

述评与讨论

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.04.001

## 蓝色水工厂: 框架与技术

郝晓地<sup>1</sup>, 李季<sup>1</sup>, 吴远远<sup>2</sup>, 李爽<sup>2</sup>, 李伏京<sup>2</sup>, 王征戌<sup>2</sup>,  
蔡然<sup>2</sup>, Mark van Loosdrecht<sup>1,3</sup>

(1. 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; 2. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044; 3. 代尔夫特理工大学, 荷兰)

**摘要:** 在目前的环境压力下, 循环经济得到快速发展, 而强调纳入生态循环的蓝色发展则突显人类回归自然的属性。传统污水处理虽然是人类排泄物的“清道夫”, 但自身高能耗、高物耗且不回收其中的价值资源, 使其处于一种“不得不前行, 而又很难可持续”的尴尬境地。在蓝色发展指引下, 污水处理完全可以藉理念与技术转变为蓝色水工厂。蓝色水工厂强调营养物、生物材料、热/电和水回用等循环, 主要针对潜在环境压力涉及的两大问题——温室气体(需碳中和)和磷危机(要磷回收)。蓝色水工厂以被誉为下一代污水处理技术的好氧颗粒污泥为核心工艺, 干化焚烧被用作剩余污泥处理/处置方式, 强调回收各种价值资源/能源, 如前端纤维素、颗粒污泥高值类藻酸盐(ALE)、污泥焚烧电/热、焚烧灰分磷与金属等, 特别重视出水余热热能利用。蓝色水工厂在独特智慧控制模式下最终对环境可以实现“净零(Net-zero)”影响, 同时获得可观的经济效益。为此, 详述了蓝色水工厂之框架及相关技术。

**关键词:** 蓝色发展; 碳中和; 磷回收; 好氧颗粒污泥; 污泥焚烧; 余热热能

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)04-0001-11

## Blue Water Factories (BWFs): Framework and Technologies

HAO Xiao-di<sup>1</sup>, LI Ji<sup>1</sup>, WU Yuan-yuan<sup>2</sup>, LI Shuang<sup>2</sup>, LI Fu-jing<sup>2</sup>,  
WANG Zheng-shu<sup>2</sup>, CAI Ran<sup>2</sup>, VAN LOOSDRECHT Mark<sup>1,3</sup>

(1. 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; 2. Beijing Capital Eco-Pro Group Co. Ltd., Beijing 100044, China; 3. Delft University of Technology, the Netherlands)

**Abstract:** Increased environmental pressures have forced us to develop the circular economy. The blue development focusing on ecological cycles highlights the attribute of human beings going back to nature. Wastewater treatment is a kind of “scavenger” for our feces. However, high consumption of energy and chemical usage and little in valuable resources recovery makes it be in an embarrassing situation: “having to go ahead but being unsustainable”. Based on the blue development principles, appropriate ideas and technologies are required for the transformation of conventional activated sludge treatment

process into “blue water factories (BWFs)”. BWFs emphasize four sustainable cycles as nutrients, biomaterials, heat/power and water, focusing on alleviating two potential environmental stresses: greenhouse gases (carbon neutrality needed) and phosphorus crisis (phosphorus recovery required). BWFs take the next generation of wastewater treatment: aerobic granular sludge (AGS) as a key technology, and sludge drying and incineration are applied as the ultimate disposal for excess sludge. Valuable resource and energy is mainly recovered, such as celluloses from influent, highly valuable alginate-like extracellular (ALE) from AGS, heat and power from sludge incineration, phosphate & metals from incineration ash, and especially potential thermal energy from effluent. BWFs can not only realize the “Net-zero” impact on the total environment but also obtain a considerable economic benefit under the control of special smart system. The article introduced the framework and the key technologies associated with BWFs.

**Key words:** blue development; carbon neutrality; phosphorus recovery; aerobic granular sludge (AGS); sludge incineration; thermal energy

人类在享受现代文明的同时,对资源与能源的过量摄取以及对生态环境的破坏会摧毁赖以生存的星球。例如,人类对化石燃料的过度依赖与消耗已导致严重的温室效应,以至于全球共同签署了《巴黎气候协定》,试图控制本世纪气温上升幅度不超过2℃。为此,各国纷纷出台了碳中和路线图。与此同时,地球上的另外一种有限资源——磷(P)正以空前速度被消耗用以生产磷肥,以满足日益增长的世界人口对粮食生产的需求;由此引发的磷危机现象早已显现,磷矿资源将在50~100 a内被消耗殆尽<sup>[1]</sup>。可见,环境中碳排放与磷危机这两个不安定因素正严重威胁着人类的生存。

为此,各行业均应积极行动起来,以实际行动应对上述人类命运问题。对此,循环经济或者说是蓝色经济已经成为今后人类发展的必选模式,恢复和保持生态循环将促使人类从“以人为本”方式向“天人合一”模式转变。污水处理尽管是人类排泄物的“清道夫”,是水环境质量的“保护神”,但它却常常被冠上高能耗/物耗的帽子,特别是在传统污水处理方式下,除回用外并未考虑回收污水中的其他资源与能源,以至于被贴上“以能耗能、污染转嫁、浪费资源”的标签<sup>[2]</sup>。

在以活性污泥法为主流的100多年污水处理技术发展史中,先是以消除有机物(COD/BOD)为主要目的,随后又强调污水脱氮除磷,但都没有意识到这些污染物实际上是潜在的资源。结果,污水处理能耗不断攀升,且伴随的碳排放加剧了温室效应。

事实上,污水中的有机物是能源载体,所含氮、磷是作物生长必不可少的营养元素,污水也蕴含着丰富的余温热能<sup>[3]</sup>。因此,污水处理必须从“去除”观念转向“回收”理念;其中,资源、能源分离回收后,水也“顺便”得以净化,作为“副产品”进行回用。

基于此,以生态循环为目标的可持续污水处理技术势在必行。综合国际污水处理技术发展趋势,特别提出蓝色水工厂的框架以及相关技术,以落实“一个中心(可持续),两个基本点(碳中和与磷回收),最终全面变蓝色”的未来污水处理发展理念<sup>[4-5]</sup>。在此框架中,包括好氧颗粒污泥及其高值资源(类藻酸盐)回收技术、纤维素回收、污泥焚烧电/热与余温热能回收技术以及基于焚烧灰分提磷技术/金属回收生产混凝剂技术、碳核算乃至碳中和技术、以工艺数学模拟为核心的智慧控制技术等将被逐一介绍。最后,通过“3E”(能源平衡Energy、环境效益Environment与经济效益Economy)评价体系分析蓝色水工厂的综合效能,以奠定未来污水处理技术蓝色发展的雏形。

## 1 蓝色水工厂框架

蓝色水工厂基于生态循环理念,强调能耗低、药耗少、空间小处理技术,以回收污水中重要资源与能源为目标,将工艺过程智慧控制与碳中和甚至“负碳”运行作为发展方向。为此,蓝色水工厂首先进行进水中纤维素的回收<sup>[6-8]</sup>,核心处理工艺选择被誉为下一代污水处理技术的好氧颗粒污泥<sup>[9]</sup>及其高值类藻酸盐回收<sup>[10-12]</sup>,剩余污泥采用干化焚烧发电、

灰分磷回收等手段<sup>[4,13]</sup>,同时借助水源热泵提取出水余温热能,用于污泥干化并向厂内外供热/冷<sup>[3-4]</sup>。此外,回收灰分提磷时被分离的金属离子可与海水淡化卤水(阴离子)结合生产混凝剂<sup>[14]</sup>,最后,将“干净”的灰分用作建材(如水泥原料)。

蓝色水工厂采用以营养物、生物材料、热/电和水回用等4个循环为核心的蓝色工艺,其框架以及相应的工艺过程如图1所示。其中,所涉及的上述关键技术可具体分解为4个单元:①膜分离回收污水中纤维素;②好氧颗粒污泥工艺及其胞外聚合物(EPS)中高值类藻酸盐(ALE)物质回收;③污泥干化焚烧回收有机质能(电/热)及灰分提磷与金属利用(生产混凝剂);④水源热泵提取出水余温热能,用于干化污泥、供热/冷。在蓝色水工厂概念下,出水水质达标后可作为“副产品”加以回用。蓝色水工厂将建立以工艺过程模拟为核心的智慧控制系统来精准管理工艺过程,同时实现以碳中和为目标的低碳甚至“负碳”模式运行。

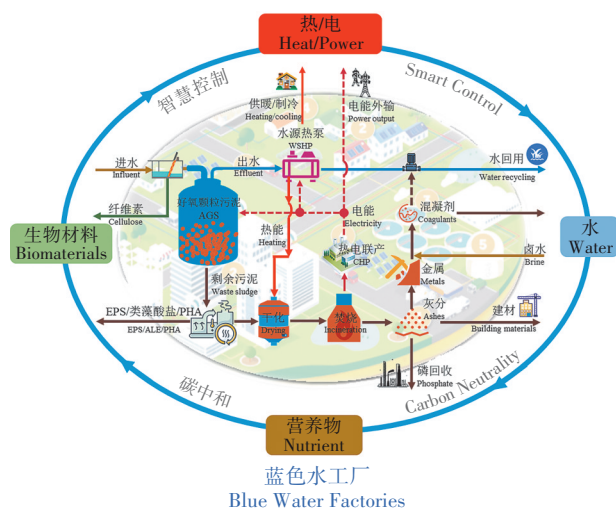


图1 蓝色水工厂框架及其相关技术

**Fig.1 Framework and associated key technologies of blue water factories**

蓝色水厂短期内着力解决当前污水处理提标改造、节能降耗、低碳运行问题,长远目标是开发未来可持续污水处理技术,助力新理念下污水处理厂实现“蛙跳”式转变,将其打造为资源、能源工厂。

## 2 核心技术/工艺

## 2.1 资源化预处理:纤维素回收

污水中的纤维素生物降解困难<sup>[7]</sup>,但若在生物处理前进行分离回收,不但可以作为一种可利用的

资源,还可节省后续生物处理曝气能量、提升处理负荷<sup>[6,8]</sup>。纤维素主要来源于厕纸,约占进水SS的35%、COD的20%~30%<sup>[7]</sup>。被回收的纤维素可用作沥青、混凝土添加材料,亦可用于制造玻璃纤维、包装箱等<sup>[8]</sup>,可产生一定的经济价值。污水纤维素回收非常简单,容易实现,可在沉砂池后安装筛网分离。例如,荷兰应用的旋转带式过滤机(RBF,筛网孔径约0.35 mm)可使被分离物中的纤维素含量高达79%,并成功用作沥青添加剂进行弹性步道铺设<sup>[15]</sup>。

## 2.2 生物处理及其高值资源化

### 2.2.1 好氧颗粒污泥技术

好氧颗粒污泥技术(AGS)因密实的生物量可以大大节省生物处理单元占地(为传统活性污泥法的1/4),即使加上预处理以及后处理流程,AGS也可节省50%的全流程占地<sup>[5]</sup>。此外,AGS在单一反应器内可以通过进水、曝气、排水等时间环节形成厌氧、缺氧、好氧环境,同时实现碳、氮、磷等的去除,运行能耗可节省30%,运行成本降低最高可达75%。因此,AGS被誉为下一代污水生物处理技术<sup>[5,9]</sup>。

好氧颗粒污泥与传统絮状污泥除在密实性上存在巨大差异外,两者的EPS成分及其含量也有很大不同,特别是类藻酸盐(ALE)含量<sup>[10-12]</sup>。作为一种高值生物合成材料,ALE在医药、纺织、印染、造纸、日化等领域都显示出良好的应用潜力和经济效益,特别是其良好的阻燃性能符合美国联邦航空条例(FAR)飞机内部阻燃材料的阻燃要求,可用作航空火箭、空间站涂层等高级环保防火材料<sup>[16]</sup>。

此外, AGS 高生物量为水处理过程中磷回收提供了便利条件, 可通过厌氧释磷上清液侧流磷回收方式回收磷, 又可相对提高生物处理 C/N 比<sup>[17]</sup>。

因此,AGS技术自2005年底于荷兰奶酪加工废水处理厂得到首次应用后<sup>[18]</sup>,在全球范围内很快掀起了研发热潮。到目前为止,AGS在全球工程应用案例已达70余例<sup>[9]</sup>,在我国的工程应用业已开始,且自主研发项目已经出现并开始应用<sup>[19]</sup>。显然,AGS技术对缺地新建或既有扩容的工业废水甚至市政污水处理都是一种具有极高吸引力的解决方案。

新建 AGS 污水处理厂可采用成熟的序批式 (SBR) 工艺, 设计多个反应器协同运行, 在时间上形成“连续”运行模式。既有污水厂亦可通过改造实现 AGS 的序批式运行。当然, 空间上连续流 AGS 工



艺工程化也不是没有可能,有关技术研发与验证工作正在进行中。然而,连续流反应器污泥颗粒化仍面临一些挑战,如:解耦絮状污泥与颗粒污泥停留时间问题;产生足够碳源强化聚磷菌(PAOs)富集;曝气与混合搅拌策略;絮状与颗粒污泥尺寸分布对传质扩散的影响;平衡不同微生物间的竞争<sup>[9]</sup>。

### 2.2.2 ALE的回收

AGS剩余污泥中ALE含量高达20%~35%VSS<sup>[20]</sup>(絮状污泥仅为9%~19%VSS<sup>[12]</sup>)。在图2所示的污水处理过程可回收物质中,ALE是一种非常值得回收的高值生物材料,它的性能可与大型海藻天然形成的藻酸盐媲美。ALE是污泥具有凝胶特性的重要结构,回收后可用作各类防水/防火材料、增稠剂、乳化剂、稳定剂、黏合剂、上浆剂、种子包衣等<sup>[5,21]</sup>。目前,荷兰已建设两座提取AGS中ALE的工厂,产品被命名为“Kaumera”(来自新西兰毛利语,“变色龙”之意)。目前ALE年产量已达400 t/a,且有望在2030年前突破85 000 t/a<sup>[22]</sup>。

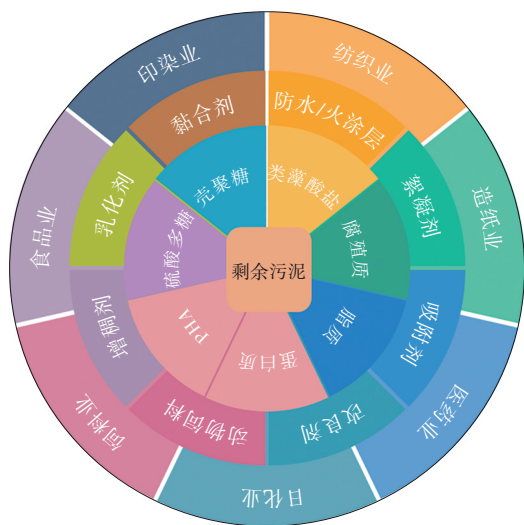


图2 污泥中可回收的高值生物材料/化学品

Fig.2 A glance of highly valued biomaterials and/or chemicals potentially recovered from excess sludge

## 2.3 污泥干化焚烧、磷回收及其他

### 2.3.1 污泥干化焚烧

实现有机质能最大化回收利用与剩余污泥终极处置目标——干化焚烧一致<sup>[3]</sup>,也是蓝色水工厂第三个强调的技术路径。这是因为传统污泥厌氧消化并热电联产(CHP)有机能源转化率很低,不到15%<sup>[23]</sup>,且消化后仍有50%~70%的污泥有机质需进

一步稳定处理,最终不得不进行焚烧处置。进言之,从热力学熵的角度,有机物一次性转化为甲烷( $\text{CH}_4$ )是一个熵增过程,不具可持续性<sup>[4]</sup>。

污泥直接干化焚烧在污泥稳定和能源回收等方面优势明显,已被评价为终极处理/处置方式<sup>[13]</sup>。污泥焚烧前需对机械脱水污泥(80%含水率)进一步脱水或干化,最好达到能自持燃烧的临界含水率(一般为50%~70%,取决于污泥有机质含量)<sup>[13]</sup>。当前最有效、便捷的手段是对脱水污泥进行热干化,但输入能源类型决定着污水处理是否可以实现低碳运行甚至碳中和。利用污水处理出水余热热能热交换产生的热源(50~60℃)对污泥进行低温干化不失为一种原位利用热能的有效方式,可行而又可靠<sup>[3,13]</sup>。建议以污水处理厂内分散干化、集中焚烧方式实施,从而将不能发电的低品位热能间接转化为可以发电的高品位热能(800~1 000℃)。

污泥高温焚烧后完全变为无机灰分,污泥体积可减至5%~10%,不含任何有机质与致病菌,可以去金属后提磷,最后用作建筑材料。至于焚烧过程产生的二噁英、氮氧化物和重金属等污染物,可采取“3T+E”策略得到控制<sup>[24]</sup>。

需要说明的是,污泥在焚烧前首先要对所含EPS中的ALE进行提取,也就是说有机高值资源回收应先于污泥焚烧。当然,这势必会降低污泥有机质含量,进而影响污泥自持燃烧。为此,可采取进一步降低污泥含水率或提高污泥燃烧热值的策略。例如,添加废弃锯末、粉碎秸秆等有机固废来改变污泥流变特性,以增强污泥疏水性,从而提高污泥脱水性能,同时增加污泥有机质含量。

### 2.3.2 焚烧灰分磷资源回收

为应对全球已经出现的磷危机,从污水或动物粪便中回收磷似乎是目前现实且可能的一种选择。因此,将污水脱氮除磷转向磷回收势在必行。磷回收的最早实践其实就是我国的粪尿返田(原生态文明),但是工业化引起的城市化使人类排泄物进入污水而难以再回归土地。结果,粪尿营养物回收不得不从污水处理过程中来实现,于是就有了几十年的欧洲污水磷回收理论与实践,并最早采取了剩余污泥返田的实践。然而,污泥返田因重金属以及其他污染物顾虑而被大多数国家禁用;对作物来说,关键是污泥肥效太低,农民根本不愿使用。因此,从污水处理过程中直接回收磷酸盐化合物并用作

化肥生产原料的研究与实践于20年前在欧洲开始盛行,并经历了几种磷回收位点的变化(见图3)。污水中的营养物回收一般仅强调磷回收,这是因为刻意从污水中回收氮并不比工业合成氨制造氮肥经济<sup>[25]</sup>。

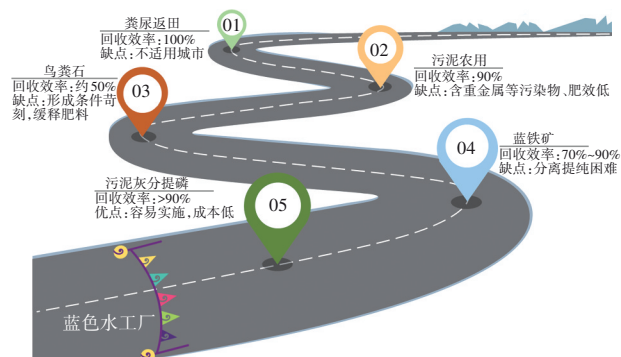


图3 污水磷回收方式演变

Fig.3 Evolution of phosphorus recovery from wastewater

从污水中回收磷最早聚焦于鸟粪石(MAP),因其折标 $P_2O_5$ 含磷量高达51.8%(不含结晶水),特别是最早报道碱性( $pH>8.5$ )条件下很容易形成鸟粪石。事实上,在高 $pH$ 条件下所形成的磷酸盐化合物中鸟粪石含量很低,只有在接近中性 $pH$ 下方能获得较为纯净的鸟粪石(含量 $>90\%$ )<sup>[26]</sup>。但是,中性 $pH$ 下鸟粪石形成速度极低,工程化代价很大;况且,下游化肥工业只在乎产物含磷量。所以,磷回收不应再聚焦鸟粪石,而应转向回收经济性更高的其他磷酸盐化合物<sup>[26]</sup>。

近年来,从厌氧消化污泥中回收蓝铁矿 $[Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O]$ ,不含结晶水折标 $P_2O_5$ 含磷量高达39.7%的研究开始在荷兰进行工程实践。但是,蓝铁矿形成先要有污泥厌氧消化系统,再就是要有足够铁源存在(前端使用铁混凝剂)<sup>[27]</sup>。此外,蓝铁矿与消化污泥的有效分离也是一个工程上广泛推广需要解决的技术难题<sup>[28-29]</sup>。特别是在干化焚烧被认为是污泥处理终极方式后,污泥厌氧消化前景难测<sup>[30]</sup>。

在此情形下,从污泥焚烧灰分中回收磷显得最为适宜,因为污水中约90%的磷负荷最后都在生物处理过程中转移至剩余污泥<sup>[30-31]</sup>;污泥焚烧灰分中磷含量占灰分质量的3.6%~13.1%(折标 $P_2O_5$ 为8.2%~30.0%),是潜在的“第二磷矿”<sup>[32]</sup>。进言之,焚烧灰分磷回收成本仅分别相当于从污水和污泥中回收磷成本的80%和24%,但磷回收效率却高达

90%<sup>[30]</sup>。因此,与污泥终极处置路径相一致的焚烧灰分磷回收应该是未来可持续污水处理的发展趋势。

### 2.3.3 焚烧灰分撇除金属利用

为获得相对纯净的磷产品,焚烧灰分化学提磷过程一般需要先分离所含金属离子( $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Pb$ 、 $Cr$ 、 $Cd$ 、 $Hg$ 、 $Al$ 、 $Fe$ 等)<sup>[33]</sup>,而被分离金属离子的最终处置也是一个必须面对的现实问题。与此同时,海水淡化正逐渐成为解决沿海、近海地区缺水问题的重要途径<sup>[5]</sup>。海水淡化副产物——卤水因生态问题一般不能再回流海洋,需要考虑资源化处置。卤水中被浓缩的阴离子( $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 等)似乎可与灰分提磷时被分离的金属离子( $Al^{3+}$ 、 $Fe^{3+}$ 等)配对结合,可制作污水处理使用的絮凝剂/混凝剂<sup>[14]</sup>。瑞典赫尔辛堡EasyMining工厂采用Ash®Phos技术处理30 000 t/a污泥焚烧灰分,实现了较高的 $P$ (90%~95%)、 $Al$ (60%~80%)和 $Fe$ (10%~20%)回收率,并获得相应的经济效益,运营收入/成本比例高达1.55<sup>[33]</sup>。如果将回收的 $Al$ 和 $Fe$ 与海水淡化卤水相结合,用于生产絮凝剂/混凝剂,其附加值显然还会翻番。

### 2.4 出水余热热能交换利用

与剩余污泥中有机能源相比,污水处理出水余热热能潜能巨大,详细测算表明,只需交换4℃温差便可获得 $1.77 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 的电当量,而在进水 $COD$ 为400 mg/L条件下完成脱氮除磷后产生的剩余污泥经厌氧消化并热电联产(CHP)最多能产生 $0.20 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 的电当量(能源转化率为13%)<sup>[3,34]</sup>。

分散式污水余热热能交换利用的实践应用较早,但这种楼宇管线原位热能利用方式的水量并不稳定且水源热泵易被腐蚀和堵塞,最大问题是冬季交换热量后流入污水处理厂的低温进水会严重影响生物处理效果<sup>[35]</sup>。因此,不应鼓励分散式在线热交换方式,应转变为污水处理出水集中式热交换并直接并入城市供热/冷网或原位干化污泥。这样不仅可以避免分散式热交换的缺点,而且可以降低水源热泵设备的投资。

目前,水源热泵产出的经济水温是50~60℃,属于低品位能源,不能发电,只能直接利用。因此,热/冷直接纳入市政热网是最佳利用方式。然而,因冬季较低的供热温度,决定了其供暖输热半径不能太大(3~5 km)<sup>[35]</sup>,这就需要寻求污水处理厂内部与周边有效输热范围内的潜在需热用户。例如,厂内除

办公楼宇有限供热量外还可以原位低温干化脱水污泥(80%含水率),亦可在北方寒冷地区的冬季加热进水;厂外寻找农业种植大棚/温室、养鱼塘、木材/食品干燥等用热场景<sup>[35]</sup>。有关余温热能集中供热方式在欧洲已有大规模实践,最成功的应用案例当属芬兰的Kakolanmäki污水处理厂,该厂仅利用61%的处理水量(平均处理水量 $Q=120\,000\text{ m}^3/\text{d}$ )就能使所在图尔库(Turku)市可再生能源供热比例从22%提高至30%(8℃温差二级热交换,占图尔库市供热量的14%)<sup>[36]</sup>。可见,出水余温热能利用不存在任何技术障碍,主要取决于政府规划以及健全的激励机制<sup>[35,37]</sup>。

## 2.5 副产品:再生水

与传统污水处理以出水回用为主不同,蓝色水工厂以回收污水中磷资源、生物材料及有机能与热能为主。在好氧颗粒污泥处理过程中完成脱氮除磷以及相应有机物去除后,出水得到净化,可以作为“副产品”回用。

## 2.6 碳足迹与碳中和

蓝色水工厂最高目标是尽可能降低处理过程的碳足迹并通过能量回收实现碳中和甚至是“负碳”运行。因此,首先需要建立适当的碳核算方法,以摸清污水处理“碳家底”,即,碳足迹。在此基础上,主要通过挖掘污水中的潜在有机能、热能来实现碳中和或“负碳”运行。

碳足迹模型构建需考虑污水厂全流程所释放的温室气体如 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ (见图4),包括直接碳排和间接碳排两部分,前者指非生源碳(化石碳)产生的 $\text{CO}_2$ 及生物处理过程形成的 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ (温室效应分别是 $\text{CO}_2$ 的28和265倍)<sup>[38]</sup>,后者是处理过程中化石能源消耗与药剂生产和运输产生的 $\text{CO}_2$ 。

污水中或污水处理厂内可挖掘的潜在能源除有机化学能与余温热能外,还可以通过光伏发电(PV)为污水处理提供清洁能源,这也是目前我国很多污水处理厂、给水厂正大规模实践的项目。然而,理论测算与实际运行均表明,污水处理厂光伏发电量只能提供不足10%的运行能耗<sup>[34]</sup>,比污泥厌氧消化并热电联产(CHP)产能(约50%的运行能耗)还低<sup>[3,34]</sup>。因此,蓝色水工厂能源回收并不建议采用光伏发电,毕竟它的生产、运输、废弃过程仍会产生大量碳排放。蓝色水工厂主要基于有机化学能和出水余温热能回收来建立能量平衡、碳中和/

“负碳”模型(见图4),需要指出的是,污水处理能量中和并不等于碳中和,因为存在 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 这两种温室气体<sup>[39]</sup>。

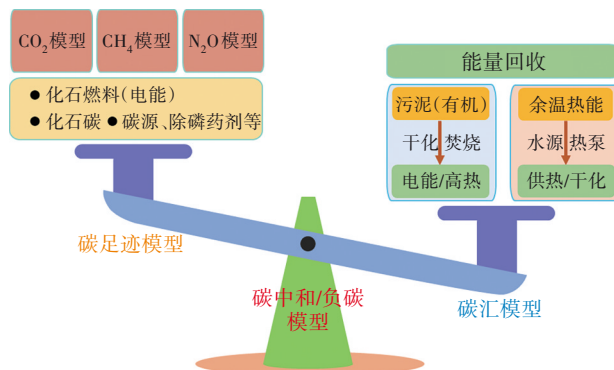


图4 碳足迹与碳中和模型构建

Fig.4 Establishing the models of carbon footprint and carbon neutrality

## 2.7 以模拟生物过程为核心的智慧控制

区别于设备自动控制、精确加药、精确曝气或者以信息化为特征的运营平台等数字智慧水务现状,蓝色水工厂智慧控制以生物处理工艺过程数学模拟来构建系统化方案为核心,形成自动化—信息化—智慧化于一体的智慧控制系统<sup>[40]</sup>。基于生物建模技术,以达标排放基础上的最大化节能降耗为目标,设计曝气决策控制、内外回流决策控制、药剂投加决策控制、排泥量决策控制等,并自动反馈操作系统及时调整运行工况。同时,实时进行工艺运行评估,并诊断各个处理单元效率以及限制因素,挖掘各单元潜力。蓝色水工厂智慧控制系统深度融合信息化技术、自动化技术以及污水处理厂生物处理技术,可实现污水处理数据资源化、管理精确化、控制智能化和决策智慧化(见图5)。



图5 基于工艺数学模拟技术的智慧控制系统

Fig.5 Smart control system based on modeling the process of wastewater treatment

数学模拟技术还可协助、规范取样点位及检测指标,建立全流程物料衡算、合理划分工艺单元计



算边界、进行静态与动态情景模拟及敏感性分析等;同时,帮助形成污水处理厂数据清洗、工艺健康度评估、决策支持以及工艺预警等模块,实现污水处理设备自控到工艺自控的跨越,实现即时反馈、即时处理机制,保证污水处理高效运行。

此外,蓝色水工厂智慧控制系统还可以进一步融入碳中和评价模型,基于智慧运行平台数据,进行深度学习,识别碳概念下最佳运行参数与工况,还可以辅助污水处理工艺设计方案,编制投资与运行成本优化方案,量化评估实时运行情况等。

### 3 “3E”评价

#### 3.1 能量平衡(Energy)

蓝色水工厂重点之一是通过发掘污水中蕴含的有机能与余温热能首先直接/间接实现运行能耗自给自足(能量平衡),继而将盈余能量用于碳中和甚至“负碳”运行。由于我国进水普遍较低的有机物浓度很难通过污泥厌氧消化并热电联产实现能量平衡<sup>[13]</sup>,所以,需要认真考虑出水余温热能利用以弥补能量赤字。出水提取4℃温差实际可以获得1.77 kW·h-eq/m<sup>3</sup>(热)电当量,只需使用约10%出水热交换便可满足50%能量平衡赤字<sup>[13]</sup>。

蓝色水工厂剩余污泥以干化焚烧为处置手段,有机能量转化率可达32%<sup>[3,23]</sup>。考虑到污泥焚烧前需要先回收高值ALE物质,导致污泥有机质含量下降,如,以回收污泥中15%VSS的ALE计算,焚烧前污泥剩余化学能理论潜能(进水COD为400 mg/L)将由1.54 kW·h/m<sup>3</sup>降低至1.31 kW·h/m<sup>3</sup>。在此基础上,污泥焚烧并热电联产可回收电能为0.42 kW·h/m<sup>3</sup>,可以满足0.37 kW·h/m<sup>3</sup>污水处理能耗并盈余0.05 kW·h/m<sup>3</sup>电量,再扣除约0.01 kW·h/m<sup>3</sup>污泥脱水能耗,最终可以输出电能0.04 kW·h/m<sup>3</sup>。这意味着,采用污泥焚烧便可以满足污水处理能量平衡需要。

蓝色水工厂考虑余温热能回收,单位水量理论热能值达到4.64 kW·h-eq/m<sup>3</sup>,扣除水源热泵效率等损失,实际可获热能值为1.77 kW·h-eq/m<sup>3</sup>(4℃温差)。若污泥产量按最大为0.2%计,即,1 m<sup>3</sup>污水可产生2.0 kg剩余污泥(含水率80%)。根据污泥自持燃烧含水率要求,剩余污泥提取ALE后污泥干化理论耗热量为0.93 kW·h-eq/m<sup>3</sup>,这意味着通过水源热泵提取的污水余温热能完全可以覆盖污泥干

化所需热能,且有相当盈余热能(0.84 kW·h-eq/m<sup>3</sup>)可以外输,进而弥补碳中和所需碳汇(抵消直接碳排放)。有机能与热能平衡总结见图6。图6揭示出污泥焚烧有机化学能回收与水源热泵余温热能回收相结合,完全可以实现污水处理厂能量平衡,且有盈余能量可以外输使用。

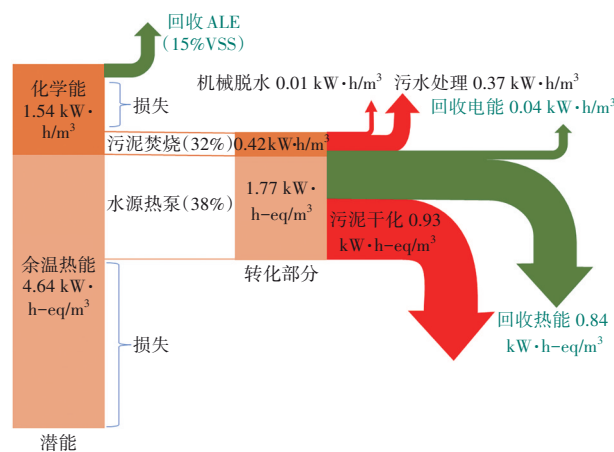


图6 蓝色水工厂能源回收能量平衡示意

Fig.6 Recovered energy balance in blue water factories

#### 3.2 环境效益(Environment)

蓝色水工厂的核心是纳入生态系统的循环经济模式,以实现污染物零排放和环境净零(Net-zero)影响为目标,涵盖零能耗、净零碳、零固废与零水耗等4个方面。

图6显示了通过污泥干化焚烧以及余温热能利用完全可以实现污水厂运行过程“零能耗”。通过建立碳足迹与碳中和核算模型对案例污水厂进行碳核算,结果(见图7)显示,有机化学能与余温热能利用在实现能量平衡后存在热量盈余,可以弥补运行过程产生的直接碳排放(化石碳CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>与N<sub>2</sub>O,合计0.45 kgCO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>)和药剂在生产、运输过程中产生的间接碳排放(0.1 kgCO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>)。图6显示的污泥焚烧剩余电能(0.04 kW·h/m<sup>3</sup>)与盈余出水余温热能(0.84 kW·h-eq/m<sup>3</sup>)实际上可看作一种平衡自身碳排放的“碳汇”。按照我国电力碳排因子取1.0 kgCO<sub>2</sub>-eq/(kW·h)计算,剩余电能和盈余热能的碳汇当量分别为0.04 kgCO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>和0.84 kgCO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>。结果,富余碳汇不仅可以弥补直接碳排与间接碳排放量,而且还盈余0.33 kgCO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>的碳汇量,这部分盈余的碳汇其实就是可以用于碳交易的“负碳”。

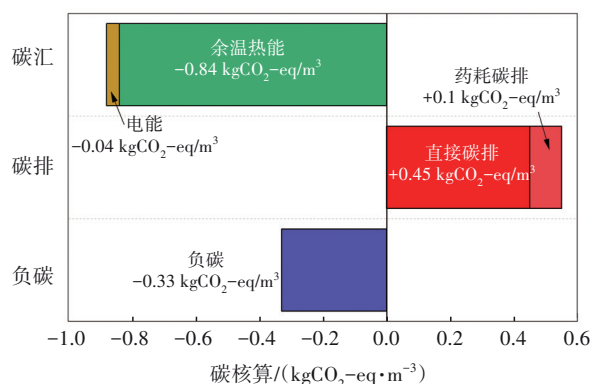


图7 蓝色水工厂碳平衡/中和评价

Fig.7 Carbon balance/neutrality evaluation of blue water factories

除可以实现零能耗、净零碳外,水回用还可以形成零水耗,污泥焚烧与资源回收利用亦可以实现零固废,最终可全面实现环境净零影响。此外,通过高值资源回收,蓝色水工厂还可以获得ALE等高值资源;磷回收可以缓解磷矿开采压力;能量回收可直接缓解化石能源消耗现状;纤维素回收、金属资源利用(混凝剂)、灰分利用(建材)等均会对环境产生积极影响。蓝色水工厂对环境产生的综合影响见图8。

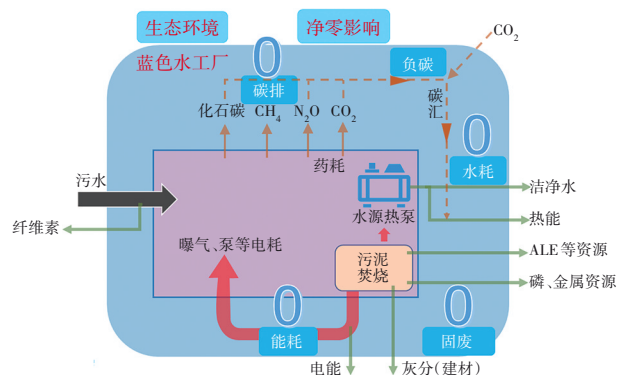


图8 蓝色水工厂环境净零影响评价

Fig.8 Impacting assessment of the environmental net-zero on blue water factories

### 3.3 经济效益(Economy)

蓝色水工厂通过回收污泥焚烧转化的化学能发电可供厂区电能消耗,余热热能用于低温干化污泥、实现碳中和与负碳;低碳高效的好氧颗粒污泥技术节能、降耗、节地;高值等资源回收可直接创造经济价值;智慧控制可以显著降低运营成本。为更清晰地展示蓝色水工厂运营经济效益,与传统活性污泥污水处理厂(CAS)进行了比较,具体结果如图9所示。

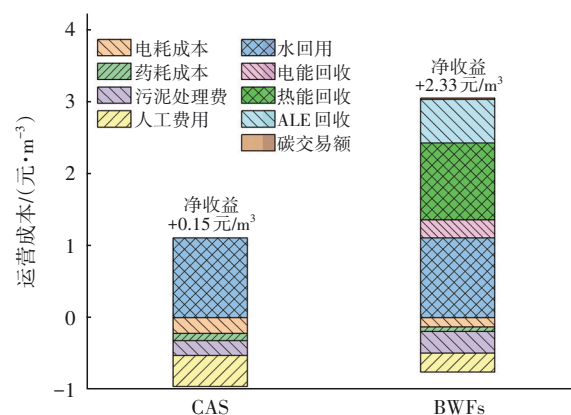


图9 蓝色水工厂与传统活性污泥处理厂运营成本比较

Fig.9 Comparison of operational expenses between blue water factories and conventional activated sludge plants

污水处理厂运行成本包括电耗、药耗、污泥处理/处置、人工工资、设备维护检修等方面。按照目前国家规定的工业用电收费标准[0.6元/(kW·h),不区分峰谷时段]估算,CAS工艺运行成本中电费约为0.22元/m³,药剂费为0.10元/m³,污泥处理/处置费用为0.20元/m³(约100元/t污泥,污泥含水率为80%),其他主要为人工工资和管理费用,约为0.43元/m³;CAS厂一般仅考虑出水回用,直接经济效益为1.10元/m³,最终CAS厂可获得约0.15元/m³的净利润。蓝色水工厂好氧颗粒污泥技术可降低运行成本(按最低30%计),前端纤维素回收与智慧控制措施降低运行成本约10%,最终污水的处理运营成本为0.45元/m³。蓝色水工厂资源与能源回收可获得的经济效益有多个方面,包括:

① 化学能与热能经济效益。按照电价为0.6元/(kW·h)折算,化学能与热能利用获得的经济效益分别为0.25元/m³和1.06元/m³。

② ALE回收经济效益。藻酸盐市售价格约80元/kg,按污泥VSS/TSS=50%、提取ALE=15%VSS计算,折算ALE售价达到1200元/t(80%含水率污泥),扣除ALE提取与纯化费用以及纯度降低对产品的贬值等,预计ALE利润仅为25%,约为300元/t(80%含水率污泥),折合吨水利润为0.6元/m³。然而,ALE提取、干化焚烧污泥处置成本比直接填埋费用高,预计增加至均值150元/t(80%含水率污泥),折合0.30元/m³。

③ 磷回收经济效益。考虑9%(干质量)灰分含量,磷回收采用强酸溶解—添加硫化物沉淀分离重金属—氨化工艺可直接制得复合肥料 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,



预计产量38.3 kg/t(80%含水率污泥), $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 生产成本为1.94元/kg;磷肥[以 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 计]目前市售价格为2.60元/kg,回收磷利润约25.28元/t(80%含水率污泥),折算吨水磷回收效益为0.05元/ $\text{m}^3$ 。

④ 水回用经济效益。回用水经济效益仍取目前的1.10元/ $\text{m}^3$ 。

⑤ 碳交易经济效益。盈余的碳可用于碳交易,以目前我国均值碳价为75元/ $\text{tCO}_2\text{-eq}$ 计算,最终碳交易额约为0.02元/ $\text{m}^3$ 。

综上,蓝色水工厂可实现的净利润为2.33元/ $\text{m}^3$ ,远远高于CAS污水处理厂的0.15元/ $\text{m}^3$ 。

由上述经济性分析可以看出,回收高值ALE比磷回收经济效益高10倍以上。然而,磷是一种战略资源,不久将成为一种“稀土”,磷矿价格将会出现攀升。

#### 4 结语

蓝色水工厂以生态循环为依据,强调营养物、生物材料、热/电和水回用等4个循环,可对潜在环境危机涉及的两大要素——温室气体和磷短缺危机起到有效的缓解作用。换句话说,碳中和与磷回收是蓝色水工厂中两个最为关键的追求目标。

污水处理厂以净化污水为首要目的,蓝色水工厂将资源与能源回收视为主要目标,而目标资源/能源被回收后,污水也自然被净化,处理水可以“副产品”形式被加以利用。蓝色水工厂以被誉为下一代污水处理技术的好氧颗粒污泥为核心技术,干化焚烧被用作剩余污泥处理、处置方式。相应这两大单元的前处理、后处理均可不同程度地回收各种价值资源/能源。例如,前端纤维素、颗粒污泥高值类藻酸盐(ALE)、污泥焚烧电/热、焚烧灰分磷回收与金属回收等,特别是出水余温热能利用。

能量平衡表明,污泥焚烧电/热回收及出水余温热能利用不仅可以实现蓝色水工厂能量中和,亦可满足碳中和需要,而且还有盈余热能用于碳交易的“负碳”。从污泥灰分中提取磷可使污水中磷回收程度最大化(90%),从灰分中分离出的金属可以生产混凝剂,“干净”的灰分最终被用作建材原料。所有这些回收利用方式使蓝色水工厂最终可以实现对环境的“净零(Net-zero)”影响。

依托于以生物工艺数学模拟技术为核心的智慧控制系统,蓝色水工厂进入精细化运行管理,深

度节能降耗再加上资源/能源回收,可使综合经济效益达2.33元/ $\text{m}^3$ ,远超传统污水处理厂。

蓝色水工厂涉及的核心技术均已经成熟,系统集成蓝色水工厂已无悬念。但是,国内外殷切期望的连续流好氧颗粒污泥技术仍待开发,高值ALE物质提取效率与纯度还有待进一步提升,污泥超低温干化设备也需要及时配合研发。

#### 参考文献:

- [1] VAN DIJK K C, LESSCHEN J P, OENEMA O. Phosphorus flows and balances of the European Union Member States [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 542: 1078-1093.
- [2] 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).
- [3] HAO X D, LI J, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* Energy recovery from wastewater: heat over organics [J]. *Water Research*, 2019, 161: 74-77.
- [4] HAO X D, WU D Q, LI J, *et al.* Making waves: a sea change in treating wastewater - Why thermodynamics supports resource recovery and recycling [J]. *Water Research*, 2022, 218: 118516.
- [5] VAN LOOSDRECHT M C M, BRDJANOVIC D. Anticipating the next century of wastewater treatment [J]. *Science*, 2014, 344(6191): 1452-1453.
- [6] 郝晓地, 饶志峰, 刘然彬, 等. 纤维素对污水生物处理系统性能的影响及机理分析[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(21): 1-6.  
HAO Xiaodi, RAO Zhifeng, LIU Ranbin, *et al.* Impact and mechanism of celluloses on the performance of biological wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(21): 1-6 (in Chinese).
- [7] 郝晓地, 翟学棚, VAN LOOSDRECHT M, 等. 污水碳源分离新概念——筛分纤维素[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(14): 9-12.  
HAO Xiaodi, ZHAI Xuepeng, VAN LOOSDRECHT M, *et al.* A new concept of separating carbon source from wastewater: sieving fibers [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(14): 9-12 (in Chinese).
- [8] LIU R B, LI Y X, ZHANG M B, *et al.* Review on the fate and recovery of cellulose in wastewater treatment [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022,

- 184: 106354.
- [9] WINKLER M H, VAN LOOSDRECHT M. Intensifying existing urban wastewater [J]. *Science*, 2022, 375 (6579): 377-378.
- [10] LI J, HAO X D, GAN W, *et al.* Controlling factors and involved mechanisms on forming alginate like extracellular polymers in flocculent sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 439: 135792.
- [11] LI J, HAO X D, GAN W, *et al.* Enhancing extraction of alginate like extracellular polymers (ALE) from flocculent sludge by surfactants [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 837: 155673.
- [12] LI J, HAO X D, GAN W, *et al.* Recovery of extracellular biopolymers from conventional activated sludge: potential, characteristics and limitation [J]. *Water Research*, 2021, 205: 117706.
- [13] HAO X D, CHEN Q, VAN LOOSDRECHT M, *et al.* Sustainable disposal of excess sludge: incineration without anaerobic digestion [J]. *Water Research*, 2020, 170: 115298.
- [14] HAO X D, WANG X Y, CHEN S, *et al.* Creating coagulants through the combined use of ash and brine [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 845: 157344.
- [15] RUIKEN C J, BREUER G, KLAVERSMA E, *et al.* Sieving wastewater—cellulose recovery, economic and energy evaluation [J]. *Water Research*, 2013, 47(1): 43-48.
- [16] KIM N K, MAO N, LIN R, *et al.* Flame retardant property of flax fabrics coated by extracellular polymeric substances recovered from both activated sludge and aerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 2020, 170: 115344.
- [17] 郝晓地, 李季, 赵梓丞, 等. 侧流磷回收强化主流脱氮除磷微观现象评价 [J]. *环境工程学报*, 2021, 15(11): 3677-3685.
- HAO Xiaodi, LI Ji, ZHAO Zicheng, *et al.* Evaluation of microcosmic phenomena on enhancing main-stream biological nutrient removal by side-stream phosphate recovery [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(11): 3677-3685 (in Chinese).
- [18] 郝晓地, 孙晓明, VAN LOOSDRECHT M. 好氧颗粒污泥技术工程化进展一瞥 [J]. *中国给水排水*, 2011, 27(20): 9-12.
- HAO Xiaodi, SUN Xiaoming, VAN LOOSDRECHT M. A glance at progress of engineered aerobic granular sludge technology [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(20): 9-12 (in Chinese).
- [19] 吴远远, VAN LOOSDRECHT M, 郝晓地, 等. 好氧颗粒污泥低温稳定性中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2022, 38(11): 56-61.
- WU Yuanyuan, VAN LOOSDRECHT M, HAO Xiaodi, *et al.* A pilot study on stability of aerobic granular sludge at low temperature [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(11): 56-61 (in Chinese).
- [20] LIN Y M, SHARMA P K, VAN LOOSDRECHT M C M. The chemical and mechanical differences between alginate-like exopolysaccharides isolated from aerobic flocculent sludge and aerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 2013, 47(1): 57-65.
- [21] FELZ S, NEU T R, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* Aerobic granular sludge contains hyaluronic acid-like and sulfated glycosaminoglycans-like polymers [J]. *Water Research*, 2020, 169: 115291.
- [22] VAN LEEUWEN K, DE VRIES E, KOOP S, *et al.* The energy & raw materials factory: role and potential contribution to the circular economy of the Netherlands [J]. *Environmental Management*, 2018, 61(5): 786-795.
- [23] LI J, HAO X D, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* Effect of humic acids on batch anaerobic digestion of excess sludge [J]. *Water Research*, 2019, 155: 431-443.
- [24] 郝晓地, 陈奇, 李季, 等. 污泥焚烧无须顾虑尾气污染物 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(10): 8-14.
- HAO Xiaodi, CHEN Qi, LI Ji, *et al.* Unnecessary worry about pollutants in off-gases of sludge incineration [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(10): 8-14 (in Chinese).
- [25] 郝晓地, 李季, 李爽, 等. 从污水中技术回收氮不具经济性 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(20): 28-33.
- HAO Xiaodi, LI Ji, LI Shuang, *et al.* Nitrogen recovery from wastewater: no benefit in economy [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(20): 28-33 (in Chinese).
- [26] HAO X D, WANG C C, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* Looking beyond struvite for P-recovery [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(10): 4965-4966.
- [27] 郝晓地, 周健, 王崇臣, 等. 污水磷回收新产物——蓝铁矿 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(11): 4223-4234.
- HAO Xiaodi, ZHOU Jian, WANG Chongchen, *et al.* New product of phosphorus recovery—vivianite [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(11): 4223-

- 4234 (in Chinese).
- [28] 郝晓地,周健,王崇臣. 探究污泥厌氧消化系统中蓝铁矿生成的干扰因子[J]. 中国给水排水, 2018, 34(23): 1-7.
- HAO Xiaodi, ZHOU Jian, WANG Chongchen, *et al.* Determination of interference factors of vivianite formation in anaerobic digestion of excess sludge [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(23): 1-7 (in Chinese).
- [29] 郝晓地,周健,王崇臣. 蓝铁矿形成于污泥厌氧消化系统的验证与分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(13): 7-13.
- HAO Xiaodi, ZHOU Jian, WANG Chongchen, *et al.* Vivianite formed in anaerobic digestion of excess sludge: verification and analysis [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(13): 7-13 (in Chinese).
- [30] 郝晓地,于晶伦,刘然彬,等. 剩余污泥焚烧灰分磷回收及其技术进展[J]. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1149-1159.
- HAO Xiaodi, YU Jinglun, LIU Ranbin, *et al.* Advances of phosphorus recovery from the incineration ashes of excess sludge and its associated technologies [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(4): 1149-1159 (in Chinese).
- [31] 郝晓地,于文波,时琛,等. 污泥焚烧灰分磷回收潜力分析及其市场前景[J]. 中国给水排水, 2021, 37(4): 5-10.
- HAO Xiaodi, YU Wenbo, SHI Chen, *et al.* Potential analysis and market prospects of phosphorus recovery from the bottom ashes of sludge incineration [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(4): 5-10 (in Chinese).
- [32] FARAGÒ M, DAMGAARD A, MADSEN J A, *et al.* From wastewater treatment to water resource recovery: environmental and economic impacts of full-scale implementation[J]. Water Research, 2021, 204: 117554.
- [33] MORF L, SCHLUMBERGER S, ADAM F, *et al.* Urban Phosphorus Mining in the Canton of Zurich: Phosphoric Acid from Sewage Sludge Ash [M]. Singapore: Springer Singapore, 2018: 157-177.
- [34] HAO X D, LIU R B, HUANG X. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China [J]. Water Research, 2015, 87: 424-431.
- [35] 郝晓地,叶嘉洲,李季,等. 污水热能利用现状与潜在用途[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 15-22.
- HAO Xiaodi, YE Jiazhou, LI Ji, *et al.* Status and potential applications of thermal energy from wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 15-22 (in Chinese).
- [36] 郝晓地,赵梓丞,李季,等. 污水处理厂的能源与资源回收方式及其碳算:以芬兰 Kakolanmäki 污水处理厂为例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 2849-2857.
- HAO Xiaodi, ZHAO Zicheng, LI Ji, *et al.* Analysis of energy recovery and carbon neutrality for the Kakolanmäki WWTP in Finland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 2849-2857 (in Chinese).
- [37] 郝晓地,罗玉琪,林甲,等. 污水潜能开发取决于适时补贴政策[J]. 中国给水排水, 2017, 33(12): 12-18, 23.
- HAO Xiaodi, LUO Yuqi, LIN Jia, *et al.* Development potential energy in wastewater depends on timely subsidy policies [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(12): 12-18, 23 (in Chinese).
- [38] SOLOMON S, QIN D, MANNING M, *et al.* IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [39] 郝晓地,张益宁,李季,等. 污水处理能源中和与碳中和案例分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 1-8.
- HAO Xiaodi, ZHANG Yining, LI Ji, *et al.* Case analysis of energy neutrality and carbon neutrality for wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(20): 1-8 (in Chinese).
- [40] 郝晓地,衣兰凯,秦建军. 生物营养物去除工艺的数字化控制集成研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(3): 93-98.
- HAO Xiaodi, YI Lankai, QIN Jianjun. Integrated digital control of biological nutrient removal process [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(3): 93-98 (in Chinese).

**作者简介:**郝晓地(1960—),男,山西柳林人,博士,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:**2022-06-15

**修回日期:**2022-06-21

(编辑:丁彩娟)