

述评与讨论

污水碳中和运行潜能分析

郝晓地, 方晓敏, 李季, 江瀚

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中—荷污水处理
技术研发中心, 北京 100044)

摘要: 污水中含有有机物(COD)化学能和余温热能,但这种潜能一直不被重视。计算表明,污水所含化学能、热能理论值虽然前者小于后者,但相差倍数(3.0)不大,取决于进水COD浓度。然而,COD化学能在能量转化过程中有相当一部分并不能回收或受限于能量转化效率而不能全部转化。对某实际污水处理厂(COD=400 mg/L)潜能转化计算显示,污泥厌氧消化产甲烷(CH_4)后实施热电联产(CHP)可转化的化学能折算电当量仅为 $0.20 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,只能满足实际运行耗能($0.37 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$)的53.2%。因水源热泵可转换热能(全部出水,4℃温差) $1.77 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ (供热)和 $1.18 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ (制冷),所以,只用不到15%的出水量(供热9.8%、制冷14.7%)即可弥补46.8%的碳中和运行赤字能量。总之,实例厂供热时出水热能与化学能所占总潜能值比例分别为90%和10%;折算电当量后,总潜能值为 $1.97 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

关键词: 污水潜能; 有机物化学能; 余温热能; 剩余污泥; 厌氧消化; 水源热泵

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)10-0011-06

Analysis of Potential in Carbon-neutral Operation of WWTPs

HAO Xiao-di, FANG Xiao-min, LI Ji, JIANG Han

(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The chemical/organic and thermal energy potentials existed in wastewater are not paid much attention. Calculation results indicate that the theoretical chemical energy is 3.0 times smaller than the thermal energy. This relatively little discrepancy depends on the influent COD concentration. However, the chemical energy of COD could not be fully recovered due to the efficiency of energy transformation. Further calculations on a real WWTP (COD=400 mg/L) demonstrate that anaerobic digestion (AD) associated with combined heat and power (CHP) could merely generate $0.20 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, which could meet the need of 53.2% of the practical energy consumption of $0.37 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$. In practice, water source heat pump (WSHP) could convert thermal energy (4℃ temperature difference) for heating with $1.77 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ and for cooling with $1.18 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, respectively. Therefore, only less than 15% of the amount of water (heating 9.8%, refrigeration 14.7%) can make up for 46.8% of the deficit

energy from carbon neutralization. Overall, the chemical and thermal energies in the case study plant for heating take the shares at respectively 90% and 10% in the total energy potentials; the total converted electrical equivalent is at $1.97 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$.

Key words: energy potentials in wastewater; chemical energy in organics; residual thermal energy; excess sludge; anaerobic digestion; water source heat pump

污水作为资源与能源的载体越来越受到人们的广泛关注。特别是在《巴黎气候协定》签署与实施之后,开发利用其中蕴含的化学能(COD)和热能(余温)则显得非常重要,这有助于污水处理实现碳中和运行。

众所周知,污水中有机物(COD)实际上是一种含能物质,含有大量化学能^[1]。与其将COD“以能消能”方式去除,不如尽可能转化为能源物质(如甲烷)加以利用,反哺污水处理厂运行,直至逼近碳中和运行目标^[2]。这样就可以大大减少对外部能源(化石燃料)的消耗,减少因发电而间接产生的碳(CO_2)排放。

城市生活过程向污水中输入大量热量使其温度往往比环境温度高(冬季)或低(夏季)。污水余温一般在 30°C 以下,但蕴含的热量却很大。污水余温废热约占城市总废热排放量的40%^[3];且因四季温差变化不大、流量稳定而具有冬暖夏凉的特点。所以,污水余温比较适合通过水源热泵交换回收,是一种可以利用的清洁能源^[4]。

有关污水化学能与热能计算显示,城市污水中所蕴含的潜能(化学能+热能)值可达污水处理耗能的9~10倍^[5]。同时也有人指出,城市污水中化学能约占总潜能值的10%,而90%的污水潜能由热量产生;美国原污水中废热和化学能含量约为 $1\,500 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,其中80%为废热,20%为化学能。McCarty等人计算得到理论最大有机化学能为 $1.93 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ($\text{COD} = 500 \text{ mg}/\text{L}$),热能理论最大值为 $7.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ($\Delta t = 6^\circ\text{C}$)^[6];也有以单位COD计算得到的理论化学能,为 $17.8 \sim 28.7 \text{ kJ}/\text{gCOD}$ ^[6,7]。然而,这些被定量的污水潜能值在文献中很难找到具体的估算方法,对大多数人来说还是一个比较模糊的估计值,仍属于“定性”范围。

为详细说明和计算污水潜能值,通过能量平衡与计算模型,分别计算污水中蕴含的化学能与热能含量,以诠释污水潜能的蕴藏量以及可以回收利用的价值。

1 污水潜能理论计算

1.1 热能计算

污水处理厂出水流量、水质一般较为稳定,且水温变化不大,夏季在 $20 \sim 24^\circ\text{C}$ 之间(低于空气环境温度),冬季处于 $10 \sim 15^\circ\text{C}$ 范围(高于空气环境温度)。因此,非常适合应用水源热泵工程。城市污水中所赋存的理论冷/热量可用下式计算^[8]。

$$A = M \times \Delta t \times C \quad (1)$$

式中 A ——城市污水冷/热量, kJ

M ——污水质量, kg

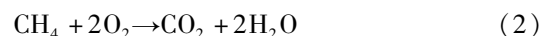
Δt ——污水进、出水水源热泵机组温差, $^\circ\text{C}$

C ——污水比热容,取 $4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

若取污水温差 $\Delta t = 4^\circ\text{C}$,则污水中所含理论热能值为 $4.64 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,与McCarty等^[6]计算的 $7.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 相近($\Delta t = 6^\circ\text{C}$)。

1.2 化学能计算

化学能评估大都基于生活污水所含有有机物COD值,以两种方式表征:①单位COD含能值(kJ/gCOD);②单位水量化学潜能值,并转化为电当量值来表征($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$)^[9]。两种表征方法本质上一致,仅与进水参数(COD)相关。污水有机物最大理论化学潜能值是指污水所含COD全部提取(不含微生物分解)并转化为甲烷(CH_4)的能量值,且不考虑转化过程的实际能量损失。所含化学能可按 CH_4 氧化计量方程计算,见下式:



根据相关热力学参数 $\Delta_f H(\text{CH}_4) = -74.81 \text{ kJ}/\text{mol}$, $\Delta_f H(\text{O}_2) = 0 \text{ kJ}/\text{mol}$, $\Delta_f H(\text{H}_2\text{O}) = -285.83 \text{ kJ}/\text{mol}$, $\Delta_f H(\text{CO}_2) = -393.51 \text{ kJ}/\text{mol}$,可以得到反应燃烧热 $\Delta_r H = -890.36 \text{ kJ}/\text{mol}$ 。根据上述 CH_4 氧化计量方程计算公式可知, 0.25 g CH_4 氧化需要消耗 1 g O_2 ;换句话说, 1 g COD 可以产生 0.25 g CH_4 ,即单位COD含化学能为 $13.9 \text{ kJ}/\text{gCOD}$;这个理论值与Shizas等^[5]计算相近,与Heidrich等^[7]计算的 $17.8 \sim 28.7 \text{ kJ}/\text{gCOD}$ 差别在于其考虑了COD可转化为热值更高的甲酸、草酸、乙炔、甲醛。据此,

COD = 400 mg/L 的污水理论最大化学潜能值为 $1.54 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, 与 McCarty 等人计算完全一致^[6]。

污水化学能取决于进水 COD 浓度, 而热能相对固定。不同 COD 浓度下热能 ($\Delta t = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$) 与化学能比值以及 1 m^3 污水所含理论最大化学潜能值计算结果如图 1 所示。其中, 当 COD = 400 mg/L 时, 热能与化学能的比值约为 3。

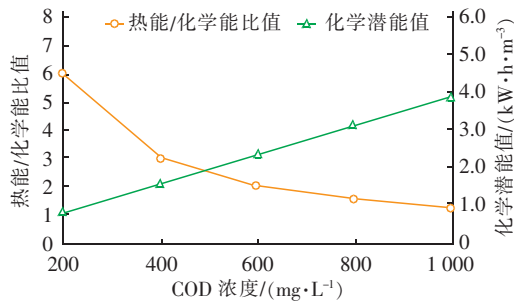


图1 不同 COD 浓度下污水热能与化学能比值以及 1 m^3 污水所含化学潜能理论值

Fig. 1 Ratios of heat/chemical energy and theoretical chemical energy potential per m^3 wastewater under different COD concentrations

2 污水处理厂潜能转化计算

上述计算结果显示, 污水中所含理论总潜能值 (COD = 400 mg/L, $\Delta t = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$) 为 $6.18 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, 这与一些专家指出的污水中蕴含的潜能可达处理能耗 (一般为 $0.5 \sim 0.7 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$) 的 9 ~ 10 倍相一致。因此, 一些学者误认为即使是单一的能量来源 (化学能 $1.54 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 或者热能 $4.64 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$) 就

能完全满足碳中和运行需求。事实上, 并非所有理论潜能都可以转化为可用电能, 上述计算仅表征了污水理论潜能值, 实际可获得化学能需以热电联产 (CHP) 方式进行转化计算; 热能应通过水源热泵转化利用, 并以标准煤作为能量转化介质进行转化计算。

2.1 化学能转化计算

不同污水处理工艺因运行工况和所需设备不同导致处理过程耗能以及最终可回收的能量存在一定差异。本研究以目前包括脱氮除磷在内而广泛使用的 A^2/O 工艺作为蓝本, 根据之前已构建的能量转化物料平衡^[2], 参考图 2 所示的流程编号建立计算公式。假设污泥厌氧消化产生的沼气以热电联产 (CHP) 方式利用, 并以此计算化学能转化值, 主要计算公式列于表 1^[2,10]。其中, 能量消耗定义为正, 能量回收为负。

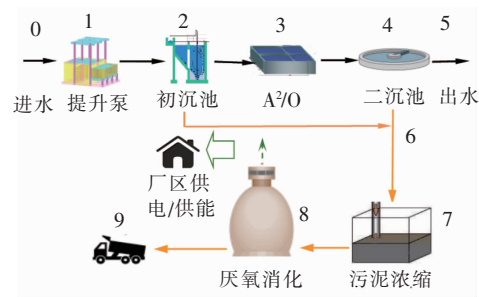


图2 化学能转化模型参考工艺流程

Fig. 2 Related process for the model of chemical energy conversion

表1 化学能转化计算公式形式

Tab. 1 Calculating formula of chemical energy conversion

项 目	理论能量消耗或回收	实际能量消耗或回收	备注
消化池 (加热)	$+cpQ_{7-8} \times (35 - T_0) \times 10^{-3}$	$+I_1/\alpha$	c : 污泥比热容; p : 污泥密度; Q_{7-8} : 污泥浓缩池进泥量; α : 系数 (考虑池体散热和热交换效率); T_0 : 污泥温度; Q_{8-9} : 厌氧消化池进泥量; S_m : 消化池甲烷产量 (以 COD 计); η_1 : 消化池中 SCOD 实际降解率; η_2 : 热电联产效率; I_1 、 I_2 分别为消化池、热电联产理论能量消耗或回收。
热电联产	$-\frac{Q_{8-9} \cdot S_m}{64} \times 800 \times 1\,000$	$-I_2\eta_1\eta_2$	

2.2 热能转化计算

水源热泵总供热量/制冷量可用下式计算:

$$A_{\text{H/C}} = A \pm W \quad (3)$$

式中 $A_{\text{H/C}}$ ——热泵总供热量/制冷量 (下标 H/C 分别代表供热/制冷工况), kJ

W ——热泵所消耗电能对输出热能的贡献值
根据相关研究^[11,12], W 可利用水源热泵供热/

制冷系数 COP (表示输入 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电的热量, 可以产生多少 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 的热量, 无因次) 计算, 即 $A : W$:

$A_{\text{H/C}} = (\text{COP} \pm 1) : 1 : \text{COP}$ (供热时取“ $-$ ”, 制冷时取“ $+$ ”); 其中, COP 表征了水源热泵消耗电能转化热能的能力。式(3)中的“ \pm ”号选取根据不同目的而异。冬季供热时, 因水源热泵消耗电能向污水转化热能, 提高了输出热能值, 所以取“ $+$ ”; 夏季制冷

时,水源热泵消耗电能向污水转化热能为负,降低了输出热能值,因此取“-”。

3 案例计算与分析

污水实际可以获得的潜能与所处地域、选择工艺、处理规模有关。以具有地域代表性的北方城市北京为例,选择目前广泛采用的 A²/O 工艺,处理规模以大型污水厂为例,根据上述所列化学能、热能转

化公式计算污水厂实际能量转化潜能值。

3.1 案例污水处理厂概况

北京某市政污水处理厂采用 A²/O 工艺,处理规模为 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该厂全年平均进、出水水质以及相关运行参数列于表 2^[13]。初沉与剩余污泥经过厌氧消化稳定后脱水减量,厌氧消化池产生的沼气假设通过热电联产(CHP)加以利用。

表 2 案例污水处理厂水质及运行参数

Tab. 2 Influent and effluent characteristics and operational parameters of the case-study plant

项目	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		SCOD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		TKN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		$\text{NO}_3^- - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		外回流 比/%	内回流 比/%	曝气池 DO/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	厌氧消化污泥 停留时间/d
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水				
数值	400	42	312	0	37	5	0	13	5	1	100	150	2	20

3.2 化学能转化计算

根据已经建立的物料平衡模型^[2],物料衡算中不考虑污泥外回流和混合液内回流,忽略初沉池和二沉池排泥对水量的影响,并假定初沉池对 COD 截留不影响后续脱氮除磷效果,亦不考虑曝气池内 COD 挥发损失^[2],对案例污水厂进行物料衡算,得出厌氧消化池中甲烷产生量 $S_m = 23.64 \text{ kgCOD}/\text{m}^3$ 。

据此,再根据表 1 相关计算公式,对化学能转化进行计算。其中, $c = 4\,200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, $\rho = 1\,020 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\alpha = 0.8$, 污泥温度 $T_0 = 20 ^\circ\text{C}$ 。案例污水厂厌氧消化池设计进泥量为 $3\,000 \text{ m}^3/\text{d}$, $Q_{8-9} = Q_{7-8} = 3\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。因为在消化池中溶解性 COD (SCOD) 并不能完全被降解(我国 SCOD 在消化池中的平均降解率为 $0.6^{[2]}$),所以厌氧消化产沼气 CHP 效率取 $80\%^{[14]}$,最后可得出案例厂化学能转化计算结果,见表 3。

表 3 案例污水处理厂工艺化学能转化计算结果

Tab. 3 Calculated results of chemical energy conversion for the case-study plant $\text{kW} \cdot \text{h}$

项 目	理论能耗	实际能耗
消化池加热	+53 611	+66 945
热电联产	-246 111	-118 056

由表 3 可知,污泥厌氧消化产 CH_4 如果实施热电联产,所产生的能量远高于厌氧消化池加热所投入的能量,即,污泥厌氧消化确实是一种能量转化并输出的必要单元。产生的净能量也就是污水有机物在完成基本污染物去除功能(脱氮除磷兼 COD 去除)后所获得的实际化学能,可以抵消曝气、回流、消化池加热等环节的能耗,减少对外部能源的依赖。

3.3 热能转化计算

案例污水厂出水流量、水质均较为稳定;水温变化不大,夏季在 $20 \sim 24 ^\circ\text{C}$ 之间(低于空气环境温度),冬季处于 $10 \sim 15 ^\circ\text{C}$ 范围(高于空气环境温度)。因此,非常适合应用水源热泵。利用式(1),取用案例污水厂处理后的出水($60 \times 10^4 \text{ m}^3$),提取温差设定 $\Delta t = 4 ^\circ\text{C}^{[8]}$,则案例污水厂每天出水所含热量计算如下:

$$A = 1\,000 \times 60 \times 10^4 \times 4 \times 4.18 = 10.03 \times 10^9 \text{ kJ} \quad (4)$$

根据式(3)和 COP 定义得到热泵实际供热量/制冷量的变形计算公式,具体如下:

$$A_{\text{H/C实际}} = A \pm W = A \pm \frac{A}{\text{COP} \mp 1} \quad (5)$$

计算中,分别取热泵机组供热 COP 为 3.5、制冷 COP 为 4.8,利用式(4)、(5)以及能源换算关系(见表 4)^[15],可计算系统每单位出水可获取的热/冷量、系统供热、制冷时机组实际能耗^[16],结果见表 5。

表 4 能源换算关系

Tab. 4 Relationship of energy conversion

项 目	能量转换系数	煤耗/($\text{kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$)
煤炭	33.85 MJ/kg	—
电能	3.6 MJ/($\text{kW} \cdot \text{h}$)	0.074

表 5 水源热泵系统利用案例厂单位出水可产生的当量电量

Tab. 5 Equivalent electricity produced by heat pump in the case-study plant

项目	可获取热 (冷)量/ 10^9 kJ	当量电量/ ($\text{kW} \cdot \text{h}$)	机组能耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h}$)	净产能当量 电量/($\text{kW} \cdot \text{h}$)
供热	14.04	1 556 544	494 211	1 062 333
制冷	8.30	920 179	213 022	707 157

表5显示,水源热泵系统在供热工况下,每消耗494 211 kW·h电量可产生1 556 544 kW·h的电当量,热泵机组每天净产出电当量1 062 333 kW·h。在制冷工况下,每消耗213 022 kW·h电量,可产生920 179 kW·h电当量,热泵机组每天净产电当量707 157 kW·h。可见,案例污水厂如果采用水源热泵系统,节能与能量回收效果非常明显。

综上所述,将水源热泵系统从污水中获取的热能与污泥厌氧消化产CH₄后热电联产转化的化学能相比,热能显著高于化学能;供热时热能与化学能比值为1 062 333/118 056=9.0,制冷时热能与化学能的比值为707 157/118 056=6.0。

3.4 潜能评价与碳中和运行

为评价污水可获潜能与污水处理碳中和运行的可行性,将上述案例厂每天经转化可获得的潜能值与实际运行耗能^[2]进行比较,数据列于表6。其中,输入为正,输出为负。

表6 案例厂能耗及可获化学能

Tab.6 Energy consumption and converted chemical energy in the case-study plant kW·h

项 目	提升/回流泵	鼓风机	消化池加热	热电联产
电当量值	+40 833	+114 167	+66 945	-118 056

表6显示,案例厂实际运行时每天总能耗为221 945 kW·h。这表明,经热电联产产生的化学能只能满足该厂曝气、回流、厌氧池加热等主要耗能单元的53.2%,并不能涵盖全部运行能耗。但是,如果用水源热泵弥补46.8%的碳中和运行能量赤字,每天只需使用 5.9×10^4 m³ (供热时)和 8.8×10^4 m³ (制冷时)的出水,仅相当于 60×10^4 m³/d处理水量的9.8%和14.7%。也就是说,只需利用不足15%的出水热量即可弥补化学能在实现碳中和运行时的能量赤字。可见,污水余温所含能量之巨大,85%的热/冷能可供厂外周边供热、制冷用户使用。

案例厂实际运行能耗为0.37 kW·h/m³;热电联产转化的化学能为0.20 kW·h/m³;供热/制冷时(全部出水)热能电当量分别为1.77 kW·h/m³和1.18 kW·h/m³。电当量折算表明,供热时化学能与热能潜能值合计为1.97 kW·h/m³,制冷时合计为1.38 kW·h/m³。

4 结语

污水有机物化学能与余温热能计算表明,污水中确实蕴含着巨大的潜在能量。污水所含化学能、

热能理论值虽然前者小于后者,但相差倍数不大,取决于进水COD浓度。如果进水COD=400 mg/L,与获取4℃余温差热量相比,热能约为化学能的3.0倍。

然而,有机物化学能在实际能量转化过程中有相当一部分不能回收(如COD氧化分解至CO₂部分,即分解)或散失(受限于能量转化效率)。实际案例计算表明,以水源热泵转化同样温差(4℃)热能实际可获取的热/冷量分别是污泥厌氧消化产甲烷(CH₄)后热电联产(CHP)可获得化学能的9.0倍(供热)和6.0倍(制冷),即,供热时污水热能与化学能所占污水总潜能的比例大约为90%和10%,与国际专家声称值(90%和10%)完全一致。

污水潜能折算电当量后显示,热电联产转化的化学能电当量为0.20 kW·h/m³,而供热、制冷时(全部出水)电当量分别为1.77 kW·h/m³和1.18 kW·h/m³。电当量折算表明,供热时化学能与热能潜能值合计为1.97 kW·h/m³,制冷时合计为1.38 kW·h/m³。

案例厂实际运行能耗为0.37 kW·h/m³,上述经转化后可获得的有机物化学能(0.20 kW·h/m³)仅能满足碳中和运行能量需求的53.2%。碳中和赤字能量(46.8%)利用不足15%(供热9.8%/制冷14.7%)的出水量中热能即可获得满足。

污水潜能计算结果预示着我国污水处理行业若要实现碳中和运行,仅靠有机物化学能是远远不够的,必须考虑利用其潜在、巨大的污水余温热能。诚然,污水热能是一种低品位能量,不可能用于发电,只能直接、近距离地进行热/冷量利用。这就需要市政热力规划进行全盘考虑,将污水处理厂大部分热能提取而供出厂外,用以交换自身碳中和运行赤字电量。

参考文献:

- [1] 郝晓地. 可持续污水—废物处理技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
Hao Xiaodi. Sustainable Treatment Technologies of Wastewater—Wastes[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2006(in Chinese).
- [2] 郝晓地,刘然彬,胡沅胜. 污水处理厂“碳中和”评价方法创建与案例分析[J]. 中国给水排水,2014,30(2):1-7.
Hao Xiaodi, Liu Ranbin, Hu Yuansheng. Creation of e-

- valuation method of "Carbon Neutral" for WWTPs and analysis of a practical case [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(2): 1-7 (in Chinese).
- [3] 朱爱平. 污水源热泵技术浅析[J]. *科技创新导报*, 2008, (24): 102-103.
- Zhu Aiping. A brief analysis of sewage source heat pump system[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2008, (24): 102-103 (in Chinese).
- [4] 丁晓妹, 李向阳. 城市污水热能的回收利用[J]. *甘肃科技*, 2010, 26(3): 74-75.
- Ding Xiaomei, Li Xiangyang. Recovery and utilization of urban sewage heat energy[J]. *Gansu Science and Technology*, 2010, 26(3): 74-75 (in Chinese).
- [5] Shizas I, Bagley D M. Experimental determination of energy content of unknown organics in municipal wastewater streams[J]. *J Energy Eng*, 2004, 130(2): 45-53.
- [6] McCarty P L, Jaehoo B, Jeonghwan K. Domestic wastewater treatment as a net energy producer - can this be achieved? [J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 45(17): 7100-7106.
- [7] Heidrich E S, Curtis T P, Dolfing J. Determination of the internal chemical energy of wastewater[J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 45(2): 827-832.
- [8] 尹军, 陈雷, 白莉. 城市污水再生及热能利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- Yin Jun, Chen Lei, Bai Li. *Recycle Water of Urban Sewage and Heat Energy Utilization Technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010 (in Chinese).
- [9] Khiewwijiit R, Temmink H, Rijnaarts H, *et al.* Energy and nutrient recovery for municipal wastewater treatment: How to design a feasible plant layout? [J]. *Environ Modell Softw*, 2015, 68: 156-165.
- [10] 王福浩, 李慧博, 陈晓华. 青岛麦岛污水处理厂的污泥中温消化和热电联产[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(2): 49-51.
- Wang Fuhao, Li Huibo, Chen Xiaohua. Mesophilic sludge digestion and heat and power co-generation in Qingdao Maidao WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(2): 49-51 (in Chinese).
- [11] Chao S, Jiang Y, Yang Y, *et al.* Experimental performance evaluation of a novel dry-expansion evaporator with defouling function in a wastewater source heat pump[J]. *Appl Energy*, 2012, 95: 202-209.
- [12] Meggers F, Leibundgut H. The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump[J]. *Energy Buildings*, 2011, 43(4): 879-886.
- [13] Hao X D, Liu R B, Huang X. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China[J]. *Water Res*, 2015, 87: 424-431.
- [14] Verstraete W, Vlaeminck S E. Zero wastewater: short-cycling of wastewater resources for sustainable cities of the future[J]. *Int J Sustain Dev World Ecol*, 2011, 18(3): 253-264.
- [15] 郝晓地, 黄鑫, 刘高杰, 等. 污水处理“碳中和”运行能耗赤字来源及潜能测算[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(20): 1-6.
- Hao Xiaodi, Huang Xin, Liu Gaojie, *et al.* Energy deficits and their potential replenishments of wastewater treatment operation towards carbon neutral [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(20): 1-6 (in Chinese).
- [16] 胡谦. 污水源热泵在长沙市的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- Hu Qian. *Study on Application of Sewage Source Heat Pump System in Changsha City* [D]. Changsha: Hunan University, 2013 (in Chinese).



作者简介: 郝晓地(1960-), 男, 山西柳林人, 教授, 从事市政与环境工程专业教学与科研工作, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术, 现为国际水协期刊《Water Research》区域主编(Editor)。

E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn

收稿日期: 2017-06-13