

张涛, 余冉. 低温对市政污水生物处理的影响及对策[J]. 净水技术, 2022, 41(6):24-29, 38.

ZHANG T, YU R. Influence and countermeasures of low temperature on biological process for municipal wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(6): 24-29, 38.



扫我试试?

低温对市政污水生物处理的影响及对策

张涛, 余冉*

(东南大学能源与环境学院, 江苏南京 210096)

摘要 冬季环境温度过低, 城市污水处理厂的常规生物处理工艺经常出现处理效率下降、出水水质不达标的情况。文中介绍了低温对市政污水处理系统中活性污泥微生物的影响, 重点从污泥微生物群落结构、微生物活性、污泥絮体结构稳定性以及絮体沉降性能等方面综合探究了低温导致生物处理效率下降的原因。同时对近年来国内污水生物处理工艺的低温脱氮和低温除磷技术研究进展进行了综述, 列举了多个国内低温市政污水生物处理工艺的改造实例, 并提出利用微生物膜技术的组合工艺在低温污水处理领域有着广阔的研究与应用前景。

关键词 低温 市政污水 脱氮除磷 生物膜 污水处理厂

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)06-0024-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.06.004

Influence and Countermeasures of Low Temperature on Biological Process for Municipal Wastewater Treatment

ZHANG Tao, YU Ran*

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract In winter, the conventional biological treatment processes in municipal wastewater treatment plants (WWTPs) often occur a decline in treatment efficiency because of the too low ambient temperature and the effluent quality does not meet the standard. This article introduces the influences of low temperature on the microorganisms of the activated sludge in WWTPs. The sludge microbial community structure, microbial activity, structure stability and settling performance of sludge floc are addressed to explore the reasons to cause of the decrease of biological treatment efficiency under low temperature. The research development of biological nitrogen and phosphorus removal technologies for municipal wastewater treatment under low temperature in recent years is summarized, and the according real cases are listed. The combined process of using microbial membrane technology has been proposed to have broad research and application potential to solve the low-temperature effects in WWTPs treatment.

Keywords low temperature municipal wastewater nitrogen and phosphorus removal biofilm wastewater treatment plant (WWTP)

活性污泥中的微生物种类/丰度和活性受季节

[收稿日期] 2020-07-19

[基金项目] 国家自然科学基金(51878145);江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2019709)

[作者简介] 张涛(1996—),男,硕士,研究方向为低温市政污水生物处理, E-mail:1092966395@qq.com。

[通信作者] 余冉,教授,主要从事环境生物技术在水污染控制、固体废物(污泥)处理和处置的应用研究, E-mail:yuran@seu.edu.cn。

变化影响大,以活性污泥为核心的污水生物处理工艺处理效率也随季节的变化而产生波动。尤其是在温度较低的冬季,活性污泥中的功能微生物会受到低温的生长抑制影响^[1-2],出现微生物活性低、污泥膨胀、出水水质氮磷含量不达标等现象。研究表明,我国北方寒冷地区的污水生物处理工艺,在污水温度低于 13℃时,整个污水处理系统处理效率会下降 50%左右;而在水温低于 4℃时,工艺的生物处理效

果可忽略不计^[3]。表 1 列举了我国北方城市污水处理厂不同污水处理工艺冬春两季的水温情况,冬春季的平均水温都低于 15 ℃,最低水温甚至达到了 4.7 ℃。因此,保障冬季低温市政污水处理系统稳定运行极为重要。

表 1 我国北方地区不同污水处理工艺春冬两季水温^[4]
Tab. 1 Sewage Temperature of Different Treatment Processes in Spring and Winter in North China^[4]

污水厂	工艺名称	水温/℃	冬春季平均水温/℃
A	AO 工艺	10.4~17.1	12.8
B	氧化沟	4.7~18.5	11.3
C	SBR 工艺	11.9~18.1	14.2

1 低温对活性污泥的影响

1.1 活性污泥微生物

1.1.1 低温对污泥微生物群落结构的影响

活性污泥主要由微生物细胞组成,同时吸附了污水中的各种有机物和无机颗粒。活性污泥中的微生物种类丰富,一般以细菌为主,还含有古细菌、真菌、原生动物和后生动物等。它们能够形成一个完整的食物链,利用废水中的营养物质来维持群落结构的稳定。污泥处理工艺中,常见的优势菌门有变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、绿弯菌门(Chloroflexi)和放线菌门(Actinobacteria),以及许多未知菌种^[5]。这些菌种在污泥中担任的角色各不相同,如硝化螺旋菌门(Nitrospirae)与活性污泥法的硝化作用有紧密关系^[6],变形菌门和厚壁菌门(Firmicutes)与反硝化作用有关^[7],以及与污泥膨胀相关的腐螺旋菌科(Saprospiraceae)、黄杆菌科(Flavobacteriaceae)、四球虫属(Tetrasphaera)^[8-9]等。

温度是影响污泥微生物群落结构的重要因素。Ju 等^[1]在长达 4 年研究中,发现许多功能菌属丰度遵循季节变化规律,夏季硝化细菌——硝化螺旋菌属(Nitrospira)和亚硝化单胞菌属(Nitrosomonas)表现出更高的丰度,而冬季除磷菌——四球虫菌属(Tetrasphaera)、具有反硝化作用的副球菌属(Paracoccus)、潜在的人类粪便细菌双歧杆菌属(Bifidobacterium)、多利亚菌属(Dorea)和瘤胃球菌属(Ruminococcus)等的丰度表现得更高。季节变化在改变污泥微生物的种群丰度的同时可能会影响其功能基因的表达。Liu 等^[10]的研究发现,硝化单胞

菌和硝化螺菌分别是代表性的氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化细菌(NO₂-OB),而这 2 种细菌的丰度在冬季下降并导致了氨氮去除率降低。同样,樊柳^[11]对武汉市多个污水处理厂取样研究发现,同一水厂的暖季样品的 Chao 和 Ace 指数(Chao 和 Ace 指数反映菌群丰度,数值越大,物种总数越大)高于冷季,而 Simpson 指数(Simpson 指数反映种群多样性,Simpson 指数值越小,表明物种越丰富)却具有一致性,这表明低温只会使得污泥微生物菌群丰度减小,而对污泥微生物种群多样性几乎没有影响。

污水处理工艺在冬季低温环境下经常发生污泥膨胀^[12-13],污泥群落结构稳定性和污染物的去除效率都会受到负面影响。污泥膨胀一般分为污泥丝状菌膨胀和非丝状菌膨胀,其中非丝状菌膨胀又分为菌胶团污泥膨胀和菌胶团解体污泥膨胀。低温下的非丝状菌膨胀一般是菌胶团污泥膨胀,这种污泥膨胀可以通过改善活性污泥的组成,或调整适当回流比、溶解氧、混合液悬浮固体浓度(MLSS)等参数进行控制^[14]。端正花等^[9]对冬季郑州某污水处理厂发生的污泥膨胀现象进行了机理研究,利用高通量测序技术对 1 月—4 月及 12 月发生污泥膨胀的污泥样进行分析,发现腐螺旋菌科和黄杆菌科的丝状菌在低温下的过度增殖是污泥膨胀的主要成因。高春娣等^[15]发现在 14 ℃的低温下 SBR 反应器的污泥丝状菌膨胀,污泥沉降性能明显恶化,污泥中特定菌群丝状菌群的丰度由 0.49% 变化至 26.04%,而脱氮菌群和除磷菌群的丰度则相对减少。

1.1.2 低温对污泥微生物活性的影响

微生物的活性一般指微生物的新陈代谢的速率,即污泥微生物细胞与污水之间的能量和物质交换,以及污泥微生物细胞内物质和能量的转变。当环境温度降低时,微生物的新陈代谢速率会下降从而导致其活性降低。已有研究显示,低温对微生物活性的影响因素包括以下几点^[16-22]。(1)膜的流动性。微生物细胞膜的基本结构是磷脂双分子层,这种结构需要保持适当的流动性,以保证基本膜蛋白的渗透性和活动。常温下的磷脂双分子层是液晶态的结构,而温度降低会使其向凝胶态转变,细胞膜因不能保持流动性而丧失物质交换功能。(2)维持低温下蛋白质的合成和产生以及维持酶催化反应的速率。低温条件下,分子内氢键增加导致酶的折叠增加,且单个酶分子合成减少,降低了酶催化反应速

率,最终引起蛋白质合成速率的下降。(3)冷适应蛋白及其作用机制。低温微生物为了应对温度的突然降低,会在体内合成冷适应蛋白来适应温度的变化。(4)防冻机制。适应低温的微生物能够产生相容性溶质(甘氨酸、甜菜碱、甘油、海藻糖等),这些溶质能够在细胞质内积累,在不影响细胞活动的同时,使细胞免于低温伤害。

1.2 活性污泥理化性质

1.2.1 低温对活性污泥絮体结构的影响

活性污泥絮体的粒径分布、结构和密度是控制活性污泥固液分离性能的最重要物理参数。污泥絮体大、密度高将有助于污泥快速沉降,并且使泥水分离后上清液浑浊度低。污泥絮体结构受多种因素影响,如 pH、Zeta 电位、胞外聚合物(EPS)含量、丝状菌数量等。弱稳定的絮体结构遇到剪切力作用时,容易在活性污泥水处理过程中分解,导致污水中的细小颗粒和游离态细菌数量增加。进一步过程中,活性污泥不可避免地在污水处理系统中各工段中会遇到因曝气、泵输送、脱水等产生的剪切力作用,污泥絮体往往会被分解成更小的颗粒,从而不利于泥水分离。而出水中 30% 的化学需氧量(COD)和 50%~80% 的磷都与粒径大于 0.1 μm 的颗粒相结合^[23],低温对絮体的影响间接导致了出水水质下降。

冬季水温较低时,活性污泥絮体的絮体结构一般较弱,这使得污水中的悬浮固体浓度较高^[24]。Koivuranta 等^[25]发现絮体的形成与进水水质没有明显关联,而受水温影响极大,具有明显的季节性特征。夏季的污泥絮体通常个体大,形状较圆,丝状菌数量少,且小颗粒数量较少,而冬季污泥絮体的以上相关参数与夏季相反。造成这一差异的原因可能是低温促进了丝状菌生长,致使污泥絮体中的丝状菌数量增加。包含大量丝状菌的絮体对剪切作用的敏感性更高,絮凝强度也降低,极易发生大规模破碎^[26-27]。破碎后的絮体尺寸变小,同时小颗粒数目增加,导致出水水质变差。

1.2.2 低温对污泥絮体沉降性能的影响

污泥的沉降性能和松散程度一般用污泥容积指数(SVI)来衡量,过高的 SVI 会降低污泥沉降性能和脱水效果。污泥沉降性能的季节变化特性在污水处理厂中较为常见,SVI 通常在冬季会远高于夏季,并且这一现象有时会伴随着污泥中丝状菌丰度的增

加^[28]。此外,冬季污水处理厂为弥补污水处理系统低温除磷的不足,经常会利用铁盐进行化学强化除磷。相关研究发现这一举措提高了污泥中的铁浓度,会对污泥沉降性能和压实性能产生负面影响^[24]。

污泥的表面性质(疏水性、表面电荷)和 EPS 的组成也会影响污泥的生物絮凝性能,EPS 的含量与污泥的沉降性能 SVI 呈正相关性^[29-30]。EPS 是细胞的代谢产物,主要由多糖、蛋白质、核酸等高分子物质构成,是污泥絮体中的第三大成分,仅次于细胞和水^[31]。活性污泥组成会随着季节变化而变化,在冬季时受低温影响,污泥中的 EPS 含量达到全年最高^[32-33]。崔迪^[4]在对寒区污水处理系统的研究中发现,限制微生物合成多糖的限制酶 EC 1.1.1.22(UDP-glucose 6-dehydrogenase, UGD)在冬季丰度达到最高,细菌利用多糖可以合成更多的 EPS,一定程度上解释了冬季污泥中 EPS 含量偏高的现象。

2 低温市政污水生物处理强化技术及运行调控策略

对于绝大部分市政污水生物处理工艺来说,低温会影响到其脱氮除磷效率但对 COD 的去除效率影响不大。故在《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中,当污水温度低于 12 $^{\circ}\text{C}$ 时,对总氮和氨氮排放标准进行了适当放宽。

2.1 低温脱氮

传统的生物脱氮途径一般包括硝化和反硝化两个阶段,分别由硝化菌和反硝化菌主导完成。低温对脱氮的影响主要体现于对硝化和反硝化作用的抑制。常温硝化菌群的最适温度为 30 $^{\circ}\text{C}$,世代时间约为 15 h,而在低温 5 $^{\circ}\text{C}$ 时则延长为 200 h^[34],故其硝化作用基本停止,而当温度低于 4 $^{\circ}\text{C}$ 时,悬浮生长的污泥中可能不存在硝化菌^[35-36]。同样,低温下的反硝化细菌,生长代谢速率降低,而且由于低温会使水中溶解氧(DO)增加,分子态的氧与硝酸盐竞争优先充当反硝化细菌的电子受体,抑制硝酸盐的还原,降低反硝化速率。

许多学者从环境中驯化筛选嗜冷菌,并验证它们在低温下处理污水的能力。盛晓琳等^[37]在低温(10 $^{\circ}\text{C}$)下驯化低温硝化污泥,经过菌种富集之后,污泥中的硝化杆菌属和亚硝化单胞菌属的相对丰度

提高了 43 倍和 42 倍,在面对低温影响时,该硝化污泥能够在 5 d 内,将氨氮去除率升至 99%。孟盈盈^[38]从北极海洋沉淀物中筛选出多株反硝化细菌构建混合菌群,发现其在 10 ℃ 下,48 h 内可将初始质量浓度为 60 mg/L 的氨氮完全去除。伍海全等^[39]筛选驯化了嗜冷性微生物菌群并形成活性污泥处理水温为 5、10、15 ℃ 的人工污水,结果表明 COD 去除率能够达到 95% 以上,氨氮去除率能够达到 85% 以上,且出水能够达到城镇污水处理厂污染物排放标准一级 A 标准。唐美珍等^[40]从人工湿地的底泥中分离出黄假单胞菌,其能够在 16 ℃ 下,对模拟生活废水中的 COD、氮、磷达到较高的脱除效果。李晓亮^[41]从北极海洋沉积物中分离出多株低温硝化细菌,利用其构建混合菌群在 15 ℃ 下处理废水 48 h 能够获得 91.7% 的氨氮去除率。

研究表明,嗜冷氨氧化细菌在 0~5 ℃ 时,氨氮的去除作用并不明显;而在 8~10 ℃ 时,能够保持较高的硝化速率^[42]。王思萌等^[43]在以短程硝化反硝化-厌氧氨氧化一体化工艺(SPN/A)为主体的序批式活性污泥(SBR)反应器中,15 ℃ 的低温反应条件下定期投加短程硝化污泥,发现该方法能够增强 AOB 和厌氧氨氧化菌的丰度及活性,抑制 NOB 活性,从而增强系统的低温氨氮处理能力。

好氧颗粒污泥(AGS)技术具有沉降性能好、生物活性高、耐冲击能力强的特点。Jiang 等^[44]利用序批式气提反应器(SBAR)在低温(8 ℃)下快速造粒,系统运行 10 d 能够观察到紧致污泥颗粒,25 d 能够稳定运行,该系统稳定后的氨氮去除率能够达到 99% 以上。

通过载体的利用可以固定富集嗜冷菌,从而保证污水生物处理系统中的低温菌生物量,避免因直接投加造成的菌株流失和菌株适应等问题,以提高污水在低温条件下的处理效能。郑志佳等^[45]为解决移动床生物膜反应器工艺在冬季出水氨氮不达标问题,向生化池好氧区投加悬浮载体,低温条件下仍然能够保持硝化菌群数量,达到延长泥龄的目的,使得出水氨氮达标。

2.2 低温除磷

生物除磷需要保证充分的有机碳源。虽然低温对聚磷菌的生长速率影响不大,但是会降低大分子有机物的水解速率,导致易受聚磷菌降解的挥发性

脂肪酸(VFAs)等小分子产物含量降低,从而间接减缓微生物好氧释磷作用。

在传统活性污泥法 AAO 工艺中,除磷的唯一方法是从二沉池排放剩余污泥,遇到温度降低时,工艺的除磷能力明显不足。为了增强传统 AAO 工艺的低温除磷效果,Li 等^[46]对 AAO 工艺进行了改进。他们在缺氧池和好氧池之间增加一个中沉池,专门进行硝化和释磷。并在二沉池后端连接一个厌氧释磷池,污泥释放磷后活性会表现得更高,将其回流至前端好氧池,能够更好地去除污染物,尤其是磷。与改进前相比,改进后的 AAO 工艺对磷的去除效率从 56.0% 增至 93.3%。

虽然低温一般会导致磷去除率下降,但也有研究人员发现低温会促进磷的去除。Erdal 等^[47]在研究生物强化除磷系统(EBPR)时发现,水温由 20 ℃ 降至 10 ℃,生物除磷能力会下降,而降至 5 ℃ 时,生物除磷能力反而会有所提高。Whang 等^[48]和 Panswad 等^[49]也发现了类似的结论,低温会对除磷有一定的促进效果。他们认为这是由聚磷酸盐微生物(PAOs)和糖原累积微生物(GAOs)之间的相互竞争引起的,PAOs 能够在低温下优先利用 VFAs 等有限碳源进行除磷,而当温度升高,GAOs 会抢夺碳源抑制 PAOs 的生物除磷反应。

2.3 低温污水处理工艺的改造与运行调控

表 2 列举了多种污水处理工艺的低温改造和运行调控措施,工艺的提标改造措施除了优化原有工艺运行模式,多数都在原工艺的生物处理部分添加了填料,利用填料形成生物膜保留生物量的特性,增强低温环境下对氮、磷的去除能力。通过向生物反应池内投加载体实现污水降解效果提高的工艺有很多,代表性工艺有挪威的 KMT 工艺(将圆柱状 KMT 聚乙烯塑料载体与生物流化床相结合的污水处理技术)、美国的 Captor 工艺(利用聚氨酯泡沫为生物膜载体的污水处理技术)、Biofor 工艺(利用曝气生物滤池内的填料附着生物膜的污水处理技术)、德国的 Linpor 工艺(利用聚氨酯泡沫块作为填料的生物流化床工艺,载体尺寸比 Captor 工艺的小)和 IFAS 工艺(活性污泥法与生物膜技术相结合和污水处理技术)等。其中,IFAS 工艺在国内研究较为成熟,在北方污水处理中也发挥了显著效果^[50-51]。

表2 低温污水处理工艺的改造与运行调控
Tab. 2 Renovation and Operation Control of Low Temperature Sewage Treatment Process

工艺名称	问题	改造手段及调控策略	改造后水质
AAO ^[52]	出水不能稳定达到一级 A 标准	适当提高污泥龄,增加氮、磷去除效果;适当提高混合液内回流比和污泥回流比,提高总氮去除效果	满足一级 A 标准
AO ^[53]	出水氨氮不达标	采用水凝胶包埋硝化菌固定化载体技术,向 AO 曝气池投加容积率为 12% 的载体; 设计规模为 50 m ³ /d,运行负荷为 2.1 m ³ /h,污泥质量浓度为 3 000 mg/L,DO 质量浓度为 5 mg/L	出水氨氮浓度能够达到一级 A 标准
多级 AO ^[54]	低温出水氮、磷不达标	外加措施,单次投加硝化污泥,提升脱氮效果,持续时间短;好氧区添加填料,脱氮效果提升持久有效;投加硫酸亚铁同步除磷,经济有效 工艺调控:降低缺氧好氧容积比,优化排泥周期,控制好氧区 DO	满足一级 A 标准
活性污泥法 ^[50]	出水氨氮不达标	向活性污泥法的曝气池中投加载体,硝化菌生长在生物膜载体上,不参与污泥循环,因此,能够保持较高浓度,系统整体的硝化速率也能得到提高,脱氮性能增强	改造后氨氮去除率达 93% 以上, COD _{Cr} 去除率从 53% 提高到 61% 以上,在冬季 8~12 °C 水温下,能够保持稳定达到一级 A 标准的出水水质
CASS ^[55]	提标改造,强化氮、磷去除	强化总氮去除:保证缺氧段碳源充足,提高缺氧段进水 C/N,或外加碳源,扩大缺氧区池容以延长水力停留时间 强化 COD _{Cr} 、BOD ₅ 和氨氮去除:应用移动床生物膜技术,向好氧区投加生物填料增加生物量	稳定优于一级 A 标准

3 总结

低温条件会导致市政污水生物处理系统氮、磷去除率下降,为克服现有问题,研究者们提出驯化筛选低温菌、工艺改良等技术研究,但目前仍然存在不足:(1)对嗜冷菌的研究多停留在小试试验基础,缺少中试及实际工程的应用研究;(2)对单一嗜冷菌的处理效果研究较多,而对复合菌种协同处理效果和机理的研究较少;(3)多数研究角度都是从污泥的物理性质和污泥组分的变化出发,而更深入的角度,如微生物酶、功能基因等研究较少。

与嗜冷菌的开发相比,对低温污水生物处理工艺的改进与调控策略的研究与工程应用成效更为显著。其中,基于生物膜技术的组合工艺因其能够在低温下保持较高的生物量和较好的处理效果,在未来的低温污水处理研究中可能更具有发展前景。

参考文献

[1] JU F, GUO F, YE L, et al. Metagenomic analysis on seasonal microbial variations of activated sludge from a full-scale wastewater treatment plant over 4 years [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2014, 6(1): 80-89.
[2] SIRIPONG S, RITTMANN B E. Diversity study of nitrifying bacteria in full-scale municipal wastewater treatment plants [J].

Water Research, 2007, 41(5): 1110-1120.

- [3] 钱程,任丽波,姚瑶.寒冷地区冬季低温对污水处理厂运行效率的影响研究[J]. *环境科学与管理*, 2008(5): 84-86.
[4] 崔迪.寒区污水生化处理系统微生物群落结构与功能解析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
[5] 黄菲,梅晓洁,王志伟,等.冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征[J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 1002-1008.
[6] YE L, SHAO M F, ZHANG T, et al. Analysis of the bacterial community in a laboratory-scale nitrification reactor and a wastewater treatment plant by 454-pyrosequencing [J]. *Water Research*, 2011, 45(15): 4390-4398.
[7] KNOWLES R. Denitrification [J]. *Microbiological Reviews*, 1982, 46(1): 43-70.
[8] XU S, YAO J Q, AINIWAER M, et al. Analysis of bacterial community structure of activated sludge from wastewater treatment plants in winter [J]. *Biomed Research International*, 2018, 2018: 8278970. DOI: 10.1155/2018/8278970.
[9] 端正花,潘留明,陈晓欧,等.低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究[J]. *环境科学*, 2016, 37(3): 1070-1074.
[10] LIU F, HU X M, ZHAO X, et al. Microbial community structures' response to seasonal variation in a full-scale municipal wastewater treatment plant [J]. *Environmental Engineering Science*, 2019, 36(2): 172-179.
[11] 樊柳.城镇污水处理系统活性污泥性质与微生物群落结构相关性研究[D].武汉:华中科技大学, 2018.
[12] 田腾,周斌,王心海.低温条件下污水处理运行优化路径[J]. *环境与发展*, 2018, 30(1): 40-41.

- [13] 崔洪升, 白晓慧, 李刚, 等. 寒冷地区城市污水处理厂污泥膨胀及其控制方法[J]. 城市环境与城市生态, 2000(2): 79-82.
- [14] 柴春省. 低温非丝状菌活性污泥膨胀的控制措施[J]. 工业用水与废水, 2017, 48(4): 51-53, 60.
- [15] 高春娣, 张娜, 韩徽, 等. 低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3373-3383.
- [16] FELLER G, GERDAY C. Psychrophilic enzymes: Hot topics in cold adaptation[J]. Nature Reviews Microbiology, 2003, 1(3): 200-208.
- [17] GERDAY C, AITTALEB M, BENTAHIR M, et al. Cold-adapted enzymes: From fundamentals to biotechnology [J]. Trends in Biotechnology, 2000, 18(3): 103-107.
- [18] KRÁLOVÁ S. Role of fatty acids in cold adaptation of Antarctic psychrophilic *Flavobacterium* spp. [J]. Systematic & Applied Microbiology, 2017, 40(6): 329-333.
- [19] ABRAHAM W P, RAGHUNANDANAN S, GOPINATH V, et al. Deciphering the cold adaptive mechanisms in *Pseudomonas psychrophila* MTCC12324 isolated from the Arctic at 79° N[J]. Current Microbiology, 2020, 77: 2345-2355. DOI: 10.1007/s00284-020-02006-2.
- [20] 辛明秀. 低温微生物研究进展[J]. 微生物学报, 1998(5): 400-403.
- [21] 辛玉华, 周宇光, 东秀珠. 低温细菌与古菌的生物多样性及其冷适应机制[J]. 生物多样性, 2013, 21(4): 469-483.
- [22] PIKUTA E V, HOOVER R B, TANG J. Microbial extremophiles at the limits of life[J]. Critical Reviews in Microbiology, 2007, 33: 183-209. DOI: 10.1080/10408410701451948.
- [23] NEIS U, TIEHM A. Particle size analysis in primary and secondary waste water effluents [J]. Water Science & Technology, 1997, 36(4): 151-158.
- [24] WILÉN B-M, LUMLEY D, MATTSSON A, et al. Relationship between floc composition and flocculation and settling properties studied at a full scale activated sludge plant [J]. Water Research, 2008, 42(16): 4404-4418.
- [25] KOIVURANTA E, SUOPAJÄRVI T, HATTUNIEMI J, et al. The effect of seasonal variations on floc morphology in the activated sludge process [J]. Environmental Technology, 2017, 38(24): 3209-3215.
- [26] KOIVURANTA E, SUOPAJÄRVI T, STOOR T, et al. Use of optical monitoring to assess the breakage of activated sludge flocs [J]. Particulate Science and Technology, 2015, 33(4): 412-417.
- [27] WILÉN B M, JIN B, LANT P. Impacts of structural characteristics on activated sludge floc stability [J]. Water Research, 2003, 37(15): 3632-3645.
- [28] JONES P A, SCHULER A J. Seasonal variability of biomass density and activated sludge settleability in full-scale wastewater treatment systems[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 164(1): 16-22.
- [29] LIAO B Q, ALLEN D G, DROPPA I G, et al. Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability [J]. Water Research, 2001, 35(2): 339-350.
- [30] 周健, 龙腾锐, 苗利利. 胞外聚合物 EPS 对活性污泥沉降性能的影响研究[J]. 环境科学学报, 2004(4): 613-618, 607.
- [31] LI D H, GANCZARCZYK J J. Structure of activated-sludge flocs [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1990, 35(1): 57-65.
- [32] WANG Z W, WU Z C, TANG S J. Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor [J]. Water Research, 2009, 43(9): 2504-2512.
- [33] 刘振超. 胞外聚合物对活性污泥沉降性能影响机制研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [34] HOANG V, DELATOLLA R, LAFLAMME E, et al. An investigation of moving bed biofilm reactor nitrification during long-term exposure to cold temperatures[J]. Water Environment Research, 2014, 86(1): 36-42.
- [35] DYKE V S, JONES S, ONG S K. Cold weather nitrogen removal deficiencies of aerated lagoons [J]. Environmental Technology Letters, 2003, 24(6): 767-777.
- [36] MCCARTNEY D M, OLESZKIEWICZ J A. Carbon and nutrient removal in a sequencing batch reactor at low temperatures[J]. Environmental Technology Letters, 1990, 11(2): 99-112.
- [37] 盛晓琳, 张念慈, 刘锐, 等. 低温硝化活性污泥的富集及其生物强化效果 [J]. 净水技术, 2019, 38(12): 99-104.
- [38] 孟盈盈. 北极低温反硝化细菌的多样性与脱氮能力分析[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.
- [39] 伍海全, 周丽蓉, 孙芬芬, 等. 应用生物强化技术处理高寒地区城市生活污水[J]. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3511-3517.
- [40] 唐美珍, 李婷婷, 王艳娜, 等. 人工湿地中一株高效低温菌的分离鉴定与去除特性研究 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 708-714.
- [41] 李晓亮. 低温硝化细菌的筛选及其在低温污水处理中的初步应用研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2017.
- [42] 梁红星. 低温氨氧化细菌富集、保存及其在城市生活污水中的应用研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [43] 王思萌, 苗圆圆, 彭永臻. 低温投加短程硝化污泥下城市污水 SPN/A 工艺运行特性[J]. 中国环境科学, 2019, 39(4): 1456-1463.
- [44] JIANG Y, SHANG Y, WANG H Y, et al. Rapid formation and pollutant removal ability of aerobic granules in a sequencing batch airlift reactor at low temperature[J]. Environmental Technology, 2016, 37(23): 3078-3085.
- [45] 郑志佳, 白华清, 孟涛, 等. 低温下 MBBR 强化硝化原理分析和应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(23): 6-11.

(下转第 38 页)

- 活饮用水水质的监测分析[J]. 环境与职业医学, 2012, 29(11): 681-683, 688.
- [4] 周炯, 王维克. 海岛水库水源地污染现状与保护对策研究——以舟山市为例[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(6): 71-73.
- [5] 周昕彦. 供水管网中土霉味卤代苯甲醚的生物甲基化生成机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [6] 毛敏敏, 张可佳, 张土乔, 等. 大体积浓缩-固相微萃取-气相色谱-质谱联用测定水样中6种典型嗅味物质[J]. 分析化学, 2013, 41(5): 760-765.
- [7] 李仰斌, 张国华, 谢崇宝. 我国农村饮用水源现状及相关保护对策建议[J]. 中国农村水利水电, 2007(11): 1-4, 7.
- [8] 王亦宁, 双文元. 国外饮用水水源地保护经验与启示[J]. 水利发展研究, 2017, 17(10): 88-93.
- [9] 李成文. 用户水质投诉的问题、产生的原因与处理对策[J]. 城镇供水, 2015(1): 30-32.
- [10] 黄孟斌, 邵志昌, 杨颂, 等. 深圳市某水厂嗅味物质全流程控制技术应用[J]. 净水技术, 2020, 39(11): 159-163, 168.
- [11] ZHOU X Y, ZHANG K J, ZHANG T Q, et al. An ignored and potential source of taste and odor (T&O) issues-biofilms in drinking water distribution system (DWDS) [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, 101(9): 3537-3550. DOI: 10.1007/s00253-017-8223-7.
- [12] KIKUCHI T, KADOTA S, SUEHARA H, et al. Odorous metabolites of a fungus, chaetomium-globosum kinze ex fr-identification of geosmin, a musty-smelling compound [J]. Chemical & Pharmaceutical Bulletin, 1981, 29(6): 1782-1784.
- [13] ABBASZADEGAN M, YI M, ALUM A. Stimulation of 2-methylisoborneol (MIB) production by actinomycetes after cyclic chlorination in drinking water distribution systems [J]. Journal of Environmental Science and Health, 2015, 50(4): 365-371.
- [14] 康娜. 自来水中典型异味物质的检测研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [15] PHEIXUMPHOU K, RAGHURAMAN A, DIETRICH A M. Implementing the drinking water taste-and-odor wheel to improve the consumer lexicon [J]. American Water Works Association, 2017, 109(11): 453-463. DOI: 10.5942/jawwa.2017.109.0122.
- [16] CARNEIRO R C V, WANG C M, YU J W, et al. Check-if-apply approach for consumers and utilities to communicate about drinking water aesthetics quality [J]. Science of the Total Environment, 2021, 753: 141776. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141776.
- [17] WANG C M, AN W, GUO Q Y, et al. Assessing the hidden social risk caused by odor in drinking water through population behavioral responses using economic burden [J]. Water Research, 2020, 172: 115507. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115507.
- [18] 许京骐. 美国水工业开展公众事务工作[J]. 城镇供水, 2002(6): 47-48.

(上接第29页)

- [46] LI J Z, JIN Y, GUO Y Q, et al. Enhancement of phosphorus removal in a low temperature A²/O process by anaerobic phosphorus release of activated sludge [J]. Water Science & Technology, 2013, 67(11): 2437-2443.
- [47] ERDAL U G, ERDAL Z K, RANDALL C W. The mechanism of enhanced biological phosphorus removal washout and temperature relationships [J]. Water Environment Research, 2006, 78(7): 710-715.
- [48] WHANG L M, PARK J K. Competition between polyphosphate- and glycogen-accumulating organisms in enhanced-biological-phosphorus-removal systems: Effect of temperature and sludge age [J]. Water Science & Technology, 2002, 78(1): 4-11.
- [49] PANSWAD T, DOUNGCHAI A, JIN A. Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system [J]. Water Research, 2003, 37(2): 409-415.
- [50] 于亮. 低温条件生物膜与活性污泥复合工艺强化生物脱氮性能的中试研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(4): 96-99.
- [51] 白扬. 基于悬浮载体的生物膜与活性污泥复合工艺脱氮除磷性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [52] 吴洋. 低温期A²O工艺及CAST工艺生活污水处理厂运行参数的控制与优化[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [53] 赵雪莲, 娄高彬, 李宗慧, 等. 硝化菌载体低温处理生活污水中试[J]. 环境工程, 2015, 33(3): 21-24.
- [54] 赵宪章. 多级AO工艺处理低温污水调控研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [55] 王洪刚, 纪海霞, 程树辉, 等. 北方某污水厂CASS工艺升级改造设计[J]. 中国给水排水, 2019, 35(10): 60-63.