



碳中和愿景下碳化污泥吸附耦合铁盐混凝处理污水

李振华^{1,2}, 黄金阳^{1,2}, 蔡丽云^{1,2}, 沈程程^{1,2}

(1. 厦门大学嘉庚学院环境科学与工程学院, 福建漳州 363105;

2. 河口生态安全与环境健康福建省高校重点实验室, 福建漳州 363105)

[摘要] 以市政污水处理厂剩余污泥为原料,经连续高速污泥碳化系统脱水、干化和缺氧干馏处理后,可制得碳化污泥吸附剂。通过检测碳化污泥的基本特征参数、粒度分布、元素组成、水溶物和重金属离子表征其物理化学特性,并用碳化污泥吸附与三氯化铁混凝耦合处理污水。结果表明,碳化污泥的孔容积、比表面积和碘值分别为 0.10 cm³/g、140 m²/g 和 515.2 mg/g,颗粒粒径主要分布在 1.0~5.7 mm,碳质量分数接近 50%,最大碳氢质量比(C/H)为 39.09,且碳化过程实现了剩余污泥中重金属离子的固定化,溶出物质量浓度和重金属离子质量浓度均低于水处理相关标准指标值,可被安全应用于污水处理。利用碳化污泥吸附耦合铁盐混凝对市政污水进行深度处理,在三氯化铁、碳化污泥投加量分别为 15 mg/L 和 4 g/L 时,污水中 COD、NH₃-N、TP 和浊度的去除率分别为 59.38%、28.20%、59.41% 和 91.84%。碳化污泥吸附与铁盐混凝的协同作用,不仅可提高污水中各类污染物的去除率,而且可减少 33.33% 的三氯化铁投加量。

[关键词] 碳化污泥;剩余污泥;混凝;吸附;回用

[中图分类号] X705;X703

[文献标识码] A

[文章编号] 1005-829X(2023)02-0118-06

Combination of sludge-derived-carbon adsorption and coagulation of iron salt for sewage treatment under the vision of carbon neutrality

LI Zhenhua^{1,2}, HUANG Jinyang^{1,2}, CAI Liyun^{1,2}, SHEN Chengcheng^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tan Kah Kee College, Xiamen University, Zhangzhou 363105,

China; 2. Key Laboratory of Estuarine Ecological Security and Environmental Health of Fujian

Province University, Zhangzhou 363105, China)

Abstract: Using the excess sludge from municipal sewage treatment plant as raw material, sludge-derived-carbon adsorbent was prepared by dehydration, drying and anoxic retorting through continuous high-speed carbonizing system. The physical and chemical characteristics of sludge-derived-carbon were examined in terms of the basic parameters, the particle size distribution, elemental composition, dissolved matter and heavy metal ion contents. Furthermore, the removal rates of pollutants for sewage treatment were also investigated through the combination of sludge-derived-carbon adsorption and coagulation of ferric chloride. The results showed that the pore volume, specific surface area and iodine value of sludge-derived-carbon could reach 0.10 cm³/g, 140 m²/g and 515.2 mg/g, respectively. And the particle sizes of sludge-derived-carbon were mainly 1.0–5.7 mm. The carbon mass fraction of sludge-derived-carbon was close to 50%, and the maximum mass ratio of carbon to hydrogen (C/H) was 39.09. As the immobilization of heavy metals in the carbonization process, the mass concentration of dissolved matter and heavy metal ions of sludge-derived-carbon were lower than the relevant standard of water treatment, which could be safely applied to sewage treatment. The municipal sewage was further treated by sludge-derived-carbon adsorption coupled with ferric salt coagulation. When the dosage of ferric chloride and sludge-derived-carbon were 15 mg/L and 4 g/L, the removal efficiencies of COD, NH₃-N, TP and turbidity reached to 59.38%, 28.20%, 59.41% and 91.84%, respectively. The removal rates of pollutants could be improved significantly by means of the synergistic effect of sludge-derived-carbon

[基金项目] 漳州市自然科学基金项目(ZZ2021J35)

adsorption and coagulation of iron salt. Meanwhile, the dosage of ferric chloride had been reduced by 33.33%.

Key words: sludge-derived-carbon; excess sludge; coagulation; adsorption; reuse

高效、低能耗、低碳排量是碳中和愿景下污水处理的发展方向。碳化污泥是市政污水处理厂剩余污泥碳化处理的副产物。污泥碳化是指在常压或微正压、无氧或缺氧条件下,对污泥进行高温热分解,使污泥中的水分释放出来,分解污泥中除碳以外的有机物,同时又最大限度地保留污泥中的碳含量^[1]。污水处理厂剩余污泥碳化处理可大量减少污泥质量和体积(减容率90%以上),还可使剩余污泥在污水处理厂内的处理处置和资源化利用成为可能。然而,污泥碳化处理需消耗热能,提供热能会产生碳排。当前我国各行业都在聚焦“双碳”目标,加速实现各领域的低碳化转型^[2],污水处理厂的碳中和运行是污水处理行业的探索方向^[3]。因此,针对污泥碳化,一方面要尽可能地降低现有污泥碳化流程的能耗;另一方面,要积极拓展有效安全利用副产品碳化污泥的渠道,尤其是评估碳化污泥在污水处理厂内资源化再利用的安全性和可行性,以期减少污水处理厂的物耗或药耗,从而降低污水处理厂的间接碳排。

碳化污泥外形与木炭相似,质量轻,无臭味,自身的孔洞结构使其具有吸臭、吸湿及吸水性。因此,近年来关于碳化污泥作为吸附剂、除臭材料、燃料、融雪剂、土壤改良材料、园林绿化肥料等进行资源化利用的报道较多。鲁涛等^[4]利用污泥碳化机理制得污泥炭并回归土壤,污泥炭中重金属含量符合农用泥质、园林绿化用泥质以及土地改良用泥质标准要求;污泥炭中总养分质量分数为1.94%,低于园林绿化用泥质及农用泥质标准要求,优于土地改良用泥质要求。潘志辉等^[5]以城市污水处理厂化学与生物混合污泥为原料,在550℃下活化1h,制备出混合污泥吸附剂并用于污水化学强化一级处理,混凝剂投加量减少50%即可达到对UV₂₅₄和COD的同等去除率。李亚飞^[6]以污水处理厂脱水污泥和玉米芯为原料,采用ZnCl₂活化法混合共碳化制备了污泥-玉米芯碳化吸附剂,用于处理某电池厂产生的重金属实际废水,当吸附剂投加量为32g/L时,Cu²⁺几乎被完全吸附,Pb²⁺去除率达96.10%。然而,现有研究中使用的碳化污泥大多是通过实验室小试或中试试验制得,碳化流程各不相同,碳化污泥性能差异较大且产量有限。这些因素都限制了碳化污泥在污水处理

厂内的大规模资源化再利用。同时,将碳化污泥在污水处理厂内回用于污水处理的研究也较少。

基于碳化污泥的研究与应用现状,本试验以商业化量产运营的高速污泥碳化系统制得的碳化污泥为研究对象,检测了碳化污泥的基本特征参数、粒度分布、元素组成、水溶物和重金属离子含量等,以表征其物理化学特性和评价其回用安全性;并在此基础上,考察了碳化污泥吸附耦合铁盐混凝处理污水的效能,为其在污水处理厂内的资源化再利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 碳化污泥的制备

试验用碳化污泥由某市政污水处理厂内处理量为60 t/d(以含水率80%的脱水污泥计)的连续高速污泥碳化装置制得。制备流程如图1所示。

制备流程为:(1)先将经污水处理厂浓缩脱水后的滤饼在干燥机内的缺氧环境下加热、搅拌及翻转10 min,含水率80%的脱水滤饼被干化至含水率30%的干化污泥;(2)在缺氧状态下将干化污泥通过螺旋式外热碳化炉进行多级连续干馏15~20 min(温度700~800℃),分解干化污泥中除碳以外的有机物。碳化过程中干馏气体能够完全燃烧,不会产生二噁英;且制备流程可充分回收和利用干馏气体燃烧后形成的热量,既节省了能源,又减少了碳排。

1.1.2 试验水样

试验水样取自某采用传统活性污泥法的市政污水处理厂二次沉淀池出水,水质参数如下:COD 54.0~68.0 mg/L, NH₃-N 10.9~12.5 mg/L, TN 17.7~21.3 mg/L, TP 0.8~1.2 mg/L, 浊度 9~20 NTU, pH 7.1~7.5, 水温 18~24℃。

1.2 试验方法

碳化污泥成品回用前预处理:先将碳化污泥在蒸馏水中浸泡24 h,再放入DGG-9140A烘箱内于105℃烘至恒重后待用。

三氯化铁单独混凝沉淀试验:在JJ-4A型混凝试验搅拌仪的搅拌杯中各注入1 L试验水样,分别将不同质量的三氯化铁(5、10、15 mg)加入各搅拌杯,先以300 r/min快速搅拌60 s,再以80 r/min慢速

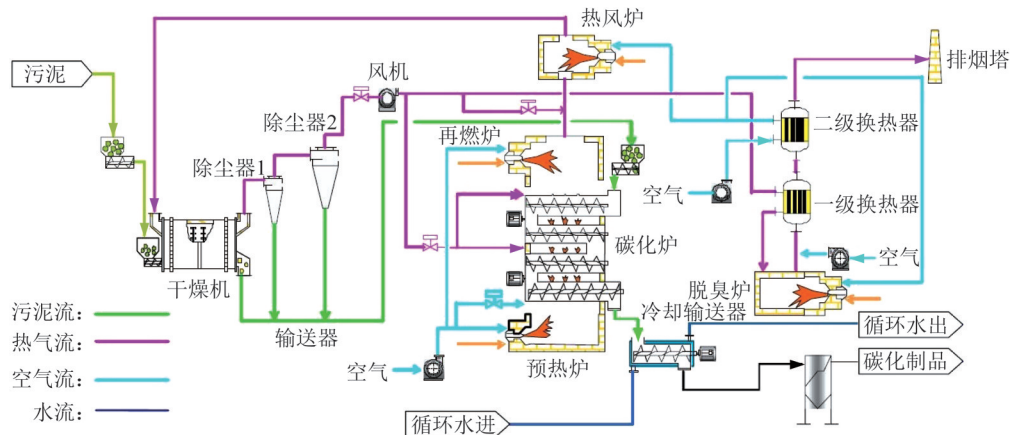


图1 碳化污泥制备流程

Fig. 1 Production process of sludge-derived-carbon

搅拌 15 min, 静置沉淀 30 min 后取上清液, 测定上清液水质。

碳化污泥单独吸附沉淀试验: 在搅拌杯中各注入 1 L 水样, 分别将不同质量的碳化污泥(1、2、3、4、5 g)加入各搅拌杯, 先以 300 r/min 快速搅拌 60 s, 再以 80 r/min 慢速搅拌 15 min, 静置沉淀 30 min 后取上清液, 测定上清液水质。

碳化污泥吸附耦合三氯化铁混凝沉淀试验: 在搅拌杯中各注入 1 L 水样, 将三氯化铁加入各搅拌杯, 以 300 r/min 快速搅拌 30 s; 再将碳化污泥加入各搅拌杯, 以 300 r/min 快速搅拌 30 s, 再以 80 r/min 慢速搅拌 15 min, 静置沉淀 30 min 后取上清液, 测定上清液水质。

1.3 分析项目及方法

碳化污泥的比表面积、孔容积依据《煤质颗粒活性炭试验方法 孔容积和比表面积的测定》(GB/T 7702.20—2008)测定; 碳化污泥碘吸附值依据《煤质颗粒活性炭试验方法 碘吸附值的测定》(GB/T 7702.7—2008)测定; 碳化污泥亚甲基蓝吸附值依据《煤质颗粒活性炭试验方法 亚甲基蓝吸附值的测定》(GB/T 7702.6—2008)测定; 碳化污泥 pH 依据《煤质颗粒活性炭试验方法 pH 值的测定》(GB/T 7702.16—1997)测定; 碳化污泥粒度依据《煤质颗粒活性炭试验方法 粒度的测定》(GB/T 7702.2—1997)测定; 碳化污泥水溶物依据《煤质颗粒活性炭 净化水用煤质颗粒活性炭》(GB/T 7701.2—2008)附录 C 测定; 碳化污泥重金属离子含量依据《生活饮用水净化水用煤质活性炭》(CJ/T 345—2010)附录 D 测定; 碳化污泥元素分析采用 EL 型元素分析仪测定。

水样 COD、TN、TP 分别采用重铬酸钾法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、钼酸铵分光光度法测定; 浊度和 pH 分别采用 SGZ-400A 数显台式浊度计和 PHSJ-5 型 pH 计测定。

2 结果与讨论

2.1 碳化污泥特性分析

2.1.1 碳化污泥基本特征和粒度分布

试验测定了碳化污泥的密度、孔容积、比表面积等基本特征参数, 并与净化水用煤质活性炭进行了比较, 结果见表 1。

表 1 碳化污泥基本特征参数

Table 1 Characteristic parameters of sludge-derived-carbon

项目	碳化污泥	煤质活性炭
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.38~0.52	0.20~0.70
孔容积/($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	0.1	0.2~0.4
pH	7~9	6~10
比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	140	500~1 400
碘值/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	515.2	≤ 800
亚甲基蓝吸附值/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	3.0	≥ 120
溶剂蒸汽吸附值/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	3.0	≥ 30
热值/($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	12 000~17 000	—

表 1 结果显示, 碳化污泥与煤质活性炭的密度相近; 而孔容积、比表面积、碘值、亚甲基蓝吸附值和溶剂蒸汽吸附值这 5 个指标, 碳化污泥的检测值小于煤质活性炭, 这说明碳化污泥在基本物理特性上和煤质活性炭有一定相似性, 也具备一定的孔容积和比表面积, 具有一定的吸附能力。而导致碳化污泥相关吸附性指标参数小于煤质活性炭的原因在于二者制作原料和工艺的差异, 使得二者在结构特性

上存在一定的差距,即碳化污泥内部孔隙度不如煤质活性炭发达,对碘、亚甲基蓝等的吸附能力也就不如煤质活性炭。

表2展示了碳化污泥的粒度分布。

表2 碳化污泥粒度分布

Table 2 Particle size distribution of sludge-derived-carbon			
粒径/mm	质量分数/%	粒径/mm	质量分数/%
≤0.2	1.57	1.0~2.4	16.81
0.2~0.5	1.39	2.4~4.0	43.37
0.5~0.7	0.91	4.0~5.7	26.33
0.7~1.0	1.70	≥5.7	7.92

表2结果显示,碳化污泥粒径在2.4~4.0 mm范围的质量分数最大,接近总量的一半。粒径在1.0~5.7 mm范围的碳化污泥的质量分数达到86.51%,说明碳化污泥颗粒粒径主要分布在1.0~5.7 mm。碳化污泥粒径分布满足《煤质颗粒活性炭 载体用煤质颗粒活性炭》(GB/T 7701.3—2008)中对载体用颗粒活性炭的粒度指标要求。因此,碳化污泥颗粒可作为载体填料回用于污水处理。

2.1.2 碳化污泥元素分析

碳化污泥元素分析结果见表3。

表3 碳化污泥元素分析

Table 3 Element analysis of sludge-derived-carbon						
元素	C质量分数/%	H质量分数/%	O质量分数/%	N质量分数/%	S质量分数/%	高温挥发分质量分数/%
碳化污泥	43.0~47.0	1.1~1.8	0.2~0.7	2.0~5.0	0.1~0.3	40.0~55.0
煤质活性炭	75.0~85.0	0.5~8.0	3.0~6.0	0.4~0.8	0.4~1.0	—

由表3可以看出,碳化污泥中碳质量分数最高,接近50%,其他元素的质量分数均低于5%。与净化水用煤质活性炭相比,碳化污泥含碳率偏低,其他元素占比接近。虽然污泥碳化流程已最大限度地将剩余污泥中的碳元素保留在碳化污泥中了,但是制备碳化污泥的原材料是含有大量有机物的剩余污泥,而煤质活性炭是通过优质煤制得,因此碳化污泥的碳元素质量分数要比煤质活性炭低一些。另外,碳氢质量比(C/H)为显示污泥碳化程度的特征值,由表3计算可得碳化污泥的最大C/H为39.09,说明污泥经过高温碳化后,其中的水分已被充分蒸发,污泥内有机成分也已被干馏热分解。

2.1.3 碳化污泥水溶物和重金属离子含量分析

为评价碳化污泥回用于污水处理的安全性,本试验进行了碳化污泥水溶物和重金属离子含量的测定,结果见表4和表5。由于我国目前还未制定统一的污泥基吸附剂资源化再利用国家标准,故表4和表5中的标准限值采用有关城镇污水处理厂污泥处理处置的城镇建设行业标准。

由表4可以看出,碳化污泥的溶出物质量浓度远低于CJ/T 290—2008的指标限值,溶出物总和低于GB/T 7701.2—2008中规定的净水用煤质颗粒活性炭水溶物的指标限值(≤0.4%)。而且,碳化污泥中重金属离子质量浓度低于CJ/T 309—2009中A级污泥污染物浓度限值(表5),说明碳化过程实现了剩余污泥中重金属离子的固定化。由此可知,将商

表4 碳化污泥水溶物质量浓度及标准限值

Table 4 Mass concentration and standard limit of dissolved matter of sludge-derived-carbon					
项目	质量浓度/(mg·L ⁻¹)	标准限值/(mg·L ⁻¹)	项目	质量浓度/(mg·L ⁻¹)	标准限值/(mg·L ⁻¹)
铅	0.008	≤3	六价铬	0.04	≤1.5
镉	0.005	≤0.3	氰化物	0.09	≤1.0
汞	0.000 4	≤0.05	有机磷	0.08	—
砷	0.008	≤1.5	多氯联苯	0.000 2	—
硒	0.007	—	苯	0.000 8	—

注:标准限值参见《城镇污水处理厂污泥处置单独焚烧用泥质》(CJ/T 290—2008)。

表5 碳化污泥重金属离子质量浓度及标准限值

Table 5 Mass concentration and standard limit of heavy metal ions of sludge-derived-carbon					
项目	质量浓度/(mg·kg ⁻¹)	标准限值/(mg·kg ⁻¹)	项目	质量浓度/(mg·kg ⁻¹)	标准限值/(mg·kg ⁻¹)
总镉	2.3	<3	总铬	46	<500
总汞	0.003	<3	总砷	7.3	<30
总铅	47	<300	总镍	69	<100

注:标准限值参见《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》(CJ/T 309—2009)中A级污泥污染物浓度限值。

业化量产运营制得的碳化污泥应用于污水处理是安全可行的。

2.2 碳化污泥吸附耦合三氯化铁混凝处理效能

本试验考察了三氯化铁单独混凝、碳化污泥单独吸附和碳化污泥吸附耦合三氯化铁混凝3种不同模式下,混凝剂和吸附剂投加量对市政污水深度处理效果的影响,结果见图2。

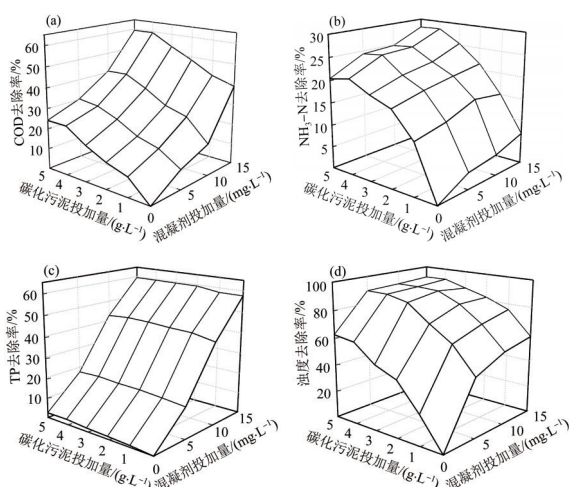


图2 碳化污泥吸附耦合三氯化铁混凝处理污水的效果

Fig. 2 Pollutants removal effect of the combination of sludge-derived-carbon adsorption and coagulation of iron salt

由图2可以看出,无论是铁盐单独混凝、碳化污泥单独吸附,还是碳化污泥吸附耦合三氯化铁混凝处理,都对污水中的COD、NH₃-N、TP和浊度有一定的去除效果。其中,投加15 mg/L三氯化铁单独混凝时,COD、TP和浊度的去除率分别为39.06%、57.66%和58.21%;NH₃-N去除率稍低,仅为6.92%。投加4 g/L碳化污泥单独吸附时,COD、NH₃-N和浊度的去除率分别为24.19%、21.33%和60.40%;TP去除率较低,仅为2.46%。单独混凝和单独吸附2种方式对COD和浊度的去除率相近,三氯化铁单独混凝对TP的去除效果较好,而碳化污泥单独吸附对NH₃-N去除效果较好。而利用碳化污泥吸附耦合三氯化铁混凝时,在三氯化铁、碳化污泥投加量分别为15 mg/L和4 g/L时,通过吸附和混凝的协同处理,COD、NH₃-N、TP和浊度的去除率分别为59.38%、28.20%、59.41%和91.84%。另外,当碳化污泥投加量固定时,COD、NH₃-N、TP和浊度的去除率随着三氯化铁投加量的增加而增大。当三氯化铁投加量固定时,当碳化污泥投加量小于4 g/L时,COD、NH₃-N、TP和浊度去除率随着碳化污泥投加量的增加而逐步升高;当碳化污泥投加量达到4 g/L时,COD、NH₃-N、TP和浊度去除率基本维持稳定;碳化污泥投加量再增加时,各污染物指标去除率不再增大,部分指标反而出现小幅波动。

由上述试验分析可知,碳化污泥吸附剂的使用可以提升污水处理的出水水质。同时,单独三氯化铁混凝处理污水时存在NH₃-N去除效果欠佳的短板,但其

在与碳化污泥吸附耦合后,NH₃-N去除率升高;单独碳化污泥吸附处理污水时存在TP去除率较低的不足,也在和三氯化铁混凝耦合后,TP去除率明显上升。出现这一现象的原因是,碳化污泥利用其自身的多孔结构,可吸附悬浮颗粒物、部分有机分子及无机盐离子,且由污水处理厂剩余污泥制成的碳质吸附剂对水中阳离子的吸附效果要明显优于阴离子^[6-7],故碳化污泥对污水中NH₃-N的去除效果较好;同时,三氯化铁加入污水后会水解产生氢氧化铁胶体,可与水中的磷酸根离子结合形成磷酸铁后从水中析出,故三氯化铁混凝对TP去除率较高。碳质吸附剂的吸附能力与其含碳率具有一定的正相关性^[5,8],而碳化污泥元素分析结果显示其碳元素质量分数约为45%,低于煤质活性炭,所以碳化污泥单独吸附处理污水的效果难以达到煤质活性炭的效果,需与混凝剂耦合使用。另外,与单独使用15 mg/L三氯化铁混凝处理相比,耦合使用4 g/L碳化污泥吸附和10 mg/L三氯化铁混凝处理时,COD、NH₃-N、TP和浊度的去除率显示出相近或更高值,加入碳化污泥减少了33.33%的三氯化铁投加量。因此,利用碳化污泥吸附与三氯化铁混凝耦合处理污水时,两者之间的协同作用不仅可提高污水中各污染物的去除率,而且可节约化学药剂三氯化铁的使用量。另外,吸附饱和后的碳化污泥颗粒和三氯化铁混凝沉淀产生的化学污泥,可与污水处理厂剩余污泥一起脱水后,再次送入连续高速污泥碳化系统,实现循环再生利用。

3 结论

(1)市政污水处理厂剩余污泥经商业化量产运营的连续高速污泥碳化系统脱水、干化和缺氧干馏处理后制得的碳化污泥,物理特性上和煤质活性炭相似,孔容积、比表面积和碘值分别可达0.10 cm³/g、140 m²/g和515.2 mg/g。

(2)碳化污泥颗粒粒径主要分布在1.0~5.7 mm,满足GB/T 7701.3—2008中对载体用颗粒活性炭的粒度指标要求;碳化污泥的碳质量分数接近50%,最大C/H为39.09;碳化污泥的溶出物质量浓度远低于CJ/T 290—2008的指标限值,溶出物总和低于GB/T 7701.2—2008中规定的净水用煤质颗粒活性炭水溶物的指标限值,且碳化污泥重金属离子质量浓度低于CJ/T 309—2009中A级污泥污染物浓度限值,表明碳化污泥应用于污水处理是安全可行的。

(3)碳化污泥吸附耦合三氯化铁混凝沉淀深度处理污水,当三氯化铁、碳化污泥投加量分别为

15 mg/L 和 4 g/L 时, COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和浊度的去除率分别为 59.38%、28.20%、59.41% 和 91.84%。

(4) 碳化污泥吸附与三氯化铁混凝耦合处理污水时, 两者之间的协同作用不仅可提高污水中各污染物的去除率, 而且可减少 33.33% 的三氯化铁投加量。

参考文献

- [1] 北京市市政工程设计研究总院有限公司. 给水排水设计手册(第 5 册)城镇排水[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 605-606.
- [2] 柴麒麟. 全国“一盘棋”积极主动作为推动碳达峰碳中和[N]. 中国环境报, 2021-01-25(2).
- [3] 陆家缘. 中国污水处理行业碳足迹与减排潜力分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
LU Jiayuan. Carbon footprint and reduction potential of Chinese wastewater treatment sector[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [4] 鲁涛, 朱宝飞, 石春梅, 等. 污泥碳化系统试运行及污泥炭回归土壤可行性分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(21): 108-111.
LU Tao, ZHU Baofei, SHI Chunmei, et al. Test run of sewage sludge carbonization system and feasibility analysis of sludge carbon land use[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(21): 108-111.
- [5] 潘志辉, 梁恒, 田家宇, 等. 混合污泥制备吸附剂回用于污水处理

理研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(6): 845-848.

PAN Zhihui, LIANG Heng, TIAN Jiayu, et al. Preparation of the adsorbent from hybrid chemical and biological sludges and effect of its reuse in wastewater treatment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(6): 845-848.

- [6] 李亚飞. 污泥-玉米芯碳化吸附剂制备及其对 Pb^{2+} 的吸附特性[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
LI Yafei. Preparation of carbonized adsorbent from sludge and corn-cob and its adsorption characteristics for Pb^{2+} [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [7] 柯玉娟, 陈泉源, 张立娜. 污泥活性炭的制备及其对溶液中 Cr^{6+} 的吸附[J]. 化工环保, 2009, 29(1): 75-79.
KE Yujuan, CHEN Quanyuan, ZHANG Lina. Preparation of activated carbon from sewage sludge and adsorption of Cr^{6+} from aqueous solution [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2009, 29(1): 75-79.
- [8] CHENG Fangwei, LUO Hongxi, HU Lei, et al. Sludge carbonization and activation: From hazardous waste to functional materials for water treatment[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4(4): 4574-4586.

[作者简介] 李振华(1984—), 博士, 副教授. E-mail: 1438164@qq.com。

[收稿日期] 2022-12-06(修改稿)

(上接第 103 页)

- [2] XIA Pengfei, CAO Shaowen, ZHU Bicheng, et al. Designing a 0D/2D S-scheme heterojunction over polymeric carbon nitride for visible-light photocatalytic inactivation of bacteria[J]. Angewandte Chemie, 2020, 59(13): 5218-5225.
- [3] ZHANG Jinshui, ZHANG Guigang, CHEN Xiufang, et al. Comonomer control of carbon nitride semiconductors to optimize hydrogen evolution with visible light[J]. Angewandte Chemie, 2012, 51(13): 3183-3187.
- [4] GONG Kuanping, DU Feng, XIA Zhenhai, et al. Nitrogen-doped carbon nanotube arrays with high electrocatalytic activity for oxygen reduction[J]. Science, 2009, 323(5915): 760-764.
- [5] LIU Qiao, ZHANG Junyan. Graphene supported Co-g- C_3N_4 as a novel metal-macrocyclic electrocatalyst for the oxygen reduction reaction in fuel cells[J]. Langmuir, 2013, 29(11): 3821-3828.
- [6] SHIRAISHI Y, KANAZAWA S, KOFUJI Y, et al. Sunlight-driven hydrogen peroxide production from water and molecular oxygen by metal-free photocatalysts[J]. Angewandte Chemie, 2014, 53(49): 13454-13459.
- [7] RAO C V, ISHIKAWA Y. Activity, selectivity, and anion-exchange membrane fuel cell performance of virtually metal-free nitrogen-doped carbon nanotube electrodes for oxygen reduction reaction[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2012, 116(6): 4340-4346.
- [8] YANG Shubin, FENG Xinliang, WANG Xinchun, et al. Graphene-based carbon nitride nanosheets as efficient metal-free electrocata-

lysts for oxygen reduction reactions[J]. Angewandte Chemie, 2011, 50(23): 5339-5343.

- [9] TIAN Jingqi, LIU Qian, ASIRI A M, et al. Ultrathin graphitic C_3N_4 nanosheets/graphene composites: Efficient organic electrocatalyst for oxygen evolution reaction [J]. ChemSusChem, 2014, 7(8): 2125-2130.
- [10] YU Dingshan, ZHANG Qiang, DAI Liming. Highly efficient metal-free growth of nitrogen-doped single-walled carbon nanotubes on plasma-etched substrates for oxygen reduction[J]. Journal of the American Chemical Society, 2010, 132(43): 15127-15129.
- [11] BUTLER M A. Photoelectrolysis and physical properties of the semiconducting electrode WO_2 [J]. Journal of Applied Physics, 1977, 48(5): 1914-1920.
- [12] SHAO Huixin, ZHAO Xu, WANG Yanbin, et al. Synergetic activation of peroxymonosulfate by Co_3O_4 modified g- C_3N_4 for enhanced degradation of diclofenac sodium under visible light irradiation[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2017, 218: 810-818.
- [13] YAN S C, LI Z S, ZOU Z G. Photodegradation of rhodamine B and methyl orange over boron-doped g- C_3N_4 under visible light irradiation[J]. Langmuir, 2010, 26(6): 3894-3901.

[作者简介] 孙寒(1990—), 硕士, 工程师. 电话: 021-55009199, E-mail: sunhan28@163.com。

[收稿日期] 2022-12-01(修改稿)