

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.24.010

## 剩余污泥衰减系数取值范围探讨

赵剑强<sup>1,2</sup>, 张局<sup>1</sup>, 史冰峰<sup>1</sup>, 杨文娟<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 剩余污泥量是污水处理厂设计和运行的重要参数。我国《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中给出了按污泥产率系数、衰减系数及不可生物降解和惰性悬浮物计算污水处理厂剩余污泥量的公式,但该公式中的污泥衰减系数( $K_d$ )取值范围(0.04~0.075 d<sup>-1</sup>)不能适应进水中含有较高浓度不可生物降解悬浮物在长污泥龄下的情况。基于污泥龄的概念,通过理论推导给出了该计算公式中 $K_d$ 的表达式,说明了 $K_d$ 的实质含义和影响因素,指出 $K_d$ 并不是一个常数,其值随污泥龄和不可生物降解悬浮物在反应池中的累积浓度占混合液挥发性悬浮固体浓度的比例不同而不同。可由污泥龄和进水中不可生物降解悬浮物浓度与可生物降解有机污染物浓度比值判断 $K_d$ 的取值。所列举的工程实例的适宜 $K_d$ 值为0.03 d<sup>-1</sup>。可为改进和拓宽该剩余污泥量计算公式的应用范围提供有益帮助。

**关键词:** 污水处理厂; 剩余污泥; 污泥龄; 混合液挥发性悬浮固体; 衰减系数

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)24-0053-05

### Discussion on the Value Range of Excess Sludge Decay Coefficient

ZHAO Jian-qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Ju<sup>1</sup>, SHI Bing-feng<sup>1</sup>, YANG Wen-juan<sup>1,2</sup>

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The amount of excess sludge is an important factor in the design and operation of wastewater treatment plants. The formula for calculating the excess sludge quantity in wastewater treatment plants according to sludge yield coefficient, decay coefficient ( $K_d$ ) and non-biodegradable and inert suspended solids is proposed in *Standard for Design of Outdoor Wastewater Engineering* (GB 50014—2021). However, the value range of sludge decay coefficient (0.04–0.075 d<sup>-1</sup>) in this formula cannot adapt to the condition that the influent contains a high concentration of non-biodegradable suspended solids with a long sludge age. Based on the concept of sludge age, the paper introduced the expression of sludge decay coefficient by theoretical derivation, illustrated the essential meaning and influence factors of sludge decay coefficient, and pointed out that decay coefficient was not a constant and its value varied with sludge age and the proportion of non-biodegradable suspended solid cumulative concentration in the reaction tank to the concentration of volatile suspended solids in the mixed liquor. It is proposed that the value of  $K_d$  can be judged by the sludge age and the ratio of the concentration of non-biodegradable

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(51778057); 宁夏回族自治区重点研发计划(重点)项目(2019BFG02031)

通信作者: 杨文娟 E-mail: 81858645@qq.com

suspended solids and the concentration of biodegradable organic pollutants in the influent. A  $K_d$  value of  $0.03 \text{ d}^{-1}$  is appropriate for an engineering example cited in this paper. This research is expected to provide useful help for improving and broadening the application range of the formula.

**Key words:** wastewater treatment plants; excess sludge; sludge age; mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS); decay coefficient

## 1 研究背景

剩余污泥量是污水处理厂设计和运行过程中的重要参数,合理地确定剩余污泥量对污水厂的稳定运行起着重要作用。在我国,《室外排水设计标准》(GB 50014—2021,以下简称《标准》)是指导污水处理厂设计和运行的重要技术依据,其第7.7.3—2条给出了按照污泥产率系数、衰减系数及不可生物降解和惰性悬浮物计算剩余污泥量的公式:

$$\Delta X = YQ(S_0 - S_e) - K_d VX_v + fQ(SS_0 - SS_e) \quad (1)$$

式中: $\Delta X$ 为剩余污泥量,kgSS/d; $Y$ 为污泥产率系数,20℃时为0.3~0.8 kgVSS/kgBOD<sub>5</sub>;  $Q$ 为设计平均日污水量,m<sup>3</sup>/d; $S_0$ 为生物反应池进水五日生化需氧量,kg/m<sup>3</sup>; $S_e$ 为生物反应池出水五日生化需氧量,kg/m<sup>3</sup>; $K_d$ 为衰减系数,取值范围为0.04~0.075 d<sup>-1</sup>; $V$ 为生物反应池的容积,m<sup>3</sup>; $X_v$ 为生物反应池内混合液的挥发性悬浮固体平均浓度,gMLVSS/L; $f$ 为SS的污泥转换率,宜根据试验资料确定,无试验资料时可取0.5~0.7 gMLSS/gSS; $SS_0$ 为生物反应池进水悬浮物浓度,kg/m<sup>3</sup>; $SS_e$ 为生物反应池出水悬浮物浓度,kg/m<sup>3</sup>。

近年来,随着污水处理工程特别是村镇污水处理工程的快速建设和普及,出现了不少建成的污水处理厂因实际处理水量远小于设计水量,致使污水停留时间长<sup>[1]</sup>、污泥浓度低的状况。为了提高生化池处理性能,运营单位常常采用降低剩余污泥排放量的手段来提高反应池中的污泥量<sup>[2]</sup>,但是,极端地减少排泥会使生化反应池中的灰分含量显著增大,进水中的不可降解有机固体在混合液挥发性悬浮固体(MLVSS)中所占比例增加,采用《标准》给出的剩余污泥量计算公式计算剩余污泥量时因MLVSS的衰减系数 $K_d$ 取值范围不适宜而造成计算结果的偏差。笔者试图通过对该公式的来源进行分析和推导给出 $K_d$ 的计算方法和取值范围,以便拓宽公式的适用范围。

## 2 剩余污泥计算公式的推导

### 2.1 生化反应池中污泥浓度表达式

由污泥龄,即固体停留时间(SRT)定义,可知生化系统在稳态下单位时间产生的剩余污泥量为:

$$\Delta X = \frac{VX_T}{\Theta_c} \quad (2)$$

式中: $\Theta_c$ 为固体停留时间SRT,即泥龄,d; $X_T$ 为生物反应池内混合液悬浮固体浓度,gMLSS/L。

假设排放的剩余污泥主要由活性生物量(有机物转化成的生物量减去衰减掉的生物量)、微生物衰减产生的残渣和进出水中不可生物降解的有机物及无机物组成,由质量守恒原理,可得生化系统在稳态下单位时间排放剩余污泥量<sup>[3]</sup>为:

$$\Delta X = YQ(S_0 - S_e) - b_H X_H V + f_d b_H X_H V + Q\Delta SS_{nb} + Q\Delta SS_i \quad (3)$$

式中: $b_H$ 为活性微生物的衰减系数,d<sup>-1</sup>; $X_H$ 为生物反应池内活性生物量浓度,g/L; $f_d$ 为活性生物量转化为生物残渣的比例系数; $\Delta SS_{nb}$ 为生物反应池进出水中不可降解的有机悬浮固体浓度差,kg/m<sup>3</sup>; $\Delta SS_i$ 为生物反应池进出水中无机悬浮固体浓度差,kg/m<sup>3</sup>。

将式(3)代入式(2),可得生化反应池中的TSS浓度为:

$$X_T = Y(S_0 - S_e) \frac{\Theta_c}{\tau} - b_H X_H \Theta_c + f_d b_H X_H \Theta_c + \Delta SS_{nb} \frac{\Theta_c}{\tau} + \Delta SS_i \frac{\Theta_c}{\tau} \quad (4)$$

式中: $\tau$ 为水力停留时间HRT,d。

式(4)等号右侧前两项之和为生化池活性微生物浓度,即等于 $X_H$ ,所以可得:

$$X_H = \frac{Y(S_0 - S_e) \Theta_c}{1 + b_H \Theta_c \tau} \quad (5)$$

式(4)等号右侧第三和第四项分别为生化池中活性微生物衰减产生的残渣浓度及进水中悬浮固体不可降解部分形成的混合液挥发性悬浮固体(MLVSS)浓度,所以,式(4)等号右侧前四项之和等

于生化池 MLVSS 浓度<sup>[4]</sup>,即  $X_v$ ,则有:

$$X_v = \frac{(1 + f_d b_H \Theta_c) Y (S_0 - S_e) \Theta_c}{1 + b_H \Theta_c} \frac{\Theta_c}{\tau} + \Delta SS_{nb} \frac{\Theta_c}{\tau} \quad (6)$$

于是,式(4)可写成:

$$X_T = X_v + \Delta SS_i \frac{\Theta_c}{\tau} \quad (7)$$

## 2.2 生化池剩余污泥排放量表达式

将式(5)代入式(3),可得剩余污泥排放量与进出水可降解有机物的关系式:

$$\Delta X = \frac{(1 + f_d b_H \Theta_c) Y Q (S_0 - S_e)}{1 + b_H \Theta_c} + Q \Delta SS_{nb} + Q \Delta SS_i \quad (8)$$

或:

$$\Delta X = Y Q (S_0 - S_e) - \frac{(1 - f_d) b_H \Theta_c}{1 + b_H \Theta_c} Y Q (S_0 - S_e) + Q \Delta SS_{nb} + Q \Delta SS_i \quad (9)$$

将式(6)代入式(9),可得剩余污泥排放量与生化池 MLVSS 浓度的关系式:

$$\Delta X = Y Q (S_0 - S_e) - \frac{(1 - f_d) b_H (V X_v - \Theta_c Q \Delta SS_{nb})}{1 + f_d b_H \Theta_c} + Q \Delta SS_{nb} + Q \Delta SS_i \quad (10)$$

将式(7)代入式(10),可得剩余污泥排放量与生化池 MLSS 浓度的关系式:

$$\Delta X = Y Q (S_0 - S_e) - \frac{(1 - f_d) b_H (V X_T - \Theta_c Q \Delta SS_{nb} - \Theta_c Q \Delta SS_i)}{1 + f_d b_H \Theta_c} + Q \Delta SS_{nb} + Q \Delta SS_i \quad (11)$$

由于  $\Delta SS_{nb}$  不易测量,所以用式(6)中的  $X_v$  表示  $\Delta SS_{nb}$ ,得:

$$\Delta SS_{nb} = X_v \frac{\tau}{\Theta_c} - \frac{(1 + f_d b_H \Theta_c) Y (S_0 - S_e)}{1 + b_H \Theta_c} \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)或式(10),可得:

$$\Delta X = \frac{X_v V}{\Theta_c} + Q \Delta SS_i \quad (13)$$

$\Delta SS_i$  的浓度值可由进出水中的 TSS 减去进出水中的 VSS 浓度确定,即:

$$\Delta SS_i = \Delta TSS - \Delta VSS \quad (14)$$

所以,式(13)可写成:

$$\Delta X = \frac{X_v V}{\Theta_c} + Q (\Delta TSS - \Delta VSS) \quad (15)$$

生化池中  $X_H$  与  $X_T$  的比值表示 MLSS 中活性生物量的比例  $f_A$ ,用式(5)除以式(7),可得:

$$f_A = \frac{1}{1 + f_d b_H \Theta_c + \frac{(\Delta SS_{nb} + \Delta SS_i) (1 + b_H \Theta_c)}{Y (S_0 - S_e)}} \quad (16)$$

由以上推导过程可见,剩余污泥排放量与污泥龄密切相关。如果已知生化池中  $X_v$  的值便可使用式(15)计算剩余污泥排放量。

## 3 对《标准》中剩余污泥计算公式的讨论

### 3.1 《标准》中剩余污泥计算公式分析

比较以上各式,可见式(1)与式(10)的表达式比较接近。式(10)等号右侧第二项表示的是活性微生物衰减量与产生的残渣之差。因为,  $V X_v - \Theta_c Q \Delta SS_{nb}$  是生化池内 MLVSS 的量减去 SRT 期间进水导致生化池内积累的不可生物降解的有机固体量,该差值即为活性生物量与生物残渣量之和。

$1/(1 + f_d b_H \Theta_c)$  表示的是活性生物量占活性生物量与生物残渣之和的比例[在式(16)中令  $\Delta SS_{nb} + \Delta SS_i$  为 0 即可得],所以,  $b_H$  与这二者乘积便是活性生物的衰减量。  $f_d$  表示的是生物衰减过程生成的残渣占活性生物量的比例,所以,衰减量与  $(1 - f_d)$  乘积便是活性微生物衰减量与产生的残渣量之差。这与式(3)中所表示的剩余污泥的构成一致。

令式(1)中第二项与式(10)中的第二项相等,可得:

$$K_d = \frac{(1 - f_d) b_H}{(1 + f_d b_H \Theta_c)} \left( 1 - \frac{\Theta_c \Delta SS_{nb}}{\tau X_v} \right) \quad (17)$$

可见式(1)中的  $K_d$  并不是一个常数,其与污泥龄及生化反应池中积累的来自进水中的  $\Delta SS_{nb}$  占 MLVSS 的比例  $(\Theta_c \Delta SS_{nb} / \tau X_v, \text{用 } f_{NV} \text{ 表示})$  有关。这是因为式(1)中  $K_d$  的含义实质上是 MLVSS 的衰减系数而不是活性微生物的衰减系数。而  $X_v$  的浓度与污泥龄和  $\Delta SS_{nb}$  有关[见式(6)],其随污泥龄和  $\Delta SS_{nb}$  的增大而增大;泥龄越大,则污泥中非活性物质所占比例越大,活性生物量所占比例越小。

以 20 °C 时,  $f_d=0.2$ ,  $b_H=0.2 \text{ d}^{-1}$ ,  $f_{NV}=0\%$ 、10%、20%、30%、40% 和 50% 为例,根据式(17)绘制  $K_d$  与 SRT 及  $f_{NV}$  的关系曲线(见图1)。

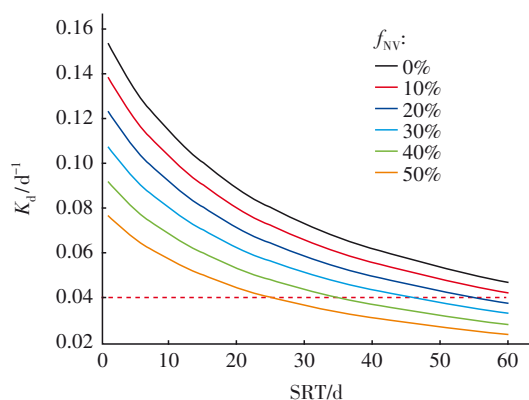
图1  $K_d$ 与SRT和 $f_{NV}$ 的关系曲线Fig.1 Relationship curves of  $K_d$ , SRT and  $f_{NV}$ 

图1说明 $K_d$ 的值在长污泥龄情况下会因 $f_{NV}$ 的影响而超出《标准》给出的取值下限( $0.04 \text{ d}^{-1}$ )。当 $f_{NV}=0\%$ 、 $10\%$ 、 $20\%$ 、 $30\%$ 、 $40\%$ 和 $50\%$ 时, $K_d$ 的取值下限( $0.04 \text{ d}^{-1}$ )对应的SRT分别为75、65、55、45、35和25 d。即在对应的 $f_{NV}$ 下,当SRT大于这些值时, $K_d$ 的值应小于 $0.04 \text{ d}^{-1}$ 。

那么在什么运行条件下会出现这种情况呢?有必要进一步分析 $K_d$ 与生化反应池进出水有机污染物浓度差的关系。将式(6)代入式(17),整理得到:

$$K_d = \frac{(1 - f_d) b_H}{1 + f_d b_H \Theta_c + \frac{(1 + b_H \Theta_c) \Delta SS_{nb}}{Y(S_0 - S_e)}} \quad (18)$$

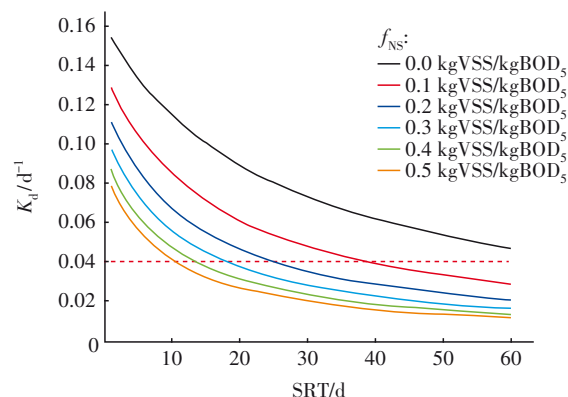
式(18)表明 $K_d$ 的值除与生化动力学常数及污泥龄有关外,还受到反应池进出水中不可降解有机固体浓度差 $\Delta SS_{nb}$ 与进出水中可降解有机污染物浓度差( $S_0 - S_e$ )的比值的影响。将此比值记为 $f_{NS}$  ( $\text{kgVSS/kgBOD}_5$ ),可见污泥龄越长、 $f_{NS}$ 越大时, $K_d$ 值越小。

同样以 $20^\circ\text{C}$ 时, $f_d=0.2$ , $b_H=0.2 \text{ d}^{-1}$ , $Y=0.6 \text{ kgVSS/kgBOD}_5$ , $f_{NS}=0.0$ 、 $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.3$ 、 $0.4$ 和 $0.5 \text{ kgVSS/kgBOD}_5$ 为例,根据式(18)绘制 $K_d$ 与SRT及 $f_{NS}$ 的关系曲线(见图2)。

图2表明,当 $f_{NS}=0.0$ 、 $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.3$ 、 $0.4$ 和 $0.5 \text{ kgVSS/kgBOD}_5$ 时, $K_d$ 的取值下限( $0.04 \text{ d}^{-1}$ )对应的SRT分别为75、39、25、18、13和10 d。可见,当 $f_{NS}$ 值较大时,即使在较短的泥龄(10 d)下也存在 $K_d$ 值下限值不适用的可能。

在实际工程中,由于生化池进出水中不可降解有机固体浓度相差较大,进出水中可降解有机污染

物浓度相差也较大,所以,可以近似用生化池进水中不可降解有机固体浓度与可降解有机污染物浓度的比值来表示 $f_{NS}$ 的值。当污泥龄长、 $f_{NS}$ 值高时, $K_d$ 应取低值。

图2  $K_d$ 与SRT和 $f_{NS}$ 的关系曲线Fig.2 Relationship curves of  $K_d$ , SRT and  $f_{NS}$ 

### 3.2 工程实例

西安市某市政污水处理厂设计处理规模为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用预处理+A<sup>2</sup>/O生物池+二沉池+高密度沉淀池+反硝化深床滤池+次氯酸钠消毒工艺,要求出水水质达到《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB 61/224—2018)中的A标准,其中 $\text{BOD}_5$ 限值为 $6 \text{ mg/L}$ ,SS限值为 $10 \text{ mg/L}$ ,生化池设计水力停留时间HRT为14.4 h。实际运行中生化反应池平均进水 $\text{BOD}_5$ 为 $93.94 \text{ mg/L}$ ,SS为 $117.19 \text{ mg/L}$ 。因进水 $\text{BOD}_5$ 浓度偏低,为保障出水水质,采用了减少排泥的运行方式。2021年1月—6月累计处理污水 $384.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,外运干污泥1276.33 t(含有化学污泥),经核算后外运生化反应池剩余污泥为245 t。反应器实际出水 $\text{BOD}_5$ 浓度平均为 $4.56 \text{ mg/L}$ ,SS浓度平均为 $6.4 \text{ mg/L}$ ;MLVSS约4000 mg/L。按照式(1)计算剩余污泥产生量,取 $Y=0.8 \text{ kgVSS/kgBOD}_5$ , $f=0.7$ , $K_d=0.04 \text{ d}^{-1}$ ,得到: $\Delta X = YQ(S_0 - S_e) - K_d V X_v + fQ(SS_0 - SS_e) = 0.8 \text{ kgVSS/kgBOD}_5 \times 384.8 \times 10^4 \text{ m}^3 \times (93.94 - 4.56) \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 - 0.04 \text{ d}^{-1} \times 15000 \text{ m}^3 \times 4000 \text{ mg/L} \times 180 \text{ d} \times 10^{-3} + 0.7 \times 384.8 \times 10^4 \text{ m}^3 \times (117.19 - 6.4) \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 = 141 \times 10^3 \text{ kg} = 141 \text{ t}$ 。

计算结果表明,即使采用式(1)中给出的最有利于接近该工程实际排泥量的参数取值,计算结果也与实际情况相差甚远。所以,根据本研究关于 $K_d$ 取值范围的分析,突破《标准》的约束,在其他参数



取值不变的情况下,将 $K_d$ 值降低为 $0.03\text{ d}^{-1}$ ,所得结果与实际情况接近。

#### 4 结论

我国《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)给出的按污泥产率系数、衰减系数及不可生物降解和惰性悬浮物计算污水处理厂剩余污泥量的公式中,污泥衰减系数 $K_d$ 并不是一个常数,其随污泥龄及生化反应池中积累的来自进水中的不可降解有机悬浮固体占MLVSS的比例的变化而变化。在一些长污泥龄的情况下,因进水中不可降解有机固体的影响, $K_d$ 的值会超出《标准》给出的取值下限。本研究给出了 $K_d$ 值的计算方法,并建议如果凭经验取值,那么泥龄长、进水中不可降解有机悬浮物浓度占可降解有机污染物浓度的比例较大时, $K_d$ 应取低值,反之, $K_d$ 应取高值。

#### 参考文献:

- [1] 丛广治. A/O法除磷工艺中污水停留时间的控制[J]. 中国给水排水, 1999, 15(12): 45-46.  
CONG Guangzhi. Control of wastewater retention time in A/O phosphorus removal process [J]. China Water & Wastewater, 1999, 15(12): 45-46 (in Chinese).
- [2] 于安峰. 好氧-厌氧耦合体系污泥减量化的机理研

究及工程应用[D]. 北京:清华大学, 2008.

YU Anfeng. Mechanism Study of the On-site Sludge Reduction in a Biological Process with Repeated Coupling of Aerobic and Anaerobic Conditions and Its Application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008 (in Chinese).

- [3] Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse [M]. 4th ed. USA: McGraw-Hill, 2002.
- [4] C·P·莱斯利·格雷迪, 格伦·T·戴杰, 南希·G·洛夫, 等. 废水生物处理 [M]. 3版. 张锡辉, 刘勇弟, 吴光学, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 143-154.  
LESLIE GRADY C P, DAIGGER G T, LIM H C, *et al.* Biological Wastewater Treatment [M]. 3rd ed. ZHANG Xihui, LIU Yongdi, WU Guangxue, translated. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017: 143-154 (in Chinese).

作者简介: 赵剑强 (1963—), 男, 陕西商洛人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事污水生物处理教学和科研工作, 发表学术论文 100 余篇, 曾获陕西省优秀教师和三秦人才奖励。

E-mail: 626710287@qq.com

收稿日期: 2021-11-26

修回日期: 2021-12-29

(编辑: 孔红春)

大力推进水利薄弱环节建设,  
提高防灾减灾能力