

# 纤维直接过滤去除原水藻类

余国忠<sup>1</sup> 李灵芝<sup>2</sup> 赵明云<sup>3</sup> 王占生<sup>1</sup>

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 河南省平顶山师专化学系, 平顶山 467000;

3. 北京市自来水公司第九水厂, 北京 100027)

**摘要** 以丙纶丝为滤料, 以自制转鼓装置对高藻原水进行直接过滤除藻试验。结果表明, 对 Chl-a 及藻总数的去除率分别为 64%—95% (平均 91%) 和 82%—96% (平均 92%), 对主要藻种的平均去除率均在 85% 以上, 除藻效果明显。原水中藻类特征、试验运行工况条件直接影响对藻类的去除效果。筛分截留与吸附-絮凝是试验装置过滤除藻的主要机理。

**关键词** 丙纶丝 直接过滤 富营养化原水 藻类

## Study on the algae removal from raw water by direct fiber filtration

Yu Guozhong<sup>1</sup> Li Lingzhi<sup>2</sup> Zhao Mingyun<sup>3</sup> Wang Zhansheng<sup>1</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Department of Chemistry, Pingdingshan Teachers' College, Henan, Pingdingshan 467000;

3. Beijing Water Supplies Cooperation, Beijing 100027)

**Abstract** This paper presented the effects of a pilot scale experiment on algae removal by direct filtration apparatus consisted of a drum on which polypropylene fiber silk was fixed. Under certain operating conditions, the removal rates of total algae number, Chl-a, Diatom, Green algae, Blue-green algae, Flagellate algae ranged between 64%—95% (averagely 91%) and 82%—96%, (averagely 92%) respectively. Main algae species were more than 85% removal from raw water. The effects of algae removal by the apparatus were affected by both of the algae characteristics in raw water and operating conditions including the hydraulic loading, way and intensity of backwash, and the drum rotating speed. Micro-sieving and adsorption-flocculation of the filter bed to algae were the main removal mechanisms.

**Key words** polypropylene fiber; direct filtration; eutrophic raw water; algae

水体中的藻类过度繁殖给自来水厂运行管理造成沉重负担, 高藻原水的净化一直是人们研究的重要课题, 并开发了预氧化、微滤、气浮(DAF)、高梯度磁力分离(HGMS)和强化常规工艺等净水技术。但这些净水技术往往伴生一些问题, 如含藻水的化学预氧化会产生消毒副产物及增加可生物同化有机碳(AOC), 导致饮用水的化学风险和微生物风险, 生物预氧化除藻效率低<sup>[1]</sup>; 微滤机除藻率一般低于90%, 且易堵塞<sup>[2]</sup>; 实验室中 DAF 除藻率可达99.9%<sup>[3]</sup>, 但在实际应用中常难达到90%<sup>[1,2]</sup>; HGMS 技术成本高、种磁剂回收难<sup>[4,5]</sup>的问题长期没能彻底解决。总之, 高藻原水除藻技术仍是研究的热点问题。

目前纤维过滤已被广泛地应用于工业水处理中<sup>[6]</sup>, 其应用领域仍在不断拓展<sup>[7,8]</sup>。本试验尝试

应用纤维丝做滤料, 设计加工一转鼓过滤试验装置, 探索薄层纤维丝滤床直接过滤去除原水藻类的效果、影响因素及其除藻机理。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料与工艺流程

试验装置为钢结构, 尺寸为 600 mm × 300 mm × 700 mm, 内置直径 206 mm 转鼓, 转鼓一端连接驱动电机; 滤料为  $\phi 16.7 \mu\text{m}$  丙纶丝, 将其加工成一定结构, 按照一定方式装填在转鼓表面使滤床厚度为 20 mm、初始孔隙率  $\epsilon_0 = 0.6$ 。滤床反冲洗排水槽设于装置上部, 试验工艺流程见图 1。

收稿日期: 2002-06-01; 修订日期: 2002-11-18

作者简介: 余国忠(1966~), 男, 博士, 河南省信阳师范学院副教授, 主要从事水处理理论与技术研究。

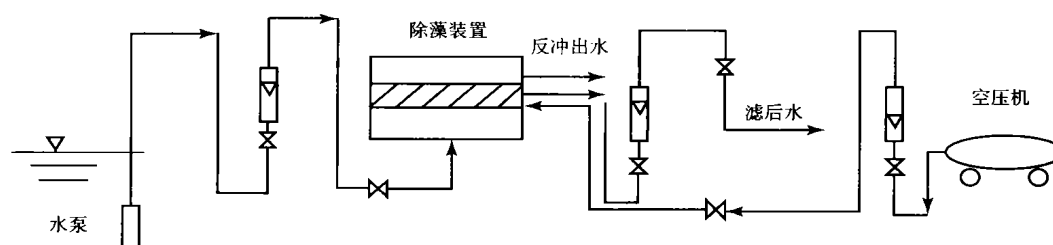


图1 纤维过滤除藻试验工艺流程

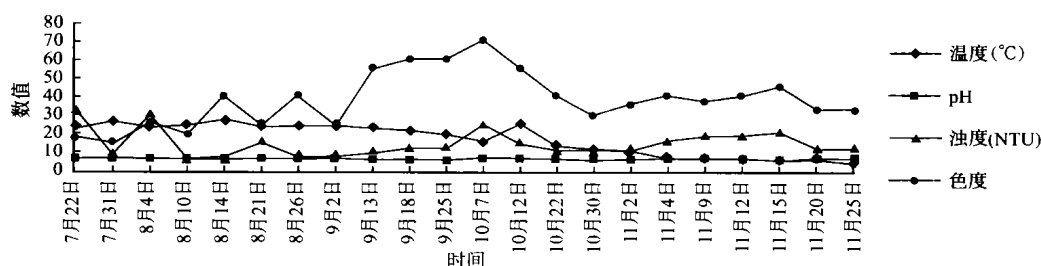


图2 试验期间原水水质变化

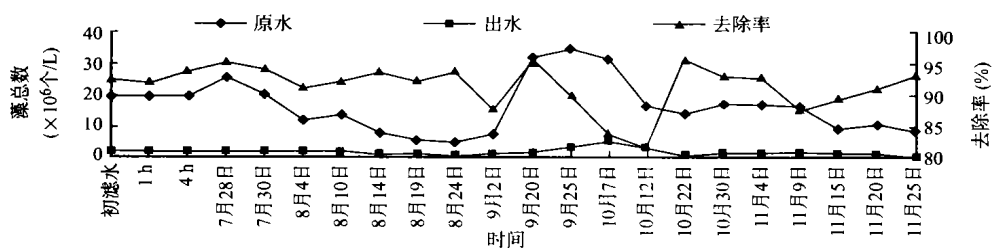


图3 原水藻总数去除效果

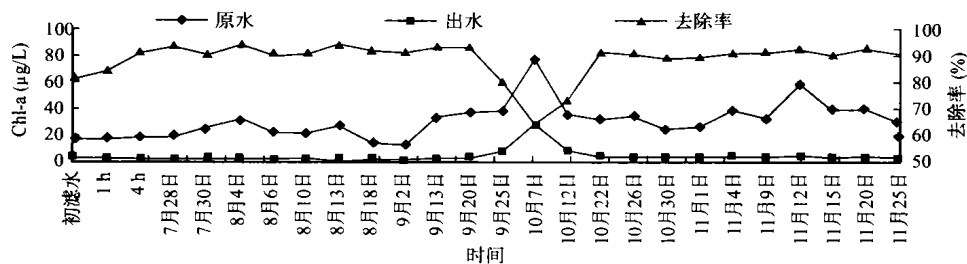


图4 原水 Chl-a 去除效果

原水经泵抽到试验装置中,在压力作用下经过纤维滤层进入转鼓,从转鼓一端流出。随转鼓转动,转鼓表面滤床被分为过滤区和反冲洗区两部分,面积比为 5:1。试验装置运行方式为连续过滤、连续反冲洗。压缩空气反洗装置布于转鼓内,反洗用水为转鼓内的压力水。过滤水量为  $1.68 \text{ m}^3/\text{h}$ ,水力负荷为  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ,用气水联合连续反冲洗,气冲强度为  $4.63 \text{ L}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,水冲强度为  $1.85 \text{ L}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ,反冲洗用水量为  $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ ,占过滤水量的 5.9%。原

水不经加药处理,直接进入试验装置进行过滤。试验于 2001 年 7—12 月进行。

## 1.2 试验水质

原水取自北京某地表水体,水质特征如图 2 所示,原水藻总数、叶绿素 a(Chl-a)范围分别在  $5 \times 10^6$ — $35 \times 10^6$  个/L、 $10$ — $76 \mu\text{g}/\text{L}$  之间,处于富营养—重富营养化状态。原水藻总数和 Chl-a 的变化分别见图 3 和图 4。按文献<sup>[9]</sup>分类,原水藻类构成见表 1。

表 1 试验对原水藻类的去除效果

| 藻种   | 去除率(%) | 藻种   | 去除率(%) | 藻种   | 去除率(%) | 藻种   | 去除率(%) |
|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|
| 硅藻   | 79—98  | 绿藻   | 82—99  | 蓝藻   | 83—99  | 鞭毛藻  | 95—99  |
| 小环藻* | >73    | 栅裂藻* | >87    | 蓝纤维* | >86    | 隐藻*  | 负值—>90 |
| 舟形藻* | >77    | 小球藻* | >66    | 蓝球藻* | 50—90  | 裸藻*  | 23—96  |
| 脆杆藻* | >86    | 盘星藻  | >95    | 席藻   | >98    | 多甲藻  | 76—97  |
| 针杆藻* | >88    | 四角藻* | >70    | 腔球藻  | 43—88  | 钟罩藻* | >94    |
| 冠盘藻  | >89    | 绿球藻* | 76—85  | 螺旋藻  | >95    | 肾形藻  | 33—98  |
| 平板藻* | >97    | 顶棘藻  | >95    | 林氏藻  | >95    | 十字藻* | 20—80  |
| 直链藻* | >91    | 多芒藻  | >95    | 平裂藻* | >63    | 卵形藻  | >90    |
| 星杆藻  | >95    | 微芒藻  | >97    | 鱼腥藻* | >78    | 胶囊藻* | >95    |
| 曲舟藻  | >95    | 鼓藻   | >80    |      |        |      |        |

\* 原水中的主要藻种

### 1.3 藻类生物量的检测与分析

藻类生物量用 Chl-a 和藻类计数表示。用三色光法测定叶绿素 a, 在光学显微镜下检测藻类个体。取原水、滤后水分析比较试验装置对藻类生物量的去除效果。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 对藻类的去除效果

#### 2.1.1 对 Chl-a 和藻总数的去除

图 3 和图 4 分别是对原水藻总数和 Chl-a 的去除结果。可以看出, 对藻总数的去除率为 82%—96% (平均为 92%), 对 Chl-a 去除率为 64%—95% (平均为 91%), 试验装置对原水藻类去除效果比较显著。并且, 藻总数的去除率与 Chl-a 的去除率之间存在一定的相关性, 相关系数  $R = 0.7233$ 。

#### 2.1.2 对原水中主要藻种的去除

原水中主要藻种的数量均在  $10^6$  个/L 数量级或以上, 试验装置对原水藻种的去除结果见表 1, 可以看出, 对绝大部分藻种都能比较显著地去除。试验期间在原水中没有发现铜绿微囊藻 (*M. aeruginosa*) 这一我国富营养化水体中较为常见的蓝藻, 试验装置对其去除效果如何, 尚需进一步实验确定。

### 2.2 藻类去除效果的影响因素分析

在滤床结构一定的情况下, 试验装置对藻类的去除效果主要取决于原水水质与运行工况条件。

#### 2.2.1 原水水质

原水水质因素包括水温、pH 值、浊度、有机物含

量及原水中藻类特征等, 其中藻类特征包括藻类的种类构成及其构成种类的特征——藻种的形态、大小、表面状况及表面的荷电特征等。结合图 1、图 3 和图 4, 不难看出, 在设定的运行条件下, 试验装置对原水温度、pH、浊度、色度等水质条件变化的适应性较强, 藻类的去除效果不因水质波动而发生较大变化。但水质变化依然对藻类的去除效果产生了影响, 主要表现在原水藻类构成变化对除藻效果的影响。从表 1 可以发现, 对于通常个体较大的藻类, 如针杆藻、冠盘藻、平板藻、直链藻、星杆藻、栅裂藻、蓝纤维藻、席藻、林氏藻、螺旋藻和钟罩藻等的去除比较显著; 对断面形态呈圆形及近圆形、个体形态较小的藻类, 如小环藻、肾形藻、绿球藻、小球藻、蓝球藻、腔球藻、多甲藻、十字藻、隐藻和裸藻等的去除率变化较大; 藻细胞表面比较光滑的舟形藻的去除率也有波动, 对表面有附属物的顶棘藻、多芒藻及微芒藻等去除效果较好; 藻细胞个体和藻丝段之间联系紧密性与牢固程度较弱的无定型藻类, 如平裂藻、鱼腥藻等的去除率也呈现出较大幅度的波动。因此, 当这些去除率波动较大的藻类在原水中占的比例较大时, 应减小水力负荷, 以提高去除效果。

#### 2.2.2 运行工况

运行工况因素包括水力负荷、转鼓转速及反冲洗的方式与强度。试验发现, 由于滤床较薄, 滤床所承受的水力负荷有限, 当水力负荷增加到  $11 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  时, 原水 Chl-a 的去除率较之图 2 中的相应去除率降低 5%—10% 左右。

表 2 原水、滤后水和反冲排水中颗粒粒径( $\mu\text{m}$ )分布与体积含量(%)对比\*

|                                   | 原 水    | 滤 后 水              | 反 冲 洗 排 水 |
|-----------------------------------|--------|--------------------|-----------|
| 体积浓度(%)                           | 0.0023 | 0.0003             | 0.0031    |
| $d_p \leq 4.88$ 体积含量(%)           | 21.76  | 38.99              | 16.48     |
| 体积浓度(%)                           | 0.05   | 0.012              | 0.051     |
| $4.88 < d_p \leq 16.57$ 体积含量(%)   | 42.67  | 22.46              | 37.95     |
| 体积浓度(%)                           | 0.098  | 0.007              | 0.118     |
| $16.57 < d_p \leq 88.91$ 体积含量(%)  | 28.90  | 18.14              | 29.63     |
| 体积浓度(%)                           | 0.066  | 0.005              | 0.092     |
| $88.91 < d_p \leq 258.95$ 体积含量(%) | 6.67   | 20.40              | 2.91      |
| 体积浓度(%)                           | 0.015  | 0.006              | 0.009     |
| $d_p > 258.95$ 体积含量(%)            | 0      | 0.01               | 13.03     |
| 体积浓度(%)                           | 0      | $3 \times 10^{-6}$ | 0.04      |
| $1.95 < d_p \leq 190.8$ 体积含量(%)   | 98.50  | 93.00              | 84.62     |
| 体积浓度(%)                           | 0.227  | 0.0279             | 0.2623    |

\*  $d_p$  为颗粒物等效粒径。各粒径范围的体积浓度等于表中体积浓度与体积百分含量之积;表中反冲洗排水与原水数值差别不大是由于反冲洗面积比过滤面积小与反冲洗比较频繁的结果。

随转鼓转动,滤床在过滤和被反冲洗之间发生角色变化,转鼓转速因影响滤床被反洗时间长短而影响除藻效果,试验结果表明,试验装置适宜的转鼓转速应 $<0.515 \text{ cm/s}$ 。

因本试验设计的滤床较薄,与厚层纤维滤床相比,对反冲洗方式有不同的要求,需要连续的气、水联合反冲洗,但气、水的反洗强度均大大低于厚层间歇式纤维丝滤床(滤床深度一般超过 700 mm)的反洗强度,分别不到厚层滤床反冲洗强度的 1/8 和 1/5<sup>[7]</sup>。试验发现,当维持水冲强度不变,将气冲强度提高一倍时,藻类的去除率不仅没有提高,反而有所降低,这是因为大气量不仅易将滤床整体托起,从而使气体不能充分发挥对纤维丝的振动、分割和搓磨作用,事实上使气体的反洗功能失效,而且气量较大也使反冲洗排水槽中水的流态发生了不利于藻类排除出试验装置的变化,一部分被冲洗出的藻类又可重新回落到滤床的表面,在过滤时,易被水流剪力裹挟发生穿透而降低去除效果。

### 3 纤维丝滤床的除藻机理

由于水中藻类是以颗粒形态存在,所以可借助分析水中颗粒杂质的方法来研究纤维丝滤床对藻类的去除机理,通过对比进、出水中颗粒杂质的粒径分布可以反映出过滤工艺的过滤精度及其对颗粒杂质的去除机理。淡水藻类的粒径分布通常在 2—200

$\mu\text{m}$  之间,藻类在富营养化原水中的数量往往较高,因此,在显微镜下直接测定各种藻类的粒径分布难度较大,本文探讨通过测定、比较进水和出水中颗粒杂质的粒径分布来间接反映纤维丝滤床对藻类的去除机理。

表 2 为用 Malvern Mastersizer 激光粒度分析仪(Malvern Instruments Ltd, UK)对原水、滤后水及反冲洗排水中颗粒粒径分布与体积含量的对比分析。可见,滤后水中  $16.57 \mu\text{m} < d_p \leq 258.95 \mu\text{m}$  颗粒杂质的体积浓度明显比原水低,说明滤床对该粒径范围颗粒杂质的分离效果显著,若与丙纶丝径相联系,不难看出,这部分颗粒杂质的去除主要是滤床的筛分截留(micro-sieving 或 micro-screening)效应的结果;滤后水中  $d_p \leq 16.57 \mu\text{m}$  颗粒的体积含量仍为 61.45%,仅比原水相应的体积含量 64.43% 低 2.98%,说明筛分效应对于该粒径范围颗粒杂质的去除效果有限,但在体积浓度上, $d_p \leq 16.57 \mu\text{m}$  的颗粒在滤后水和原水中分别为 0.00019% 和 0.00148%,二者相差很大,说明除筛分机制外,尚存在其他机制,在本试验条件下,显然是滤料对颗粒杂质及被截留颗粒杂质之间的吸附絮凝作用。滤床对原水中  $d_p \leq 4.88 \mu\text{m}$  的颗粒杂质分离效果差,这与镜检发现滤后水中  $d_p \leq 5 \mu\text{m}$  的藻类通常在 85% 以上的结果比较吻合,从体积浓度看,滤后水中这一粒径范围的颗粒与原水相比仍有明显差异,说明该范

围的部分杂质是由于易被滤床吸附而被去除的。 $>258.95\ \mu\text{m}$ 的颗粒杂质在原水中不存在,而滤后水及反冲洗排水中均存在,这是颗粒杂质之间吸附絮凝的结果,与手工制作滤料的不均匀性有关。

当然,滤床截留颗粒杂质后,滤床结构发生了变化,其去除颗粒杂质的筛分与吸附絮凝机制只具有相对性。

比较表 2 中的原水、滤后水与反冲洗排水中 $1.95\ \mu\text{m} < d_p \leq 190.8\ \mu\text{m}$ (与淡水藻类粒径分布大体一致)颗粒杂质的体积浓度发现,滤后水比原水低近 90%,这与试验条件下对藻总数平均去除率(92%)很接近,表明粒度分析技术对水中颗粒杂质分布的分析可间接地用于分析水中藻类的粒径分布。

根据粒度分析结果,可以认为机械筛分和吸附絮凝是纤维丝滤床直接过滤分离去除藻类的主要机理。粒径 $<4.88\ \mu\text{m}$ 的藻类是以吸附-絮凝去除为主, $4.88\ \mu\text{m} \leq d_p \leq 16.57\ \mu\text{m}$ 的藻类是筛分与吸附絮凝共同作用的结果,粒径 $>16.57\ \mu\text{m}$ 的藻类主要通过筛分机制去除。

#### 4 结 论

(1)在设定的试验条件下,试验装置对原水藻类的去除效果比较显著。

(2)在设定的滤床结构条件下,藻类特征、水力负荷、转鼓转速及反冲洗方式和强度均影响试验装置的除藻效果。

(3)纤维丝滤床对原水中藻类的机械筛分和吸附-絮凝是试验装置直接过滤除藻的主要机制。气水联合连续反冲洗是试验装置维持比较稳定除藻效果的重要因素。

#### 参 考 文 献

- [1] 周建平,许建华,杨再高等. 梅梁湖原水除藻工艺研究. 中国给水排水, 1997, 23(11): 22—24
- [2] 陈培康,裴本昌. 给水净化新技术. 北京:学术书刊出版社, 1990, 194—196
- [3] Edzwald J. K. Principles and applications of dissolved air flotation. Wat. Sci. Tech., 1995, 31(3—4): 1—23
- [4] Yadidia R., et al. Algae removal by high gradient magnetic filtration. Enviro. Sci. Tech., 1977, 11(9): 913—916
- [5] 常州市自来水公司. 高梯度磁分离处理试验. 中国给水排水, 1980, (3): 41—42
- [6] 张锡辉. 纤维球过滤机理的研究 [博士学位论文]. 北京:清华大学环境科学与工程系, 1991
- [7] 杨云霞. 纤维球滤料的表面防油改性及其处理油田采出水的研究 [博士学位论文]. 北京:清华大学环境科学与工程系, 2001
- [8] 游文书, 杨日光. 纤维束滤料在给水处理池中的生产试验. 给水排水, 2001, 27(2): 27—30
- [9] Palmer M. Algae and water pollution: the identification, significance and control of algae in water supplies and in polluted water. Castle House Publications LTD, (U. K.), 1980, 98—110

(责任编辑:刘 颖)