

对某城市污水处理厂技术性能的综合评价

邢丽贞^{1,2}, 寇知辉¹, 吴毅晖³, 欧丽英¹, 郭玉梅³, 郭 昉², 吴光学⁴

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省绿色建筑协同创新中心, 山东 济南 250101; 3. 昆明滇池水务股份有限公司, 云南 昆明 650228; 4. 清华大学深圳研究生院 深圳市环境微生物利用与安全控制重点实验室, 广东 深圳 518055)

摘 要: 采用 TPS 法、DPF 法和 AHP 法从不同角度对昆明市某污水处理厂技术性能进行了综合评价,并对三种评价方法进行了比较分析。TPS 统计评价侧重于单一指标分析,评价指标包括 COD、BOD₅、TN、TP 和 NH₄⁺-N 等的去除率、达标率、稳定性和去除负荷等,评价结果为出水 BOD₅、TP、NH₄⁺-N 稳定性差,但达标率都高于 95%,出水 TN 平均值接近限值,达标率小于 95%;DPF 法综合评价偏重于整体性能评价,将各污染物浓度转换为 COD 当量,评价结果为进水污染物浓度低于设计标准,污染物去除负荷低于设计负荷,污染物去除率基本达到设计要求;AHP 法综合评价则兼顾了单一指标和整体性能,建立包括去除率、达标率、稳定性和去除负荷等的评价指标体系,带有主观性,评价结果为运行状态总体良好,旱季略好于雨季,但 TN 达标率低于 95%。结合 TPS 法和 DPF 法分析,TN 应作为未来运行管理中重点控制的技术指标。

关键词: 城市污水处理厂; 技术性能; 综合评价; 概率统计法; 污染物排放费用计算方法; 层次分析法

中图分类号: X703 文献标识码: C 文章编号: 1000-4602(2017)03-0087-06

Comprehensive Evaluation of Technical Performance of a Wastewater Treatment Plant

XING Li-zhen^{1,2}, KOU Zhi-hui¹, WU Yi-hui³, OU Li-ying¹, GUO Yu-mei³,
GUO Fang², WU Guang-xue⁴

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Green Building Collaborative Innovation Center of Shandong Province, Jinan 250101, China; 3. Kunming Dianchi Water Group Co. Ltd., Kunming 650228, China; 4. Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control of Shenzhen, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The technical performance of a wastewater treatment plant in Kunming was evaluated by methods of TPS, DPF and AHP from different perspectives, and based on the evaluation results, the three evaluation methods were compared. TPS statistical evaluation method focused on the single indicator analysis. The indicators comprised the removal rate, standard compliance rate, stability and removal load

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07302002); 昆明市科技项目(2014-04-A-S-02-2126); 山东省绿色建筑协同创新中心团队建设项目(LSXT201508)

通信作者: 吴光学 E-mail: wu.guangxue@sz.tsinghua.edu.cn

of pollutants COD, BOD₅, TN, TP and NH₄⁺ - N. The evaluation results showed that the stability of effluent NH₄⁺ - N, BOD₅ and TP was poor, but their standard compliance rates were more than 95%. The average effluent TN concentration was close to the limits, with the standard compliance rate of less than 95%. DPF comprehensive evaluation method emphasized on the overall performance evaluation and converted concentrations of each pollutant into COD equivalents. The evaluation results showed that the influent concentrations of pollutants were below the design standards, the removal load of pollutants was less than the design load, and the removal rates of pollutants basically met the design requirements. AHP comprehensive evaluation method took both the single indicator and overall performance into account by establishing an evaluation index system of removal rate, standard compliance rate, stability and removal load, with subjectivity. The evaluation results showed that the operating state was generally good, and the dry season was slightly better than the rainy season, but the standard compliance rate of TN was less than 95%. Through all the evaluation methods, TN should be focused on in future system operation management.

Key words: wastewater treatment plant; technical performance; comprehensive evaluation; probabilistic statistical method; pollutant discharge fee calculation method; analytic hierarchy process (AHP)

随着环保理念的更新,城市污水厂的技术性能评价逐渐由单一指标评价向多目标综合评价转变。以往研究和污水厂运行大多以污染物去除率和达标率评估城市污水厂的整体运行性能^[1]。然而,污水处理厂进水水质、水量随时都在变化,出水水质及其稳定性也可能发生相应变化,所以即使去除率相同,所表征的运行性能也可能完全不同^[2]。因此,在污水厂运行管理中,为获得稳定的出水水质,稳定性也是衡量污水厂技术性能的重要指标^[3]。另外,针对现今污水厂大多存在进水碳源负荷偏低等特征^[4],把污水厂构筑物的使用效率纳入污水厂技术性能评价指标体系也具有重要意义。

笔者针对污水处理厂技术性能,提出包括去除率、达标率、稳定性和去除负荷的技术性能评价指标体系,利用概率统计法(TPS)、污染物排放费用计算法(DPF)和层次分析法(AHP)对昆明某污水处理厂的技术性能进行系统评价,以期为污水处理厂运行和设计提供可行评价方法和参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

昆明市某污水处理厂采用 A²/O + 化学除磷 + 紫外消毒工艺,处理水量为 30 × 10⁴ m³/d,出水排放标准为《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,污水达标排入滇池外海。对该污水处理厂技术性能评价所采用数据主要

为 2013 年全年污水处理厂实际运行监测数据,各指标监测总数为 365 个。

1.2 评价方法及其评价指标

1.2.1 TPS 法

TPS 法是目前数据统计较为简洁有效的方法,可以同时体现数据特殊值和变化趋势。统计指标包括最小值、最大值、算术平均值、标准偏差、变异系数(COV)、TPS - 3.84%、TPS - 50%、TPS - 95%、TPS - 3.84%/50% 和 TPS - 95%/50%。其中,COV 表示数据离散性,可有效消除测度和量纲的影响;TPS - 3.84%、TPS - 50% 和 TPS - 95% 分别代表 14 d、中间水平(50%)和 95% 保证率条件下的指标值^[5]。COV、TPS - 3.84%/50% 和 TPS - 95%/50% 的变化范围具有一致性,可用于评价水质稳定性。评价指标包括 COD、BOD₅、TN、TP 和 NH₄⁺ - N 等指标的去除率、达标率、稳定性和去除负荷。

1.2.2 DPF 法

采用污染物 DPF 法对进、出水水质进行归一化处理。其中,COD、BOD₅、SS、TN 和 TP 的 DPF 权重系数分别采用 1、2、2、20 和 100^[6],将各污染物浓度转换为 COD 当量(COD_{eq}),对城市污水处理厂技术性能进行综合评价。

1.2.3 AHP 法

以污水处理厂技术性能综合评价作为总目标,建立包括去除率、达标率、稳定性和去除负荷等四项

技术指标的 AHP 评价指标体系,并结合关键污染物指标建立综合评价树状图(见图1)。

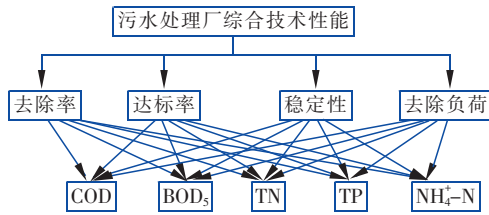


图1 污水处理厂技术性能综合评价示意

Fig.1 Schematic diagram of comprehensive evaluation of technical performance of wastewater treatment plant

由于各项指标对表征污水处理厂技术效益的贡献程度不同,因此在进行综合评价前需要确定各评价指标的权重。

在污水处理厂设计和管理中,达标率是最重要的运行目标^[7]。其次,污水处理厂稳定运行是保障污染物有效去除的关键^[8],也是考虑的重要方面。因此,在 AHP 法评价计算权重过程中,优先考虑达标率和稳定性,然后是去除率和去除负荷。虽然去除率和去除负荷之间存在一定的相关关系,但比较而言,去除负荷的高低往往不能确保良好的出水水质^[2],因此去除率的权重较大。

采用九标度 AHP 方法确定各指标权重^[9],结果如下:评价去除率时,COD、BOD₅、TN、TP、NH₄⁺-N 的权重分别取 0.008 8、0.004 6、0.036 2、0.036 2、0.036 2;评价达标率时,COD、BOD₅、TN、TP、NH₄⁺-N 的权重分别取 0.215 2、0.020 1、0.053 7、0.053 7、0.215 2;在评价稳定性时,COD、BOD₅、TN、TP、NH₄⁺-N 的权重分别取 0.101 6、0.009 5、0.025 4、0.025 4、0.010 16;在评价去除负荷时,COD、BOD₅、TN、TP、NH₄⁺-N 的权重分别取 0.016 9、0.002 1、0.016 9、0.004 1、0.016 9。

所有技术指标均为定量指标,可有效表征污水处理厂的技术性能。各指标权重确定后,采用十分制来计算各项指标在每个等级分项内的分值。各指标分值评价标准如表1所示。根据文献[10]和该污水处理厂设计标准,把去除率、去除负荷、达标率、稳定性定义为较低、低、适中、较高、高五个等级。其中,在达标率超过 95% 的条件下,认定稳定性等级为高,否则以变异系数(COV)作为稳定性指标等级判别的标准。

根据以上确定的各指标权重和评分标准,可通

过下式^[11]计算得到污水处理厂综合效益得分。

$$S = \sum (W_i \times R_i) \quad (1)$$

式中 S ——待评价污水处理厂综合效益最终得分

W_i ——第 i 项指标综合权重

R_i ——第 i 项指标的评分结果

根据 S 值的大小,最后将污水处理厂运行技术性能划分为 5 个等级,各等级评分的变化范围如下: {很差;较差;一般;良好;优秀} = {0 ~ 59; 60 ~ 69; 70 ~ 79; 80 ~ 89; 90 ~ 100}, 以此得到城市污水处理厂的综合评价结果。

表1 各污染物指标打分标准

Tab.1 Scoring standard for pollutant indicators

项 目		分值				
		0 ~ 2	2 ~ 4	4 ~ 6	6 ~ 8	8 ~ 10
去除率/%	COD	< 70	70 ~ 75	75 ~ 80	80 ~ 85	> 85
	TP	< 80	80 ~ 85	85 ~ 90	90 ~ 95	> 95
	TN	< 45	45 ~ 50	50 ~ 55	55 ~ 60	> 60
	NH ₄ ⁺ -N	< 60	60 ~ 65	65 ~ 70	70 ~ 75	> 75
	BOD ₅	< 80	80 ~ 85	85 ~ 90	90 ~ 95	> 95
达标率/%	COD	< 80	80 ~ 85	85 ~ 90	90 ~ 95	95 ~ 100
	TP					
	TN					
	NH ₄ ⁺ -N					
	BOD ₅					
去除负荷/(t·d ⁻¹)	COD	< 90	90 ~ 95	95 ~ 100	100 ~ 105	> 105
	TP	< 1.6	1.6 ~ 1.9	1.9 ~ 2.2	2.2 ~ 2.5	> 2.5
	TN	< 6	6 ~ 6.5	6.5 ~ 7	7 ~ 7.5	> 7.5
	NH ₄ ⁺ -N	< 3.6	3.6 ~ 3.9	3.9 ~ 4.2	4.2 ~ 4.5	> 4.5
	BOD ₅	< 40	40 ~ 45	45 ~ 50	50 ~ 55	> 55
稳定性	COD	达标率 < 95%, COV > 0.8	达标率 < 95%, COV = 0.6 ~ 0.8	达标率 < 95%, COV = 0.4 ~ 0.6	达标率 < 95%, COV = 0.2 ~ 0.4	达标率 > 95%, COV = 0 ~ 0.2
	TP		达标率 < 95%, COV = 0.6 ~ 0.8	达标率 < 95%, COV = 0.4 ~ 0.6	达标率 < 95%, COV = 0.2 ~ 0.4	达标率 > 95%, COV = 0 ~ 0.2
	TN		达标率 < 95%, COV = 0.6 ~ 0.8	达标率 < 95%, COV = 0.4 ~ 0.6	达标率 < 95%, COV = 0.2 ~ 0.4	达标率 > 95%, COV = 0 ~ 0.2
	NH ₄ ⁺ -N		达标率 < 95%, COV = 0.6 ~ 0.8	达标率 < 95%, COV = 0.4 ~ 0.6	达标率 < 95%, COV = 0.2 ~ 0.4	达标率 > 95%, COV = 0 ~ 0.2
	BOD ₅		达标率 < 95%, COV = 0.6 ~ 0.8	达标率 < 95%, COV = 0.4 ~ 0.6	达标率 < 95%, COV = 0.2 ~ 0.4	达标率 > 95%, COV = 0 ~ 0.2

2 结果与讨论

2.1 TPS 法评价结果

进、出水水质与水量概率分析如表2所示。整体来看,进水水量和设计处理水量吻合,波动较小。该污水处理厂进水水量主要受市政排水管网和污水处理厂进水泵房的联合控制,所以受季节等因素影响较小。进水 BOD₅、COD、SS、TN 和 TP 浓度均存在超过设计标准现象,变化波动范围较大,这可能是由水质的季节性变化导致的。进水 NH₄⁺-N 浓度与设计值相吻合,波动较小。

虽然进水 NH₄⁺-N 波动较小,但出水 NH₄⁺-N

浓度最不稳定,去除负荷均值为 8.3 t/d,高于设计预期;95% 保证率下的出水浓度为 1.5 mg/L,大大低于标准限值;结合进水水质分析,说明系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 有很好的去除效果,并且达标率超过 95%。出水 TN 浓度较为稳定,但接近标准限值,有超标可能;95% 保证率下的出水 TN 为 15.5 mg/L,

超过了标准限值;去除负荷均值为 6.5 t/d,大大超过设计值。因此,采用单一指标评价时,并不能实现对技术性能的全面客观评价。结合进水水质分析,系统仍然达到了良好的去除效果,但进水水质波动影响了出水指标稳定性。因此,TN 是未来达标控制的主要指标。

表2 进、出水水量与水质的概率分析

Tab.2 Probability analysis of influent and effluent quality and quantity

项 目	水量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	$\text{BOD}_5/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		$\text{COD}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		$\text{SS}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		$\text{TN}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		$\text{TP}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		$\text{NH}_4^+ - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	
		进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
最大值	39.7	673	4.0	1 320	34	1 550	16	112.0	18.9	24.0	0.7	36.3	9.9
最小值	17.6	56	0.0	102	6	82	4	13.1	6.0	1.8	0.1	4.6	0.1
平均值	30.8	198	1.0	337	13	333	7	39.4	11.8	6.4	0.2	21.9	0.6
TPS-3.84%	24.7	79	0.5	138	10	102.0	4.0	20.2	7.6	2.7	0.1	12.7	0.1
TPS-50%	30.9	178	0.9	295	13	285.0	6.0	33.2	12.0	5.5	0.2	22.1	0.3
TPS-95%	35.7	382	1.9	627	18	755.0	9.1	73.5	15.5	12.6	0.4	30	1.5

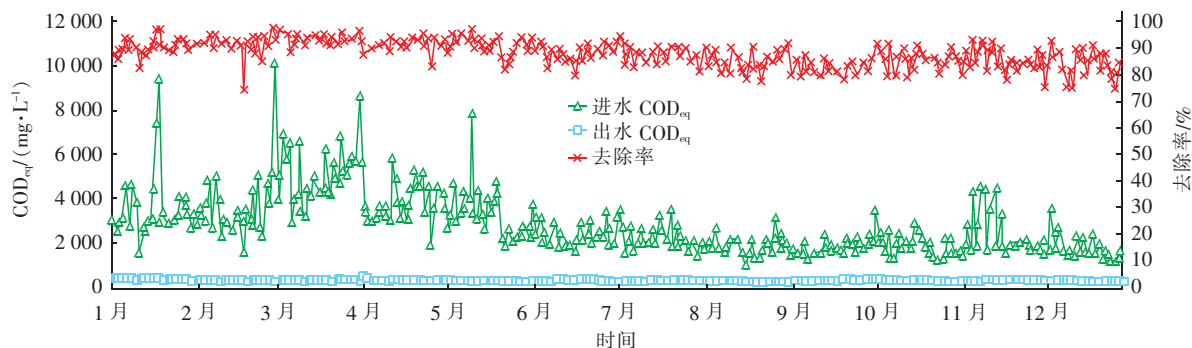
注: 上述各项对应的标准差分别为 3.2、99、0.5、172、3、216、8、1.8、17.4、2.3、3.4、0.1、5.0、1.0;对应的 COV 分别为 0.1、0.5、0.5、0.5、0.2、0.7、0.3、0.4、0.2、0.5、0.5、0.2、1.7;对应的 TPS-3.84%/50% 分别为 0.80、0.45、0.56、0.47、0.74、0.36、0.67、0.61、0.63、0.48、0.43、0.58、0.25;对应的 TPS-95%/50% 分别为 1.15、2.15、2.11、2.13、1.40、2.65、1.51、2.21、1.29、2.28、2.23、1.36、4.69。

出水 COD 和 SS 浓度变化不大,95% 保证率下出水浓度分别为 18 和 9.1 mg/L,均低于标准限值;去除负荷分别为 97.4 和 97.9 t/d,小于设计预期;结合进水水质分析,系统去除率达到预期,并有一定的抗冲击负荷能力。出水 BOD_5 、TP 浓度存在一定波动,但 95% 保证率下的出水浓度分别为 1.9、0.4

mg/L,并没有超过标准限值;去除负荷分别为 59.5 和 1.8 t/d,与设计值相符。综上可知,虽然进水污染物浓度波动对出水水质有一定影响,但在一定冲击负荷范围内,系统仍具有很高的去除率。

2.2 DPF 法评价

进、出水 COD_{eq} 和去除率如图 2 所示。

图2 进、出水 COD_{eq} 及去除率变化Fig.2 Changes of influent and effluent COD_{eq} and removal rate

进水 COD_{eq} 低于设计污染物当量浓度,变化幅度较大。从图 2 可以看出波动主要发生在 2 月—6 月。2 月—4 月为旱季,进水 COD_{eq} 呈现上升现象,并达到当年最大值;4 月—6 月为雨季,雨水的稀释作用降低了进水污染物浓度。出水 COD_{eq} 变化幅度较小,出水指标整体稳定。然而,去除负荷平均值为

661.1 t COD_{eq} /d,低于设计预期,波动较大。结合进水 COD_{eq} 分析,这主要是由于进水污染物负荷平均值低于设计负荷,且波动较大造成的。平均去除率为 86%,总体达到设计要求,变异系数 COV 为 0.06,较为稳定,说明该工艺具有很好的抗冲击负荷能力。

2.3 AHP 法评价结果

采用 AHP 法对污水处理厂技术性能进行综合评价,各指标的特征化结果及评分如表 3 所示。

表 3 各指标评分明细

Tab.3 Score detail for each index

项 目		雨季		旱季		十分制权重
		数值	评分	数值	评分	
去除率	COD	94.54%	10	95.95%	10	0.088
	TP	95.73%	10	96.52%	10	0.362
	TN	62.97%	10	69.87%	10	0.362
	NH ₄ ⁺ - N	96.64%	10	98.15%	10	0.362
	BOD ₅	99.36%	10	99.41%	10	0.046
达标率	COD	100%	10	100%	10	2.152
	TP	98.13%	10	97.26%	9	0.537
	TN	93.93%	7	90.41%	6	0.537
	NH ₄ ⁺ - N	98.60%	10	100%	10	2.152
	BOD ₅	100%	10	100%	10	0.201
去除负荷	COD	84.54 t/d	1	116.21 t/d	10	0.169
	TP	1.65 t/d	2	2.12 t/d	6	0.041
	TN	6.76 t/d	5	10.45 t/d	10	0.169
	NH ₄ ⁺ - N	6.38 t/d	10	6.63 t/d	10	0.169
	BOD ₅	53.09 t/d	7	69.03 t/d	10	0.021
稳定性 (达标率, COV)	COD	100%, 0.2	10	100%, 0.23	10	1.016
	TP	98%, 0.52	10	97%, 0.55	10	0.254
	TN	93%, 0.21	8	90%, 0.18	10	0.254
	NH ₄ ⁺ - N	98%, 1.83	10	100%, 0.73	10	1.016
	BOD ₅	100%, 0.4	10	100%, 0.54	10	0.095

通过加权 AHP 综合评价,计算得到雨季和旱季该污水厂的最终评价得分分别为 95.2 和 96.7,说明污水处理厂运行状态总体良好。该污水处理厂在达标率和去除率两项指标中均表现出优异的运行性能。其中去除率指标得分均为 12.2,说明该系统在雨季和旱季对污染物都有很高的去除效率。达标率得分最高,分别为 54.2 和 53.1,各项关键污染物指标均取得了很高的达标率。相对而言,TN 达标率略低,分别为 93.9% 和 90.4%,均低于 95%。结合进水水质分析,BOD₅/TN 值 < 4 的概率为 28%,仍存在碳源不足的问题,这可能会对反硝化脱氮有不利影响。雨季进水污染物浓度较低,达标率稍高于旱季。稳定性指标的得分相近,分别为 25.8 和 25.9,可以看出出水水质整体稳定性较好。其中,虽然出水 NH₄⁺ - N 有很高的达标率,但离散程度较大,雨季和旱季变异系数分别为 1.83 和 0.73,雨季离散程度明显大于旱季。结合 TN 达标率分析,雨季进水有机物含量和组成的变化有可能造成了反硝化与硝化

反应不均衡现象^[12]。去除负荷权重最小,得分最低,分别为 2.9 和 5.5,雨季得分明显低于旱季。

3 结论

通过引入去除率、达标率、稳定性和去除负荷四个技术指标建立了相应评价指标体系,采用 TPS 法、DPF 法和 AHP 法从不同角度对昆明某污水处理厂进行技术性能评价,得到如下结论:

① TPS 法分析结果显示处理水量较为稳定,与设计负荷相吻合。除 NH₄⁺ - N 以外,进水污染物浓度波动均较大。出水 NH₄⁺ - N、BOD₅、TP 稳定性差,但达标率都大于 95%,其他关键污染物浓度波动不大。出水 TN 均值接近限值,达标率 < 95%。

② DPF 法综合评价从整体上说明了进水 COD_{eq} 波动较大,整体低于设计标准,去除负荷低于设计负荷,但出水 COD_{eq} 较为稳定,去除率基本达到设计要求。

③ 在 AHP 法综合评价中,该污水厂各项技术指标均表现了良好的技术性能,运行状态总体良好,旱季略好于雨季。结合 TPS 法和 DPF 法分析,TN 应作为未来运行管理中重点控制的技术指标。

④ TPS 法侧重于单一指标分析,不能体现污水处理厂的整体技术性能。基于 DPF 权重分布的综合评价虽然实现了污水处理厂的整体性能评价,但对各单一指标,特别是达标率的分析不够全面,很难反馈到实际工程优化调控中。基于 AHP 法综合评价,兼顾了单一技术指标和整体技术性能,但结果有一定主观性。因此,单一指标或单一方法均不能从整体上实现对城市污水处理厂技术性能的客观评价,需结合不同方法和工艺指标进行全面评价。

参考文献:

- [1] Kumar P R, Pinto L B, Somashekar R K. Assessment of the efficiency of sewage treatment plants: a comparative study between Nagasandra and Mailasandra sewage treatment plants[J]. Kathmandu University J Sci Eng Technol, 2010, 6(2): 115 - 125.
- [2] Lorenzo-Yago Y, Vazquez-Rowe I, Chenel S, et al. Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA + DEA method[J]. Water Res, 2015, 68: 651 - 666.
- [3] Guerreroa J, Guisasaola A, Comas J, et al. Multi-criteria selection of optimum WWTP control setpoints based on microbiology-related failures, effluent quality and operating costs[J]. Chem Eng J, 2012, 188: 23 - 29.

- [4] Newcomer T A, Kaushal S S, Mayer P M, *et al.* Influence of natural and novel organic carbon sources on denitrification in forest, degraded urban, and restored streams [J]. *Ecological Society of America*, 2012, 82(4): 449 – 466.
- [5] Bott C B, Parker D S, Jimenez J, *et al.* WEF/WERF study of BNR plants achieving very low N and P limits: evaluation of technology performance and process reliability [J]. *Water Sci Technol*, 2012, 65(5): 808 – 814.
- [6] Copp J B, Spanjers H, Vanrolleghem P A. *Respirometry in Control of the Activated Sludge Process: Benchmarking Control Strategies* [M]. London: IWA Publishing, 2002.
- [7] Blake D J, Payton A L. Balancing design objectives: Analyzing new data on voting rules in intergovernmental organizations [J]. *The Review of International Organizations*, 2015, 10(3): 377 – 402.
- [8] Tadkaew N, Hai I F, McDonald A J, *et al.* Removal of trace organics by MBR treatment: The role of molecular properties [J]. *Water Res*, 2011, 45(8): 2439 – 2451.
- [9] Garcia-Cascales M S, Lamata M T. Selection of a cleaning system for engine maintenance based on the analytic hierarchy process [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2009, 56(4): 1442 – 1451.
- [10] Metcalf & Eddy. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse* (4th ed) [M]. London: McGraw-Hill,

2004.

- [11] 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, 37(2): 84 – 90.
- [12] Pochana K, Keller J. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND) [J]. *Water Sci Technol*, 1999, 39(6): 61 – 68.



作者简介: 邢丽贞 (1966 –), 女, 山东滨州人, 博士, 教授, 研究方向为水处理理论与技术。

E-mail: xlz@sdjzu.edu.cn

收稿日期: 2016 – 07 – 12

(上接第86页)

sewage sludge stabilized by fly ash on the growth of Manilagrass and transfer of heavy metals [J]. *J Hazard Mater*, 2012, 217/218(6): 58 – 66.

- [11] 边靖, 王艳芳, 赫俊国, 等. 微波 – 碱改性粉煤灰钝化贮存污泥中 Cu、Zn 的研究 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(13): 91 – 95.
- [12] 马闯, 郭静, 张宏忠, 等. 河南省城市污泥土地利用潜力研究 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(1): 71 – 73.
- [13] 莫测辉, 吴启堂, 蔡全英, 等. 论城市污泥农用资源化与可持续发展 [J]. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 157 – 160.
- [14] 陈同斌, 黄启飞, 高定, 等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势 [J]. *环境科学学报*, 2003, 23(15): 561 – 569.
- [15] 李敏, 宋兴伟, 李超. 污泥重金属潜在生态风险评价技术分析 [J]. *中国资源综合利用*, 2014, 32(11): 44 – 47.



作者简介: 杨长明 (1973 –), 男, 安徽巢湖人, 博士, 副教授, 主要研究方向为污泥污染风险评价与资源化利用。

E-mail: cmyang@tongji.edu.cn

收稿日期: 2016 – 08 – 12