

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017081302

李影影, 董黎明, 李梦娅, 等. 固体浓度及上清液有机物对柠檬酸污泥 pH 缓冲容量的影响[J]. 环境化学, 2018, 37(3): 584-590.

LI Yingying, DONG Liming, LI Mengya, et al. Effects of solid concentration and organic matter in supernatant on the pH buffering capacity of citric acid sludge[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(3): 584-590.

固体浓度及上清液有机物对柠檬酸污泥 pH 缓冲容量的影响*

李影影 董黎明** 李梦娅 李杨杨

(北京工商大学, 中国轻工业清洁生产 and 资源综合利用重点实验室, 北京, 100048)

摘 要 本文选取柠檬酸污泥作为研究对象并与市政污泥比较, 探讨了固体浓度和上清液有机物对污泥 pH 缓冲容量的影响. 结果表明, 柠檬酸污泥的 pH 缓冲容量 ($9.50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 比市政污泥 ($6.61 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 高出 40% 以上. 污泥体系的固体浓度越大或上清液中有机物浓度越高, 则污泥的 pH 缓冲容量越大. 污泥的 pH 缓冲容量与污泥固体和上清液 pH 缓冲容量的加和并不一致, 但上清液有机物均比固体浓度对污泥体系的 pH 缓冲容量影响更大.

关键词 柠檬酸污泥, 固体浓度, 上清液有机物, 酸碱缓冲容量.

Effects of solid concentration and organic matter in supernatant on the pH buffering capacity of citric acid sludge

LI Yingying DONG Liming** LI Mengya LI Yangyang

(Beijing Technology and Business University, Key Laboratory of Cleaner Production and Integrated
Resource Utilization of China National Light Industry, Beijing, 100048, China)

Abstract: The effect of solid concentration and organic matter in supernatant on the pH buffering capacity was investigated, using citric acid processed wastewater sludge and municipal wastewater sludge for comparison. The results showed that the pH buffering capacity of citric acid sludge ($9.50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) was about 40% more than that of municipal sludge ($6.61 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$). The higher concentration of solid and organic matter in the supernatant resulted in the increased buffering capacity of the sludge system. The buffering capacity of sludge was not consistent with the sum of solid and supernatant. The organic matter in the supernatant had more effects on the buffering capacity of sludge than the solid concentration.

Keywords: citric acid sludge, solid concentration, organic matter in supernatant, pH buffering capacity.

pH 作为污泥环境稳定的重要指标, 影响着活性污泥微生物的种类、代谢活力、表面特性^[1-2]以及污泥中的胞外聚合物(EPS)组分^[3], 是引起污泥膨胀的重要原因^[4]. 活性污泥 pH 的稳定程度由体系的酸碱缓冲容量决定, 即单位 pH 变化所需要的酸碱量^[5]. 酸缓冲容量(ABC)^[6]和碱缓冲容量(ALBC)被分

2017 年 8 月 13 日收稿(Received: August 13, 2017).

* 十二五科技支撑计划项目(2014BAC28B01)和“2017 研究生科研能力提升计划项目”资助.

Supported by 12th Five-Year Technology Support Program(2014BAC28B01) and 2017 Graduate Research Enhancement Program.

** 通讯联系人, Tel: 13426019968, E-mail: donglm@btbu.edu.cn

Corresponding author, Tel: 13426019968, E-mail: donglm@btbu.edu.cn

别用来描述基质对酸和碱的缓冲能力.2015 年,孙津鸿等^[7]以市政污泥为研究对象,发现活性污泥 pH 缓冲容量可以作为评价污泥系统的参数,且不同污泥的 pH 缓冲容量不同;陈学民等^[8]同样发现,可通过提高氨化和硝化强度影响市政污泥的缓冲容量,从而增强活性污泥在酸碱环境下的稳定性.但这些研究都只针对活性污泥的整体环境,并未考虑污泥固体浓度及上清液有机物对污泥 pH 缓冲性能的影响.

本文以柠檬酸污泥为研究对象,这类生物发酵废水的活性污泥与市政污泥相比具有更复杂的微生物种类和较高的有机质^[9],并参照土壤和海水系统 pH 缓冲容量的测定^[10-14],对比分析柠檬酸污泥和市政污泥体系的污泥固体和上清液 pH 缓冲容量,探讨固体浓度和上清液有机物对污泥 pH 缓冲容量的影响,以期生物发酵产业的废水处理运行和污泥的后续处理处置提供依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 试验材料

柠檬酸污泥为山东某柠檬酸生产企业污水处理车间氧化沟处理技术的二沉池回流污泥,此类活性污泥具有较高的有机质含量;市政污泥为首都机场污水处理厂 A²O 处理工艺的二沉池回流污泥.取样之后当天回实验室测定两种活性污泥的基本性质及污泥酸碱缓冲容量,其余污泥经离心后上清液于 4 ℃ 冰箱中保存备用,将底部污泥固体置于 105 ℃ 烘箱中烘干 12 h 后,研磨过 60 目筛室温保存备用.

1.2 试验方法

1.2.1 污泥基本性质的测定

按照国家标准^[15]测定两种污泥的 pH、混合液悬浮固体浓度 (MLSS)、混合液挥发悬浮固体浓度 (MLVSS)、上清液 COD;布氏漏斗法测定污泥的污泥比阻 (SRF)^[16];CST 测定仪测定污泥的毛细吸水时间 (CST);酸碱滴定法测定污泥的酸缓冲容量 (ABC)、碱缓冲容量 (ALBC) 和 pH 缓冲容量 (pHBC).

1.2.2 不同固体浓度下污泥悬浊液的缓冲容量测定

根据多次现场取样测定,污泥的固体浓度范围为 1—40 g·L⁻¹,因此,分别称取 0.1、0.2、0.3、0.5、1、2、4 g 研磨过筛后的备用柠檬酸污泥和市政污泥固体置于锥形瓶中并编号,分别加 100 mL 去离子水制备成污泥质量浓度分别为 1、2、3、5、10、20、40 g·L⁻¹ 的污泥悬浊液.将其在 25 ℃ 下恒温振荡 1 h,取 40 mL 于烧杯中,分别以摩尔浓度为 0.1 mol·L⁻¹ 的 HCl、NaOH 溶液作为调节污泥酸碱的试剂,投加于不同固体浓度的污泥悬浊液中,观察 pH 的变化情况,并计算 ABC、ALBC 及 pHBC,每个样品均进行 3 次平行样测定.

1.2.3 不同 COD 的污泥上清液的缓冲容量测定

将柠檬酸污泥和市政污泥上清液,制备成上清液与蒸馏水体积比为 1:0、2:1、1:1、1:2、1:3、1:4 的不同溶液并充分混匀,取 40 mL 于烧杯中,其余步骤参照 1.2.2 节的测定方法进行,观察 pH 的变化情况,并计算酸碱缓冲容量.

1.3 数据处理及分析

缓冲容量一般被定义为基质每改变一个单位 pH 时,所需一定浓度的强酸的量 C_A 或者强碱的量 C_B ^[17]:

$$\beta = \frac{d_{C_A}}{d_{pH}} = \frac{d_{C_B}}{d_{pH}}$$

pHBC 表示指定 pH 范围内单位基质其 pH 增加或降低一个单位所需酸或碱的量^[18],由酸、碱缓冲容量共同决定,在线性条件成立下,即为酸碱滴定曲线的斜率绝对值^[19].但对于酸碱缓冲能力不完全一致的基质,pHBC 的描述精确度会相对降低,需要分段拟合^[14]来准确表征基质对酸和碱的缓冲能力即 ABC 与 ALBC,可以用降低到特定 pH 所需要的酸和升高到特定 pH 所需要的碱的量来描述^[20],分别为酸滴定和碱滴定曲线的斜率绝对值.缓冲容量的单位可使用 mmol·L⁻¹,代表污泥整体性能,也可使用 mmol·g⁻¹,代表单位固体含量的缓冲性能,可反映固体缓冲性能的差异.其中 mmol·g⁻¹ = (mmol·L⁻¹)/(g·L⁻¹).

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 污泥基本性质及其酸碱缓冲性能

由表 1 可知,柠檬酸污泥的缓冲性能明显强于市政污泥,其中 ABC 比市政污泥高出 182%,ALBC 高出 41%,pHBC 高出 44%. 而且与陈学民等^[8] 研究中市政污泥的 ABC (11.4 mmol·L⁻¹)、ALBC (7.4 mmol·L⁻¹)、pHBC(8.8 mmol·L⁻¹) 相比也较高.一方面,这可能与其中的微生物分布有关,柠檬酸生产为黑曲霉真菌发酵后分离所得,废水中残余真菌较多,柠檬酸污泥中的真菌种类和丰富度要远高于市政污泥,而有研究表明^[21],真菌具有较好的耐酸碱碱性;另一方面,也可能与污泥当中的有机质含量有关^[18],因为柠檬酸污泥的挥发性有机物和上清液 COD 分别高出市政污泥 8%和 166%.因此,从污泥固体和上清液两部分来探究其对污泥缓冲性能的影响.但由毛细吸水时间(CST)和污泥比阻(SRF)可以看出,柠檬酸污泥的脱水性能差于市政污泥.

表 1 两种污泥的基本性质及其酸碱缓冲性能
Table 1 Basic properties of the two sludges

污泥种类 Sludge type	固体浓度 MLSS/ (g·L ⁻¹)	挥发性固体 浓度 MLVSS/%	溶解性 COD SCOD/ (mg·L ⁻¹)	初始 pH Initial pH	酸缓冲容量 ABC/ (mmol·L ⁻¹)	碱缓冲容量 ALBC/ (mmol·L ⁻¹)	pH 缓冲容量 pHBC/ (mmol·L ⁻¹)	毛细吸水 时间 CST/s	污泥比阻 SRF (×10 ¹²)/ (m·kg ⁻¹)
柠檬酸污泥	4.40±0.16	62.50±2.36	568.62±24.55	7.85±0.08	19.93±0.5	10.07±0.18	9.50±0.38	17.2±0.6	14.8±3.62
市政污泥	5.67±0.18	57.80±2.25	213.63±15.6	6.96±0.06	7.06±0.38	7.10±0.2	6.61±0.31	12.3±0.3	6.48±0.94

2.2 不同固体浓度下污泥悬浊液的酸碱缓冲性能

采用酸碱滴定的方法,对两种污泥进行不同固体浓度下的酸碱滴定,如图 1 所示,柠檬酸污泥和市政污泥的酸碱缓冲能力变化趋势大致相似,均成明显的反“S”形,具有两个明显的拐点,但不同固体浓度污泥悬浊液的拐点出现的位置不同.参照土壤酸碱缓冲曲线的意义^[22]并结合图 1 可知,无论是市政污泥还是柠檬酸污泥,固体浓度越大,缓冲曲线斜率越小越平缓,表示污泥悬浊液的缓冲能力越强.

2.2.1 污泥悬浊液的 pH 缓冲容量

由图 1 可以看出,污泥悬浊液的酸碱滴定曲线整体呈现明显的反“S”形,且在 pH 3.00—10.00 的范围内均近似直线,因此,本实验在此 pH 范围内对两种污泥的酸碱缓冲曲线进行局部拟合计算.拟合结果及 pH 缓冲容量见表 2.

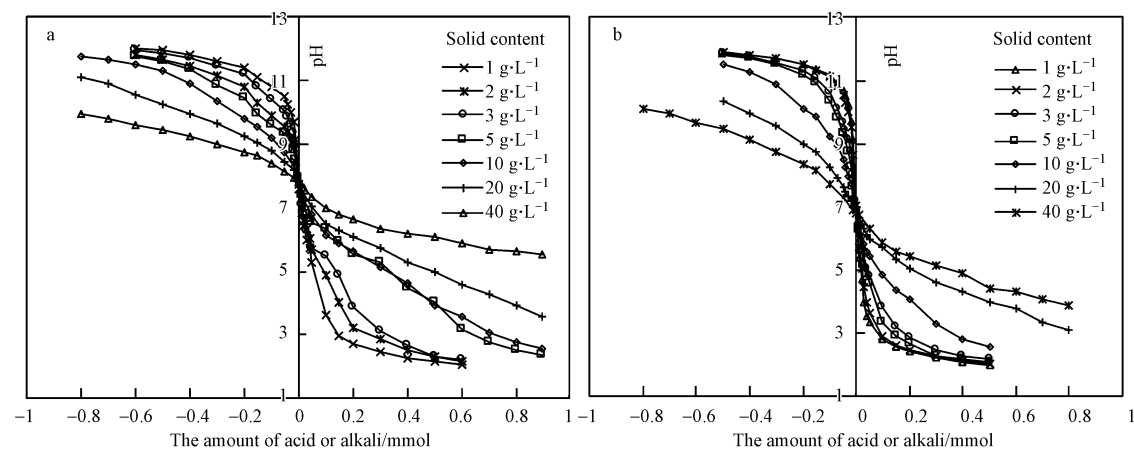


图 1 不同固体浓度的柠檬酸污泥(a)和市政污泥(b)的酸碱滴定曲线
(正值代表酸加入量,负值代表碱加入量)

Fig.1 Acid-base titration curves of citric acid sludge(a)and municipal sludge(b)at different concentrations
(The positive value represents the amount of acid added, and the negative value represents the amount of alkali added)

如表 2 所示,在设定的固体浓度范围即 $40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 内,以 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为单位的 pHBC 随着固体浓度的增加在不断增大,而且相同固体浓度下,柠檬酸污泥的 pH 缓冲容量是市政污泥的 1.5—4.8 倍,可能是因为柠檬酸污泥的有机质含量较高^[18],也可能与其中的多糖、蛋白质等 EPS 有关,其中,在质量浓度为 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,柠檬酸污泥的 pHBC 分别是市政污泥的 4.8 倍和 3.3 倍.以 $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 为单位与土壤酸碱缓冲容量作对比发现,柠檬酸污泥的 pHBC 同样远高于土壤(pHBC 为 $0.01\text{—}0.03\text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[18]).

表 2 不同固体浓度柠檬酸污泥和市政污泥在突跃范围内的直线拟合及 pH 缓冲容量

Table 2 Linear fitting and pH buffer capacity of citric acid sludge and municipal sludge with different solid concentration

固体浓度 Solid content / ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	柠檬酸污泥 Citric acid sludge				市政污泥 Municipal sludge			
	初始 pH Initial pH	pH 缓冲 容量 pHBC/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH 缓冲 容量 pHBC/ ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	R^2	初始 pH Initial pH	pH 缓冲 容量 pHBC/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH 缓冲 容量 pHBC/ ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	R^2
1	7.74	0.42	0.42	0.97	7.04	0.27	0.20	0.95
2	7.88	0.51	0.26	0.97	7.06	0.31	0.16	0.96
3	7.61	0.88	0.29	0.92	7.18	0.46	0.15	0.98
5	7.78	3.33	0.67	0.93	6.97	0.70	0.14	0.93
10	7.84	3.84	0.38	0.96	6.88	1.15	0.11	0.94
20	7.82	5.22	0.26	0.97	6.84	2.78	0.14	0.95
40	7.66	8.55	0.21	0.94	6.82	5.49	0.14	0.96

2.2.2 污泥悬浊液的酸缓冲容量及碱缓冲容量

由表 3 和表 4 可知,两种污泥的 ABC 与 ALBC 均在一定范围内随着固体浓度的增加而增大($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为单位).柠檬酸污泥的 ALBC 是 ABC 的 1—3 倍,这可能是由污泥原始的 pH 所决定的^[12],柠檬酸污泥的 pH 值在 7.4—8.0 之间,偏碱性,中和所需要的酸较多,因此对外来碱的加入相对比较敏感.相同固体浓度下,两种污泥的 ABC 值极为接近,均在 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 到 $8\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,而柠檬酸污泥的 ALBC 均是市政污泥的 1.7 倍和 3.1 倍.

表 3 不同固体浓度的柠檬酸污泥和市政污泥在突跃范围内的酸滴定

Table 3 Acid titration of citric acid sludge and municipal sludge at different concentrations in the jump range

固体浓度 Solid content/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	柠檬酸污泥 Citric acid sludge			市政污泥 Municipal sludge		
	酸缓冲容量 ABC/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	酸缓冲容量 ABC/ ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	R^2	酸缓冲容量 ABC/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	酸缓冲容量 ABC/ ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	R^2
1	1.02	1.02	0.91	1.44	1.44	0.63
2	1.78	0.89	0.92	1.33	0.67	0.72
3	1.59	0.53	0.92	1.71	0.57	0.83
5	4.28	0.86	0.96	1.72	0.34	0.81
10	4.58	0.46	0.96	3.05	0.31	0.92
20	6.25	0.31	0.97	5.63	0.28	0.95
40	7.30	0.18	0.90	7.16	0.18	0.94

表 4 不同固体浓度的柠檬酸污泥和市政污泥在突跃范围内的碱滴定

Table 4 Alkali titration of citric acid sludge and municipal sludge with different solid concentrations in the jump range

固体浓度 Solid content/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	柠檬酸污泥 Citric acid sludge			市政污泥 Municipal sludge		
	碱缓冲容量 ALBC/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	碱缓冲容量 ALBC/ ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	R^2	碱缓冲容量 ALBC/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	碱缓冲容量 ALBC/ ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	R^2
1	2.65	2.65	0.65	1.18	1.18	0.59
2	4.70	2.35	0.76	1.52	0.76	0.61
3	4.28	1.43	0.82	1.93	0.64	0.75
5	4.33	0.87	0.90	1.77	0.35	0.79
10	5.24	0.52	0.91	1.99	0.20	0.9
20	6.55	0.33	0.96	3.17	0.16	0.94
40	10.26	0.26	0.95	6.11	0.15	0.94

因此,可通过调整活性污泥的固体浓度来改变污泥的缓冲性能,如在活性污泥用酸碱法^[23-24]进行脱水预处理之前,降低其固体浓度到合适值,从而降低活性污泥的缓冲性能,使其酸碱环境容易被改变,从而改善活性污泥的脱水性能。

2.3 不同 COD 的污泥上清液的酸碱缓冲性能

如图 2 所示,上清液的滴定曲线不同于污泥悬浊液,其酸滴定和碱滴定呈现明显的分段特征,即酸碱滴定曲线在 pH 3.00—10.00 的范围内并不呈线性.但是上清液的酸滴定曲线呈现明显的反“S”形.因此本实验从上清液的酸滴定曲线与碱滴定曲线分别探讨了其缓冲性能,如表 5 所示。

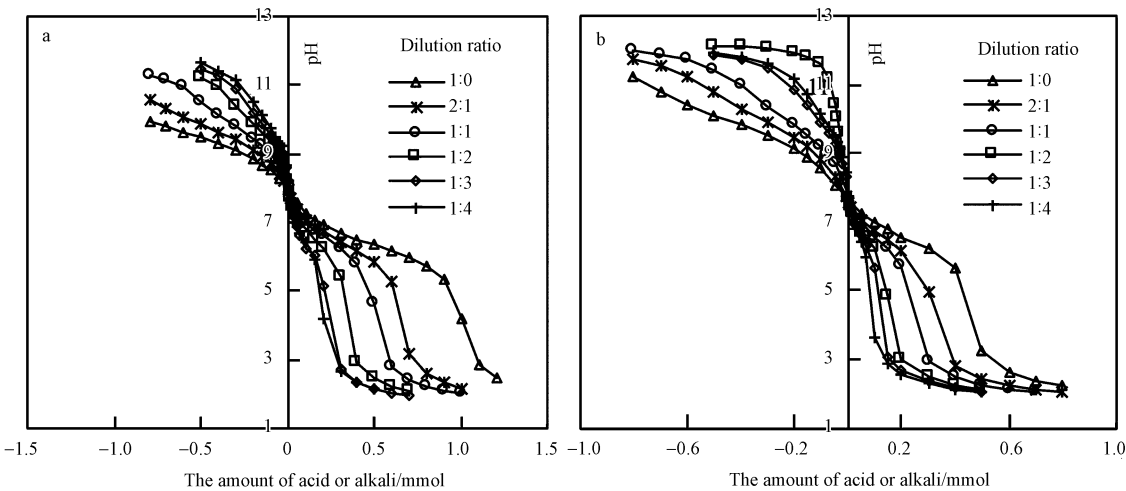


图 2 不同 COD 的柠檬酸污泥(a)和市政污泥(b)上清液的滴定曲线
(正值代表酸加入量,负值代表碱加入量)

Fig.2 Titration curves of citric acid sludge(a)and municipal sludge(b)supernatant with different COD
(The positive value represents the amount of acid added, and the negative value represents the amount of alkali added)

由表 5 可知,无论是柠檬酸污泥还是市政污泥,上清液 COD 越高,酸碱缓冲性能越强,可见其中的可溶性有机物含量是影响 ABC 与 ALBC 的一个重要因素,柠檬酸污泥上清液的 ALBC 是 ABC 的 1.2—2.0 倍.是因为污泥的初始 pH 值为碱性,对外来碱的加入比较敏感.其中柠檬酸污泥上清液的 ABC (1.95—8.78 mmol·L⁻¹)略高于焦化废水^[25]的 ABC(0.7—8.0 mmol·L⁻¹),而市政污泥上清液的 ABC 仅有 0.88—3.31 mmol·L⁻¹.且相同稀释比的情况下,柠檬酸污泥的 ABC 与 ALBC 均高于市政污泥,这可能与其中有机物的种类有关,因为柠檬酸污泥上清液和焦化废水中均含有大量的高分子有机物.因此,降低活性污泥缓冲性能的另一途径是降低其上清液的 COD。

表 5 不同 COD 的柠檬酸污泥和市政污泥上清液在突跃范围内的直线拟合及缓冲容量

Table 5 Linear fitting and buffer capacity of citric acid sludge and municipal sludge supernatant in the jump range with different COD										
稀释比 Dilution ratio	柠檬酸污泥 Citric acid sludge					市政污泥 Municipal sludge				
	初始 pH Initial pH	酸缓冲容量 ABC/ (mmol·L ⁻¹)	R ²	碱缓冲容量 ALBC/ (mmol·L ⁻¹)	R ²	初始 pH Initial pH	酸缓冲容量 ABC/ (mmol·L ⁻¹)	R ²	碱缓冲容量 ALBC/ (mmol·L ⁻¹)	R ²
1:0	7.97	8.78	0.93	10.87	0.96	7.67	3.31	0.95	5.49	0.94
2:1	7.93	4.24	0.95	8.35	0.96	7.57	3.12	0.92	4.91	0.95
1:1	8.17	3.75	0.96	6.55	0.97	7.68	2.06	0.94	4.75	0.92
1:2	8.24	2.66	0.96	4.42	0.97	7.72	1.33	0.96	3.21	0.91
1:3	8.23	2.58	0.9	4.03	0.95	7.72	1.23	0.91	1.79	0.91
1:4	8.2	1.95	0.94	3.87	0.92	7.73	0.88	0.93	1.66	0.90

将原污泥与相同浓度污泥悬浊液以及上清液的 ABC、ALBC、pHBC 进行比对发现,原污泥的缓冲性能并不是简单的污泥固体和上清液缓冲性能的加和.柠檬酸污泥的 pHBC 中上清液占 75.6%,污泥固体占 16.9%;ABC 中上清液占 44.0%,污泥固体占 21.4%;ALBC 中仅上清液就高出原污泥 8%.由此可见,上清液对活性污泥缓冲性能的占比更大.这可能是由活性污泥当中的可溶性有机物(DOM)导致的,而上清液中含有大量的多糖、蛋白质和腐殖酸等胞外聚合物(EPS)^[26],以及其中大量的可溶性离子,均增大了上清液的缓冲性能.

3 结论(Conclusion)

(1) 柠檬酸污泥与市政污泥的 ABC、ALBC 以及 pHBC 均在一定范围内随固体浓度的增加而增大.相同固体浓度下,两种污泥的 ABC 值均在 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 到 $8\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间;但柠檬酸污泥的 pHBC 和 ALBC 分别是市政污泥的 1.5—4.8 倍和 1.7—3.1 倍.

(2) 柠檬酸污泥与市政污泥上清液的 ABC 与 ALBC 均随上清液 COD 的增加而增大.柠檬酸污泥上清液的 ALBC 是 ABC 的 1.2—2.0 倍.

(3) 活性污泥体系的缓冲能力是由污泥固体和上清液两部分共同作用的结果,且上清液是影响活性污泥缓冲性能的主要原因,其中柠檬酸污泥的上清液对酸碱缓冲性能的占比为 75.6%,污泥固体占 16.9%.在采用需调节 pH 处理污泥的工艺中,需充分考虑污泥浓度和上清液 COD 对污泥缓冲容量和酸碱用量的影响,从而确定合理经济的工艺条件.

参考文献(References)

- [1] 朱哲,李涛,王东升,等. pH 对活性污泥表面特性和形态结构的影响[J]. 环境工程学报, 2008, 2(12): 1599-1604.
ZHU Z, LI T, WANG D S, et al. Effect of pH on surface properties and physical structure of activated sludge flocs[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(12): 1599-1604(in Chinese).
- [2] 姚毅. 活性污泥的表面特性与其沉降脱水性能的关系[J]. 中国给水排水, 1996, 12(1): 22-26.
YAO Y. Surface properties of activated sludge and their effects on settle ability and dewaterability [J]. China Water & Wastewater, 1996, 12(1): 22-26(in Chinese).
- [3] 郑蕾,田禹,孙德智. pH 值对活性污泥胞外聚合物分子结构和表面特征影响研究[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1507-1511.
ZHENG L, TIAN Y, SUN D Z. Effects of pH on the surface characteristics and molecular structure of extracellular polymeric substances from activated sludge[J]. Environmental Science, 2007, 28(7): 1507-1511(in Chinese).
- [4] 璩绍雷,孙宝盛,赵双红,等. pH 对间歇进水序批式生物反应(SBR)工艺活性污泥沉降性能和微生物结构的影响[J]. 环境化学, 2016, 35(3): 508-515.
QU S L, SUN B S, ZHAO S H, et al. pH activated sludge sedimentation performance and the structure of the microbial of SBR technology [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(3): 508-515(in Chinese).
- [5] GARCIA-GIL J C, CEPPLS B, VELASCO M I, et al. Long-term effects of amendment with municipal solid waste compost on the elemental and acidic functional group composition and pH-buffer capacity of soil humic acids[J]. Geoderma, 2004, 121(1): 135-142.
- [6] WONG M T F, NORTCLIFF S, SWIFT R S. Method for determining the acid ameliorating capacity of plant residue compost, urban waste compost, farmyard manure, and peat applied to tropical soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1998, 29(19/20): 2927-2937.
- [7] 孙津鸿,张书廷,姚艳. 活性污泥缓冲性能研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 199-202.
SUN J H, FZHANG S T, YAO Y, On the buffering performance of activated sludge[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1): 199-202(in Chinese).
- [8] 陈学民,高承煜,伏小勇,等. 蚯蚓处理对城镇造粒污泥酸碱缓冲容量的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(8): 2941-2946.
CHEN X M, GAO C Y, FU X Y, et al. Impacts of earthworm on acidic and alkaline buffering capacity of pelletized dewatered sludge in vermicomposting[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(8): 2941-2946(in Chinese).
- [9] 环境保护部清洁生产中心,中国生物发酵产业协会. 中国柠檬酸行业清洁生产进展研究报告[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
Cleaner Production Center of Ministry of Environmental Protection, China Biological Fermentation Industry Association. Research report on clean production progress of citric acid industry in China [M]. Beijing: China Environment Press, 2013(in Chinese).
- [10] 井玉丹,林清火,郭澎涛,等. 海南胶园土壤酸碱缓冲性能研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(2): 345-350.
JING Y D, LIN Q H, GUO P T, et al. Soil acid buffer performance of rubber plantation in Hainan[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(2): 345-350(in Chinese).

- [11] 臧维玲.海水的缓冲性能及缓冲容量[J].海洋科学,1983,7(4):18.
SANG W L. Buffering capacity and buffering capacity of sea water[J].Marine Science,1983,7(4):18(in Chinese).
- [12] AITKEN R L, MOODY P W. The effect of valence and ionic-strength on the measurement of pH buffer capacity[J]. Soil Research,1994, 32(5):975-984.
- [13] HUANG P,ZHANG J B,ZHU A N, et al. Acid and alkali buffer capacity of typical fluvor-aquic soil in Huang-Huai-Hai Plain[J].Journal of Integrative Agriculture,2009,8(11):1378-1383.
- [14] YANG S,WU S J,ZHOU W Z, et al. Acid and alkaline buffering capacity and its influencing factors of typical soils in the three gorges reservoir area[J].Resources & Environment in the Yangtze Basin,2016,25(1):163-170.
- [15] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第三版)[M].北京:中国环境科学出版社,1989.
State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater (Third Edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989(in Chinese).
- [16] IMC L, LAI K C, CHEN G H. Salinity effect on mechanical dewatering of sludge with and without chemical conditioning [J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(23):4691-4696.
- [17] DREVER J I. Aquatic Chemistry, Third Edition[J].Journal of Environmental Quality,1996,25(5):1162.
- [18] 姜军,徐仁扣,赵安珍.用酸碱滴定法测定酸性红壤的 pH 缓冲容量[J].土壤通报,2006,37(6):1247-1248.
JIANG J, XU R K, ZHAO A Z. Determination of pH buffer capacity of acid red soils by acid-base titration[J].Chinese Journal of Soil Science, 2006,37(6):1247-1248(in Chinese).
- [19] 成杰民,胡光鲁,潘根兴.用酸碱滴定曲线拟合参数表征土壤对酸缓冲能力的新方法[J].农业环境科学学报, 2004,23(3): 569-573.
CHENG J M,HU G L,PAN G X. New method for evaluating buffering capacity and equilibrium pH of paddy soil with simulation parameter [J].Journal of Agro-Environment Science, 2004,23(3):569-573(in Chinese).
- [20] ZHANG H Y,KAMON M,KATSUMI T. Effect of acid buffering capacity on the long-term mobility of heavy metals in clay liner[J].Soils and Foundations -Tokyo-, 2004,44(6):111-120.
- [21] 刘芳,叶滨恭.有机垃圾好氧堆肥过程中微生物生长适应条件的研究[J].重庆环境科学,2003,25(12):56-58.
LIU F,YE B G. Adaptability of microorganism in the process of aerobic composting[J].Environmental Impact Assessment, 2003,25(12): 56-58(in Chinese).
- [22] 胡波,王云琦,王玉杰,等.重庆缙云山酸雨区森林土壤酸缓冲机制及影响因素[J].水土保持学报,2013,27(5):77-83.
HU B, WANG Y Q, WANG Y J, et al. Acidic buffering capability and its influencing factors of typical forests soil in Jinyun Mountain, Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(5):77-83(in Chinese).
- [23] NEYENS E,BAEYENS J,CREEMERS C. Alkaline thermal sludge hydrolysis[J]. Journal of Hazardous Materials,2003,97(13):295-314.
- [24] NEYENS E,BAEYENS J,WEEMAES M, et al. Hot acid hydrolysis as a potential treatment of thickened sewage sludge[J].Journal of Hazardous Materials,2003, 98(1-3):275-293.
- [25] 林冲,袁孟阳,韦朝海,等.焦化废水缓冲体系的存在证明与集水调节池中水质结构调控[J].环境化学,2012,31(10):1473-1479.
LIN C,YUAN M Y,WEI C H, et al. The buffer system in coking wastewater and the water quality control in water regulating tank[J]. Environmental Chemistry,2012,31(10):1473-1479(in Chinese).
- [26] CHEN W,CAO X H,XU H. Influence of extracellular polymeric substances (EPS) treated by combined ultrasound pretreatment and chemical re-flocculation on water treatment sludge settling performance[J]. Chemosphere,2017,170:196-206.