

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.04.012

污水厂污泥产量计算和常规处理设计

韩佩君, 张明, 吴艳华, 钱勍, 曹孟禹, 郑佳慧, 刘凯
(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430019)

摘要: 合理确定污水厂污泥产量是设计污泥处理系统的基础,从设计角度对预处理污泥、剩余污泥和化学污泥产量现有计算公式进行讨论,对重要参数如预处理污泥产量公式中系数 α 、出水SS,剩余污泥产量公式中污泥产率系数 Y 、污泥转换率 f ,化学污泥产量公式中药剂转化泥量系数 K 、进出水溶解性总磷的取值进行了分析。针对剩余污泥计算公式中污泥龄 θ_c 取值较宽泛的问题,提出了以磷平衡法进行校核。此外,还提出了当 $\theta_c > 20$ d时, Y 应以可生物降解COD(BCOD)为计算基础;同时建议《室外排水设计标准》在修订剩余污泥计算公式时,应考虑活性污泥内源呼吸过程中的惰性残余物。建议重力浓缩进泥含水率取99.2%,水力停留时间取12~16 h以免厌氧释磷;进泥管路上投加聚合氯化铝(PAC)或池底曝气以降低上清液TP浓度。常规污泥浓缩、调理及超高压板框压滤脱水工艺能将污泥含水率降至55%左右,进一步降低含水率需在脱水后增加干化环节。

关键词: 污泥产量; 污泥产率系数; 预处理污泥; 剩余污泥; 化学污泥; 含水率
中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)04-0071-07

Sludge Yield Calculation and Conventional Sludge Treatment Process Design of Sewage Treatment Plant

HAN Pei-jun, ZHANG Ming, WU Yan-hua, QIAN Qing, CAO Meng-yu,
ZHENG Jia-hui, LIU Kai

(Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan
430019, China)

Abstract: Reasonable calculation of sludge yield is the basis of sludge treatment system design. This paper discussed the existing calculation formulas for calculating the yields of pretreated sludge, excess sludge and chemical sludge from the design point of view, and analyzed the determination of important parameters such as coefficient α and effluent SS in the pretreated sludge yield formula, sludge yield coefficient Y and sludge conversion rate f in the excess sludge yield formula, coefficient K of sludge converted by agent and dissolved total phosphorus in influent and effluent in the chemical sludge yield formula. The phosphorus balance method was proposed to check the excess sludge calculation formula, so as to solve the problem of wide range of sludge age θ_c . It was also proposed that Y should be calculated based on biodegradable COD (BCOD) when θ_c was greater than 20 days. In addition, it was suggested that the inert residues in the endogenous respiration process of activated sludge should be considered in the revision of the excess sludge calculation formula specified in *Standard for Design of Outdoor Wastewater Engineering*. It was recommended that the moisture content and hydraulic retention time of gravity concentrated sludge should be 99.2% and 12~16 h to avoid anaerobic phosphorus release. Adding polymeric aluminum chloride (PAC) to the sludge inlet pipe or bottom aeration was employed to reduce

the TP in supernatant. Conventional sludge concentration, conditioning and ultra-high plate and frame pressure filtration and dehydration process can reduce the moisture content of the sludge to approximately 55%, and further reducing the moisture content requires additional drying process after dehydration.

Key words: sludge yield; sludge yield coefficient; pretreated sludge; excess sludge; chemical sludge; moisture content

截至2021年,全国城市污水处理厂2 827座,处理规模为 $20\,767 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;县城污水处理厂1 765座,处理规模为 $3\,979 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;建制镇污水处理厂13 462座,处理规模为 $2\,932.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (不包括污水处理装置的 $2\,361.84 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)^[1];城镇(不含建制镇)污水处理规模共计约 $903 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。根据污水厂污泥产量约占处理水量的0.3%~0.5%(含水率以97%计)^[2],城镇干污泥产量约为 $(812.7 \sim 1\,354.5) \times 10^4 \text{ t/a}$ 。污水处理过程中产生的污泥有机物含量较高,不稳定、易腐化,含有大量病菌及寄生虫,必须进行污泥处理和处置,以实现污泥的稳定化、减量化、无害化与资源化。正确计算污泥产量,是确保污泥处理设施规模合理的基础。

1 不同污泥的产量计算

1.1 预处理污泥产量公式

预处理污泥包括初沉池、水解池、吸附-生物降解工艺(AB法)A段、化学强化一级处理工艺产生的污泥。预处理污泥的产量取决于进出水水质、工艺类型和运行条件,其计算^[3]通常如下所示:

$$S_1 = \alpha \cdot \frac{Q(SS_{01} - SS_{e1})}{1\,000} \quad (1)$$

式中: S_1 为预处理污泥量,kg/d; α 为系数,初沉池、水解池、AB法A段分别取0.8~1.0、0.5~0.8、1.0~1.2,化学强化一级处理工艺根据投药量取1.5~2.0; Q 为设计平均日污水量, m^3/d ; SS_{01} 为进水悬浮物浓度,mg/L; SS_{e1} 为出水悬浮物浓度,mg/L。

1.2 剩余污泥产量公式

剩余污泥指活性污泥系统排出的污泥。影响其产量的因素包括进出水水质、污泥龄、处理工艺、温度等。《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中剩余污泥的计算公式有两种,一种是按照污泥龄计算,如下所示:

$$\Delta X = \frac{V \cdot X}{\theta_c} \quad (2)$$

式中: ΔX 为剩余污泥量,kgSS/d; V 为生物反应

池的容积, m^3 ; X 为生物反应池内混合液悬浮固体平均浓度,gMLSS/L; θ_c 为污泥龄,d。

另一种是按照污泥增殖、衰减及不可生物降解和惰性悬浮物计算,如下所示:

$$\Delta X = YQ(S_0 - S_e) - K_d V X_v + fQ(SS_0 - SS_e) \quad (3)$$

式中: Y 为污泥产率系数,kgVSS/kgBOD₅,20℃时宜取0.3~0.8; S_0 为生物反应池进水BOD₅,kg/m³; S_e 为生物反应池出水BOD₅,kg/m³; K_d 为衰减系数,d⁻¹; X_v 为生物反应池内混合液挥发性悬浮固体平均浓度,gMLVSS/L; f 为悬浮固体的污泥转换率,gMLSS/gSS; SS_0 为生物反应池进水悬浮物浓度,kg/m³; SS_e 为生物反应池出水悬浮物浓度,kg/m³。

1.3 化学污泥产量公式

化学污泥为混凝沉淀工艺中形成的污泥,除磷常用聚合氯化铝(PAC)。根据PAC投加位置的不同,分为前置沉淀、协同沉淀和后置沉淀。其中协同沉淀除磷的产泥量取决于药剂品种、投加量及附带产生的其他沉淀物,实际应用按照2.5 kg污泥/kgFe或4.0 kg污泥/kgAl来计算;GB 50014—2021条文解释中提及,设有后置沉淀的污泥总量增加20%~35%;上述化学污泥产量估算方法的精确度均不高。

后置沉淀通过混凝剂与污水中的氢氧根、磷酸盐反应生成难溶的含磷絮凝体和磷酸铝沉淀,达到除磷目的,其污泥量通常由沉淀的悬浮物固体、投药产生的磷酸铝和羟铝聚合物、絮体吸附的溶解性总磷和药剂固体杂质组成^[4],计算如下:

$$S_2 = Q \cdot \frac{(SS_{02} - SS_{e2}) + KD + (DTP_0 - DTP_e) + Z}{1\,000} \quad (4)$$

式中: S_2 为后置沉淀化学污泥量,kg/d; SS_{02} 为沉淀池进水悬浮物浓度,mg/L; SS_{e2} 为沉淀池出水悬浮物浓度,mg/L; K 为药剂转化泥量系数; D 为药剂投加量,mg/L; DTP_0 为沉淀池进水溶解性总磷,mg/L;

DTP_e为沉淀池出水溶解性总磷,mg/L;Z为PAC药剂中固体杂质含量,mg/L。

2 污泥产量计算公式的讨论

2.1 预处理污泥产量公式参数

就初沉池污泥而言,污泥产率与排泥周期、水温、水力停留时间、进水SS浓度有着密切关系^[5]。若排泥间隔较长, α 取0.8,一般可取1.0^[3]。设计初沉池污泥量主要需确定SS_{el},可根据沉淀时间及表面水力负荷设计值选取,自然沉淀对SS的去除率一般为40%~55%,当沉淀时间达2.0h或表面水力负荷<1.5 m³/(m²·h)时,SS_{el}可取为0.45SS₀₁,反之则取0.6SS₀₁。

由于我国特别是南方地区污水普遍存在碳源不足的情况,为防止溶解性BOD₅吸附在SS或非溶解性BOD₅沉淀上,近年来新建污水厂一般不设初沉池,已建初沉池也逐步改造为生化池或调节池等,即SS与生化池增殖的剩余污泥一同在二沉池中进行沉淀。

2.2 剩余污泥产量公式参数

2.2.1 污泥龄计算公式参数

按照污泥龄计算,剩余污泥量 ΔX 与污泥龄 θ_c 成反比关系,以AAO工艺为例, θ_c 取值为10~22 d, ΔX 计算结果最大相差2.2倍。脱氮和除磷分别要求较长泥龄和较短泥龄,因此设计应根据污水厂脱氮除磷负荷侧重的不同进行取值。 ΔX 可通过磷的平衡予以计算,用于校核根据 θ_c 计算的公式。

微生物正常生长时污泥中含磷量一般为干重的1.5%~2.3%^[6]。刘昌等^[7]在超声与碱预处理对剩余污泥中磷及有机物释放的影响试验中测得高碑店污水处理厂(传统活性污泥法,有初沉池)的剩余污泥含磷量为1.23%;朱晓芸等^[8]在磷形态和pH对剩余污泥磷释放的影响中测得上海青浦、周浦和临港3座污水处理厂的污泥含磷量分别为1.74%、1.36%和0.81%。

传统聚磷菌(PAOs)除磷工艺污泥中含磷量为3%~7%^[9]。王莉等^[10]和周娜等^[11]测得西安市邓家村污水处理厂AAO系统(前端有初沉池)的剩余污泥含磷量分别为2.8%和2.5%;黄满红等^[12]在对AAO系统中碳、氮、磷的物料平衡分析中测得上海某城市污水处理厂(AAO工艺)中混合液挥发性悬浮固体(MLVSS)含磷量为7.7%;冯新长等^[13]测定

六安市城北污水处理厂(氧化沟)的剩余污泥含磷量为3.3%。

进入污水厂的磷主要通过两条途径去除:一条是被出水带离,另一条是随污泥外排。建议无初沉池生物脱氮除磷工艺的剩余污泥含磷量以2.5%~3%计,则磷平衡法计算剩余污泥公式如下:

$$\Delta X = \frac{Q \cdot (TP_0 - TP_e)}{1000 \times c} \quad (5)$$

式中:TP₀为生化池进水TP浓度,mg/L;TP_e为生化池出水TP浓度,mg/L;c为剩余污泥含磷量,%。

2.2.2 其他计算公式参数

① 基本参数取值

剩余污泥主要来源于两个方面:进水不可降解及惰性悬浮固体的沉积;微生物增殖。污泥产量受多种因素影响,其中最主要的影响因素包括SS、有机物、温度、MLVSS、 θ_c 、污泥负荷等^[14]。

进水中的有机物被微生物摄取后,约有1/3发生分解代谢转化成二氧化碳和水,约有2/3发生合成代谢,产生剩余活性污泥。污泥产率系数Y表示单位BOD₅降解后产生的微生物量,GB 50014—2021指出普通活性污泥法(以去除碳源污染物为主要目的)和厌氧好氧(A_pO)法的Y取0.4~0.8 kgVSS/kgBOD₅,缺氧/好氧(A_nO)法和AAO法的Y取0.3~0.6 kgVSS/kgBOD₅。对全国106座污水厂进行研究发现,AAO工艺(或AO工艺)、氧化沟工艺拟合的Y平均值分别为0.782和0.755 kgVSS/kgBOD₅,而自养微生物比例极小,故忽略不计。德国水协DWA将异养菌的Y取经验值0.75 kgVSS/kgBOD₅;国际水协IWA的ASM1模型法将异养微生物的Y取0.63 kgVSS/kgBOD₅,此外还考虑了自养菌的增殖,其Y的参考值为0.1 kgVSS/kgNH₃-N^[15]。综合考虑,建议脱氮除磷工艺的Y根据 θ_c 取0.6~0.75 kgVSS/kgBOD₅。

衰减系数K_d指微生物内源呼吸而自我分解的部分,与温度、 θ_c 等因素有关。K_d随 θ_c 的增大而增大,表观污泥产率也随之降低。衰减系数根据污水温度按照下式进行修正:

$$K_{dT} = K_{d20} \cdot \theta_T^{T-20} \quad (6)$$

式中:K_{dT}为T℃时的衰减系数,d⁻¹;K_{d20}为20℃时的衰减系数,取值为0.04~0.075 d⁻¹;θ_T为温度系数,取1.02~1.06;T为设计温度,℃。

目前我国部分城市仍存在截流式合流制系统,同时越来越多的污水厂不设初沉池,因此生化系统

进水含有大量的惰性悬浮固体,计算剩余污泥产量时需考虑该部分含量。由于进水悬浮固体中存在可生物降解有机物,一般城市污水挥发分占比0.6~0.65,其中可降解部分占比0.6~0.8^[16],故SS的污泥转换率 f 不为定值。德国水协DWA标准推荐 f 取0.6 gMLSS/gSS,日本相关指南推荐值为0.9~1.0 gMLSS/gSS。GB 50014—2021规定 f 宜根据试验资料确定,无资料时可取0.5~0.7 gMLSS/gSS。不设初沉池的污水厂,建议 f 取高值0.7 gMLSS/gSS。

② 污泥产率系数 Y 计算基础

采用单因素敏感性分析方法^[17],对 Y 、 K_{dt} 、 f 进行分析,发现 K_{dt} 的敏感度系数为 Y 、 f 的10倍,表明当上述3个系数变化值相同时, K_{dt} 对污泥产量的影响程度最大,但受变化幅度影响,实际微生物增殖、衰减及悬浮物沉淀对污泥产量的贡献在同一数量级。

周丹等^[18]认为,当COD/BOD₅<2.2时, Y 以BOD₅为计算基础;当COD/BOD₅>2.2, Y 应以COD/2.2为计算基础。可能是由于部分污水厂进水可生物降解COD(BCOD)较高,除易生物降解COD外,还存在一定量的慢速可生物降解有机物(XC_B),通常BCOD可用下式表示:

$$\text{BCOD} = \frac{1}{1 - f_{\text{BOD}}} \cdot \text{BOD}_{\text{tot}} \quad (7)$$

式中: f_{BOD} 为稳定因子,通常为0.01~0.2,一般取0.15; BOD_{tot} 为进水总生化需氧量,mg/L,BOD₅近似等于其70%。

以AAO工艺为例,由于污泥龄一般为10~22 d,存在XC_B的积累与利用。建议当 θ_c 在20 d以上时,以BCOD为 Y 的计算基础。

③ 污泥中非挥发性悬浮固体

环境保护部颁布的《城镇污水处理厂污泥处理处置污染防治最佳可行技术指南(试行)》中规定,不带预处理系统的活性污泥法及其变形工艺的剩余污泥产生量计算^[3]如下:

$$\Delta X = \frac{YQ(S_0 - S_e) - K_d V X_v}{f_1} + fQ(SS_0 - SS_e) \quad (8)$$

式中: f_1 为MLVSS/MLSS,对于生活污水,通常为0.5~0.75。

此公式相比GB 50014—2021考虑了 f_1 ,实际是关注了活性污泥内源呼吸过程中的惰性残余物,建议无初沉池等预处理系统的污水厂, f_1 可取低值

0.5~0.6。

2.3 化学污泥产量公式参数

药剂转化泥量系数 K ,理论上应综合考虑Al³⁺与PO₄³⁻反应生成沉淀的转化系数2.4和聚合氯化铝水解形成羟铝聚合物的转化系数1.53。当实际pH为4.6~9.8时,正磷酸盐主要以H₂PO₄⁻和HPO₄²⁻两种形态存在(PO₄³⁻几乎不存在)^[19],且较易被带正电荷的羟铝聚合物吸附而得到去除,故 K 取值为1.53(药剂投加量以Al₂O₃计)。进水DTP₀可近似认为取设计进水TP的80%^[20];出水DTP_e可认为几乎为0。《水处理剂 聚氯化铝》(GB/T 22627—2014)规定不溶物的质量分数≤0.4%,因此PAC药剂中的固体杂质质量可忽略不计。

3 污泥常规处理设计探讨

3.1 污泥浓缩工艺

国内污泥浓缩工艺中重力浓缩占比约70%,机械浓缩约20%,气浮浓缩占比不到10%^[21]。重力浓缩池占地大,运行设备简单,剩余污泥经浓缩后含水率一般为97%~98%;机械浓缩占地小,剩余污泥经浓缩后含水率一般为90%~95%,通常按照类似运行经验或厂家设备参数选型。

GB 50014—2021指出,当采用生物除磷工艺时,不宜采用重力浓缩。该条文主要是考虑重力浓缩时间长,担心发生厌氧释磷,上清液回流至污水系统前段增加系统磷负荷。此外,当厂区用地受限时,可采用占地较小的机械浓缩。

3.2 污泥脱水工艺

污泥脱水方式一般有自然干化、石灰稳定和机械脱水等。自然干化虽最经济,但受到气候、用地和环境卫生条件制约,应用受限。石灰稳定法通过生石灰与污泥中水分反应以及反应释放的热量形成蒸发而去除水分,应用范围较广,污泥含水率降低而绝干物质有所增加。机械脱水常用设备有板框压滤脱水机、带式压滤脱水机、叠螺脱水机和离心脱水机。后三者通常可将污泥含水率降至80%左右;板框压滤脱水机配合污泥调理剂可将含水率降至60%左右。部分城市要求出厂污泥含水率降至40%,一般在脱水至80%后进一步采用低温干化措施。

带式压滤脱水机的处理能力有进泥量和进泥固体负荷两种衡量标准,其大小与带速、滤带张力及

污泥调质效果有关。一般进泥量可取 $4\sim 7\text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$,进泥固体负荷可取 $150\sim 250\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{h})$ 。带式压滤脱水具有噪声小、电耗少的优点,但占地和冲洗水量大,环境卫生条件差。相较而言,离心脱水机结构密封,环境卫生条件好,但噪声较大,能耗较高,其处理能力通常以小时进泥量(m^3/h)评价。板框压滤脱水机的噪声和能耗均比离心脱水机低,但卫生条件与带式压滤脱水机类似,可将污泥深度脱水至含水率为60%左右,其过滤周期为 $1.5\sim 4\text{ h}$,处理能力可达 $2\sim 4\text{ kgDS}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。

3.3 污泥干化工艺

当污泥出厂要求含水率在50%以下时,需采用干化工艺。常见的污泥干化设备有多级圆盘干化机、带式干化机、薄层干化机、低温真空脱水干化一体机。除脱水干化一体机外,其余干化设备通常在前端设置脱水环节,采用“脱水+低温干化”两段式处理。热源一般有电能、天然气、蒸汽等,电能对应热泵型低温干化机,后两者对应余热型低温干化机。

3.4 浓缩、脱水、干化工艺讨论

3.4.1 污泥浓缩

在污泥重力浓缩池进泥管路上投加PAC或底部曝气,可显著降低上清液TP浓度^[21]。周玉红等^[22]研究AAO及MBR工艺剩余污泥浓缩过程中磷的释放,发现由于AAO工艺的污泥前16h释磷缓慢,因此24h内上清液中TP浓度远小于一般进水浓度。GB 50014—2021规定重力浓缩时间不宜小于12h;《给水排水设计手册 第5册 城镇排水》(第三版)指出浓缩池容积应按照浓缩12~16h核算,不宜过长,否则污泥将腐败产生 CO_2 和 H_2S 。建议实际设计重力浓缩池的水力停留时间取12~16h,通过投加PAC或设置底部曝气控制释磷强度。

进入浓缩池的污泥含水率一般为99.2%~99.6%,考虑避免停留时间过久导致释磷,建议取99.2%(即含固率为0.8%)。进泥含固率即污泥浓度,其中二沉池污泥浓度计算如下:

$$X_r = \frac{10^6}{\text{SVI}} \quad (9)$$

式中: X_r 为剩余污泥浓度,mg/L;SVI为污泥容积指数,一般取80~150 mL/g。

3.4.2 污泥脱水

如污泥含水率只要求达到80%,可采用卫生条

件较好的离心脱水机或叠螺脱水机,通常查阅设备手册,根据进泥含水率,选取对应进泥量(m^3/h)或处理量(kg/h)的型号。当含水率要求达到60%时,需采用板框压滤脱水机,如采用超高压板框压滤脱水机辅以调理,可将市政污水厂污泥的含水率降至55%左右。

压滤面积 A 为设备选型的主要参数;普通板框压滤脱水机1个运行周期通常需4h,其中压滤时间1h;设计处理能力建议取 $4\text{ kgDS}/(\text{m}^2\cdot\text{批})$ 。 A 的计算如下:

$$A = \frac{S}{j \times (1 - b) \times \rho \times t} \quad (10)$$

式中: S 为干污泥量,kg/d; b 为脱水后污泥含水率,%; ρ 为脱水后污泥密度,含水率60%的市政污泥可取 $1.1\sim 1.2\text{ kg/L}$; t 为全天运行批次,批次/d,通常4h为1个批次,全天2班共16h,总计4批次/d; j 为压滤机每批次每平方压滤面积对应的固体容积,按照压滤后产生滤饼厚度为20~30mm计算,取值为 $10\sim 15\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{批次})$ 。

3.4.3 污泥干化

低温真空脱水干化一体机相较于“脱水+低温干化”两段式工艺,流程更省,占地更小,但设备较贵。两段式脱水干化工艺,前端脱水后污泥含水率不宜过低,以方便造粒机切割污泥,通常采用能将含水率降至70%~80%的叠螺、离心或带式脱水机。低温干化机根据干化前后污泥质量减少量选型。

与电能相比,天然气和蒸汽的吨泥干化费用可能更高,需根据市场价格进行经济比较。根据工程经验,当蒸汽(0.8 MPa)价格低于120~150元/t时,才有可能比热泵型低温干化机[综合能耗为 $265\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,电价以 $0.7\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计]更经济。

4 结论

① 预处理污泥产量公式系数 α 应根据工艺类型、排泥间隔选取,其中出水SS应根据沉淀时间及表面水力负荷确定。后置沉淀污泥产量由沉淀的悬浮物固体、投药产生的磷酸铝和羟铝聚合物、絮体吸附的溶解性总磷和药剂固体杂质组成,其中药剂固体杂质可忽略不计,进水溶解性TP可取进水TP的80%,出水溶解性TP可取0,药剂转化泥量系数 K 取1.53(药剂投加量以 Al_2O_3 计)。

② 剩余污泥产量公式按污泥龄法计算的不确定性较大,建议采用磷平衡法对其进行校核。建

议脱氮除磷工艺的污泥产率系数 Y 根据污泥龄 θ_c 取0.65~0.75 kgVSS/kgBOD₅;当 $\theta_c > 20$ d时,建议以BCOD为 Y 的计算基础;不设初沉池的污水厂,建议污泥转换系数 f 取高值0.7 gMLSS/gSS, MLVSS/MLSS取0.5~0.6。

③ 当厂区用地受限时,建议采用机械浓缩。当除磷工艺污泥采用重力浓缩时,浓缩时间优选12~16 h,进泥设计含水率选取低值99.2%。可在进泥管路上投加PAC或池底曝气以降低上清液TP浓度。

④ 当要求污泥含水率为80%时,采用卫生条件好的叠螺或离心脱水机;经浓缩、调理、超高压板框压滤脱水可将污泥含水率降至55%左右。干化可进一步降低污泥含水率以适应不同污泥出厂要求,当前“脱水+低温干化”两段式工艺较脱水干化一体机投资更省;如无废热源,热泵型低温干化机则更经济。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴(2021)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook (2021)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022 (in Chinese).
- [2] 张自杰. 排水工程(下册)[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 328-329.
ZHANG Zijie. Drainage Engineering (vol. II) [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 328-329 (in Chinese).
- [3] 环境保护部. 城镇污水处理厂污泥处理处置污染防治最佳可行技术指南(试行)[EB/OL]. [2023-03-19]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201003/W020100310402829058583.pdf>.
Ministry of Environmental Protection. Guideline on best available technologies of pollution prevention and control for treatment and disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant (on trial) [EB/OL]. [2023-03-19]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201003/W020100310402829058583.pdf> (in Chinese).
- [4] 刘静伟. 城市污水处理厂生物辅助同步或后置化学除磷工艺的试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016: 60-63.
LIU Jingwei. Study on Co-precipitation or Post-precipitation Chemical Phosphorus Removal Process in Urban Sewage Treatment Plant [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016: 60-63 (in Chinese).
- [5] 许洲. 城镇污水处理初沉污泥产率影响因素研究[J]. 城市道桥与防洪, 2014(3): 3.
XU Zhou. The research of effect for primary sludge productivity in municipal wastewater treatment plant [J]. Urban Road Bridges & Flood Control, 2014(3): 3 (in Chinese).
- [6] 许保玖, 龙腾锐. 当代给水与废水处理原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 530-547.
XU Baojiu, LONG Tengrui. Contemporary Principles of Water and Wastewater Treatment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 530-547 (in Chinese).
- [7] 刘昌, 曾萍, 宋永会, 等. 超声与碱预处理对剩余污泥磷及有机物释放的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(5): 1276-1284.
LIU Chang, ZENG Ping, SONG Yonghui, et al. Phosphorus and DOM releasing from different surplus activated sludge by ultrasonic and alkaline pretreatment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(5): 1276-1284 (in Chinese).
- [8] 朱晓芸, 杨红, 高春梅. 磷形态和pH对剩余污泥磷释放的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(1): 102-107.
ZHU Xiaoyun, YANG Hong, GAO Chunmei. The influence of phosphorus form and pH on phosphorus release from sewage sludge [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(1): 102-107 (in Chinese).
- [9] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 192-193.
ZHENG Xingcan, LI Yaxin. Phosphorus and Nitrogen Removal Technology of Sewage [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998: 192-193 (in Chinese).
- [10] 王莉, 杨永哲, 李林辉, 等. 富磷剩余污泥重力浓缩过程中各参数的变化特征[J]. 中国给水排水, 2011, 27(1): 37-40.
WANG Li, YANG Yongzhe, LI Linhui, et al. Parameter variation characteristics of phosphorus-rich sludge during gravity thickening [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(1): 37-40 (in Chinese).
- [11] 周娜, 袁林江, 陈光秀, 等. 污泥含磷量与脱氮除磷系统污泥膨胀的关系研究[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 2981-2987.
ZHOU Na, YUAN Linjiang, CHEN Guangxiu, et al.

- Relationship between phosphorus content in activated sludge and sludge bulking in biological nutrient removal SBR system [J]. *Environmental Science*, 2009, 30 (10): 2981-2987 (in Chinese).
- [12] 黄满红, 李咏梅, 顾国维. A²O 系统中碳、氮、磷的物料平衡分析[J]. *中国给水排水*, 2009, 25 (13): 41-44.
HUANG Manhong, LI Yongmei, GU Guowei. Analysis on mass balance of carbon, nitrogen and phosphorus in A²O process [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25 (13): 41-44 (in Chinese).
- [13] 冯新长, 张黎黎. 污水处理厂剩余污泥中总磷的测定[J]. *环境科学导刊*, 2012, 31(3): 94-96.
FENG Xinchang, ZHANG Lili. Determination of total phosphorus in surplus sludge of sewage treatment plant [J]. *Environmental Science Survey*, 2012, 31(3): 94-96 (in Chinese).
- [14] 王磊. 城市污水厂污泥产率季节变化与影响因素分析[J]. *净水技术*, 2018, 37(6): 36-40.
WANG Lei. Analysis of seasonal variation and influencing factors of sludge yield in municipal sewage plant [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37 (6): 36-40 (in Chinese).
- [15] 陈晓光, 王硕, 聂新宇, 等. 城市污水处理厂污泥产率计算公式探讨[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(18): 68-72.
CHEN Xiaoguang, WANG Shuo, NIE Xinyu, *et al.* Discussion on calculation formula of excess sludge yield in wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(18): 68-72 (in Chinese).
- [16] 吴华明. 城市污水处理厂污泥产率的探讨[J]. *中国市政工程*, 1998(4): 40-42.
WU Huaming. A study on sludge production in city sewage treatment works [J]. *China Municipal Engineering*, 1998(4): 40-42 (in Chinese).
- [17] 金平日, 顾雪锋, 汪玉平. 污水处理厂剩余污泥理论估算与实际产量的比较[J]. *净水技术*, 2020, 39 (12): 111-116.
JIN Pingri, GU Xuefeng, WANG Yuping. Comparison of theoretical estimation and practical output of excess sludge production in WWTPs [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(12): 111-116 (in Chinese).
- [18] 周丹, 周雹. 高 C/B 值污水生化处理产泥量的简易计算方法[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(18): 47-49.
ZHOU Dan, ZHOU Bao. Calculation method for sludge production of biological treatment of wastewater with high COD/BOD [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(18): 47-49 (in Chinese).
- [19] 钱丽莉, 任洪艳, 缪恒锋, 等. 城市景观水系混凝除磷试验研究[J]. *工业水处理*, 2011, 31(8): 48-51.
QIAN Lili, REN Hongyan, MIAO Hengfeng, *et al.* Study on the phosphorus removal from landscape water system by coagulation [J]. *Industrial Water Treatment*, 2011, 31(8): 48-51 (in Chinese).
- [20] 徐伟勇. 城市污水处理厂尾水中磷的形态分析及除磷研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009: 24-26.
XU Weiyong. Study on Speciation and Removal of Phosphorus in Tail Water from Municipal Wastewater Treatment Plant [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009: 24-26 (in Chinese).
- [21] 李吉玉, 刘安平, 毛先勇, 等. 污泥浓缩池中磷的释放及其强化去除措施[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(13): 1-5.
LI Jiyu, LIU Anping, MAO Xianyong, *et al.* Release of phosphorus in sludge thickener and its enhanced removal measures [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35 (13): 1-5 (in Chinese).
- [22] 周玉红, 杨威, 任重远. A²O 和 MBR 工艺剩余污泥浓缩过程中磷释放对比[J]. *广东化工*, 2014, 41 (5): 225.
ZHOU Yuhong, YANG Wei, REN Zhongyuan. Comparison of phosphate releasing during sludge concentration of A²O process and MBR process [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2014, 41 (5): 225 (in Chinese).

作者简介: 韩佩君(1992-), 男, 河南信阳人, 硕士, 工程师, 从事市政给水排水工程设计工作。

E-mail: 1556267763@qq.com

收稿日期: 2023-03-19

修回日期: 2023-07-03

(编辑: 沈靖怡)