

基于 PSR 模型的甘南尕海湿地生态系统健康评价

徐国荣, 马维伟, 李广, 张宏奎

(甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: [目的] 对甘南尕海湿地生态系统健康进行综合评价, 为该湿地科学管理和可持续发展提供科学依据。[方法] 运用 PSR 数学模型, 从压力、状态和响应 3 个方面选取 18 个评价指标来构建尕海湿地生态系统健康评价体系, 并采用层次分析法(AHP)确定指标权重, 分析生态系统健康指数。[结果] 尕海湿地生态系统健康指数为 0.588 1, 属于亚健康状态; 压力子系统健康指数为 0.733 2, 属于健康状态; 状态和响应子系统健康指数为 0.489 3 和 0.567 9, 二者都属于亚健康状态。[结论] 全球气候变化和人为活动干扰使尕海湿地生态系统健康状况受到严重威胁, 迫切需要科学地保护和修复措施, 提高湿地管理水平。

关键词: PSR 模型; 健康评价; 层次分析法; 尕海湿地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0275-06

中图分类号: X171

文献参数: 徐国荣, 马维伟, 李广, 等. 基于 PSR 模型的甘南尕海湿地生态系统健康评价[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 275-280. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.040; Xu Guorong, Ma Weiwei, Li Guang, et al. Health assessment of Gahai wetland ecosystem of South Gansu Province based on PSR modeling[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 275-280.

Health Assessment of Gahai Wetland Ecosystem of South Gansu Province Based on PSR Modeling

Xu Guorong, Ma Weiwei, Li Guang, Zhang Hongkui

(College of Forest of Gansu Agriculture University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] The ecosystem health of Gahai wetland of South Gansu Province was comprehensively evaluated in order to provide a scientific basis for the management and sustainable development of the wetland. [Methods] Using PSR mathematical model, 18 evaluation indexes were selected from three aspects including pressure, state and response, to construct the health evaluation system of Gahai wetland. Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to determine the weight of indicators and to analyze the ecosystem health index. [Results] The health index of the Gahai wetland ecosystem was 0.588 1, which belonged to the sub-health state, and the health index of the pressure subsystem was 0.733 2, which belonged to the health state. The health indexes of the state and the response subsystem were 0.489 3 and 0.567 9, respectively, both of which belonged to sub-health states. [Conclusion] Global climate change and human disturbance have seriously threatened the health of the wetland ecosystem in Gahai. wetland Scientific protection and restoration measures are urgently needed to improve the level of wetland management.

Keywords: PSR model; healthassessment; analytic hierarchy process; Gahai wetland

湿地是一种不同于其他生态系统的具有调节气候、涵养水源等生态功能的一种自然生态系统^[1]。随着社会经济的不断发展, 人类日益发展的活动需求同自然资源和环境的矛盾越发突出, 导致湿地生态系统遭到严重干扰和破坏, 进而引发一系列生态环境问题^[2]。因此, 湿地生态系统的健康状况的诊断和评价

已成为当前研究的热点问题。湿地生态系统健康评价是对当前区域生态环境诊断的主要手段, 能客观反映某一生态系统总体特征, 表明生态系统各层次健康状况, 从而为采取恰当的措施恢复和保护提供策略^[3], 以促进湿地及其资源的可持续利用, 对区域生态环境保护、经济发展具有重要意义^[4]。近年来, 国

收稿日期: 2019-06-24

修回日期: 2019-08-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(31860143; 41561022); 2019 年陇原青年创新创业项目(个人项目); 甘肃农业大学科技创新基金项目: 学科建设基金(GAU-XKJS-2018-116); 甘肃省 GEF/OP12 三期专题研究(GS-GEF/OP12-01); 甘肃省科技计划项目(18JR3RA163); 甘肃省高等学校科学研究创新团队项目(2018C-16)

第一作者: 徐国荣(1995—), 男(汉族), 甘肃省武威市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: 1287791525@qq.com。

通讯作者: 马维伟(1980—), 男(汉族), 甘肃省靖远县人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: mww-007@163.com。

内外湿地生态系统健康评价体系逐步建立。其中湿地生态系统健康评价的方法有指示物种法、指标体系法、集对分析理论和人工神经网络方法等^[5-6]。如 Vassallo 等^[7]以河口低栖生物群落为指示物种,建立海岸带湿地生态系统健康评价体系;Karr 和 Brousseau^[8]以鱼类群组成、多度以及物种数量种类的变化来评价水生生态系统。这些研究均以单一指标对生态系统健康进行评价,难以准确、全面评价生态系统健康状况^[9]。一些学者^[10]以生态系统环境、生物群落指标和生态功能作为评价指标来构建生态系统健康评价体系;还有一些研究^[11]也引入人口密度、文化素质和区域人均 GDP 等社会经济指标来评价区域生态系统健康评价体系,这些研究进一步丰富了湿地生态系统健康评价体系。对于土壤质量状态生化指标在评价中涉及较少,而土壤酶活性、氮、磷、有机碳等作为土壤有机体的代谢动力,其变化规律及其与生态因子的相互作用关系,在湿地生态系统中起着重要的作用,成为湿地土壤系统变化的预警指标^[12],对土壤质量状态好坏具有重要指示作用,但目前湿地生态系统健康评价研究中很少涉及。因此,在区域湿地生态系统健康评价体系中,有必要引入土壤生化指标,以建立健全生态系统评价体系,实现对生态系统健康准确、全面的评价。

尕斯湖湿地位于青藏高原的东部边缘,是我国青藏高原若尔盖湿地的重要组成部分,也是维系甘南高原生态安全的重要屏障。随着人口、经济和社会的迅速发展以及湿地长期超载过牧等不合理利用,致使湿地生态系统结构受到严重破坏,湿地出现了退化现象,影响着区域经济、社会与资源的可持续发展^[13]。近年来,为保护和恢复尕斯湖湿地生态系统,当地政府进行了大规模的封禁保护措施,但恢复效果如何,恢复后湿地生态系统健康状况如何仍不清楚。因此,本研究选择甘南尕斯湖湿地生态系统为研究对象,基于压力—状态—响应(PSR)模型建立生态系统健康评价指标体系,综合研究环境、土壤生化指标和社会经济指标,对其进行健康状况综合评估,为尕斯湖湿地科学管理和可持续发展提供依据。

1 研究区概况

尕斯湖湿地位于青藏高原东北边缘甘肃省碌曲县尕斯湖—则岔国家级自然保护区内(33°58′12″—34°32′16″N, 102°05′00″—102°47′39″E),海拔 3 430~4 300 m,保护区内湿地面积 5.79×10^4 hm²,主要为河流湿地、沼泽草甸和泥炭湿地,其中沼泽化草甸 5.12×10^4 hm²,泥炭地 1.04×10^4 hm²。气候属于青藏高原带、高寒

湿润气候区,年均气温 1.2 ℃,无绝对无霜期,年均降水量 781.8 mm,主要集中在 7—9 月,年蒸发量 1 150.5 mm^[14]。植物种类主要有乌拉苔草(*Carex meyeriana*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)、线叶蒿(*Artemisia subulata*)、萎陵菜(*Potentilla chinensis*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum* L.)、蕨麻(*Potentilla anserina* L.)等。

2 材料与方法

2.1 数据来源

结合相关研究成果及尕斯湖湿地实际状况,选择 18 项指标,用于评价尕斯湖湿地生态系统状态。其中社会经济指标数据(主要包括人口密度、人均 GDP、旅游强度、人口受教育水平、环保投资指数、政策法规贯彻力度、湿地管理水平等数据),主要来源于《碌曲县年鉴》(2017 年)和政府工作报告;土壤质量状态生化指标、植被特征指标等来源于野外现场调查。

野外调查及采样于 2018 年 8 月在研究区内进行。根据尕斯湖湿地周边环境,按照代表性原则,设置植物群落样地(10 m×10 m)45 个,在样地内随机选取 3 个小样方(0.5×0.5 m)取样^[13]。调查植物盖度、高度及株数等参数,并采集地上部分带回实验室于 80 ℃烘干至恒重,测得地上生物量。用土钻在每个样方中采集 0—20 cm 层土壤样品,带回实验室进行理化指标测定,用 pH 计测定土壤 pH 值,烘干法测定土壤含水量,重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳,凯氏定氮法测定总氮,钼锑抗比色法测定总磷,3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤酶。

2.2 研究方法

2.2.1 评价指标体系 构建湿地生态系统健康评价是一个复杂的、没有明确界限划分的、很难用精确尺度来刻画指标^[15],目前被广泛应用于区域生态系统健康评价的“P-S-R”模型由联合国 OECD 和 UNEP 提出,主要用来衡量人类活动对区域生态环境造成的压力、生态系统的变化以及人类对生态系统状态变化的响应^[16]。综合分析研究区生态环境特征与生态系统健康影响因素,基于 P-S-R 模型,将尕斯湖湿地健康评价体系分为 3 个准则层,依据相对应的指标将准则层划分为 18 项指标,构建尕斯湖湿地生态系统健康评价指标体系(表 1)。

2.2.2 数据标准化 为了消除评价指标的类型,数据性质和量纲,对各个指标值进行无量纲化处理,统一在 [0,1]^[17]。本文对状态层指标数据采用极差法进行标准处理,将压力层和响应层指标根据实际状况与评价指标标准进行分级类比,得出对应的标准化值(表 1)。

表 1 尕海湿地生态系统健康评价指标体系

目标层	准则层	指标层	现状值	标准化值	指标属性	数据来源/计算方法
尕海湿地生态系统健康评价 A	压力层 B ₁	C ₁ 年降水量/mm	781.8	0.9	+	统计数据
		C ₂ 年平均气温/℃	1.2	0.53	-	统计数据
		C ₃ 人口密度/(人·km ⁻²)	4.98	0.9	-	研究区人口数/研究区面积
		C ₄ 人均 GDP[元/(人·a)]	9014.6	0.9	+	研究区生产总值/地区人数
		C ₅ 旅游强度/(万人·a ⁻¹)	120.9	0.9	-	以地区年度旅游人数表示
	状态层 B ₂	C ₆ 植被覆盖度/%	90	0.9	+	植被覆盖面积/湿地面积
		C ₇ 植物多样性/%	15.6	0.7	+	湿地植物种数/保护区植物种数
		C ₈ 植物生物量/(g·m ⁻²)	1286.5	0.9	+	实验室测定
		C ₉ 土壤 pH	7.81	0.3	-	实验室测定
		C ₁₀ 土壤有机碳/(g·m ⁻²)	8513.0	0.5	+	实验室测定
		C ₁₁ 土壤总氮/(g·kg ⁻¹)	4.15	0.4	+	实验室测定
		C ₁₂ 土壤总磷/(g·kg ⁻¹)	46.72	0.5	+	实验室测定
		C ₁₃ 土壤酶/(mg·g ⁻¹)	30.7	0.6	+	实验室测定
		C ₁₄ 土壤含水量/%	52.9	0.4	+	实验室测定
	响应层 B ₃	C ₁₅ 人口受教育水平/%	98.9	0.9	+	研究区非文盲率表示
		C ₁₆ 环保投资指数/亿元	13.7	0.1	+	环境保护投资/地区生产总值
		C ₁₇ 政策法规贯彻力度/(人·hm ⁻²)	0.0002	0.5	+	保护区单位面积执法人员数表示
		C ₁₈ 湿地管理水平/级	Ⅲ级	0.7	+	管理体系完善程度表示

注:“+”表示该指标为正向指标,值越大,生态系统越健康;“-”表示该指标为负向指标,值越小,生态系统越健康。

2.2.3 评价方法 本文参考相关研究成果^[18-19]及专家意见构造判断矩阵,采用层次分析法确定各指标主观权重,在此基础上,引入熵权法对主观权重进行修正,弥补了层次分析法主观性过强的缺点^[20]。判断矩阵一致性比例(CR)是关键,具体计算公式为:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

式中:CI——矩阵一致性指标,CI=(I);λ_{max}——判断矩阵的最大特征根;n——矩阵阶数;RI——矩阵随机一致性指标,通过查表获得不同阶数矩阵的随机一致性数值。当CR<0.1时,判断矩阵通过一致性检验,否则需要重新构造矩阵^[21]。

2.2.4 生态系统健康指数 计算生态系统健康指数采用以下公式计算:

$$EHI = \sum_{i=1}^n E_i W_i$$

式中:EHI——生态系统健康指数取值范围为0~1;E_i——第i个评价指标标准化后的值;W_i——第i个评价指标的权重;n——评价指标个数。

各评价指标无量纲化标准值与相应权重进行加权求和计算得到上一层指标健康指数,依次计算,分别得到尕海湿地生态系统压力层、状态层和响应层健康指数,最终获得研究区的生态系统健康评价综合指数。

2.2.5 评价等级的确定 生态系统健康状况的划分尚无统一的标准,本研究参考牛明香、王薇等相关研究资料^[1,19],将尕海湿地生态系统健康状况划分为5个等级(表2)。

表 2 尕海湿地生态系统健康评价等级

评价指数	(0.8,1]	(0.6,0.8]	(0.4,0.6]	(0.2,0.4]	(0,0.2]
健康状态	很健康	健康	亚健康	不健康	病态

3 结果与分析

3.1 评价结果

由表3可知,准则层各因素的相对重要性排序为:状态B₂(0.5369)>压力B₁(0.3797)>响应B₃(0.0834)。尕海湿地压力、状态和响应子系统CR<0.1,均通过一致性检验(表4)。各评价指标综合权重由各准则层指标权重与各指标层权重相乘而得,各

指标层综合权重详见表5。按照权重大小各指标排序为:年平均气温(0.1722)>土壤含水量(0.1522)>土壤酶活性(0.1239)>年降水量(0.1050)。这4项指标之和(0.5533)大于0.5,是影响目标层最重要的指标。尕海湿地生态系统健康评价综合指数为0.5881(表5),位于湿地生态系统健康状况评价标准(0.4,0.6],属于亚健康状态(表2)。压力指标指数为0.7322,属于健康状态;状态指标指数为0.4893,

处在亚健康和不健康的临界状态;响应指标指数为 0.567 9,属于亚健康状态。

表 3 准则层指标权重

A	B ₁	B ₂	B ₃	权重
B ₁	1	1/3	2	0.379 7
B ₂	3	1	3	0.536 9
B ₃	1/2	1/3	1	0.083 4

表 4 各判断矩阵一致性检验

项目	A—B	B—B ₁	B—B ₂	B—B ₃
λ_{\max}	3.053 8	5.370 4	9.944 6	4.237 7
CI	0.026 9	0.092 6	0.118 1	0.079 2
RI	0.520	1.120	1.452	0.890
CR	0.051 7	0.082 7	0.081 3	0.089 0
满足一致性	是	是	是	是

表 5 尕海湿地生态系统健康综合评价计算结果

评价指标	综合权重	准则层	权重	准则层健康指数	综合指数 EHI
年降水量 C ₁	0.105 0				
年平均气温 C ₂	0.172 2				
人口密度 C ₃	0.074 4	压力层 B ₁	0.379 7	0.732 2	
人均 GDP C ₄	0.020 0				
旅游强度 C ₅	0.007 9				
植被覆盖度 C ₆	0.004 1				
植物多样性 C ₇	0.012 0				
植物生物量 C ₈	0.025 6				
土壤 PH C ₉	0.041 8				
土壤有机碳 C ₁₀	0.032 8	状态层 B ₂	0.536 9	0.489 3	0.588 1
土壤总氮 C ₁₁	0.060 2				
土壤总磷 C ₁₂	0.084 3				
土壤酶 C ₁₃	0.123 9				
土壤含水量 C ₁₄	0.152 2				
人口受教育水平 C ₁₅	0.032 2				
环保投资指数 C ₁₆	0.028 4	响应层 B ₃	0.083 4	0.567 9	
政策法规贯彻力度 C ₁₇	0.002 0				
湿地管理水平 C ₁₈	0.020 8				

3.2 压力分析

根据综合评价计算结果(表 5),压力层健康指数为 0.732 2,属于健康状态。在压力层指标中,尕海湿地自然过程对生态系统压力状况影响较大(表 6),年平均气温和年降水量对压力层的权重为 0.453 6,0.276 7,2 项指标之和(0.730 3)大于 0.5,即压力层 5 项指标中年平均气温和年降水量为重要影响因素;其次是人口密度和人为活动干扰,人口密度、人均 GDP 和旅游活动强度对压力层的权重为 0.196 0,0.052 8,0.020 9。

表 6 压力层指标权重

B ₁	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	权重
C ₁	1	3	4	4	4	0.276 7
C ₂	1/3	1	3	4	5	0.453 6
C ₃	1/4	1/3	1	3	4	0.196 0
C ₄	1/4	1/4	1/3	1	2	0.052 8
C ₅	1/4	1/5	1/4	1/2	1	0.020 9

3.3 状态分析

尕海湿地系统状态层健康指数为 0.489 3,整体

处于亚健康状态。

从状态指标来看(表 7),各指标中土壤含水量和土壤酶活性对状态层的影响较大,权重为 0.283 5 和 0.230 7,2 项指标权重之和(0.514 2)大于 0.5;其次是土壤养分总磷、总氮和有机碳权重分别为 0.157 0,0.112 1,0.061 1;土壤 pH 值对维持生态系统稳定性具有重要作用,相对状态层权重为 0.077 8;而植物生物量和植物多样性指标分别对状态层的权重为 0.047 6 和 0.022 4。

3.4 响应分析

响应层健康指数为 0.567 9,属于亚健康状态。从响应指标来看(表 8),湿地周边人口素质是湿地生态系统健康发展的重要因素,其次环保投资指数和湿地管理水平是维持生态系统健康的重要指标,政策法规贯彻力度对生态系统健康状况影响较小;人口受教育水平、环保投资指数、政策法规贯彻力度和湿地管理水平依权重排序为:人口受教育水平(0.386 2) > 环保投资指数(0.340 2) > 湿地管理水平(0.249 3) > 政策法规贯彻力度(0.024 3)。

表 7 状态层指标权重

B_2	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	权重
C_6	1	1/3	1/4	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	0.007 7
C_7	3	1	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	0.022 4
C_8	4	3	1	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	0.047 6
C_9	5	3	3	1	2	2	2	3	2	0.077 8
C_{10}	3	2	2	1/2	1	1/3	1/3	1/3	1/3	0.061 1
C_{11}	3	2	2	1/2	3	1	1/2	1/3	1/4	0.112 1
C_{12}	3	2	2	1/2	3	2	1	1/3	1/4	0.157 0
C_{13}	3	2	2	1/3	3	3	3	1	1/3	0.230 7
C_{14}	5	3	2	1/2	3	4	4	3	1	0.283 5

表 8 响应层指标权重

B_3	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	权重
C_{15}	1	1/3	4	3	0.386 2
C_{16}	3	1	4	4	0.340 2
C_{17}	1/4	1/4	1	1/3	0.024 3
C_{18}	1/3	1/4	3	1	0.249 3

4 讨论

湿地生态系统是一个复杂的生态系统,其生态系统健康评价尚未建立一套严格标准^[22],同时没有全面、准确地规定生态系统健康状况评价需要的指标^[23]。本研究研究区位于保护区中,生态系统演替较为稳定,用以研究尕斯海湿地健康状况特征具有很好的代表性,通过 PSR 关系模型,将湿地生态系统看作一个有机整体,全面分析尕斯海湿地生态系统的“压力”、“状态”和“响应”,充分理解影响尕斯海湿地生态系统中各指标间的相互关系,避免了单因素评价湿地生态系统的片面性^[1]。本模型与 VOR 模型和 VCOR 模型不同的是在生理指标和生态指标的基础上引入了社会经济指标^[24],使该评价体系将实测数据、统计数据 and 前人研究成果相结合,建立起尕斯海湿地更全面、更综合的评价指标体系。

压力指数主要体现自然和人为活动对湿地生态系统的干扰和胁迫,在一定程度上表征生态系统自我调节和应对人类活动干扰的能力。目前的生态系统评价体系中,压力层指标选择更多的以人口分布密度和经济发展总量,在压力层指标中赋以较高的权重,但是人类活动对生态系统的影响不仅仅是对生态系统的破坏,也有积极作用。在本研究中,尕斯海湿地压力层指标属于健康状态,生态系统所受的人口密度、人类活动和人均 GDP 等压力较小,这与何彦龙等人对影响生态系统压力指标因素的研究结果一致^[25]。年平均气温和年降水量等自然压力对生态系统健康状况影响较大,可能是由于在全球气候变暖的背景

下,温度升高将引起蒸发速度的增大,同时也会引起降雨量的变化和季节性分配不均,从而影响湿地生态系统健康状况^[26],但该压力仍处在环境允许范围内,生态系统尚能维持其稳定性。

同时在生态系统健康评价中最重要的指标是状态指数,是生态系统健康与否的预警,不仅能及时反映自然和人为活动对生态系统的影响,也体现了生态系统自身结构和功能的变化,是生态系统应对人类压力和自然压力所响应的结果^[1]。在本研究中,状态指标包括了尕斯海湿地生态系统的土壤和植被物理化学指标,状态子系统评价得分最低,整体上处在亚健康状态。导致状态子系统得分较低可能是近年来全球气候变暖、过度放牧和湿地排水疏干等作用下,尕斯海湿地出现了植被退化现象^[27],过度的利用植被致使生态系统地上生产力降低乃至丧失,这一过程使得土壤板结,物质循环变慢,土壤持水能力降低,土壤含水量减小,土壤酶活性受到不同程度的抑制,使土壤环境恶化,土壤肥力状况显著降低,植被与土壤形成一个相互影响、相互作用的耦合作用系统^[19]。随着尕斯海湿地退化程度加剧,植被盖度和生物量随之下降,其变化也影响生态系统结构和功能的改变。

响应指数是人类为防止生态系统破坏,保护和恢复生态系统所做出的积极响应,主要说明为预防和修复生态系统破坏而做出的改变,响应层主要包括政策贯彻力度、环保投资指数、人口素质和湿地管理水平等指标。本研究中响应子系统综合健康指数处于亚健康状态,其中人口受教育水平和环保投资指数是较为重要的指标,这和地区经济发展有关,随着甘南经济的逐步发展,湿地保护投资力度将逐步加大^[28]。同时需要加强执法队伍建设,提升人员执法业务素质,完善管理体制,促进生态系统稳定发展。

5 结论

尕斯海湿地生态系统健康状况为亚健康状态。其

中,压力子系统为健康状态,状态和响应子系统健康状况都为亚健康状态。因此,急需控制人类压力和生态威胁对湿地生态系统健康的影响,采取科学的保护和修复措施,加强政策落实和加大资金投入,提高人民群众环保意识,将社会、经济和生态效益相结合,使尕斯库勒湿地生态系统趋向健康发展。

[参 考 文 献]

- [1] 牛明香,王俊,徐宾铎. 基于 PSR 的黄河河口区生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 943-952.
- [2] 徐浩田,周林飞,成遣. 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.
- [3] 李纯厚,林琳,徐姗楠,等. 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1798-1810.
- [4] 崔保山,杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系(I): 理论[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1005-1011.
- [5] 杨柳,李泳慧,王俊才,等. 基于 B-IBI 指数的温榆河生态健康评价[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3313-3322.
- [6] 曾朝平,付翔,代翔宇,等. 基于 GIS 和 RS 的郑州黄河湿地生态健康评价[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(5): 189-191.
- [7] Vassallo, P, Fabiano, M, Vezzulli, L, et al. Assessing the health of coastal marine ecosystems; A holistic approach based on sediment micro and meio-benthic measures[J]. Ecological Indicators, 2006, 6(3): 525-542.
- [8] Brousseau C M, Randall R G, Hoyle J A, et al. Fish community indices of ecosystem health: How does the Bay of Quinte compare to other coastal sites in Lake Ontario? [J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2011, 14(1): 75-84.
- [9] Chiu G S, Wu M A, Lu L. Model-based assessment of estuary ecosystem health using the latent health factor index, with application to the Richibucto Estuary[J]. PLoS One, 2013, 8(6): e65697.
- [10] 宋创业,胡慧霞,黄欢,等. 黄河三角洲人工恢复芦苇湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2705-2714.
- [11] 刘存东,何太蓉,苏维词. 基于模糊 AHP 的长寿湖生态系统健康评价[J]. 水生态学杂志, 2009, 30(6): 57-61.
- [12] 关松荫著. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 19861.
- [13] 马维伟,王辉,李广,等. 甘南尕斯库勒湿地退化过程中植被生物量变化及其季节动态[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 5091-5101.
- [14] 王元峰,王辉,马维伟,等. 尕斯库勒湿地泥炭土土壤理化性质[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 118-122.
- [15] 吴金鸿,杨涵,杨方社,等. 额尔齐斯河流域湿地生态系统健康评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(6): 149-154.
- [16] 周晓蔚,王丽萍,郑丙辉. 长江口及毗邻海域生态系统健康评价研究[J]. 水利学报, 2011, 42(10): 1201-1208, 1217.
- [17] 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, 639.
- [18] 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[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2011, 41(4): 1157-1165.
- [19] 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.
- [20] 张延凤,刘建书,张士峰. 基于层次分析法和熵值法的目标多属性威胁评估[J/OL]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(2): 163-165.
- [21] 马立广,曹彦荣,李新通. 基于层次分析法的拉市海高原湿地生态系统健康评估[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(2): 234-239.
- [22] Rapport D J, Gaudet C I, Calow P. Evaluating and Monitoring the Health of Large-scale Ecosystem [M]. Springer: Global Environment Change: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, 1995.
- [23] Van Niekerk L, 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.
- [24] 赵玉婷,李文龙,陈迪,等. 高寒牧区草地生态系统健康动态评价:以甘南地区为例[J]. 草业科学, 2017, 34(1): 16-29.
- [25] 何彦龙,袁一鸣,王腾,等. 基于 GIS 的长江口海域生态系统脆弱性综合评价[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3918-3925.
- [26] 刘帆,刘晖,徐凌翔,等. 青藏高原东部尕斯库勒湿地种子库沿水位梯度的分布格局[J]. 科学通报, 2013, 58(14): 1332-1339.
- [27] 马维伟,王辉,李广,等. 甘南尕斯库勒湿地不同植被退化阶段土壤有机碳含量及动态[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 254-259.
- [28] 赵高颖,秦佳琦. 基于 PSR 模型的长春北湖湿地生态系统健康评价研究[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(3): 71-74, 87.