

## 高效除磷型底泥陶粒的制备及性能分析

肖继波<sup>1</sup>, 黄志达<sup>2</sup>, 陈玉莹<sup>1</sup>, 瞿倩<sup>1</sup>, 褚淑祎<sup>3</sup>

(1. 温州大学 生命与环境科学学院, 浙江 温州 325035; 2. 温州市工业科学研究院, 浙江 温州 325028;  
3. 温州科技职业学院 农业与生物技术学院, 浙江 温州 325000)

**摘要:** 以河道疏浚底泥为主要原料制备高效除磷型底泥陶粒。通过单因素实验和  $L_9(3^4)$  正交试验考察了造孔剂、水泥、烧结温度和保温时间对陶粒性能的影响, 并研究了吸附饱和和陶粒的再生方法。结果表明: 高效除磷陶粒的最佳制备条件为造孔剂 6.0 g, 水泥 6.0 g, 烧结温度 1 060 °C, 保温时间 15 min。该条件下制得的陶粒空隙率 60.20%, 吸水率 38.75%, 破碎率与磨损率 2.14%, 盐酸可溶率 1.60%, 底泥质量分数 0.77%, 表观密度 1 280  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 堆积密度 510  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 满足 CJ/T 299-2008《水处理用人工陶粒滤料》性能指标要求; 处理 10.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  含磷废水, 磷去除率可达 95.55%; 吸附饱和陶粒可采用 2.0  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  氢氧化钠进行再生。表 7 参 26

**关键词:** 环境科学; 陶粒; 磷; 底泥; 吸附; 正交试验

中图分类号: S273; X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)02-0415-07

## Preparation and properties analysis of sediment ceramsite with high efficiency phosphorus removal

XIAO Jibo<sup>1</sup>, HUANG Zhida<sup>2</sup>, CHEN Yuying<sup>1</sup>, QU Qian<sup>1</sup>, CHU Shuyi<sup>3</sup>

(1. College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China; 2. Wenzhou Institute of Industry & Science, Wenzhou 325028, Zhejiang, China; 3. College of Agriculture and Biotechnology, Wenzhou Vocational College of Science & Technology, Wenzhou 325000, Zhejiang, China)

**Abstract:** The main purpose of the research is to develop ceramsite with high efficiency phosphorus (P) removal from dredged sediment of a river. Single factor and orthogonal experiments  $L_9(3^4)$  were conducted to investigate the effects of pore-forming agent, concrete, sintering temperature and holding time on characteristics of ceramsite. Furthermore, reuse of the disused ceramsite was studied. Results showed that the optimum conditions for the sintering process were obtained with a pore-forming agent-6.0 g, concrete-6.0 g, a sintering temperature of 1 060 °C, and a holding time of 15 min. Properties of the ceramsite were as follows: void fraction 60.20%, water absorption 38.75%, breaking and wear rate 2.14%, solubility in hydrochloric acid 1.60%, silt carrying capacity 0.77%, apparent density 1 280  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , and piled density 510  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , which met the standard for an artificial ceramsite filter material for water treatment. When the initial P concentration was 10.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , a P removal efficiency of 95.55% was obtained with the ceramsite. The disused ceramsite could be reused using 2.0  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaOH. Thus, the dredged sediment is an alternative raw materials for the ceramsite filter with high efficiency phosphorus removal. [Ch, 7 tab. 26 ref.]

**Key words:** environmental science; ceramsite; phosphorus; sediment; adsorption; orthogonal test

富营养化是中国最主要的水污染问题, 其主要限制因子是磷的质量浓度<sup>[1]</sup>。根据 Liebig 最低营养学

收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2018-05-03

基金项目: 浙江省温州市科技计划项目(S20150006)

作者简介: 肖继波, 从事污染水体生态修复、环境生物技术和废弃物资源化利用技术等研究。E-mail: jbxiao@wzu.edu.cn。通信作者: 褚淑祎, 副教授, 博士, 从事面源污染控制和废弃物资源化利用技术等研究。E-mail: chusy@zafu.edu.cn

限制定律, 磷质量浓度控制藻类生长丰度, 当水中磷高于  $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 富营养化程度将加剧<sup>[2]</sup>。目前广泛应用的除磷技术有化学沉淀法<sup>[3-4]</sup>、生物法<sup>[5-6]</sup>和吸附法<sup>[7]</sup>。化学沉淀法除磷操作简便, 见效快, 但运行费用较高, 且污泥产量大, 易造成二次污染<sup>[8]</sup>; 生物法运行费用较低, 但对运行条件及环境要求相对较高, 稳定性较差, 且单纯依靠生物处理难以达标排放<sup>[9-10]</sup>; 吸附法因具有工艺简单、操作简便、除磷效果显著, 且吸附剂可循环使用等优点而受到广泛关注<sup>[7,11]</sup>。底泥是水体的沉积物, 污染物进入水体后, 经吸附、络合、沉淀等作用最终会在其中沉积, 受到水体温度、pH 值和电位改变或水体扰动则重新释放污染上覆水体<sup>[12-13]</sup>。因而, 底泥是水体的重要内源污染, 城市建设中多采用定期疏浚以控制底泥污染。底泥的矿物组成与黏土类似, 可在高温下发泡膨胀, 替代黏土作为陶粒制备的原料<sup>[14]</sup>。陶粒是一种表面粗糙的多孔物质, 微生物附着性好, 具有一定的吸附能力, 近年来, 作为生物滤料和基质在水处理中得到了广泛的应用<sup>[15-16]</sup>。目前采用疏浚底泥制备高效除磷型陶粒的研究鲜见报道, 本研究以疏浚底泥为主要原料, 辅以造孔剂和水泥, 通过单因素实验、正交试验确定高效除磷型底泥陶粒的最佳制备条件, 分析底泥陶粒的性能、经济性与实际运用可行性, 为废水深度除磷、控制水体排污口磷排放及水体富营养化提供基础数据, 亦为疏浚底泥的资源化利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

底泥取自浙江省温州市龙湾区某河道, 黑色, 具臭味, 经自然干燥、 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$  烘干、粉碎后过 100 目筛; X 射线荧光光谱(XRF)成分分析表明, 河道底泥中的主要成分(质量百分比): 二氧化硅( $\text{SiO}_2$ ) 62.00%, 三氧化二铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )19.26%, 三氧化二铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )7.53%, 氧化钙( $\text{CaO}$ )1.41%, 氧化锰( $\text{MgO}$ ) 2.91%, 氧化钠( $\text{Na}_2\text{O}$ )1.10%, 氧化钾( $\text{K}_2\text{O}$ )3.02%, 灼减率 10.9%。旱伞草 *Cyperus alternifolius* 残体取自温州市龙湾区某河道, 自来水洗净后, 切成 1~2 cm 小段,  $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$  烘干, 粉碎后过 100 目筛。无烟煤产自山西, 烘干, 粉碎后过 100 目筛。水泥为市售。

### 1.2 陶粒的制备

称取河道底泥 30.0 g, 加入造孔剂旱伞草和煤粒(2.0~6.0 g), 水泥(4.0~6.0 g), 加水混合, 制成直径 3~5 mm 圆球,  $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下干燥 3 h; 放入马弗炉中,  $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$  预热 30 min, 后以  $3 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  速率升温至焙烧温度( $1060\sim 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 烧制 15~45 min 后自然冷却至室温, 制得陶粒。

### 1.3 陶粒性能分析

根据国家标准 CJ/T 299-2008《水处理用人工陶粒滤料》测定陶粒的含泥量、盐酸可溶率、破碎率与磨损率、空隙率、表观密度、堆积密度等指标<sup>[17]</sup>。重复测定 2 次·样品<sup>-1</sup>, 2 次试验结果之差不大于平均值的 2.0%, 取平均值作为测定值。

### 1.4 陶粒除磷能力

取 3.0 g 陶粒于锥形瓶中, 加入 50.0 mL 质量浓度为  $10.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸二氢钾溶液,  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $120 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  恒温振荡 24 h, 过滤, 采用《水和废水监测分析方法》(第四版)钼锑抗分光光度法( $\lambda=700 \text{ nm}$ )测定滤液中总磷质量浓度<sup>[18]</sup>。重复 3 次, 3 个平行样测定值相对误差不大于 5.0%, 取平均值。

### 1.5 陶粒再生

取吸附饱和陶粒 3.0 g 于 250.0 mL 锥形瓶中, 加入 100.0 mL  $2.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  氢氧化钠( $\text{NaOH}$ )溶液,  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $120 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  恒温振荡 24 h, 过滤, 测定滤液中总磷质量浓度。以 100.0 mL 蒸馏水作空白对比。

## 2 结果与分析

### 2.1 造孔剂添加量对陶粒性能的影响

底泥中有机质含量较低(灼减率 10.9%)会影响陶粒的发泡效果<sup>[19]</sup>, 造成空隙率较低, 因而需要添加适宜的造孔剂提高其发泡效果。目前常用的造孔剂有木屑、泡沫、秸秆、煤、碳酸氢铵以及碳酸钙等。分别以这几种物质为造孔剂(添加量均为 2.0 g), 对比造孔效果表明(表 1): 旱伞草和煤的造孔效果较为理想, 且二者存在互补作用。因此, 后续实验采用  $m(\text{煤}):m(\text{旱伞草})=1:1$  混合作为造孔剂。

陶粒的除磷效果、吸水率、空隙率、破碎率与磨损率、含泥量及盐酸可溶率均随造孔剂量增加而增

大(表 2)。当造孔剂量从 2.0 g 增至 6.0 g 时, 除磷率由 64.58% 升至 81.48%, 吸水率由 25.18% 升至 34.15%, 空隙率从 53.87% 升至 58.85%, 破碎率与磨损率从 1.49% 升至 1.87%, 含泥量和盐酸可溶率分别由 0.49%, 0.84% 升到 0.65% 和 1.22%。陶粒密度的变化则相反, 造孔剂量从 2.0 g 增至 6.0 g, 表观密度和堆积密度分别下降 16.30% 和 25.30%。分析认为, 陶粒烧制过程中, 造孔剂中有机质分解产生膨胀气体, 陶粒的开孔率提高, 导致空隙率和吸水率增大, 表观密度降低。而气孔的存在减少了陶粒承受负荷的有效截面积, 应力集中而强度降低, 引起破碎率增大<sup>[19-20]</sup>。陶粒内部丰富的孔隙, 使得溶液中磷的渗透性加大, 磷与陶粒中有效组分的接触概率上升, 是除磷效果提高的原因。造孔剂煤的金属矿物成分, 消耗了一部分盐酸, 陶粒内部丰富的孔隙, 更易受盐酸腐蚀破坏, 可能是盐酸可溶率及含泥量增加的原因。实验同时发现, 当造孔剂添加量超过 6.0 g 时, 搓制陶粒较难成型。

表 1 各种造孔剂的造孔效果

造孔剂	造孔效果
木屑	陶粒中仍存在部分木屑
泡沫	泡沫可在低温融化, 但陶粒表面光滑, 孔隙并不连通。
旱伞草	表面粗糙
碳酸氢铵	发泡效果不好
碳酸钙	发泡效果不好, 加入量多时, 表面有结圈现象
煤	陶粒有许多大小不一的小孔, 但表面粗糙度不够

表 2 添加造孔剂对陶粒性能影响

$m_{\text{造孔剂}}/\text{g}$	除磷率/%	空隙率/%	吸水率/%	盐酸可溶率/%	破碎率与磨损率/%	含泥量/%	表观密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	堆积密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
2.0	64.58	53.87	25.18	0.84	1.49	0.49	1 577	723
4.0	64.92	56.80	27.55	1.10	1.63	0.62	1 437	623
6.0	81.48	58.85	34.15	1.22	1.87	0.65	1 320	540

## 2.2 水泥添加量对陶粒性能的影响

从表 3 可见: 当水泥量由 4.0 g 增至 6.0 g 时, 陶粒的空隙率略有升高(由 55.60% 升至 57.79%), 除磷率显著上升(由 58.93% 升到 79.60%); 推测原因是水泥中含有氧化钙, 磷酸根离子与钙反应形成磷酸钙沉淀, 而随着水泥量增大而增大的空隙率, 增大了钙与溶液中磷酸根离子的接触概率。陶粒的破碎率与磨损率及含泥量也有所上升。二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )和三氧化二铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )是陶粒产生强度和形成结构的主要物质基础<sup>[21]</sup>, 两者在水泥中的质量占比不足底泥中的 1/3, 因而水泥量增加导致二氧化硅和三氧化二铝减少。多次预实验发现, 水泥量过高时, 陶粒的强度下降明显, 烧结后陶粒表面形成一层薄的覆盖层, 震荡时, 少量粉末脱落, 不但影响出水浊度, 也增加了破损率与磨损率及含泥量; 陶粒烧结过程中产生的液相量及液相黏度影响陶粒的膨胀和孔隙的形成。如果液相量不足或黏度较小, 则烧结过程中产生的气体容易外溢, 无法形成丰富的孔隙, 也就无法膨胀; 若液相量过大或黏度较强, 则会使气体的膨胀力被液相过分地抑制, 也不能形成发达孔隙<sup>[22]</sup>。钙盐是助熔剂, 可以降低液相生成的温度, 对生成的液相起稀释作用。因而, 适量钙盐利于陶粒孔隙的形成, 增大陶粒吸水率, 降低表观密度和堆积密度。随着水泥量增大, 水泥中氧化钙遇到强酸溶出, 引起陶粒的盐酸可溶率上升。

表 3 添加水泥对陶粒性能影响

$m_{\text{水泥}}/\text{g}$	除磷率/%	空隙率/%	吸水率/%	盐酸可溶率/%	破碎率与磨损率/%	含泥量/%	表观密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	堆积密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
4.0	58.93	55.60	27.83	0.79	1.53	0.52	1 473	650
5.0	72.46	56.45	30.37	1.14	1.71	0.62	1 447	633
6.0	79.60	57.79	33.68	1.23	1.75	0.62	1 413	603

## 2.3 烧结温度对陶粒性能的影响

烧结温度由 1 060 °C 上升到 1 100 °C 时, 陶粒的堆积密度和表观密度增大, 空隙率、吸水率下降(表 4)。研究表明: 烧结温度越高, 熔融产生的液相量越大, 固体颗粒由于液相表面张力的作用相互接近; 其次, 因表面黏度下降, 液相更容易填充到气孔中使坯体致密化, 导致空隙率、吸水率、破碎率与磨损率及含泥量下降<sup>[23-24]</sup>。烧结温度对除磷率的影响较大。从表 4 可见: 当烧结温度从 1 060 °C 升至 1 100

℃时,空隙率由58.80%降至54.58%,除磷率降至51.23%。分析认为,随烧结温度升高,陶粒空隙率下降,陶粒中金属盐固化率增大<sup>[25-26]</sup>,导致与磷酸盐结合的金属离子减少,造成除磷率下降;同时坯料中的物相发生变化,酸可溶组分烧结变为难溶组分,使酸溶出率降低,陶粒的盐酸可溶率明显减小。

表4 烧结温度对陶粒性能影响

Table 4 Effect of sintering temperature on characteristics of ceramsite

$T_{\text{烧结}}/^{\circ}\text{C}$	除磷率/%	空隙率/%	吸水率/%	盐酸可溶率/%	破碎率与磨损率/%	含泥量/%	表观密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	堆积密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
1 060	88.37	58.80	34.85	1.48	2.03	0.70	1 353	560
1 080	71.31	56.43	28.92	1.10	1.69	0.64	1 450	630
1 100	51.23	54.58	23.12	0.59	1.25	0.39	1 530	697

#### 2.4 保温时间对陶粒性能的影响

延长保温时间不利于陶粒除磷。从表5可见:当保温时间从15 min延长至45 min时,空隙率从56.61%降至55.71%,盐酸可溶率由1.21%降至0.83%,除磷率从75.76%降至63.77%。推测原因是保温时间越长,熔融产生的液相量越大,金属的固化率越多,导致陶粒的空隙率下降,与磷酸盐结合的金属离子减少。同时发现陶粒的破碎率与磨损率、含泥量、吸水率均下降,而堆积密度和表观密度在保温的前30 min变化幅度较小,此后呈增大趋势。推测原因是长时间保温,熔融产生的液相有足够的时间填充气孔,使陶粒内部结构更致密。

表5 保温时间对陶粒性能影响

Table 5 Effect of holding time on characteristics of ceramsite

$t_{\text{保温}}/\text{min}$	除磷率/%	空隙率/%	吸水率/%	盐酸可溶率/%	破碎率与磨损率/%	含泥量/%	表观密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	堆积密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
15	75.76	56.61	33.88	1.21	1.82	0.62	1 430	623
30	71.31	55.82	29.15	1.12	1.71	0.59	1 440	610
45	63.77	55.71	28.85	0.83	1.45	0.54	1 463	653

#### 2.5 正交试验

根据单因素实验,选择造孔剂(A)、水泥(B)、烧结温度(C)和保温时间(D)4个因素,各因素取3个水平:A(2.0, 4.0, 6.0 g), B(4.0, 5.0, 6.0 g), C(1 060, 1 080, 1 100 ℃), D(15, 30, 45 min),进行正交试验。从表6可见:A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>D<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>D<sub>3</sub>和A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>D<sub>1</sub>等3组除磷率分别为93.23%, 95.25%和95.55%,且各组其他性能指标均能满足CJ/T299-2008的要求。

表6 正交试验性能指标值

Table 6 Performance indexes values of orthogonal test

试验号	试验组合	吸水率/%	堆积密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	表观密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	空隙率/%	盐酸可溶 率/%	除磷率/%	破碎率与 磨损率/%	含泥量/%
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	33.20	670	1 500	55.33	1.15	76.67	1.90	0.61
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	23.40	710	1 580	55.06	1.03	67.07	1.61	0.58
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub>	18.95	790	1 650	52.12	0.33	50.00	0.95	0.29
4	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub>	24.60	670	1 490	55.03	0.66	46.50	1.32	0.56
5	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub>	24.70	690	1 510	54.30	0.88	55.05	1.43	0.49
6	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	33.35	510	1 310	61.07	1.76	93.23	2.15	0.80
7	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub>	25.70	610	1 430	57.34	0.56	53.64	1.38	0.40
8	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	38.00	500	1 250	60.00	1.51	95.25	2.09	0.78
9	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	38.75	510	1 280	60.20	1.60	95.55	2.14	0.77

对正交试验结果做极差分析发现(表7):烧结温度对除磷率、盐酸可溶率、破碎率与磨损率、吸水率和含泥量的影响最大,极差值(R)分别为37.14%, 0.89%, 0.78%, 11.73%和0.31%。造孔剂对空隙率、表观密度及堆积密度的影响最大,极差值分别为4.98%, 257  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和183  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。4个因素对除磷率的影响从大到小依次为烧结温度、水泥、造孔剂、保温时间。

表 7 正交试验极差分析

Table 7 Performance indexes values of orthogonal test

因素	吸水率/%				盐酸可溶率/%				表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )				堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )			
	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R
A	25.18	27.55	34.15	8.97	0.84	1.10	1.22	0.38	1 577	1 437	1 320	257	723	623	540	183
B	27.83	30.37	33.68	5.85	0.79	1.14	1.23	0.44	1 473	1 447	1 413	60	650	633	603	47
C	34.85	28.92	23.12	11.73	1.48	1.10	0.59	0.89	1 353	1 450	1 530	177	560	630	697	137
D	33.88	29.15	28.85	5.03	1.21	1.12	0.83	0.38	1 430	1 440	1 463	33	623	610	653	30

  

因素	空隙率/%				含泥量/%				破碎率与磨损率/%				除磷率/%			
	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R
A	53.87	56.80	58.85	4.98	0.49	0.62	0.65	0.16	1.49	1.63	1.87	0.38	64.58	64.92	81.48	16.69
B	55.60	56.45	57.79	2.19	0.52	0.62	0.62	0.10	1.53	1.71	1.75	0.22	58.93	72.46	79.60	20.67
C	58.80	56.43	54.58	4.22	0.70	0.64	0.39	0.31	2.03	1.69	1.25	0.78	88.37	71.31	51.23	37.14
D	56.61	55.82	55.71	0.90	0.62	0.59	0.54	0.08	1.82	1.71	1.45	0.37	75.76	71.31	63.77	11.99

说明： $k_i$ 表示任意列上水平号为*i*时所对应的试验结果之和的平均值

## 2.6 陶粒再生

磷酸盐为阴离子，可利用氢氧化钠溶液再生。实验结果表明：用 2.0 mol·L<sup>-1</sup> 氢氧化钠溶液对吸附饱和和陶粒中磷进行解吸，24 h 后解吸率达 88.58%。而空白对照中几乎不发生解吸。

## 2.7 经济性与实际运用可行性分析

高效除磷型底泥陶粒以疏浚底泥和水生植物残体为主要原料(占陶粒总质量 70.0%以上)，节省了黏土的费用(约 50 元·m<sup>-3</sup>)，降低了陶粒烧制成本。采用河道底泥和水生植物残体制备水处理陶粒，属废弃物资源化利用领域，可获得一定的政府补贴，且当污泥质量分数>30%时，陶粒产品可享受 5 a 内免交产品增值税和企业所得税的税收优惠。因此，高效除磷型底泥陶粒制备经济可行。底泥陶粒可应用于曝气生物滤池强化废水除磷，也可作为人工湿地或生态浮岛基质，控制水体富营养化，应用领域较为广泛。

## 3 结论

通过单因素实验和正交试验，得到高效除磷型底泥陶粒制备的最佳条件为造孔剂 6.0 g，水泥 6.0 g，烧结温度 1 060 °C，保温时间 15 min。对陶粒除磷性能的影响从大到小依次为烧结温度、水泥、造孔剂、保温时间。

最佳制备条件下烧制的陶粒空隙率 60.20%，吸水率 38.75%，破碎率与磨损率 2.14%，盐酸可溶率 1.60%，底泥质量分数 0.77%，表观密度 1 280 kg·m<sup>-3</sup> 和堆积密度 510 kg·m<sup>-3</sup>，符合 CJ/T299-2008 的要求。

初始浓度为 10.0 mg·L<sup>-1</sup> 的含磷废水，经高效除磷型底泥陶粒处理后，除磷率达 95.55%。吸附饱和和陶粒可用 2.0 mol·L<sup>-1</sup> 氢氧化钠再生。底泥陶粒可应用于曝气生物滤池强化废水除磷，也可作为人工湿地或生态浮岛基质，在控制水体富营养化上的应用是可行的。

## 4 参考文献

- [1] 周真明, 黄廷林, 苑宝玲. 生物沸石薄层覆盖削减富营养化水体磷负荷[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 726 - 733.  
ZHOU Zhenming, HUANG Tinglin, YUAN Baoling. Biozeolite thin-layer capping for reducing the phosphorus load in eutrophic water body [J]. *J Lake Sci*, 2016, **28**(4): 726 - 733.
- [2] 冯锦梅, 张海荣. 水环境中的磷研究与富营养化控制[J]. 污染防治技术, 2013, **26**(1): 28 - 32.  
FENG Jinmei, ZHANG Hairong. Phosphorus and eutrophication control of water environment [J]. *Pollut Control Technol*, 2013, **26**(1): 28 - 32.
- [3] SINDELAR H R, BROWN M T, BOYER T H. Effects of natural organic matter on calcium and phosphorus co-precipitation [J]. *Chemosphere*, 2015, **138**: 218 - 224.
- [4] KRISHNA K C B, NIAZ M R, SARKER D C, et al. Phosphorus removal from aqueous solution can be enhanced

- through the calcination of lime sludge [J]. *J Environ Manage*, 2017, **200**: 359 – 365.
- [5] MARQUES R, SANTOS J, NGUYEN H, *et al.* Metabolism and ecological niche of Tetrasphaera and Ca. Accumulibacter in enhanced biological phosphorus removal [J]. *Water Res*, 2017, **122**: 159 – 171.
- [6] YADAV D, PRUTHI V, KUMAR P. Enhanced biological phosphorus removal in aerated stirred tank reactor using aerobic bacterial consortium [J]. *J Water Process Eng*, 2016, **13**: 61 – 69.
- [7] BISWAS B K, INOUE K, GHIMIRE K N, *et al.* Removal and recovery of phosphorus from water by means of adsorption onto orange waste gel loaded with zirconium [J]. *Bioresource Technol*, 2008, **99**(18): 8685 – 8690.
- [8] 孟顺龙, 裘丽萍, 陈家长, 等. 污水化学沉淀法除磷研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, **28**(35): 264 – 268. MENG Shunlong, QIU Liping, CHEN Jiazhang, *et al.* The research process of chemistry precipitation method in phosphorus removal in wastewater [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, **28**(35): 264 – 268.
- [9] OEHMEN A, SAUNDERS A M, VIVES M T, *et al.* Competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems with acetate and propionate as carbon sources [J]. *J Biotechnol*, 2006, **123**(1): 22 – 32.
- [10] 钟晓, 孙培德, 方治国, 等. 强化生物除磷系统除磷特性对水温变化响应的试验研究[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2197 – 2204. ZHONG Xiao, SUN Peide, FANG Zhiguo, *et al.* Effect of water temperature variation on phosphorus removal characteristics in an enhanced biological phosphorus removal system [J]. *Acta Sci Circumst*, 2010, **30**(11): 2197 – 2204.
- [11] 孟顺龙, 胡庚东, 瞿建宏, 等. 镧/铝改性沸石去除富营养化水体中磷的研究[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(11): 1875 – 1880. MENG Shunlong, HU Gengdong, QU Jianhong, *et al.* Effect of Lanthanum/Aluminum-modified zeolite on phosphorus removal from eutrophic water [J]. *Ecol Environ Sci*, 2012, **21**(11): 1875 – 1880.
- [12] KIM L H, CHOI E, STENSTROM M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(1): 53 – 61.
- [13] 代政, 祁艳丽, 唐永杰, 等. 上覆水环境因子对滨海水库沉积物氮磷释放的影响[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(12): 1766 – 1772. DAI Zheng, QI Yanli, TANG Yongjie, *et al.* Effects of environmental factors of overlying water on the release of nitrogen and phosphorus from sediment of coastal reservoir [J]. *Res Environ Sci*, 2016, **29**(12): 1766 – 1772.
- [14] 潘嘉芬, 冯雪冬. 利用河道淤泥等固体废弃物制备水处理多孔陶粒滤料试验研究[J]. 非金属矿, 2010, **33**(6): 68 – 71. PAN Jiafen, FENG Xuedong. Experimental study on preparation of porous ceramics from river course sediments as main raw material for treatment of waste water [J]. *Non-Met Mines*, 2010, **33**(6): 68 – 71.
- [15] BAO Teng, CHEN Tianhu, LIU Haibo, *et al.* Preparation of magnetic porous ceramsite and its application in biological aerated filters [J]. *J Water Proc Eng*, 2014, **4**: 185 – 195.
- [16] 郭露, 张翔凌, 陈巧珍, 等. 人工湿地常用生物陶粒基质 LDHs 覆膜改性及其除磷效果研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(9): 2840 – 2849. GUO Lu, ZHANG Xiangling, CHEN Qiaozhen, *et al.* Removal of phosphorus by the modified biological ceramsite coated with different layered double hydroxides in constructed wetlands [J]. *Acta Sci Circumst*, 2015, **35**(9): 2840 – 2849.
- [17] 中华人民共和国建设部. 水处理用人工陶粒滤料: CJ/T 229-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 246 – 248.
- [19] MARTÍNEZ-GARCÍA C, ELICHE-QUESADA D, PÉREZ-VILLAREJO L, *et al.* Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry [J]. *J Environ Manage*, 2012, **95**: S343 – S348.
- [20] 徐振华, 刘建国, 宋敏英, 等. 污泥、底泥与粉煤灰烧结陶粒的工艺研究[J]. 安全与环境学报, 2012, **12**(4): 21–26. XU Zhenhua, LIU Jianguo, SONG Minying, *et al.* Technological study on sintering ceramsite with sewage sludge and sediment and fly ash [J]. *J Safety Environ*, 2012, **12**(4): 21 – 26.
- [21] FAVONI C, MINICHELLI D, TUBARO F, *et al.* Ceramic processing of municipal sewage sludge (MSS) and steelworks slags (SS) [J]. *Ceramics Int*, 2005, **31**(5): 697 – 702.

- [22] 邓红卫, 杨英姿, 高小建. 高强粉煤灰烧胀陶粒制备的影响因素研究[J]. 青岛理工大学学报, 2009, **30**(4): 70 - 74.  
DENG Hongwei, YANG Yingzi, GAO Xiaojian. Research on factors to affect the preparation of high-strength ceramic in low absorption [J]. *J Qingdao Technol Univ*, 2009, **30**(4): 70 - 74.
- [23] 金宜英, 杜欣, 王志玉, 等. 采用污水厂污泥制陶粒的烧结工艺及配方研究[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(1): 17 - 21.  
JIN Yiyang, DU Xin, WANG Zhiyu, *et al.* Research on technology and batch formula of sintering municipal sewage for manufacturing haydite [J]. *China Environ Sci*, 2009, **29**(1): 17 - 21.
- [24] 翁焕新, 章金骏, 曹彦圣, 等. 污泥陶粒的性能特征与烧制工艺[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, **45**(10): 1877 - 1883.  
WENG Huanxin, ZHANG Jinjun, CAO Yansheng, *et al.* Characteristics and sintering technology of haydite made of sewage sludge [J]. *J Zhejiang Univ Eng Sci*, 2011, **45**(10): 1877 - 1883.
- [25] TAKAOKA M, TAKEDA N, MIURA S. The behavior of heavy metals and phosphorus in an ash melting process [J]. *Water Sci Technol*, 1997, **36**(11): 275 - 282.
- [26] 张洁, 王兴润, 陈勇民, 等. CaO 对含砷废渣烧结过程砷的形态及释放特性的影响[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(5): 796 - 801.  
ZHANG Jie, WANG Xingrun, CHEN Yongmin, *et al.* Impacts of CaO on species and release characteristics of arsenic during sintering of arsenic-containing waste residue [J]. *Res Environ Sci*, 2015, **28**(5): 796 - 801.