

DOI:10.13205/j.hjgc.202306019

廖子莹,张焕军,韩曙光,等. 典型蓝藻处理装备的生命周期评价[J]. 环境工程,2023,41(6):143-150.

典型蓝藻处理装备的生命周期评价

廖子莹^{1,2} 张焕军^{1,2} 韩曙光³ 潘正国³ 李轶^{1,2*}

(1. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,南京 210098; 2. 河海大学 环境学院,南京 210098;
3. 无锡德林海环保科技股份有限公司,江苏 无锡 214091)

摘要:常见的蓝藻处理装备有蓝藻在线分离磁捕船、加压控藻船、深潜式高压灭藻器和组合式藻水分离装置。装备应用可能对环境造成影响,识别典型处理装备的环境影响十分必要。基于生命周期评价方法,以典型蓝藻处理装备为评价对象,分析装备生产和运行阶段的环境影响情况,筛选出了导致环境负荷的主要阶段及主要影响因子。结果表明:4种装置的总环境负荷大小顺序为深潜式高压灭藻器<藻水分离装置<加压控藻船<蓝藻在线分离磁捕船。蓝藻在线分离磁捕船、加压控藻船、藻水分离装置在运行阶段产生的环境负荷较大,分别占总负荷的99.8%、96.6%和99.7%;深潜式高压灭藻器的环境影响主要发生在装备生产阶段,占总负荷的47.6%。加压控藻船和蓝藻在线分离磁捕船在运行阶段的高环境负荷来源于燃料消耗产生的污染物;电耗是造成藻水分离装置在运行阶段高环境负荷的主要因素;深潜式高压灭藻器在生产阶段的主要环境影响因素为钢材的消耗。总体来说,深潜式高压灭藻器更具有环境效益,且兼具占地小、效率高等优点,是未来蓝藻处理装备发展的趋势所在。

关键词:生命周期评价;蓝藻治理;装备评估;环境影响

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF TYPICAL CYANOBACTERIA TREATMENT EQUIPMENT

LIAO Ziyang^{1,2}, ZHANG Huanjun^{1,2}, HAN Shuguang³, PAN Zhengguo³, LI Yi^{1,2*}

(1. Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Wuxi Delin Hai Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuxi 214091, China)

Abstract: The common treatment equipment includes cyanobacteria magnetic capture vessels, pressurized cyanobacterial control vessels, submersible pressure cyanobacteria controllers and combined cyanobacteria water separation devices. The application of equipment may cause impacts on the environment. It is necessary to identify the impacts of typical treatment equipment. Based on the life cycle assessment (LCA) method, this study selected typical cyanobacterial treatment equipment as the evaluation object, analyzed its environmental impacts in the production and operation stages, and screened out the main stages and the main influencing factors leading to environmental load. The results showed that the total environmental loads of the four devices were in an order of submersible pressure cyanobacteria controller < cyanobacteria water separation device < pressurized cyanobacterial control vessel < cyanobacteria magnetic capture vessel; the environmental loads generated by the cyanobacteria magnetic capture vessels, pressurized cyanobacterial control vessels and the combined cyanobacteria water separation devices during the operation stage were relatively large, accounting for 99.8%, 96.6% and 99.7% of the total load respectively. The environmental impact of the submersible pressure cyanobacteria controllers mainly occurred in the production stage of equipment, accounting for 47.6% of the total load. The high environmental load of the pressurized cyanobacterial control vessels and cyanobacteria magnetic capture vessels in the operation stage of equipment came from the pollutants

收稿日期:2022-09-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0408301);江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(BE2022601)

第一作者:廖子莹(1999-),女,硕士研究生,主要研究方向为水资源保护与生态修复。liaoziying@hhu.edu.cn

*通信作者:李轶(1975-),男,博士,教授,主要研究方向为水资源保护与生态修复。envly@hhu.edu.cn

generated by fuel consumption; the electric power consumption was the main factor causing high environmental load of combined cyanobacteria water separation device in the operation stage; steel consumption was the main environmental factor in the production stage of the submersible pressure cyanobacteria controllers. In general, submersible pressure cyanobacteria controllers is the trend of cyanobacterial treatment equipment in the future, due to their higher environmental benefits, smaller space occupation and higher effluent quality.

Keywords: life cycle assessment; cyanobacteria treatment; equipment evaluation; environmental impact

0 引言

蓝藻爆发是全球性水环境问题之一^[1]。20 世纪 80 年代以来,全球范围内有 68% 的湖泊遭受蓝藻水华的干扰,藻华强度呈上升趋势^[2]。水华发生时,水体透明度下降,限制水中浮游植物的光合作用^[3],影响其生长,最终导致浮游植物多样性降低^[4]。蓝藻密度过大还使水体中 DO 减少,鱼虾等水生动物窒息死亡,导致水生态系统紊乱^[1]。

为应对蓝藻爆发问题,目前已研发出多种蓝藻处理装备^[5,6]。其中,蓝藻在线分离磁捕船、加压控藻船、深潜式高压灭藻器、组合式藻水分离装置已广泛应用于国家重要湖泊的蓝藻水华治理^[7-9]。当前太湖已建成 31 座藻水分离站和多个深潜式高压灭藻器,配备多艘分离磁捕船和加压控藻船^[7]。蓝藻在线分离磁捕船是将藻华胶体动力学与磁分离耦合的藻水分离平台,对藻类去除率维持在 99%^[5]。加压控藻船和深潜式高压灭藻器根据不同压力下蓝藻囊团和气囊结构的变化特点,对藻水进行加压使蓝藻失去上浮能力,叶绿素 a 和藻类去除率可达到 95% 以上^[10,11]。组合式藻水分离装置是藻水分离站的核心单元,包括蓝藻打捞、脱气沉降、气浮分离等处理环节^[12],对藻细胞平均去除率达到 85% 以上^[13]。蓝藻处理装置的应用对控制蓝藻水华起到积极作用,现有研究对蓝藻处理过程的评价多关注除藻率、叶绿素 a 去除率等蓝藻去除效率指标^[14,15],忽略了处理装备在使用过程中产生的负面作用。除藻装备的使用涉及设备制造、药剂投加、运行维护等环节,这些环节排放的污染物对水环境可造成一定的影响^[16,17],为选择具有环境效益的蓝藻处理装备,对其在应用过程中产生的环境影响进行全面评估十分必要。由于蓝藻处理装备涉及的工艺复杂,尚无研究对蓝藻处理设备全流程的环境影响进行评价。

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是从设备或工艺的生命周期角度,将资源消耗、污染物的输出数据化,并将产生的环境影响特征化的一种方

法^[18]。LCA 的评价范围涵盖原材料的开发利用、设备的生产、运行到设备报废回收全过程,能将各阶段环境影响定性和定量,以便于进行设备或工艺的环境影响对比分析。LCA 在评价水利工程建设的环境影响以及污水处理工艺的对比优化等方面应用较多^[19,20],近年来 LCA 逐渐应用于新型水处理系统和生态工程生命周期环境影响评价^[21,22]。然而,目前未研究利用 LCA 评价蓝藻处理装备在实际应用过程中的环境影响。

本文基于 LCA 方法对典型蓝藻处理装备的环境影响进行对比分析,对装备的主要材料消耗、能量消耗以及排放物数据进行收集和整理,定量分析蓝藻处理装备在实际应用过程中的环境影响,筛选出导致环境负荷的主要阶段及主要环境因子,旨在为蓝藻处理装备的环境效益提供更全面的评价,为优选蓝藻处理装备提供理论支撑。

1 研究方法

1.1 评价目标和范围的确定

本研究选择蓝藻在线分离磁捕船(简称为磁捕船)、加压控藻船(简称控藻船)、深潜式高压灭藻器(简称为高压灭藻器)和组合式藻水分离装置(简称为藻水分离装置)为评价目标,考虑藻水分离阶段涉及的装置生产及装置运行时产生的污染物排放,系统边界如图 1 所示。对于建设、运行和报废拆除 3 个阶段而言,前两者是设计蓝藻处理装备时着重考虑的因素^[23],因此评价范围确定为蓝藻处理装备生产到运行阶段。将功能单位确定为处理 1 m³ 藻水产生的资源消耗和环境影响^[24]。

1.2 清单分析

清单分析是生命周期评价的核心步骤,是收集整理蓝藻处理装备从建设到运行阶段所有物质输入和输出的全部数据的过程。目前,国际上常见的生命周期评价方法体系主要有:工业产品环境设计 1997 (EDIP 97)、产品开发环境优先策略 2000 (EPS 2000)、Ecoindicator 99、环境科学中心 2001 (CML

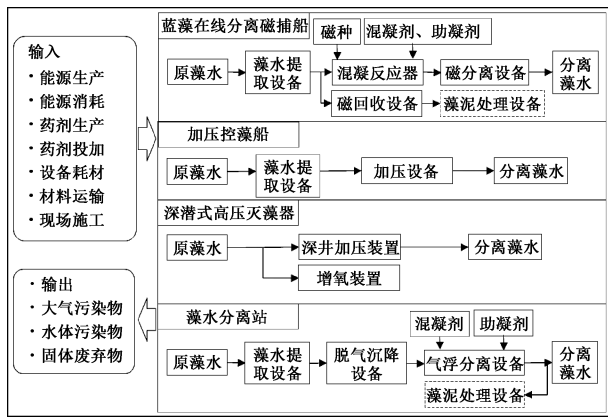


图 1 蓝藻处理装备系统边界

Figure 1 Boundary of cyanobacteria treatment equipment

2001) 和 IMPACT 2002+ 体系^[25,26]。CML 2001 评价体系采用中间点分析, 减少了假设数量和模型的复杂性, 因此本研究选取该体系进行评价^[26,27]。本研究以 GaBi 6.0 为评价软件, 采用 CML2 baseline 2001、

EI99 等评价方法及 Ecoinvent、ELCO 等清单分析数据库开展数据分析。主要数据来自生态修复工程等相关文献资料, 主要包括基础设备和设施建设材料消耗、化学药剂消耗量和各阶段能源消耗等^[23,27]。运输工具统一采用 10 t 柴油货车, 运输距离为 100 km。

根据产品规格信息以及现场调查, 磁捕船^[28-30]、控藻船^[31,32]、高压灭藻器^[33]、藻水分离装置的日处理量分别为 10000, 7200, 86400, 2000 t/d, 假设使用年限分别为 10, 10, 15, 50 年。装备生产阶段的资源消耗包括钢材、铸铁、铝合金、混凝土等原材料的制造、加工、运输和配件组装过程, 配件组装过程涉及钢材焊接以及船体涂料的使用^[34-37]。在装备运行阶段, 考虑船舶运行时电能和燃油消耗以及絮凝剂的使用, 输出主要包括大气污染物、水体污染物、固体废弃物等。磁捕船、控藻船、高压灭藻器、藻水分离装置的数据清单分别如表 1—4 所示。

表 1 蓝藻在线分离磁捕船数据清单

Table 1 Parameter list of cyanobacteria magnetic capture vessels

项目	资源/污染物	数量	资源/污染物	数量	资源/污染物	数量		
生产阶段	输入	钢材	2.85×10^{-3} kg	锰矿石	2.05×10^{-4} kg	HF	1.42×10^{-6} kg	
		铸铁	1.33×10^{-4} kg	黏土矿	2.28×10^{-4} kg	HNO ₃	1.57×10^{-7} kg	
		砂	7.61×10^{-5} kg	水	3.27×10^{-2} kg	HCl	1.42×10^{-7} kg	
		纸包装	4.34×10^{-7} kg	煤	2.14×10^{-3} kg	NaOH	2.85×10^{-7} kg	
		漆	2.1×10^{-6} kg	电力	5.34×10^{-5} kW·h	POCl ₃	9.40×10^{-9} kg	
		石灰石	3.14×10^{-3} kg	油	1.75×10^{-7} kg	N ₂	1.56×10^{-5} kg	
		CO ₂	1.28×10^{-3} kg	氩气	2.65×10^{-6} kg	O ₂	1.71×10^{-7} kg	
		焊丝(直径 1.2 mm)	6.54×10^{-6} kg	HCl	2.42×10^{-9} kg	NH ₃	8.69×10^{-8} kg	
		铁矿石	5.33×10^{-3} kg	NaOH	8.55×10^{-8} kg			
		输出	粉尘	3.99×10^{-5} kg	CuO	4.18×10^{-8} kg	NO _x	2.85×10^{-6} kg
			固体废弃物	5.79×10^{-4} kg	CO ₂	7.31×10^{-3} kg	冲灰清水	1.31×10^{-4} kg
			三甲苯	5.71×10^{-9} kg	CO	2.89×10^{-4} kg	COD	8.55×10^{-6} kg
			VOC	5.22×10^{-8} kg	碳氢化合物	1.71×10^{-6} kg	废石、尾矿	3.09×10^{-5} kg
			C ₆ H ₁₂ O	3.80×10^{-8} kg	氢氧化物	1.70×10^{-4} kg	粉煤灰	7.85×10^{-6} kg
			TBT	4.18×10^{-8} kg	SO ₂	2.02×10^{-5} kg	炉渣	9.08×10^{-7} kg
			燃油	7.20×10^{-2} kg	磁性铁矿粉末	1.00×10^{-4} kg	电力	4.35×10^{-1} kW·h
运行阶段	输入	酸性凹凸棒土	1.00×10^{-2} kg	浓硫酸	1.00×10^{-4} kg			
		废石、尾矿	2.51×10^{-1} kg	炉渣	7.40×10^{-3} kg	N ₂ O	1.15×10^{-5} kg	
	输出	粉煤灰	6.39×10^{-2} kg	SO ₂	4.86×10^{-2} kg	NM VOC(非甲烷挥发性有机物)	2.22×10^{-4} kg	
		氢氧化物	1.38 kg	CO ₂	7.35×10^{-1} kg	SO _x	3.53×10^{-3} kg	
		冲灰清水	1.07 kg	CO	3.54×10^{-2} kg	PM	5.03×10^{-4} kg	
		CH ₄	4.32×10^{-6} kg	NO _x	3.14×10^{-2} kg			

本研究对评价目标进行清单分析后, 对环境影响指标进行计算, 将同类环境影响的干扰因子转化为相同量纲。不同环境影响类型的潜值按式(1)计算^[38]:

$$EP(j) = \sum EP(j)_i = \sum [Q_i \times EP(j)_i] \quad (1)$$

式中: EP(j) 为环境影响类型 j 特征化后的影响潜值; EP(j)_i 为环境干扰因子 i 对环境影响类型 j 的贡献;

Q_i 为环境干扰因子 i 的排放总量; EF(j)_i 为环境干扰因子 i 相对于环境影响类型 j 的当量因子。

计算过程在 Gabi 6.0 软件中完成。

2 结果与讨论

2.1 蓝藻处理设备生命周期环境影响特征化

选取国内外普遍采用的 CML2001 评价方法中有

表2 加压控藻船数据清单

Table 2 Parameter list of pressurized cyanobacterial control vessels

项目	资源/污染物	数量	资源/污染物	数量	资源/污染物	数量	
生产阶段	输入	玻璃钢	2.74×10^{-3} kg	铸铁	8.30×10^{-5} kg	黏土矿	2.19×10^{-4} kg
		碳钢	1.52×10^{-6} kg	铝合金	6.24×10^{-7} kg	水	3.15×10^{-2} kg
		砂	8.15×10^{-5} kg	铁矿石	5.12×10^{-3} kg	电力	6.43×10^{-4} kg
		纸包装	4.64×10^{-7} kg	锰矿石	1.97×10^{-4} kg	油	3.41×10^{-7} kg
		底漆	2.90×10^{-5} L	石灰石	3.01×10^{-3} kg	煤	2.06×10^{-3} kg
		焊丝(直径 1.2 mm)	5.46×10^{-6} kg				
	输出	三甲苯	7.92×10^{-8} kg	CO ₂	6.16×10^{-3} kg	冲灰清水	1.58×10^{-3} kg
		二甲苯	6.60×10^{-6} kg	NO _x	2.74×10^{-6} kg	废石、尾矿	3.72×10^{-4} kg
		TBT	5.81×10^{-7} kg	碳氢化合物	2.06×10^{-5} kg	粉煤灰	9.45×10^{-5} kg
		CuO	5.81×10^{-7} kg	氢氧化物	2.04×10^{-3} kg	炉渣	1.09×10^{-5} kg
VOC		7.25×10^{-7} kg	SO ₂	8.44×10^{-5} kg	粉尘	3.84×10^{-5} kg	
运行阶段	输入	CO	3.26×10^{-4} kg	COD	8.22×10^{-6} kg	金属包装	8.37×10^{-9} kg
		电力	3.87×10^{-1} kW·h	燃油	4.83×10^{-2} kg	含藻原水	1.00 m ³
	输出	SO ₂	4.31×10^{-2} kg	CO	3.14×10^{-2} kg	氢氧化物	1.23 kg
		CO ₂	5.52×10^{-1} kg	NMVOG	1.49×10^{-4} kg	冲灰清水	9.50×10^{-1} kg
		CH ₄	2.90×10^{-6} kg	SO _x	2.37×10^{-3} kg	废石、尾矿	2.24×10^{-1} kg
		N ₂ O	7.73×10^{-6} kg	PM	3.38×10^{-4} kg	粉煤灰	5.69×10^{-2} kg
		NO _x	2.11×10^{-2} kg	碳氢化合物	1.24×10^{-2} kg	炉渣	6.58×10^{-3} kg

表3 深潜式高压灭藻器数据清单

Table 3 Parameter list of submersible pressure cyanobacterial controllers

项目	资源/污染物	数量	资源/污染物	数量	资源/污染物	数量	
生产阶段	输入	铁矿石	8.01×10^{-4} kg	水	4.92×10^{-3} kg	膨润土	3.17×10^{-6} kg
		锰矿石	3.08×10^{-5} kg	煤	3.21×10^{-4} kg	石子	2.54×10^{-5} kg
		石灰石	4.71×10^{-4} kg	钢材	3.17×10^{-5} kg	焊丝	3.81×10^{-8} kg
		黏土矿	3.43×10^{-5} kg	燃油	3.51×10^{-6} kg	电力	自发电
		CO ₂	8.00×10^{-5} kg	NO _x	1.02×10^{-7} kg	粉尘	4.44×10^{-7} kg
运行阶段	输入	CO	3.17×10^{-6} kg	SO ₂	1.59×10^{-7} kg	固体废弃物	6.44×10^{-6} kg
		COD	9.51×10^{-8} kg				
	输出	电力	1.74×10^{-4} kW·h	抗磨液压油	6.34×10^{-11} kg	原藻水	1.00 m ³
		CO	1.41×10^{-5} kg	氢氧化物	5.53×10^{-4} kg	废石、尾矿	1.01×10^{-4} kg
		CO ₂	1.10×10^{-4} kg	SO ₂	1.91×10^{-5} kg	粉煤灰	2.56×10^{-5} kg
	碳氢化合物	5.57×10^{-6} kg	冲灰清水	4.27×10^{-4} kg	炉渣	2.96×10^{-6} kg	

表4 组合式藻水分离装置数据清单

Table 4 Parameter list of combined cyanobacteria water separation devices

项目	资源/污染物	数量	资源/污染物	数量	资源/污染物	数量	
生产阶段	输入	铸铁	9.86×10^{-5} kg	石灰石	4.37×10^{-5} kg	石子	3.80×10^{-1} kg
		混凝土	2.92×10^{-6} kg	黏土矿	3.18×10^{-6} kg	水资源	5.30×10^{-2} kg
		不锈钢	3.97×10^{-5} kg	水泥	1.29×10^{-6} kg	电	5.84×10^{-4} kW·h
		铁矿石	7.42×10^{-5} kg	砂子	1.84×10^{-1} kg	煤	2.98×10^{-5} kg
		锰矿石	2.86×10^{-6} kg				
运行阶段	输出	COD	1.23×10^{-7} kg	CO ₂	6.19×10^{-4} kg	NO _x	3.97×10^{-8} kg
		废石、尾矿	3.38×10^{-4} kg	碳氢化合物	1.87×10^{-5} kg	冲灰清水	1.43×10^{-3} kg
		粉煤灰	8.58×10^{-5} kg	氢氧化物	1.86×10^{-3} kg	粉尘	7.28×10^{-6} kg
		CO	5.13×10^{-5} kg	SO ₂	6.48×10^{-5} kg	炉渣	9.93×10^{-6} kg
		固体废弃物	8.25×10^{-6} kg				
运行阶段	输入	絮凝剂	1.00×10^{-4} kg	水	9.13×10^{-5} m ³	电能	7.42×10^{-1} kg
		助凝剂	1.00×10^{-4} kg				
	输出	CO	6.01×10^{-2} kg	碳氢化合物	2.37×10^{-2} kg	冲灰清水	1.82×10^0 kg
		CO ₂	4.68×10^{-1} kg	氢氧化物	2.36×10^0 kg	废石、尾矿	4.29×10^{-1} kg
	炉渣	1.26×10^{-2} kg	SO ₂	8.16×10^{-2} kg	粉煤灰	1.09×10^{-1} kg	

代表性的 8 个环境影响指标:全球变暖潜势(global warming potential, GWP, 100 years)、酸化潜势(acidification potential, AP)、富营养化潜势(eutrophication potential, EP)、臭氧层消耗潜势(ozone layer depletion potential, ODP)、非生物资源消耗潜势(abioticdepletion potential, ADP)、光化学氧化潜势

(photochemical oxidation potential, POCP)、淡水水生生态毒性潜势(freshwater aquatic ecotoxicity potential, FAETP)和人体毒性潜势(human toxicity potential, HTP)进行特征化^[39,40],4 种蓝藻处理装备环境影响特征化结果如表 5 所示。

表 5 蓝藻处理装备的环境影响特征化结果

Table 5 Characterization result of cyanobacteria treatment equipment

环境影响指标	蓝藻在线分离磁捕船		加压控藻船		深潜式高压灭藻器		组合式藻水分离装置	
	生产阶段	运行阶段	生产阶段	运行阶段	生产阶段	运行阶段	生产阶段	运行阶段
GWP/(CO ₂ -eq.)	2.17×10 ⁻¹	1.21×10 ⁰	1.96×10 ⁻²	5.54×10 ⁻¹	2.34×10 ⁻⁴	2.94×10 ⁻⁴	5.10×10 ⁻²	4.38×10 ⁻¹
AP/(kg SO ₂ -eq.)	2.11×10 ⁻²	7.83×10 ⁻²	7.90×10 ⁻⁴	5.41×10 ⁻²	2.44×10 ⁻⁶	2.37×10 ⁻⁵	3.01×10 ⁻²	6.79×10 ⁻²
EP/(PO ₄ ³⁻ -eq.)	1.68×10 ⁻⁴	3.79×10 ⁻³	5.32×10 ⁻⁶	2.43×10 ⁻⁴	6.94×10 ⁻⁸	5.38×10 ⁻⁸	1.90×10 ⁻⁹	1.11×10 ⁻⁸
ODP/(R11-eq.)	8.85×10 ⁻¹³	3.00×10 ⁻¹⁵	2.00×10 ⁻¹³	1.99×10 ⁻¹³	2.98×10 ⁻¹⁸	1.04×10 ⁻¹⁶	6.59×10 ⁻²⁰	8.78×10 ⁻¹⁹
ADP/(kg Sb-eq.)	7.08×10 ⁻¹	4.22×10 ⁰	1.00×10 ⁻¹	9.70×10 ⁻²	1.79×10 ⁻³	1.84×10 ⁻³	7.03×10 ⁻⁵	8.04×10 ⁻⁴
POCP/(kg Ethene-eq.)	3.90×10 ⁻⁴	1.95×10 ⁻³	1.00×10 ⁻⁵	4.51×10 ⁻³	1.97×10 ⁻⁷	1.37×10 ⁻⁶	6.92×10 ⁻⁴	8.20×10 ⁻³
FAETP/(DCB-eq.)	3.56×10 ⁻⁴	5.79×10 ³	1.00×10 ¹	5.16×10 ³	4.59×10 ⁻⁶	1.82×10 ⁻⁶	3.43×10 ⁻²	5.06×10 ⁰
HTP/(DCB-eq.)	1.03×10 ⁻⁴	1.17×10 ³	1.00×10 ¹	1.04×10 ³	2.60×10 ⁻⁴	9.00×10 ⁻⁵	2.62×10 ⁻³	4.18×10 ¹

由于 4 种蓝藻处理装备有部分环境影响指标值绝对值相对较小,为清晰地比较生产阶段和运行阶段的环境负荷,将每个环境影响指标的总值设置为 100%,绘制出 4 种装备在不同阶段的环境影响特征化柱状图,如图 2 所示。根据 8 个环境指标装备生产阶段和装备运行阶段环境影响占比可知:磁捕船、控藻船、藻水分离装置在装备运行阶段产生的环境影响大于生产阶段。对于磁捕船,运行阶段在 GWP、AP、ADP 主要环境影响指标上的占比分别达到 84.8%、97.5%和 85.6%,造成该阶段高环境负荷的主要环境影响因子为船运行所需的燃料消耗;在生产阶段则为 ODP、GWP、POCP、ADP 指标占比较大。进一步分析得出,在装备生产阶段中钢的生产和使用是产生环境影响的主要因素。对钢材生产过程的全生命周期评价研究表明,GWP、ADP、POCP 指标在钢生产生命周期总环境负荷中占比较高^[42]。控藻船的 GWP、AP、EP、POCP 环境影响指标主要发生在运行阶段,造成该阶段高环境负荷的主要影响因子为船运行所需的燃料消耗,尽管控藻船在运行阶段不需要额外添加药剂,但是船航行过程中由于燃料消耗而产生的环境影响不容忽视^[36,41];ODP、ADP 在装备生产阶段占比较高,控藻船与磁捕船相似,船体的建造需要消耗大量的钢材,使得 ODP、ADP 指标在装备生产阶段较大。

据藻水分离装置的分析结果可知:GWP、AP、EP、ODP 和 ADP 主要环境影响指标在运行阶段的占比分别为 89.6%、69.3%、85.4%、93.0%和 92.0%,

电力消耗为该阶段的主要环境影响因子。藻水分离装置采用脱气沉降、气浮分离等工艺实现藻水分离,气浮池需要消耗电能驱动刮板,同时消耗电能运行空压机注入空气促进絮凝物上浮^[43],电力消耗较大从而产生高环境负荷;装备生产阶段中 AP、EP 占比较大,环境负荷主要来自混凝土的生产和使用。与前 3 种处理装备不同,高压灭藻器的环境影响主要发生在装备生产阶段。GWP、EP、ODP 和 ADP 主要环境影响指标在装备生产阶段占比分别为 55.7%、43.7%、99.9%和 50.7%,造成该阶段高环境负荷的主要环境影响因子为钢材的生产和消耗。由于加压井是固定式蓝藻处理装备且在使用过程中不需要额外投加药剂,在使用过程中仅需要为加压泵和增氧装置提供电能,因此在装备运行阶段环境负荷较小。在传统深井加压除藻技术的基础上,鄢琪等^[44]提出了适用于养殖水体的深水井循环处理技术,研发出固定式双通道深井加压设备,有效降低了深井加压除藻技术在设备运行阶段的环境影响,为环境友好型深井加压除藻装备的发展提供了技术支持。

2.2 蓝藻处理装备生命周期环境影响归一化

将环境影响特征化结果归一化,使不同当量的环境影响指标转换为同一当量,对不同环境影响类型进行比较分析,使 4 种蓝藻处理装备的环境影响指标具有可比性。本研究归一化因子采用 CML2001 的世界年人均值(CML2001-Nov. 09)^[45,46]。由表 5 可知:4 种蓝藻处理装备总环境影响特征值以及各阶段环境

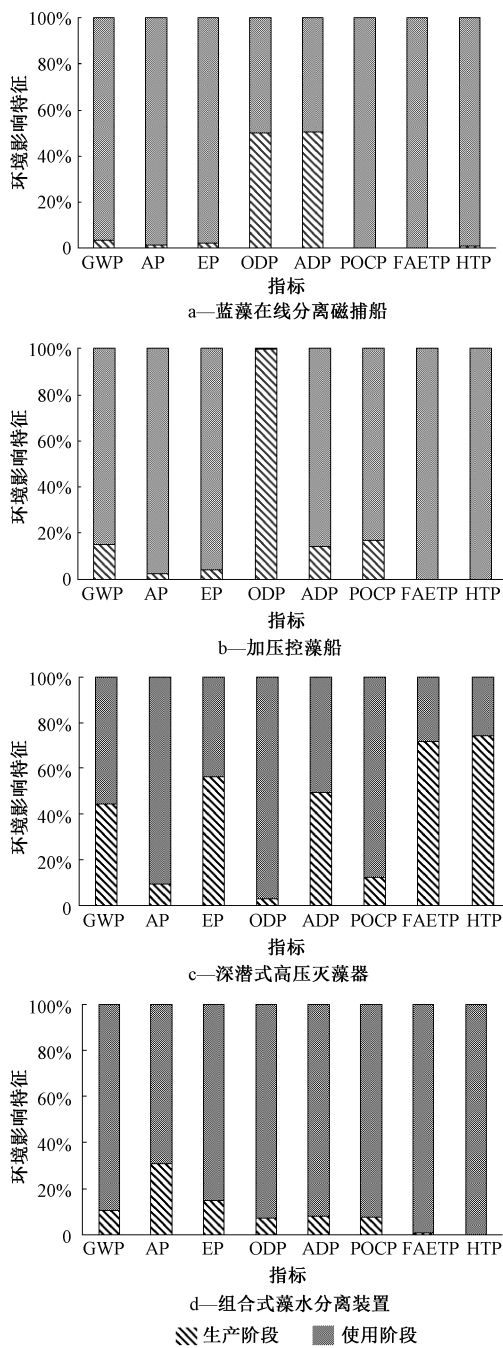


图2 不同阶段环境影响特征化结果

Figure 2 Characteristic value of environmental impacts at different stages

影响特征值分别除以归一化因子,得出4种蓝藻处理装备环境影响归一化结果,如表6所示。

根据归一化结果计算得到,高压灭藻器的总环境负荷最小,其后依次为藻水分离装置、控藻船和磁捕船,其数值分别为 1.74×10^{-11} 、 7.51×10^{-12} 、 9.45×10^{-10} 、 2.36×10^{-8} 。磁捕船、控藻船、藻水分离装置在运行阶段产生的环境负荷较大,分别占总负荷的99.8%、96.6%和99.7%;高压灭藻器的环境影响主

要发生在装备生产阶段,占总负荷的47.6%。除ADP指标外,高压灭藻器的GWP、AP、EP、ODP、POCP、FAETP、HTP环境影响指标均小于其他3种装备。与其他3种装备相比,高压灭藻器装备结构简单、主体耗材少,且在运行过程中无须额外添加化学药剂,因此7个环境影响指标均较小。潘阳等^[47]研究了原位加压蓝藻的垂直分布规律、生长衰亡趋势及沉淀稳定性,在一定条件下,0.7 MPa 加压处理可使水体藻类评价浓度降低98%以上,加压能耗为 $0.005 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。高压灭藻器的低能耗特点,使其具有较好的应用前景。

藻水分离装置的ADP指标比高压灭藻器小,分离装置和高压灭藻器的ADP指标归一化后数值分别为 1.74×10^{-11} 、 4.18×10^{-12} 。高压灭藻器的ADP主要来自装备建设材料消耗所产生的污染物排放,藻水分离装置的ADP主要来自装备使用时药剂投加和能量消耗所排放的污染物。磁捕船的GWP、EP、ODP、ADP大于其他3种装备。由于磁捕船船体大,因此相对于其他处理装备钢材消耗量大和运行时燃料消耗较多,致使磁捕船的GWP、EP、ADP指标大于其余3种处理装备。此外,磁捕船运行时需投加磁性絮凝剂等化学药剂,导致ODP指标偏高。藻水分离装置涉及的工艺多,运作时大量装备同时运行,电能的大量消耗,使得藻水分离装置的AP、POCP、HTP、FAETP大于其他3种装备。

磁捕船、控藻船、藻水分离装置的ADP、FAETP指标对环境的影响远大于其他指标。对于磁捕船和藻水分离装置,絮凝剂等药剂的投加是ADP、FAETP增高的主要原因。对于控藻船,钢材的生产、加工、使用是导致ADP、FAETP指标显著增大的重要因素。高压灭藻器的ADP、AP大于其他环境影响指标,装备建设的耗材是ADP增大的主要原因。此外,高压灭藻器的运行过程中压力泵和增压装置电动机需要消耗化学能源,化学能源燃烧产生的大量 CO_2 以及少量 SO_2 、 NO_x 是导致AP增大的重要因素。

3 结论

本研究基于LCA理论,对当前在湖泊蓝藻治理中应用较广的4种蓝藻处理装备的环境影响进行评价,得到的结论如下:

1) 4种装置的总环境负荷大小顺序为深潜式高压灭藻器<藻水分离装置<加压控藻船<蓝藻在线分离磁捕船。总体来说,深潜式高压灭藻器的资源消耗

表 6 蓝藻处理装备的环境影响归一化结果

Table 6 Standardized values of environmental impact of cyanobacteria treatment equipment

环境影响指标		GWP	AP	EP	ODP	ADP	POCP	FAETP	HTP
归一化标准值		4.15×10 ¹² / (kg CO ₂ 当量/a)	3.35×10 ¹¹ / (kg SO ₂ 当量/a)	1.32×10 ¹¹ / (kg PO ₄ 当量/a)	2.27×10 ⁸ / (kg R ₁₁ 当量/a)	3.61×10 ⁸ / (kg Sb 当量/a)	3.68×10 ¹⁰ / (kg 乙烯 当量/a)	2.04×10 ² / (kg 1,4-DCO 当量/a)	5.70×10 ¹³ / (kg 1,4-DCO 当量/a)
蓝藻在线分离 磁捕船	生产阶段	2.19×10 ⁻¹⁵	8.33×10 ⁻¹⁵	8.68×10 ⁻¹⁶	3.90×10 ⁻²¹	9.95×10 ⁻¹⁰	6.55×10 ⁻¹⁵	1.03×10 ⁻¹⁶	2.84×10 ⁻¹⁸
	运行阶段	2.72×10 ⁻¹⁴	3.26×10 ⁻¹³	2.56×10 ⁻¹⁴	1.32×10 ⁻²³	2.26×10 ⁻⁸	2.05×10 ⁻¹³	1.45×10 ⁻¹²	3.22×10 ⁻¹⁴
	总计	2.94×10 ⁻¹⁴	3.35×10 ⁻¹³	2.65×10 ⁻¹⁴	3.91×10 ⁻²¹	2.36×10 ⁻⁸	2.12×10 ⁻¹³	1.45×10 ⁻¹²	3.22×10 ⁻¹⁴
加压控藻船	生产阶段	4.68×10 ⁻¹⁶	1.25×10 ⁻¹⁵	3.35×10 ⁻¹⁷	2.20×10 ⁻²¹	9.38×10 ⁻¹⁰	3.45×10 ⁻¹⁶	1.17×10 ⁻¹²	2.77×10 ⁻¹⁴
	运行阶段	1.32×10 ⁻¹⁴	2.31×10 ⁻¹³	1.54×10 ⁻¹⁵	4.57×10 ⁻²⁵	4.78×10 ⁻¹²	1.56×10 ⁻¹³	3.21×10 ⁻¹³	2.87×10 ⁻¹⁰
	总计	1.37×10 ⁻¹⁴	2.33×10 ⁻¹³	1.57×10 ⁻¹⁵	2.20×10 ⁻²¹	9.43×10 ⁻¹⁰	1.57×10 ⁻¹³	1.49×10 ⁻¹²	2.89×10 ⁻¹⁴
深潜式高压灭 藻器	生产阶段	5.58×10 ⁻¹⁸	1.02×10 ⁻¹⁷	4.39×10 ⁻²⁰	1.30×10 ⁻²⁶	8.56×10 ⁻¹²	6.89×10 ⁻¹⁸	1.33×10 ⁻¹⁸	7.16×10 ⁻¹⁸
	运行阶段	7.02×10 ⁻¹⁸	9.88×10 ⁻¹⁷	3.40×10 ⁻²⁰	3.69×10 ⁻²⁹	8.80×10 ⁻¹²	4.72×10 ⁻¹⁷	5.36×10 ⁻¹⁹	2.48×10 ⁻¹⁸
	总计	1.26×10 ⁻¹⁷	1.09×10 ⁻¹⁶	7.80×10 ⁻²⁰	1.31×10 ⁻²⁶	1.74×10 ⁻¹¹	5.41×10 ⁻¹⁷	1.86×10 ⁻¹⁸	9.64×10 ⁻¹⁸
藻水分离装置	生产阶段	2.39×10 ⁻¹⁷	4.17×10 ⁻¹⁶	1.89×10 ⁻²¹	7.00×10 ⁻²⁹	1.45×10 ⁻¹³	2.28×10 ⁻¹⁶	9.90×10 ⁻¹⁵	7.23×10 ⁻¹⁷
	运行阶段	1.12×10 ⁻¹⁴	4.08×10 ⁻¹³	7.92×10 ⁻²⁰	4.09×10 ⁻²⁷	4.04×10 ⁻¹²	2.84×10 ⁻¹³	1.46×10 ⁻¹²	1.50×10 ⁻¹¹
	总计	1.12×10 ⁻¹⁴	4.08×10 ⁻¹³	8.11×10 ⁻²⁰	4.16×10 ⁻²⁷	4.18×10 ⁻¹²	2.84×10 ⁻¹³	1.47×10 ⁻¹²	1.50×10 ⁻¹¹

量小、污染物排放少,更具有环境效益,且兼具占地小、效率高等优点,是未来蓝藻处理装备发展的趋势所在。

2) 蓝藻在线分离磁捕船、加压控藻船、藻水分离装置在运行阶段产生的环境负荷较大,分别占总负荷的 99.8%、96.6%和 99.7%;深潜式高压灭藻器的环境影响主要发生在装备生产阶段,占总负荷的 47.6%。加压控藻船和蓝藻在线分离磁捕船在运行阶段的高环境负荷来源于燃料消耗产生的污染物;电耗是造成藻水分离装置在运行阶段高环境负荷的主要因素;深潜式高压灭藻器在生产阶段的主要环境影响因素为钢材的消耗。

从减少能源消耗和降低装备运行过程的环境影响角度考虑,深潜式高压灭藻器这类固定式蓝藻处理装备将会更受关注;船体式处理设备的除藻范围更大,从提高蓝藻处理装置机动性角度考虑,加压控藻船和蓝藻在线磁捕船更为合适;从藻水处理稳定、出水稳定达标需求考虑,藻水分离装置这类工艺成熟的装备值得推广。

参考文献

[1] HUISMAN J, CODD G A, PAERL H W, et al. Cyanobacterial blooms[J]. Nature Reviews Microbiology, 2018, 16(8):471-483.

[2] HO J C, MICHALAK A M, PAHLEVAN N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s[J]. Nature, 2019, 574(7780):667-670.

[3] SUN D Y, LIN X H, et al. Process evaluation of urban river replenished with reclaimed water from a wastewater treatment plant based on the risk of algal bloom and comprehensive acute toxicity [J]. Water Reuse, 2021, 12(1):1-10.

[4] 邓莎,周键. 蓝藻水华的危害及主要控制技术的研究进展[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(18):150-151.

[5] 常露,朱云,朱喜. 治理巢湖蓝藻爆发现状及思路[J]. 环境生态学, 2020, 2(8):89-95.

[6] 方雨博,王趁义,汤唯唯,等. 除藻技术的优缺点比较、应用现状与新技术进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(9):1-6.

[7] 殷鹏,张建华,胡晓雨. 太湖蓝藻水华和湖泛应急防控能力提升对策研究[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(1):18-22.

[8] 朱晔宸. 微能耗加压沉淀蓝藻治理技术装备研发与应用[D]. 扬州:扬州大学, 2022.

[9] 周越,丛海兵,鄢琪,等. 深井循环加压对养殖塘蓝藻控制及机制研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(5):520-524.

[10] 石宏博,黄玥,杨逢乐,等. 基于层次分析法的洱海控藻工程环境效益识别:以挖色湖湾藻水分离站为例[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(增刊2):194-200.

[11] 潘阳,陈旭清,张铮惠,等. 压力作用后的蓝藻在太湖中的生长控制机理[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(7):8-13.

[12] 丛海兵,高郑娟,孙秀秀. 压力作用后太湖蓝藻沉淀性能及其去除研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(1):43-47.

[13] 曹泽磊,易斯文,马立恒,等. 一种蓝藻打捞分离方法[P]. 江苏省:CN111747612A, 2020-10-09.

[14] 邹楚钧,薛现光,朱德平,等. 改性红土应急除藻及水质改善评价:水库现场应用[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(3):206-213.

[15] 王晓刚,付健,戴江玉,等. 河湖健康评价案例分析[J]. 中国水利, 2020(20):11-13.

[16] 陈铁群. 紫外/过硫酸盐除藻及对消毒副产物生成影响研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.

[17] 梅梦磊. 基于 LCA 的船舶环境影响与能效评价系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018.

[18] HULLEBUCH V E, VERONIQUE D, PHILIPPE C M, et al. Environmental impact of two successive chemical treatments in a small shallow eutrophicated lake: Part I. case of aluminum sulphate[J]. Environmental Pollution, 2002, 120(3):617-626.

[19] HOU X, ZHANG W L, LUO X Y, et al. Life cycle assessment of typical urban wastewater reclamation alternatives with different recycling usage [J]. Environment Engineering, 2017, 35(2):

- 153-157, 189.
- [20] 罗小勇, 黄希望, 王大伟, 等. 生命周期评价理论及其在污水处理领域的应用综述[J]. 环境工程, 2013, 31(4):118-122.
- [21] ZHANG W L, FANG S Q, LI Y, et al. Optimizing the integration of pollution control and water transfer for contaminated river remediation considering life-cycle concept[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236: 117651.
- [22] GHIMIRE S R, JOHNSTON J M, INGWERSEN W W, et al. Life cycle assessment of a commercial rainwater harvesting system compared with a municipal water supply system[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 151(2):75-86.
- [23] 张杉雪, 张文龙, 熊维, 等. 典型海水淡化工艺的生命周期评价[J]. 环境工程, 2019, 37(3):168-173.
- [24] 李爽, 王向阳, 郝晓地, 等. 全生命周期评价在污水处理中的研究与应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(18):32-37.
- [25] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(6):155-160.
- [26] SCHMID A G, TARPAMI R R Z. Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: a review[J]. Water Research, 2019, 153:63-79.
- [27] 黄希望, 罗小勇, 李轶, 等. 污水处理厂生命周期评价及不同工艺污水处理系统的环境影响比较分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(1):90-94.
- [28] 冯慧云, 张长风, 蒋锦刚, 等. 蓝藻磁絮体拨轮及蓝藻磁捕船[P]. 安徽省:CN112431181A,2021-03-02.
- [29] 叶瑞, 张发宇, 杜海明, 等. 富营养化水体中藻类物质磁捕移出装置[P]. 安徽:CN201553641U,2010-08-18.
- [30] 刘兵, 叶瑞, 杜海明, 等. 一种新型磁分离污水处理装置[P]. 安徽:CN101913685A,2010-12-15.
- [31] 曹泽磊, 陈旭清, 胡航宇, 等. 一种蓝藻打捞及加压控藻船[P]. 江苏省:CN106638518B,2018-11-13.
- [32] 潘阳. 大型水体原位加压沉淀控制蓝藻生长机理研究[D]. 扬州:扬州大学, 2022.
- [33] 潘正国, 树大伟, 曹泽磊, 等. 一种深潜式高压灭藻装备[Z]. 2020.
- [34] 李碧英, 陈实. 船舶碳足迹计算[J]. 中国船检, 2010(10):48-51.
- [35] TUAN D D, WEI C. Cradle-to-gate life cycle assessment of ships: a case study of Panamax bulk carrier[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M-Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2019, 233(2): 670-683.
- [36] ÖNAL M, NESER G, GURSEL K T. Environmental impacts of steel ship hulls building and recycling by life cycle assessment (LCA)[J]. Ships and Offshore Structures, 2020, 16(9/10): 1061-1066.
- [37] FAVI C, CAMPI F, GERMANI M, et al. Using design information to create a data framework and tool for life cycle analysis of complex maritime vessels[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 192(10): 887-905.
- [38] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10):2136-2144.
- [39] SHAHABI M P, MCHUGH A, ANDA M, et al. Comparative economic and environmental assessments of centralised and decentralised seawater desalination options[J]. Desalination, 2015, 376(16):25-34.
- [40] BLANCO D, COLLADO S, LACA A, et al. Life cycle assessment of introducing an anaerobic digester in a municipal wastewater treatment plant in Spain[J]. Water Science & Technology, 2016, 73(4):835-842.
- [41] 李碧英. 基于生命周期评价的船舶环境影响行为研究[J]. 环境保护与循环经济, 2009, 29(7):17-20.
- [42] 王腊芳, 张莉沙. 钢铁生产过程环境影响的全生命周期评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(增刊2):239-244.
- [43] 任浩强. 基于全生命周期的船舶环境成本控制评价研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2016.
- [44] 鄢琪, 丛海兵, 周越, 等. 深水井循环处理对养殖水体蓝藻控制及对水质的改善[J]. 环境工程学报, 2017, 11(6):3539-3544.
- [45] 丛海兵, 孙凤, 蒋新跃, 等. 深井循环控制浅水蓝藻生长繁殖系统和方法[P]. CN106365218B,2019-04-19.
- [46] MUNO I, FERNANDEZ A, AMADEO R. Reducing the environmental impacts of reverse osmosis desalination by using brackish groundwater resources[J]. Water Research, 2008, 42(3):801-811.
- [47] 潘阳, 陈旭清, 张铮惠, 等. 压力作用后的蓝藻在太湖中的生长控制机理[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(7):8-13.

(上接第123页)

- [22] CHENG A H, LEI X Y. Fenton-like catalytic oxidation of phenol by polysilicate ferric doped iron oxyhydroxides[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(3): 817-825.
- [23] LI D Q, JIANG J Y, ZHOU Y X, et al. Degradation of cationic red X-GRL dye wastewater with H₂O₂ catalyzed by Fe-containing zeolite[J]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 3(5): 392-397.
- [24] HABER F, WEISS J. The catalytic decomposition of hydrogen peroxide by iron salts[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1934, 147(861):332-351.
- [25] GARRIDO-RAMIREZ E G, THENG B, MORA M L. Clays and oxide minerals as catalysts and nanocatalysts in Fenton-like reactions: a review[J]. Applied Clay Science, 2010, 47(3/4): 182-192.
- [26] WANG W M, SONG J, HAN X. Schwertmannite as a new Fenton-like catalyst in the oxidation of phenol by H₂O₂[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 262(15):412-419.
- [27] LUO C Y, ZHANG Z, ZHAO H F. The mineralogical characteristics of schwertmannite and its progress in arsenic removal[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(11): 3530-3543.
- [28] DAI H W, CHEN J X, MIAO X Z, et al. Effect of alcohols on scavenging efficiencies to hydroxyl radical in UV-Fenton system[J]. China Environmental Science, 2018, 38(1): 202-209.
- [29] GHADETAJ A, ALMASI H, MEHRVAR L. Development and characterization of whey protein isolate active films containing nanoemulsions of Grammosciadium ptrocarpum Bioss. essential oil[J]. Food Packaging & Shelf Life, 2018, 16:31-40.