

基于生态系统完整性的水生态环境 项目综合评价研究

周文广¹ 殷西宁¹ 周建² 孙燕博³ 石磊^{1,3} 李玮⁴

(1. 南昌大学 资源环境与化工学院/鄱阳湖环境与资源利用教育部

重点实验室, 江西 南昌 330031; 2. 北控水务中国投资有限公司, 北京 100102;

3. 清华大学环境学院/国家环境模拟与污染控制联合重点实验室, 北京 100084;

4. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 北京 100038)

【摘要】: 水生态环境项目往往涉及厂、网、河、湖等工程要素和自然生态要素。如果割裂这些要素之间的有机关联, 则容易忽视生态系统服务功能及其效益, 从而导致评价结果具有片面性。论文基于生态系统完整性概念, 提出了包括技术、效果、结构、功能、稳定性、综合效益和可持续竞争等 7 个维度的综合评价框架, 构建了包括工程与自然生态两大系统, 厂、网、河、湖 4 个要素, 共 21 个因子和 54 项指标的综合评价指标体系。岳阳市某水综合整治项目案例研究表明: 该指标体系纳入了生态效益并充分考虑了厂网河湖要素的关联, 使其评价能够更好地服务于生态环境保护目标。

【关键词】: 生态系统完整性 生态环境项目 综合评价 生态效益

【中图分类号】: F062.2; X324; X820.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)03-188-08

随着我国生态环境保护治理力度的加大, 环保项目的生态效益需求越来越高。如何科学、客观地对这些环保项目进行综合评价, 为同类环保评价项目提供借鉴, 更好地发挥环保项目的生态效益, 成为环保评价项目亟须解决的问题。生态环境保护项目是践行生态文明和绿色发展的重要支撑^[1]。自党的十八大明确生态文明建设以来, 生态环保项目表现出两大突出特点: 首先是产业规模的急剧扩大, 以政府和社会资本合作项目 (public private-partnership, 简称 PPP 项目) 为例, 2019 年入库的 PPP 项目 1434 个, 资金规模为 2.2 万亿元, 较 2016 年增长了 2.34 倍^[2]。其次, 表现为对生态系统完整性与治理系统性的重视, 项目类型从基于污染减排、环境隐患整改或风险防范的区域性治理项目逐渐转变为流域综合治理项目, 并呈现出厂网河湖一体化的管理形态^[3]。一般情况下, 生态环境保护项目的经济效益并不显著, 我国同类评价项目研究多集中于项目生命周期内的项目建设成本与使用成本的平衡问题, 但能统筹兼顾项目生命周期内生态效益方面的研究很少。在这方面, 德国、英国、法国和美国等欧美发

作者简介: 周文广, 博士, 教授, 研究方向为环境与资源利用。E-mail:wgzhou@ncu.edu.cn;李玮, 博士, 高级工程师, 研究方向为水资源环境规划与管理。E-mail:li_wei29@ctg.com.cn

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司项目“长江大保护环保产业项目后评价指标体系研究”(201903147);江西省重点研发计划重点项目“村镇水体生态修复与农渔共生高效循环系统的技术集成与示范”(20212BBF61010)

达国家在环境保护与可持续发展进程中探索出一条基于生态系统完整性的方法，旨在将环境保护项目与山、河、植被等生态环境要素形成一个相互融合和协调的有机整体^[4,5,6]。这为我国生态文明发展理念下的生态环保项目尤其是流域水环境综合治理项目的评价研究工作提供了重要的参考价值。

随着大体量生态环保项目的密集落地和实施，如何科学评价这些生态环境保护项目就成为重要的议题^[7]。当前，生态环境保护项目的评价存在企业与政府“两张皮”现象。从政府角度，项目评价则更多侧重于宏观的环境、经济和社会表现及影响，因评价目的或数据可得性等原因而选择性忽略技术性和竞争性评价。从企业角度，项目评价往往侧重于技术评价和财务评价，通常偏向选择污水处理率、排污管网建设率、成本收益比等评价指标，而对水环境质量和生态系统服务提升等生态环境类指标关注不足^[8,9,10]。除评价视角和目的不同外，当前评价中更为突出的问题是忽视了项目所在或涉及的复合生态系统的完整性，这容易割裂厂网河湖等生态要素之间的生态关联，从而导致评价结论碎片化。

本文基于项目全生命周期内管网、污水、河流、湖泊水体等工程和生态要素的内在关联，构建了基于生态系统完整性的环保项目综合评价体系，并在岳阳市某城市水环境综合治理项目中成功应用。

1 生态系统完整性内涵及综合评价框架构建

1.1 生态系统完整性内涵

生态系统完整性 (ecosystem integrity) 指支持和保持一个平衡、综合、适宜的生态系统的功能^[11,12,13]。生态系统完整性包括三个层次：一是组成系统的成分是否完整，即系统是否具有本身的全部物种；二是系统的组织结构是否完整；三是系统的功能是否健康。正如 Kay 等^[14]指出的“考察完整性要考察生态系统的组织状态，这包括系统结构的完整和功能的健康”。前两个层次是对系统组成完整的要求，后一个层次则是对系统成分间的作用和过程完整的要求。此外，人对系统“功能”是否健康有自己的价值判断，因此生态系统完整性存在多维的评判视角。

通常认为，生态系统完整性是指生态系统具有与自然栖息地相似的物种组合和维持功能，即生态系统是动态变化的，具有不确定性，在扰动不大的情况下具有恢复原有稳定状态的能力。然而，现代人类活动加剧了生态系统及其所依存环境的不确定性，有可能造成生态系统退化和环境的恶化。因此，我们调控生态系统的目的是使其在人类活动管理下具有对扰动做出响应并维持自身完整性的能力^[15]。

1.2 基于生态系统完整性的综合评价框架构建

一般而言，综合性的水生态治理项目往往会涉及厂网河湖等多个要素，其中，厂网河湖分别指区域系统内的污水收集环节的排水管网、污水处理环节的污水处理厂及其泵站和污水接纳环节的河流、湖泊等水体。污水收集环节主要对施工期的环境影响和管网自身的收集效果进行评价，污水处理环节主要对处理效果及技术进行评价，污水接纳环节主要对其生物、生境、服务功能，及水体本身功能的完善性等方面进行评价。这些要素往往集中于区域生态系统中，我们需从生态系统角度评判这些厂网河湖的效果，同时，这些项目的建设是一个系统工程，相互之间存在定量依存和时序关系，因此我们需要站在生态系统完整性角度上对生态环保项目进行综合评价，并建立了生态环境保护项目的综合评价框架，具体如图 1 所示。

首先，本文将生态环保项目的作用对象看成是一个社会—经济—环境复合生态系统^[16]。该复合系统包含两大子系统，即工程系统和自然生态系统，其中工程系统主要包括污水处理环节的污水处理厂及其泵站和污水收集环节的排水管网，自然生态系统主要是项目所涉及的河流、湖泊生态系统。复合生态系统概念的引入一方面有利于将生态环保项目的评价纳入生态学的解析框架，同时，又将生态系统完整性概念从传统的自然生态系统领域拓展到人工复合生态系统领域^[17]。

然后,针对该复合生态系统不同层级的不同生态要素,确定了相应的评价目的、范畴和内容。工程系统的评价主要是技术评价和效果评价。其中,技术评价的对象是工程系统所包含的厂、网两大要素,目的是评价项目方案中厂网所采用技术的先进性、可靠性、安全性和环保性等方面,评价内容包括技术先进性、经济可行性和环境友好性等。该部分评价目的是为企业技术决策提供参考,同时,为其他评价提供技术基础。效果评价是针对项目技术目标对自然生态系统的直接影响,评价工程系统是否达到了这一最初设立的目标。

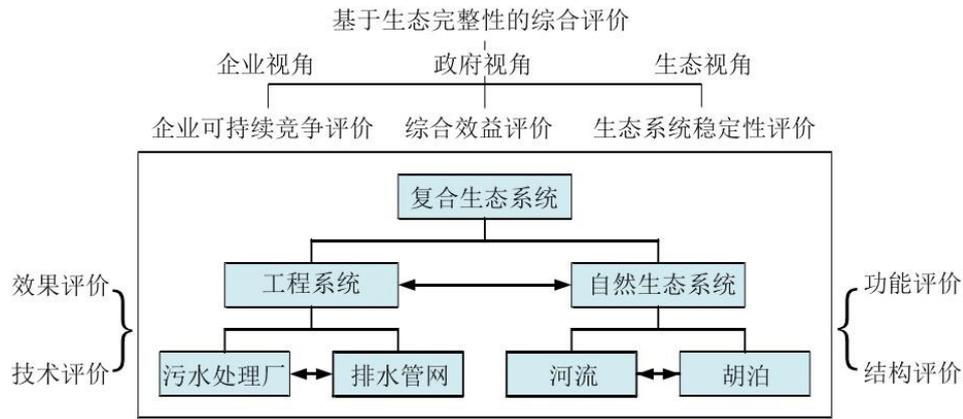


图1 基于生态系统完整性的综合评价框架

河、湖等自然生态系统的评价包括结构评价和功能评价。结构评价主要是对水体与湿地的结构进行评价,主要从河流湖泊等水体形态结构、水生生物结构和水景观结构等方面进行评价^[18,19]。人类活动是长江经济带水体多时空尺度结构变化的绝对因素,严重影响长江经济带的野生动植物资源和生物多样性,引起生态系统退化和生物多样性减少等严峻问题^[20,21]。涉及的水体功能评价主要指河流、湖泊等水体的水环境表现功能和生态系统服务功能。水体的功能在长江经济带中发挥了重要的技术支撑作用,可以为水环境综合治理的防洪、水资源管理和水生态保护等多方面提供理论指导,为区域协调发展和黄金水道功能提升做出重大贡献^[22,23,24]。

生态系统的评价是针对项目目标和效果的可持续性评价,以保证项目与人类社会不同的经济、社会和环境等子系统之间的和谐发展,该部分评价包含以下三个部分:一是基于企业视角的可持续竞争评价;二是基于政府视角的综合效益评价;三是基于生态视角的生态系统稳定性评价。具体评价内容如下:

(1) 可持续竞争评价是基于企业活动管理能力对区域内生态系统完整性保持能力的评价,即本企业视角评价主要针对企业经济可持续发展能力进行分析,通过国家对企业相关财税制度等方面考察项目的获利能力,判断项目技术方案在财务上的可能性^[25,26]。

(2) 在生态系统不同要素自身结构性和功能性评价的基础上,人类活动管理对城市生态系统具有自身生存发展的需求——效益,因此,效益评价是研究评价指标体系的第二个目标层指标,该部分评价基于经济、社会和环境不同子系统又可对应细分为经济效益评价、社会效益评价和生态效益评价三个方面^[27,28]。其中,生态效益是当前国际形势下我国国家战略明确要求必须深入研究的内容之一。

(3) 区域环保项目的核心是生态文明建设,即人类与环境的协调问题,生态系统稳定性是生态文明建设的基础,因此,我们需要对生态系统的稳定性进行评价^[29]。

在以上 7 类评价的相互关系分析基础上构成了评价矩阵。

2 基于生态系统完整性的生态环保项目评价指标体系

2.1 评价指标体系构建原则

指标体系的构建是环保项目综合评价的基础，在很大程度上决定了评价的可行性和评价结果的科学性、适宜性。在本文中，城市污水处理系统涉及管网覆盖、污水处理厂分布和排水区域等多个生态要素，需要确定这些生态要素之间具有的时空有序性的代表性度量指标。指标的确定参考以下几项基本原则：要素完整性原则，涵盖所有对象系统的主导性生态要素；定量分析与定性分析相结合，以定量分析为主；可操作性原则，数据可得，方法服务于决策目的。

2.2 评价指标体系

本文在设计指标体系过程中，参考国内外研究成果、指标筛选原则和综合评价框架，分别对划分的评价要素、因子和因素等代表性指标进行分析和讨论，构建了基于生态系统完整性理念、包含厂网河湖等要素在内的 12 个要素层、21 个因子层和 54 个指标层的综合评价指标体系。

2.3 评价方法

评价方法是开展项目评价的科学工具，经典的评价方法有很多，但都有其局限性，比如：模糊综合评价法尽管结果清晰，系统性强，能较好地解决模糊的、难以量化的问题，但计算复杂，对指标权重向量的确定主观性较强^[62,63]；层次分析法提供了层次思维框架，可用于对无结构特性的系统评价，但指标过多时数据统计量大，意味着我们要构造层次更深、数量更多、规模更庞大的判断矩阵^[64]。因此，本文采用多种评价方法进行综合评价，比如针对 $A_1 \sim A_4$ 中的指标采用层次分析法进行评价；针对 A_5 指标则首先通过专家评定法选出 3 个代表性指标 $D_{62} \sim D_{64}$ ，并整体性分析企业财务表现能力。本文中指标完成程度采用成功度评价法，即非常成功的赋值为 80~100 分，此后，比较成功、一般成功、较不成功和不成功的赋值分别为 70~79、60~69、50~59 和 30~49 分。一些定性分析指标或一些综合性评价指标根据评价目的采用专家评价法、模糊综合评价法等不同评价方法。

3 岳阳案例研究

3.1 研究区概况

岳阳是湖南唯一的临江城市，是湖南省建设长江经济带、共抓大保护的主战场和主阵地，也是城镇污水处理第一批试点示范城市。岳阳市是北亚热带季风气候区，雨季集中，洪涝现象时有发生。一方面需要扩建污水处理规模、重新规划雨污分流工程，另一方面，岳阳市黑臭水体问题严重，多达 5 个湖泊、9 条河流、18 处水塘在全国黑臭水体普查中列为黑臭水体，水环境治理刻不容缓。本文研究区域主要包括东风湖、王家河、北港河、南港河及其流域内的污水处理厂和排水管网等。

3.2 评价结果与讨论

从指标层评价结果看，非常成功指标有 17 个，比较成功指标有 18 个，在不考虑权重的情况下，本项目整体比较成功。但是指标评分总体不是很高，这与水环境治理的长期性与复杂性有关：灰色基础设施的推进与完善可以通过短期的工程措施来快速实现，但水环境本底条件与生态系统健康的恢复，不仅依赖于科学与系统的工程治理的逐步实施，同时，也有赖于源头上更完善的排污管理与长期的工程设施运维管理。此外，生态环保类项目沉没成本较大、回收期长、经济回报率低也是原因之一。

从因子层指标评价结果来看，非常成功指标有 5 个，比较成功指标有 6 个。在非常成功的 5 个指标中的 3 个是工业系统的污水处理技术评价 A_1 中的指标，另外一个为河流的河道连通性 C_1 ，这一结果反映出岳阳市本身具有较为发达与完备的水系及水资源本底条件，同时，相关政策制定者与工程规划人员对这一较好的本底条件进行了良好的保护与利用，相关工程并未破坏水体的自然形态与流动性，并通过对水体周围景观工程的重塑，为广大市民提供了理想的临水活动场所，并间接带动了临近土地资源价值。同时也表明，本项目工程的雨污分流工程在技术层面整体比较成功，取得较理想的污染削减效果，对项目整体成功度做出较大贡献，但后续还应继续关注工程建设完成后厂网实际运行效果，尤其是雨污水系统在强降雨条件下的溢流对河湖系统所造成的短期水质冲击，以及生态系统对这部分冲击的消纳情况。另外，从系统角度分析，该因子层指标总体一般成功，这一结果也从侧面表明我国人类社会与自然系统的和谐发展仍并不理想，需要我们加大人类活动管理能力来人为提高自然生态系统在人类社会中的契合度以达到人与自然的可持续发展。

从要素层评价结果来看，非常成功指标有 2 个，比较成功指标有 5 个。在评价得分最低的 3 个指标中的 2 个是自然生态系统的功能评价部分的指标，表明在人类工业活动的影响下城市生态系统已难以保持自身的稳定性功能，迫切需要我们加大生态环保项目的投资力度并大幅减少直接进入水体系统中的污染负荷总量。从系统角度来看，工程系统评价结果接近非常成功，表明生态环保项目投资十分必要。此外，自然生态系统的结构评价部分较好，印证人类活动管理行为能够有效提升自然生态系统的功能。生态系统评价部分 3 个指标评分差距较大，表明生态环保项目实施的短期目标是有利的，但从长远目标来看，我们需要保持持续增长的环保投资力度才可实现生态系统自身功能结构的完善，并最终实现可持续发展。

从工程系统评价体系来看，工程效果具有明显的成效，如生活污水处理率从基准年的 85% 提高到 90%，排污口水质达标率从基准年的 85% 提高到 95%，水功能区水质达标率从基准年的 80% 提高到 92%，13 个片区基本完成管网雨污分流。工程技术方面虽然有中水回用率 D_3 不理想，但其他指标基本是比较成功的，尤其是管网管材规划超过了国家和地方的标准，与此同时我们要认识到，生态环保项目是具有长期治理的特点，一次性工程投资并不能永久性解决复合生态系统的所有问题，如污水处理率、水功能区水质等指标，仍需要通过科学、系统并持久的工程运维来保障设计目标的长久实现。

从生态系统完整性评价体系来看，可持续竞争评价非常成功，效益评价比较成功，稳定性评价一般成功。造成这种差异性的一个重要原因是人类的生存和发展严重依赖自然生态系统的稳定性，随着我国社会经济的发展，强度与密度不断上升的人类生产活动对生态系统的干扰越来越大，与此同时，人类针对自身行为的管理能力以及针对污染问题的治理能力并没有同步提升，因此造成对自然生态系统的破坏，并产生一系列的环境问题。

本文项目评价最终结果为 74.36 分，评价结果比较成功。通过以上案例成功应用分析，本文提出以下建议：（1）政府方面需要继续加强协调管理职能，继续加强区域水资源管理统筹工作，完善现有制度，强化管理手段，进一步提高生态效益。（2）夯实城市生态系统服务功能，加强水资源群落构建。一方面，政府和企业需将构建物种多样性结构的工程实施内容进行详细规划并进行项目考核；另一方面，工程项目在追求生态环境价值的同时需注意选择具有适应性的本地物种，既减少外来物种入侵的可能性，又有利于提高居民的满意度、幸福感。（3）具化湿地建设内容与力度^[65]。研究表明湿地生态系统占全球生态系统服务总价值的 40.6%^[33]，且其娱乐文化功能具有与水生态系统相同的生态系统服务价值，因此我们要加强水生态系统和湿地生态系统的工程联系。

4 结论

本文建立了一个综合指标体系来完善流域水环境治理项目的生态效益，并在岳阳市某城市水环境综合治理项目中成功应用。评价结果表明：（1）流域水环境治理模式是非常好的模式，可有效解决厂网河湖要素相互割裂引起的生态系统服务功能不突出等问题。（2）通过岳阳市某城市水环境综合治理项目案例的成功应用可以看出，本文成功将生态效益转化到系统厂网河湖要素的关联中，更加直观展示了城市的生态系统服务价值，并对项目的决策纠偏提出重要建议。（3）基于生态系统完整性的厂网河湖一体化评价模式，在满足项目功能目标的前提下，具有更加完善项目建设成本与使用成本的平衡性方面问题和有效实现生态效益的

目标, 是对我国综合性环保项目评价研究的一个重要补充和完善。

参考文献:

- [1]石磊, 陈伟强. 中国产业生态学发展的回顾与展望[J]. 生态学报, 2016(22):7158-7167.
- [2]全国 PPP 综合信息平台管理库项目 2019 年报[EB/OL]. (2020-04-17). <https://www.cpppc.org/jb/1781.jhtml>.
- [3]Conway T M, Almas A D, Coore D. Ecosystem services, ecological integrity, and native species planting: How to balance these ideas in urban forest management?[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, 41:1-5.
- [4]Wu X K, Hu S. Exploratory post-evaluation of the current situation of sustainable urban development[J]. Procedia Engineering, 2011, 21:1169-1172.
- [5]Mora F. The use of ecological integrity indicators within the natural capital index framework: The ecological and economic value of the remnant natural capital of México[J]. Journal for Nature Conservation, 2019, 47:77-92.
- [6]Cristian J, Stijn S. On-farm adoption of irrigation technologies in two irrigated valleys in Central Chile: The effect of relative abundance of water resources[J]. Agricultural Water Management, 2020, 236:378-390.
- [7]李亭亭, 李良勇, 起云凤. PPP 模式下绿色金融发展的问题及对策分析[J]. 中国商论, 2020(22):33-35.
- [8]王珮瑜, 郭佩含. PPP 项目绩效评价指标体系研究——以 X 污水处理项目为例[J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2016(4):22-24.
- [9]于晓田, 尹贻林. PPP 项目物有所值定性评价指标体系构建——以污水处理 PPP 项目为例[J]. 建筑经济, 2018(11):38-43.
- [10]Ni J N, Xu J P, Zhang M X. Constructed wetland planning based bi-level optimization to balance the watershed ecosystem and economic development: A case study at the Chaohu Lake watershed, China[J]. Ecological Engineering, 2016, 97:106-121.
- [11]杨丽, 李春宇, 余绍文, 等. 湿地生态完整性评价方法研究进展[J]. 安全与环境工程, 2008(4):1-4.
- [12]赵峰, 吴计生, 岳超俊, 等. 桃山水库生态完整性影响评价[J]. 东北水利水电, 2009(4):49-52.
- [13]杨华峰, 张素芬. 投资项目后评价的几个问题[J]. 地质技术经济管理, 1996(5):26-29.
- [14]Kay J J, Regier H A, Boyle M, et al. An ecosystem approach for sustainability: Addressing the challenge of complexity[J]. Futures, 1999, 31(7):721-742.
- [15]Blumetto O, Castagna A, Gardozo G, et al. Ecosystem integrity index, an innovative environmental evaluation tool for agricultural production systems[J]. Ecological Indicators, 2019, 101:725-733.

-
- [16]马世骏,王如松.社会-经济-自然复合生态系统[J].生态学报,1984(1):1-9.
- [17]Cheng Y X,Wu D S,Bian Y.A systematic approach of determining compensation and allocation for river basin water environment based on total pollutants control[J].Journal of Environmental Management,2020,271:301-313.
- [18]吕兰军.水文在长江经济带“共抓大保护”中的作用及思考——以长江九江段为例[J].中国水利,2018(13):48-50.
- [19]单媛媛,李瑞,张骏芳,等.平原河网地区河流健康评价指标体系构建[J].水科学与工程学报,2010(4):17-19.
- [20]吴丹,邹长新,林乃峰,等.长江经济带生态系统宏观结构变化特征分析[J].生态与农村环境学报,2018(6):499-503.
- [21]肖贵清,尹聪.水文助力长江经济带高质量发展探讨[J].中国水利,2019(3):38-40.
- [22]唐冠军.以习总书记重要指示为根本遵循抢抓黄金发展机遇提升黄金水道功能[J].中国水运(上半月),2017(10):9-10.
- [23]蔡之兵.区域协调发展战略的六大功能定位[N].中国经济时报,2018-07-16(05).
- [24]Xu X B,Yang G S,Tan Y,et al.Ecosystem services trade-offs and determinants in China's Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015[J].Science of The Total Environment,2018,634:1601-1614.
- [25]陈套.长江经济带经济可持续发展能力动态评价研究[J].调研世界,2015(7):18-22.
- [26]国家开发投资公司研究中心,北京中天恒管理咨询有限公司.企业投资项目后评价操作实务[M].北京:企业管理出版社,2010.
- [27]袁广达.环境保护效益审计及其评价[J].财会月刊,2006(20):59-60.
- [28]秦承露.基于LCA的城市产业共生系统环境效益评价研究[D].大连:大连理工大学,2019.
- [29]李传印.生态系统稳定性与生态文明建设[J].理论导刊,2010(6):100-101.
- [30]狄倩.CASS工艺城市污水处理厂清洁生产评价指标体系研究[D].西安:陕西科技大学,2014.
- [31]纪楠,樊庆铎,石磊.基于CP对污水处理厂综合评价指标体系的研究[J].环境科学与管理,2011(8):164-167.
- [32]孟繁宇,樊庆铎,纪楠,等.城市污水处理厂综合评价指标体系构建与应用研究[J].环境与可持续发展,2012(2):84-90.
- [33]Di Fraia S,Massarotti N,Vanoli L.A novel energy assessment of urban wastewater treatment plants[J].Energy Conversion and Management,2018,163:304-313.
- [34]陈文立,蒋伟萍.污水处理厂清洁生产评价指标体系的构建[J].环境保护与循环经济,2013(7):28-30.
- [35]狄倩,孙根行,郭金鑫,等.CASS工艺城市污水处理厂清洁生产评价指标研究[J].环境工程,2014(5):133-137.

-
- [36]漆小国, 赵昕怡, 谢尧玉. 城市燃气管网风险评价指标体系的构建[J]. 内蒙古石油化工, 2012(19):74-75.
- [37]赵清民, 洪云飞. 城市雨水管网脆弱性评价指标体系研究[J]. 荆楚理工学院学报, 2016(2):71-77.
- [38]易晓, 胡端艳, 韩用明. 污水处理项目绩效审计评价指标体系构建[J]. 财会月刊, 2013(24):84-85.
- [39]Gémar G, Gomez T, Senante M M, et al. Assessing changes in eco-productivity of wastewater treatment plants: The role of costs, pollutant removal efficiency, and greenhouse gas emissions[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2018, 69:24-31.
- [40]王佩, 王靖瑶, 杨斌. 基于 AHP 法的矿井供水管网可靠性评价指标体系建立[J]. 煤矿安全, 2017(1):224-227.
- [41]杨柠. 中小河流治理效果评价指标体系的初步构建[J]. 水利发展研究, 2019(4):9-11.
- [42]陈歆, 靳甜甜, 苏辉东, 等. 拉萨河河流健康评价指标体系构建及应用[J]. 生态学报, 2019(3):799-809.
- [43]章晶晶, 陈波, 卢山. 基于生态文化健康的城市河流健康评价指标体系探索[J]. 浙江农业科学, 2018(4):575-577.
- [44]王莉, 徐聪, 于鲁冀. 沙颍河流域(河南段)清洁河流评价指标体系构建研究[J]. 生态经济, 2017(9):164-169.
- [45]陈淼, 苏晓磊, 党成强, 等. 三峡水库河流生境评价指标体系构建及应用[J]. 生态学报, 2017(24):8433-8444.
- [46]Huang J L, He J H, Liu D F, et al. An ex-post evaluation approach to assess the impacts of accomplished urban structure shift on landscape connectivity[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622-623:1143-1152.
- [47]帅红, 李景保, 夏北成, 等. 基于形态结构特征的洞庭湖湖泊健康评价[J]. 生态学报, 2012(8):2588-2595.
- [48]吴迪, 岳峰, 罗祖奎, 等. 上海大莲湖湖泊湿地两栖动物群落分布及生境选择模式[J]. 复旦学报(自然科学版), 2011(3):268-273.
- [49]Ding Y K, Wang S R, Zhang W Q, et al. A rule of hydrological regulating on nutritional status of Poyang Lake, since the operation of the Three Gorges Dam[J]. Ecological Indicators, 2019, 104:535-542.
- [50]薛涛, 李曼. 河流健康评价指标体系构建研究[J]. 河南农业, 2017(9):58-60.
- [51]陈兴茹. 自然-亲水-文化的城市河流评价指标体系研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014(3):225-233.
- [52]La Notte A, Liqueste C, Grizzetti B, et al. An ecological-economic approach to the valuation of ecosystem services to support biodiversity policy. A case study for nitrogen retention by Mediterranean rivers and lakes[J]. Ecological Indicators, 2015, 48:292-302.
- [53]高翔, 黄娉婷, 王可. 宁夏沙坡头干旱沙漠自然保护区生态系统稳定性评估[J]. 生态学报, 2019(17):6381-6392.

-
- [54]Sun X, Xiong S, Zhu X J, et al. A new indices system for evaluating ecological-economic-social performances of wetland restorations and its application to Taihu Lake Basin, China[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 295:216-226.
- [55]张继义, 赵哈林. 短期极端干旱事件干扰下退化沙质草地群落抵抗力稳定性的测度与比较[J]. *生态学报*, 2010(20):5456-5465.
- [56]邓晓军, 许有鹏, 翟禄新, 等. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用[J]. *生态学报*, 2014(4):993-1001.
- [57]纪楠. 城市污水处理厂综合评价指标体系和评价方法的研究[J]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [58]赵敏, 许成娟. 引水式电站对西南山区河流健康影响的评价指标体系研究[J]. *安徽农业科学*, 2015(7):357-358.
- [59]Ratha D, Agrawal V P. Agrawal, a digraph permanent approach to evaluation and analysis of integrated watershed management system[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525:188-196.
- [60]郑保, 罗文胜. 河流生态系统健康评价指标体系及权重的研究[J]. *水电与新能源*, 2019(8):60-65.
- [61]Chang Y, Hou K, Wu Y P, et al. A conceptual framework for establishing the index system of ecological environment evaluation-A case study of the upper Hanjiang River, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 107:1470-1483.
- [62]王国胜. 河流健康评价指标体系与 AHP-模糊综合评价模型研究[J]. 广州: 广东工业大学, 2007.
- [63]蒋吉, 许艳. 基于多层次模糊综合评价法的小城镇水环境整治效果后评价——以宁绍平原河网地区为例[J]. *浙江水利科技*, 2016(1):20-22.
- [64]齐阳阳, 吴净, 魏蕴然. 基于层次分析法的田园综合体使用后评价——以苏南地区为例[J]. *大众文艺*, 2019(6):247-249.
- [65]Faber-Langendoen D, Lemly J, Nichols W, et al. Development and evaluation of Nature Serve's multi-metric ecological integrity assessment method for wetland ecosystems[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104:764-775.