

湿地环境质量评价方法研究进展

汪豪¹, 娄厦^{1,2}, 刘曙光^{1,2}, 陈明¹, 董行¹, 钟桂辉¹

(1. 同济大学水利工程系, 上海 200092; 2. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:近年来湿地评价已成为环境科学研究的热点。随着研究内容和评价方法的不断丰富,多种数学方法及模型被广泛应用于湿地环境质量评价。综述了目前国内外湿地中水环境、土壤及生态系统常用的评价方法,重点对水质评价的不确定性模型、土壤风险评价的生物效应方法和生态系统的指标评价法进行了归纳。针对目前湿地水环境和土壤质量评价研究中存在的不足,指出今后应结合遥感技术和地理信息系统自动化获取实时监测数据,优化水环境动态评价模型,加强湿地土壤质量标准的建立,进一步研究多种评价方法的耦合及评价模型的优化。

关键词:湿地评价; 水环境; 土壤; 生态系统; 评价模型; 评价方法; 研究进展

中图分类号:TV143 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)06-0085-10

Advances in wetland environmental quality assessment methods//WANG Hao¹, LOU Xia^{1,2}, LIU Shuguang^{1,2}, CHEN Ming¹, DONG Xing¹, ZHONG Guihui¹ (1. *Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*; 2. *Key Laboratory of Yangtze Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: In recent years, wetland evaluation has become a hot topic in environment research. With the enrichment of research content and methods for wetland environmental quality assessment, various mathematical methods and models are widely used. In this paper, evaluation methods of water environment, soil and ecosystems in wetlands were summarized at home and abroad. The uncertainty model of water quality evaluation, the biological effect method of soil risk evaluation and the index evaluation method of ecosystem were mainly concluded. Aiming at the shortcomings in the current study, it is pointed out that in the future, the real-time monitoring data should be automatically obtained by combining remote sensing technology and geographic information system, the dynamic evaluation model of water environment should be optimized, the establishment of wetland soil quality standard should be strengthened, and the coupling of multiple evaluation methods and the optimization of evaluation model should be further studied.

Key words: wetland evaluation; water environment; soil; ecosystem; evaluation model; evaluation method; advances

湿地是全球三大生态系统之一,在缓解污染、净化环境、保护生物多样性等方面起着重要的作用^[1]。然而,近年来过度的人为干扰活动导致了湿地出现水污染、土壤退化、生态破坏等问题,严重威胁了湿地生态系统的健康发展。因此,开展湿地评价对湿地保护、修复及管理具有重要科学意义和应用价值。

20世纪50年代, Bedford等^[2]美国专家首先开展了湿地珍稀植物和鸟类的环境影响评价工作。随着湿地评价研究的深入,评价指标和研究范围不断扩大。1999年, Ladson等^[3]综合考虑河流区域地质构造、水环境质量及水生生物等多方面因素,对澳大利

亚流域湿地整体的环境质量状况作出了评价分析。2004年,欧洲环保部门建立了一套基于生物多样性、水文特征及物理化学因子的评价指标体系^[4],为湿地环境质量评价提供了指导框架。随后出现了较多的构建指标体系的评价方法。近年来,随着计算机及大数据技术的提高,多种数学方法及模型的广泛采用,模糊数学、人工网络、PSR (press-state-response)模型等湿地环境定量评价方法^[5-6]得到了很大发展。同时,不同类型及不同时空尺度的湿地评价研究已成为热点内容,国内外学者相继开展了湿地水环境、土壤、生物及生态系统等多尺度评

基金项目:上海市“科技创新行动计划”“一带一路”国际合作项目(20230742500);国家自然科学基金(42072281);上海市土木工程高峰学科建设项目(2019010207)。

作者简介:汪豪(1994—),男,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力与水环境研究。E-mail: 1932632@tongji.edu.cn

通信作者:娄厦(1986—),女,副教授,博士,主要从事河口海岸水动力与水环境研究。E-mail: lousha@tongji.edu.cn

价方法的研究。目前,湿地环境质量评价在评价方法的量化分析、评价指标体系的构建及评价模型的改进等问题上有待进一步研究。

水是湿地发育、消退、演替的主导因素,尤其对于河流、湖泊型湿地,水环境的质量优劣直接影响着湿地生态的健康状况。由于水环境客观存在着大量的随机性和不确定性影响因素^[8],湿地水环境质量评价面临着一定挑战。对于河口滨海湿地,其沉积物及土壤是重金属的主要汇聚地^[8],重金属可以通过底床泥沙启动再次释放到水体中以影响水质及生态系统健康,因此重金属评价是湿地土壤质量评价的重要方面。湿地生态系统的评价指标众多、评价体系复杂,选取合适的评价方法是保证评价准确度、合理性和可信度的基础。本文从湿地水质评价的不确定性方法、土壤重金属风险评价的生物效应方法和生态系统的指标评价法三方面综述了国内外湿地环境质量评价的相关研究,并对各评价方法存在的问题及今后的研究方向进行了分析和展望。

1 湿地环境质量评价的概念及发展

20 世纪 60 年代,由于环境污染加剧,各国开始密切关注环境治理工作,美国科学家 Mcdonald^[9]首次提出环境质量评价的概念,并将水质指数和大气污染指数用于描述评价污染区域环境质量的优劣程度。1971 年,随着《拉姆萨尔公约》关于湿地定义的指示,湿地作为水陆过渡带重要生态系统,其环境影响和功能价值受到广泛关注,环境质量指数^[10]开始用于湿地水质、土壤质量等问题研究。经过 40 多年的发展,湿地环境质量评价由单要素评价扩展到区域生态系统环境质量综合评价,对环境质量概念、评价方法、指标体系等评价理论逐渐进行完善。燕守广^[11]认为湿地生态环境质量评价是根据人类生产和社会发展的适宜程度,采用一定评价标准和方法对某一区域范围的环境质量优劣和变化状态进行评价。Wu 等^[5]以模糊数学方法对湿地水环境质量进行综合评价,相对于水质量指数法提高了评价的精确度。Rapport 等^[12]提出了生态系统的恢复功能,将稳定性、弹性指数和抵抗力等作为生态环境质量的重要指标。Friend 等首先建立 PSR 模型,综合分析人类活动压力指标、环境变化指标和社会发展指标之间的内在关系,构建了全面的指标体系,随后基于 PSR 模型的多指标方法在湿地生态环境质量评价中得到了广泛应用^[13]。目前,国内外学者开始对不同空间尺度的湿地环境开展研究,侧重于探讨定量评价方法的实践应用。湿地系统不同尺度之间环境因子错综复杂,评价方法在参数权重的处理,关键

指标的选择及模型的改进等方面还面临诸多挑战。

2 湿地水环境质量评价方法

水环境质量是影响湿地生态健康的重要因素,常见的评价方法有单因子指数法^[14]、综合污染指数法^[15]、水污染指数法^[16]等。这些方法实际操作容易、数据分析计算简便,但其评价结果往往不够全面且容易受主观因素的影响,不能体现湿地水环境中多种物理化学因素动态变化下的不确定性。目前国内对湿地水质评价研究中,基于数学方法的不确定性模型评价法主要有模糊综合评判法、贝叶斯水质模型评价法、BP 神经网络评价法和灰色关联分析法等。

2.1 模糊综合评判法

模糊综合评判法是将一些边界不确定,难以定量的因素定量化,进而计算各因子的隶属度,得到评价等级的一种方法^[16]。

模糊综合评判法具有能定量描述不确定性问题和评价结果契合客观规律的优点。杨浩等^[17]运用模糊评判法和单因子指数法对洮河湿地水环境质量进行评价,结果显示模糊综合评判法能定量分析各污染因子的隶属程度,更加全面、合理地反映洮河湿地水质污染程度。Wen 等^[18]采用模糊综合评判法,将有机污染物、富营养化和重金属污染中的不确定性问题综合考虑,从而客观、全面反映东寨港滨海湿地水环境健康状况。

然而,模糊综合评判法在赋权方面还存在一定的不足,常采用污染物超标法确定权重系数。该赋权方法虽然突出了超标污染因子对水质的影响,但是由于忽略或减轻了一些污染因子的作用,可能导致评价结果不贴近真实情况。而且不同的实测样本采用超标法赋权,各样本相同指标的权重系数可能出现较大的变化,加大了实测水样之间评价结果比较的难度。针对超标法的不足,邹志红等^[19]提出熵权法,在对各评价因子赋权时,充分考虑多个评价水样之间的关联,大大减少了计算监测指标权重的工作量。韩晓刚等^[20]采用主成分分析法确定权重系数,并结合模糊综合隶属度对水质进行评价,结果表明主成分赋权法削弱了污染因子随机性所造成的数值波动,评判结果也更贴近水体实际状况。

2.2 贝叶斯水质模型评价法

贝叶斯评价法是以数理统计为基础,定量描述各评价因子或要素之间关联程度,通过数据信息的概率推断来评价水质的一种方法^[21]。目前,贝叶斯水质模型已用于处理湿地水环境评价中的不确定性问题。针对水质评价情况时,先由观测信息推测先

验概率,然后以几何距离概念和分层思想计算评价因子的条件概率,利用先验概率和条件概率的贝叶斯公式^[22]以最大概率原则确定水质所属类别。

Liu 等^[23]利用贝叶斯评价法,根据实测资料计算出受污染河流属于某一类别水质的可能性,从而对河流湿地水质状况进行了评价。杨海江等^[24]采用贝叶斯模型评价法,计算综合后验概率,对星海湖湿地水环境状况进行了评价,结果显示星海湖水域最主要的污染因子为 TP、TN 和 COD_{Mn}。

然而,贝叶斯水质模型在描述参数不确定性方面尚有不足,其模型参数常以实测浓度的均值输入,无法考虑枯水期或其他极端水文条件下参数变化较大的情况,可能导致评价结果缺乏说服力。一些学者开始对贝叶斯模型改进方法进行探讨,余勋等^[25]发现三角模糊数能反映一定置信度水平下参数的变动,将三角模糊数与贝叶斯模型结合对水质进行评价,能更客观、全面地反映水质污染程度的实际状况。李韶慧等^[26]构建了基于层次分析法和熵值理论的贝叶斯模型并应用于水质评价,克服了参数的不确定性,使评价结果更加客观、可靠。

2.3 BP 神经网络评价法

人工神经网络评价法是基于计算机网络,具有人脑相似的学习推理功能,能解决水质标准与评价指标之间的非线性关系^[27]。BP 网络是最常见的人工神经网络,由输入层、隐蔽层和输出层构成^[28],其评价过程大致为:①选择水环境评价指标,对断面监测数据作归一化处理;②从输入层正向传播处理好的标准训练样本;③将反馈的误差信息从输出层反向传递给各层单元,通过不断改进权重和阈值将输出值的均方误差降到最小。机器自学习功能大大减弱了主观影响,提高了评价的精度,而且训练好的权重还能用于评价其他实测样本。因此,BP 神经网络法拥有客观可靠性和通用性等优点。卞建民等^[29]利用 BP 神经网络对辽河源头区湿地水质进行评价,结果表明 BP 神经网络评价法具有较强的适用性和客观性,大大降低了指数法和模糊评价法固有的主观选择的任意性。

然而,BP 神经网络法也存在诸多缺点,训练过程需要大量实测样本,标准 BP 网络易陷入局部极小、稳定性较差、学习收敛速度慢等^[30],从而对 BP 网络的应用推广造成了较大的限制。目前,已有学者对 BP 网络模型优化改进作出有益的探究,大体可分为基于标准数值优化和基于标准梯度下降的两类改进算法。曹剑峰等^[31]建立基于步长自适应法和 LM 算法的 BP 神经网络模型用于湿地水质评价,具有计算速度快、方法简单、评价结果客观准确的优点。

2.4 灰色关联分析法

灰色关联分析法是基于灰色系统的一种评价法,其原理为:计算水质实测数据与各评价标准值的关联系数,然后对各关联系数赋权得到关联度,最后以最大关联度所在水质级别确定水质评价等级。

灰色关联分析法具有评价结果可比性好和受权重确定影响较小的优点。许秀梅等^[32]采用灰色关联分析法,对多布库尔湿地水生环境进行了评价,定量描述了水质指标与浮游植物之间的关联程度,评价结果具有客观性和可比性。然而,该方法存在静态分辨系数均质化、分辨系数的确定带有主观性等缺点。针对这些不足,马艳等^[33]引入了动态分辨系数对灰色关联分析法进行改进,并将改进后的方法用于评价四湖流域湖泊型湿地水质污染情况,结果表明,该方法与传统灰关联分析法相比,有效地提高了评价结果的可靠性和准确性。柴蕴栩等^[34]采用基于 AHP 法的灰色关联分析法对白城地区地下水质进行评价,充分考虑了不同水质指标在评价过程中的差异性,减弱了主观因素的影响,获得了更加全面、准确的评价结果。

以上 4 种评价方法是处理水环境中参数不确定性问题的常用评价方法,各自的侧重点和优缺点不同,适用条件也存在差异,其对比情况见表 1。灰色关联分析法在评价原理上与模糊综合评判法具有相似性,一些学者将两种方法进行了对比研究。安乐生等^[35]发现灰色关联分析法的评价结果更贴近综合污染指数法,各评价因子权重的确定也更加合理。而康晓风等^[36]则认为模糊综合评判法相比灰色关联法在

表 1 湿地水环境不确定性模型评价法对比

评价方法	优点	缺点	适用范围/条件	应用
模糊综合评判法	能综合分析多种评价因子,评价结果符合自然变化规律	计算过程复杂,权重的确定方法尚未形成统一的标准	精度要求较高,含有众多模糊性、不确定性因素的水环境	[38-39]
贝叶斯水质模型评价法	计算简便,能快速做出推断,能很好地描述模型结构方面的不确定性	模型参数易受环境条件的影响	样本数据较少的小范围评价分析	[25]
BP 神经网络评价法	克服了计算过程中的主观性,具有较强的自学习和自适应性	神经网络的训练过程复杂,需要大量训练样本	精度要求高,实测数据较多的大范围评价分析	[28]
灰色关联分析法	权重的确定更加合理;评价结果排序明确、可比性较好	计算较复杂;分辨系数的确定带有主观性	适用于信息不完全清楚的多指标系统	[34]

评价精度和可靠性上更有优势。另外,江春波等^[37]将模糊模型、灰色关联法和 BP 神经网络法等不确定性模型应用于衡水湖湿地水质评价,对比发现 BP 神经网络法的评价精度更高,结果更加客观真实。徐悦等^[40]运用 BP 神经网络法和基于熵值理论的贝叶斯模型法对石佛寺湿地水环境质量进行评价,对比显示两种评价结果基本一致,但后者计算方法更简单明了。

3 湿地土壤重金属评价方法

湿地沉积物是重金属主要的源汇库,对于湿地土壤而言,开展重金属评价至关重要,可为人体健康和土壤环境保护提供科学依据^[41-42]。目前国内外湿地土壤评价中,有关重金属总量和综合污染程度的评价研究较多,常用的方法有地积累指数法^[10,43]、沉积物富集系数法^[44]、内梅罗综合指数法^[45]、污染负荷指数法^[46]等。但这些方法忽略了生物毒性及其对生态环境的影响。

潜在生态风险指数法^[47-48]引入毒性响应系数,将毒理学与重金属的生态效应联系起来,在湿地土壤生态风险评价中得到广泛的应用。随着对重金属研究的深入,发现各化学形态生物吸收利用的情况不同,所造成的生物毒性和环境效应存在较大差异。目前,关于重金属形态的评价方法主要有次生相与原生相比值法和风险评估编码法。

3.1 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是 Hakanson 从沉积学的角度出发,根据重金属性质及其在环境中迁移转化沉积等特点,对重金属风险进行评价的一种方法^[49-50]。

潜在风险指数法适用于同时考虑一种或多种重金属浓度、生物毒性及沉积影响的情况。Wang 等^[45]采用潜在风险指数法对饶阳河湿地进行评价,考虑重金属的生物毒性,得出 8 种重金属污染物在核心区和缓冲区的综合影响程度。齐月等^[51]利用潜在生态风险指数法,获得了黄河三角洲湿地 Cu、Pb、Cd 和 As 4 种重金属的生态危害程度及污染分布规律。

该方法虽然考虑了生物毒性,但未能体现不同化学形态生态危害的差异性,可能使评价结果不符合实际。针对不足,已有研究者进行了改进。Zhu 等^[52]结合风险评估编码法,引入了不同的毒性系数,进而提出了修正的潜在生态风险指数,充分考虑了不同重金属形态的影响;卢聪等^[53]引入参考值差值与修正浓度,并结合不同形态的生物效应,建立了适用性更广的潜在生态风险指数法。

3.2 基于重金属形态的风险评价

重金属各形态的含量不仅影响着湿地土壤的理化性质,而且危害着水生生态系统的健康。因此,基

于重金属的形态特征开展湿地土壤质量评价,对于生态环境更有实际意义。

3.2.1 风险评估编码法

风险评估编码法 (risk assessment code, RAC)^[54-55]是一种基于重金属活性形态分析的评价法。活性态所占比例越高,重金属元素危害生态环境的风险越大。

汤向宸等^[56]利用 RAC 对贵州草海湿地 Hg、As 的危害程度进行分析,研究表明 Hg 整体较高的生物可利用性对栖息地黑颈鹤鸟类可能会产生影响,As 无较强的生态风险威胁。Jain^[54]通过重金属形态结合 RAC 研究,对亚穆纳河湿地沉积物中重金属潜在危害进行分析,结果表明,Cd 和 Pb 的活性形态可能会对水生环境造成较大危害,Zn 的形态只显示中低风险。

3.2.2 次生相与原生相比值法

次生相与原生相比值法 (ratio of secondary phase and primary phase, RSP)^[57-58]可用于评价重金属潜在风险程度。在沉积物地质学上,将几乎不发生迁移转化的金属残渣称为原生地球化学相;将可在环境中发生转化的其他形态统称为次生地球化学相^[59]。重金属元素的原生相和次生相的分配比例反映重金属生物可利用性和化学活性,次生相占比越高,重金属污染物释放到环境造成危害的可能性越大。

罗松英等^[60]通过计算湛江湾红树林湿地沉积物中各重金属的非残渣所占比例,并结合 RSP 污染等级划分标准,发现 Pb、Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 这 6 种重金属具有极强的化学活性和生物有效性,潜在生态风险较大。He 等^[58]利用 RSP,从形态学角度进行重金属生态风险评价,计算了长江河岸湿地重金属平均 K_{RSP} 值,发现 Cd 为重度污染,Pb、Cr 为轻度污染,Cu、Zn 为无污染。

上述两种方法均是适用于重金属形态的评价法,充分考虑了重金属的生物效应和化学活性,但忽略了重金属生物毒性和富集程度的影响,无法全面反映湿地重金属污染状况。针对各种重金属评价法的优缺点,目前湿地土壤评价研究中,常从形态和总量两方面对重金属污染现状进行综合评估。杨新明等^[61]利用 RAC 法与潜在生态风险指数法,综合考虑重金属浓度、毒性和生物有效性,从而全面评估了小清河污灌区土壤重金属的污染程度及生态风险状况。

4 湿地生态环境质量评价方法

湿地生态环境质量评价是基于人类社会与自然环境之间相适宜程度,对生态环境的性质及健康状况进行的综合评估。湿地是一个错综复杂的生态系统,影响生态环境质量的评价指标也是纷繁多样。

目前,湿地生态环境质量评价研究的核心是构建科学合理的评价指标,然后通过选择合适的方法确定权重系数,进而对生态系统健康状况进行评价。评价方法主要有生物指标法和 PSR 模型法。

4.1 生物指标评价法

湿地生态系统现有的生物群落都是长期地理变迁和生物进化的结果,是对湿地中各种物理、化学、生物因子的综合和直接的反映^[62]。湿地环境的变化时刻影响着其内在生物的种类丰度、种群密度、群落结构和生理功能等。因此,通过单个物种或指示类群评价湿地生态环境健康状况是非常直接和有效的方法。生物指标法主要是根据生态系统中的特有物种、环境敏感物种或其他关键物种,运用适宜的方法测量其生物量、数量、生产力、环境功能指标及一些生理生态指标,进而对生态系统的健康状况进行描述评估^[63]。

目前,评价湿地健康程度的可行指标主要有藻类、鸟类、两栖动物以及底栖无脊椎动物等^[64]。葛继稳等^[65]利用浮游藻类和高等植物作为指标来评价湖泊湿地生物多样性及生态健康状况。郑耀辉等^[66]根据红树林生态系统自身的特点,指出两栖动物海蛙可作为红树林湿地的环境指示物种。另外,国内外还常采用生物完整性指数 (index of biotic integrity, IBI) 来综合反映湿地整体的健康状况。Breine 等^[67]基于鱼类构建 IBI,运用多种生物参数对佛兰德斯上游河流湿地的生态环境状况进行了评价。陈展等^[68]基于多种水生植物建立符合白洋淀湿地的 IBI,结合植物群落和人类干扰之间的反应来评估白洋淀湿地整体的健康状况。

生物指标评价法适用于具有环境敏感物种的湿地系统,由于测度方式简单、花费低、评价结果直观有效等优势,在湿地生态环境健康评价中有很广泛的应用。然而,该方法指示物种的筛选标准不明确且主观性较强,可能会对评价结果产生较大的影响。同时,生物指标评价法只探究化学、物理、生物因子的综合效应,未考虑人类健康和社会经济等因素,难以反映湿地生态环境变化与人类社会响应措施之间的影响关系。

4.2 PSR 模型综合评价法

随着对湿地生态系统的深入研究,评价指标由

最初的生物、化学、物理指标,逐渐加入了人类对环境干扰活动和社会响应措施的相关指标,使生态环境质量评价的指标体系不断完善。目前,PSR 模型^[6,69]是应用最广泛的指标体系框架。PSR 模型综合评价法通过充分分析环境要素与人类活动之间因果关系,选取具有代表性的压力、状态、响应指标,构建合理的评价指标体系,结合定量的分析方法建立综合评价模型,从而对湿地生态环境的优劣程度和健康状况进行评价。

PSR 指标体系主要有目标层、准则层和指标层 3 个层次。目标层是评价对象,准则层分为压力、状态和响应三项,指标层是对应的具体评价指标。湿地生态系统的压力是自然灾害和人类对生态环境干扰所造成的,包括大面积垦殖、排放工农业污水、破坏生物多样性等方面,压力指标具体有土地利用程度、人类干扰指数、人口密度等。施加给环境的压力导致生态系统的物理化学性质、生物多样性及生态功能发生变化,状态指标具体有水质等级、植被覆盖率、景观优势度指数、物质生产功能等。当状态的改变到达一定程度时,人类会对环境破坏采取相应的保护管理措施,响应指标具体有环保投资指数、湿地管理水平、政策法规贯彻力度等。前人研究中,关于详细的评价指标见表 2。

Shi 等^[76]基于 PSR 模型选择合适的评价指标,并以熵权法确定权重,建立综合评价模型,进而对上海市 7 个主要滩涂湿地的生态环境安全性进行了评估。赵衡等^[77]采用层次分析法赋权,建立 PSR 综合评价模型,对三门峡湿地生态环境质量状况进行了评价。杨一鹏等^[75]利用 PSR 模型综合评价法对松嫩平原湿地生态环境的时空分布规律和结构功能动态变化进行了分析评价。

PSR 模型法能对众多指标进行系统性的分类,充分分析人为干扰下各指标的状态变化和响应措施,适用于大范围的湿地系统环境质量综合评价分析。然而,PSR 模型在社会经济发展对环境影响的描述上还存在一定的不足,一些学者开始对 PSR 模型进行调整。欧洲环境署的人员在综合分析社会发

表 2 湿地生态环境质量评价指标体系

准则层	指标层	具体指标	参考文献
压力指标	自然压力	湿地自然灾害	[70]
	人类压力	土地利用程度、人口密度、工业污水排放强度、化肥施用强度、人类干扰指数	[6, 70-71]
状态指标	物理化学指标	水质等级、地下水埋深、富营养化程度、土壤有机质含量、土壤含盐量	[71-72]
	生物指标	植被覆盖率、生物多样性指数、物种濒危状况、优势性植物覆盖率、初级生产力水平	[72-74]
	景观指标	景观多样性指数、景观破碎度指数、景观优势度指数、均匀度指数、平均斑块面积	[6, 75]
	功能指标	物质生产功能、控制侵蚀功能、水文调节指数、观光旅游功能	[71-72]
响应指标	人类响应	环保投资指数、湿地管理水平、政策法规贯彻力度、生态恢复工程、污水处理率	[70-72]

展和生态环境间的影响关系后,将“驱动力”和“影响”引入到 PSR 模型中,提出了 DPSIR(driving force-pressure-state-impact-response) 模型^[78-79]。Zhang 等^[80]利用 DPSIR 模型建立评价指标体系,对南四湖湿地生态环境健康水平进行评估,更加明确地描述了社会经济发展对环境造成的影响。王贺年等^[78]运用 DPSIR 模型,除了选择湿地生态系统自身的结构和功能性指标外,还将社会经济和环境保护意识等指标也纳入了评价指标体系中,构建了更加全面的评价指标体系,并对衡水湖湿地的生态健康状况进行了评价。

5 研究展望

- a. 基础理论与研究尺度问题。近年来,国内外学者相继开展了湿地环境影响评价、湿地生态健康评价、湿地环境质量评价、湿地生态安全评价等方面的研究,但这些湿地评价在研究对象和内容上存在概念相互混淆,甚至部分重合的现象。今后首先需要科学界定湿地环境质量评价的概念内涵,建立完善的基础理论体系。目前,湿地环境质量评价研究多限于生态系统层次,对湿地土壤、生物、景观等较小尺度的研究较少,而实际上不同尺度的环境质量存在着复杂的相互影响关系。因此,应将大、中、小尺度的湿地区域研究有机地结合起来,研究其内在机理和评价结果的相互影响关系。
- b. 水环境的动态评价问题。水环境中某一监测断面的指标时刻发生着改变,评价结果不可避免带有短时效应,想要获得长期稳定的综合评价结果,需要连续、可靠的监测数据的支撑。地理信息系统 (GIS) 技术不仅能自动化获取实时、动态的监测数据,还能为空间信息的分析处理提供操作平台。尽管 GIS 技术在水质监测中已有应用,但目前尚未形成一种成熟的水环境动态评价模型。今后可进一步研究 GIS 技术与数学理论的集成方法。
- c. 加强湿地土壤质量评价。目前,湿地土壤研究尚未形成统一的质量标准且评价研究集中于重金属污染方面,但随着社会活动的加剧,各种营养成分、有机污染物、地质构造及微生物也将成为影响湿地土壤质量的关键。今后应根据不同类型的湿地,综合多种物理、化学、生物指标,建立合适的湿地土壤质量标准。生命周期评价方法考虑了土壤周期变化的环境影响,可作为湿地土壤环境质量评价的新方法。另外,在已有评价方法的基础上,应进一步研究多种评价方法的耦合及评价模型的优化。
- d. 生态环境的指标选择问题。湿地类型众多,面积辽阔,评价指标错综复杂。然而,过多的评价指

- 标在实际工作中不易操作,容易导致生态环境质量评价问题复杂化。目前湿地评价研究所建立的指标体系中,普遍存在评价指标代表性不足或指标信息互相重叠的现象。因此,有必要对各类指标进行精炼,针对湿地类型特点和评价目的选取具有代表性、易于操作且能全面反映生态环境状况的评价指标。
- e. 未来发展方向。我国湿地环境质量评价研究起步较晚,引入其他学科合适的评价方法是今后有效开展环境评价工作的基础。湿地评价涉及水利学、土壤学、生态学、环境学甚至社会学等学科,多学科、多方法的集成组合是今后整体评价的研究方向。另外,随着遥感技术、机器学习方法及人工智能算法的日益完善和推广应用,不同时间段的动态监测数据和空间信息将更容易获取,可以在建立环境监测数据库的基础上创立湿地数据共享平台。大数据分析方法及空间评价模型将是未来湿地环境质量评价研究的重点。
- 参考文献:
- [1] HUANG C D, YE X Y, DENG C B, et al. Mapping above-ground biomass by integrating optical and SAR imagery: a case study of Xixi National Wetland Park, China [J]. Remote Sensing, 2016, 8(8):281-296.
 - [2] BEDFORD B L, PRESTON E M. Developing the scientific basis for assessing cumulative effects of wetland loss and degradation on landscape functions : status, perspectives, and prospects [J]. Environmental Management, 1988, 12(5): 751-771.
 - [3] LADSON A R, WHITE L J, DOOLAN J A, et al. Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia [J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 453-468.
 - [4] ORTEGA M, VELASCO J, MILLAN A, et al. An ecological integrity index for littoral wetlands in agricultural catchments of semiarid Mediterranean regions [J]. Environmental Management, 2004, 33(3): 412-30.
 - [5] WU J M, XU D, HE F, et al. Comprehensive evaluation of substrates in vertical-flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment [J]. Water Practice and Technology, 2015, 10(3): 625-432.
 - [6] 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. (XU Haotian, ZHOU Linfei, CHENG Qian. Health assessment and early warning of linghekou wetland ecosystem based on PSR model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8264-8274. (in Chinese))
 - [7] 彭涛, 陈晓宏, 王高旭, 等. 基于集对分析与三角模糊

- 数的滨海湿地生态系统健康评价[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6): 917-22. (PENG Tao, CHEN Xiaohong, WANG Gaoxu, et al. Coastal wetland ecosystem health assessment based on set pair analysis and triangular fuzzy number[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 23(6): 917-922. (in Chinese))
- [8] 徐明露, 方凤满, 林跃胜. 湿地土壤重金属污染特征、来源及风险评价研究进展[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 762-768. (XU Minglu, FANG Fengman, LIN Yuesheng. Research progress on characteristics, sources and risk assessment of heavy metal pollution in wetland soil[J]. Soil Bulletin, 2015, 46(3): 762-768. (in Chinese))
- [9] MCDONALD M E. EMAP overview: objectives, approaches, and achievements[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 64(1): 3-8.
- [10] JIANG X L, XIONG Z Q, LIU H, et al. Distribution, source identification, and ecological risk assessment of heavy metals in wetland soils of a river-reservoir system[J]. Environmental Science Pollution Research, 2017, 24(1): 436-44.
- [11] 燕守广. 湿地生态环境质量评价研究概述[C]//中国环境科学学会. 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第三卷). 厦门:中国环境科学学会,2017:4.
- [12] RAPPORT D J, WHITFORD W G. How ecosystems respond to stress: common properties of arid and aquatic systems[J]. Bioscience, 1999, 49(3): 193-203.
- [13] 周静, 万荣荣. 湿地生态系统健康评价方法研究进展[J]. 生态科学, 2018, 37(6): 209-16. (ZHOU Jing, WAN Rongrong. Research progress of wetland ecosystem health assessment methods[J]. Ecological Science, 2018, 37(6): 209-216. (in Chinese))
- [14] YAN C A, ZHANG W C, ZHANG Z J, et al. Assessment of water quality and identification of polluted risky regions based on field observations & GIS in Honghe River Watershed, China[J]. Plos One, 2015, 10(3):234-247.
- [15] ZHANG Y A, CHU C L, LIU L, et al. Water environment assessment as an ecological red line management tool for marine wetland protection[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(8): 134-146.
- [16] 潘峰, 付强, 梁川. 模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究[J]. 环境工程, 2002(2): 58-61. (PAN Feng, FU Qiang, LIANG Chuan. Application of fuzzy comprehensive evaluation in comprehensive evaluation of water environmental quality[J]. Environmental Engineering, 2002(2): 58-61. (in Chinese))
- [17] 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 等. 基于模糊综合评判法的洮河水环境质量评价[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(增刊1): 380-386. (YANG Hao, ZHANG Guozhen, YANG Xiaoni, et al. Environmental quality assessment of taohe river based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Environmental Science and Technology, 2016, 39(Sup1): 380-386. (in Chinese))
- [18] WEN J S, LI F, ZENG X Y, et al. Genetic algorithm-based fuzzy comprehensive evaluation of water quality in Dongzhaigang[J]. Water, 2015, 7(9): 4821-4847.
- [19] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2005, 12(4): 552-556. (ZOU Zhihong, SUN Jingnan, REN Guangping. Entropy weighting of fuzzy evaluation factors and its application in water quality evaluation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 12(4): 552-556. (in Chinese))
- [20] 韩晓刚, 黄廷林, 陈秀珍. 改进的模糊综合评价法及在给水厂原水水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1513-1518. (HAN Xiaogang, HUANG Tinglin, CHEN Xiuzhen. Improved fuzzy comprehensive evaluation method and its application in raw water quality evaluation of water supply plants[J]. Chinese Journal of Environmental Sciences, 2013, 33(5): 1513-1518. (in Chinese))
- [21] BORSUK M E, STOW C A, RECKHOW K H. A Bayesian network of eutrophication models for synthesis, prediction, and uncertainty analysis[J]. Ecological Modelling, 2004, 173(2/3): 219-239.
- [22] HADDAD K, EGODAWATTA P, RAHMAN A, et al. Uncertainty analysis of pollutant build-up modelling based on a Bayesian weighted least squares approach[J]. Science of the Total Environment, 2013, 449:410-417.
- [23] LIU Y, YANG P J, HU C, et al. Water quality modeling for load reduction under uncertainty: a Bayesian approach[J]. Water Research, 2008, 42(13): 3305-3314.
- [24] 杨海江, 钟艳霞, 罗玲玲, 等. 基于贝叶斯的星海湖湿地水质评价及特征分析[J]. 节水灌溉, 2018, 10(4): 92-95. (YANG Haijiang, ZHONG Yanxia, LUO Lingling, et al. Water quality evaluation and characteristic analysis of Xinghai Lake Wetland based on Bayes[J]. Water Saving Irrigation, 2018, 10(4): 92-95. (in Chinese))
- [25] 余勋, 梁婕, 曾光明, 等. 基于三角模糊数的贝叶斯水质评价模型[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 904-909. (YU Xun, LIANG Jie, CENG Guangming, et al. Bayesian water quality evaluation model based on triangular fuzzy number[J]. Chinese Journal of Environmental Sciences, 2013, 33(3): 904-909. (in Chinese))
- [26] 李韶慧, 周忠发, 但雨生, 等. 基于组合赋权贝叶斯模型的平寨水库水质评价[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 211-217. (LI Shaohui, ZHOU Zhongfa, DAN Yusheng, et al. Water quality evaluation of Pingzhai Reservoir based on combined weighted Bayesian model

- [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40 (2): 211-217. (in Chinese))
- [27] MO M H, WANG X L, WU H J, et al. Ecosystem health assessment of Honghu Lake Wetland of China using artificial neural network approach [J]. Chinese Geographical Science, 2009, 19(4): 349-56.
- [28] 王彤彤, 张剑, 涂川, 等. IPSO-BP 神经网络在渭河天水段水质评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(8): 175-81. (WANG Tongtong, ZHANG Jian, TU Chuan, et al. Application of IPSO-BP neural network in water quality assessment of Tianshui Section of Weihe River[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 36(8): 175-81. (in Chinese))
- [29] 卞建民, 胡昱欣, 李育松, 等. 基于 BP 神经网络的辽河源区水质评价研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21 (1): 147-151. (BIAN Jianmin, HU Yuxin, LI Yulong, et al. Study on water quality evaluation in the source area of Liaohe River based on BP neural network[J]. Soil and Water Conservation Research, 2014, 21(1): 147-151. (in Chinese))
- [30] 王日莲, 董曼玲. 人工神经网络在水文预报中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(5): 33-34. (WANG Rilian, DONG Manling. Application of artificial neural network in hydrological forecasting[J]. Advances in Water Resources and Hydropower Science and Technology, 2002, 22(5): 33-34. (in Chinese))
- [31] 曹剑峰, 平建华, OUMAR S, 等. 改进 BP 神经网络在地下水环境质量评价中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(3): 21-23. (CAO Jianfeng, PING Jianhua, OUMAR S, et al. Application of improved BP neural network in groundwater environmental quality assessment [J]. Advances in Water Resources and Hydropower Science and Technology, 2006, 26(3): 21-23. (in Chinese))
- [32] 许秀梅, 陈佳喜, 柴方营, 等. 多布库尔自然保护区水体浮游植物分布及水质综合评价[J]. 湿地科学, 2017, 15(3): 457-463. (XU Xiumei, CHEN Jiaxi, CHAI Fangying, et al. Phytoplankton distribution and comprehensive evaluation of water quality in duobucur nature reserve[J]. Wetland Science, 2017, 15(3): 457-463. (in Chinese))
- [33] 马艳, 王剑. 改进型灰色关联分析法在湿地水质评价中的应用: 以四湖流域为例[J]. 节水灌溉, 2015, 36 (4): 70-73. (MA Yan, WANG Jian. Application of improved grey relational analysis method in wetland water quality evaluation: a case study of Four Lakes Basin[J]. Water-saving Irrigation, 2015, 36(4): 70-73. (in Chinese))
- [34] 柴蕴栩, 肖长来, 梁秀娟, 等. 改进 AHP 法灰色关联和模糊综合评价在地下水水质评价中的适用性[J]. 水利水电技术, 2019, 50(4): 146-152. (CHAI Yunxu, XIAO Changlai, LIANG Xiujuan, et al. Applicability of improved AHP grey correlation and fuzzy comprehensive evaluation in groundwater quality evaluation [J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2019, 50(4): 146-152. (in Chinese))
- [35] 安乐生, 赵全升, 刘贯群, 等. 代表性水质评价方法的比较研究[J]. 中国环境监测, 2010, 26(5): 47-51. (AN Lesheng, ZHAO Quansheng, LIU Guanqun, et al. Comparative study on representative water quality evaluation methods[J]. China Environmental Monitoring, 2010, 26(5): 47-51. (in Chinese))
- [36] 康晓风, 林兰钰, 李茜. 地表水环境质量评价方法实证及适用性分析[J]. 中国环境监测, 2014, 30(6): 102-107. (KANG Xiaofeng, LIN Lanyu, LI Xi. Demonstration and applicability analysis of surface water environmental quality assessment method [J]. China Environmental Monitoring, 2014, 30(6): 102-107. (in Chinese))
- [37] 江春波, 张明武, 杨晓蕾. 华北衡水湖湿地的水质评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(6): 848-851. (JIANG Chunbo, ZHANG Mingwu, YANG Xiaolei. Water quality evaluation of Hengshui Lake Wetland in North China [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2010, 50(6): 848-851. (in Chinese))
- [38] WANG J Y, YAN H X, XIN K L, et al. Risk assessment methodology for iron stability under water quality factors based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Environmental Sciences Europe, 2020, 32(1): 67-77.
- [39] WU X L, HU F. Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Ecological Indicators, 2020, 113(3): 236-248.
- [40] 徐悦, 周林飞, 成遣. 基于两种方法的石佛寺人工湿地水质综合评价与分析[J]. 节水灌溉, 2017, 22(4): 106-109. (XU Yue, ZHOU Linfei, CHENG Qian. Comprehensive evaluation and analysis of water quality of Shifosi constructed wetland based on two methods [J]. Water Saving Irrigation, 2017, 22(4): 106-109. (in Chinese))
- [41] SCHULZ-ZUNKEL C, KRUEGER F. Trace metal dynamics in floodplain soils of the River Elbe: a review [J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(4): 1349-62.
- [42] GAO X L, ZHOU F X, CHEN C T A. Pollution status of the Bohai Sea: an overview of the environmental quality assessment related trace metals [J]. Environment International, 2014, 62(4): 12-30.
- [43] XIAO H, SHAHAB A, LI J Y, et al. Distribution, ecological risk assessment and source identification of heavy metals in surface sediments of Huixian Karst Wetland, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 185(3): 18-32.
- [44] 李莲芳, 曾希柏, 李国学, 等. 北京市温榆河沉积物的重金属污染风险评价[J]. 环境科学学报, 2007, 56 (2): 289-97. (LI Lianfang, ZENG Xibai, LI Guoxue, et al. Evaluation in groundwater quality evaluation [J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2019, 50(4): 146-152. (in Chinese))

- p>et al. Heavy metal pollution risk assessment of sediments in Wenyu River, Beijing [J].
- Acta Scientiae Circumstantiae*
- , 2007, 56(2): 289-297. (in Chinese))
- [45] WANG X D, SUN Y F, LI S Y, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil from the Raoyanghe Wetland, China[J]. *Plos One*, 2019, 14(8): 156-167.
- [46] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 买托合提·阿那依提, 等. 博斯腾湖湿地边缘带农田土壤重金属的污染风险评价[J]. *土壤*, 2018, 50(2): 369-375. (MAIMAITI Tursun Azizi, AJIGULI Mamuti, MAITUOHEITI Anayiti, et al. Pollution risk assessment of heavy metals in farmland soil in Bosten Lake Wetland marginal zone [J]. *Soil*, 2018, 50(2): 369-375. (in Chinese))
- [47] YANG C M, WU Y Q, ZHANG F, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments from a source water reservoir[J]. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 2016, 28(1/2/3/4): 133-141.
- [48] PETROSYAN V, PIRUMYAN G, PERIKHANYAN Y. Determination of heavy metal background concentration in bottom sediment and risk assessment of sediment pollution by heavy metals in the Hrazdan River (Armenia) [J]. *Applied Water Science*, 2019, 9(4): 123-132.
- [49] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution-control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [50] FU C, GUO J S, PAN J, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metal pollution in sediments of the Yangtze River within the Wanzhou Section, China[J]. *Biological Trace Element Research*, 2009, 129(1/2/3): 270-277.
- [51] 齐月, 李俊生, 马艺文, 等. 黄河三角洲滨海滩涂湿地沉积物重金属空间分布及生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(6): 1488-1496. (QI Yue, LI Junsheng, MA Yiwen, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in coastal wetland sediments of the Yellow River Delta [J]. *Environmental Science Research*, 2020, 33(6): 1488-1496. (in Chinese))
- [52] ZHU H N, YUAN X Z, ZENG G M, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(6): 1470-1477.
- [53] 卢聪, 李涛, 付义临, 等. 基于生物可利用性与宽浓度范围的 Hakanson 潜在生态风险指数法的创建: 以小秦岭金矿区农田土壤为例 [J]. *地质通报*, 2015, 34(11): 2054-2060. (LU Cong, LI Tao, FU Yilin, et al. Establishment of Hakanson potential ecological risk index method based on bioavailability and wide concentration range; taking farmland soil in Xiaoqinling Gold Mine as an example [J]. *Geological Bulletin*, 2015, 34(11): 2054-2060. (in Chinese))
- [54] JAIN C K. Metal fractionation study on bed sediments of River Yamuna, India [J]. *Water Research*, 2004, 38(3): 569-578.
- [55] SINGH K P, MOHAN D, SINGH V K, et al. Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti River sediments: a tributary of the Ganges, India [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 312(1/2/3/4): 14-27.
- [56] 汤向宸, 林陶, 夏品华, 等. 贵州草海湿地不同水位梯度沉积物中汞、砷形态分布及风险评价 [J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1): 100-110. (TANG Xiangchen, LIN Tao, XIA Pinhua, et al. Speciation distribution and risk assessment of mercury and arsenic in sediments at different water levels in Caohai Wetland, Guizhou Province [J]. *Journal of Lake Science*, 2020, 32(1): 100-110. (in Chinese))
- [57] WANG P F, LIU J J, WANG C, et al. Seasonal, spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from a watershed area in Gonghu Bay in Taihu Lake, China [J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2014, 25(4): 605-616.
- [58] HE L P, LIU D, LIN J J, et al. Total nitrogen and pH-controlled chemical speciation, bioavailability and ecological risk from Cd, Cr, Cu, Pb and Zn in the water level-fluctuating zone sediments of the Three Gorges Reservoir [J]. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 2017, 29(1): 89-96.
- [59] 徐亚岩, 宋金明, 李学刚, 等. 渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2012, 33(3): 732-740. (XU Yayan, SONG Jiming, LI Xuegang, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of various forms of heavy metals in surface sediments of the Bohai Bay [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(3): 732-740. (in Chinese))
- [60] 罗松英, 邢雯淋, 梁绮霞, 等. 湛江湾红树林湿地表层沉积物重金属形态特征、生态风险评价及来源分析 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28(2): 348-358. (LUO Songying, XING Wenlin, LIANG Qixia, et al. Morphological characteristics, ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments of mangrove wetlands in Zhanjiang Bay [J]. *Acta Eco-Environmental Sciences*, 2019, 28(2): 348-358. (in Chinese))
- [61] 杨新明, 庄涛, 韩磊, 等. 小清河污灌区农田土壤重金属形态分析及风险评价 [J]. *环境化学*, 2019, 38(3): 644-652. (YANG Xinming, ZHUANG Tao, HAN Lei, et al. Speciation analysis and risk assessment of heavy metals in farmland soil of Xiaoqing River sewage irrigation area [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(3): 644-652. (in Chinese))
- [62] 马牧源, 刘静玲, 杨志峰. 生物膜法应用于海河流域湿地生态系统健康评价展望 [J]. *环境科学学报*,

- 2010, 30 (2): 226-236. (MA Muyuan, LIU Jingling, YANG Zhifeng. The application of biofilm method to the health assessment of the wetland ecosystem in the Haihe River Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30 (2): 226-236. (in Chinese))
- [63] 孔红梅, 赵景柱, 马克明, 等. 生态系统健康评价方法初探[J]. 应用生态学报, 2002, 36 (4): 486-490. (KONG Hongmei, ZHAO Jingzhu, MA Keming, et al. Preliminary study on ecosystem health assessment method [J]. Acta Applied Ecologica Sinica, 2002, 36(4): 486-490. (in Chinese))
- [64] WANG Y K, STEVENSON R J, SWEETS P R, et al. Developing and testing diatom indicators for wetlands in the Casco Bay Watershed, Maine, USA [J]. Hydrobiologia, 2006, 561:191-206.
- [65] 葛继稳, 蔡庆华, 刘建康, 等. 梁子湖湿地植物多样性现状与评价[J]. 中国环境科学, 2003, 40(5): 4-9. (GE Jiwen, CAI Qinghua, LIU Jiankang, et al. Status quo and evaluation of plant diversity in Liangzi Lake Wetland[J]. China Environmental Science, 2003, 40 (5): 4-9. (in Chinese))
- [66] 郑耀辉, 王树功, 陈桂珠. 滨海红树林湿地生态系统健康的诊断方法和评价指标[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 111-116. (ZHENG Yaohui, WANG Shugong, CHEN Guizhu. Diagnostic methods and evaluation indexes of coastal mangrove wetland ecosystem health[J]. Journal of Ecology, 2010, 29(1): 111-116. (in Chinese))
- [67] BREINE J, SIMOENS I, GOETHALS P, et al. A fish-based index of biotic integrity for upstream brooks in Flanders (Belgium) [J]. Hydrobiologia, 2004, 522 (1/2/3): 133-148.
- [68] 陈展, 林波, 尚鹤, 等. 适应白洋淀湿地健康评价的 IBI 方法[J]. 生态学报, 2012, 32(21): 6619-6627. (CHEN Zhan, LIN Bo, SHANG He, et al. The IBI method adapted to the health assessment of Baiyangdian Wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (21): 6619-6627. (in Chinese))
- [69] SUN B D, TANG J C, YU D H, et al. Ecosystem health assessment: a PSR analysis combining AHP and FCE methods for Jiaozhou Bay, China[J]. Ocean & Coastal Management, 2019, 168:41-50.
- [70] 秦趣, 黄艳, 崔小平. 基于 PSR 模型的云贵高原湿地生态系统健康评价[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(5): 26-31. (QIN Qu, HUANG Yan, CUI Xiaoping. Health assessment of Yunnan-Guizhou Plateau wetland ecosystem based on PSR model [J]. Journal of Water Ecology, 2019, 40(5): 26-31. (in Chinese))
- [71] 王富强, 刘沛衡, 杨欢, 等. 基于 PSR 模型的刁口河尾间湿地生态系统健康评价[J]. 水利水电技术, 2019, 50(11): 75-83. (WANG Fuqiang, LIU Peiheng, YANG Huan, et al. Ecosystem health assessment of Diaokou River Wetland based on PSR model[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2019, 50(11): 75-83. (in Chinese))
- [72] 朱卫红, 郭艳丽, 孙鹏, 等. 图们江下游湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2012, 32(21): 6609-6618. (ZHU Weihong, GUO Yanli, SUN Peng, et al. Wetland ecosystem health assessment in the lower reaches of Tumen River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21): 6609-6618. (in Chinese))
- [73] 吴春莹, 陈伟, 刘迪, 等. 北京市重要湿地生态系统健康评价[J]. 湿地科学, 2017, 15(4): 516-521. (WU Chunying, CHEN Wei, LIU Di, et al. health assessment of important wetland ecosystems in Beijing[J]. Wetland Science, 2017, 15(4): 516-521. (in Chinese))
- [74] 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 Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al. Study on ecological security evaluation and early warning of Tumen River wetland based on 3S technology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1379-1390. (in Chinese))
- [75] 杨一鹏, 蒋卫国, 何福红. 基于 PSR 模型的松嫩平原西部湿地生态环境评价[J]. 生态环境, 2004, 35(4): 597-600. (YANG Yipeng, JIANG Weiguo, HE Fuhong. ecological environment assessment of western Songnen Plain wetland based on PSR model [J]. Ecological Environment, 2004, 35(4): 597-600. (in Chinese))
- [76] SHI Y H, LI J Q, XIE M Q. Evaluation of the ecological sensitivity and security of tidal flats in Shanghai [J]. Ecological Indicators, 2018, 85:729-741.
- [77] 赵衡, 闫旭, 王富强, 等. 基于 PSR 模型的三门峡库区湿地生态系统健康评价[J]. 水资源保护, 2020, 12(1): 1-8. (ZHAO Heng, YAN Xu, WANG Fuqiang, et al. Health Evaluation of wetland ecosystem in Sanmenxia Reservoir area based on PSR model[J]. Water Resources Protection, 2020, 12(1): 1-8. (in Chinese))
- [78] 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 Wetland based on DPSIR model [J]. Wetland Science, 2019, 17(2): 193-198. (in Chinese))
- [79] FENG Z, LIU X P, ZHANG J Q, et al. Ecological vulnerability assessment based on multi-sources data and SD model in Yinma River Basin, China [J]. Ecological Modelling, 2017, 349:41-50.
- [80] ZHANG F, ZHANG J Q, WU R, et al. Ecosystem health assessment based on DPSIRM framework and health distance model in Nansi Lake, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016, 30 (4): 1235-1247.

(收稿日期:2019-05-22 编辑:郑孝宇)