

人工湿地运行状态综合评估研究

刘雷¹, 袁秀泽¹, 李元鹏², 张克峰¹, 李梅¹

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 山东同圆集团设计有限公司, 山东济南 250101)

摘要 随着人工湿地运行周期的增加, 由于管理不善导致人工湿地运行状态差、出水水质不达标的问题日益增多。为此, 分析影响人工湿地运行状态的相关因素, 构建人工湿地运行状态综合评价指标体系。采用层次分析法确定了各指标权重, 提出各指标赋分标准和计算方法, 构建了综合评价指数。通过应用于山东某人工湿地运行状态综合评估, 结果表明: 构建的指标体系能够科学客观地评估人工湿地运行状态, 可为人工湿地的综合管理决策提供指导。

关键词 人工湿地; 运行状态; 综合评价指数; 生态系统服务价值

中图分类号 S181 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)05-0092-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.05.025



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Comprehensive Evaluation and Research on the Operation Status of Constructed Wetlands

LIU Lei¹, YUAN Xiu-ze¹, LI Yuan-peng² et al (1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101; 2. Shandong Tongyuan Group Design Limited Company, Jinan, Shandong 250101)

Abstract With the increase of the operation cycle of constructed wetlands, poor management of constructed wetlands leads to poor operation state and substandard effluent quality. Therefore, the comprehensive evaluation index system of the operation state of constructed wetlands was constructed by analyzing the relevant factors influencing the operation state of constructed wetlands. Analytic hierarchy process (AHP) was used to determine the weight of each index, the scoring criteria and calculation methods for each index were proposed, and the comprehensive evaluation index was constructed. The results showed that the constructed index system could evaluate the operation state of constructed wetland scientifically and objectively, and could provide guidance for the comprehensive management decision of constructed wetland.

Key words Constructed wetland; Operation state; Comprehensive evaluation index; Ecosystem service value

人工湿地作为保障水质的重要工程措施在流域水生态保护中得到广泛应用^[1-3]。随着湿地运行时间的增加, 湿地运行管理方面的问题日益突出, 人工湿地运行状态不佳, 直接导致出水水质不达标。

人工湿地运行状态是人工湿地在运行过程中的管理状况、净化水质效果和对周围生态环境所做贡献的一系列状态的综合体现, 包括管理状况、出水水质、运行处理成本和生态服务价值等方面。目前, 我国对于人工湿地运行状态评价更多的是侧重于湿地所产效益的评价^[4-7], 而对于人工湿地运行状态的综合评估较少。面对当前人工湿地领域重建设、轻管理的现状, 亟待建立一套完善的人工湿地运行状态综合评价体系, 以实现已建成运行人工湿地的科学管理和优化指导。

1 人工湿地运行状态综合评价指标体系构建

1.1 评价指标体系的建立 人工湿地运行状态综合评价是对人工湿地运行管理和运行效果的综合分析, 既包括人工湿地运行管理水平, 又包括这种管理水平下人工湿地各种功能的实现程度。因此, 根据上述评价目的, 建立涵盖管理状况、水质状况、运行处理成本和生态系统服务价值 4 个方面的人工湿地运行状态综合评价指标体系, 设置目标层、准则层和指标层 3 个层次, 如表 1 所示。

1.2 评价指标含义

1.2.1 管理状况。 人工湿地管理水平直接决定湿地的整体运行效果和湿地寿命, 具体涉及湿地的进水水质稳定性、植物管理、水质检测、堵塞管理、设备管理和冬季保温等方面。

作者简介 刘雷(1980—), 男, 山东淄博人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事流域水污染控制、环境规划与管理工。

收稿日期 2018-12-17

表 1 人工湿地运行状态综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of operating state of constructed wetlands

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Indicators layer	单位 Unit
人工湿地运行状态综合评价体系 A Comprehensive evaluation index system of constructed wetland operation state	管理状况 B ₁	进水水质稳定性 C ₁	%
		植物管理 C ₂	—
		水质监测 C ₃	—
		堵塞管理 C ₄	—
		设备管理 C ₅	—
		冬季保温 C ₆	%
	水质状况 B ₂	出水水质达标率 C ₇	%
		污染物削减率 C ₈	%
	运行处理成本 B ₃	运营成本 C ₉	元/m ³
		生态系统服务价值 B ₄	产品服务 C ₁₀
			调节与维护服务价值 C ₁₁
		休闲与科研教育 C ₁₂	—

1.2.1.1 进水水质稳定性。 进水水质稳定性对人工湿地出水稳定达标有重要影响。人工湿地实际运行过程中出水水质不达标很多是由于进水水质超出设计进水标准所导致的。

1.2.1.2 植物管理。 植物是人工湿地的重要组成部分, 是净化水质的核心单元。人工湿地植物的管理包括定期巡检、水位控制、除杂草情况、补植、修剪和冬季收割等 6 个具体因素, 各因素赋分依据如表 2 所示。植物管理指标分值为 6 个因素赋分的平均值。

1.2.1.3 水质检测。 人工湿地水质检测指标主要包括水量、温度、溶解氧、pH、COD、氨氮、总氮、总磷、硝酸盐、重金属等, 此指标赋值根据检测项目数量确定。

表 2 湿地植物管理评价指标赋分标准

Table 2 Scoring criteria for wetland plant management evaluation indicators

具体指标 Specific indicators	分值 Point				
	100	80	60	40	20
巡检频率 Inspection frequency	每周 3 次	每周 2 次	每周 1 次	每月 3 次	每月 3 次
水位控制(挺水植物, cm) Water level control (emergent water plant, cm)	根据植物高度合理调整水位	10	20	30	40
除草频率 Mowing frequency	每周 1 次	每月 2 次	每月 1 次	每季 1 次	每 6 个月 1 次
补植 Replanting//%	≥80	60~80	40~60	20~40	<20
修剪频率 Trim the frequency	每周 1 次	每月 2 次	每月 1 次	每季 1 次	每 6 个月 1 次
植物收割率 Plant harvesting rate//%	≥80	60~80	40~60	20~40	<20

1.2.1.4 堵塞管理。湿地运行过程中,有机固体物在填料内部颗粒间隙的沉积、生物的生长和分解等会造成基质堵塞,堵塞后将降低污染物的去除效果,影响出水水质。堵塞管理主要考虑废水的预处理、基质选择与级配、间歇运行、水位的调节控制、植物的定期收割以及定期反冲洗等因素,此指标分值由上述因素的实现程度评判。

1.2.1.5 设备管理。设备管理指标包括有无专业的设备管理人员、合理使用设备、定期巡检、定期养护 4 个方面,此指标分值由这四部分实现程度评判。

1.2.1.6 冬季保温。温度是影响人工湿地运行效率的重要参数。冬季温度低,微生物活性下降,植物生物量减少,会大大降低人工湿地的净化效果。常用的保温措施包括植物保温隔离措施、冰雪覆盖组合保温隔离措施、地膜保温隔离措施等。

1.2.2 水质状况。人工湿地的主要功能是净化水质,出水水质状况采用出水水质达标率和污染物削减率来表征。

出水达标率为一年内人工湿地出水水质满足排放要求的比例。

污染物削减率为 COD、氨氮、总氮、总磷 4 个污染物削减的比例,最后分值是 4 个因子得分的平均值,当污染物削减率分别为 ≥80、60~80、40~60、20~40、<20 时,水质的分值分别为 100、80、60、40、20 分。

1.2.3 运行处理成本。人工湿地的运行处理成本主要包括运行过程中的设备检修费用、管理人员薪资费用、潜流湿地清淤治堵费和电费等,此指标以吨水运行处理费用来判断,计算公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i \quad (1)$$

$$C = R/Q \quad (2)$$

式中, R 为运行处理成本, R_i 为 i 项的费用, Q 表示人工湿地处理规模。

1.2.4 生态服务系统价值。湿地功能的服务类型按照人类对湿地功能需求的不同,包括产品服务、调节与维护服务、休闲旅游和科研教育等。

1.2.4.1 产品服务价值。采用市场价格法对产品服务价值^[7],包括物质产品价值和水源供给价值进行估算。水源供给价值按照山东省工业用水价格计算。产品服务价值计算公式如下:

$$T = T_1 + T_2 \quad (3)$$

式中, T_1 表示物质产品价值; T_2 表示水源供给价值。

1.2.4.2 调节与维护服务价值。主要包括气候调节、蓄水调洪调节、降解污染物和生存栖息地等。

调节气候价值采用效益转移测算。1 hm^2 湿地植被在夏季吸收的热量相当于 189 台 1 kW 的空调全天工作制冷效果,发挥作用时间一般为 100 d,具体计算公式如下^[8]:

$$V = 189 \times 24 \times A \times S \times D \quad (4)$$

式中, A 表示当地电费,单位为元/(kW·h); S 表示人工湿地的面积,单位为 1 hm^2 ; D 表示工作天数,这里采用 100 d。

蓄水调洪调节采用影子工程法测算,即用建造相同库容的水库工程费用来作为湿地调洪蓄水的价值。计算公式如下:

$$Q = V \times P \quad (5)$$

式中, V 为蓄水体积, P 为单位库容建设成本。全国水库 1 m^3 库容需投入成本约为 1.03 元,目前国内在此方面的研究多采用此数据。

降解污染物价值采用中国陆地湿地生态系统废物处理功能的单位面积价值 16 086.60 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)测算^[9]。

生存栖息地价值采用全球湿地生物多样性价值估算标准 2 056.83 元/ hm^2 计算^[10]。

1.2.4.3 旅游休闲和科研教育价值。人工湿地具有一定的休闲旅游和科研教育价值,可根据每年游客和科研人员的来访人数多少确定。

1.3 评价指标赋分标准 各评价指标具体赋分依据见表 3。

2 人工湿地运行状态综合评估方法

2.1 指标权重确定 层次分析法是一种常用的指标赋权方法,它可以将复杂系统的决策问题转化为简单数量化,为管理者提供依据。采用层次分析法对人工湿地运行状态各指标进行赋权,结果见表 4。

2.2 综合评价指数 采用线性加权的方法设计人工湿地运行状态综合评价指数,具体计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \times a_i \quad (6)$$

式中, S 表示人工湿地运行状态综合评价指数; W_i 表示各项指标层指标的权重; a_i 表示各项指标层指标评分。

人工湿地综合评价分级分别为优、良、中等、差、极差,其评分分析为 $80 \leq S \leq 100$ 、 $60 \leq S < 80$ 、 $40 \leq S < 60$ 、 $20 \leq S < 40$ 、 $S < 20$ 。

表3 评价指标赋分标准
Table 3 Scoring criteria for evaluation indicators

指标 Indicators	单位 Unit	赋分标准 Scoring standard				
		100	80	60	40	20
进水水质稳定性 Stability of inlet water quality//%	%	超标率≤10	超标率 10~20	超标率 20~30	超标率 30~50	超标率>50
植物管理 Plant management	—	≥80	60~80	40~60	20~40	<20
水质监测 Water quality monitoring	—	包含 5 个及以上的常规监测指标	包含 4 个常规监测指标	包含 3 个常规监测指标	包含 2 个常规监测指标	包含 1 个常规监测指标
堵塞管理 Congestion management	—	包含 5 个及以上的预防和治理措施	包含 4 个预防和治理措施	包含 3 个预防和治理措施	包含 2 个预防和治理措施	包含 1 个预防和治理措施
设备管理 Device management	—	包含 4 个方面	包含 3 个方面	包含 2 个方面	包含 1 个方面	0
冬季保温 Winter heat preservation	%	采取两种及以上的保温措施且保温面积≥80	采取一种保温措施且保温面积达 60~80	采取一种保温措施且保温面积达 40~60	采取一种保温措施且保温面积达 20~40	无保温措施或者保温面积<20
出水水质达标率 Standard rate of effluent quality	%	≥80	60~80	40~60	20~40	<20
污染物削减率 Pollutant reduction rate	%	≥80	60~80	40~60	20~40	<20
运行管理费用 Operational management costs	元/m ³	<0.06	0.06~0.14	0.14~0.22	0.22~0.30	≥0.3
产品服务 Product service	万元/hm ²	≥16	12~16	8~12	4~8	<4
调节与维护服务价值 Adjusting and maintenance service value	万元/hm ²	≥35	25~35	15~25	5~15	<5
旅游休闲和科研教育价值 The value of tourism leisure and scientific research education	—	有生态教育区, 科研者超过来访者 15%	无生态教育区, 科研者超过来访者 15%	有生态教育区, 但科研者低于来访者的 15%	无生态教育区, 科研者低于来访者 15%	无生态教育区, 来访者中无科研者

表4 人工湿地综合评价体系各指标权重
Table 4 Weights of indicators in comprehensive evaluation system of constructed wetlands

准则层 Criterion layer	权重 Weight	指标层 Indicators layer	权重 weight	归一化权重 Normalized weights
管理状况 Management condition B ₁	0.470 7	进水水质稳定性 C ₁	0.066 0	0.031 1
		植物管理 C ₂	0.147 4	0.069 4
		水质监测 C ₃	0.089 5	0.042 1
		堵塞管理 C ₄	0.369 9	0.174 1
		设备管理 C ₅	0.267 8	0.126 1
		冬季保温 C ₆	0.059 1	0.027 8
水质状况 Water quality condition B ₂	0.300 8	出水水质达标率 C ₇	0.166 7	0.050 1
		污染物削减率 C ₈	0.833 3	0.250 7
运行管理成本 Operational Management Cost B ₃	0.075 6	运行管理费用 C ₉	1.000 0	0.075 6
生态系统价值服务 Ecosystem services value B ₄	0.152 8	产品服务 C ₁₀	0.104 7	0.016 0
		调节与维护服务价值 C ₁₁	0.637 0	0.097 3
		旅游休闲和科研教育 C ₁₂	0.258 3	0.039 5

3 典型人工湿地运行状态综合评估应用

3.1 人工湿地简介 该人工湿地水质净化工程日处理污水量 10 万 m³, 是将上游河水和县城污水处理厂出水进一步净化处理, 该人工湿地水质净化工程由 16.0 hm² 强化处理湿地和 366.7 hm² 表流湿地两部分组成。其中强化处理湿地是由 5 个单元预强化处理床、1 个潜流池、2 个表流池组成的。经强化湿地处理水和县城生态景观用水汇集进入 366.7 hm² 表面流湿地, 经湿地自然净化处理后, 就地资源化利用和供湿地周围生态用水。另外表面流湿地在旱季起到储水作用, 为周围农田提供灌溉。在洪涝季节表流湿地能够蓄水, 起到防洪排洪作用。设计出水水质为国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类。

3.2 评估原始数据及指标计算结果 该次实例研究的数据

来源于该人工湿地工程设计说明书、对人工湿地进出水质实测数据以及调查问卷资料等, 评价指标数据经处理后各指标值、综合指数值见表 5。

3.3 评估结果分析 该人工湿地运行状态综合评价得分为 80.84, 处于优级状态, 说明该人工湿地综合运行状态良好。但对各评价指标分析可知, 该人工湿地在运行过程中仍存在一定问题, 主要表现为: ①人工湿地进水波动大, 导致人工湿地出水水质达标率较低, 没有达到预期的处理效果。②人工湿地在冬季运行的保温措施单一, 且有部分的湿地保温措施不到位, 导致出水水质变差。优化措施如下: ①严格控制进水污染物的浓度, 此湿地水源为上游河流及污水厂出水, 应加强河流的治理工作和河流沿岸污染防治和控制; ②采取多种保温措施, 如可以利用冬天的积雪, 覆盖在湿地表面, 达到

保温效果;也可以人为在人工湿地表面覆盖薄膜,减少湿地 内部冷热气体的交换。

表 5 人工湿地各评价指标值

Table 5 Evaluation index values of constructed wetlands

指标 Indicators	评价依据 Evaluation basis	指标值 Indicators score
进水水质稳定性 Stability of inlet water quality	该湿地系统的设计进水水质(mg/L):COD=50,NH ₃ -N=3,TP=0.5,TN=15;通过1年的监测数据可得各指标进水浓度(mg/L):COD=24.0~140.8,NH ₃ -N=3.6~10.1,TP=0.30~2.92,TN=7.8~70.1,可知总的进水超标率>50%	20
植物管理 Plant management	6个评价因子的平均分为83.3	100
水质监测 Water quality monitoring	该湿地的日常监测指标为水量、温度、pH、COD、NH ₃ -N、TN、TP	100
堵塞管理 Congestion management	湿地设有废水预处理设施,建设时对填料进行严格筛选、定期收割植物和对潜流人工湿地进行反冲洗	80
设备管理 Device management	配有专业的设备管理人员,合理规范使用设备、会定期进行设备的巡检和养护工作	100
冬季保温 Winter heat preservation	该湿地会在冬季收割植物,并将其覆盖在人工湿地表面,以保证湿地的温度,覆盖面积达50%	60
出水水质达标率 Standard rate of effluent quality	湿地出水水质达标率为40%~50%	60
污染物削减率 Pollutant reduction rate	在一年的监测数据中,进水平均COD=54 mg/L,NH ₃ -N=3.2 mg/L,TP=1.7 mg/L,TN=26.7 mg/L,出水平均COD=24 mg/L,NH ₃ -N=1.0 mg/L,TP=0.27 mg/L,TN=8.7 mg/L;所监测污染物平均去除率为69%	80
运行管理费用 Operational management costs	0.057元/m ³	80
产品服务 Product service	植物生产每年可盈利105万元左右;人工湿地净化后的水流入东平湖,因此按照基本水价1.7元/m ³ 计算其价值,总价值为6205万元,故产品服务价值为16.5万元/hm ²	100
调节与维护服务价值 Adjusting and maintenance service value	调节气候总价值为10415.6万元;蓄洪价值为159.65万元;湿地降解污染物的总价值为615.6万元;生存栖息地价值为78.7万元;调节与维护服务总价值为13634.55万元,即29.4万元/hm ²	80
旅游休闲和科研教育 Value of tourism leisure and scientific research education	该人工湿地公园来访人数较多,主要为附近的居民,有生态教育区,但科研者低于来访者的15%	60

4 结论

从人工湿地运行管理水平和功能实现程度方面分析影响和反映人工湿地运行状态的相关因素,提出人工湿地运行状态综合评价指标体系,采用线性加权法构建综合评价指数。通过在山东某人工湿地应用,评估结果能够科学客观地反映人工湿地运行状态,并揭示人工湿地运行过程中存在的主要问题,为人工湿地综合管理和优化提升运行水平提供决策依据。

参考文献

- [1] 刘伟. 人工湿地技术在新沂市尾水导流工程中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(10): 145-146, 157.
- [2] 袁俊, 钟山, 张漓杉, 等. 微电解耦合人工湿地处理农村分散式污水[J]. 水处理技术, 2018, 44(9): 36-39, 46.

- [3] 李文毅, 陈尧, 汤文艳. 人工湿地技术在农村污水综合治理工程中的优势分析[J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(7): 21-24.
- [4] 沈万斌, 赵涛, 刘鹏, 等. 人工湿地环境经济价值评价及实例研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(2): 70-73.
- [5] 王淑军, 刘佩楼, 王雯雯, 等. 人工湿地生态系统服务分类及其价值评估: 以临沂市武河湿地为例[J]. 生态经济(学术版), 2011(2): 375-378.
- [6] 董金凯, 贺锋, 吴振斌. 人工湿地生态系统服务价值评价研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(8): 187-193.
- [7] 肖思思, 吴春笃, 储金宇, 等. 城市湿地主导生态系统服务功能及价值评估: 以江苏省镇江市为例[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 194-199, 205.
- [8] 徐慧娴, 李锋民, 卢伦, 等. 人工湿地综合评价指标体系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(10): 106-115.
- [9] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展[J]. 资源科学, 2001, 23(6): 2-9.
- [10] 龚建周, 刘彦随, 张灵. 广州市土地利用结构优化配置及其潜力[J]. 地理学报, 2010, 65(11): 1391-1400.