

论述与研究

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.07.001

地下式污水处理厂全生命周期综合效益评价

郝晓地¹, 于文波¹, 王向阳¹, 袁土贵¹, Mark van Loosdrecht^{1,2}

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044; 2. 代尔夫特理工大学, 荷兰)

摘要: 地下式污水处理厂建设近年在我国兴起,且有扩展之势。地下污水厂地表可形成的景观环境直观、易觉,这就使污水处理厂可与景观环境建设合二为一的说法盛行。反观更加缺地的欧洲、日本等地,地下式污水处理厂其实并不多见,让人不免心生疑窦。因此,有必要通过一些方法对地下式污水处理厂进行综合影响评价,以揭示其综合效益之优劣。以国内某全地下式污水处理厂为研究实例,并以相同工艺的地上式污水处理厂作为对比参照物,通过全生命周期环境影响评价(LCIA)、全生命周期成本(LCC)评价及全生命周期生态效益(LCEE)评价3种方法分别对地下式污水处理厂进行全方位影响评价,最后将3种评价结果归一化为全生命周期综合影响(LCCI)评价。综合影响评价结果显示,地下式污水处理厂在环境影响、基建投资、生态效益三方面的综合负面影响较地上式要高约20%。虽然地下式污水处理厂地表园林景观会产生一定生态效益,但这并不能“中和”其环境影响以及基建投资所产生的负面效益。因此,地下式污水处理厂建设并非优选方式,需要因地制宜,选址要特别慎重。

关键词: 地下式污水处理厂; 全生命周期环境影响评价(LCIA); 全生命周期成本(LCC); 全生命周期生态效益(LCEE); 全生命周期综合影响(LCCI); 综合效益

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)07-0001-10

Life Cycle Comprehensive Efficiency Assessment on Underground Wastewater Treatment Plant

HAO Xiao-di¹, YU Wen-bo¹, WANG Xiang-yang¹, YUAN Tu-gui¹, Mark van Loosdrecht^{1,2}

(1. Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Delft University of Technology, the Netherlands)

Abstract: Constructing underground wastewater treatment plants (UWWTPs) prevails recently and tends to extend largely in China. Ecological landscape saved by UWWTPs is easy to be seen, which makes an opinion popular that wastewater treatment could combined with ecological landscape. In Europe and Japan much shorter of land, however, it is rare to see UWWTPs, which makes us a query. Therefore, it is necessary to comprehensively assess UWWTPs in some ways and to reveal their pluses and minuses. Based on life cycle impact assessment (LCIA), life cycle cost (LCC) assessment and life cycle

ecological efficiency (LCEE) assessment, the study assessed omnibearingly the impacts and efficiencies of UWWTPs, and finally the assessed results from each assessment were normalized into life cycle comprehensive impact (LCCI) assessment. The assessment was based on a real domestic UWWTP, and a proposed surface WWTP was used as a counterpart for comparison. The LCCI results revealed that the comprehensively negative efficiency of UWWTP on the environment, infrastructure investment and ecological efficiency was about 20% higher than that of its counterpart. Although the ecological landscape restored by the UWWTP could form a certain ecological efficiency, it could not neutralize the negative efficiency of the UWWTP on the environment and the infrastructure investment. As a result, UWWTPs are not a preference approach to municipal wastewater treatment. So constructing UWWTP should act according to circumstances and selecting sites of UWWTP have to be prudent.

Key words: underground wastewater treatment plant; life cycle impact assessment (LCIA); life cycle cost (LCC); life cycle ecological efficiency (LCEE); life cycle comprehensive impact (LCCI); comprehensive efficiency

污水处理厂作为城市发展的重要组成部分,承担着保护水环境的重要角色。然而,目前主流工艺以平面占地型为主,一些滞后于城市发展的污水处理厂建设时,在使用土地空间方面显得捉襟见肘。于是,地下式污水处理厂建设一时兴起,试图缓解紧张的城市用地,或与城市园林景观建设合二为一。然而,地下污水处理厂节地建设及其地面的园林景观是以较大建设以及运营成本为代价的,其可持续性或综合效益需要定量评估,毕竟在很多比中国更缺地的国家和地区(如日本、欧洲国家等),地下式污水处理厂并不普遍。为此,有必要对地下式污水处理厂进行全生命周期综合影响评价,以揭示其在可持续性或综合效益方面的实际情况。笔者以国内某全地下式污水处理厂作为研究对象,采用定量评价方法,从全生命周期角度分析其在工程建设、工艺运行、环境影响、生态景观等几个方面所产生的综合效益。

1 评价方法

本研究针对地上式与地下式两种污水处理厂建设模式,分别采用全生命周期环境影响(LCIA)、全生命周期成本(LCC)与全生命周期生态效益(LCEE)3种方法进行评价。然后,将3种评价结果进行归一化与无量纲化,得出污水处理厂全生命周期综合影响(LCCI)指标,以比较两种建设模式在投入产出以及综合生态环境效益方面之优劣。

1.1 评价范围

研究评价时限覆盖污水处理厂建设、运行与拆除3个阶段;评价范围为自污水处理厂进水至出水,

并包含污泥处理过程。

选择我国广东某地一座代表性全地下式污水处理厂的实际情况并结合文献参数进行评价。该厂厂区占地面积为 $1.83 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、建筑面积为 $2.21 \times 10^4 \text{ m}^2$,采用两层全地下式结构设计;处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用 $A^2/O + \text{MBR}$ 处理工艺,水力停留时间(HRT)为7.43 h;出水水质执行国家一级A标准,水质不达标时需向曝气池投加液体硫酸铝予以化学除磷;污水处理厂服务年限为20年^[1]。MBR膜组件使用酸、碱和次氯酸钠溶液清洗^[2-3]。污泥经机械脱水后,折合产生干污泥12 t/d。本研究仅讨论污水处理厂构造模式,作为比较的地上式污水处理厂工艺流程与地下式完全相同,占地面积等信息亦相同,建造形式如图1所示。评价功能单位(FU)设定为每人每年平均排放污水量在处理过程中所产生的各种影响,即 $1 \text{ FU} = 1 \text{ PE} \cdot \text{a}$ 。案例研究采用人均污水排放量为 $0.1 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[4]。

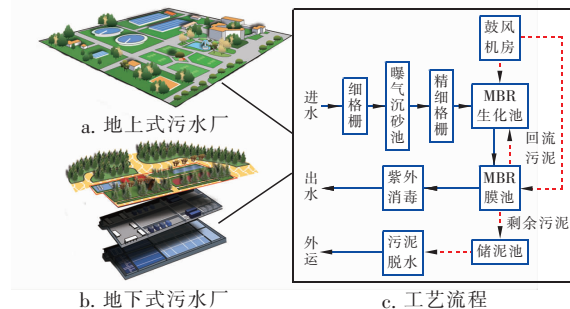


图1 地上式与地下式污水处理厂的构造及其工艺流程

Fig.1 Structure and treatment process of the surface WWTP and underground WWTP

1.2 LCIA 评价

LCIA 是定量分析产品或生产工艺对环境影响的客观评价方法,其目的在于辨识并量化能源与物质消耗对环境造成的影响,并以此为依据进行积极调整,寻求最低环境影响方案。

本研究采用 LCIA 方法对污水处理厂产生的环境影响进行评价,评价目标包括污水处理厂运行中产生的直接环境影响以及物料与能源消耗伴生的间接影响;数据清单覆盖污水处理厂全生命周期中所有物料、能源消耗及其污染物排放,包括污水、污泥处理过程中产生的直接排放以及建材、药剂生产运输中涉及的资源/能源消耗所产生的间接排放。

环境影响评价方法依照国际环境毒理学与化学学会(SETAC)、国际标准化组织(ISO)及美国国家环保署(US EPA)等组织标准,按照分类、特征化和量化3个步骤分别进行^[5-6]。

1.2.1 分类

案例污水处理厂环境影响可划分为:非生物资源耗竭潜能(Abiotic Resources Depletion Potential, ADP)、淡水资源消耗(Freshwater Use, FWU)、全球变暖潜能(Global Warming Potential, GWP)、大气酸化潜能(Acidification Potential, AP)、水体富营养化潜能(Eutrophication Potential, EP)、人体毒性潜能(Human Toxicity Potential, HTP)、填埋空间消耗(Landfill Space Depletion, LSD)、黑臭水体潜能(Black Odor Potential, BOP)等8个子影响指标^[7-8]。

1.2.2 特征化

根据环境影响分类,将清单数据依据影响因子进行量化,以得到各类环境影响负荷值。本研究采用 US EPA 公布的环境影响因子^[9]。各项环境影响负荷(EB)可用下式计算:

$$EB = \sum_{i=1}^n m_i PF_i \quad (1)$$

式中: i 为排放的各物质种类; n 为排放的物质种类总数; m_i 为物质清单中第 i 种物质总量; PF_i 为第 i 种物质对某类环境造成的影响。

1.2.3 量化

将不同类别环境影响负荷,统一化为无量纲归一化结果,使不同影响之间可以相互比较。之后再对各结果赋予权重,以获得环境综合影响值。本研究采用层次分析法(AHP)计算权重。AHP过程首先应建立不同项目间两两对比相对重要性,并进行

标度,形成 $A-P$ 矩阵;随后,对矩阵进行逻辑一致性检验,并计算权重值 $W^{[10]}$ 。最终,依照权重值将各项评价加权求和,计算评价总值,如式(2)所示。本研究结果可以作为地下式与地上式两种不同构筑形式污水处理厂在相同功能单元下综合评价的一般方法。

$$LCIA = \sum_{i=1}^n W_i NEB_i \quad (2)$$

式中:LCIA 为全生命周期环境影响指标值; W_i 为第 i 种环境影响类型权重值; NEB_i 为归一化后第 i 种环境影响的环境负荷潜能值。

1.3 LCC 评价

LCC 为统计分析产品在全生命周期中所发生的总成本评价方法,可依照评价结果改善生产工艺与方法。本研究采用 LCC 方法分析案例污水处理厂的经济信息,可根据如下公式进行计算^[11]:

$$LCC = \sum_{k=1}^m C_k + \sum_{t'=1}^{T_0} C_h \left(\frac{1+f}{1+r} \right)^{t'} + \sum_{t=0}^T \frac{C_i}{(1+r)^t} - S \quad (3)$$

$$r = (1+j) \times (1+f) - 1 \quad (4)$$

式中: C_k 为污水处理厂建设工程费用; C_h 为运行阶段设备更新费用; C_i 为污水处理厂运行成本; f 为通货膨胀率,取2.8%; r 为折现率; j 为利率,取4.90%; S 为净残值,取固定资产的4%; T 为全生命周期; t 为运行年份; t' 为设备更新时间。

1.4 LCEE 评价

LCEE 是指自然或人造景观生物系统在全生命周期内对人类生产、生活条件产生的有益影响,对其进行量化分析,可以用来评价其可持续性与良性循环能力^[12]。地下式污水处理厂将处理工艺主体置于地下,而地表部分所建园林景观被视为最大优点。可见,在综合评价地下式污水处理厂过程中,LCEE 评价不可忽略。

在 LCEE 中,将景观生态功能分为大气调节、土壤调节、生物功能、生产功能与文化功能等5大类,如表1所示^[13]。分别针对每项生态效益进行定量评价,再通过 AHP 法将结果统一为归一化无量纲结果,可通过式(5)计算其生态影响评价值。

$$LCEE = \sum_{i=1}^n W_i NEE_i \quad (5)$$

式中:LCEE 为全生命周期生态效益指标值; W_i 为第 i 种生态效益类型权重值; NEE_i 为归一化后第 i 种生态效益的潜能值。

表1 生态效益分类

Tab.1 Classification of the ecological benefits

景观功能	景观效益	评价内容
大气调节	气体调节	调节大气气体组成
	气候调节	调节小范围内气温、降水变化
	空气净化	植物吸收空气中 SO ₂ 、灰尘等
土壤调节	旱涝调节	植物截留并保持雨水
	水土保持	减少风沙、径流冲刷造成的土壤流失
	土壤形成	生物促进岩石侵蚀风化及有机物质积累
	养分循环	获取、产生养分或存储、内部循环养分
	废弃物处理	降解过剩养分或分解有毒物质
生物功能	授粉	有授粉昆虫栖息
	生物控制	存在一定生态链,可维持生态平衡
	生物栖息	迁徙物种繁育与栖息地,或本地物种越冬场地
生产功能	食物生产	进行农业或渔业生产,可产出食物
	原材料	产出木材、燃料、饲料等非食品加工原材料
	遗传资源	栖息繁育珍稀动植物物种,或人工培育有价值动植物物种
文化功能	休闲	游览、运动等户外休闲活动场地
	文化	传播艺术、教育、科学等文化意义

1.5 LCCI 评价

LCCI 是针对产品各方面影响与效益分别进行评价后,将评价结果按照一定层次结构有机结合的综合评价方法。有别于 LCIA 等,LCCI 不仅仅局限于单一层面,而是从多角度分析产品,客观反映出产品在不同情景下的状态与问题,以达到环境、经济、生态等多方面影响的和谐统一,避免因片面追求某一方面的优良效果而降低整体价值^[14]。

本研究采用 LCCI 评价方法,把案例污水处理厂综合影响评价结果作为总目标,以 LCIA、LCC、LCEE 三方面评价结果作为子目标层,将各评价指标结果值以 AHP 法进行权重计算、归一化和无量纲化,以此获得最终的 LCCI 综合评价结果,用于评判地下式污水处理厂与地上式污水处理厂综合影响之优劣。LCCI 评价结果可以依据式(6)进行计算。设定 LCCI 结果为正值表示对自然环境与社会产生了负面影响(如对环境排放污染物、耗费资金等),而负值则是产生了一定正面效益(如景观植被净化空气等)。

$$LCCI = LCIA + LCC - LCEE \quad (6)$$

2 全生命周期环境影响评价(LCIA)

2.1 数据清单

案例地下式与地上式污水处理厂的相关物质数据清单如表2所示^[1-3,7,9,15-18]。其中,地下式污水处理厂采用实际运行数据,并依据其数据推算得到所对应的地上污水处理厂基准。表2显示,在建设阶段,因地下污水处理厂纵向空间设计布局,额外增加了开挖基坑与建设大型地下框架结构的要求,所以所需建材与能耗远高于地上污水处理厂;在运行阶段,地下污水处理厂出水以及剩余污泥需要从地下提升至地表排放或处理,使污水处理的单位能耗升高。此外,地下污水处理厂额外增添的照明与通风设备也相应增加了处理能耗;在拆除阶段,巨大基坑需要掩埋填平,导致建筑垃圾量增加,亦使施工能耗相应增加。

表2 案例污水处理厂 LCIA 评价主要影响物质清单

Tab.2 Inventory of major materials associated with LCIA of the case-study WWTP

项目	影响物质	输入		输出	
		地下式	地上式	地下式	地上式
建设阶段	钢筋与钢材/t	3 888	3 151	—	—
	混凝土/m ³	44 110	24 033	—	—
	陶粒混凝土/m ³	5 693	5 693	—	—
	挖弃土方/m ³	163 800	8 421	—	—
	回填土方/m ³	17 846	846	—	—
	直接能耗/(kW·h)	8.22 × 10 ⁶	5.55 × 10 ⁶	—	—
运行阶段	COD/(mg·L ⁻¹)	270		20	
	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	160		5	
	TN/(mg·L ⁻¹)	35		11.7	
	氨氮/(mg·L ⁻¹)	30		0.32	
	TP/(mg·L ⁻¹)	4.5		0.3	
	SS/(mg·L ⁻¹)	220		0.5	
	能耗/(kW·h·m ⁻³)	0.64	0.59	—	—
	次氯酸钠/(kg·d ⁻¹)	41.7		—	—
	硫酸铝/(t·d ⁻¹)	2.32		—	—
	污泥(含水率为77%)/(t·d ⁻¹)	—	—	56.26	
拆除阶段	拆除能耗/(kW·h)	5.25 × 10 ⁶	2.10 × 10 ⁶	—	—
	运输油耗/L	7.35 × 10 ⁵	2.18 × 10 ⁵	—	—
	建筑垃圾/t	—	—	59 700	29 850
	钢材回收/t	—	—	1 477	1 197

2.2 特征化结果

案例污水处理厂 LCIA 特征化结果列于表 3, 各类环境影响占比见图 2。由于地下污水处理厂建设阶段投入较大工程量, 使其对环境影响, 特别是在 ADP 方面明显高于地上污水处理厂; 拆除阶段所需工程量也相应增大, 导致拆除阶段各类环境影响大大升高。此外, 两种污水处理厂在拆除阶段都呈现

出较大的 ADP 占比, 这是因为 MBR 工艺会增加拆除作业中的施工量, 且会产生更多的建筑垃圾; 运行阶段, 因地下污水处理厂运行能耗较高导致环境影响略有增加。显然, 地下污水处理厂在建设及拆除阶段较之地上污水处理厂会产生更大的环境影响, 而这些影响均体现在污水处理厂的外部结构上, 影响增大对核心的污水处理水平却未带来一丝益处。

表 3 案例污水处理厂环境影响特征化结果

Tab. 3 Characterization results of the case-study WWTP on the environmental effects

项 目	建设		运行		拆除		全生命周期	
	地下式	地上式	地下式	地上式	地下式	地上式	地下式	地上式
ADP/(kgSb 当量·FU ⁻¹)	0.412	0.002 4	0.019 9	0.019 1	0.220	0.187	0.652	0.209
FWU/(kg·FU ⁻¹)	0.067 3	0.046 7	2.52	2.33	0.030 2	0.010 2	2.61	2.39
GWP/(kgCO ₂ 当量·FU ⁻¹)	0.160	0.111	5.38	4.94	0.037 1	0.006 5	5.58	5.06
AP/(kgSO ₂ 当量·FU ⁻¹)	1.28×10^{-4}	8.80×10^{-5}	0.006 1	0.005 7	5.85×10^{-5}	1.89×10^{-5}	0.006 3	0.005 8
EP/(kgPO ₄ ³⁻ 当量·FU ⁻¹)	2.28×10^{-5}	1.52×10^{-5}	0.030 2	0.030 1	1.20×10^{-5}	4.09×10^{-6}	0.030 2	0.030 1
HTP/(kgDCB 当量·FU ⁻¹)	0.133	0.093 2	5.69	5.26	0.292	0.135	6.12	5.48
LSD/(m ³ ·FU ⁻¹)	0.006 8	0.005 9	0.195	0.182	0.002 0	8.04×10^{-5}	0.204	0.188
BOP/(kgCOD 当量·FU ⁻¹)	6.47×10^{-5}	3.78×10^{-5}	0.149	0.149	9.17×10^{-5}	4.39×10^{-5}	0.150	0.149

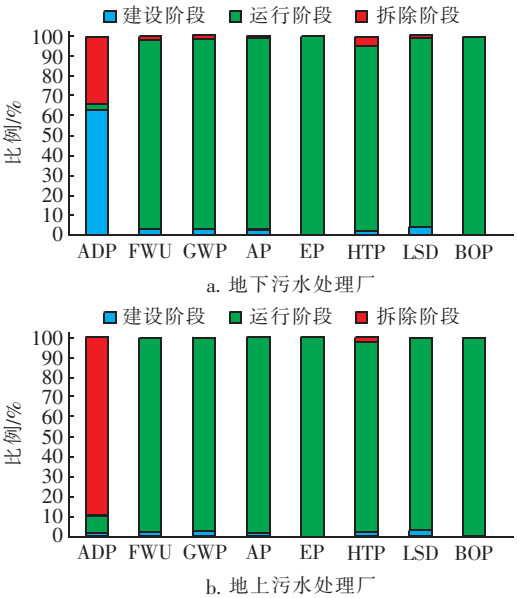


图 2 案例污水处理厂不同阶段的环境影响对比
Fig. 2 Comparison of the environmental effects from the case-study WWTP and its counterpart

2.3 归一化结果及环境综合影响

根据层次分析法, 经过统计分析后, 得到归一化矩阵^[7,19]:

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.198 & 0.034 & 0.296 & 0.056 \\ 0.124 & 0.084 & 0.051 & 0.157 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

基于此, 案例污水处理厂环境影响归一化计算

结果如下: 地下污水处理厂的 ADP、FWU、GWP、AP、EP、HTP、LSD、BOP 指标值分别为 0.129、0.088 9、1.65、 3.55×10^{-4} 、0.003 74、0.514、0.010 4、0.023 5, 地上污水处理厂的相应指标值分别为 0.041 4、0.081 3、1.05、 3.27×10^{-4} 、0.003 73、0.461、0.009 57、0.023 4。最终计算得到, 地下和地上污水处理厂的 LCIA 值分别为 2.42 和 2.12。以上结果表明, 地下污水处理厂产生的环境影响较地上污水处理厂要大(影响增加 14%), 即对环境造成了更大的负担, 具有不可持续性。案例污水处理厂的环境影响主要集中在全球变暖潜能(GWP)、人体毒性潜能(HTP)与非生物资源耗竭潜能(ADP), 而地下污水处理厂建设与拆除中大兴土木, 额外增加了材料、能源消耗导致这些影响增加, 使 LCIA 值变大。

3 全生命周期成本评价(LCC)

若设备使用年限设定为 10 年, 则生命周期中共需更新 1 次设备。计算可知, 本研究采用的折现率为 7.84%。维护费用取固定资产的 3%; 管理费用取运行费用与固定资产的 15%^[11]。案例污水处理厂的全生命周期成本统计结果列于表 4^[1]。可知, 地下和地上污水处理厂的全生命周期总成本分别为 39.81、32.43 元/FU, 地下污水处理厂比地上污水处理厂高出 22.8%。可见, 无论在哪个阶段, 地下污水处理厂都需要投入较高的成本, 不利于资金筹措、

周转与回报。

表4 案例污水处理厂的全生命周期成本

Tab.4 Life cycle cost of the case-study WWTP

元·FU⁻¹

项 目	地下污水厂	地上污水厂
建设阶段	基坑工程	2.99
	大型地下框架工程	2.23
	施工建设费用	10.34
	通风工程	0.39
	消防工程	0.18
	MBR膜组件工程	4.95
	自控与仪表工程	0.79
	绿化	0.19
	其他费用	2.50
	总投资	24.55
运行阶段	MBR处理能耗	12.15
	照明能耗	0.84
	通风能耗	0.37
	紫外消毒能耗	1.01
	污泥脱水	0.05
	污泥提升	0.75
	硫酸铝	0.85
	次氯酸钠	0.08
	运输	0.09
	维护修理费	0.74
	管理费	6.05
	处理总成本折现值	12.31
	设备更新(第10年)折现值	4.10
	净残值	1.15
拆除阶段	全生命周期总费用	39.81
		32.43

在总成本中,地下污水处理厂的建造费用所占比例较大,约为地上污水处理厂的1.31倍(与实际工程情况相符^[17]),归因于额外的地下空间开挖与构筑。此外,地下污水处理厂运行阶段管理与维护费用亦相应增加,主要为照明、通风系统以及污水、污泥提升所致。

案例地下污水处理厂的建设成本单价为4 910元/(m³·d⁻¹),地上污水处理厂为3 750元/(m³·d⁻¹),均远高于相同规模的普通二级污水处理厂的建设单价[1 471元/(m³·d⁻¹)]^[20]。除了地下污水处理厂额外地下空间开挖与构筑、配套设施与设备安装(占总工程费用的23.5%)因素之外,MBR工艺造价较高(占总工程费用的20.1%)是另外一

个原因。

4 全生命周期生态效益评价(LCEE)

4.1 生态效益分类与结果

地下式污水处理厂的园林景观为精心设计打理的人造绿化景观,可以认为具有气体调节、气候调节、空气净化、旱涝调节、水土保持、养分循环、休闲与文化等8个方面的生态效益,如表5所示。其中,休闲功能选取当地游览收入情况进行评价,但这并非指地上景观会成售票公园景点,而只是借助其潜在游览价值来表征居民对景观绿地的抽象感受。

表5 案例污水处理厂的景观生态效益分类

Tab.5 Classification of the ecological efficiencies for the case-study WWTP

项 目	评价指标
气体调节	植被可吸收的CO ₂ 总量
气候调节	叶片蒸腾作用在夏季中吸收的热量,本研究取6月—8月
空气净化	植物吸收截留灰尘、SO ₂ 等空气污染物量
旱涝调节	植被滞留雨水量
水土保持	植被减少土壤侵蚀量
养分循环	植物产生与保持的N与P元素总量
休闲	当地景观游览收入
文化	当地景观接待游客数

各评价指标中所涉及的参数从相关文献^[21-25]中获得。其中,地上污水处理厂内同样可保留一定绿化面积;考虑到管理水平与植物密度均不及地下污水处理厂的园林景观,故设定其单位面积内的生态效益为地下污水处理厂地表园林的80%;此外,因地上污水处理厂绿地仅供员工休憩,其休闲价值按50%计,也不具备文化宣传效果(相应效益为0)。分析各项生态效益,结果列于表6。

表6 案例污水处理厂景观生态效益清单

Tab.6 Inventory of the ecological efficiencies from the case-study WWTP

项 目	地下污水厂	地上污水厂
气体调节/kgCO ₂	20 112	11 659
气候调节/(kW·h)	42 356	24 555
空气净化/kgSO ₂	3 439	1 994
旱涝调节/m ³	74 193	43 011
水土保持/kg	6 034	3 498
养分循环/kg	19 106	11 076
休闲/万元	122	44.2
文化/万人	10 694	0

4.2 生态效益量化结果

根据文献与案例污水处理厂所在地区情况,可

以得到各项景观生态效益相对重要性判断矩阵,如表7所示。

表7 生态效益判断矩阵

Tab.7 Judgement matrix of the ecological efficiencies

项 目	气体调节	气候调节	空气净化	旱涝调节	水土保持	养分循环	休闲	文化
气体调节	1	1/2	2	2	1	3	3	3
气候调节	2	1	3	3	2	5	6	6
空气净化	1/2	1/3	1	1	1/2	1	2	2
旱涝调节	1/2	1/3	1	1	1/2	2	2	2
水土保持	1	1/2	2	2	1	3	3	3
养分循环	1/3	1/5	1	1/2	1/3	1	2	2
休闲	1/3	1/6	1/2	1/2	1/3	1/2	1	1
文化	1/3	1/6	1/2	1/2	1/3	1/2	1	1

对判断矩阵进行一致性检验,以确认其逻辑性。计算结果显示,判断矩阵的一致性指标 $CR = 0.009$

(<0.1),证明该矩阵具有逻辑一致性。对该矩阵进行正规化,获得如下矩阵:

$$\begin{bmatrix} 0.167 & 0.156 & 0.182 & 0.190 & 0.167 & 0.188 & 0.150 & 0.150 \\ 0.333 & 0.313 & 0.273 & 0.286 & 0.333 & 0.313 & 0.300 & 0.300 \\ 0.083 & 0.104 & 0.091 & 0.095 & 0.063 & 0.083 & 0.100 & 0.100 \\ 0.083 & 0.104 & 0.091 & 0.095 & 0.083 & 0.125 & 0.100 & 0.100 \\ 0.167 & 0.156 & 0.182 & 0.190 & 0.167 & 0.188 & 0.150 & 0.150 \\ 0.056 & 0.063 & 0.091 & 0.048 & 0.056 & 0.063 & 0.100 & 0.100 \\ 0.056 & 0.052 & 0.045 & 0.048 & 0.056 & 0.031 & 0.050 & 0.050 \\ 0.056 & 0.052 & 0.045 & 0.048 & 0.056 & 0.031 & 0.050 & 0.050 \end{bmatrix} \quad (8)$$

再对每行求和并正规化,可得向量:

$$W_2 = [0.169 \quad 0.306 \quad 0.090 \quad 0.098 \quad 0.169 \quad 0.072 \quad 0.048 \quad 0.048]^T \quad (9)$$

这便是案例污水处理厂地上景观生态效益的权重值。基于此,对景观效益指标进行归一化,结果如下:地下污水处理厂的气体调节、气候调节、空气净化、旱涝调节、水土保持、养分循环、休闲、文化效益指标值分别为 1.70×10^{-4} 、 6.49×10^{-4} 、 1.55×10^{-5} 、 3.63×10^{-4} 、 5.09×10^{-5} 、 6.86×10^{-5} 、 2.95×10^{-6} 、 2.59×10^{-5} ,地上污水处理厂的相应指标值分别为 9.83×10^{-5} 、 3.76×10^{-4} 、 8.97×10^{-6} 、 2.10×10^{-4} 、 2.95×10^{-5} 、 3.98×10^{-5} 、 1.07×10^{-6} 、0。最终得到,地下和地上污水处理厂的景观生态效益指标 LCEE 值分别为 1.34×10^{-3} 、 7.64×10^{-4} ,即地下污水处理厂的地表园林景观产生的生态效益约为地上污水处理厂的 1.75 倍。

污水处理厂附属景观或绿地的生态效益主要集中在气体调节(植被吸纳 CO_2 , 调节大气气体组成)、气候调节(植物叶片蒸腾作用调节周围温度)与旱涝调节(植被截留吸纳降雨)方面,均属于对环

境的调节作用,而对人类生活活动(休闲与文化功能)则收益很小。

5 全生命周期综合影响评价(LCCI)

5.1 计算结果

经过 LCIA、LCC、LCEE 评价后,已分别得到了对应的评价指标值。再次以层次分析法对上述 3 种评价指标进行归一化与量化。归一化矩阵如下:

$$W_3 = [0.65 \quad 0.23 \quad 0.12]^T \quad (10)$$

最终,计算得到地下与地上污水处理厂的综合影响评价指标结果,以行向量形式表示为:

$$LCCI_{\text{地下式}} = [1.57 \quad 9.15 \quad -1.64 \times 10^{-4}]^T \quad (11)$$

$$LCCI_{\text{地上式}} = [1.37 \quad 7.45 \quad -9.33 \times 10^{-5}]^T \quad (12)$$

在本研究规定的全生命周期中,地下与地上污水处理厂对环境和社会产生的综合影响 LCCI 值分别为 10.7、8.83。可知,地下式污水处理厂产生的环境、投资、生态综合影响较地上式高出 21%。地下式污水处理厂的地表园林景观确实具有一定的生态效益,但与基建投资及其对环境的影响相比显然

远无法实现效益“中和”。

5.2 讨论

本研究的综合评价结果与现行观点显然相左。这是因为景观园林具象,感官可以直觉,容易被人接受,而其背后隐含的环境影响以及基建投资等往往不被人所认识。其实,地下污水处理厂的地面景观罕有向公众开放,其真实功能也就相当于一块绿地的价值,也不能在上面开发房地产。

也有人认为地下式污水处理厂可以升值其周边的房地产价格。事实上,这只不过是对于地下污水处理厂“眼不见为净”的浅显认识,地上污水处理厂目前也大都可以通过加盖封闭方式收集尾气并净化排放,对周围居民并没有太大的嗅觉影响。如果地下污水处理厂果真可以提高周边房地产价格,从环境经济角度看,这势必会间接增加环境污染物排放,因为“钱”的背后便是CO₂、雾霾、废水等污染物。

因此,地下式污水处理厂的建设并非优选方式,需要因地制宜,选址需要特别慎重。在此方面,应该认真分析国外少有的地下污水处理厂选址、建设缘由。例如,荷兰鹿特丹 Dokhaven 污水处理厂^[26]、日本神奈川叶山町污水处理厂^[27]、芬兰赫尔辛基 Viikinmäki 污水处理厂^[28]、瑞典斯德哥尔摩 Henriksdal 污水处理厂(目前世界上最大的 MBR 地下污水厂,处理规模达 $86.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)^[29]等,或因确实缺地、或出于气候严寒需要保温措施而考虑建设地下式污水处理厂。无论如何,这些污水厂均充分考虑了利用当地地形,例如,鹿特丹 Dokhaven 污水处理厂利用了废弃船坞码头的深坑(深 6~7 m),而神奈川叶山町污水处理厂、赫尔辛基 Viikinmäki 污水处理厂、斯德哥尔摩 Henriksdal 污水处理厂则利用了天然山洞。

6 结语

在城市化进程以及规模不断扩张的今天,城市用地显得紧张与昂贵,这就使得地下式污水处理厂建设集工艺建设与恢复生态景观合二为一的观点占了上风。事实上,人们往往只看到生态景观的表象,而对其中隐含的基建投资、环境影响却很少关注和了解。这就需要从全生命周期角度对地下式污水处理厂的基建投资、环境影响以及生态效益等方面分别予以定量评价,综合各种影响进行定量分析。

本研究通过全生命周期环境影响(LCIA)、全生命周期成本(LCC)与全生命周期生态效益(LCEE)

三种评价方法对国内某全地下式污水处理厂进行定量评价,并最后归纳于全生命周期综合影响评价(LCCI)。结果显示,地下式污水处理厂在基建投资、环境影响、生态效益三方面的综合负面影响较地上式要高出约 1/5。虽然地下式污水处理厂的地表园林景观会产生一定的生态效益,但这并不能“中和”其基建投资以及环境影响产生的负面效益。更何况,其产生的生态红利服务了发达城市,而环境负面影响往往转嫁至欠发达地区。

本研究虽基于理论计算与分析,但结果对地下污水处理厂建设的综合评价至少可以定性说明问题。不然,比中国更缺地的日本、欧洲等地的地下污水处理厂早已遍地开花。

参考文献:

- [1] 韦玮. 广州市京溪污水处理厂工程造价分析[J]. 建筑经济, 2011(10): 42-44.
WEI Wei. Project cost analysis of Guangzhou Jingxi sewage treatment plant[J]. Construction Economy, 2011(10): 42-44 (in Chinese).
- [2] 伍运佳. MBR 工艺在京溪污水处理厂处理的运行及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
WU Yunji. Study on the Operation and Application of Jingxi Sewage Plant Treatment by MBR Process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [3] 陈贻龙. 地下式 MBR 工艺在广州京溪污水处理厂的应用[J]. 给水排水, 2010, 36(7): 51-54.
CHEN Yilong. Application of underground MBR in Guangzhou Jingxi wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(7): 51-54 (in Chinese).
- [4] 上海市建设和交通委员会. 室外排水设计规范: GB 50014—2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
Shanghai Construction and Transportation Committee. Code for Design of Outdoor Wastewater Engineering: GB 50014-2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2006 (in Chinese).
- [5] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述——兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1232-1242.
WANG Changbo, ZHANG Lixiao, PANG Mingyue. A review on hybrid life cycle assessment: development and application[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1232-1242 (in Chinese).

- [6] 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.
- LUO Xiaoyong, HUANG Xiwang, WANG Dawei, *et al.* The theory of life cycle assessment and its application in wastewater treatment [J]. Environmental Engineering, 2013,31(4):118-122 (in Chinese).
- [7] 王向阳. 污水处理碳足迹核算及环境综合影响评价研究[D]. 北京:北京建筑大学,2019.
- WANG Xiangyang. Study on Calculating Carbon Footprint and Assessing the Total Environmental Impact of Wastewater Treatment [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019 (in Chinese).
- [8] 杨帆. 重庆市城市污水处理厂升级改造的环境影响评价[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- YANG Fan. LCA-based Environment Impact Assessment of Emission Standard Upgrading of Wastewater Treatment Plant in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014 (in Chinese).
- [9] 梁松. 基于LCA的城市污水处理厂环境影响负荷研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- LIANG Song. Research on the Environmental Impact Load of the Urban Wastewater Treatment Plant by the Method of Life Cycle Assessment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese).
- [10] 邓南圣,王小兵. 生命周期评价[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- DENG Nansheng, WANG Xiaobing. Life Cycle Assessment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003 (in Chinese).
- [11] 黄辉,张勤,傅斌. 基于全生命周期成本理论的污水厂投资方案比较[J]. 中国给水排水,2013,29(1):101-104.
- HUANG Hui, ZHANG Qin, FU Bin. Comparison between investment programs of WWTP based on LCC theory [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(1): 101-104 (in Chinese).
- [12] 王效科,杨宁,吴凡,等. 生态效益评价内容和评价指标筛选[J]. 生态学报,2019,39(15):5442-5449.
- WANG Xiaoke, YANG Ning, WU Fan, *et al.* Ecological benefit evaluation contents and indicator selection [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5442-5449 (in Chinese).
- [13] Sub-Global Assessment Selection Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Millennium ecosystem assessment sub-global component: purpose, structure and protocols [EB/OL]. [2021-01-14]. <http://www.Millenniumassessment.org>.
- [14] 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[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- Ji Nan. Research on Comprehensive Evaluation Index System and Method in Wastewater Treatment Plant [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese).
- [15] 熊艾玲. 城市污水处理工艺的生命周期能耗分析及节能试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- XIONG Ailing. Life Cycle Assessment and Study on Energy Conservation for Municipal Wastewater Treatment Process [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004 (in Chinese).
- [16] 何小飞. 建筑施工初始能耗及节能施工技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
- HE Xiaofei. The Research of Energy Consumption and Energy Conservation in Construction Technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013 (in Chinese).
- [17] 侯锋. 地下式污水处理厂关键技术研究工程实践[D]. 北京:清华大学,2017.
- HOU Feng. Key Technology Research and Engineering Practice of Underground Municipal Wastewater Treatment Plant [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017 (in Chinese).
- [18] 王琦,樊耀波. 膜生物反应器在污水处理与回用中的能耗分析[J]. 膜科学与技术,2012,32(3):95-103.
- WANG Qi, FAN Yaobo. Analysis of energy consumption in membrane bioreactors for wastewater treatment and reuse [J]. Membrane Science and Technology, 2012, 32(3): 95-103 (in Chinese).
- [19] 郝晓地,王向阳,江瀚,等. 污水处理环境综合效益评价方法及案例应用[J]. 中国给水排水,2019,35(6):6-15.
- HAO Xiaodi, WANG Xiangyang, JIANG Han, *et al.* Evaluation method of the environmental comprehensive benefit for wastewater treatment and a case study [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6): 6-15 (in Chinese).
- [20] 建设部标准定额研究所. 市政工程投资估算指标(第四册 排水工程): HGZ 47—104—2007 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- Research Institute of Standards and Norms Ministry of Construction. Municipal Engineering Investment Estimation Index (Volume 4 Drainage Engineering):

- HGZ 47 - 104 - 2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008 (in Chinese).
- [21] 游宇, 车伍, 张伟, 等. 8 种园林乔木林冠对雨水截留作用的研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(9): 121 - 127.
- YOU Yu, CHE Wu, ZHANG Wei, *et al.* Effect of rainfall interception by eight species of garden arbors[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(9): 121 - 127 (in Chinese).
- [22] 刘斌, 罗全华, 常文哲, 等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 68 - 73.
- LIU Bin, LUO Quanhua, CHANG Wenzhe, *et al.* Relationship between percentage of vegetative cover and soil erosion[J]. China Water & Wastewater, 2008, 6(6): 68 - 73 (in Chinese).
- [23] 王迪生. 基于生物量计测的北京城区园林绿地净碳储量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- WANG Disheng. Studies on Net Carbon Reserves in Beijing Urban Landscape Green Based on Biomass Measurement[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010 (in Chinese).
- [24] 王帅. 海南岛不同类型森林生态系统氮储量研究[D]. 海口: 海南大学, 2015.
- WANG Shuai. Nitrogen Storage of Three Typical Forest Ecosystems in Hainan Island [D]. Haikou: Hainan University, 2015 (in Chinese).
- [25] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020 (in Chinese).
- [26] 郝晓地, Mark van Loosdrecht. 荷兰鹿特丹 DOKHAVEN 污水处理厂介绍[J]. 给水排水, 2003, 29(10): 19 - 25.
- HAO Xiaodi, VAN LOOSDRECHT Mark. DOKHAVEN wastewater treatment plant in Rotterdam [J]. Water & Wastewater Engineering, 2003, 29(10): 19 - 25 (in Chinese).
- [27] 葉山町公共下水道事業の概要. 美しい水環境を次世代へ引き継ぐ下水道[R]. 東京: 生活环境部下水道課, 2010.
- [28] KÄMPPI A. Viikinki; Helsinki's new central wastewater treatment plant [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(3): 373 - 377.
- [29] 中国水网. 斯德哥尔摩 Henriksdal 污水厂将成世界最大 MBR 污水处理厂[EB/OL]. [2021 - 01 - 16]. <http://www.h2o-china.com/news/222356.html>.
- E20 Environment Platform. Stockholm Henriksdal sewage plant will become the world's largest MBR sewage treatment plant [EB/OL]. [2021 - 01 - 16]. <http://www.h2o-china.com/news/222356.html> (in Chinese).

作者简介:郝晓地(1960 -),男,山西柳林人,博士,教授,从事市政与环境工程专业教学与科研工作,主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术。现为国际水协期刊《Water Research》区域主编(Editor)。

E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn

收稿日期: 2021 - 02 - 09

修回日期: 2021 - 02 - 17

(编辑:刘贵春)

环境就是民生,青山就是美丽,蓝天也是幸福