

# 欧洲污水处理厂节能降耗的策略与实践

纪婷婷<sup>1,2</sup>, 李咏梅<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092;  
2. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

**摘要:** 污水处理厂是高耗能单位,合理的节能降耗技术能使污水处理厂在满足严格的排放标准的同时降低运营成本。对部分或已完全实现能源自给自足的欧洲污水处理厂的节能降耗策略与实践经验进行分析,结果表明:全面的能源审计有助于制定节能降耗策略;大规模污水处理厂的单位能耗更低;优化污水处理单元的曝气环节、提高泵机效率、开发节能降耗新工艺以及改善污泥处理单元的厌氧消化条件可有效降低能耗;运用污泥预处理、有机质共消化和优化污泥混合条件等技术可增加厌氧消化沼气产量,有利于实现污水处理厂的能源自给自足。这些经验可为我国污水处理厂基于节能降耗的设计与运营提供借鉴。

**关键词:** 欧洲污水处理; 节能降耗; 能源自给自足

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)18-0026-06

## Strategy and Practice of Energy Saving and Consumption Reduction in European Wastewater Treatment Plants

Ji Ting-ting<sup>1,2</sup>, Li Yong-mei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Operating wastewater treatment plants (WWTPs) requires high energy consumption. Reasonable energy reduction technologies allow WWTPs to reduce operating costs and to meet stringent effluent standards. Through analyzing relevant strategies and practical experience from partially or completely energy self-sufficient WWTPs in European countries, the following conclusions are proposed: a comprehensive energy audit of a WWTP can assist decision makers to develop strategies of energy and consumption reduction; unit energy consumption in large-scale WWTPs is lower; optimizing the aeration of wastewater treatment units, increasing the efficiencies of pumps, developing novel energy-saving processes and improving anaerobic digestion conditions of sludge treatment units could effectively reduce energy consumption. Through sludge pretreatment, co-digestion with organic substrates, improvement of mixing conditions, WWTPs could increase biogas production and thus achieve energy self-sufficiency. Based on these conclusions, a reference could be provided to the design and operation of WWTPs concerning energy reduction strategies in China.

**Key words:** European wastewater treatment; energy saving and consumption reduction; energy self-sufficiency

近几年来,由于政策的要求,污水处理厂节能降耗研究受到重视<sup>[1]</sup>。欧洲在能源与气候框架中出台了能源效率法令(Directive 2009/28/EC),其中明确了到 2020 年需要达成的目标(Horizon 20):相比于 1990 年,温室气体的排放需要降低 20%(如果条件允许,将降低 30%);20% 的能源消耗需来源于可再生能源;能源利用效率需要提高 20%。在污水处理中有效利用能源已被证明是实现这些目标的一个可行方法<sup>[2]</sup>。自奥地利的 Strass 污水处理厂首次成功实现了能源自给自足并且向当地电网供电以来,欧洲污水处理厂在节能降耗基础上,一直在探索产能与耗能平衡的可能性。

### 1 欧洲污水处理厂能耗现状

在制定节能降耗战略之前,可对污水处理厂进行能源审计,这可以反映污水处理厂在不同运营阶段的能耗情况。同时,研究者可以利用相同情况的污水处理厂进行基准研究。目前,描述污水处理厂能耗现状的难点在于,尚无标准的能源审计方法。Foladori 等<sup>[3]</sup>提出需要重点关注水力运输、COD 去

除、污泥处理以及厂房建设阶段的能源审计,对于不同阶段,将  $EE_{m3}$ (单位处理水量的能耗)、 $EE_{BOD}$ (去除单位  $BOD_5$  的能耗)或  $EE_{COD}$ (去除单位 COD 的能耗)、 $EE_{PE, served}$ (每年服务的单位人口当量能耗)和  $EE_{PE, designed}$ (每年设计的单位人口当量能耗)作为能耗指标。Patziger 等<sup>[4]</sup>提出加上去除单位总氮与总磷能耗来完善能源审计。在确定了指标之后,对于其量的分析又存在全生命周期分析、双自举分析和成本-效益分析等不同方法<sup>[3,5,6]</sup>。为了能建立统一的污水处理厂能耗分析方法与节能战略,欧洲自 2015 年起开展了 ENERWATER 项目。来自 4 个欧洲国家的 9 位合作者将对欧洲、美国以及亚洲现有污水处理厂的资料(能源审计、节能降耗案例等)进行基准研究,以期用统一的方法完善欧洲现有污水处理厂的能耗数据<sup>[3]</sup>。

为反映欧洲污水处理厂能耗的大致情况,选取了文献中常见的单位服务人口当量能耗以及单位处理水量能耗作为能耗指标列举在表 1 中。作为对比,中国污水处理厂的能耗情况亦列举在其中。

表 1 欧洲部分污水处理厂年平均能耗情况(中国的情况作为对比)

Tab. 1 Average annual energy consumption of several WWTPs in Europe (compared to the WWTPs in China)

项目	污水处理厂	平均进水负荷/kPE	单位人口当量 <sup>b</sup> 能耗/(kW·h·PE <sup>-1</sup> )	单位处理水量能耗/(kW·h·m <sup>-3</sup> )	文献
法国	5 家 SIAPP 管理的污水处理厂	N. A. <sup>a</sup>	N. A.	1.7 <sup>c</sup>	[7]
德国	10 200 家污水处理厂	N. A.	35	0.4	[8]
挪威	2 家 Oslo 污水处理厂	600	65.88	0.23	[9]
意大利	SMAT Castiglione T. se 污水处理厂	2 700	24.73	0.3	[10]
	Folgaria 污水处理厂	24	73.00	0.49	[10]
荷兰	Dutch Water Sector 管理的多家污水处理厂	24 400	26.60	0.30	[11]
葡萄牙	2 家 Alveiro 污水处理厂	78	47.20	0.73	[12]
捷克	Prague 污水处理厂	1 642	45.27	N. A.	[13]
匈牙利	Pest - south 污水处理厂	293	30.81	N. A.	[13]
中国	多家污水处理厂	N. A.	N. A.	0.3	[14]

注: <sup>a</sup>. N. A. 指暂无数据。  
<sup>b</sup>. PE 指人口当量,根据欧盟法令 Directive 91/271/EEC, 1 PE = 60 gBOD<sub>5</sub>/(人·d)。  
<sup>c</sup>. 文献中使用的能源审计方法综合了热能和化学能的消耗,并运用公式将其转化为了电能,而其他文献只对电能消耗做了审计。

从表 1 可以看出,欧洲污水处理厂能耗普遍比中国高。一方面是因为这些污水处理厂采用了出水消毒、污泥消化与焚烧、厂房除臭等工艺,这些耗能环节在我国污水处理厂尚未大规模普及。另一方面也可能是因为我国进水 COD(200 ~ 400 mg/L) 普遍

比欧洲(500 ~ 800 mg/L)低。进水 COD 较低的污水处理厂,其有机质产能潜力也较低<sup>[14]</sup>。

另外,从表 1 中还可以发现,以人口当量作为衡量标准的大规模污水处理厂单位能耗更低。无论分析水处理过程中的哪一个环节,当污水处理厂规模

增加时,单位电耗总是在减少<sup>[15]</sup>。然而,无论污水处理厂的规模大小,都有降低能耗的空间。

对于大中型污水处理厂,能耗较高的处理单元是好氧生物处理、提升(进水泵和泥水混合液循环)以及污泥机械脱水和(或)污泥消化<sup>[16]</sup>。法国 SAV 污水处理厂的研究发现,一级处理、生物处理、澄清絮凝和硝化/反硝化这些处理过程的电耗占到了整个污水处理厂的 70%。污泥处理单元消耗了污水处理厂 14% 的电力,其中约一半是贡献给了消化池运行<sup>[7]</sup>。在另一污水处理厂中,污泥处理单元的能耗占到了 30%<sup>[17]</sup>。因此,目前节能降耗的实践经验大部分来源于泵机效率提升、生化过程以及污泥处理优化。

## 2 污水处理厂节能降耗的实践经验

### 2.1 污水处理单元

生化处理是污水处理单元的重要步骤,而曝气系统是其中关键环节,约占总能耗的 50%<sup>[10]</sup>。曝气系统的能耗受到需氧细菌种群、进水负荷、出水水质、处理类型、处理厂的规模和运行年限的影响。

通常,污水处理厂通过在线监测系统来控制曝气池溶解氧量。但是考虑到生化过程不是线性的,并且进水水质变化会对 DO 有较大影响,因此上述控制方法可能不完全可靠。为了克服这个限制,基于模糊逻辑的定点控制系统被引入意大利 SMAT Castiglione T. se 污水厂。该系统可以通过监测  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的实时浓度来连续自动调节 DO 的设定值,使曝气量适应有机物负荷的变化。改造后节省了 1 000  $\text{m}^3/\text{h}$  的压缩空气,节约了 15% ~ 20% 的电力。同时,有机物的去除率提高了 10%<sup>[10]</sup>。

用数学模型和模拟仿真手段来实现对污水处理厂曝气量的控制在污水处理厂中已有运用。比如,西班牙 Mekolalde 污水处理厂引入 Add - Control 软件<sup>[18]</sup>,运用活性污泥 1 号模型(ASM1)描述了该厂脱氮过程,并且将软件连接曝气池  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和混合液污泥浓度的比例 - 积分 - 微分(PID)控制器,通过即时模拟曝气量与出水水质来调节鼓风机的运行。此举为该厂节省了 7% 的曝气量。

虽然这种基于动力学数据的数值模拟对污水处理厂优化有很好的效果,但是这些模型的应用缺乏普适性<sup>[19]</sup>。得益于信息技术的不断发展,用数据挖掘手段对污水处理厂数据进行分析并制定优化策略具有发展前景。Hernández-Del-Olmo 等<sup>[20]</sup>利用免模

型强化学习方法训练人工智能来控制污水处理厂运行,以最大限度地降低污水处理厂的运营成本,同时保持水质在可接受的水平。人工智能在模拟环境中进行了测试(假设一年有 70% 的晴天,20% 的降雨和 10% 的暴风雨天数),发现其能够根据环境对污水处理厂进行监督并优化运行参数(如 DO)。这使得无人运营污水处理厂成为可能。不过,数据挖掘优化运行技术尚未在欧洲大规模推广。

用于污水提升与混合的泵机系统是污水处理过程中的另一高耗能环节。泵自身的功率、电机、所采用的驱动系统和流量控制方法都会影响泵机系统的总体效率。如果泵的实际运行条件与泵的最佳效率点不匹配,泵机内液体会发生湍流、摩擦和回流等情况,从而导致泵机系统效率降低且造成水头损失。为使泵机运行始终在最佳效率点,爱尔兰的 Ringsend 污水处理厂采用变频驱动器(VFD)来改变泵的转速以匹配流量条件。这种驱动器一方面可提高泵转化效率,另一方面可避免电机在无效高转速下产生能源浪费,根据水泵相似定理,即使电机转速稍微降低,也使泵的能耗降低多达 50%<sup>[21]</sup>。

采用先进的低能耗污水处理工艺是降低污水处理能耗的另一个有效途径。如近年来提出的生物两阶段法(A/B法)结合厌氧氨氧化工艺可有效降低污水处理能耗。A/B法的优势在于可以对有机物进行高速捕集而不需要过度的有氧稳定。A段的水力停留时间在 0.5 h 内,主要通过吸附去除有机物,产生的高有机负荷污泥进入厌氧消化罐产能;B段通过控制低泥龄(约 10 d)去除污水中的氮<sup>[22]</sup>。含高浓度氨氮的厌氧消化上清液通过亚硝化/厌氧氨氧化 DEMON<sup>®</sup> 系统进行处理<sup>[23]</sup>。在侧流 DEMON<sup>®</sup> 系统能稳定运行后,该系统中的厌氧氨氧化颗粒污泥被接种至主流 B 段反应器中,并通过水力旋流分级器保留和富集高密度活性污泥成分。同时,运用生物强化技术,在 B 段中保留厌氧氨氧化菌与氨氧化菌,并且抑制亚硝酸盐氧化菌的生长<sup>[24]</sup>。该污水处理厂在运用此工艺期间削减了 8% 的能耗,相应地提高了能源净产量(约为 16%)<sup>[22]</sup>。然而,该工艺在污水处理厂尚未得到大规模应用,主要原因如下:①富集培养厌氧氨氧化菌所需时间较长,Strass 污水处理厂花费约 2.5 年启动 DEMON<sup>®</sup> 反应器<sup>[25]</sup>;②在主流处理生化段阻断亚硝酸氧化菌的生长和维持稳定的亚硝化在实际应用中仍存在挑战;③已发



现的厌氧氨氧化菌生长需要中温环境(28~32℃),低温下的应用尚待研究<sup>[26]</sup>;④在主流处理段应用厌氧氨氧化工艺会增加污水处理厂的碳足迹,在主流处理段运行 DEMON<sup>®</sup>系统后,Strass 污水处理厂的 N<sub>2</sub>O 排放量增长了 2.3%,相应地,年碳足迹增长到了 36 kgCO<sub>2</sub>/PE,为此,仍需对此工艺的操作条件进行改进<sup>[22]</sup>。

## 2.2 污泥处理单元

常见的污泥处理流程为污泥浓缩、消化、脱水、稳定化与处置。厌氧消化过程中产生的沼气通过热电联产系统可以为污水处理厂带来能源收益。

然而,厌氧消化产沼气工艺的应用目前集中在大中规模的污水处理厂。如果考虑能进行厌氧消化的最小规模(>10 000 PE),根据欧洲环境局在 2015 年发布的欧洲污水处理厂处理规模的统计,仅有 5 141 个处理厂(19.1%)具有沼气生产的可能性。当然,已有在小规模污水处理厂应用厌氧消化工艺的成功案例<sup>[17]</sup>,但需要开发新的技术手段来匹配厂区规模。

在成功运行厌氧消化-热电联产装置的污水处理厂,每年大约可产能 15 kW·h/PE<sup>[27]</sup>,但是产能量并不能完全抵消污泥处理的能耗,同时与表 1 中数据对比,大约能抵消整个污水处理厂 20%~50% 的能耗。因此,污水处理厂在节能降耗的基础上要进一步实现能源自给自足的话,还需增加产能量,比如通过污泥预处理、生物质联合厌氧发酵或者采用高效热电联产系统。

污泥预处理可以使污泥中易生物降解部分增加一倍以上,与没有进行预处理的污泥相比,其通过厌氧消化产生的沼气将增加 30%~60%<sup>[28]</sup>。另外,污泥的预处理也可以实现污泥的减量化,从而降低能耗。瑞典的数据表明,污泥量每减少 1%,每年可以节省 18 000 欧元的能耗费用。污泥干燥工艺可有效削减污泥量,位于法国的 Bellecombe 污水处理厂(32 000 PE)于 2001 年开始搭建暖棚以利用太阳能干燥污泥,并于 2004 年正式投入使用。这种污泥干燥工艺不仅不消耗电能与化石能源,还降低了污泥的含水率,增加了固体水解量。污泥热水解是常用的污泥预处理工艺,150~160℃的高温处理可以破坏污泥的胶体态结构释放出结合水,从而溶解部分污泥。通过这种方式,可以缩减污泥体积,同时增加产气量<sup>[28]</sup>。挪威的 Hamar 污水处理厂在 1999 年率

先将污泥热水解工艺运用于实践。与传统的处理工艺相比,脱水污泥经过热水解后,体积可缩小 50%。针对小规模污水处理厂,OTV 公司开发了 Théllys<sup>®</sup> 污泥热水解-厌氧消化一体化反应器。污泥在 700 kPa、160℃环境中加热 30 min 成为流动态后,进入消化反应器,这使得厌氧消化装置从传统的 2 200 m<sup>3</sup> 削减到了 950 m<sup>3</sup>。消化产生的沼气回用于 Théllys<sup>®</sup> 反应器中的蒸汽发生器,从而维持反应器温度在 160℃。法国 SIVO 污水处理厂引入该反应器后,实现了能源的自给自足。良好的混合条件也可以保证高产气量,在优化了厌氧消化反应器的混合器性能并采用热电联产系统后,意大利 SMAT Castiglione T. se 污水处理厂节省了 90% 的能耗<sup>[10]</sup>。

一些研究指出,从现有的能源平衡来看,如果没有外部碳源的投入(其他污水处理厂污泥、生物废料、有机基质等),依靠现有污水处理厂的污泥量,无法实现 100% 的能源自给自足<sup>[13]</sup>。欧洲大部分国家有完善的城市固体废物分类收集系统,这使得有机废物(如厨余垃圾)与污泥联合厌氧消化成为可能。匈牙利的 Pest-South 污水处理厂在 2004 年—2006 年施行了污泥与有机废物共消化,产气量增长了 500%(从 200 000 Nm<sup>3</sup>/月增长到 600 000~1 000 000 Nm<sup>3</sup>/月)<sup>[13]</sup>。奥地利的 Zirl 污水处理厂自 2008 年开始向厌氧消化罐中投入厨余垃圾,产气量增长了 133%,于 2010 年实现了能源自给自足。

## 2.3 优化工艺回报周期

除了从技术角度来考虑不同节能降耗战略,从运营角度亦需要考虑经济成本问题。根据世界银行与荷兰应用水研究基金会(STOWA)发布的关于污水处理厂节能降耗的案例研究报告,从经济学角度总结了污水处理厂不同节能降耗战略的投资回报周期,具体见表 2。由表 2 可以看出,提高初沉池沉降效率和改进泵的性能与优化污水处理单元曝气系统有相同的节能效果,并且有更短的投资回报周期。不过,报告也指出,用药剂提高初沉池的沉降效率,从降能耗角度看,投资效果立竿见影。然而,对于药剂的投资未计算在回报周期中。对于污泥的处理,主要集中在厌氧消化过程的优化和热电联产发动机安装,相比于污水处理单元的措施,可以产生更好的节能效果,但是投资回报周期相对较长。污水处理厂的运营者需要根据自身情况选择适合自己的方案。

表2 污水处理厂节能降耗常用措施与回报周期

Tab.2 Energy reduction strategies frequently conducted in WWTPs and their financial payback time

方 法		能耗削减量/%	投资回报周期/a
污水处理单元	优化泵的工作范围和算法或者使用变频泵	5~44	<0.1~4
	使用混凝剂优化初沉效率	5~25	立即
	通过DO和SRT的自动化控制来管理曝气池中的曝气量	20~36	2.4~5
	夏季降低MLSS,冬季提高MLSS	10~15	N. A.
污泥处理单元	有机废物(厨余垃圾等)在污泥消化器中进行共消化	60~90	6
	优化厌氧消化的混合条件	90	2.5
	用双燃料热电联产对中温厌氧消化供热	15	8.8
	用沼气作为热电联产发动机燃料产热进行污泥加热与脱水	80~88	N. A.
其他	运用保温建筑材料;厂区建筑内采用照明定时器;建筑外采用光线感应照明开关;采用低能耗灯泡	<10	N. A.

### 3 结语

① 合理的能源审计能帮助研究者了解污水处理厂各处理单元以及运营中的能耗现状,以此作为基础可以有的放矢地制定能耗优化策略。目前,统一的能源审计方法尚在研究中。

② 传统污水处理厂节能降耗的关键在于优化污水处理中的曝气环节以及提升泵机效率。基于模型和数据挖掘的控制手段,可帮助污水处理厂实现自动化运营的同时降低能耗。

③ 运用新型节能降耗污水处理工艺如A/B法结合厌氧氨氧化工艺可有效削减能耗,但此工艺在污水处理厂中的大规模应用尚需研究。

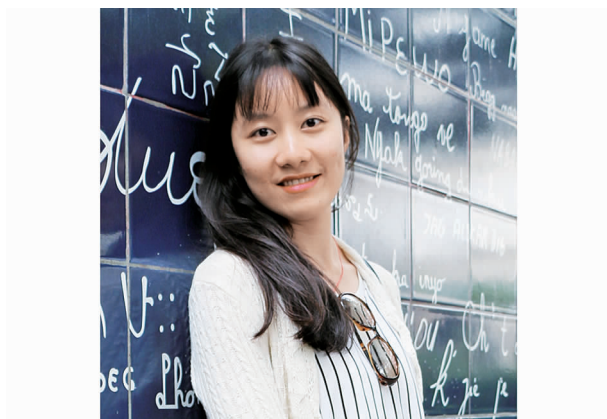
④ 如果要想实现污水处理厂能耗自给自足,在能耗减少的同时还应增加内部能源生产。这可通过污泥厌氧消化产生沼气来实现。沼气可以通过热电联产系统有效地转换成电能及热能。污泥预处理和优化厌氧消化过程是提高沼气产量、降低污泥处理能耗的关键。此外,与其他有机废物共同消化是另一种增加能源生产的潜在途径。

在决定节能降耗战略时,还需考虑经济成本,因地制宜地选择适合目标污水处理厂的节能降耗技术组合。

### 参考文献:

- [1] Molinos-Senante M, Hanley N, Sala-Garrido R. Measuring the CO<sub>2</sub> shadow price for wastewater treatment: A directional distance function approach [J]. Appl Energy, 2015, 144: 241–249.
- [2] Kollmann R, Maier S, Shahzad K, et al. Waste water treatment plants as regional energy cells – Evaluation of economic and ecologic potentials in Austria [J]. Chem Eng Trans, 2014, 39: 607–612.
- [3] Foladori P, Vaccari M, Vitali F. Energy audit in small wastewater treatment plants: Methodology, energy consumption indicators, and lessons learned [J]. Water Sci Technol, 2015, 72(6): 1007–1015.
- [4] Patziger M. Efficiency and development strategies of medium-sized wastewater treatment plants in central and eastern Europe: Results of a long-term investigation program in Hungary [J]. J Environ Eng, 2017, 143(6), DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001185.
- [5] D'Antoni B M, Longo S, Akkersdijk E, et al. Energy audit methodology and key performance parameters (KPI) in small wastewater treatment plants [A]. 13th IWA Specialized Conference on Small Water and Wastewater Systems (SWWS) [C]. Athens: IWA, 2016.
- [6] Guerrini A, Romano G, Indipendenza A. Energy efficiency drivers in wastewater treatment plants: A double bootstrap DEA analysis [J]. Sustainability, 2017, 9(7), DOI: 10.3390/su9071126.
- [7] Azimi S, Rocher V. Energy consumption reduction in a waste water treatment plant [J]. Water Pract Technol, 2017, 12(1), DOI: 10.2166/wpt.2017.006.
- [8] Husmann M. Improving energy efficiency in wastewater treatment: What emerging countries can learn from experience gained in the developed world [EB/OL]. [http://siteresources.worldbank.org/EXTWAT/Resources/4602122-1213366294492/5106220-123446-9721549/21.3\\_Energy\\_efficiency.pdf](http://siteresources.worldbank.org/EXTWAT/Resources/4602122-1213366294492/5106220-123446-9721549/21.3_Energy_efficiency.pdf), 2018-01-07.
- [9] Venkatesh G, Bratteb Ø H. Environmental impact analysis of chemicals and energy consumption in wastewater treatment plants: Case study of Oslo, Norway [J]. Water Sci Technol, 2011, 63(5): 1018–1031.
- [10] Panepinto D, Fiore S, Zappone M, et al. Evaluation of

- the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy[J]. *Appl Energy*,2016,161:404–411.
- [11] Frijns J,Hofman J,Nederlof M. The potential of (waste) water as energy carrier[J]. *Energy Conv Manage*,2013,65(1):357–363.
- [12] Lemos D,Dias A C,Gabarrell X,*et al.* Environmental assessment of an urban water system[J]. *J Clean Prod*,2013,54(9):157–165.
- [13] Chudoba P,Sardet C,Palko G,*et al.* Main factors influencing anaerobic digestion of sludge and energy efficiency at several large WWTP in central Europe[J]. *J Residuals Sci Technol*,2011,8(2):89–96.
- [14] Hao X,Liu R,Huang X. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China[J]. *Water Res*,2015,87:424–431.
- [15] Hernández-Sancho F,Molinos-Senante M,Sala-Garrido R. Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants:A non-radial DEA approach[J]. *Sci Total Environ*,2011,409(14):2693–2699.
- [16] Longo S,D'Antoni B M,Bongards M,*et al.* Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement[J]. *Appl Energy*,2016,179:1251–1268.
- [17] Shen Y,Linville J L,Urgun-Demirtas M,*et al.* An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States:Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs[J]. *Renew Sust Energy Rev*,2015,50:346–362.
- [18] Brockmann D,Steyer J P,Keyser W D,*et al.* ADD CONTROL:Advanced control solutions for waste water treatment[J]. *Rev Environ Sci Biotechnol*,2011,10(1):3–7.
- [19] Asadi A,Verma A,Yang K,*et al.* Wastewater treatment aeration process optimization: A data mining approach[J]. *J Environ Manage*,2017,203(2):630–639.
- [20] Hernández-Del-Olmo F,Llanes F H,Gaudioso E. An emergent approach for the control of wastewater treatment plants by means of reinforcement learning techniques[J]. *Expert Syst Appl*,2012,39(3):2355–2360.
- [21] Awe O W,Liu R,Zhao Y. Analysis of energy consumption and saving in wastewater treatment plant:Case study from Ireland[J]. *J Water Sustain*,2016,6(2):63–76.
- [22] Clippeleir H D,Weissenbacher N,Schaubroeck T,*et al.* Mainstream partial nitrification/anammox:Balancing overall sustainability with energy savings[A]. *Proceedings of the Water Environment Federation*[C]. USA:Water Environment Federation,2012.
- [23] Schaubroeck T,De Clippeleir H,Weissenbacher N,*et al.* Environmental sustainability of an energy self-sufficient sewage treatment plant:Improvements through DEMON and co-digestion[J]. *Water Res*,2015,74:166–179.
- [24] Wett B,Omari A,Podmirseg S M,*et al.* Going for mainstream deammonification from bench to full scale for maximized resource efficiency[J]. *Water Sci Technol*,2013,68(2):283–289.
- [25] Wett B. Solved upscaling problems for implementing deammonification of rejection water[J]. *Water Sci Technol*,2006,53(12):121–128.
- [26] Ma B,Wang S,Cao S,*et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances[J]. *Biore-sour Technol*,2016,200:981–990.
- [27] Nathalie B,Jansen J,Günther B,*et al.* Sustainable Biogas Production in Municipal Wastewater Treatment Plants[M]. Germany:IEA Bioenergy,2015.
- [28] Carrère H,Dumas C,Battimelli A,*et al.* Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability:A review[J]. *J Hazard Mater*,2010,183(1/3):1–15.



作者简介:纪婷婷(1992–),女,上海人,同济大学硕士研究生,并获法国生命与环境科学与工业学院工程师学位,研究方向为污水处理与资源化。

E-mail:liyongmei@tongji.edu.cn

收稿日期:2018–04–23