

污水生物处理单元能量平衡与分析方法研究与应用

龙腾锐, 高 旭 (重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要:在提出污染物内能概念的基础上,对污水生物处理工艺能量平衡和分析的原理与方法进行了探讨,建立了能量平衡研究的基本模型。据此对国内四座不同工艺的城市污水处理厂进行了生物处理单元的能量衡算,并采用两类指标对处理单元耗能状况进行了评价。应用能量平衡分析方法可进行处理工艺的设计遴选和建成后运转效果的评判,以及指导处理厂有针对性地采取节能降耗措施。

关键词:污水;生物处理;能量平衡;能量分析方法;能量利用率

Study and application on energy balancing and analyzing approach for biological wastewater treatment unit

LONG Tengrui, GAO Xu (Institute of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Based on concept of internal energy of pollutants, principles and approaches for energy analysis are discussed, and basic model for energy balancing are founded. Energy balance computation is performed for biological treating units of 4 municipal wastewater treatment facilities which various processes are adopted. Energy consuming state is evaluated through two sorts of indexes. The author think that energy balancing and analyzing approach proposed is fit for processes selection during project designing stage and for performance effect evaluation during running stage when energy conservation measures concerned could be taken.

Key words: wastewater; biological treatment; energy balance; energy analysis approach; energy utilization efficiency

城市污水处理属于能量密集型的行业,其中生物处理单元对能源的要求较为突出。按常规,二级生物处理厂的单位运行费用目前国内为 0.20~0.60 元/(m³·d),即 1 万 m³/d 规模的处理厂,年运行费用要达到 73~219 万元,该费用中最主要的部分是能源消耗的费用^[1]。分析污水处理厂能源的利用、耗散与回收,并在此基础上确定节能的方向和环节是迫切和重要的课题。目前国内对此尚无系统的研究,本文拟就城市污水生物处理单元能量分析的方法和实际应用进行一些探讨。

1 污染物内能

污水生物处理过程主要利用微生物的代谢能力去除有机污染物,这既是物质形态的变化过程,又是微生物的能量转换过程,即将高分子耗氧有机物分解为低能物质,释放的能量被微生物以 ATP 形式贮存或再利用的过程。通过这种途径,微生物获得维持与增殖所需的能量,多余部分则转化为热。微生物在生长过程中,组成微生物细胞的物质也在进行分解,由生物能转化为热与功。通过对这一过程的分析可知,进水污染物质,其中主要是有机污染物包含着可被特定微生物利用的化学能;分解过程的最终产物如 CO₂ 和 H₂O 是低能物质;释放的可被细胞利用的能量一般贮存在高能化合物中。

显然,污水污染物质中所结合的化学能与其化学组成有关。美国学者 Owen^[2]认为,污水中有机物总的分子式为 C₁₀H₁₈O₃N,细菌细胞为 C₅H₇O₂N,他把这两种“物质”的燃烧值与理论上算出的两种物质的 COD 相联系,

收稿日期:2001-11-12;修订日期:2002-02-01

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(59838300)

作者简介:龙腾锐(1939—),男,教授,博士生导师

得出污水的化学能量势 (Chemical Energy Potential, CEP) 为 13.9 kJ/g(COD), 细菌细胞为 14.8 kJ/g(COD). 德国学者 Loll 测定污泥稳定的热产量为每分解 1 g COD 产热 14.7 kJ^[3], 这一热值与 Owen 所提出的有机物热值相近. 上述以及相关研究的目的是为揭示污水和污泥中有机污染物的能量水平, 并通过 COD 这种易于测定的指标来换算污染物的化学能这一较难测定的指标. 一定的污染物 COD 水平与一定的能量水平相对应. Owen 将 CO_2 和 H_2O 的能量水平视为 0, 即这两种最终产物已经稳定, 不再包含可释放的热. 那么, 有机物的化学能量势就可定义为有机物完全氧化为 CO_2 和 H_2O 所释放的热值. 这样, 污染物的能量定义便有了较为严密的工程内涵, 也确立了处理工艺能量分析的基础.

2 污水生物处理工艺能量平衡与能量分析方法

能量平衡的根据是能量守恒定律. 进入污水生物处理系统的能量流包括污染物(工质)的内能和外界供给处理单元体系的能量两部分. 处理过程是使污水中污染物的能量水平降低的过程, 处理的目的是为了获得一定能级(排放标准)的出水. 该过程需要消耗外界供给的能量. 将污水处理生物反应器当作耗能装置, 可按热力学分析方法建立能量利用的基本模型, 其中所涉及的能量转化和流动, 可用图 1 来说明.

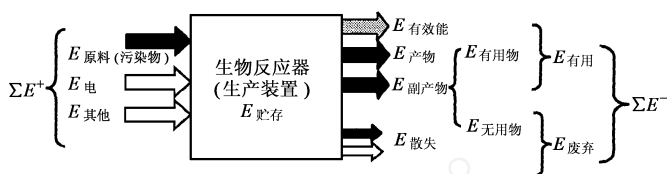


图 1 微生物系统能量平衡图

Fig. 1 Energy balance for microbiological system

图 1 中工质的能量用黑色箭头表示, 外界供给的能量用白色箭头表示. 进入生物反应器的能量总和为 ΣE^+ , 离开反应器的能量总和为 ΣE^- . ΣE^+ 包含输入微生物系统中的各种形式能量, 例如, 进入传统活性污泥工艺曝气池的能量包括污水污染物带入的化学能, 曝气系统充氧、混合投入的电能及其他可能的能量输入.

ΣE^- 包括产物和副产物中的能量, 这是进水污染物所含化学能被微生物利用并转化的剩余部分; 另外, 生化反应中散失到环境中的热和功, 成为 $E_{\text{散失}}$ 的一部分, 上述两者之和即为工质输出的能量. 生物处理装置的产品可用达到一定排放标准即满足一定能量水平的出水表示. 副产物在活性污泥系统中指产生的剩余污泥. 剩余污泥中还有部分可利用的化学能和生物能, 通过一定的处理工艺(如污泥消化), 可转化为可用的化学能(如沼气)或热能. 注意到输入系统中的电能和其他形式的能量本身并不转化为产物和副产物的一部分, 而仅创造生化反应进行的必要条件, 其有用部分在反应器内消耗, 为分析方便, 仍将其视为离开装置的能量, 图 1 中用带斜线的箭头表示. 以曝气池为例, 输入的电能转化为两部分: 一部分是混合与充氧需要的有效能 $E_{\text{有效能}}$, 另一部分是损失的热和功, 构成 $E_{\text{散失}}$ 的另一部分. 工质所含能量的有用部分包括 $E_{\text{产物}}$ 和 $E_{\text{有用物}}$, 加上 $E_{\text{有效能}}$, 是处理过程所获得的有效的能量输出, 属于能量 $E_{\text{有用}}$; 其余的能量, 包括无用副产物具有的能量 $E_{\text{无用物}}$ 、反应过程中散失的能量 $E_{\text{散失}}$, 最终废弃到环境中, 即为 $E_{\text{废弃}}$. 若反应器或系统是连续稳定生产的, 即在活性污泥系统内连续进出水、连续排放新增的污泥; 在生物膜反应器中新增的膜细胞物质不断被冲刷出系统, 不形成积累, 则 $E_{\text{贮存}} = 0$, 那么对生物反应器系统列能量平衡方程, 有

$$\Sigma E^+ = \Sigma E^- + E_{\text{贮存}} \quad (1)$$

由于 $E_{\text{贮存}} = 0$, 则有

$$\Sigma E^+ = \Sigma E^- = \Delta E_{\text{有用}} + \Delta E_{\text{废弃}} \quad (2)$$

式(2)说明输入系统总的能量由可用部分和无用部分构成, 在能量利用过程中总存在耗散, 节约能耗的主要方式是尽可能地增加 $E_{\text{有用}}$ 的数量而减少 $E_{\text{废弃}}$ 的数量.

3 能量平衡的技术指标

能量平衡的技术指标用以衡量处理厂(设备)能耗的高低. 本文参照其他行业的耗能评价标准^[4], 采用两类技术指标来反映处理厂的能耗水平.

3.1 比能耗

定义为去除单位污染物所消耗的某种能量或各种能量的数量,可按下式计算:

$$\text{单位产品能耗} = \text{某种能耗总量(或总综合能耗量)} / \text{去除的污染物量} \quad (3)$$

某种能是指某种一次能源(煤、石油、天然气等)或某种二次能源(电、煤气等);总综合能耗为各处理单元消耗的各种能量的总和,故比能耗的单位为 kJ/kg(BOD) 、 $\text{kW}\cdot\text{h/kg(BOD)}$ 或 kJ/kg(COD) 和 $\text{kW}\cdot\text{h/kg(COD)}$ 。在污染物浓度一定时,比能耗还可用单位污水量表示为 kJ/m^3 或 $\text{kW}\cdot\text{h/m}^3$ 。

比能耗具有计算简单,直观性强的优点,可基于相同工艺、类似水质进行概略性比较,有一定的实用价值。但它不能揭示能耗发生的内在原因和能源利用效率。

3.2 利用率和回收率

利用率和回收率是石油、化工等行业以及热设备常用的能量平衡技术指标^[5]。如果以输入生物处理单元的全部能量(包括工质带入、外界供给的能量以及回收利用的能量)为基础作全入能量平衡,则处理单元的能源利用率可用下式表示:

$$\text{处理单元能源利用率} = \frac{\text{总有效能}}{\text{全入能}} = \frac{\text{总有效能}}{\text{工质带入能} + \text{外界供给能} + \text{回收利用能}} \quad (4)$$

$$\text{式中} \quad \text{总有效能} = \text{工艺有效能} + \text{回收利用能} + \text{输出能} \quad (5)$$

按照化工行业的定义,工艺有效能是指完成产品生产理论上所应消耗的能量。对污水二级处理而言,要获得一定能级的出水,理论上微生物可利用的能量就是进水中可生物降解的污染物的化学能,实际利用部分为 $(E_{\text{原料(污染物)}} - E_{\text{产物}})$,由于剩余污泥中还包含有可能对环境造成危害的能量,所以有效降低的能量为 $(E_{\text{原料(污染物)}} - E_{\text{产物}} - E_{\text{副产物}})$ 。这部分能量是完成特定的产品生产,理论上需要转化的能量,将其作为工艺有效能较符合污水生物处理能量削减过程的特点。回收利用能指工艺过程产能回用于生产的能量,如沼气燃烧用于消化池加热、或推动汽轮机发电等。输出能是指外供的能量,如沼气发电除满足本处理厂需要外,外供入电网的电量。

回收率是反映处理厂由于能量回收带来的节能效果的指标,可用下式表示:

$$\text{处理厂能源回收率} = \text{回收利用的总有效能} / \text{全入能} \quad (6)$$

利用率指标可从能量利用角度评价污水处理工艺的参数,由于将工质本身的能量和外界供给体系的能量整合在同一表达式中,同时兼顾了能量的回收,故相对于比能耗指标具有更好的可比性。

基于前述模型,本文对国内4座城市污水处理厂的生物处理单元进行了能量衡算和评价分析。这4座污水处理厂采用不同的二级处理工艺,建成运转均在两年以上,有较为可靠的运行水质和能耗纪录。在以下讨论中,能量分析边界为曝气池和二沉池组成的二级生物处理系统。

4 各污水处理厂简况

污水处理厂A处理水量约 $6500 \text{ m}^3/\text{d}$ 。生物处理部分采用完全混合合建式曝气沉淀池工艺,污泥无消化设施,经浓缩后直接压滤脱水。曝气充氧设备为泵(E)型叶轮表面曝气机。目前采用连续进出水间歇曝气的运行方式,即曝气2~3h,停曝2~3h,依次交替。依靠曝气机的提升力实现污泥回流,剩余污泥静压排放。

污水处理厂B处理水量 $1.5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。二级处理部分采用一体化氧化沟工艺,泥水分离部分与氧化沟合建。剩余污泥不消化,直接浓缩后过滤。氧化沟曝气充氧设备为转刷曝气器。剩余污泥直接从氧化沟排入浓缩池。

污水处理厂C处理水量约 $5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。采用AB工艺。曝气设备为NOPOL微孔曝气头,供氧采用4台电动鼓风机和1台沼气鼓风机。剩余污泥由中间沉淀池和最终沉淀池排出,经预浓缩后进消化池。消化后污泥浓缩后压滤脱水。目前消化池按常温运行,所产沼气用于带动沼气鼓风机和厂区民用。

污水处理厂D处理水量为 $6 \sim 9 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。采用传统活性污泥法,曝气池为内循环推流反应池。曝气系统采用射流喷射器,属于微——中气泡系统。供氧采用5台罗茨鼓风机,备用两台。由于处理水量小于原设计规模,鼓风机轮切换间歇运行。剩余污泥由二沉池排出,经预浓缩——消化——后浓缩,最后压滤脱水。

5 污水厂二级处理单元能量平衡

各处理厂进出二级生物处理系统边界的水质指标和能量指标均采用 1998、1999 年夏季 1 个月的平均值, 如表 1 所示.

表 1 污水厂二级处理系统进出物流与能流汇总

Table 1 Recapitulation on matter flow and energy flow of secondary treatment systems

处理厂	流量, m ³ /d	COD _{Cr} , mg/L		剩余污泥		电耗, kW·h/d	
		进水	出水	产量, kg/d	干污泥有机物含量, %	曝气系统	其它 ²
A	6750	177	38	530	30	420	—
B	15400	342	100	520	58	5760	—
C	46588	104 ¹	26	1450 ¹	50	3640	1412
D	84133	89.75	26.67	2420	60	3480	4260.3

1. 为 B 段数值; 2. 包括回流污泥泵、剩余污泥泵电耗, 以及搅拌混合设备电耗

5.1 能量分析的前提和假设

在进行能量衡算和平衡时, 基础参数取值为:

1) 污染物的能量 污水中污染物的能量采用 COD_{Cr} 指标换算, 即 13.94 kJ/g(COD)^[2]. 污泥中微生物细胞所包含的能量, 一般认为有机干物质热值低限在 18 和 26 kJ/g(ODS) 之间, 本文采用 21 kJ/g(ODS)^[6].

2) 二次能源的等价热量 在进行能源衡算时, 以一次能源作为基准. 二次能源及耗能工质按等价热量折算成一次能源计算, 此折算系数即是等价热量. 换言之, 等价热量就是为获得单位二次能源(或载能工质) 所实际消耗的一次能源量. 污水处理系统中, 电是最主要的二次能源. 目前, 我国生产 1 kW·h 电约需消耗 0.35 ~ 0.44 kg(标准煤)^[4]. 按 1 kg 标准煤的低位发热量 29.27 MJ 计, 相当于消耗 10.24 ~ 12.89 MJ 热量. 1998 年, 我国火电厂供电煤耗为 0.412 kg(标准煤)/(kW·h)^[7], 换算成等价热为 12059 kJ.

5.2 能量结构分析和能流图

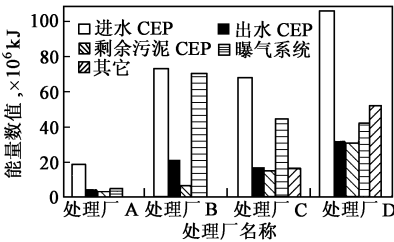


图 2 各处理厂二级生物处理单元能量结构

Fig. 2 Energy components in secondary biological treatment unit of the four facilities

5.2.1 能量结构分析 进出二级生物处理系统的各类能值详见图 2. 由图 2 中可见, 从绝对量来看, 处理厂 D 进水污染物带入的能量最高. 处理厂 C 为 AB 工艺, A 段包括曝气沉砂和 A 段曝气池, 所排出的污泥既无机砂粒和固体, 又有剩余污泥, 难于准确计量微生物的产量, 故仅考虑 B 段的情况. 厂 A 和厂 B 外界供给生物处理系统的能量主要消耗于曝气供气系统; 厂 C 和厂 D 除部分电能消耗于曝气系统外, 还有部分电能用于污泥回流、混合液回流、剩余污泥排放等操作, 这一差别与各厂所采用的工艺和系统配置有关, 设计中如能利用地形等条件减少耗能设备需求, 也能降低不少能耗. 厂 D 的这部分能耗甚至超过了曝气系统. 究其原因, 处理量不能达到设计要求, 曝气系统虽然可以通过间歇运转节省一部分能量, 但其余设施在设计阶段未充分考虑可调和灵活性, 运转后难于根据实

际情况调整, 致使这部分能耗过高. 各厂剩余污泥所带出的能量, 与其工艺的污泥表观产率有关, 综合来看, 氧化沟工艺的污泥产率最低, 如不考虑 AB 工艺的 A 段产泥量, 传统活性污泥法最高. 这一因素对处理厂能耗的影响, 将在下文讨论.

5.2.2 能流图 按照前文提出的方式, 可绘制各处理厂二级生物处理单元的能流图, 详见图 3.

在各能流图中, 处理厂输入输出二级处理单元的能量按同等比例绘制, 工质的能量用白色箭头表示; 外界输入的能量用黑色箭头表示, 两者箭头的宽度代表能值大小, 回收利用的能量作为外界供给的能量输入时, 用带斜线的箭头表示.

常规二级处理对剩余污泥并无严格的处理要求,但污泥中包含可污染环境的能量,因此在进行二级处理单元的能量分析时,工艺有效能中考虑扣除剩余污泥含能;若进行全厂的能量分析,则应以最后出厂的污泥含能为准.直观地看,二级生物处理单元的有效利用能为 $E_{\text{进水}} - E_{\text{出水}} - E_{\text{剩余污泥}}$,即等于 $E_{\text{散失}}$.则存在影响工艺选择的两类情况:一是不进行污泥的稳定化处理,以减少投资的情况,这时希望污泥的产量尽量少,即尽可能通过微生物代谢将能量作为热和功散失,在这一前提下,氧化沟工艺比传统工艺具有特定的优势,污泥量少、稳定程度高,既可节省投资,又可减轻环境危害;二是污泥进行厌氧或好氧处理稳定化.除污水提升泵站外,污泥处理是仅次于污水生物处理的高耗能工段^[1,8],这部分内容虽不在本文的讨论范围,但可以肯定,增进该工序的能量回收(Energy Recovery)是减少二级处理工艺耗能的重要手段,也是设计和技术经济比较需重点考虑的因素.从图 3(c)和图 3(d)可以看出,污泥处理回收的能量代替了部分电能的输入,使得 C 厂的电耗比例降低.

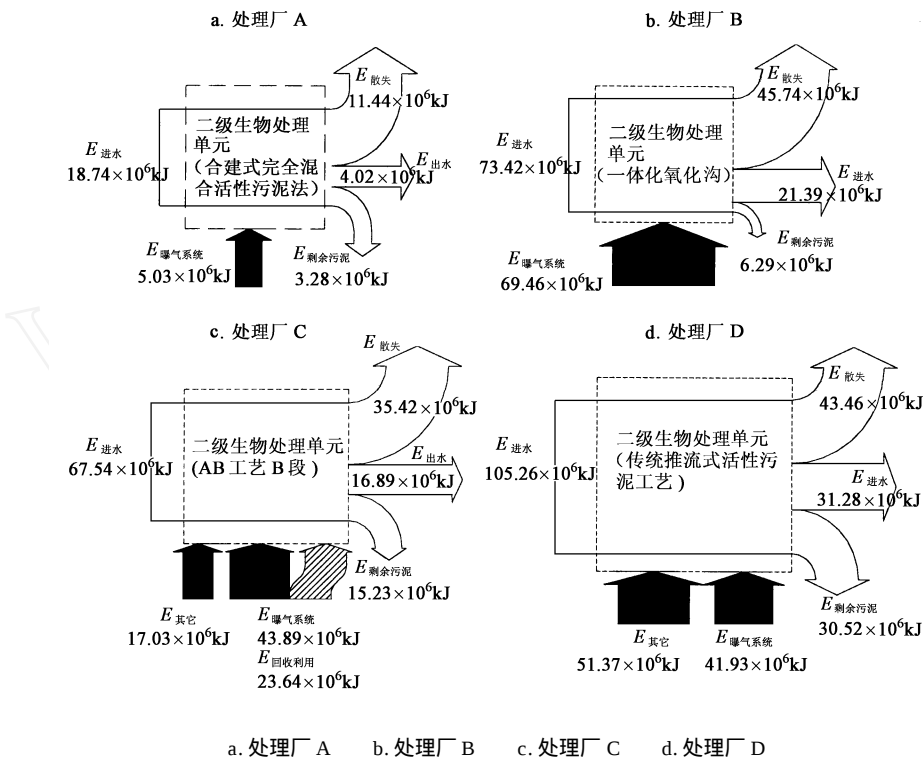


图 3 处理厂能流图

Fig. 3 Energy flow diagram for the facility

5.3 能量平衡技术指标比较

能量平衡的技术指标汇总于表 2 中. 能量利用率指标与比能耗指标的对比见图 4.

参照图 4, 可得到以下几点认识:

1) 比能耗指标与能量利用率指标在趋势上虽然有一定的对应关系, 但比能耗指标不能反映能量回收对总能耗的影响. 图中为方便各厂比较, 处理厂 C 的比能耗指标是按电能实际消耗, 即不包含回收沼气转化的能量来折算的. 比能耗指标的

表 2 能量技术指标汇总

Table 2 Recapitulation of energy technic index			
处理厂	能量利用率 %	回收率 %	比能耗 kW·h/kg(COD)
A	48.10	0	0.39
B	32.01	0	1.54
C	38.83	15.04	0.85
D	21.89	0	1.46

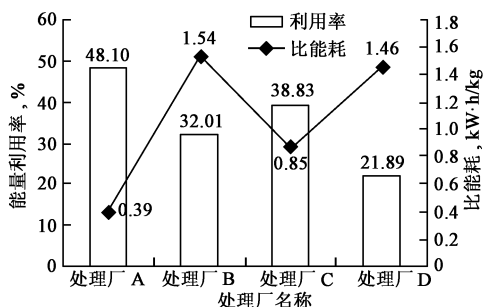


图4 各处理厂能量利用率与比能耗指标对比

Fig. 4 Comparison between energy utilization efficiency and specific energy consuming index of the four facilities

向对比中是最高的. 另外, 厂 C 由于沼气回用于曝气系统, 使外界供给的总能量有所降低, 这种方式也是污水厂提高能量利用率的有效途径.

6 结语

本文依据热力学原理提出的污水处理单元能量平衡分析的方法, 可用于处理工艺的设计遴选和建成后运转效益的评判; 能量利用率指标较之比能耗指标更为客观和严密, 它与水质指标相互参照, 对推动高效、低耗的工艺的研究以及现有污水厂节能降耗的技术改造有一定的指导作用.

参考文献:

- [1] 高旭. 合建式完全混合活性污泥工艺的节能技术研究[D]. (学位论文) 重庆建筑大学, 1999
- [2] Owen B W F (章北平, 车武译). 污水处理能耗与能效[M]. 北京: 能源出版社, 1989
- [3] Kordes. Berechnung der Energiebilanz von Kläranlagen unter Berücksichtigung zeitlicher Schwankungen[D]. Dissertation für Doktor-Ingenieurs, Universität Karlsruhe, Schriftenreihe des ISWW Karlsruhe
- [4] 张润霞, 肖继昌. 企业热平衡与节能技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993
- [5] 叶大均. 能源概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990
- [6] Gniodorsch L. Die Optimierung der Schlammverbrennung im Hinblick auf die Energiebilanz, Berichte aus Wassergewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen[R]. Bd. 28, S. 279—308, München 1980
- [7] 陈和平, 周晔. 我国中长期节能目标及行动方案探讨[J]. 中国能源, 1999, 8
- [8] Robert M. Hagen. Energy requirements for wastewater treatment (Part 2) [J]. Water & Sewage Works, December, 1976. 52—57

定义不能给出合理的算法, 而在能量利用率的表达式中, 回收的能量作为一项重要变量已内含于公式. 因而在物理意义上, 比能耗指标不如能量利用率指标严密.

2) 处理厂 B 的比能耗指标最高, 而能量利用率指标却高于处理厂 D. 这是因为能量利用率指标考虑了剩余污泥处理可能需要的能量投入, 在表达式中减去了 $E_{\text{剩余污泥}}$ 项. 故对氧化沟这类产泥少、污泥稳定程度高的污水生物处理单元, 用比能耗指标就难以判断该工序耗能 with 污泥处理工序耗能的内在联系, 而能量利用率则可给出较为客观的、可靠的用能效率评价.

3) 对于厂 D 这类进水水质大大低于设计预计的处理厂, 改革运转方式是重要的节能途径. 处理厂 A 也长期运行在低浓度进水条件下, 实施连续进水间歇曝气的运转方式后, 节能效果明显. 其能量利用率在与 B、C 和 D 厂的横