

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.027

# 改性植物单宁对铜绿微囊藻的去除效果与机理

於昌峰<sup>1</sup>, 顾扣泉<sup>1</sup>, 周 涛<sup>1</sup>, 孙家兴<sup>1</sup>, 杨梓俊<sup>2,3</sup>, 侯 俊<sup>2,3</sup>

(1. 江苏煤炭地质勘探三队, 江苏 常州 213017;

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;

3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**研究了改性植物单宁(Tanfloc)絮凝对铜绿微囊藻的去除效果、影响因素及机理。10 mg/L的Tanfloc投加量下,10 min内即可获得94%的高去除率,而当投加量进一步增加时,去除率反而略有下降。Tanfloc具有较宽的初始pH值适用范围,在酸性条件和弱碱性条件下(pH值不大于9.0),藻去除率均超过90%;而在强碱性条件下(pH值不小于10.0),藻去除率逐渐下降。Tanfloc在高藻细胞密度(大于 $4.87 \times 10^9$ 个/L)下可以获得大于95%的高除藻效果。水体pH值会影响除藻机理,pH值为5.5、8.0和9.5时,电中和、静电簇和架桥作用分别是除藻的主要影响因素。

**关键词:**改性植物单宁;铜绿微囊藻;絮凝;pH值;除藻机理

**中图分类号:**X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0197-06

**Removal effect and mechanism of modified tannin on *Microcystis aeruginosa*** // YU Changfeng<sup>1</sup>, GU Kouquan<sup>1</sup>, ZHOU Tao<sup>1</sup>, SUN Jiaying<sup>1</sup>, YANG Zijun<sup>2,3</sup>, HOU Jun<sup>2,3</sup> (1. Jiangsu Geological Prospecting Team Three, Changzhou 213017, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The effect, influencing factors and mechanism of modified tannin (Tanfloc) flocculation to remove *Microcystis aeruginosa* were studied. At the dosage of 10 mg/L Tanfloc, a high algae removal rate of 94% can be obtained within 10 minutes, but when the dosage is further increased, the removal rate decreases slightly. Tanfloc has a wide application range of initial pH value. Under acidic and weakly alkaline conditions (pH value not greater than 9.0), the algae removal rate exceeds 90%. Under strong alkaline conditions (pH value is not less than 10.0), the algae removal efficiency decreases gradually. Tanfloc in high algal cell density (greater than  $4.87 \times 10^9$  cell/L) can obtain a high algae removal rate more than 95%. The pH value of water will affect the algae removal mechanism. When the pH values are 5.5, 8.0 and 9.5 respectively, electric neutralization, electrostatic cluster and bridging effect are the main influencing factors of algae removal.

**Key words:** modified tannin; *Microcystis aeruginosa*; flocculation; pH value; removal mechanism

蓝藻水华在全球众多国家和地区暴发,有害蓝藻的大量繁殖会影响水体颜色、气味,细胞破裂后释放的藻毒素和蛋白质等藻类有机物还会对人体及水生动植物产生不利影响<sup>[1-5]</sup>。絮凝法是治理蓝藻水华的重要应急手段<sup>[6-7]</sup>,然而,目前普遍使用的传统絮凝材料均存在不同的优缺点:无机絮凝剂价格便宜,但铁盐类无机絮凝剂(如硫酸铁、聚合硫酸铁)

储存和稀释稳定性差,容易产生氢氧化物沉淀,且残留的铁离子有一定的色度,影响水质;铝盐无机絮凝剂(如硫酸铝、聚合氯化铝)残留的铝元素会威胁人体健康<sup>[8-9]</sup>;黏土矿物类絮凝剂来源广泛、绿色环保,可就地取材,但其投加量高、产生污泥过多<sup>[10]</sup>;人工合成高分子絮凝剂(如聚丙烯酰胺)絮凝效果好且性质稳定,但其难以生物降解,合成单体会对水

基金项目:中煤长江地质集团(江苏煤炭地质局)科研专项资金(2020-II-4);国家自然科学基金(51722902,51979075)

作者简介:於昌峰(1986—),男,高级工程师,硕士,主要从事水环境治理与水文地质研究。E-mail: ycf88888@163.com

通信作者:侯俊(1979—),男,教授,博士,主要从事水环境保护与生态修复研究。E-mail: hjy\_hj@hhu.edu.cn

生生物产生毒性作用,可能对生态系统会造成二次污染。而且,上述絮凝材料的絮凝处理效果容易受水体环境变化的影响,极大地限制了絮凝处理技术在蓝藻水华治理中的推广应用。

近些年,来源广泛、成本低廉、可生物降解、无二次污染的高效天然絮凝剂越来越受到关注。植物单宁又名植物多酚,是植物体复杂酚类的次生代谢产物。自然界中植物单宁的储量非常丰富,主要存在于植物的皮、根、叶和果肉中,是仅次于纤维素、木质素、半纤维素的第四大林副产品。由于植物单宁的等电点较低(pH 值为 2.0~3.0),而藻细胞表面通常呈负电性,所以通常需要进行化学改性才能用于高藻浓度水体的处理。通过曼尼希反应将氨基引入到植物单宁的化学结构,可合成具有黄酮类结构的改性植物单宁(Tanfloc)。改性之后植物单宁的等电点明显增加(pH 值为 7.0~8.0),絮凝能力显著提高,在生活污水、染料废水和黑臭水体的处理中取得了很好的效果,表现出高效易处理、适用处理范围广、天然环保可降解、无毒无害无二次污染的特点。目前 Tanfloc 絮凝处理高藻浓度水体的相关研究较少,同时尚未见 Tanfloc 除藻机理的相关研究。本文选取一种常见的水华优势藻种——铜绿微囊藻作为试验藻种,探索 Tanfloc 絮凝去除铜绿微囊藻的效果,考察投加量、初始 pH 值和藻细胞密度对絮凝效果的影响,进一步结合絮凝前后藻液 Zeta 电位变化,阐明 Tanfloc 除藻机理。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

铜绿微囊藻 FACHB-905 购于中国科学院淡水藻种库(武汉,中国)。在 BG-11 培养基中培养藻液,培养条件为:温度设为(25±1)℃,光照强度设为 2000 lx,光照黑暗比为 12 h:12 h。培养 12 d 后,取处于对数期的藻细胞作为试验用藻。

Tanfloc 购于尚澄(北京)环保科技有限公司。试验中向去离子水中溶解一定量 Tanfloc 并使用磁力搅拌器在 200 rpm 转速下搅拌 30 min 得到 1 g/L 的 Tanfloc 储备液。

### 1.2 絮凝试验设计

取对数期藻液,将其在 4000 r/min 下离心 5 min 后,弃去上清液,并用 NaCl 溶液再悬浮成一定浓度的藻悬液。絮凝试验在六联搅拌器(ZR4-6,深圳市中润水工业技术发展有限公司,中国)中进行,向 600 mL 烧杯中加入 500 mL 藻悬液,絮凝试验前用 0.1 mol/L 的 NaOH 和 HCl 调节 pH 值,在液面下 2 cm 处取上清液,使用浮游荧光仪(Heinz Walz

GmbH,德国)测定初始叶绿素 a 的质量浓度。设定搅拌参数为:200 r/min 快速搅拌 1 min,加入不同投加量的 Tanfloc,200 r/min 快速搅拌 1 min,50 r/min 慢速搅拌 20 min 后,静置并开始计时,于液面下 2 cm 处逐时(0 min、2 min、5 min、10 min、20 min、30 min、60 min)取样,再利用浮游荧光仪测定叶绿素 a 的质量浓度。使用英国马尔文仪器有限公司(Zetasizer Nano ZSP 测定絮凝前后上清液的 Zeta 电位及水力学粒径。藻细胞去除率计算方法<sup>[11-12]</sup>为

$$R_E = \frac{\rho_0 - \rho_i}{\rho_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $R_E$ 为藻细胞去除率,%; $\rho_0$ 为叶绿素 a 的初始质量浓度, $\mu\text{g/L}$ ; $\rho_i$ 为絮凝后不同时间上清液中叶绿素 a 的质量浓度, $\mu\text{g/L}$ 。

试验过程中,用 Tanfloc 储备液将投加量梯度设置为:0 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L。在初始 pH 值为 8.0、藻细胞密度为  $5.86 \times 10^9$  个/L、藻细胞去除率达到 90% 时,需要的最低投加量为 Tanfloc 絮凝铜绿微囊藻的最佳投加量<sup>[13]</sup>。使用 0.1 mol/L NaOH 和 HCl 调节藻悬液的初始 pH 值,其变化范围为 5.0~10.0,在最佳投加量、藻细胞密度为  $5.86 \times 10^9$  个/L 的条件下,研究初始 pH 值对絮凝过程的影响。采获对数期藻细胞并配成不同藻细胞密度的藻液,藻细胞密度梯度设置为  $0.81 \times 10^9$  个/L、 $3.11 \times 10^9$  个/L、 $4.87 \times 10^9$  个/L、 $5.86 \times 10^9$  个/L、 $7.70 \times 10^9$  个/L、 $10.38 \times 10^9$  个/L,在最佳投加量、初始 pH 值为 8.0 的条件下,研究藻细胞密度对絮凝过程的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 投加量的影响

图 1 为不同投加量下藻细胞去除率随沉降时间变化。可以看出,10 mg/L 的投加量下,Tanfloc 对藻细胞的去除率高达 94%,这体现了 Tanfloc 的高效性,即在低投加量下就可获得较好的去除效果。Barrado-Moreno 等<sup>[14]</sup>考察了 Tanfloc 对铜绿微囊藻、蛋白核小球藻、四尾栅藻和卵胞藻的去除效果,结果表明 10 mg/L 的投加量下,Tanfloc 对 4 种藻的去除率均高于 90%。因此,使用 10 mg/L 作为初始投加量以开展后面的试验。随着投加量的增加(20 mg/L、30 mg/L、50 mg/L),藻细胞去除率一直保持较高的水平,即均大于 95%。这可能是由于适量正电性 Tanfloc 的投加可以有效中和藻细胞表面的负电荷,破坏藻细胞的分散稳定性,引起藻细胞团聚并形成含藻絮体,在重力作用下沉降。但当投加量进一步增加后(100 mg/L),藻细胞去除率下降到

63.84%，原因可能是过量投加后，不能被中和的正电性 Tanfloc 在藻液中积累，静电排斥作用使藻液再稳定，影响了去除效果<sup>[15]</sup>。

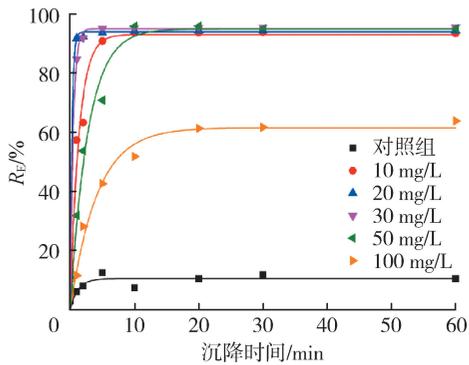


图1 不同投加量下藻细胞去除率随沉降时间变化

Fig.1 changes of algal removal rate with sedimentation time under different dosage

## 2.2 初始 pH 值的影响

初始 pH 值是絮凝除藻过程的重要影响因素，图 2 为不同初始 pH 值下藻细胞去除率的变化。可以看出，絮凝除藻过程明显受初始 pH 值的影响，在酸性和中性条件下，Tanfloc 对藻细胞均有很好的絮凝去除效果。在 pH 值为 5.0 时，藻细胞去除率为 70.67%；pH 值为 7.0 时，藻细胞去除率高达 95.27%。在碱性条件下，絮凝效果有所不同，弱碱性条件下，Tanfloc 表现出较好的絮凝效果，但在强碱性条件下，絮凝效果明显下降。pH 值为 8.0 时，藻细胞去除率为 93.29%，而 pH 值增加到 10.0 时，去除率只有不到 11%。这可能是由不同水体 pH 值引起 Tanfloc 表面电荷的差异所致。如图 3 所示，Tanfloc 的零电势点在 pH 值为 8.1 左右，而在较宽的 pH 值范围内，藻细胞表面都呈现负电性。因此，酸性和中性条件下，由于水体 pH 值低于零电势点，此时 Tanfloc 的表面呈现正电性，Tanfloc 可以在静电引力的作用下大量结合负电性的藻细胞；而在强碱性条件下，水体 pH 值远高于零电势点，导致 Tanfloc 表面带负电荷，由于静电斥力，Tanfloc 难以结合藻细胞，引起藻细胞去除率的下降。Wang 等<sup>[16]</sup>研究了 Q-TN 对铜绿微囊藻的去除效果，结果发现 pH 值为 6.0 时，藻细胞去除率高达 97%，而当 pH 值增加到 9.0 后，相同投加量下藻细胞去除率快速降到不足 10%，分析 pH 值对 Zeta 电位的影响发现，pH 值为 6.0 时，Q-TN 的 Zeta 电位为 +19.4 mV，而 pH 值为 9.0 时，Zeta 电位变为负值。这与本研究的情况类似。

本研究中，虽然水体 pH 值为 9.0 时略高于零电势点，但藻细胞去除率仍高于 90%，这可能是 Tanfloc 的分子量较高的原因。当水体 pH 值略高于零电势时，Tanfloc 表面负电荷的电荷量较小，

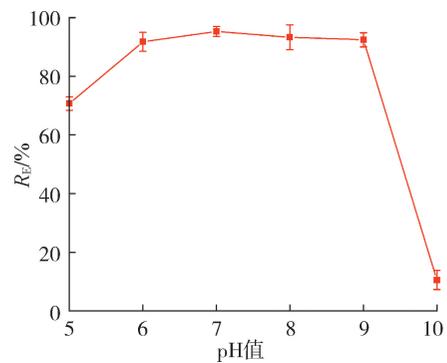


图2 不同初始 pH 值下的藻细胞去除率

Fig.2 Algal removal rate at different initial pH values

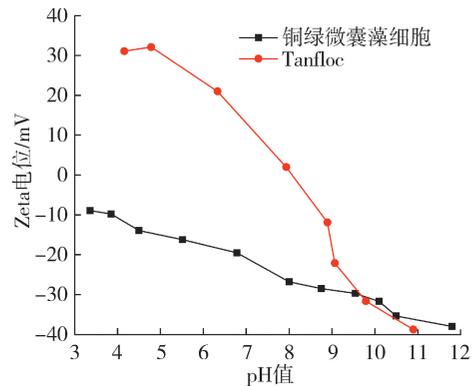


图3 不同 pH 值下 Tanfloc 及铜绿微囊藻细胞的 Zeta 电位

Fig.3 Zeta potential of Tanfloc and *Microcystis aeruginosa* cells at different pH values

Tanfloc 与藻细胞间的排斥作用较小，同时由于 Tanfloc 是一种天然大分子絮凝剂，其可以通过架桥作用絮凝去除藻细胞。此时，架桥作用强于静电排斥作用，可以抵消静电斥力对絮凝过程的不利影响，所以在 pH 值为 9.0 时 Tanfloc 仍有较好的絮凝表现。太湖等天然湖泊水华暴发时的水体 pH 值为 7.5~9.3<sup>[15]</sup>，可见，Tanfloc 的高效除藻区间 (pH 值为 5.0~9.0) 能够满足实际湖泊的 pH 值使用要求，Tanfloc 可以用于天然湖泊蓝藻水华的应急处理。

## 2.3 藻细胞密度的影响

图 4 为不同藻细胞密度下藻细胞去除率的变化情况。可以看出，在较低的藻细胞密度 ( $0.81 \times 10^9$  个/L) 下，获得了较低的藻细胞去除率 (68%)。随着藻细胞密度的增加，去除率先明显增加随后保持不变，当藻细胞密度小于  $4.87 \times 10^9$  个/L，藻细胞去除率和藻细胞密度呈线性关系。当藻细胞密度为  $4.87 \times 10^9$  个/L 时，去除率超过了 90%；进一步增加到  $10.38 \times 10^9$  个/L 时，去除率高达 95%。原因可能是低藻细胞密度下，Tanfloc 相对过量，进入水体后大量包覆在藻细胞表面，藻液在静电斥力的作用下呈稳定状态，导致此时去除率较低。随着藻细胞密度的增加，更多的藻细胞可以去中和 Tanfloc 表面的

正电荷,导致去除率的提高。进一步地,藻细胞数量相对较多时,架桥作用可以使 Tanfloc 结合更多数量的藻细胞,所以藻去除率没有明显下降。

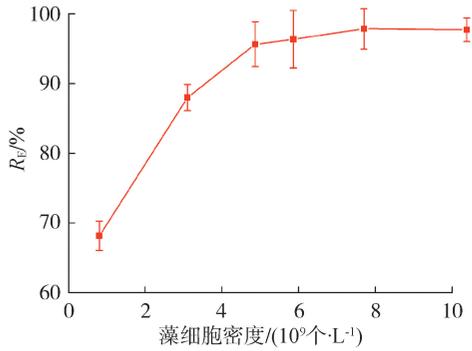


图4 不同藻细胞密度下的藻细胞去除率

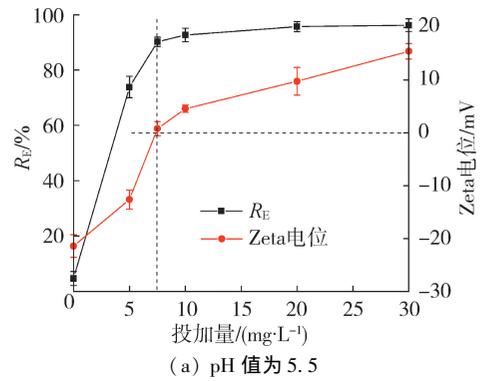
Fig. 4 Algal removal rate at different cell densities

Barrado-Moreno 等<sup>[14]</sup>研究了藻细胞密度对 Tanfloc 絮凝去除卵胞藻、蛋白核小球藻、铜绿微囊藻和四尾栅藻的影响,结果表明卵胞藻细胞质量浓度由 5 μg/L 增加到 60 μg/L 时,其去除率也由 20% 左右明显增加到接近 80%;其他 3 种藻细胞质量浓度由 3 μg/L 增加到 20 μg/L 时,其去除率分别由 50%、30% 和 30% 增加到 90% 以上,藻细胞质量浓度进一步增加到 80 μg/L,去除率保持不变。这一结论与本研究类似,因此, Tanfloc 更适用于处理较高藻细胞密度的水体,而蓝藻水华暴发时藻细胞密度大约为 10<sup>6</sup> ~ 10<sup>7</sup> 个/L<sup>[17]</sup>,可以使用 Tanfloc 进行应急处理。

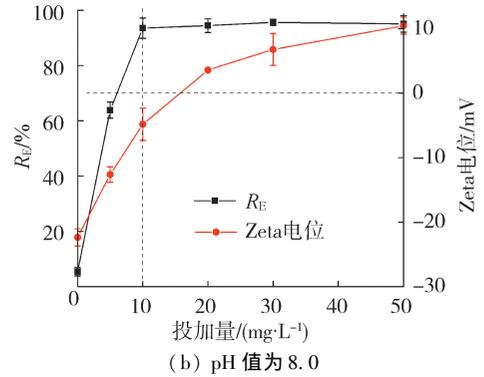
#### 2.4 絮凝机理

研究表明 pH 值会影响絮凝除藻的机制,即在不同的 pH 值条件下,絮凝除藻的机理可能不同。为了研究 Tanfloc 絮凝除藻的主要作用方式,考察了不同 pH 值条件下藻细胞去除率和 Zeta 电位随投加量的变化(图 5)。另外,由于 Tanfloc 的分子链也会影响絮凝除藻的表现和机制,同时研究了 Tanfloc 的流体动力学半径随 pH 值的变化(图 6)。

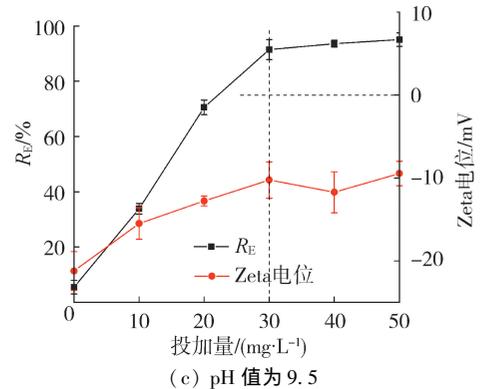
由图 5 可见,在 pH 值为 5.5 时,由于静电排斥作用,正电性的 Tanfloc 的流体动力学半径较大,导致 Tanfloc 分子链完全伸展。此时 Tanfloc 完全舒展的分子链和表面大量的正电荷都有助于藻细胞的去除<sup>[17]</sup>。可以看到,最佳投加量对应的 Zeta 电位正好接近零电势点,而 Tanfloc 过量投加后 Zeta 电位发生反转,这表明电中和是酸性水体中 Tanfloc 的主要除藻机制。絮凝过程中,在静电作用下舒展的 Tanfloc 分子链与负电性藻细胞相互靠近, Tanfloc 逐渐中和藻细胞的负电荷并附着在表面。当藻细胞表面被完全覆盖后达到静电平衡状态,此时失稳的藻细胞发生聚集形成较大絮体沉降下来。在 pH 值为 8.0 时,



(a) pH 值为 5.5



(b) pH 值为 8.0



(c) pH 值为 9.5

图5 不同 pH 值条件下藻细胞去除率和 Zeta 电位随投加量的变化

Fig. 5 Changes of algal removal rate and Zeta potential with dosage at different pH values

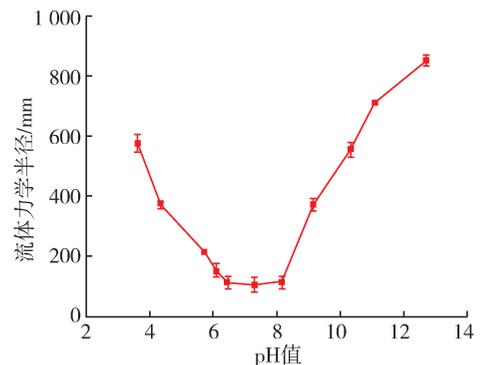


图6 不同 pH 值条件下 Tanfloc 的流体动力学半径

Fig. 6 Hydrodynamic radius of Tanfloc at different pH values

此时 pH 值接近 Tanfloc 的零电势点, Tanfloc 分子链间几乎没有排斥作用, 容易发生卷曲缠绕, 导致流体力学半径下降。另外, 此时 Tanfloc 残留的正电荷驱使其向负电性藻细胞靠近, 并黏附在藻细胞表面, 最后 Tanfloc 在藻细胞表面不均匀附着, 这导致藻细胞表面正电区和负电区共存, 随后不同藻细胞间的正负电区在静电作用下相互靠近发生聚集沉降。进一步地, 该条件下最佳投加量对应的 Zeta 电位略小于 0, 过量投加后发生反转, 表明静电簇作用是此时絮凝除藻的主要机制。在 pH 值为 9.5 时, Tanfloc 表面负电荷明显增加, 受排斥作用影响, Tanfloc 分子链的流体力学半径增加, 结构完全伸展。但是, 此时 Tanfloc 和藻细胞的表面均为负电性, 由于静电排斥作用, 藻细胞去除率略有下降, 最佳投加量明显增加。进一步地, 最佳投加量对应的 Zeta 电位远小于 0, 过量投加后并没有发生反转, 这是由于水体中正电荷不足, 但絮凝表现没有明显下降, 这可以由架桥作用来解释。水力搅拌驱使藻细胞通过范德华力和氢键吸附到 Tanfloc 分子链上, Tanfloc 在藻细胞间起到架桥作用达到除藻的效果, 而静电排斥作用不足以抵消这种作用。但是由于 Tanfloc 的分子量有限, 在架桥作用为主要絮凝机理的碱性水体中, 除藻效果有所下降。

Wang 等<sup>[16]</sup>研究了胺甲基化和季铵盐化两种 Tanfloc 的絮凝除藻机制, 结果表明, 电中和作用不是唯一机理, 架桥作用也发挥着重要作用, 这与本研究结果类似。整体上看, 当水体 pH 值较低时, Tanfloc 表面的高正电性促使其与负电性藻细胞发生快速的电中和; 随着水体 pH 值的增加, Tanfloc 表面的正电性有所下降, 与藻细胞之间的静电作用也有所减弱; 当水体 pH 值进一步增加, 超过 Tanfloc 的零电势点后, 静电吸引变为静电排斥, 静电作用反而阻碍絮凝的发生, 此时架桥作用逐渐从次要作用变为主要作用。因此, 絮凝过程是静电作用与架桥作用共同影响的结果。

### 3 结 论

a. 10 mg/L 的低投加量下, Tanfloc 即可获得 94% 的高藻细胞去除率, 随着投加量的进一步增加, 藻去除率反而略有下降。

b. Tanfloc 在较宽的初始 pH 值范围内均可高效除藻。在酸性条件下和弱碱性条件下 (pH 值不大于 9.0), Tanfloc 可以高效絮凝去除铜绿微囊藻细胞, 这使得 Tanfloc 适用于天然湖泊水华暴发时的水体处理 (水体 pH 值为 7.1 ~ 9.3); 而在强碱性条件下 (pH 值不小于 10.0), 藻去除率明显下降。

c. 藻细胞密度会影响藻细胞去除效果。Tanfloc 在高藻细胞密度 (大于  $4.87 \times 10^9$  个/L) 下可以获得更好的除藻效果。

d. pH 值会影响絮凝除藻机理, pH 值为 5.5、8.0 和 9.5 时, 电中和、静电簇和架桥作用分别是主要的絮凝除藻机制。

### 参考文献:

- [ 1 ] CHA Y K, CHO K H, LEE H, et al. The relative importance of water temperature and residence time in predicting cyanobacteria abundance in regulated rivers [J]. *Water Research*, 2017, 124: 11-19.
- [ 2 ] XIONG W, TANG Y, SHAO C, et al. Prevention of cyanobacterial blooms using nano-silica: a biomineralization-inspired strategy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(21): 12717-12725.
- [ 3 ] 任梦甜, 陈荣, 雷振, 等. 铜绿微囊藻增殖与产毒过程中的氮磷限制与主控因子研究 [J]. *水资源保护*, 2019, 35(5): 102-107. (REN Mengtian, CHEN Rong, LEI Zhen, et al. Nitrogen and phosphorus restriction and main controlling factors in proliferation and toxicity production of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(5): 102-107. (in Chinese))
- [ 4 ] 王举, 陈荣, 陈静, 等. 铁在不同磷源条件下对铜绿微囊藻生长与产毒的影响 [J]. *水资源保护*, 2019, 35(1): 87-94. (WANG Ju, CHEN Rong, CHEN Jing, et al. Effect of iron on growth and toxicity in production of *Microcystis aeruginosa* under different phosphorus sources [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(1): 87-94. (in Chinese))
- [ 5 ] 倪利晓, 陈春明, 马艳艳. 镉胁迫对铜绿微囊藻的抑制作用及营养盐浓度对其的减缓效应 [J]. *水资源保护*, 2017, 33(6): 96-101. (NI Lixiao, CHEN Chunming, MA Yanyan. Inhibitory effects of cadmium stress on *Microcystis aeruginosa* and the alleviation effects of nutrient concentrations [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(6): 96-101. (in Chinese))
- [ 6 ] LU X Q, CHEN Z, YANG X. Spectroscopic study of aluminium speciation in removing humic substances by Al coagulation [J]. *Water Research*, 1999, 33(15): 3271-3280.
- [ 7 ] SENGCO M R, ANDERSON D M. Controlling harmful algal blooms through clay flocculation [J]. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 2004, 51(2): 169-172.
- [ 8 ] 宋力. 絮凝剂在水处理中的应用与展望 [J]. *工业水处理*, 2010, 30(6): 4-7. (SONG Li. Application of flocculants to water treatment and its forecast [J]. *Industrial Water Treatment*, 2010, 30(6): 4-7. (in Chinese))
- [ 9 ] YANG Z, YAN H, YANG H, et al. Flocculation performance and mechanism of graphene oxide for removal

- of various contaminants from water[J]. Water Research, 2013, 47(9):3037-3046.
- [10] 郑怀礼,刘克万. 无机高分子复合絮凝剂的研究进展及发展趋势[J]. 水处理技术, 2004, 30(6):315-319. (ZHENG Huaili, LIU Kewan. Research progress and development trend of inorganic polymer composite flocculants[J]. Echnology of Water Treatment, 2004, 30(6):315-319. (in Chinese))
- [11] PAN G, ZHANG M M, CHEN H, et al. Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils. I. Equilibrium and kinetic screening on the flocculation of *Microcystis aeruginosa* using commercially available clays and minerals[J]. Environmental Pollution, 2006, 141(2): 195-200.
- [12] ZOU H, PAN, G, CHEN, H, et al. Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils II. Effective removal of *Microcystis aeruginosa* using local soils and sediments modified by chitosan [J]. Environmental Pollution, 2006, 141(2):201-205.
- [13] HOU J, YANG Z, WANG P, et al. Changes in *Microcystis aeruginosa* cell integrity and variation in microcystin-LR and proteins during Tanfloc flocculation and floc storage [J]. Science of the Total Environment, 2018, 626: 264-273.
- [14] BARRADO-MORENO M M, BELTRAN-HEREDIA J, MARTIN-GALLARDO J. Microalgal removal with natural coagulants[J]. Phycologia, 2016, 55(6):688-695.
- [15] 郭文景,符志友,汪浩,等. 水华过程水质参数与浮游植物定量关系的研究:以太湖梅梁湾为例[J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1517-1525. (GUO Wenjing, FU Zhiyou, WANG Hao, et al. The quantitative relation of aquatic parameters and phytoplankton biomass in the process of algal blooms; the case of Meiliang Bay in Taihu Lake[J]. China Environmental Science, 2018, 38(4): 1517-1525. (in Chinese))
- [16] WANG D, PILLAI S C, HO S H, et al. Plasmonic-based nanomaterials for environmental remediation[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2018, 237:721-741.
- [17] ROSELET F, BURKERT J, ABERU P C. Flocculation of *Nannochloropsis oculata* using a tannin-based polymer: bench scale optimization and pilot scale reproducibility [J]. Biomass & Bioenergy, 2016, 87:55-60.
- (收稿日期:2021-02-20 编辑:王芳)

(上接第 196 页)

- [21] HAMRICK J M. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects[R]. Virginia: The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, 1992.
- [22] 余昭辉,夏建新,任华堂. 黄河甘宁蒙河段突发水污染事故预警模型[J]. 人民黄河, 2014, 36(4):37-40. (YU Zhaohui, XIA Jianxin, REN Huatang. Water pollution accident emergency response and early-warning model in Gansu-Ningxia-Inner Mongolia Section of the Yellow River [J]. Yellow River, 2014, 36(4):37-40. (in Chinese))
- [23] 易雨君,侯传莹,唐彩红. 澜沧江中游河段中国结鱼栖息地模拟[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5):82-89. (YI Yujun, HOU Chuanying, TANG Caihong. Habitat simulation of *Tor sinensis* in middle reaches of Lancang River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(5):82-89. (in Chinese))
- [24] 黄福江,马秀慧,叶超. 中国结鱼性腺发育的组织学观察[J]. 四川动物, 2013, 32(3):406-409. (HUANG Fujiang, MA Xiuhui, YE Chao. Observation on the gonadal development of *Tor sinensis*[J]. Sichuan Zoology, 2013, 32(3):406-409. (in Chinese))
- [25] CLARKE K R, WARWICK R M. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation[M]. Plymouth:PRIMER-E, 2001.
- [26] SIEN J P, HERRICKS E E. Investigating the causes of fish community change in the Dahan River(Taiwan) using an autecology matrix [J]. Hydrobiologia, 2006, 568(1): 317-330.
- [27] 曹龙智. 济南市鱼类功能群及其与水环境因子的关系[J]. 水资源保护, 2019, 35(1):79-86. (CAO Longzhi. Fish functional groups and their relationship with water environmental factors in Jinan City[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1):79-86. (in Chinese))
- [28] 郑从奇,武玮,魏杰,等. 黄河下游支流大汶河鱼类多样性及影响因子分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(6):31-38. (ZHENG Congqi, WU Wei, WEI Jie, et al. Fish diversity and its influencing factors in the Dawen River, a tributary of the lower Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):31-38. (in Chinese))
- [29] 孙嘉宁. 白鹤滩水库回水支流黑水河鱼类生境模拟研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- [30] 英晓明. 基于 IFIM 方法的河流生态环境模拟研究[D]. 南京:河海大学, 2006.
- [31] BOVEE K D. Guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology[R]. Washington, D. C.:USDI Fish and Wildlife Service, 1982.
- [32] DING Chengzhi, JIANG Xiaoming, WANG Lieen, et al. Fish assemblage responses to a low-head dam removal in the Lancang River [J]. Chinese Geographical Science, 2019, 29(1):26-36.
- (收稿日期:2020-11-10 编辑:王芳)