

文章栏目: 固体废物处理与资源化

DOI: 10.12030/j.cjee.201807061 中图分类号 X705 文献标识码 A

季文杰, 姚寰琰, 陈斌, 等. 水葫芦压滤脱水与鲜汁强化除磷工艺 [J]. 环境工程学报, 2019, 13(1): 195-203.

Ji Wenjie, YAO Huanyan, CHEN Bin, et al. Process of mechanical dewatering of water hyacinth and enhanced phosphorus removal from its fresh juice[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(1): 195-203.

## 水葫芦压滤脱水与鲜汁强化除磷工艺

季文杰, 姚寰琰, 陈斌, 单峰, 罗歆婷, 高华生\*

宁波大学建筑工程与环境学院, 宁波 315211

第一作者: 季文杰(1993—), 男, 硕士研究生。研究方向: 污染控制技术。E-mail: 597238937@qq.com

\*通信作者: 高华生(1965—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 污染控制技术。E-mail: gaohuasheng@nbu.edu.cn

**摘要** 就地对水葫芦进行粉碎压滤能有效减少质量和体积, 降低处置难度, 减少运输成本。针对水葫芦鲜渣含水率高, 鲜汁污染物浓度高的问题, 研究不同压滤时间、压力和调理剂的添加对压滤后鲜渣的含水率的影响; 同时采用化学混凝法研究不同混凝剂、pH和混凝时间以及CaO的添加对鲜汁中COD和TP的去除效果的影响。结果表明: 鲜渣含水率随着压滤压力、时间的增加而降低, 8 MPa压力条件下鲜渣含水率为66.35%, 添加鲜货质量10%的木屑和CaO能使含水率降为46.17%和40.21%, 加快鲜渣脱水速度; FeCl<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>和PAC等3种混凝剂均能有效去除鲜汁中COD和TP, 去除率分别可达80%以上和85%以上, 进一步添加CaO能强化TP的去除效果, 去除率可达96%以上; 水葫芦压滤脱水与鲜汁预处理工艺为水葫芦处置提供了一种新的途径。

**关键词** 水葫芦; 混凝沉淀; 压滤脱水; 强化除磷; 富营养化水体生态修复

随着中国经济和社会的快速发展, 水资源污染日趋严重, 尤其是地处水系末梢的平原城市, 干支流河道的水污染严重地影响了人们的身体健康和城市形象。水生植物修复技术因其太阳能驱动、环境友好、成本低廉、可恢复水体自净能力等优点, 已逐渐成为一种作用明显的、潜在的生态治理手段<sup>[1-2]</sup>。用于生态修复的水生植物需满足生长快速、生物量大、营养物质富集能力强等特点<sup>[3]</sup>。

水葫芦, 学名凤眼莲(water hyacinth), 为多年生漂浮性草本植物<sup>[4]</sup>。由于水葫芦根系发达、繁殖速度快、对水体的N、P、K等营养物质吸收迅速, 故在水体净化和生态环境保护方面得到广泛应用<sup>[5-6]</sup>。张志勇等<sup>[7-8]</sup>、宋伟等<sup>[9]</sup>的研究结果表明, 水葫芦有极好的吸收氮磷的能力, 能有效改善被污染的水体的水质。周新伟等<sup>[10]</sup>的研究结果表明, 在水葫芦生长旺盛期, 以100%覆盖度对氮磷的去除效果最好。陈文萍等<sup>[11]</sup>、张皓东<sup>[12]</sup>、郑家传<sup>[13]</sup>的研究结果表明, 水葫芦能显著去除砷、镉、铅、锌等重金属, 去除率均在70%以上, 水葫芦根对重金属离子有很好的富集效果。

水葫芦如果打捞不及时, 死亡后的残体腐烂分解过程中将释放大量的N、P等物质, 导致水体二次污染。水葫芦治理污染水体工艺实行的关键是水葫芦的处置利用, 目前水葫芦的处置利用方式可采用堆肥化、饲料化和燃料化处理。SINGH等<sup>[14]</sup>的实验结果表明, 水葫芦中还含有一定量的重金属离子, 堆肥过程中添加CaO能够有效固化水葫芦中含有的重金属离子, 减少重金属离子的溶出。目前对水葫芦鲜汁的处理大多数都采用厌氧发酵。刘健峰<sup>[15]</sup>、胡晓明等<sup>[16]</sup>以水葫芦鲜汁为原料, 进行发酵产沼气

收稿日期: 2018-07-10; 录用日期: 2018-10-18

基金项目: 住房和城乡建设部2018年度科学技术计划项目(2018-K7-017); 宁波市城市科学研究会2017年度重点课题(HK2017000043)

实验,结果表明,水葫芦鲜汁是一种良好的发酵原料,产气量大,可大大提高处理效率。但是厌氧发酵处理周期长,设备工艺复杂。

水葫芦生长繁殖速度惊人,打捞上岸的水葫芦数量巨大,运输成本高,处置难度大。水葫芦就地减量能够大大减少水葫芦质量与体积,减少运输成本。打碎后的水葫芦鲜渣含水率为95%左右,压滤得到的水葫芦鲜汁污染物浓度高,COD浓度为11.9~18.9 g·L<sup>-1</sup>,TN浓度为0.6~0.65 g·L<sup>-1</sup>,TP浓度为0.08~0.09 g·L<sup>-1</sup>。为解决鲜渣含水率高、鲜汁污染物浓度高的问题,本研究采用简单易行的预处理办法,对鲜渣进行压滤脱水,并对鲜汁进行净化处理,降低鲜汁的污染物浓度,降低污水处理厂的负荷,为鲜汁排入污水处理厂提供有利条件;同时通过添加调理剂来提高水葫芦鲜渣的脱水效果和鲜汁中磷的去除效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、试剂和仪器

实验材料:新鲜水葫芦采摘自宁波大学护校河,其基本成分见表1。

化学试剂:氯化铁FeCl<sub>3</sub>(国药集团,分析纯);聚合氯化铝PAC(天津市鼎盛鑫化工有限公司,分析纯);硫酸铝Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(天津市展望化工有限公司,分析纯),以上试剂均配制成200 g·L<sup>-1</sup>溶液,储备待用。氢氧化钠NaOH(国药集团,分析纯),浓盐酸HCl(国药集团,分析纯);氧化钙CaO(国药集团,分析纯)等。

实验仪器:XFB-400高速中药粉碎机(吉首市中诚制药机械厂);自行设计安装的手动压滤机;PHS-3C/pH计(上海平轩科学仪器有限公司)等。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 压滤实验

本实验采用压滤机对水葫芦进行压滤实验,实验装置如图1所示。

先用粉碎机将水葫芦做简单的粉碎预处理,然后取粉碎水葫芦鲜渣装进滤袋里,放入压滤机内在一定压力条件下压滤,完成后取出水葫芦滤饼并测定其含水率。改变实验条件,研究不同条件下水葫芦鲜渣含水率的变化。压滤过程中收集挤出的水葫芦鲜汁保存待用。

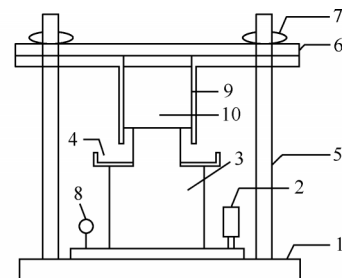
#### 1.2.2 混凝实验

水葫芦鲜汁的基本成分见表2。取若干只洁净的50 mL比色管,加入50 mL水葫芦鲜汁,调节适当的pH。然后分别加入一定量的混凝剂(200 g·L<sup>-1</sup>),搅拌混匀,静置30 min,抽取一定量的上清液,测定其中COD和TP含量。改变实验条件,研究不同条件下水葫芦鲜汁中COD和TP的去除效果。化学混凝法主要通过混凝剂的作用去除液体中的固态悬浮颗粒,溶解性氮的去除规律和COD的去除规律类似,所以,本实验主要研究TP和COD的去除规律。

表1 水葫芦基本成分(以干基计)

Table 1 Basic components of water hyacinth (on dry basis)

分析项目	质量浓度/(g·kg <sup>-1</sup> )
有机质	700~900
总氮	20~30
总磷	4~6
总钾	50~70



1. 压滤机底座; 2. 压柄; 3. 千斤顶; 4. 接水盘; 5. 支撑柱; 6. 固定板; 7. 固定螺母; 8. 压力表; 9. 出水孔; 10. 压腔。

图1 压滤机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of filter press

表2 水葫芦鲜汁基本成分

Table 2 Basic ingredients of fresh juice of water hyacinth

分析项目	浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )
TSS	15 000~20 000
COD	11 000~16 000
总氮	500~650
总磷	75~85
总钾	1 200~1 600

### 1.2.3 分析方法

含水率用上海菁海快速卤素水分仪测定; COD采用重铬酸盐法测定; 总磷采用钼酸铵分光光度法测定; 总钾采用火焰光度法测定; 总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 压滤实验

#### 2.1.1 不同压力对水葫芦含水率影响

将水葫芦鲜渣分别在0、2、4、6、8和10 MPa的压力下压滤一定时间, 测定滤饼含水率, 研究不同压力对水葫芦脱水效果的影响, 结果如图2所示。

根据图2中的曲线拟合得到 $y = 0.923 9x^{-0.198}$ ,  $R^2=0.974 9$ 。随着压力由0~10 MPa, 水葫芦含水率由初始的91.20%逐步降低, 下降幅度逐渐增大, 所获残渣的最低含水率为65.74%, 脱除的水分占鲜货总水分的81.47%, 水葫芦减重率达74.6%。0~6 MPa含水率下降的幅度大, 6~10 MPa下降的幅度较小, 10 MPa压力过大, 会将水葫芦滤饼压出实验装置, 结构会被破坏, 且该压力在现实中也是不易实现的。后续实验在2~8 MPa压力范围内进行。

#### 2.1.2 不同压滤时间对水葫芦含水率的影响

将水葫芦鲜渣分别压滤0、15、30、60、120、180、240、300和360 s的时间, 测定滤饼含水率, 研究不同压滤时间对水葫芦脱水效果的影响, 结果如图3所示。

结果表明, 8 MPa压力下, 随着压滤时间的增加, 水葫芦鲜渣的含水率由92.80%逐渐减少到65.19%。说明随着压滤时间的增加, 含水率不断减小, 且6 MPa和8 MPa下降幅度比2 MPa和4 MPa要大。从图3中可以看出, 压滤时间到300 s后, 随着时间的增加, 水葫芦鲜渣含水率变化趋势甚微。所以本实验选用300 s作为水葫芦鲜渣压滤的时间。

#### 2.1.3 添加调理剂对水葫芦含水率的影响

取200 g粉碎后的水葫芦鲜渣装在滤布中, 在压力为2、4、6和8 MPa条件下, 分别添加质量为水葫芦鲜渣质量的0%、2%、5%、10%、15%、20%的木屑和CaO。压滤300 s, 测定滤饼含水率, 研究添加不同调理剂与不同添加量对水葫芦脱水效果及比阻的影响, 结果如图4和图5所示。

由图4可知, CaO和木屑都有促进脱水的作用且CaO的脱水性能远远比木屑的更好。在8 MPa压力下, 加入20%的CaO可使泥饼的含水率降为38.58%, 加入20%的木屑可使水葫芦滤饼的含水率降为42.63%。由图5可知, 木屑和CaO的添加可以有效降低水葫芦的比阻, 增加水葫芦的可滤性, 加快水葫芦鲜渣的脱水速度。

在压滤过程中, 木屑的作用是作为构成物理通道的生物骨架, 阻止胶状微粒对滤孔的阻塞, 可以保持良好的渗透性, 既能使滤液中的细小颗粒及胶状物质被截留在格子骨架上, 又具备通道, 使清液有流畅的途径。CaO作为骨架构建体可减少水葫芦泥的压缩性, 提高水葫芦泥压缩过程中的机械强度

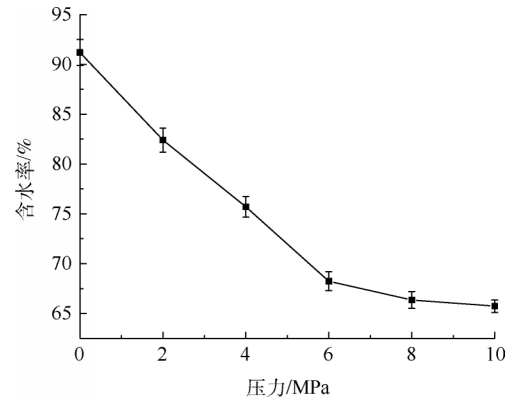


图2 不同压力下水葫芦鲜渣的含水率

Fig. 2 Water content of residue under different pressures

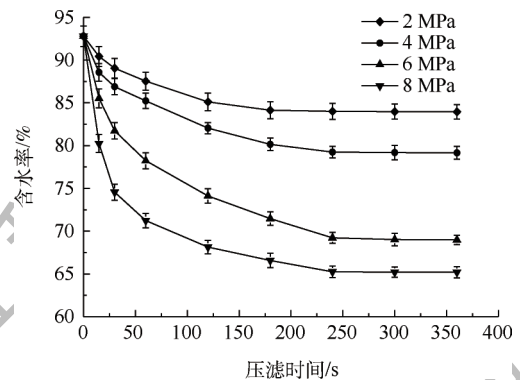


图3 不同压滤时间下水葫芦鲜渣的含水率

Fig. 3 Water content of residue under different filter-pressing times

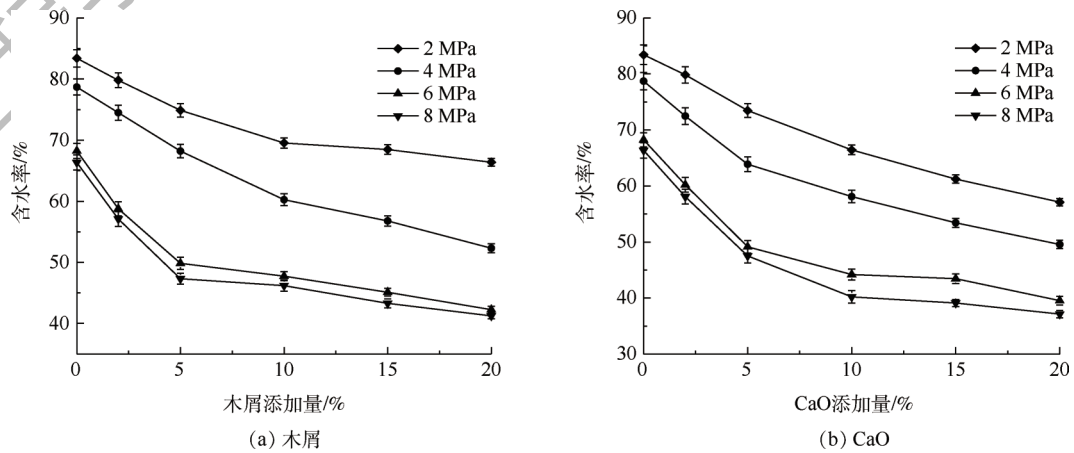


图4 调理剂添加量对水葫芦鲜渣含水率的影响

Fig. 4 Effect of conditioner dosage on water content of water hyacinth residue

和渗透性能。另外，CaO扰乱了水葫芦泥絮体的结构，在水葫芦泥的调理过程中，释放了其中部分细胞内水，增加了水葫芦泥中自由水的含量，有利于后续的实际压滤脱水情况。

#### 2.1.4 减量处理效果对比

取适量粉碎后的水葫芦，测得水葫芦初始含水率约为95%。设置3个实验组，实验组1取1 000 g水葫芦在6 MPa压力下充分压滤；实验组2取1 000 g水葫芦，加入50 g木屑作为调理剂，在6 MPa压力下充分压滤；实验组3取1 000 g水葫芦，加入50 g CaO作为调理剂，在6 MPa压力下充分压滤；测定各组压滤后得到的水葫芦鲜渣的含水率，对比水葫芦压滤后的减量效果，结果如表3所示。

水葫芦经过6 MPa压力压滤后，含水率从初始的95%降低到68.24%，质量减少85.26%。加入水葫芦鲜渣质量5%的木屑或CaO虽然会使压滤后的水葫芦鲜渣质量增加，但是木屑和CaO的添加会大大降低水葫芦鲜渣的含水率，可以使含水率降到50%左右，同时能增加压滤得到的鲜汁的量，加快脱水速度。

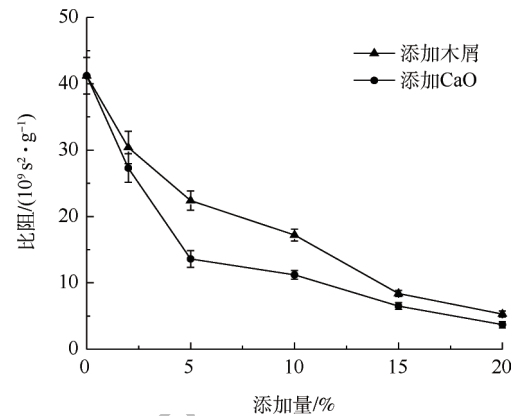


图5 调理剂添加量对水葫芦鲜渣比阻的影响

Fig. 5 Effect of conditioner dosage on the specific resistance of water hyacinth residue

表3 调理剂种类对水葫芦压榨减量处理的影响

Table 3 Effect of conditioners on filter press reduction of water hyacinth

序号	调理剂种类	调理剂用量/g	初始质量/g	鲜渣质量/%	含水率/%	鲜汁质量/g	质量分数/%
1	无	0	1 000	157.43	68.24	842.57	15.74
2	木屑	50.0	1 050	199.36	49.84	850.64	18.98
3	CaO	50.0	1 050	196.65	49.15	853.35	18.73

## 2.2 混凝实验

### 2.2.1 混凝剂种类对COD和TP去除的影响

取50 mL水葫芦鲜汁，分别加入不同剂量浓度为 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{FeCl}_3$ 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、PAC溶液为混凝剂，

采用NaOH溶液调节pH为8, 混凝时间为30 min, 研究不同混凝剂不同添加量对COD和TP效果的影响, 结果如图6所示。

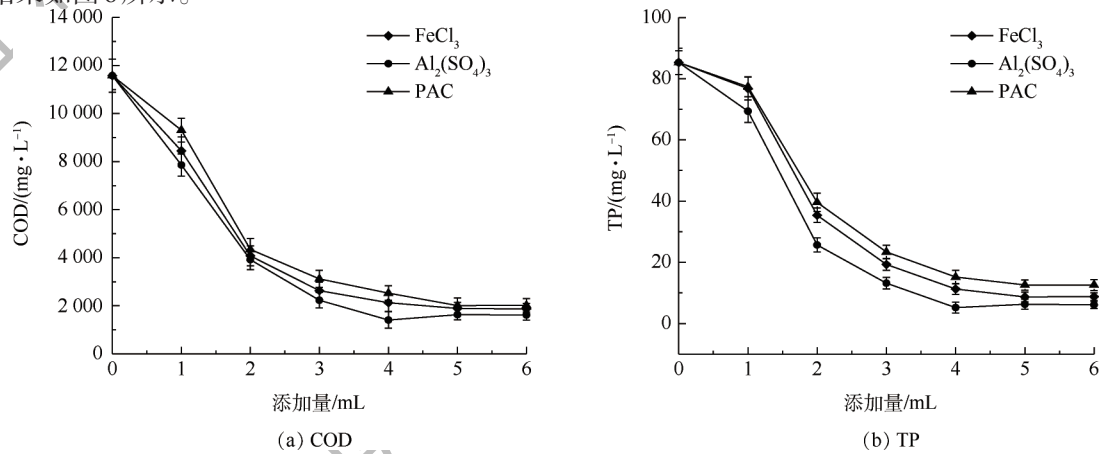


图6 混凝剂添加量对COD和TP去除的影响

Fig. 6 Effect of coagulant dosage on COD and TP removal

由图6可知, FeCl<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>和PAC均能有效去除水葫芦鲜汁中COD和TP。投加FeCl<sub>3</sub>时, COD和TP的最低浓度分别为1 890 mg·L<sup>-1</sup>和8.7 mg·L<sup>-1</sup>, 去除率分别为83.68%和89.80%, 每升水葫芦鲜汁FeCl<sub>3</sub>溶液200 g·L<sup>-1</sup>的最佳投加量为100 mL, 其中FeCl<sub>3</sub>质量为20 g。投加Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>时, COD和TP的最低浓度分别为1 410 mg·L<sup>-1</sup>和5.2 mg·L<sup>-1</sup>, 去除率分别为87.82%和93.90%, 每升水葫芦鲜汁浓度为200 g·L<sup>-1</sup> Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>的最佳投加量为80 mL, 其中Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>质量为16 g。投加PAC时, COD和TP的最低浓度分别为2 010 mg·L<sup>-1</sup>和12.6 mg·L<sup>-1</sup>, 去除率分别为82.64%和85.23%, 每升水葫芦鲜汁浓度为200 g·L<sup>-1</sup> PAC的最佳投加量为100 mL, 其中PAC质量为20 g。3种混凝剂对COD和TP的去除效果各有差异, 但差别不大。

混凝沉淀除水中污染物的机理是: 一方面, 混凝剂中的Fe<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup>等离子能与水中的磷酸根作用, 生成沉淀, 达到除磷目的<sup>[18]</sup>; 另一方面, 混凝剂将水中的悬浮颗粒凝聚在一起, 在沉降过程中还能吸附不易沉淀的含磷悬浮物, 发挥网捕卷扫作用, 通过沉降得以去除并使上清液清澈。所以用混凝的方法能有效去除水中的TP和COD。

### 2.2.2 pH对COD和TP去除的影响

由于化学混凝是通过金属离子及盐类水解产生羟基络合物去除水中的污染物, 而pH是影响盐类水解的重要因素, 直接影响混凝效果。取50 mL水葫芦鲜汁, 加入4 mL浓度为200 g·L<sup>-1</sup>的Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>溶液为混凝剂, 采用盐酸和NaOH溶液调节pH, 混凝时间为30 min, 研究不同pH对Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>去除COD和TP效果的影响, 结果如图7所示。

由图7可知: 在pH为3时, 混凝效果差, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>对COD和TP的去除效果最差; 随着pH的增大, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>对COD和TP的去除效果也逐渐增大; 在pH为12时, COD浓度为2 300 mg·L<sup>-1</sup>, TP浓度为10.3 mg·L<sup>-1</sup>; 当pH达到8时, 去除效果最好, COD浓度为1 410 mg·L<sup>-1</sup>, 去除率达86.24%, TP浓度达到

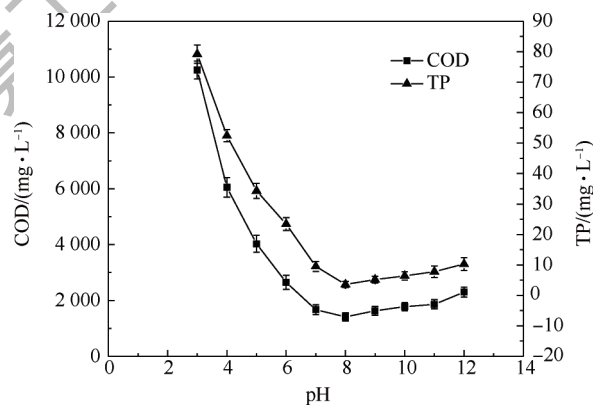


图7 pH对Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>去除COD和TP的影响

Fig. 7 Effect of pH on Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> coagulation for COD and TP removal

$3.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率达95.45%, 去除效果显著。

### 2.2.3 混凝时间对COD和TP去除的影响

取50 mL水葫芦鲜汁, 加入4 mL浓度为 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液为混凝剂, 采用NaOH溶液调节pH为8, 改变混凝时间, 研究不同混凝时间对 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 去除COD和TP效果的影响, 结果如图8所示。由图8可知, 混凝5 min, COD、TP浓度分别降到 $4530 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $34.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率达到63.17%和58.63%。随着混凝时间的增加, 去除效果进一步提高, 混凝时间达到30 min时, COD和TP的浓度分别为 $1630 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率分别为86.75%和94.84%。30 min后, COD、TP的浓度依旧在减小, 但减小幅度趋于平缓, 所以确定混凝时间为30 min。

### 2.2.4 添加CaO对COD和TP去除的影响

取2份50 mL水葫芦鲜汁, 每份都加入0、2、3、4和5 mL浓度为 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液, 其中一份加入适量的CaO, 调节pH为8, 另一份使用NaOH溶液, 调节pH到8, 混凝时间为30 min, 研究CaO的添加对 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 去除COD和TP效果的影响, 结果如图9所示。

由图9可知, 不加CaO时, COD和TP的浓度分别为 $1450 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率分别为87.17%和93.06%, 加了CaO时, COD和TP的浓度分别 $1310 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率分别为87.76%和96.09%。实验结果表明, 在水葫芦压滤鲜汁中加入CaO对COD去除率影响不大, 但能够强化TP的去除效果。CaO溶于水中产生 $\text{Ca}^{2+}$ 离子,  $\text{Ca}^{2+}$ 离子会与水葫芦汁中的 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$ 和 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 等离子形成难溶于水的磷酸盐沉淀, 从而去除水中的磷含量。

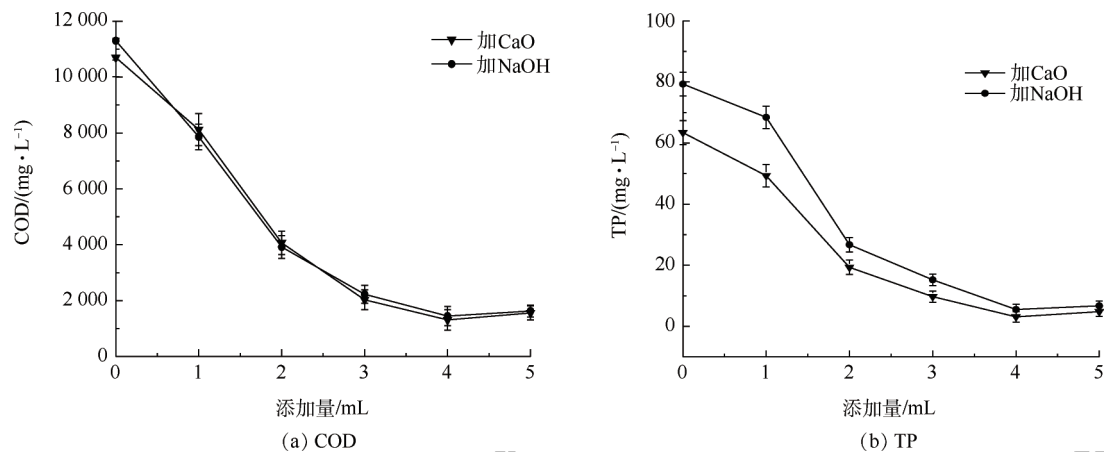


图9 添加CaO对去除COD和TP的影响

Fig. 9 Effect of adding CaO on COD and TP removal

### 2.2.5 净化除磷效果对比

取1000 g水葫芦鲜货记为样品A(含水率约为95%), 将水葫芦鲜货进行压滤, 得到样品B和样品 $C_1$ , 其中, 样品B为压滤后的水葫芦鲜渣, 样品 $C_1$ 为压滤得到的水葫芦鲜汁, 在样品 $C_1$ 中加入适量的浓度为 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的混凝剂进行处理得到样品 $C_2$ , 混凝完全后向样品 $C_2$ 中添加适量的CaO进行处理得到样品 $C_3$ 。其中, 分别测定5个样品中的有机质质量和TP质量, 进行净化效果对比, 结果如表4所示。

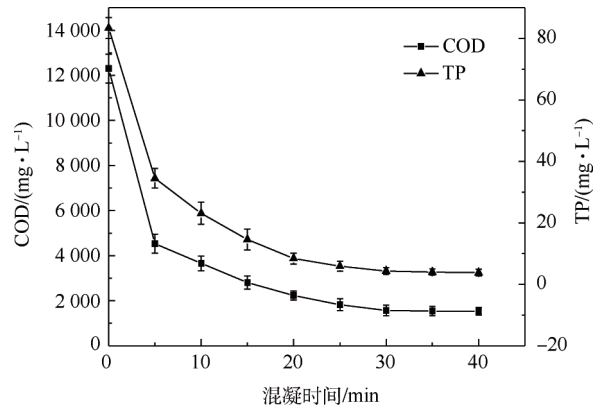


图8 混凝时间对 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 去除COD和TP的影响

Fig. 8 Effect of coagulation time on  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  coagulation for COD and TP removal

表4 压榨鲜汁的混凝净化与强化除磷

Table 4 Coagulated purification of fresh juice with enhanced TP removal

样品	样品说明	样品质量/g	有机质质量/g	有机质质量分数/%	TP质量/mg	TP质量分数/%
A	鲜货	1 000.00	45.50	100.00	250.00	100.00
B	鲜渣	157.43	33.55	75.39	180.07	72.03
C <sub>1</sub>	鲜汁	842.57	10.95	24.61	69.93	27.97
C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> 经混凝后上清液	692.57	0.99	2.22	3.50	1.40
C <sub>3</sub>	C <sub>1</sub> 经CaO处理后上清液	692.57	0.87	1.96	2.15	0.86

水葫芦压滤后得到的鲜汁中有机质和TP的质量仅为水葫芦鲜货中有机质和TP质量的24.61%和27.97%，化学混凝法处理后的鲜汁中有机质和TP质量为鲜货中有机质和TP质量的2.22%和1.40%，说明化学混凝法能够有效去除COD和TP；进一步添加CaO处理后的鲜汁中有机质和TP质量为鲜货中有机质和TP质量的1.96%和0.86%，说明加入CaO能强化TP的去除，对COD影响不大。将混凝沉淀的沉渣再和水葫芦鲜渣一起处理，就能将养分充分地保留到水葫芦鲜渣中，提高后续水葫芦鲜渣的堆肥效果。得到净化的水葫芦鲜汁可以直接排入市政污水管网中，大大减少污水处理厂的负荷。

### 2.3 就地处理工艺设想

根据实验研究成果，为水葫芦处置提出了一种就地处置、操作简单、COD和固态悬浮颗粒去除效率高的预处理方法，该方法还能强化对鲜汁中溶解状态磷的去除，其工艺流程与相关参数如图10所示。

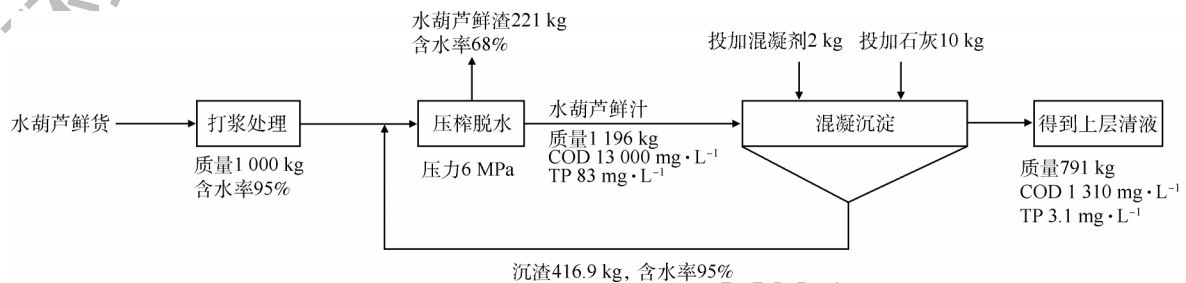


图10 水葫芦处置利用工艺流程图

Fig. 10 Process flow chart of water hyacinth disposal

将经过打浆处理后的水葫芦放入压滤机中，在一定压力下，进行压滤脱水。得到水葫芦残渣进行堆肥处理，得到的水葫芦鲜汁中加入混凝剂溶液和CaO，充分混合后排入到沉淀装置中进行混凝沉淀。静置一段时间后得到上层液体和下层沉淀物，上层清液的COD和TP质量仅为鲜货中有机质和TP质量的1.96%和0.86%，可直接排入城市市政管网中；下层沉淀物与打浆后的水葫芦混合，一起进行压滤脱水，CaO和混凝剂不仅能够去除鲜汁中的污染物，还能够加快脱水速率，降低压滤后水葫芦的含水率。

### 3 结论

1) 水葫芦的含水率与压滤压力和压滤时间成正比，在8 MPa压力下，水葫芦的含水率从初始的91.20%降至66.35%，相当于1 000 kg的水葫芦压滤到了254 kg的水葫芦鲜渣，质量上相当于原来的25%，大大减轻了水葫芦的后续处置难度，减少运输成本，同时65%的含水率也正是在水葫芦堆肥的适宜含水率范围内。木屑、CaO等调理剂的添加可以强化水葫芦的脱水效果，可以使含水率降到50%以下。

2) 使用以FeCl<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>、PAC为混凝剂的化学混凝法，能有效去除水葫芦鲜汁中COD和TP。化

学混凝法对COD和TP去除率分别可达到80%以上和85%以上,  $Al_2(SO_4)_3$ 的去除效果最好;进一步添加CaO能强化TP的去除,使去除率提高到96%以上,但对COD的去除影响不大。

3) 根据研究成果提出了一种水葫芦压滤脱水和鲜汁预处理的工艺,经过加入CaO的混凝沉淀法处理后的鲜汁,上层清液的有机质和TP质量仅为鲜货中有机质和TP质量的1.96%和0.86%,与直接将未经处理的鲜汁排入污水处理厂的传统工艺相比,该工艺能最大化地将COD和TP集中在鲜渣中,减轻污水处理厂的负荷。

## 参 考 文 献

- [1] BATTY L C, DOLAN C. The potential use of phytoremediation for sites with mixed organic and inorganic contamination[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, 43(3): 217-259.
- [2] QIN H J, ZHANG Z Y, LIU M H, et al. Site test of phytoremediation of an open pond contaminated with domestic sewage using water hyacinth and water lettuce[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 753-762.
- [3] 孙小燕, 丁洪. 水葫芦的综合利用与防治技术[J]. *农业资源与环境学报*, 2004, 21(5): 35-36.
- [4] 吾甫尔·米吉提, 艾尔肯·热合曼, 苏里坦·阿巴拜克力, 等. 利用水浮莲(*Pistia stratiotes* L.)净化城市污水的实践[J]. *中国环境科学*, 2002, 22(3): 77-80.
- [5] VERMA V K, GUPTA R K, RAI J P N. Biosorption of Pb and Zn from pulp and paper industry effluent by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)[J]. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 2005, 64(10): 778-781.
- [6] 朱磊, 胡国梁, 卢剑波, 等. 水葫芦的资源化利用[J]. *浙江农业科学*, 2006, 1(4): 460-463.
- [7] 张志勇, 张迎颖, 刘海琴, 等. 滇池水域凤眼莲规模化种养种群扩张特征与水质改善效果[J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(2): 310-318.
- [8] 张志勇, 刘海琴, 严少华, 等. 水葫芦去除不同富营养化水体中氮、磷能力的比较[J]. *江苏农业学报*, 2009, 25(5): 1039-1046.
- [9] 宋伟, 韩士群, 刘海琴, 等. 水葫芦去除污水中氮磷的效果[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(25): 11076-11076.
- [10] 周新伟, 沈明星, 金梅娟, 等. 不同水葫芦覆盖度对富营养水体氮、磷的去除效果[J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(1): 97-105.
- [11] 陈文萍, 徐舒阳, 那中元, 等. 紫根水葫芦对重金属水体的净化作用[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(5): 2284-2290.
- [12] 张皓东. 滇池水葫芦富集砷、铅、镉形态模拟研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [13] 郑家传. 利用水葫芦根系去除水中重金属的效率和机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [14] SINGH J, KALAMDHAD A S. Effects of lime on bioavailability and leachability of heavy metals during agitated pile composting of water hyacinth[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 138(2): 148-155.
- [15] 刘健峰. 水葫芦汁液厌氧消化工艺的比较研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2017.
- [16] 胡晓明, 查国君, 张无敌, 等. 水葫芦汁中温沼气发酵的实验研究[J]. *能源工程*, 2008(2): 36-38.
- [17] 叶小梅, 常志州, 钱玉婷, 等. 鲜水葫芦与其汁液厌氧发酵产沼气效率比较[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 208-214.
- [18] 李柏林, 梁亚楠, 张程琛, 等. 粉煤灰-铝土矿改性制备铝铁复合混凝剂的除磷性能及混凝机理研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(7): 2503-2511.

(本文编辑:金曙光, 郑晓梅, 张利田)



## Process of mechanical dewatering of water hyacinth and enhanced phosphorus removal from its fresh juice

Ji Wenjie, YAO Huanyan, CHEN Bin, SHAN Feng, LUO Xinting, GAO Huasheng\*

College of Architectural Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China

\* Corresponding author, E-mail: gaohuasheng@nbu.edu.cn

**Abstract** Crushing and squeezing water hyacinth on site can effectively decrease its mass and volume, reduce its disposal difficulty and transportation cost. In view of the high water content of the water hyacinth residue and high contaminant content of fresh juice, the influences of pressing time, pressure and conditioners on the water content of fresh residue after pressure filtering were studied. At the same time, the effects of coagulants, pH, coagulation time and CaO addition on the COD and TP removal from fresh juice were studied when chemical coagulation was used. The results showed that the water content of fresh residue decreased with the increase of pressure and time. The water content of fresh residue under 8 MPa pressure was 66.35%, adding sawdust or CaO with a quality of 10% of water hyacinth could reduce water content to 46.17% and 40.21%, respectively, and accelerate the dewatering rate of water hyacinth. Coagulation with  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  or PAC could effectively remove COD and TP from fresh juice, and the removal rate can reach above 80% and above 85%, respectively. Further, CaO addition could enhance the removal of TP with the removal rate of above 96%. The process of water hyacinth dewatering and its fresh juice pretreatment provides a new way for water hyacinth treatment.

**Keywords** water hyacinth; coagulation sedimentation; press dehydration; enhanced phosphorus removal; ecological restoration of eutrophic water