

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.01.003

# 基于絮体结构指标的丝状菌膨胀污泥SVI预测

胡小兵<sup>1,2</sup>, 张琳<sup>1</sup>, 汪坤<sup>1</sup>, 韦京云<sup>1</sup>, 林睿<sup>1</sup>, 张诗华<sup>1,2</sup>,  
钟梅英<sup>1</sup>, 谢俊霞<sup>1</sup>

(1. 安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 2. 生物膜法水质净化及利用技术教育部工程研究中心, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:** 为了建立更加准确的膨胀活性污泥沉降性表征方法, 筛选出5个反映污泥微观絮体结构的特征指标: 絮体大小(SZ)、伸长性(ST)、密实性(CP)、规则性(RG)和丝状菌(FL), 分析众多特征参数降维的可能性, 建立丝状菌膨胀污泥絮体结构特征指标体系, 以偏最小二乘回归法(PLS)探索膨胀污泥絮体结构特征指标与污泥容积指数(SVI)的关系, 建立丝状菌膨胀污泥的SVI预测函数。结果表明, 污泥絮体特征参数之间具有较好的相关性, 可采用主成分分析法(PCA)进行降维。污泥絮体结构特征指标与丝状菌膨胀活性污泥的SVI之间有较强的线性相关性( $R^2=0.779$ ), 据此建立了SVI预测模型, 丝状菌膨胀污泥的SVI实测值与预测值呈现较强的线性相关性( $R^2=0.801$ ), 模型能较好地预测丝状菌污泥膨胀。

**关键词:** 丝状菌膨胀污泥; 絮体结构指标; 污泥容积指数; 主成分分析法; 预测函数

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)01-0016-07

## Sludge Volume Index Prediction of Filamentous Bulking Sludge Based on Floc Structure Index

HU Xiao-bing<sup>1,2</sup>, ZHANG Lin<sup>1</sup>, WANG Kun<sup>1</sup>, WEI Jing-yun<sup>1</sup>, LIN Rui<sup>1</sup>,  
ZHANG Shi-hua<sup>1,2</sup>, ZHONG Mei-ying<sup>1</sup>, XIE Jun-xia<sup>1</sup>

(1. College of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China; 2. Engineering Research Center of Biofilm Water Purification and Utilization Technology <Ministry of Education>, Ma'anshan 243032, China)

**Abstract:** Five comprehensive indicators, namely floc size (SZ), stretchability (ST), compactness (CP), regularity (RG) and filamentous bacteria (FL), reflecting the microscopic floc structure characteristics of activated sludge were selected to establish a more accurate method for characterizing the settleability of bulking activated sludge. The possibility of dimensionality reduction of many characteristic parameters was analyzed, and the structural characteristic index system of filamentous bulking sludge floc was established. The relationship between the structural characteristics of bulking sludge floc and sludge volume index (SVI) was explored by using partial least squares regression (PLS) method, so as to establish a SVI prediction function of bulking sludge. There were good correlations

基金项目: 生物膜法水质净化及利用技术教育部工程研究中心合作项目(BRT19-02); 安徽省重点研究与开发计划项目(202004h07020027)

通信作者: 胡小兵 E-mail: hxb6608@163.com

among the characteristic parameters of sludge floc, and principal component analysis (PCA) method could be employed to reduce the dimensionality. There was a strong linear correlation ( $R^2=0.779$ ) between the structural characteristics of sludge floc and SVI of filamentous bulking activated sludge, and a SVI prediction model was established based on the linear correlations. There was a strong linear correlation between the measured and the predicted SVI value of filamentous bulking sludge ( $R^2=0.801$ ), indicating that the model could predict filamentous bulking sludge well.

**Key words:** filamentous bulking sludge; indicator of floc structure; sludge volume index (SVI); principal component analysis; predictive function

活性污泥法作为最常见的污水处理方法,具有处理效果好、运行成本低等优点,但存在污泥膨胀的技术难题,导致活性污泥难沉降、易流失,出水水质差,且难以恢复正常,严重时可导致整个处理工艺的失败<sup>[1-3]</sup>。污泥膨胀原因有很多,而90%以上是由丝状菌过度生长造成的<sup>[4]</sup>。因此,如何准确预测丝状菌污泥膨胀已成为污水处理厂迫切需要解决的问题。

污泥膨胀预测与判断的方法很多,目前主要根据污水处理厂运行情况 and 丝状菌特征两方面进行预判<sup>[5-14]</sup>,例如,Lou等人<sup>[7]</sup>将温度、pH值、COD等有关参数进行主成分回归并建立人工神经网络模型,通过这些模型预测污泥容积指数(SVI)变化与污泥膨胀;范念斯等人<sup>[8]</sup>对丝状菌生长情况进行耦合监测;Salvado等人<sup>[10]</sup>建立基于丝状菌类型及聚集方式的丝状菌长度与污泥沉降性的模型;Nittami等人<sup>[11]</sup>通过实时监测优势菌种丰度,确定其与污泥沉降性的关系,预测与判别污泥膨胀。这些方法能较好地预测污泥膨胀问题,但从活性污泥絮体微观结构方面进行分析,可克服常规指标分析的宏观滞后性,具有更好的前瞻性,可更加准确地预测污泥膨胀特征。

活性污泥絮体由一系列絮团黏结而成,形态结构多样,可将絮体形态分为4大类:丝状菌骨架不明显的絮体、长条形絮体、巨型絮体、巨型污泥<sup>[15]</sup>,可采用孔隙率、分形特征、密度等参数表征污泥絮体结构<sup>[16]</sup>。图像软件检测能够获取更准确的絮体信息,絮体大小、形状因子、伸长度、总丝状菌含量等多个参数都会显著影响污泥沉降性<sup>[17]</sup>。Boztoprak等人<sup>[18]</sup>使用图像处理 and 人工智能技术对絮体、丝状物的结构形态进行统计并建立模型进而估计SVI值。笔者前期研究通过图像软件分析多个活性污

泥絮体结构参数,采用降维分析方法建立了絮体结构特征指标,Isomap非线性降维的特征指标更准确、简洁地描述絮体结构特征<sup>[19]</sup>。然而基于正常活性污泥建立的絮体结构特征指标不适用于形态结构更加复杂、变化多样的膨胀活性污泥。鉴于此,笔者基于丝状菌膨胀活性污泥絮体结构特征,对絮体结构参数进行分类,采用合理的降维分析方法建立絮体结构特征指标函数体系,再利用偏最小二乘分析法(PLS)探讨特征指标对污泥沉降性的影响,建立以絮体结构特征指标为自变量的SVI预测函数方程,以期为污水处理厂预测与控制活性污泥膨胀提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置与运行

实验装置采用内径为10.0 cm、高为23.0 cm、有效容积为1.5 L的柱状反应器。采用SBR的方式运行,每天运行2个周期,每周期包括4个阶段:曝气(10 h)、沉淀(1.5 h)、排水与进水(0.5 h)。使用空气压缩机对实验装置供氧,采用智能定时器控制曝气时间,通过转子流量计维持溶解氧浓度在2.5~5.24 mg/L之间。

### 1.2 污泥驯化与实验用水

采集马鞍山某污水处理厂曝气池内的原污泥,静置沉降一段时间后,选取沉降性能良好的污泥作为接种污泥,其污泥浓度(MLSS)为3 500 mg/L。取污水处理厂初沉池的污水,按照1:10的比例添加自来水进行稀释,再投加葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾将COD:N:P调整为100:5:1,配制模拟生活污水作为实验进水。当系统接种污泥驯化30 d后,COD去除率稳定,认为驯化完成,将COD:N:P调整为100:0.05:0.01进行污泥膨胀的诱导<sup>[20]</sup>,系统运行60 d后SVI急剧增高,发生了丝状菌污泥膨胀。

### 1.3 膨胀污泥絮体采集与参数分类

实验期内,每隔 3 d 采集一次膨胀活性污泥样品。将采集的样品制片放于显微镜下观察,用相机拍摄絮体图像。1 个载玻片采集 60 张左右图像,然后采用图片分析软件 Image-pro Plus 对图像进行预处理和微观絮体参数测量。按照国家标准方法测定污泥的 SVI 值。

为了更好地表征膨胀污泥特征,在正常污泥絮体 4 类结构指标的基础上<sup>[19]</sup>,增加“絮体伸长性”指标,形成 5 类指标,并对参数重新筛选,具体见表 1。

表 1 絮体结构特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of floc structure

项 目	特征参数	计算方法
大小 (SZ)	平均面积( $A_{mean}$ )	$A_T/N$
	轮廓线周长( $P_{cont}$ )	内置测量参数
	周长( $P$ )	内置测量参数
	最大弗雷德直径( $F_{max}$ )	内置测量参数
	当量直径( $D_{eq}$ )	$\sqrt{A/\pi}$
	长度( $L$ )	内置测量参数
	宽度( $W$ )	内置测量参数
伸长性 (ST)	长径比(AR)	$[1 + 4(L - W)]/\pi W$
	长短轴比(Asp)	内置测量参数
	高宽比(BR)	$H_{box}/W_{box}$
	充实度(Ext)	$A/(WL)$
密实性 (CP)	孔数(Ho)	内置测量参数
	孔率(HR)	内置测量参数
	密实度(Comp)	$\sqrt{4A/\pi}/F_{max}$
规则性 (RG)	圆度(Ro)	内置测量参数
	凸率(Conv)	$P_{cont}/P$
	形状因子(FF)	$4\pi A/P^2$
	分形维数(FD)	内置测量参数
丝状菌 (FL)	单位絮体面积丝状菌长度( $FL_A$ )	$FL/A$
	单位悬浮固体丝状菌长度( $FL_{SS}$ )	$FL/MLSS$
注: $A_T$ 为系统中采集的所有絮体的面积之和; $N$ 为絮体总数量; $A$ 为单个絮体面积; $H_{box}$ 和 $W_{box}$ 分别为絮体边框高度与宽度; $FL$ 为单个絮体内总丝状菌长度,公式来源见文献[17]~[19]。		

## 2 结果与讨论

### 2.1 丝状菌膨胀污泥絮体微观参数间的相关性

为了探索膨胀污泥絮体参数是否适合进行降维处理,首先对参数进行 Person 相关性分析,结果如图 1 所示。可见,各特征参数之间的相关性均有不同,整体看较为复杂。絮体结构大小的 7 个参数间的相关性相对简单。絮体平均面积( $A_{mean}$ )、最大弗

雷德直径( $F_{max}$ )、当量直径( $D_{eq}$ )、长度( $L$ )、宽度( $W$ )这 5 个参数间的相关性显著,因为这些参数都是直接反映絮体大小,其中,长度( $L$ )与当量直径( $D_{eq}$ )的相关性最低( $r=0.763, p<0.01$ ),平均面积( $A_{mean}$ )与当量直径( $D_{eq}$ )的相关性最高( $r=0.996, p<0.01$ )。轮廓线周长( $P_{cont}$ )、周长( $P$ )与其他各参数之间的相关性较弱,因为它们间接反映絮体大小,同时絮体丝状菌的数量较多,絮体形状极为不规则导致周长( $P$ )等参数受到较大影响。

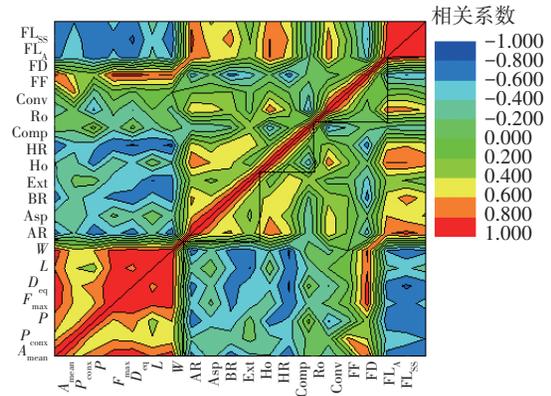


图 1 膨胀污泥絮体结构特征参数的相关系数矩阵  
Fig.1 Correlation coefficient matrix of structure parameters of floc in bulking activated sludge

在 4 个反映丝状菌膨胀污泥絮体伸长性的参数中,高宽比(BR)与长径比(AR)、长短轴比(Asp)有较强的相关性( $r=0.63, p<0.01$ ),长径比(AR)与长短轴比(Asp)的相关性一般( $r=0.431, p<0.05$ )。而充实度(Ext)与其他 3 个参数间的相关性较低,说明充实度(Ext)并不会因絮体高宽变化而显著改变。此外,由图 1 可知,充实度(Ext)还受到絮体密实度与丝状菌长度的影响。

表征污泥絮体结构密实性的 3 个参数间相关性相差较大,密实度(Comp)与孔数(Ho)之间呈现较强的负相关( $r=-0.529, p<0.01$ ),表明孔数越高,密实度越低;孔率(HR)与密实度(Comp)和孔数(Ho)的相关性均极低,它们之间不存在必然的联系。

表征污泥絮体结构规则性的 4 个参数间相关性较为复杂,分形维数(FD)与圆度(Ro)的相关性较强( $r=0.716, p<0.01$ ),与形状因子(FF)呈一定负相关( $r=-0.451, p<0.05$ ),说明随污泥膨胀分形的复杂,絮体形状越规则,絮体越密实。凸率(Conv)与圆度(Ro)、分形维数(FD)间的相关性较弱( $r<0.36$ )。从

膨胀污泥絮体结构的丝状菌特征来看,单位絮体面积丝状菌长度( $FL_A$ )与单位悬浮固体丝状菌长度( $FL_{SS}$ )之间的相关性极强( $r=0.906, p<0.01$ )。

由上述分析可知,大部分参数(超过77%)之间的相关系数都大于0.3,具有较理想的相关性,可进行主成分分析(PCA)法的降维分析<sup>[21]</sup>。

## 2.2 丝状菌膨胀污泥絮体结构特征指标降维分析

通过预处理分析发现,线性降维分析的主成分分析法比非线性降维的Isomap法更适用于膨胀污泥絮体结构分析,因此,利用PCA法对絮体结构多变量参数进行降维。

### 2.2.1 絮体大小特征指标

丝状菌膨胀污泥絮体大小特征的7个参数,经过PCA法降维得到特征指标SZ,特征值为5.313,贡献率和累计贡献率均为85.901%。各参数对絮体大小特征指标SZ作用较均匀,均呈正相关。絮体大小特征指标表达式为: $SZ = 3.63ZP_{conx} + 3.29ZP + 2.74ZL + 2.44ZW + 2.41ZF_{max} + 2.37ZD_{eq} + 2.35ZA_{mean}$ 。式中的“Z”代表该参数是经过标准化处理后的数据,下同。

### 2.2.2 絮体伸长性特征指标

丝状菌膨胀污泥絮体伸长特征的4个参数,经过PCA法降维得到特征指标ST,特征值为2.224,贡献率和累计贡献率均为78.603%。各参数与絮体伸长特征指标ST呈正相关,其中ZExt对ST的影响最大。絮体伸长性特征指标表达式为: $ST = 3.10ZExt + 1.99ZAsp + 1.82ZBR + 1.71ZAR$ 。

### 2.2.3 絮体密实性特征指标

表征丝状菌膨胀污泥絮体密实性特征的3个参数经过PCA法降维得到2个特征指标 $CP_1$ 、 $CP_2$ ,其特征值分别为1.522、1.007,贡献率分别为51.724%、33.577%,二者的累计贡献率为85.301%。二者皆含全部3个特征参数,但 $CP_1$ 中参数ZComp与之呈负相关, $CP_2$ 中参数与之均呈正相关,参数ZHo的影响远大于其他两个参数。絮体密实性特征指标表达式分别为: $CP_1 = 1.41ZHo + 4.96ZHR - 1.48ZComp$ ; $CP_2 = 52.82ZHo + 1.05ZHR + 3.29ZComp$ 。

根据两个指标的贡献率,将其整合为单一指标CP,各参数均与CP呈正相关。综合表达式为: $CP = 0.517CP_1 + 0.336CP_2 = 18.48ZHo + 2.92ZHR + 0.34ZComp$ 。

### 2.2.4 絮体规则性特征指标

利用PCA法对表征絮体规则特征的4个参数进

行降维分析,得到2个特征指标 $RG_1$ 、 $RG_2$ ,二者均含有全部4个特征参数。 $RG_1$ 、 $RG_2$ 的特征值分别为1.967、1.186,贡献率分别为49.163%、29.653%,二者的累计贡献率为78.816%。絮体规则性特征指标表达式分别为: $RG_1 = 1.61ZRo + 3.94ZConv - 2.79ZFF + 1.54ZFD$ ; $RG_2 = 3.88ZRo + 1.40ZConv + 1.61ZFF - 5.47ZFD$ 。

通过贡献率以单一指标RG表征各参数,参数Conv、Ro与RG呈正相关,参数FF、FD与RG呈负相关。综合表达式为: $RG = 0.492RG_1 + 0.297RG_2 = 2.35ZConv + 1.944ZRo - 0.895ZFF - 0.867ZFD$ 。

### 2.2.5 絮体丝状菌特征指标

表征絮体丝状菌特征的2个参数经PCA法降维后得到特征指标FL,特征值为1.906,贡献率和累计贡献率均为95.310%。各参数对絮体丝状菌特征指标FL的作用较均匀,均呈正相关。絮体丝状菌特征指标表达式为: $FL = 1.41ZFL_A + 1.41ZFL_{SS}$ 。

## 2.3 丝状菌膨胀污泥絮体特征指标对SVI的作用

### 2.3.1 絮体结构特征指标与SVI的相关性

将丝状菌膨胀活性污泥絮体结构的5个特征指标(SZ、ST、CP、RG、FL)作为自变量、污泥沉降性指标SVI作为因变量进行分析,由于系统自变量之间存在一定的多重相关性,采用偏最小二乘分析法(PLS)对因变量与自变量进行线性拟合。从自变量、因变量数据中分别提取成分 $t_1$ 和 $u_1$ ,要求 $t_1$ 和 $u_1$ 能充分解释自变量与因变量的信息,同时两者的相关程度最大<sup>[22]</sup>。两者拟合结果见图2。

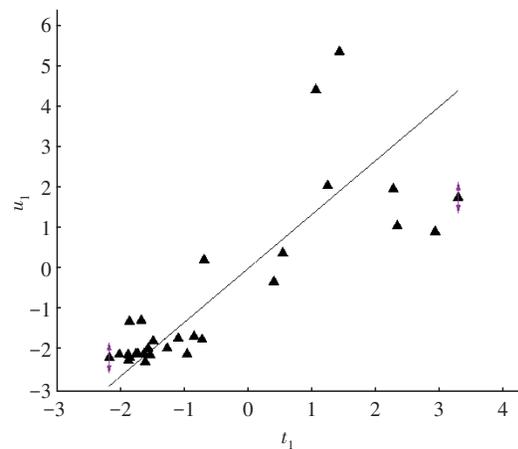


图2 丝状菌膨胀活性污泥SVI的 $t_1$ - $u_1$ 平面图

Fig.2  $t_1$ - $u_1$  plan figure of SVI of filamentous bulking activated sludge

由图 2 可以看出,因变量与自变量之间有较强的线性关系,拟合度较高( $R^2=0.779$ ),污泥沉降性指标 SVI 与絮体结构的变化具有较强的同步性, $t_1$ 、 $u_1$  有足够的解释自变量与因变量所携带的信息,线性回归模型的建立是合理的<sup>[22]</sup>。

### 2.3.2 SVI 回归模型的建立

为直观地观测自变量与因变量的相关关系结构,增加成分  $t_2$ , 绘制  $(w_1 \cdot r_1) - (w_2 \cdot r_2)$  平面图, 如图 3 所示, 表达变量与变量的相关程度。其中  $w$ 、 $r$  分别代表因变量的权重与自变量的回归系数向量。一般来说,位置点坐标越接近,两者之间的相关性就越强。

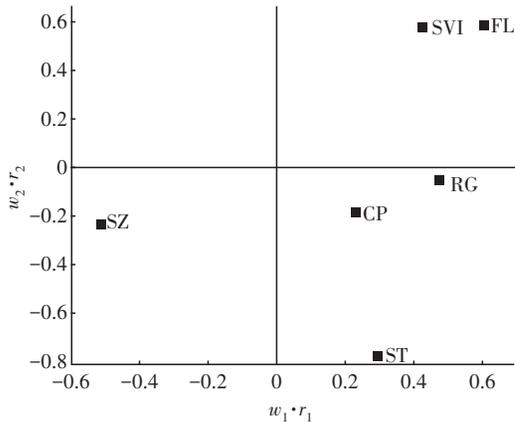


图 3 丝状菌膨胀活性污泥 SVI 的  $(w_1 \cdot r_1) - (w_2 \cdot r_2)$  平面图  
Fig.3  $(w_1 \cdot r_1) - (w_2 \cdot r_2)$  plan figure of SVI of filamentous bulking activated sludge

由图 3 可知,絮体结构指标 FL 与丝状菌膨胀活性污泥的 SVI 具有很强的正相关性。絮体结构指标 CP、RG、ST 之间呈现较强的正相关性,但与 SVI 的相关性较弱;SZ 与其他絮体结构指标呈负相关性,与 SVI 呈较高的负相关性。为更准确地观测自变量 (CP、RG、ST、SZ、FL) 对因变量 (SVI) 的影响方式与大小,作回归系数分布图,如图 4 所示。可见,丝状菌膨胀活性污泥絮体的 SZ、ST 指标对 SVI 起负向作用,其增大时 SVI 减小,说明絮体越大、伸长性越好,则污泥沉降性能越好,越不易发生污泥膨胀;RG、FL 指标对 SVI 起正向作用,其增大时 SVI 亦增大,说明絮体结构越规则、丝状菌越多,则污泥越易发生膨胀。FL 指标与 SVI 之间的相关性最强,表明污泥絮体的 FL 指标对整个污泥系统沉降性起决定性作用,丝状菌过度生长不利于活性污泥沉降,易于膨胀。CP 指标对 SVI 的作用不明显。据此建立的 SVI 回归

模型函数如下:  $SVI = | - 0.351SZ - 0.333ST - 0.005CP + 0.178RG + 0.610FL |$ 。

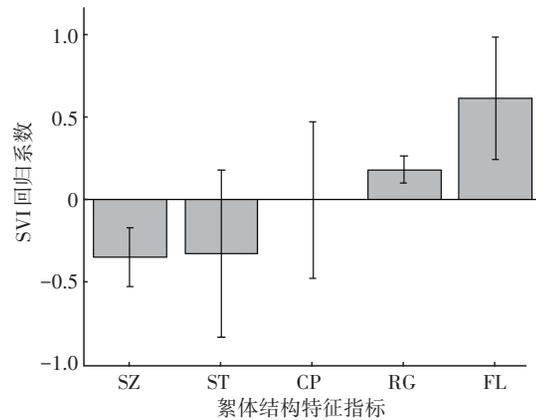


图 4 丝状菌膨胀活性污泥的 SVI 回归系数分布  
Fig.4 SVI regression coefficient distribution of filamentous bulking activated sludge

### 2.3.3 SVI 预测函数的验证

为考察回归模型函数的预测精度,将原始数据代入上述模型得到 SVI 的预测值  $Y_{Pred}$ , 以其作为纵坐标、实际观测值  $Y_{Var}$  作为横坐标绘制散点图,并进行拟合分析,结果见图 5。

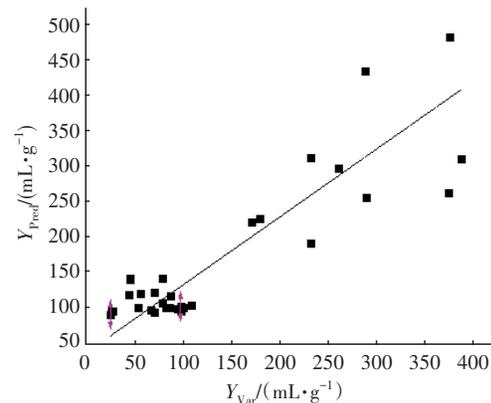


图 5 丝状菌膨胀活性污泥的 SVI 观测值与预测值的关系  
Fig.5 Relationship between observation value and predicted value of SVI of filamentous bulking activated sludge

由图 5 可见,实际观测值与预测值呈现较强的线性相关性 ( $R^2=0.801$ ), 说明絮体微观结构指标可准确反映活性污泥的沉降性能,基于微观絮体结构建立的丝状菌膨胀活性污泥 SVI 函数能较好地预测污泥膨胀。

## 3 结论

① 丝状菌膨胀污泥絮体结构特征参数之间

大多呈现很强的相关性,适合进行PCA法降维分析,为此建立了丝状菌膨胀活性污泥结构特征指标体系,由絮体大小(SZ)、伸长性(ST)、密实性(CP)、规则性(RG)和丝状菌(FL)这5类指标构成。

② 丝状菌膨胀活性污泥的SVI与絮体微观结构指标之间有较强的线性相关性( $R^2=0.779$ ),由此建立的SVI回归模型函数方程为: $SVI=|-0.351SZ-0.333ST-0.005CP+0.178RG+0.610FL|$ 。

③ 丝状菌膨胀活性污泥的SVI观测值与预测值呈现较强的线性相关性( $R^2=0.801$ ),基于絮体结构指标体系建立的SVI预测模型能较好地预测丝状菌污泥膨胀。

#### 参考文献:

- [1] 高晨晨,游佳,陈轶,等. 丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2794-2801.  
GAO Chenchen, YOU Jia, CHEN Yi, *et al.* Effect of denitrification and phosphorus removal microorganisms in activated sludge bulking caused by filamentous bacteria [J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2794-2801 (in Chinese).
- [2] 吴晶晶,曹蓉. 浅析活性污泥膨胀及其影响因素[J]. 广州化工, 2011, 39(1): 30-31, 37.  
WU Jingjing, CAO Rong. A brief analysis of activated sludge bulking and its influencing factors [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, 39(1): 30-31, 37 (in Chinese).
- [3] 郭亚男. 基于自组织递归RBFNN的污泥膨胀智能诊断方法[D]. 北京:北京工业大学, 2018.  
GUO Yanan. Intelligent Detection Method of Bulking Sludge Based on a Self-organizing Recurrent Radial Basis Function Neural Network [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [4] 陈琳凤,王怡,王若卿. 高浓度消毒剂对活性污泥系统中微生物的影响[J]. 中国给水排水, 2020, 36(9): 7-11.  
CHEN Linfeng, WANG Yi, WANG Ruoqing. Effect of high concentration disinfectant on microorganisms in activated sludge system [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(9): 7-11 (in Chinese).
- [5] BAGHERI M, MIRBAGHERI S A, BAGHERI Z, *et al.* Modeling and optimization of activated sludge bulking for a real wastewater treatment plant using hybrid artificial neural networks-genetic algorithm approach [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 95: 12-25.
- [6] SHEN Y, HUANG D M, CHEN Y P, *et al.* New insight into filamentous sludge bulking during wastewater treatment: surface characteristics and thermodynamics [J]. Science of the Total Environment, 2020, 712: 135795.
- [7] LOU I, ZHAO Y C. Sludge bulking prediction using principle component regression and artificial neural network [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012. DOI: 10.1155/2012/237693.
- [8] 范念斯,王润芳,齐嵘,等. 多维度耦合丝状菌监测方法在污泥膨胀中的应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(15): 6-12.  
FAN Niansi, WANG Runfang, QI Rong, *et al.* Application of multi-dimensional integrated filamentous monitoring method in sludge bulking dynamic process [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(15): 6-12 (in Chinese).
- [9] WU J, WHEATLEY A. Assessing activated sludge morphology by laser and image analysis [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 2010, 163(3): 139-145.
- [10] SALVADO H. Improvement of the intersection method for the quantification of filamentous organisms: basis and practice for bulking and foaming bioindication purposes [J]. Water Science & Technology, 2016, 74(6): 1274-1282.
- [11] NITTAMI T, SPEIRS L B M, YAMADA T, *et al.* Quantification of *Chloroflexi* Eikelboom morphotype 1851 for prediction and control of bulking events in municipal activated sludge plants in Japan [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, 101: 3861-3869.
- [12] XIAO H, HUANG D, PAN Y, *et al.* Fault diagnosis and prognosis of wastewater processes with incomplete data by the auto-associative neural networks and ARMA model [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2017, 161: 96-107.
- [13] DEEPNARAIN N, KUMARI S, RAMJITH J, *et al.* A logistic model for the remediation of filamentous bulking in a biological nutrient removal wastewater treatment plant [J]. Water Science and Technology, 2015, 72(3): 391-405.
- [14] WAGNER D S, RAMIN E, SZABO P, *et al.* *Microthrix*

- parvicella* abundance associates with activated sludge settling velocity and rheology—quantifying and modeling filamentous bulking [J]. *Water Research*, 2015, 78: 121–132.
- [15] 龙腾锐,何强,林刚. 活性污泥中丝状菌与絮体结构的关系研究[J]. *中国给水排水*, 2000, 16(2): 5–8.  
LONG Tengrui, HE Qiang, LIN Gang. Research on the relationships between filamentous organisms and flocculate structure in activated sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2000, 16(2): 5–8 (in Chinese).
- [16] 赵敏. 活性污泥絮体的性状及其沉降性能的探讨[J]. *环境科学与管理*, 2011, 36(5): 110–115.  
ZHAO Min. Characteristics and settle-ability of activated sludge flocs [J]. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(5): 110–115 (in Chinese).
- [17] COSTA J C, MESQUITA D P, AMARAL A L, *et al.* Quantitative image analysis for the characterization of microbial aggregates in biological wastewater treatment: a review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(9): 5887–5912.
- [18] BOZTOPRAK H, OZBAY Y, GUCLU D, *et al.* Prediction of sludge volume index bulking using image analysis and neural network at a full-scale activated sludge plant [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57: 17195–17205.
- [19] 胡小兵,朱荣芳,叶星,等. 基于降维分析的活性污泥絮体结构特征指标[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(5): 1759–1768.  
HU Xiaobing, ZHU Rongfang, YE Xing, *et al.* Characteristic indexes of floc structure in activated sludge based on dimensionality reduction methods [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(5): 1759–1768 (in Chinese).
- [20] 田园. SBR反应器中氮和磷含量对污泥膨胀现象影响研究[D]. 长春:吉林建筑大学, 2013.  
TIAN Yuan. Experimental Study on the Effects of Nitrogen and Phosphorus Content of SBR Reactor for Sludge Bulking [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2013 (in Chinese).
- [21] 陈颖异,孙艺宁,许嘉巍,等. 基于主成分分析的林型数量分类研究——以吉林省长白山科学院实验基地为例[J]. *天津农业科学*, 2019, 25(3): 67–71.  
CHEN Yingyi, SUN Yining, XU Jiawei, *et al.* Research on quantitative classification of forest types based on principal component analysis: taking Jilin Changbai Mountain Academy of experimental base as an example [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2019, 25(3): 67–71 (in Chinese).
- [22] 王惠文,吴载斌,孟洁. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.  
WANG Huiwen, WU Zaibin, MENG Jie. Partial Least Squares Regression—Linear and Nonlinear Methods [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006 (in Chinese).

作者简介:胡小兵(1966—),男,安徽泾县人,博士,副教授,主要研究方向为水污染控制工程。

E-mail:hxb6608@163.com

收稿日期:2020-06-08

修回日期:2020-06-30

(编辑:刘贵春)

保护生态环境就是保护生产力

改善生态环境就是发展生产力