

污水处理厂脱氮除磷潜力分析评价体系的应用

姚杰¹, 裘湛¹, 安莹², 蒋玲燕¹, 陈广¹, 周振²

(1. 上海城投污水处理有限公司, 上海 201203; 2. 上海电力学院 环境与化学工程学院, 上海 200090)

摘要: 脱氮除磷的碳源需求分析是污水处理厂升级改造难度评估和工艺对策设计的关键。介绍了一种在综合考虑脱氮和除磷碳源需求的基础上, 同步评估污水处理厂脱氮除磷难度(DNR)的方法, 并采用上海市19座城镇污水处理厂的实际运行数据对该方法进行可靠性分析与应用研究。统计分析结果表明, DNR指数与出水TN和TP浓度在0.01水平上显著正相关, 其相关系数明显高于碳氮比和碳磷比。根据DNR指数的分级结果, 一级A标准下脱氮除磷难度较高、中等和较低的污水处理厂分别有3、11和5座, 且大部分污水处理厂碳源需求中脱氮需求占比更高。DNR指数能够科学客观地反映污水处理厂的脱氮除磷难度, 并能进一步应用于污水处理厂的分级管理、不同排放标准下的碳源供给分析和运行优化中。

关键词: 污水处理厂; 脱氮除磷; 碳源; 难度评估; 生物处理

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0079-06

Application of Nitrogen and Phosphorus Removal Potential Analysis and Evaluation System in Wastewater Treatment Plants

YAO Jie¹, QIU Zhan¹, AN Ying², JIANG Ling-yan¹, CHEN Guang¹, ZHOU Zhen²

(1. Shanghai Chengtong Wastewater Treatment Co. Ltd., Shanghai 201203, China; 2. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Analysis on carbon source requirement of nitrogen and phosphorus removal is the key to evaluate the upgrading difficulty and technological countermeasures design of wastewater treatment plants (WWTPs). A simultaneous evaluation method for difficulty of nutrient removal (DNR) was introduced based on comprehensive consideration of carbon source requirements of nitrogen and phosphorus removal, and the reliability and application of this method were investigated by using the actual operation data of 19 WWTPs in Shanghai City. The statistical analysis results showed that the DNR index had a significant positive correlation ($P < 0.01$) with effluent total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) concentrations, and the correlation coefficient was significantly higher than that of C/N and C/P ratios. According to the classification results of DNR index, the number of WWTPs with high, medium and low DNR level was 3, 11 and 5 under the first class A standard, respectively. For most WWTPs, the proportion of carbon source requirement for nitrogen removal was higher. DNR index could scientifically and objectively reflect the difficulty of nitrogen and phosphorus removal in WWTPs, and it could be further applied in

classification management of WWTPs and carbon source supply analysis and operation optimization under different discharge standards.

Key words: wastewater treatment plant; nitrogen and phosphorus removal; carbon source; difficulty evaluation; biological treatment

2015年4月,国务院印发的《水污染防治行动计划》明确提出,对水环境质量存在显著影响的总氮、总磷等污染物实施总量控制。根据该要求,城镇污水处理厂的升级改造和新建均必须满足脱氮除磷的要求。污水处理厂通常采用生化处理技术利用反硝化菌在缺氧条件下将硝酸盐还原为气态氮实现脱氮,利用聚磷菌的超量吸磷能力实现磷在污泥中的富集并通过剩余污泥排放除磷^[1]。由于污水的反硝化脱氮和聚磷菌的厌氧释磷过程均需要碳源,因此污水中的碳源供给就成为脱氮除磷难度评价的重要指标^[2,3]。

目前常用的衡量污水碳源供给能力的指标是碳氮比和碳磷比。在生物脱氮工艺中,由于反硝化过程的碳源需求,通常要求 BOD_5 与凯氏氮(TKN)的比值 $BOD_5/TKN > 4$,由于污水处理厂的进水硝酸盐和亚硝酸盐浓度较低,也可要求 $BOD_5/TN > 3.8$ 。进水中过低的碳氮比会限制脱氮效率^[4],并由于回流液中存在硝酸盐和亚硝酸盐而干扰厌氧释磷过程^[5,6]。而就生物除磷工艺而言,厌氧释磷过程需要易生物降解碳源合成聚 β -羟基烷酸^[7],通常要求污水中的 $BOD_5/TP > 17$ 。因此,许多研究人员均采用碳氮比和碳磷比评估污水处理工艺的脱氮除磷潜力^[8-10]。

由于污水脱氮与除磷之间存在碳源竞争关系^[11],碳源供给需要同时满足脱氮和除磷的双重需求,因此单纯采用碳氮比和碳磷比描述脱氮除磷难度往往存在偏差,而且难以判断出水总氮和总磷协同达标的能力。近年来,Zhou等^[12]在综合考虑脱氮和除磷碳源需求的基础上,提出一种同步评估污水处理厂脱氮除磷潜力的综合性方法。笔者采用上海市19座污水处理厂的运行数据来验证该方法的可靠性,并进一步将其应用于污水处理厂的分级管理、碳源供给分析和不同排放标准下的运行优化研究中。

1 材料与方法

1.1 方法原理

除了环境条件之外,生物脱氮除磷效率主要受

进水水质、处理工艺和运行参数的影响。由于反硝化和厌氧释磷均需要碳源作为电子供体,因此进水中可利用碳源浓度的高低可作为污水处理厂脱氮除磷潜力分析的依据。可利用碳源有三大来源^[1]:①污水中的溶解性可生物降解 COD(BSCOD);②内源代谢过程中产生的 BSCOD,包括进水中颗粒性可生物降解 COD 水解发酵后产生的 BSCOD;③甲醇或者乙酸等外源性碳源。本评估方法的基本假设是可利用的碳源完全用于脱氮除磷,而且反硝化和厌氧释磷之间不存在干扰竞争的理想运行条件。

1.1.1 反硝化的理论碳源需求量

根据活性污泥模型,硝态氮还原为氮气的氧当量为 $2.86 \text{ g}^{[13]}$ 。但是,实际值将取决于系统操作条件和反硝化所使用的电子供体类型,而 $BSCOD/NO_3^- - N$ 值与系统的微生物产率相关。因此,反硝化脱氮的碳源需求量(CSR_N)可根据化学计量学方程计算^[1,12,13]:

$$\begin{cases} CSR_N = \frac{2.86NO_3^- - N}{1 - Y_n} \\ Y_n = \frac{Y}{1 + k_{dn}SRT} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $NO_3^- - N$ 为反硝化去除的硝酸盐氮, mg/L ; Y_n 为反硝化菌净产率系数, gCOD/gCOD ; Y 为反硝化菌真实产率系数,默认值为 $0.57 \text{ gCOD/gCOD}^{[1]}$; k_{dn} 为反硝化菌内源代谢常数,默认值为 $0.15 \text{ d}^{-1[1]}$; SRT 为污泥龄, d 。

1.1.2 生物除磷的理论碳源需求量

由于大部分 BSCOD 可在较短的厌氧水力停留时间内转化为乙酸,生物储存的磷去除量可根据污水中提供的 BSCOD 量进行估计。根据生物除磷化学计量学研究^[1,14],以下假定将用于估计生物除磷的化学计量学:①大部分可发酵 COD 均会转化为挥发性脂肪酸,产率为 1.06 g 乙酸/gBSCOD ;②细胞产率为 0.30 gVSS/g 乙酸 ;③胞内磷含量为 0.3 gP/gVSS 。根据这些假定可得,基于生物储存除磷机理的理论碳源需求量(CSR_P)为:

$$CSR_P = \frac{1}{0.3 \times 0.3 \times 1.06} TP = 10.5 TP \quad (2)$$

1.1.3 脱氮除磷潜力评估体系构建

由于城镇污水中绝大部分氮是以有机氮和氨氮形式存在,均需首先氧化为硝酸盐,然后再反硝化去除。因此,在污水处理系统中,式(1)中的 $NO_3^- - N$ 可近似等效为总氮,而磷的去除也主要是通过聚磷菌超量吸磷实现的。因此,生物脱氮除磷达到排放标准的理论碳源需求量(CS_{TR})为:

$$CS_{TR} = \frac{2.86(TN_0 - TN_s)}{1 - Y_n} + 10.5(TP_0 - TP_s) \quad (3)$$

式中, TN_0 和 TN_s 分别为进水和排放标准(如 GB 18918—2002 的一级 A 标准)要求的总氮浓度,mg/L; TP_0 和 TP_s 分别为进水和排放标准要求的总磷浓度,mg/L。

由于 BCOD 和 BSCOD 中存在慢速水解有机物,而污水厂生物处理系统的 HRT 和 SRT 相对较长^[1],包括胶体态和颗粒态在内的绝大部分 BCOD 均可转化为 BSCOD。考虑到实际监测的方便,可采用 BOD_5 替代 BCOD。因此,引入 CS_{TR}/BOD_5 表征脱氮除磷难度(DNR)^[12]:

表1 19座城镇污水处理厂生物脱氮碳源需求与除磷潜力评估(2016年)

Tab.1 Carbon source requirement for nitrogen removal and evaluation of phosphorus removal potential in nineteen WWTPs (2016)

污水厂	处理工艺	进水 $BOD_5/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	$TN/(mg \cdot L^{-1})$		$TP/(mg \cdot L^{-1})$		$CS_{TR}/(mg \cdot L^{-1})$			DNR		
			进水	出水	进水	出水	完全	一级 A	一级 B	完全	一级 A	一级 B
A	AAO	110.9	28.26	13.79	3.05	0.57	136.6	75.9	52.1	1.23	0.68	0.47
B	AO	92	29.22	11.87	3.64	0.35	146.3	85.6	61.8	1.59	0.93	0.67
C	SBR	194.5	44.39	10.8	4.97	1.06	216.4	155.7	131.9	1.11	0.8	0.68
D	AAO	140.1	39.88	12.26	3.6	0.75	185.4	124.6	100.9	1.32	0.89	0.72
E	AAO	129.1	37.88	9.66	4.17	0.49	184	123.2	99.4	1.42	0.95	0.77
F	SBR	100.5	30.52	15.62	3.23	0.97	146.9	86.1	62.4	1.46	0.86	0.62
G	AO	82.8	21.07	6.6	2.18	0.24	100.9	40.1	16.4	1.22	0.48	0.2
H	AAO	191.6	45.82	15.56	5.36	0.25	225.9	165.1	141.4	1.18	0.86	0.74
I	AAO	75.4	23.07	11.82	3.32	1.6	120.2	59.5	35.7	1.59	0.79	0.47
J	AO	104.7	45.29	10.38	2.63	1.63	195.2	134.4	110.7	1.86	1.28	1.06
K	AO	145.2	54.29	20.82	4.42	0.4	247.3	186.5	162.8	1.7	1.28	1.12
L	AAO	189.5	28.56	9.49	6.49	0.31	173.8	113	89.3	0.92	0.6	0.47
M	OD	104.9	19.88	8.08	3.65	0.21	111.9	51.2	27.8	1.07	0.49	0.27
N	AAO	80.2	31.99	20.06	5.52	0.8	176.4	115.6	91.9	2.2	1.44	1.15
O	OD	133.7	20.36	9.93	9.66	0.62	176.8	116	92.3	1.32	0.87	0.69
P	AAO	52.3	19.56	10.79	3.52	0.51	109.3	48.5	26.4	2.09	0.93	0.5
Q	OD	133	17.03	8.14	3.31	0.19	97.8	37	24.3	0.74	0.28	0.18
R	AAO	72.5	16.74	5.58	3.17	0.44	95.2	34.4	22.8	1.31	0.48	0.31
S	OD	177.3	17.45	6.69	3.29	0.18	99.2	38.4	24.1	0.56	0.22	0.14

$$DNR = CS_{TR}/BOD_5 \quad (4)$$

DNR 值越大,则表明污水处理厂的脱氮除磷难度越大。当 $DNR > 1$ 时,表示碳源供给难以满足该标准下的脱氮除磷需求。DNR 指数还可以细分为脱氮 DNR(DNR_N) 和除磷 DNR(DNR_P) 指数,具体计算方法如下:

$$DNR_N = CS_N/BOD_5 \quad (5)$$

$$DNR_P = CS_P/BOD_5 \quad (6)$$

1.2 评估用污水处理厂

本研究以上海市 19 座城镇污水处理厂为评估对象,2016 年的总处理规模为 $416.8 \times 10^4 m^3/d$ 。19 座污水处理厂中采用厌氧/缺氧/好氧(AAO)、氧化沟(OD)、缺氧/好氧(AO)和序批式反应器(SBR)系列工艺的分别有 9、4、4 和 2 座。

2 结果与讨论

2.1 DNR 计算与相关分析

根据 2016 年 19 座城镇污水处理厂的运行数据,采用式(3)计算可得不同排放标准下的 CS_{TR} 与 DNR 指数,如表 1 所示。将 19 座污水处理厂一级 A 标准下的 DNR 值与出水 TN、TP 浓度进行相关性分析,并将其与 BOD_5/TP 、 BOD_5/TN 对比,结果如图 1 所示。

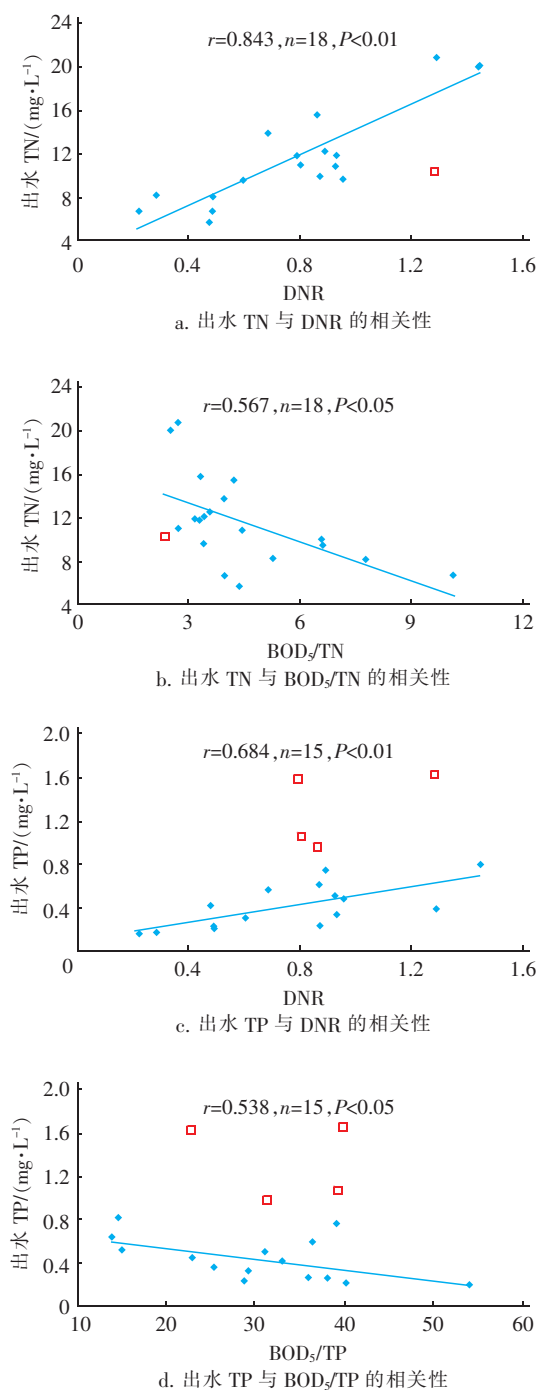


图1 19座城镇污水处理厂出水TN和TP浓度与DNR、 BOD_5/TN 、 BOD_5/TP 的相关关系

Fig.1 Correlation between TN or TP concentration in effluent and DNR, BOD_5/TN or BOD_5/TP in nineteen WWTPs

由图1(a)可知,19座污水厂中仅J污水厂的出水TN浓度与DNR(一级A)的关系明显离群,其他18座污水厂出水TN浓度与DNR(一级A)的相关系数为0.843($P < 0.01$),明显高于图1(b)中其与

BOD_5/TN 的相关系数(0.567, $P < 0.05$)。由图1(c)可知,19座污水厂中仅C、I、J和F这4座污水厂的出水TP浓度与DNR(一级A)的关系明显离群,其他15座污水厂出水TP浓度与DNR(一级A)的相关系数为0.684($P < 0.01$),高于图1(d)中其与 BOD_5/TP 的相关系数(0.538, $P < 0.05$)。部分污水处理厂存在偏离的主要原因可能是处理工艺的差异,如部分污水厂处理工艺设计时未考虑除磷功能或者增加化学除磷等。但总体而言,进水DNR指数模型比传统的碳氮比和碳磷比与出水总氮、总磷浓度的相关性更高,更适用于污水处理厂脱氮除磷难度评估。

2.2 脱氮除磷难度评估和分级管理

根据碳源供给与需求的平衡关系,可根据DNR值将污水处理厂的脱氮除磷难度分为4级^[12]:①低难度, $DNR \leq 0.5$;②中等难度, $0.5 < DNR \leq 1.0$;③高难度, $1.0 < DNR \leq 1.5$;④极高难度, $DNR > 1.5$ 。低难度污水处理厂通过工艺调控可较容易地实现出水氮、磷的达标;中等难度污水处理厂则需对碳源进行优化分配,确保出水氮、磷协同达标;高难度污水处理厂进水 BOD_5 难以满足脱氮除磷需求,仅通过运行优化难以实现出水氮、磷协同达标,这就需要通过工艺设计强化进水中颗粒性有机物水解以提供额外碳源;对于极高难度污水处理厂,则需根据其难度因子辅以化学除磷或外加碳源强化反硝化。

由表1可知,2016年19座城镇污水处理厂一级A标准下的DNR指数平均值为0.80,属于中等难度。按照一级A和一级B标准对各污水处理厂进水DNR指数构成进行分析,结果见图2。可知,J、K和N这三座污水厂的脱氮除磷难度最高($1.0 < DNR \leq 1.5$),碳源供给难以满足一级A和一级B标准下脱氮除磷的需求,这与其出水总氮或总磷中至少有一项无法达到一级B标准相吻合(见表1)。在一级A标准下,E、B、P、D、O、H、F、C、I、A和L这11座污水厂的脱氮除磷难度中等;在一级B标准下,上述污水厂中除I、A和L外的脱氮除磷难度同样属于中等水平。另外,在一级A标准下,S、Q、R、G和M这5座污水厂的DNR指数低于0.5,脱氮除磷难度较低。

从图2还可以看出,在一级A标准下,12座污水处理厂的 DNR_N 在DNR指数构成中占比超过50%,特别是在 $DNR > 0.5$ 的14座污水处理厂中,

仅有 O、L 和 P 这 3 座污水厂的 $DNR_P > DNR_N$, J 和 K 污水处理厂的 DNR_N 甚至高于 1.0。因此,所评估的 19 座污水处理厂脱氮的碳源需求要高于除磷。在污水处理厂硝化效率普遍较高的前提下,碳源相对匮乏成为各污水处理厂脱氮的难点所在。当然,考虑到生物脱氮除磷过程中,反硝化优先于厌氧除磷利用碳源,较高的脱氮难度还意味着生物除磷效率的下降。

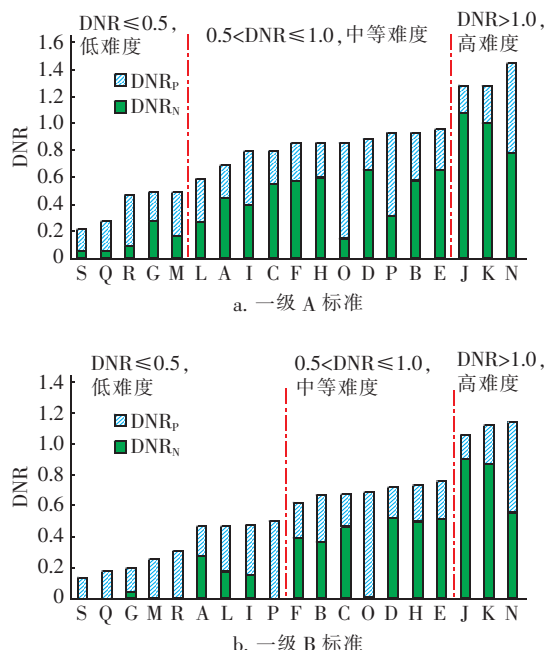


图2 2016年19座城镇污水处理厂不同排放标准下的DNR值

Fig. 2 DNR index for nineteen WWTPs under different pollutant discharge standards

本研究提出的 DNR 指数是不同排放标准下污水处理厂分级管理的重要依据。不同 DNR 指数的污水处理厂应采取不同的脱氮除磷对策和补贴政策。对于 $DNR \leq 1.0$ 的污水处理厂,在工艺完善脱氮除磷后应该注重内部挖潜而实现氮和磷的协同达标。对于 $DNR > 1.0$ 的污水处理厂,宜在制定经济补贴政策时适度倾斜,或者采用相对宽松的排放考核标准。对于合流制污水处理系统,如果 $DNR > 1.0$ 的污水处理厂进水中存在碳氮比和碳磷比偏低的工业废水,则应该严格控制其氮、磷排放量以削减污水厂的氮、磷负荷。

DNR 指数的另一个作用是可以作为污水处理工艺选择的依据。由于反硝化过程优先于聚磷菌利用碳源^[2],因此高 DNR 指数的污水处理厂宜采用化

学除磷,以便将有限的碳源用于反硝化脱氮。对于碳源极度匮乏的污水处理厂,进水碳源甚至难以满足反硝化需求,则应考虑外加碳源以实现同步脱氮除磷。外加碳源的最低投加量(m_c)同样可根据 DNR 指数进行估算:

$$m_c = CS_{TR} - BOD_5 \quad (7)$$

3 结论

① 统计分析结果表明,DNR 指数与出水总氮和总磷浓度在 0.01 水平上显著正相关,其相关系数明显高于碳氮比和碳磷比。

② 根据 DNR 指数的分级结果,一级 A 标准下脱氮除磷难度较高、中等和较低的污水处理厂分别有 3、11 和 5 座,大部分污水处理厂脱氮除磷的碳源需求中脱氮需求占比更高。

③ 相比碳氮比和碳磷比,DNR 指数能够更为科学客观地反映污水处理厂的脱氮除磷难度,并能进一步应用于污水处理厂的分级管理、不同排放标准下的碳源供给分析和运行优化。

参考文献:

- [1] Tchobanoglous G, Burton F L, Stensel H D. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (4th ed) [M]. New York: Metcalf & Eddy Inc., 2003.
- [2] Zhao C H, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Effects of influent C/N ratio, C/P ratio and volumetric exchange ratio on biological phosphorus removal in UniFed SBR process [J]. J Chem Technol Biot, 2008, 83(12): 1587 - 1595.
- [3] Yang M, Sun P, Wang R, et al. Simulation and optimization of ammonia removal at low temperature for a double channel oxidation ditch based on fully coupled activated sludge model (FCASM): a full-scale study [J]. Biore-source Technol, 2013, 143(9): 538 - 548.
- [4] Wu C Y, Peng Y Z, Wan C L, et al. Performance and microbial population variation in a plug-flow A²O process treating domestic wastewater with low C/N ratio [J]. J Chem Technol Biot, 2011, 86(3): 461 - 467.
- [5] Guerrero J, Tayà C, Guisasola A, et al. Understanding the detrimental effect of nitrate presence on EBPR systems: effect of the plant configuration [J]. J Chem Technol Biot, 2012, 87(10): 1508 - 1511.
- [6] Zhou Z, Xing C, Wu Z C, et al. Optimization of a full-scale Unitank wastewater treatment plant for biological phosphorus removal [J]. Environ Technol, 2014, 35(6): 766 - 772.

- [7] Zhu R, Wu M, Yang J. Effect of sludge retention time and phosphorus to carbon ratio on biological phosphorus removal in HS-SBR process [J]. Environ Technol, 2013, 34(4): 429–435.
- [8] Kumar M, Lee P Y, Fukusihma T, *et al.* Effect of supplementary carbon addition in the treatment of low C/N high-technology industrial wastewater by MBR [J]. Bioresour Technol, 2012, 113(4): 148–153.
- [9] 阚睿哲, 李军, 卞伟, 等. 多级 A/O 耦合生物膜反硝化处理低 C/N 值生活污水 [J]. 中国给水排水, 2017, 33(1): 27–32.
- Kan Ruizhe, Li Jun, Bian Wei, *et al.* Treatment of domestic sewage with low C/N ratio by coupling process multistage A/O and denitrifying biofilm [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(1): 27–32 (in Chinese).
- [10] 刘伟岩, 李军, 宋玮华, 等. 碳源对缺氧/厌氧/好氧工艺脱氮除磷效果的影响 [J]. 中国给水排水, 2009, 25(13): 55–57.
- Liu Weiyan, Li Jun, Song Weihua, *et al.* Influence of carbon source on nitrogen and phosphorus removal by anoxic/anaerobic/aerobic process [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(13): 55–57 (in Chinese).
- [11] Wang Y Y, Geng J J, Ren Z J, *et al.* Effect of COD/N and COD/P ratios on the PHA transformation and dynamics of microbial community structure in a denitrifying phosphorus removal process [J]. J Chem Technol Biot, 2013, 88(7): 1228–1236.
- [12] Zhou Z, Xing C, Wu Z C, *et al.* A comprehensive method for the evaluation of biological nutrient removal potential of wastewater treatment plants [J]. Desalin Water Treat, 2015, 53(11): 2931–2938.
- [13] Henze M, Gujer W, Mino M, *et al.* Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 [M]. London: IWA Publishing, 2002.
- [14] Henze M, van Loosdrecht M C M, Ekama G A, *et al.* Biological Wastewater Treatment—Principles, Modelling and Design [M]. London: IWA Publishing, 2008.



作者简介: 姚杰 (1969 –), 男, 河南潢川人, 硕士, 高级工程师, 长期从事排水系统和污水处理厂运营管理工作。

E-mail: yaoj@shwwt.com

收稿日期: 2018-01-06

(上接第 78 页)

- ating bed system [J]. J Environ Sci, 2010, 22(11): 1710–1717.
- [4] 丛海兵, 吴黎明. 2 种耐寒生态浮床植物的水质改善性能研究 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 51–56.
- Cong Haibing, Wu Liming. Study on water quality improvement capacity of two cold-resistant floating bed plants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(1): 51–56 (in Chinese).
- [5] Kwon S, Moon E, Kim T S, *et al.* Pyrosequencing demonstrated complex microbial communities in a membrane filtration system for a drinking water treatment plant [J]. Microbes Environ, 2011, 26(2): 149–155.
- [6] Falkentoft C M, Muller E, Arnz P, *et al.* Population changes in a biofilm reactor for phosphorus removal as evidenced by the use of FISH [J]. Water Res, 2002, 36(2): 491–500.



作者简介: 柏义生 (1983 –), 男, 安徽庐江人, 硕士, 工程师, 研究方向为水污染控制理论与技术。

E-mail: boyisheng2015@126.com

收稿日期: 2018-01-06