

高速公路服务区集中式污水处理工艺 及综合评价

马兴冠¹, 宁宇¹, 李洪波²

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省高速公路实业发展
有限责任公司, 辽宁 沈阳 110179)

摘要 目的 研究我国高速公路服务区污水处理工艺技术方面的工艺流程、处理效率, 经济方面的占地规模、运行投资、运行耗电费用, 并建立处理工艺的评价体系, 为解决高速公路服务区污水排放不规范问题提供依据. 方法 分析高速公路服务区污水处理设施建设及工艺运行状况, 对曝气式生物滤池处理工艺、厌氧水解-人工湿地处理工艺、地下土壤毛细管渗滤污水处理工艺、序批式活性污泥法处理工艺4种主要工艺从处理效果、投资成本、运行成本等方面分析评价, 对不同影响方面做权重分配. 结果 技术性指标占比42%, 经济性指标占比58%. 技术性指标对不同污染因子进行权重分配, 化学需氧量(COD)权重值为0.4, 氨氮, 总氮(TN), 总磷(TP)权重值均为0.2; 经济性指标对单位污水处理占地规模, 单位工艺运行投资费用, 运行耗电费用权重分配为0.55, 0.35, 0.10. 经综合评价, 厌氧水解-人工湿地处理工艺评分3.374为4种工艺最高得分. 结论 高速公路服务区污水处理工艺的选择应着重考虑经济性因素的影响, 现阶段采用厌氧水解-人工湿地处理工艺较适合于服务区.

关键词 高速公路服务区; 污水处理工艺; 工艺对比; 综合评价

中图分类号 X703

文献标志码 A

Comprehensive Evaluation of Centralized Sewage Treatment Technology in Expressway Service Area

MA Xingguan¹, NING Yu¹, LI Hongbo²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;
2. Liaoning Province Expressway Industrial Development Co. Ltd., Shenyang, China, 110179)

Abstract: To provide basis for solving the problem of sewage discharge in expressway service areas in China, the treatment process, treatment efficiency, construction area, operation cost and power consumption of sewage treatment technology was studied, and an evaluation system for the

收稿日期: 2019-07-07

基金项目: 国家重大专项(2018YFC1801230); 辽宁省科技厅项目(2017207002)

作者简介: 马兴冠(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事水污染控制理论及技术方面研究.

treatment technology was established. The construction and operation status of sewage treatment facilities in expressway service areas were analyzed. The four main processes of biological aerated filter process, anaerobic hydrolysis-constructed wetland process, underground soil capillary infiltration sewage process and sequencing batch activated sludge process were analyzed and evaluated in terms of treatment effect, investment cost and operation cost. The weight distribution of index was made. The technical index was accounted for 42% and the economic index 58%. The weights of COD is 0.4, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP are 0.2. The weights of economic indicators for unit sewage treatment area, unit process operation investment and operation power consumption are 0.55, 0.35 and 0.10. The process of highest score is anaerobic hydrolysis-constructed wetland treatment process and the score is 3.374. The economic factors should be considered in the selection of sewage treatment process in high-speed service area. At present, anaerobic hydrolysis-constructed wetland treatment process is more suitable for service area.

Key words: high-speed service area; sewage treatment process; process comparison; comprehensive evaluation

近年来我国高速公路建设飞速发展,高速公路服务区增设也逐渐增多。服务区的设置间隔为 40 ~ 70 km, 总量较大, 分布区域广, 具有不同的地域特点^[1]。由于服务区建设的特殊性, 产生的污废水需要采用高效的处理方式进行处理。由于自然环境、经济实力、技术条件等方面存在明显地区差异, 各地区高速公路服务区污水排放处理方式存在较大差异, 因此需要采取经济有效的方法对服务区内的污废水进行处理回收, 实现水资源有效利用, 减少服务区污水排放。徐竟成^[2]指出污水处理工艺的评价体系应包含低碳、环保、生态等理念。姬国斌^[3]通过实验得出, 人工湿地系统对 COD、BOD₅ 及氮素等有机物去除效果明显, 能够对污水进行有效处理。研究高速公路服务区集中式污水处理工艺, 结合工艺水平及运行经验, 在对污水集中式处理技术综合评价的基础上, 笔者以我国北方高速

公路服务区污水处理为例, 对比分析更加适用于服务区污水处理的工艺, 对污水处理工艺建立节能、低碳、高效、环保的综合评价体系, 为服务区内污水处理提供参考方案。

1 高速公路服务区污水特征

1.1 服务区污水水质特征

服务区污水主要由厕所污水、洗涤污水、餐饮废水 3 部分组成, 以生活污水为主, 其中卫生间产生污水占总量 80% 以上, 污水中有机物含量较高, 含有大量固体物质。主要成分: COD、SS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TS、无机盐、微生物等, 部分服务区具有汽车维修和清洗车辆功能, 污水中含有石油类污染物^[6]。依据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006) 规定的典型城镇生活污水水质特征确定服务区污水水质如表 1 所示。

表 1 高速公路服务区污水水质特征

Table 1 Characteristics of sewage quality in high-speed service area

区域水质	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{SS})$
城镇生活污水水质	20 ~ 600	3 ~ 310	6 ~ 350	0.8 ~ 20.2	10 ~ 112
服务区实测水质均值	90 ± 60	26 ± 20	43 ± 33	2.1 ± 2	30 ± 20

1.2 服务区污水处理现状

我国高速公路服务区污水排放现状如图 1 所示。

(1) 污水直排污水管网。服务区污水排放市政排污管网, 进入城市污水处理厂处理, 经处理达到排放标准后排放至水体。此类

服务区设置地点处于市政污水管网覆盖范围内或靠近城市污水处理厂^[4],占比约8%。

(2)污水运输转移处理.通过污水运输车运输到相应污水处理厂集中处理.此类服务区规模相对较小,旅客流量少,污水产量小,占比约3%。

(3)服务区建设污水处理设施.建立相应污水处理设备,采用污水处理工艺,对服务区内产生污水进行集中收集,处理达标后排入水体或者进行资源化利用.此类服务区是位于非市政污水管网覆盖范围内且污水量相对较大的高速公路服务区,占比约58%。

(4)污水未处理直接排放.一部分已建成服务区受地理位置,经济因素,人为因素影响,服务区内产生污水未经处理或者处理不达标,直接排入外部环境,给当地生态环境带来了一定的影响^[5],占比约31%。

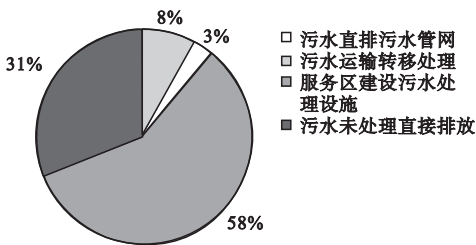


图1 高速公路服务区污水排放特点

Fig. 1 Sewage discharge characteristics in high speed service area

2 高速公路服务区污水主要处理工艺技术对比

2.1 服务区污水处理主要工艺

近几年我国已建成并投入使用的服务区污水处理工艺主要有4种(见表2)。

表2 高速公路服务区污水处理主要工艺

Table 2 Main processes of sewage treatment in expressway service area

工艺编号	工艺名称
I	曝气式生物滤池处理工艺
II	厌氧水解-人工湿地处理工艺
III	地下土壤毛细管渗滤污水处理工艺
IV	序批式活性污泥法处理工艺

2.1.1 曝气式生物滤池处理工艺

曝气式生物滤池处理工艺是服务区污水处理使用范围较广的工艺之一.其主要工艺在滤池由底部设置进水管和排泥管,中上层采用轻质填料填充,滤料上附着大量微生物.污水由滤池下层进入,然后通过滤层,污水中悬浮物质等固体颗粒被拦截在滤层中,由曝气风机供氧,被滤层中微生物氧化分解,同时污水中所含有溶解性有机物质也被分解利用,达到净水水质效果.微生物产生污泥存留在滤层中,净化后的水从上层流出^[7]。

2.1.2 厌氧水解-人工湿地处理工艺

厌氧水解-人工湿地处理工艺首先通过前期处理,通过格栅除去体积较大悬浮物质与固体物质,经过调节池进入厌氧处理池,在厌氧环境下,在相应的温度、湿度、酸碱度条件下,通过池内微生物处理作用,将污水中物质分解代谢,将处理后的上清液引入人工建造湿地环境中,使污水与污泥按照一定方向流动,利用人工模拟自然环境,通过微生物、植物、土壤等协同作用,对流经人工湿地污水进行处理^[8]。

2.1.3 地下土壤毛细管渗滤污水处理工艺

地下土壤毛细管渗滤污水处理工艺是利用人工构建土壤生态系统,通过土壤中植被根系、微生物、土壤中小动物等生命活动以及土壤系统本身的物理作用,吸附,过滤、分解污水中污染物质,达到净水的效果.污水处理过程一般包括预处理、污水输送、土壤渗滤等几部分组成,预处理设施一般采用化粪池或者水解池等^[9]。

2.1.4 序批式活性污泥法处理工艺

序批式活性污泥法处理工艺(SBR法)采用间歇式曝气,通过人工驯化培养的活性污泥对服务区污水进行处理.该工艺的特点是运行上有序性和间歇性,SBR池集污水混合,初沉池,曝气池,二次沉淀池于一体,利用活性污泥对污水进行处理,设备集成化程度高,适用于污水间歇性排放和污水量变化明显

场所,符合高速公路服务区污水排放特点^[10]。

2.2 工艺处理效果对比

对已建成并长期投入使用的服务区污水处理工艺运行状况分析,4种主要污水处理工艺对不同污染因子的处理效果存在差异,

表3 不同处理工艺处理结果对比

Table 3 Comparison of different treatment processes

工艺编号	出水质量浓度/(mg·L ⁻¹)				污染因子去除率/%			
	COD	NH ₃ -N	TN	TP	COD	NH ₃ -N	TN	TP
I	21.09	2.34	9.52	0.62	73.64	82.20	75.40	78.62
II	32.86	0.35	4.12	0.18	62.93	94.83	72.60	83.79
III	59.27	4.51	5.72	0.3	55.91	78.97	69.30	89.66
IV	28.35	1.15	5.41	0.58	64.56	96.17	81.95	80.00

从表3可以看出:①COD的去除效果.4种处理工艺对化学需氧量的处理效果存在较明显差别,曝气式生物滤池处理工艺,序批式活性污泥法处理工艺对COD的去除率较高,较其他两种工艺,好氧处理条件下更有利于对COD的去除.厌氧水解-人工湿地处理工艺通过微生物,植物根系作用,对COD的去除也较明显.②总氮的去除效果.由处理效果显示,序批式活性污泥法处理工艺,厌氧水解-人工湿地处理工艺对总氮的处理效果较好.总氮去除机理主要通过微生物在好氧条件与缺氧条件下进行去除,在好氧条件下进行硝化作用氨氮转化成NO₃-N,在缺氧条件下NO₃-N转化为游离氮,实现反硝化作用^[12].序批式活性污泥法处理工艺可以实现好氧与缺氧条件互相转换,厌氧水解-人工湿地处理工艺的人工湿地中微生物,植物根系等作用,同时加强对氮的去除.③总磷的去除效果.厌氧水解-人工湿地处理工艺、地下土壤毛细管渗滤污水处理工艺、序批式活性污泥法处理工艺对总磷去除效果较理想,生物除磷机理是微生物通过厌氧作用和好养作用将磷吸收进体内,进而形成富磷污泥,排出系统,达到除磷效果,具有人工湿地的工艺,同时又加强了对磷的吸附与去除^[13].由于曝气式生物滤池处理工艺中溶解氧浓度原因,

出水水质都可以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)规定的一级B排放标准,部分处理工艺可以达到一级A排放标准^[11].4种主要处理工艺对服务区污水处理结果如表3所示.

对磷去除率存在一定影响.④氨氮的去除效果.由处理效果及去除率得出曝气式生物滤池处理工艺、序批式活性污泥法处理工艺可以有效处理氨氮,氨氮的去除是在好氧条件下进行硝化反应,转换为NO₃-N,从而实现氮的转化.地下土壤毛细管渗滤污水处理工艺由于采用土壤根系及微生物处理方式,溶解氧的含量较低,不利于氨氮的去除^[14].厌氧水解-人工湿地处理工艺中由于污水流经湿地系统,处理效果相对较好.

2.3 工艺经济性对比

对4种污水处理工艺进行经济性对比,主要对污水日处理规模,单位污水处理占地规模,单位工艺运行投资费用,运行耗电费用等4种经济指标进行比对与分析.4种不同污水处理工艺经济性比对数据结果如表4所示.

从污水日处理规模分析,序批式活性污泥法处理工艺、地下土壤毛细管渗滤污水处理工艺相较于其他两种工艺日处理规模较大,适用于服务流量大服务区;厌氧水解-人工湿地处理工艺、曝气式生物滤池处理工艺更适用于日产污水量较少服务区.

从单位污水处理占地规模分析,厌氧水解-人工湿地处理工艺由于主要通过人工构建湿地环境,利用湿地内部植被、微生物的生命活动,及相应的物理作用对污水进行吸附,

表4 污水处理工艺经济性对比

Table 4 Economic comparison of wastewater treatment processes

工艺编号	污水日处理规模/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)		单位污水处理占地规模/ ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)		单位工艺运行投资费用/ (万元· $\text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)		运行耗电费用/ (元· m^{-3})	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
I	50~200	100	2.08~4.55	3.22	0.42~1.0	0.76	0.18~0.63	0.33
II	65~270	110	3.52~13.2	6.83	0.31~0.85	0.43	0.05~0.18	0.08
III	100~300	140	3.51~6.50	4.39	0.27~0.62	0.38	0.10~0.22	0.13
IV	70~300	120	0.80~2.36	1.33	0.50~1.52	0.63	0.15~0.45	0.25

沉降,分解等作用达到净化水质效果,湿地系统是导致占地规模增大原因^[15]。其他3种工艺相对设备集中,占地规模较少,序批式活性污泥法处理工艺设备集成化程度高,占地规模较少。

从单位工艺运行投资费用分析,曝气式生物滤池处理工艺投资较高,好氧生化池中填料的补充与维持是投资费用变化的原因。地下土壤毛细管渗滤污水处理工艺主要采用植被对污水进行处理,未添加复杂设备,所以投资费用较低^[16]。其他2种工艺需要建设相应处理设备,作为投资费用变化原因。

从运行耗电费用分析,曝气式生物滤池处理工艺与序批式活性污泥法处理工艺需要在工艺中进行曝气,需要消耗大量电能。地下土壤毛细管渗滤污水处理工艺中预处理污水需要通过泵站输送到土壤渗滤池内,通过管道输送进入渗滤沟槽内;厌氧水解-人工湿地处理工艺需要通过水泵将厌氧池内预处理水转移到人工湿地内,这两种工艺耗电量较少。

3 高速公路服务区污水处理工艺综合评价

高速公路服务区作为保障道路交通持续有效运行的辅助设施,为提供过往旅客提供休息、购物、娱乐等场所,服务区内保持干净卫生显得尤为重要。服务区污水处理工艺的选择受到自然因素与社会经济因素影响,不同地区选择服务区污水处理工艺应结合当地特点进行综合评价分析后确定^[17]。

3.1 分析与评价方法

采用设置定量评价标准,对处理工艺技术与经济性进行比较。技术性评价内容包括有机物质去除率,脱氮效果,除磷效果等;经济性评价内容包括工艺占地面积 S_1 ,运行投资费用 M_1 ,运行耗电费用 M_2 。该评价标准既能保证处理工艺效果达标,又能实现经济利益最大化^[18]。评价标准如表5、表6所示。

表5 高速公路服务区污水处理工艺技术性评价标准

Table 5 Technical evaluation criteria for wastewater treatment process in high speed service zone

评价结果/ 分	污染因子去除率/%			
	COD	NH ₃ -N	TN	TP
5	≥90	≥90	≥90	≥90
4	80~90	75~90	75~90	75~90
3	70~80	65~75	65~75	65~75
2	60~70	40~65	40~65	40~65
1	<60	<40	<40	<40

表6 高速公路服务区污水处理工艺经济性评价标准

Table 6 Economic evaluation criteria for wastewater treatment process in high speed service zone

评价结果/ 分	S_1 / ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	M_1 / (万元· $\text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	M_2 / (元· m^{-3})
	5	<2	<0.2
4	2~3	0.2~0.4	0.1~0.2
3	3~4	0.4~0.5	0.2~0.3
2	4~5	0.5~0.6	0.3~0.4
1	≥5	≥0.6	≥0.4

3.2 评价结果

高速公路服务区作为服务场所,污水处

理工艺评价中,经济性评价更为关键,运行成本,投资成本对工艺选择具有重要影响,结合各地区高速公路服务区污水处理现状及参考实际工程案例,依据层次分析法,对指标项作

两两比较遍历法,通过采用指标比较的方法,建立对应矩阵,确定一级指标权重问题^[19]. 指标内容如表7所示.

表7 综合评价指标体系及指标划分

Table 7 Comprehensive evaluation index system and index definition

一级指标	二级指标	指标含义
技术性指标	COD 去除效果	表示对有机物去除能力
	TN 去除效果	表示对总氮去除能力
	TP 去除效果	表示对总磷去除能力
	NH ₃ -N 去除效果	表示对氨氮去除能力
	工艺效率	表示处理污水能力
	抗负荷能力	工艺应对水质水量波动能力
	资源化利用	实现污水回用,污泥再利用能力
经济性指标	前期投资费用	表示建设工艺设施投资费用
	占地面积	表示工艺及先关设施的占地面积
	运行耗电量	表示工艺运行正常用电量
	药品费用及人工费用	表示维持工艺运行外加药品及人工费用
	二次污染	工艺排水、排气、排泥对环境的影响
	设备寿命及工艺先进性	工艺的可维持性及更新周期

以典型评语集{优级,良级,中级,合格,不合格}进行评定指标,分别对应分数{5,4,3,2,1},得出经济性指标与技术性指标优先级权重为0.6~0.55,次级权重值为0.4~0.45^[20].综合评价中技术性参数与经济性参数取0.42与0.58的比例进行权重分配计算.技术性指标中,由于服务区废水主要以厕所废水为主,污染因子主要为COD,其他几种污染因子占比较少,所以分配COD权重值为0.4,NH₃-N,TN,TP权重值均为0.2;经济性指标中,由于服务区多建设在远离城市中心地区,建设用土地成本较低,同时运行耗电费用作为工艺运行中较单一经济支出,占比也较少,主要经济投入在工艺建设与维护的投资,所以将“单位污水处理占地规模S₁”,“单位工艺运行投资费用M₁”,“运行耗电费用M₂”权重值分配为0.55,0.35,0.10.技术性与经济性评价指标权重值如表8所示.

表8 高速公路服务区污水处理工艺评价指标权重值
Table 8 Weight value of evaluation index for wastewater treatment process in high speed service zone

评价类别	工艺评价指标		权重
	技术性	经济性	
COD	0.4	—	0.168
NH ₃ -N	0.2	—	0.084
TN	0.2	—	0.084
TP	0.2	—	0.084
S ₁	—	0.10	0.058
M ₁	—	0.55	0.319
M ₂	—	0.35	0.203

4种处理工艺综合评价数值计算方法为

$$L_i \sum_{(j=1)}^n w_j l_{ij} \quad (1)$$

式中:L_i为第i种处理工艺综合评价值;w_j为第j种评价指标权重值;l_{ij}为第j种处理工艺第i种评价指标得分^[21].

利用式(1)计算4种污水处理工艺综合

评价结果如表9所示。由表9可知,采用不同权重值对高速公路服务区污水处理工艺的技术性与经济性进行比较,可得厌氧水解-人工湿地处理工艺整体技术性与经济性较其他

3种工艺占优势,4种工艺比较结果先后顺序为:厌氧水解-人工湿地处理工艺,地下土壤毛细管渗滤污水处理工艺,序批式活性污泥法处理工艺,曝气式生物滤池处理工艺。

表9 4种污水处理工艺综合评价表

Table 9 Comprehensive evaluation data table of four sewage treatment technologies

工艺评价指标	各工艺评价权重			
	曝气式生物滤池处理工艺	厌氧水解-人工湿地处理工艺	地下土壤毛细管渗滤污水处理工艺	序批式活性污泥法处理工艺
COD	0.504	0.336	0.168	0.336
NH ₃ -N	0.336	0.42	0.336	0.42
TN	0.336	0.252	0.252	0.336
TP	0.336	0.336	0.336	0.336
S ₁	0.232	0.058	0.116	0.29
M ₁	0.319	0.957	1.276	0.319
M ₂	0.406	1.015	0.812	0.609
综合评价结果 L _i	2.469	3.374	3.296	2.646

4 结论

(1)高速公路服务区污水集中处理工艺综合评价指标体系涵盖了处理工艺,主要污染因子,资源化利用,前期投资,运行维护,性能对比等方面,依据层次分析法进行评价,选择经济、低碳、高效的处理工艺。

(2)高速公路服务区污水集中处理工艺综合评价指标体系中经济性因素占总评价体系权重58%,占据主导地位。作为公共设施,服务区在建设中应突出高效,低碳,节能,经济等特点,实现服务区污水处理长期有效运行。

(3)以技术性与经济性作为评价方向,综合评价结果显示厌氧水解-人工湿地处理工艺评分为3.374,整体技术性与经济性较其他3种工艺占优势,厌氧水解-人工湿地处理工艺更适合应用于现阶段服务区污水处理。服务区污水主要以排泄污水为主,其中有机物质含量较高,COD浓度较高,厌氧水解-人工湿地处理工艺经过前期工艺,结合人工湿地能够对COD,NH₃-N,TN等进行有效去除,同时投资维护较低,4种工艺对比厌氧水解-人工湿地处理工艺更适合高速公路服务区污水处理工艺的选择。

(4)高速公路服务区污水集中处理工艺综合评价指标体系中引入低碳、节能、环保等理念,符合我国技术发展要求,实现资源化利用目标,为建设发展高速公路服务区提供参考。

参考文献

- [1] 梁丽萍,张林.江苏省高速公路服务区污水处理现状及解决对策[J].中国给水排水,2017,33(4):20-25.
(LIANG Liping, ZHANG Lin. Problems and solutions for sewage treatment in expressway service areas in Jiangsu province [J]. China water supply and drainage, 2017, 33(4): 20-25.)
- [2] 徐竟成,阎轶婧,李光明,等.城镇污水处理厂工艺的低碳、生态综合评价方法[J].中国给水排水,2012,28(17):129-133.
(XU Jingcheng, YAN Yijing, LI Guangming, et al. Assessment method of low-carbon and ecological processes in municipal wastewater treatment plants [J]. China water supply and drainage, 2012, 28(17): 129-133.)
- [3] 姬国斌,张楠.人工湿地处理高速公路服务区污水效能[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(5):176-181.
(JI Guobin, ZHANG Nan. Ecological treatment process of sewage in expressway service area [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2018, 38(5): 176-181.)
- [4] 孙宁.高速公路服务区污水回收设计及处理工艺[J].工程与建设,2008(6):799-800.
(SUN Ning. Design of sewage recycling and treatment process in service area of highway [J]. Engineering and construction, 2008(6): 799-800.)
- [5] 徐荣乐,韩彪,于嵘,等.广西农村生活污水集

- 中处理工艺综合评价[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(2): 354-359.
(XU Rongle, HAN Biao, YU Rong, et al. Comprehensive evaluation of rural sewage treatment technology in Guangxi [J]. Journal of Guilin university of technology, 2017, 37(2): 354-359.)
- [6] 徐蓓青. 高速公路服务区污水处理工艺的比较[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(9): 213-215.
(XU Beiqing. Comparisons of sewage treatment processes in expressway service areas [J]. Highway transportation science and technology (applied technology edition), 2016, 12(9): 213-215.)
- [7] 熊仁, 谢敏, 冯传禄, 等. 厌氧+跌水曝气+人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 327-331.
(XIONG Ren, XIE Min, FENG Chuanlu, et al. Rural domestic sewage treatment by a combined process of anaerobic tank, drop-aeration and constructed wetland [J]. Journal of environmental engineering, 2019, 13(2): 327-331.)
- [8] 邓仁健, 任伯帜, 陈军. 小型污水厂工艺选择的多层次模糊灰关联聚类分析[J]. 中国给水排水, 2010, 26(11): 64-67.
(DENG Renjian, REN Bozhi, CHEN Jun. Selection of technology for small sewage treatment plant based on multi-level fuzzy grey relational clustering analysis [J]. China water supply and drainage, 2010, 26(11): 64-67.)
- [9] 史志翔, 韩超. 高速公路服务区生活污水处理工艺与技术研究[J]. 中国高新科技, 2018(2): 85-87.
(SHI Zhixiang, HAN Chao. Domestic sewage treatment process and technology in expressway service area [J]. China's high-tech, 2018(2): 85-87.)
- [10] 杨斌. 高速公路服务区适用污水处理工艺与技术探讨[J]. 公路交通技术, 2008(2): 133-136.
(YANG Bin. Discussion on applicable sewage treatment process & technology for expressway service zone [J]. Highway traffic technology, 2008(2): 133-136.)
- [11] KHAZNADAR M, VOGIATZAKIS I N, GRIFFITHS G H. Land degradation and vegetation distribution in Chott El Beida wetland, Algeria [J]. Journal of arid environments, 1973(3): 369-377.
- [12] WILLARD D A, PHILLIPS T L, LESNIKOWSKA A D, et al. Paleocology of the late pennsylvanian-age calhoun coal bed and implications for long-term dynamics of wetland ecosystems [J]. International journal of coal geology, 1969(1/2), 21-54.
- [13] 彭永臻, 王晓莲, 王淑莹. A/O脱氮工艺影响因素及其控制策略的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005(8): 1053-1057.
(PENG Yongzhen, WANG Xiaolian, WANG Shuying. Study on influence factors and control strategies of A/O nitrogen removal process [J]. Journal of Harbin university of technology, 2005(8): 1053-1057.)
- [14] 王磊. 城市污水的生物脱氮除磷工艺[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(12): 225.
(WANG Lei. Analysis of biological wastewater nitrogen and phosphorus removal process [J]. Chemical design communication, 2018, 44(12): 225.)
- [15] 陈静, 杜辉, 孙强, 等. 高速公路附属区生活污水处理设施的管理[J]. 交通环保, 2004(6): 46-47.
(CHEN Jing, DU Hui, SUN Qiang, et al. Management of domestic wastewater treatment facilities in service areas/stations of expressway [J]. Traffic environmental protection, 2004(6): 46-47.)
- [16] 沈丰菊, 张克强, 李军幸, 等. 基于模糊积分模型的农村生活污水处理模式综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 272-280.
(SHEN Fengju, ZHANG Keqiang, LI Junxing, et al. Evaluation method for engineering technology of rural domestic sewage treatment based on fuzzy integral model [J]. Journal of agricultural engineering, 2014, 30(15): 272-280.)
- [17] 郝前进, 张莘. 农村生活污水治理示范工程的成本有效性研究: 以上海和苏南地区为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(1): 108-111.
(HAO Qianjin, ZHANG Ping. Cost effectiveness study on demonstration project of rural domestic sewage treatment: taking Shanghai and southern Jiangsu as examples [J]. Population, resources and environment of China, 2010, 20(1): 108-111.)
- [18] 徐洪斌, 李远, 李力军, 等. 高速服务区污水处理工程设计及运行效果[J]. 水处理技术, 2017, 43(8): 127-129.
(XU Hongbin, LI Yuan, LI Lijun, et al. Design and operation effect of wastewater treatment project for expressway service area [J]. Water treatment technology, 2017, 43(8): 127-129.)
- [19] DE BRUIN L, DE KREUK M, VAN DER ROEST H F, et al. Aerobic granular sludge technology: an alternative to activated sludge [J]. Water science and technology, 2004, 49(11/12): 1-7.
- [20] DE BRUIN L, VAN DER ROEST H F, DE KREUK M, et al. Promising results pilot research aerobic granular sludge technology at WWTP Ede [J]. IWA publishing, 2005, 25(3): 135-142.
- [21] UGGETTI E, GARCÍA J, LIND S E, et al. Quantification of greenhouse gas emissions from sludge treatment wetlands [J]. Water research, 2012, 46(6): 1755-1762.

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)