

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201704049



煅烧改性净水厂污泥制备 除磷材料工艺参数优化

刘启迪¹, 周真明¹, 张红忠²,
费霞丽³, 谢保金⁴, 李书文¹, 苑宝玲¹

- (1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 泉州市自来水有限公司, 福建 泉州 362000;
3. 厦门水务集团有限公司, 福建 厦门 361008;
4. 厦门水务中环制水有限公司 制水三部, 福建 厦门 361000)

摘要: 针对净水厂污泥(WTPS)直接应用于富营养化水体除磷过程中存在向水体释放氨氮和有机物的问题,研究煅烧改性净水厂污泥(C-WTPS)制备除磷材料的可行性,考察 C-WTPS 的氨氮和有机物的释放情况,优化煅烧工艺参数. 等温吸附试验和去离子水浸渍试验的结果表明:在煅烧温度为 50~400 ℃,煅烧时间为 0.5~4.0 h 范围内,最佳煅烧温度为 400 ℃,最佳煅烧时间为 2.5 h;与 WTPS 相比,C-WTPS 对磷的吸附量增长 48.2%,氨氮和总有机碳(TOC)的释放量分别削减 79.5%,71.9%,铵态氮和有机物的质量比分别削减 80.5%,91.6%;C-WTPS 制备除磷材料具有可行性,煅烧改性工艺不仅提高 WTPS 的磷吸附能力,而且大为削减了 WTPS 氨氮和有机物的释放量.

关键词: 净水厂污泥; 煅烧改性; 工艺参数; 除磷材料

中图分类号: X 524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)01-0051-06

Parameter Optimization of Preparing Phosphorus Removal Material by Using Calcined Water Treatment Plant Sludge

LIU Qidi¹, ZHOU Zhenming¹, ZHANG Hongzhong², FEI Xiali³,
XIE Baojin⁴, LI Shuwen¹, YUAN Baoling¹

- (1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Quanzhou Water Limited Company, Quanzhou 362000, China;
3. Xiamen Water Group Limited Company, Xiamen 361008, China;
4. The Third Sector, Water Production Subsidiary Company of Xiamen Water Group Limited Company, Xiamen 361000, China)

Abstract: Since ammonia nitrogen and organic matter release in the process of phosphorus removal in eutrophic water by using water treatment plant sludge (WTPS), the feasibility of preparing phosphorus removal material by using calcined water treatment plant sludge (C-WTPS) was studied. In addition, the release of ammonium nitrogen and organic matter of C-WTPS was investigated, and the technological parameters were opt-

imized. The results of isothermal adsorption experiments and deionized water dipping tests showed that the optimum calcination parameters were calcining temperature at 400 ℃ and calcining time with 2.5 h in the range of calcining temperature between 50 to 400 ℃ and calcining time from 0.5 to 4.0 h. Comparing with WTPS, the phosphorus adsorption capacity of C-WTPS improved 48.2%, the release capacities of ammonia nitrogen and total organic carbon (TOC) of C-WTPS were reduced 79.5% and 71.9% respectively, and the contents of ammonium nitrogen and organic matter of C-WTPS were reduced 80.5% and 91.6% respectively. Therefore, it is feasible to prepare phosphorus removal material by using C-WTPS. Calcining process not only improves the phosphorus adsorption capacity of WTPS, but also reduces the release capacities of ammonia nitrogen and organic matter significantly.

Keywords: water treatment plant sludge; calcined modification; technological parameter; phosphorus removal material

水体富营养化是全球水环境的难题之一^[1]. 限制水体磷的质量浓度是控制水体富营养化的有效措施^[2]. 目前,用于控制水体富营养化的常见除磷材料有铝盐^[3]、铁盐^[4]、钙盐^[5]和镧改性黏土^[6]. 此外,还有一些新型的除磷材料,如膨润土载锆除磷复合材料^[7]、Mg/Al-LDO^[8]. 这些新型的除磷材料存在不易大规模生产、成本高和污染物再释放等问题. 因此,关于工业副产物(工业废渣^[9]、净水厂污泥^[10]等)制备除磷材料的研发逐渐成为水体富营养化的研究热点. 净水厂污泥(WTPS)是净水厂的生产副产物,富含铁、铝氧化物或氢氧化物、氮化物、有机质等. 王昌辉等^[11]研究表明 WTPS 对磷的理论饱和吸附量可达 45.45 mg·g⁻¹,与其他天然和工业材料相比,具有较高的磷吸附量. 然而,课题组前期的研究结果表明^[12],WTPS 覆盖控制底泥磷释放过程中,存在向水体释放氨氮和有机物的问题. 基于此,本文研究通过煅烧工艺制成的煅烧改性净水厂污泥(C-WTPS)作为除磷材料的可行性,考察 C-WTPS 氨氮和有机物的释放情况,优化煅烧工艺参数.

1 材料与方法

1.1 试验材料

WTPS 颗粒制备:从净水厂污泥脱水间装取脱水污泥,带回实验室风干,粉碎成颗粒状,用不锈钢筛选出粒径为 1~2 mm 的颗粒,保存于塑料自封袋内备用.

C-WTPS 颗粒制备:定量称取风干后的 WTPS 置于陶瓷坩埚中,放入马弗炉内煅烧,煅烧结束后,转入干燥器中冷却至室温,再将其粉碎成颗粒状,用不锈钢筛选出粒径为 1~2 mm 的颗粒,保存于塑料自封袋内备用.

WTPS 分别于 2016 年 9 月和 10 月取自福建省厦门市某净水厂(该厂以聚合双酸铝铁(PFACS)作为混凝剂),分别记为 1# WTPS,2# WTPS,其理化性质如表 1 所示. 表 1 中:η(水)为含水率;ω(铵态氮),ω(有机质),ω(总磷)分别为铵态氮、有机质、总磷的质量比;1# WTPS 用于优化煅烧温度参数的试验,分别在 50,100,150,200,250,300,350,400 ℃下煅烧 3 h;2# WTPS 用于优化煅烧时间参数的试验,在 400 ℃下,分别煅烧 0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,3.5,4.0 h.

表 1 WTPS 的理化性质
Tab. 1 Physicochemical properties of WTPS

项目	η(水)/%	pH 值	ω(铵态氮)/mg·kg ⁻¹	ω(有机质)/mg·kg ⁻¹	ω(总磷)/mg·kg ⁻¹
1# WTPS	75±2	7.06±0.20	122.39±0.84	133.25±1.20	1 743.93±39.28
2# WTPS	70±3	6.92±0.23	75.61±1.23	96.42±0.90	1 016.67±17.86

1.2 试验方法

1.2.1 等温吸附试验 用去离子水配置质量浓度为 1 mg·L⁻¹的 KH₂PO₄ 溶液,用 0.1 mol·L⁻¹的 HCl 和 NaOH 溶液调节 KH₂PO₄ 溶液的 pH 值为 7.00±0.20,每个 250 mL 锥形瓶中倒入 200 mL KH₂PO₄ 溶液,投加 0.5 g WTPS 或 C-WTPS(即投加量为 2.5 g·L⁻¹). 在 25 ℃,150 r·min⁻¹的条件下,振荡反应 24 h 后取样,测定水样中 PO₄³⁻-P 的质量浓度. 每个试验设置 3 组平行样,分别考察煅烧温度和煅烧时间对 C-WTPS 磷吸附量的影响.

1.2.2 浸渍试验 称取 10.0 g WTPS 或 C-WTPS,置于 250 mL 透明的螺口玻璃试剂瓶中,加入 100 mL 去离子水(pH 值为 5.8 ± 0.2),密封,在室内阴凉处常温放置 30 d 后,测定玻璃瓶中水样的氨氮(NH_4^+-N)和总有机碳(TOC)的质量浓度. 每个试验设置 3 组平行样,分别考察煅烧温度和煅烧时间对 C-WTPS 氨氮和有机物释放量的影响.

1.3 项目测试方法

水样的 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$, NH_4^+-N , TOC 的质量浓度分别采用钼锑抗分光光度法、纳氏试剂光度法、燃烧氧化-非分散红外吸收法进行测定^[13]; WTPS, C-WTPS 的有机质质量比采用重铬酸钾-硫酸氧化法进行测定^[14]; 铵态氮质量比采用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提-靛酚蓝比色法进行测定^[15]; 总磷质量比采用 SMT 法进行测定^[16]; WTPS, C-WTPS 的表面元素质量分数采用 X-Max 型 X 射线能谱仪(英国 OXFORD 仪器公司)进行分析. 分析前,将 WTPS, C-WTPS 磨成粉末状,过 120 目筛,分析范围为粉末集中聚集区域.

1.4 数据处理

WTPS, C-WTPS 的磷吸附量为

$$X_1 = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \tag{1}$$

式(1)中: X_1 为吸附剂的磷吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; C_0 为溶液的磷初始质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C_e 为吸附反应后溶液的磷质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为反应溶液的体积, L; m 为吸附剂的投加量, g.

WTPS, C-WTPS 的氨氮或总有机碳释放量为

$$X_2 = \frac{C_1 \times V}{m} \tag{2}$$

式(2)中: X_2 为吸附剂的氨氮或总有机碳释放量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; C_1 为反应后溶液的氨氮或总有机碳的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为反应溶液的体积, L; m 为吸附剂的投加量, g.

2 结果与讨论

2.1 C-WTPS 煅烧温度参数的优化

2.1.1 等温吸附试验 不同煅烧温度对 C-WTPS 磷吸附量(X_1)的影响,如图 1 所示. 图 1 中:横坐标 0 表示 WTPS. 由图 1 可知:在 50~200 $^{\circ}\text{C}$ 煅烧, C-WTPS 对磷的吸附量逐渐增加,这主要因为随着煅烧温度的增加,其内部的自由水和结晶水蒸发量越多,比表面积及孔容增大,以及吸附位点上某些易热解的物质被去除^[17];在 200~400 $^{\circ}\text{C}$ 煅烧,随着煅烧温度的提高, C-WTPS 的水分蒸发量达到稳定,水分蒸发对磷吸附的改善作用不再增强,最终 C-WTPS 对磷的吸附量在 350 $^{\circ}\text{C}$ 和 400 $^{\circ}\text{C}$ 时达到最大值 $0.269 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,是 WTPS 磷吸附量的 3 倍.

文献[17-18]研究表明:在 300 $^{\circ}\text{C}$ 下煅烧, C-WTPS 对磷的吸附量最大;当煅烧温度高于 300 $^{\circ}\text{C}$ 时,由于无定形铁铝向晶体转化的作用增强,吸附孔道塌陷, C-WTPS 对磷的吸附量出现下降趋势. 这与文中研究的结果不一致,可能是因为 WTPS 的成分及理化性质不同.

WTPS 除磷的主要机理是配合基的交换作用,其中,无定形铁铝是配合基交换作用的反应物之一^[19]. WTPS 的无定形铁铝质量分数越大,对磷的吸附效果越好,但是煅烧过程会导致无定形铁铝晶体化,降低 C-WTPS 对磷的吸附量. 文中 C-WTPS 对磷的吸附量并未出现下降的现象,说明煅烧温度在 50~400 $^{\circ}\text{C}$ 内, C-WTPS 中无定形铁铝晶体化作用较弱,在此温度范围内煅烧,水分和有机物的损失导致 C-WTPS 质量减少,但其中无定形铁铝的总量不变. 因此,单位质量 C-WTPS 的无定形铁铝质量分数增加. WTPS 和 C-WTPS 的元素质量分数(η),如表 2 所示. 由表 2 可知:与 WTPS 相比较, C-WTPS 的各元素质量分数发生变化,吸附过程中,起主要作用的 Al, Fe 的质量分数明显增加,这也是 C-WTPS

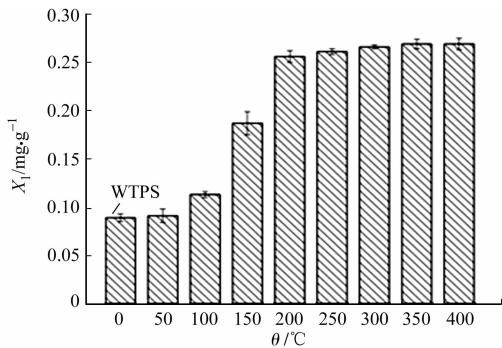


图 1 煅烧温度对 C-WTPS 磷吸附量的影响
Fig. 1 Effect of calcining temperature on phosphorus adsorption capacity of C-WTPS

对磷的吸附量提高的原因.

表 2 WTPS 和 C-WTPS 的元素质量分数
Tab. 2 Elements weight percent of WTPS and C-WTPS %

吸附剂	$\eta(\text{C})$	$\eta(\text{N})$	$\eta(\text{O})$	$\eta(\text{Al})$	$\eta(\text{Fe})$	$\eta(\text{Ca})$	$\eta(\text{Mg})$	$\eta(\text{Si})$
1# WTPS	34.20	0.51	55.41	4.72	1.07	0.05	0.04	3.56
C-WTPS(200 ℃)	30.97	1.21	56.22	5.56	1.26	0.05	0.06	4.25
C-WTPS(400 ℃)	23.41	0.19	59.02	8.33	2.05	0.12	0.08	6.11

2.1.2 浸渍试验 煅烧温度(θ)对 C-WTPS 氨氮释放量($X(\text{NH}_4^+-\text{N})$)和总有机碳释放量($X(\text{TOC})$)的影响,如图 2 所示.

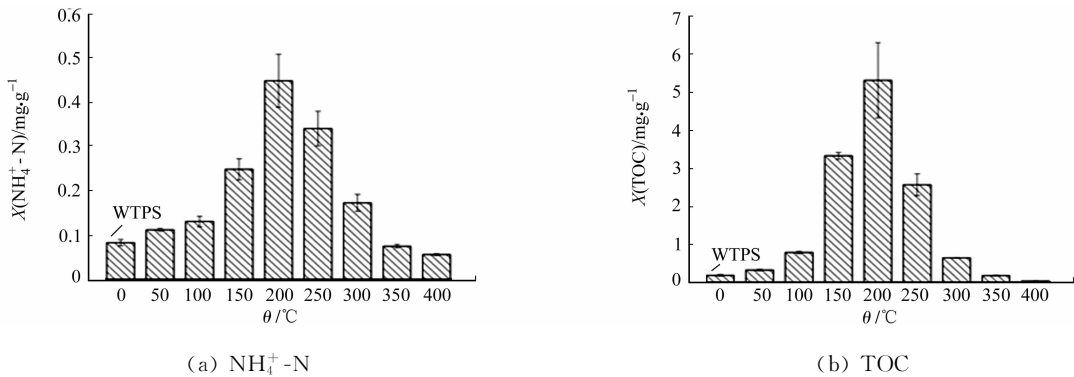


图 2 煅烧温度对 C-WTPS 氨氮和总有机碳释放量的影响

Fig. 2 Effect of calcinating temperature on ammonia and total organic carbon release capacities of C-WTPS

由图 2 可知:煅烧温度为 50~200 ℃时,C-WTPS 的氨氮和总有机碳释放量均呈现逐渐增加的趋势;煅烧温度为 200 ℃时,C-WTPS 的氨氮和总有机碳释放量均达到最大(与 Ichihara 等^[20]的研究结果一致),分别为 0.449,5.321 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,比 WTPS 的氨氮和总有机碳释放量分别增加 440%,2 746%;煅烧温度在 200~400 ℃时,C-WTPS 的氨氮和 TOC 释放量均呈现减少趋势;当煅烧温度为 400 ℃时,C-WTPS 氨氮和总有机碳的释放量均达到最小值,分别为 0.056,0.037 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,与 WTPS 相比,分别减少 32.4%,80.3%.

WTPS,C-WTPS 中氨氮、总有机碳的释放量主要与铵态氮和有机质质量比有关.不同煅烧温度 C-WTPS 中铵态氮和有机质的质量比,如表 3 所示.

由表 3 可以得到以下 2 点结论.1) 随着煅烧温度的增加,C-WTPS 的铵态氮质量比先增加后减少,煅烧温度为 200 ℃时,C-WTPS 的铵态氮质量比最多,比 WTPS

表 3 不同煅烧温度 C-WTPS 铵态氮和有机质质量比
Tab. 3 Ammonium nitrogen and organic matter mass ratios of C-WTPS with different calcinating temperatures

$\theta/^{\circ}\text{C}$	$w(\text{铵态氮})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$w(\text{有机质})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
50	142.7±1.2	134.3±3.5
100	153.7±1.2	139.0±0.2
150	268.4±5.9	129.5±3.8
200	364.8±3.8	110.5±3.1
250	325.0±11.0	73.9±0.4
300	157.0±10.0	55.0±1.6
350	78.5±1.0	29.7±0.5
400	28.4±2.8	10.8±2.6

增加了 198.1%;煅烧温度为 400 ℃时,C-WTPS 的铵态氮质量比最少,比 WTPS 削减了 76.8%.结合浸渍实验的结果可知,WTPS 和 C-WTPS 的铵态氮质量比越高,其氨氮的释放量越高.2) 煅烧温度为 50~100 ℃的 C-WTPS 中,有机质质量比随着煅烧温度的增加而增加,这是因为水分蒸发导致 WTPS 的质量减少,但有机质的总量基本不变,故单位质量 WTPS 的有机质质量比增加;煅烧温度为 100~400 ℃的 C-WTPS 中,有机质质量比随着煅烧温度增加而减少,因为煅烧温度高于 100 ℃时,有机物的损失量逐渐增大;煅烧温度为 400 ℃时,C-WTPS 的有机质质量比达到最小值,比 WTPS 削减了 91.9%.结合浸渍实验的结果可知,WTPS,C-WTPS 的总有机碳释放量与其有机质质量比并不是正相关的关系,这可能与其有机物的种类、形态及稳定性有关.

综上所述,400 ℃的 C-WTPS,磷吸附量最大,氨氮和有机物释放量最少.因此,WTPS 煅烧改性工艺的最佳煅烧温度为 400 ℃.

2.2 C-WTPS 煅烧时间参数的优化

2.2.1 等温吸附试验 煅烧时间(t)对 C-WTPS 磷吸附量的影响,如图 3 所示.由图 3 可知:在最佳煅烧温度 400 ℃下,煅烧 0.5~4.0 h,WTPS 对磷的吸附量可增大,增加率为 44.07%~61.15%,但煅烧 0.5~1.5 h 的 C-WTPS 对磷的吸附能力优于煅烧 2 h 以上的,这与文献[17]的研究结果一致.

2.2.2 浸渍试验 在浸渍试验中,煅烧时间(t)对 C-WTPS 氨氮和总有机碳释放量的影响,如图 4 所示.

由图 4 可以得到以下 2 点结论.1) 煅烧 0.5 h 时,C-WTPS 的氨氮释放量比 WTPS 增加了 38.7%;当煅烧时间超过 1 h,C-WTPS 的氨氮释放量均小于 WTPS,且随着煅烧时间的增加而减少;当煅烧时间超过 2.5 h 后,C-WTPS 的氨氮释放量变化趋于稳定.煅烧 2.5 h 的 C-WTPS 氨氮释放量比 WTPS 削减了 79.5%.2) 与 WTPS 相比,随着煅烧时间的增加,C-WTPS 的总有机

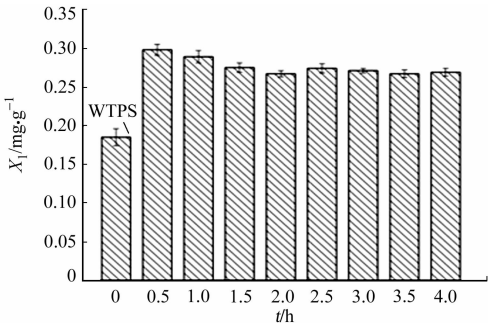
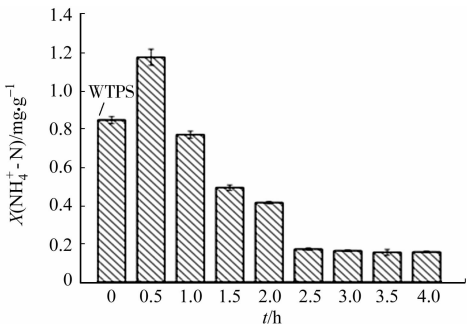
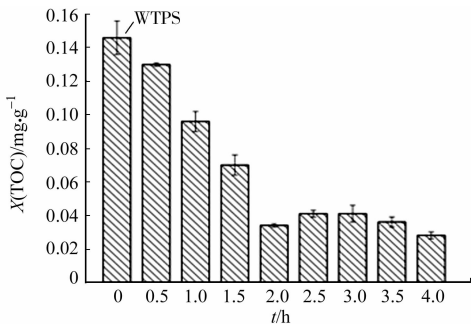


图 3 煅烧时间对 C-WTPS 磷吸附量的影响
Fig.3 Effect of calcinating time on phosphorus adsorption capacity of C-WTPS



(a) $\text{NH}_4^+\text{-N}$



(b) TOC

图 4 煅烧时间对 C-WTPS 氨氮和 TOC 释放量的影响

Fig.4 Effect of calcinating time on ammonia and total organic carbon release capacities of C-WTPS
碳释放量逐渐减少,在 2 h 以后,总有机碳释放量变化趋于稳定.煅烧 2.5 h 的 C-WTPS 的总有机碳的释放量比 WTPS 削减了 71.9%.

不同煅烧时间 C-WTPS 的铵态氮和有机质的质量比,如表 4 所示.由表 4 可知:在煅烧温度为 400 ℃时,煅烧时间越长,C-WTPS 的铵态氮和有机质质量比越少,煅烧 4 h 的 C-WTPS 的铵态氮和有机质质量比最少,比 WTPS 分别削减 97.1%,92.7%.但煅烧 2.5 h 的 C-WTPS 的铵态氮和有机质质量比比 WTPS 削减了 80.5%,91.6%,WTPS 中大部分的铵态氮和有机物已被去除.综上所述,考虑 C-WTPS 制备能耗和其氨氮、有机物释放量,WTPS 煅烧改性工艺的最佳煅烧时间为 2.5 h.

表 4 不同煅烧时间 C-WTPS 中铵态氮和有机质质量比
Tab.4 Ammonium nitrogen and organic matter mass ratios of C-WTPS with different calcinating times

t/h	$w(\text{铵态氮})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$w(\text{有机质})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
0.5	61.3 ± 0.0	33.9 ± 3.7
1.0	49.1 ± 0.1	28.9 ± 2.0
1.5	32.6 ± 0.0	20.3 ± 0.8
2.0	21.2 ± 0.3	16.1 ± 1.6
2.5	14.7 ± 0.2	8.1 ± 1.1
3.0	5.3 ± 0.0	6.9 ± 0.7
3.5	3.7 ± 0.0	7.0 ± 1.1
4.0	2.2 ± 1.1	7.0 ± 0.6

3 结论

1) 在煅烧温度为 50~400 ℃,煅烧时间为 0~4 h 范围内,C-WTPS 制备的最佳煅烧工艺参数:煅烧温度为 400 ℃,煅烧时间为 2.5 h.与 WTPS 相比,C-WTPS 对磷吸附量的增长率为 48.2%,C-WTPS 的氨氮和总有机碳释放量的削减率分别为 79.5%,71.9%,C-WTPS 中铵态氮和有机质质量比的削减率分别为 80.5%,91.6%.

2) 煅烧改性净水厂污泥资源化制备除磷材料具有可行性,煅烧改性工艺不仅提高了净水厂污泥的

磷吸附能力,而且大为削减了净水厂污泥铵态氮和有机物量,基本解决净水厂污泥直接应用于富营养化水体除磷中存在的释放氨氮和有机物问题,但 C-WTPS 的除磷机理及主要影响因素还需进一步研究。

参考文献:

- [1] SMITH V H, SCHINDLER D W. Eutrophication science: Where do we go from here? [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2009, 24(4): 201-207. DOI:10.1016/j.tree.2008.11.009.
- [2] SCHINDLER D W, CARPENTER S R, CHAPRA S C, *et al.* Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success[J]. Environmental Science and Technology, 2016, 50(17): 8923-8929. DOI:10.1021/acs.est.6b02204.
- [3] HUSER B J, EGEMOSE S, HARPER H, *et al.* Longevity and effectiveness of aluminum addition to reduce sediment phosphorus release and restore lake water quality[J]. Water Research, 2016, 97: 122-132.
- [4] IMMERS A K, BAKKER E S, DONK E V, *et al.* Fighting internal phosphorus loading: An evaluation of the large scale application of gradual Fe-addition to a shallow peat lake[J]. Ecological Engineering, 2015, 83: 78-89. DOI:10.1016/j.ecoleng.2015.05.034.
- [5] GERLINDE W, THOMAS G, MICHAEL H, *et al.* Phosphorus balance of Lake Tiefwareensee during and after restoration by hypolimnetic treatment with aluminum and calcium salts[J]. Lake and Reservoir Management, 2009, 25(4): 377-388. DOI:10.1080/07438140903238591.
- [6] DOUGLAS G B, LURLING M, SPEARS B M. Assessment of changes in potential nutrient limitation in an impounded river after application of lanthanum-modified bentonite[J]. Water Research, 2016, 97: 47-54. DOI:10.1016/j.watres.2016.02.005.
- [7] 穆凯艳, 赵田甜, 张樱美, 等. 膨润土载锆除磷复合材料的研究[J]. 环境工程, 2014, 32(3): 60-64. DOI:10.13205/j.hjgc.201403015.
- [8] 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 等. 高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制[J]. 环境科学, 2017, 38(2): 572-579. DOI:10.13227/j.hjxx.201606187.
- [9] 刘焱, 吴玲琳, 王世和, 等. 工业废渣基除磷材料的静态吸附研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(2): 275-278.
- [10] 帖靖玺, 赵莉, 张仙娥. 净水厂污泥的磷吸附特性研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(6): 149-151. DOI:10.3969/j.issn.1003-6504.2009.06.034.
- [11] 王昌辉, 裴元生. 给水处理厂废弃铁铝泥对正磷酸盐的吸附特征[J]. 环境科学, 2011, 32(8): 2371-2377.
- [12] 黄华山, 杨志敏, 周真明, 等. 净水厂污泥覆盖控制底泥氮磷释放效果[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(3): 347-351. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2016.03.0347.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [16] GONZÁLEZ M J J, PÉREZ C B, FERNÁNDEZ G E. Analytical phosphorus fractionation in sewage sludge and sediment samples[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2005, 381(4): 873-878. DOI:10.1007/s00216-004-2989-z.
- [17] 吴慧芳, 胡文华. 聚合氯化铝污泥吸附除磷的改性研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(8): 1289-1294.
- [18] 高思佳, 王昌辉, 裴元生. 热活化和酸活化给水处理厂废弃铁铝泥的吸磷效果[J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 606-611.
- [19] YANG Y, ZHAO Yaqian, BABATUNDE A O, *et al.* Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption on dewatered alum sludge[J]. Separation and Purification Technology, 2006, 51(2): 193-200. DOI:10.1016/j.seppur.2006.01.013.
- [20] ICHIHARA M, NISHIO T. Suppression of phosphorus release from sediments using water clarifier sludge as capping material[J]. Environmental Technology, 2013, 34(15): 2291-2299. DOI:10.1080/09593330.2013.765924.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 刘源岗)