(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 102701346 B
(45)授权公告日 2013.10.02

(21)申请号 201210158949.5

(22)申请日 2012.05.21

(73)专利权人 中国科学院生态环境研究中心
地址 100085 北京市海淀区区双清路 18 号

(72)发明人 曲久辉 马敏 刘锐平 刘会娟

(74)专利代理机构 上海智信专利代理有限公司 31002
代理人 李柏

(51)Int.Cl.
C02F 1/52(2006.01)
C02F 1/72(2006.01)

审查员 张飞飞

权利要求书1页 说明书6页

(54)发明名称

预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法

(57)摘要

本发明属于饮用水处理技术领域，特别涉及一种预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法。本发明针对湖泊、水库等地表水源富营养化污染，提出了一种依次投加预氧化剂与亚铁盐和铁盐等的方法，预氧化剂灭活藻细胞，而亚铁盐终止预氧化，以控制藻细胞内的有机物的继续释放，同时亚铁盐氧化生成的新生态三价铁及铁盐作为混凝剂；经预氧化的藻细胞的混凝得到强化。本发明主要应用于饮用水厂净化，也可应用于以景观水体回用为目标的景观水处理以及富营养化水体的水源预处理以抑制藻细胞生长。

CN 102701346 B

1. 一种预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法，其特征是，所述的方法包括以下步骤：

（1）将预氧化剂的水溶液与含藻水混合，对含藻水进行预氧化，以灭活藻细胞，其中预氧化剂与藻细胞的比例为 0.5 ～ 5×10^3 毫克的预氧化剂：10^8 ～ 5×10^9 个藻细胞；在灭活藻细胞的同时藻细胞内的有机物释放至水体中；

（2）向步骤（1）经过预氧化的含藻水中投加亚铁盐的水溶液和铁盐的水溶液，还原多余的预氧化剂，终止预氧化，以控制藻细胞内的有机物的继续释放，同时亚铁盐氧化生成的新生态三价铁及铁盐作为混凝剂共同发挥混凝作用，其中铁盐与亚铁盐的摩尔数比为 0< 摩尔数比≤ 1:1；通过沉降、过滤去除水中的藻细胞及由藻细胞内释放出的有机物，得到藻细胞及有机物含量降低的水；

以亚铁计，所述的亚铁盐与预氧化的含藻水中的藻细胞的比例为 2 ～ 20 毫克的亚铁盐：10^8 ～ 5×10^9 个藻细胞。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征是：在加入亚铁盐的水溶液和加入铁盐的水溶液的含藻水中加入钙盐的水溶液、镁盐的水溶液或它们的混合物；其中：钙盐的摩尔数与亚铁盐的摩尔数的比为 0 ～ 1:1，镁盐的摩尔数与亚铁盐的摩尔数的比为 0 ～ 1:1。

3. 根据权利要求 2 所述的方法，其特征是：所述的钙盐选自氯化钙、硫酸钙和硝酸钙中的一种或几种。

4. 根据权利要求 2 所述的方法，其特征是：所述的镁盐选自氯化镁、硫酸镁、硝酸镁中的一种或几种。

5. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征是：所述的进行预氧化的时间为 2 ～ 20 分钟。

6. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征是：所述的铁盐与亚铁盐的摩尔数比为 0.25:1 ≤摩尔数比≤ 0.5:1。

7. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征是：所述的预氧化剂选自高锰酸钾、高锰酸钠、次氯酸钠、次氯酸钙、臭氧和二氧化氯中的一种或几种。

8. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征是：所述的有机物主要包括类蛋白质、糖、脂、微囊藻毒素和嗅味物质。

9. 根据权利要求 1、2 或 6 所述的方法，其特征是：所述的亚铁盐选自氯化亚铁、硫酸亚铁、硝酸亚铁、聚合氯化亚铁、聚合硫酸亚铁和聚合硝酸亚铁中的一种或几种。

10. 根据权利要求 1、2 或 6 所述的方法，其特征是：所述的铁盐选自氯化铁、硫酸铁、硝酸铁、聚合氯化铁、聚合硫酸铁和聚合硝酸铁中的一种或几种。

预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法

技术领域

[0001] 本发明属于饮用水处理技术领域，特别涉及预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法。

背景技术

[0002] 湖泊、水库等是常用地表水源。例如，我国北京、上海、哈尔滨、环太湖城市群、黄河沿线城市等均以湖泊或水库水作为地表水源。但是，由于氮、磷等营养源的排放，导致许多具备饮用水源地功能的湖泊、水库等呈现不同程度的富营养化趋势，并可能在环境条件适宜的条件下导致藻类爆发，成为影响水厂处理工艺过程和饮用水质安全的重要隐患。近年来，我国发生多起饮用水源地藻类爆发的现象，给城市正常供水带来负面影响。

[0003] 含藻水或高藻水对饮用水处理工艺、饮用水质安全的不利影响主要表现为：1）藻细胞为电负性，不易于通过混凝脱稳，尤其对于存活藻细胞，更是难以通过混凝、沉淀单元去除，可能导致藻细胞在反应池、沉淀池、滤池等构筑物中繁殖，并可能穿透滤池的过滤膜进入输配水管网；2）穿透滤池的过滤膜的藻细胞可能在输配水管网的配水管、入户管、二次供水设施等中进一步繁殖生长，这将消耗管网末端的余氯，并导致微生物繁殖和感官下降等不利影响；3）预氧化工艺将藻细胞灭活，这对于混凝过程是有利的，但是预氧化或消毒工艺也可能将细胞壁结构破坏，并导致胞内物质释放，可能产生更大的水质风险。而适度预氧化一方面灭活藻细胞，一方面避免胞内有机物的过度释放，从而避免了胞外有机物浓度过高或分子量过小给混凝带来的负面影响。研究显示，藻细胞内部的藻毒素、致嗅物质等物质的浓度远远高于胞外的情况；此外，胞内物质往往具有很高的消毒副产物（DBPs）生成势，并在氯化过程中生成DBPs。因此，对于含藻水的处理而言，如何在不破坏藻细胞结构的前提下强化除藻并控制胞内代谢物释放，这将成为饮用水厂面临的技术难题之一。

[0004] 国内外关于强化除藻的方法报导较多，主要有：1）采用氯、臭氧、高铁酸钾、高锰酸钾等进行预氧化；2）提高混凝剂投量或投加高分子助凝剂；3）投加粘土矿物等强化藻的沉降；4）采用混凝／气浮工艺或混凝／气浮－沉淀工艺；5）采用超滤膜过滤技术截留藻细胞等。其中，氯、臭氧、高铁酸钾均可能导致藻细胞破裂和胞内物质大量释放，且臭氧、高铁酸钾成本很高；高锰酸钾具有一定灭活和抑制藻细胞活动的能力且氧化破坏藻细胞壁能力较弱，此外其还原产物二氧化锰能沉积在藻细胞表面而加速其沉降，但由于高锰酸钾有颜色，投量不宜过高，且二氧化锰为电负性细小颗粒也需要一并去除。提高混凝剂投量能够提高藻细胞去除，但往往投量需要提高数倍以上，且污泥含量显著增加。投加粘土矿物往往也需要很高投量，且粘土本身为胶体，将大幅提高混凝剂投量。气浮或浮沉池工艺是最佳的除藻工艺，但绝大多数水厂都不具备相关构筑物，而要进行工程改造，则需要花费大量投资。采用膜分离技术则不仅需要大量投资，且运行成本更高。因此，如何以现有工艺为基础，在不进行或难以及时进行大规模工艺改造的条件下，解决高藻水处理难题或有效应对突发性藻类爆发导致的水质问题，具有重要应用价值。

[0005] 因此，开发高效、成本低廉、使用方便且可同时达到高效去除藻细胞和控制胞内有

机物释放目标的预氧化－混凝方法，这是目前研究与工程应用中亟需解决的难点问题。本案发明人针对该问题，并考虑到亚铁的氧化比较缓慢，导致原提出的 $KMnO_4$-Fe(II) 工艺出水中铁浓度较高的问题，因此，本案发明人对原提出的 $KMnO_4$-Fe(II) 工艺进行改进，用铁盐替换一部分亚铁盐，也即本发明所论述的一种预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法。

发明内容

[0006] 本发明的目的是针对作为饮用水源的高藻水，提供一种性能高效、经济可行、易于在工程中大规模应用的一种预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法；该预氧化－混凝方法可同时达到高效去除藻细胞和控制胞内有机物释放的目标。

[0007] 本发明的预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法的技术原理在于：先使用常用的预氧化剂（选自高锰酸钾、高锰酸钠、次氯酸钠、次氯酸钙、臭氧和二氧化氯等中的一种或几种）对含藻水进行预氧化，以灭活藻细胞。在灭活藻细胞的过程中，藻细胞的活动性降低，藻细胞的表面形态发生改变，藻细胞内的有机物（包括微囊藻毒素）释放至水体中；再向经过预氧化的含藻水中投加亚铁盐和铁盐等，在避免含藻水过度预氧化的同时，为反应体系持续提供作为混凝剂的新生态三价铁及铁盐。经过上述过程处理后的藻细胞及由藻细胞内释放出的有机物经过混凝、过滤从水中去除。本发明的方法能有效去除饮用水源（包括河流、湖泊、水库、地下水等水体）中的藻细胞和由藻细胞内释放出的有机物。

[0008] 本发明的预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法包括以下步骤：

[0009] （1）将预氧化剂的水溶液与含藻水混合，对含藻水进行预氧化（一般进行预氧化的时间为 2 ～ 20 分钟），以灭活藻细胞，其中预氧化剂与藻细胞的比例为 0.5 ～ 5×10^3 毫克的预氧化剂：10^8 ～ 5×10^9 个藻细胞；在灭活藻细胞的同时藻细胞内的有机物释放至水体中；

[0010] （2）向步骤（1）经过预氧化的含藻水中投加亚铁盐的水溶液和铁盐的水溶液，还原多余的预氧化剂，终止预氧化，以控制藻细胞内的有机物的继续释放，同时亚铁盐氧化生成的新生态三价铁及铁盐作为混凝剂共同发挥混凝作用，其中铁盐与亚铁盐的摩尔数比为 0< 摩尔数比≤ 1:1（优选铁盐与亚铁盐的摩尔数比为 0.25:1 ≤摩尔数比≤ 0.5:1）；经预氧化的藻细胞的混凝得到强化，通过沉降、过滤去除水中的藻细胞及由藻细胞内释放出的有机物，得到藻细胞及有机物含量显著降低的水。过滤水达到生活饮用水卫生标准。

[0011] 所述的亚铁盐与预氧化的含藻水中的藻细胞的比例为 2 ～ 20 毫克的亚铁盐（以亚铁计）：10^8 ～ 5×10^9 个藻细胞。

[0012] 所述的预氧化剂选自高锰酸钾、高锰酸钠、次氯酸钠、次氯酸钙、臭氧和二氧化氯等中的一种或几种。

[0013] 所述的有机物主要包括类蛋白质、糖类、脂类、微囊藻毒素和嗅味物质等。

[0014] 本发明中亚铁盐的加入不仅终止了藻细胞内的有机物的继续释放，还避免了已释放出的有机物的分子量由于被预氧化剂降解而变小。本发明所述的混凝剂为新生态三价铁及铁盐，其中，新生态三价铁是由亚铁盐通过预氧化剂、溶解氧等氧化而持续原位生成。

[0015] 本发明的方法中可进一步在加入亚铁盐的水溶液和加入铁盐的水溶液的含藻水

中加入钙盐的水溶液、镁盐的水溶液或它们的混合物；其中：钙盐的摩尔数与亚铁盐的摩尔数的比为 0 ～ 1:1，镁盐的摩尔数与亚铁盐的摩尔数的比为 0 ～ 1:1（优选钙盐与亚铁盐的摩尔数比为 0.1:1 ≤摩尔数比≤ 0.5:1，优选镁盐与亚铁盐的摩尔数比为 0.1:1 ≤摩尔数比≤ 0.5:1，）。钙离子、镁离子带正电，能够桥接带负电的藻细胞，增加藻细胞的表面电位，使絮体更容易脱稳，从而促进絮凝、沉降除藻。

[0016] 所述的亚铁盐可选自氯化亚铁、硫酸亚铁、硝酸亚铁、聚合氯化亚铁、聚合硫酸亚铁和聚合硝酸亚铁等中的一种或几种。

[0017] 所述的铁盐可选自氯化铁、硫酸铁、硝酸铁、聚合氯化铁、聚合硫酸铁和聚合硝酸铁等中的一种或几种。

[0018] 所述的钙盐可选自氯化钙、硫酸钙和硝酸钙中的一种或几种。

[0019] 所述的镁盐可选自氯化镁、硫酸镁、硝酸镁中的一种或几种。

[0020] 本发明针对湖泊、水库等地表水源富营养化污染，提出了一种依次投加预氧化剂与亚铁盐和铁盐等的方法，预氧化剂灭活藻细胞，而亚铁盐终止预氧化，以控制藻细胞内的有机物的继续释放，同时亚铁盐氧化生成的新生态三价铁及铁盐作为混凝剂；经预氧化的藻细胞的混凝得到强化。本发明主要应用于饮用水厂净化，也可应用于以景观水体回用为目标的景观水处理以及富营养化水体的水源预处理以抑制藻细胞生长。

[0021] 在应用本发明的预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法时，在现有的处理水厂的一级泵站的取水口，或一级泵站的出水管至水厂混合单元之前的任意两个可投加液体药剂的位置，先后设置预氧化剂、亚铁盐和铁盐等的加药口，药液投加之后设置一个混合器，之后进入沉淀单元、介质过滤单元进行过滤。

[0022] 本发明的预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法，适用于去除饮用水源中多种程度的藻华，对于常规工艺难以处理的高藻水也有良好的处理效果，藻细胞去除率能达到 85 ～ 100%。

[0023] 本发明的预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法，所用的化学试剂为水处理中常用的净水药剂或净水材料，方法简单，成本低廉，使用操作简便。本发明涉及的预氧化 - 混凝方法具有优异的除藻性能，仅需在预氧化一段较短时间后，向含藻水中加入亚铁盐的水溶液和铁盐的水溶液等，操作过程简单，易于实现。

[0024] 本发明的预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法通过界面氧化、吸附、表面络合、螯合、吸附、共沉降、架桥、卷扫等多种途径实现，多种作用机制协同，从而具有良好的除藻效果。

[0025] 本发明的预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法仅需将预氧化剂和亚铁盐和铁盐等先后投加含藻水中，之后进行充分混合、沉降与过滤即可，工程施工操作过程简单。

[0026] 本发明的预氧化强化藻细胞混凝并控制藻细胞内有机物释放的方法除了去除水中藻细胞之外，还可以用于混凝去除水中的溶解性有机物。

具体实施方式

[0027] 实施例 1.

[0028] 某水厂水源地发生富营养化污染，藻细胞浓度达到 10 万个 /ml，原水浊度为 15

NTU，水厂采用的絮凝剂为聚合氯化铝。水源未发生富营养化污染时，絮凝剂的投量为15mg/L即可达到良好去除效果，滤池的过滤周期为24小时。但是，水源发生上述富营养化污染后，絮凝剂的投量增加至25mg/L，处理效果仍不理想，表现为沉后水、滤后水浊度升高，沉后水的藻细胞的去除率仅为80%，滤池的过滤周期缩短至22小时。

[0029] 采用本发明的方法对上述发生富营养化污染的水源进行强化除藻：

[0030] 1）将高锰酸钾、硫酸亚铁和硫酸铁分别与水混合，在充分搅拌下溶解，分别获得高锰酸钾的水溶液、硫酸亚铁的水溶液和硫酸铁的水溶液；

[0031] 2）将步骤1）得到的高锰酸钾的水溶液通过水厂的一级泵站的取水口投加至发生富营养化污染的含藻水中，其中高锰酸钾的投量与藻细胞的比例为1.0mg高锰酸钾：10^8个藻细胞，对含藻水进行预氧化2～20分钟，通过高锰酸钾的氧化作用抑制藻细胞的活动，以灭活藻细胞，且反应生成的新生态MnO_2极细小颗粒沉积在藻细胞的表面以提高藻细胞表面的电位；在灭活藻细胞的同时藻细胞内的有机物（包括类蛋白质、糖类、脂类、微囊藻毒素和嗅味物质等）释放至水体中；

[0032] 3）通过混凝池的进水口向步骤2）经过预氧化的含藻水中投加步骤1）得到的硫酸亚铁的水溶液和硫酸铁的水溶液并混合均匀，硫酸亚铁还原多余的高锰酸钾并终止预氧化，以控制藻细胞内的有机物的继续释放，同时硫酸亚铁氧化持续生成的新生态三价铁（Fe(III)）与硫酸铁作为混凝剂共同发挥混凝作用，其中硫酸亚铁和硫酸铁的投量分别为1.6mg/L和0.4mg/L（分别以亚铁、铁计），即硫酸亚铁与预氧化的含藻水中的藻细胞的比例为1.6mg硫酸亚铁（以亚铁计）：10^8个藻细胞，且硫酸铁与硫酸亚铁的摩尔数比为1:4；经预氧化的藻细胞的混凝得到强化，藻细胞在混凝单元发生凝聚絮凝作用，通过进一步在沉淀、过滤单元中去除水中的藻细胞及由藻细胞内释放出的有机物（包括类蛋白质、糖类、脂类、微囊藻毒素和嗅味物质等），得到藻细胞及有机物含量显著降低的水。沉后水中的藻细胞的去除率显著提高至98%，滤池的过滤周期延长至24小时。过滤水达到生活饮用水卫生标准。

[0033] 实施例2

[0034] 某水厂水源地发生富营养化污染，藻细胞浓度达到100万个/ml，原水浊度为40NTU，水厂采用的絮凝剂为硫酸铝。水源未发生富营养化污染时，絮凝剂的投量为20mg/L（以铝计）即可达到良好去除效果，滤池的过滤周期为24小时。但是，水源发生上述富营养化污染后，絮凝剂的投量增加至30mg/L，处理效果仍不理想，表现为沉后水、滤后水浊度升高，沉后水的藻细胞去除率仅为70%，滤池的过滤周期缩短至18小时。

[0035] 采用本发明的方法对上述发生富营养化污染的水源进行强化除藻：

[0036] 1）将次氯酸钙和氯化镁与水混合，在充分搅拌下溶解，获得次氯酸钙和氯化镁的混合水溶液，其中次氯酸钙与氯化镁的摩尔数比为1:25；将氯化亚铁和硫酸铁分别与水混合，在充分搅拌下溶解，分别获得氯化亚铁的水溶液和硫酸铁的水溶液；

[0037] 2）将步骤1）得到的次氯酸钙和氯化镁的混合水溶液通过水厂的一级泵站的取水口投加至发生富营养化污染的含藻水中，其中混合水溶液的投加量是以次氯酸钙的投量计，次氯酸钙与藻细胞的比例为3mg次氯酸钙（以氯计）：10^9个藻细胞，对含藻水进行预氧化2～20分钟，通过次氯酸钙的氧化作用抑制藻细胞的活动，以灭活藻细胞；在灭活藻细胞的同时藻细胞内的有机物（包括类蛋白质、糖类、脂类、微囊藻毒素和嗅味物质等）释放至水体中；

[0038] 3）通过混凝池的进水口向步骤 2）经过预氧化的含藻水中投加步骤 1）得到的氯化亚铁的水溶液和硫酸铁的水溶液并混合均匀，氯化亚铁还原多余的次氯酸钙并终止预氧化，以控制藻细胞内的有机物的继续释放，同时氯化亚铁氧化持续生成的新生态三价铁（Fe(III)）与硫酸铁作为混凝剂共同发挥混凝作用，其中氯化亚铁和硫酸铁的投量分别为 8mg/L 和 4mg/L（分别以亚铁、铁计），即氯化亚铁与预氧化的含藻水中的藻细胞的比例为 8mg 氯化亚铁（以亚铁计）：10^9 个藻细胞，且硫酸铁与氯化亚铁的摩尔数比为 1:2；经预氧化的藻细胞的混凝得到强化，藻细胞在混凝单元发生凝聚絮凝作用，通过进一步在沉淀、过滤单元中去除水中的藻细胞及由藻细胞内释放出的有机物（包括类蛋白质、糖类、脂类、微囊藻毒素和嗅味物质等），而镁离子桥接带负电的藻细胞及由藻细胞内释放出的有机物（包括类蛋白质、糖类、脂类、微囊藻毒素和嗅味物质等），促进其混凝沉降，得到藻细胞及有机物含量显著降低的水。沉后水中的藻细胞的去除率显著提高至 95%，滤池的过滤周期延长至 24 小时。过滤水达到生活饮用水卫生标准。

[0039] 实施例 3

[0040] 某水厂水源地发生富营养化污染，藻细胞浓度达到 500 万个 /ml，原水浊度为 200 NTU，水厂采用的絮凝剂为聚合氯化铝。水源未发生富营养化污染时，絮凝剂的投量为 25mg/L（以铝计）即可达到良好去除效果，滤池的过滤周期为 24 小时。但是，水源发生上述富营养化污染后，絮凝剂的投量增加至 50mg/L，处理效果仍不理想，表现为沉后水、滤后水浊度升高，沉后水的藻细胞去除率仅为 40%，滤池的过滤周期缩短至 15 小时。

[0041] 采用本发明的方法对上述发生富营养化污染的水源进行强化除藻：

[0042] 1）将臭氧与水混合，在充分搅拌下溶解，获得臭氧的水溶液；将聚合硫酸亚铁和氯化钙与水混合，在充分搅拌下溶解，获得聚合硫酸亚铁和氯化钙的混合水溶液，其中聚合硫酸亚铁与氯化钙的摩尔数的比为 4:1；将硫酸铁与水混合，在充分搅拌下溶解，获得硫酸铁的水溶液；

[0043] 2）将步骤 1）得到的臭氧的水溶液通过水厂的一级泵站的取水口投加至发生富营养化污染的含藻水中，其中臭氧的投加量为臭氧与藻细胞的比例为 1.2mg 臭氧：5×10^9 个藻细胞，对含藻水进行预氧化 2 ～ 20 分钟，通过臭氧的氧化作用抑制藻细胞的活动，以灭活藻细胞；在灭活藻细胞的同时藻细胞内的有机物（包括类蛋白质、糖类、脂类、微囊藻毒素和嗅味物质等）释放至水体中；

[0044] 3）通过混凝池的进水口向步骤 2）经过预氧化的含藻水中投加步骤 1）得到的聚合硫酸亚铁与氯化钙的混合水溶液和硫酸铁的水溶液并混合均匀，聚合硫酸亚铁还原多余的臭氧并终止预氧化，以控制藻细胞内的有机物的继续释放，同时聚合硫酸亚铁氧化持续生成的新生态三价铁（Fe(III)）与硫酸铁作为混凝剂共同发挥混凝作用，其中聚合硫酸亚铁和硫酸铁的投量分别为 16mg/L 和 4mg/L（分别以亚铁、铁计），即聚合硫酸亚铁与预氧化的含藻水中的藻细胞的比例为 16mg 聚合硫酸亚铁（以亚铁计）：5×10^9 个藻细胞，且硫酸铁与聚合硫酸亚铁的摩尔数比为 1:4（分别以铁、亚铁计）；经预氧化的藻细胞的混凝得到强化，藻细胞在混凝单元发生凝聚絮凝作用，通过进一步在沉淀、过滤单元中去除水中的藻细胞及由藻细胞内释放出的有机物（包括类蛋白质、糖类、脂类、微囊藻毒素和嗅味物质等），而钙离子桥接带负电的藻细胞及由藻细胞内释放出的有机物，促进其混凝沉降，得到藻细胞及有机物含量显著降低的水。沉后水中的藻细胞的去除率显著提高至 95%，滤池的过滤周

期延长至 23 小时。过滤水达到生活饮用水卫生标准。