做到全面合理的规划开发,无法保证湿地资源合理利用,资源浪费、破坏以及过度使用等现象频发。库区湿地涉及多个市县区域,湿地管理部门较多且分散,政策实施不统一,资金来源和数额不固定。库区湿地景观也各不相同,既有高山流水的美丽风景,也有黄土枯树的荒芜景象,风景优美的地方可为科研娱乐提供场所,能够获得可观的经济效益,使该区域的湿地规划与管理水平进一步提高,而大面积的无人管理区域只能任其自然发展。

**c. 响应分析。**从 PSR 模型中状态层的角度分析,三门峡库区湿地生态系统健康程度主要受生态环境恢复的制约。湿地生态系统受外界环境的持续干扰或面临一定程度的压力时,会产生与之相对应的响应。三门峡库区湿地区域内还未有大型或较大型生态恢复工程,主要还是依靠人为干预和生态系统自身恢复能力,导致了库区湿地生态系统恢复缓慢,一旦遇到严重破坏,生态系统健康状况将会大幅下降。

除以上主要影响因素外,人口密度增加造成的环境承载压力,河流水体污染造成的生态环境破坏等,也是造成三门峡库区湿地生态系统整体健康状况下降的原因。因此改善库区湿地客观现状,采取相应生态恢复工程措施,加大湿地保护管理力度,有效实施相关政策是提高三门峡库区湿地生态系统健康程度的有效措施。本文研究结果虽然总体上反映了三门峡库区湿地生态系统健康状况,但由于湿地生态系统健康评价涉及的研究内容较多,其评价指标种类多样、评价体系分类复杂,使最终评价结果不可避免地存在一定的片面性和局限性,尤其在指标选取、内容构建以及等级分类标准制定等方面仍需进一步完善。

## 4 结 论

**a. 三门峡库区湿地生态系统健康综合评价指数为 0.696,湿地生态系统健康状况处于“脆弱”等级,接近“亚健康”状态。**

**b. 在压力、状态、响应 3 个目标层中,状态层的**

约束性最强(0.5485),响应层次之(0.2410),压力层最弱(为 0.2105),表明三门峡库区湿地所处的压力水平并不高,对其影响最大的是状态指标。

**c. 在三门峡库区湿地生态系统健康评价指标体系中,物质供应、生态环境恢复、科研娱乐、湿地受胁迫程度是影响三门峡库区湿地生态系统健康状况的主要因素。**

## 参 考 文 献:

- [1] 彭涛,王珍,赵乔,等. 基于压力-状态-响应模型的黄柏河生态系统健康评价[J]. 水资源保护,2016,32(5):141-145. ( PENG Tao, WANG Zhen, ZHAO Qiao, et al. Ecosystem health assessment for Huangbai River based on PSR model [ J ]. Water Resources Protection, 2016, 32 ( 5 ) :141-145. ( in Chinese ))
- [2] NIU Z, ZHANG H, GONG P. More protection for China's wetlands[ J ]. Nature,2011,471:305.
- [3] 蒋庭菲,杨雨微,江海清,等. 我国九省(区)湿地生态系统健康状况预警研究[J]. 湿地科学与管理,2018,14(4): 16-19. ( JIANG Tingfei, YANG Yuwei, JIANG Haiqing, et al. Early warning of wetland ecosystem health in nine provinces( regions ) of China[ J ]. Wetland Science and Management,2018,14(4):16-19. ( in Chinese ) )
- [4] 崔丽娟,张晓栋,张曼胤. 中国湿地保护与管理的任务与展望:对《湿地保护修复制度方案》的解读[J]. 环境保护,2017(4):12-17. ( CUI Lijuan, ZHANG Xiaodong, ZHANG Manyin. The task and perspectives of wetland conservation and management in China[ J ]. Environmental Protection,2017(4):12-17. ( in Chinese ) )
- [5] 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. Research progress of ecosystem health assessment [ J ]. Journal of Plant Ecology,2001 ,25(6):641-647. ( in Chinese ) )
- [6] CRANE J J. Evaluation of EPA level I, II, and III assessments and the effects of land use on wetland communities [ J ]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2014,7(35):56-68.
- [7] COSTANZA R, ARGE R, GROOT R S, et al. The total value of the world's ecosystem services and natural capital [ J ]. Nature,1997,387:253-260.
- [8] SCHULTE-HOSTEDDE B, WALTERS D, POWELL C, et al. Wetland management:an analysis of past practice and recent policy changes in Ontario [ J ]. Journal of Environmental Management,2007,82(1):83-94.
- [9] SPENEC R, ROBERTSON A I, CURTIS A. Development and testing of a rapid appraisal wetland condition index in South-Eastern Australia [ J ]. Journal of Environmental Management,1998 ,54(2):143-159.

(下转第 74 页)

- [14] 苏波,何用,卢陈,等.磨刀门咸潮入侵与抑咸技术 [M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [15] 方神光,崔丽琴.磨刀门水道枯季咸潮入侵特性及规律 [J].水利水电科技进展,2015,35(4):14-18. ( FANG Shenguang, CUI Liqin. Characteristics and rules of seawater intrusion during dry season in Modaomen Waterway [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(4):14-18. (in Chinese) )
- [16] 王青,叶荣辉,汪玉平,等.珠江口盐度预测统计模型 [J].水资源保护,2018,34(6):82-87. ( WANG Qing, YE Ronghui, WANG Yuping, et al. Statistical model for salinity prediction in Pearl River Estuary [ J ]. Water Resources Protection,2018,34(6):82-87. (in Chinese) )
- [17] GONG W, MAA J P Y, HONG B, et al. Salt transport during a dry season in the Modaomen Estuary, Pearl River Delta, China [ J ]. Ocean & Coastal Management, 2014, 100:139-150.
- [18] 吕紫君,冯佳佳,郜新宇,等.磨刀门河口环流与咸淡水混合层化机制[J].水科学进展,2017,28(6):908-921. ( LYU Zijun, FENG Jiajia, GAO Xinyu, et al. Estuarine circulation and mechanism of mixing and stratification in the Modaomen Estuary [ J ]. Advances in Water Science, 2017,28(6):908-921. (in Chinese) )
- [19] MACCREADY P. Toward a unified theory of tidally-averaged estuarine salinity structure [ J ]. Estuaries and Coasts,2004,27(4):561-570.
- +++++

(上接第 25 页)

- [10] 麦少芝,徐颂军,潘颖君.PSR 模型在湿地生态系统健康评价中的应用 [J].热带地理,2005,25(4):317-321. ( MA Shaozhi, XU Songjun, PAN Yingjun. Application of PSR model in wetland ecosystem health assessment [ J ]. Tropical Geography,2005,25(4):317-321. (in Chinese) )
- [11] 蒋卫国.基于 RS 和 GIS 的湿地生态系统健康评价:以辽河三角洲盘锦市为例 [D].南京:南京师范大学,2003.
- [12] 赵臻彦,徐福留,詹巍,等.湖泊生态系统健康定量评价方法 [J].生态学报,2005,25(6):1466-1474. ( ZHAO Zhenyan, XU Fulu, ZHAN Wei, et al. Quantitative evaluation method of lake ecosystem health [ J ]. Journal of Ecology,2005,25(6):1466-1474. (in Chinese) )
- [13] 王治良,王国祥.洪泽湖湿地生态系统健康评价指标体系探讨 [J].中国生态农业学报,2007,15(6):152-155. ( WANG Zhiliang, WANG Guoxiang. Discussion on the evaluation index system of Hongze Lake wetland ecosystem health [ J ]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2007,15(6):152-155. (in Chinese) )
- [14] WANG Y T, WANG Y S, NAN L I, et al. The assessment system of mangrove ecosystem health applying the PSR model:a case study of Guangdong Province [J]. Ecological Science,2010,29(3):234-241.
- [15] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用 [J].水科学保护,2018,34(1):1-7. ( GU Xiaoyun, LIU Linfei. Investigation and evaluation of river health in Weihe River Basin [ J ]. Water Resources Protection,2018,34(1):1-7. (in Chinese) )
- [20] BURCHARD H, HETLAND R D, SCHULZ E, et al. Drivers of residual estuarine circulation in tidally energetic estuaries: straight and irrotational channels with parabolic cross section [ J ]. Journal of Physical Oceanography,2011, 47(1):548-570.
- [21] WEI X, KUMAR M, SCHUTTELAAR H M. Three-dimensional salt dynamics in well-mixed estuaries: influence of estuarine convergence, coriolis, and bathymetry [ J ]. Journal of Physical Oceanography,2017, 47(1):1843-1871.
- [22] 宋晓飞,石荣贵,孙羚晏,等.珠江口磨刀门盐水入侵的现状与成因分析 [J].海洋通报,2014,33(1):7-15. ( SONG Xiaofei, SHI Ronggui, SUN Linyan, et al. Status and cause of saltwater intrusion in Modaomen, Pearl River Estuary [ J ]. Marine Science Bulletin, 2014,33(1):7-15. (in Chinese) )
- [23] 尹小玲,赵雪峰.径潮共同作用对径流型河口盐水上溯的影响 [J].水科学进展,2018,29(1):118-126. ( YIN Xiaolin, ZHAO Xuefeng. Combined influences of runoff and tide on saline intrusion length in riverine estuary [ J ]. Advances in Water Science, 2018, 29 ( 1 ) : 118-126. ( in Chinese) )
- [24] HANSEN D V, RATTRAY M. Gravitational circulation in straits and estuaries [ J ]. Journal of Marine Research, 1965,23:104-122.

(收稿日期:2019-09-17 编辑:熊水斌)

+++++

[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148-153. ( GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyun. Research and application of analytic hierarchy process [ J ]. Chinese Journal of Safety Sciences , 2008 , 18 ( 5 ) : 148-153. ( in Chinese) )

- [16] 苏辉东,贾仰文,牛存稳,等.河流健康评价指标与权重分配的统计分析 [J].水资源保护,2019,35(6):138-144. ( SU Huidong, JIA Yangwen, NIU Cunwen, et al. Statistical analysis of river health assessment indicators and weight distribution [ J ]. Water Resources Protection, 2019,35(6):138-144. (in Chinese) )
- [17] 徐浩田,周林飞,成遭.基于 PSR 模型的凌河口湿地生态系统健康评价与预警研究 [J].生态学报,2017,37(24):8264-8274. ( XU Haotian, ZHOU Linfei, CHENG Qian. Study on ecosystem health assessment and early warning of Linghekou wetland based on PSR model [ J ]. Journal of Ecology, 2017, 37 ( 24 ) : 8264-8274. ( in Chinese) )
- [18] 徐宗学,顾晓昀,刘麟菲.渭河流域河流健康调查与评价 [J].水资源保护,2018,34(1):1-7. ( XU Zongxue, GU Xiaoyun, LIU Linfei. Investigation and evaluation of river health in Weihe River Basin [ J ]. Water Resources Protection,2018,34(1):1-7. (in Chinese) )

(收稿日期:2020-02-02 编辑:熊水斌)