

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.020

水热氧化法回收污泥氮磷用于培养产油栅藻

朱 伟^{1,2},赵 帅¹,王若辰¹,张 昕¹,吕 艺¹

(1. 河海大学环境学院,江苏南京 210098;

2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,江苏南京 210098)

摘要:为了有效提取污泥中的营养,并使栅藻达到较高的产油量,采用水热氧化法处理污泥,并对污泥氧化液制成的培养基进行稀释。结果表明:在126℃下,投加0.2mol/L的氧化剂(过硫酸钾)对污泥进行水热氧化可以将其中超过90%的氮磷转移至液相;直接使用水热氧化的液相产物培养斜生栅藻,得到的藻产量和产油量都很低,但液相产物经过10倍稀释后,培养的栅藻在产油量上超过了传统BG11培养基,提高了63%。

关键词:水热氧化;氮磷回收;产油栅藻;过硫酸钾;污泥

中图分类号:X703 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)03-0147-07

Recovering nitrogen and phosphorus from sludge by hydrothermal oxidation to cultivate oil producing *Scenedesmus obliquus* // ZHU Wei^{1,2}, ZHAO Shuai¹, WANG Ruochen¹, ZHANG Yu¹, LYU Yi¹ (1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to effectively extract nutrients from sludge and obtain a higher oil yield of *Scenedesmus obliquus*, the hydrothermal oxidation method was adopted to treat sludge, and the culture medium made from the sludge oxidation solution was diluted. The results showed that more than 90% of nitrogen and phosphorus in sludge could be transferred into the liquid phase by adding 0.2 mol/L oxidant (potassium persulfate) at 126℃; the algae and oil yields of oil producing *Scenedesmus obliquus* directly cultured in original liquid products of hydrothermal oxidation were very low, while, the oil yield of *Scenedesmus obliquus* cultured in liquid products diluted 10 times was 63% higher than that in conventional BG11 medium.

Key words: hydrothermal oxidation; nitrogen and phosphorus recovery; oil producing algae; potassium persulfate; sludge

化石燃料的使用产生了众多环境问题,且日益枯竭,因此需要寻找一种替代燃料来满足世界能源需求。生物柴油的燃烧特性与化石燃料相似,并具有可持续、环保的优点,具有作为新能源的潜力^[1]。在制造生物柴油的原材料中,微藻具有产油率较高、不需要占用农田进行培养等优势^[2-3]。但使用微藻产油需要提供大量的营养物质,使用微藻生产1t生物柴油,淡水培养条件下需要消耗330 kg氮和120 kg磷^[4]。为了解决营养成分的问题,有研究利用废弃生物质,如污水^[5]、禽畜粪便^[6-7]等,提供氮磷和有机质等营养成分。

中国市政污泥年产量大、分布面广,且仍在持续增长。根据《城乡建设统计年鉴》,2015年、2017

年、2019年全国污泥产量(以含水率80%计)分别为4300万t、6000万t、6500万t,污泥的处理和处置需要大量的能源和场地。污泥中含有丰富的生物可利用营养成分,包括氮、磷、钾等^[8]。如果可以使用市政污泥进行微藻的培养,对于污泥的处理和绿色新能源的转化具有重要意义。

脱水污泥无法直接用于培养微藻,需要通过某种手段进行预处理,将污泥中的营养成分提取到液相中。提取废弃生物质中营养成分用于微藻培养的方法主要有化学氧化^[9]、水热液化^[10]等。对于产量大、体积大的污泥来说,要求处理方法效率高、用时短、操作简单。

化学氧化利用氧化剂或氧化剂产生的自由基破

作者简介:朱伟(1962—),男,教授,博士,主要从事水环境和环境土工研究。E-mail:weizhu@hhu.edu.cn

通信作者:赵帅(1998—),男,硕士研究生,主要从事水环境研究。E-mail:zs0072@foxmail.com

坏大分子,将废弃生物质中的有机大分子态的氮磷等营养物质转化成生物可以利用的小分子态或无机态,常用的氧化剂有过氧化氢^[11]和过硫酸钾^[12]等。水热液化可以通过高温促使大分子分解,使废弃生物质中的营养物质溶解于液相中。Shanableh^[13]在亚临界条件下通过水热液化处理污泥,可水解污泥中95%以上的有机固体,得到的液相产物中含有大量的有机物。Aida等^[14]在225℃下对污泥进行水热液化处理15 min后,氮回收率为50%~70%,磷回收率约20%。

将化学氧化和水热条件联用,在水热条件下使用氧化剂处理污泥,可以加速自由基的产生,强化处理效果。Zhang等^[15]使用过氧化氢作为氧化剂水热氧化处理污泥,液相产物中含有大量小分子有机酸和氨氮。Abelleira等^[16]将热水解和过氧化氢相结合水热氧化处理污泥,在138℃下处理34 min后,可有效去除有机物,效果相比不添加过氧化氢时有明显的提高。Wang等^[17]在126℃下使用过氧化氢和过硫酸钾作为氧化剂水热氧化处理蓝藻藻液30 min后,可回收90%以上的氮磷,液相产物可以用于培养微藻。

微藻对营养的利用可以从两个层面来论述,一个是营养物质形态方面,对于微藻来说使用小分子有机碳源、氮源培养更容易被利用^[18-19],而大分子难以被微藻利用且可能有抑制生长的作用,Misaki等^[20]发现培养基中腐殖酸含量过高时,会增加培养基的色度,影响光合作用;另一个是营养物质浓度方面,过高的总有机碳(TOC)可能抑制微藻的生长,进行稀释处理能够减轻抑制作用^[21],Wang等^[17]将水热氧化得到的液相产物稀释至TOC质量浓度为1 g/L,可显著优化微藻的生长情况和产油能力,产油量可超过BG11培养基。

脱水污泥产出稳定、量大、富含营养物质,具有作为微藻营养来源的潜力。而水热氧化法可以在相对低温的条件下快速、高效地提取污泥中的营养物质。微藻的生长对碳源、氮源等营养物质的形态和浓度有一定的要求。本文以脱水污泥作为预处理原料,选取产油量高且耐受能力强的斜生栅藻^[22-25]作为产油藻种,探究水热氧化对脱水污泥中营养物质的提取效果。通过稀释手段处理水热氧化的液相产物,利用从污泥中提取的氮磷培养斜生栅藻,得出最合适的产油方案。

1 试验材料与方法

1.1 污泥的来源和基础参数

脱水污泥取自南京市某污水厂,污泥含水率为

79.1%,污泥烘干后,TN和TP的质量分数分别为2.107%和1.972%,有机质的质量分数为47.77%,污泥样本保存于室温下。

1.2 水热氧化反应参数的确定

水热氧化处理过程为:将每100 g污泥与1 L氧化剂溶液混合于锥形瓶中,设置温度及时间后放入高压蒸汽锅中,反应结束后,对锥形瓶中固液混合物进行离心处理(转速为4 200 r/min,时间为6 min),弃残渣取清液。

为了获得最合适的水热氧化反应条件,首先设置氧化剂浓度为0.05 mol/L,反应时间为30 min,选取过氧化氢和过硫酸钾两种氧化剂,根据Wang等^[17]在蓝藻藻浆上应用水热氧化的研究,温度分别设定为105℃、115℃、121℃和126℃,测试氧化剂种类和反应温度的影响。

根据所得氮、磷提取率结果确定合适的氧化剂和温度,测试氧化剂用量和反应时间的影响,将氧化剂质量浓度分别设定为0.01 mol/L、0.05 mol/L、0.1 mol/L和0.2 mol/L,反应时间分别设定为15 min、30 min、60 min和90 min。氮、磷提取率计算公式为

$$E_N = \frac{\rho_{TN}}{\rho_w w_{TN} k} \times 100\% \quad (1)$$

$$E_P = \frac{\rho_{TP}}{\rho_w w_{TP} k} \times 100\% \quad (2)$$

式中: E_N 和 E_P 分别为氮、磷提取率,%; ρ_{TN} 和 ρ_{TP} 分别为离心后清液中TN、TP质量浓度,mg/L; ρ_w 为反应前污泥的质量浓度, $\rho_w = 100$ g/L; w_{TN} 为干污泥中TN的质量分数, $w_{TN} = 2.107\%$; w_{TP} 为干污泥中TP的质量分数, $w_{TP} = 1.972\%$; k 为污泥含固率, $k = 20.9\%$ 。

1.3 培养基的制备

在测得最合适的反应条件下进行水热氧化。为满足栅藻生长的要求,用HCl和NaOH稀溶液,将培养基pH值调节至7.5左右。调节pH值后会有大量腐殖酸沉淀析出,使用0.45 μm玻璃纤维滤膜抽滤去除。调节pH值并去除沉淀后,使用蒸馏水将培养基分别稀释3、5和10倍,与未稀释的培养基结果对比,以观察稀释对栅藻生长和产油的影响。对照组培养基选用BG11,配制方法参考Hamouda等^[26]的研究。

1.4 藻种来源和培养环境

斜生栅藻藻种来自中科院的淡水藻种库(编号FACHB-416)。藻种保存于BG11培养基中,pH值不低于7.5,温度为(25 ± 1)℃,光照强度为2 500 lx,光暗循环交替时间为12 h,将锥形瓶每天

摇动2次或3次。

试验前使用高压蒸汽锅对所需的培养基进行灭菌,冷却后进行接种。接种初始藻细胞密度为40万个/mL,培养的光照强度为4500 lx,其他条件与保存藻种时一样。

1.5 藻细胞的计数及比生长速率的计算

栅藻生物量计数使用血小球计数板计数法。显微镜(Olympus CX31)放大倍数为400倍。连续重复3次计数,如果差别小于10%,取平均值为藻细胞密度数值,否则重新进行计数。培养到达对数期时计算比生长速率:

$$\mu = (\ln N_2 - \ln N_1)/t \quad (3)$$

式中: μ 为比生长速率, d⁻¹; N_2 和 N_1 分别为对数期和培养初始的藻细胞密度,万个/mL; t 为培养到达对数期时的天数,d。

1.6 培养基中营养成分质量浓度测定及利用率计算

每次取5 mL藻液,以4200 r/min转速离心处理6 min,取上清液。使用过硫酸钾在高压蒸汽锅中对上清液进行消解后,用分光光度计(Shimadzu UV-2450)测定TN、TP的质量浓度,测定方法参考Ebina等^[27]的方法,使用TOC分析仪(Shimadzu TOC-V)测定TOC。硝氮和氨氮的测定分别参考HJ/T 346—2007《水质 硝酸盐氮的测定 紫外分光光度法(试行)》和HJ 535—2009《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》。营养成分利用率计算公式为

$$U = \frac{\rho_s - \rho_e}{\rho_s} \times 100\% \quad (4)$$

式中: U 为营养成分利用率,%; ρ_s 、 ρ_e 分别为培养初始和结束时营养成分的质量浓度,mg/L。

1.7 藻产量及含油率的测定

培养达到稳定期后,将所有藻液进行离心,下层固体即为藻细胞生物质,对其进行冷冻干燥,干燥至恒重后,刮取所有干藻进行称重,为最终藻干重,单位体积藻液提取出的藻干重即为藻产量。干藻置于4℃冰箱内保存待用。

油脂提取参照Bligh等^[28]的方法,具体操作为①称取约100 mg干藻,记录质量;量取4 mL氯仿、8 mL甲醇,在50 mL离心管中与干藻混匀,25℃下使用40 kHz超声处理60 min;进行6 min的离心分离处理,转速为1万r/min;使用0.45 μm滤膜抽滤上清液,滤液倒入新的50 mL离心管中;剩余的藻渣按照上述步骤萃取数次,将各次所得滤液混合。②向混合滤液中加入16 mL质量分数为5%的NaCl溶液,于分液漏斗中充分摇匀后,静置待其分层;将下层溶液释放于圆底烧瓶中,加入适量氯仿,用旋转蒸发仪对溶液进行浓缩。③取4 mL玻璃瓶,称量并记录质

量;将浓缩后的液相产物全部转移到玻璃瓶中,在45℃下用氮吹仪将玻璃瓶吹至恒重,此时玻璃瓶质量减去空玻璃瓶质量即为萃取出的油脂质量。

含油率和油脂产量计算公式为

$$P = \frac{m_o}{m_a} \times 100\% \quad (5)$$

$$W = PW_a \quad (6)$$

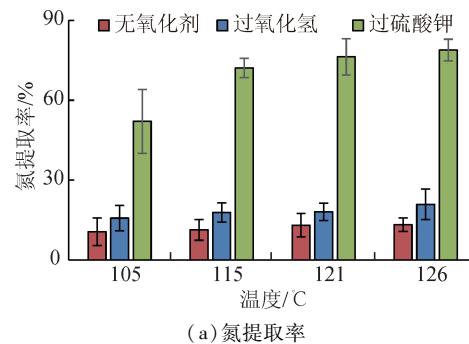
式中: P 为含油率,%; m_o 为萃取出的油脂质量,mg; m_a 为称取干藻质量,mg; W 为产油量,g/L; W_a 为藻产量,g/L。

2 结果与分析

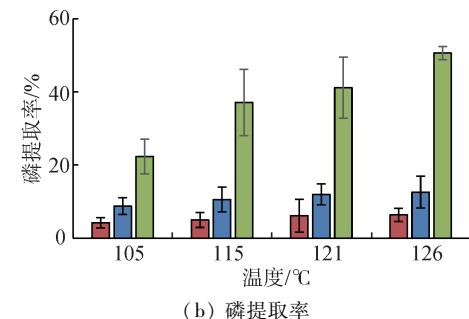
2.1 试验参数的比较

2.1.1 氧化剂种类和温度对氮、磷提取率的影响

选取过氧化氢和过硫酸钾两种氧化剂,分别在105℃、115℃、121℃和126℃下进行测试,氧化剂浓度为0.05 mol/L,氧化时间为30 min,并设置无氧化剂组为对照组。图1显示了不同温度下不同氧化剂对氮、磷提取率的影响。可以看出,在试验设计的温度范围内,3组中氮、磷提取率均随温度升高而上升。不添加氧化剂时氮、磷的提取率比较低,氮、磷提取率最高分别约为13%和6%;使用过氧化氢氧化剂后,提取率略有提高,氮、磷提取率最高分别约为21%和13%;使用过硫酸钾氧化剂后,提取率明显高于另外两组,氮、磷提取率最高分别约为80%和50%。因此在后续测定反应时间和氧化剂浓度的试验中选取过硫酸钾为氧化剂,温度为126℃。



(a) 氮提取率



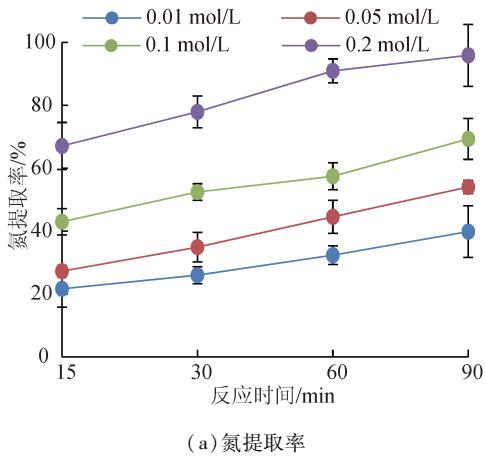
(b) 磷提取率

图1 温度与氧化剂对氮、磷提取率的影响

Fig. 1 Influences of temperature and oxidants on extraction rates of nitrogen and phosphorus

2.1.2 氧化剂浓度和反应时间对氮、磷提取率的影响

设置了4种过硫酸钾浓度,分别为0.01 mol/L、0.05 mol/L、0.1 mol/L和0.2 mol/L,在126℃下分别反应15 min、30 min、60 min和90 min。图2显示不同过硫酸钾浓度、不同反应时间得到的氮、磷提取率。从图2可以看出,氮、磷提取率与氧化剂浓度和反应时间均呈正相关关系,与反应时间相比,氧化剂浓度的影响更为显著。在过硫酸钾量浓度为0.2 mol/L,反应时间为90 min的条件下,氮、磷提取率均可达到95%;但在过硫酸钾浓度为0.2 mol/L,反应时间为60 min的条件下,氮、磷提取率可达到90%左右,考虑到能量投入和工艺的效率,后续培养栅藻的试验中以此作为反应条件进行培养基的制备。



(a) 氮提取率

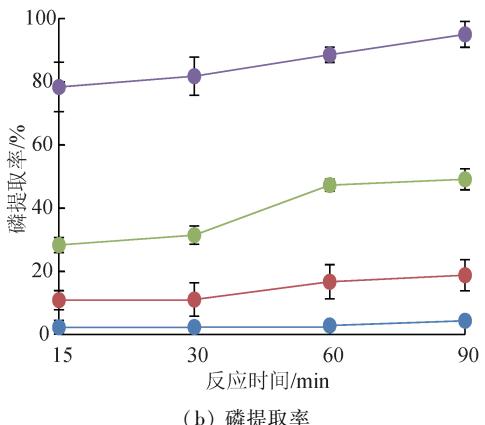


图2 过硫酸钾量浓度和反应时间对氮、磷提取率的影响

Fig. 2 Influences of potassium persulfate concentration and reaction time on extraction rates of nitrogen and phosphorus

2.2 结果分析

2.2.1 栅藻的生长曲线

使用由污泥水热氧化处理液制成的培养基对栅藻进行培养,培养基分为4种稀释倍数:未稀释、稀释3倍、稀释5倍和稀释10倍,使用BG11培养基作为对照组。根据培养结果绘制的藻细胞密度变化曲线,如图3所示。结果显示,稀释倍数在10倍以内

时,藻细胞密度随着稀释倍数的增加而升高,实验组和对照组均在22 d左右达到稳定期。稀释10倍的培养基在达到稳定期时藻细胞密度超过600万个/mL,接近BG11的水平。根据生长曲线计算到达对数期的比生长速率,BG11培养的栅藻平均比生长率为0.147 d⁻¹,未稀释、稀释3倍、稀释5倍、稀释10倍的污泥水热氧化处理液培养的栅藻平均比生长率分别为0.007 d⁻¹、0.058 d⁻¹、0.103 d⁻¹和0.150 d⁻¹,在试验设计的稀释倍数范围内,比生长率随着稀释倍数的增大而增大,稀释10倍时略高于BG11。

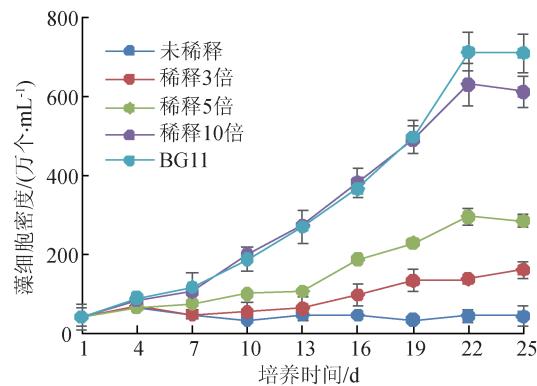


图3 不同培养基中栅藻生长曲线

Fig. 3 Growth curves of *Scenedesmus obliquus* in different culture media

2.2.2 栅藻的藻产量、含油率和产油量

将培养得到的栅藻进行干燥,并通过有机溶剂萃取其中的油脂,得到的藻产量、含油率和产油量如图4所示。由于藻细胞粒径的差异,藻产量的变化规律并不和藻细胞密度一样随着稀释倍数升高而升高,而是在稀释3倍时最高;含油率在未稀释和稀释3倍、稀释5倍时随着稀释倍数升高而降低,但在稀释10倍时含油率反而最高;各组最终的产油量均接近或超过BG11,在稀释10倍时达到最高,为0.137 g/L,与BG11相比提高了63%。

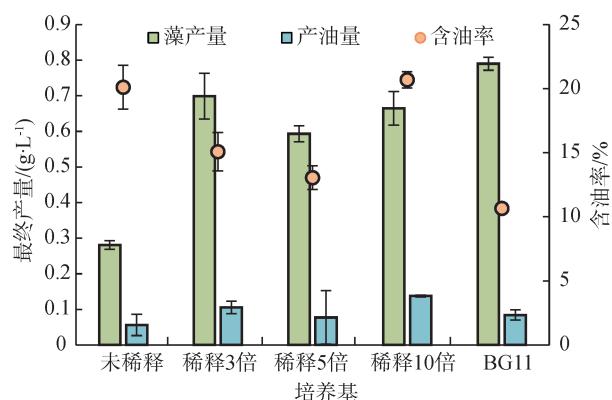


图4 不同培养基中栅藻藻产量、含油率和产油量

Fig. 4 Algae yield, oil content, and oil yield of *Scenedesmus obliquus* in different culture media

2.2.3 栅藻对培养基中营养成分的利用

培养基初始营养成分质量浓度如表 1 所示,各稀释组营养成分质量浓度为未稀释组营养成分质量浓度除以相应的稀释倍数。根据测定的培养过程中各组培养基内营养成分的变化情况,分别计算各组中营养成分的利用率,结果如图 5 所示。BG11 中营养成分的利用率(不含氨氮和 TOC)均超过其他试验组,可达到 90% 以上。污泥水热氧化处理液稀释后,所有组均显示 TN、TP 和氨氮的利用率增加,且稀释倍数越高,利用率越高。TOC 利用率与稀释倍数呈负相关关系,稀释倍数越高,利用率越低。而硝氮的利用率受稀释倍数的影响并不明显。

表 1 培养基初始营养成分质量浓度 单位: mg/L

Table 1 Initial nutrient mass concentrations in different culture media unit: mg/L

培养基	TOC	TN	TP	氨氮	硝氮
未稀释	397.61	309.72	8.28	151.92	160.05
BG11	0	247.21	7.31	0	247.21

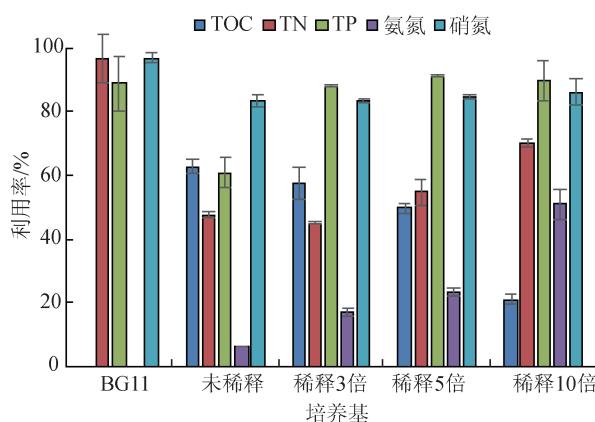


图 5 不同培养基的营养成分利用率

Fig. 5 Nutrient utilization rates of different culture media

2.3 讨论

2.3.1 水热氧化回收污泥氮磷的可行性

污泥絮团在水热环境下,絮体内部结构被破坏,胞外聚合物发生水解,絮体中微生物细胞结构受到破坏^[29-30],微生物细胞中大量氮、磷、有机物等营养物质释放到液相中来^[31],此外,絮团内部及胞外聚合物中富含的有机物^[32]大分子结构也会被高温破坏,分解为小分子形态,溶解于液相中。本试验中选取的水热温度相对较低,破碎细胞结构和分解大分子的作用较为有限,因此在低氧化剂浓度下氮、磷的提取效果不明显。而过硫酸钾在水热条件下被活化^[33],生成的硫酸根自由基具有较强的氧化性,且产生的速率远高于室温情况^[34-35]。硫酸根自由基能有效地破坏污泥絮体中微生物的细胞结构,并将

大分子有机物转化为小分子形态,使污泥中的营养物质溶解于液相产物中。

水热处理和化学氧化剂的联合作用能够破坏污泥中微生物的细胞结构,释放其中的氮、磷、有机物等营养物质,并利用氧化剂产生的自由基氧化这些营养物质,破坏其大分子结构,将其转化为小分子形态或无机形态,从而快速、高效地从污泥中提取养分。在 126℃、反应时间 60 min、氧化剂浓度为 0.2 mol/L 的条件下,氮、磷的提取率可达 90%,这与 Wang 等^[17]的研究结果相似,说明水热氧化可以高效地从污泥中以液相产物的形式回收氮磷。

2.3.2 稀释对栅藻生长和产油的影响

通过水热氧化处理污泥,得到了含有高浓度营养成分的培养基,各营养成分的质量浓度均可接近或超过 BG11 的水平。但是直接用未稀释的培养基培养微藻效果并不好。

微藻对 TOC 具有明显的耐受阈值,在 TOC 质量浓度超过 1 100 mg/L 时,微藻的生长发育会遭到显著的抑制^[36],因此,未稀释的原始培养基中过高的 TOC 水平可能阻碍栅藻的生长。未稀释的培养基较高的色度^[20]也会影响栅藻的光合作用,从而抑制栅藻生长。此外,微藻对于重金属离子十分敏感,光合作用很大程度上会受到重金属的抑制^[37-38];酚类、抗生素类和某些有机酸也会对微藻产生化感作用,抑制微藻的代谢^[39-40]。因此,污泥中含有的重金属等其他有害物质也可能进入培养基,对栅藻产生毒害作用。

通过稀释污泥水热氧化处理液降低了各种对栅藻生长存在不利影响的组分浓度,从而减轻了对栅藻生长的抑制效果,提高了栅藻对各类营养成分的利用率,促进栅藻的生长。经稀释后,虽然各类营养成分浓度有所降低,但藻细胞密度和产油量在稀释 10 倍时仍可接近或超过 BG11,说明和无机培养基相比,有机态的培养基更适宜栅藻的生长和产油,且在本文的稀释倍数范围内,有毒物质含量的降低对于栅藻生长的促进作用远高于营养物质浓度降低对栅藻生长的不利影响。如果继续加大稀释倍数,可以降低有害物质的浓度,但营养物质浓度也会进一步降低,因此,稀释倍数最合适的区间尚需进一步研究。

3 结论

a. 通过水热氧化从污泥中成功回收了 90% 以上的氮、磷营养物质,并且获得了相对合适的水热氧化处理参数:温度为 126℃、反应时间为 60 min、氧化

剂过硫酸钾量浓度为 0.2 mol/L。

b. 水热氧化处理液作为培养基直接用于培养斜生栅藻,培养效果不理想,藻细胞密度和营养成分利用率都比较低。但通过稀释处理可以降低培养基中有害物质的浓度,使栅藻更容易利用其中的营养成分,促进栅藻生长和产油,得到较高的产油量。

c. 与 BG11 培养出的栅藻的产油量相比,使用稀释 10 倍的污泥氧化液培养栅藻,得到的产油量提高了 63%。

参考文献:

- [1] BASHA S A, GOPAL K R, JEBARAJ S. A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(6/7) :1628-1634.
- [2] DOUŠKOVÁ I, KAŠTÁNEK F, MALÉTEROVÁY, et al. Utilization of distillery stillage for energy generation and concurrent production of valuable microalgal biomass in the sequence: biogas-cogeneration-microalgae-products [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51 (3) : 606-611.
- [3] CHISTIY. Biodiesel from microalgae [J]. Biotechnology Advances, 2007, 25 (3) :294-306.
- [4] YANG Jia, XU Ming, ZHANG Xuezhi, et al. Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance [J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (1) :159-165.
- [5] LI Kun, LIU Qiang, FANG Fan, et al. Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery; a review [J]. Bioresource Technology, 2019, 291 :121934..
- [6] CAI Ting, PARK S Y, LI Yebo. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospects [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19 :360-369.
- [7] SINGH M, REYNOLDS D L, DAS KC. Microalgal system for treatment of effluent from poultry litter anaerobic digestion[J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (23) : 10841-10848.
- [8] 王涛. 我国城镇污泥营养成分与重金属含量分析[J]. 中国环保产业, 2015 (4) :42-45. (WANG Tao. Analysis on urban sludge nutrition element and heavy metal content in China [J]. China Environmental Protection Industry, 2015 (4) :42-45. (in Chinese))
- [9] RAMSUNDARP, GULDHE A, SINGH P, et al. Evaluation of waste activated sludge as a potential nutrient source for cultivation of *Chlorella sorokiniana* [J]. Algal Research, 2017, 28 :108-117.
- [10] BARBERA E, BERTUCCO A, KUMAR S. Nutrients recovery and recycling in algae processing for biofuels production [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90 :28-42.
- [11] KIM T H, LEE S R, NAM Y K, et al. Disintegration of excess activated sludge by hydrogen peroxide oxidation [J]. Desalination, 2009, 246 (1/2/3) :275-284.
- [12] XIE Pengchao, MA Jun, WEI Liu, et al. Removal of 2-MIB and geosmin using UV/persulfate: contributions of hydroxyl and sulfate radicals [J]. Water Research, 2015, 69 :223-233.
- [13] SHANABLEH A. Production of useful organic matter from sludge using hydrothermal treatment [J]. Water Research, 2000, 34 (3) :945-951.
- [14] AIDA T M, NONAKA T, FUKUDA S, et al. Nutrient recovery from municipal sludge for microalgae cultivation with two-step hydrothermal liquefaction [J]. Algal Research, 2016, 18 :61-68.
- [15] ZHANG Yifan, ZHANG Shouyu, LI Hao, et al. Treatment of municipal sludge by hydrothermal oxidation process with H₂O₂ [J]. Chemosphere, 2020, 257 :127140.
- [16] ABELLEIRA J, PÉREZ-ELVIRA S I, SÁNCHEZ-ONETO J, et al. Advanced thermal hydrolysis of secondary sewage sludge:a novel process combining thermal hydrolysis and hydrogen peroxide addition [J]. Resources Conservation and Recycling, 2012, 59 :52-57.
- [17] WANG Ruochen, ZHU Wei, HU Siyuan, et al. Hydrothermal pretreatment of salvaged cyanobacteria and use of pretreated medium for cultivating *Scenedesmus obliquus* [J]. Bioresource Technology, 2019, 294 :122120.
- [18] MOON M, KIM C W, PARK W K, et al. Mixotrophic growth with acetate or volatile fatty acids maximizes growth and lipid production in *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. Algal Research, 2013, 2 (4) :352-357.
- [19] LI Xin, HU Hongying, GAN Ke, et al. Growth and nutrient removal properties of a freshwater microalga *Scenedesmus sp.* LX1 under different kinds of nitrogen sources [J]. Ecological Engineering, 2010, 36 (4) :379-381.
- [20] MISAKI K, MORITA Y, KOBAYASHI K, et al. Evaluation of algal photosynthesis inhibition activity for dissolved organic matter with the consideration of inorganic and coloring constituents [J]. Chemosphere, 2019, 224 : 333-342.
- [21] WANG Haiying, XIONG Hairong, HUI Zhenglong, et al. Mixotrophic cultivation of *Chlorella pyrenoidosa* with diluted primary piggy wastewater to produce lipids [J]. Bioresource Technology, 2012, 104 :215-220.
- [22] GODOS I D, VARGAS V A, SAÚL B, et al. A comparative evaluation of microalgae for the degradation of piggy wastewater under photosynthetic oxygenation [J]. Bioresource Technology, 2010, 101 (14) :5150-5158.
- [23] 赵昕宇,廖利民,成杰,等. 基于斜生栅藻培养的城市生

- 活废水资源化利用研究 [J]. 水资源保护, 2016, 32 (3) :44-49. (ZHAO Xinyu, LIAO Limin, CHENG Jie, et al. Resource utilization of urban sewage water based on cultivation of *Scenedesmus obliquas* [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3) :44-49. (in Chinese))
- [24] 赵秀侠, 杨坤, 方婷, 等. 3 种微藻在龟鳖养殖废水中的生长与脱氮除磷特性 [J]. 水资源保护, 2018, 34 (1) : 83-87. (ZHAO Xiuxia, YANG Kun, FANG Ting, et al. Growth feature and nitrogen and phosphorus removal characteristics of three microalgae in turtle breeding wastewater [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (1) :83-87. (in Chinese))
- [25] GUPTA S, PANDEY R A, PAWAR S B. Microalgal bioremediation of food-processing industrial wastewater under mixotrophic conditions: kinetics and scale-up approach [J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2016, 10(4) :499-508.
- [26] HAMOUDA R A, ABOU-EL-SOUOD G W. Influence of various concentrations of phosphorus on the antibacterial, antioxidant and bioactive components of green microalgae *Scenedesmus obliquus* [J]. International Journal of Pharmacology, 2018, 14(1) :99-107.
- [27] EBINA J, TSUTSUI T, SHIRAI T. Simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in water using peroxodisulfate oxidation [J]. Water Research, 1983, 17(12) : 1721-1726.
- [28] BLIGH E G, DYER W J. A rapid method of total lipid extraction and purification [J]. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology, 1959, 37(8) :911-917.
- [29] MA Honglei, CHI Yong, YAN Jianhua, et al. Experimental study on thermal hydrolysis and dewatering characteristics of mechanically dewatered sewage sludge [J]. Drying Technology, 2011, 29(14) :1741-1747.
- [30] SONG H W, PARK K J, HAN S K, et al. Thermal conductivity characteristics of dewatered sewage sludge by thermal hydrolysis reaction [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2014, 64 (12) : 1384-1389.
- [31] 徐琼. 水热法联合竹粉对污泥脱水性能影响的研究 [D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2018.
- [32] URBAIN V, BLOCK J C, MANEM J. Bioflocculation in activated sludge: an analytic approach [J]. Water Research, 1993, 27(5) :829-838.
- [33] TABRIZI G B, MEHRVAR M. Integration of advanced oxidation technologies and biological processes: recent developments, trends, and advances [J]. Journal of Environmental Science and Health: Part A, 2004, 39 (11/12) :3029-3081.
- [34] LIANG C, LEE I L, HSU I Y, et al. Persulfate oxidation of trichloroethylene with and without iron activation in porous media [J]. Chemosphere, 2008, 70(3) :426-435.
- [35] 郭国俊. 过硫酸钾化学氧化处理污泥及含磷农药的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [36] TRAVIESO L, BENÍTEZ F, SÁNCHEZ E, et al. Batch mixed culture of *Chlorella vulgaris* using settled and diluted piggery waste [J]. Ecological Engineering, 2006, 28(2) :158-165.
- [37] PLEKHANOV S E, CHEMERIS Y K. Early toxic effect of zinc, cobalt, and cadmium on photosynthetic activity of green alga *Chlorella pyrenoidosa* Chick S-39 [J]. Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences, 2003, 30 (5) :506-511.
- [38] 邢丽贞, 李飞, 张向阳, 等. 固定化微藻在解决环境问题方面的应用 [J]. 水资源保护, 2006, 22 (5) :9-12. (XING Lizhen, LI Fei, ZHANG Xiangyang, et al. Application of immobilized microalgae in settling environmental problems [J]. Water Resources Protection, 2006, 22(5) :9-12. (in Chinese))
- [39] 吴珊, 李孝红, 杨龙. 邻苯二酚和邻苯三酚对藻类化感作用的试验 [J]. 水资源保护, 2011, 27 (3) :69-71. (WU Shan, LI Xiaohong, YANG Long. Experimental study of effect of o-dihydroxybenzene and pyrogallol on algae allelopathy [J]. Water Resources Protection, 2011, 27 (3) :69-71. (in Chinese))
- [40] 关英红, 马军. 富营养化水体中微藻的生物控制技术发展动态 [J]. 水资源保护, 2008, 24 (6) :1-6. (GUAN Yinghong, MA Jun. Biological methods of controlling micro-algae in eutrophic water [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(6) :1-6. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-11-01 编辑: 施业)

(上接第 79 页)

- [16] XIE L, LIU H, PENG M. The effect of wave-current interaction on the storm surge and inundation in Charleston Harbor during Hurricane Hugo 1989 [J]. Ocean Modelling, 2008, 20(3) :252-269.
- [17] 李健. 南海北部台风风暴潮模拟研究与机理探索 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
- [18] 冯士猝. 风暴潮导论 [M]. 北京: 科学出版社, 1982.

(收稿日期: 2021-06-07 编辑: 俞云利)