



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202001091

中图分类号 X703

文献标识码 A

吴春旭, 唐明悦, 张鸿涛, 等. 我国不同地区市政污泥理化性质及其对脱水性能的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15(1): 271-278.

WU Chunxu, TANG Mingyue, ZHANG Hongtao, et al. Effect of the physicochemical properties of municipal sludge from different areas in China and their influence on dewatering performance[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(1): 271-278.

我国不同地区市政污泥理化性质及其对脱水性能的影响

吴春旭^{1,2}, 唐明悦³, 张鸿涛^{1,*}, 沙雪华², 陈兆林⁴, 张伟军³

1. 清华大学环境学院, 北京 100084

2. 北控水务集团固废事业部, 北京 100102

3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074

4. 北京国环清华环境工程设计研究院有限公司, 北京 100084

第一作者: 吴春旭(1979—), 男, 博士研究生, 高级工程师。研究方向: 污泥处理及资源化等。

E-mail: wu-cx13@mails.tsinghua.edu.cn

*通信作者: 张鸿涛(1961—), 男, 硕士, 教授级高级工程师。研究方向: 污水污泥资源化等。

E-mail: zhanght@mail.tsinghua.edu.cn

摘要 选取我国南北方地区各 5 处典型污水处理厂, 对其污泥的絮体特性、胞外聚合物(EPS)、脱水性能进行了对比研究。Pearson 相关性分析结果表明, 不同地区污水处理厂污泥的理化性质和脱水性能方面具有明显差异; 污泥絮体粒径与污泥有机质含量呈显著正相关。相比多糖, 污泥 EPS 中蛋白质对污泥脱水性能的影响更大, 尤其溶解性胞外聚合物(S-EPS)中的蛋白质含量对污泥脱水性能的影响最为显著($r=0.704, P<0.05$)。三维荧光和平行因子分析显示, 溶解性 EPS 分为色氨酸类蛋白质(TPN)和腐殖酸(HA) 2 类荧光组分, 而疏松结合型 EPS 和紧密结合型 EPS 中含有 TPN 和富里酸(FA) 2 类荧光组分。本研究结果可以为污泥调理脱水提供参考。

关键词 市政污泥; 脱水性能; 污泥理化性质; 地域差异; EPS 蛋白质

活性污泥法是当今应用最广泛的污水处理技术。伴随着污水处理过程会产生大量的剩余污泥, 而污泥的处理处置已成为污水处理中最主要的问题之一^[1]。污泥在最终处置或再利用前, 需进行污泥脱水减量化。但是, 由于污泥中有机物含量高, 其污泥絮体颗粒呈胶状结构且拥有高度亲水性, 易与水分子以不同的形式结合使得污泥中部分水分难以脱除, 最终导致简单脱水后的污泥仍具有较高的含水率。脱水污泥的高含水率已成为制约其后续处理处置的主要障碍之一, 故了解污泥脱水的制约因素显得尤为重要。不同的气候差异可能导致不同地区的污泥在理化性质上产生区别。有研究^[2]表明, 在北方污泥有机质组成中, 蛋白质和脂质的比例高于南方; 北方污泥中 N、P 元素含量远高于南方。而且, 随着我国城市建设的不断发展, 不同城市的污泥性质也会发生

收稿日期: 2020-01-13; 录用日期: 2020-10-24

基金项目: 北控水务自主科技立项课题(ZZLX-2017-01); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07402005)

变化^[3]。不同城市的污水水质存在明显差异, 这些因素都会对污泥性质产生影响^[4]。

本研究在我国南北方各选取5座相对分散且具有代表性的污水处理厂的污泥为研究对象, 对其理化性质进行系统性对比分析, 并对污泥脱水性能与其理化性质间的关系进行研究, 以期根据不同的污泥特性为各污水处理厂的污泥调理脱水技术选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试污泥

污泥样品取自于我国南北方地区各5处不同地区、不同处理工艺以及不同进水组成的污水处理厂。对不同地区污泥样品进行编号, 编号为S1~S10。所有样品均保存在4℃冰箱中, 污泥取样点(污水处理厂)及水厂基本情况如表1所示。

表1 污泥样品取样点及污泥基本指标情况
Table 1 Sampling points and basic information of sludge samples

编号	水厂名称	省市	区域	污水处理工艺	进水组成	污泥类型	MLSS/MLVSS	进水COD/(mg·L ⁻¹)	SVI/(mL·g ⁻¹)
S1	长沙污水处理厂	湖南省	南方	氧化沟	100%生活水	剩余污泥	0.354 4	248.37	50
S2	永州污水处理厂	湖南省	南方	A ² /O	100%生活水	剩余污泥	0.405 8	156.55	62
S3	锦州污水处理厂	辽宁省	北方	A ² /O	90%生活水	剩余污泥	0.601 1	265.31	109
S4	沙河污水处理厂	北京市	北方	A ² /O	100%生活水	混合污泥	0.441 3	279.07	80
S5	张北污水处理厂	河北省	北方	氧化沟	50%生活水	混合污泥	0.688 9	628.61	142
S6	玉溪污水处理厂	云南省	南方	A ² /O	100%生活水	混合污泥	0.475 7	367.13	127
S7	阎良污水处理厂	陕西省	北方	A ² /O	100%生活水	混合污泥	0.591 8	854.72	110
S8	都匀污水处理厂	贵州省	南方	A ² /O	100%生活水	混合污泥	0.427 9	156.45	95
S9	路桥污水处理厂	浙江省	南方	氧化沟	93%生活水	混合污泥	0.500 1	202.72	106
S10	莒南污水处理厂	山东省	北方	A ² /O	30%生活水	混合污泥	0.409 8	188.08	146

1.2 检测方法

pH采用pHS-3C型pH计(Shanghai, China)测定; 有机质使用马弗炉法测定; Zeta电位通过Malvern公司的Zetasizer 2000进行测定; 粒径分布特征采用Malvern公司的Mastersizer 2000激光粒度仪分析^[5]。EPS中蛋白质含量采用Lowry-Folin法测定, 以牛血清蛋白为标准物质, 于750 nm波长处进行比色^[5]; 多糖含量采用蒽酮-硫酸法测定以葡萄糖为标准物质, 于625 nm波长处进行比色^[5]。

毛细吸水时间(capillary sanction time, CST)检测采用英国TRITON公司生产的便携式319型CST测定仪和Whatman 17号滤纸测定。测试步骤为: 将体积为5 mL左右的活性污泥放入到测定仪不锈钢圆柱中, 记录污泥滤液润湿滤纸从1 cm扩散到3 cm所需时间。为了排除污泥浓度影响, 所有测定的结果均需采用污泥浓度进行归一化处理^[6], 计算如式(1)所示。

$$n_{\text{CST}} = \frac{h_{\text{CST}}}{W} \quad (1)$$

式中: n_{CST} 为CST归一化结果, s·L·g⁻¹; h_{CST} 为仪器测定的毛细吸水时间, s; W 为污泥含固率, g·L⁻¹。

胞外聚合物(extracellular polymeric substance, EPS)的提取方法在ZHANG等^[7]的基础上修改。首先, 污泥沉淀部分在2 000g(离心力)条件下离心15 min, 产生的上清液即为粘液层EPS(S-EPS)组分。然后向底部的沉淀投加细胞缓冲液(Na₃PO₄:NaH₂PO₄:NaCl:KCl摩尔比为2:4:9:1)至原始体积。混匀之后, 在5 000g(离心力)条件下离心15 min, 上清液即为松散附着型EPS(LB-EPS)组分。

之后，向底部的沉淀加入细胞缓冲液至原始体积。混匀之后，在 40 kHz、300 W 条件下超声 10 min。最后，以 20 000g(离心力)条件下离心 10 min，上清液即为紧密结合型 EPS(TB-EPS) 组分。

三维荧光光谱分析 (3-dimension excitation emission matrix, 3D-EEM) 检测采用 Hitachi F-7000 型三维荧光光谱仪对污泥 EPS 中荧光组分组成进行分析，激发光源为氙弧灯，激发波长 λ_{Ex} 为 200~400 nm，发射波长 λ_{Em} 为 220~550 nm，激发和发射狭缝宽度为 5 nm，扫描速度为 12 000 nm·min⁻¹。三维荧光图谱采用平行因子 (PARAFAC) 进行解析，从而识别出主要的荧光组分信息，数据处理使用 Mat Lab 8.6 软件进行^[8]。

2 结果与讨论

2.1 不同地区污水处理厂污泥样品脱水性能

不同地区污泥样品脱水性能如图 1 所示。由图 1 可知，锦州污水处理厂 (S3) 和玉溪污水处理厂 (S6) 的污泥脱水性能最差， n_{CST} 分别达到了 220.4 和 214.2 s·L·g⁻¹；路桥污水处理厂 (S9) 的污泥脱水性能同样不理想， n_{CST} 为 53.5 s·L·g⁻¹；其他地区的污泥脱水性能差异不大，基本保持在 11~28 s·L·g⁻¹。

2.2 不同地区污水处理厂污泥样品的基本性质

不同地区污水处理厂污泥样品的理化性质如图 2~图 5 所示。由图 2 可知，不同地区污水处理厂污泥样品的 pH 基本保持在中性范围，波动较小。图 3 为不同地区污泥样品的粒径特征。由图 3 可知，张北污水处理厂 (S5) 污泥的粒径最大，沙河污水处理厂 (S4)、阎良污水处理厂 (S7) 和路桥污水处理厂 (S9) 污泥粒径次之，而其他地区污泥样品粒径均较小。一般而言，污泥脱水性能与粒径 ($d_{0.5}$) 呈现出较好的负相关性。在污泥脱水过程中，污泥颗粒粒径越小，数量越多，污泥颗粒的比表面积就越广，其吸附的荷电粒子和胞外聚合物 (EPS) 就越多。这不仅会阻碍脱水过程中污泥中的间隙水、毛细水和吸附水的释放，而且还会阻碍污泥颗粒之间的结合^[9]。不同地区污泥样品的表面电荷分布 (Zeta 电位) 如图 4 所示。由图 4 可知，不同地区污泥样品的表面电荷分布差异较大，除玉溪污水处理厂 (S6) 的污泥样品的 Zeta 电位不为负值外 (0.07)，其他地区的污泥样品均为负值，且各个地区的 Zeta 电位差异明显。通常来说，污泥颗粒呈负电性，其周围会吸附一层带正电荷的离子，这些离子会与水分子发生水合

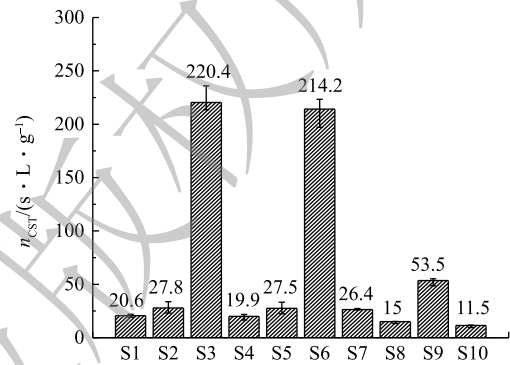


图 1 不同地区污水处理厂污泥样品脱水性能
Fig. 1 Dewatering performance of sludge samples from sewage treatment plants in different regions

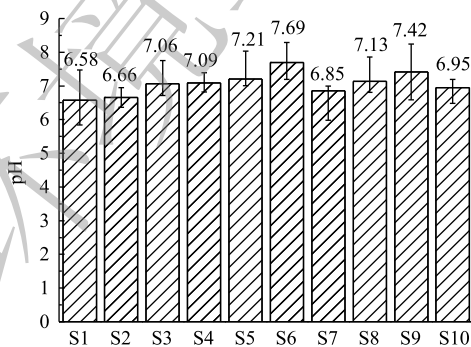


图 2 不同地区污水处理厂污泥样品的 pH

Fig. 2 pH values of sludge samples from sewage treatment plants in different regions

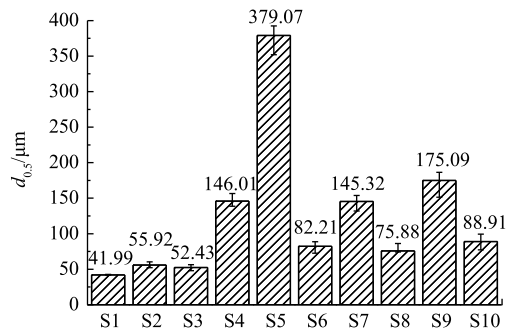


图 3 不同地区污水处理厂污泥样品的平均粒径 ($d_{0.5}$)

Fig. 3 Average floc size ($d_{0.5}$) of sludge samples from sewage treatment plants in different regions

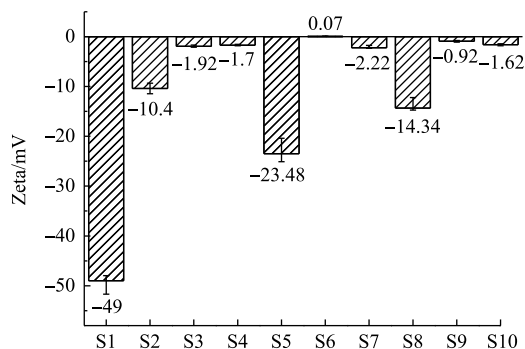


图4 不同地区污水处理厂污泥样品的 Zeta 电位

Fig. 4 Zeta potential of sludge samples from sewage treatment plants in different regions

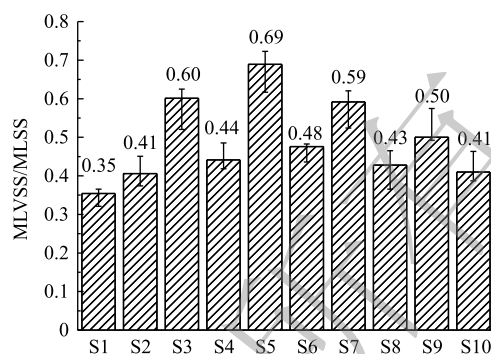


图5 不同地区污水处理厂污泥样品的有机质含量 (MLVSS/MLSS)

Fig. 5 Organic matter content (MLVSS/MLSS) of sludge samples from sewage treatment plants in different regions

反应, 吸附大量水分。另外, 污泥颗粒的 Zeta 电位值越大, 表面电荷越大, 颗粒间的斥力越大, 可压缩性差, 会导致污泥的蓄水能力增强, 从而导致污泥脱水困难^[10]。图 5 为不同地区污泥的有机质含量 (MLVSS/MLSS), 污泥有机质含量与气候、温度、污水的来源以及处理工艺密切相关。有机质含量最高和最低的样品分别出现在张北污水处理厂 (S5) 和长沙污水处理厂 (S1)。北方污泥样品的有机质含量平均值 (54.66%) 均明显高于南方污泥样品的平均值 (43.28%)。污泥有机质含量是影响污泥脱水性能的关键性因素, 污泥有机质含量越高, 污泥中 EPS 含量越高。EPS 很大程度上影响着污泥的絮体结构, 较高的 EPS 将会提高污泥的束水容量, 导致污泥脱水性能变差^[11]。另外, 有机质含量高还会降低泥饼的机械脱水效率^[12]。

2.3 不同地区污水处理厂污泥样品 EPS 中多糖与蛋白质分布特征

多糖和蛋白质是污泥 EPS 的主要组成部分, 两者可占污泥 EPS 的 70%~80%^[13]。不同地区污泥样品各层 EPS 中多糖和蛋白质含量如图 6 所示。如图 6(b) 所示, 不同地区污泥 EPS 中多糖含量差异明显。其中, 湖南长沙污水处理厂 (S1) 和贵州都匀污水处理厂 (S8) 的污泥 EPS 中多糖含量最低, 这可能与这 2 个地区污泥的有机质含量相对较低有关。另外, 多糖在不同层 EPS 中的分布也存在较大差异, 湖南永州污水处理厂 (S2)、云南玉溪污水处理厂 (S6)、浙江路桥污水处理厂 (S9) 和山东莒南污水处理厂 (S10) 的污泥样品中, 多糖在 S-EPS 和 LB-EPS 中分别较多, 而辽宁锦州污水处理厂 (S3)、河北张北污水处理厂 (S5) 和陕西阎良污水处理厂 (S7) 的污泥样品中多糖主要分布在 LB-EPS 和 TB-EPS 中。此外, 由图 6(a) 可知, 不同地区污泥 EPS 中蛋白质含量差异同样明显。其中, 辽宁锦州污水处理厂 (S3)、河北张北污水处理厂 (S5)、云南玉溪污水处理厂 (S6) 和陕西阎良市污水处理厂 (S7) 的污泥样品 EPS 中蛋白质含量较高, 这同样可能与这 4 个地区污泥中有机质含量较高有关。另外, 这 4 个地区污泥 EPS 中蛋白质主要分布在 S-EPS 和 TB-EPS 中, 其他地区污泥 EPS 同样也是在 TB-EPS 中蛋白质含量最高。有研究表明, EPS 的存在可导致污泥的脱水性能变差^[14]。其中, 蛋白质对污泥脱水性的影响最为显著。还有研究指出, S-EPS 中蛋白质的含量越高, 污泥的脱水性越差^[15]。蛋白质是一种生物大分子, 蛋白质和水分子能结合生成各种稳定度不同的胶体溶液。此外, 蛋白质分子表面有许多极性基团, 这些基团与水分子有高度亲和性, 很容易吸附水分子, 导致蛋白质颗粒外面形成一层稳定的水化膜, 使得被 EPS 包裹的细胞颗粒彼此间不能靠近, 阻碍了颗粒的聚集、沉淀, 最终增加了污泥中结合水的稳定性^[16]。因此, EPS 中蛋白质、多糖和核酸为主要成分组成的类凝胶结构是污泥高度持水的主要原因。若要实现污泥的深度脱水, 就必须破坏由污泥中 EPS 构成的污泥类凝胶结构。

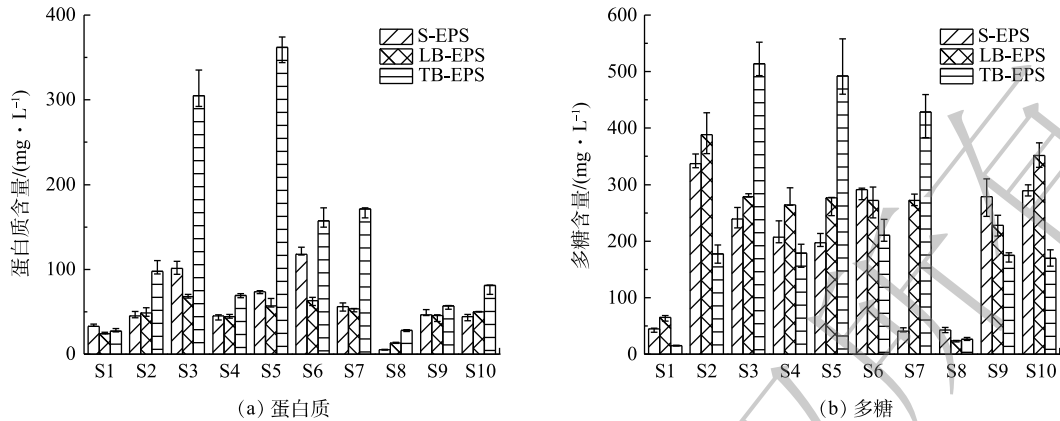


图 6 不同地区污水处理厂污泥样品中 EPS 的分布特征

Fig. 6 EPS distribution of sludge samples from sewage treatment plants in different regions

2.4 不同地区污水处理厂污泥样品中荧光组分分析

三维荧光光谱图对生物源类物质的表征具有独特优势，特别是对污泥中微生物生命代谢分泌的有机物具有较高的检测灵敏度^[17]。一般将三维荧光光谱分为 4 个区，不同区域、荧光强度代表不同物质及相应的浓度。这 4 个区域分别是色氨酸类蛋白 (TPN)、芳香族类蛋白 (APN)、富里酸类物质 (FA) 及腐殖质类物质 (HA)^[18]。而且，通过平行因子分析 (PARAFAC) 可以将三维荧光光谱各个组分进行拆分。不同地区污泥样品 EPS 中荧光组分拆分结果如图 7 所示；对应的荧光组分荧光强度分布特征如图 8~图 10 所示。首先，在不同地区污泥 EPS 中主要拆分出 TPN、FA 和 HA 3 种荧光组分 (图 7)。对于 S-EPS (图 8)，主要拆分出 TPN 和 HA 荧光组分，这说明该层 EPS 中富里酸和芳香族类蛋白质含量相对较低。不同地区污泥的 S-EPS 中这 2 类荧光组分含量差异明显，河北张北污水处理厂 (S5)、陕西阎良市污水处理厂 (S7) 和浙江路桥污水处理厂 (S9) 的污泥样品 S-EPS 中这 2 类荧光组分含量较高。而且，除了贵州都匀市污水处理厂 (S8) 污泥样品 S-EPS 中色氨酸类蛋白质含量

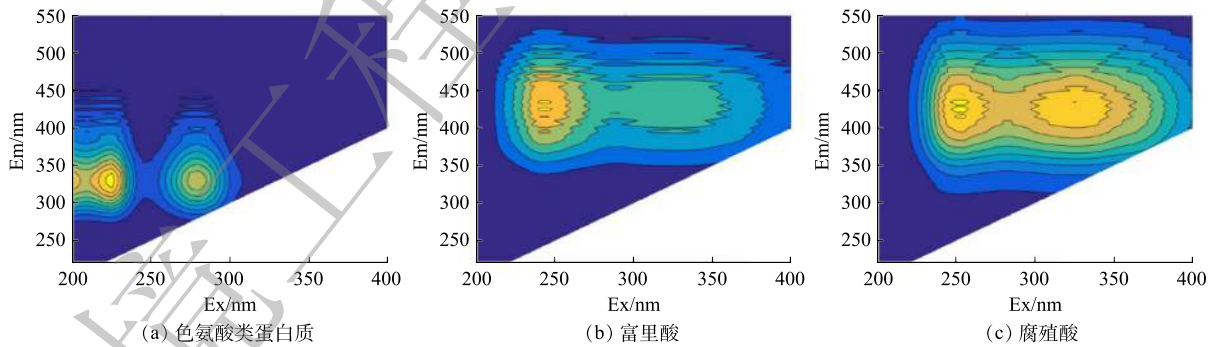


图 7 污泥 EPS 中荧光组分拆分结果

Fig. 7 Separation results of fluorescence components in sludge EPS

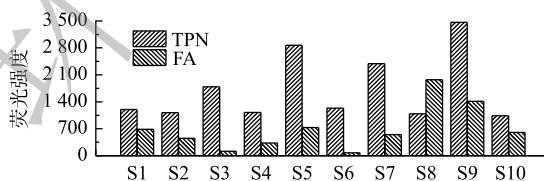


图 8 污泥 S-EPS 中荧光组分荧光强度分布特征

Fig. 8 Fluorescence intensity distribution characteristics of fluorescent components in S-EPS

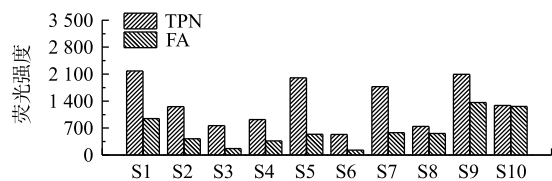


图 9 污泥 LB-EPS 中荧光组分荧光强度分布特征

Fig. 9 Fluorescence intensity distribution characteristics of fluorescent components in LB-EPS

低于腐殖酸外, 其他地区污泥样品 S-EPS 中色氨酸类蛋白质含量均高于腐殖酸含量。对于 LB-EPS(图 9), 主要拆分出 TPN 和 FA 荧光组分。不同地区污泥 LB-EPS 中色氨酸类蛋白质含量与 S-EPS 中色氨酸类蛋白质基本呈现相似的规律, 且含量均高于富里酸含量。与 LB-EPS 相同, TB-EPS 中也只拆分出 TPN 和 FA 荧光组分(图 10), 而且色氨酸类蛋白质含量远高于富里酸含量。

2.5 污泥性质对污泥脱水性能的影响

Pearson 相关性分析被用来解析不同地区污泥基本性质(包括 pH、粒径、Zeta 电位和有机质含量)与污泥脱水性能间的关联机制(表 2)。污泥絮体粒径和污泥有机质含量展现出显著的相关性($r=0.709, P<0.05$), 表明大颗粒污泥可能具有较高的有机质含量。不同地区污泥的大部分基本性质之间不具备显著的相关性, 这说明不同地区污泥的脱水性能不单单受某一单一污泥性质的影响, 而是多种因素共同作用的结果。除了上述的污泥基本性质以外, 污泥 EPS 中的组成物质(多糖与蛋白质)也是影响污泥脱水性能的重要因素。如表 3 所示, n_{CST} 与各层 EPS 中多糖含量无明显相关性, 这说明 EPS 中多糖对污泥脱水性能的影响作用不明显。EPS 中蛋白质含量与 n_{CST} 之间的相关性分析(表 4)表明, S-EPS 中蛋白质含量与 n_{CST} 之间存在显著的相关性($r=0.858, P<0.01$), 由此说明污泥的脱水性能随着 S-EPS 中蛋白质含量的上升而逐渐降低, 这与相关研究结论^[15]一致。

表 3 污泥 EPS 中多糖组分含量与污泥脱水性能的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of polysaccharide content in EPS and its dewatering performance

考察量	n_{CST}	SEPS	LBEPs	TBEPs
n_{CST}	1			
S-EPS	0.352	1		
LB-EPS	0.170	0.769**	1	
TB-EPS	0.392	0.138	0.504	1

注: ** $P<0.01$ 。

2.6 进水水质、处理工艺、地域对污泥脱水性能的影响

结合上述讨论和相关研究结论可知, 污泥絮体的有机组成是影响污泥脱水性能的关键因素, 而其中 EPS 对污泥脱水性能的影响最为显著^[19]。污泥有机组成特征在不同地域、不同污水处理工艺中差异较大, 即使同一污水处理工艺, 不同的进水水质也会对微生物活性和生长状态造成影响。不同地区污泥基本性质(包括 n_{CST} 和有机质含量)与污水处理厂进水 COD 的相关性分析如表 5 所示。进水 COD 与污泥有机质含量显著相关($r=0.704, P<0.05$), 这表明污水厂进水水质对污泥有

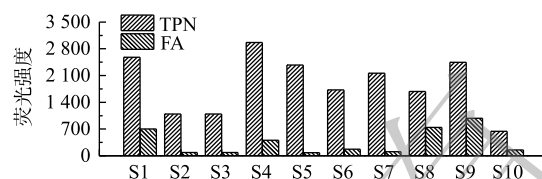


图 10 污泥 TB-EPS 中荧光组分荧光强度分布特征

Fig. 10 Fluorescence intensity distribution characteristics of fluorescent components in TB-EPS

表 2 污泥的基本性质与污泥脱水性能的相关性分析
Table 2 Correlation analysis of sludge basic properties and its dewatering performance

考察量	n_{CST}	pH	$d_{0.5}$	Zeta	MLSS/MLVSS
n_{CST}	1				
pH	0.528	1			
$d_{0.5}$	-0.256	0.311	1		
Zeta	0.350	0.513	-0.035	1	
MLSS/MLVSS	0.287	0.330	0.709*	0.235	1

注: * $P<0.05$ 。

表 4 污泥 EPS 中蛋白质组分含量与污泥脱水性能的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of protein content in EPS and its dewatering performance

考察量	n_{CST}	SEPS	LBEPs	TBEPs
n_{CST}	1			
S-EPS	0.858**	1		
LB-EPS	0.618	0.877**	1	
TB-EPS	0.448	0.687*	0.723*	1

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

机质含量具有明显的影响效应。但进水 COD 与 n_{CST} 之间的相关性不明显，进一步表明了污泥的脱水性能是由多因素决定的。

由表 1 可以看出，南部地区的污水处理厂有机质含量明显低于北方污泥有机质含量。南方有机质含量普遍在 35%~50%，而北方污泥普遍接近 60%(需要指出的是，山东莒南污水厂(S10)污泥中泥沙含量较高，导致有机质含量较低；北京沙河污水处理厂(S4)运行负荷较低为 60%，使得进水中有机物大部分被微生物利用，微生物大多处于饥饿状态，使得有机质含量较低)。同时，有机质含量高的污泥普遍 CST n 较高，这与之前的相关性分析结果相一致。此外，不难发现在同一地区，A²O 工艺产生的剩余污泥的有机质含量普遍低于氧化沟工艺，且 n_{CST} 也较低。这是由于，A²O 工艺相比于传统活性污泥法和氧化沟法，增加了缺氧反应区，更有利于硝化反硝化的进行，有机物去除效果更好，污泥中有机质含量也相应较低。另外，进水水质不仅影响污水处理系统的稳定和出水达标情况，也会影响污泥胞外聚合物的组成和污泥的脱水情况。生活污水比例越低，即工业污水比例较高，会导致污泥的有机质含量部分升高(由于污泥中泥沙含量较高的原因，山东莒南污水厂(S10)除外)。这是因为，工业污水中含有大量不易被微生物氧化利用，甚至会抑制微生物生长的有机污染物，会导致微生物分泌更多的胞外聚合物，从而将液相中有机物吸附于细胞外壁并缓慢分解，使得胞外聚合物中蛋白质、多糖、溶解性微生物产物(SMP)等的组成比例升高，最终导致污泥的脱水性能下降。

综上所述，污泥的脱水性能不仅与污泥自身的理化性质有关，还会受到地域差异、污水处理工艺、进水组成等因素的影响。

3 结论

1) 不同地区污水处理厂污泥在理化性质与脱水性能方面具有明显差异，南方的污水处理厂污泥粒径相对较小，有机质含量较低，北方的污水处理厂污泥表面电荷普遍较低。

2) 不同地区污水处理厂的絮体粒径和有机质含量表现出显著的相关性($r=0.709$, $P<0.05$)。污泥各层 EPS 中多糖含量对污泥脱水性能的影响作用不明显，而蛋白质与污泥脱水性能呈负相关，尤其是 S-EPS 中的蛋白质含量对污泥脱水性能的影响作用最为显著($r=0.704$, $P<0.05$)。

3) 三维荧光和平行因子分析显示，S-EPS 主要拆分出 TPN 和 HA 荧光组分，而 LB-EPS 和 TB-EPS 中含有 TPN 和 FA 荧光组分。

参考文献

- [1] PILLI S, YAN S, LEBLANC R J, et al. Ultrasonic pretreatment of sludge: A review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(1): 1-18.
- [2] 吕丰锦, 刘俊新. 我国南北方城市污水处理厂污泥性质比较分析[J]. 给水排水, 2016, 42(S1): 63-66.
- [3] 郭广慧, 杨军, 陈同斌, 等. 中国城市污泥的有机质和养分含量及其变化趋势[J]. 中国给水排水, 2009, 25(13): 120-121.
- [4] 张玲玲, 陈立, 郭兴芳, 等. 南北方污水处理厂进水水质特性分析[J]. 给水排水, 2012, 38(1): 45-49.
- [5] ZHANG W, TANG M, YANG P, et al. Micro-interfacial mechanisms on sludge dewaterability enhancement using cerium chloride for preparation of carbon-based functional material[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 386: 121930.
- [6] CAO B, ZHANG W, WANG Q, et al. Wastewater sludge dewaterability enhancement using hydroxyl aluminum conditioning: Role of aluminum speciation[J]. Water Research, 2016, 105(15): 615-624.
- [7] ZHANG W, PENG S, XIAO P, et al. Understanding the evolution of stratified extracellular polymeric substances in full-scale activated sludges in relation to dewaterability[J]. RSC Advances, 2014, 5(2): 1282-1294.

表 5 污泥性质与进水 COD 的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of sludge properties and sewage COD content

考察量	COD	n_{CST}	MLSS/MLVSS
COD	1		
n_{CST}	-0.034	1	
MLSS/MLVSS	0.704*	0.287	1

注: * $P<0.05$ 。

- [8] AI J, ZHANG W, CHEN F, et al. Catalytic pyrolysis coupling to enhanced dewatering of waste activated sludge using $\text{KMnO}_4/\text{Fe(II)}$ conditioning for preparing multi-functional material to treat groundwater containing combined pollutants[J]. *Water Research*, 2019, 158: 424-437.
- [9] 李彬彬, 余静, 何成达, 等. OSA工艺活性污泥的吸附性能研究[J]. *环境工程*, 2016, 34(S1): 272-277.
- [10] CURVERS D, USHER S P, KILCULLEN A R, et al. The influence of ionic strength and osmotic pressure on the dewatering behaviour of sewage sludge[J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64(10): 2448-2454.
- [11] LI X Y, YANG S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. *Water Research*, 2007, 41(5): 1022-1030.
- [12] 梁嘉林. 芬顿氧化联合氧化钙对五种市政污泥深度脱水性能影响的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [13] HOUGHTON J I, STEPHENSON T. Effect of influent organic content on digested sludge extracellular polymer content and dewaterability[J]. *Water Research*, 2002, 36(14): 3620-3628.
- [14] 何培培, 余光辉, 邵立明, 等. 污泥中蛋白质和多糖的分布对脱水性能的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29(12): 3457-3461.
- [15] ZHANG W, YANG P, YANG X, et al. Insights into the respective role of acidification and oxidation for enhancing anaerobic digested sludge dewatering performance with Fenton process[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 181: 247-253.
- [16] 付尧, 暴瑞玲, 顾文卓, 等. 低水力负荷下好氧颗粒污泥的特性及胞外聚合物关键组分对该污泥稳定性的影响[J]. *净水技术*, 2017, 36(2): 11-18.
- [17] HENDERSON R K, BAKER A, MURPHY K R, et al. Fluorescence as a potential monitoring tool for recycled water systems: A review[J]. *Water Research*, 2009, 43(4): 863-881.
- [18] YU G H, HE P J, SHAO L M. Novel insights into sludge dewaterability by fluorescence excitation-emission matrix combined with parallel factor analysis[J]. *Water Research*, 2010, 44(3): 797-806.
- [19] FENG X, DENG J, LEI H, et al. Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 99(3): 1074-1081.

(本文编辑: 金曙光, 郑晓梅)

Effect of the physicochemical properties of municipal sludge from different areas in China and their influence on dewatering performance

WU Chunxu^{1,2}, TANG Mingyue³, ZHANG Hongtao^{1,*}, SHA Xuehua², CHEN Zhaolin⁴, ZHANG Weijun³

1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Solid Waste Business Department, Beijing Enterprises Water Group Limited, Beijing 100102, China

3. School of Environment Studies, China University of Geoscience (Wuhan), Wuhan 430074, China

4. Beijing Guohuan Tsinghua Design and Research Institute Limited Company, Beijing 100084, China

*Corresponding author, E-mail: zhanght@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract In this study, five typical sewage treatment plants in southern China and northern China were selected to compare floc properties, extracellular polymeric substances (EPS) and dewatering performances of sludge, respectively. The Pearson correlation analysis results showed some obvious differences in physicochemical properties and dewatering performances of sludge from sewage treatment plants in different areas. The average particle size of sludge had a positive correlation with its organic matter content. The protein content in EPS had greater influence on dewatering performance than polysaccharide. The protein content in soluble EPS (S-EPS) had the most significant effect on sludge dewatering performance ($r=0.704$, $P<0.05$). Three-dimensional fluorescence analysis and parallel factor analysis showed S-EPS contained tryptophan proteins (TPN) and humic acid (HA), while loosely-bound EPS (LB-EPS) and tightly-bound EPS (TB-EPS) contained TPN and fulvic acid (FA). This study provided new insights for sludge conditioning and dewatering.

Keywords municipal sludge; dewatering performance; physicochemical properties of sludge; regional disparity; protein in EPS