

一种硅藻群落水华原位修复水玻璃旧砂堆积地方法

汪华方, 张 武, 汪泉润, 高 翔, 卢记军

(武汉纺织大学 机械工程与自动化学院, 湖北武汉 430073)

摘要: 水玻璃旧砂排放量巨大, 但是再生成本较高, 导致很多工厂直接将旧砂排放在山谷或者深沟河道中, 因旧砂表面富含碱性物质, 极易污染堆放地环境。本文以修复旧砂堆放地为目的, 设计了一种硅藻群落水华原位再生水玻璃旧砂的方法, 介绍了硅藻品种的选用原则和培养基的改造措施, 研究了容易发生水华季节条件下的硅藻群落生长的光照时间、硅藻初始加入量、培养时间等对生物原位再生效果的影响。结果表明, 在培养两周后, 该硅藻群落发生了水华, 水体最下层为再生砂和极少量活性不足的藻体, 中间层为干净的水体, 最上层为漂浮的对环境无毒害的水华硅藻, 三层自然分层、分离; 水玻璃旧砂中的硅酸根离子去除率为49.1%, 钠离子的去除率为30.1%。

关键词: 水玻璃旧砂; 原位再生; 硅藻群落水华

作者简介:

汪华方(1979-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为水玻璃砂绿色铸造和固体废弃物处理。电话: 027-59367589, E-mail: wanghfust@163.com

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

06-0706-06

基金项目:

国家自然科学基金青年基金项目(51405348); 国家自然科学基金面上项目(51575405); 湖北省教育厅重点基金(D20171604); 武汉市青年科技晨光计划(2017050304010323); 湖北省科技厅面上项目(2018CFB673)。

收稿日期:

2020-12-07 收到初稿,

2021-01-16 收到修订稿。

铸造业是关系国计民生的重要行业, 是制造业的重要组成部分。水玻璃砂型铸造因其环境友好的特点, 被专家们认为是最有可能实现清洁生产的绿色铸造工艺。水玻璃(硅酸钠)长期使用对人体无害, 用水玻璃砂造型, 价格便宜、流动性好、硬化快, 型(芯)的尺寸精度高, 在混砂、造型、浇注和落砂过程中均无刺激性气味或有毒气体产生, 也无黑色污染^[1]。水玻璃砂工艺自20世纪60年代经前苏联传入我国后, 得到了广泛的应用, 目前中国约有70%的铸钢件采用了水玻璃砂铸造工艺, 随着国家对环保的日益重视, 水玻璃砂的使用量还将进一步上升^[2]。

但是, 水玻璃砂的缺点也同样不可忽视: 旧砂溃散性差, 落砂异常困难; 水玻璃旧砂再生回用率低, 许多技术实力较差的工厂直接将废砂丢弃在山谷、深沟河道中, 旧砂中的可溶性碱性水玻璃等物质破坏了植被, 如不及时处理, 旧砂中不断释放出的碱性物质还会污染地表水和地下水, 致使本来极具环保优势的水玻璃砂技术反倒成了污染环境的一个因素, 因此水玻璃的使用成了环境保护的一把双刃剑。近年来, 国内每年产生的水玻璃废砂约有1 000万吨, 巨大的旧砂排放量造成了严重的环境问题^[3]。

水玻璃旧砂现有再生方法均存在不足, 干法再生虽然系统简单、投资较少, 但干法再生砂的脱膜率低(5%~15%)、质量较差(其再粘结强度较低、可使用时间短), 一般只能做背砂使用, 且干法再生会产生大量的碱性粉尘; 湿法再生质量高, 基本接近新砂的性能指标, 再生砂可100%的做面砂或单一砂使用, 但湿法再生系统组成较为复杂、湿砂需烘干、投资较大, 其污水处理、污泥处理等依然是难题。随着我国一系列矿山开采法律的完善以及对环境保护的要求, 优质硅砂越来越成为稀缺资源。如果能够大量遗弃在山谷、河流中的水玻璃旧砂利用起来, 采用一定的手段将其再生, 可达到修复堆积场地和再生旧砂的双重目的。

1 原位修复水玻璃旧砂堆积地的原理与硅藻群落藻种选择

1.1 硅藻群落水华原位修复水玻璃旧砂堆积地的原理与工艺图

本论文提出了一种硅藻群落水华原位修复水玻璃旧砂堆积地的方法。以旧砂存放地（山谷、河流等容易形成封闭场地）为基础构筑营养池，向其中注入富含微量元素的地下水，将旧砂存放地改造为支持硅藻生长不可或缺的“硅源”，再投入一定浓度的硅藻群落和极少的营养物质，利用太阳光大规模培养硅藻直至水华，营养池的表层水华藻体、中层水、下层砂（含极少量藻体）等三层自然分离；旧砂中的硅酸钠粘结剂被大量固定到对环境无毒害的硅藻体内，硅藻生长代谢出可促进残留水玻璃脱膜溶解的多糖等表面活性剂物质，保障了“硅源”的供给（图1）。

本文设计了简易式水玻璃旧砂原位再生工艺（图2），较高硅酸钠浓度的水玻璃旧砂池通过管道不断的给硅藻群落培养池提供硅源物质，在太阳光、硅源、氮源、磷源、钾源等的共同作用下，硅藻群落通过光合作用大量消耗残留在水玻璃旧砂表面的硅酸钠，使得碱性残留粘结剂不再危害堆放地，实现了旧砂的“原位再生”；生物再生砂没有经历擦洗过程中的机械摩擦碰撞，因而保持了和新砂基本一致的形貌、级配、成分分布，性能和新砂一致。

1.2 适宜于生物原位处理的水华硅藻藻种选择

生物处理过程一般都很缓慢，加快回收过程必须要选择容易发生水华的硅藻藻种。生物学上把大自然水体中由微小浮游生物大量繁殖、高密度、成团、成块漂浮在水体表面，使水体呈现优势种的蓝绿色或赤红色的自然现象，称为水华。在一定的条件下（水

体内富含氮、磷等营养物质，总磷量0.087 mg/L以上，总氮量0.78 mg/L以上；封闭性水体，水流速小于0.8 m/s；水温 > 10 ℃；光照水平高），硅藻很容易发生水华^[6-7]。

对比了容易发生水华硅藻品种的细胞大小和生活习性（表1），最后选择了直链藻、舟形藻、星杆藻、针杆藻等组成的硅藻群落作为研究对象，图3为这四种藻的显微图^[8-11]。这四种藻均属于水产养殖上有较大经济价值的优良工程藻种，可以作为育苗的良好饵料，同时亦可直接用硅肥等。

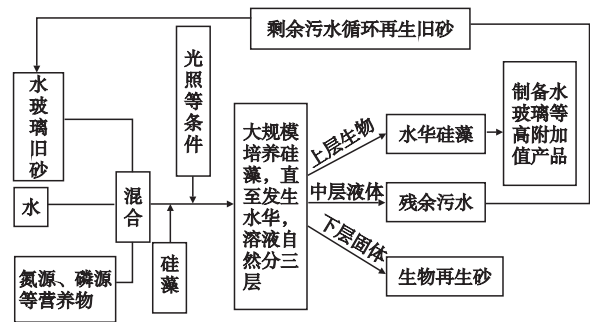


图1 硅藻群落水华原位修复水玻璃旧砂堆积地的原理

Fig. 1 Principle of in-situ storage area restoration of used sodium silicate sand by diatom community water bloom

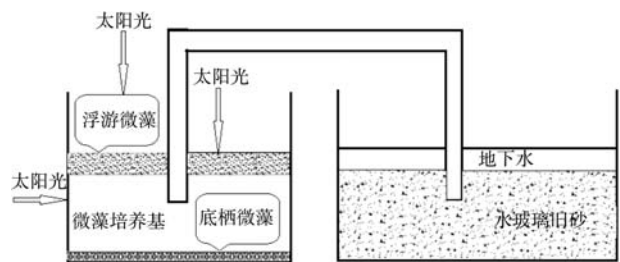


图2 简易式硅藻群落水华原位修复水玻璃旧砂堆积地工艺

Fig. 2 Simple process of in-situ storage area restoration of used sodium silicate sand by diatom community water bloom

表1 常见水华硅藻的生活习性和细胞形状对比

Table 1 Comparison of life characteristics and cell shape of common bloom diatoms

硅藻属	生活特性	细胞形状
直链藻属	圆球形或圆柱形丝状群	圆柱形，长约20 μm，浮游藻类
舟形藻属	具有鞭毛，能游动	细胞舟形至椭圆形，长约18.9 μm，浮游藻类
星杆藻属	链状、带状、螺旋状或星型群体	细胞呈棒状，两端异形，浮游藻类
针杆藻属	细胞单独生活，或簇生成射出状或扇状体	细胞细长，附着在其他植物或其他物体上，浮游藻类
骨条藻属	多细胞长链	小型藻，圆柱形，直径6~22 μm
根管藻属	单细胞或链状群体	小型藻，细胞细长而直，直径3~7 μm
角毛藻属	常为单细胞	小型藻，细胞宽为3.5~4.6 μm，长4.6~9.2 μm，角毛长20.7~34.5 μm
细柱藻属	链状群体	长圆柱形，直径8~12 μm，长31~130 μm
海链藻属	链状群体	小型藻，细胞壳环面八角形，壳面正圆形，直径12~43 μm
盒形藻属	链状群体，少数单细胞	细胞宽62~320 μm，高112~264 μm，高度比例变化很大
菱形藻属	链状群体，少数单细胞	小型藻，藻宽为2~3 μm，长12~23 μm，体型较小

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

硅藻活体由中国科学院水生生物研究所淡水藻库提供,改造后的藻体培养基(D1)如表2所示。硅源是水玻璃旧砂中的可溶性残留粘结剂;氮源改为尿素,因为原有的氮源(硝酸钠)会在再生体系中引入钠离子,影响了水玻璃再生砂性能;土壤提取液直接改为来源广泛、价格低廉的地下水,也能起到提供土壤中的微量元素的作用。

2.2 试验方法

采用上海美谱达仪器有限公司的V-1100D型分光光度计测定硅藻群落的生物量,用吸光度值表征硅藻群落的生物量;培养前后的培养基中钠离子和硅酸根离子的测定采用了GB/T 4209—2008国家标准。

3 结果分析

3.1 光照时间对水玻璃旧砂生物原位再生效果的影响

试验选定的时间为四月底到五月初春夏之交,天气预报为连续一周的晴天。文献研究表明,此环境下硅藻群落比较容易大规模生长而发生水华^[6-7]。在南北通透、有较大的采光面积的培养室,采用定时开关窗帘的方式分析了光照时间对微藻群落增值率(再生效果)的影响。图4a是硅藻群落不同光照时间下培养七天的生长曲线,这七天的温度为15~25℃,光照度5 000~15 000 lux。结果表明:随着光照时间的增加,硅藻群落的生长速度增加,当光照时间为每天14 h时,硅藻群落的生长迅速,且状态良好,硅藻群落生物量增加倍数可达初始量2.02倍。图4b是硅藻群落培养七天后不同光照时间下硅藻培养基中 Na^+ 、 SiO_3^{2-} 的降低率。由图可知,在光照时间为14 h/d时硅藻培养基中 Na^+ 、 SiO_3^{2-} 的含量降低的最多,其中 Na^+ 含量降低36.3%、 SiO_3^{2-} 含量降低46.0%。当光照时间超过14 h时,硅藻群落生长受到抑制,其生长速度逐渐减低。每天光照时间对硅藻群落的生长具有重要影响,当光照时间为14 h时硅藻群落光照充足光合作用效率最高,水玻璃砂的

再生效果最好。

3.2 硅藻初始生物量对水玻璃旧砂生物原位再生效果的影响

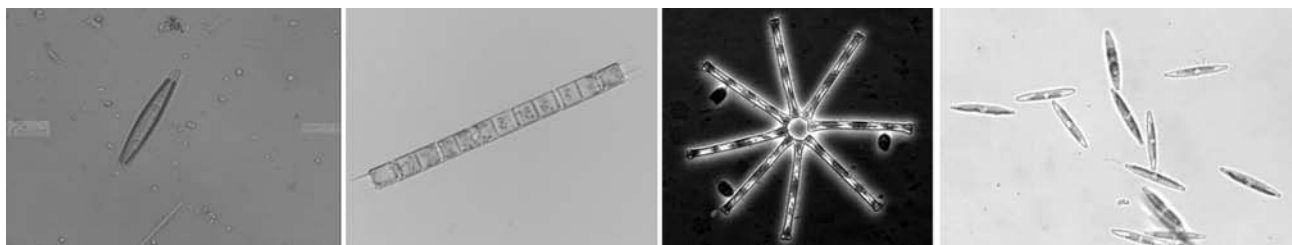
图5是硅藻群落不同初始加入量条件下的污水处理效果图。硅藻群落起始加入量占培养基的体积分别为10%、20%和30%。结果表明:随着硅藻加入量增加, Na^+ 、 SiO_3^{2-} 含量去除越来越大。对比10%的硅藻加入量,20%和30%的硅藻加入量分别增加了2倍和3倍,但是回收率的增加并没有达到2倍和3倍,说明在一定的空间内硅藻的增值有个限度,在空间和营养物质一定的情况下,起始量过多的硅藻生长会受到抑制,反而会降低污水处理效果。在硅藻的添加量很小的时候,一开始的增长速度比较慢,当达到一定的程度,硅藻

表2 D1培养基
Table 2 D1 culture medium

物质名称	浓度
尿素(替代硝酸钠)	0.04 g/L
K_2HPO_4	0.04 g/L
MgSO_4	0.07 g/L
CaCl_2	0.02 g/L
KH_2PO_4	0.08 g/L
MnSO_4	0.0002 g/L
柠檬酸铁	0.005 g/L
A5(表3)	1 mL
地下水(替代土壤提取液)	20 mL

表3 D1中A5成分组成
Table 3 A5 composition in D1

物质名称	浓度
H_3BO_3	2.86 g/Ld H_2O
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.86 g/Ld H_2O
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.39 g/Ld H_2O
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.08 g/Ld H_2O
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.22 g/Ld H_2O
$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.05 g/Ld H_2O



(a) 舟形藻

(b) 直链藻

(c) 星杆藻

(d) 针杆藻

图3 组成硅藻群落的四种浮游硅藻的显微照片

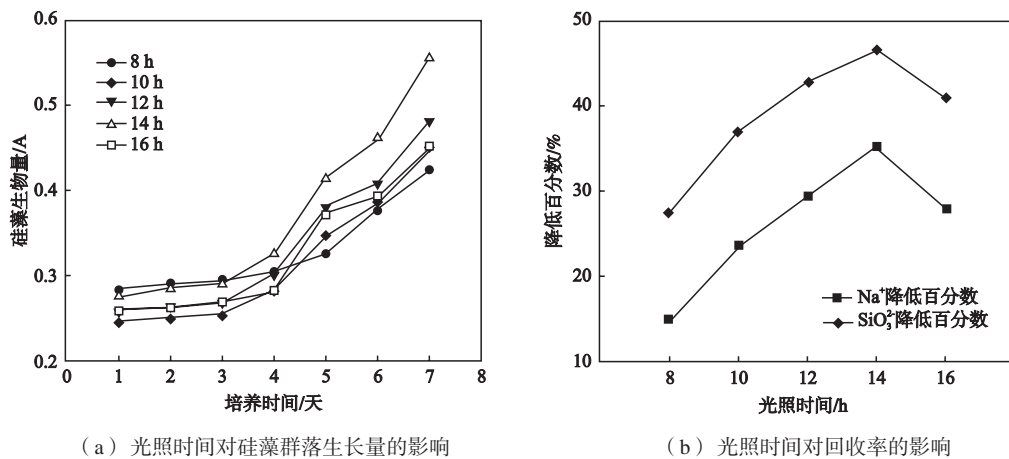
Fig. 3 Micrographs of four planktonic diatoms constituting diatom community

的增长速率得到了明显的提升；而随着生长空间的固定，种群内的竞争激烈，再加上所得的营养有限，生物的生长往往会受到生长空间以及种群内相互竞争的约束，生物的种群数量往往会达到一个最大值（ k 值）就不再增长。当生物种群数量达到了 k 值后，种群数量将会停止增长并在 k 值左右保持相对稳定，而且同一种群的 k 值也不是固定不变的，它随周围环境的变化而变化。所以添加的硅藻初始量并不是越多越好，添加的过多反而会造成硅藻的大量死亡，而添加的过少会造成硅藻一开始的增长速度增长缓慢，推荐以硅藻加入量以薄层刚好覆盖满容器底部为宜。

3.3 硅藻培养时间对水玻璃旧砂生物原位再生效果的影响

图6是培养时间对硅藻群落生长（再生效果）的影响图，可见随着处理时间的增加， Na^+ 、 SiO_3^{2-} 回收率增大。但是从图上可以看出，培养十天到二十天，

硅藻会生长很快，最后十天硅藻增值率变低，回收率的增加值较前十天要小，表明后十天内的硅藻增殖越来越慢。在培养两周后，水玻璃旧砂中的硅酸根离子去除率为49.1%，钠离子的去除率为30.1%。硅藻大量繁殖，原本只是在缸底的硅藻由于光合作用产生了氧气，氧气附着在藻体，带着藻体上浮到水面，最终大量藻体密集的铺满水面，发生了水华。最后结果是水体最下层为极少量光合作用不充足的藻体（底栖藻体），中间层为干净的水体，最上层是漂浮的水华硅藻，如图7b所示。水体下层是经过原位再生的水玻璃砂和极少量活性不足的藻体，最上层的水华硅藻可通过网眼较为密集和普通渔网打捞出来，打捞出来的水华硅藻无毒无味，湿态硅藻可直接用于鱼类的开口饵料，脱水干燥的藻体可用作燃料等。太阳光是藻体增殖、浮力增大的主要因素，也是藻、砂、水三者分离的基本动力。



(a) 光照时间对硅藻群落生长量的影响

(b) 光照时间对回收率的影响

图4 光照时间对硅藻群落生长量和回收效率的影响

Fig. 4 Effects of light time on growth and reclamation efficiency in diatom community

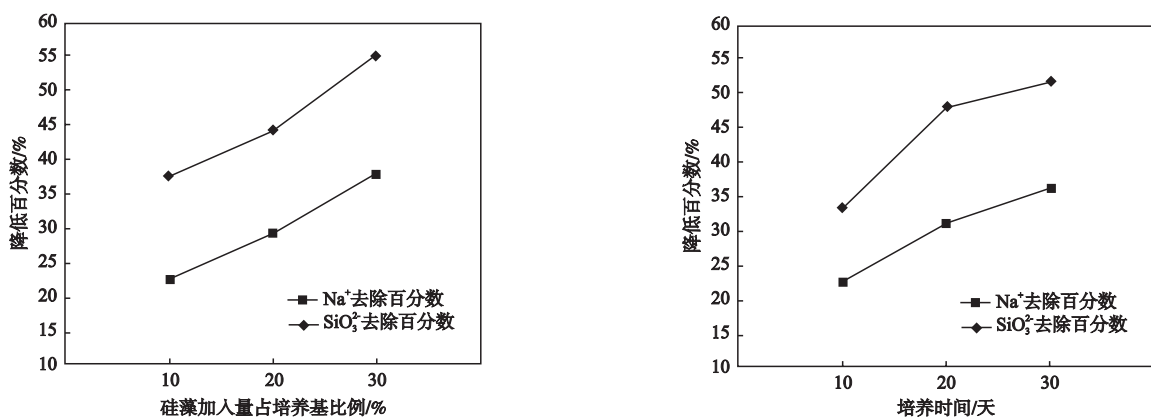
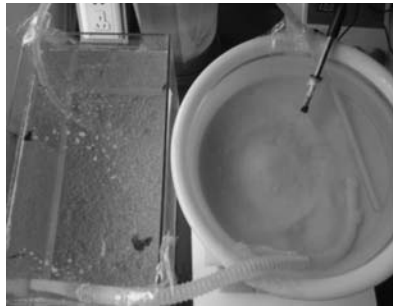


图5 硅藻群落不同初始加入量对再生效果的影响

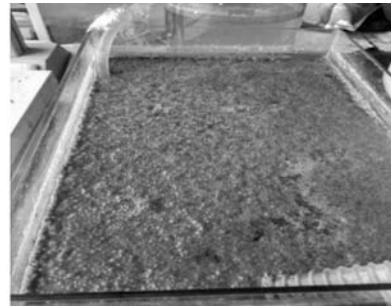
Fig. 5 Effect of initial addition amount of diatom community on reclamation

图6 硅藻群落不同培养时间对再生效率的影响

Fig. 6 Effect of different culture time on reclamation efficiency in diatom community



(a) 刚投入硅藻的培养池和“硅源池”



(b) 二周后发生水华的培养池

图7 培养二周的硅藻群落在简易式水华原位修复水玻璃旧砂堆积地设备中的对比

Fig. 7 Comparison of diatom community for two weeks of cultivation

4 结论

以修复旧砂堆放地为目的,设计了一种硅藻群落水华原位修复水玻璃旧砂堆积地的方法,选用了直链藻、舟形藻、星杆藻、针杆藻等组成的硅藻群落作为研究对象,以方便大规模培养为原则,研究了硅藻群落培养基的组分和配制比例,进而分析了夏初季节硅藻群落生长

的光照时间、初始加入量、培养时间等对水玻璃旧砂原位原位再生效果的影响。结果表明,在培养两周后,该硅藻群落发生了水华,水体最下层为再生砂和极少量活性不足的藻体,中间层为干净的水体,最上层漂浮的是无毒无味的水华硅藻;水玻璃旧砂中的硅酸根离子去除率为49.1%,钠离子的去除率为30.1%。

参考文献:

- [1] 李依依. 我国铸造技术的现状和发展对策 [J]. 中国科学院院刊, 2006 (5): 395-398.
- [2] WANG H F, FAN Z T, Y U S Q, et al. Wet reclamation of sodium silicate used sand and biological treatment of its wastewater by *Nitzschia palea* [J]. *China Foundry*, 2012, 9 (1): 34-38.
- [3] 胡贵钱, 王国强. 铸造业水玻璃自硬砂再生系统的污水处理 [J]. *工业安全与环保*, 1997 (12): 3-4, 14
- [4] 刘梅, 张宪孔. 谷皮菱形藻的耐盐适应性 [J]. *水生生物学报*, 1992 (2): 153-158.
- [5] 余少强, 樊自田, 汪华方. 硅藻处理水玻璃旧砂湿法再生污水的影响因素及效果 [J]. *铸造*, 2012, 61 (4): 412-417.
- [6] 李春青, 叶闽, 普红平. 汉江水华的影响因素分析及控制方法初探 [J]. *环境科学导刊*, 2007 (2): 26-28.
- [7] 杨霞, 杨正健, 马骏. 三峡水库香溪河库湾春季水华暴发藻类种源研究 [J]. *灾害与防治工程*, 2009 (2): 61-68.
- [8] 王超, 刘杨, 李新辉, 等. 基于文献计量学的直链藻属的研究进展 [J]. *生态学报*, 2016, 36 (16): 5276-5283.
- [9] 谭小力, 赵东华, 马忠岩, 等. 舟形藻生长、品质特性及转化筛选标记研究 [J]. *生物学杂志*, 2012, 29 (4): 1-4.
- [10] 王珺, 王永强, 陈国华, 等. 生态和营养条件对日本星杆藻生长的影响 [J]. *海洋渔业*, 2014, 36 (4): 329-334.
- [11] 薛迪, 解军, 周建仁, 等. 南水北调东线湖泊针杆藻属分布特征及其与环境因子的关系 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29 (11): 1600-1607.

A Method for In-Situ Storage Area Restoration of Used Sodium Silicate Sand by Diatom Community Water Bloom

WANG Hua-fang, ZHANG Wu, WANG Quan-run, GAO Xiang, LU Ji-jun

(School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan 430073, Hubei, China)

Abstract:

The emission of used sodium silicate sand is huge, but the cost of reclamation is high, so many factories directly discharge the used sand into the valley or deep channel. The used sand pollute the environment because the residual alkaline substances are rich in the surface. This study relates to a method for in-situ reclamation of used sodium silicate sand by diatom community water bloom, in which the selection principle of diatom species and the preparation of culture medium are introduced. The effects of lighting time, initial amount of diatom and culture time on the in-situ reclamation of diatom community under the condition of prone to water bloom were studied. The results showed that the diatom community had blooms after two weeks of cultivation, and the bottom layer in the water body was a small amount of algae with insufficient photosynthesis, the middle layer was clean water, and the top layer was floating diatom, and the three layers could be separated. The removal rate of silicate ion in the used sodium silicate sand was 49.1% and sodium ion was 30.1%.

Key words:

used sodium silicate sand; in-situ reclamation; diatom community water bloom
